624
SAL
M
j.1'92
C1
PERPUS D.III F.T
UNDIP

STRUKTUR BAJA

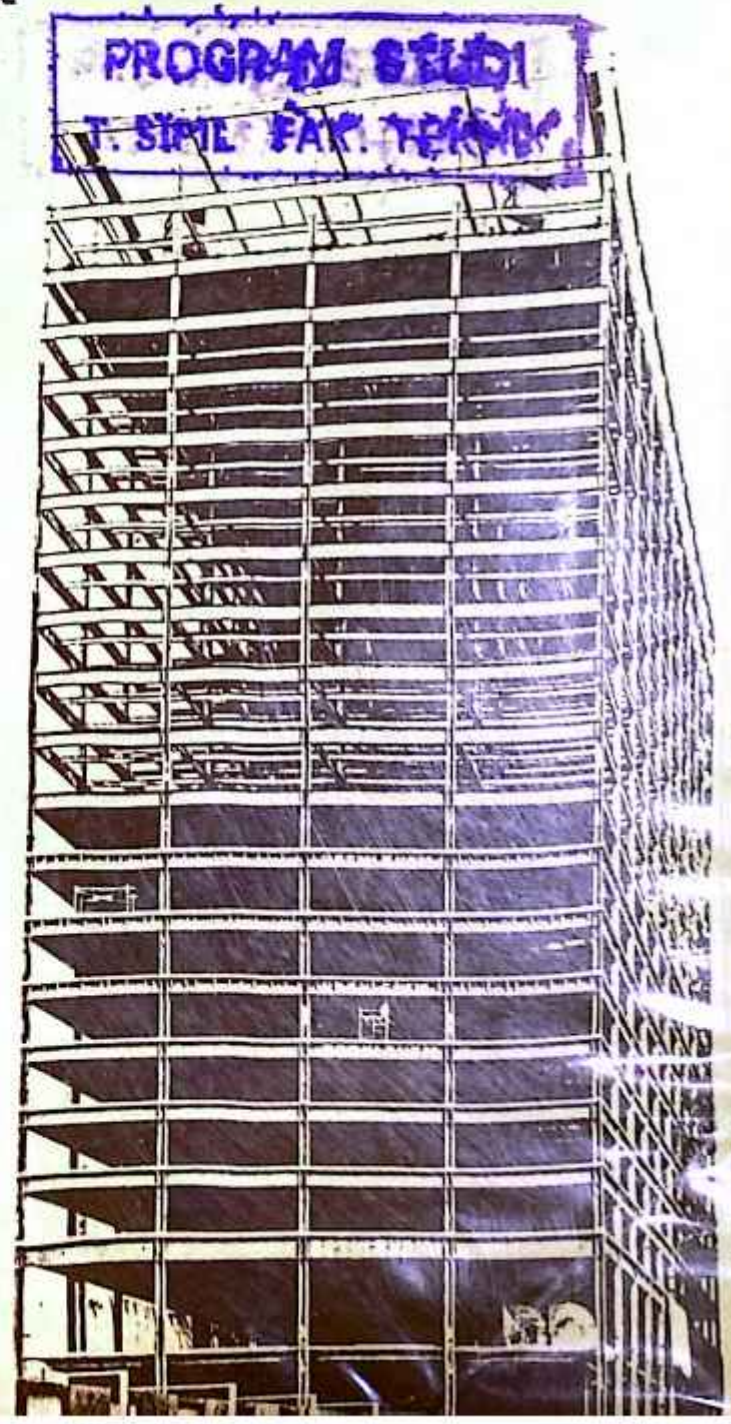
DESAIN DAN PERILAKU

CHARLES G. SALMON
JOHN E. JOHNSON

PROGRAM STUDI
T. SIPIL FAK. TEKNIK

EDISI KETIGA

DENGAN PENEKANAN PADA LOAD AND RESISTANCE FACTOR DESIGN



Struktur Baja desain dan perilaku Jilid 1 Ed 3
6710002 4
UNDIP

Dipindai dengan CamScanner

31

Struktur Baja
Desain dan Perilaku
1
Edisi ketiga

PROGRAM STUDI
. SIPIL FAK. TEKNIK

PROGRAM STUDI
D. III T. SIPIL
FAK. TEKNIK – UNDIP

PERHATIAN

Kepada peminjam buku ini diminta perhatiannya atas hal-hal sbb :

1 Agar memelihara buku ini dengan sebaik-sebaiknya dan diminta untuk :
   - Tidak mengotori
   - Tidak membuat catatan apapun didalamnya.
   - Tidak melipat lembaran lembaran halaman tersebut
2 Segera mengembalikan apabila :
   - Batas waktu pinjam habis
   - Diminta oleh petugas perpustakaan
3 Mengganti buku ini apabila hilang ,memperbaikny apabila ada kerusakan - kerusakan
4 Tidak meminjamkan buku ini kepada orang lain.
5 Mengembalikan buku ini dl keadaan sebagaimana pad waktu diterima.

Pengurus Perpustakaan

Dipindai dengan CamScanner

Sanksi Pelanggaran Pasal 44:
Undang-Undang Nomor 7 Tahun 1987 Tentang
Perubahan atas Undang-Undang Nomor 6 Tahun 1982
Tentang Hak Cipta

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 100.000.000,00 (seratus juta rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 50.000.000,00 (lima puluh juta rupiah).

PERPUSTAKAAN : D III F. TEKNIK
No. INV : 0999/p/e1
TANGGAL : 7/4 99

Dipindai dengan CamScanner

STRUKTUR BAJA
Desain dan Perilaku
1

dengan penekanan pada
Load and Resistance Factor Design

Edisi Ketiga

oleh:
Charles G. Salmon
John E. Johnson
University of Wisconsin–Madison

PROGRAM STUDI
T. SIPIL FAK. TEKNIK

Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1992

Dipindai dengan CamScanner

STEEL STRUCTURES: Design and Behavior,
Emphasizing Load and Resistance Factor Design, Third Edition
by Charles G. Salmon
John E. Johnson
Copyright © 1990 by HarperCollins, Publisher, Inc.

STRUKTUR BAJA: Desain dan perilaku 1
Edisi Ketiga
dengan penekanan pada
Load and Resistance Factor Design

Diterbitkan atas persetujuan HarperCollins Publisher Inc.
Diterjemahkan oleh: Ir. Mc. Prihminto Widodo
Pembaca ahli: Ir. Laurentius Wahyudi
GM 209 92 288
Hak Cipta terjemahan Indonesia:
Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama
Jl. Palmerah Selatan 24–26, Jakarta 10270
Desain sampul oleh: Purwono Kuntardi
Perwajahan oleh: Sofnir Ali
Diterbitkan pertama kali oleh:
PT Gramedia Pustaka Utama
Anggota IKAPI, Jakarta, 1992

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang.
Dilarang mengutip atau memperbanyak
sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Perpustakaan Nasional : Katalog Dalam Terbitan (KDT)
SALMON, Charles G.
Struktur baja: Desain dan perilaku 1 dengan penekanan pada load and resistence factor design / oleh Charles G. Salmon, John E. Johnson; diterjemahkan oleh Prihminto Widodo. — Jakarta : Gramedia Pustaka Utama, 1992.
2 jil. : ilus. ; 23 cm.

Judul asli: Steel structures : design and behavior, emphasing load and resistance factor design.
ISBN 979–511–287–2 (no. jil. lengkap)
ISBN 979–511–288–0 (jil. 1)
ISBN 979–511–289–9 (jil. 2)

1. Baja. I. Judul. II. Johnson, E.

PROGRAM STUDI
TEKNIK SIPIL

Dicetak oleh Percetakan PT Gramedia, Jakarta
Isi di luar tanggung jawab Percetakan PT Gramedia

Dipindai dengan CamScanner

DAFTAR ISI

PENGANTAR ix
KATA PENGANTAR DARI PENERBIT xiii
1 PENDAHULUAN 1

1.1 Desain Struktur 1
1.2 Prinsip-prinsip Desain 1
1.3 Latar Belakang Sejarah Struktur Baja 3
1.4 Beban-beban 4
1.5 Tipe-tipe Batang Struktur Baja 15
1.6 Struktur Baja 19
1.7 Spesifikasi dan Peraturan Bangunan 24
1.8 Filosofi Desain 26
1.9 Faktor-faktor Keamanan — Perbandingan antara ASD dan LRFD 32
1.10 Mengapa Harus Menggunakan LRFD? 38
1.11 Analisis Struktur 39
Acuan-acuan Terpilih 40

2 BAJA DAN SIFAT-SIFATNYA 44

2.1 Baja Struktur 44
2.2 Baja Penyambung 51
2.3 Elektrode Las dan Material Pengisi 53
2.4 Perilaku Tegangan — Regangan (Uji Tarik) pada Temperatur Atmosferik 54
2.5 Keuletan Bahan 56
2.6 Kekuatan Leleh untuk Keadaan-keadaan Tegangan Multiaksial 58
2.7 Perilaku Temperatur Tinggi 60
2.8 Pekerjaan Dingin dan Pengerasan Regangan 62
2.9 Retakan Getas 64
2.10 Sobekan Lembaran/Lamela 69

Dipindai dengan CamScanner

2.11 Kekuatan Letih 71
2.12 Resistensi Korosi dan Baja yang Melapuk 72
Acuan Terpilih 74

3 BATANG TARIK 78

3.1 Introduksi 78
3.2 Kekuatan Nominal 78
3.3 Luas Bersih 81
3.4 Efek Lobang-lobang Tak-segaris (Melenceng) terhadap Luas Bersih 82
3.5 Luas Bersih Efektif 86
3.6 Kegagalan Robekan pada Lobang Baut 89
3.7 Kekakuan sebagai suatu Kriteria Desain 92
3.8 Transfer Beban pada Sambungan 92
3.9 *Load and Resistance Factor Design* — Batang Tarik 94
3.10 Jangkar Tarik 102
3.11 *Allowable Stress Design* — Batang Tarik 105
Acuan Terpilih 107
Soal-soal 107

4 PENYAMBUNG STRUKTURAL 113

4.1 Tipe-tipe Penyambung 113
4.2 Latar Belakang Sejarah Baut Berkekuatan Tinggi 116
4.3 Penyebab Mengapa Keling Dianggap Ketinggalan Jaman 118
4.4 Detail Baut Berkekuatan Tinggi 119
4.5 Prosedur Pemasangan 122
4.6 Kekuatan Nominal dari Penyambung Individual 124
4.7 *Load and Resistance Factor Design* — Penyambung 131
4.8 Contoh-contoh — Sambungan Tipe Tumpu Batang Tarik — LRFD 137
4.9 Simpul Gelincir-Kritik 143
4.10 *Allowable Stress Design* - Penyambung 150
4.11 Contoh-contoh — Batang Tarik dengan *Allowable Stress Design* 154
4.12 Geser Eksentrik 156
4.13 Penyambung yang Bekerja pada Tarik Aksial 178
4.14 Kombinasi Geser dan Tarik 183
4.15 Geser dan Tarik dari Pembebanan Eksentrik 195
Acuan Terpilih 203
Soal-soal 205

5 LAS 215

5.1 Introduksi dan Sejarah Pengembangan 215
5.2 Proses-proses Dasar 217
5.3 Kemampuan Las Baja Struktur 223

Dipindai dengan CamScanner

5.4 Tipe-tipe Sambungan 224
5.5 Tipe-tipe Las 227
5.6 Simbol-simbol Las 230
5.7 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kualitas Sambungan Las 233
5.8 Kemungkinan Cacat pada Las 236
5.9 Pengawasan dan Kontrol 239
5.10 Perhitungan Ekonomi untuk Batang dan Sambungan *Built-up* 240
5.11 Pembatasan Ukuran dan Panjang Las *Fillet* 242
5.12 Luas Las Efektif 245
5.13 Kekuatan Nominal Las 247
5.14 *Load and Resistance Factor Design* — Las 259
5.15 *Allowable Stress Design* — Las 259
5.16 Las yang Menghubungkan Batang-batang yang Terkena Beban Aksial Langsung 262
5.17 Sambungan Geser Eksentrik — Analisis Kekuatan 276
5.18 Sambungan Geser Eksentrik — Analisis (Vektor) Elastik 288
5.19 Beban-beban Eksentrik terhadap Bidang Las 296
Acuan Terpilih 302
Soal-soal 304

6 BATANG TEKAN 315

Bagian I: Kolom 315

6.1 Umum 315
6.2 Tekuk Elastik Euler dan Latar Belakang Sejarah 315
6.3 Kekuatan Kolom Dasar 318
6.4* Tekuk Tak — elastik 319
6.5 Tegangan Sisa 324
6.6* Pengembangan Kurva Kekuatan Kolom yang Mencakup Tegangan Sisa 327
6.7 Kurva Kekuatan menurut *Structural Stability Research Council* (SSRC) 337
6.8 *Load and Resistance Factor Design* 342
6.9 Panjang Efektif 346
6.10 *Load and Resistance Factor Design* pada Profil-profil Tempa (W, S, dan M) yang Terkena Aksial Tekan 354
6.11 *Allowable Stress Design* 361
6.12* Efek Geser 363
6.13* Desain Batang Tersusun 366

Bagian II: Pelat 373

6.14* Introduksi Stabilitas Pelat 373
6.15* Kekuatan Pelat yang Memikul Tekanan Tepi Merata 383
6.16 Batas Lebar/Tebal λ_r AISC untuk Mencapai Tegangan Leleh tanpa Tekuk Lokal Pelat 387

Dipindai dengan CamScanner

6.17 Batas Lebar/Tebal AISC λ_p untuk Mencapai Deformasi Plastik yang Signifikan 391
6.18* Ketentuan AISC untuk Memperhitungkan Kekuatan Tekuk dan Pasca-tekuk pada Elemen Pelat 393
6.19 Desain Batang Tekan yang Dipengaruhi Provisi Tekuk Lokal 400
Acuan Terpilih 408
Soal-soal 413

7 BALOK DENGAN TUMPUAN LATERAL 420

7.1 Introduksi 420
7.2 Lentur Sederhana pada Profil Simetrik 421
7.3 Perilaku Balok yang Secara Lateral Stabil 422
7.4 Balok dengan tumpuan Lateral — *Load and Resistance Factor Design* 425
7.5 Balok dengan tumpuan Lateral — *Allowable Stress Design* 431
7.6 Defleksi 435
7.7 Geser pada Balok Tempa 444
7.8 Beban Terpusat yang Dikenakan terhadap Balok Tempa 451
7.9 Lobang-lobang pada Balok 457
7.10 Teori Lentur secara Umum 459
7.11 Lentur Biaksial pada Penampang Simetrik 467
Acuan Terpilih 472
Soal-soal 475

INDEKS 482

Dipindai dengan CamScanner

Pengantar

PROGRAM STUDI
T. SIPIL FAK. TEKNIK

Penerbitan edisi ketiga ini mencerminkan perubahan-perubahan yang terus berlangsung dalam persyaratan desain baja struktur, khususnya dengan diadopsinya spesifikasi berdasar *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) (Desain Beban dan Faktor Resistansi) secara formal oleh *American Institute of Steel Construction* (AISC). Desain batang-batang struktur baja telah berkembang selama 90 tahun, mulai dari pendekatan sederhana atas beberapa sifat dasar baja dan matematika elementer sampai ke perhitungan canggih yang menuntut pengetahuan mendalam tentang perilaku struktur dan material. Praktek desain dewasa ini memanfaatkan pengetahuan tentang mekanika material, analisis struktur, dan secara khusus, stabilitas struktur, bersama-sama dengan aturan-aturan desain demi menjamin keamanan. Yang paling luas digunakan adalah peraturan desain yang diterbitkan oleh *American Institute of Steel Construction* (AISC), dalam *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings* dan *Specification for Structural Steel Buildings — Allowable Stress Design and Plastic Design.* Dalam buku ini peraturan tersebut masing-masing diacu sebagai Spesifikasi LRFD dan ASD.

Ada peristiwa istimewa yang mendesak munculnya edisi ketiga ini, yakni terbitnya Spesifikasi LRFD 1986 (efektif 1 September, 1986) dengan Komentar; buku pegangan LRFD pasangannya, *Manual of Steel Construction — Load and Resistance Factor Design*, edisi pertama, 1986; dan Spesifikasi ASD 1989 (efektif 1 Juni, 1989) dengan Komentar; dan buku pegangan ASD pasangannya, *Manual of Steel Construction — Allowable Stress Design*, edisi kesembilan, 1989. Batang dan komponen-komponen baja yang dipilih dari buku-buku pegangan ini selanjutnya diacu sebagai Manual LRFD dan Manual ASD.

Edisi ketiga ini menganut pendekatan filosofis yang sama dengan edisi-edisi sebelumnya yang telah diterima luas oleh para Pengguna semenjak edisi pertama pada tahun 1971. Edisi ini tetap berusaha secara logis menghadirkan latar belakang yang dibutuhkan untuk mengembangkan serta menjelaskan persyaratan-persyaratan desain, khususnya yang berasal dari Spesifikasi LRFD 1986. Dimulai dengan materi latar belakang, termasuk acuan kepada riset terkait, pengembangan rumus-rumus khusus yang digunakan dalam Spesifikasi AISC disertai pula de-

Dipindai dengan CamScanner

ngan sejumlah besar contoh desain di mana secara rinci dijelaskan proses pemilihan batang-batang dengan berat minimum untuk memenuhi persyaratan yang diberikan.

Seluruh edisi ketiga ini menekankan Spesifikasi LRFD 1986. Spesifikasi ini didasarkan atas studi-studi statistik mengenai beban dan resistansi struktur baja yang terkena berbagai macam efek beban seperti momen lentur, geser, gaya aksial, dan momen puntir. Dengan pembahasan yang rasional atas beban dan resistansi, dapat kita peroleh hasil berupa struktur baja dengan keamanan yang secara keseluruhan lebih baik. Filosofi desain baru ini, yang dalam edisi kedua hanya dibahas secara singkat dalam satu bagian, diharapkan pada waktunya nanti akan menjadi bentuk pendekatan desain yang utama.

Buku ini lebih mengutamakan materi bagi para mahasiswa pemula maupun tingkat lanjut, yakni konsep-konsep stabilitas elastik dan tak elastik, yang mutlak perlu dikuasai supaya mereka dapat menerapkan aturan-aturan desain baja dengan tepat. Konsep-konsep yang sama juga dapat diterapkan untuk desain menurut Spesifikasi LRFD maupun ASD. Konsep-konsep stabilitas dijelaskan secara menyatu dengan bab-bab yang ada, sedemikian rupa sehingga Pembaca dapat mempelajarinya secara terinci, melewatinya, menangguhkan rincian tentang pengembangan, atau sekedar mengambil penjelasan kualitatifnya saja dan segera mulai mendesain.

Pada saat edisi ketiga ini disiapkan, kebanyakan desain masih dilakukan dengan *Allowable Stress Design* (Desain Tegangan Ijin) tradisional (yakni *Working Stress Design* = Desain Tegangan Kerja). Metode ini berfokus pada beban layanan (beban kerja) dan tegangan yang dihitung secara elastik dengan cara membandingkan tegangan-tegangan ini terhadap harga batas yang diijinkan. Namun, *trend* penalaran di masa mendatang hendaknya lebih mengarah kepada Spesifikasi *Load and Resistance Factor Design*. Filosofi kekuatan desain (yang terpantul dalam Spesifikasi LRFD 1986) menggunakan beban-beban layanan terfaktor serta membandingkan kekuatan yang diperoleh terhadap beban. Dalam kasus mana pun, kekuatan tergantung pada "keadaan batas", atau modus kegagalan, seperti leleh, retak, dan tekuk. "Desain plastik" tradisional, yang dalam Spesifikasi ASD tahun 1989 tercantum dalam Bab N, secara integral dirangkumkan sebagai bagian dari salah satu pasal Spesifikasi LRFD.

Dalam seluruh buku ini, telah diintegrasikan segala teori dan materi latar belakang yang akrab dengan filosofi desain LRFD maupun ASD. Meskipun demikian, pada umumnya provisi-provisi desain khusus serta contoh-contoh ilustratif tetap dibahas dalam bab-bab tersendiri, sehingga Pengguna dapat mempelajari baik *Allowable Stress Design* atau *Load and Resistance Factor Design* secara terpisah.

Edisi ketiga ini tetap menggunakan satuan SI sebagai tambahan terhadap satuan utama yang digunakan yakni Inch—Pound, walaupun sebenarnya baik LRFD atau ASD tidak menggunakan satuan SI. Rumus-rumus LRFD dan ASD memiliki ekuivalen SI-nya (oleh penulis telah disediakan konversinya) yang diberikan sebagai catatan kaki. Tabel dan diagram pada umumnya mengandung satuan Inch—Pound maupun SI.

Sejalan dengan tingkat penguasaan yang dikehendaki mahasiswa, buku ini

Dipindai dengan CamScanner

menyediakan materi untuk dua kuliah yang masing-masing terdiri dari empat kredit—jam—semester (SKS). Dianjurkan agar pada kuliah awal struktur baja untuk tingkat S1, dicakup bahan-bahan dari **Bab 1** sampai dengan **7**, **9**,, **10**, **12**, dan **16**, kecuali **Bagian6.4**, **6.6**, **6.12** sampai **6.19**, **7.9** sampai **7.11**, **9.3** sampai **9.5**, **9.8**, **9.12** sampai **9.14**, dan **12.6** sampai **12.7**. Kuliah selanjutnya hendaknya membahas lagi topik-topik yang sama dengan kuliah pertama, namun secara sekilas saja dengan lebih menekankan bahan-bahan yang belum disampaikan dalam kuliah pertama. Sebagai tambahan, bab-bab yang masih tersisa — yakni **Bab 8** mengenai puntir, **Bab 11** mengenai gelagar pelat, **Bab 13** mengenai sambungan, **Bab 14** mengenai rangka, dan **Bab 15** mengenai desain rangka — dianjurkan untuk diikutsertakan pula. Dalam kedua kuliah tersebut, tekanan hendaknya diberikan pada *Load and Resistance Factor Design.*

Dalam keseluruhan wacana, Pembaca tentunya ingin mendapatkan akses langsung ke Manual LRFD[1], khususnya pada saat mengerjakan contoh-contoh. Namun, bukan maksud buku ini agar Pembaca dapat terampil menggunakan tabel secara rutin. Tabel-tabel hanya berfungsi sebagai penuntun untuk mendapatkan pengalaman dengan variasi parameter-parameter desain serta sebagai bantuan untuk sampai kepada desain yang baik. Spesifikasi dan Komentar LRFD telah tercakup dalam Manual LRFD.

Dalam buku ini, penggunaan komputer tidak diterapkan secara spesifik. Penulis yakin bahwa prioritas tertinggi dalam perkuliahan adalah penguasaan prinsip-prinsip dasar. Meskipun demikian, boleh jadi Pembaca akan menemukan bahwa tersedianya basis data tentang sifat-sifat penampang standar, yang dapat dibeli dari AISC, akan sangat bermanfaat. Para penulis merekomendasikan penggunaan perangkat lunak lembar beber (*spreadsheet software*), seperti Lotus 1-2-3[2], bersama dengan penggunaan sifat-sifat basis data.

Keistimewaan-keistimewaan baru edisi ketiga ini adalah (1) presentasi terinci atas latar belakang dan aturan-aturan desain yang berkaitan dengan kekuatan untuk *Load and Resistance Factor Design* (LRFD = Desain beban dan faktor resistansi); (2) pembahasan terpadu atas *Load and Resistance Factor Design Specification* 1986 bersama dengan *Allowable Stress Design Specification* 1989.

Keistimewaan-keistimewaan lainnya adalah (3) pembahasan komprehensif tentang desain batang—**I** yang terkena puntiran (Bab 8), termasuk metode praktis yang disederhanakan; (4) pembahasan terinci tentang teori gelagar pelat dalam kaitannya dengan *Load and Resistance Factor Design* (Bab 11) dan contoh desain komprehensif untuk gelagar menerus dua bentangan dengan dua mutu baja yang berlainan; (5) pembahasan panjang lebar mengenai sambungan (Bab 13), terma-

---

[1]*Manual of Steel Construction — Load and Resistance Factor Design*, edisi pertama, 1986. Karena Manual LRFD (yang berisi pula Spesifikasi dan Komentar LRFD 1986) hampir terus-menerus digunakan sebagai acuan, akan sangat bermanfaat bila Pembaca juga memiliki sebuah *copy*-nya dari *American Institute of Steel Construction, Inc.*, One East Wacker Drive, Suite 3100, Chicago, IL 6060—200. Spesifikasi dan Komentar LRFD juga tersedia sebagai sebuah dokumen terpisah. Manual ASD dan Spesifikasi dan Komentar ASD juga disediakan oleh AISC dalam sampul kertas.

[2]Lotus 1-2-3 merupakan *trademark* dari Lotus Development Co.

Dipindai dengan CamScanner

suk sejumlah pembahasan dan ilustrasi tentang desain komponen. Kesemua bab hampir seluruhnya telah ditulis ulang supaya dapat lebih mencerminkan pendekatan LRFD.

Para penulis sangat berhutang budi kepada para mahasiswa, rekan sejawat, dan para Pengguna kedua edisi terdahulu yang telah menyarankan penyempurnaan kata, mengidentifikasi kekeliruan, serta menyarankan pokok-pokok yang perlu diikutsertakan atau perlu dibuang. Saran-saran tersebut sejauh mungkin telah dipertimbangkan dengan seksama dan diikutsertakan dalam revisi lengkap ini. Secara khusus, penulis sangat menghargai saran dari Profesor Abdul H. Zureick dari Georgia Institute of Technology menyangkut beberapa aspek buku ini, serta Profesor Geoffrey L. Kulak dari University of Alberta, Edmonton, mengenai sambungan baut. Bantuan Profesor Donald R. Sherman dari University of Wisconsin—Milwaukee dalam penyediaan informasi mengenai perkembangan khusus yang berkaitan dengan spesifikasi sangat kami hargai. Kerjasama dan bantuan dari AISC melalui Nestor Iwankiw dan Robert F. Lorenz sangat kami hargai pula. Para penulis juga berterimakasih kepada para asisten kuliah pada University of Wisconsin, Minhah Chuan dan Jae-Hoon Lee, atas bantuan mereka dalam meneliti manuskrip.

Para Pengguna edisi ketiga ini dimohon kesudiannya untuk berkomunikasi dengan para penulis menyangkut segala aspek buku ini, khususnya dalam menemukan kekeliruan serta saran-saran penyempurnaan.

Penulis senior berhutang budi secara khusus kepada istri tercinta, Bette Salmon, atas kesabaran dan dorongannya yang tanpa itu revisi besar-besaran ini tak mungkin terlaksana.

Charles G. Salmon
John E. Johnson

Dipindai dengan CamScanner

Kata Pengantar dari Penerbit

Dalam terjemahan, buku ini diterbitkan menjadi dua jilid. Buku **Jilid I** meliputi **Bab 1** sampai dengan **Bab 7**; sedangkan **Bab 8** sampai dengan **Bab 16** terangkum dalam **Jilid II**. Pada setiap jilid disertakan ringkasan definisi variabel yang terdapat pada *flap* bagian dalam serta **Apendiks**.

Penerbit

PROGRAM STUDI
T. SIPIL FAK. TEKNIK

Dipindai dengan CamScanner

Faktor-faktor Konversi

Berikut ini beberapa faktor konversi, antara sistem satuan Inch-Pound dengan SI, yang digunakan dalam desain baja struktur.

	Untuk mengkonversikan	Menjadi	Kalikan dengan
Gaya	kip gaya	kN	4.448
	lb	N	4.448
	kN	kip	0.2248
Tegangan	ksi	MPa(yakni N/mm²)	6.895
	psi	MPa	0.006895
	MPa	ksi	0.1450
	MPa	psi	145.0
Momen	ft–kip	kN.m	1.356
	kN.m	ft–kip	0.7376
Pembebanan seragam/merata	kip/ft	kN/m	14.59
	kN/m	kip/ft	0.0852
	kip/ft²	kN/m²	47.88
	psf	N/m²	47.88
	kN/m²	kip/ft²	0.02089

Untuk penggunaan SI dengan tepat, lihatlah *Standart for Metric Practise* (ASTM E380–89), American Sosiety for Testing and Materials, Philadelphia, 1989. Lihat pula *Standard Practice for the Use of Metric (SI) Units in Buildings Design and Construction (Committee E-6 Supplement to E380)* (ANSI/ASTM E61–78), American Sosiety for Testing and Materials, Philadelphia, 1978.

Basis konversi (ASTM E380): 1 inch = 25.4 mm; 1 lb gaya = 4.448 221 615 260 5 newton.

Satuan-satuan SI dasar yang berkaitan dengan desain baja struktur:

Kuantitas	*Satuan*	*Simbol*
panjang	meter	m
massa	kilogram	kg
waktu	detik *(second)*	detik (s)

Satuan-satuan turunan SI yang berkaitan dengan desain struktur:

Kuantitas	*Satuan*	*Simbol*	*Rumus*
gaya	*newton*	*N*	*kg.m/detik²*
tekanan, tegangan	*paskal*	*Pa*	*N/m²*
energi, atau kerja	*joule*	*J*	*N.*

Dipindai dengan CamScanner

1
PENDAHULUAN

PROGRAM STUDI
T. SIPIL FAK. TEKNIK

1.1 Desain Struktur

Desain struktur dapat didefinisikan sebagai suatu paduan dari sains dan seni, yang mengkombinasikan perasaan intuitif seorang insinyur yang berpengalaman mengenai perilaku struktur dengan pengetahuan yang mendalam mengenai prinsip-prinsip statika, dinamika, mekanika bahan, dan analisis struktural, untuk menciptakan suatu struktur yang aman dan ekonomis sehingga dapat berfungsi seperti yang diharapkan.

Sampai sekitar tahun 1850-an, desain struktur pada umumnya masih berupa suatu seni berdasarkan intuisi, baik pada penentuan ukuran maupun susunan elemen-elemen strukturnya. Struktur-struktur pertama yang dibuat oleh manusia pada hakikatnya merupakan tiruan bentuk dari apa yang ditampilkan oleh alam, misalnya balok dan lengkungan. Ketika prinsip-prinsip yang menentukan perilaku struktur serta bahan-bahan struktur telah dipahami dengan lebih baik, prosedur desain pun berkembang menjadi semakin ilmiah pula.

Perhitungan-perhitungan yang melibatkan prinsip-prinsip ilmiah hendaknya hanya berfungsi sebagai *pedoman* untuk mengambil keputusan saja, dan tidak perlu diikuti secara membuta. Kemampuan seni atau kemampuan intuitif dari seorang insinyur yang berpengalaman dapat dimanfaatkan pada pengambilan keputusan, dengan disertai bimbingan hasil-hasil perhitungan.

1.2 Prinsip-prinsip Desain

Desain merupakan suatu proses untuk mendapatkan penyelesaian yang optimum. Dalam buku ini, kita membicarakan desain struktur — dan secara lebih khusus lagi, struktur *baja*. Dalam desain apa pun, harus ditentukan sejumlah kriteria untuk menilai apakah yang optimum tersebut telah tercapai atau belum. Untuk sebuah struktur, kriteria-kriteria tersebut dapat berupa (*a*) biaya yang minimum; (*b*) berat yang minimum; (*c*) waktu konstruksi yang minimum; (*d*) jum-

Dipindai dengan CamScanner

World Trade Center, New York, 1350 kaki (Foto oleh C. G. Salmon)

lah tenaga kerja minimum; (*e*) biaya pembuatan produk-produk pemilik yang minimum; dan (*f*) efisiensi pengoperasian yang maksimum bagi pemilik. Biasanya dilibatkan beberapa kriteria yang masing-masing perlu diberi bobot nilai. Dengan memperhatikan kriteria yang mungkin seperti di atas, tampaklah bahwa penentuan kriteria-kriteria yang terukur dengan jelas pun (seperti berat dan biaya) untuk mencapai suatu optimum kerap kali terbukti tidak mudah, bahkan mustahil dilakukan. Dalam kebanyakan situasi praktis, penilaian hanya dapat dilakukan secara kualitatif.

Apabila suatu kriteria tertentu dapat diwujudkan secara matematis, untuk memperoleh titik maksimum dan minimum dari fungsi objektif yang bersangkutan, dapat digunakan teknik-teknik optimasi. Namun demikian, buku ini tidak bermaksud membicarakan prosedur-prosedur serta teknik-teknik optimasi itu. Dalam seluruh buku ini, yang mendapat tekanan adalah kriteria berat minimum, dengan asumsi bahwa bahan yang minimum akan berarti pula biaya yang minimum. Namun, hendaknya kita tidak melupakan kriteria subjektif lainnya, walaupun pengintegrasian dari prinsip-prinsip perilaku dengan desain elemen-elemen baja struktur hanya berdasarkan kriteria-kriteria objektif yang sederhana saja, misalnya berat dan biaya.

Dipindai dengan CamScanner

1.2.1 Prosedur Desain

Prosedur desain dapat dianggap terdiri dari dua bagian — desain fungsional dan desain kerangka kerja struktural. Desain fungsional akan menjamin tercapainya hasil-hasil yang dikehendaki seperti (*a*) area kerja yang lapang dan mencukupi; (*b*) ventilasi dan/atau pengkondisian udara yang tepat; (*c*) fasilitas-fasilitas transportasi yang memadai, seperti *lift*, tangga, dan derek atau alat-alat untuk menangani bahan-bahan; (*d*) pencahayaan yang cukup; dan (*e*) estetika.

Desain kerangka kerja struktural berarti pemilihan susunan serta ukuran elemen-elemen struktur yang tepat, sehingga beban-beban layanan bekerja dengan aman.

Secara garis besar, prosedur desain secara iteratif dapat digambarkan sebagai berikut:

1. *Perencanaan.* Penentuan fungsi-fungsi yang akan dilayani oleh struktur yang bersangkutan. Tentukan kriteria-kriteria untuk mengukur apakah desain yang dihasilkan telah mencapai optimum.
2. *Konfigurasi struktur pendahuluan.* Susunan dari elemen-elemen yang akan melayani fungsi-fungsi pada langkah 1.
3. *Penentuan beban-beban* yang harus dipikul.
4. *Pemilihan batang pendahuluan.* Pemilihan ukuran batang yang memenuhi kriteria objektif, seperti berat atau biaya minimum dilakukan berdasarkan keputusan dari langkah 1, 2, dan 3.
5. *Analisis.* Analisis struktural dengan membuat model beban-beban dan kerangka kerja struktural untuk mendapatkan gaya-gaya internal dan defleksi yang dikehendaki.
6. *Evaluasi.* Apakah semua persyaratan kekuatan dan kemampuan kerja telah terpenuhi dan apakah hasilnya sudah optimum? Bandingkan dengan kriteria-kriteria yang telah ditentukan sebelumnya.
7. *Redesain.* Sebagai hasil dari evaluasi, diperlukan pengulangan bagian mana saja dari urutan langkah 1 sampai dengan 6. Langkah-langkah tersebut merupakan suatu proses iteratif. Namun dengan mengingat bahwa konfigurasi struktural dan pembebanan luar telah ditentukan sebelumnya, dalam buku ini yang perlu diiterasi biasanya hanya langkah 3 sampai 6 saja.
8. *Keputusan akhir.* Penentuan apakah desain optimum telah tercapai atau belum.

1.3 Latar Belakang Sejarah Struktur Baja

Penggunaan logam sebagai bahan struktural diawali dengan besi tuang untuk bentangan lengkungan (*arch*) sepanjang 100–ft (30-m) yang dibangun di Inggris pada tahun 1777–1779 [1.1]*. Dalam kurun waktu 1780–1820, dibangun lagi sejumlah jembatan dari besi tuang, kebanyakan berbentuk lengkungan dengan balok-

* Nomor di antara tanda kurung menunjuk pada Acuan Terpilih pada akhir bab.

Dipindai dengan CamScanner

balok utama dari potongan-potongan besi tuang individual yang membentuk batang-batang atau kerangka (*truss*) konstruksi. Besi tuang juga digunakan sebagai rantai penghubung pada jembatan-jembatan suspensi sampai sekitar tahun 1840.

Segera setelah tahun 1840, besi tempa mulai mengganti besi tuang dengan contoh pertamanya yang penting adalah Brittania Bridge di atas selat Menai di Wales yang dibangun pada 1846–1850. Jembatan itu menggunakan gelagar-gelagar tubular yang membentang sepanjang 230–460–460–230 ft (70–140–140–70 m) dari pelat dan profil siku besi tempa.

Proses canai (*rolling*) dari berbagai profil mulai berkembang pada saat besi tuang dan besi tempa telah semakin banyak digunakan. Batang-batang mulai dicanai pada skala industrial sekitar tahun 1780. Pencanaian rel dimulai sekitar 1820 dan diperluas sampai pada bentuk-**I** menjelang tahun 1870-an.

Perkembangan proses Bessemer (1855) dan pengenalan alur dasar pada konverter Bessemer (1870) serta tungku siemens-martin semakin memperluas penggunaan produk-produk besi sebagai bahan bangunan. Sejak tahun 1890, baja telah mengganti kedudukan besi tempa sebagai bahan bangunan logam yang terutama. Dewasa ini (1990-an), baja telah memiliki tegangan leleh dari 24 000 sampai dengan 100 000 *pounds per square inch*, psi (165 sampai 690 megapaskal, ** MPa), dan telah tersedia untuk berbagai keperluan struktural. Berbagai macam mutu baja, penggunaan, serta sifat-sifat mereka akan dibicarakan dalam **Bab 2**.

1.4 Beban-beban

Beban-beban yang akan ditanggung oleh suatu struktur atau elemen struktur tidak selalu dapat diramalkan dengan tepat sebelumnya. Bahkan apabila beban-beban tersebut telah diketahui dengan baik pada salah satu lokasi pada sebuah struktur tertentu, distribusi bebannya dari elemen yang satu ke elemen yang lain pada keseluruhan struktur biasanya masih membutuhkan asumsi dan pendekatan. Dalam bagian-bagian berikut ini akan dibicarakan beberapa jenis beban yang paling dikenal.

1.4.1 Beban Mati

Beban mati merupakan beban gaya berat pada suatu posisi tertentu. Beban ini disebut demikian karena ia bekerja terus menerus menuju arah bumi pada saat struktur telah berfungsi. Berat struktur dianggap sebagai beban mati; demikian pula segala hal yang tertempel pada struktur tersebut seperti pipa-pipa, saluran listrik, saluran AC dan pemanasan, peralatan pencahayaan, penutup lantai, penutup atap, plafon gantung; yakni segala macam hal yang tetap berada pada tempatnya sepanjang umur struktur tersebut.

Beban mati biasanya telah diketahui dengan tepat setelah desain selesai.

** MPa, megapaskal, ekuivalen dengan Newton per milimeter persegi N/mm2 dalam satuan SI

Dipindai dengan CamScanner

Menurut langkah 3 sampai 6 dari prosedur desain dalam **Bagian 1.2** di muka, bila perlu berat struktur atau elemen strukturnya harus diestimasi, bagian pendahuluannya diseleksi, beratnya dihitung ulang, dan pemilihan batangnya direvisi lagi. Beban mati dari tempelan-tempelan biasanya telah diketahui dengan cukup tepat sebelum desain selesai.

1.4.2 Beban Hidup

Beban-beban gravitasi yang bekerja pada saat struktur telah berfungsi, namun bervariasi dalam besar dan lokasinya, disebut beban hidup. Contohnya adalah beban orang, furnitur, perkakas yang dapat bergerak, kendaraan, dan barang-barang yang disimpan. Secara praktis, beberapa beban hidup bersifat permanen; sedangkan yang lainnya sering berpindah-pindah tempatnya. Karena tidak diketahui besar, lokasi, dan kepadatannya, besar dan posisi sebenarnya dari beban-beban semacam itu sulit sekali ditentukan.

Tabel 1.4.1 Beban-beban Hidup Minimum Tipikal yang Terbagi Merata (Diadaptasi dari Acuan 1.2)

Penggunaan Ruang	Beban Hidup	
	psf	Pa*
1. Ruang tamu hotel Ruang kelas Apartemen pribadi Ruang pribadi rumah sakit	40	1900
2. Kantor	50	2400
3. Ruang pertemuan dengan bangku tetap Ruang baca perpustakaan	60	2900
4. Koridor, di atas lantai pertama pada sekolah, perpustakaan, dan rumah sakit	80	3800
5. Tempat pertemuan, lobi teater Ruang makan bersama dan restauran Lobi bangunan kantor Lantai utama, toko kelontong Ruang pertemuan dengan tempat duduk tidak tetap	100	4800
6. Toko serba ada, semua lantai Manufakturing, ringan Gudang penyimpanan, ringan	125	6000
7. Gedung militer Lantai panggung Ruang rak perpustakaan	150	7200
8. Manufakturing, berat Gang dan jalan yang dapat dilewati truk Gudang penyimpanan, berat	250	12000

* Harga dalam SI merupakan konversi pendekatan. 1 psf (lb/sq ft) = 47.9 Pa

Dipindai dengan CamScanner

Karena dikehendaki keamanan yang cukup, penentuan beban hidup, yang dalam desain diambil sebagai beban berguna, pada umumnya mengacu pada peraturan pembebanan yang ditentukan oleh pemerintah. Beban-beban ini pada umumnya bersifat empiris dan konservatif, yakni lebih berdasarkan pengalaman dan praktek yang umum diterima ketimbang harga-harga yang dihitung dengan tepat. Apabila peraturan pembebanan ternyata tidak sesuai, atau malahan mungkin tidak ada peraturan, dapat digunakan provisi menurut salah satu peraturan regional dan nasional. Salah satunya yang paling banyak dikenal adalah *American National Standard Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* ANSI A58.1 dari *American National Standards Institute* (ANSI) [1.2], di mana beberapa beban tipikal di antaranya diberikan dalam **Tabel 1.4.1**. Peraturan tersebut selanjutnya akan disebut sebagai Standar ANSI. Standar ini selalu diperbaharui dari waktu ke waktu, dan yang terakhir pada tahun 1982.

Bila diterapkan pada suatu struktur, beban hidup harus ditempatkan sedemikian rupa sehingga memberikan efek maksimum, termasuk pembebanan parsial, pembebanan bentang pengganti, atau pembebanan seluruh bentang bila diperlukan. Penyederhanaan asumsi dari pembebanan yang merata seluruhnya hanya boleh digunakan bila sesuai atau cukup mendekati kenyataan. Kemungkinan untuk menganggap pembebanan yang telah ditentukan berlaku secara merata pada seluruh luasan lantai, atau pada keseluruhan lantai, hampir tidak ada. Dalam hal ini, kebanyakan peraturan mencantumkan persentase reduksi dari pembebanan secara penuh. Misalnya, untuk beban hidup sebesar 100 psf atau lebih, Standar ANSI [1.2] mengijinkan batang-batang memiliki area (luas) pengaruh sebear 400 sq ft atau lebih yang didesain untuk beban hidup yang direduksi menurut **Persamaan 1.4.1** sebagai berikut:

$$L = L_0 \left[0.25 + \frac{15}{\sqrt{A_I}} \right] \tag{1.4.1}$$

di mana L = beban hidup tereduksi per sq ft area yang didukung oleh batang yang bersangkutan

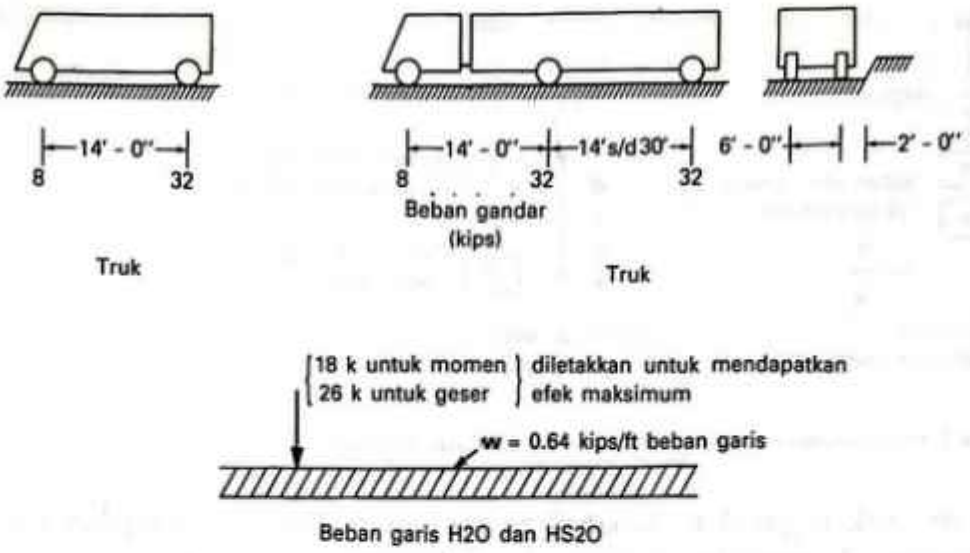
L_0 = beban hidup tak tereduksi per sq ft area yang didukung oleh batang yang bersangkutan (dari **Tabel 1.4.1**)

A_I = luas pengaruh, sq ft

Luas Area pengaruh A_I adalah sebesar empat kali area dukung (*tributary area*) untuk sebuah kolom, dua kali area dukung untuk sebuah balok, dan sama dengan luas panel untuk slab dua arah. Beban hidup reduksi L tidak boleh kurang dari 50% beban hidup L_0 untuk batang-batang yang mendukung satu lantai, dan tidak boleh kurang dari 40% dari L_0 untuk hal lainnya.

Reduksi beban hidup seperti di atas tidak diperkenankan pada area-area yang akan digunakan sebagai ruang pertemuan umum dan *slab* dua arah bila beban hidupnya L sebesar 100 psf atau kurang. Reduksi diperkenankan untuk penggu-

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 1.4.1 *Pembebanan Jalan Raya H20 dan HS20 AASHTO [1.3] (1 kip = 4.45 kN)*

naan di mana L_0 lebih besar dari 100 psf dan untuk garasi-garasi serta atap dalam kondisi yang istimewa (ANSI–4.7.2)[1.2].

1.4.3 Beban Hidup Jalan Raya

Di Amerika Serikat, pembebanan kendaraan jalan raya telah distandardisasi oleh *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [1.3] menjadi beban-beban truk standar dan beban-beban garis yang mendekati serangkaian truk. Terdapat dua sistem, diberi tanda H dan HS, yang diidentifikasikan berdasarkan banyaknya gandar tiap truk. Sistem H memiliki dua gandar, sedangkah sistem HS memiliki tiga gandar per truk. Terdapat pula beberapa kelas pembebanan; meskipun demikian, yang paling umum dikenal adalah H20 dan HS20 seperti **Gambar 1.4.1**.

Dalam desain suatu jembatan tertentu, diterapkan pembebanan truk terhadap keseluruhan struktur atau pembebanan garis. Dengan pembebanan garis, beban merata didistribusikan atas bentang atau bentang-bentang sejauh dapat menyebabkan efek maksimum. Di samping itu, *salah satu* beban terpusat (untuk momen negatif maksimum pada bentang menerus, digunakan juga beban terpusat kedua) diletakkan pada efek pembebanan yang paling kuat. Distribusi beban menurut lebar jembatan terhadap berbagai batang pendukung diambil sesuai dengan hukum-hukum semiempirik yang tergantung pada tipe lantai jembatan dan struktur pendukungnya.

Pembebanan truk tunggal memungkinkan terjadinya efek beban terpusat yang berat dan biasanya terdapat pada bentangan yang relatif pendek. Beban garis yang merata dimaksudkan untuk menyerupai jalur lalu lintas, sedangkan beban terpusat tambahan untuk memperhitungkan kemungkinan adanya salah satu kendaraan yang sangat berat pada jalur lalu lintas tersebut. Beban-beban ini telah digunakan tanpa kesulitan yang berarti sejak tahun 1944. Sebelumnya,

Dipindai dengan CamScanner

Gambar 1.4.2 *Perbandingan antara pembebanan statik dan dinamik*

serangkaian truk digunakan sebagai pembebanan. Pada sistem jalan raya antar negara bagian di Amerika Serikat, digunakan pula pembebanan militer yang terdiri dari dua beban gandar sebesar 24 kip (107–kN) yang terpisah sejauh 4 ft (1.2 m).

Jembatan kereta api didesain untuk mendukung pembebanan semiempirik serupa yang dikenal sebagai kereta Cooper E72, yang terdiri dari serangkaian beban terpusat yang terpisah pada jarak tertentu dan kemudian diikuti dengan pembebanan merata. Pembebanan ini diatur oleh *American Railway Engineering Association* (AREA)[1.4].

1.4.4 Kejut

Istilah *kejut* (*impact*), seperti yang biasa digunakan pada desain struktur, berarti efek dinamik dari beban yang bekerja secara tiba-tiba. Pada pembangunan suatu struktur, bahan-bahan ditambahkan sedikit demi sedikit; orang-orang yang memasuki suatu bangunan pun dapat dianggap sebagai pembebanan secara bertahap. Beban mati merupakan beban statik; yakni bahwa beban tersebut tidak mempunyai efek selain beratnya. Namun beban hidup dapat bersifat statik dan dapat pula memiliki efek dinamik. Orang dan furnitur mungkin saja diperlakukan sebagai beban hidup statik, namun derek dan berbagai macam mesin juga memiliki efek dinamik.

Perhatikan sistem massa-pegas dari **Gambar 1.4.2** di mana pegas dapat dianggap analog dengan sebuah balok elastik. Pada saat beban setahap demi setahap mulai bekerja (yakni beban statik), massa (berat beban) berdefleksi sebesar x dan beban pada pegas (balok) sebanding dengan berat W. Pada **Gambar 1.4.2*b*** beban bekerja secara tiba-tiba (beban dinamik) dan defleksi maksimumnya sebesar $2x$; sedang beban maksimum pada pegas (balok) besarnya $2W$. Dalam hal ini, massa bervibrasi menurut gerak harmonik sederhana dengan posisi netral setara dengan posisi yang terdefleksi secara statik. Dalam struktur yang sebenarnya, gerakan harmonik (vibratif) teredam (tereduksi sampai nol) dengan sangat cepat. Pada saat gerakan telah terhenti, gaya yang tetap berada pada pegas adalah berat W. Untuk memperhitungkan gaya

Dipindai dengan CamScanner

yang meningkat selama batang bergerak, perlu digunakan suatu beban yang besarnya sama dengan dua kali beban statik W; sehingga beban statiknya bertambah 100% untuk mewakili efek dinamik tersebut. Hal demikian ini disebut sebagai faktor kejut 100%.

Sesuatu beban hidup yang dapat memiliki efek dinamik harus diperbesar dengan sebuah faktor kejut. Namun, meski kita dapat membuat analisis dinamik dari suatu struktur, dalam desain yang biasa prosedur semacam ini tidak diperlukan. Dengan demikian, biasanya digunakan rumus-rumus dan faktor kejut yang diperoleh secara empirik. Dalam kasus-kasus di mana efek dinamiknya kecil (katakan misalnya faktor kejutnya kurang dari 20%), biasanya digunakan harga yang lebih tinggi (konservatif) untuk jenis beban hidup tertentu. Efek dinamik yang diakibatkan oleh orang dalam bangunan dan kendaraan yang bergerak lambat dalam gedung parkir merupakan contoh di mana beban hidup desain bersifat konservatif dan tidak mendapatkan penambahan faktor yang diberikan secara eksplisit.

Meskipun demikian, untuk desain jembatan jalan raya, kejut selalu diperhitungkan. Secara empiris, AASHTO [1.3] menganjurkan bahwa faktor kejut yang diwujudkan sebagai bagian dari beban hidup diambil sebesar:

$$I = \frac{50}{L + 125} \leq 0.30 \qquad (1.4.2)$$

di mana L (dalam ft) merupakan panjang dari bagian bentang yang dibebani supaya dapat memberikan efek maksimum pada batang yang bersangkutan. Karena kendaraan bergerak secara langsung di atas superstruktur, semua bagian dari superstruktur tersebut akan terkena vibrasi dan harus didesain dengan mengikutsertakan kejut. Sedangkan substruktur, termasuk semua bagian yang tidak tertempel dengan kokoh seperti pangkal jembatan, dinding penyangga, dan tonggak dermaga, diasumsikan telah mengalami peredaman atau cukup jauh dari titik kerja beban dinamik, sehingga pengaruh kejutnya tidak perlu diperhitungkan. Sekali lagi, beban-beban statik konservatif sudah dapat mencakup pula efek dinamik yang kecil.

Pada bangunan, hanya desain tumpuan derek dan mesin-mesin berat saja yang secara eksplisit memperhitungkan kejut. Spesifikasi* [1.5, 1.15] (ASD dan LRFD-A4.2) menurut *Allowable Stress Design* (ASD = Desain Tegangan Ijin) dan *Load and Resistance Factor Design* (LRFD = Desain Faktor Tahanan dan Beban) dari *American Institute of Steel Construction* (AISC) menyatakan bahwa bila tidak diberikan spesifikasi lebih lanjut, persentase kejut haruslah sebagai berikut:

---

* Para Pembaca akan menemukan acuan lanjutan pada Spesifikasi AISC (ASD dan LFRD) yang masing-masing termuat dalam *AISC ASD Manual* [1.7] dan *AISC LRFD Manual* [1.17]. Kedua buku tersebut dapat dibeli dari AISC, 400 North Michigan Avenue, Chicago, IL 60611–4185.

Dipindai dengan CamScanner

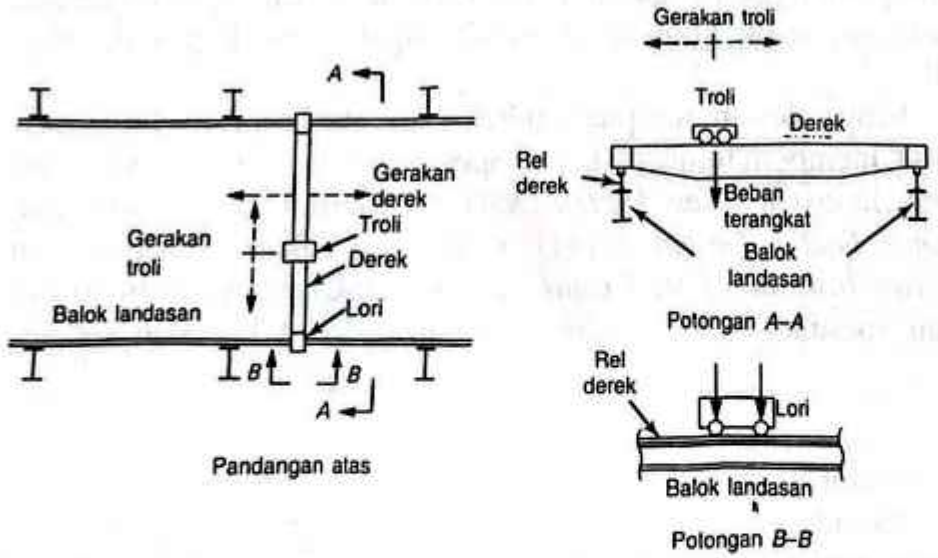
Untuk dukungan lift dan mesin lift	100%
Untuk balok gelagar pendukung derek berpindah yang dioperasikan dengan kabel dan penghubungnya	25%
Untuk balok pendukung derek berpindah yang dioperasikan dengn penggantung dan penghubungnya	10%
Untuk pendukung mesin-mesin ringan, yang digerakkan dengan poros atau motor, tidak boleh kurang dari	20%
Untuk pendukung mesin-mesin bolak-balik atau unit-unit yang digerakkan dengan penggerak, tidak boleh kurang dari	50%
Untuk lantai pendukung gantungan dan balkon	33%

Pada desain balok-balok landasan derek kran (*lihat* **Gambar 1.4.3**) dan penghubungnya, gaya-gaya horisontal yang disebabkan oleh troli derek yang bergerak juga harus diperhitungkan. Baik LRFD maupun ASD–A4.3 menyarankan penggunaan minimum "20% dari jumlah beban terangkat dan troli dereknya (namun tidak eksklusif terhadap bagian-bagian lain dari derek yang bersangkutan). Gaya harus diasumsikan bekerja pada bagian atas rel dan bekerja pada arah normal mana pun terhadap rel landasannya, dan harus didistribusikan menurut kekakuan lateral dari struktur yang mendukung rel-rel tersebut".

Di samping itu, karena akselerasi dan deselerasi dari keseluruhan derek, suatu gaya tarik longitudinal akan ditransmisikan kepada balok landasan melalui gesekan dari roda-roda lori dengan rel derek. LRFD dan ASD-A4.3 mempersyaratkan agar gaya ini, bila tidak diberi spesifikasi lain, diambil tidak kurang dari 10% beban maksimum roda derek yang bekerja terhadap bagian atas rel.

1.4.5 Beban Salju

Salah satu beban hidup utama yang mungkin dipikul oleh atap (di Indonesia hampir tidak ada salju – *Ed*) adalah beban salju. Karena berat jenis salju bervariasi, beban desain yang tepat tidak dapat ditentukan sekedar berdasarkan tebal lapisan



***Gambar 1.4.3** Susunan derek, memperlihatkan gerakan-gerakan yang ikut menyumbang pembebanan kejut*

Dipindai dengan CamScanner

dikalikan beban per satuan luas atap. Perhitungan sedemikian hanya perkiraan saja.

Di Amerika Serikat, prosedur terbaik untuk menentukan beban salju desain adalah mengikuti Standar ANSI [1.2]. Peraturan ini menggunakan peta Amerika Serikat dengan isolini salju tanah sesuai dengan interval ulang rata-rata 50 tahunan yang dapat digunakan untuk mendesain kebanyakan struktur permanen. Kemudian, beban salju tanah tersebut dikalikan dengan suatu koefisien yang telah mencakup efek kemiringan atap, kemungkinan terkena angin, rangkaian atap berganda, akumulasi tak seragam pada atap lancip atau atap lengkung, atap bertingkat, serta luasan atap yang berdekatan dengan projeksi pada tingkatan atap.

Jelaslah bahwa semakin curam atap, semakin sedikit salju yang dapat terakumulasi. Di samping beban penuh, perlu diperhitungkan pula beban salju parsial, khususnya bila diyakini bahwa pembebanan sedemikian dapat saja terjadi dan dapat menimbulkan efek maksimum. Angin dapat juga berpengaruh terhadap struktur yang menanggung beban salju. Meskipun demikian, tampaknya beban salju dan beban angin maksimum tidak cenderung terjadi secara serentak.

Secara umum, basis beban salju yang digunakan dalam desain berkisar dari 30 sampai 40 psf (1400 sampai dengan 1900 MPa) di negara-negara bagian utara dan timur Amerika Serikat, dan sampai dengan 20 psf (960 MPa) atau kurang di negara-negara bagian selatan. Atap datar dalam lingkungan iklim yang normalnya cukup hangat harus didesain untuk 20 psf (960 MPa), meskipun tampaknya akumulasi salju sebesar ini masih dirasa meragukan. Pembebanan ini dapat dianggap sebagai diakibatkan oleh orang-orang yang berkumpul di atas atap. Di samping itu, meskipun angin kerapkali tidak dianggap sebagai gaya vertikal terhadap atap, namun angin dapat menyebabkan efek sedemikian. Maka dari itu, pembebanan minimum sebesar 20 psf (960 MPa), meskipun belum tentu disebabkan oleh salju, cukup dapat diterima. Pada saat mendesain beban salju, harus digunakan peraturan lokal, kondisi cuaca aktual, ANSI [1.2], atau *Canadian Structural Design Manual* [1.9]. Informasi lain mengenai beban salju telah disediakan oleh Lew, Simiu, dan Ellingwood dalam *Building Structural Design Handbook* (**Bab 2**) [1.10], serta dalam karya dari O'Rourke dan Stiefel [1.38], Templin dan Schriever [1.39], O'Rourke, Tobiasson, dan Wood [1.40], O'Rourke, Redfield, dan von Bradsky [1.41], dan O'Rourke, Speck, dan Stiefel [1.42].

1.4.6 Beban Angin

Semua struktur akan terkena beban angin. Namun, selain jembatan-jembatan panjang, hanya struktur dari bangunan tiga lantai atau lebih sajalah yang membutuhkan pertimbangan angin secara khusus. Pada setiap bangunan tipikal berdenah dan bertampak persegi, angin menimbulkan tekanan pada sisi yang terkena angin dan hisapan pada sisi hisapnya, sebagaimana halnya dengan tekanan ke atas maupun ke bawah pada atap. Untuk kebanyakan situasi normal, pembebanan atap secara vertikal diabaikan dengan asumsi bahwa beban salju membutuhkan kekuatan yang lebih besar ketimbang beban angin. Asumsi ini tidak

Dipindai dengan CamScanner

berlaku untuk daerah-daerah dengan iklim selatan di mana beban vertikal karena angin juga harus diikutsertakan. Lebih jauh lagi, beban angin lateral total, yakni efek angin tekan dan angin hisap, pada umumnya diasumsikan bekerja pada sisi yang terkena angin dari struktur tersebut.

Sesuai dengan teorema Bernoulli untuk fluida ideal yang menumbuk suatu objek, penambahan tekanan statiknya sebanding dengan penurunan tekanan dinamiknya atau:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \tag{1.4.3}$$

di mana q adalah tekanan dinamik terhadap objek, ρ adalah densitas massa udara (berat jenis w = 0.07651 pcf pada permukaan laut dan pada suhu 15°C), sedang V adalah kecepatan angin. Bila kecepatan V dalam mil per jam, tekanan dinamik q (psf) sama dengan:

$$q = \frac{1}{2}\left(\frac{0.07651}{32.2}\right)\left(\frac{5280V}{3600}\right)^2 = 0.0026V^2 \tag{1.4.4}^*$$

Namun dalam desain tipe-tipe bangunan yang biasa, pada umumnya tekanan dinamik q dikonversikan ke dalam tekanan statik p yang dapat dinyatakan sebagai [1.9]:

$$p = qC_eC_gC_p \tag{1.4.5}$$

di mana C_e merupakan faktor jumpaan yang bervariasi dari 1.0 (untuk ketinggian 0–40 ft) sampai dengan 2.0 (untuk ketinggian 740–1200 ft); C_g merupakan faktor sentakan angin, seperti 2.0 untuk batang struktural dan 2.5 untuk elemen-elemen kecil termasuk pelapisan (*cladding*); dan C_p merupakan faktor bentuk dari bangunan tersebut sebagai satu kesatuan. Dalam Standar ANSI [1.2] dan *National Building Code of Canada* [1.9] tersedia uraian terinci mengenai berbagai macam penerapan beban angin terhadap struktur.

Tekanan angin yang umum digunakan sebesar 20 psf, seperti yang dispesifikasikan oleh banyak peraturan bangunan, berkaitan dengan kecepatan sebesar 88 mil per jam yang diperoleh dari **Persamaan 1.4.4**. Sedang faktor jumpaan C_e sebesar 1.0, faktor sentakan C_g sebesar 2.0, dan faktor bentuk C_p sebesar 1.3 untuk bangunan rapat udara, bersama dengan tekanan statik ekuivalen p sebesar 20 psf, berdasarkan **Persamaan 1.4.5** akan memberikan tekanan dinamik q sebesar 7.7 psf yang berkaitan dengan kecepatan angin sebesar 55 mil per jam bila kita menggunakan **Persamaan 1.4.4**. Untuk semua bangunan yang permukaannya bukan bidang datar, atau permukaannya condong ke arah angin, atau permukaannya mempunyai bukaan yang cukup banyak, diperlukan penentuan gaya angin khusus berdasarkan sumber-sumber seperti Standar ANSI [1.2] atau

* Dalam satuan SI, $q = 0.63V^2$, untuk q dalam MPa dan V dalam m/detik (1.4.4)

Dipindai dengan CamScanner

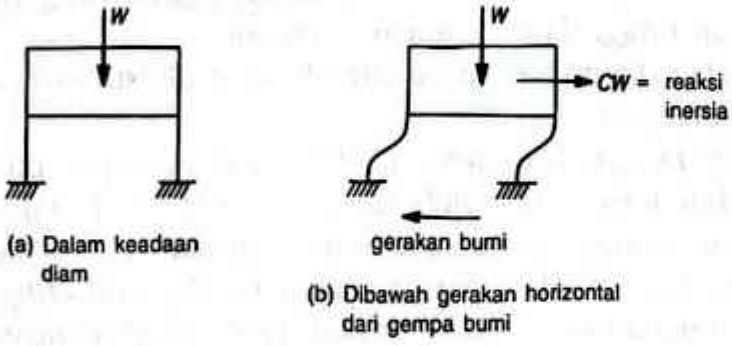
National Building Code of Canada [1.9]. Bila menginginkan perlakuan terhadap beban angin yang lebih ekstensif, para Pembaca dipersilakan mengacu pada terbitan Satuan Tugas Bahaya Angin [1.35], karya Lew, Simiu, dan Ellingwood dalam *Building Structural Design Handbook* [1.10], karya Mehta [1.36], serta karya Stathopoulos, Surry, dan Davenport [1.37].

1.4.7 Beban Gempa

Gempa bumi terdiri dari gerakan-gerakan lapisan bumi ke arah horisontal dan vertikal, di mana biasanya gerakan vertikalnya lebih kecil ketimbang gerakan horisontalnya. Karena efek terbesar ditimbulkan oleh gerakan arah horisontal, efek ini pulalah yang biasanya diperhitungkan sebagai beban gempa. Apabila lapisan tanah di bawah suatu objek (struktur) dengan massa tertentu tiba-tiba saja bergerak, inersia dari massa tersebut cenderung melawan gerakan, seperti terlihat dalam **Gambar 1.4.4**. Di antara lapisan tanah dengan massa tersebut akan timbul gaya geser. Maka dari itu, kebanyakan peraturan bangunan yang mengikutsertakan masalah gempa menghendaki agar desainer juga memperhitungkan gaya lateral *CW* yang biasanya diperoleh secara empirik. Dinamika gerakan gempa terhadap struktur tidak tercakup dalam buku ini; bila berminat para Pembaca dipersilakan mengacu pada karya Chopra [1.45] dan Clough dan Penzien [1.46].

Untuk menyederhanakan proses desain, kebanyakan peraturan bangunan telah mencantumkan suatu prosedur gaya lateral ekuivalen untuk desain tahan gempa. Salah-satunya yang paling luas digunakan dikeluarkan oleh *Structural Engineers Association of California* (SEAOC) dengan versi mutakhirnya yang diterbitkan pada tahun 1973 [1.43]. Setelah itu, *Applied Technology Council* (ATC) juga menyiapkan suatu rangkaian anjuran desain [1.47]. Dewasa ini, beberapa peraturan untuk prosedur gaya lateral ekuivalen diberikan oleh Standar ANSI [1.47]. Menurut ANSI, gaya-gaya seismik lateral yang diasumsikan tidak akan bekerja secara bersamaan dalam arah masing-masing sumbu utama struktur tersebut dapat diwujudkan dalam persamaan berikut:

$$V = ZIKCSW \tag{1.4.6}$$



Gambar 1.4.4 *Gaya yang dibentuk oleh gempa bumi*

Dipindai dengan CamScanner

di mana Z = koefisien zona seismik yang bervariasi dari $1/8$ untuk zona dengan seismisitas terendah sampai dengan 1 untuk zona dengan seis-misitas tertinggi

I = faktor kepentingan penggunaan yang bervariasi dari 1.5 untuk bangunan-bangunan yang dikategorikan sebagai "fasilitas vital", 1.25 untuk bangunan dengan penggunaan utama sebagai tempat pertemuan lebih dari 300 orang, sampai dengan 1.0 untuk bangunan biasa.

K = faktor gaya horisontal yang bervariasi dari 0.67 sampai dengan 2.5; bilangan ini menunjukkan kapasitas struktur untuk mengabsorpsi deformasi plastik (angka yang rendah menunjukkan duktilitas yang tinggi)

$$C = \frac{1}{15\sqrt{T}} \leq 0.12 \qquad (1.4.7)$$

merupakan koefisien seismik yang ekuivalen dengan percepatan maksimum yang disebabkan oleh gaya berat

T = periode natural fundamental, yakni waktu yang dibutuhkan bangunan untuk melakukan satu putaran vibrasi menurut arah gerakan

S = koefisien profil lapisan tanah yang bervariasi dari 1.0 untuk batu sampai dengan 1.5 untuk lapisan pasir dan lempung dengan kekerasan lembek sampai sedang

W = beban mati total dari bangunan tersebut termasuk partisi-partisi interiornya.

Apabila tidak dapat ditentukan secara rasional dari data teknis, untuk dinding geser atau rangka beton eksterior yang menggunakan balok dalam (*deep beam*) atau tonggak lebar (*wide pier*) atau kedua-duanya, periode natural T dapat diperoleh sebagai berikut:

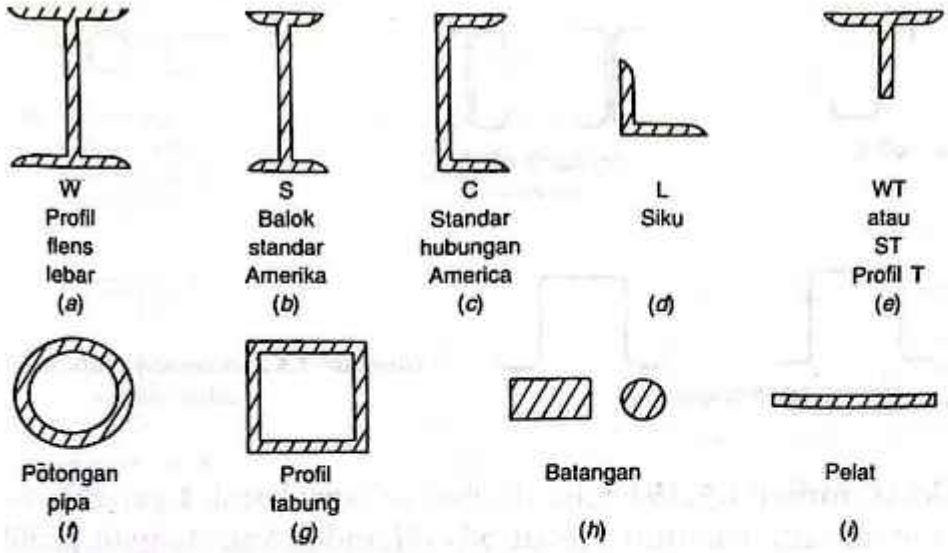
$$T = \frac{0.05h_n}{\sqrt{D}} \qquad (1.4.8)$$

di mana D merupakan dimensi struktur menurut arah gaya-gaya yang bekerja (dalam ft) dan h_n merupakan tinggi dari bangunan tersebut.

Bila gaya geser dasar V telah ditentukan, gaya lateral harus didistribusikan terhadap seluruh ketinggian bangunan.

Dalam *Building Structural Design Handbook* [1.10] dapat dijumpai prosedur Standar ANSI [1.2] yang lebih terperinci. Oleh Chopra dan Cruz [1.44] diperbandingkan berbagai rumus aturan bangunan untuk desain tahan gempa. Sementara itu, banyak negara bagian telah menggunakan *Uniform Building Code* (UBC) [1.48], dengan versi mutakhirnya terbitan tahun 1985, yang mengandung anjuran-anjuran untuk desain tahan gempa yang pada umumnya berdasarkan pada Standar ANSI [1.2].

Dipindai dengan CamScanner



***Gambar 1.5.1** Profil-profil tempa standar*

1.5 Tipe-tipe Batang Struktur Baja

Sebagaimana telah dibahas dalam **Bagian 1.2**, fungsi struktur merupakan faktor utama dalam penentuan konfigurasi struktural. Komponen-komponen individual dipilih sedemikian rupa sehingga dapat mendukung dan menyalurkan beban-beban ke seluruh struktur dengan tepat berdasarkan konfigurasi struktural serta beban-beban desain. Batang-batang baja dipilih dari profil-profil baja tempa standar yang digunakan oleh *American Institute of Steel Construction* (AISC) (juga diberikan oleh Spesifikasi *American Society for Testing and Materials* (ASTM) A6).

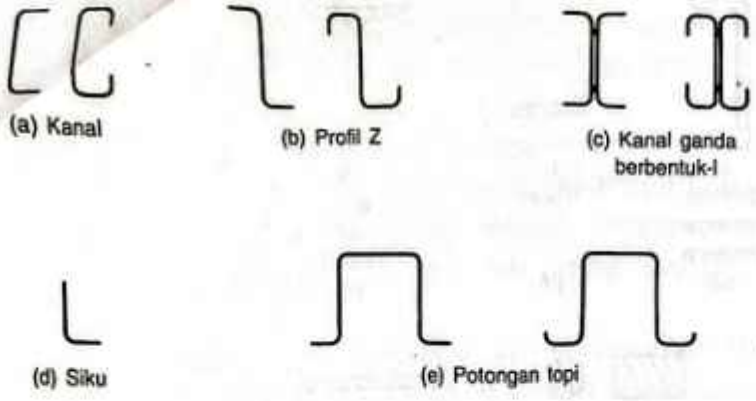
Tentu saja, pengelasan memungkinkan pengkombinasian pelat-pelat dan/atau profil-profil tempa untuk memperoleh berbagai bentuk penampang sesuai yang dikehendaki desainer.

Profil-profil tempa tipikal, yang dimensinya dapat ditemukan dalam Manual AISC [1.7, 1.17]*, dapat dijumpai dalam **Gambar 1.5.1**.

Profil yang paling banyak digunakan adalah profil flens lebar (**Gambar 1.5.1*a***) yang dibentuk dengan penempaan panas dalam pabrik baja. Profil flens lebar dicirikan dengan kedalaman nominal dan beratnya per ft, seperti W18x97 yang mempunyai kedalaman nominal 18 inch (kedalaman sebenarnya = 18.59 inch menurut Manual AISC) dan beratnya 97 pound per ft. (Dalam satuan SI, profil W18x97 dapat disebut sebagai W460x142, yakni kedalaman nominalnya 460 mm dan massanya 142 kg/m). Kedua bentuk dimensi tersebut dapat dijumpai dalam Manual AISC; yang satu diberikan dalam bentuk desimal supaya mudah digunakan desainer untuk perhitungan, sedang lainnya dalam bentuk pecahan (yang terkecil $\frac{1}{16}$ inch). Berdasar ketebalan badan (*web*), oleh ANSI/ASTM A6 [1.8] profil W tempa juga dicantumkan ke dalam Kelompok I sampai dengan V, dengan Kelompok I merupakan yang paling tipis.

* Bila dikatakan bahwa acuan menunjuk pada Manual AISC, berarti material yang dimaksud terdapat dalam **Acuan 1.7** maupun **1.17**

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 1.5.2 Beberapa profil b tukan dingin

Balok Standar Amerika (**Gambar 1.5.1*b***) biasa disebut sebagai balok-**I** yang fle nya relatif sempit dan curam serta badannya tebal bila dibandingkan dengan pr flens lebar. Sejumlah besar balok I relatif tidak populer lagi karena banyak mate yang terbuang untuk badan dan kekakuan lateralnya kurang karena flensnya sem

Profil kanal (**Gambar 1.5.1*c***) dan siku (**Gambar 1.5.1*d***) kerap digunak sendirian maupun dalam kombinasi dengan profil lain. Profil kanal, misalr C12x20.7, memiliki kedalaman kanal nominal sebesar 12 inch dan beratnya 2 pound per ft. Profil siku diberi nama menurut panjang kakinya (kaki yang p jang terlebih dahulu) dan ketebalan, misalnya L6x4x$\frac{3}{8}$.

Profil **T** (**Gambar 1.5.1*e***) dibuat dengan membagi dua balok flens lebar atau l lok I dan profil ini kerap dipergunakan sebagai batang tarik pada kerang Pemberian nama profil T, misalnya WT5x44, karena kedalaman nominalnya sebe 5 inch dan beratnya 44 pounds per ft; profil ini merupakan pemotongan dari W10x

Potongan pipa (**Gambar 1.5.1*f***) didesain "Standard", "ekstra kuat", dan "eks ganda kuat" sesuai dengan ketebalan dan juga secara normal ditentukan oleh diar ter; jadi diameter ekstra-ganda kuat 10 inch adalah contoh dari sebuah pipa berul ran khusus.

Potongan pipa (**Gambar 1.5.1g**) dipergunakan bila dikehendaki suatu tam an arsitektural yang menyenangkan dari baja ekspos. Penamaan profil tab berdasarkan dimensi luar dan ketebalannya, misalnya 8x6x$\frac{1}{4}$.

Profil-profil dalam **Gambar 1.5.1** kesemuanya dihasilkan dengan tempa par yaitu dibentuk dari baja bongkahan panas (blok baja) yang dilewatkan mel rol penempa berulang-ulang sampai diperoleh bentuk yang dikehendaki.

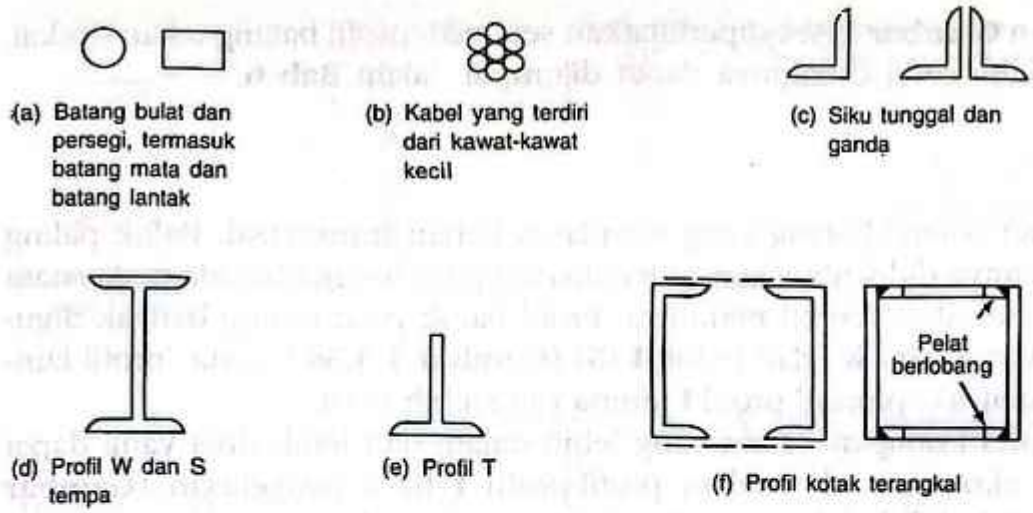
Banyak profil lain dibentuk dengan cara dingin dari bahan pelat yang me liki ketebalan tidak melebihi 1 inch seperti terlihat dalam **Gambar 1.5.2.**

Mengenai ukuran dan penamaan batang-batang baja yang diproses secara ngin, sebenarnya tidak ada profil yang benar-benar standar meskipun sifat-s dari banyak profil yang umum telah diberikan dalam *Cold-Formed Steel De Manual* [1.12]. Berbagai pabrik memproduksi profil-profilnya sendiri.

1.5.1 Batang Tarik

Batang tarik pada umumnya berwujud penahan tarik pada kerangka, silan diagonal (*diagonal bracing*) pada berbagai tipe struktur, penumpu langsung p

Dipindai dengan CamScanner

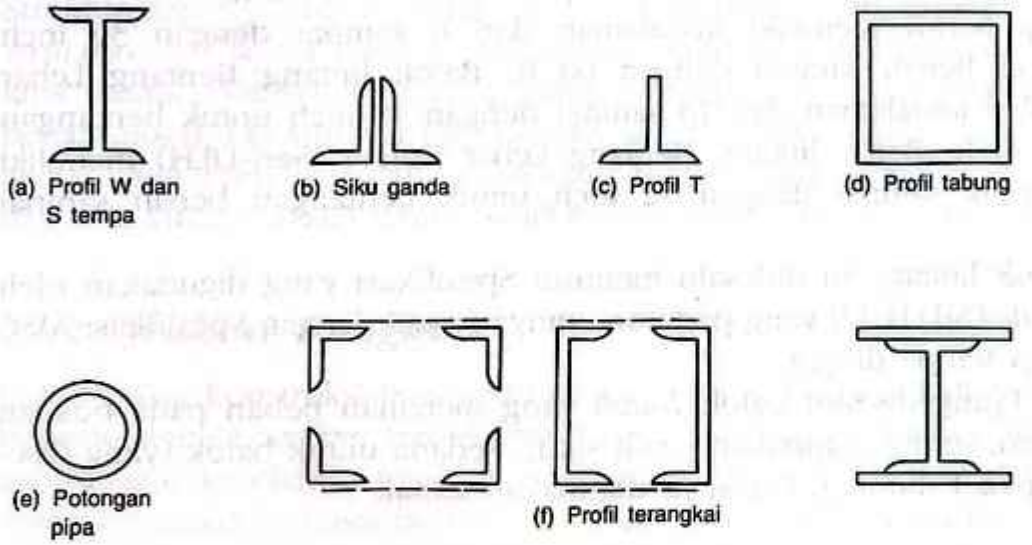


***Gambar 1.5.3** Batang-batang tarik tipikal*

balkon, kabel pada sistem atap gantung, dan sebagai kabel utama pada jembatan gantung serta penggantung yang mendukung jalan rayanya. Pada **Gambar 1.5.3** diperlihatkan sejumlah profil batang tarik, sedangkan desainnya (kecuali untuk faktor-faktor tertentu yang berkaitan dengan struktur berpendukung kabel dari tipe suspensi) akan dibicarakan dalam **Bab 3**.

1.5.2 Batang Tekan

Karena kekuatan batang tekan merupakan fungsi dari bentuk penampang lintangnya (radius girasi), pada umumnya luas penampangnya disebarkan sepraktis mungkin. Contoh-contoh batang yang mungkin akan mendapat gaya tekan aksial antara lain adalah batang penarik pada kerangka serta kolom-kolom interior dalam bangunan. Kendatipun kondisinya begitu ideal, gaya tekan aksial murni tak akan tercapai; dengan demikian, desain untuk pembebanan "aksial" berdasar asumsi bahwa efek dari suatu *bending* (lentur) yang kecil dan terjadi bersamaan dapat



***Gambar 1.5.4** Batang tekan tipikal*

Dipindai dengan CamScanner

diabaikan. Dalam **Gambar 1.5.4** diperlihatkan sejumlah profil batang tekan, sedangkan perilaku serta desainnya dapat dijumpai dalam **Bab 6**.

1.5.3 Balok

Balok merupakan batang-batang yang mendapat beban transversal. Balok efisien bila luasannya didistribusikan sedemikian rupa sehingga berada pada jarak praktis terjauh dari sumbu netralnya. Profil balok yang paling banyak nakan adalah flens lebar (**W**) dan balok-**I** (**S**) (**Gambar 1.5.5*a***), serta "profi lain" (**M**) yang mencakup profil-profil **I** tempa yang lebih kecil.

Untuk profil-profil dengan badan yang lebih dalam dan lebih tipis yang ditempa secara ekonomis, digunakan profil-profil **I** hasil pengelasan (**Ga 1.5.5*b***), termasuk balok-balok yang diperkuat dengan pelat.

Untuk bentangan sedang yang menanggung beban ringan, sering digu "balok lintang" badan terbuka (**Gambar 1.5.5*c***). Batang ini merupakan kerangka tipe tarik (*chord*) sejajar yang digunakan untuk mendukung lant atap. Bajanya dapat berasal dari proses tempa panas maupun dingin. Balok lintang sedemikian ini diberi nama "Seri-**K**", "Seri-**LH**", dan "Seri-**DLH**". sesuai untuk batang-batang yang mempunyai dukungan langsung dari lant dak atap pada bangunan. Seri-LH dan Seri-DLH dikenal sebagai Bentang Leb Bentang Lebar Dalam. Balok lintang Baja Bentang Lebar dibuat di bengkel "mendukung langsung lantai atau slab lantai atau dak yang ada di antara di dinding, balok-balok, dan batang-batang struktural utama" [1.13]. Balok l Bentang Lebar Dalam digunakan untuk "mendukung langsung slab lantai at yang ada di antara dinding, balok-balok, dan batang-batang struktural utama" Desain penarik untuk kerangka dengan Seri-K didasarkan atas kekuatan sebesar 50 ksi (345 MPa), sementara penampang badannya dapat menggu 36 ksi (248 MPa) atau 50 ksi (345 MPa). Untuk Seri-LH dan Seri-DLH, desain serta penampang badannya harus berdasarkan kekuatan leleh paling tidak 36 ksi (248 MPa) namun tidak lebih besar daripada 50 ksi (345 MPa).

Balok lintang Seri-K memiliki kedalaman dari 8 sampai dengan 3 untuk bentangan bersih sampai dengan 60 ft. Balok lintang Bentang (Seri-LH) memiliki kedalaman dari 18 sampai dengan 48 inch untuk ber bersih sampai 96 ft. Balok lintang Bentang Lebar Dalam (Seri-DLH) m kedalaman dari 52 sampai dengan 72 inch untuk bentangan bersih dengan 144 ft.

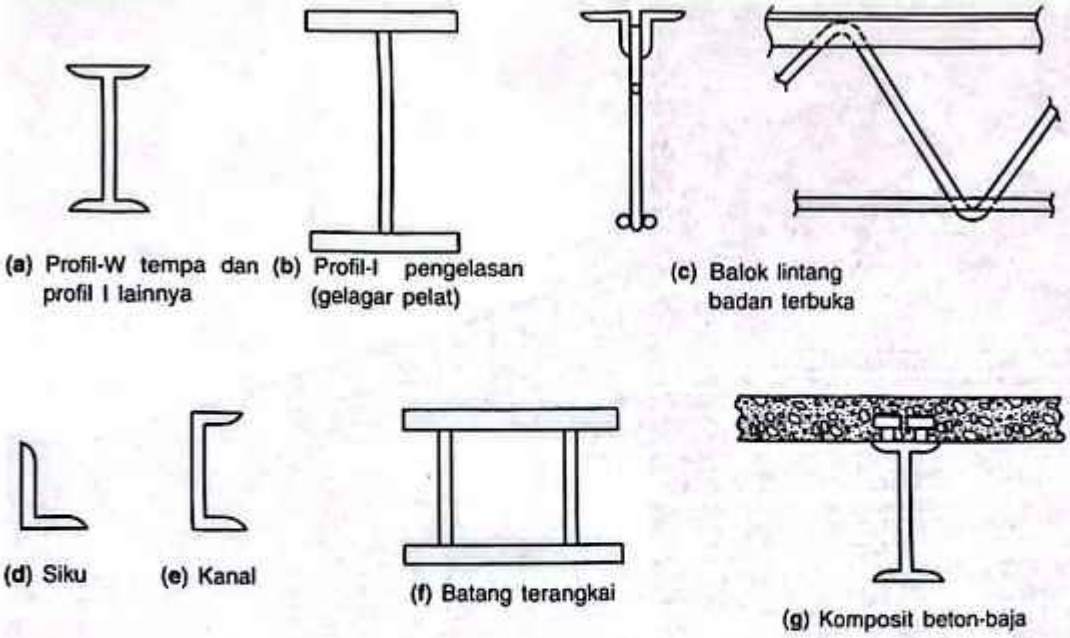
Kesemua balok lintang ini didesain menurut Spesifikasi yang digunak *Steel Joist Institute* (SJI) [1.13] yang pada umumnya sesuai dengan Spesifik [1.11] untuk baja tempa dingin.

Untuk balok (yang disebut balok *lintel*) yang menahan beban pada jendela dan pintu, sering digunakan profil siku; sedang untuk balok (ya but *girt*) pada panel dinding, biasanya digunakan kanal.

---

* Periksalah **Bagian 2.4** untuk definisi ini.

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 1.5.5 *Balok tipikal*

1.5.4 Beban Lentur dan Aksial

Bila terjadi tarikan atau tekanan bersama-sama dengan lenturan, muncullah permasalahan tegangan kombinasi, dan tipe batang yang digunakan akan tergantung pada tipe tegangan yang lebih dominan. Suatu batang yang mendapatkan tekanan dan lenturan aksial biasanya disebut sebagai *kolom-balok*, sedang perilaku dan desainnya akan dibahas dalam **Bab 12**.

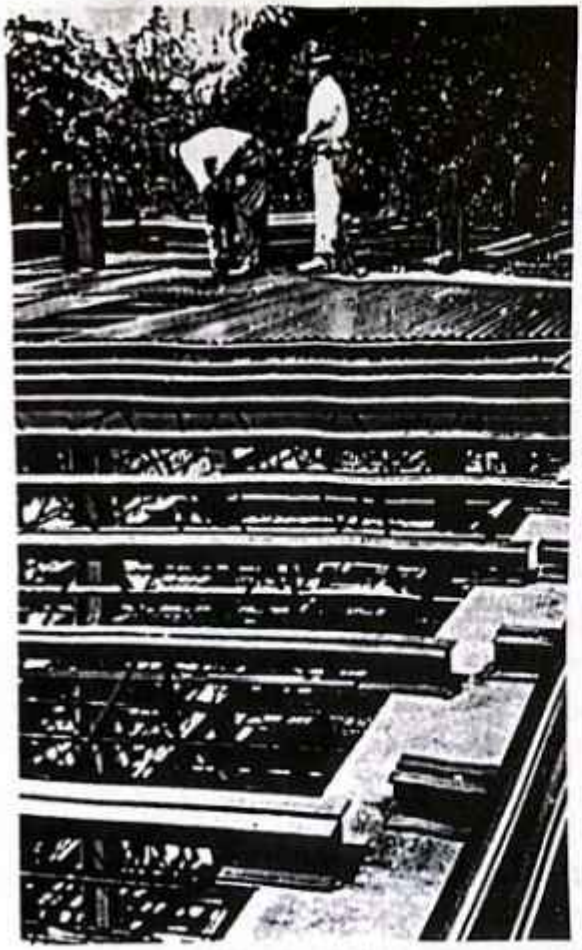
1.6 Struktur Baja

Struktur dapat dibagi menjadi tiga kategori umum: (*a*) struktur rangka (*framed structure*), di mana elemen-elemennya kemungkinan terdiri dari batang-batang tarik, balok, dan batang-batang yang mendapatkan beban lentur kombinasi dan beban aksial; (*b*) struktur tipe cangkang (*shell-type structure*), di mana tegangan aksial lebih dominan; dan (*c*) struktur tipe suspensi (*suspension-type structure*), di mana tarikan aksial lebih mendominasi sistem pendukung utamanya.

1.6.1 Struktur Rangka

Kebanyakan konstruksi bangunan tipikal termasuk dalam kategori ini. Bangunan banyak lantai biasanya terdiri dari balok dan kolom, baik yang terhubungkan secara *rigid* atau hanya terhubung sederhana dengan penopangan diagonal untuk menjaga stabilitas. Meskipun suatu bangunan banyak lantai bersifat tiga dimensional, namun biasanya bangunan tersebut didesain sedemikian rupa sehingga lebih kaku pada salah satu arah ketimbang arah lainnya. Dengan demikian, ba-

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 1.6.1 Balok lintang lantai (kerangka bidang) dan pembuatan dak baja. (Foto oleh: C.G. Salmo

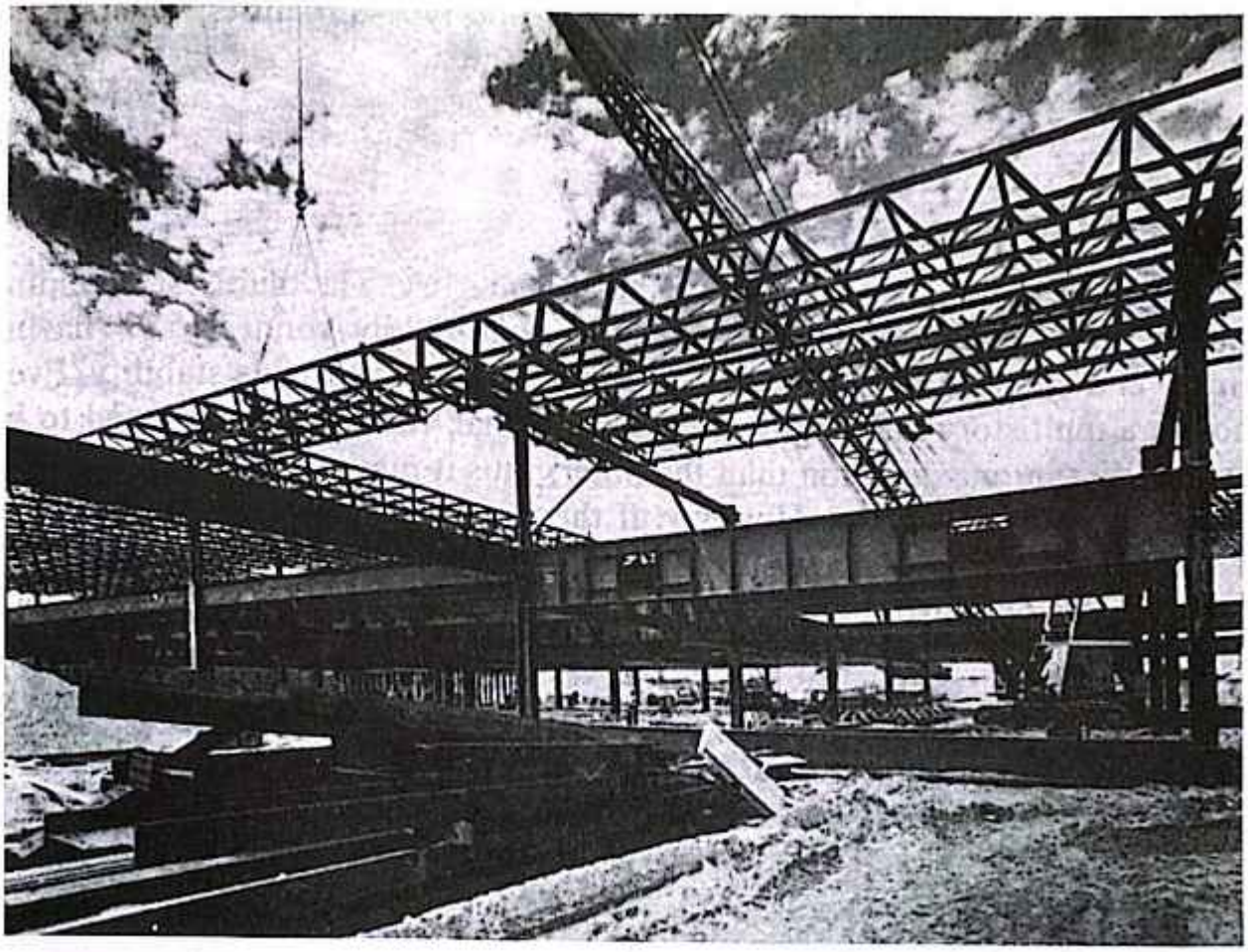
ngunan tersebut dapat diperlakukan sebagai serangkaian rangka (*fra* bidang. Meskipun demikian, bila perangkaan sedemikian rupa sehingga p laku batang-batangnya pada salah satu bidang cukup mempengaruhi perila pada bidang lainnya, rangka tersebut harus diperlakukan sebagai rangka ru tiga dimensi.

Bangunan-bangunan industrial dan bangunan-bangunan satu lantai tertei seperti gereja, sekolah, dan gelanggang, pada umumnya menggunakan struk rangka baik secara keseluruhan maupun hanya sebagian saja. Khususnya sist atap yang mungkin terdiri dari serangkaian kerangka datar (*lihat* **Gambar 1.6** kerangka ruang (*lihat* **Gambar 1.6.2**), sebuah kubah (*lihat* **Gambar 1.6.3**), a mungkin pula bagian dari suatu rangka datar atau rangka kaku satu lantai d gan pelana.

Jembatan pun kebanyakan merupakan struktur rangka, seperti balok dan g gar pelat (*lihat* **Gambar 1.6.5**), atau kerangka yang biasanya menerus (*l* **Gambar 1.6.5**).

Sebagian besar isi buku ini membahas perilaku dan desain elemen-ele dalam struktur rangka.

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 1.6.2 *Kerangka atap ruang yang dipasang bagian demi bagian. Terlihat pula gelagar pelat pada tingkat yang lebih rendah dengan pelat pengaku dan pengaku khusus di seputar lobang-lobang persegi di sepanjang badan gelagar. Upjohn Office Building, Kalamazoo, Michigan. (Foto milik Whitehead and Kales Company)*

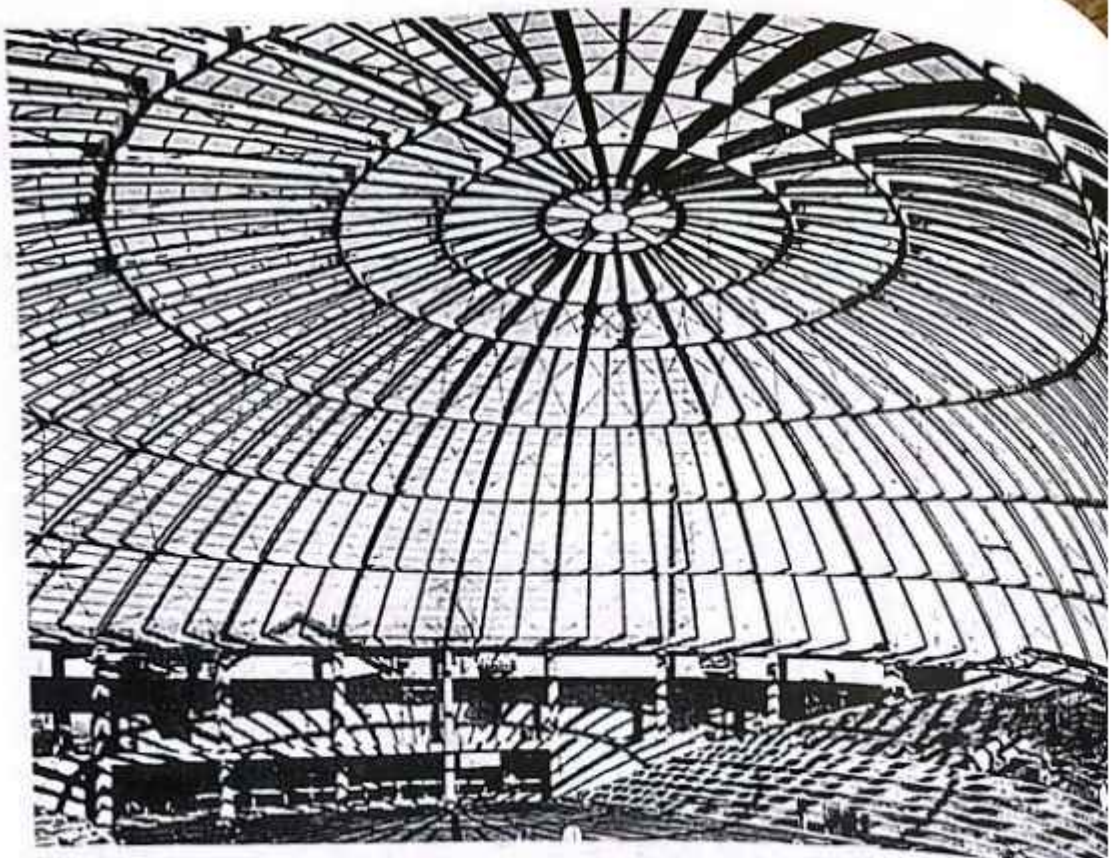
1.6.2 Struktur Tipe Cangkang

Dalam tipe struktur ini, selain melayani fungsi bangunan, kubah juga bertindak sebagai penahan beban. Salah satu tipe yang umum di mana tegangan utamanya berupa tarikan adalah bejana yang digunakan untuk menyimpan cairan (baik untuk temperatur tinggi maupun rendah), di antaranya yang paling terkenal adalah tanki air. Bejana penyimpan, tanki, dan badan kapal merupakan contoh-contoh lainnya. Pada banyak struktur dengan tipe cangkang, dapat digunakan pula suatu struktur rangka yang dikombinasikan dengan cangkang tersebut.

Pada dinding-dinding dan atap datar, sementara berfungsi bersama dengan sebuah kerangka kerja, elemen-elemen "kulit"-nya dapat bersifat tekan. Contoh lain yang serupa adalah badan pesawat terbang.

Struktur tipe cangkang biasanya didesain oleh seorang spesialis; dan buku ini tidak membahasnya.

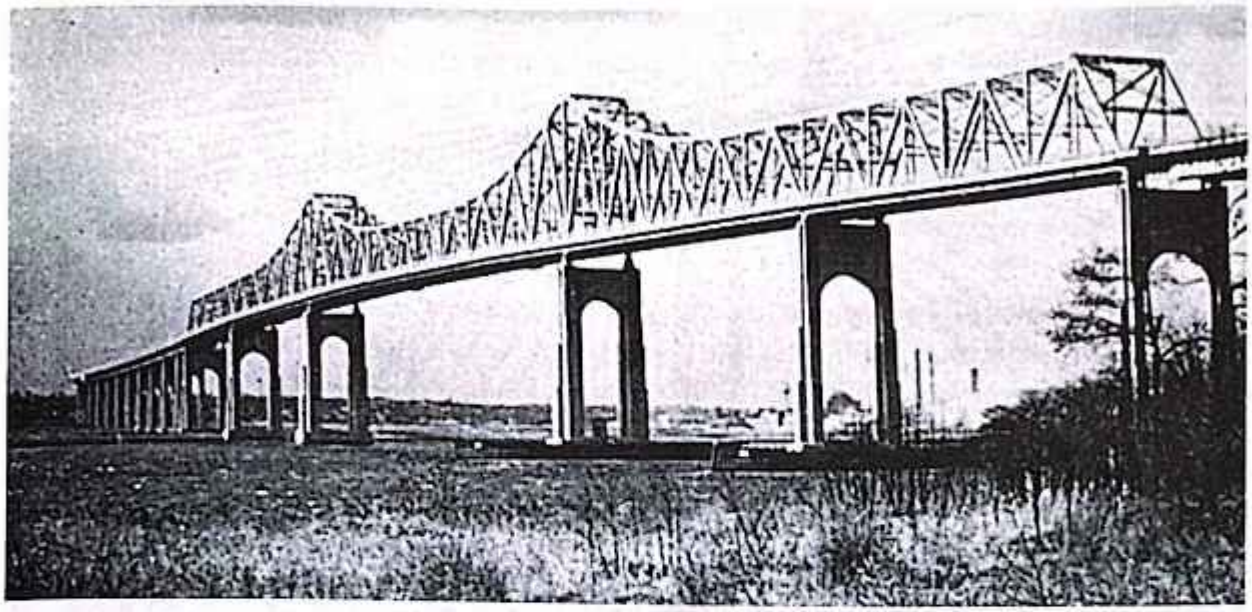
Dipindai dengan CamScanner



Gambar 1.6.3 *Atap kubah, auditorium Brown University. Milik Bethlehem Steel Corporation.*

Gambar 1.6.4 *Gelagar pelat ortotropik menerus yang menyeberangi Missisipi River di St. Louis, Missisipi. (Foto oleh: C.G. Salmon)*

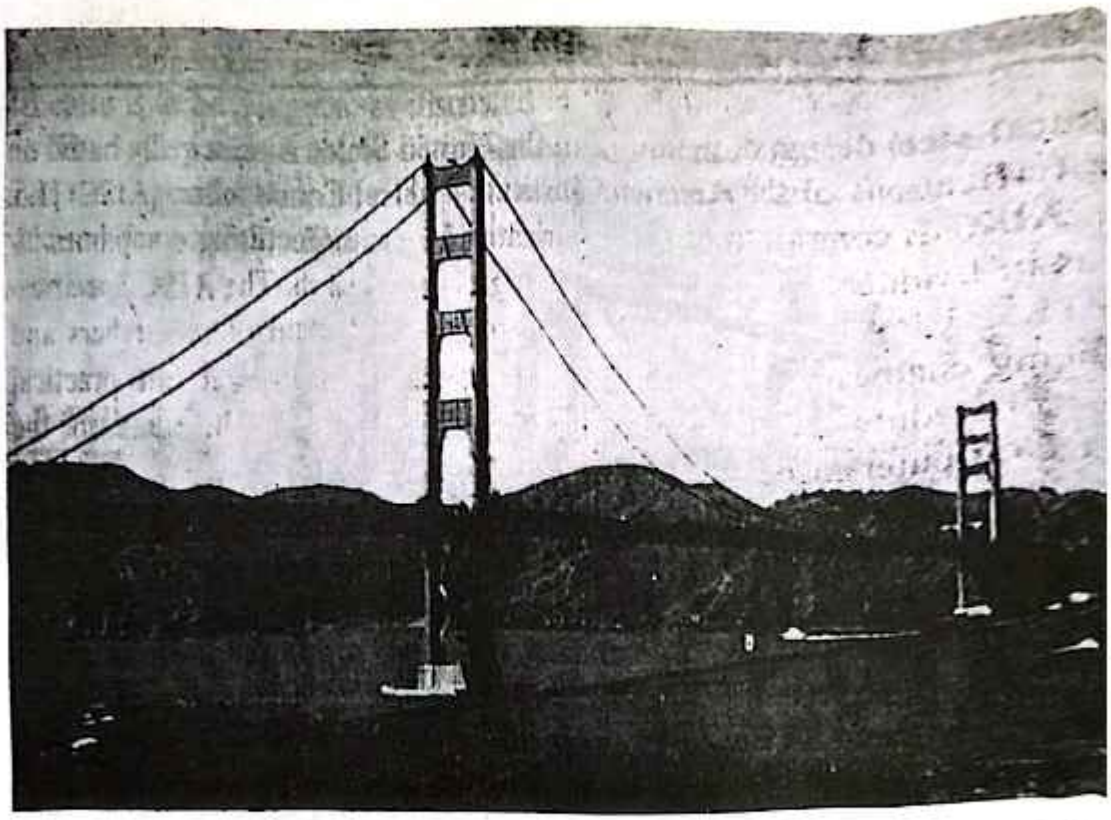
Dipindai dengan CamScanner



Gambar 1.6.5 *Jembatan kerangka menerus. Outerbridge Crossing, Staten Island, New York. (Foto oleh C.G. Salmon)*

Gambar 1.6.6 *Atap berpenggantung kabel untuk Madison Square Garden Sports and Entertainment Center, New York. Milik Bethlehem Steel Corporation.*

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 1.6.7 *Jembatan gantung. Golden Gate Bridge, San Francisco, California. (Foto oleh: C.G. Salm*

1.6.3 Struktur Tipe Suspensi

Pada struktur dengan tipe suspensi, kabel tarik merupakan elemen-elemen uta
Dalam **Gambar 1.6.6** terlihat sebuah atap yang dapat disebut sebagai ber
dukung kabel. Barangkali struktur yang paling populer dari jenis ini adalah j
batan gantung seperti **Gambar 1.6.7**. Biasanya subsistem dari struktur ini te
dari struktur kerangka, seperti misalnya rangka pengaku pada jembatan gant
Karena elemen tarik ini terbukti paling efisien dalam menahan beban, stru
dengan konsep ini semakin banyak dipergunakan.

Telah dibangun pula banyak struktur khusus dengan berbagai kombinasi
tipe rangka, cangkang, dan suspensi. Meskipun demikian, seorang desainer s
sialis dalam tipe struktur cangkang ini pun pada dasarnya harus juga memah
desain dan perilaku struktur rangka.

1.7 Spesifikasi dan Peraturan Bangunan

Desain baja struktur untuk bangunan-bangunan di Amerika Serikat terut
berdasarkan spesifikasi *American Institute of Steel Construction* (AISC) [1.5, 1.
AISC merupakan wadah dari para fabrikan, perusahaan pembuat baja, mau
perseorangan yang berminat terhadap riset dan desain baja. Sedangkan Spesifi
AISC [1.5, 1.15] merupakan hasil keputusan bersama dari para periset dan insi

Dipindai dengan CamScanner

praktisi. Usaha-usaha penelitian mereka telah disintesiskan ke dalam prosedur-prosedur desain praktis untuk memperoleh struktur yang aman dan ekonomis. Adanya komputer telah memungkinkan praktek desain dapat menggunakan aturan-aturan yang lebih terinci. Spesifikasi mutakhir yang menjadi acuan dari buku ini diambil dari *Specification for Structural Steel Buildings – Allowable Stress Design and Plastic Design* [1.5] terbitan tahun 1989 dan *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings* [1.15] terbitan tahun 1986.

Spesifikasi merupakan serangkaian aturan yang penggunaannya bertujuan agar keamanan lebih terjamin. Walaupun telah ada spesifikasi, desainer harus tetap memahami perilaku yang dikenai aturan tersebut. Sebab bila tidak, mungkin akan dihasilkan suatu desain yang absurd, terlalu konservatif, dan kadangkala tidak cukup aman. Penulis berpendapat bahwa sebenarnya mustahil menuliskan aturan yang sepenuhnya dapat berlaku untuk segala macam situasi. Yang pertama-tama harus dikuasai justru pemahaman mengenai perilaku, baru kemudian diikuti dengan penerapan aturan. Apa pun aturan yang digunakan, *tanggungjawab terakhir terhadap keamanan struktur tetap terletak pada pundak desainer.*

Spesifikasi yang diambil oleh AISC pun sebenarnya semula sekedar serangkaian anjuran dari sejumlah ahli dalam bidang riset dan desain baja. Hanya apabila badan-badan pemerintah seperti instansi lokal atau negara bagian, atau pun federal, yang memiliki tanggung jawab terhadap keselamatan umum, telah mengambil dan menetapkannya sebagai spesifikasi, misalnya *Load and Resistance Factor Design Specification*, 1986 [1.15], dalam peraturan bangunan, spesifikasi itu menjadi aturan hukum yang resmi.

Desain jembatan baja pada umumnya sesuai dengan spesifikasi dari *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [1.3]. Di Amerika Serikat, spesifikasi ini menjadi aturan hukum setelah diambil oleh negara-negara bagian (biasanya oleh departemen jalan raya negara bagian).

Jembatan kereta api didesain menurut spesifikasi yang diambil oleh *American Railway Engineering Association* (AREA) [1.4]. Dalam hal ini, perusahaan kereta api memiliki tanggung jawab terhadap keamanan, dan melalui organisasi itulah perusahaan-perusahaan perkereta-apian ini mengambil aturan-aturan demi terjaminnya desain yang aman.

Istilah *peraturan bangunan* (*building code*) kadangkala dipergunakan dalam arti yang sama dengan spesifikasi. Namun sebenarnya lebih tepat lagi bila dikatakan bahwa suatu peraturan bangunanan merupakan dokumen yang basisnya sangat luas, baik dokumen hukum seperti peraturan bangunan lokal atau negara bagian, atau dokumen yang dipakai secara luas meskipun tidak mempunyai kekuatan hukum dengan topik-topik yang sama luasnya dengan peraturan bangunan lokal atau negara bagian. Peraturan bangunan pada umumnya memperlakukan semua faset dalam hubungannya dengan keselamatan, seperti desain struktural, detail arsitektural, pemadam kebakaran, pemanasan dan pengkondisian udara, plambing, sanitasi, dan pencahayaan. Di lain pihak, spesifikasi kerapkali mengacu pada aturan-aturan yang dikemukakan oleh si arsitek atau insinyur yang berlaku hanya pada salah satu bangunan tertentu yang sedang dibangun.

Dipindai dengan CamScanner

Peraturan bangunan biasanya juga menentukan beban-beban standar yang h
rus ditanggung oleh desain struktur tersebut, seperti yang dibicarakan dala
Bagian 1.4.

Hendaknya para Pembaca tidak perlu merasa bingung dengan penggunaan sp
sifikasi dan aturan bangunan yang sering dipertukarkan. Sebaliknya, hendakny
para Pembaca dapat dengan jelas memahami mana yang secara hukum dipe
syaratkan bagi desain dan mana yang dapat dianggap sebagai anjuran saja.

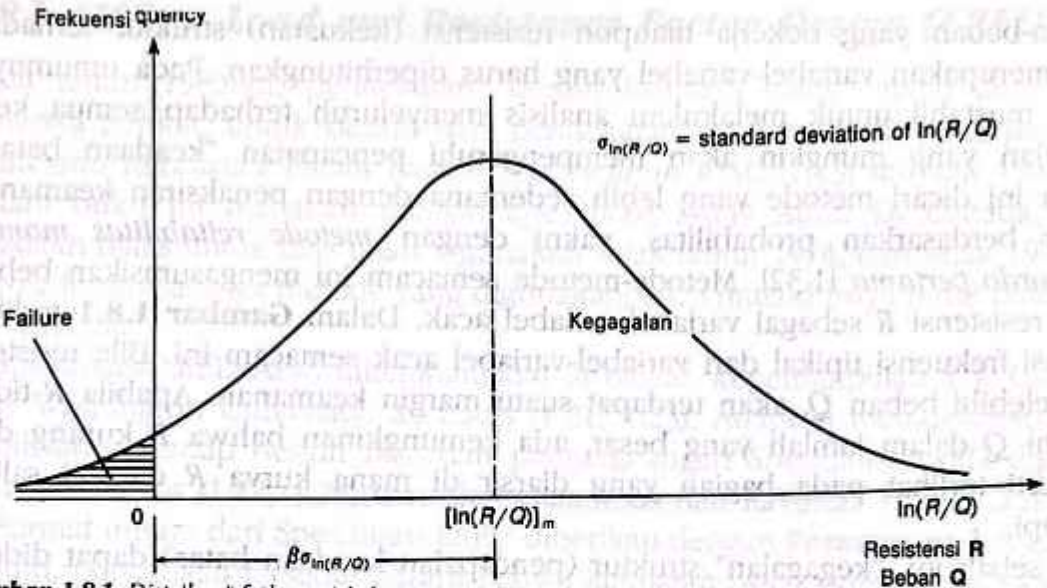
1.8 Filosofi Desain

Dewasa ini dipergunakan dua filosofi desain, *desain tegangan kerja* (yang diac
oleh AISC sebagai *Allowable Stress Design*) dan *desain keadaan batas* (yang diac
oleh AISC sebagai *Load and Resistance Factor Design*). Desain tegangan kerj
telah menjadi filosofi utama selama 100 tahun terakhir. Selama kurang lebih 2(
tahun ini, desain struktural telah bergeser menuju prosedur desain yang lebi
rasional dan berdasarkan pada probabilitas yang disebut sebagai desain "keadaa
batas" (*limit states*). Haaijer [1.26] dan Kennedy [1.27, 1.28] telah mempresen-
tasikan status mutakhir dari konsep keadaan batas beserta penggunaannya dalam
desain. Desain keadaan batas meliputi metode-metode yang umumnya disebu
sebagai "desain kekuatan ultimit" (*ultimate strength design*), "desain kekuatan"
(*strength design*), "desain plastik" (*plastic design*), "desain faktor beban" (*loa
factor design*), "desain batas" (*limit design*), dan sekarang "desain faktor resisten-
si dan beban" (*Load and Resistance Factor Design* = LRFD).

Struktur dan batang-batang struktur harus memiliki kekuatan yang cukup, seper-
ti kekakuan dan ketahanan yang cukup sehingga dapat berfungsi selama umu
layanan dari struktur tersebut. Desain harus menyediakan cadangan kekuatan di
atas yang diperlukan untuk menanggung beban layanan; yakni, struktur harus
memiliki sediaan terhadap kemungkinan kelebihan beban. Kelebihan beban dapa
terjadi akibat perubahan fungsi struktur, akibat terlalu rendahnya taksiran atas
efek-efek beban karena penyederhanaan berlebihan dalam analisis strukturalnya,
dan akibat variasi-variasi dalam prosedur konstruksinya. Di samping itu, harus
ada sediaan terhadap kemungkinan kekuatan material yang lebih rendah.
Penyimpangan dalam dimensi batang, meskipun dalam batas toleransi yang masih
dapat diterima, dapat mengakibatkan suatu batang memiliki kekuatan yang lebih
rendah ketimbang yang telah diperhitungkan. Material (baja untuk elemen batang
baut, dan las) mungkin saja memiliki kekuatan yang lebih kecil daripada yang
digunakan dalam perhitungan desain. Suatu profil baja mungkin saja memilik
tegangan leleh di bawah harga minimum yang dispesifikasikan, namun masih
berada dalam batas-batas yang secara statistik masih dapat diterima.

Apa pun filosofinya, desain struktural harus memberikan keamanan yang cukup
baik terhadap kemungkinan *kelebihan beban* (*overload*) atau *kurang kekuata
(understrength*). Selama tiga puluh tahun terakhir ini [1.19, 1.20] telah berkem
bang studi mengenai unsur-unsur yang menentukan keamanan struktural
Dorongan yang utama berasal dari keinginan untuk menyelidiki kemungkina

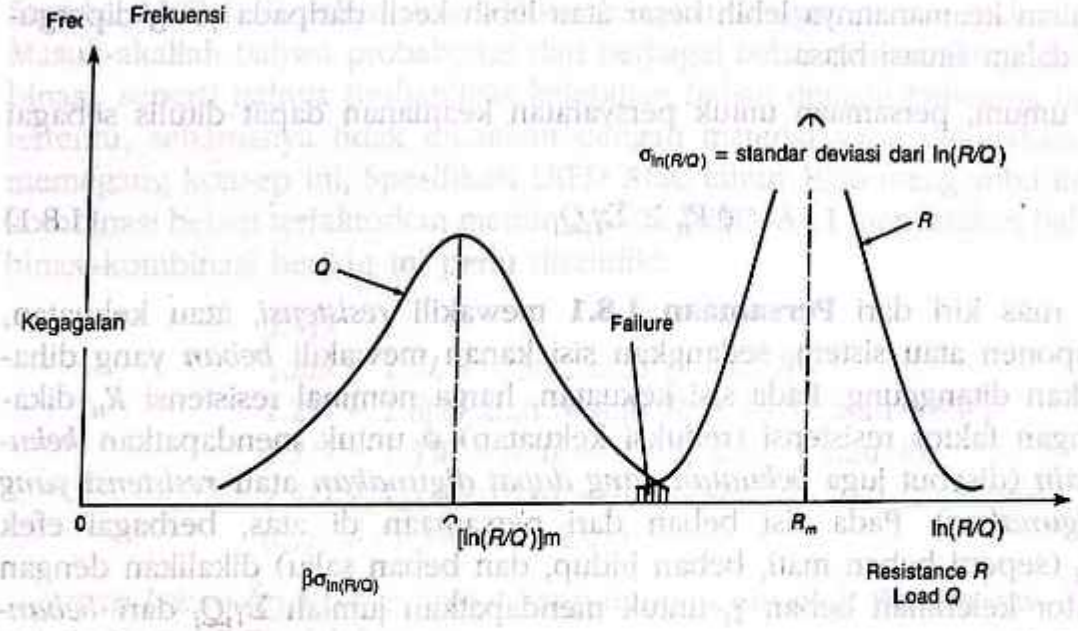
Dipindai dengan CamScanner



Gambar 1.8.1 *Distribusi frekuensi beban Q dan resistensi R.*

terjadinya "kegagalan" pada batang, penyambung, atau sistem dengan menggunakan berbagai metode probabilitas.

Namun, istilah "keadaan batas" lebih disukai ketimbang "kegagalan". *Keadaan batas* berarti "kondisi-kondisi di mana suatu struktur berhenti memenuhi fungsi yang diharapkan darinya" [1.27]. Keadaan batas pada umumnya dibagi menjadi dua kategori, *kekuatan* (*strength*) dan *kemampuan layanan* (*serviceability*). Keadaan batas kekuatan (yakni keamanan) merupakan fenomena-fenomena perilaku pada saat mencapai kekuatan duktil maksimum (yakni kekuatan plastik), tekukan, keletihan, retakan, lantakan, dan geseran. Keadaan batas kemampuan layanan menyangkut penggunaan bangunan, misalnya karena adanya defleksi, vibrasi, deformasi permanen, dan rekahan.



Gambar 1.8.2 *Indeks reliabilitas β*

Dipindai dengan CamScanner

Beban-beban yang bekerja maupun resistensi (kekuatan) struktur terhad
beban merupakan variabel-variabel yang harus diperhitungkan. Pada umumny
hampir mustahil untuk melakukan analisis menyeluruh terhadap semua ke
dakpastian yang mungkin akan mempengaruhi pencapaian "keadaan bata
Dewasa ini dicari metode yang lebih sederhana dengan penaksiran keaman
struktur berdasarkan probabilitas, yakni dengan *metode reliabilitas mom*
kedua ordo pertama [1.32]. Metode-metode semacam ini mengasumsikan beb
Q dan resistensi R sebagai variabel-variabel acak. Dalam **Gambar 1.8.1** terlih
distribusi frekuensi tipikal dari variabel-variabel acak semacam ini. Bila resiste
si R melebihi beban Q, akan terdapat suatu margin keamanan. Apabila R tid
melebihi Q dalam jumlah yang besar, ada kemungkinan bahwa R kurang d
Q seperti terlihat pada bagian yang diarsir di mana kurva R dan Q sali
menutupi.

Dari sebab itu, "kegagalan" struktur (pencapaian keadaan batas) dapat dide
nisikan dengan membandingkan R dan Q, atau dalam bentuk logaritmik $\ln(R/$
seperti **Gambar 1.8.2**. Pada kedua bentuk tersebut, "kegagalan" merupak
wilayah perpotongan. Jarak di antara garis kegagalan dengan nilai rata-rata d
fungsi $[\ln(R/Q)]$ didefinisikan sebagai perkalian β dengan standar deviasi σ d
fungsi itu. Pengali β disebut *indeks reliabilitas* (indeks kehandalan). Semak
besar β, semakin besar pula margin keamanannya.

Menurut rangkuman Pinkham [1.20], terdapat beberapa manfaat dari indeks re
abilitas β:

1. Indeks tersebut dapat menjadi penunjuk konsistensi keamanan bagi berbag
   komponen dan sistem yang menggunakan metode-metode desain tradisiona
2. Indeks ini dapat digunakan untuk menetapkan metode-metode baru yang aka
   memiliki margin keamanan yang konsisten.
3. Indeks ini dapat pula digunakan untuk secara rasional menganekaragamka
   margin-margin keamanan untuk komponen-komponen dan sistem-sistem yan
   kebutuhan keamanannya lebih besar atau lebih kecil daripada yang diperg
   nakan dalam situasi biasa.

Secara umum, persamaan untuk persyaratan keamanan dapat ditulis sebag
berikut:

$$\phi R_n \geq \Sigma \gamma_i Q_i \qquad (1.8$$

di mana ruas kiri dari **Persamaan 1.8.1** mewakili *resistensi*, atau kekuata
dari komponen atau sistem; sedangkan sisi kanan mewakili *beban* yang dih
rapkan akan ditanggung. Pada sisi kekuatan, harga nominal resistensi R_n dik
likan dengan faktor resistensi (reduksi kekuatan) ϕ untuk mendapatkan *kek*
atan desain (disebut juga *kekuatan yang dapat digunakan* atau *resistensi ya*
dapat digunakan). Pada sisi beban dari persamaan di atas, berbagai ef
beban Q_i (seperti beban mati, beban hidup, dan beban salju) dikalikan deng
faktor-faktor kelebihan beban γ_i untuk mendapatkan jumlah $\Sigma \gamma_i Q_i$ dari *beba*
beban terfaktor.

Dipindai dengan CamScanner

1.8.1 AISC — Load and Resistance Factor Design (LRFD)

Pada tahun 1980-an, pendekatan "desain keadaan batas" mulai diterima. Di Amerika Serikat, untuk desain baja pendekatan ini berpuncak pada penetapan *Load and Resistance Factor Design Specification* AISC [1.15] terbitan 1986, yang dalam buku ini diacukan sebagai Spesifikasi LRFD AISC. Di Canada, desain keadaan batas untuk baja telah digunakan sejak tahun 1974, dan sejak 1978 telah menjadi satu-satunya metode yang digunakan; edisi mutakhirnya terbit pada tahun 1984 [1.18].

Spesifikasi LRFD AISC dikembangkan di bawah kepemimpinan T.V. Galambos dari Washington University, St. Louis [1.21, 1.23]. Adaptasi metode-metode probabilistik terhadap desain baja dan pengembangan Spesifikasi LRFD dijelaskan oleh Galambos [1.22, 1.24] dan oleh Galambos dan Ravindra [1.23, 1.25].

Format umum dari Spesifikasi LRFD diberikan dengan **Persamaan 1.8.1**. Secara umum, persamaan tersebut berarti bahwa kekuatan (ϕR_n) yang disediakan dalam desain paling tidak harus sama dengan pemfaktoran beban-beban yang bekerja ($\Sigma\gamma_i Q_i$). Subskrip i menunjukkan bahwa harus ada isian untuk masing-masing tipe beban Q_i yang bekerja, seperti beban mati (D), beban hidup (L), beban angin (W), beban salju (S), dan beban gempa (E). Faktor γ_i mungkin saja berlainan untuk masing-masing tipe beban.

Spesifikasi LRFD AISC didasarkan atas hal-hal berikut ini:

1. Suatu model atas dasar probabilitas [1.23, 1.25, 1.32, 1.33]
2. Kalibrasi dengan Spesifikasi LRFD AISC tahun 1978.
3. Evaluasi atas dasar pertimbangan dan pengalaman di masa lalu, disertai studi-studi lembaga desain atas struktur-struktur yang representatif.

Pengembangan kriteria-kriteria beban berdasarkan probabilitas oleh Galambos, Ellington, MacGregor, dan Cornell [1.32, 1.33] mengantar kepada kombinasi-kombinasi beban terfaktor menurut Standar ANSI [1.2] terbitan 1982. Penggunaan Standar ANSI [1.2] dalam desain dikembangkan dengan *semua* material struktur. Masuk-akallah bahwa probabilitas dari berbagai beban yang bekerja dalam kombinasi, seperti halnya probabilitas kelebihan beban dengan beberapa tipe beban tertentu, seharusnya tidak dikaitkan dengan material yang digunakan. Dengan memegang konsep ini, Spesifikasi LRFD AISC tahun 1986 mengambil kombinasi-kombinasi beban terfaktorkan menurut ANSI. LRFD–A4.1 menyatakan bahwa kombinasi-kombinasi berikut ini perlu diselidiki:

$$1.4D \tag{1.8.2}$$

$$1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) \tag{1.8.3}$$

$$1.2D + 1.6(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) + (0.5L \text{ atau } 0.8W) \tag{1.8.4}$$

$$1.2D + 1.3W + 0.5L + 0.5(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) \tag{1.8.5}$$

$$1.2D + 1.5E + (0.5L \text{ atau } 0.2S) \tag{1.8.6}$$

$$0.9D - (1.3W \text{ atau } 1.5E) \tag{1.8.7}$$

Beban-beban layanan nominal yang ditunjukkan oleh **Persamaan 1.8.2** sampai dengan **1.8.7** adalah:

Dipindai dengan CamScanner

D = beban mati (beban gaya berat dari elemen-elemen struktural dan tempelan permanen)
L = beban hidup (beban peralatan yang dapat bergerak dan okupansi gaya berat)
L_r = beban hidup atap
W = beban angin
S = beban salju
E = beban gempa
R = beban air hujan atau beban es

Perhatikan bahwa D, L, W, S, dan sebagainya merupakan beban-beban menurut artian umum yang mencakup momen lentur, gaya geser, gaya aksial, dan momen puntir. Kerapkali gaya-gaya internal ini disebut sebagai *efek-efek beban*. Dengan demikian, simbol D berarti beban mati, momen beban mati, gaya geser beban mati, gaya aksial beban mati, dan seterusnya. Penjelasan statistik yang menyangkut faktor-faktor beban salju dan angin diberikan oleh Ravindra, Cornell, dan Galambos [1.34].

1.8.2 AISC — Allowable Stress Design (ASD)

Metode tradisional dari Spesifikasi AISC adalah *allowable stress design* (*desain tegangan yang diijinkan*) yang disebut pula *working stress design* (*desain tegangan kerja*). Dalam *Allowable Stress Design* (ASD) fokusnya terletak pada kondisi-kondisi beban layanan (yakni tegangan-tegangan unit yang mengasumsikan struktur elastik) yang memenuhi persyaratan keamanan (kekuatan yang cukup) bagi struktur tersebut. Spesifikasi AISC tahun 1989 untuk *Allowable Stress Design*, dalam buku ini diacukan sebagai Spesifikasi ASD.

Untuk *Allowable Stress Design*, **Persamaan 1.8.1** dapat dirumuskan ulang sebagai berikut:

$$\frac{\phi R_n}{\gamma} \geq \Sigma Q_i \qquad (1.8.8)$$

Dalam filosofi ini, semua beban diasumsikan sebagai memiliki variabilitas rata-rata yang sama. Keseluruhan variabilitas beban-beban dan kekuatan-kekuatan ditempatkan pada ruas kekuatan dari persamaan tersebut. Untuk menyelidiki persamaan tersebut menurut *Allowable Stress Design* untuk balok, ruas kiri hendaknya mewakili kekuatan balok nominal M_n yang dibagi oleh suatu faktor keamanan FS (sama dengan ϕ/γ), sedangkan ruas kanan meakili momen lentur beban layanan M yang bekerja sebagai hasil dari semua tipe beban. Dengan demikian, **Persamaan 1.8.8** akan menjadi:

$$\frac{M_n}{\text{FS}} \geq M \qquad (1.8.9)$$

Istilah *Allowable Stress Design* menyiratkan suatu perhitungan tegangan elastik.

Dipindai dengan CamScanner

Persamaan 1.8.9 dapat dibagi dengan I/c (yakni momen inersia I dibagi dengan jarak c dari sumbu netral ke serat terluar) untuk mendapatkan satuan-satuan tegangan. Dengan demikian, bila diasumsikan bahwa kekuatan nominal M_n tercapai pada saat tegangan serat terjauh merupakan tegangan leleh F_y (yakni $M_n = F_y I/c$), **Persamaan 1.8.9** akan menjadi:

$$\frac{F_y}{\text{FS}} \frac{I/c}{I/c} \geq \frac{M}{I/c} \tag{1.8.10}$$

atau:

$$\frac{F_y}{\text{FS}} \geq \left[f_b = \frac{Mc}{I} \right] \tag{1.8.11}$$

Dalam ASD, F_y/FS akan menjadi tegangan yang diijinkan F_b dan f_b akan menjadi tegangan elastik hitung dalam beban layanan penuh. Bila kekuatan nominal final M_n telah didasarkan atas pencapaian suatu tegangan F_{cr} yang lebih sedikit ketimbang F_y karena, misalnya saja tekukan, tegangan yang diijinkan F_b akan sama dengan F_{cr}/FS. Dengan demikian, kriteria keamanan dalam ASD dapat ditulis sebagai:

$$f_b \leq \left[F_b = \frac{F_y}{\text{FS}} \text{ atau } F_b = \frac{F_{cr}}{\text{FS}} \right] \tag{1.8.12}$$

Tegangan-tegangan ijin dari Spesifikasi ASD [1.5] diturunkan dari kekuatan yang mungkin dicapai oleh struktur bila struktur tersebut mengalami kelebihan beban. Bila profilnya cukup kenyal (*ductile*) dan tidak terjadi tekukan, regangan yang lebih besar daripada "lelehan yang pertama" ragangan $\epsilon_y = F_y/E_s$ dapat terjadi pada profil tersebut (E_s merupakan modulus elastisitas). Perilaku tak elastik kenyal semacam itu *memungkinkan* lebih banyak beban dapat ditanggung daripada yang mungkin terjadi bila struktur tersebut masih sepenuhnya elastik. Dalam hal semacam itu, tegangan ijin dinaikkan. Bila kekuatan dibatasi oleh tekukan atau suatu perilaku lainnya sedemikian rupa sehingga tegangannya tidak mencapai tegangan lelehnya, tegangan ijinnya diturunkan.

Persyaratan layanan seperti batas-batas defleksi selalu diteliti pada kondisi-kondisi beban layanan: apakah prosedur desain LRFD atau ASD telah digunakan sehingga memenuhi persyaratan keamanan.

1.8.3 AISC – Desain Plastik

Secara tradisional, Bagian 2 dari Spesifikasi AISC disebut *Desain Plastik. Specifications for Structural Steel Buildings* [1.5] tahun 1989 mengandung Desain Plastik pada Bab N. Desain Plastik merupakan suatu kasus khusus dari desain keadaan batas, di mana keadaan batas untuk kekuatan adalah tercapainya *kekuatan momen plastik* M_p. Kekuatan momen plastik merupakan kekuatan

Dipindai dengan CamScanner

momen pada saat semua serat dari penampang lintang berada pada tegangan leleh F_y (satu sisi dari sumbu netral berada dalam keadaan tekan sedang sisi lainnya tarik). Desain plastik tidak mengijinkan penggunaan keadaan-keadaan batas lainnya, seperti ketidakstabilan, keletihan, atau retakan getas. Filosofi desain seperti yang digunakan oleh AISC berlaku untuk batang-batang lentur termasuk balok-kolom, dan untuk batang-batang yang dapat diwujudkan dengan **Persamaan 1.8.1**. Kemudian dengan memisalkan $R_n = M_p$ dan $\gamma_i/\phi = 1.7$ **Persamaan 1.8.1** menjadi:

$$M_p \geq 1.7 \Sigma Q_i \tag{1.8.13}$$

Provisi untuk kelebihan beban dan kekurangan kekuatan dikombinasikan ke dalam suatu faktor tunggal 1.7 yang digunakan untuk semua beban gaya berat. Kekuatan nominal *harus* merupakan kekuatan momen plastik M_p. Karena desain plastik merupakan kasus khusus dari desain keadaan batas dan secara lebih rasional tercakup dalam Spesifikasi LRFD AISC, desain plastik tidak lagi diperlakukan sebagai sebuah topik khusus seperti dalam beberapa edisi sebelumnya. Desain plastik menjadi sebuah komponen LRFD.

Filosofi desain keadaan batas seperti yang dikodifikasikan dalam LRFD memungkinkan desainer mendapatkan pendekatan yang lebih rasional terhadap desain ketimbang yang telah tersedia dalam ASD atau Desain Plastik yang filosofinya diberikan secara garis besar dalam beberapa paragraf berikut ini. Beedle [1.29] telah memberikan suatu rangkuman yang bagus mengenai keuntungan penggunaan LRFD.

1.9 Faktor-faktor Keamanan — Perbandingan antara ASD dan LRFD

1.9.1 Allowable Stress Design (ASD)

"Faktor keamanan" FS yang digunakan dalam **Persamaan 1.8.9** sampai dengan **1.8.12** tidak secara sengaja ditentukan dengan metode-metode probabilistik. Harga-harga dalam Spesifikasi ASD AISC [1.5] telah digunakan bertahun-tahun dan merupakan hasil pengalaman dan kebijaksanaan. Jelaslah bahwa keamanan yang diinginkan harus merupakan kombinasi dari ekonomi dan statistik. Jelas pula bahwa tidak ekonomislah mendesain suatu struktur yang probabilitas kegagalannya sama dengan nol. Sebelum Spesifikasi LRFD AISC [1.15] dikembangkan, Spesifikasi-spesifikasi AISC dari tahun 1924 sampai dengan 1978 tidak memberikan penalaran bagi tegangan-tegangan ijin yang diberikannya.

Orang dapat saja menyatakan bahwa resistensi minimum harus melebihi beban terpakai maksimum dengan suatu jumlah tertentu. Misalkan beban sebenarnya melebihi beban layanan sejumlah ΔQ, sedang resistensi aktualnya lebih kecil dari yang dihitung dengan selisih sebesar ΔR. Suatu struktur yang mencukupi akan memiliki:

Dipindai dengan CamScanner

$$R_n - \Delta R_n = Q + \Delta Q$$

$$R_n(1 - \Delta R_n/R_n) = Q(1 + \Delta Q/Q) \qquad (1.9.1)$$

Garis batas keamanan, atau "faktor keamanan" akan merupakan perbandingan antara kekuatan nominal R_n dengan beban layanan nominal Q; atau

$$\text{FS} = \frac{R_n}{Q} = \frac{1 + \Delta Q/Q}{1 - \Delta R_n/R_n} \qquad (1.9.2)$$

Persamaan 1.9.2 melukiskan efek dari kelebihan beban ($\Delta Q/Q$) dan kurangnya kekuatan ($\Delta R_n/R_n$); meskipun demikian, persamaan ini tidak mengidentifikasikan faktor-faktor yang ikut berpengaruh pada yang mana pun dari keduanya. Bila diasumsikan bahwa kelebihan beban ($\Delta Q/Q$) kebetulan 40% lebih besar daripada nilai nominalnya, dan bahwa kekurangan kekuatannya ($\Delta R_n/R_n$) kebetulan 15% lebih kecil daripada nilai nominalnya, akibatnya:

$$\text{FS} = \frac{1 + 0.4}{1 - 0.15} = \frac{1.4}{0.85} = 1.65$$

Tentu saja perhitungan di atas terlalu disederhanakan, namun setidaknya mampu menunjukkan suatu skenario yang mungkin dilakukan untuk memperoleh harga FS AISC tradisional sebesar 1.67 yang digunakan sebagai nilai dasar dalam *Allowable Stress Design*. Pembagian dengan 1.67 seperti dalam **Persamaan 1.8.12** akan memberikan pengali sebesar 0.60 terhadap F_y atau F_{cr}.

Harga dasar sebesar 1.67 digunakan untuk batang tarik dan balok, dan harga ini merupakan batas bawah untuk kolom dengan panjang sama dengan nol. Untuk kolom panjang digunakan harga sebesar 1.92, dan untuk sambungan digunakan harga sebesar 2.5 sampai 3. Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa penggunaan harga-harga ini untuk γ/ϕ dalam **Persamaan 1.8.8** masih tetap memberikan keamanan "yang nyata" terhadap *ketidaktahuan* akan terjadinya "kegagalan"!

1.9.2 Load and Resistance Factor Design (LRFD)

Seperti yang dibicarakan dalam **Bagian 1.8**, faktor-faktor untuk kelebihan beban merupakan variabel yang tergantung pada tipe beban, dan kombinasi-kombinasi beban yang difaktorkan yang harus diperhitungkan adalah yang diberikan oleh Standar ANSI [1.2] dan LRFD-A4.1, dan diberikan dalam **Persamaan 1.8.2** sampai dengan **1.8.7**. Bagian lain dari sediaan yang berkaitan dengan keamanan adalah faktor ϕ yang disebut *faktor resistensi*. Faktor resistensi ϕ bervariasi menurut tipe batang dan keadaan batas yang sedang diperhitungkan. Berikut ini diberikan beberapa faktor resistensi ϕ yang representatif:

Dipindai dengan CamScanner

Batang Tarik (LRFD-D1)

ϕ_t = 0.90 untuk keadaan batas *leleh*
ϕ_t = 0.75 untuk keadaan batas *retakan*

Batang Tekan (LRFD-E2)

ϕ_c = 0.85

Balok (LRFD-F2.2)

ϕ_b = 0.90

Pengelasan (LRFD–Tabel J2.3)

ϕ = sama untuk semua tipe kerja, yakni tarik, lentur, dan sebagainya

Penyambung (baut A325) (LRFD–Tabel J3.2)

ϕ = 0.75 untuk kekuatan tarik
ϕ = 0.65 untuk kekuatan geser

Untuk menentukan keamanan yang cukup dengan menggunakan metode-metode probabilistik, logaritma natural dari resistensi R dibagi dengan beban Q, yakni bahwa $\ln(R/Q)$, seperti dalam **Gambar 1.8.2**, dapat diperlakukan sebagai suatu variabel random . Hal ini akan lebih sederhana ketimbang bekerja dengan dua kelompok variabel random (R dan Q) seperti dalam **Gambar 1.8.1**. Bila $\ln(R/Q) < 1$, keadaan batas sudah akan terlampaui, dan bagian yang diarsir dari **Gambar 1.8.2** merupakan probabilitas dari kejadian ini. Metode yang digunakan untuk mengembangkan LRFD menggunakan *nilai rata-rata* (*mean*) R_m dan Q_m dan *deviasi standar* σ_R dan σ_Q dari resistensi maupun beban. Kerapkali, harga rata-rata dan deviasi standar dapat diestimasi sementara distribusi aktualnya tidak dapat diperoleh. Jadi, dengan menggunakan kuantitas-kuantitas yang dapat diestimasi, deviasi standar σ dari $\ln(R/Q)$ dapat didekati sebagai:

$$\sigma_{\ln(R/Q)} \approx \sqrt{V_R^2 + V_Q^2} \qquad (1.9.3)$$

di mana $V_R = \sigma_R/R_m$
$V_Q = \sigma_Q/Q_m$

Margin keamanan adalah jarak dari garis asli sampai ke rata-ratanya, seperti dalam **Gambar 1.8.2**, dan diwujudkan sebagai perkalian β dari $\sigma_{\ln(R/Q)}$. Jarak yang mewakili margin keamanan dapat didekati [1.16] sebagai:

$$\beta\sigma_{\ln(R/Q)} \approx \beta\sqrt{V_R^2 + V_Q^2} = \ln(R_m/Q_m) \qquad (1.9.4)$$

Dengan demikian, semakin besar jaraknya semakin kecil pula probabilitas pencapaian keadaan batas. Pengali β disebut sebagai *indeks reliabilitas*. Bentuk untuk β dari **Persamaan 1.9.4** menjadi:

Dipindai dengan CamScanner

$$\beta = \frac{\ln(R_m/Q_m)}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \qquad (1.9.5)$$

Dalam Komentar LRFD [1.16], Galambos dan Ravindra [1.25], dan Publikasi Khusus NBS 577 [1.32], dibahas lebih lanjut mengenai pengembangan **Persamaan 1.9.5**. Dalam buku ini tidak dibahas perlakuan terhadap teori probabilitas.

Dengan menggunakan kombinasi-kombinasi beban yang difaktorkan menurut Standar ANSI [1.2], Komite Spesifikasi dan Satuan Tugas AISC telah mengkalibrasi Spesifikasi LRFD [1.15] supaya dapat secara umum sesuai denga pengalaman yang telah terjadi. Dengan demikian, dalam LRFD faktor-faktor resistensi ϕ ditetapkan dengan tujuan supaya dapat memperoleh harga-harga β berikut ini:

Indeks Reliabilitas β Kombinasi-kombinasi Beban	**Sasaran**
Beban mati + beban hidup (atau beban salju)	3.0 untuk batang
	4.5 untuk sambungan
Beban mati + beban hidup + beban angin	2.5 untuk batang
Beban mati + beban hidup + beban gempa	1.75 untuk batang

Karena probabilitas munculnya beban angin dan gempa dengan kekuatan penuh lebih rendah, indeks reliabilitas β untuk kasus-kasus tersebut juga dibuat lebih rendah. Harga-harga β untuk sambungan dibuat lebih tinggi daripada untuk batang supaya sambungan tersebut lebih kuat ketimbang batang-batangnya seperti yang telah biasa dilakukan.

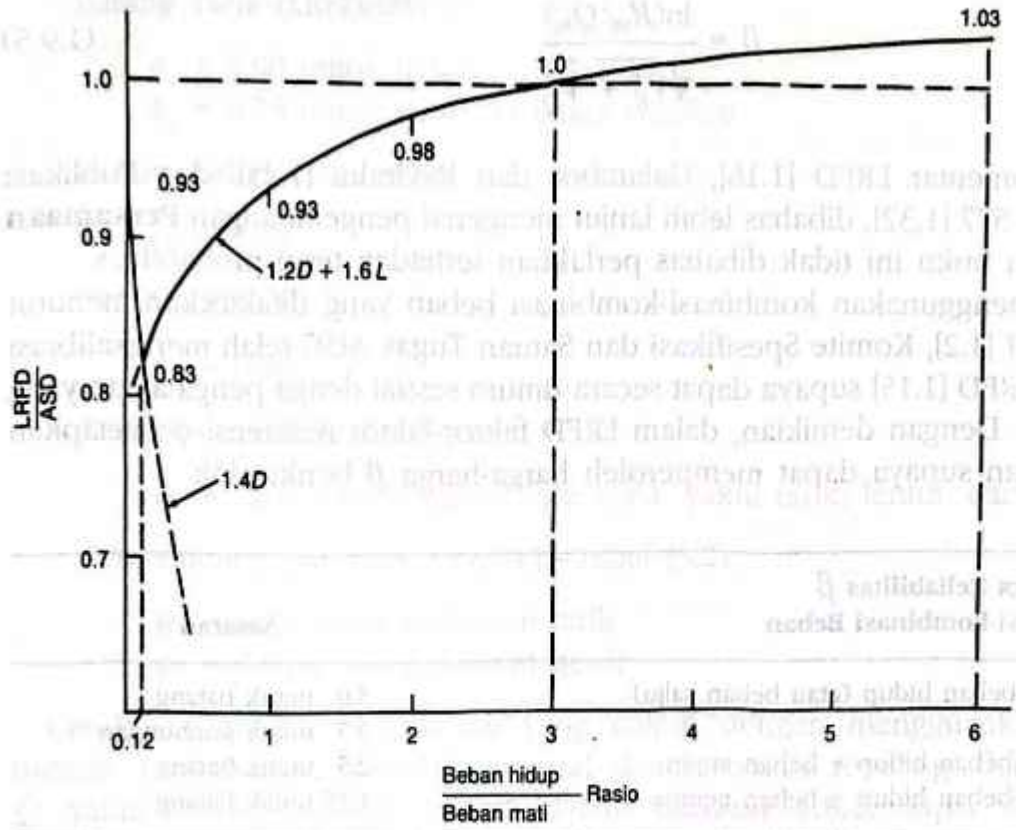
Pengembangan Spesifikasi LRFD mengkombinasikan hal-hal berikut:

1. Model probabilitas
2. Kalibrasi dengan Spesifikasi ASD AISC 1978
3. Kebijaksanaan dan pengalaman di masa lalu
4. Studi-studi mengenai desain dari strukturk-struktur yang representatif

Spesifikasi LRFD (LRFD-A4.) menggunakan enam kombinasi beban terfaktor yang diberikan dalam **Persamaan 1.8.2** sampai dengan **1.8.7**. Ini diperlukan untuk memperhitungkan masing-masing beban terpisah (beban mati, hidup, atap, angin yang menambah berat, angin yang mengurangi berat, dan gempa) yang bekerja pada harga umur manfaat maksimumnya. Beben-beban selain beban mati akan bekerja pada harga "sembarang umur manfaat". Harga "sembarang umur manfaat" merupakan harga yang diharapkan terjadi pada struktur pada sembarang waktu. Harga sembarang waktu dari beban hidup L dapat hanya sebesar seperempat dari beban umur manfaat maksimumnya, namun distribusinya sangat bervariasi. Angin sembarang waktu (W) merupakan angin harian maksimum. Harga "maksimum umur manfaat" diambil sebear 50 tahun.

Dengan demikian, kombinasi beban terfaktor dan beban terkaitnya pada maksimum 50 tahun adalah sebagai berikut:

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 1.9.1 *Perbandingan antara* Load and Resistance Factor Design *dengan* Allowable Stress Design *untuk batang-batang tarik.*

Persamaan LRFD	Kombinasi Beban	Beban pada Maksimum Umur manfaat (50 tahun)
(A4–1)	1.4 D	Beban mati D selama proses konstruksi; beban-beban lain tidak ada.
(A4–2)	$1.2D + 1.6L + 0.5S$	Beban hidup L
(A4–3)	$1.2D + 1.6S + (0.8W$ atau $0.5L)$	Beban atap; yakni beban salju S atau beban hujan R selain yang memberikan efek genangan
(A4–4)	$1.2D + 1.3W + 0.5L + 0.5S$	Beban angin (W) yang *menambah* beban mati
(A4–5)	$1.2D + 1.5E + (0.5L$ atau $0.2S)$	Beban gempa E yang *menambah* beban mati
(A4–6)	$0.9D - (1.3W$ atau $1.5E)$	Beban angin W atau beban gempa E yang *melawan* beban mati

Catatan: Bila beban salju S digunakan dalam persamaan di atas, berarti S ATAU beban hidup atap L_r ATAU beban hujan R yang tidak menggenang.

1.9.3 Perbandingan dari LRFD dan ASD untuk Batang Tarik

Perbandingan keamanan yang diperoleh untuk batang-batang tarik dalam desain dengan kedua metode AISC merupakan penunjuk dari hasil desain secara umum

Dipindai dengan CamScanner

yang diharapkan. Dalam desain, perbandingan langsung dari tipe-tipe batang yang berlainan akan lebih sulit dilakukan karena kekuatan nominal R_n tidak perlu sama untuk kedua metode tersebut.

Untuk batang-batang tarik yang bekerja karena beban mati dan hidup karena gaya berat, faktor resistensi $\phi = 0.90$, dan dengan **Persamaan 1.8.3** akan diperoleh LRFD:

$$1.2D + 1.6L = 0.90R_n \qquad (1.8.3)$$

$$1.33D + 1.78L = R_n \qquad \text{LRFD}$$

Dalam *Allowable Stress Design* (ASD) faktor keamanan FS = 1.67 untuk tarik aksial yang diberikan dari **Persamaan 1.8.8** di mana γ/ϕ merupakan faktor keamanan:

$$R_n/1.67 = \Sigma Q = D + L \qquad (1.8.8)$$

atau:

$$1.67D + 1.67L = R_n \qquad \text{ASD}$$

Kemudian, pembagian **Persamaan 1.8.3** dengan **Persamaan 1.8.8** akan menghasilkan:

$$\frac{\text{LRFD}}{\text{ASD}} = \frac{1.33D + 1.78L}{1.67D + 1.67L} = \frac{0.8 + 1.07(L/D)}{1 + (L/D)} \qquad (1.9.6)$$

Karena ini merupakan suatu perbandingan beban gaya berat, Persamaan LRFD (A4–1) [**Persamaan 1.8.2**] juga harus digunakan pada saat L/D mendekati nol. Dengan demikian, **Persamaan 1.8.2** akan memberikan:

$$1.4D = 0.90R_n \qquad [1.8.2]$$

$$1.56D = R_n \qquad \text{LRFD}$$

Pembagian LRFD dengan ASD akan memberikan:

$$\frac{\text{LRFD}}{\text{ASD}} = \frac{1.56D}{1.67D + 1.67L} = \frac{0.93}{1 + (L/D)} \qquad (1.9.7)$$

Persamaan 1.9.6 dan **1.9.7** terlihat diplotkan dalam **Gambar 1.9.1**. Desain batang-batang tarik akan kurang lebih sama dalam LRFD dan ASD bila rasio beban hidup terhadap beban mati (L/D) sekitar 3. Bila L/D semakin rendah (yakni bila beban mati lebih dominan), akan terjadi penghematan dalam penggunaan LRFD. Dengan rasio L/D yang lebih besar daripada 3, ASD akan sedikit lebih ekonomis, namun jarang sekali yang lebih dari 3%.

Dipindai dengan CamScanner

1.10 Mengapa Harus Menggunakan LRFD?

Beedle [1.29] dengan bagus menguraikan berbagai kelebihan LRFD, dan uraiannya kini menjadi basis dari hal-hal berikut ini:

1. LRFD merupakan suatu "perkakas" lain yang dapat digunakan oleh ahli struktur dalam desain baja. Mengapa tidak menggunakan perkakas yang sama (faktor-faktor kelebihan beban berubah dan faktor-faktor resistensi berubah) yang tersedia untuk desain baja maupun desain beton?
2. Penggunaan LRFD bukan merupakan suatu keharusan namun toh dapat menyediakan suatu keluwesan pilihan bagi desainer. Pasarlah yang akan menentukan apakah LRFD akan menjadi metode yang laku atau tidak.
3. ASD merupakan suatu cara pendekatan untuk memperhitungkan apa yang dilakukan LRFD dengan cara yang lebih rasional. Penggunaan konsep-konsep desain plastik dalam ASD telah membuat ASD tidak dapat lagi disebut sebagai metode "desain elastis".
4. Rasionalitas LRFD selalu menarik perhatian, dan menjadi suatu perangsang yang menjanjikan penggunaan bahan yang lebih ekonomis dan lebih baik untuk beberapa kombinasi beban dan konfigurasi struktural. LRFD juga cenderung memberikan struktur yang lebih aman bila dibandingkan dengan ASD dalam mengkombinasikan beban-beban hidup dan mati dan memperlakukan mereka dengan cara yang sama.
5. Penggunaan kombinasi-kombinasi faktor beban berganda seharusnya mengantar kepada penghematan.
6. LRFD akan memudahkan pemasukan informasi baru mengenai beban-beban dan variasi-variasi beban bila informasi tersebut telah diperoleh. Pengetahuan tentang resistensi struktur baja telah cukup tersedia. Di lain pihak, pengetahuan kita mengenai beban-beban berserta variasi mereka masih jauh dari mencukupi. Bila dikehendaki, pemisahan pembebanan dari resistensinya akan memungkinkan pengubahan yang satu tanpa perlu mempengaruhi yang lainnya.
7. Perubahan-perubahan dalam berbagai faktor kelebihan beban dan faktor resistensi ϕ lebih mudah dilakukan ketimbang mengubah tegangan ijin dalam ASD.
8. LRFD membuat desain dalam segala macam material lebih mudah dipertautkan. Variabilitas beban-beban sebenarnya tidak berkaitan dengan material yang digunakan dalam desain. Kelak, spesifikasi-spesifikasi yang tidak menggunakan format keadaan batas untuk material mana pun akan membuat material tersebut tidak menguntungkan dalam desain.
9. LRFD memberikan kerangka kerja untuk menangani beban-beban yang tidak biasa yang mungkin tidak terliput dalam Spesifikasi tersebut. Mungkin saja desain mengandung ketidakpastian akibat resistensi strukturnya, dalam hal mana faktor-faktor resistensinya dapat dimodifikasi. Di lain pihak, ketidakpastian itu boleh jadi berkaitan dengan beban-beban dan berbagai faktor kelebihan beban yang berlainan.

Dipindai dengan CamScanner

10. Kelak, penyesuaian terhadap kalibrasi metode tersebut dapat dilakukan tanpa kerumitan. Kalibrasi untuk LRFD telah dilakukan untuk suatu situasi *rata-rata* namun selanjutnya masih dapat disesuaikan lagi.
11. Rasio yang rendah dari beban hidup terhadap beban mati cenderung memberikan penghematan. Untuk rasio yang tinggi, akan terjadi ketidakhematan meskipun jumlahnya tidak terlalu besar.
12. LRFD cenderung memberikan struktur yang lebih aman karena metode tersebut seharusnya membawakan kesadaran yang lebih baik terhadap perilaku struktur.
13. Dalam hal keadaan batas layanan, praktek desain baru pada tahap awal; meskipun demikian, setidaknya LRFD telah memberikan suatu pendekatan.

Rasionalitas LRFD dan berbagai kelebihannya seperti yang diuraikan secara garis besar oleh Beedle [1.29] atas ASD merupakan petunjuk bahwa filosofi desain akan menggusur kedudukan ASD ke tempat belakang dalam beberapa tahun yang akan datang. Meskipun demikian, pentinglah bahwa desainer memahami kedua filosofi desain itu, karena banyak struktur akan tetap didesain dengan ASD dan desainer mungkin kerapkali harus mengevaluasi struktur-struktur yang didesain di masa lalu. Lindsey [1.31] memberikan suatu artikel yang menarik mengenai kemajuan-kemajuan terakhir dalam desain baja, dan Heger [1.30] memberikan sejumlah pemikiran mengenai kesulitan-kesulitan untuk menjembatani jurang antara teori statistik dan probabilitas dengan dunia nyata dari struktur sebenarnya.

1.11 Analisis Struktur

Secara umum, analisis struktur untuk mendapatkan beban-beban layanan (atau *efek-efek* beban, momen lentur, gaya geser, gaya aksial, dan momen puntir) terhadap batang-batang dilakukan dengan cara yang sama baik untuk LRFD maupun ASD. Metode-metode analisis struktur elastik tetap digunakan, kecuali bila keadaan batasnya berupa *mekanisme runtuh plastik* (*plastic collapse mechanism*) seperti dalam **Bab 10**. *Analisis ordo pertama* (*first order analysis*) [1.14, p.21] sudah cukup memadai untuk struktur-struktur rangka biasa yang diberi topang silangan (*bracing*) untuk melawan goyangan. Dalam analisis ordo pertama, persamaan-persamaan keseimbangan didasarkan atas geometri asli dari struktur yang bersangkutan. Ini berarti bahwa desainer mengasumsikan gaya-gaya internal (momen, geser, dan sebagainya) tidak cukup terpengaruh oleh perubahan dalam bentuk struktur sehingga diperlukan analisis yang lebih rumit. Bila pergeseran (*displacement*) elastik cukup kecil dibanding dimensinya, pendekatan saja sudah cukup memadai.

Situasi paling umum, di mana efek *ordo kedua* harus diperhitungkan, akan terjadi pada struktur banyak lantai yang tergantung pada kekakuan balok dan kolom yang berinteraksi untuk menahan goyangan karena pembebanan lateral (angin dan/atau gempa). Hal sedemikian disebut sebagai *struktur rangka tak berpenopang* (*unbraced frame*). Dalam hal ini, pergeseran lateral Δ (disebut juga

Dipindai dengan CamScanner

goyangan atau *drift*) akan menyebabkan momen-momen lentur tambahan karena beban gaya berat (ΣP) yang bekerja pada posisi tergeser Δ. Analisis harus mengikutsertakan efek sekunder $P\Delta$ ini. Ada berbagai macam tingkat kecanggihan yang digunakan dalam analisis untuk melibatkan efek-efek $P\Delta$. Baik dalam ASD maupun LRFD, efek-efek ordo kedua dapat dihitung sebagai bagian dari analisis, atau dapat diperhitungkan dengan menggunakan rumus-rumus dalam Spesifikasi [1.5, 1.15] atau Komentar [1.6, 1.16].

Dalam buku ini tekanan lebih pada bagaimana mendesain batang-batang dengan kekuatan yang cukup serta kemampuan layanan yang tepat, ketimbang pada analisis strukturalnya. Para Pembaca dipersilakan mengacu pada Wang dan Salmon [1.14] untuk topik-topik analisis struktural yang dasariah. Acuan-acuan lain yang secara khusus berkaitan dengan analisis untuk rangka tak berpenopang diberikan dalam **Bab 14**.

Kebanyakan contoh dalam buku ini menggunakan beban layanan, atau efek-efek beban layanan yang sudah ditentukan, yang bekerja batang struktur yang akan didesain. Harga-harga ini harus diasumsikan sebagai hasil dari analisis struktur. Beban-beban layanan harus difaktorkan dengan menggunakan **Persamaan 1.8.2** sampai **1.8.7** untuk desain dalam LFRD, namun beban-beban tersebut dianggap sudah ditentukan bila menggunakan ASD.

Acuan-acuan Terpilih

1.1. Hans Straub. *A History of Civil Engineering*. Cambridge, MA: M.I.T. Press, 1964 (pp. 173180).

1.2. ANSI. *American National Standard Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, A58.1-1982. New York: American National Standards Institute, Inc. (1430 Broadway, New York, NY 10018),1982.

1.3. AASHTO. *Standard Specifications for Highway Bridges*, 14th ed. Washington, DC: The American Association of State Highway and Transportation officials (444 North Capitol Street, N.W., Suite 225, Washington, DC 20001),1989.

1.4. AREA. *Manual for Railway Engineering*, Chapter 15 (Specifications for Steel Railway Bridges). Chicago, IL: American Railway Engineering Association, 1980.

1.5. AISC. *Specification for Structural Steel Buildings—Allowable Stress Design and Plastic Design (June 1,* 1989). Chicago: American Institute of Steel Construction (400 North Michigan Avenue, Chicago, IL 60611-4185),1989.

1.6. AISC. *Commentary on the Specification for Structural Steel Buildings—Allowable Stress Design and Plastic Design (June 1,* 1989). Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, 1989.

1.7. AISC. *Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design*, 9th ed. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, 1989.

1.8. ASTM. *Standard Specification for General Requirements for Rolled Steel Plates, Shapes, Sheet Piling, and Bars for Structural Use*, A6-88c. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.

Dipindai dengan CamScanner

1.9. National Research Council of Canada. *Canadian Structural Design Manual,* Supplement No. 4 to the National Building Code of Canada, Ottawa, Canada, 1985.

1.10. H. S. Lew, Emil Simiu, and Bruce Ellingwood. "Loads," Chapter 2, *Building Structural Design Handbook,* Richard N. White and Charles G. Salmon, Ed. New York: John Wiley & Sons, 1987 (pp. 9–43).

1.11. AISI. *Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members.* Washington, DC: American Iron and Steel Institute, September, 1980.

1.12. AISI. *Cold-Formed Steel Design Manual, Part 1, Specification; Part 11, Commentary; Part 111, Supplementary Information; Part IV, Illustrative Examples; and Part V, Charts and Tables.* New York: American Iron and Steel Institute, 1982.

1.13. SJI. *Standard Specifications Load Tables & Weight Tables for Steel Joists & Joist Girders.* Myrtle Beach, SC: Steel Joist Institute (Suite A, 1205 48th Avenue North, Myrtle Beach, SC 29577),1988. Chu-Kia Wang and Charles G. Salmon. *Introductory Structural Analysis.* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1984.

Load and Resistance Factor Design

1.15. AISC. *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings.* Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, September 1, 1986.

1.16. AISC. *Commentary on the Load and Resistance Factor Design Specificatio Jor Structural Steel Buildings (September 1,1986).* Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, 1986.

1.17. AISC. *Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design.* Chicago IL: American Institute of Steel Construction, 1986.

1.18. CSA. *Steel Structures for Buildings—Limit States Design,* CAN3-S16.1-M84. Rexdale, Ontario, Canada: Canadian Standards Association, 1984.

1.19. ASCE Task Committee on Structural Safety of the Administrative Committee on Analysis and Design of the Structural Division. "Structural Safety—A Literature Review," Journal of *the Structural Division,* ASCE, 98, ST4 (April 1972), 845-884. Clarkson W. Pinkharn. "Design Philosophies," Chapter 3, *Building Structural Design Ifandbook* Richard N. White and Charles G. Salmon; Ed. New York: John Wiley & Sons, 19X7 (pp. 44–54).

1.20. Clarkson. W. Pinkham and W. C. Hansell. "An Introduction to Load and Resistance Factor Design for Steel Buildings," *Engineering Journal,* AISC, 15, 1 (First Quarter 1978), 2–7.

1.21. Theodore V. Galambos. "Load Factor Design of Steel Buildings," *Engineering Journal* AISC, 9, 3 (July, 1972),108-113. 1.22. Theodore V. Galambos and M. K. Ravindra. "Proposed Criteria for Load and Resistance Factor Design," *Engineering Journal,* AISC, 15, 1 (First Quarter 1978), 8–17.

1.24. Theodore V. Galambos. "Load and Resistance Factor Design," *Engineering Journal,* AISC, 18, 3 (Third Quarter 1981), 74–82. 1.25. Mayasandra K. Ravindra and Theodore V. Galambos. "Load and Resistance Factor Design

Dipindai dengan CamScanner

for Steel," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 104, ST9 (September 1978), 1337–1353.
1.26. Geerhard Haaijer. "Limit States Design—A Tool for Reducing the Complexity of Steel Structures," paper presented at AISC National Engineering Conference March 4, 1983.
1.27. D. J. Laurie Kennedy. "Limit States Design of Steel Structures in Canada," *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 110, 2 (February 1984), 275–290.
1.28. D. J. Laurie Kennedy. "North American Limit States Design," *Proceedings, The 1985 International Engineering Symposium on Structural Steel.* Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, May 22–24,1985.
1.29. Lynn S. Beedle. "Why LRFD?" *Modern Steel Construction,* AISC 26, 4 (4th Quarter, 1986), 30–31.
1.30. Frank J. Heger. "Proposed AISC LRFD Design Criteria," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 106, ST3 (March 1980), 729–734. Disc. 106, ST12 (December 1980), 2576–2577.
1.31. Stanley D. Lindsey. "Advances in Steel Design and Construction," *Proceedings, Solutions in Steel, The National Engineering Conference.* Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, June 12–14,1986.
1.32. Bruce Ellingwood, Theodore V. Galambos, James G. MacGregor, and C. Allin Cornell. *Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58,* NBS Special Publication 577. Washington, DC: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, June 1980.
1.33. Theodore V. Galambos, Bruce Ellingwood, James G. MacGregor, and C. Allin Cornell. "Probability Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 108, STS (May 1982), 959–977.
1.34. Mayasandra K. Ravindra, C. Allin Cornell, and Theodore V. Galambos. "Wind and Snow Load Factors for Use in LRFD," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 104, ST9 (September 1978),14431457.

Beban Angin

1.35. ASCE, Task Committee on Wind Forces, Commitee on Loads and Stresses, Structural Division. "Wind Forces on Structures," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 84, ST4 (July 1958) (Preliminary Report); and Final Report, Transactions, ASCE, 126, pt. II (1961),1124–1198.
1.36. Kishor C. Mehta. "Wind Load Provisions ANSI #A58.1-1982," *Journal of Structural Engineering,* 110, 4 (April 1984), 769–784.
1.37. Theodore Stathopoulos, David Surry, and Alan G. Davenport. "Effective Wind Loads on Flat Roofs," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 107, ST2 (February 1981), 281–298.

Beban Salju

1.38. Michael J. O'Rourke and Ulrich Stiefel. "Roof Snow Loads for Structural

Dipindai dengan CamScanner

Design," *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 109, 7 (July 1983),1527-1537.
1.39. J. T. Templin and W. R. Schriever, "Loads due to Drifted Snow," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 108, ST8 (August 1982),1916–1925.
1.40. Michael O'Rourke, Wayne Tobiasson, and Evelyn Wood. "Proposed Code Provisions for Drifted Snow Loads," *Journal of Structural Engineering,* 112, 9 (September 1986), 2080–2092.
1.41. Michael J. O'Rourke, Robert Redfield, and Peter von Bradsky. "Uniform Snow Loads on Structures," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 108, ST12 (December 1982), 2781–2798.
1.42. Michael J. O'Rourke, Robert S. Speck, Jr., and Ulrich Stiefel. "Drift Snow Loads on Multilevel Roofs," *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 111, 2 (February 1985), 290–306.

Beban Gempa

1.43. SEAOC. *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary.* San Francisco, CA: Seismology Committee, Structural Engineers Association of California, 1974.
1.44. Anil K. Chopra and Ernesto F. Cruz. "Evaluation of Building Code Formulas for Earthquake Forces," *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 112, 8 (August 1986), 1881–1899.
1.45. Anil K. Chopra. *Dynamics of Structures, A Primer.* Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Institute, 1980.
1.46. R. W. Clough and Joseph Penzien. *Dynamics of Structures.* New York: McGraw-Hill, 1975.
1.47. Applied Technology Council (ATC), Associated with the Structural Engineers Association of California. *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings (ATC 306)* (NBS Publication 510). Washington, DC: Center for Building Technology, National Bureau of Standards, June 1978.
1.48. UBC. *Uniform Building Code.* Whittier, CA: International Conference of Building Officials, 1985.

Dipindai dengan CamScanner

2
BAJA DAN SIFAT-SIFATNYA

2.1 Baja Struktur

Hampir semenjak diintroduksikan sebagai bahan bangunan utama sampai dengan tahun 1960-an, baja yang digunakan, menurut klasifikasi ASTM (*American Society for Testing and Materials*), digolongkan sebagai baja karbon A7 dengan spesifikasi tegangan leleh minimum sebesar 33 ksi. Selama itu, kebanyakan desainer sekedar menyebutkan kata "baja" saja tanpa identifikasi lebih lanjut. Tegangan ijin serta prosedur seperti yang dianjurkan oleh Spesifikasi AISC pun hanya berlaku untuk baja A7 saja. Pada saat itu, baja struktur lainnya, seperti baja paduan rendah yang khusus tahan korosi (A242) dan baja yang lebih siap dilas (A373), memang sudah tersedia namun masih jarang digunakan pada bangunan. Kadangkala saja desain jembatan menggunakan baja jenis-jenis lain ini.

Lain halnya dengan dewasa ini (1990-an). Bagi desainer kini telah tersedia berbagai macam baja, sehingga bahan tersebut sudah mungkin digunakan dengan kekuatan yang lebih besar maupun pada tempat-tempat yang tegangannya sangat tinggi tanpa perlu memperbesar ukuran batangnya. Desainer dapat menentukan apakah kekakuan maksimum ataukah berat minimumkah yang akan menjadi kriteria utama. Ketahanan terhadap korosi, yang berarti pula berkurangnya keharusan berulang kali mengecat kembali, merupakan salah satu faktor yang sangat penting. Beberapa jenis baja beroksidasi dan membentuk lapisan protektif rapat yang mencegah terjadinya oksidasi (korosi) lebih lanjut, dan kadangkala malahan menimbulkan tekstur merah coklat yang menambah manis penampilannya. Karena tidak membutuhkan pengecatan, mungkin penggunaan "baja melapuk" ini lebih ekonomis kendati biaya awal agak sedikit lebih tinggi ketimbang baja karbon biasa.

Beberapa baja tertentu lebih mudah dilas ketimbang yang lain; sebagian lebih cocok terhadap tekanan fluida ketimbang yang lain baik untuk di atas maupun di bawah temperatur kamar.

Dipindai dengan CamScanner

John Hancock Center, Chicago, memperlihatkan penopangan diagonal eksterior. (Foto oleh: C.G. Salmon)

Baja-baja struktur diberi nama oleh ASTM serta oleh para pembuatnya. Untuk keperluan desain, tegangan leleh tarik menjadi kuantitas acuan yang digunakan oleh spesifikasi-spesifikasi, seperti AISC, sebagai variabel sifat untuk menentukan kekuatan atau tegangan ijinnya. Terminologi *tegangan leleh* (*yield stress*) digunakan baik untuk menyatakan "titik leleh" (*yield point*), yakni suatu penyimpangan yang jelas dari elastisitas sempurna yang ditunjukkan oleh kebanyakan baja struktur biasa; maupun "kekuatan leleh" (*yield strength*), yakni tegangan satuan pada suatu titik perpindahan regangan untuk baja-baja yang tidak memiliki titik leleh yang jelas. Dewasa ini (1990), baja telah tersedia dengan tegangan leleh dari 24 sampai dengan 100 ksi (170 sampai dengan 690 MPa).

Baja untuk struktur dengan tempa panas dapat diklasifikasikan sebagai *baja karbon* (*carbon steel*), *baja paduan rendah berkekuatan tinggi* (*high strength low alloy steel*), dan *baja paduan* (*alloy steel*). Persyaratan umum untuk jenis-jenis

Dipindai dengan CamScanner

baja sedemikian ini tercakup dalam Spesifikasi ANSI/ASTM A6 [1.8]. **Tabel 2.1.1** mencakup baja-baja umum, tegangan leleh minimum, dan kekuatan tarik. Sedang kegunaan mereka dapat dijumpai dalam **Tabel 2.1.2**.

Tabel 2.1.1 Sifat-sifat Baja yang Digunakan untuk Bangunan dan Jembatan

Penamaan ASTM[1]	Tegangan leleh minimum F_y ksi (MPa)[2]	Kekuatan tarik F_u ksi (MPa)[2]	Ketebalan maksimum untuk pelat inch (mm)	Kelompok ASTM A6 untuk yang berprofil[3]
A36	32 (220)	58–80 (400–550)	lb 8 (200)	–
	36 (250)	58–80 (400–550)	s/d 8 (200)	Semua
A53 Mutu B	35(240)	60(415)		
A242	42 (290)	62 (435)	lb 1½ s/d 4 (40 s/d 200)	4,5
	46 (315)	67 (460)	lb ¾ s/d 1½ (20 s/d 40)	3
	50 (345)	70 (480)	s/d ¾ (20)	1,2
A441 Dihentikan pada tahun 1989; digantikan oleh A572				
A500 Gol A	33(228)	45(310)	Bulat	
Gol B	42(290)	58(400)	Bulat	
Gol C	46(317)	62(427)	Bulat	
Gol A	39(269)	45(310)	Berprofil	
Gol B	46(317)	58(400)	Berprofil	
Gol C	50(345)	62(427)	Berprofil	
A501	36(250)	58(400)		
A514	90 (620)	100–130 (690–895)	lb 2½ s/d 6 (65 s/d 150)	
	100 (690)	110–130 (760–895)	s/d 2½ (65)	
A529	42 (290)	60– 85 (414–586)	s/d ½ (13)	1
A570 Gol 40	40(275)	55(380)		
Gol 45	45(310)	60(415)		
Gol 50	50(345)	65(450)		
A572 Gol 42	42 (290)	60 (415)	s/d 6 (150)	Semua
Gol 50	50 (345)	65 (450)	s/d 4 (100)	Semua
Gol 60	60 (415)	75 (520)	s/d 1¼ (32)	1,2
Gol 65	65 (450)	80 (550)	s/d 1¼ (32)	1

Dipindai dengan CamScanner

Tabel 2.1.1 Lanjutan

Penamaan ASTM[1]	Tegangan leleh minimum F_y ksi (MPa)[2]	Kekuatan tarik F_u ksi (MPa)[2]	Ketebalan maksimum untuk pelat inch (mm)	AS untuk bentuk berprofil[3]
A588	42 (290)	63 (435)	lb 5 s/d 8 (125 s/d 200)	–
	46 (315)	67 (460)	lb 4 s/d 5 (100 s/d 125)	–
	50 (345)	70 485)	s/d 4 (100)	Semua
A606	45(310) 50(345)	65(450) 70(480)		
A607 Gol 45	45(310)	60(410)		
Gol 50	50(340)	65(450)		
Gol 55	55(380)	70(480)		
Gol 60	60(410)	75(520)		
Gol 65	65(450)	80(550)		
Gol 70	70(480)	85(590)		
A611 Gol C	33(230)	48(330)		
Gol D	40(275)	52(360)		
Gol E	80(550)	82(565)		
A618 Gol I & II	50(345)	70(485)	s/d ¾ tebal dinding	
Gol III	50(345)	65(450)		
A709 Gol 36	36 (250)	58–80 (400–550)	s/d 4 (100)	Semua
Gol 50	50 (345)	65 (450)	s/d 4 (100)	Semua
Gol 50W	50 (345)	70 (485)	s/d 4 (100)	Semua
Gol 100 & 100W	90 (620)	100–130 (690–895)	lb 2½ s/d 4 (64–102)	
Gol 100 & 100W	100 (690)	110–130 (760–895)	s/d 2½ (64)	

[1]Semua baja disetujui menurut Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] kecuali untuk A611 dan A709
[2]Semua nilai dalam SI diberikan dalam Spesifikasi ASTM khusus.
[3]Untuk klasifikasi sifat tariknya, ASTM A6[1.8] menempatkan profil-profil struktural tempaan (W, M, S, HP, C, MC, dan L) ke dalam Kelompok 1 sampai dengan 5 menurut ukurannya. Semua penampang flens tempaan yang paling tidak memiliki salah satu penampang lintang sebesar 3 inch (75 mm) atau lebih termasuk di sini. Basis ukuran untuk pengelompokan kurang lebih adalah ketebalan badan yang berkaitan dengan ketebalan maksimum untuk pelat di mana Kelompok 1 merupakan yang paling tipis badannya. Penampang-penampang khusus yang termasuk dalam masing-masing kelompok diberikan dalam ASTM A6 [1.8] dan Manual AISC [1.7, 1.17].

2.1.1 Baja Karbon

Baja karbon dibagi menjadi empat kategori berdasarkan persentase karbonnya:

Dipindai dengan CamScanner

karbon rendah (kurang dari 0.15%); karbon lunak (0.15–0.29%0; karbon sedang (0.30–0.59%0; dan karbon tinggi (0.60–1.70%0. Baja karbon struktural termasuk dalam kategori karbon lunak. Suatu baja, misalnya A36, memiliki karbon maksimum antara 0.25 – sampai 0.29% tergantung dari ketebalannya. Baja karbon struktur menunjukkan titik leleh definit seperti pada kurva *a)* dari **Gambar 2.1.1**. Peningkatan persentase karbon akan meningkatkan kekerasannya namun akan mengurangi kekenyalannya, hingga lebih sulit dilas.

Baja karbon yang diberikan dalam **Tabel 2.1.1** adalah A36[2.1], A53[2.2], A500[2.9], A501[2.10], A529[2.12], A570[2.13], A611[2.18], dan A709[2.20], Mutu 36.

Tabel 2.1.2 Penggunaan Berbagai Jenis Baja

Penamaan ASTM*	Penggunaan umum
A36 Baja karbon	Kebutuhan struktur pada umumnya; dihubungkan dengan baut atau dilas; terutama untuk bangunan
A53 Baja karbon	Pipa dilas dan tanpa kampuh
A242 Baja paduan rendah berkekuatan tinggi	Konstruksi jembatan dengan las dan baut di mana dikehendaki ketahanan terhadap korosi; pada hakikatnya digantikan oleh A709, Golongan 50 W
A500 Baja karbon	Profil bulat, bujur sangkar, persegi panjang yang dibentuk secara dingin dengan las atau tanpa kampuh, atau profil tabung struktural khusus untuk kegunaan-kegunaan struktural yang menggunakan las atau baut
A514 Baja paduan, didinginkan dan disepuh	Pelat dengan ketebalan 6 inc (150 mm) atau kurang, terutama untuk jembatan dengan las: pada umumnya untuk jembatan diganti dengan A709
A529 Baja karbon	Pelat-pelat dan batang dengan ketebalan atau diameter $^1/_2$ inch (13 mm) atau kurang dan profil-profil Kelompok 1 [1.8] yang digunakan pada rangka sistem bangunan atau kerangka
A570 Baja karbon	Baja lembaran atau pita bentukan panas memanjang atau gulungan; untuk penampang dengan bentukan dingin [ketebalan maksimum 0.299 inch (6 mm)]
A572 Baja vanadium atau columbium; paduan rendah; berkekuatan tinggi	Profil-profil struktural; pelat; tiang lembaran; batang untuk bangunan dengan baut atau las; jembatan dengan las dalam Golongan 42 dan 50 saja; pada hakikatnya diganti dengan A709, Golongan 50
A588 Baja paduan rendah berkekuatan tinggi	Profil-profil struktural; pelat; dan batang untuk bangunan dan jembatan dengan las di mana dibutuhkan penghematan berat dan pertambahan keawetan; ketahanan terhadap korosi empat kali lebih besar daripada yang dimiliki baja A36; pada hakikatnya diganti dengan A709, Golongan 50 untuk jembatan
A606 Baja paduan rendah berkekuatan tinggi	Baja lembaran atau pita yang ditempa dingin dan panas dalam bentuk memanjang atau gulungan, di mana diinginkan penambahan keawetan; ketahanan korosi atmosferik untuk Tipe 2 paling tidak dua kali dari yang dimiliki baja karbon; sedang untuk Tipe 4 paling tidak empat kalinya

Dipindai dengan CamScanner

Tabel 2.1.2 Lanjutan

Penamaan ASTM*	Penggunaan umum
A607 Baja vanadium atau columbium; paduan rendah; berkekuatan tinggi	Baja lembaran dan pita yang ditempa dingin dan panas dalam bentuk lembaran atau gulungan; untuk penampang-penampang bentukan dingin; di mana penghematan berat dan kekuatan yang lebih besar merupakan hal yang penting; resistensi korosi atmosferik (tanpa tembaga) sama dengan baja karbon; dengan tembaga; resistensi korosi dua kali yang dimiliki baja karbon
A611 Baja karbon	Baja lembaran tempa dingin dalam bentuk potongan memanjang atau gulungan untuk membuat penampang-penampang bentukan dingin
A618 Baja paduan rendah berkekuatan tinggi	Profil bujur sangkar; persegi; bulat bentukan panas las dan tanpa kampuh; atau profil tabung struktur khusus untuk kebutuhan struktur umum yang menggunakan las dan baut; Golongan II memiliki ketahanan terhadap korosi sebesar kurang lebih dua kali yang dimiliki baja karbon Golongan I memiliki ketahanan terhadap korosi sekitar empat kali yang dimiliki baja karbon Golongan III untuk resistensi korosi yang diperkuat mungkin dengan spesifikasi tembaga
A709 Karbon; paduan rendah, berkekuatan tinggi; dan paduan didinginkan dan disepuh	Profil-profil struktural, pelat, dan batangan dalam Golongan 36, 50, dan 500W yang digunakan untuk jembatan; pelat dalam Golongan 100 dan 100W digunakan pada jembatan; bila digunakan pula persyaratan tambahan, persyaratan A36, A572, A588, dan A514 terlampaui; Golongan 50 W dan 100 W merupakan baja melapuk

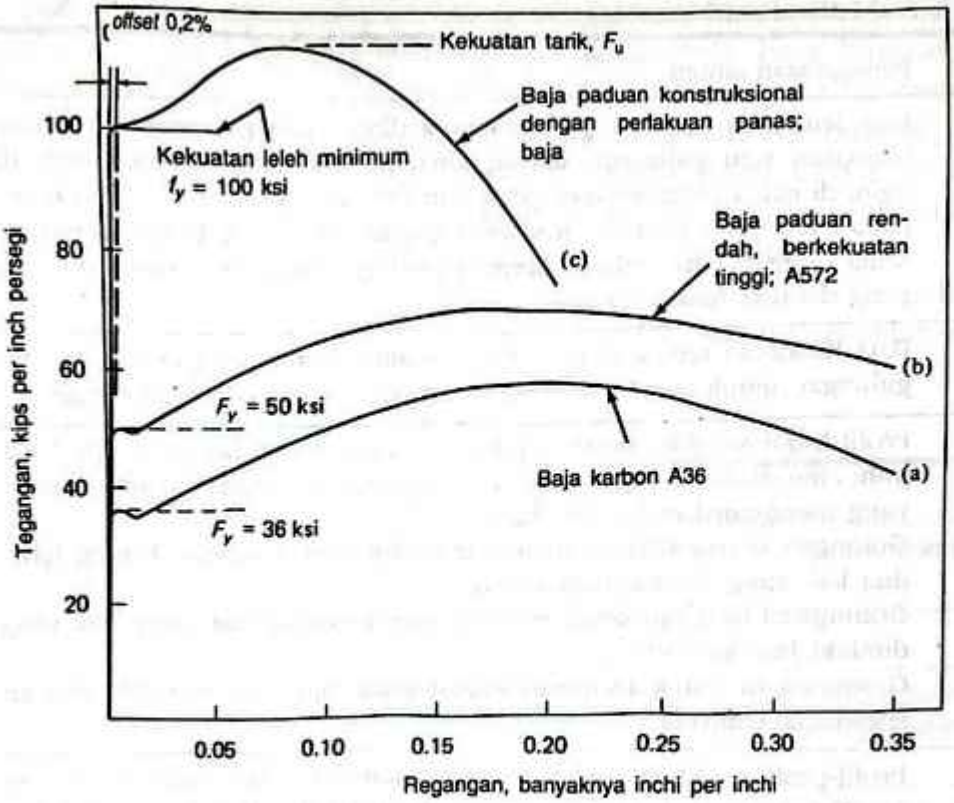
* Semua baja dalam daftar di atas disetujui oleh Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] kecuali A611 dan A709

2.1.2 Baja Paduan Rendah Berkekuatan Tinggi

Kategori ini meliputi baja-baja yang memiliki tegangan leleh dari 40 sampai denan 70 ksi (275 sampai dengan 480 MPa), yang menunjukkan titik leleh yang jelas pada kurva (*b*) dari **Gambar 2.1.1**, sama dengan yang terjadi pada baja karbon. Penambahan sejumlah elemen paduan terhadap baja karbon seperti krom, kolumbium, tembaga, mangan, molibden, nikel, fosfor, vanadium, atau zirkonium, akan memperbaiki sifat-sifat mekanisnya. Bila baja karbon mendapatkan kekuatan dengan penambahan kandungan karbonnya, elemen-elemen paduan menciptakan tambahan kekuatan lebih dengan mikrostruktur yang halus ketimbang mikrostruktur yang kasar yang diperoleh selama proses pendinginan baja. Baja paduan rendah berkekuatan tinggi digunakan dalam kondisi seperti tempaan atau kondisi normal; yakni kondisi di mana tidak digunakan perlakuan panas.

Baja paduan rendah berkekuatan tinggi dalam **Tabel 2.1.1** adalah A242[2.3], A441[2.6], A572[2.14]. A588[2.15]. A607[2.17], A618[2.19], dan A709[2.20], Mutu 50 dan 50W.

Dipindai dengan CamScanner



***Gambar 2.1.1** Kurva-kurva tegangan – regangan tipikal*

2.1.3 Baja Paduan

Baja paduan rendah dapat didinginkan dan disepuh supaya dapat mencapai kekuatan leleh sebesar 80 sampai dengan 110 ksi (550 sampai dengan 760 MPa). Kekuatan leleh biasanya didefinisikan sebagai tegangan pada regangan *offset* 0.2%, karena baja ini tidak menunjukkan titik leleh yang jelas. Dalam **Gambar 2.1.1**, kurva (*c*), terlihat kurva tegangan – regangan tipikal. Dengan prosedur yang tepat, baja ini dapat dilas, dan biasanya tidak membutuhkan tambahan perlakuan panas setelah pengelasan dilakukan. Untuk beberapa keperluan khusus, kadangkala dibutuhkan pengendoran tegangan. Beberapa baja karbon, seperti baja tekanan fluida tertentu, dapat didinginkan dan disepuh supaya dapat memberikan kekuatan leleh sekitar 80 ksi (550 MPa), namun kebanyakan baja dengan kekuatan sedemikian merupakan baja paduan rendah. Baja paduan rendah ini pada umumnya memiliki kandungan karbon sekitar 0.20% supaya dapat membatasi kekerasan mikrostruktur butiran kasar (martensit) yang mungkin terbentuk selama perlakuan panas atau pengelasan, sehingga dapat mengurangi bahaya retakan.

Perlakun panas terdiri dari pendinginan (pendinginan secara cepat dengan air atau minyak paling tidak 1650°F (900°C) sampai sekitar 300–400°F); kemudian penyepuhan dengan pemanasan kembali sampai paling tidak sekitar 1150°F (620°C) dan kemudian dibiarkan mendingin. Penyepuhan, meskipun mengurangi sedikit kekuatan dan kekerasan dari bahan yang telah didinginkan, namun dapat meningkatkan kekenyalan dan keuletan. Pengurangan dalam kekuatan dan keke-

Dipindai dengan CamScanner

rasan dengan peningkatan temperatur sedikit dilawan oleh munculnya pengerasan sekunder yang terjadi akibat penyerapan kolumbium, titanium, atau vanadium karbida. Penyerapan ini dimulai pada temperatur sekitar 950° (510°C) dan menjadi makin cepat sampai sekitar 1250° (680°C). Penyepuhan pada atau sekitar 1250°F untuk mendapatkan penyerapan maksimum dari karbida mungkin akan mengakibatkan masuknya elemen tersebut ke dalam zona transformasi, dan hasilnya mikrostruktur menjadi lebih lemah yang mungkin dapat diperoleh tanpa pendinginan dan penyepuhan.

Secara ringkas, pendinginan menghasilkan martensit, suatu mikrostruktur getas yang sangat keras dan kuat; pemanasan kembali akan sedikit mengurangi kekuatan dan kekerasan, namun akan meningkatkan keuletan dan kekenyalan. Untuk mendapatkan informasi lebih lanjut mengenai metalurgi proses pendinginan dan penyepuhan, silakan membuka *Welding Handbook* [2.22]. Dalam **Tabel 2.1.1** yang termasuk baja paduan yang didinginkan dan disepuh adalah A514[2.11] dan A709[2.20], Mutu 100 dan 100W.

2.2 Baja Penyambung

Perlakuan terinci mengenai desain penyambung berulir dapat dijumpai dalam **Bab 4**. Dalam pasal-pasal berikut ini akan dijumpai suatu deskripsi singkat mengenai bahan-bahan yang digunakan untuk baut.

2.2.1 A307, Baut dan Baut Tap Baja Karbon, Kekuatan Tarik 60,000 psi

Material ini digunakan untuk apa yang biasa disebut sebagai "baut mesin", dan biasanya hanya digunakan pada instalasi temporer saja. Yang termasuk di dalamnya adalah baut Mutu A untuk keperluan umum, yang kekuatan tariknya minimum 60 ksi (415 MPa); dan baut Mutu B untuk simpul flens pada sistem pemipaan di mana salah satu atau kedua flens-nya merupakan besi tuang. Baut Mutu B memiliki limitasi kekuatan tarik *maksimum* sebesar 100 ksi (700 MPa). Baut-baut ini tidak menunjukkan titik leleh yang jelas, sedang spesifikasi kekuatan leleh minimumnya juga tidak ada (misalnya 0.2% dari kekuatan *offset*).

2.2.2 A325[2.5], Baut Berkekuatan Tinggi untuk Simpul Baja Struktural

Baja karbon medium yang didinginkan dan disepuh ini digunakan untuk baut yang biasa disebut sebagai "baut struktural berkekuatan tinggi", atau baut berkekuatan tinggi. Material ini mengandung karbon maksimum sebesar 0.30%, dan mendapat perlakuan panas (pendinginan) dan kemudian dipanaskan kembali (penyepuhan) sampai temperatur paling tidak sebesar 800°F. Pada uji tarik, baja

Dipindai dengan CamScanner

ini berperilaku lebih menyerupai baja paduan dengan perlakuan panas ketimbang baja karbon. Kekuatan tarik ultimitnya sebesar 105 ksi (733MPa) (baut dengan diameter 1⅛ sampai 1½ inch) sampai dengan 120 ksi (838 MPa) (baut dengan diameter ½ sampai dengan 1 inch). Kekuatan lelehnya, bila diukur pada 0.2% *offset*, dianjurkan minimum sebesar 81 ksi (566 MPa) untuk baut dengan diameter 1⅛ sampai dengan 1½, dan 92 ksi (643 MPa) untuk baut dengan diameter ½ sampai dengan 1 inch (*lihat* **Tabel 4.1.1**).

2.2.3 449[2.7], Stud dan Baut Tempa Baja yang Didinginkan dan Disepuh

Baut ini memiliki kekuatan tarik dan tegangan leleh (kekuatan pada *offset* sebesar 0.2%) sama dengan A325 untuk baut dengan diameter 1½ inchi dan yang lebih kecil; meskipun kepalanya heksagon regular dan panjang ulirnya lebih panjang seperti baut A307. Tersedia pula baut dengan diameter sampai dengan 3 inch. Spesifikasi [1.5, 1.15] mengijinkan penggunaan baut A449 hanya untuk simpul-simpul struktural tertentu yang membutuhkan diameter lebih dari 1½ dan untuk baut jangkar berkekuatan tinggi serta stud berulir.

2.2.4 490 [2.8], Baut Struktural Baja dengan Perlakuan Panas, Kekuatan Tarik 150 ksi (1035 MPa)

Material ini mengandung karbon sampai sebanyak 0.53% untuk baut dengan diameter 1½ inch, dan memiliki unsur-unsur paduan dengan jumlah serupa dengan baja A514[2.11]. Setelah pendinginan dalam minyak, material tersebut disepuh dengan pemanasan kembali paling tidak sampai 900°F. Kekuatan leleh minimum dengan *offset* 0.2% berkisar dari 115 ksi (803 MPa) (diameter 2½ inch sampai dengan 4 inch) sampai dengan 130 ksi (908 MPa) (untuk diameter 2½ atau kurang).

2.2.5 Baut Berkekuatan Tinggi Digalvani

Untuk memberikan perlindungan terhadap korosi, baut A325 dapat digalvani. Proses galvani celup panas menghendaki agar temperatur seng cair berada dalam kisaran temperatur perlakuan panas; dengan demikian sifat-sifat mekanik yang diperoleh dengan perlakuan panas dapat dikurangi. Secara umum, hanya baut Tipe 1 A325 yang perlu digalvani celup panas. Bila Tipe 2 digalvani, sifat-sifat mekaniknya kelak perlu dicek kembali. Bila menggunakan baut galvanis, murnya harus "berukuran lebih". Bila mur-nya juga digalvani, ukurannya harus "berukuran lebih ganda".

Bila hidrogen tetap dibiarkan dalam baja dan bila digunakan tegangan tinggi, baja yang kekuatan tariknya berkisar 200 ksi atau lebih mudah terserang penggetasan hidrogen. Pemasukan hidrogen yang terjadi selama operasi *pickling*

Dipindai dengan CamScanner

(pencelupan dalam larutan kimia) dari proses galvanis dan "penyelimutan" hidrogen serta pelapisan seng [2.23]. Kekuatan tarik minimum dari baut A325 di bawah rentang kritis 200 ksi. Di lain pihak, baut A490 memiliki kekuatan tarik minimum sebesar 170 ksi, suatu harga yang dianggap terlalu dekat dengan kisaran kritis. Dengan demikian, *penggalvanian baut A490 tidak diperkenankan.*

2.3 Elektrode Las dan Material Pengisi

Perlakuan yang terinci dari pengelasan dan sambungan las dapat dijumpai dalam **Bab 5**. Elektrode-elektrode yang digunakan dalam *shielded metal arc welding* (SMAW = las busur cahaya berpelindung) (*lihat* **Bagian 5.2**) juga berfungsi sebagai bahan pengisi dan tercakup dalam Spesifikasi AWS A5.1 dan A5.5. Elektrode konsumsi semacam itu diklasifikasikan sebagai E60XX, E70XX, E80XX, E90XX, E100XX, dan E110XX. Huruf "E" berarti elektrode. Dua angka pertama menunjukkan kekuatan tarik dalam ksi; dengan demikian kekuatan tariknya berkisar dari 60 sampai dengan 110 ksi (414 sampai dengan 760 MPa). Sedang huruf "X" mewakili angka yang menunjukkan penggunaan elektrode tersebut.

Tabel 2.3.1 Elektrode-elektrode untuk Las*

Proses							
Shield Metal Arc Welding (SMAW) AWS A5.1 atau A5.5	*Submerged Arc Welding* (SAW) A5.17 atau A5.23	*Gas Metal Arc Welding* (GMAW) AWS A5.18 atau A5.28	*Flux Cored Arc Welding* (FCAW) AWS A5.20 atau A5.29	Tegangan leleh minimum		Kekuatan tarik minimum	
				(ksi)	(MPa)	(ksi)	(MPa)
E60XX			E6XT-X	50	345	62 min	425
	F6X-EXXX			50	345	62–80	425–550
E79XX		ER70S-X	E7XT-X	60	415	72 min	495
	F7X-EXXX			60	415	70–90	485–655
E80XX				67	460	80 min	550
	F8X-EXXX		E8XT	68	470	80–100	550–690
		ER80S		65	450	80 min	550
E100XX				87	600	100 min	690
	F10X-EXXX			88	605	100–130	690–895
		ER100S		90	620	100 min	690
			E10XT	88	605	100–120	690–830
E110X				97	670	110 min	760
	F11X-EXXX			98	675	110–130	760–895
		ER110S		98	675	110 min	760
			E11XT	98	675	110–125	760–860

*Persyaratan logam pengisi diberikan dalam AWS D1.1 [2.24], **Tabel 4.1.1** untuk menyesuaikan diri dengan berbagai macam baja struktur.

Dipindai dengan CamScanner

Untuk *submerged arc welding* (SAW = las busur terbenam) (*lihat* **Bagian 5.2**), elektrode-elektrode yang berfungsi pula sebagai bahan pengisi tercakup dalam AWS A5.17 dan A5.23, dan diberi nama F6X-EXXX, F7X-EXXX, F8X-EXXX, F9X-EXXX, F10X-EXXX, dan F11X-EXXX. Huruf "F" menunjukkan material alir granular yang melindungi las pada saat pembuatan. Dua angka pertama di belakang "F" menunjukkan kekuatan tarik (6 berarti 60 ksi), sementara angka kedua menyatakan kekuatan kejut takikan V Charpy. Huruf "E" dan X lainnya mewakili angka yang berhubungan dengan penggunaan. Untuk *gas metal arc welding* (GMAW = las busur logam gas) (*lihat* **Bagian 5.2**) dan *flux cored arc welding* (FCAW = las busur berinti aliran) (*lihat* **Bagian 5.2**), elektrodenya masing-masing dinamai ER70S-X dan E7XT-X. Angka 70 (atau 7) merupakan kekuatan tarik dalam ksi. Tegangan leleh dan kekuatan tarik dari elektrode yang biasa digunakan diberikan dalam **Tabel 2.3.1**

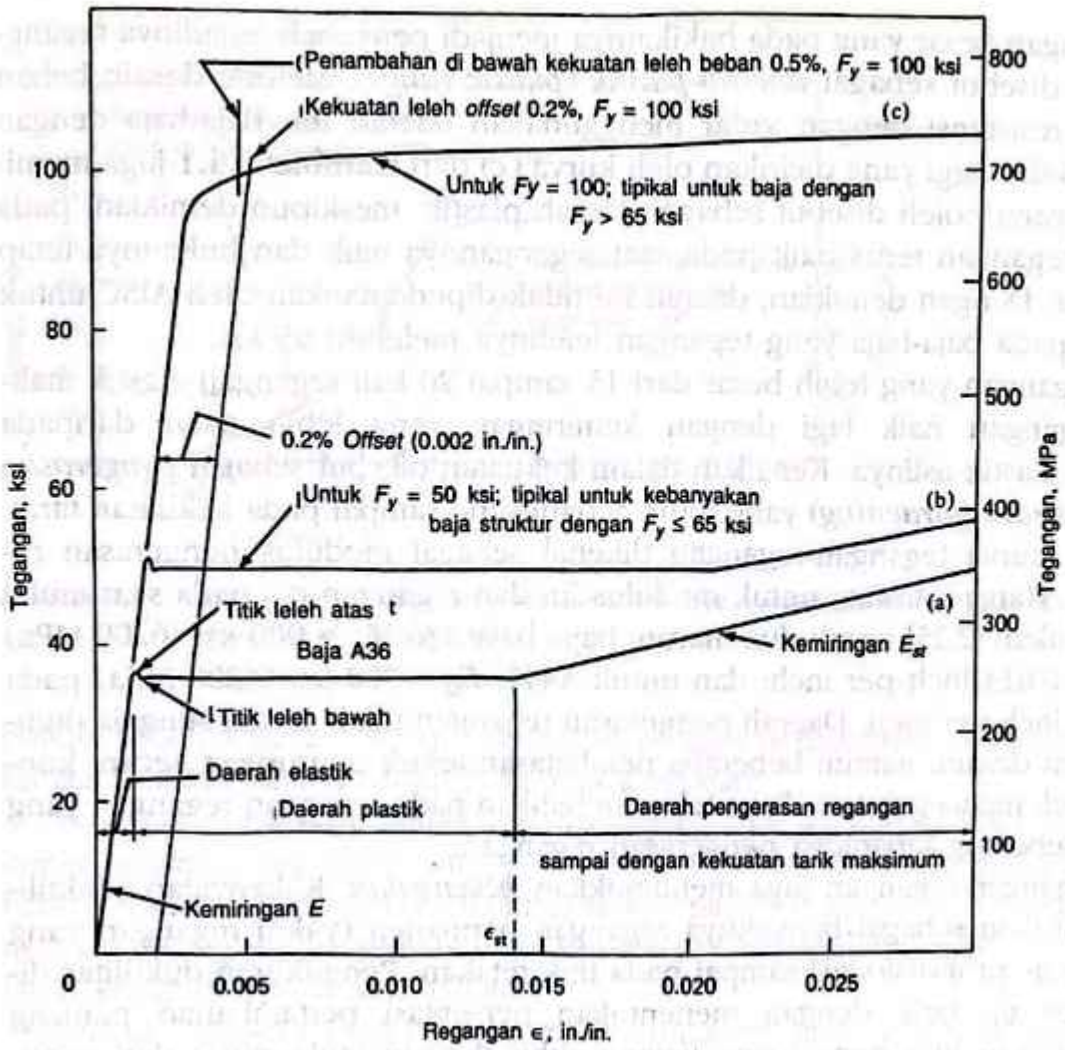
2.4 Perilaku Tegangan — Regangan (Uji Tarik) pada Temperatur Atmosferik

Dalam **Gambar 2.1.1** diperlihatkan beberapa kurva tegangan-regangan untuk kondisi tarik bagi tiga kategori baja yang telah dibicarakan: baja karbon, paduan rendah berkekuatan tinggi, dan baja paduan rendah berkekuatan tinggi dengan perlakuan panas. Perilaku yang sama terjadi pada kondisi tekan bila diberikan dukungan sedemikian rupa sehingga dapat mencegah terjadinya tekukan. Bagian dari masing-masing kurva tegangan-regangan dari **Gambar 2.1.1** yang digunakan dalam desain biasa diperbesar dalam **Gambar 2.4.1**.

Kurva-kurva tegangan-regangan dari **Gambar 2.1.1** ditentukan dengan menggunakan suatu tegangan unit yang diperoleh dengan cara membagi beban dengan luas penampang asli dari spesimen, sedangkan regangan (inchi per inchi) diperoleh dari pertambahan panjang dibagi dengan panjang mula-mula. Kurva-kurva semacam ini disebut sebagai kurva *tegangan-regangan rekayasa* (*engineering stress-strain*). Kurva ini naik sampai suatu tingkat tegangan maksimum (yang dikenal sebagai kekuatan tarik) dan kemudian, dengan bertambahnya regangan, menukik tajam sampai berakhir pada saat spesimennya patah. Ditinjau dari materialnya sendiri, tegangan unit akan terus naik sampai terjadinya kegagalan. Kurva yang disebut sebagai *tegangan sebenarnya/regangan sebenarnya* (*true-stress/true-strain*) diperoleh dengan menggunakan penampang lintang aktual, meskipun telah terjadi pengecilan penampang, dan dengan menggunakan regangan yang bertambah seketika. Kurva tegangan-regangan rekayasa memungkinkan penampang lintang mula-mula (sebelum terjadi pengecilan) dapat digunakan secara praktis.

Kurva-kurva tegangan-regangan (seperti **Gambar 2.4.1**) menunjukkan adanya hubungan garis lurus dengan suatu titik yang disebut sebagai *limit proporsional*, yang pada hakikatnya berimpit dengan titik leleh untuk kebanyakan baja struktur dengan titik leleh tidak lebih dari 65 ksi (450 MPa). Untuk baja paduan rendah yang didinginkan dan disepuh, penyimpangan dari garis lurus terjadi secara

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 2.4.1 *Kurva tegangan-regangan yang diperbesar untuk berbagai tegangan leleh yang berbeda.*

bertahap, seperti dalam kurva (*c*), **Gambar 2.4.1**. Karena istilah titik leleh tidak tepat untuk kurva (*c*), digunakanlah *kekuatan leleh* untuk menyatakan tegangan pada regangan *offset* sebesar 0.2%; atau bila tidak, pertambahan panjang sebesar 0.5% dalam keadaan terbebani seperti **Gambar 2.4.1**. *Tegangan leleh* merupakan istilah umum yang mencakup tegangan unit pada suatu titik leleh, bila terjadi hal demikian, atau kekuatan leleh.

Perbandingan tegangan terhadap regangan pada daerah garis lurus awal dikenal sebagai modulus elastisitas, atau modulus Young, *E*, yang untuk baja struktur dapat diambil sekitar 29,000 ksi (200,000 MPa). Pada daerah garis lurus, pembebanan dan penghilangan beban tidak mengakibatkan deformasi permanen; dan dari sinilah didapatkan sebutan *daerah elastik* (*elastic range*). Tegangan unit beban layanan pada desain baja selalu dimaksudkan agar tetap berada dalam batas proporsional dengan aman, meskipun untuk memastikan faktor-faktor keamanan terhadap kemungkinan kegagalan atau deformasi yang berlebihan, diperlukan pengetahuan mengenai perilaku tegangan-regangan sampai dengan regangan sekitar 15 sampai 20 kali regangan elastik maksimum.

Untuk baja yang menunjukkan titik leleh seperti kurva (*a*) dan (*b*) dari **Gambar**

Dipindai dengan CamScanner

2.4.1, regangan besar yang pada hakikatnya menjadi penyebab terjadinya tegangan konstan disebut sebagai *daerah plastik* (*plastic range*). Metode desain beban dan faktor resistensi dengan sadar menggunakan daerah ini. Baja-baja dengan kekuatan lebih tinggi yang dicirikan oleh kurva (*c*) dari **Gambar 2.4.1** juga memiliki daerah yang boleh disebut sebagai daerah plastik; meskipun demikian, pada daerah ini tegangan terus naik pada saat regangannya naik dan bukannya tetap konstan saja. Dengan demikian, daerah ini tidak diperkenankan oleh AISC untuk digunakan pada baja-baja yang tegangan lelehnya melebihi 65 ksi.

Untuk regangan yang lebih besar dari 15 sampai 20 kali regangan elastik maksimum, tegangan naik lagi dengan kemiringan yang lebih datar daripada kemiringan elastik aslinya. Kenaikan dalam kekuatan disebut sebagai *pengerasan regangan* (*strain hardening*) yang terus berlangsung sampai pada kekuatan tarik. Kemiringan kurva tegangan-regangan dikenal sebagai modulus pengerasan regangan, E_{st}. Harga rata-rata untuk modulus ini dan regangan ϵ_{st} pada saat mulai telah ditentukan [2.25] untuk dua macam baja: baja A36, E_{st} = 900 ksi (6200 MPa) pada ϵ_{st} = 0.014 inch per inch; dan untuk A441, E_{st} = 700 ksi (4800 MPa) pada ϵ_{st} = 0.021 inch per inch. Daerah pengerasan regangan tidak secara sengaja digunakan dalam desain, namun beberapa pembatasan tekuk diturunkan secara konservatif untuk mencegah terjadinya tekukan bahkan pada regangan-regangan yang berada di seberang terjadinya pengerasan regangan.

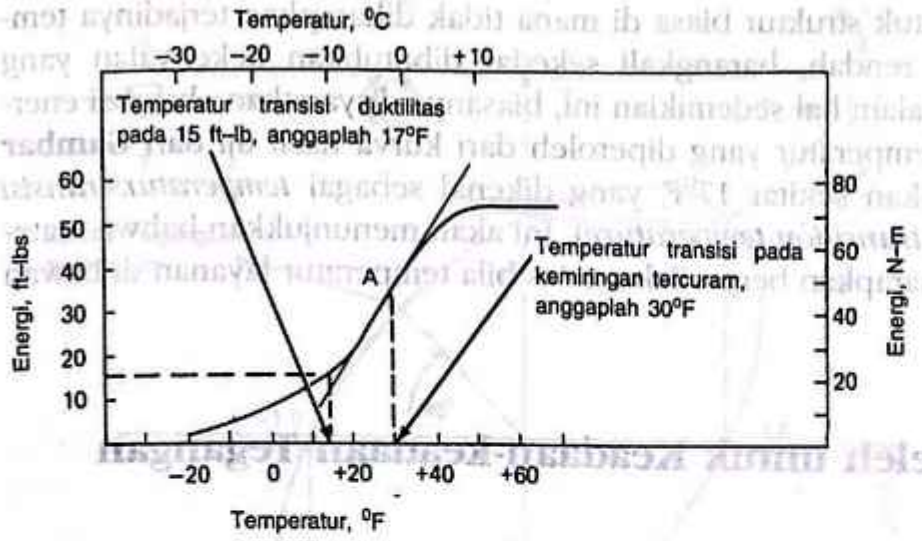
Kurva tegangan-regangan juga menunjukkan *kekenyalan*. Kekenyalan (duktilitas) didefinisikan sebagai banyaknya regangan permanen (yakni regangan yang melebihi batas proporsional) sampai pada titik retakan. Pengukuran duktilitas diperoleh dari uji tarik dengan menentukan persentasi pertambahan panjang (membandingkan luas penampang lintang akhir dengan mula-mula) dari spesimen. Kekenyalan merupakan hal yang penting karena memungkinkan terjadinya pelelehan lokal yang disebabkan oleh tegangan yang tinggi dan dari sebab itu memungkinkan terjadinya perubahan distribusi tegangan. Prosedur desain berdasarkan perilaku tak-elastik membutuhkankan kekenyalan yang inheren, khususnya untuk perlakuan terhadap tegangan yang terjadi di dekat lobang-lobang atau perubahan mendadak pada bentuk batang maupun pada desain sambungan.

2.5 Keuletan Bahan

Penggunaan baja dengan kekuatan lebih tinggi dari A36 tanpa perlakuan panas telah menimbulkan berbagai persoalan yang terkait dengan kurang kenyalnya bahan serta keretakan bahan [2.27]. Paling tidak, penggunaan baja-baja sedemikian ini menghendaki agar insinyur lebih menyadari perilaku bahan.

Pada desain baja struktur, keuletan merupakan ukuran kemampuan baja untuk menahan retakan; yakni untuk menyerap energi. Menurut Rolfe [2.26], keuletan bahan didefinisikan sebagai "ketahanan terhadap penyebaran celahan yang tidak stabil karena adanya takikan". Penyebaran celahan yang tak stabil akan menim-

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 2.5.1 *Kurva temperatur transisi untuk baja karbon yang diperoleh dari uji kejut takikan V Charpy. (Diadaptasi dari* ***Acuan 2.25****)*

bulkan retakan getas, bila dibandingkan dengan pertumbuhan celahan yang stabil dari suatu celahan subkritik karena keletihan.

Untuk tarik uniaksial, keuletan dapat diwujudkan sebagai luasan total di bawah kurva tegangan-regangan sampai ke titik retakan di mana diagram tersebut berakhir. Karena tarik uniaksial jarang terjadi pada struktur yang sebenarnya, lebih mudah bila digunakan sebuah indeks keuletan berdasarkan kondisi tegangan yang lebih kompleks pada akar takikan.

Keuletan takikan (*notch toughness*) merupakan ukuran dari ketahanan logam terhadap awal dan penyebaran celahan pada suatu takikan standar, biasanya dengan uji takikan V Charpy. Uji ini menggunakan suatu balok berbentuk persegi kecil berpenumpu sederhana dengan sebuah takikan V pada pertengahan panjangnya. Batang tersebut diretakkan oleh pukulan dari sebuah bandul yang berayun-ayun. Banyaknya energi yang diserap dihitung dari ketinggian yang dicapai bandul setelah memecahkan spesimen. Banyaknya energi yang diserap akan naik dengan naiknya temperatur pada saat uji dilaksanakan.

Meskipun uji takikan V Charpy telah biasa menjadi sarana untuk menentukan keuletan takikan, akhir-akhir ini telah digunakan kriteria-kriteria retakan lain serta mekanika retakan yang lebih mutakhir [2.26]. Barsom dan Rolfe [2.28] dan Barsom [2.29, 2.30] dengan cemerlang telah menguraikan faktor-faktor yang berkaitan dengan keretakan pada baja.

Gambar 2.5.1 menunjukkan hubungan tipikal antara temperatur dengan transisi dari perilaku kenyal (*ductile*) ke perilaku getas (*brittle*), seperti yang dapat diperoleh dari uji takikan V Charpy. Temperatur pada titik di mana kemiringan paling curam (titik A dari **Gambar 2.5.1**) merupakan temperatur transisi. Karena getas dan kenyal merupakan istilah kualitatif, berbagai baja struktur memiliki persyaratan yang berlain-lainan untuk kekenyalan pada berbagai temperatur tergantung pada lingkungan layanannya (pembebanan, temperatur, tingkatan tegangan dan regangan, angka pembebanan, dan pembebanan berulang).

Dipindai dengan CamScanner

Sebagai contoh, untuk struktur biasa di mana tidak diharapkan terjadinya temperatur yang sangat rendah, barangkali sekedar dibutuhkan kekenyalan yang sedang-sedang saja; dalam hal sedemikian ini, biasanya disyaratkan absorbsi energi sebesar 15 ft-lb. Temperatur yang diperoleh dari kurva hasil uji dari **Gambar 2.5.1** pada 15 ft-lb akan sekitar 17°F, yang dikenal sebagai *temperatur transisi kekenyalan* (*ductility transition temperature*). Ini akan menunjukkan bahwa material tersebut dapat diharapkan berperilaku getas bila temperatur layanan di bawah 17°F.

2.6 Kekuatan Leleh untuk Keadaan-keadaan Tegangan Multiaksial

Hanya bila batang pikul beban dipengaruhi tegangan tarik uniaksial sajalah, sifat-sifat dari uji tarik dapat diharapkan identik dengan sifat-sifat batang strukturalnya. Mudah sekali kita melupakan bahwa pelelehan pada suatu struktur yang sebenarnya biasanya *bukan* merupakan perilaku yang terdefinisikan dengan baik yang teramati selama uji tarik. Pelelehan biasanya diasumsikan dapat tercapai bila salah satu komponen tegangan mencapai harga uniaksial F_y.

Untuk semua keadaan tegangan selain uniaksial, dibutuhkan suatu definisi pelelehan. Definisi-definisi ini, dan kerapkali ada beberapa definisi hanya untuk satu keadaan saja, disebut *kondisi-kondisi lelehan* (atau *teori-teori kegagalan* = *theories of failure*), dan merupakan persamaan-persamaan interaksi di antara tegangan-tegangan yang bekerja.

2.6.1 Kriteria Lelehan Energi Distorsi (Huber—von Mises—Hencky)

Teori yang paling umum diterima ini memberikan tegangan leleh uniaksial menurut tiga tegangan utama. Kriteria leleh* dapat dinyatakan sebagai:

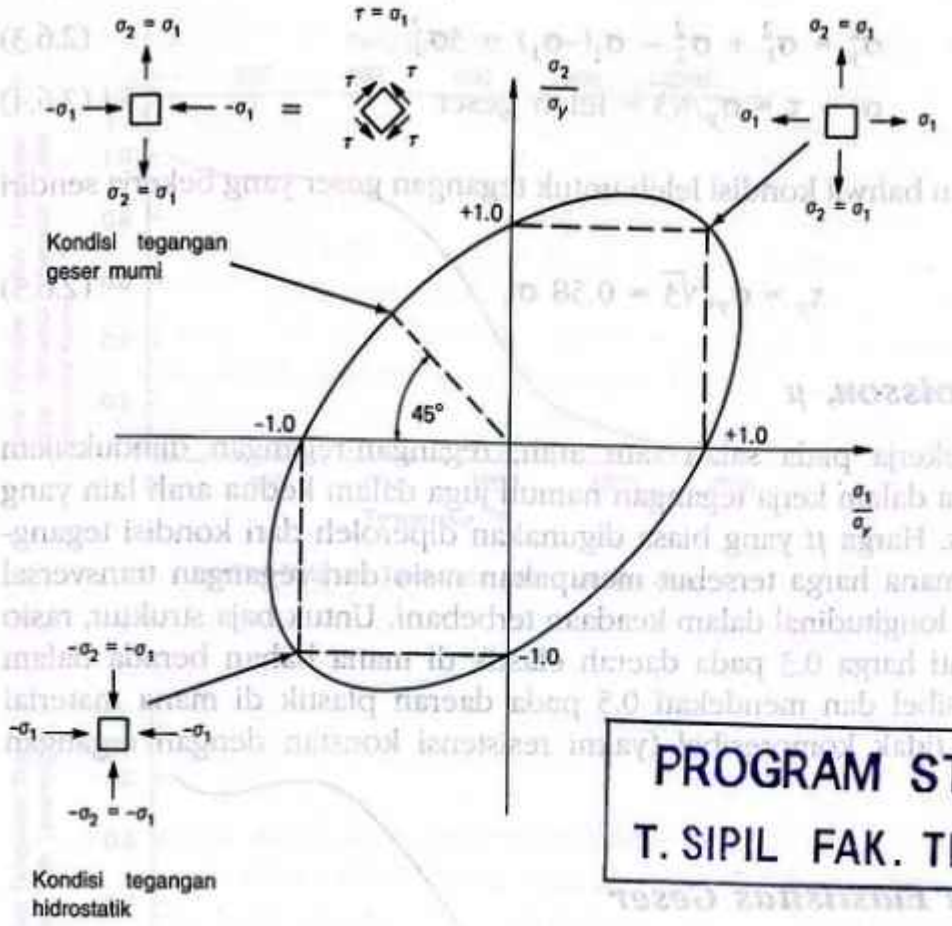
$$\sigma_y^2 = \tfrac{1}{2}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right] \qquad (2.6.1)$$

di mana σ_1, σ_2, σ_3 merupakan tegangan tarik atau tekan yang bekerja pada tiga arah utama; yakni tegangan yang bekerja dalam tiga bidang saling tegak lurus dari geser nol, dan σ_y merupakan "tegangan leleh" yang dapat dibandingkan dengan harga uniaksial F_y.

Untuk kebanyakan situasi desain struktur, salah satu tegangan utama berharga nol atau cukup kecil sehingga bisa diabaikan. Dengan demikian, untuk tegangan bidang (semua tegangan dianggap bekerja pada suatu bidang) **Persamaan 2.6.1** dapat disederhanakan menjadi:

* Lihat Fred B. Seely dan James O. Smith, *Advanced Mechanics of Materials*, edisi kedua (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1952), pp. 76–91

Dipindai dengan CamScanner



***Gambar 2.6.1** Kriteria leleh energi distorsi untuk tegangan-tegangan bidang.*

$$\sigma_y^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 \qquad (2.6.2)$$

Bila tegangan-tegangan pada pelat tipis ini ikut diperhitungkan, tegangan utama yang bekerja secara tegak lurus terhadap bidang pelat biasanya berharga nol (paling tidak terhadap pendekatan tingkat pertama). Tegangan-tegangan fleksural (bengkokan) pada balok berasumsi pada tegangan utama yang tegak lurus terhadap bidang lentur sama dengan nol. Tambahan pula, profil-profil struktural (**Gambar 1.5.1**) tersusun dari elemen-elemen pelat tipis, dengan demikian semuanya mengikuti **Persamaan 2.6.2**. Kriteria leleh tegangan bidang, **Persamaan 2.6.2**, merupakan prinsip yang digunakan di seluruh bab berikutnya bila mana diperlukan, dan dilukiskan dalam **Gambar 2.6.1**.

2.6.2 Tegangan Leleh Geser

Titik leleh untuk geser murni dapat ditentukan dari kurva tegangan-regangan dengan pembebanan geser, atau bila kriteria leleh multiaksial diketahui, hubungan tersebut dapat digunakan. Geser murni terjadi pada bidang-bidang yang membentuk sudut 45° terhadap bidang utama bila $\sigma_2 = -\sigma_1$, dan tegangan geser $\tau = \sigma_1$. Substitusi dari $\sigma_2 = -\sigma_1$ ke dalam **Persamaan 2.6.2** akan memberikan:

Dipindai dengan CamScanner

$$\sigma_y^2 = \sigma_1^2 + \sigma_1^2 - \sigma_1(-\sigma_1) = 3\sigma_1^2 \quad (2.6.3)$$

$$\sigma_1 = \tau = \sigma_y/\sqrt{3} = \text{leleh geser} \quad (2.6.4)$$

yang menunjukkan bahwa kondisi leleh untuk tegangan geser yang bekerja sendiri adalah:

$$\tau_y = \sigma_y/\sqrt{3} = 0.58\ \sigma_y \quad (2.6.5)$$

2.6.3 *Rasio Poisson, μ*

Bila tegangan bekerja pada salah satu arah, regangan-regangan diinduksikan bukan hanya pada dalam kerja tegangan namun juga dalam kedua arah lain yang saling tegak lurus. Harga μ yang biasa digunakan diperoleh dari kondisi tegangan uniaksial, di mana harga tersebut merupakan rasio dari regangan transversal dengan regangan longitudinal dalam keadaan terbebani. Untuk baja struktur, rasio Poisson mendekati harga 0.3 pada daerah elastik di mana bahan berada dalam keadaan kompresibel dan mendekati 0.5 pada daerah plastik di mana material pada hakikatnya tidak kompresibel (yakni resistensi konstan dengan regangan mana pun).

PROGRAM STUDI
T. SIPIL FAK. TEKNIK

2.6.4 *Modulus Elastisitas Geser*

Pembebanan dalam geser murni menghasilkan kurva tegangan-regangan berbentuk garis lurus yang kemiringannya mewakili modulus elastisitas geser. Bila rasio Poisson μ dan modulus elastisitas tarik-tekan E diketahui, modulus geser G oleh teori elastisitas didefinisikan sebagai:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2.6.6)$$

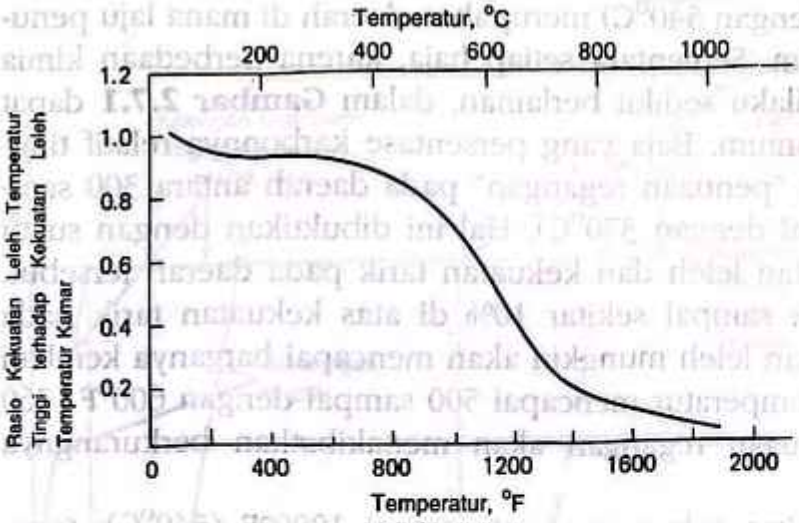
yang untuk baja struktural harganya di atas 11,000 ksi (75,800 MPa).

2.7 Perilaku Temperatur Tinggi

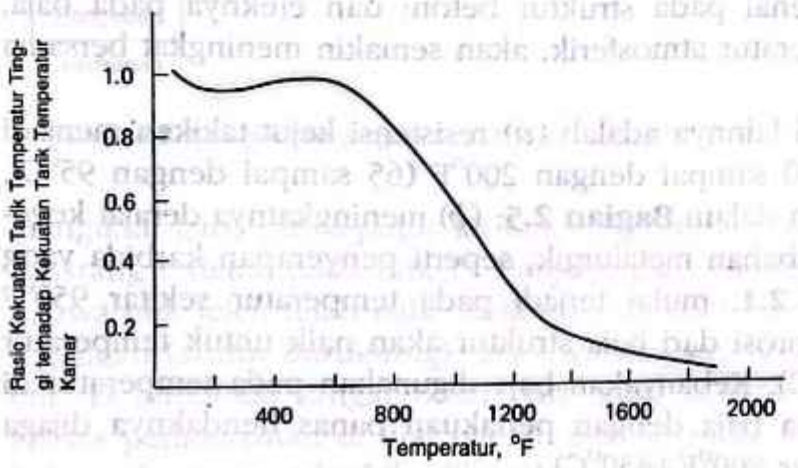
Desain struktur-struktur yang bekerja di bawah temperatur atmosferik jarang melibatkan pertimbangan mengenai perilaku temperatur tinggi. Pengetahuan mengenai perilaku semacam ini dibutuhkan pada waktu memberikan spesifikasi terhadap prosedur pengelasan, dan menjadi hal yang penting bila berhadapan dengan efek-efek api.

Bila temperatur melampaui sekitar 200°F (93°C), kurva tegangan-regangan mulai menjadi tidak linear, sedikit demi sedikit mengeliminasi titik leleh yang terdefinisikan dengan baik. Modulus elastisitas, kekuatan leleh, dan kekuatan tarik, kesemuanya berkurang pada saat temperaturnya naik. Daerah antara 800 sampai

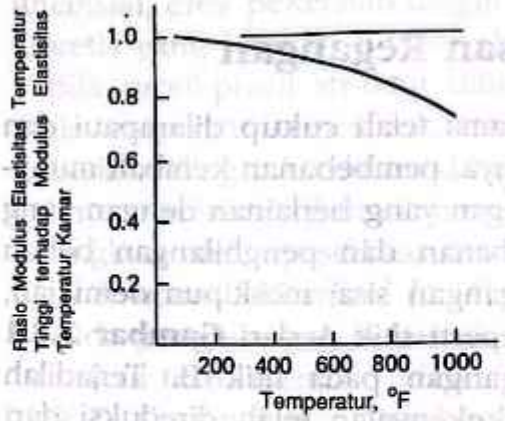
Dipindai dengan CamScanner



(a) Efek Rata-rata Temperatur pada Kekuatan Leleh



(*b*) Efek Rata-rata Temperatur pada Kekuatan Tarik



(*c*) Efek Tipikal Temperatur pada Modulus Elastisitas

Gambar 2.7.1 *Efek-efek tipikal temperatur tinggi pada sifat-sifat kurva tegangan-regangan baja struktur. (diadaptasi dari Acuan 2.25)*

Dipindai dengan CamScanner

dengan 1000°F (430 sampai dengan 540°C) merupakan daerah di mana laju penurunannya mencapai maksimum. Sementara setiap baja, karena perbedaan kimia dan mikrostrukturnya, berperilaku sedikit berlainan, dalam **Gambar 2.7.1** dapat dilihat hubungannya secara umum. Baja yang persentase karbonnya relatif tinggi, seperti A36, menunjukkan "penuaan regangan" pada daerah antara 300 sampai dengan 700°F (150 sampai dengan 370°C). Hal ini dibuktikan dengan suatu kenaikan relatif dalam kekuatan leleh dan kekuatan tarik pada daerah tersebut. Kekuatan tarik mungkin naik sampai sekitar 10% di atas kekuatan tarik pada temperatur kamar dan kekuatan leleh mungkin akan mencapai harganya kembali pada temperatur kamar bila temperatur mencapai 500 sampai dengan 600°F (260 sampai dengan 320°C). Penuaan regangan akan menakibatkan berkurangnya kekenyalan.

Penurunan modulus elastisitas cukup moderat sampai 1000°F (540°C); sesudahnya penurunan akan sangat tajam. Lebih penting lagi, pada temperatur di atas 500 sampai 600°F (260 sampai 320°C), baja menunjukkan deformasi yang naik bersama bertambahnya waktu pembebanan, fenomen ini dikenal sebagai *creep* (*penjalaran*). Penjalaran dikenal pada struktur beton; dan efeknya pada baja, yang tidak terjadi pada temperatur atmosferik, akan semakin meningkat bersama naiknya temperatur.

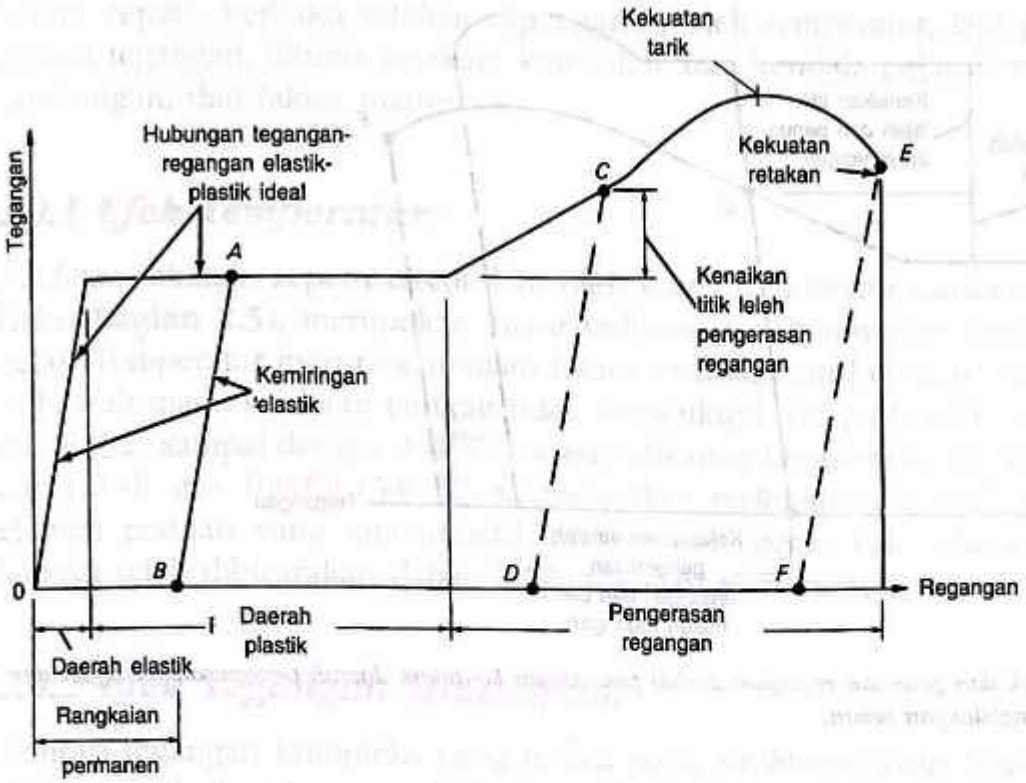
Efek-efek temperatur tinggi lainnya adalah (*a*) resistensi kejut takikan menjadi lebih baik sampai sekitar 150 sampai dengan 200°F (65 sampai dengan 95°C), seperti yang telah dibicarakan dalam **Bagian 2.5**; (*b*) meningkatnya derajat kegetasan karena perubahan-perubahan metalurgik, seperti penyerapan karbida yang dibicarakan dalam **Gambar 2.1**, mulai terjadi pada temperatur sekitar 950°F (510°C); dan (*c*) resistensi korosi dari baja struktur akan naik untuk temperatur sampai sekitar 1000°F (540°C). Kebanyakan baja digunakan pada temperatur di bawah 1000°F; dan beberapa baja dengan perlakuan panas hendaknya dijaga tetap berada di bawah sekitar 800°F (430°C).

2.8 Pekerjaan Dingin dan Pengerasan Regangan

Setelah regangan $\epsilon_y = F_y/E_s$ pada lelehan pertama telah cukup dilampaui dan spesimen yang bersangkutan dihilangkan bebannya, pembebanan kembali mungkin akan memberikan hubungan tegangan-regangan yang berlainan dengan yang teramati selama pembebanan pertama. Pembebanan dan penghilangan beban elastik akan mengakibatkan tidak terjadinya regangan sisa; meskipun demikian, pembebanan awal yang jauh dari titik leleh seperti titik A dari **Gambar 2.8.1** pada penghilangan beban mengakibatkan regangan pada titik B. Terjadilah rangkaian regangan permanen OB. Kapasitas kekenyalan telah direduksi dari regangan OF menjadi BF. Pembebanan kembali akan menunjukkan perilaku seakan-akan asal mula tegangan-regangan terjadi pada titik B; daerah plastik sebelum terjadinya pengerasan regangan juga direduksi.

Bila pembebanan telah terjadi sampai titik C tercapai, penghilangan beban akan

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 2.8.1 *Efek-efek peregangan di luar daerah elastik.*

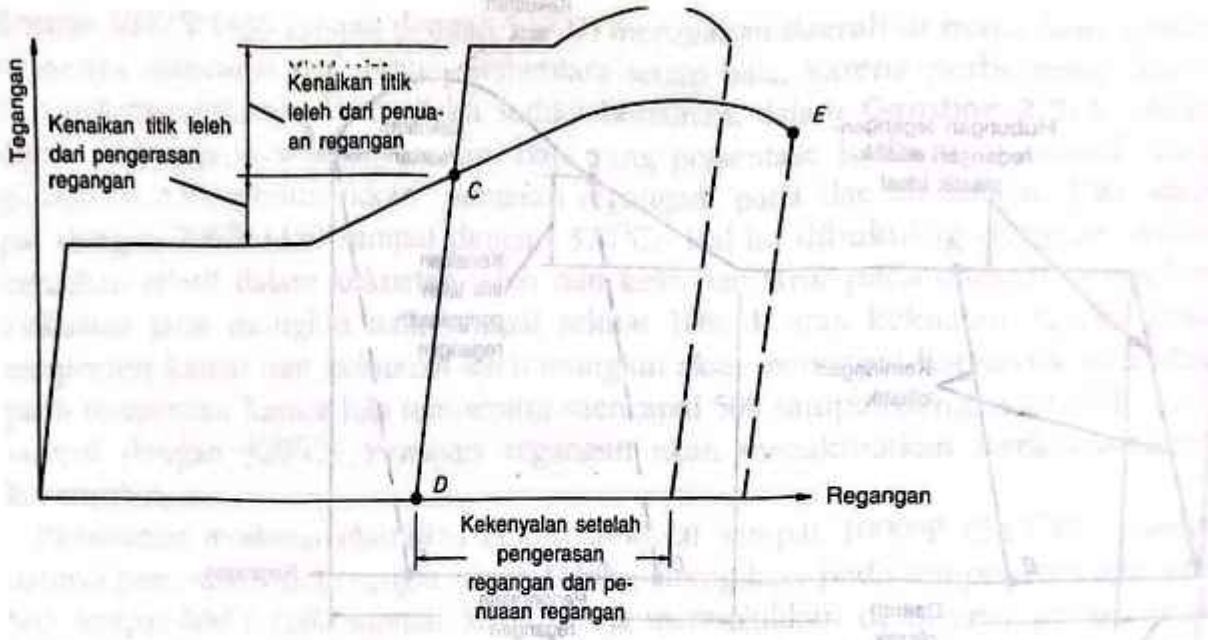
mengikuti garis putus-putus ke titik D; yakni asal mula untuk pembebanan baru sekarang terletak pada titik D. Panjang garis CD lebih besar yang menunjukkan bahwa titik leleh telah naik. Naiknya titik leleh disebut sebagai efek pengerasan regangan (*strain hardening*); kekenyalan yang tinggal selama pembebanan dari titik D tereduksi sangat besar dari harga aslinya sebelum pembebanan awal. Proses pembebanan di luar daerah elastik untuk menimbulkan perubahan pada kekenyalan yang ada, bila dikerjakan pada temperatur atmosferik, dikenal sebagai *pekerjaan dingin*. Karena struktur sebenarnya tidak dibebani dalam tarik-tekan uniaksial, efek pekerjaan dingin jauh lebih kompleks dan merupakan suatu studi teoretis yang berada di luar cakupan buku ini.

Bila profil-profil struktur dibuat dengan pembentukan dingin dar pelat-pelat pada temperatur atmosferik, terjadilah deformasi tak elastik pada bengkokannya. Pekerjaan dingin ke dalam daerah pengerasan regangan pada tempat-tempat terjadinya pembengkokan akan meningkatkan kekuatan leleh yang dapat ikut diperhitungkan oleh spesifikasi desain. *Specification for the Design of Cold Formed Steel Structural Members** [1.11] mencakup pula hal demikian ini.

Pada penghilangan beban dan setelah suatu kurun waktu tertentu, baja tersebut akan telah memiliki sifat-sifat yang berlainan dengan yang ditunjukkan oleh titik D, C, dan E dari **Gambar 2.8.1** dengan suatu fenomen yang dikenal sebagai *penuaan regangan* (*strain aging*). Penuaan regangan, seperti terlihat dalam

* Selanjutnya disebut sebagai Spesifikasi AISI

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 2.8.2 *Efek dari penuaan regangan setelah peregangan ke dalam daerah pengerasan regangan dan penghilangan beban.*

Gambar 2.8.1, menghasilkan suatu tambahan pada titik lelehnya, memperbaiki daerah plastik dari tegangan konstan, dan memberikan suatu daerah pengerasan regangan baru pada tegangan yang telah ditinggikan. Bentuk asli dari diagram tegangan-regangan direstorasi, namun kekenyalannya tereduksi. Diagram tegangan-regangan yang baru dapat digunakan seolah-olah merupakan diagram yang asli untuk menganalisis potongan-potongan bentukan dingin, selama kekenyalan yang tinggal masih mencukupi. Bagian-bagian sudut dari profil-profil bentukan dingin pada umumnya tidak membutuhkan kekenyalan yang tinggi untuk regangan rotasi di sekitar sumbu bengkokan.

Seandainya dikehendaki, pengendoran tegangan dengan pemudaan dapat mengeliminasi efek-efek pekerjaan dingin. Pemudaan dilakukan dengan pemanasan sampai ke suatu temperatur di atas daerah transformasi dan membiarkannya mendingin perlahan-lahan sehingga terjadilah proses rekristalisasi yang akan merestorasi sifat-sifat aslinya. Bittence [2.3.1] memberikan rangkuman yang istimewa mengenai dasar-dasar perlakuan panas.

2.9 Retakan Getas

Sebagaimana yang telah dibicarakan dalam beberapa bagian, dalam berbagai macam kondisi, baja yang biasanya kenyal dapat berubah menjadi getas.

Barsom [2.29, 2.30], Barsom dan Rolfe [2.28], dan Rolfe [2.26] telah membuat suatu rangkuman yang baik mengenai pengendalian getas dan letih bagi para insinyur struktur. Rolfe [2.26] mendefinisikan *retakan getas* (*brittle fracture*) sebagai suatu "bencana" yang terjadi tanpa deformasi sebelumnya dan berlangsung

Dipindai dengan CamScanner

begitu cepat". Perilaku retakan dipengaruhi oleh temperatur, laju pembebanan, tingkat tegangan, ukuran retakan, ketebalan atau kendala pelat, bentuk geometri sambungan, dan faktor manusia.

2.9.1 Efek Temperatur

Keuletan takikan, seperti ditentukan oleh kurva temperatur transisi kejut Charpy (*lihat* **Bagian 2.5**), merupakan suatu indikasi dari kerentanan terhadap retakan getas. Temperatur merupakan suatu faktor vital dengan beberapa cara: (*a*) harga di bawah mana keuletan takikan tidak mencukupi; (*b*) pada 600 sampai dengan 800°F (320 sampai dengan 430°C) menyebabkan terbentuknya mikrostruktur getas; dan (*c*) di atas 1000°F (540°C) menyebabkan terserapnya karbida oleh elemen-elemen paduan yang menambah mikrostruktur getas. Faktor-faktor temperatur lainnya telah dibicarakan dalam bagian-bagian sebelumnya.

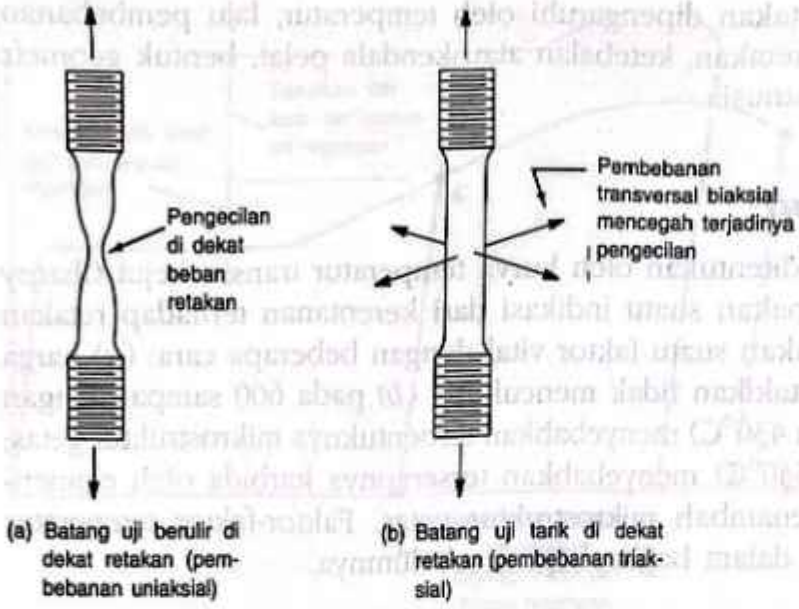
2.9.2 Efek Tegangan Multiaksial

Kondisi tegangan kompleks yang terjadi pada struktur-struktur biasa, khususnya pada simpul-simpul, merupakan suatu faktor utama lainnya yang mempengaruhi getas. *Primer on Brittle Fracture* [2.32] telah memberi uraian rasional mengenai hal ini dan menjadi dasar dari hal berikutnya. Kurva tegangan-regangan rekayasa diperuntukkan bagi tegangan uniaksial sebelum terjadi pengecilan penampang seperti **Gambar 2.9.1*a***. Bila mungkin terjadi pembebanan lateral biaksial seperti **Gambar 2.9.1*b***, pengecilan penampang secara plastik dapat ditekan sampai ke suatu titik di mana batang tersebut akan pecah menggetas tanpa mengalami pertambahan panjang dan tanpa pengurangan luas. Tegangan retak berdasarkan luas penampang lintang yang tak tereduksi akan sama tinggi nilainya dengan yang berdasarkan penampang lintang dengan pengecilan pada kasus tarik uniaksial. Tegangan unit akan jauh di atas kekuatan tarik maksimum nominal dari kurva tegangan-regangan rekayasa yang selalu dihitung berdasar penampang lintang aslinya.

Efek-efek takikan juga telah disinggung pada pembicaraan mengenai keuletan takikan pada **Bagian 2.5**. Takikan bekerja sedikit menyerupai pembebanan triaksial teoretis dari **Gambar 2.9.1*b*** keadaan tersebut, aliran plastik yang dapat terjadi pada kondisi sebaliknya serta pada suatu tegangan yang lebih tinggi cenderung mengalami kegagalan secara getas. **Gambar 2.9.2** menunjukkan efek dari suatu takikan dalam spesimen uji tarik. Luas penampang lintang pada dasar takikan berhubungan dengan luas spesimen aslinya dari **Gambar 2.9.1*b***. Penampang yang tereduksi berusaha menjadi makin sempit pada saat tarik aksial naik, namun pengurangan penampang ini akan tertahan oleh tarikan diagonal yang berkembang pada titik-titik sudut, seperti **Gambar 2.9.2**. Batang uji akan mengalami kegagalan pada tegangan tinggi dengan retakan getas.

Takikan-takikan dapat terjadi pada struktur nyata karena penggunaan sudutan tak beralur dalam desain atau karena pengelasan yang kurang layak sehingga

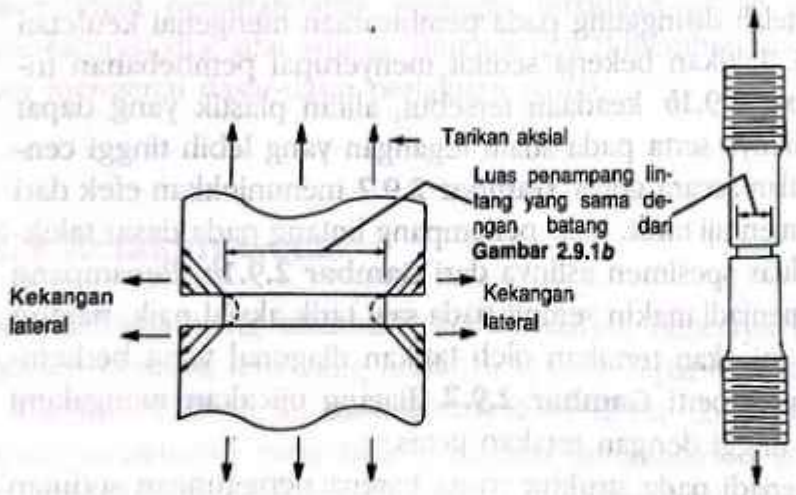
Dipindai dengan CamScanner



Gambar 2.9.1 *Pembebanan uniaksial dan triaksial.*

mudah retak. Kejadian-kejadian semacam ini dapat menyebabkan terjadinya sifa getas. Meskipun demikian, takikan dan las yang retak dapat diminimumkan de ngan desain dan prosedur pengelasan yang baik.

Konfigurasi dan perubahan yang tidak lazim perlu dibuat setahap demi seta hap, sehingga untuk membuat perubahan-perubahan mendadak tidak diperlukar garis-garis alir tegangan. Apabila kompleksitasnya sudah sedemikian rupa sehing ga dapat menaikkan tegangan-tegangan tiga dimensional, kecenderungan ter jadinya getas tentu akan naik pula. Misalnya saja, pengecoran (*casting*) terkenal karena getasnya. Hal ini terutama disebabkan oleh kontinuitas tiga dimensional yang sudah *built-in.*



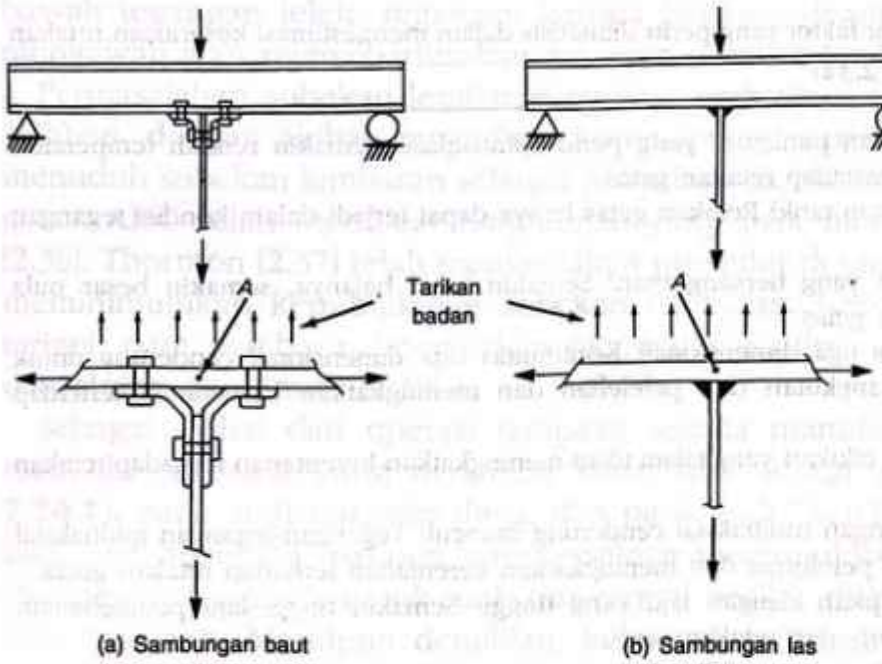
Gambar 2.9.2 *Efek takikan pada uji tarik uniaksial.*

Dipindai dengan CamScanner

2.9.3 Tegangan Multiaksial yang Diinduksikan oleh Pengelasan

Secara umum, pengelasan sudah dengan sendirinya akan menciptakan kekangan yang akan meningkatkan kondisi regangan dan tegangan biaksial dan triaksial, dan yang kemudian akan mengakibatkan terjadinya perilaku getas. Sebagai ilustrasi, perhatikan balok yang dibebani secara sederhana dalam **Gambar 2.9.3** yang mendukung suatu pelat dalam keadaan tarik. Karena membengkok, flens bawah dari balok tersebut berada dalam keadaan tarik; maka dari itu, tegangan pada titik A merupakan tarik uniaksial (dengan mengabaikan efek-efek kecil akibat lebar balok dan tempelan flens pada badan balok). Penerapan pelat tarik dengan siku dan baut pada dasarnya membuat baut flens dan siku dalam keadaan tarik uniaksial dan baut yang menembusi pelat penggantung dalam keadaan geser, sehingga tidak ada efek terhadap tegangan di titik A yang perlu diperhitungkan. Dengan kata lain, kondisi-kondisi tegangan pada sambungan dalam **Gambar 2.9.3*a*** kurang lebih dalam keadaan uniaksial.

Kemudian, perhatikan pelat penggantung tarik yang dilaskan pada flens tarik dari balok tersebut seperti **Gambar 2.9.3*b***. Tegangan pada titik A sekarang biaksial karena tertempel langsung pada flens titik tersebut. Maka dari itu, daerah las dipengaruhi oleh tegangan triaksial; biaksial dari beban-beban langsung, ditambah resistensi terhadap deformasi sepanjang sumbu-sumbu las yang diakibatkan oleh tempelan menerus (efek rasio Poisson). Desain dari sambungan-sambungan dilas hendaknya memperhitungkan kemungkinan terjadinya getas karena tegangan tiga dimensional. Masalah *sobekan lembaran/lamela* (*lamellar tearing*) dibicarakan dalam **Bagian 2.10**.



Gambar 2.9.2 *Perbandingan dari kondisi-kondisi tegangan pada sambungan dengan baut dan sambungan las.*

Dipindai dengan CamScanner

2.9.4 Efek ketebalan

Seperti yang dibicarakan dalam **Bagian 2.6**, bila terjadi tegangan bidang, seperti yang terjadi pada pelat-pelat tipis di mana tegangan yang berada pada arah tegak lurus terhadap bidang pelat dapat diabaikan, efek dimensi ketiga dapat dieliminasi. Untuk pelat tebal, karena efek tiga dimensi, kecenderungan terhadap getas akan bertambah. Dari proses manufakturing, pelat tebal juga cenderung lebih getas ketimbang pelat tipis; (*a*) laju pendinginan yang lebih lambat akan membuat mikrostruktur makin kasar dan (*b*) untuk yang berpenampang tebal, semakin banyak kandungan karbon yang diperlukan untuk memperoleh kekuatan leleh yang sama dengan yang diperoleh dengan pekerjaan panas tambahan pada yang berpenampang tipis, juga akan membuat bahan semakin getas saja.

Menurut Fisher dan Pense [2.33], profil W tempa yang sangat tebal (ASTM A6[1.8], Kelompok 4 dan 5); yakni yang disebut sebagai "profil jumbo", menunjukkan keuletan retak yang rendah pada bagian inti dari flens tebal dengan pertemuan badan dan pada bagian tengah dari badan yang berdekatan dengannya. Keuletan retak yang rendah ini dapat mengakibatkan kegagalan getas bila profil W ini digunakan sebagai batang tarik. Karena alasan inilah, profil tersebut diperuntukkan bagi batang-batang tekan [2.34].

2.9.5 Efek Pembebanan Dinamik

Sifat-sifat tegangan-regangan yang disebut-sebut sejauh ini berlaku untuk pembebanan statik yang dikenakan secara perlahan-lahan. Pembebanan yang lebih cepat seperti pada hentakan pemukul, gempa bumi, atau ledakan nuklir akan meng-

Tabel 2.9.1 Unsur risiko: Faktor-faktor yang perlu dianalisis dalam mengestimasi keseriusan retakan getas (Dari **Acuan 2.32**)

1. Berapakah temperatur layanan minimum yang perlu diantisipasi? Semakin rendah temperatur semakin besar kerentanan terhadap retakan getas.
2. Apakah terdapat pula tegangan tarik? Retakan getas hanya dapat terjadi dalam kondisi tegangan tarik saja.
3. Berapakah ketebalan bahan yang bersangkutan? Semakin tebal bajanya, semakin besar pula kerentanan terhadap retakan getas.
4. Apakah terdapat kontinuitas tiga dimensional? Kontinuitas tiga dimensional cenderung untuk mengekang baja yang bersangkutan dari pelelehan dan meningkatkan kerentanan terhadap retakan getas.
5. Apakah ada takikan? Adanya takikan yang tajam akan meningkatkan kerentanan terhadap retakan getas.
6. Apakah kondisi-kondisi tegangan multiaksial cenderung muncul? Tegangan-tegangan multiaksial akan cenderung mengekang pelelehan dan meningkatkan kerentanan terhadap retakan getas.
7. Apakah pembebanan diterapkan dengan laju yang tinggi? Semakin tinggi laju pembebanan semakin besar kerentanan terhadap retakan getas.
8. Apakah terjadi perubahan laju tegangan? Retakan getas hanya terjadi dalam kondisi meningkatnya laju tegangan.
9. Apakah menggunakan las? Rekahan las dapat berakibat sama hebatnya dengan takikan.

Dipindai dengan CamScanner

ubah sifat-sifat tegangan-regangan. Biasanya, kenaikan laju regangan dari pembebanan dinamik akan menaikkan pula titik leleh, kekuatan tarik, dan kekenyalan. Pada temperatur sekitar 600°F (320°C) terjadi sedikit penurunan pada kekuatannya. Pada laju regangan yang tinggi, tercatat peningkatan getas, namun tampaknya hal itu berkaitan dengan faktor-faktor lain selain yang telah dibicarakan, seperti takikan-takikan di mana terjadi pemusatan tegangan dan efek temperatur terhadap keuletan. Faktor yang lebih penting yang berkaitan dengan penerapan beban dinamik bukan bahwa terjadi suatu laju regangan yang meningkat, melainkan bahwa hal itu dikombinasikan dengan laju regangan yang *menurun* dengan cepat. Efek dari *variasi* tegangan dibicarakan dalam bagian mengenai letih (*fatigue*).

Tabel 2.9.1 dari **Acuan 2.32** memberikan suatu daftar faktor "untuk membantu menentukan apakah risiko keretakan getas cukup serius dan apakah diperlukan pertimbangan-pertimbangan desain khusus ataukah tidak".

2.10 Sobekan Lembaran/Lamela

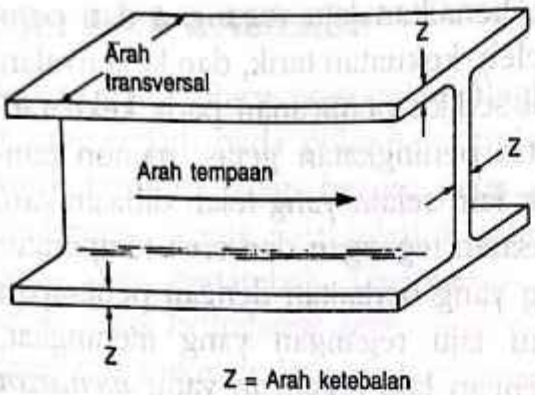
Sobekan lembaran/lamela (*lamellar tearing*) merupakan suatu bentuk retakan getas yang terjadi pada "bidang-bidang yang pada hakikatnya paralel dengan permukaan tempa dari suatu pelat akibat pembebanan yang tinggi di sepanjang ketebalannya" [2.35]. Pada suatu sambungan las dengan kekangan tinggi, regangan "sepanjang ketebalan" diinduksi oleh penyusutan logam las. Regangan setempat karena penyusutan logam las dapat mencapai beberapa kali lebih besar dari regangan titik lelehnya. Karena tegangan yang disebabkan beban layanan di bawah tegangan leleh, regangan karena beban sedemikian tidak diyakini akan mengawali atau menyebarluaskan sobekan-sobekan lembaran/lamela.

Permasalahan sobekan lembaran mulai diperhatikan semenjak awal dasawarsa 1970-an, dengan akibat munculnya kecenderungan para insinyur struktur untuk menuduh sobekan lembaran sebagai penyebab dari kebanyakan peristiwa retakan getas. AISC telah membuat rangkuman yang baik mengenai fenomen tersebut [2.36]. Thornton [2.37] telah menyediakan prosedur desain dan pengawasan untuk meminimumkan kemungkinan sobekan lembaran. Untuk perlakuan yang lebih terinci, para pembaca dipersilakan menyimak Kaufman, Pense, dan Stout [2.35] dan Holby dan Smith [2.38].

Sebagai akibat dari operasi tempaan selama manufaktur, bagian-bagian baja memiliki sifat-sifat yang berlainan pada arah sejajar tempaan (*lihat* **Gambar 2.10.1**), pada arah transversalnya, dan pada arah "ketebalan". Di daerah elastik, baik arah tempaan maupun transversalnya menunjukkan perilaku yang serupa, dengan batas elastik untuk arah transversal sedikit di bawah batas elastik pada arah tempaan. Meskipun demikian, kekenyalan (kemampuan meregang) dalam arah "ketebalan" dapat jauh jadi di bawah kekenyalan pada arah tempaan.

Pada umumnya, penampang baja profil I cukup kenyal bila dibebani baik pada arah sejajar maupun tegak lurus arah tempaan. Karena memikul beban dengan

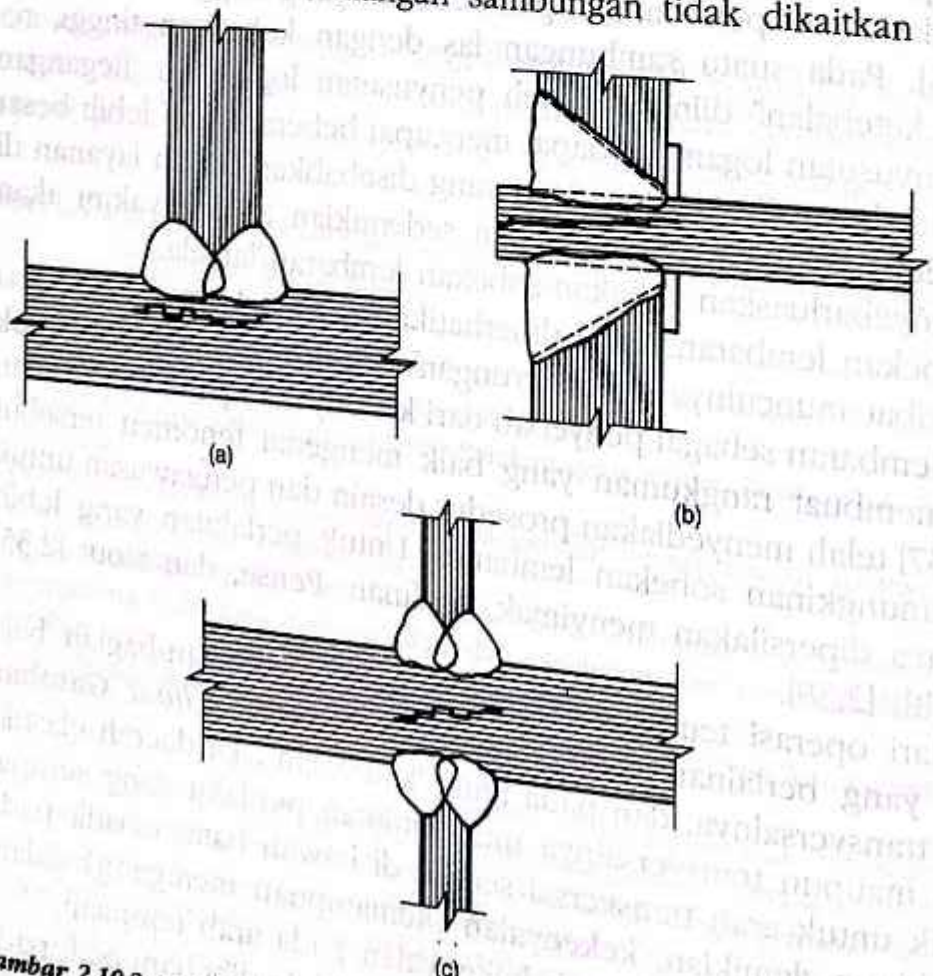
Dipindai dengan CamScanner



Gambar 2.10.1 *Definisi menurut terminologi arah. (Dari Acuan 2.36)*

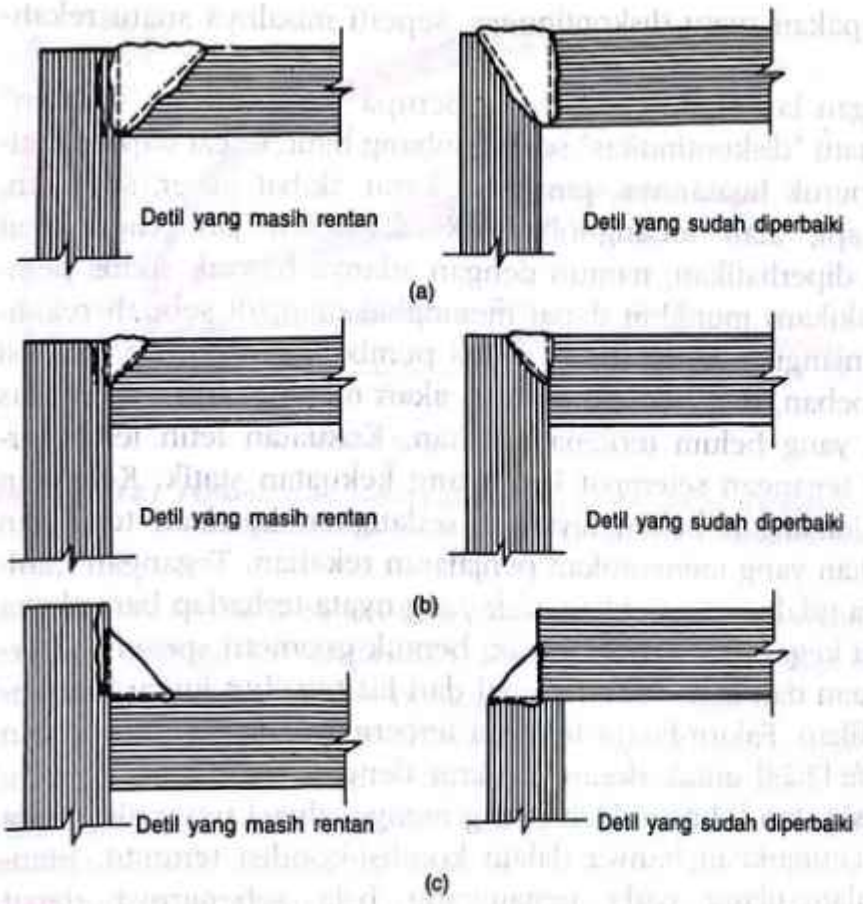
suatu material yang bekerja pada tegangan leleh dan, bila dibutuhkan tambahan kekuatan, mengikutsertakan juga material yang berdekatan, penampang tersebut akan mengalami deformasi lokal sampai pada regangan yang lebih besar dari pada regangan lelehnya (F_y/E_s). Meskipun demikian, bila regangan dilokalkan, misalnya dalam arah "ketebalan" pada salah satu flens tebal dari suatu penampang, akan terjadilah peristiwa terkekang karena regangan tidak dapat didistribusikan kembali dari flens melalui badan ke flens di seberangnya. Regangan melalui "ketebalan" setempat yang besar tersebut mungkin akan melampaui regangan titik lelehnya, menimbulkan dekohesi dan mengantar kepada terjadinya robekan lembaran.

Gambar 2.10.2 melukiskan hubungan antara sobekan lembaran dengan sambungan las. Kondisi kekangan sambungan tidak dikaitkan dengan kontinuitas



Gambar 2.10.2 *Sambungan yang menunjukkan sobekan lembaran tipikal yang diakibatkan oleh penyusutan dari las besar pada material tebal di bawah kekangan tinggi. (Dari* ***Acuan 2.36****).*

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 2.10.3 *Kerentanan terhadap sobekan lembaran dapat direduksi dengan pendetilan sambungan las dengan cermat. (Dari* ***Acuan 2.36****)*

seperti yang diacu oleh para insinyur struktur dalam analisis rangka kaku statis tak tentu. Kekangan yang secara potensial menaikkan sobekan lembaran merupakan kekangan dalam sambungan yang menghambat regangan-regangan unit akibat penyusutan las. Dengan mengacu pada **Gambar 2.10.3**, bila terjadi penyusutan las dalam arah "ketebalan", material terhubung tersebut menjadi rentan terhadap sobekan lembaran. Rincian las harus dibuat supaya penyusutan las terjadi pada arah tempaan. **Acuan 2.36** dan **2.39** memberikan beberapa cara untuk menghindari permasalahan tersebut.

2.11 Kekuatan Letih

Pembebanan dan penghilangan beban secara berulang-ulang, terutama pada *tarikan* sering dapat menyebabkan terjadinya kegagalan, bahkan pula bila tegangan lelehnya tidak sampai terlampaui. Istilah *letih* (*fatigue*) berarti kegagalan karena pembebanan siklik. Kegagalan ini bersifat progresif, di mana tahap akhirnya berupa penjalaran rekahan yang tidak stabil. Kekuatan letih ditentukan oleh tiga variabel; (1) banyaknya siklus pembebanan, (2) *kisaran* tegangan beban layanan (perbedaan antara tegangan maksimum dan minimum), dan (3) ukuran cacat

Dipindai dengan CamScanner

mula-mula. Cacat merupakan suatu diskontinuitas, seperti misalnya suatu rekahan yang sangat kecil.

Pada hubungan dengan las, suatu cacat dapat berupa perpotongan "takikan" dari dua elemen atau suatu "diskontinuitas" seperti lobang baut. Cacat dapat diakibatkan oleh las yang buruk buatannya, pinggiran kasar akibat geser, sodokan pemotongan dengan api, atau lobang-lobang kecil. Boleh jadi cacat-cacat sedemikian tidak perlu diperhatikan; namun dengan adanya banyak siklus pembebanan, cacat (efek takikan) mungkin dapat meningkat menjadi sebuah rekahan yang bertambah panjangnya pada setiap siklus pembebanan dan mereduksi bagian yang memikul beban, dan konsekuensinya akan meningkatkan intensitas tegangan pada bagian yang belum terkena rekahan. Kekuatan letih lebih tergantung pada keadaan tegangan setempat ketimbang kekuatan statik. Keletihan selalu merupakan pertimbangan beban layanan; sedangkan keadaan tegangan beban layanan merupakan yang menentukan penjalaran rekahan. Tegangan minimum dan golongan baja tidak menunjukkan efek yang nyata terhadap banyaknya siklus sampai timbulnya kegagalan. Di lain pihak, bentuk geometri spesimen, termasuk kondisi permukaan dan kehalusan internal dari las tersebut justru menunjukkan efek yang signifikan. Faktor-faktor tersebut tercermin dalam aturan-aturan *Structural Welding Code* [2.24] untuk desain struktur dengan las.

Karya mutakhir Zuraski dan Johnson [2.40] yang mengevaluasi umur sisa pada jembatan baja telah menunjukkan bahwa dalam kondisi-kondisi tertentu, pemberian tegangan berulang-ulang pada penampang baja sebenarnya dapat meningkatkan umur keletihan. Fenomen ini, yang dikenal sebagai *coaxing*, pertama kali dipelajari oleh Sinclair [2.41] dan merupakan akibat dari pemberian tegangan berulang-ulang di dekat namun di bawah batas letih dan setahap demi setahap menaikkan tegangannya.

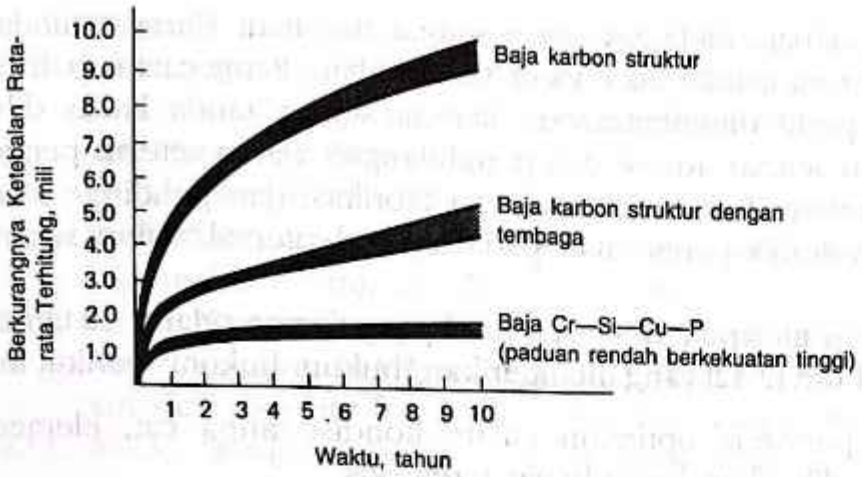
Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] dalam Apendiks K4 tidak menyebutkan efek letih yang kurang dari 20,000 siklus, yang mendekati jumlah pemakaian sebanyak dua kali sehari selama 25 tahun. Karena kebanyakan pembebanan pada bangunan tidak dalam kategori ini, pada umumnya keletihan tidak diperhitungkan. Toh masih ada kekecualian, yakni pada balok jalur derek dan struktur yang mendukung mesin-mesin. Keletihan selalu diperhitungkan pada desain jembatan jalan raya yang diharapkan akan mengalami lebih dari 100,000 siklus pembebanan.

Volume 1 dari *Welding Handbook* [2.22, p. 402] menunjukkan beberapa contoh yang bagus mengenai hubungan keletihan untuk balok-balok pelat dilas dan balok-balok yang ditutupi pelat. Pembahasan lebih lanjut mengenai keletihan diberikan oleh Barsom dan Rolfe [2.28].

2.12 Resistensi Korosi dan Baja yang Melapuk

Semenjak baja mulai digunakan, salah satu kekurangan yang penting adalah bahwa dibutuhkan pengecatan untuk mencegah perusakan logam karena korosi (perkaratan). Baja karbon berkekuatan rendah tidak mahal namun sangat mudah

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 2.12.1 *Perbandingan korosi pada beberapa baja dalam lingkungan industri. Bagian yang diarsir menunjukkan kisaran untuk spesimen-spesimen individual. (Diadaptasi dari* ***Acuan 2.43****)*

terkena korosi. Ketahanan terhadap korosi dapat diperbaiki dengan penambahan tembaga sebagai unsur paduan. Meskipun demikian, baja karbon bercampur tembaga terlalu mahal untuk penggunaan secara umum.

Baja paduan rendah berkekuatan tinggi memiliki ketahanan terhadap korosi beberapa kali lebih besar daripada baja karbon struktur [2.43], baik dengan atau tanpa penambahan tembaga, seperti terlihat pada **Gambar 2.12.1**. Baja paduan rendah berkekuatan tinggi tidak berlobang-lobang seganas baja karbon, dan karat yang terbentuk menjadi lapisan pelindung yang mencegah terjadinya perusakan lebih lanjut. Dengan unsur-unsur paduan tertentu, baja paduan rendah berkekuatan tinggi akan membentuk suatu oksida lapisan pelindung yang manis penampilannya dan dilukiskan sedemikian:* "Suatu korosi yang padat—berwarna-warni lembayung, merah, coklat yang benar-benar gelap .... Tekstur dan warnanya tak dapat direproduksi secara artifisial—suatu karakter yang hanya dapat diberikan oleh alam saja, bagaikan bebatuan, marmer, dan granit". Bila baja ini memang tidak direncanakan untuk dicat dan dibiarkan ekspos, baja tersebut disebut sebagai baja melapuk (*weathering steel*).

Seperti yang dapat diharapkan, sifat-sifat korosi dari sesuatu baja, termasuk baja melapuk, tergantung pada komposisi kimiawinya, derajat polusi dalam atmosfir, dan frekuensi pembasahan dan pengeringan dari baja yang bersangkutan.

Semenjak digunakan pertama kali dalam tahun 1958, bagi *Administrative Center for Deere & Company* di Moline, Illinois, penggunaan baja melapuk telah mengundang perhatian yang cukup besar. Mula-mula, baja sedemikian dispesifikasikan di bawah ASTM A242 yang, seperti telah dibicarakan sebelumnya, bersifat sangat umum dan memungkinkan berbagai macam variasi dalam susunan kimianya.

Dengan digunakannya baja A588 dalam tahun 1969, dan A709 dalam tahun 1975, pada hakikatnya A242 sekarang tidak terpakai lagi. A588 pada umumnya digunakan untuk baja melapuk pada bangunan dan A709 Mutu 50W dan 100W untuk baja melapuk pada jembatan (*lihat* **Tabel 2.1.2**).

* *Architectural Record*, Agustus, 1962

Dipindai dengan CamScanner

Fabrikasi dan pendirian baja melapuk perlu sangat hati-hati. Harus dihindari terjadinya congkelan, goresan, luka-luka yang tak terlihat. Pengecatan, bahkan untuk identifikasi pun, perlu diminimumkan, karena semua tanda harus dihilangkan setelah pendirian selesai. Kerak dan penghilangan warna setelah pengelasan juga harus disingkirkan. Biaya ekstra karena fabrikasi dan pendirian akan tergantikan oleh tidak perlunya pengecatan pada interval-interval waktu selama umur struktur tersebut.

Praktek penggunaan baja melapuk, termasuk hasil pengalaman selama 30 tahun, telah dirangkum oleh Coburn [2.42] yang memberikan "hukum-hukum" berikut ini:

1. Untuk mendapatkan performa optimum dalam kondisi tanpa cat, elemen-elemen struktur harus dibiarkan benar-benar terekspos.
2. Pembentukan lapisan oksida pelindung paling baik tercapai dalam cuaca normal di mana permukaan berada dalam keadaan basah di malam hari oleh embun dan kering sepanjang siang hari.
3. Karena siklus basah-kering tidak dapat terjadi selama baja terkubur dalam tanah atau terendam air, apa pun tipenya, oksida pelindung tidak akan terbentuk dan penampilannya tidak akan menyerupai baja karbon lunak yang terekspos pada kondisi yang sama.

Acuan Terpilih

2.1. ASTM. *Specification for Structural Steel* (A36–88c). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.

2.2. ASTM. *Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated Welded and Seamless* (A53-88a). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.

2.3. ASTM. *Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel* (A242-88). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.

2.4. ASTM. *Specification for Carbon Steel Bolts and Studs,* 60000 *psi Tensile Strength* (A307-88a). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.

2.5. ASTM. *Specification for High-Strength Bolts for Structural Steel Joints* (A32586). Philadelphia, PA: American Socicty for Testing and Materials, 1986.

2.6. ASTM. *Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Manganese Vanadium Steel* (A441-85). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Matcrials, 1985

2.7. ASTM. *Specification for Quenched and Tempered Steel Bolts and Studs* (A449-86). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1986.

2.8. ASTM. *Specification for Heat-Treated Steel Structural Bolts, 150 ksi Minimum Tensile Strength* (A490-85); also *Specification for High-Strength Steel Bolts, Classes 10.9 and 10.9.3, for Structural Steel Joints [Metric]* (A490M-85). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1985.

2.9. ASTM. *Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes* (A500-84). Philadelphia, PA:

Dipindai dengan CamScanner

American Society for Testing and Materials, 1984.
2.10. ASTM. *Specification for Hot-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing* (A501-88). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.
2.11. ASTM. *Specification for High-Yield-Strength, Quenched and Tempered Alloy Steel Plate, Suitable for Welding* (A514-88). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.
2.12. ASTM. *Specification for Structural Steel With 42 ksi [290 MPa] Minimum Yield Point (l / 2 in.* 113 mm [Maximum Thickness) (A529-88). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.
2.13. ASTM. *Specification for Steel, Sheet and Strip, Carbon, Hot-Rolled, Structural Quality* (A570-88). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.
2.14. ASTM. *Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Steels of Structural Quality* (A572-88c). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.
2.15. ASTM. *Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel with 50 ksi [345 MPa] Minimum Yield Point to 4 in. [100 mm] Thick* (A588-88a). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.
2.16. ASTM. *Specification for Steel, Sheet and Strip, High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled and Cold-Rolled, with Improved Atmospheric Corrosion Resistance* (A606-85). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1985.
2.17. ASTM. *Specification for Steel, Sheet and Strip, High-Strength, Low-Alloy, Columbium or Vanadium, or Both, Hot-Rolled and Cold-Rolled* (A607-85). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1985.
2.18. ASTM. *Specification for Steel, Sheet, Carbon, Cold-Rolled, Structural Quality* (A611-85). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1985.
2.19. ASTM. *Specification for Hot-Formed Welded and Seamless High-Strength Low-Alloy Structural Tubing* (A61888). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.
2.20. ASTM. *Specification for Structural Steel for Bridges* (A70988a). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.
2.21. ASTM. *Specification for Steel Sheet and Strip, High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled, and Steel Sheet, Cold-Rolled, High-Strength, Low-Alloy, with Improved Formability* (A715-88). Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1988.
2.22. AWS. *Welding Handbook,* 8th ed., Vol. 1, *Welding Technology.* Miami, FL: American Welding Society (550 N.W. LeJeune Road, P.O. Box 351040, Miami, FL 33135), 1987.
2.23. Research Council on Structural Connections. *Commentary on Specifications for Structural Joints Using ASTM* A325 *or* A490 *Bolts.* Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, November 13,1985.

Dipindai dengan CamScanner

2.24. AWS. *Structural Welding Code—Steel,* 11th ed., Effective January 1, 1988 (ANSI/AWS D1.1-88). Miami, FL: American Welding Society, 1988.
2.25. R. L. Brockenbrough and B. G. Johnston. *Steel Design Manual.* Pittsburgh, PA: United States Steel Corporation, 1968, Chap. 1.
2.26. S. T. Rolfe. " Fracture and Fatigue Control in Steel Structures," *Engineering Journal,* AISC, 14,1 (lst Quarter 1977), 2–15.
2.27. K. A. Godfrey, Jr. "High Strength Steel: Crisis or No?", *Civil Engineering,* May 1985, 50–53.
2.28. John M. Barsom and Stanley T. Rolfe. *Fracture and Fatigue Control in Structures —Applications of Fracture Mechanics,* 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1987.
2.29. John M. Barsom. "Material Considerations in Structural Steel Design," *Proceedings, National Engineering Conference & Conference of Operating Personnel.* Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, April 29-May 2,1987,1-1 through 1–15.
2.30. J. M. Barsom. "Material Considerations in Structural Steel Design," *Engineering Journal,* AISC, 24, 3 (3rd Quarter 1987),127139.
2.31. John C. Bittence. "The Basics of Heat Treating—What It Does—How It Works —Where to Specify It," *Machine Design,* January 24,1974,106-111; February 7, 1974, 117–121.
2.32. *A Primer on Brittle Fracture,* Booklet 1960-A, Steel Design File, Bethlehem Steel Corporation, Bethlehem, PA.
2.33. John W. Fisher and Alan W. Pense. "Experience with Use of Heavy W Shapes in Tension," *Engineering Journal,* AISC, 24, 2 (2nd Quarter 1987), 63–77.
2.34. "The Use of Jumbo Shapes in Non-Column Applications," *Engineering Journal,* AISC, 23, 3 (3rd Quarter 1986), 96.
2.35. E. J. Kaurman, A. W. Pensc, and R. D. Stout. "An Evaluation of Factors Significant to Lamellar Tearing," *Welding Journal,* 60, March 1981, Research Supplement, 43s–49s.
2.36. "Commentary on Highly Restrained Welded Connections," *Engineering Journal,* AISC, 10, 3 (3rd Quarter 1973), 61-73.
2.37. Charles H. Thornton. "Quality Control in Design and Supervision Can Eliminate Lamellar Tearing," *Engineering Journal,* AISC, 10, 4 (4th Quarter 1973),112–116.
2.38. E. Holby and J. F. Smith. "Lamellar Tearing—The Problem Nobody Seems to Want to Talk About," *Welding Journal, 59,* February 1980, 37–44.
2.39. "Causes and Prevention of Lamellar Tearing," *Civil Engineering,* April, 1982, 74–75.
2.40. P. D. Zuraski and J. E. Johnson. "Research on the Remaining Life in Steel Bridges," *Proceedings, ASCE Speciality Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability,* Berkeley, CA, January 11–13,1984. New York: American Society of Civil Engineers, 1985, 414–418.
2.41. G. M. Sinclair. "An Investigation of the Coaxing Effect in Fatigue of Metals,"

Dipindai dengan CamScanner

Proceedings, ASTM, *52* (1952), 743–758.

2.42. Seymour Coburn. "Theory and Practice in Use of Weathering Steels," *Proceedings, National Engineering Conference & Conference of Operating Personnel*. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, April 29-May 2, 1987, 14-1 through 14–25.

2.43. C. P. Larrabee. "Corrosion Resistance of High-Strength Low-Alloy Steels as Influenced by Composition and Environment," *Corrosion, 9*, August 1953, 259–271.

Dipindai dengan CamScanner

3
BATANG TARIK

3.1 Introduksi

Batang tarik terdapat pada kebanyakan struktur baja. Batang tersebut menjad batang struktur utama pada jembatan dan kerangka atap, pada struktur kerang ka seperti menara transmisi dan sistem topangan angin pada bangunan banyal lantai. Seringkali pula berfungsi sebagai batang sekunder, sebagai jangkar pengika untuk memperkaku sistem lantai kerangka atau pun menjadi pendukung mady bagi sistem penguat dinding. Batang tarik mungkin saja terdiri dari suatu profi tunggal atau beberapa profil terangkai. Dalam **Gambar 3.1.1** diperlihatkan bebe rapa penampang lintang batang tarik tipikal.

Secara umum, penggunaan profil struktural tunggal lebih ekonomik ketimban profil terangkai. Meskipun demikian, batang terangkai mungkin diperlukan bila (*a*) kapasitas tarik dari batang tempa tunggal tidak mencukupi, (*b*) rasio kerampinga (rasio dari panjang tanpa topangan L dengan radius girasi minimum r) tidak membe rikan rigiditas yang cukup, (*c*) efek lentur yang dikombinasikan dengan perilaku te gangan membutuhkan kekakuan lateral yang lebih besar, atau (*e*) masalah estetika.

3.2 Kekuatan Nominal

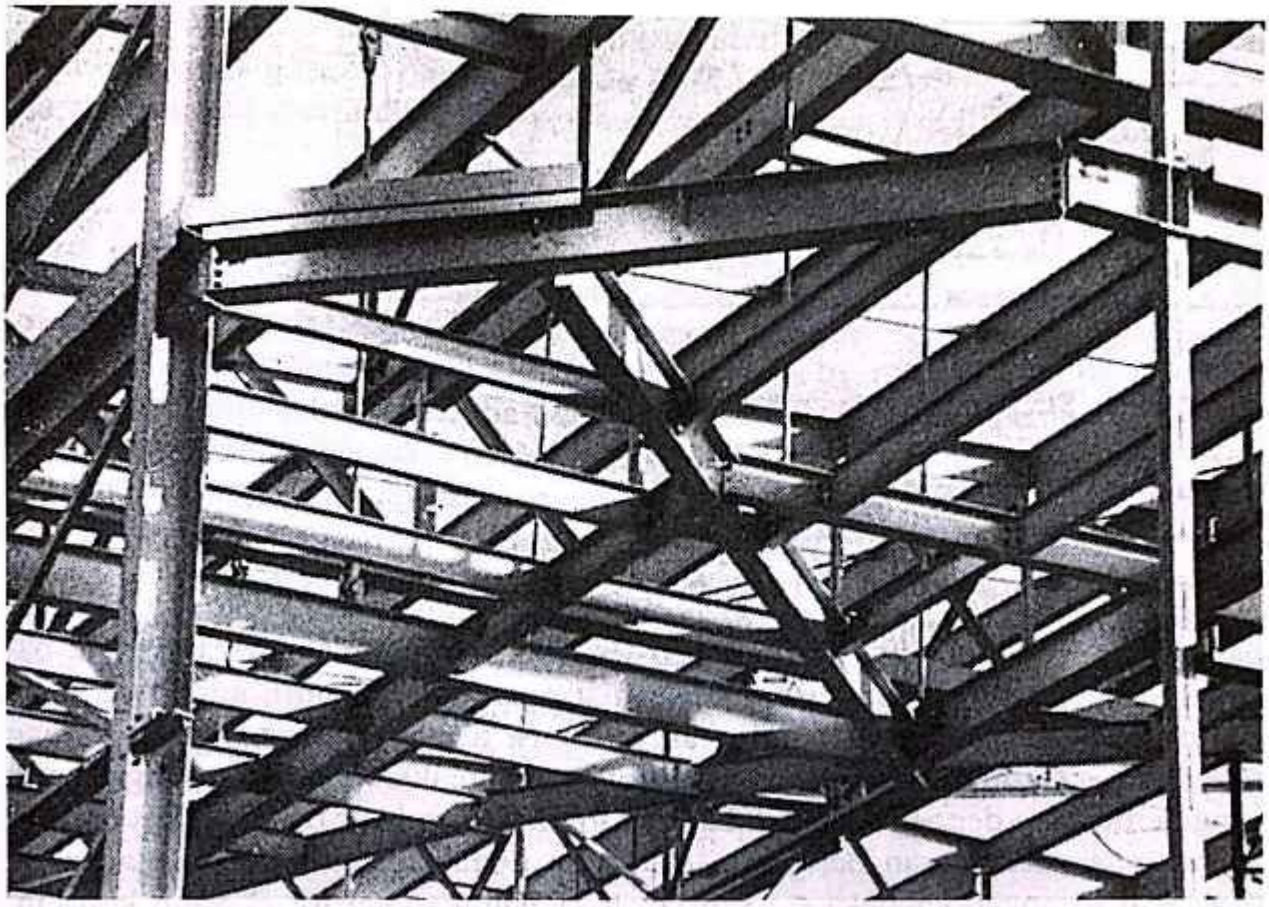
Kekuatan suatu batang tarik dapat diungkapkan menurut "keadaan batas-keadaa batas" yang menentukan. Keadaan batas kekuatan yang berpengaruh bagi suat batang tarik dapat berupa (*a*) pelelehan penampang lintang bruto batang pad tempat yang jauh dari titik sambungan, (*b*) retakan dari luas bersih efektif (yak melalui lobang-lobang) pada sambungan [3.1].

Bila keadaan batasnya adalah pelelehan umum dari penampang lintang brut atas panjang batang, seperti halnya untuk batang tarik tanpa pelobangan (yak dengan sambungan las), kekuatan nominal T_n dapat diwujudkan sebagai:

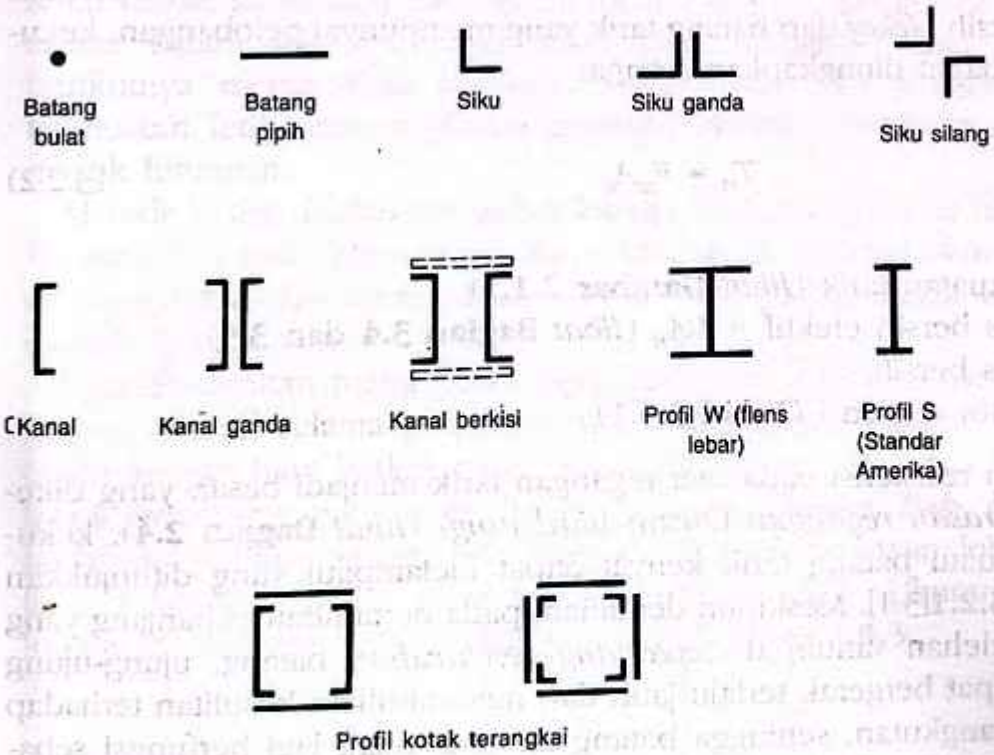
$$T_n = F_y A_g \qquad (3.2.1$$

Dipindai dengan CamScanner

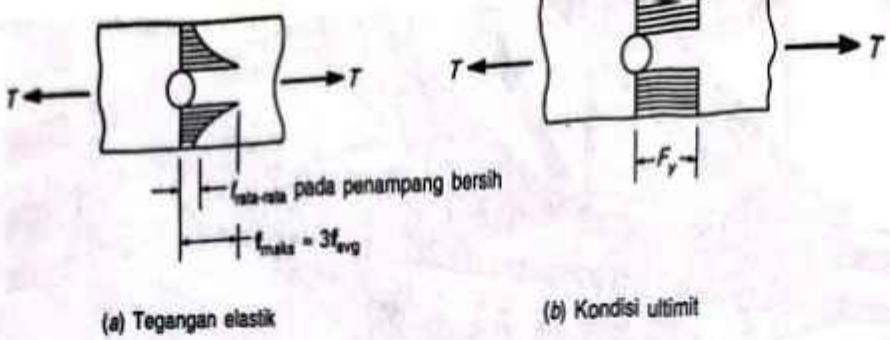
Dipindai dengan CamScanner



Kerangka baja struktur pada tingkat lantai menengah. Tingkat ini digantungkan pada sistem kerangka atap dengan jangkar-jangkar tarik. (Foto oleh C.G. Salmon).



***Gambar 3.1.1** Penampang lintang batang-batang tarik tipikal.*



(a) Tegangan elastik (b) Kondisi ultimit

Gambar 3.2.1 *Distribusi tegangan di mana terdapat lobang.*

di mana F_y = tegangan leleh
A_g = luas penampang lintang bruto

Untuk batang tarik dengan pelobangan, seperti untuk baut dan keling, penampang lintang yang tereduksi disebut sebagai *luas bersih*. Lobang-lobang pada batang menyebabkan pemusatan tegangan (tegangan tak-seragam); misalnya, suatu lobang pada pelat akan meningkatkan distribusi tegangan pada beban layanan seperti pada **Gambar 3.2.1*a***. Teori elastisitas menunjukkan bahwa tegangan tarik yang berdekatan dengan sebuah lobang akan menjadi sekitar tiga kali dari tegangan rata-rata pada luasan bersihnya. Meskipun demikian, pada saat setiap serat mencapai regangan lelehnya $\epsilon_y = F_y/E_s$, tegangannya menjadi F_y yang konstan, dengan deformasi yang terus berlangsung sejalan meningkatnya beban sampai semua serat mencapai atau melampaui regangan ϵ_y (**Gambar 3.2.1*b***).

Bila keadaan batasnya adalah pelelehan setempat yang menimbulkan retakan melalui luasan bersih *efektif* dari batang tarik yang mempunyai pelobangan, kekuatan nominal T_n dapat diungkapkan sebagai:

$$T_n = F_u A_e \tag{3.2.2}$$

di mana:

F_u = kekuatan tarik (*lihat* **Gambar 2.1.1**)
A_e = luas bersih efektif = UA_n (*lihat* **Bagian 3.4** dan **3.5**)
A_n = luas bersih
U = faktor efisiensi (**Tabel 3.5.1**)

Karena kenaikan resistensi pada saat regangan tarik menjadi besar, yang dikenal sebagai *pengerasan regangan* (*strain hardening*) (*lihat* **Bagian 2.4**), kekuatan aktual dari suatu batang tarik kenyal dapat melampaui yang ditunjukkan oleh **Persamaan 3.2.1**[3.1]. Meskipun demikian, pada pertambahan panjang yang besar karena pelelehan umum di *sepanjang keseluruhan* batang, ujung-ujung batang tersebut dapat bergerak terlalu jauh dan menimbulkan kesulitan terhadap struktur yang bersangkutan; sehingga batang tersebut tidak lagi berfungsi sebagaimana yang diinginkan. Baik pelelehan tak terkekang atau pun retakan melalui penampang yang tereduksi pada lobang-lobangnya dapat membatasi kegunaan

Dipindai dengan CamScanner

batang yang bersangkutan. Secara tradisional, pada saat mempertimbangkan keadaan batas retakan, diambil margin keamanan yang lebih tinggi dalam desain ketimbang mempertimbangkan keadaan batas leleh.

3.3 Luas Bersih

Bila suatu batang tarik diketatkan dengan baut atau keling, pada sambungan tersebut harus dibuat lobang-lobang. Akibatnya, luas penampang lintang pada sambungan akan berkurang dan kekuatan batang pun *mungkin* akan berkurang pula tergantung pada ukuran dan lokasi lobang.

Ada beberapa metode untuk membuat lobang. Yang paling umum dan paling murah adalah dengan menceklokkan lobang *standar* sebesar $\frac{1}{16}$ inch (1.6 mm) lebih besar daripada diameter baut atau kelingnya. Secara umum, ketebalan pelat kurang dari diameter ceklokan. Selama penceklokan, logam pada pinggiran lobang terusakkan. Dalam desain, hal ini diperhitungkan dengan mengasumsikan bahwa meluasnya kerusakan terbatas pada jarak radial sebesar $\frac{1}{32}$ inch (0.8 mm) di seputar lobang. Maka dari itu lebar total yang harus dibuat (LRFD dan ASD–B2) harus diambil sebagai dimensi nominal dari *lobang* normal terhadap arah beban yang bekerja plus $\frac{1}{16}$ inch (1.6 mm). Untuk penyambung dalam lobang standar, ini ekuivalen dengan diameter penyambung plus $\frac{1}{8}$ inch (3.2 mm).

Metode pelobangan kedua adalah dengan menceklokkan lobang dengan ukuran $\frac{3}{16}$ inch (4.8 mm) lebih kecil dan kemudian membesarkan lobang sampai pada ukuran final setelah masing-masing digabung dan dirangkaikan. Metode ini lebih mahal ketimbang menceklok lobang standar, namun menawarkan kelebihannya dalam hal kesesuaian yang lebih akurat. Metode ini serta metode berikutnya memberikan kekuatan yang lebih, baik kekuatan statik maupun kekeuatan letih, namun dalam prosedur desain metode-metode tersebut tidak masuk hitungan.

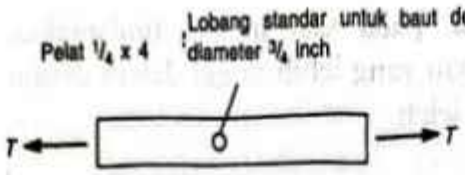
Metode ketiga adalah mengebor lobang menurut diameter baut atau keling plus $\frac{1}{32}$ inch (0.8 mm). Metode ini digunakan untuk merangkaikan potongan-potongan yang tebal dan merupakan metode yang paling mahal dari antara metode-metode yang umum.

Bila dibutuhkan ruang gerak yang lebih luas untuk menyesuaikan dengan toleransi ukuran selama pendirian, dapat digunakan lobang *standar* yang lebih besar dengan baut berkekuatan tinggi yang lebih besar dari $\frac{5}{8}$ inch diameternya tanpa mempengaruhi kemampuan kerjanya. Dalam **Bab 4** sambungan baut berkekuatan tinggi diberi perlakuan dengan penggunaan lobang bercelah panjang, bercelah pendek, atau baut berukuran lebih. Ukuran maksimum untuk lobang-lobang sedemikian diberikan dalam **Tabel 4.9.3**.

■ *Contoh 3.3.1*

Berapakah luas bersih A_n untuk batang tarik seperti **Gambar 3.3.1**?

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 3.3.1 Batang tarik untuk Contoh 3.3.1

Penyelesaian:

$$A_g = 4(0.25) = 1.0 \text{ inch}^2$$

Lebar yang harus diambil untuk lobang = $\frac{3}{4} + \frac{1}{8} = \frac{7}{8}$ inch

$A_n = A_g$ – (lebar untuk lobang)(tebal pelat)

$= 1.0 - 0.875(0.25) = 0.78 \text{ inch}^2$

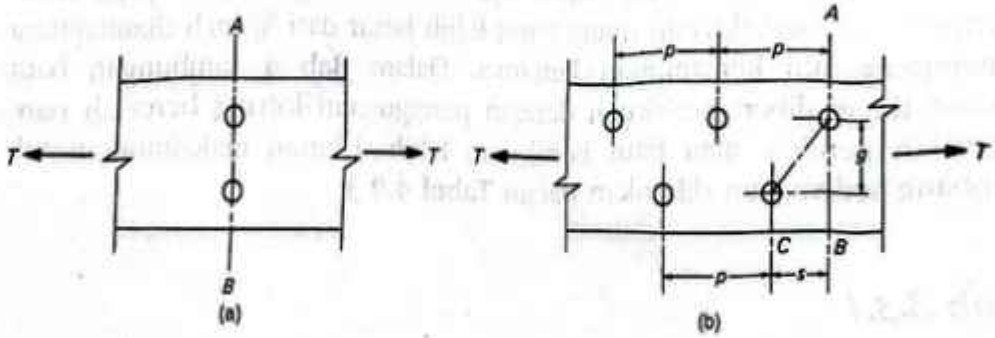
3.4 Efek Lobang-lobang Tak-segaris (Melenceng) terhadap Luas Bersih

Bila ada lebih dari satu lobang dan lobang-lobang tersebut *tidak* dijajarkan tegak lurus terhadap arah pembebanan, dapat terjadi lebih dari satu garis kegagalan potensial. Garis kegagalan yang berpengaruh adalah yang memberikan luas bersih minimum.

Dalam **Gambar 3.4.1*a*** garis kegagalan sepanjang potongan *A–B*. Dalam **Gambar 3.4.1*b*** di mana terdapat dua deretan lobang tak segaris, garis kegagalan dapat melalui salah satu lobang (potongan *A–B*) atau sepanjang alur diagonal, *A–C*. Sekilas, mungkin kita mengira bahwa potongan *A–B* merupakan yang kritik karena *A–B* jelas lebih pendek daripada jalur *A–C*. Namun, dari *A–B* hanya ada satu lobang yang perlu diambil sementara dua lobang lain diambil dari jalur *A–C*. Untuk menentukan penampang yang berpengaruh, kedua jalur, *A–B* dan *A–C* harus diteliti. Pengecekan yang teliti terhadap kekuatan sepanjang jalur *A–C* cukup kompleks. Namun demikian, LRFD dan ASD–B2 telah mengambil suatu hubungan empirik yang disederhanakan menurut usulan oleh Cochrane [3.2] untuk memperhitungkan perbedaan antara jalur *A–C* dan jalur *A–B* yang diwujudkan sebagai suatu koreksi panjang:

$$\frac{s^2}{4g}$$

di mana s merupakan kemencengan, atau jarak projeksi dari lobang-lobang berdekatan yang sejajar dengan arah pembebanan (*lihat* **Gambar 3.4.1**), dan g



Gambar 3.4.1 Jalur-jalur kegagalan pada penampang bersih

Dipindai dengan CamScanner

merupakan jarak lebar alur antara kedua barisan lobang yang arahnya tegak lurus terhadap arah pembebanan. Dengan demikian panjang bersih jalur *A–B* dan *A–C* akan menjadi:

Panjang bersih *A–B* = panjang (*A–B*) – (lebar lobang + $1/16$ inch)

Panjang bersih *A–C* = panjang (*A–B*) – 2(lebar lobang + $1/16$ inch) + $\frac{s^2}{4g}$.

Luas bersih minimum kemudian ditentukan dari panjang bersih minimum dikalikan dengan tebal pelat.

Pada tahun-tahun semenjak Cochrane mengusulkan ungkapan $s^2/4g$, banyak peneliti yang mengusulkan hukum-hukum lain [3.3 – 3.6], namun tak satu pun yang memberikan hasil yang lebih baik dan kesemuanya justru lebih berbelit-belit.

Sejalan dengan kecenderungan umum penggunaan pendekatan desain yang berkaitan dengan kekuatan, karya Bijlaard [3.7] dan karya-karya lain [3.8 – 3.10] telah memberikan teori-teori analisis batas untuk mendapatkan luasan bersih dalam tarik. Teori-teori ini tidak menyimpang dari metode $s^2/4g$ lebih dari 10 sampai dengan 15 persen.

Bila menghendaki pembahasan yang lebih lengkap mengenai penampang bersih melalui alur tak segaris pada penyambung, para pembaca dipersilakan membuka karya McGuire [3.11].

■ Contoh 3.4.1

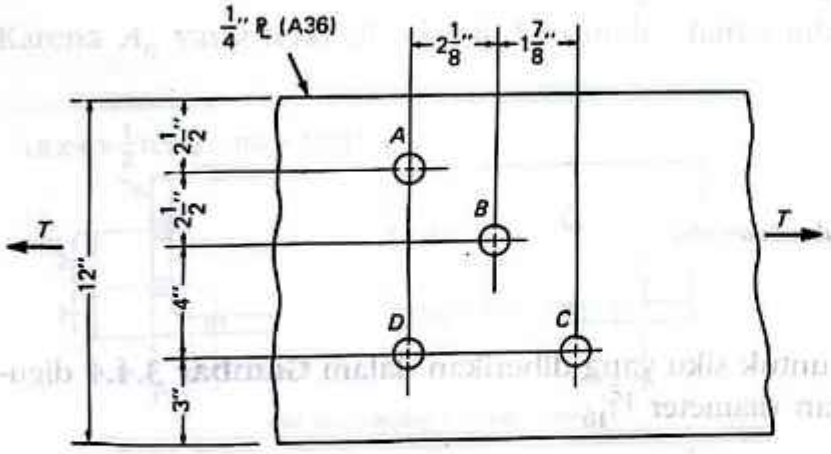
Tentukan luas minimum dari pelat pada **Gambar 3.4.2** dengan mengasumsikan bahwa pada pelat tersebut terdapat lobang-lobang berdiameter $15/16$ inch dengan penempatan seperti pada gambar.

Penyelesaian:

Menurut LRFD dan ASD-B2, lebar yang diambil untuk lobang adalah diameter lobang ditambah $1/16$ inch, sedang koreksi panjang lencengan adalah $s^2/4g$.

Jalur *AD*:

$$[12 - 2(15/16 + 1/16)]0.25 = 2.50 \text{ inch}^2$$



Gambar 3.4.2 Contoh 3.4.1

Dipindai dengan CamScanner

Jalur *ABD*:

$$12 - 3\left[\frac{15}{16} + \frac{1}{16} + \frac{(2.125)^2}{4(2.5)} + \frac{(2.125)^2}{4(4)}\right] 0.25 = 2.43 \text{ inch}^2$$

Jalur *ABC*:

$$12 - 3\left[\frac{15}{16} + \frac{1}{16} + \frac{(2.125)^2}{4(2.5)} + \frac{(1.875)^2}{4(4)}\right] 0.25 = 2.42 \text{ inch}^2$$

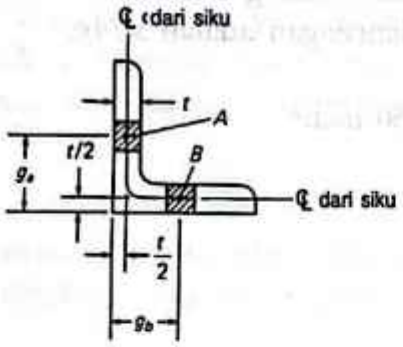
(yang berpengaruh)

3.4.1 Siku

Bila lobang-lobang melenceng pada dua kaki dari sebuah siku, lebar alur g yan diambil untuk ungkapan $s^2/4g$ diperoleh dengan menggunakan panjang di antar pusat-pusat lobang yang diukur menurut garis pusat ketebalan siku, yakni jara *A–B* pada **Gambar 3.4.3**. Dengan demikian lebar alur g adalah:

$$g = g_a - \frac{t}{2} + g_b - \frac{t}{2} = g_a + g_b - t \qquad (3.4.1$$

Setiap siku tempaan memiliki harga standar untuk lokasi lobang-lobangny (yakni lebar alur g_a dan g_b) tergantung pada panjang kakinya. **Tabel 3.4.1** menun jukkan *lebar alur biasa* untuk baja siku seperti yang terdaftar dalam Manua AISC*. Kecuali bila ada persyaratan khusus yang memerintahkan penggunaan leba alur selain yang biasa, biaya fabrikasi yang lebih tinggi sebagai akibat dari peng gunaan lebar alur khusus tak dapat dibenarkan.



Gambar 3.4.3 Jarak lebar alur untuk sebuah siku

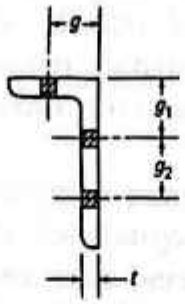
■ Contoh 3.4.2

Tentukan luas bersih A_n untuk siku yang diberikan dalam **Gambar 3.4.4** digu nakan lobang-lobang dengan diameter $^{15}/_{16}$.

* Manual LRFD [1.17], p.5-166

Dipindai dengan CamScanner

Tabel 3.4.1 Lebar alur biasa untuk siku, inchi (Dari Manual AISC)



Kaki	8	7	6	5	4	3½	3	2½	2	1¾	1½	1⅜	1¼	1
g	4½	4	3½	3	2½	2	1¾	1⅜	1⅛	1	⅞	⅞	¾	⅝
g_1	3	2½	2¼	2										
g_2	3	3	2½	1¾										

Penyelesaian:
Untuk perhitungan luas bersih, siku tersebut dapat divisualisasikan seolah diratakan menjadi sebuah pelat seperti **Gambar 3.4.5**:

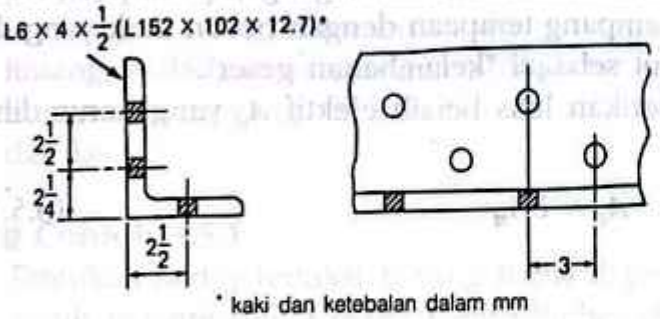
$$A_n = A_g - Dt + \frac{s^2}{4g}t$$

di mana D merupakan lebar yang harus diambil untuk lobang.

Jalur AC:
$$4.75 - 2\left(\frac{15}{16} + \frac{1}{16}\right)0.5 = 3.75 \text{ inch}^2$$

Jalur ABC:
$$4.75 - 3\left(\frac{15}{16} + \frac{1}{16}\right)0.5 + \left[\frac{(3)^2}{4(2.5)} + \frac{(3)^2}{4(4.25)}\right]0.5 = 3.96 \text{ inch}^2$$

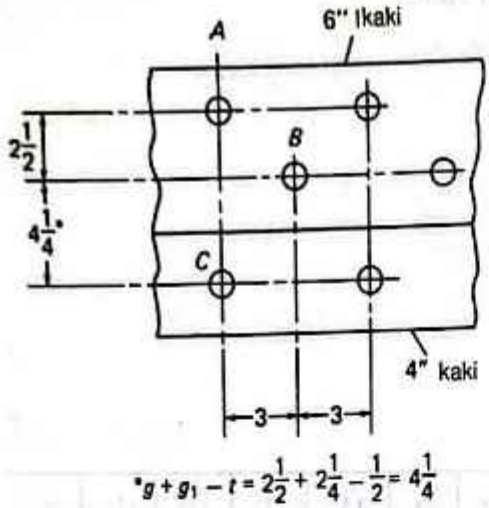
Karena A_n yang terkecil adalah 3.75 inch², harga inilah yang berpengaruh.



* kaki dan ketebalan dalam mm

Gambar 3.4.4 Contoh 3.4.2

Dipindai dengan CamScanner



$^{*}g + g_1 - t = 2\frac{1}{2} + 2\frac{1}{4} - \frac{1}{2} = 4\frac{1}{4}$

Gambar 3.4.5 *Siku untuk* ***Gambar 3.4.2*** *dengan kaki-kaki yang "diratakan" menjadi satu bidang datar.*

3.5 Luas Bersih Efektif

Luas bersih seperti yang dihitung dalam **Bagian 3.3** dan **3.4** memberikan penampang tereduksi yang menahan tarik namun boleh jadi tidak menampilkan kekuatan dengan tepat. Terutama hal ini berlaku bila batang tariknya memiliki profil yang terdiri dari elemen-elemen yang tidak berada dalam bidang datar biasa dan bila beban tarik ditransmisikan pada ujung batang dengan sambungan ke beberapa, namun tidak semua, elemen. Contoh dari situasi sedemikian adalah penampang siku yang memiliki sambungan ke salah satu kaki. Untuk kasus-kasus seperti ini, gaya tarik didistribusikan secara tidak seragam ke luas bersih. Untuk memperhitungkan ketidakseragaman, LRFD dan ASD–B3 memberikan *luas bersih* A_e yang sebanding dengan UA_n, di mana U merupakan koefisien reduksi. Dengan menggunakan luas bersih efektif, ketidakseragaman tegangan dapat dihitung secara sederhana.

Bila suatu beban tarik bekerja secara eksentrik terhadap suatu pelat lebar, distribusi tegangan ke arah lebar pelat juga tidak seragam. Mekanisme pentransmisian tegangan dari lokasi bekerjanya beban ke penampang-penampang yang jauh dari beban adalah melalui tegangan-tegangan geser yang bekerja pada bidang pelat. Kenyataan bahwa semakin rendah tegangan semakin jauh pula lokasi dari bekerjanya beban berarti bahwa transfer gesernya mengalami "kelambanan" atau tidak mencukupi. Dengan demikian, ketidakseragaman tegangan pada pelat lebar atau elemen-elemen pelat dari penampang tempaan dengan beban tarik yang diterapkan secara tak seragam disebut sebagai "kelambanan geser".

Maka, LRFD dan ASD-B3 memberikan luas bersih efektif A_e yang harus dihitung sebagai:

$$A_e = UA_n \tag{3.5.1}$$

di mana U = koefisien reduksi
A_n = luas bersih

Logisnya, persamaan di atas berlaku untuk *kedua* jenis penyambung yang

Dipindai dengan CamScanner

memiliki lobang-lobang dan untuk sambungan las. Untuk sambungan las, luas bersihnya sama dengan luas bruto A_g karena tidak ada lobang.

Bila beban tarik ditransmisikan dengan baut, keling, atau las "melalui beberapa—namun bukan semua—elemen penampang lintang dari batang tersebut", efisiensi daya dukung beban akan tereduksi dan koefisien U akan lebih kecil dari satu.

Untuk batang tarik pendek (elemen penghubung), seperti pelat penyambung dan pelat buhul, di mana pada hakikatnya elemen-elemen penampang lintang berada dalam bidang datar biasa, luas bersih efektif diambil sebanding dengan A_n, namun tidak boleh lebih dari 85% luas bruto A_g (LRFD–J5.2.b dan ASD–B3). Pengujian [3.1] telah menunjukkan bahwa bila terdapat lobang pada elemen pendek sedemikian di mana tak dapat terjadi pelelehan umum pada penampang lintang, paling tidak akan terjadi pengurangan kekuatan sebesar 15% dari yang diperoleh berdasarkan pelelehan pada penampang lintang bruto.

Tabel 3.5.1 merangkum persyaratan AISC untuk luas bersih efektif.

Perlakuan dasar dari koefisien reduksi mengasumsikan bahwa hubungan las akan terdiri dari las longitudinal (yakni sejajar dengan arah pembebanan). Bila digunakan las transversal saja, akan terjadi pengurangan efisiensi yang serius. Hubungan las untuk batang tarik dibahas dalam **Bab 5** mengenai pengelasan.

Karena LRFD dan ASD-B3 menunjukkan bahwa harga U seperti diberikan dalam **Tabel 3.5.1** harus digunakan "Kecuali bila koefisien yang lebih besar dapat dibenarkan dengan pengujian atau kriteria rasional lainnya", Komentar LRFD dan ASD-B3 [1.6, 1.16] menunjukkan bahwa persamaan berikut ini yang didasarkan pada karya Munse dan Chesson [3.9] dapat digunakan:

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l} \tag{3.5.2}$$

di mana $\bar{x}$ = jarak dari sentroid elemen yang dihubungkan secara eksentrik terhadap bidang transfer beban (*lihat* **Gambar 3.5.1**)

l = panjang sambungan

Persamaan 3.5.2 merupakan hubungan empirik yang korelasinya dengan pengujian cukup baik sekitar ±10%[3.1]. **Persamaan 3.5.2** menunjukkan bahwa sambungan yang lebih besar akan meningkatkan efektivitas luas penampang lintang; walaupun sambungan yang panjang akan mereduksi efektivitas penyambung, seperti yang dibicarakan dalam **Bab 4** dan **5** mengenai penyambung dan las.

■ Contoh 3.5.1

Tentukan faktor reduksi U yang harus digunakan dalam menghitung luas bersih untuk penampang W14×82 yang dihubungkan dengan pelat pada kedua flensnya seperti **Gambar 3.5.2**. Masing-masing terdapat tiga baut di sepanjang garis hubungan.

Dipindai dengan CamScanner

Tabel 3–5.1 Luas bersih efektif A_e untuk sambungan baut dan las[1]

Tipe Batang	Jumlah Penyambung[3] Minimum per garis	Persyaratan Khusus	Luas Bersih Efektif A_e
(*a*) Batang yang *semua* elemen penampang lintangnya dihubungkan untuk mentransmisikan gaya tarik	1 (atau las)	Kecuali pelat las datar [*lihat* (*g*), (*b*), dan (*i*) di bawah	A_n[2]
(*b*) Batang penghubung pendek seperti pelat sambung, pelat buhul, dan sambungan balok-kolom	1	Tidak ada	A_n namun tidak melebihi 0.85 A_g
(*c*) Profil W, M, atau S tempa yang dihubungkan hanya pada flens penampang	3 (atau las)	$b/d \geq 0.67$ b=lebar flens d=dalamnya	0.90 A_n
(*d*) Profil T struktur yang dipotongkan dari profil-profil yang memenuhi persyaratan (*c*) di atas	3 (atau las)		0.90 A_n
(*e*) Profil W, M, atau S yang tidak memenuhi syarat-syarat (*c*) dan profil-profil lain, termasuk profil-profil terangkai yang memiliki segmen-segmen tak terhubung	3 (atau las)	Tidak ada	0.85 A_n
(*f*) Semua profil	2	Tidak ada	0.75 A_n
(*g*) Pelat datar yang bebannya ditransmisikan oleh las longitudinal sepanjang kedua sisi yang sejajar dengan beban	Las	$l>2w$ l=panjang las w=lebar pelat	A_g
(*h*) Pelat datar yang tidak memenuhi persyaratan l/w dari (*g*) di atas	Las	$2w>l>1.5w$	$0.87A_g$
(*i*) Pelat datar yang tidak memenuhi persyaratan l/w dari (*g*) atau (*h*) di atas	Las	Harus memiliki $l/w>1$	0.75 A_g

[1]) Dari LRFD dan ASD–B3.

Dipindai dengan CamScanner

[2] Luas bersih aktual yang dihitung menurut LRFD dan ASD–B2. Untuk sambungan las longitudinal, luas bersih sebanding dengan luas bruto.

[3] Untuk sambungan las (LRFD dan ASD–B3), las harus sejajar dengan arah pembebanan, yakni las longitudinal. Untuk beban yang ditransmisikan oleh las transversal ke beberapa—namun tidak semua—elemen penampang lintang dari profil W, M, atau S, atau profil T struktur yang dipotong dari profil-profil sedemikian, luas efektif A_e harus diambil sebagai *luas elemen-elemen yang langsung bersambungan* (LRFD dan ASD–B3).

Penyelesaian:

Dalam kasus ini, dua elemen (flens-flens) dari penampang lintang dihubungkan, namun satu elemen (badan) tidak. Cek rasio profil b_f/d,

$$\frac{b_f}{d} = \frac{\text{lebar flens}}{\text{kedalaman penampang}} = \frac{10.13}{14.31} = 0.71 > 0.67 \quad \text{OK}$$

Dengan demikian hubungan ini termasuk dalam kategori (*c*) dari **Tabel 3.5.1** dan faktor U sebesar 0.90.

Bila tidak, desainer dapat menghitung faktor tersebut dengan menggunakan **Persamaan 3.5.1**. Karena masing-masing sambungan flens membebani bagian dari profil W, penampang tersebut dapat diperlakukan sebagai dua profil T seperti **Gambar 3.5.1*c***. Separuh profil W bersesuaian dengan sebuah profil T struktural WT7×41 yang jarak sentroidalnya $\bar{x}$ diberikan oleh Manual AISC sebesar 1.39 inch. Panjang l dari sambungan tersebut adalah 6 inch. Dengan demikian, **Persamaan 3.5.1** memberikan:

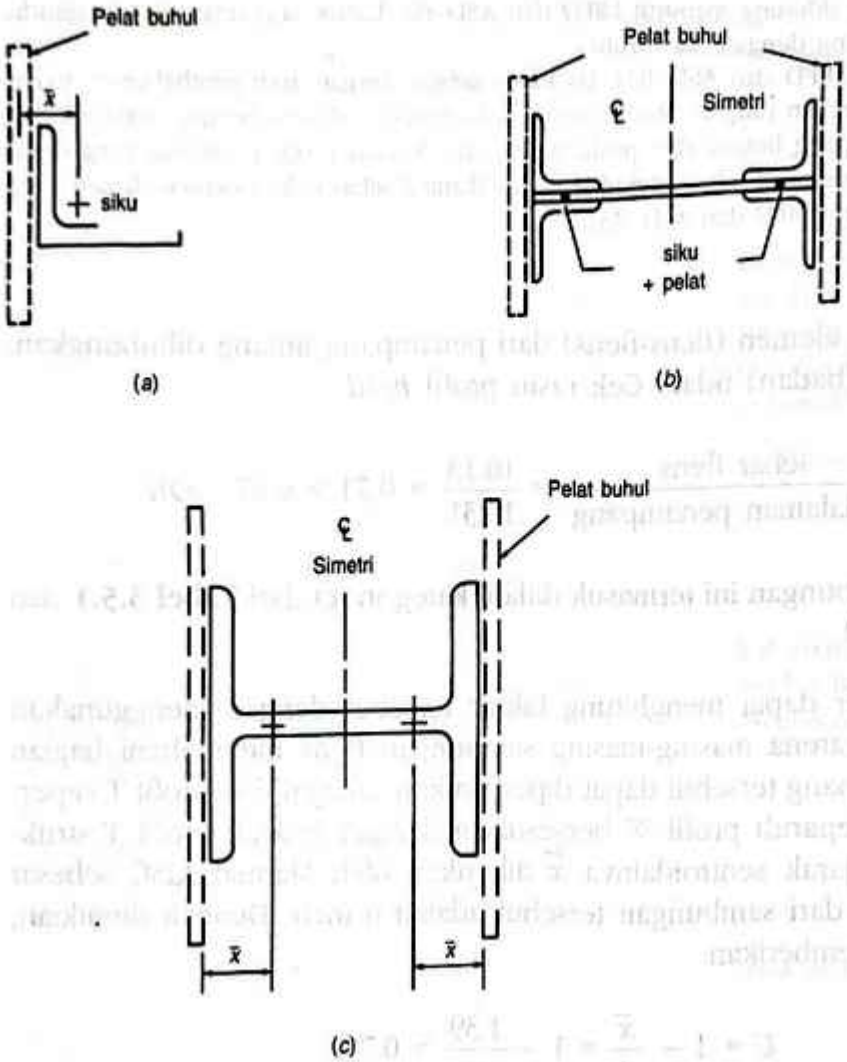
$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l} = 1 - \frac{1.39}{6.0} = 0.77$$

Ini menunjukkan efisiensi hasil perhitungan yang ternyata justru jauh lebih rendah ketimbang sekedar menggunakan 0.90 saja. Secara umum, tiga baut dalam satu baris bukanlah sambungan yang bagus untuk penampang ini. Bila digunakan empat baut dalam setiap baris, l menjadi 9 inch dan U naik sampai mencapai 0.85.

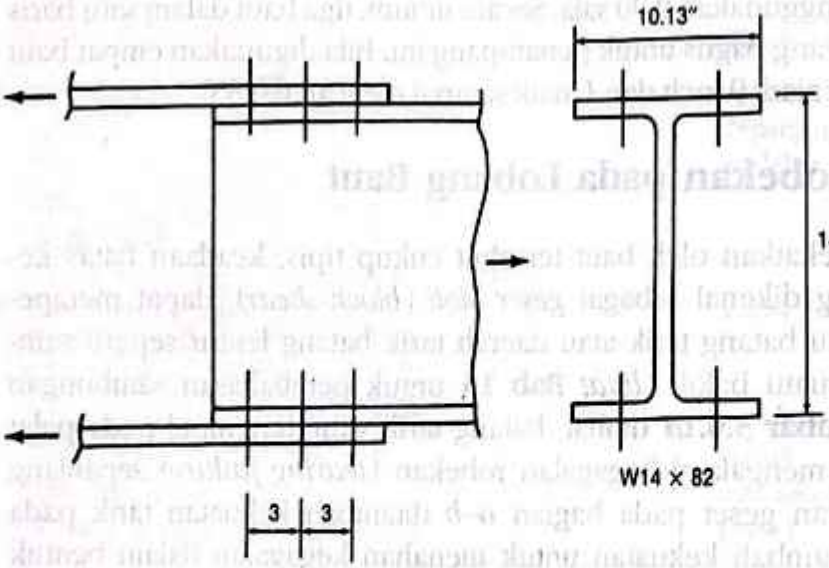
3.6 Kegagalan Robekan pada Lobang Baut

Bila material yang direkatkan oleh baut tersebut cukup tipis, keadaan batas kegagalan robekan, yang dikenal sebagai *geser blok* (*block shear*), dapat mempengaruhi kekuatan suatu batang tarik atau daerah tarik batang lentur seperti sambungan pada ujung suatu balok (*lihat* **Bab 13** untuk pembahasan sambungan sedemikian). Bila **Gambar 3.6.1*a*** dilihat, batang tarik yang tertempel pada pelat buhul mungkin akan mengalami kegagalan robekan (*tearing failure*) sepanjang bagian *a–b–c*. Kekuatan geser pada bagian *a–b* ditambah kekuatan tarik pada bagian *b–c* akan menambah kekuatan untuk menahan kegagalan dalam bentuk ini. Keempat lobang pada pelat dari **Gambar 3.6.1*b*** dan ***c*** dapat menambah kegagalan robekan ini bila jumlah dari kekuatan-kekuatan geser sepanjang *a–b*

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 3.5.1 *Eksentrisitas pada simpul sambungan. (Dari Kulak, Fisher, dan Struik [3.1])*



Gambar 3.5.2 *Contoh 3.5.1*

Dipindai dengan CamScanner

dan *c–d* dan kekuatan tarik sepanjang *b–c* lebih kecil baik dibanding dengan kekuatan-kekuatan pada pelelehan umum sepanjang batang tersebut maupun dibanding dengan retakan sepanjang *e–b–c–f* (**Persamaan 3.2.2**).

Pada batang tarik tidak biasa dijumpai kegagalan karena kombinasi geser dan robekan tarik; meskipun demikian, bentuk kegagalan ini biasanya mempengaruhi desain sambungan ujung ke badan-badan balok yang tipis dengan menggunakan baut. Komentar AISC [1.16] LRFD-J4 menunjukkan bahwa kedua persamaan berikut ini dapat digunakan untuk mewakili kekuatan nominal T_n:

1. Pelelehan geser—retakan tarik

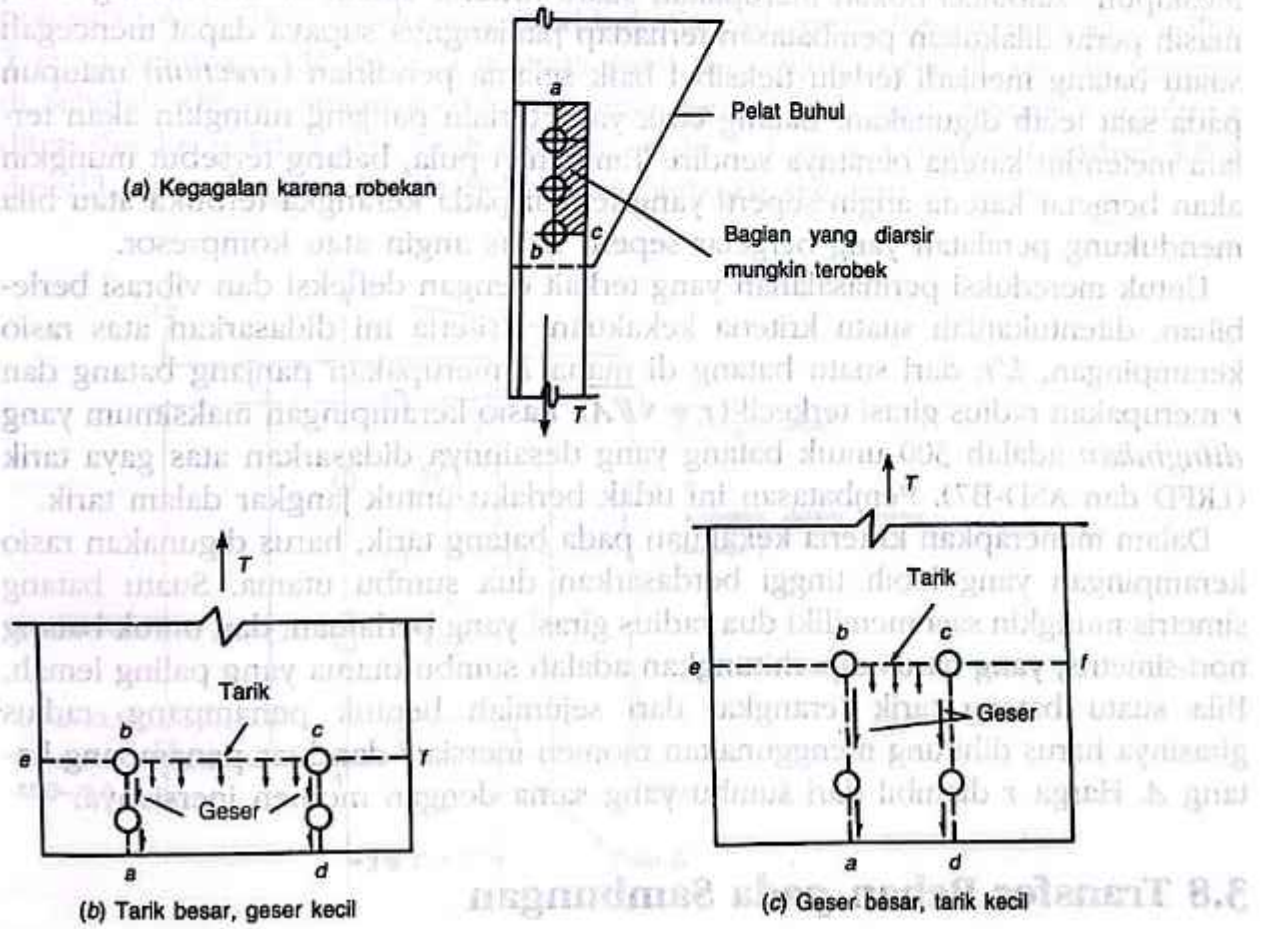
$$T_n = 0.6F_yA_{vg} + F_uA_{nt} \tag{3.6.1}$$

atau:

2. Retakan geser—pelelehan tarik

$$T_n = 0.6F_uA_{ns} + F_yA_{tg} \tag{3.6.2}$$

di mana: A_{vg} = luas bruto yang mengalami pelelehan geser
A_{tg} = luas bruto yang mengalami pelelehan tarik
A_{ns} = luas bersih yang mengalami retakan geser
A_{nt} = luas bersih yang mengalami retakan tarik



Gambar 3.6.1 Keadaan batas kegagalan robekan.

Dipindai dengan CamScanner

Kegagalan robekan sebenarnya bukan kegagalan retakan (*fracture failure*) bail pada bagian yang menahan tarik *maupun* bagian yang menahan geser. Bentuk kegagalan ini akan menjadi retakan *pada salah satu* bagian yang menahan yang diikuti dengan pelelehan pada bagian yang tegak lurus terhadap bidang atau bidang-bidang retakan [3.12, 3.13].

Sejalan dengan keadaan batas yang dibicarakan dalam **Bagian 3.2**, luas bruto digunakan untuk keadaan batas pelelehan, dan luas bersih digunakan untuk keadaan batas retakan. **Persamaan 3.6.1** menunjukkan retakan pada luas bersih dalam tarik yang diikuti dengan pelelehan pada luas bruto dalam geser. **Persamaan 3.6.2** menunjukkan retakan pada penampang bersih dalam geser diikuti dengan pelelehan pada luas bruto dalam tarik. Sesuai dengan **Persamaan 2.6.5**, tegangan leleh geser τ_y diambil sebesar $0.6\,F_y$. Demikian pula kekuatan tarik geser τ_u diambil sebesar $0.6\,F_u$.

Karena pada dasarnya bentuk kegagalan geser blok pada hakikatnya merupakan suatu fenomen retakan, persamaan yang tepat digunakan untuk mendapatkan kekuatan adalah salah satu dari dua persamaan di mana bentuk retakannya lebih besar. Prosedur yang paling sederhana adalah membuat perhitungan menurut kedua cara dan menggunakan hasil yang terbesar.

3.7 Kekakuan sebagai suatu Kriteria Desain

Meskipun stabilitas bukan merupakan suatu kriteria dalam desain batang tarik, masih perlu dilakukan pembatasan terhadap panjangnya supaya dapat mencegah suatu batang menjadi terlalu fleksibel baik selama pendirian (*erection*) maupun pada saat telah digunakan. Batang tarik yang terlalu panjang mungkin akan terlalu melendut karena beratnya sendiri. Tambahan pula, batang tersebut mungkin akan bergetar karena angin seperti yang terjadi pada kerangka terbuka atau bila mendukung peralatan yang bergetar seperti kipas angin atau kompresor.

Untuk mereduksi permasalahan yang terkait dengan defleksi dan vibrasi berlebihan, ditentukanlah suatu kriteria kekakuan. Kriteria ini didasarkan atas rasio kerampingan, L/r, dari suatu batang di mana L merupakan panjang batang dan r merupakan radius girasi terkecil ($r = \sqrt{I/A}$). Rasio kerampingan maksimum yang *diinginkan* adalah 300 untuk batang yang desainnya didasarkan atas gaya tarik (LRFD dan ASD-B7). Pembatasan ini tidak berlaku untuk jangkar dalam tarik.

Dalam menerapkan kriteria kekakuan pada batang tarik, harus digunakan rasio kerampingan yang lebih tinggi berdasarkan dua sumbu utama. Suatu batang simetris mungkin saja memiliki dua radius girasi yang berlainan; dan untuk batang non-simetris, yang harus diperhitungkan adalah sumbu utama yang paling lemah. Bila suatu batang tarik terangkai dari sejumlah bentuk penampang, radius girasinya harus dihitung menggunakan momen inersia I dan luas penampang lintang A. Harga r diambil dari sumbu yang sama dengan momen inersianya.

3.8 Transfer Beban pada Sambungan

Normalnya, lobang-lobang yang dijumpai pada batang tarik merupakan lobang

Dipindai dengan CamScanner

baut atau keling yang digunakan untuk mentransfer beban dari batang tarik ke batang lainnya.

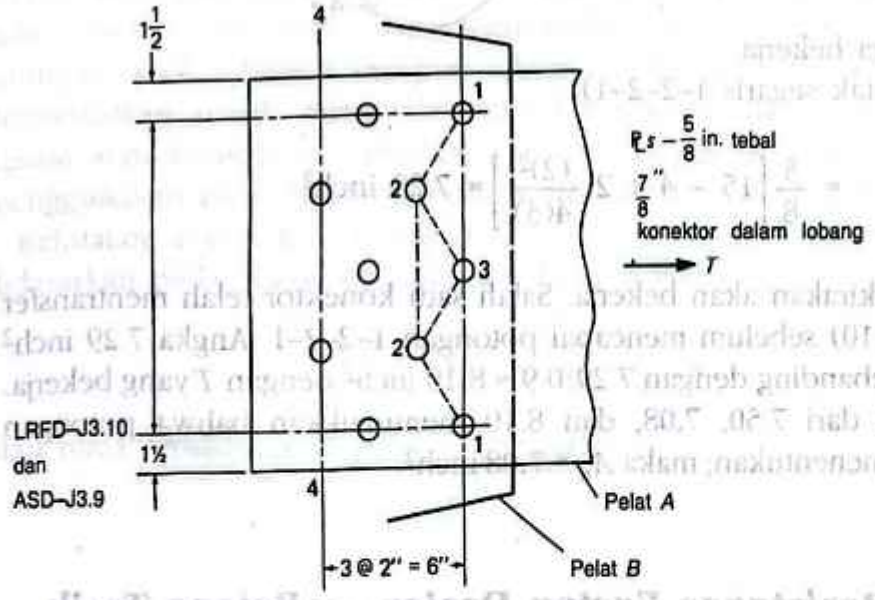
Sebenarnya, rincian pembahasan mengenai penyambung beserta perilakunya baru dijumpai dalam **Bab 4** mendatang. Namun demikian dapat dikatakan bahwa asumsi dasarnya adalah bahwa setiap penyambung dengan ukuran yang sama akan mentransfer bagian beban yang sama bila penyambung-penyambung tersebut disusun secara simetris menurut sumbu sentroid dari suatu batang tarik. Contoh berikut ini melukiskan gagasan tersebut beserta hubungannya dengan perhitungan luas bersih.

▮ Contoh 3.8.1

Hitunglah luas bersih yang menentukan untuk pelat *A* dari sambungan irisan tunggal dalam **Gambar 3.8.1** dan buatlah diagram benda bebas dari bagian-bagian pelat *A* dengan potongan-potongan yang diambil melalui setiap barisan lobang. Asumsikanlah bahwa pelat *B* telah memiliki luas bersih yang cukup dan tidak mempengaruhi kapasitas *T*.

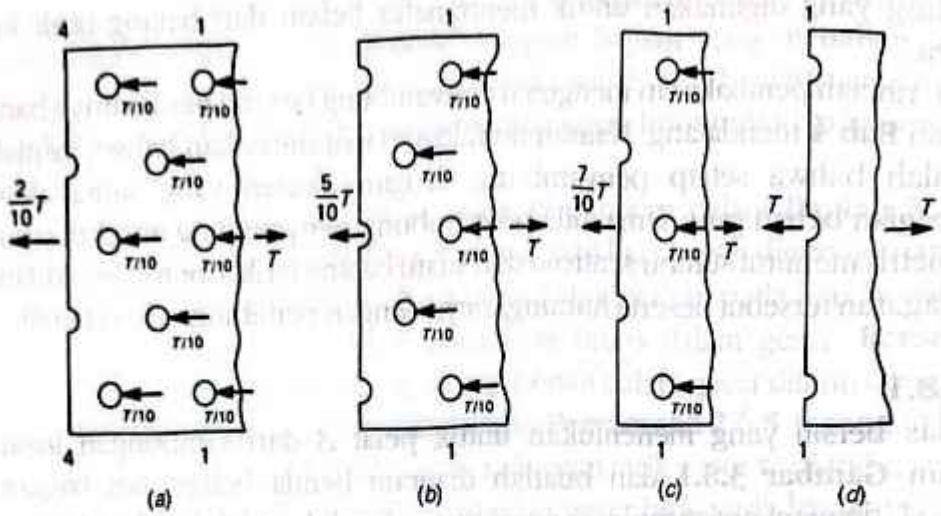
Penyelesaian:

Gaya tarik penuh *T* dalam pelat *A* bekerja pada potongan 1–1 dari **Gambar 3.8.1**. Penyelidikan terhadap potongan-potongan lain pada pelat *A* sampai ke bagian kiri dari potongan 1–1 akan melibatkan *kurang dari* 100% *T* yang bekerja karena sebagian gaya tersebut telah ditransfer dari pelat *A* ke pelat *B*. Pada potongan 4–4, 100% *T* sekarang pasti bekerja pada pelat *B* sementara hanya 20% *T* yang bekerja pada pelat *A*. Karena gaya pada ujung pelat *A*, sejarak tertentu di sebelah kiri potongan 4–4, harus sama dengan nol, gaya *T* harus seluruhnya ditransfer ke pelat *B* atas jarak dari potongan 1–1 ke 4–4. Dalam **Gambar 3.8.2** diperlihatkan diagram benda bebas dari berbagai segmen.



Gambar 3.8.1 Sambungan irisan tunggal untuk Contoh 3.8.1.

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 3.8.2 Distribusi beban pada Pelat A.

Pemotongan untuk 1 lobang = Diameter lobang + $^1/_{16}$ inch
= Diameter penyambung + $^1/_8$ inch untuk lobang *standar*
= $^7/_8 + ^1/_8 = 1$ inch

Luas bersih (potongan 1–1) = $^5/_8(15 - 3) = 7.50$ inch^2

di mana bekerja 100% T (**Gambar 3.8.2*d***).

Luas bersih (jalur tak segaris 1–2–3–2–1):

$$= \frac{5}{8}\left[15 - 5\,(1) + 4\frac{(2)^2}{4(3)}\right] = 7.08 \text{ inch}^2$$

$s^2/4g$

di mana 100% T juga bekerja.

Luas bersih (jalur tak segaris 1–2–2–1):

$$= \frac{5}{8}\left[15 - 4 + 2\,\frac{(2)^2}{4(3)}\right] = 7.29 \text{ inch}^2$$

di mana 0.9 T diperkirakan akan bekerja. Salah satu konektor telah mentransfer bagian bebannya (0,10) sebelum mencapai potongan 1–2–2–1. Angka 7.29 inch^2 dengan 0.9 T akan sebanding dengan 7.29/0.9 = 8.10 inch^2 dengan T yang bekerja. Suatu perbandingan dari 7.50, 7.08, dan 8.10 menunjukkan bahwa potongan 1–2–3–2–1-lah yang menentukan; maka $A_n = 7.08$ inch^2.

3.9 *Load and Resistance Factor Design* — Batang Tarik

Filosofi umum dari *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) telah dibeberkan

Dipindai dengan CamScanner

dalam **Bagian 1.8** dan **1.9**. **Persamaan 1.8.1** memberikan persyaratan keamanan struktur sebagai berikut:

$$\phi R_n \geq \Sigma \gamma_i Q_i \qquad [1.8.1]$$

di mana: ϕ = faktor resistensi (faktor reduksi kekuatan)
R_n = resistensi nominal (kekuatan)
γ_i = faktor-faktor kelebihan beban (LRFD-A4.1)
Q_i = beban-beban (seperti beban mati, beban hidup, beban angin, beban gempa) atau efek-efek beban (seperti momen lentur, geser, gaya aksial, dan momen puntir karena berbagai macam beban)

Persamaan 1.8.1 menyaratkan bahwa *kekuatan desain* ϕR_n sama atau melebihi penjumlahan *beban-beban terfaktor*, atau secara khusus untuk batang tarik, **Persamaan 1.8.1** menjadi:

$$\phi_t T_n \geq T_u \qquad (3.9.1)$$

di mana: ϕ_t = faktor resistensi yang berkaitan dengan kekuatan tarik
T_n = kekuatan nominal batang tarik
T_u = beban terfaktor pada batang tarik

Karena pembebanan tidak berkaitan dengan tipe batang, misalnya batang tarik atau kolom, berbagai kombinasi faktor beban yang diberikan dalam LRFD–A4.1 sama untuk semua batang dalam struktur. Meskipun demikian, faktor resistensi ϕ memperhitungkan kemungkinan bahwa kekuatan sebenarnya dari batang yang bersangkutan bisa jadi lebih kecil dibanding kekuatan hitung teoretis karena adanya variasi-variasi dalam sifat-sifat bahan dan toleransi dimensional. Sementara secara individual variasi-variasi ini dapat diterima dalam batas-batas toleransi, dalam struktur sebenarnya dapat memberikan kekuatan yang lebih kecil dari hasil hitungan. Baik faktor ϕ maupun faktor kelebihan beban γ tak satu pun yang dimaksudkan untuk memperhitungkan kesalahan karena kecerobohan dalam desain atau konstruksi. Reliabilitas desain batang tarik baja dengan baut yang menggunakan LRFD telah dilaporkan oleh Bennet dan Najem-Clarke [3.14].

Kekuatan desain $\phi_t T_n$ menurut LRFD–D1 lebih kecil dibanding dengan yang didasarkan pada *pelelehan pada penampang bruto*:

$$\phi_t T_n = \phi_t F_y A_g = 0.90 F_y A_g \qquad (3.9.2)$$

atau pada *retakan pada penampang bersih*:

$$\phi_t T_n = \phi_t F_u A_e = 0.75 F_u A_e \qquad (3.9.3)$$

Perhatikan bahwa faktor resistensi ϕ_t adalah sebesar 0.90 untuk keadaan batas pelelehan dan sebesar 0.75 untuk keadaan batas retakan.

Dipindai dengan CamScanner

Tambahan pula, desainer harus memperhitungkan kekuatan patahan geser panjang jalur robekan potensial (*lihat* **Bagian 3.6**), yang menurut LRFD–J4:

$$\phi_t T_n = \phi_t (0.6F_u) A_{ns} \qquad (3.9$$

di mana: ϕ_t = 0.75 untuk retakan
A_{ns} = luas bersih yang terkena retakan geser

Persamaan 3.9.4 merupakan penyederhanaan konservatif dari **Persamaan 3.6.** dan **3.6.2**, yang merupakan alternatif yang dapat diterima untuk **Persamaan 3.9.** menurut Komentar LRFD-J4. Perhatikan bahwa untuk "luas bersih" dalam **Persamaan 3.9.4**, "rekomendasi" AISC (seperti yang dibuktikan, misalnya, oleh **Tabel I–G.1** dan **I–G.2** dari Manual AISC [1.17]) adalah untuk membuat lobang yang sebenarnya; yakni diameter baut ditambah $^1/_{16}$ inch untuk lobang standar. Luas bersih yang digunakan dalam **Persamaan 3.9.3** menurut LRFD–B2 mengambil $^1/_{16}$ inch dari diameter lobang; yakni diameter baut ditambah $^1/_8$ inch untuk lobang standar.

Dalam **Tabel 3.9.1** dirangkumkan pasal-pasal Spesifikasi [1.15] yang digunakan dalam *Load and Resistance Factor Design of Tension Members.*

Tabel 3.9.1 Batang Tarik — Acuan Spesifikasi AISC

Topik	Pasal Spesifikasi	
	LRFD[1.15]	ASD[1.5]
Luas bersih	B2	B2
Luas bersih efektif	B3	B3
Rasio kerampingan pembatas	B7	B7
Kekuatan tarik	D1	D1
Batang terangkai	D2	D2
Batang mata — batang yang dihubungkan dengan pen	D3	D3
Jangkar berulir	J3	J3
Geser blok	J4	J4
Elemen-elemen penyambung	J5	J5
Keletihan	K4	K4

▪ Contoh 3.9.1

Tentukan kapasitas beban layanan dalam tarik untuk sebuah L6x4x$^1/_2$ dari baja Mutu 50 yang disambungkan dengan baut berdiameter $^7/_8$ inch dalam lobang standar seperti **Gambar 3.9.1**. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC, dan asumsikan bahwa rasio beban hidup terhadap beban matinya sebesar 3.0.

Penyelesaian:

Batang tarik siku dihubungkan dengan sebuah *pelat buhul*, tipikal untuk sambungan kerangka. Pelat buhul merupakan pelat pada perpotongan batang-batang dengan mana batang-batang tersebut disambungkan.

Dipindai dengan CamScanner

Kekuatan maksimumnya akan didasarkan baik atas potongan 1–1 dengan salah satu lobang yang diambil, atau didasarkan atas potongan alur tak segaris 1–2 melalui dua lobang. Potongan yang menentukan akan mendapatkan 100% beban T yang bekerja padanya.

Untuk potongan 1-1:

$$A_n = A_g - 1 \text{ lobang} = 4.75 - \left(\frac{7}{8} + \frac{1}{8}\right) 0.50 = 4.25 \text{ inch}^2$$

Untuk potongan 1–2:

$$A_n = A_g - 2 \text{ lobang} + (s^2/4g)t$$

$$= 4.75 - 2\left(\frac{7}{8} + \frac{1}{8}\right) 0.50 + \frac{(2)^2}{4(2.5)} (0.50) = 3.95 \text{ inch}^2$$

Karena siku tersebut tidak mempunyai kaki yang terhubung untuk mentransfer gaya tarik, dengan memperhitungkan eksentrisitas pada sambungan, luas bersih efektif akan lebih kecil daripada luas bersih hitungan.

Kedua kekuatan desain yang digunakan sesuai dengan LRFD-D1 diberikan oleh **Persamaan 3.9.2** berdasarkan pada *pelelehan umum* sepanjang panjang batang:

$$\phi_t T_n = \phi_t F_y A_g \qquad [3.9.2]$$

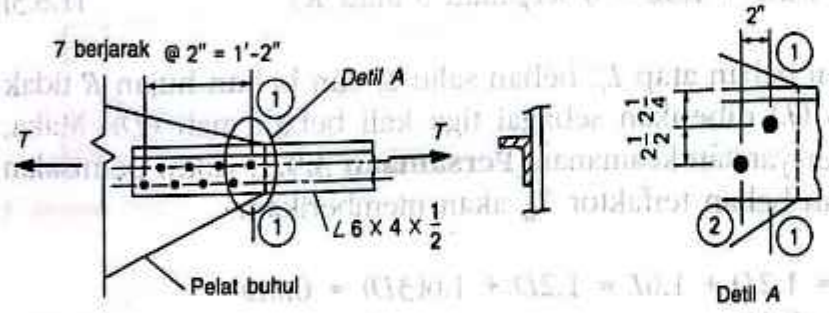
$$= 0.90(50)(4.75) = 214 \text{ kips}$$

dan oleh **Persamaan 3.9.3** berdasarkan *retakan* pada sambungan tersebut:

$$\phi_t T_n = \phi_t F_u A_e \qquad [3.9.3]$$

Luas bersih efektif A_e adalah:

$$A_e = UA_n$$



Gambar 3.9.1 Batang tarik untuk Contoh 3.9.1

Dipindai dengan CamScanner

di mana, menurut LRFD–B3, seperti rangkuman dalam **Tabel 3.5.1** [kasus (*e*)], $U = 0.85$. Bila tidak, koefisien reduksi U dapat dihitung dari **Persamaan 3.5.2**:

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l} \qquad [3.5.2]$$

di mana jarak $\bar{x}$ dari sentroid elemen yang dihubungkan secara eksentrik terhadap bidang transfer beban (*lihat* **Gambar 3.5.1**) untuk kasus siku tersebut adalah 0.987 inch. Panjang l dari simpul tersebut adalah 14 inch. Maka **Persamaan 3.5.2** akan memberikan:

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l} = 1 - \frac{0.987}{14} = 0.93$$

Harga yang lebih besar dari hasil hitungan teoretis atau harga yang dispesifikasikan oleh LRFD-B3 masih dapat diterima. Dengan menggunakan $U = 0.93$, luas efektifnya adalah

$$A_e = UA_n = 0.93(3.95) = 3.67 \text{ inch}^2$$

Dengan demikian **Persamaan 3.9.3** memberikan:

$$\phi_t T_n = \phi_t F_u A_e = 0.75(65)(3.67) = 179 \text{ kips}$$

Maka, $\phi_t T_n$ yang berpengaruh merupakan harga yang lebih kecil dari **Persamaan 3.9.2** (214 kips) dan **3.9.3** (179 kips), yakni:

$$\phi_t T_n = 179 \text{ kips}$$

Faktor-faktor kelebihan beban mengkaitkan kekuatan desain dengan beban layanan atau efek-efek beban. Dengan menggunakan kombinasi beban berat **Persamaan 1.8.3** [LRFD-Persamaan(A4–2)], beban terfaktor T_u adalah:

$$T_u = \Sigma \gamma_i Q_i = 1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) \qquad [1.8.3]$$

di mana dalam contoh ini beban atap L_r, beban salju S, dan beban hujan R tidak dilibatkan. Beban hidup (L) diberikan sebagai tiga kali beban mati (D). Maka, dengan menggunakan persyaratan keamanan, **Persamaan 3.9.1**, yakni pemisalan bahwa $\phi_t T_n$ sama dengan beban terfaktor T_u akan memberikan:

$$\phi_t T_n = 1.2D + 1.6L = 1.2D + 1.6(3D) = 6.0D$$
$$179 = 6.0D$$
$$D = 29.8 \text{ kips}$$
$$L = 3D = 3(29.8) = 89.5 \text{ kips}$$

Dipindai dengan CamScanner

Beban layanan total yang aman T adalah:

$$T = D + L = 29.8 + 89.5 = 119 \text{ kips}$$

Bila sambungan siku ini terdiri dari penyambung berukuran besar yang sangat sedikit jumlahnya atau bila pelat buhul atau sikunya tipis, keadaan batas patahan geser dari LRFD–J4, yang diwakili oleh **Persamaan 3.9.4** atau **3.6.1** dan **3.6.2**, mungkin akan memberikan kekuatan yang lebih rendah daripada yang paling kecil dari yang diberikan oleh **Persamaan 3.9.2** dan **3.9.3**.

▪ Contoh 3.9.2

Selidikilah bentuk kegagalan patahan geser pada siku L4x4x$^1/_4$ yang dihubungkan dengan tiga baut berdiameter $^7/_8$ inch dan pelat buhul setebal $^3/_8$ inch, seperti **Gambar 3.9.2**. Bahannya adalah baja A36.

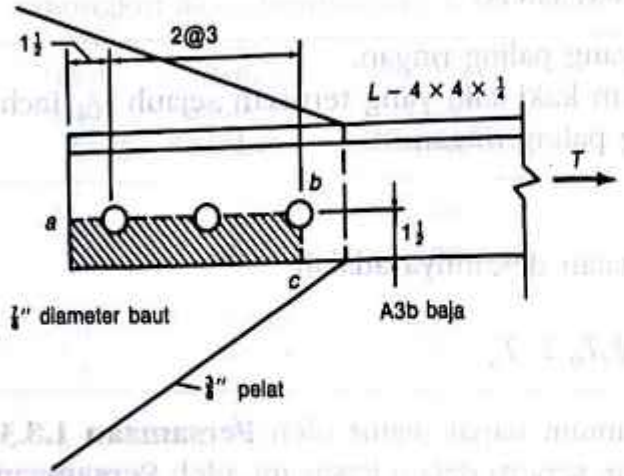
Penyelesaian:

Keadaan batas leleh dan keadaan batas retak umum diatur oleh nilai terkecil dari **Persamaan 3.9.2** dan **3.9.3** memberikan:

$$\phi_t T_n = \phi_t F_y A_g = 0.90(36)(1.94) = 62.9 \text{ kips}$$
$$\phi_t T_n = \phi_t F_u A_e = \phi_t F_u U A_n$$
$$= 0.75(58)(0.85)(1.94 - 0.25) = 62.5 \text{ kips yang berpengaruh}$$

Kegagalan geser blok sepanjang jalur *a–b–c* dari **Gambar 3.9.2** yang diselidiki menurut LRFD–J4 dengan menggunakan **Persamaan 3.9.4** memberikan:

$$\phi_t T_n = \phi(0.6F_u)A_{ns}$$
$$= 0.75(0.6)(58)A_{ns} = 26.1A_{ns}$$
$$A_{ns} = \text{(panjang } a\text{–}b\text{–}c \text{ kurang dari tiga lobang) tebal}$$
$$A_{ns} = [7.5 + 1.5 - 3(0.875 + 1/16)]0.25 = 1.55 \text{ inch}^2$$
$$\phi_t T_n = 26.1(1.55) = 40.4 \text{ kips}$$



Gambar 3.9.2 Batang tarik dari Contoh 3.9.2.

Dipindai dengan CamScanner

Dengan demikian, geser blok memberikan kekuatan desain yang lebih ren daripada leleh atau retak umum. Meskipun demikian, menurut Komentar LRFD nilai terbesar dari **Persamaan 3.6.1** dan **3.6.2** dapat digunakan untuk meng tung kekuatan nominal sebagai berikut:

1. leleh geser—Retak tarik:

$$\begin{aligned}\phi_t T_n &= 0.75[0.6F_y A_{vg} + F_u A_{nt}] \\ &= 0.75[21.6(7.5)0.25 + 58(1.5 - 0.47)0.25] \\ &= 0.75(55.4) = 41.6 \text{ kips}\end{aligned}$$

atau:

2. Retak geser—leleh tarik:

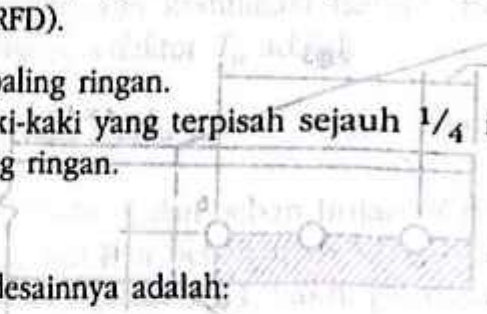
$$\begin{aligned}\phi_t T_n &= 0.75[0.6F_u A_{ns} + F_y A_{tg}] \\ &= 0.75[34.8(7.5 - 2.34)0.25 + 36(1.5)0.25] \\ &= 0.75(58.4) = 43.8 \text{ kips yang menentukan}\end{aligned}$$

Bahkan bila digunakan persamaan-persamaan yang lebih tepat, kekuatan terse but dikendalikan oleh geser blok; $\phi_t T_n = 43.8$ kips yang lebih kecil daripad kekuatan retak sebesar 62.5 kips pada penampang lintang bersih. Hasil umun ini dapat diharapkan bila digunakan jumlah konektor minimum bersama dengan elemen-elemen yang tipis seperti $^1/_4$ inch atau kurang.

■ Contoh 3.9.3

Pilihlah suatu batang tarik diagonal untuk kerangka atap dengan baja A572 Mutu 50 dengan menggunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC. Tarik aksialnya sebesar 60 kips beban mati dan 6 kips beban hidup, sedang panjang batang 12 ft. Asumsikan bahwa baut berdiameter $^7/_8$ inch akan ditempatkan dengan alur tunggal pada lobang standar. Asumsikan batas yang dikehendaki pada rasio kerampingan L/r adalah 240 (*bukan* batas LRFD).

(*a*) Pilihlah batang siku tunggal yang paling ringan.
(*b*) Pilih batang siku ganda dengan kaki-kaki yang terpisah sejauh $^1/_4$ inch saling bertolak belakang yang paling ringan.



Penyelesaian:
Untuk batang tarik, persyaratan kekuatan desainnya adalah:

$$\phi_t T_n \geq T_u$$

di mana beban terfaktor T_u secara umum dapat diatur oleh **Persamaan 1.8.3**, atau bila proporsi beban matinya besar, seperti dalam kasus ini, oleh **Persamaan 1.8.2**; dengan demikian:

Dipindai dengan CamScanner

$$T_u = 1.2D + 1.6L = 1.2(60) + 1.6(6) = 82 \text{ kips}$$

atau:

$$T_u = 1.4D = 1.4(60) = 84 \text{ kips (yang menentukan)}$$

Dalam kasus ini, beban terfaktor yang harus didesain adalah 84 kips.

Kekuatan batang dapat dikendalikan baik oleh:

$$\phi_t T_n = \phi_t F_y A_g = 0.90(50)\ A_g$$

atau pun:

$$\phi_t T_n = \phi_t F_u A_e = 0.75(65)\ A_g$$

Kekuatan desain $\phi_t T_n$ harus sama dengan beban terfaktor T_u. Persyaratan luas menjadi:

$$A_g \text{ yang disyaratkan} = \frac{84}{0.90(50)} = 1.87 \text{ inch}^2$$

$$A_e \text{ yang disyaratkan} = \frac{84}{0.75(65)} = 1.72 \text{ inch}^2$$

$$A_n \text{ yang disyaratkan} = \frac{A_e}{U} = \frac{1.72}{0.85} = 2.03 \text{ inch}^2$$

Persyaratan luas bersih jelas menentukan karena luas tersebut melampaui persyaratan luas bruto.

Demikian pula, r minimum untuk memenuhi pembatasan soal $L/r = 240$ dapat ditentukan sebagai:

$$r \text{ min} = \frac{L}{240} = \frac{12(12)}{240} = 0{,}6 \text{ inch}$$

(*a*) Pilih batang siku tunggal. Luas bruto yng disyaratkan pada masing-masing kasus tergantung pada luas yang diambil untuk sebuah lobang, yang pada gilirannya berarti pula tergantung pada ketebalan. Prosedur tabular berikut ini mungkin akan bermanfaat dalam menentukan pilihan:

Tebal Standar t	Reduksi untuk Satu Lobang	Luas Bruto yang Disyaratkan	Pilihan yang Tersedia dari Manual AISC Sifat-sifat Siku Tunggal	
$^5/_{16}$	0.313[1]	2.34[2]	L4 x 4 x $^5/_{16}$,	$A = 2.40$, $r = 0.79$[3]
$^3/_8$	0.375	2.40	L3$^1/_2$ x 3$^1/_2$ x $^3/_8$,	$A = 2.48$, $r = 0.69$
			L4 x 3 x $^3/_8$,	$A = 2.48$, $r = 0.64$
$^7/_{16}$	0.438	2.46	L3$^1/_2$ x 2$^1/_2$ x $^7/_{16}$,	$A = 2.43$, $r = 0.54$
$^1/_2$	0.500	2.53		

1) $(^7/_8 + {}^1/_8)0.3125 = 0.3125 \text{ inch}^2$

2) *Perhatikan*: r min = r_z untuk siku-siku tunggal

3) A_g yang disyaratkan = 2.03 + 0.31 = 2.34 inch^2

Dipindai dengan CamScanner

Gunakan: L4x4x$^5/_{16}$ batang siku tunggal.

(*b*) Pilih batang siku ganda. Untuk penampang dari tipe ini, harus dibuat c lobang. Pilihan diambil berdasar sifat-sifat siku ganda dalam Manual AISC

Tebal Standar t	Reduksi untuk Dua Lobang	Luas Bruto yang Disyaratkan	Pilihan yang Tersedia dari Manual AISC Sifat-sifat Siku Ganda	
$^1/_4$	0.500	2.53	L3 x 3 x $^1/_4$,	A = 2.88, r = 0.94
			L3 x 2$^1/_2$ x $^1/_4$,	A = 2.63, r = 0.95
$^5/_{16}$	0.625	2.65	L2$^1/_2$ x 2$^1/_2$ x $^5/_{16}$,	A = 2.62, r = 0.78
$^3/_8$	0.750	2.78		

Gunakan: 2—L3 x 2$^1/_2$ x $^1/_4$ dengan kaki panjang bertolak belakang.

L2$^1/_2$ x 2 x $^5/_{16}$ sedikit kurang kuat. Geser blok (robekan) hanya dapat dicek selah banyaknya penyambung ditentukan.

3.10 Jangkar Tarik

Batang tarik sederhana dan banyak dipakai adalah jangkar berulir. Jangkar sedemikian biasanya menjadi batang sekunder di mana tegangan desainnya kecil, seperti (*a*) *sag rod* yang membantu mendukung gordeng pada bangunan industrial (**Gambar 3.10.1*a***), (*b*) ikatan vertikal untuk untuk membantu mendukung *girt* pada dinding bangunan industrial (**Gambar 3.10.1*b***), (*c*) penggantung, seperti jangkar pengikat yang mendukung balkon (**Gambar 3.10.1*c***); dan (*d*) jangkar ikat untuk menahan dorongan suatu struktur lengkung.

Jangkar tarik kerapkali digunakan dengan suatu tarik awal sebagai ikatan angin pada dinding, atap, dan menara. Tarik awal secara efektif akan menambah kekakuan dan mengurangi defleksi dan gerakan vibrasi yang cenderung menimbulkan kegagalan keletihan pada sambungan-sambungan. Tarik awal sedemikian dapat diperoleh dengan mendesain batang tersebut lebih pendek $^1/_{16}$ inch untuk setiap kelipatan panjang sebesar 20 ft atau dengan menggunakan peregang kawat (*turnbuckles*) yang dapat diketatkan setelah konstruksi.

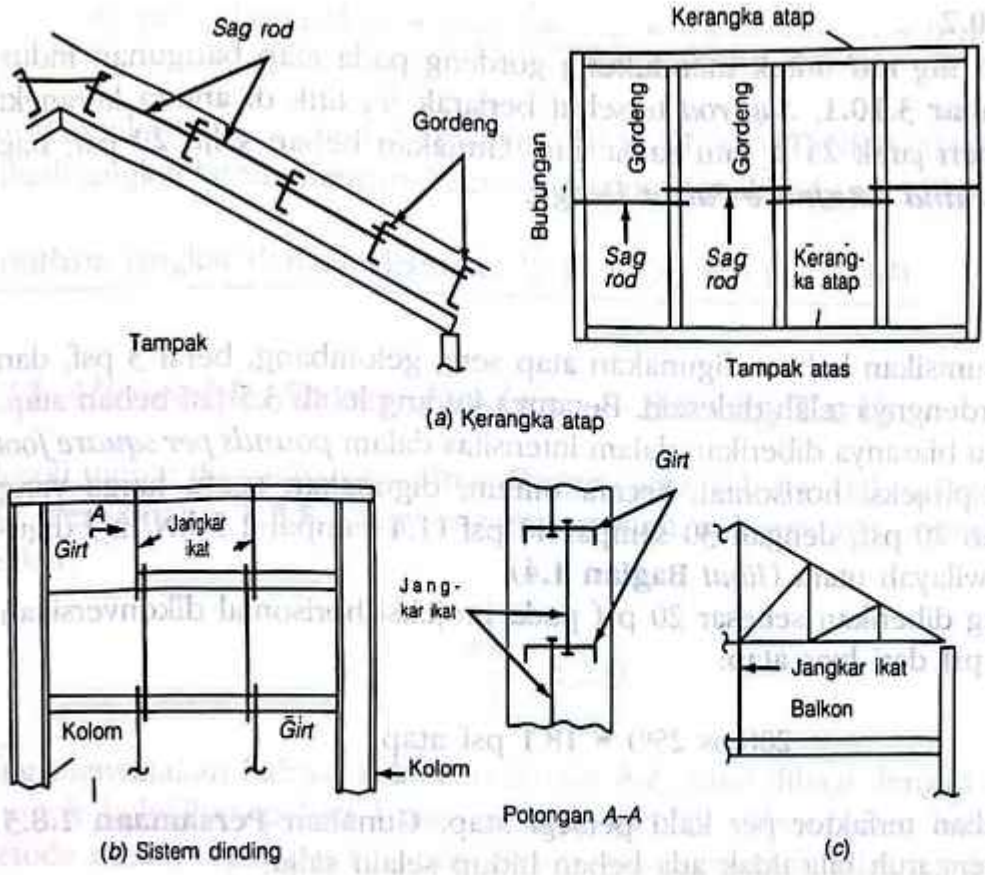
▪ Contoh 3.10.1

Pilih diameter untuk sebuah jangkar berulir dari baja A36 yang harus mendukung gaya tarik aksial sebesar 6 kips beban hidup dan 3 kips beban mati. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC.

Penyelesaian:

Kekuatan desain dari jangkar berulir diberikan oleh LRFD–J3 (Tabel J3.2) sebagai:

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 3.10.1 *Penggunaan jangkar tarik*

$$\phi_t T_n = 0.75 A_b (0.75 F_u) \qquad (a)$$

Beban terfaktor T_u yang harus dipikul adalah:

$$T_u = 1.2D + 1.6L = 1.2(3) + 1.6(6) = 13.2 \text{ kips}$$

Dengan menggunakan kekuatan tarik minimum F_u untuk baja A36 sebesar 58 ksi dari **Tabel 2.1.1** (atau LRFD "NUMERICAL VALUES" TABLE 2), dan menyamakan beban terfaktor T_u dengan kekuatan desain $\phi_t T_n$, akan diperoleh luas A_b yang disyaratkan dari **Persamaan (*a*)** sebagai:

$$A_b \text{yang disyaratkan} = \frac{\phi_t T_n \text{ yang disyaratkan}}{0.75(0.75F_u)} = \frac{13.2}{0.75(0.75)(58)} = 0.40 \text{ inch}^2$$

Informasi mengenai jangkar berulir tersedia dalam Manual AISC [1.7 atau 1.17] bagian "THREADED FASTENERS" (LRFD, p. 5–172). Karena luas bruto merupakan dasar bagi desain, luas A_b yang diambil dari LRFD–Tabel J3.2 merupakan luas bruto A_D berdasarkan diameter utama yang diukur dari titik ekstrem terluar ulir tersebut.

Gunakan: jangkar berdiameter $\frac{3}{4}$ (9 ulir per inch)(A_D = 0.442 inch^2).

Dipindai dengan CamScanner

■ **Contoh 3.10.2**

Buatlah desain *sag rod* untuk mendukung gordeng pada atap bangunan industrial dari **Gambar 3.10.1**. *Sag rod* tersebut berjarak $^1/_3$ titik di antara kerangka atap, yang diberi jarak 24 ft satu sama lain. Gunakan beban salju 20 psf, baja A36, dan *Load and Resistance Factor Design.*

Penyelesaian:

(*a*) Beban. Asumsikan bahwa digunakan atap seng gelombang, berat 3 psf, dan bahwa gordengnya telah didesain. Beratnya kurang lebih 3.5 psf beban atap. Beban salju biasanya diberikan dalam intensitas dalam *pounds per square foot* (psf) dari projeksi horisontal. Secara umum, digunakan suatu harga yang kurang dari 20 psf, dengan 30 sampai 40 psf (1.4 sampai 1.9 kN/m^2) digunakan di wilayah utara (*lihat* **Bagian 1.4**).

Harga yang diberikan sebesar 20 psf pada projeksi horisontal dikonversikan ke dalam psf dari luas atap:

$$20(\cos 25^\circ) = 18.1 \text{ psf atap}$$

(*b*) Hitung beban terfaktor per kaki persegi atap. Gunakan **Persamaan 1.8.3** yang berpengaruh bila tidak ada beban hidup selain salju:

$$1.2\ D + 1.6D(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) \qquad [1.8.3]$$
$$1.2(3 + 3.5) + 1.6(18.1) = 36.8 \text{ psf}$$

(*c*) Hitung beban terfaktor yang harus dipikul oleh sebuah *sag rod.* Beban berat terfaktor yang dikenakan pada sebuah *sag rod* adalah:

36.8 kali luas yang dikenai (dalam kaki persegi)

$$36.8(25)(8)/1000 = 7.4 \text{ kips}$$

Jangkar tersebut hanya memikul komponen yang paralel dengan atap. Dengan demikian, sebuah *sag rod* harus memiliki kekuatan untuk memikul:

$$T_u = 7.4(\sin 25^\circ) = 7.4(0.423) = 3.1 \text{ kips}$$

(*d*) Pilih diameter *rod.* Persyaratan kekuatan dari LRFD-J3 adalah

$$\phi_t T_n \geq T_u$$
$$\phi_t T_n = 0.75(0.75F_u)\ A_g$$

Dengan memperoleh F_u dari **Tabel 2.1.1** (atau LRFD "NUMERICAL VALUES" TABLE 2), dan menyamakan beban terfaktor T_u dengan kekuatan desain $\phi_t T_n$ akan diperoleh luas yang disyaratkan A_g sebagai:

Dipindai dengan CamScanner

$$A_g \text{ yang disyaratkan} = \frac{T_u}{0.75(0.75F_u)} = \frac{3.1}{0.75(0.75)(58)} = 0.10 \text{ inch}^2$$

Dari Manual AISC [1.7, atau 1.17] bagian "THREADED FASTENERS" (LRFD, p. 5–172), pilihlah jangkar berulir dengan diameter $\frac{3}{8}$ yang memiliki $A_D = 0.110$ inch^2.

Gunakan: jangkar dengan diameter $\frac{3}{8}$ inch ($A_g = 0.110$ inch^2).

3.11 *Allowable Stress Design* — Batang Tarik

Filosofi umum dari *Allowable Stress Design* (ASD) dibahas dalam **Bagian 1.8** dan **1.9**. **Persamaan 1.8.8** memberikan persyaratan keamanan struktural sebagai berikut:

$$\frac{\phi R_n}{\gamma} \geq \Sigma Q_i \qquad [1.8.8]$$

yang menyatakan bahwa kekuatan desain ϕR_n yang dibagi dengan suatu faktor γ untuk kelebihan beban harus melebihi jumlah beban-beban layanan. Dalam metode desain tegangan ijin, besarnya provisi keamanan adalah γ/ϕ.

Untuk batang tarik, dengan mengambil faktor keamanan FS = γ/ϕ, kekuatan R_n seperti halnya T_n, dan ΣQ_i sama dengan beban layanan T dalam tarik, **Persamaan 1.8.8** menjadi:

$$\frac{T_n}{\text{FS}} \geq T \qquad (3.11.1)$$

Kekuatan nominal T_n untuk batang tarik dapat dipengaruhi baik oleh **Persamaan 3.2.1** atau pun **3.2.2**:

$$T_n = F_y A_g \qquad [3.2.1]$$
$$T_n = F_u A_e \qquad [3.2.2]$$

di mana A_g = luas penampang lintang bruto
A_e = luas bersih efektif = UA_n (*lihat* **Bagian 3.5**)
A_n = luas bersih (*lihat* **Bagian 3.4**)
U = faktor efisiensi (**Tabel 3.5.1**)

Dengan menggunakan suatu faktor keamanan FS sebesar 1.67, substitusikan **Persamaan 3.2.1** ke dalam **Persamaan 3.11.1** dan bagilah dengan A_g untuk mendapatkan *format tegangan* akan diperoleh:

$$\frac{F_y A_g}{1.67 A_g} \geq \frac{T}{A_g} \qquad (3.11.2)$$

Dipindai dengan CamScanner

Dengan menggunakan faktor keamanan yang lebih besar FS = 2.0 seperti yang biasa digunakan secara tipikal pada sambungan, mensubstitusikan **Persamaan 3.2.2** ke dalam **3.11.1**, dan membagi dengan A_e untuk memperoleh *format tegangan* akan didapatkan:

$$\frac{F_u A_e}{2.00 A_e} \geq \frac{T}{A_e} \qquad (3.11.3)$$

Dan dengan mendifinisikan f_a sebagai tegangan beban layanan hitungan, T/A_g atau T/A_e, **Persamaan 3.11.2** dan **3.11.3** menjadi persyaratan dari ASD-D1:

$$\left[f_a = \frac{T}{A_g}\right] \leq 0.60 F_y \qquad (3.11.4)$$

$$\left[f_a = \frac{T}{A_e}\right] \leq 0.50 F_u \qquad (3.11.5)$$

Penghitungan luas bersih A_n dibicarakan dalam **Bagian 3.5** sedangkan luas bersih efektif dibahas dalam **Bagian 3.6**.

Bagian-bagian Spesifikasi [1.5] yang digunakan dalam *Allowable Stress Design* untuk batang tarik dirangkum dalam **Tabel 3.9.1**.

▪ Contoh 3.11.1:

Selidikilah siku 4x4x$5/16$ yang dipilih dalam **Contoh 3.9.3** untuk berfungsi sebagai batang tarik siku tunggal dari baja A572 Mutu 50 untuk memikul beban mati sebesar 60 kips dan beban hidup 6 kips. Asumsikan bahwa baut berdiameter $7/8$ inch akan ditempatkan dalam jalur tunggal lobang standar untuk menghubungkan batang-batang dengan sebuah pelat buhul.

Penyelesaian:

(*a*) Hitunglah luas bersih efektif dari batang tersebut. Luas bersihnya adalah:

$$A_n = A_g - 1 \text{ lobang} = 2.40 - (0.875 + 0.125)0.3125 = 2.09 \text{ inch}^2$$

Batang tersebut dilekatkan ke pelat buhul sepanjang salah satu kaki (yakni salah satu dari kedua elemennya); maka dari itu, tegangan tak seragam melintang penampangnya akan mereduksi efisiensi batang dalam memikul beban. Menurut ASD–B3, luas bersih efektifnya adalah 0.85 dari luas bersih sebenarnya. **Tabel 3.5.1** memberikan suatu rangkuman mengenai faktor-faktor reduksi.

Maka dari itu, luas bersih efektif A_e adalah sebesar:

$$A_e = UA_n = 0.85(2.09) = 1.78 \text{ inch}^2$$

(*b*) Cek tegangan-tegangan beban layanan. Untuk baja A572 Mutu 50, F_y = 5(ksi dan F_u = 65 ksi:

Dipindai dengan CamScanner

$$f_a = \frac{T}{A_g} = \frac{66}{2.40} = 27.5 \text{ ksi} < [F_a = 0.60F_y = 30 \text{ ksi}] \text{ OK}$$

$$f_a = \frac{T}{A_e} = \frac{66}{1.78} = 37.1 \text{ ksi} > [F_a = 0.50F_a = 0.50F_u = 32.5 \text{ ksi}] \text{ NG}$$

Dengan demikian, menurut *Allowable Stress Design* penampang tersebut belum mencukupi dan diperlukan penampang yang lebih besar.

Acuan Terpilih

3.1. Geoffrey L. Kulak, John W. Fisher, and John H. A. Struik. *Guide to Design Criteria for Bolted Joints*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1987.

3.2. V. H. Cochrane. "Rules for Rivet Hole Deductions in Tension Members," *Engineering News-Record*, **89** (Nov. 1922), 874–848.

3.3. W. M. Wilson. Discussion of "Tension Tests of large Rivert Joints," *Transactions, ASCE*, **105** (1942), p. 1268.

3.4. W. M. Wilson, W. H. Munse, and M. A. Cayci. "A Study of the Practical Efficiency under Static Loading of Riveted Joints Connecting Plates," U. of Illinois Engg. Experiment Station Bulletin 402, 1952.

3.5. F. W. Schutz. "Effective Net Section of Rivered Joints," Proc. Second Illionis Structural Engg. Conf., November 1952.

3.6. "Here's a Better Way to Design Splices," *Engineering News-Record*, **150**, Part I (Jan. 8, 1953), 41.

3.7. P. P. Bijlaard. Discussion of "Investigation and Limit Analysis of Net Area in Tension," *Transactions*, ASCE, **120** (1955), 1156–1163.

3.8. G. W. Brady and D. C. Drucker. "Investigation and Limit Analysis of Net Area in Tension," *Transacsions*, ASCE, **120** (1955), 1133–1154.

3.9. W. H. Munse and E. Chesson, Jr. "Riveted and Bolted joints: Net Section Design," *Journal of the Structural Division*, ASCE, **89**, ST2 (February 1963), 107–126.

3.10. E. Chesson and W. H. Munse. "Behavior of Riveted Connections in Truss-Type Members," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 83, ST1 (January 1957) 1150-1–1150-61; also *Transaction*, ASCE, **123** (1958), 1087–1128.

3.11. William McGuire. *Steel Structural*. Englewood Cliffs, NJ: Prentise-Hall, Inc., 1968 (pp. 310–328).

3.12. James M. Ricles and Joseph A. Yura. "Strength of Double-Row Bolted-Web Connections," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 109, 1 (January 1983), 126–142.

3.13. Steve G. Hardash and Reidar Bjorhovde. "New Design Criteria for Gusset Plates in Tension," *Engineering Journal*, AISC, **22**, 2 (2nd Quarter 1985), 77–94.

3.14. Richard M. Bennett and F. Shima Najem-Clarke. "Reliability of Bolted Steel Tension Members," *Journal of Sructural Engineering*, ASCE, **113**, 8 (August 1987), 1865–1872.

Soal-soal

Semua soal hendaknya dikerjakan menurut *Load and Resistance Factor Design* AISC atau *Allowable Stress Design*. Asumsikanlah bahwa kekuatan penyambung sudah

Dipindai dengan CamScanner

mencukupi dan tidak berpengaruh. Semua lobang adalah *standar* untuk baut yang diameternya ditunjukkan. Harga-harga tegangan leleh F_y dan kekuatan tarik F_u tersedia dalam **Tabel 2.1.1**. Untuk mengecek kekuatan patahan geser, asumsikanlah bahwa semua jarak dari titik pusat lobang ke pinggir adalah $1\frac{1}{2}$ inch.

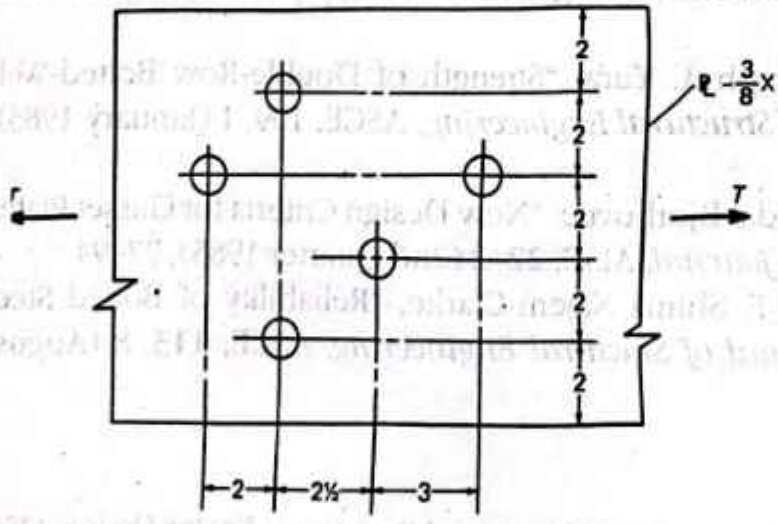
3.1 Hitunglah beban layanan tarik maksimum yang dapat diterima yang dapat bekerja pada sebuah siku tunggal L6x4x$\frac{3}{4}$ yang dilas sepanjang salah satu kakinya dengan sebuah pelat buhul; dengan demikian tidak ada lobang. Beban hidup layanannya adalah tiga kali beban matinya. Hitunglah untuk (*a*) baja A36 dan (*b*) baja A572 Mutu 50.

3.2 Hitunglah beban layanan tarik maksimum yang dapat ditanggung oleh siku pada **Soal 3.1** bila yang dihubungkan adalah kedua kakinya. Pada kaki yang berukuran 4 inch terdapat jalur tunggal baut $\frac{7}{8}$ inch, sedangkan pada kaki yang berukuran 6 inch terdapat jalur ganda baut berdiameter $\frac{7}{8}$ inch. Asumsikanlah bahwa tidak ada baut yang berada dalam keadaan tak segaris, dan bahwa semua baut ikut berpartisipasi dalam memikul beban.

3.3 Hitunglah beban layanan maksimum yang dapat diterima pada sebuah batang tarik yang berupa pelat baja A36 berukuran $\frac{1}{4}$ inch x 12 inch yang memiliki sebuah jalur lobang yang sejajar dengan arah pembebanan. Bebannya adalah 25% beban mati dan sisanya 75% adalah beban hidup, dan baut yang digunakan berdiameter $\frac{7}{8}$ inch.

3.4 Hitunglah luas bersih A_n untuk pelat (menurut LRFD dan ASD-J5 merupakan sebuah elemen penghubung) yang terlihat dalam gambar berikut ini. Kemudian hitunglah harga maksimum untuk beban layanan T bila digunakan baja A36; beban hidupnya sebesar empat kali beban matinya, dan lobang berdiameter $\frac{13}{16}$ inch.

3.5 Ulangi **Soal 3.4** dengan menggunakan baja A572 Mutu 60 dan lobang berdiameter $\frac{15}{16}$ inch.



Soal 3.4 dan 3.5

Dipindai dengan CamScanner

3.6 Pilihlah pasangan siku-siku untuk memikul beban hidup tarik (LL) dan beban mati (DL) untuk kasus yang ditunjuk. Asumsikan bahwa siku-siku tersebut terpisah sejauh $\frac{3}{8}$ inch dalam keadaan bertolak belakang oleh sebuah pelat buhul dan bahwa sambungannya menggunakan las. Asumsikanlah bahwa rasio kerampingannya diharapkan tidak melebihi 300.

Kasus	DL(kips)	LL(kips)	Baja	Panjang(ft)
1	70	20	A36	20
2	65	22	A36	30
3	70	20	A572 Mutu 60	20
4	48	30	A36	22
5	50	30	A572 Mutu 50	22
6	80	30	A36	20
7	80	100	A572 Mutu 50	28

3.7 Pilihlah suatu siku tunggal (untuk kasus yang ditunjuk) untuk memikul suatu beban tarik. Digunakan barisan tunggal yang terdiri paling tidak tiga baut. Asumsikan bahwa kekuatan patahan geser tidak berpengaruh.

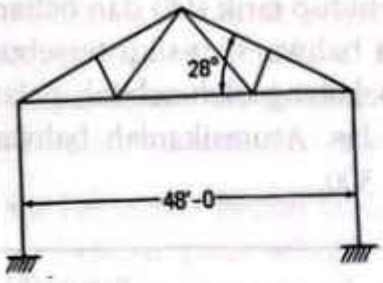
Kasus	DL(kips)	LL(kips)	Baja	Diameter Baut(inch)	Panjang(ft)
1	15	40	A36	$\frac{3}{4}$	15
2	15	40	A572 Mutu. 50	$\frac{3}{4}$	15
3	15	40	A36	$\frac{3}{4}$	20
4	15	40	A572 Mutu. 60	$\frac{7}{8}$	25
5	10	30	A36	$\frac{7}{8}$	20
6	10	30	A572 Mutu. 50	$\frac{7}{8}$	20
7	12	35	A36	$\frac{7}{8}$	18
8	12	35	A572 Mutu. 60	$\frac{7}{8}$	18

3.8 Pilihlah suatu jangkar berulir standar untuk memikul gaya tarik T sebesar 4 kips beban mati dan 6 kips beban hidup. Gunakan baja A572 Mutu 50.

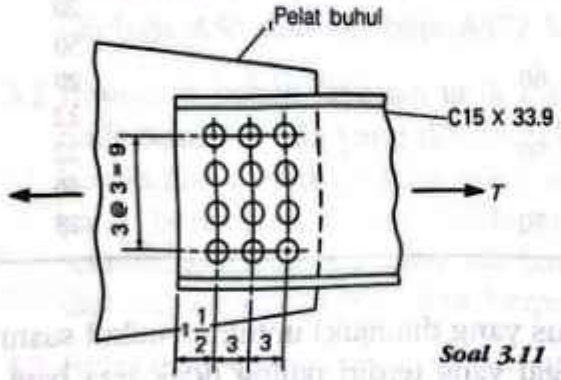
3.9 Pilihlah suatu jangkar berulir standar untuk memikul gaya tarik T sebesar 2 kips beban mati dan 4 kips beban hidup. Gunakan baja A36.

3.10 Buatlah desain *sag rod* untuk mendukung gordeng dari atap sebuah bangunan industrial yang bentangan dan kemiringannya ditunjukkan dalam gambar berikut ini. *Sag rod* ditempatkan pada setiap $\frac{1}{3}$ di antara kerangka atap yang berjarak 30 ft. Asumsikan bahwa berat pengatapan dan gordeng adalah 9 psf permukaan atap. Gunakan jangkar berulir standar dan baja A36. Beban salju yang harus dipikul adalah 20, 30, atau 40 psf dari projeksi horisontal, pilihlah yang sesuai dengan tempat anda.

Dipindai dengan CamScanner



Soal 3.10

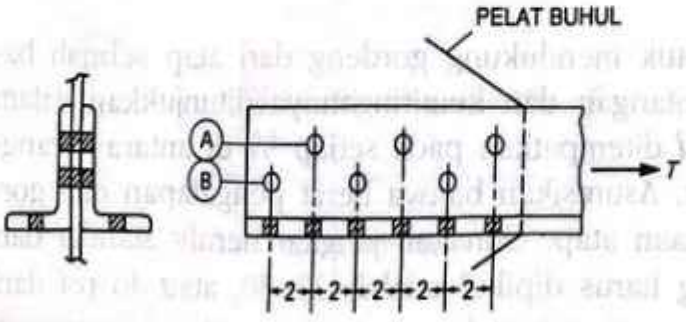


Soal 3.11

3.11 Tentukan beban tarik maksimum yang diijinkan (20% beban mati, 80% beban hidup) untuk sebuah kanal tunggal C15×33,9 yang dilekatkan dengan sebuah pelat buhul setebal $\frac{1}{2}$ inch seperti dalam gambar berikut. Gunakan baja A36 dan asumsikan bahwa lobangnya untuk baut berdiameter $\frac{3}{4}$ inch. Jawaban hendaknya didasarkan atas kekuatan tarik dari kanal yang bersangkutan, termasuk kekuatan patahan gesernya.

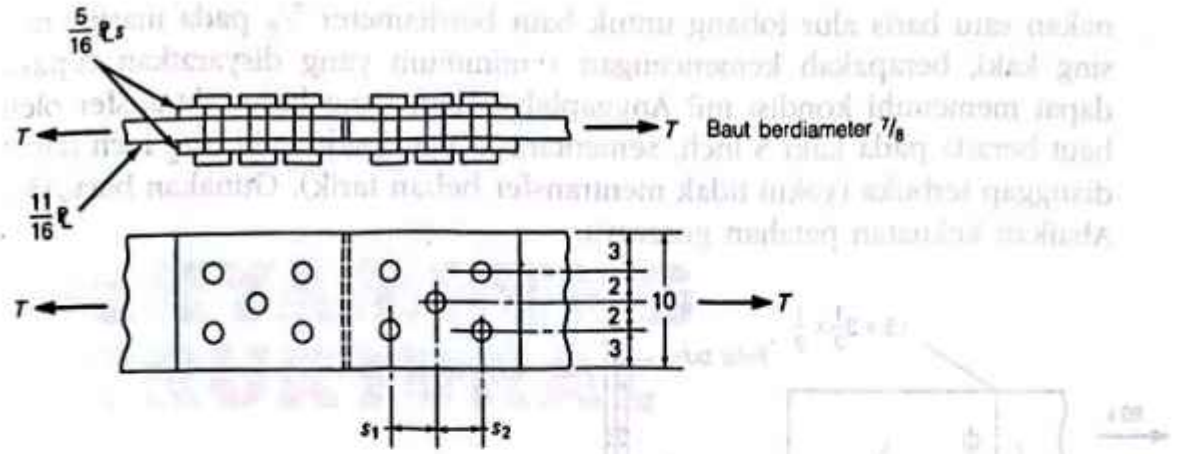
3.12 Ulangi **Soal 3.11** dengan menggunakan kanal C10x25. Asumsikan bahwa ke-12 baut berada dalam 3 baris yang sejajar dengan arah pembebanan dengan jarak yang sama yakni sebesar 3 inch.

3.13 Tentukan beban tarik (85% beban hidup; 15% beban mati) yang diijinkan oleh AISC untuk pasangan siku-siku L6x4x$\frac{3}{8}$ yang dilekatkan pada sebuah pelat buhul seperti dalam gambar berikut ini. Gunakan baja A36 dan baut berdiameter $\frac{3}{4}$ inch pada baris alur standar dengan jarak yang diberikan dalam **Tabel 3.4.1**. Gaya *T* ditransmisikan ke pelat buhul oleh penyambung pada baris *A* dan *B*; asumsikan bahwa lobang terbuka hanya pada kaki 4 inch (utama).



Soal 3.13

Dipindai dengan CamScanner



Soal 3.15

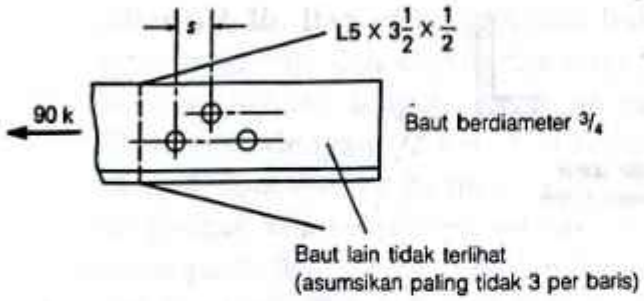
3.14 Ulangi **Soal 3.13** dengan sepasang L8x6x¾ dengan baut tak segaris pada kaki 8 inch-nya.

3.15 Bila diberikan angka-angka berikut ini:

(*a*) Tentukan kapasitas maksimum T (25% beban mati, 75% beban hidup) berdasarkan pelat-pelat baja A36 yang memiliki lobang-lobang dengan susunan seperti berikut ini.

(*b*) Berapakah seharusnya harga s untuk memberikan kapasitas maksimum T seperti hitungan (*a*) bila dikehendaki bahwa desain akhirnya memiliki hubungan $s_1 = s_2 = s$?

3.16 Sebuah siku L5x3$^1/_2$x$^1/_2$, seperti dalam gambar berikut, akan memikul beban mati sebesar 20 kips dan beban hidup sebesar 70 kips dengan panjang terpendek sambungan menggunakan baris alur baut pada kaki 5 inch. Berapakah kemencengan (jarak tak segaris) minimum yang dapat diterima, baik secara teoretis maupun yang dispesifikasikan (kelipatan $^1/_2$ inch) dengan menggunakan baja A572 Mutu 50? Abaikan kekuatan patahan gesernya.

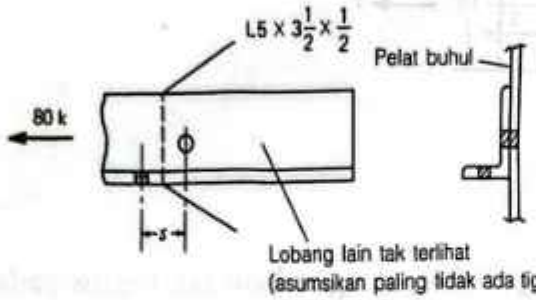


Soal 3.16

3.17 Sebuah siku L5x3$^1/_2$x$^1/_2$, seperti dalam gambar berikut, akan memikul beban sebesar 20 kips beban mati dan 60 kips beban hidup. Dengan menggu-

Dipindai dengan CamScanner

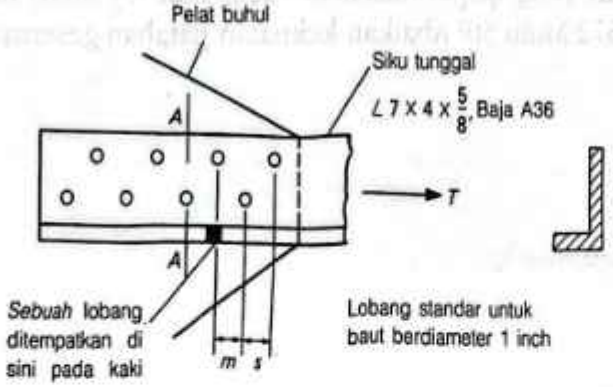
nakan satu baris alur lobang untuk baut berdiameter $^7/_8$ pada masing-sing kaki, berapakah kemencengan s minimum yang disyaratkan sup dapat memenuhi kondisi ini? Anggaplah beban yang harus ditransfer baut berada pada kaki 5 inch, sementara lobang pada kaki $3^1/_2$ inch da dianggap terbuka (yakni tidak mentransfer beban tarik). Gunakan baja A Abaikan kekuatan patahan gesernya.



Soal 3.17

3.18 Hitunglah harga minimum s yang secara teroretis dapat digunakan pada si dari gambar berikut sedemikian rupa sehingga dapat memikul gaya ta terfaktor maksimum T_u. Asumsikan bahwa m cukup besar sehingga tid dipengaruhi oleh suatu pola kegagalan melalui lobang terbuka. Ikutsertak pula pertimbangan mengenai kekuatan patahan geser.

3.19 Dengan mengasumsikan s untuk siku dari **Soal 3.18** dibuat sebesar ya diinginkan menurut **Soal 3.18** tersebut, hitunglah jarak minimum m ya disyaratkan sehingga lobang terbuka pada kaki 4 inch tidak akan meredu kekuatan di bawah harga maksimumnya yang mungkin. Bila **Soal 3.18** tid terpecahkan, asumsikan bahwa s sama dengan 3.17 inch.



Soal 3.18 dan 3.19

3.20 Buatlah desain sebuah jangkar tarik *eyebar* yang akan memikul beban mati kips dan beban hidup 76 kips dengan menggunakan pelat baja A572 Mutu yang dipotong dengan api. (Hendaklah mengacu pada LRFD dan ASD–D3).

Dipindai dengan CamScanner

4
PENYAMBUNG STRUKTURAL

4.1 Tipe-tipe Penyambung

Setiap struktur merupakan rangkaian bagian-bagian tunggal yang harus disambungkan satu sama lain, biasanya pada ujung batang dengan berbagai macam cara. Salah satunya dengan las, dan ini akan dibahas dalam **Bab 5**. Cara lain dengan penyambung seperti keling atau baut. Bab ini terutama membahas baut; dan secara khusus baut berkekuatan tinggi. Pada hakikatnya, baut berkekuatan tinggi telah menggeser kedudukan keling sebagai alat sambung bukan las. Meskipun demikian, demi lengkapnya secara singkat dikemukakan pula penyambung-penyambung lain, termasuk keling dan baut mesin tak difinis.

4.1.1 Baut Berkekuatan Tinggi

ASTM menunjuk dua tipe dasar baut berkekuatan tinggi sebagai sebagai A325 [2.5] dan A490 [2.8], sedang sifat-sifat materialnya akan dibicarakan dalam **Bagian 2.2** dan dirangkum dalam **Tabel 4.1.1**. Baut-baut ini berkepala heksagon (segi enam) tebal yang digunakan bersama mur segi enam semi finis yang tebal seperti **Gambar 4.1.1*b***. Bagian yang berulir lebih pendek daripada baut untuk keperluan non-struktural, dan dapat dipotong atau ditempa. Baut A325 terbuat dari baja *karbon medium* dengan perlakuan panas yang memiliki kekuatan leleh sekitar 81 sampai dengan 92 ksi (560 sampai dengan 630 MPa) tergantung pada diameternya. Baut A490 juga mendapat perlakuan panas, namun terbuat dari baja *paduan* dengan kekuatan leleh sekitar 115 sampai 130 ksi (790 sampai 900 MPa) tergantung pada diameternya. Kadangkala baut A449 digunakan bila dibutuhkan diameter $1\frac{1}{2}$ inch, dan juga untuk baut jangkar dan jangkar berulir.

Diameter baut berkekuatan tinggi berkisar dari $\frac{1}{2}$ sampai dengan $1\frac{1}{2}$ inch (3 inch untuk A449). Diameter yang paling banyak digunakan pada konstruksi bangunan adalah $\frac{3}{4}$ inch dan $\frac{7}{8}$ inch, sedangkan ukuran yang paling umum pada desain jembatan adalah $\frac{7}{8}$ inch dan 1 inch.

Dipindai dengan CamScanner

Tabel 4.1.1 Sifat-sifat Baut

Penamaan ANSI/ASTM	Diameter baut inch (mm)	Beban bukti[a], metode pengukuran panjang[b], ksi (MPa)	Beban bukti[a], metode kekuatan leleh[c], ksi (MPa)	Kekuatan tarik minimum ksi (MPa)
A307 [2.4],baja karbon rendah, Mutu A dan B	¼ sampai 4 (6.35 sampai 104)	–	–	60
A325 [2.5], baja berkekuatan tinggi, Tipe 1, 2, dan 3	½ sampai 1 (12.7 sampai 25.4)	85 (585)	92 (635)	120 (825)
Tipe 1, 2, dan 3	1⅛ sampai 1½ (28.6 sampai 38.1)	74 (510)	81 (560)	105 (725)
A449 [2.7], baja disepuh dan didinginkan (*Perhatikan*: AISC[d] hanya mengijinkan penggunaan untuk baut yang lebih besar dari 1½ inch dan untuk jangkar berulir serta baut jangkar)	¼ sampai 1 (6.35 sampai 25.4)	85 (585)	92 (635)	120 (825)
	1⅛ sampai 1½ (28.6 sampai 38.1)	74 (510)	81 (560)	105 (725)
	1¾ sampai 3 (6.35 sampai 76.2)	55 (380)	58 (400)	90 (620)
A490 [2.8], baja paduan disepuh dan didinginkan	½ sampai 1½ (12.7 sampai 38.1)	120 (825)	130 (895)	150 (1035)

[a]) Beban bukti dan beban tarik aktual yang diperoleh dengan mengalikan harga tegangan yang diberikan dengan luas tegangan tarik A_s; $A_s = 0.7854\ [D - (0.9743/n)]^2$, di mana A_s = luas tegangan dalam inch^2, D = diameter nominal baut dalam inch, dan n = banyaknya ulir per inch.
[b]) perpanjangan sebesar 0.5% karena beban
[c]) nilai offset 0.2%
[d]) LRFD dan ASD-J.3

Baut berkekuatan tinggi diketatkan supaya timbul tegangan tarik yang dispesifikasikan pada baut tersebut dan yang kemudian menghasilkan gaya cengkeram yang diharapkan pada simpul sambungannya. Maka dari itu, transfer beban layanan aktual melalui suatu simpul sambungan adalah melalui gesekan yang terjadi pada bagian-bagian yang digabungkan. Simpul dengan baut berkekuatan tinggi didesain baik sebagai *gelincir-kritik* (*slip-critical*) (dulu disebut *tipe-gesekan* = *friction type*) di mana diinginkan resistensi gelincir yang tinggi pada beban layanan; atau sebagai *tipe tumpu/pikul* (*bearing type*) di mana tidak diperlukan resistensi yang tinggi terhadap gelincir pada beban layanan.

Dipindai dengan CamScanner

(A) Keling

(b) Baut berkepala segi enam berkekuatan tinggi

(c) Baut badan tangkai bergerigi berkekuatan tinggi

Gambar 4.1.1 Tipe-tipe penyambung

4.1.2 Keling

Selama bertahun-tahun keling merupakan sarana yang banyak digunakan sebagai penghubung, namun dewasa ini (1990) di Amerika Serikat tidak terlalu diperhitungkan lagi. Keling yang belum digunakan dibentuk dari batang baja, berwujud poros silindris dengan kepala pada salah satu ujungnya seperti **Gambar 4.1.1*a***. Baja keling merupakan baja karbon lunak yang oleh ASTM diberi nama A502 Mutu 1 (F_y = 28 ksi)(190 MPa) dan Mutu 2 (F_y = 38 ksi)(260 MPa), dengan kekuatan leleh spesifikasi minimum berdasarkan pada blok batang pada saat ditempa. Pembuatan keling baru serta pemasangan keling akan menyebabkan perubahan pada sifat-sifat mekaniknya.

Pada hakikatnya, metode pemasangannya adalah dengan memanaskan keling tersebut sampai berwarna merah mudah buah *cherry*, memasukkannya ke dalam lobang dan kemudian menekan kepala keling yang sudah terbentuk sebelumnya dan bersamaan itu pula menggencet ujung keling yang datar sampai terbentuk kepala bulat. Selama proses berlangsung, tangkai paku keling seluruhnya atau hampir seluruhnya memenuhi lobang yang dimasukinya. Pada saat pendinginan, keling akan menyusut dan akibatnya akan timbul gaya cengkeram. Meskipun demikian, besarnya gaya cengkeram yang dihasilkan oleh pendinginan keling bervariasi antara satu keling dengan keling lainnya, dan dari sebab itu tak dapat diperhitungkan dalam kalkulasi desain.

4.1.3 Baut Tak-finis

Baut ini dibuat dari baja karbon rendah yang diberi nama ASTM A307 [2.4] dan merupakan tipe baut yang paling murah. Meskipun demikian, baut ini mungkin saja justru tidak menghasilkan sambungan yang paling murah karena dibutuhkan baut yang jauh lebih banyak jumlahnya. Penggunaannya yang terutama adalah

Dipindai dengan CamScanner

pada struktur ringan, batang sekunder atau sabukan, *platform*, *catwalk*, gorden *girt*, kerangka-kerangka kecil, dan yang serupa lainnya terutama yang bebann kecil dan bersifat statik. Baut sedemikian juga sering digunakan sebag penghubung sementara di mana kelak akan digunakan baut berkekuatan ting keling, atau las sebagai sarana penghubung yang permanen. Baut tak-finis kera kali disebut baut biasa, baut mesin, atau baut kasar; sedang wujudnya dap berkepala atau ber-mur bujur sangkar.

4.1.4 Baut Ber-rusuk

Buat ini terbuat dari baja keling biasa dengan kepala bulat dan rusuk-rusuk ya sejajar dengan tangkai baut. Selama bertahun-tahun baut ini digunakan sebag alternatif bagi keling. Diameter sebenarnya dari suatu baut berusuk dengan uku an tertentu adalah sedikit lebih besar daripada lobang yang akan dimasukiny Pada saat pemasangan, sebenarnya baut tersebut mengiris pinggiran loba sehingga menghasilkan ikatan yang relatif ketat. Tipe baut ini secara khus berguna pada sambungan tumpu (*bearing connection*) dan pada sambungan ya mengalami pembalikan tegangan.

Variasi modern dari baut berusuk adalah *baut tangkai bergerigi* (*interferenc body bolt*) seperti **Gambar 4.1.1c** yang terbuat dari baja A325 dan sebagai ga dari rusuk-rusuk memanjang justru memiliki gerigi di seputar maupun sejajar d ngan tangkai baut. Karena adanya gerigi yang memotong rusuk-rusuk terseb baut ini sering disebut juga sebagai *baut berusuk terpotong* (*interrupted-rib bol* Baut berusuk juga sulit digunakan untuk menyambungkan beberapa lapis ler baran pelat. Buat badan campuran A325 berkekuatan tinggi dewasa ini bahka lebih sulit lagi dimasukkan ke dalam lobang. Meskipun demikian, baut ini bergu na bila dikehendaki baut yang terpasang ketat pada lobangnya, dan baut i memungkinkan pengetatan mur-nya tanpa sekaligus harus memegangi kepala bau seperti yang biasa terjadi pada baut A325 yang longgar dalam lobangnya. Namun baut-baut ini jarang digunakan dalam struktur-struktur biasa.

4.2 Latar Belakang Sejarah Baut Berkekuatan Tinggi

Eksperimen-eksperimen pertama yang menunjukkan kemungkinan penggunaan baut berkekuatan tinggi pada konstruksi rangka baja dilaporkan oleh Batho dan Bateman [4.1] dalam tahun 1934. Batho dan Bateman menyimpulkan bahwa baut dengan kekuatan leleh minimum sebesar 54 ksi (370 MPa) dapat dipercaya untuk menahan gelinciran dari bagian-bagian yang disambungkan. Uji lanjutan dari Wilson dan Thomas [4.2] memperkuat hasil karya sebelumnya dengan melaporkan bahwa bila telah dipratarik dengan cukup, baut berkekuatan tinggi dengan diameter yang lebih kecil daripada lobang yang dimasukinya memiliki kekuatan letih yang sama dengan kekuatan keling yang dipasang dengan baik.

Langkah besar selanjutnya terjadi pada tahun 1947 dengan pembentukan

Dipindai dengan CamScanner

Research Council on Riveted and Bolted Structural Joints. Organisasi ini mulai dengan menggunakan dan mengekstrapolasi informasi dari studi-studi mengenai sambungan dengan keling; secara khusus, digunakan bibliografi besar yang terkenal dari De Jonge [4.3] yang diselesaikan dalam tahun 1945 itu. Dari permulaan ini, Dewan Riset tersebut telah melanjutkan organisasi dan menyeponsori riset mengenai sambungan dengan baut berkekuatan tinggi, dan menerbitkan sejumlah spesifikasi secara berkala berdasarkan temuan-temuan riset.

Menjelang tahun 1950, konsep penggunaan baut berkekuatan tinggi serta rangkuman riset dan perilaku dipresentasikan [4.4] kepada para insinyur praktisi dan industri fabrikasi baja. Spesifikasi pertama dalam tahun 1951 mengijinkan penggantian keling dengan baut dengan aturan satu keling digantikan oleh satu baut. Secara konservatif diasumsikan bahwa transfer beban gesekan diperlukan pada semua sambungan di bawah kondisi beban layanan. Faktor keamanan terhadap gelinciran ditentukan pada tingkat yang cukup tinggi sehingga resistensi yang baik terhadap keletihan (yakni tidak ada lagi gelinciran dalam berbagai macam tegangan atau perlawanan tegangan yang terdiri dari banyak siklus beban) dapat terjadi pada setiap simpul, serupa atau lebih baik daripada yang terdapat pada simpul dengan keling.

Pada tahun 1954, dibuat revisi pada spesifikasi untuk memasukkan penggunaan ring rata (*flat washer*) pada permukaan berkemiringan 1:20 dan untuk memungkinkan penggunaan kunci puntir kejut untuk memasang baut-baut berkekuatan tinggi. Pun pula, revisi tahun 1954 mengijinkan permukaan-permukaan yang bersinggungan dicat bila baut diharapkan dapat membentuk sambungan *tipe tumpu*; yakni bila kekuatan sambungan harus didasarkan pada baut yang mendesak tebal lobang.

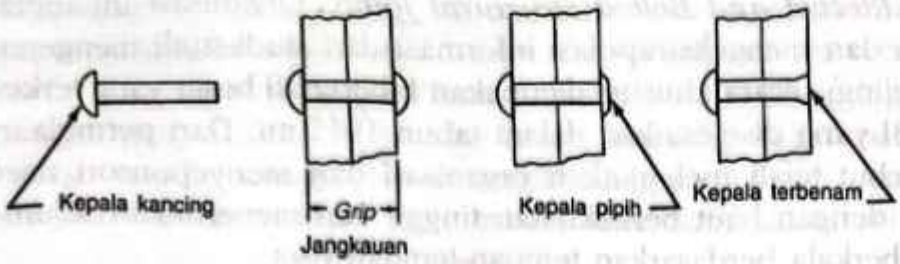
Pada tahun 1956, Munse [4.5] merangkumkan perilaku baut dan mengambil kesimpulan bahwa agar efisien dan ekonomis, baut harus memiliki tarik awal setinggi yang dapat dipraktekkan. Menjelang tahun 1960, tarik minimum baut ditingkatkan. Sambungan *tipe tumpu* mulai dikenal dan diterima sebagai pengganti yang untuk sambungan keling. Sambungan yang didesain berdasar resistensi gelinciran, yang kemudian dikenal sebagai sambungan *tipe gesekan*, mungkin hanya diperlukan bila tarik langsung bekerja pada baut atau bila terjadi perubahan arah tegangan.

Dalam tahun 1960 pula prosedur pemasangan sederhana, yang dikenal sebagai *metode putaran mur*, diperkenalkan sebagai alternatif terhadap metode kunci mur puntir. Ekonomi penggunaan baut berkekuatan tinggi semakin diperbaiki ketika pada penggunaan metode putaran mur dapat digunakan cukup satu ring saja yang diletakkan di bawah elemen (kepala atau mur) yang diputar, sedangkan sebelumnya dibutuhkan dua buah.

Pada tahun 1962, persyaratan adanya ring baut dapat dihapuskan, kecuali untuk situasi-situasi khusus [4.6]. Dalam tahun 1964, diperkenalkan baut A490 dengan kekuatan yang lebih tinggi.

Dalam tahun 1976, perubahan-perubahan besar terjadi ketika mulai dikenal kekuatan baut yang lebih tinggi, dan kekuatan untuk baut yang digunakan pada lobang yang tidak standar juga diberikan.

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 4.3.1 Tipe-tipe keling.

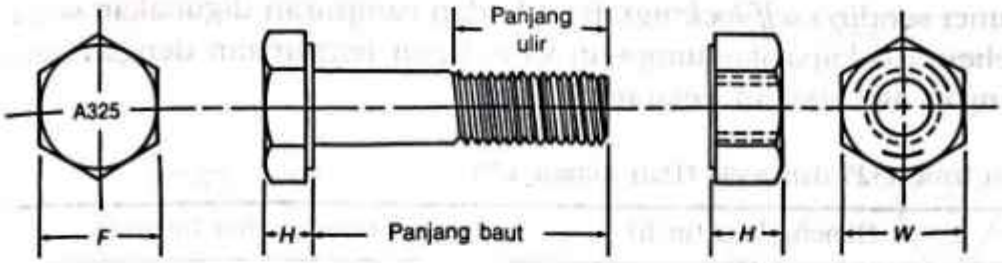
Spesifikasi paling mutakhir dari *Research Council on Structural Connection* (RCSC) [4.7, 4.8] sedikit mengubah filosofi desain untuk sambungan tipe tump dan untuk sambungan tipe gesekan, yang sekarang disebut *simpul gelincir-kr tik*. Ulasan mengenai latar belakang sejarah yang lebih terinci dari yang disam paikan di sini dapat ditemukan dalam Komentar RCSC [4.9]. *Guide to Desig Criteria for Bolted and Riveted Joints* oleh Kulak, Fisher, dan Struik [3.1] (selan jutnya akan disebut sebagai *Guide*) merangkum riset dan membuat rekomendasi rekomendasi yang pada umumnya membentuk dasar bagi desain sambungan bau dewasa ini.

4.3 Penyebab Mengapa Keling Dianggap Ketinggalan Jaman

Sambungan dengan keling merupakan metode penyambungan dengan cara me nyisipkan pen-pen logam ke dalam lobang pada elemen-elemen yang disam bungkan dan pembentukan kepala pada masing-masing ujungnya untuk mence gah supaya sambungan tersebut tidak terlepas lagi. Pada **Gambar 4.3.1** (*liha* juga **Gambar 4.1.1*a***) diperlihatkan tipe-tipe keling tipikal. Penyebab utama me ngapa keling ketinggalan jaman adalah munculnya baut berkekuatan tinggi seru perkembangan teknik-teknik pengelasan yang akan dibahas dalam **Bab 5**; sedang bahan dasar bab ini adalah perkembangan baut berkekuatan tinggi. Meskipun demikian, di samping sebab-sebab yang telah dikemukakan di atas, ada sejum lah kekurangan yang inheren yang menyebabkan keling ketinggalan jaman, khususnya pada pengelingan lapangan.

Pengelingan membutuhkan tenaga kerja setidaknya terdiri dari empat atau lima orang yang berpengalaman. Sedangkan jumlah tenaga kerja yang dibutuhkan untuk memasang baut berkekuatan tinggi tidak perlu berkeahlian tinggi. Peng awasan sulit dilakukan, bahkan tenaga ahli pemasangan keling yang paling berpengalaman pun masih membutuhkan pengawasan yang sangat ketat. Pencongkelan dan penggantian keling yang kurang baik merupakan suatu prose dur yang mahal. Bahkan pemanasan sebelum pemasangan merupakan hal yang kritik supaya dapat diperoleh keketatan yang diperlukan setelah pendinginan. Faktor utama yang menunda segera diterimanya baut berkekuatan tinggi adalah biaya bahan yang tinggi termasuk diperlukannya dua ring yang diperkeras. Pada

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 4.4.1 Baut struktur heks tebal dan mur tebal berat. (Dari Acuan 4.9)

awal tahun 1950-an, berkurangnya ongkos tenaga kerja untuk pemasangan baut belum mengimbangi biaya bahan baut yang tinggi. Setelah ring dapat direduksi menjadi satu saja atau dihilangkan sama sekali dan kekuatannya pun dapat lebih tinggi daripada kekuatan keling, baut berkekuatan tinggi mulai menjadi ekonomis. Sekarang (1990), bahkan dengan biaya tenaga yang lebih tinggi dan desain sambungan pada umumnya membutuhkan baut lebih sedikit ketimbang keling, keuntungan ekonomi jelas dimenangkan oleh baut berkekuatan tinggi.

4.4 Detail Baut Berkekuatan Tinggi

Baik baut A325 yang banyak digunakan atau baut A490 yang hanya kadang-kadang saja digunakan merupakan baut berkepala segi enam (heksagon = heks) tebal dengan mur heksagon tebal pula yang diberi identifikasi oleh ASTM pada bagian atas kepalanya seperti **Gambar 4.4.1**.

Baut heks memiliki bagian berulir yang lebih pendek dibanding baut-baut lainnya; hal ini mengurangi kemungkinan terdapatnya ulir di mana kekuatan maksimum dibutuhkan pada tangkai baut. Dimensi baut heks tebal beserta murnya diberikan dalam **Gambar 4.4.1** dan **Tabel 4.4.1**. Persyaratan untuk penandaan baut dan mur, termasuk identifikasi pembuat, diberikan dalam **Gambar 4.4.2**.

Baut A325 dan A490 tersedia sebagai Tipe 1, 2, atau 3. Baut A325 Tipe 1 merupakan baut baja karbon medium yang telah tersedia selama bertahun-tahun dan merupakan baut yang dimaksud bila tidak dispesifikasikan secara khusus. Demikian pula untuk A490, Tipe 1 merupakan baut baja paduan biasa. Tipe 2 baik untuk A325 maupun A490 merupakan baja martensit karbon rendah sebagai alternatif bagi Tipe 1 untuk digunakan dalam kondisi atmosferik. Untuk temperatur yang lebih tinggi, harus digunakan Tipe 1. Tipe 3 baik untuk A325 maupun A490 merupakan baut baja melapuk yang memiliki resistensi terhadap korosi sebanding dengan baja melapuk A588 (*lihat* **Tabel 2.1.1**).

Kadangkala digunakan baut ASTM A449 bila diameter yang dikehendaki lebih besar daripada $1\frac{1}{2}$ inch.

Variasi dari A325 dan 490 standar yang digunakan untuk sambungan tumpu adalah baut *tangkai bergerigi* seperti **Gambar 4.1.1c**. Baut-baut ini memiliki kepala dan dapat digunakan dengan mur standar berkekuatan tinggi atau dengan

Dipindai dengan CamScanner

mur yang mengunci sendiri (*self-locking*). Baut badan campuran digunakan secara khusus bila dikehendaki kapasitas tumpuan yang besar bersamaan dengan perubahan arah tegangan atau beban getaran.

Tabel 4.4.1 Dimensi baut A325 dan A490 (Dari **Acuan 4.7**)

Ukuran nominal baut, *D*, (inch)	Dimensi baut (inch)			Dimensi mur (inch)	
	Baut heks struktur yang tebal			Mur heks yang tebal	
	Lebar melintang datar, *F*	Tinggi, *H*	Panjang ulir	Lebar melintang datar, *W*	Tinggi, *H*
1/2	7/8	5/16	1	7/8	31/64
5/8	1 1/16	25/64	1 1/4	1 1/16	39/64
3/4	1 1/4	15/32	1 3/8	1 1/4	47/64
7/8	1 7/16	35/64	1 1/2	1 7/16	55/64
1	1 5/8	39/64	1 3/4	1 5/8	63/64
1 1/8	1 13/16	11/16	2	1 13/16	1 7/16
1 1/4	2	25/32	2	2	1 7/32
1 3/8	2 3/16	27/32	2 1/4	2 3/16	1 11/32
1 1/2	2 3/8	15/16	2 1/4	2 3/8	1 15/32

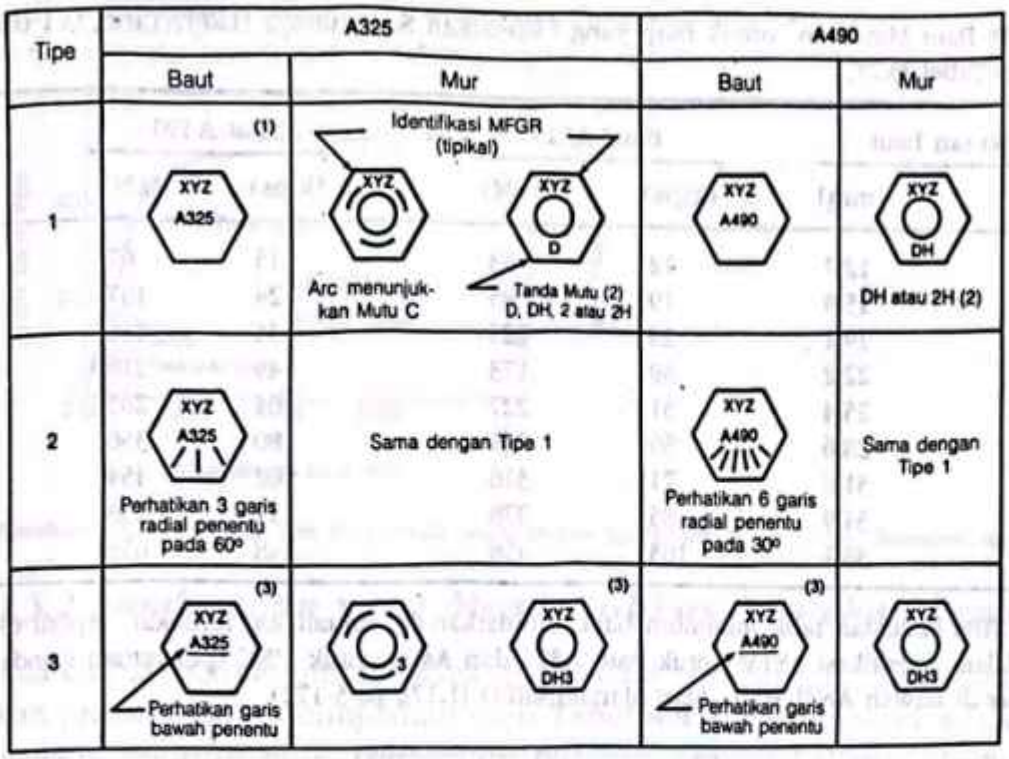
4.4.1 Beban Bukti dan Tarik Baut — Sambungan Gelincir-Kritis

Sampai tahun 1985 Spesifikasi RCSC [4.7], semua baut berkekuatan tinggi disyaratkan dipasang dengan gaya *pratarik* (*pretension*) untuk menciptakan gaya tekan setinggi yang dapat dipraktekkan di antara elemen-elemen yang disambung, sedemikian rupa sehingga gaya-gaya geser ditransmisikan melalui sambungan-sambungan dengan gesekan di antara elemen-elemen yang disambungkan. Spesifikasi tersebut tidak mewajibkan persyaratan *pratarik* bila baut tidak dipengaruhi oleh gaya tarik langsung; dan resistensi gelinciran di antara elemen-elemen yang disambungkan pun tidak diperlukan lagi [4.7, Bagian 5].

Bila diperlukan ketahanan terhadap gelinciran, pratarikan harus dilakukan setinggi mungkin tanpa memberi kesempatan terjadinya deformasi permanen atau kegagalan baut. Bahan baut menunjukkan perilaku tegangan-regangan (deformasi-beban) yang tidak memiliki titik leleh yang terdefinisi seperti **Gambar 4.4.3**. Sebagai ganti dari penggunaan tegangan leleh, digunakanlah apa yang disebut *beban bukti*. *Beban bukti* adalah beban yang diperoleh dengan mengalikan luas tegangan tarik* dengan tegangan leleh yang ditentukan dengan menggunakan regangan *offset* sebesar 0.2% atau perpanjangan sebesar 0.5% akibat beban (*lihat* **Bagian 2.4**). ASTM menabulasikan beban bukti ini untuk masing-masing diameter, misalnya, untuk baut berdiameter 1/2 sampai 1 inch, harga *offset* regangannya adalah 92 ksi (630 MPa) dan harga pengukuran panjang sebesar 85 ksi (590 MPa). Tegangan beban buktinya mendekati harga minimum sebesar 70% dan 80% dari kekuatan tarik minimum masing-masing untuk baut A325 dan A490.

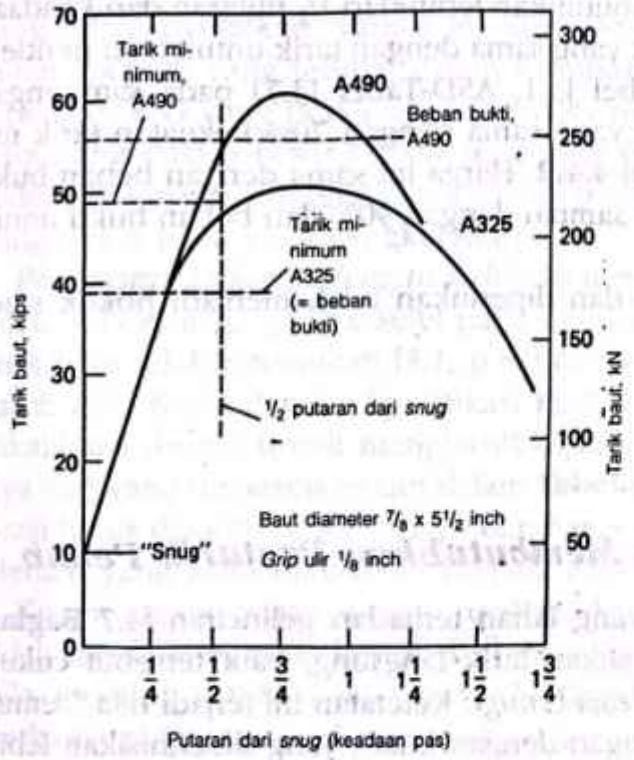
* *Lihat* catatan kaki pada **Tabel 4.1.1**

Dipindai dengan CamScanner



(1) Boleh ditambahkan tiga garis radial opsional pada 120°.
(2) Tipe 3 dapat juga dapat diterima.
(3) Dapat ditambahkan tanda opsional yang menunjukkan golongan pelapukan.

Gambar 4.4.2 *Tanda-tanda yang diharapkan pada rangkaian baut dan mur yang dapat diterima (Dari* ***Acuan 4.9****)*



Gambar 4.4.3 *Hubungan tipikal beban vs putaran mur untuk baut A325 dan A490 (Dari Kulak, Fisher, dan Struik [3.1])*

Dipindai dengan CamScanner

Tabel 4.4.2 Tarik Baut Minimum* untuk Baut yang Diketatkan Sepenuhnya (LRFD-Tabel J3.1, ASD-Tabel J3.7)

Ukuran baut		Baut A325		Baut A490	
(inch)	(mm)	(kips)	(kN)	(kips)	(kN)
1/2	12.7	12	53	15	67
5/8	15.9	19	85	24	107
3/4	19.1	28	125	35	156
7/8	22.2	39	173	49	218
1	25.4	51	227	64	285
1 1/8	28.6	56	249	80	356
1 1/4	31.8	71	316	102	454
1 3/8	34.9	85	378	121	538
1 1/2	38.1	103	458	148	658

* Sama dengan 70% kekuatan tarik minimum baut, dibulatkan ke satuan kip terdekat, seperti spesifikasikan dalam Spesifikasi ASTM untuk baut A325 dan A490 untuk UNC (penyatuan standulir sekrup *kasar* di bawah ANSI B1.1; *lihat* Manual LRFD [1.17], p. 5-172).

Semenjak awal tahun 1950-an, pratarik minimum yang disyaratkan sama dengbeban bukti untuk baut A325. Dengan menggunakan metode pemasangan pumur (akan di bahas kemudian dalam bagian ini), tidak dijumpai adanya kesulitdalam mendapatkan beban bukti untuk baut-baut ini dengan 1/2 putaran mur dposisi *snug* (= posisi pas) seperti **Gambar 4.4.3**. Meskipun demikian, dengan bA490, 1/2 putaran dari keadaan *snug* mungkin tidak akan mencapai beban bukDemikian pula untuk baut panjang, dibutuhkan lebih dari 1/2 putaran dari keadaasnug-nya supaya dapat mencapai tarik yang sama dengan tarik untuk baut pendeDengan demikian, AISC (LRFD-Tabel J3.1; ASD-Tabel J3.7) pada sambungakritik gelincir membutuhkan pratarik yang sama dengan 70% kekuatan tarik minimum, seperti diberikan dalam **Tabel 4.4.2**. Harga ini sama dengan beban bukuntuk baut A325 dan kurang lebih 85 sampai dengan 90% dari beban bukti untubaut A490.

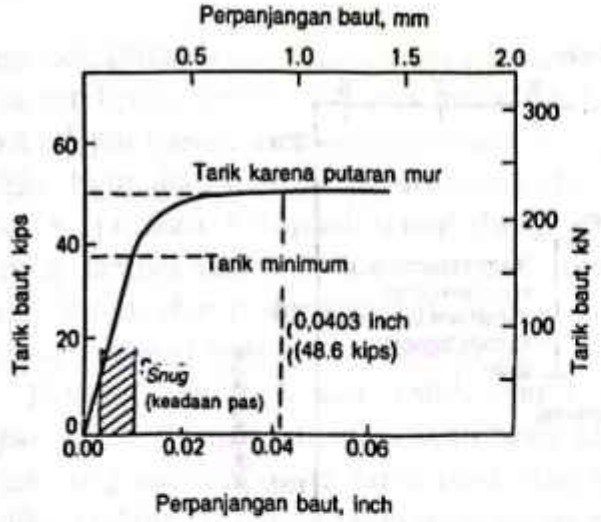
Besarnya pratarik yang diinginkan dan diperlukan telah menjadi pokok studpara peneliti [3.1].

4.5 Prosedur Pemasangan

4.5.1 Sambungan yang Tidak Membutuhkan Pratarik Penuh

Bila tidak dikehendaki sambungan yang tahan terhadap gelinciran [4.7 **Bagian 5**] dan bila baut tidak akan mendapatkan tarik langsung, baut tersebut cukup diketatkan sampai pada keadaan pas saja (*snug*). Ketetatan ini terjadi bila "semua lapisan pada suatu simpul bersinggungan dengan kuat", yang didefinisikan lebih lanjut sebagai hasil dari "beberapa dampak dari suatu puntiran kejut atau usaha penuh dari seseorang yang menggunakan puntiran obeng biasa" [4.7].

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 4.5.1 *Perpanjangan baut pada suatu simpul uji tipikal. (Dari Fisher, Ramseier, dan Beedle [4.11])*

4.5.2 Sambungan yang Membutuhkan Pratekan Penuh

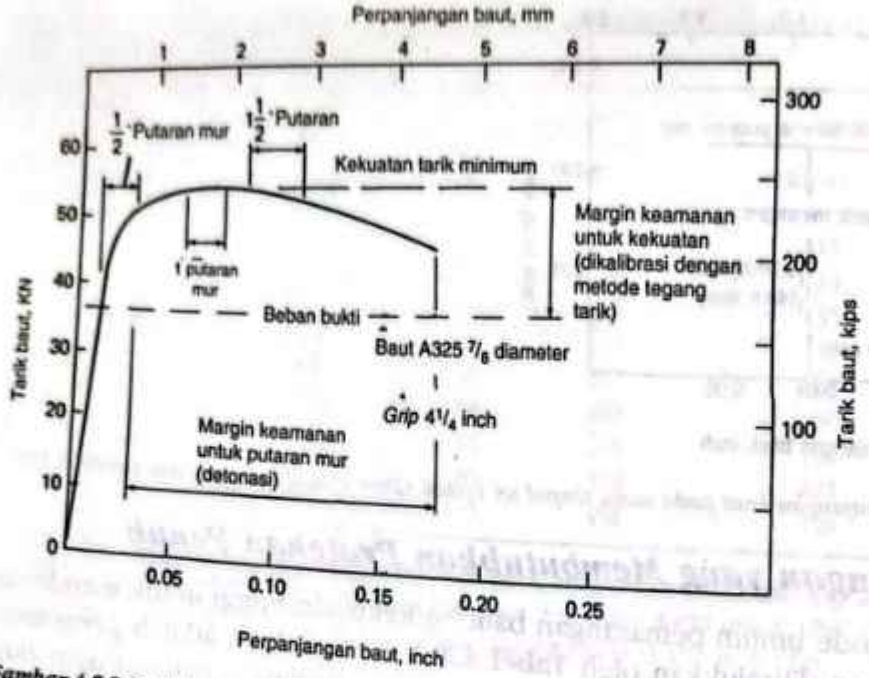
Ada empat metode umum pemasangan baut berkekuatan tinggi untuk mendapatkan pratarik yang ditunjukkan oleh **Tabel 4.4.2**. Keempatnya adalah *pengetatan dengan putaran mur, pengetatan putaran dengan kalibrasi, pemasangan baut desain pengganti,* dan *pengetatan dengan indikator tarik* [4.7].

Metode *putaran mur* merupakan yang paling sederhana. Semenjak dikembangkan pada tahun 1950-an dan 1960-an, metode ini telah mendapatkan spesifikasi pratarik dengan *rotasi spesifikasi* pada mur-nya dari kondisi "ketat pas", yang menyebabkan terjadinya regangan spesifikasi pada baut. Meskipun ke-pasan atau ketat awal dapat bervariasi menurut kondisi permukaan bagian-bagian yang akan diketatkan, variasi ini tidak secara nyata mempengaruhi gaya cengkeram, seperti yang terlihat dalam **Gambar 4.5.1**. Gaya cengkeram sebesar 48.6 kips (220 kN) yang berkaitan dengan $\frac{1}{2}$ putaran mur terjadi pada perpanjangan baut yang cukup besar (yakni sepanjang bagian horisontal dari kurva tersebut) sedemikian rupa sehingga suatu variasi pada keketatan pas awal mempunyai efek yang nyata pada gaya cengkeramnya.

Pengetatan putaran dengan kalibrasi menggunakan putaran puntir manual dan putaran bertenaga yang disetel pada suatu puntiran tertentu. Variasi-variasi dalam tarik baut telah ditemukan [3.1, p.52] berkisar 30% dengan variasi rata-rata sebesar ± 10%. Maka dari itu Spesifikasi RCSC [4.7] menyatakan bahwa putaran yang dikalibrasi disetel untuk menghasilkan tarik baut paling tidak sebesar 5% lebihnya dari yang dispesifikasikan dalam **Tabel 4.4.2**. Lebih jauh lagi, putaran berkalibrasi harus dikalibrasi *setiap hari* dan harus digunakan sebuah ring baut di bawah elemen yang akan diketatkan (kepala atau mur).

Kita mungkin bertanya-tanya apakah akan ada bahaya bila kekuatan cadangan tidak mencukupi pada kejadian di mana pratarik melampaui beban bukti; yakni bila mendekati 90% kekuatan tarik. **Gambar 4.5.2** memperlihatkan efek dari berbagai putaran mur dengan margin keamanan yang ditunjukkan. Bila digunakan metode putaran berkalibrasi, *kekuatan* merupakan faktor yang kritik dengan margin keamanan tipikal yang diperlihatkan dalam **Gambar 4.5.2**. Kemungkinan

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 4.5.2 Perilaku baut A325 (Diadaptasi dari Rump dan Fisbc [4.12])

Tabel 4.5.1 Rotasi Mur* dari kondisi *Snug* ketat (dari **acuan 4.8**)

	Disposisi muka luar bagian yang di baut	
Panjang baut (dari sisi bawah kepala sampai ujung baut)	Kedua muka normal terhadap sumbu baut	Satu muka normal terhadap sumbu baut dan muka lain dimiringkan tidak lebih dari 1:20 (tidak menggunakan *beleved washer*)	Kedua muka dimiringkan tidak lebih dari 1:20 dari sumbu normal ke sumbu baut (tidak menggunakan *beleved washer*)
Sampai dan 4 diameter	1/3 putaran	1/2 putaran	2/3 putaran
Lebih dari 4 diameter tapi tidak melampaui 8 diameter	1/2 putaran	2/3 putaran	5/6 putaran
Lebih dari 8 diameter tapi tidak melampaui 12 diameter†	2/3 putaran	5/6 putaran	1 putaran

*Rotasi mur relatif terhadap mau apa pun elemennya (mur atau baut) yang diputar. Untuk baut yang dipasang dengan 1/2 putaran atau kurang, toleransinya harus plus dan minus 30°; untuk baut yang dipasang dengan 2/3 putaran atau lebih, toleransinya harus plus atau minus 45°.

†Belum ada riset yang dilakukan oleh Dewan tersebut untuk menentukan prosedur putaran mur untuk baut dengan panjang lebih dari 12 diameter. Maka dari itu, rotasi yang dibutuhkan harus ditentukan dengan tes aktual dalam alat pengukur tarik yang mensimulasi kondisi-kondisi baja yang dipasang dengan solid.

terjadinya kelebihan puntiran pada baut dengan putaran bertenaga tidak diang-gap sebagai suatu masalah karena pemberian puntiran yang berlebih sedemikian biasanya meretakkan baut dan segera diganti pada waktu pemasangan. Pada

Dipindai dengan CamScanner

metode putaran mur, *deformasi* merupakan faktor yang kritik dengan margin keamanan tipikal terlihat dalam **Gambar 4.5.2**. Untuk proses pemasangan mana pun, kita dapat mengharapkan minimum $2^1/_4$ putaran dari keadaan *snug* sampai retak. Bila digunakan metode putaran mur dan baut ditarik dengan pertambahan sebesar $^1/_8$ putaran, kerapkali dapat diperoleh sebanyak empat putaran dari keadaan *snug* sampai retak. Metode putaran mur merupakan yang paling murah, lebih terpercaya, dan pada umumnya lebih disukai ketimbang metode putaran berkalibrasi. Putaran mur yang diterima [4.7] diperlihatkan dalam **Tabel 4.5.1**.

Kategori umum ketiga untuk teknik pemasangan, *pemasangan baut desain pengganti*, menggunakan penyambung khusus yang dirancang untuk secara tidak langsung menunjukkan tarik baut atau secara otomatik memberikan tarik yang dikehendaki. Sudah ada ketentuan mengenai prosedur pengkualifikasian baut sedemikian [4.7]. Kadangkala, desain penggantinya berupa elemen bolak-balik (*twist-off element*) atau elemen tipe lelehan. Dalam hal sedemikian, pemasangan harus dimulai pada bagian yang paling *rigid* (kokoh) dari sambungan tersebut dan secara sistematis menuju bagian-bagian yang kurang kokoh.

Kategori keempat adalah *pengetatan dengan indikator tarik langsung*. Sekali lagi, telah ada spesifikasi mengenai prosedur untuk mengkualifikasikan alat-alat sedemikian ini [4.7]. Biasanya digunakan sebuah ring yang terdiri dari serangkaian benjolan pada salah satu mukanya. Ring tersebut disisipkan di antara kepala baut dan material yang dicengkeram dengan benjolan menghadap ke sisi bawah dari baut dan meninggalkan sedikit celah akibat benjolan-benjolan tersebut. Pada saat pengetatan baut, benjolan-benjolan tersebut teratakan dan celah makin dipersempit. Tarik baut ditentukan dengan mengukur celah yang tersisa, yang untuk baut dengan tarik tepat besarnya sekitar 0.015 inch (0.38 mm) atau kurang [4.13].

4.6 Kekuatan Nominal dari Penyambung Individual

Beban-beban ditransfer dari satu batang ke batang lainnya melalui sambungan di antara mereka. Dalam **Gambar 4.6.1** diperlihatkan sejumlah sambungan tipikal.

Alat yang paling sederhana untuk mentransfer beban dari satu potong baja ke potongan lainnya adalah dengan sebuah pen (sepotong baja silindris) yang disisipkan ke dalam lobang-lobang yang dibuat pada kedua potong baja tersebut seperti **Gambar 4.6.2**. Pasak yang terlihat pada pen akan mencegah pen yang bersangkutan terlepas keluar. Beban akan ditransfer dengan tumpuan tangkai pen terhadap sisi lobang. Dari diagram benda bebas (*free bodies diagram*) pada pen tersebut dapat diperhatikan bahwa transfer di antara pelat *A* dan *B* sebenarnya terjadi melalui gaya geser pada pen itu (sedikit perputaran pen karena momen yang tidak seimbang relatif dapat diabaikan). Gesekan antara pelat *A* dan *B* dapat diabaikan. Struktur-struktur baja awal, khususnya kerangka, disambung dengan pen.

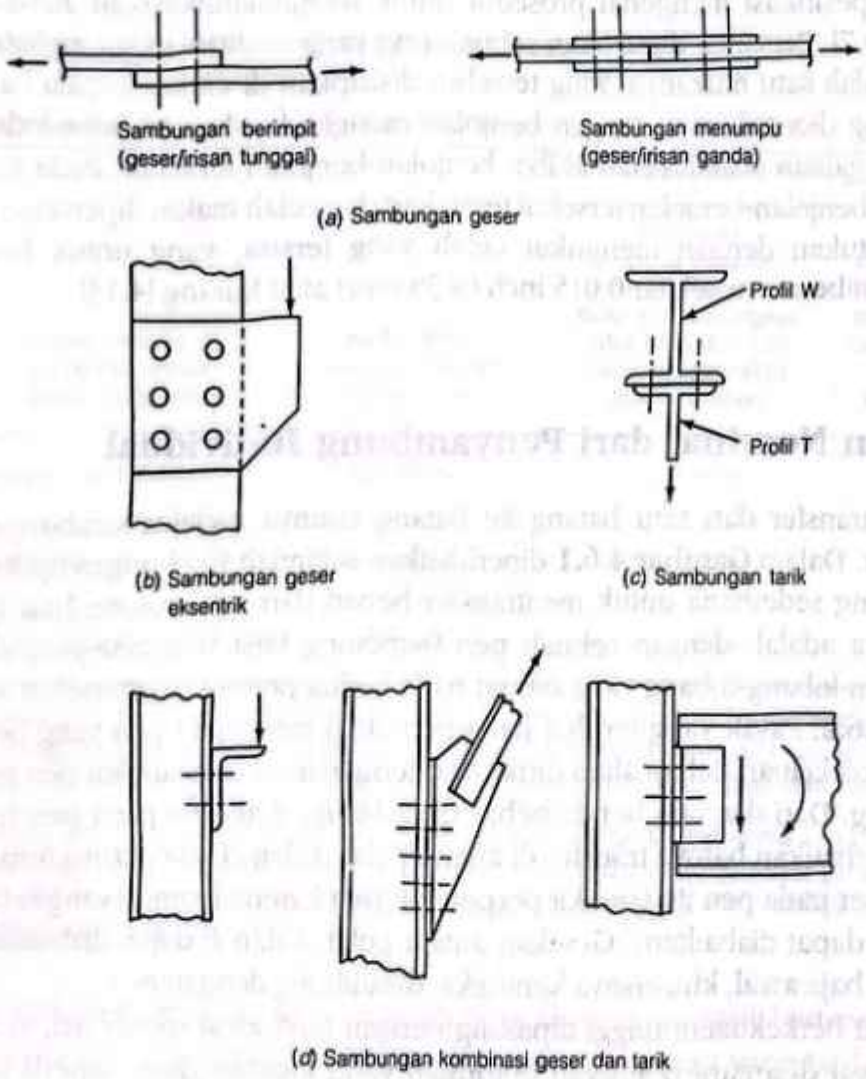
Bila suatu baut berkekuatan tinggi dipasang dengan tarik awal spesifikasi, akan ada pratekan awal di antara potongan-potongan yang digabungkan, seperti terlihat dalam **Gambar 4.6.3**. Kemudian akan terjadi transfer beban-beban tarik

Dipindai dengan CamScanner

pelat P seperti **Gambar 4.6.3** melalui gesekan, dan mungkin tidak ada tumpua tangkai baut terhadap sisi lobang. Sampai gaya gesek μT teratasi, kekuatan ges baut dan kekuatan tumpu pelat tidak akan mempengaruhi kemampuan mentransf beban dalam arah melintang bidang geser di antara pelat-pelat. Diagram bend bebas untuk transfer beban-beban pada suatu sambungan dengan baut berkekuata tinggi pratarik diperlihatkan dalam **Gambar 4.6.3**.

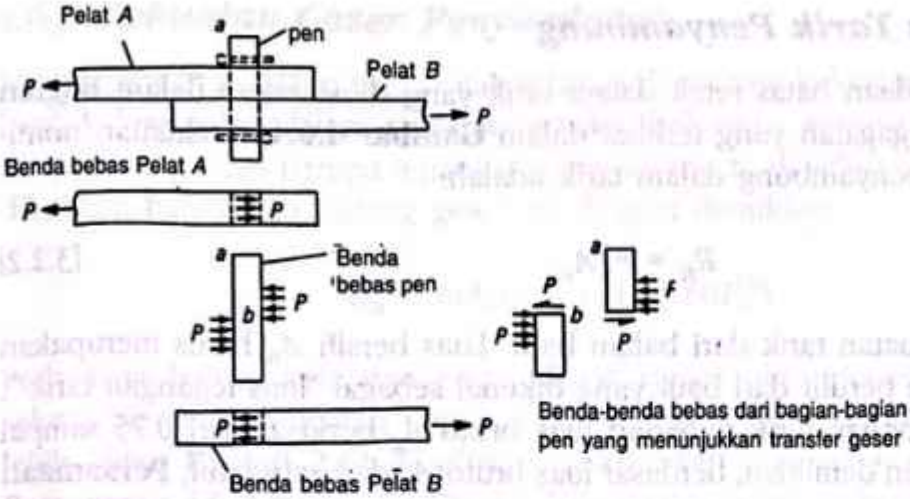
Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] mengenal dua kategori umum persyaratan keman puan untuk sambungan dengan baut berkekuatan tinggi, yang selama bertahu tahun dikenal sebagai *tipe tumpu* dan *tipe gesekan*. Spesifikasi LRFD [1.15] tahu 1986 dan Spesifikasi ASD [1.5] tahun 1989 telah memberi nama baru pada san bungan tipe gesekan sebagai sambungan *kritik gelincir*.

Kekuatan semua sambungan baut berkekuatan tinggi dalam mentransmisika gaya-gaya geser melintang terhadap bidang geser di antara elemen-elemen ba adalah sama baik bila sambungannya dari *tipe tumpu* atau *kritik gelincir*. La pula, sambungan kritik gelincir memiliki persyaratan layanan sehingga gelincira tidak boleh terjadi pada beban layanan.

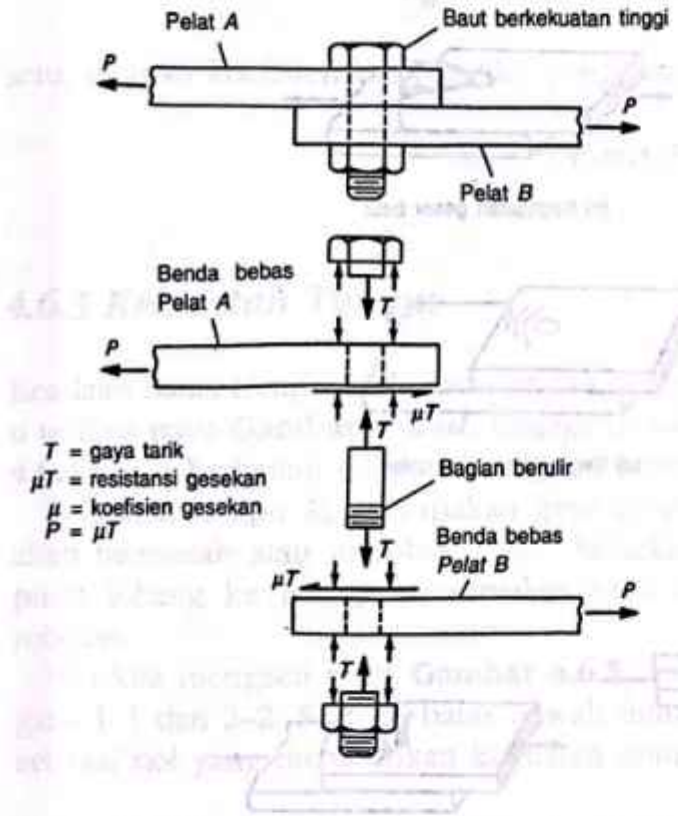


Gambar 4.6.1 *Sambungan-sambungan baut tipikal.*

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 4.6.2 Transfer beban pada sambungan dengan pen.



Gambar 4.6.3 Transfer beban pada sambungan baut berkekuatan tinggi yang dipratarik.

"Keadaan-keadaan batas" yang mungkin, atau bentuk-bentuk kegagalan, yang dapat mempengaruhi kekuatan sambungan dengan baut diperlihatkan dalam **Gambar 4.6.4**

Dipindai dengan CamScanner

4.6.1 Kekuatan Tarik Penyambung

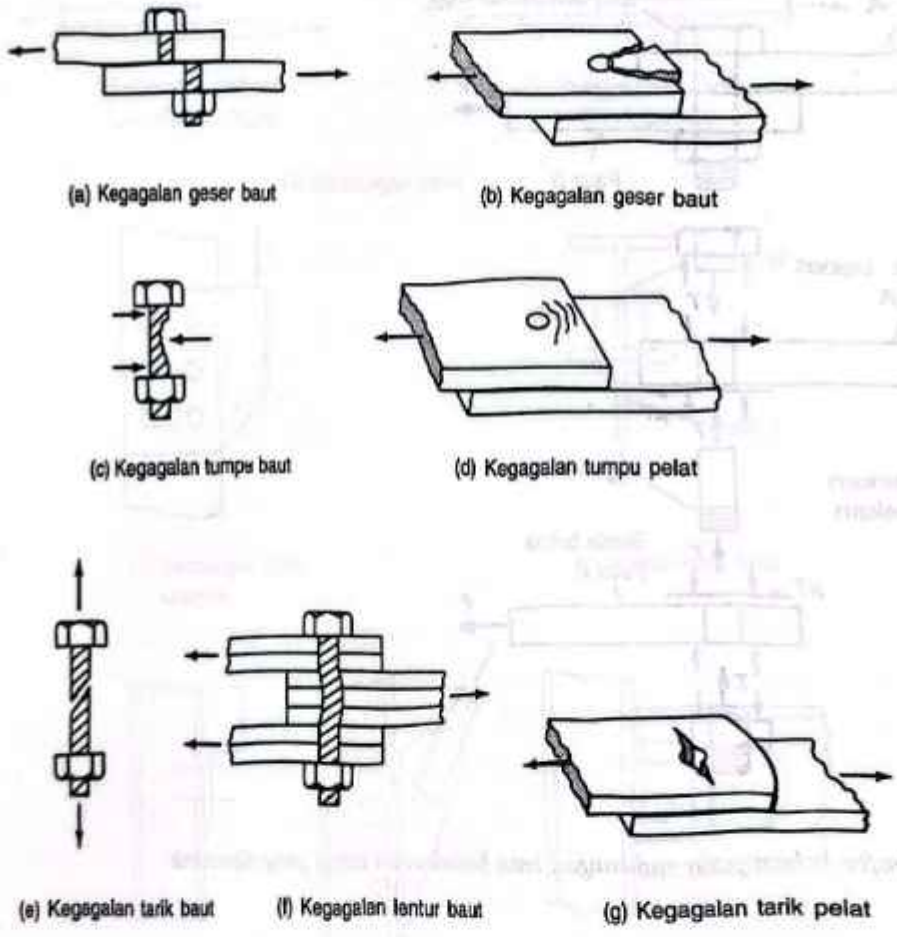
Sesuai dengan keadaan batas retak dalam tarik yang dibicarakan dalam **3.2** dan bentuk kegagalan yang terlihat dalam **Gambar 4.6.4e**, kekuatan nal R_n pada satu penyambung dalam tarik adalah:

$$R_n = F_u^b A_n$$

di mana F_u^b = kekuatan tarik dari bahan baut. Luas bersih A_n harus meru luas melalui bagian berulir dari baut yang dikenal sebagai "luas tegangan t Rasio dari luas tegangan tarik terhadap luas bruto A_g berkisar dari 0.75 s dengan 0.79. Dengan demikian, berdasar luas bruto A_b dari satu baut, **Persa 3.2.2** menjadi:

$$R_n = F_u^b(0.75A_b)$$

di mana F_u^b = kekuatan tarik bahan baut
A_b = luas penampang lintang bruto dari satu baut



Gambar 4.6.4 Bentuk-bentuk kegagalan yang mungkin timbul pada sambungan dengan baut

* *Lihat* catatan kaki pada bagian bawah **Tabel 4.1.1**.

Dipindai dengan CamScanner

4.6.2 Kekuatan Geser Penyambung

Sesuai dengan keadaan batas retak sebagai dasar bagi kekuatan penyambung dan bentuk kegagalan dalam **Gambar 4.6.4*a***, kekuatan nominal R_n untuk sebuah penyambung akan berupa tegangan geser ultimit τ_u di seluruh luas bruto A_b baut dikalikan banyaknya bidang geser m, dengan demikian:

$$R_n = mA_b\tau_u = mA_b(0.60F_u^b) \tag{4.6.2}$$

Perhatikan bahwa kekuatan geser ultimit secara eksperimental [4.7] ditemukan sekitar 62% dari kekuatan tarik ultimit; sekitar rasio yang sama untuk kekuatan leleh (*lihat* **Bagian 2.6**). Koefisien praktis 0.60 digunakan sebagai ganti 0.62. **Persamaan 4.6.2** mengasumsikan bahwa tidak ada ulir pada bidang-bidang geser. Bila ulir terdapat pada bidang-bidang geser, luas pada akar ulir harus digunakan pada tempat a_b. Karena luas pada akar ulir sedikit lebih kecil daripada luas tegangan tarik, luas akar diambil sebesar 0.70 dari luas bruto. Dengan demikian, **Persamaan 4.6.2** menjadi:

$$R_n = m(0.70A_b)(0.60F_u^b) \tag{4.6.3}$$

atau, dengan koefisien hasil sedikit penyesuaian:

$$R_n = 0.45mA_bF_u^b \tag{4.6.4}$$

4.6.3 Kekuatan Tumpu

Keadaan batas tumpu berkaitan dengan deformasi di sekitar lobang baut, seperti terlihat pada **Gambar 4.6.4*d***. Kegagalan sobekan geser seperti dalam **Gambar 4.6.4*b*** erat berkaitan dengan kegagalan tumpu.

Kekuatan tumpu R_n merupakan gaya yang bekerja terhadap sisi lobang yang akan memecah atau merobek pelat. Semakin besar jarak ujung L, diukur dari pusat lobang ke pinggiran, semakin kecil kemungkinan terjadinya kegagalan robekan.

Bila kita mengacu pada **Gambar 4.6.5**, robekan nyata akan terjadi sepanjang garis 1–1 dan 2–2. Sebagai batas bawah untuk kekuatan, sudut α dapat diambil sebagai nol yang memberikan kekuatan nominal R_n sebagai:

$$R_n = 2t\left[L - \frac{d}{2}\right]\tau_u^p \tag{4.6.5}$$

di mana τ_u^p = kekuatan geser dari bahan pelat $\approx 0.70\ F_u$
F_u = kekuatan tarik dari bahan pelat
d = diameter nominal baut

Dipindai dengan CamScanner

Dengan demikian,

$$R_n = 2t\left[L - \frac{d}{2}\right](0.70F_u)$$

$$R_n = 1.40F_u dt\left[\frac{L}{d} - \frac{1}{2}\right]$$

yang dapat didekati sebagai:

$$R_n = F_u dt\left[\frac{L}{d}\right] = LtF_u$$

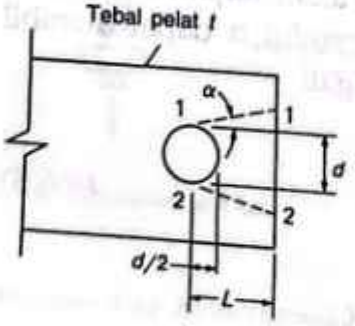
yang berlaku untuk baut yang paling dekat dengan pinggir pada desain bungan baut tunggal, atau dua atau lebih pada garis gaya, dengan jarak kurang dari $1.5d$.

Pengalaman dan tradisi telah menganjurkan bahwa penjarakan baut dari ke pusat minimum harus sebesar $2^2/_3$ diameternya [LRFD–J3.9; ASD–J3.8]. $L = 2.67d$ digunakan dalam **Persamaan 4.6.7**, kekuatan tumpu nominalnya jadi:

$$R_n = 3.0F_u dt$$

yang merupakan ungkapan dasar bila ingin menghindari robekan. Bila kekuatan tumpu yang diwakili oleh **Persamaan 4.6.9** tercapai dan tidak terjadi patah perpanjangan lobang mungkin akan berlebihan. Dengan demikian **Persamaan 4.6.9** hendaknya hanya digunakan bila deformasi di sekitar lobang *tidak* dihatikan.

Lebih baik bila digunakan kekuatan yang lebih rendah. Supaya lobang tidak mengalami perpanjangan lebih dari 0.25 inch, LRFD–J3.6 menspesifikasi kekuatan-kekuatan yang tereduksi. Dengan demikian, untuk *situasi-situasi* di mana jarak ujung L tidak kurang dari $1.5d$ dan jarak dari pusat ke pusat kurang dari $3d$, persamaan-persamaan berikut ini perlu digunakan untuk kekuatan tumpu nominal.



$f_p = \frac{P}{dt}$
= tegangan tumpu

F_u = tegangan tarik bahan pelat

Gambar 4.6.5 Kekuatan tumpu berkaitan dengan jarak ujung.

Dipindai dengan CamScanner

Pada lobang standar dan bercelah pendek (*lihat* LRFD–Tabel J3.5; ASD–Tabel J3.1):

$$R_n = 2.4F_u dt \tag{4.6.10}$$

Pada lobang bercelah panjang yang tegak lurus terhadap beban (*lihat* LRFD–Tabel J3.5; ASD–Tabel J3.1):

$$R_n = 2.0F_u dt \tag{4.6.11}$$

Dengan demikian, kekuatan nominal R_n yang diterapkan pada *satu penyambung* adalah nilai bawah dari kekuatan geser pada tangkai baut atau kekuatan tumpu terhadap sisi lobang. Bila kekuatan tumpu menentukan, pertambahan kekuatan dapat diperoleh dengan (1) menambah ketebalan elemen-elemen yang disambungkan, atau (2) menambah jarak ujung atau penjarakan dari pusat ke pusat.

4.7 Load and Resistance Factor Design—Penyambung

Filosofi umum dari *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) dibahas dalam **Bagian 1.8** dan **1.9**. **Persamaan 1.8.1** memberikan persyaratan keamanan sebagai berikut:

$$\phi R_n \geq \Sigma \gamma_i Q_i \tag{1.8.1}$$

di mana ϕ = faktor resistansi (faktor reduksi kekuatan)
R_n = resistansi nominal (kekuatan)
γ_i = faktor-faktor kelebihan beban (LRFD–A4.1)
Q_i = beban-beban (seperti beban mati, beban hidup, beban angin, beban gempa) atau efek-efek beban (seperti momen lentur, geser, gaya aksial, dan momen puntir sebagai akibat dari berbagai beban)

Persamaan 1.8.1 menyaratkan bahwa kekuatan desain ϕR_n sama atau melebihi jumlah *beban-beban terfaktor*, atau secara khusus untuk penyambung, **Persamaan 1.8.1** menjadi:

$$\phi R_n \geq P_u \tag{4.7.1}$$

di mana ϕ = faktor resistansi (untuk konektor, harga ini berkaitan dengan tipe kejadian, seperti 0.75 untuk retakan dalam tarik, 0.65 untuk geser pada baut berkekuatan tinggi, dan 0.75 untuk tumpu baut terhadap sisi lobang)
R_n = kekuatan nominal satu penyambung
P_u = beban terfaktor pada satu penyambung

Dipindai dengan CamScanner

Karena pembebanan tidak berkaitan dengan tipe batang, seperti batang tarik atau kolom, berbagai kombinasi faktor beban yang diberikan dalam LRFD–A4.1 adalah sama untuk semua batang pada struktur tersebut. Meskipun demikian, faktor resistansi ϕ memperhitungkan kemungkinan bahwa kekuatan aktual dari penyambung (atau batang) dapat lebih kecil daripada kekuatan yang dihitung secara teoretis dikarenakan oleh berbagai variasi pada sifat-sifat bahan dan toleransi dimensi. Variasi-variasi ini, bila secara individual berada dalam batas-batas toleransi yang dapat diterima, dapat berkombinasi dalam struktur yang sebenarnya, sehingga dapat memberikan kekuatan yang lebih kecil daripada harga hitungan. Baik faktor ϕ atau pun faktor-faktor kelebihan beban γ tidak dimaksudkan untuk memperhitungkan kesalahan-kesalahan karena kecerobohan dalam desain atau konstruksinya.

Kekuatan suatu penyambung dapat didasarkan atas (1) geser, (2) tumpu, (3) tarik, atau (4) kombinasi dari geser dan tarik. Kekuatan-kekuatan nominal dalam tarik, geser, dan tumpu diberikan dalam **Bagian 4.6.**

4.7.1 Kekuatan Geser Desain – Tanpa Ulir pada Bidang Geser

Kekuatan desain ϕR_n, *berdasarkan kekuatan geser penyambung*, menurut LRFD J3.3 adalah:

$$\phi R_n = \phi\ (0.60F_u^b)mA_b = 0.65(0.60F_u^b)mA_b \qquad (4.7.$$

di mana ϕ = 0.65, suatu harga yang dipilih untuk mengkalibrasi LRFD [1.1 agar sesuai dengan pengalaman dan penggunaan dalam ASD [1.

F_u^b = kekuatan tarik bahan baut (120 ksi untuk baut A325, 150 k untuk baut A490)

m = banyaknya bidang geser yang terlibat [biasanya satu (*geser/irisa tunggal*) atau dua (*geser/irisan ganda*) seperti dalam **Gamba 4.6.1*a***]

A_b = luas penampang lintang pada arah melintang tangkai tak berul dari baut tersebut

4.7.2 Kekuatan Geser Desain – Ada Ulir pada Bidang Geser

Kekuatan desain ϕR_n bila terdapat ulir pada bidang geser didasarkan pad **Persamaan 4.6.4** yang memberikan:

$$\phi R_n = \phi(0.45F_u^b)mA_b = 0.65(0.45F_u^b)mA_b \qquad (4.7.$$

4.7.3 Kekuatan Tarik Desain

Kekuatan desain ϕR_n *berdasarkan kekuatan tarik penyambung* menurut LRFD J3.3 dan yang dikembangkan seperti **Persamaan 4.6.1** adalah:

Dipindai dengan CamScanner

$$\phi R_n = \phi F_u^b(0.75A_b) = 0.75F_u^b(0.75A_b) \quad (4.7.4)$$

atau:

$$\phi R_n = 0.75(0.75F_u^b)A_b \quad (4.7.5)$$

di mana ϕ = 0.75, suatu harga untuk bentuk kegagalan tarik seperti yang dibicarakan dalam **Bab 3**

F_u^b = kekuatan tarik bahan baut (120 ksi untuk baut A325, 150 ksi untuk baut A490)

A_b = luas penampang lintang bruto yang melintang pada bagian tangkai baut yang tak berulir

Perhatikan bahwa harga $0.75A_b$ mewakili luas pada bagian berulir dari baut tersebut. LRFD-Tabel J3.2 menunjukkan bahwa *Kekuatan Tarik*-nya sebesar 90 ksi; yakni $0.75F_b^u$. Seperti terlihat dari **Persamaan 4.7.4**, perkalian luas bruto A_b dengan $0.75F_u^b$ memberikan harga yang tepat untuk R_n. Dengan menggunakan tegangan yang tereduksi pada luas bruto, akan didapatkan hasil yang sama dengan penggunaan tegangan yang tepat pada luas tereduksi.

Kekuatan-kekuatan desain untuk tarik dan geser pada baut A325 dan A490 dirangkumkan dalam **Tabel 4.7.1**.

Tabel 4.7.1 Kekuatan desain* dari baut berkekuatan tinggi A325 dan A490

Penyambung	F_u^b (ksi)	Kekuatan Tarik (ksi)	Kekuatan Geser (ksi) $\phi = 0.65$
Baut A325, bila ulir *tidak* terpisah dari bidang geser	120	$\phi(0.75F_u^b)$ 0.75(90.9) = 67.5	$\phi(0.45F_u^b)$ 0.65(54.0) = 35.1
Baut A325, bila ulir *terpisah* dari bidang geser	120	$\phi(0.75F_u^b)$ 0.75(90.0) = 67.5	$\phi(0.60F_u^b)$ 0.65(72.0) = 46.8
Baut A490, bila ulir *tidak* terpisah dari bidang geser	150	$\phi(0.75F_u^b)$ 0.75(112.5) = 84.4	$\phi(0.45F_u^b)$ 0.65(67.5) = 43.9
Baut A490, bila ulir *terpisah* dari bidang geser	150	$\phi(0.75F_u^b)$ 0.75(112.5) = 8.44	$\phi(0.60F_u^b)$ 0.65(90.0) = 58.5

* Kekuatan desain ϕR_n sama dengan tegangan dalam tabel dikalikan dengan luas penampang lintang bruto A_b

4.7.4 Kekuatan Tumpu Desain

Kekuatan desain ϕR_n *berdasarkan kekuatan tumpu pada lobang baut* menurut

Dipindai dengan CamScanner

LRFD-J3.6 dan yang dikembangkan dalam **Bagian 4.6** dibeberkan dalam beb
rapa kategori:

1. Untuk *kondisi biasa* (lobang standar atau lobang beralur pendek, jarak uju
tidak kurang dari $1.5d$, dengan jarak baut dari pusat ke pusat tidak kura
dari $3d$, dengan dua baut atau lebih pada garis gaya), berlaku **Persama
4.6.10** [LRFD–Persamaan(J3–1a)]:

$$\phi R_n = \phi(2.4dtF_u) \qquad (4.7$$

di mana $\phi = 0.75$
d = diameter nominal baut (bukan pada bagian ulir)
t = ketebalan bagian yang disambung (misalnya pelat)
F_u = kekuatan tarik baja yang membentuk *bagian yang disambungk*
(F_u = 58 ksi untuk baja A36)

2. Untuk lobang beralur pendek yang tegak lurus terhadap arah transmisi beba
jarak ujung tidak kurang dari $1.5d$, jarak baut dari pusat ke pusat tidak kura
dari $3d$, dengan dua baut atau lebih pada garis gaya, berlaku **Persama
4.6.11** [LRFD–Persamaan (J3–1b)]:

$$\phi R_n = \phi(2.0dtF_u) \qquad (4.7$$

di mana $\phi = 0.75$

3. Untuk *baut yang paling berdekatan dengan pinggir* di mana kondisi-kond
Persamaan 4.7.6 dan **4.7.7** tidak terpenuhi, berlaku **Persamaan 4.6**
[LRFD–Persamaan(J3–1c)]:

$$\phi R_n = \phi(LtF_u) \qquad (4.7$$

di mana $\phi = 0.75$
L = jarak ujung pada garis gaya, dari pusat suatu lobang standar ata
lobang berukuran lebih, atau dari pertengahan lebar lobang be
alur pendek, sampai pinggiran bagian yang disambung

4. Bila perpanjangan lobang lebih besar dari 0.25 dan "ovalisasi" lobang dapa
ditoleransi, **Persamaan 4.6.9** [LRFD-Persamaan(J3–1d)] dapat digunakan:

$$\phi R_n = \phi(3.0dtF_u) \qquad (4.7.9$$

di mana $\phi = 0.75$

4.7.5 Jarak Minimum Baut pada Garis Transmisi Gaya

Bila **Persamaan 4.7.6** atau **4.7.7**, jarak antar baut yang biasa menurut arah

Dipindai dengan CamScanner

transmisi gaya paling tidak harus sebesar 3 diameter. Dalam semua kondisi lain, yang berlaku adalah **Persamaan 4.6.8**. Penyelesaian **Persamaan 4.6.8** untuk jarak minimum L dari pusat penyambung sampai ke pinggir lobang berdekatan:

$$L \geq \frac{R_n}{F_u t} \tag{4.7.10}$$

dan kemudian penambahan radius $d_b/2$ lobang baut ke **Persamaan 4.7.10** akan memberikan jarak minimum dari pusat ke pusat:

$$\text{Jarak antar baut} \geq \frac{R_n}{F_u t} + \frac{d_b}{2} \tag{4.7.11}$$

Karena R_n dalam **Persamaan 4.7.11** merupakan kekuatan nominal yang *disyaratkan*, yang sama dengan beban terfaktor P yang bekerja pada satu baut dibagi dengan faktor resistansi ϕ, **Persamaan 4.7.11** (LRFD–J3.9) menjadi:

$$\text{Jarak antar baut} \geq \frac{P}{\phi F_u t} + \frac{d_b}{2} \tag{4.7.12}$$

di mana ϕ = 0.75
P = beban terfaktor yang bekerja pada satu baut
F_u = kekuatan tarik dari bahan *pelat*
t = ketebalan pelat
d_b = diameter lobang baut

Jarak minimum baut dalam satu garis *lebih disukai* [LRFD–J3.9] sebesar 3 diameter baut dan tidak boleh kurang dari $2\frac{2}{3}$ diameter baut.

4.7.6 *Jarak Ujung Minimum pada Arah Transmisi Gaya*

Persamaan 4.7.10 memberikan persyaratan untuk jarak ujung pada arah gaya pada baut sedemikian rupa sehingga tidak terjadi patahan. Bila kekuatan yang biasa diterima yang diberikan oleh **Persamaan 4.7.6** dan **4.7.7** digunakan, jarak ujung minimum paling tidak harus $1\frac{1}{2}$ diameter. Bila digunakan kekuatan tumpu yang lebih tinggi, **Persamaan 4.7.10** memberikan jarak ujung minimum sebagai berikut:

$$L \geq \frac{R_n}{F_u t} \tag{4.7.10}$$

bila kekuatan nominal *yang disyaratkan* adalah beban terfaktor dibagi dengan faktor resistansi ϕ. Dengan demikian, menurut LRFD–J3.10:

Dipindai dengan CamScanner

$$L \geq \frac{P}{\phi F_u t} \qquad (4.7.1)$$

di mana ϕ = 0.75
P = beban terfaktor per baut
F_u = kekuatan tarik dari bahan pelat
t = ketebalan bahan pelat

Jarak ujung yang digunakan dalam kenyataan harus lebih besar daripada yan dihitung dari persyaratan kekuatan dan jarak minimum yang ditentukan ole **Tabel 4.7.2** [LRFD–Tabel J3.7].

Tabel 4.7.2 Jarak ujung minimum
(Dari pusat lobang standar* ke pinggir bagian yang disambungkan)
(Diadaptasi dari LRFD–Tabel J3.7; ASD-Tabel J3.5)

Diameter baut atau keling nominal geser		Jarak pinggir minimum			
		Pada pinggir yang terkena yang ditempa,		Pada pinggir pelat, profil, atau batang atau pinggir yang dipotong dengan gas†	
(inch)	(mm)	(inch)	(mm)	(inch)	(mm)
1/2	12.7	7/8	22.2	3/4	19.1
5/8	15.9	1 1/8	28.6	7/8	22.2
3/4	19.1	1 1/4	31.8	1	25.4
7/8	22.2	1 1/2‴	38.1	1 1/8	28.6
1	25.4	1 3/4‴	44.4	1 1/4	31.8
1 1/8	28.6	2	50.8	1 1/2	38.1
1 1/4	31.8	2 1/4	57.2	1 5/8	41.3
Over 1 1/4	Over 31.8	1 3/4 × diameter		1 1/4 × diameter	

‴ Bila digunakan lobang ukuran berlebih atau lobang beralur, *lihat* LRFD–J3.10; ASD–J3.9
* Boleh jadi ini sejauh 1 1/4 pada ujung siku sambungan balok.
† Semua jarak pinggir pada kolom ini dapat direduksi 1/8 inch (3,2 mm) bila lobangnya ber pada suatu titik di mana tegangannya tidak melebihi 25% kekuatan desain maksimum pada men tersebut.

4.7.7 Jarak Pinggir Maksimum

Jarak maksimum dari pusat baut ke pinggir terdekat adalah 12*t*, di mana *t* me pakan ketebalan bagian yang disambungkan, dan tidak boleh melebihi 6 in Maksudnya adalah untuk menjamin bahwa bagian-bagian yang bersangkutan tid akan terpisah terlalu jauh yang akan mengakibatkan korosi karena masukn embun. Hal ini mengasumsikan bahwa bagian-bagian tersebut sudah dicat. Unt yang tidak dicat, barangkali dibutuhkan persyaratan-persyaratan tambahan.

Dipindai dengan CamScanner

Dalam **Tabel 4.7.3** dapat dijumpai daftar bagian-bagian Spesifikasi [1.15] yang digunakan dalam *Load and Resistance Design* dari penyambung.

Tabel 4.7.3 Penyambung – Acuan Spesifikasi AISC

Topik	Bagian Spesifikasi	
	LRFD[1.15]	ASD[1.5]
Umum	J1	J1
Kekuatan sambungan minimum	J1.5	J1.6
Baut, bagian berulir, keling	J3	J3
Kekuatan tarik dan geser	J3.3	J3.4
Pencongkelan	J3.3	J3.4
Kombinasi tarik dan geser	J3	J3.5, J3.6
Sambungan tipe tumpu	J3.4	J3.5
Sambungan kritik gelincir	J3.5	J3.6
Lobang, dimensi	J3.7	J3.2
Jarak antar lobang	J3.9	J3.8
Jarak ujung	J3.10	J3.9

4.8 Contoh-contoh — Sambungan Tipe Tumpu Batang Tarik — LRFD

Contoh-contoh berikut ini melukiskan penerapan metode *Load and Resistance Design* AISC pada sambungan batang-batang tarik. Prinsip-prinsip yang berkaitan dengan kekuatan batang dibicarakan dalam **Bagian 3.9** sedangkan yang berkaitan dengan penyambung dalam **Bagian 4.7**.

▪ Contoh 4.8.1

Hitunglah kapasitas beban layanan tarik untuk sambungan tipe tumpu dalam **Gambar 4.8.1** bila (*a*) ulir baut terpisah dari bidang geser dan (*b*) bila ulir baut tidak terpisah dari bidang geser. Gunakan Spesifikasi LRFD AISC dengan baut A325 diameter $\frac{7}{8}$ inch dalam lobang standar dan pelat baja A572 Mutu 50,

Penyelesaian:

(*a*) Ulir terpisah dari bidang geser. Pertama-tama hitunglah kekuatan pelat berdasar batang tarik (**Bab 3**):

$$A_g = 6(0.625) = 3.75 \text{ inch}^2$$

$$A_n = \left[6 - 2\left(\frac{7}{8} + \frac{1}{8}\right)\right]0.625 = 2.50 \text{ inch}^2$$

$$A_e = A_n = 2.50 \text{ inch}^2$$

Dipindai dengan CamScanner

Kemudian dengan menggunakan **Persamaan 3.9.2** dan **3.9.3** akan diperoleh:

$$\phi T_n = \phi F_y A_g = 0.90(50)(3.75) = 169 \text{ kips}$$
$$\phi T_n = \phi F_u A_e = 0.75(65)(2.50) = 122 \text{ kips (kontrol)}$$

Kerja keseluruhan sambungan merupakan transfer beban geser di antara kedua pelat. Bidang kontak dapat dianggap sebagai bidang geser. Bila ada suatu bidang kontak tunggal yang terlibat dalam transfer beban, sebutannya adalah "geser/iris tunggal".

Kekuatan desain baut dalam geser dan tumpu harus dihitung dengan **Persamaan 4.7.2** dan **4.7.6**. Kekuatan desain ϕR_n per baut dalam geser tunggal untuk A325X* adalah:

$$\phi R_n = \phi(0.60F_u b)mA_b \qquad [4.7$$
$$= 0.65(0.60)(120)(1)(0.6013) = 28.1 \text{ kips/baut}$$

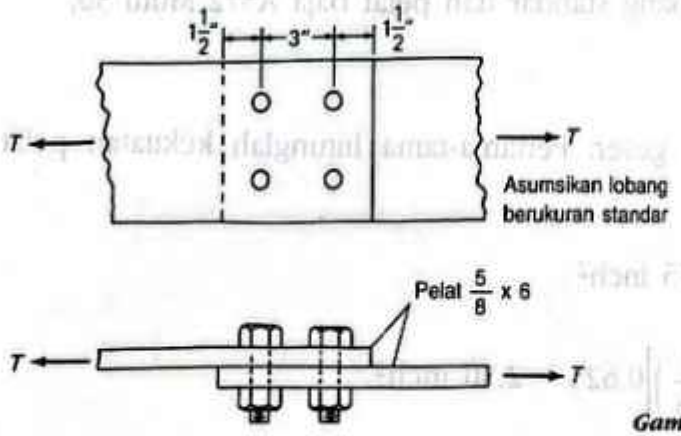
Kekuatan desain pada tumpu untuk situasi-situasi biasa yakni jarak ujung 1$\frac{1}{2}$" dan jarak antar baut $3d$ adalah:

$$\phi R_n = \phi(2.4F_u dt)$$
$$= 0.75(2.4)(65)(0.875)(0.625) = 64 \text{ kips/baut}$$

Perhatikan bahwa untuk kekuatan tumpu, F_u merupakan kekuatan tarik dari bahan pelat; 65 ksi untuk A572 Mutu 50. Dengan demikian, geser yang berpengaruh dan kekuatan desain per penyambung adalah 28.1 kips. Kekuatan desain total berdasarkan penyambung menjadi:

$$\phi T_n = (\text{nomor sambungan})\ R_n = 4(28.1) = 112 \text{ kips}$$

Karena kekuatan desain geser tunggal ($\phi R_n = 112$ kips) lebih rendah dari kekuatan desain pelat sebagai batang tarik ($\phi T_n = 122$ kips), diambil:



Gambar 4.8.1 Contoh 4.8.1

* Penamaan standar untuk baut A325 pada sambungan tipe tumpu dengan ulir terpisah (eXcluded) dari bidang geser

Dipindai dengan CamScanner

$$\phi T_n = 112 \text{ kips (untuk A325-X)}$$

Jarak ujung L dari pusat suatu lobang standar ke ujung pelat tidak boleh kurang dari (LRFD-J3.10):

$$L \geq \left[\frac{P}{\phi F_u t} = \frac{28.1}{0.75(65)0.625} = 0.92 = \text{inch} \right]$$

Pada persamaan di atas, beban terfaktor P pada baut diasumsikan sebagai nilai maksimum yang diijinkan berdasarkan geser tunggal. Harga sebesar 1.5 inch yang diberikan melampaui harga minimum yang disyaratkan sebesar 0.92 inch dari hasil perhitungan dan juga memenuhi harga minimum untuk pinggiran dengan geser pada **Tabel 4.7.2**.

Kekuatan geser patahan, yang dikenal sebagai *geser blok*, tidak dicek di sini (*lihat* **Bagian 3.6**; bila digunakan ketebalan sebesar $^5/_8$ inch, kekuatan ini cenderung tidak berpengaruh.

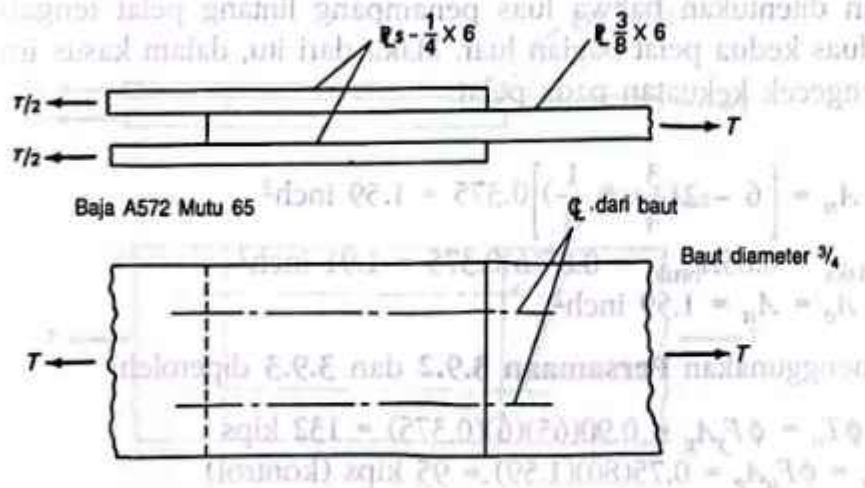
Untuk mengkaitkan kekuatan desain dengan beban layanan, **Persamaan 3.9.1** harus digunakan:

$$\phi T_n \geq T_u \qquad [3.9.1]$$

Dengan memasang beban layanan terfaktor T_u sama dengan kekuatan desain, ϕT_n akan memberikan beban layanan maksimum yang dapat diterima. Dengan menggunakan kombinasi beban terfaktor dari beban hidup dan beban mati gaya berat, **Persamaan 1.8.3** [LRFD-Persamaan(A4-2)]:

$$T_u = 1.2D + 1.6L \qquad [1.8.3]$$

Dengan substitusi ke dalam **Persamaan 1.8.3**, beban hidup L yang sama dengan tiga kali beban mati D, dan kemudian penggunaan ϕT_n sebagai 112 kips dalam **Persamaan 3.9.1** akan dihasilkan:



Gambar 4.8.2 Contoh 4.8.2

Dipindai dengan CamScanner

$$\phi T_n = T_u$$
$$112 = 1.2D + 1.6(3D) = 6.0D$$
$$D = 18.7 \text{ kips}$$
$$L = 3D = 56.1 \text{ kips}$$

Dengan demikian, beban layanan total maksimum T yang diijinkan adalah:

$$T = D + L = 18.7 + 56.1 = 74.8 \text{ kips (untuk A325-X)}$$

(*b*) Ulir tidak terpisah dalam bidang geser. Kekuatan desain penyambung p geser tunggal lebih kecil dari yang terhitung dalam (*a*). Kekuatan desain ϕR_n baut pada geser tunggal untuk A325-N* adalah:

$$\phi R_n = \phi(0.45F_u^b)mA_b \qquad [4.$$
$$= 0.65(0.45)(120)(1)(0.6013) = 21.1 \text{ kips/baut}$$

Kekuatan dalam geser tunggal berpengaruh lagi karena tidak ada perubahan da kekuatan batang tarik penampang bersih atau pada kekuatan tumpu. Kar ϕR_n-nya sebesar 0.75 dari yang ada dalam bagian (*a*), kapasitas beban laya T adalah:

$$T = 0.75(74.8) = 56.1 \text{ kips (untuk A325-N)}$$

■ Contoh 4.8.2

Tentukan banyaknya baut A325 berdiameter ¾ inch yang dibutuhkan untuk me hasilkan kekuatan penuh pelat baja A572 Mutu 65 dalam **Gambar 4.8.2** (s bagian dari sambungan lapisan ganda) untuk sambungan tipe tumpu dengan terpisah dari bidang geser. Gunakan Spesifikasi LRFD AISC dan asumsikan di nakan dua baris baut dengan ukuran lobang standar.

Penyelesaian

Dengan penyelidikan ditentukan bahwa luas penampang lintang pelat ten kurang dari jumlah luas kedua pelat bagian luar. Maka dari itu, dalam kasus kita hanya perlu mengecek kekuatan pada pelat.

$$A_n = \left[6 - 2\left(\frac{3}{4} + \frac{1}{8}\right)\right]0.375 = 1.59 \text{ inch}^2$$
$$A_{n\text{Maks}} = 0.85A_{\text{bruto}} = 0.85(6)0.375 = 1.91 \text{ inch}^2$$
$$A_e = A_n = 1.59 \text{ inch}^2$$

Kemudian dengan menggunakan **Persamaan 3.9.2** dan **3.9.3** diperoleh:

$$\phi T_n = \phi F_y A_g = 0.90(65)(6)(0.375) = 132 \text{ kips}$$
$$\phi T_n = \phi F_u A_e = 0.75(80)(1.59) = 95 \text{ kips (kontrol)}$$

* Penamaan standar untuk baut A325 pada sambungan tipe tumpu dengan ulir tidak terpisah (iNcluded) dalam bidang geser.

Dipindai dengan CamScanner

Dengan demikian, kekuatan desain pelat dalam tarik adalah 95 kips.

Dalam hal ini, kerja keseluruhan sambungan dapat dianggap sebagai transfer geser di antara pelat-pelat yang terjadi pada dua bidang kontak. Bila konektor-konektor diletakkan sedemikian rupa sehingga melintangi dua bidang kontak geser, keadaan ini disebut sebagai "geser/irisan ganda". *Geser/irisan ganda* adalah peristiwa di mana ditinjau dari bidang geser dan arah transfer geser terjadi pembebanan secara simetrik, sedangkan pada geser tunggal pembebanannya tidak simetrik (**Gambar 4.8.1**).

Kekuatan desain dalam geser ganda (per baut) adalah:

$$\phi R_n = \phi(0.60F_u^b)mA_b = 0.65(0.60)(120)(2)(0.4418) = 41.4 \text{ kips/baut.}$$

Kekuatan desain dalam tumpuan pada pelat setebal $^3/_8$ inch adalah:

$$\phi R_n = \phi(2.4F_u dt) = 0.75(2.4)(80)(0.75)(0.375) = 40.5 \text{ kips/baut}$$

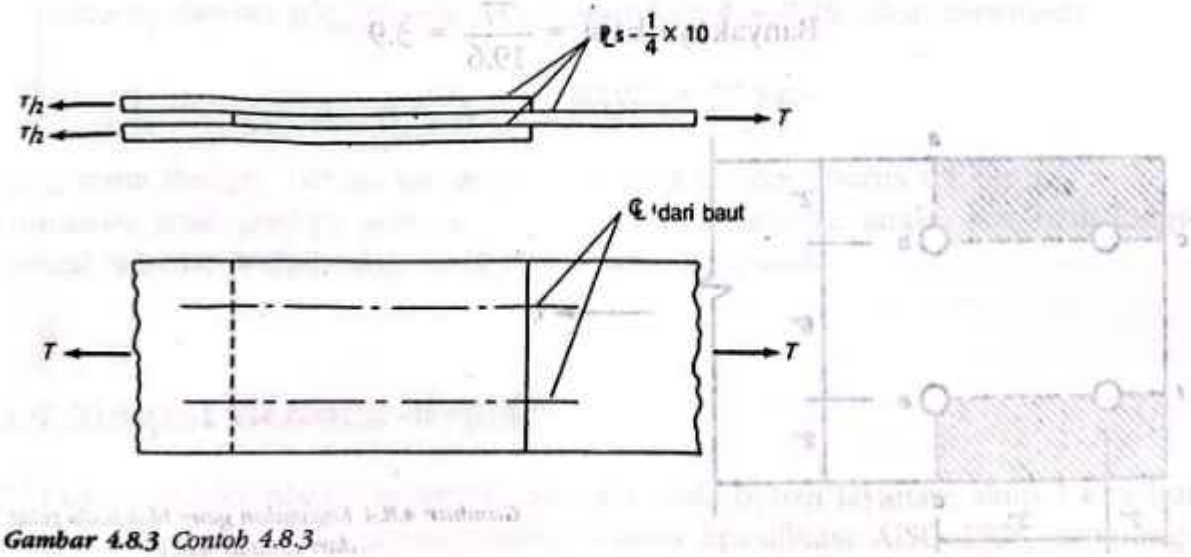
$$\text{Banyaknya baut} = \frac{95}{40.5} = 2.3$$

Gunakan 4 baut A325 (A325-X) diameter $^3/_4$ inch

Dengan menggunakan beban terfaktor P per penyambung sebesar 95/4 = 23.8 kips, jarak ujung L yang dibutuhkan menurut LRFD-K3.10 adalah:

$$L \geq \left[\frac{P}{\phi F_u t} = \frac{23.8}{0.75(80)0.375} = 1.06 \text{ inch} \right]$$

Karena harga 1.06 hasil hitungan kurang dari harga minimum dari **Tabel 4.7.2** [lrfd-Tabel J3.7], jarak ujung paling tidak harus berharga 1.25 inch dari **Tabel 4.7.2**. Keadaan batas patahan geser (geser blok) harus dicek juga. Meskipun demikian, karena tumpuan bukan yang menentukan, bentuk patahan geser tampaknya yang akan menentukan.



Gambar 4.8.3 Contoh 4.8.3

Dipindai dengan CamScanner

■ **Contoh 4.8.3**

Tentukan banyaknya baut A325 berdiameter $^3/_4$ inch dalam lobang standar ya diharapkan akan menanggung beban mati sebesar 7 kips dan beban hidup se sar 43 kips pada pelat seperti **Gambar 4.8.3** bila digunakan baja A36. Asumsil bahwa digunakan sambungan tipe tumpu dengan lapisan ganda dan ulir y terpisah dari bidang geser dan dua barisan baut. Gunakan *Load and Resista Factor Design.*

Penyelesaian:

Dalam contoh ini, pelat tengah akan mempengaruhi kekuatan tarik:

$$A_g = 10(0.25) = 2.50 \text{ inch}^2$$

$$A_n = \left[10 - 2\left(\frac{3}{4} + \frac{1}{8}\right)\right]0.25 = 2.06 \text{ inch}^2$$

$$A_{n\text{maks}} = 0.85A_g = 0.85(2.50) = 2.13 \text{ inch}^2$$

$$\therefore A_e = A_n = 2.06 \text{ inch}^2$$

$$\phi T_n = \phi F_y A_g = 0.90(36)(2.50) = 81 \text{ kips (kontrol)}$$

$$\phi T_n = \phi F_u A_e = 0.75(58)(2.06) = 90 \text{ kips}$$

Beban terfaktor T_u yang harus ditanggung adalah:

$$T_u = 1.2D + 1.6L = 1.2(7) + 1.6(43) = 77 \text{ kips}$$

dan ini tidak melampaui kekuatan batang-batangnya (yakni $\phi T_n > T_u$).

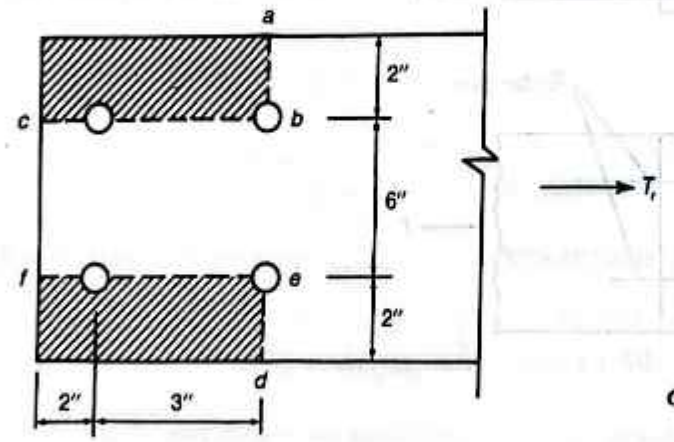
Untuk geser, dengan menggunakan baut A325-X:

$$\phi R_n = \phi(0.60F_u^b)mA_b = 0.65(0.60)(120)(2)(0.4418) = 41.4 \text{ kips/baut.}$$

Kekuatan desain dalam tumpu pada pelat $^1/_4$ inch adalah:

$$\phi R_n = \phi(2.4F_u dt) = 0.75(2.4)(58)(0.75)(0.25) = 19.6 \text{ kips/baut}$$

$$\text{Banyaknya baut} = \frac{77}{19.6} = 3.9$$



Gambar 4.8.4 *Kegagalan geser blok pada p dari Contoh 4.8.3*

Dipindai dengan CamScanner

Dengan menggunakan beban terfaktor P per penyambung sebesar 77/4 = 19.3 kips, jarak ujung L yang dikehendaki menurut LRFD-J3.10 adalah:

$$L \geq \left[\frac{P}{\phi F_u t} = \frac{19.3}{0.75(58)0.25} = 1.77 \text{ inch} \right]$$

Karena harga 1.77 inch hasil hitungan melampaui harga minimum dari **Tabel 4.7.2** [LRFD-Tabel J3.7], jarak ujung paling tidak harus sebesar 1.77 inch.

Keadaan batas patahan geser (geser blok) juga harus dicek, khususnya di sini, karena pelatnya (¼ inch) cukup tipis dan bebannya berat. Bila mengacu pada **Gambar 4.8.4**, susunan awal untuk empat baut adalah dengan jarak ujung 2 inch pada sisi-sisi dan ujung, sedangkan jarak antar baut longitudinalnya sebesar 3 inch.

Selidikilah kekuatan geser blok dari susunan yang diperoleh. Bila kita gunakan Komentar LRFD-J4, yang menganjurkan nilai terbesar dari antara **Persamaan 3.6.1** dan **3.6.2**:

Untuk pelelehan geser (sepanjang *b-c* dan *e-f*) yang dikombinasikan dengan retakan tarik (sepanjang *a-b* dan *d-e*):

$$T_n = 0.60F_yA_{ug} + F_uA_{nt} \qquad [3.6.1]$$
$$= 0.60(36)(10)0.25 + 58(4 - 13/16)0.25$$
$$= 54 + 46 = 100 \text{ kips}$$

Untuk patahan geser (sepenjang *b-c* dan *e-f*) yang dikombinasikan dengan pelelehan tarik (sepanjang *a-b* dan *d-e*):

$$T_n = 0.60F_uA_{ns} + F_yA_{tg} \qquad [3.6.2]$$
$$= 0.60(58)[10 - 3(13/16)]0.25 + 36(4)0.25$$
$$= 66 + 36 = 102 \text{ kips}$$
(yang lebih besar yang menentukan)

Kekuatan desain ϕT_n, dengan menggunakan $\phi = 0.75$, akan diperoleh:

$$\phi T_n = 0.75(102) = 77 \text{ kips}$$

yang sama dengan beban terfaktor $T_u = 77$ kips yang harus ditumpu.

Gunakan: jarak pinggir sebesar 2 inch pada sisi-sisinya, jarak antar baut longitudinal sebesar 3 inch, dan jarak ujung sebesar 2 inch.

4.9 Simpul Gelincir-Kritik

Bila dikehendaki adanya resistansi gelincir pada beban layanan, simpul tersebut disebut sebagai *simpul gelincir-kritik*. Dalam Spesifikasi AISC 1978, sambung-

Dipindai dengan CamScanner

an sedemikian disebut *sebagai sambungan tipe gesekan.* Semua sambungan berkekuatan tinggi dalam kondisi tarik sebenarnya menahan beban dengan gesekan. Bila kita *mengacu pada* **Gambar 4.6.3**, gaya pratarik T sama dengan gaya cengkeram di antara bagian-bagian yang disambungkan. Resistansi hadap geser merupakan gaya gesekan μT, di mana μ merupakan koefisien gesekan.

Koefisien gesekan, atau lebih tepat lagi *koefisien gelincir*, tergantung pada kondisi permukaan yang harganya ditentukan oleh hal-hal seperti kerataan gilingan (*mill scale*), minyak, cat, atau perlakuan khusus lainnya terhadap bidang permukaan.

Gelinciran didefinisikan telah terjadi bila "batas kekuatan geseknya benar-benar terlampaui dan kedua permukaan menggelincir satu terhadap yang lain dengan jarak relatif besar" [4.14]. Harga μ berkisar dari 0.2 hingga 0.6 tergantung pada kondisi permukaannya [3.1].

Untuk menghindari penggunaan koefisien gesek secara langsung dan untuk memungkinkan desain simpul gelincir-kritik dengan menggunakan pendekatan yang sama seperti pada sambungan tipe tumpu, gaya gesek μT dibagi dengan luas penampang bruto baut A_b untuk mendapatkan apa yang disebut sebagai "tegangan geser" pada baut.

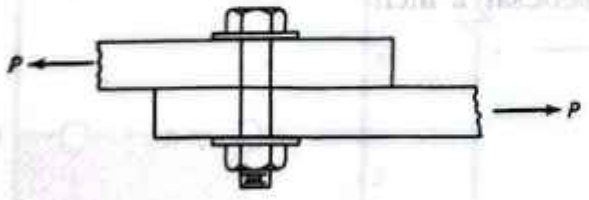
■ **Contoh 4.9.1**

Tentukan besarnya gaya P yang dibutuhkan untuk menyebabkan terjadinya gelinciran sebuah baut A325 berdiameter $\frac{7}{8}$ inch yang dibebani seperti **Gambar 4.9.1**, bila koefisien gelincirnya μ sebesar 0.33 (harga tipikal untuk kondisi "sebagai gilingan bersih" biasa). Dengan menggunakan gaya beban layanan P, hitung "tegangan geser", $f_v = P/A_b$.

Penyelesaian:

Gunakan beban pratarik dari **Tabel 4.4.2**:

$$T_b = 39 \text{ kips}$$
$$P = \mu T_b = 0.33(39) = 12.9 \text{ kips}$$



Gambar 4.9.1 Contoh 4.9.1

Dipindai dengan CamScanner

$$\phi T_n = 112 \text{ kips (untuk A325-X)}$$

Jarak ujung L dari pusat suatu lobang standar ke ujung pelat tidak boleh kurang dari (LRFD-J3.10):

$$L \geq \left[\frac{P}{\phi F_u t} = \frac{28.1}{0.75(65)0.625} = 0.92 = \text{inch} \right]$$

Pada persamaan di atas, beban terfaktor P pada baut diasumsikan sebagai nilai maksimum yang diijinkan berdasarkan geser tunggal. Harga sebesar 1.5 inch yang diberikan melampaui harga minimum yang disyaratkan sebesar 0.92 inch dari hasil perhitungan dan juga memenuhi harga minimum untuk pinggiran dengan geser pada **Tabel 4.7.2**.

Kekuatan geser patahan, yang dikenal sebagai *geser blok*, tidak dicek di sini (*lihat* **Bagian 3.6**; bila digunakan ketebalan sebesar $\frac{5}{8}$ inch, kekuatan ini cenderung tidak berpengaruh.

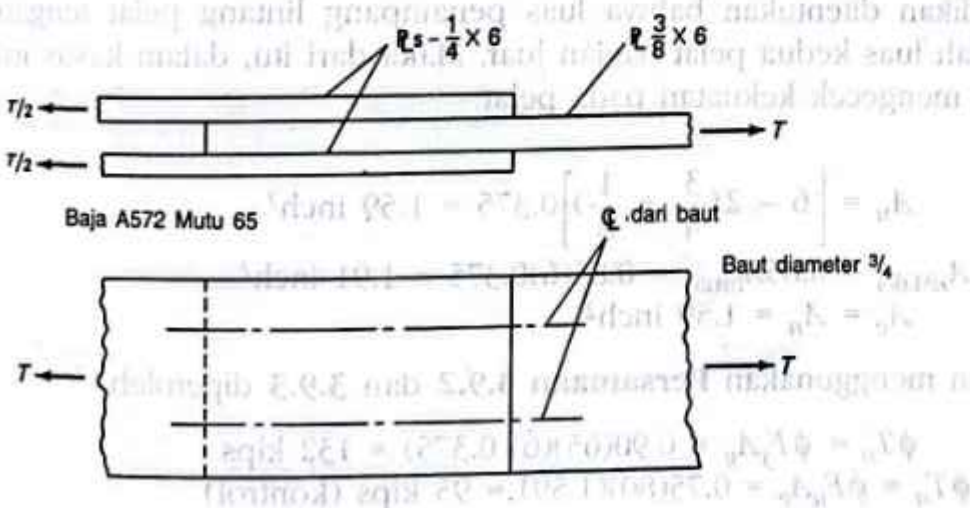
Untuk mengkaitkan kekuatan desain dengan beban layanan, **Persamaan 3.9.1** harus digunakan:

$$\phi T_n \geq T_u \qquad [3.9.1]$$

Dengan memasang beban layanan terfaktor T_u sama dengan kekuatan desain, ϕT_n akan memberikan beban layanan maksimum yang dapat diterima. Dengan menggunakan kombinasi beban terfaktor dari beban hidup dan beban mati gaya berat, **Persamaan 1.8.3** [LRFD-Persamaan(A4-2)]:

$$T_u = 1.2D + 1.6L \qquad [1.8.3]$$

Dengan substitusi ke dalam **Persamaan 1.8.3**, beban hidup L yang sama dengan tiga kali beban mati D, dan kemudian penggunaan ϕT_n sebagai 112 kips dalam **Persamaan 3.9.1** akan dihasilkan:



Gambar 4.8.2 Contoh 4.8.2

Dipindai dengan CamScanner

$$\phi T_n = T_u$$
$$112 = 1.2D + 1.6(3D) = 6.0D$$
$$D = 18.7 \text{ kips}$$
$$L = 3D = 56.1 \text{ kips}$$

Dengan demikian, beban layanan total maksimum T yang diijinkan adalah:

$$T = D + L = 18.7 + 56.1 = 74.8 \text{ kips (untuk A325-X)}$$

(*b*) Ulir tidak terpisah dalam bidang geser. Kekuatan desain penyambung pa geser tunggal lebih kecil dari yang terhitung dalam (*a*). Kekuatan desain ϕR_n baut pada geser tunggal untuk A325-N* adalah:

$$\phi R_n = \phi(0.45F_u^b)mA_b \qquad [4.$$
$$= 0.65(0.45)(120)(1)(0.6013) = 21.1 \text{ kips/baut}$$

Kekuatan dalam geser tunggal berpengaruh lagi karena tidak ada perubahan da kekuatan batang tarik penampang bersih atau pada kekuatan tumpu. Kar ϕR_n-nya sebesar 0.75 dari yang ada dalam bagian (*a*), kapasitas beban laya T adalah:

$$T = 0.75(74.8) = 56.1 \text{ kips (untuk A325-N)}$$

■ Contoh 4.8.2

Tentukan banyaknya baut A325 berdiameter $\frac{3}{4}$ inch yang dibutuhkan untuk me hasilkan kekuatan penuh pelat baja A572 Mutu 65 dalam **Gambar 4.8.2** (su bagian dari sambungan lapisan ganda) untuk sambungan tipe tumpu dengan terpisah dari bidang geser. Gunakan Spesifikasi LRFD AISC dan asumsikan di nakan dua baris baut dengan ukuran lobang standar.

Penyelesaian

Dengan penyelidikan ditentukan bahwa luas penampang lintang pelat teng kurang dari jumlah luas kedua pelat bagian luar. Maka dari itu, dalam kasus kita hanya perlu mengecek kekuatan pada pelat.

$$A_n = \left[6 - 2\left(\frac{3}{4} + \frac{1}{8}\right)\right]0.375 = 1.59 \text{ inch}^2$$
$$A_{n\text{Maks}} = 0.85A_{\text{bruto}} = 0.85(6)0.375 = 1.91 \text{ inch}^2$$
$$A_e = A_n = 1.59 \text{ inch}^2$$

Kemudian dengan menggunakan **Persamaan 3.9.2** dan **3.9.3** diperoleh:

$$\phi T_n = \phi F_y A_g = 0.90(65)(6)(0.375) = 132 \text{ kips}$$
$$\phi T_n = \phi F_u A_e = 0.75(80)(1.59) = 95 \text{ kips (kontrol)}$$

* Penamaan standar untuk baut A325 pada sambungan tipe tumpu dengan ulir tidak terpisah (iNcluded) dalam bidang geser.

Dipindai dengan CamScanner

Dengan demikian, kekuatan desain pelat dalam tarik adalah 95 kips.

Dalam hal ini, kerja keseluruhan sambungan dapat dianggap sebagai transfer geser di antara pelat-pelat yang terjadi pada dua bidang kontak. Bila konektor-konektor diletakkan sedemikian rupa sehingga melintangi dua bidang kontak geser, keadaan ini disebut sebagai "geser/irisan ganda". *Geser/irisan ganda* adalah peristiwa di mana ditinjau dari bidang geser dan arah transfer geser terjadi pembebanan secara simetrik, sedangkan pada geser tunggal pembebanannya tidak simetrik (**Gambar 4.8.1**).

Kekuatan desain dalam geser ganda (per baut) adalah:

$$\phi R_n = \phi(0.60F_u^b)mA_b = 0.65(0.60)(120)(2)(0.4418) = 41.4 \text{ kips/baut.}$$

Kekuatan desain dalam tumpuan pada pelat setebal $^3/_8$ inch adalah:

$$\phi R_n = \phi(2.4F_u dt) = 0.75(2.4)(80)(0.75)(0.375) = 40.5 \text{ kips/baut}$$

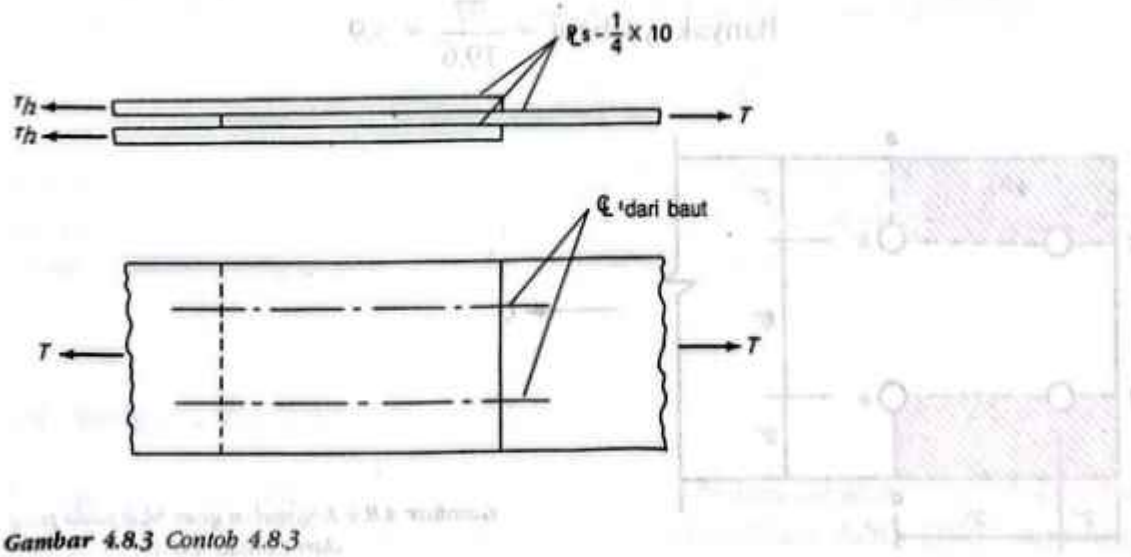
$$\text{Banyaknya baut} = \frac{95}{40.5} = 2.3$$

Gunakan 4 baut A325 (A325-X) diameter $^3/_4$ inch

Dengan menggunakan beban terfaktor P per penyambung sebesar 95/4 = 23.8 kips, jarak ujung L yang dibutuhkan menurut LRFD-K3.10 adalah:

$$L \geq \left[\frac{P}{\phi F_u t} = \frac{23.8}{0.75(80)0.375} = 1.06 \text{ inch} \right]$$

Karena harga 1.06 hasil hitungan kurang dari harga minimum dari **Tabel 4.7.2** [lrfd-Tabel J3.7], jarak ujung paling tidak harus berharga 1.25 inch dari **Tabel 4.7.2**. Keadaan batas patahan geser (geser blok) harus dicek juga. Meskipun demikian, karena tumpuan bukan yang menentukan, bentuk patahan geser tampaknya yang akan menentukan.



Gambar 4.8.3 Contoh 4.8.3

Dipindai dengan CamScanner

■ **Contoh 4.8.3**

Tentukan banyaknya baut A325 berdiameter $^3/_4$ inch dalam lobang standar ya diharapkan akan menanggung beban mati sebesar 7 kips dan beban hidup seb sar 43 kips pada pelat seperti **Gambar 4.8.3** bila digunakan baja A36. Asumsik bahwa digunakan sambungan tipe tumpu dengan lapisan ganda dan ulir ya terpisah dari bidang geser dan dua barisan baut. Gunakan *Load and Resistan Factor Design.*

Penyelesaian:

Dalam contoh ini, pelat tengah akan mempengaruhi kekuatan tarik:

$$A_g = 10(0.25) = 2.50 \text{ inch}^2$$

$$A_n = \left[10 - 2\left(\frac{3}{4} + \frac{1}{8}\right)\right]0.25 = 2.06 \text{ inch}^2$$

$$A_{nmaks} = 0.85A_g = 0.85(2.50) = 2.13 \text{ inch}^2$$

$$\therefore A_e = A_n = 2.06 \text{ inch}^2$$

$$\phi T_n = \phi F_y A_g = 0.90(36)(2.50) = 81 \text{ kips (kontrol)}$$

$$\phi T_n = \phi F_u A_e = 0.75(58)(2.06) = 90 \text{ kips}$$

Beban terfaktor T_u yang harus ditanggung adalah:

$$T_u = 1.2D + 1.6L = 1.2(7) + 1.6(43) = 77 \text{ kips}$$

dan ini tidak melampaui kekuatan batang-batangnya (yakni $\phi T_n > T_u$).

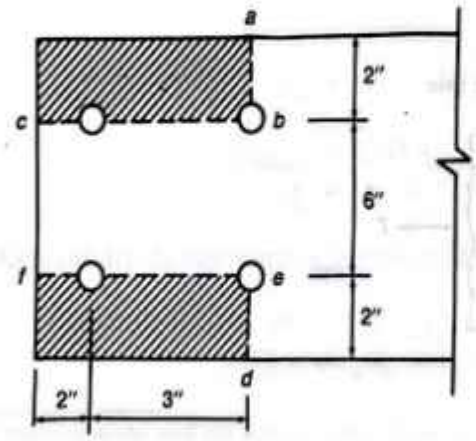
Untuk geser, dengan menggunakan baut A325-X:

$$\phi R_n = \phi(0.60F_u^b)mA_b = 0.65(0.60)(120)(2)(0.4418) = 41.4 \text{ kips/baut.}$$

Kekuatan desain dalam tumpu pada pelat $^1/_4$ inch adalah:

$$\phi R_n = \phi(2.4F_u dt) = 0.75(2.4)(58)(0.75)(0.25) = 19.6 \text{ kips/baut}$$

$$\text{Banyaknya baut} = \frac{77}{19.6} = 3.9$$



***Gambar 4.8.4** Kegagalan geser blok pada pe dari Contoh 4.8.3*

Dipindai dengan CamScanner

Dengan menggunakan beban terfaktor P per penyambung sebesar 77/4 = 19.3 kips, jarak ujung L yang dikehendaki menurut LRFD-J3.10 adalah:

$$L \geq \left[\frac{P}{\phi F_u t} = \frac{19.3}{0.75(58)0.25} = 1.77 \text{ inch} \right]$$

Karena harga 1.77 inch hasil hitungan melampaui harga minimum dari **Tabel 4.7.2** [LRFD-Tabel J3.7], jarak ujung paling tidak harus sebesar 1.77 inch.

Keadaan batas patahan geser (geser blok) juga harus dicek, khususnya di sini, karena pelatnya (1/4 inch) cukup tipis dan bebannya berat. Bila mengacu pada **Gambar 4.8.4**, susunan awal untuk empat baut adalah dengan jarak ujung 2 inch pada sisi-sisi dan ujung, sedangkan jarak antar baut longitudinalnya sebesar 3 inch.

Selidikilah kekuatan geser blok dari susunan yang diperoleh. Bila kita gunakan Komentar LRFD-J4, yang menganjurkan nilai terbesar dari antara **Persamaan 3.6.1** dan **3.6.2**:

Untuk pelelehan geser (sepanjang *b-c* dan *e-f*) yang dikombinasikan dengan retakan tarik (sepanjang *a-b* dan *d-e*):

$$T_n = 0.60F_yA_{ug} + F_uA_{nt} \quad [3.6.1]$$
$$= 0.60(36)(10)0.25 + 58(4 - 13/16)0.25$$
$$= 54 + 46 = 100 \text{ kips}$$

Untuk patahan geser (sepenjang *b-c* dan *e-f*) yang dikombinasikan dengan pelelehan tarik (sepanjang *a-b* dan *d-e*):

$$T_n = 0.60F_uA_{ns} + F_yA_{tg} \quad [3.6.2]$$
$$= 0.60(58)[10 - 3(13/16)]0.25 + 36(4)0.25$$
$$= 66 + 36 = 102 \text{ kips}$$
(yang lebih besar yang menentukan)

Kekuatan desain ϕT_n, dengan menggunakan $\phi = 0.75$, akan diperoleh:

$$\phi T_n = 0.75(102) = 77 \text{ kips}$$

yang sama dengan beban terfaktor $T_u = 77$ kips yang harus ditumpu.

Gunakan: jarak pinggir sebesar 2 inch pada sisi-sisinya, jarak antar baut longitudinal sebesar 3 inch, dan jarak ujung sebesar 2 inch.

4.9 Simpul Gelincir-Kritik

Bila dikehendaki adanya resistansi gelincir pada beban layanan, simpul tersebut disebut sebagai *simpul gelincir-kritik*. Dalam Spesifikasi AISC 1978, sambung-

Dipindai dengan CamScanner

an sedemikian disebut sebagai *sambungan tipe gesekan*. Semua sambungan b berkekuatan tinggi dalam kondisi tarik sebenarnya menahan beban ngan gesekan. Bila kita mengacu pada **Gambar 4.6.3**, gaya pratarik T sama ngan gaya cengkeram di antara bagian-bagian yang disambungkan. Resistansi hadap geser merupakan gaya gesekan μT, di mana μ merupakan koefi gesekan.

Koefisien gesekan, atau lebih tepat lagi *koefisien gelincir*, tergantung pada k disi permukaan yang harganya ditentukan oleh hal-hal seperti kerataan gilin (*mill scale*), minyak, cat, atau perlakuan khusus lainnya terhadap bidang p mukaan.

Gelinciran didefinisikan telah terjadi bila "batas kekuatan geseknya benar-be terlampaui dan kedua permukaan menggelincir satu terhadap yang lain deng jarak relatif besar" [4.14]. Harga μ berkisar dari 0.2 hingga 0.6 tergantung pa kondisi permukaannya [3.1].

Untuk menghindari penggunaan koefisien gesek secara langsung dan un memungkinkan desain simpul gelincir-kritik dengan menggunakan pendeka yang sama seperti pada sambungan tipe tumpu, gaya gesek μT dibagi deng luas penampang bruto baut A_b untuk mendapatkan apa yang disebut seba "tegangan geser" pada baut.

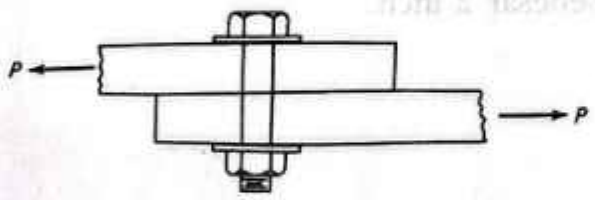
■ Contoh 4.9.1

Tentukan besarnya gaya P yang dibutuhkan untuk menyebabkan terjadi gelinciran sebuah baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch yang dibebani seperti **Gamb 4.9.1**, bila koefisien gelincirnya μ sebesar 0.33 (harga tipikal untuk kondisi "sk gilingan bersih" biasa). Dengan menggunakan gaya beban layanan P, hitung "tegangan geser", $f_v = P/A_b$.

Penyelesaian:

Gunakan beban pratarik dari **Tabel 4.4.2**:

$$T_b = 39 \text{ kips}$$
$$P = \mu T_b = 0.33(39) = 12.9 \text{ kips}$$



Gambar 4.9.1 Contoh 4.9.1

Dipindai dengan CamScanner

Tabel 4.9.1 "Tegangan Geser" beban layanan maksimum yang dapat diterima* F_v untuk baut pada simpul gelincir-kritik (diadaptasi dari Spesifikasi RCSC [4.7])

Permukaan kontak dari bagian yang dipasangi baut	Tipe lobang dan arah bekerjanya beban							
	Arah sembarang				Transversal		Sejajar	
	Standar		Beralur pendek & Berukuran lebih		Beralur panjang		Beralur pendek	
	A325	A490	A325	A490	A325	A490	A325	A490
Kelas A — Permukaan skala gilingan bersih dan permukaan bersih-hembus dengan pelapisan Kelas A**	17	21	15	18	12	15	10	13
Kelas B — Permukaan bersih-hembus dan permukaan bersih-hembus dengan pelapisan Kelas B**	28	34	24	29	20	24	17	20
Kelas C — Permukaan galvanis celup panas dan permukaan yang diperkasar	22	27	19	23	16	19	14	16

*F_v merupakan geser beban layanan terfaktor per baut dibagi dengan luas nominal.

**Pelapisan diklasifikasikan sebagai Kelas A atau Kelas B termasuk pelapisan-pelapisan yang menciptakan koefisien gelincir masing-masing tidak kurang dari 0.33 atau 0.50 seperti yang ditentukan dari hasil uji [4.15]

Karena kerja keseluruhan sambungan merupakan suatu efek geseran, "tegangan geser" f_v dalam baut berdiameter $^7/_8$ pada beban yang menyebabkan mulainya gelinciran adalah:

$$f_v = \frac{P}{A_b} = \frac{12.9}{0.6013} = 21.4 \text{ ksi}$$

Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] menggunakan pendekatan "tegangan geser" untuk mendapatkan resistansi gelinciran pada simpul-simpul di mana gelinciran pada *beban layanan* tidak dapat ditoleransi. Keadaan batas gelinciran pada simpul tersebut merupakan persyaratan daya layanan (*serviceability*). Kegagalan penyambung yang sebenarnya pada sebuah simpul akan dibahas dalam **Bagian 4.6**, yakni kegagalan geser baut, kegagalan tarik baut, atau kegagalan tumpu pada bahan yang disambungkan.

Karena resistansi terhadap gelinciran pada sambungan "gelincir-kritik" meru-

Dipindai dengan CamScanner

pakan keadaan batas yang harus diselidiki pada beban layanan, "tegangan ges
pembatas yang harus digunakan *dalam konsepnya* sama untuk *Load a*
Resistance Factor Design [1.15] seperti yang digunakan dalam *Allowable Str*
Design 1978. Harga-harga LRFD dan ASD 1989 diberikan dalam **Tabel 4.9.1**.

Seperti yang dapat diperhatikan, untuk situasi **Contoh 4.9.1** "tegangan ges
yang diijinkan LRFD-J3.5 F sebesar 17.0 ksi untuk baut A325 digunakan unt
sambungan gelincir-kritik yang berisi lobang-lobang standar. Margin keaman
terhadap gelinciran yang disediakan sebesar 21.4/17.0 = 1.26. Karena gelinci
lebih merupakan suatu persyaratan daya layanan ketimbang suatu persyarat
kekuatan, suatu margin keamanan yang lebih rendah dari yang digunakan unt
kekuatan adalah masih masuk akal. Untuk situasi ini, AISC telah menggunak
suatu faktor keamanan terhadap gelinciran sekitar 70% dari yang digunakan unt
kekuatan.

Tabel 4.9.2 Faktor keamanan terhadap gelinciran, simpul-simpul gelincir-kritik (Koefisien gel
= 0.33)

Diameter baut (inch)	Luas nominal		Faktor keamanan	
	(inch²)	(mm²)	A325	A490
5/8	0.3068	197.9	1.20	1.23
3/4	0.4418	285.0	1.23	1.24
7/8	0.6013	387.9	1.26	1.28
1	0.7854	506.7	1.26	1.28
1 1/8	0.9940	641.3	1.09	1.26
1 1/4	1.2272	791.7	1.12	1.31

Mengatasi gelinciran *tidak* sekedar menunjukkan bahwa telah terjadi suatu b
tuk kegagalan. Namun, bila sambungan cenderung untuk mengalami perubah
arah tegangan, perlu diberikan perhatian yang lebih besar terhadap gelinci
mana pun pada beban layanan. Pembebanan yang berulang-ulang dapat men
babkan berkurangnya kekuatan letih bila telah terjadi gelinciran, khususnya b
digunakan lobang beralur atau lobang berukuran lebih.

Faktor keamanan terhadap gelincir yang dihitung di atas adalah tipikal; unt
ukuran-ukuran baut lainnya serta untuk baut A325 dan A490, variasinya da
diamati dari **Tabel 4.9.2**. Gaya cengkeramnya merupakan gaya tarik awal d
Tabel 4.4.2.

Indeks reliabilitas β (*lihat* **Bagian 1.8**) untuk resistansi gelinciran akan leb
besar bila baut dipasang dengan metode putaran mur daripada bila dipasa
dengan puntiran berkalibrasi [4.16]. Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] tidak menge
perbedaan tersebut; harga-harga tersebut mengasumsikan 10% probabilitas gel
ciran terjadi pada baut yang dipasang dengan metode puntiran berkalibrasi. Har
harga "tegangan geser" yang diijinkan dalam LRFD-J3.5 dan ASD-J3.5 dibulatk
ke bawah dan sedikit dikurangi dari yang digunakan dalam ASD-1.5.2.2 tah
1978.

Dipindai dengan CamScanner

Tabel 4.9.3 Ukuran maksimum (nominal) untuk lobang beralur dan lobang berukuran lebih (Diadaptasi dari Spesifikasi RCSC [4.7])

Ukuran baut nominal		Lobang berukuran lebih[1]		Lobang beralur pendek[2]		Lobang beralur panjang[3]	
(inch)	(mm)	(inch)	(mm)	(inch)	(mm)	(inch)	(mm)
5/8	15.9	13/16	20.6	11/16x 7/8	17.5x22.2	11/16x1 9/16	17.5x39.7
3/4	19.1	15/16	23.8	13/16x1	20.6x25.4	13/16x2 7/8	20.6x47.6
7/8	22.2	1 1/16	27.0	15/16x1 1/8	23.8x28.6	15/16x2 3/16	23.8x55.6
1	25.4	1 1/4	31.8	1 1/16x1 5/16	27.0x33.3	1 1/16x2 1/2	27.0x63.5
1 1/8	28.6	1 7/16	36.5	1 3/16x1 1/2	30.2x38.1	1 3/16x2 13/16	30.2x71.4
1 1/4	31.8	1 9/16	39.7	1 5/16x1 5/8	33.3x41.3	1 5/16x3 1/8	33.3x79.4
1 3/8	34.9	1 11/16	46.0	1 9/16x1 7/8	39.7x47.6	1 9/16x3 7/16	36.5x87.3
1 1/2	38.1	1 13/16	46.0	1 9/16x1 7/8	39.7x47.6	1 9/16x3 3/4	39.7x95.3

[1] Diameter nominal sampai dengan $^3/_{16}$ inch (4.76 mm) lebih besar daripada baut berdiameter $^7/_8$ inch (22.2 mm) dan kurang; $^1/_4$ inch (6.35 mm) lebih besar daripada baut berdiameter 1 inch (25.4 mm); dan $^5/_{16}$ inch (7.94 mm) lebih besar daripada baut berdiameter $1^1/_8$ inch (38.6 mm) dan lebih besar.

[2] Nominalnya $^1/_{16}$ inch (1.59 mm) lebih lebar daripada diameter baut dan memiliki panjang yang tidak melampaui diameter berlebih (catatan kaki[1]) sebesar lebih dari $^1/_{16}$ inch (1.59 mm).

[3] Nominalnya $^1/_{16}$ inch (1.59 mm) lebih lebar daripada diameter baut dan memiliki panjang yang lebih besar daripada untuk lobang beralur pendek namun tidak melampaui $2^1/_2$ kali diameter baut.

Karena resistansi gelinciran tentu saja harus berkaitan dengan luas kontak di antara bagian-bagian yang disambung, harga-harga dasar yang diperoleh untuk lobang standar dapat direduksi bila lobang yang lebih besar mereduksi luas kontaknya. Dimensi untuk lobang beralur dan lobang berukuran lebih diberikan dalam **Tabel 4.9.3**. Harga-harga untuk lobang berukuran lebih dan lobang beralur pendek adalah 85% dari harga untuk lobang standar, sedangkan lobang beralur pendek harganya 75%-nya.

4.9.1 Desain Sambungan Gelincir-Kritik — Spesifikasi LRFD

Desain simpul-simpul gelincir-kritik membutuhkan pertimbangan sepenuhnya atas keadaan-keadaan batas kekuatan. Kekuatan penyambung dalam geser, tumpu, dan tarik langsung, seperti yang dibicarakan dalam **Bagian 4.6** dan **4.7** harus disediakan. Kekuatan harus dicapai untuk menahan *beban-beban terfaktor. Apalagi*, beban layanan yang harus ditransfer melalui gesekan tanpa gelinciran tidak boleh melampaui yang ditunjukkan oleh LRFD-K3.5, yang di sini diberikan dalam **Tabel 4.9.1**. Galambos, Reinhold, dan Ellingwood [4.16] telah memberikan suatu studi statistik yang hebat mengenai gelinciran sambungan sebagai suatu keadaan batas daya layanan.

■ **Contoh 4.9.2**

Dipindai dengan CamScanner

Tentukan kapasitas tarik sambungan yang telah diselidiki sebelumnya da
Contoh 4.8.1 sebagai sebuah sambungan tipe tumpu (**Gambar 4.8.1**); nan
sekarang anggaplah sambungan tersebut sebagai tipe gelincir-kritik dengan k
disi permukaan skala gilingan bersih biasa (Kelas A). Gunakan baut A
berdiameter $^7/_8$ inch dalam lobang standar dengan bahan pelat A572 Mutu
Gunakan *Load and Resistance Factor Design.*

Penyelesaian:

Kekuatan desain bagin tarik (pelat) ϕT_n ditentukan dalam **Contoh 4.8.1** s
gai:

$$\phi T_n = 122 \text{ kips (berdasarkan } \phi F_u A_e)$$

Dari **Tabel 4.9.1**, kapasitas beban layanan per baut pada geser tunggal ad

$$R = mF_v A_b = 1(17)(0.6013) = 10.2 \text{ kips/baut.}$$
$$T = 4(10.2) = 40.9 \text{ kips}$$

Kapasitas beban layanan T berdasar resistansi gelinciran ternyata lebih re
daripada beban layanan yang ditentukan berdasar kekuatan yang berhubu
dengan baut yakni $T = 74.8$ kips dari hasil hitungan pada **Gambar 4.8.1** u
A325-X. Dengan demikian, $T = 40.9$ kips.

Persyaratan untuk jarak antar baut, jarak ujung, dan jarak pinggir, semu
identik baik untuk sambungan tipe tumpu atau sambungan tipe gelincir-k
Karena beban terfaktor per baut lebih rendah bila banyaknya penyambung
digunakan ditentukan oleh resistansi gelinciran, persamaan-persamaan yang
kaitan dengan kekuatan tumpu untuk penentuan jarak antar penyambung
jarak ujung akan mengijinkan harga-harga jarak yang lebih kecil. Tentu saja,
syaratan minimum yang akan lebih menentukan. Umumnya, ketahanan gel
menentukan dalam sambungan gelincir kritik, ketimbang kekuatan geser
kekuatan tumpu.

■ Contoh 4.9.3

Desain-ulanglah sambungan untuk **Gambar 4.8.2** sebagai sambungan gelir
kritik dengan menggunakan lobang *berukuran lebih* dan kondisi permukaan K
A. Gunakan baut A325 berdiameter $^3/_4$ inch dengan barisan ganda dan Spesifi
LRFD AISC. Beban hidupnya empat kali beban mati.

Penyelesaian:

Kekuatan desain ϕT_n berdasar kekuatan pelat dalam tarik telah dihitung dal
Contoh 4.8.2 sebesar 95 kips. Dengan menggunakan hubungan di antara bet
terfaktor dan beban layanan, **Persamaan 1.8.1** menjadi:

$$T_u = 1.2D + 1.6L = 95 \text{ kips}$$

Dipindai dengan CamScanner

$$= 1.2D + 1.6(4D) = 7.6D$$

$$D = \frac{95}{7.6} = 12.5 \text{ kips}$$

$$T = D + L = 12.5 + 4(12.5) = 62.5 \text{ kips}$$

Dari **Tabel 4.9.1**, kapasitas beban layanan R per baut berdasar geser (geser ganda) pada sambungan gelincir-kritik adalah:

$$R = F_v m A_b = 15.0(2)0.4418 = 13.3 \text{ kips/baut}$$

$$\text{Banyaknya baut} = \frac{T}{R} = \frac{62.5}{13.3} = 4.7$$

Gunakan 6—baut diameter $^3/_4$ (A325-SC).

Perhatikan bahwa baut pada simpul gelincir-kritik diberi tanda SC karena mengikuti nomor Spesifikasi ASTM seperti contoh di atas. Sambungan ini hanya membutuhkan empat baut sebagai sambungan tipe tumpu dalam **Contoh 4.8.2**.

■ **Contoh 4.9.4**

Desain-ulanglah sambungan dari **Gambar 4.8.2** sebagai sambungan gelincir-kritik dengan lobang *standar* untuk kondisi permukaan *Kelas B* (bersih hembus). Beban hidup sebesar empat kali beban mati. Gunakan barisan ganda baut A325 diameter $^3/_4$ inch dengan menggunakan Spesifikasi LRFD AISC. Asumsikan bahwa mungkin terdapat ulir pada bidang gesernya.

Penyelesaian:

Kekuatan desain ϕT_n pelat adalah 95 kips seperti hitungan **Contoh 4.8.2**. Beban layanan berdasar kekuatan pelat adalah 62.5 kips seperti hasil hitungan **Contoh 4.9.3**. Dari **Tabel 4.9.1**, kapasitas beban layanan R per baut berdasar geser (geser ganda) pada sambungan gelincir-kritik adalah:

$$R = F_v m A_b = 28.0(2)0.4418 = 24.7 \text{ kips/baut.}$$

$$\text{Banyaknya baut} = \frac{T}{R} = \frac{62.5}{24.7} = 2.5$$

Bila pada bidang geser terdapat ulir, kekuatan berdasar geser tereduksi karena penampang lintang pada bagian berulir juga tereduksi. Dengan menggunakan **Persamaan 4.7.2**:

$$\phi R_n = \phi\,(0.45F_u^b)\,m A_b$$

$$= 0.65(0.45)(120)(2)0.44.18 = 31.0 \text{ kips/baut.}$$

Karena harga ini lebih kecil daripada kekuatan desain (40.5 kips/baut) hasil hitungan **Contoh 4.8.2**, harga inilah yang menentukan kekuatan. Beban terfaktor yang dikehendaki untuk ditanggung adalah 95 kips. Banyaknya baut yang dibutuhkan adalah:

Dipindai dengan CamScanner

$$\text{Banyaknya baut} = \frac{T_u}{\phi R_n} = \frac{95}{31.0} = 3.1$$

Dengan demikian, untuk desain ini jumlah baut 3,1 melampaui jumlah baut yang dikehendaki untuk resistansi gelinciran daya layanan.

Gunakan 4 — baut diameter $^3/_4$ inch (A325-SC).

4.10 Allowable Stress Design – Penyambung

Filosofi umum *Allowable Stress Design* (ASD) telah dibeberkan dalam **Bab** 1 dan 1.9. **Persamaan 1.8.8** memberikan persyaratan keamanan sebagai berikut

$$\frac{\phi R_n}{\gamma} \geq \Sigma Q_i \qquad [1.8.$$

yang menyatakan bahwa kekuatan desain ϕR_n yang dibagi oleh suatu faktor ke manan γ harus melampaui jumlah dari beban-beban layanan. Pada metode des tegangan yang diijinkan, provisi keamanannya adalah γ/ϕ.

Dalam hal penyambung, ruas kanan dari **Persamaan 1.8.8** menjadi beb layanan total *R per penyambung* dalam geser, tarik, atau tumpu tergantung kem taan yang ada. Bila kedua ruas dibagi dengan sediaan keamanan γ/ϕ akan dip oleh:

$$\left[\frac{R_n}{\gamma/\phi} = \frac{R_n}{\text{FS}}\right] \geq R \qquad (4.10$$

Karena filosofi yang mendasari metode tegangan ijin adalah penghitung "tegangan-tegangan" pada beban layanan, **Persamaan 4.10.1** dapat dibagi d ngan luas penampang lintang baut; dan bila ruasnya dibalik (= membalik pe tidaksamaannya) akan diperoleh:

$$\left[f = \frac{R}{A_b}\right] \leq \left[F = \frac{R_n}{(\text{FS})\ A_b}\right] \qquad (4.10.$$

Dengan demikian, tegangan "nominal" f memiliki satuan gaya per luas satua dan ruas kanan persamaan tersebut menjadi *tegangan ijin F*. Perhatikan bahw hanya bila baut dipasang tanpa tarik awal saja tegangan aktual akan berupa R/A tarik awal pada baut akan menyebabkan sebagian atau seluruh beban layan ditransfer melalui gesekan yang selanjutnya akan menaikkan tegangan "nomina gesekan f yang bekerja pada luas penampang lintang baut. Dalam kedua h tersebut, **Persamaan 4.10.2** dapat memberikan persyaratan keamanan deng tepat.

Dipindai dengan CamScanner

4.10.1 Kekuatan Geser Penyambung

Bila ulir terpisah dari bidang geser, kekuatan geser suatu baut berkekuatan tinggi diberikan oleh **Persamaan 4.6.2**:

$$R_n = mA_b\,(0.60F_u^b) \qquad [4.6.2]$$

Menurut metode desain tegangan yang bekerja (atau tegangan yang diijinkan), kekuatan dibagi dengan faktor keamanan γ/ϕ. Dengan demikian, bila digunakan faktor keamanan tradisional sebesar kurang lebih 2.5 untuk simpul-simpul yang panjangnya sedang (tipikalnya 2.0 untuk simpul pendek sampai dengan 3.0 untuk simpul panjang), substitusi **Persamaan 4.6.2** ke dalam **4.10.1** akan memberikan tegangan geser yang diijinkan F_v.

$$F_v = \frac{0.60\ F_u^b}{2.5} = 0.25\ F_u^b \qquad (4.10.3)$$

yang untuk A325 (F_u^b = 120 ksi) menjadi 30 ksi, dan untuk A490 (F_u^b = 150 ksi) menjadi 37.5 ksi. ASD-J3 menggunakan F_v = 30 ksi untuk A325-X (ulir terpisah [= *eXcluded*] dari bidang geser) dan F_v = 40 ksi untuk A490-X. Penyesuaian dari 37.5 (yakni $0.25F_u^b$) menjadi 40 memantulkan pendekatan dalam hubungan 0.60 di antara kekuatan tarik F_u^b dan kekuatan geser τ_v. Diasumsikan bahwa banyaknya bidang geser yang bekerja m terkait dengan luas; dengan demikian A_b sebenarnya adalah mA_b.

Bila ulir mungkin terdapat pada bidang geser, luas penampang lintang harus direduksi sampai pada harga yang dihitung melalui ulir. Harus dilakukan salah satu baik mengambil luas yang lebih kecil untuk menghitung f atau tegangan ijin F_v-nya yang direduksi. AISC telah memilih tegangan nominal f terus dihitung dengan menggunakan luas bruto A_b; dan ini berarti bahwa tegangan ijin F_v harus

Tabel 4.10.1 Tegangan geser ijin F_v untuk sambungan tipe tumpu* (Dari ASD-Tabel J3.2)

Penyambung	Fv (ksi)	Fv (MPa)
A325-N, ulir termasuk (iNcluded) dalam bidang geser	21	140
A325-X, ulir terpisah (eXcluded) dari bidang geser	30	210
A490-N, ulir termasuk (iNcluded) dalam bidang geser	28	190
A490-X, ulir terpisah (eXcluded) dari bidang geser	40	280

*Baut pada simpul gelincir-kritik (yakni sambungan tipe gesekan) juga harus memenuhi tegangan-tegangan ijin ini, selain harus memenuhi tegangan ijin terhadap resistansi gelinciran seperti dibahas dalam Bagian 4.9

Dipindai dengan CamScanner

direduksi. Rasio luas tegangan tarik* terhadap luas bruto sekitar 0.70 sampai dengan 0.75; maka dari itu, tegangan ijin F_v direduksi sejumlah itu pula sehingga dapat memberikan F_v = 21 ksi untuk A325-N (ulir termasuk [=*iNcluded*] dalam bidang geser) dan F_v = 28 ksi untuk A490-N.

Tegangan geser ijin F_v untuk baut A325 dan A490 pada sambungan tipe tumpu dirangkum dalam **Tabel 4.10.1**.

4.10.2 Kekuatan Tumpu Penyambung

Bila bautnya berada dalam lobang standar atau lobang beralur pendek, kekuatan tumpu baut berkekuatan tinggi diberikan oleh **Persamaan 4.6.10**:

$$R_n = 2.4\ F_u dt \qquad [4.6.10]$$

Menurut format tegangan kerja umum dari Persamaan 4.10.1, kekuatan tumpu (Persamaan 4.6.10) dibagi dengan faktor keamanan FS dan luas tumpu nominal dt untuk mendapatkan:

$$\left[f_p = \frac{R}{dt} \right] \leq \left[\frac{R_n}{(FS)\ dt} \right] \qquad (4.10.4)$$

di mana f_p = tegangan tumpu nominal dengan adanya beban layanan (subskrip p untuk *tekananan* (=*pressure*), sedangkan b untuk *lentur* (*bending*)

d = diameter nominal baut

t = ketebalan pelat yang memikul baut

F_p = tegangan tumpu yang diijinkan

Bila digunakan faktor keamanan sebesar 2 seperti yang biasa dilakukan secara tradisional, tegangan tumpu yang diijinkan F_p akan menjadi:

$$F_p = \frac{2.4F_u dt}{2.0dt} = 1.2F_u \qquad (4.10.5)$$

yang merupakan harga ASD-J3.7 untuk lobang standar. Bila deformasi sekitar lobang tidak diperhitungkan, diijinkan penggunaan harga yang lebih besar berikut ini:

$$F_p = 1.5F_u \qquad (4.10.6)$$

Seperti yang dibicarakan dalam **Bagian 4.6**, kekuatan tumpu untuk mencegah jebolnya baut pada ujung sambungan, dengan **Persamaan 4.6.9**, tidak menggunakan koefisien sebesar 2.4 seperti **Persamaan 4.6.10** melainkan sebesar 3. Meskipun demikian, sejak **Persamaan 4.10.6** diadopsi dalam Spesifikasi ASD 1978 dengan berdasarkan **Persamaan 4.6.9**, penelitian telah menunjukkan bahwa

* Lihat catatan kaki pada bagian bawah Tabel 4.1.1

Dipindai dengan CamScanner

deformasi lobang mungkin saja berlebihan bila digunakan harga yang lebih tinggi. Demikian pula, persyaratan minimum untuk jarak antar baut dan jarak ujung kerapkali lebih berpengaruh ketimbang batas atas dasar tumpuan (*bearing*).

4.10.3 Sambungan Gelincir-Kritik (yakni Tipe Gesekan)

Karena resistansi gelincir pada beban layanan merupakan kriteria yang penting untuk sambungan tipe gelincir-kritik, filosofi desain untuk mendapatkan keamanan yang cukup terhadap gelinciran adalah identik, baik apakah keseluruhan desain menurut Allowable Stress Design atau pun Load and Resistance Factor Design. Persyaratan umum untuk sambungan gelincir-kritik diberikan dalam **Bagian 4.9**.

Sambungan gelincir-kritik harus memiliki *kekuatan* yang memadai; yang dalam *Allowable Stress Design* tercapai dengan memenuhi pembatasan tegangan yang diijinkan untuk geser dan tumpu yang diberikan di atas untuk sambungan tipe tumpuan, *dan selain itu juga harus memenuhi persyaratan daya layanan terhadap resistansi gelincir.*

Dengan demikian, sudah cukuplah memenuhi pembatasan tegangan yang diberikan dalam **Tabel 4.9.1** dari Spesifikasi RCSC [4.7] untuk *Allowable Stress Design*. Meskipun demikian, Spesifikasi ASD 1978 mengijinkan tegangan yang sedikit lebih tinggi. Misalnya, tegangan geser ijin F_v untuk resistansi gelincir adalah 17.5 ksi untuk baut A325 dan 22 ksi untuk baut A490 untuk lobang standar dan kondisi permukaan Kelas A dalam Spesifikasi ASD 1978. Sedangkan dalam Spesifikasi RCSC 1986 dan Spesifikasi ASD 1989, harga-harga tersebut dikurangi masing-masing menjadi 17.0 ksi dan 21 ksi. Penelitian tambahan serta keinginan mendapatkan keamanan yang lebih seragam dalam keseluruhan desain baja telah mengarahkan kepada penyesuaian ke bawah.

4.10.4 Jarak Minimum antar Baut pada Garis Transmisi Gaya

Pencegahan terjadinya perobekan dari satu penyambung ke penyambung yang lain akibat tumpuan pada baut terhadap sisi lobang telah dibicarakan dalam **Bagian 4.6** dan **4.7**. Dengan mengganti P/ϕ dengan $2P$, di mana P adalah beban layanan (baik berdasar geser atau tumpu) per baut dan 2 mewakili angka keamanan γ/ϕ, **Persamaan 4.7.12** akan menjadi:

$$\text{Jarak antar baut} \geq \frac{2P}{F_u t} + \frac{d_b}{2} \qquad (4.10.7)$$

di mana P = beban layanan per baut
F_u = kekuatan tarik bahan *pelat*
t = ketebalan bahan pelat
d_b = diameter lobang baut

Dipindai dengan CamScanner

Bila digunakan lobang standar, ASD-J3.8 menyederhanakan **Persamaan 4.10.7** dengan menggunakan diameter nominal baut d pada tempat d_b. Dengan demikian, persyaratan jarak antar baut *Allowable Stress Design* untuk *lobang standar* adalah ASD-Persamaan(J3-5):

$$\text{Jarak antar baut} \geq \frac{2P}{F_u t} + \frac{d}{2} \qquad (4.10.8)$$

Bila lobangnya tidak standar, d dalam **Persamaan 4.10.8** ditambah menurut ASD-J3.8b.

4.10.5 Jarak Ujung Minimum menurut Arah Transmisi Gaya

Pencegahan jebolnya baut ujung pada suatu baris rangkaian baut membutuhkan jarak ujung minimum, seperti dibicarakan dalam **Bagian 4.7**. Bila P/ϕ diganti dengan $2P$ dalam **Persamaan 4.7.13** akan didapatkan persyaratan ASD-J3.9:

$$L \geq \frac{2P}{F_u t} \qquad (4.10.9)$$

di mana L = jarak ujung dari pusat baut ujung sampai ke pinggir yang diukur menurut arah garis gaya
P = beban layanan pada baut ujung
F_u = kekuatan tarik pada bahan pelat
t = tebal bahan pelat

Jarak dari pusat suatu lobang standar sampai ke pinggir bagian yang disambungkan tidak diijinkan kurang dari harga dalam ASD-Tabel J3.5 atau pun dari **Persamaan 4.10.9** (ASD-J3.9).

4.11 Contoh-contoh — Batang Tarik dengan Allowable Stress Design

■ **Contoh 4.11.1**

Selidikilah sambungan batang tarik dari **Contoh 4.8.1** (**Gambar 4.8.1**) untuk menanggung beban layanan total sebesar 75 kips. Sambungannya menggunakan tipe tumpu, dengan ulir terpisah dari bidang geser, dan baut yang digunakan adalah A325 berdiameter $\frac{7}{8}$ inch pada lobang standar. Pelat yang digunakan adalah baja A572 Mutu 50. Gunakan Spesifikasi ASD AISC.

Penyelesaian:

(*a*) Kapasitas batang tarik. Luas hitungan **Contoh 4.8.1** adalah:

$$A_e = A_n = 2.50 \text{ inch}$$
$$A_g = 3.75 \text{ inch}^2$$

Dipindai dengan CamScanner

Dengan **Persamaan 3.11.4** dan **3.11.5**:

$$f_a = \frac{T}{A_g} = \frac{75}{3.75} = 20 \text{ ksi} < [0.60F_y = 30 \text{ ksi}] \text{ OK}$$

$$f_a = \frac{T}{A_e} = \frac{75}{2.50} = 30 \text{ ksi} < [0.50F_u = 32.5 \text{ ksi}] \text{ OK}$$

(*b*) Penyambung. Kapasitas yang diijinkan R pada geser tunggal menurut **Tabel 4.10.1** adalah:

$$R \text{ (geser tunggal)} = mA_b F_v = 1(0.6013)30 = 18.0 \text{ kips/baut}$$

Kapasitas yang diijinkan pada tumpu bila deformasi sekitar lobang tidak diperhitungkan (ASD-J3.7) adalah:

$$R \text{ (tumpu)} = 1.2F_u dt = 1.2(65)(7/8)(5/8) = 42.7 \text{ kips/baut}$$

Harga gesernya adalah yang paling kecil dari keduanya (18.0 kips dan 42.7 kips), dengan demikian yang berpengaruh adalah:

$$R = 18.0 \text{ kips/baut}$$
$$T = (\text{Banyaknya baut})\ R = 4(18.0) = 72 \text{ kips}$$

Dengan demikian, beban layanan sebesar 75 kips akan membuat tegangan geser nominalnya akan melampaui harga yang diijinkan sebesar 30 ksi dengan sekitar 4% yang pada umumnya terlalu tinggi untuk bisa diterima. Perhatikan bahwa sambungan yang telah diselidiki dengan *Load and Resistance Factor Design* dalam **Contoh 4.8.1** ini diijinkan untuk menanggung beban sebesar 74.8 kips dengan asumsi bahwa beban hidup bekerja tidak lebih dari 75% beban layanan total. ■

■ Contoh 4.11.2

Selidikilah apakah sambungan dari **Gambar 4.8.1** dapat berfungsi sebagai sambungan gelincir-kritik (tipe gesekan) yang menanggung beban tarik layanan sebesar 41 kips. Sambungan tersebut terdiri dari empat baut A325 berdiameter $7/8$ inch dalam lobang standar yang menghubungkan pelat-pelat baja A572 Mutu 50 dengan kondisi permukaan Kelas A. Gunakan Spesifikasi ASD AISC.

Penyelesaian:

(*a*) Kapasitas batang tarik. Luas hitungan dalam **Contoh 4.8.1** adalah:

$$A_e = A_n = 2.50 \text{ inch}^2$$
$$A_g = 3.75 \text{ inch}^2$$

Dipindai dengan CamScanner

$$fa = \frac{T}{A_g} = \frac{41}{3.75} = 10.9 \text{ ksi} < [0.60F_y = 30 \text{ ks}] \text{ OK}$$

$$fa = \frac{T}{A_e} = \frac{41}{2.50} = 16.4 \text{ ksi} < [0.50 \text{ ksi } F_u = 32.5 \text{ ksi}] \text{ OK}$$

(*b*) Penyambung—resistansi gelinciran. Dari **Tabel 4.9.1** kapasitas $R_$ diijinkan pada geser tunggal adalah:

$$R \text{ (geser tunggal)} = mA_bF_v = 1(0.6013)17 = 10.2 \text{ kips/baut}$$

(*c*) Penyambung—kekuatan (yakni cek seandainya sebagai sambungan tumpu). Dari **Tabel 4.10.1**, kapasitas yang diijinkan R pada geser tunggal u ulir yang mungkin berada dalam bidang geser:

$$R \text{ (geser tunggal)} = mA_bF_v = 1(0.6013)21 = 12.6 \text{ kips/baut}$$

Kapasitas yang diijinkan dalam tumpu adalah:

$$R \text{ (tumpu)} = 1.2\ F_u dt = 1.2(65)\left(\frac{7}{8}\right)\left(\frac{6}{8}\right) = 42.7 \text{ kips}$$

(*d*) Kapasitas beban layanan yang diijinkan. Hasil di sini merupakan sit biasa, yakni bahwa kapasitas geser gelincir-kritik yang menentukan. Karena ha yang berkaitan dengan daya layanan ini sebesar 10.2 kips adalah lebih kecil d pada harga-harga yang berkaitan dengan kekuatan yakni sebesar 12.6 kips 42.7 kips, beban yang diijinkan adalah 10.2 kips/baut. Dengan demikian:

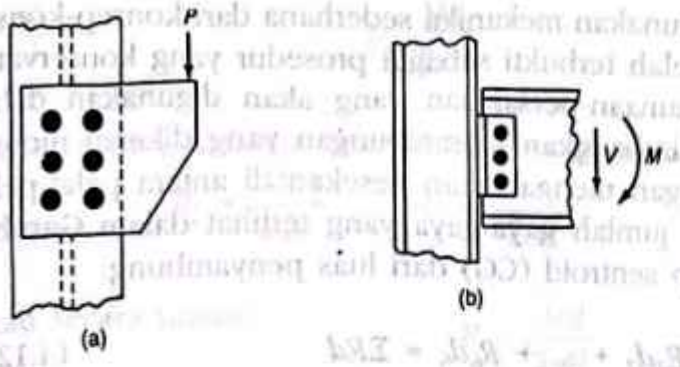
$$T = \text{(Banyaknya baut) } R = 4(10.2) = 40.8 \text{ kips}$$

Beban terpasang sebesar 41 kips pada hakikatnya merupakan beban layanan y diijinkan pada batang dengan sambungannya.

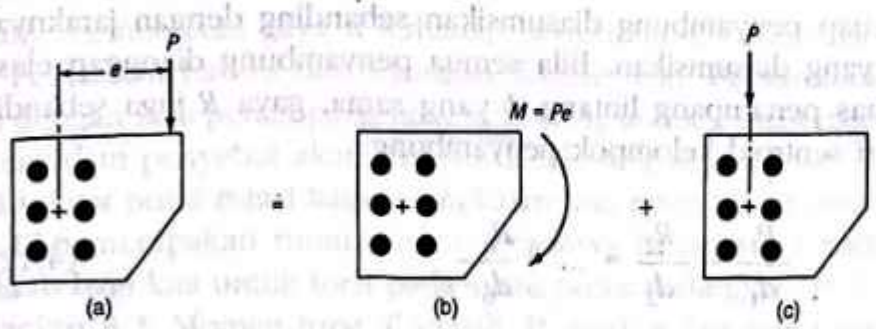
4.12 Geser Eksentrik

Bila beban P dikenakan pada suatu garis kerja yang tidak melalui pusat b kelompok baut, akan terjadi efek pembebanan eksentrik seperti **Gambar 4.1** Suatu beban P dengan eksentrisitas e, seperti **Gambar 4.12.2**, secara statik e valen dengan suatu momen sebesar P kali e ditambah beban konsentrik P y bekerja bersama-sama pada sambungan tersebut. Karena momen dan beban k sentrik sama-sama menimbulkan efek terhadap kelompok baut, situasi itu d but *geser eksentrik*.

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 4.12.1 Sambungan geser eksentrik tipikal.



Gambar 4.12.2 Kombinasi momen dan geser langsung.

Hanya dalam beberapa tahun terakhir ini saja telah dikerjakan beberapa karya eksperimental signifikan untuk mengevaluasi kekuatan simpul-simpul semacam itu. Pada hakikatnya, terdapat dua pendekatan bagi desainer: (1) analisis (vektor) elastik tradisional yang berasumsikan bahwa tidak ada gesekan dengan pelat yang rigid dan bahwa penyambungnya elastik; dan (2) analisis kekuatan ultimit (analisis plastik) di mana diasumsikan bahwa kelompok penyambung yang dibebani secara eksentrik akan berotasi di sekitar pusat rotasi seketika dan bahwa deformasi pada masing-masing penyambung sebanding dengan jaraknya dari pusat rotasi.

Karena Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] menyaratkan kapasitas (diijinkan dalam ASD dan merupakan kekuatan desain dalam LRFD) bagi penyambung namun tidak memberi spesifikasi mengenai cara analisis mana yang dapat digunakan oleh desainer, sejauh masih tetap rasional. Masing-masing pendekatan ini akan dibahas secara terinci dalam sisa bagian ini.

4.12.1 Analisis (Vektor) Elastik Tradisional

Selama bertahun-tahun, kelompok penyambung yang dibebani secara eksentrik dianalisis dengan memperhitungkan luas kelompok penyambung sebagai penampang lintang elastik yang dipengaruhi oleh geser dan puntir langsung. Tegangan yang diakibatkannya bersifat nominal dalam artian bahwa tegangan tersebut memiliki satuan tegangan (misalnya, psi) dan memberikan pedoman menuju keamanan namun tegangan tersebut bukanlah merupakan tegangan nyata karena beban layanan sebenarnya ditanggung oleh gesekan. Metode analisis elastik ini telah digu-

Dipindai dengan CamScanner

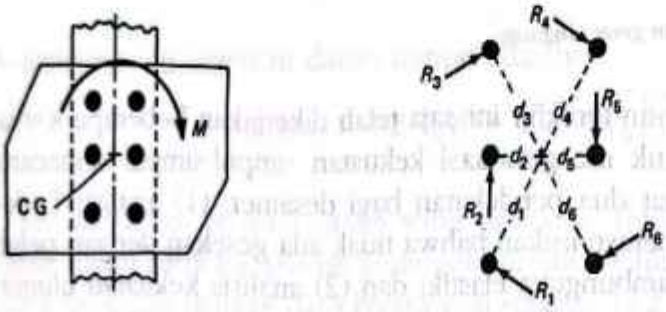
nakan karena metode ini menggunakan mekanika sederhana dari konsep-kons bahan dan karena metode ini telah terbukti sebagai prosedur yang konserva

Untuk mengembangkan persamaan-persamaan yang akan digunakan da prosedur ini, pertama-tama pertimbangkanlah sambungan yang dikenai mom M seperti **Gambar 4.12.3**. Dengan mengabaikan gesekan di antara pelat-pel momen tersebut sama dengan jumlah gaya-gaya yang terlihat dalam **Gamb 4.12.3*b*** dikalikan jarak terhadap sentroid (CG) dari luas penyambung:

$$M = R_1 d_1 + R_2 d_2 + \ldots + R_6 d_6 = \Sigma R d \qquad (4.12$$

Deformasi pada setiap penyambung diasumsikan sebanding dengan jaraknya dari pusat simpul yang diasumsikan. Bila semua penyambung dianggap elas dan berasal dari luas penampang lintang A yang sama, gaya R juga sebandi dengan jarak d dari sentroid kelompok penyambung:

$$\frac{R_1}{d_1} = \frac{R_2}{d_2} = \ldots = \frac{R_6}{d_6} \qquad (4.12.$$



(a) Sambungan (b) Gaya-gaya pada konektor

***Gambar 4.12.3** Sambungan momen murni*

Bila gaya-gaya ditulis kembali menurut R_1 dan d_1:

$$R_1 = \frac{R_1 d_1}{d_1}; \quad R_2 = \frac{R_1 d_2}{d_1}; \quad \ldots; \quad R_6 = \frac{R_1 d_6}{d_1} \qquad (4.12.$$

Substitusi **Persamaan 4.12.3** ke dalam **4.12.1** memberikan:

$$M = \frac{R_1 d_1^2}{d_1} + \frac{R_1 d_2^2}{d_1} + \ldots + \frac{R_1 d_6^2}{d_1} \qquad (4.12.$$

$$= \frac{R_1}{d_1}\left[d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \ldots + d_6^2 \right] \qquad (4.12.$$

$$= \frac{R_1}{d_1} \Sigma d^2$$

Maka dari itu, gaya pada penyambung 1 adalah:

Dipindai dengan CamScanner

$$R_1 \frac{Md_1}{\Sigma d^2} \qquad (4.12.5a)$$

dan dengan penalaran yang sama, gaya-gaya pada penyambung yang lain adalah:

$$R_2 = \frac{Md_2}{\Sigma d^2}\ ; \quad R_3 = \frac{Md_3}{\Sigma d^2}\ ; \quad \ldots\ ; \quad R_6 = \frac{Md_6}{\Sigma d^2} \qquad (4.12.5b)$$

atau secara umum:

$$R = \frac{Md}{\Sigma d^2} \qquad (4.12.6)$$

yang memberikan gaya R terhadap penyambung pada jarak d dari pusat rotasi.

Perhatikan bahwa bila tegangan dikehendaki, **Persamaan 4.12.6** dapat dibagi dengan luas penampang lintang baut A_b untuk memberikan tegangan $f = R/A_b$. Kemudian penyebut akan menjadi ΣAd^2 yang merupakan momen inersia polar J di sekitar pusat rotasi bagi serangkaian luas penampang lintang baut. **Persamaan 4.12.6** merupakan rumus-rumus mekanika bahan yang pada hakikatnya cukup akrab bagi kita untuk torsi pada suatu poros melingkar, Tr/J, yang dibahas dalam **Bagian 8.2**. Momen torsi T adalah M; jarak r dari pusat rotasi ke titik di mana tegangan tersebut dihitung adalah jarak d.

Biasanya cukup menyenangkan bekerja dengan komponen-komponen horisontal dan vertikal dari R, yakni R_x dan R_y, yang diperoleh bila komponen horisontal dan vertikal dari d, yakni x dan y, digunakan dalam **Persamaan 4.12.6**. Dari **Gambar 4.12.4**:

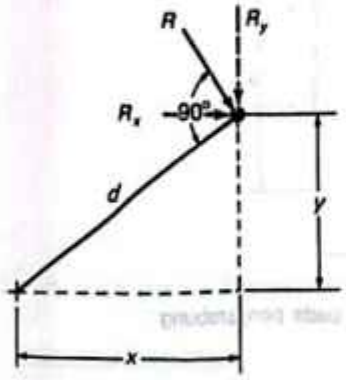
$$R_x = \frac{y}{d} R \quad \text{dan} \quad R_y = \frac{x}{d} R \qquad (4.12.7)$$

Substitusi **Persamaan 4.12.7** ke dalam **4.12.6** akan memberikan:

$$R_x = \frac{My}{\Sigma d^2} \quad \text{dan} \quad R_y = \frac{Mx}{\Sigma d^2} \qquad (4.12.8)$$

Dengan memperhatikan bahwa $d^2 = x^2 + y^2$, **Persamaan 4.12.8** dapat ditulis:

$$R_x = \frac{My}{\Sigma x^2 + \Sigma y^2} \qquad (4.12.9a)$$



Gambar 4.12.4 Kemampuan gerak horisontal dan vertikal komponen-komponen R

Dipindai dengan CamScanner

$$R_y = \frac{Mx}{\Sigma x^2 + \Sigma y^2} \qquad (4.12.9b)$$

Dengan mengambil jumlah vektor R_x dan R_y, gaya total R pada penyambung menjadi:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \qquad (4.12.10)$$

Untuk menghitung gaya total pada penyambung dalam sambungan geser eksentrik seperti **Gambar 4.12.2*a***, gaya geser langsung R_v adalah:

$$R_v = \frac{P}{\Sigma N} \qquad (4.12.11)$$

di mana N merupakan banyaknya penyambung dalam kelompok tersebut. Kemudian, gaya resultan R menjadi:

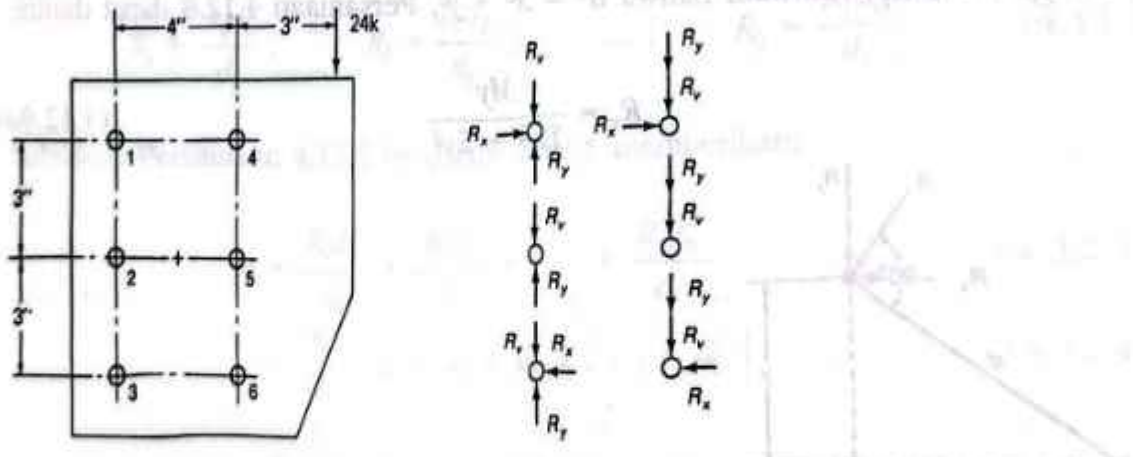
$$R = \sqrt{[R_y + R_v]^2 + R_x^2} \qquad (4.12.12)$$

■ **Contoh 4.12.1**

Gunakan metode (vektor) elastik untuk menghitung gaya maksimum R pada baut mana pun dari kelompok baut pada **Gambar 4.12.5** yang terbebani secara eksentrik. Semua baut berukuran sama.

Penyelesaian:

Dari **Gambar 4.12.5** dapat dilihat bahwa penyambung pada sebelah kanan atas dan bawah mendapat tekanan yang paling tinggi. Karena kedua penyambung ini mendapatkan tegangan yang sama, hanya salah satu saja yang perlu diselidiki; kita ambil penyambung sebelah kanan atas. Eksentrisitas e, seperti yang terukur dari sentroidnya (pusat rotasi yang diasumsikan), adalah:



(a) (b) Gaya-gaya yang bekerja pada penyambung

Gambar 4.12.5 *Contoh 4.12.1*

Dipindai dengan CamScanner

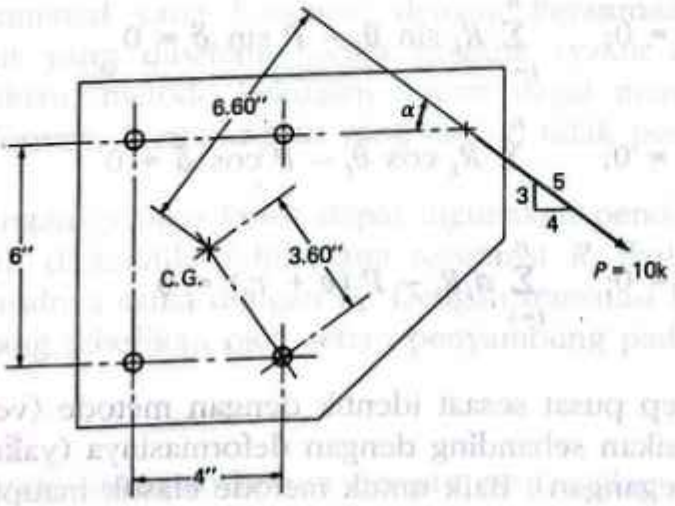
$$e = 3 + 2 = 5 \text{ inch}$$
$$M = 24(5) = 120 \text{ inch–kips}$$
$$\Sigma x^2 + \Sigma y^2 = 6(2)^2 + 4(3)^2 = 60 \text{ inch}^2$$
$$R_x = \frac{My}{\Sigma x^2 + \Sigma y^2} = \frac{120(3)}{60} = 6.0 \text{ kips} \rightarrow$$
$$R_y = \frac{Mx}{\Sigma x^2 + \Sigma y^2} = \frac{120(2)}{60} = 4.0 \text{ kips} \downarrow$$
$$R_v = \frac{P}{\Sigma N} = \frac{24}{6} = 4.0 \text{ kips} \downarrow$$
$$R = \sqrt{[R_y + R_v]^2 + R_x^2}$$
$$R = \sqrt{(4.0 + 4.0)^2 + (6.0)^2} = 10.0 \text{ kips}$$ ■

■ Contoh 4.12.2

Gunakan metode (vektor) elastik untuk menghitung gaya R pada baut kanan paling atas dalam kelompok baut yang dibebani secara eksentrik dari **Gambar 4.12.6*a***. Semua baut berukuran sama.

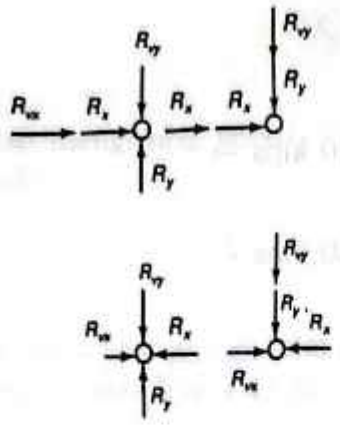
Penyelesaian:

$$e = 6.6 \text{ inch}$$
$$M = 10(6.60) = 66.0 \text{ inch kips}$$
$$\Sigma d^2 = 4(3.60)^2 = 51.8 \text{ inch}^2$$
$$R_x = \frac{My}{\Sigma d^2} = \frac{66.0(2)}{51.8} = 3.82 \text{ kips} \rightarrow$$
$$R_y = \frac{Mx}{\Sigma d^2} = \frac{66.0(2)}{51.8} = 2.55 \text{ kips} \downarrow$$
$$R_{ux} = \frac{P \cos \alpha}{\Sigma N} = \frac{10(0.8)}{4} = 2.00 \text{ kips} \rightarrow$$



(a)

Dipindai dengan CamScanner



(b) Gaya-gaya yang bekerja pada penyambung

Gambar 4.12.6 *Contoh 4.12.2*

$$R_{vy} = \frac{P \sin \alpha}{\Sigma N} = \frac{10(0.6)}{4} = 1.50 \text{ kips} \downarrow$$

$$R = \sqrt{[R_y + R_{vy}]^2 + [R_x + R_{vx}]^2}$$

$$R = \sqrt{(2.55 + 1.50)^2 + (3.82 + 2.00)^2} = 7.09 \text{ kips}$$

4.12.2 Analisis Kekuatan Ultimit

Metode ini, yang biasa disebut juga sebagai analisis plastik, dewasa ini oleh *Gui* [3.1] dikenal sebagai yang paling rasional.

Dalam metode ini, terdapat pengertian bahwa beban eksentrik P menyebabka efek rotasi maupun translasi pada kelompok penyambung. Translasi dan rota tersebut dapat direduksi menjadi sebuah rotasi murni di sekitar suatu titik yan didefinisikan sebagai pusat rotasi sesaat (*lihat* **Gambar 4.12.7**).

Persyaratan keseimbangannya adalah sebagai berikut:

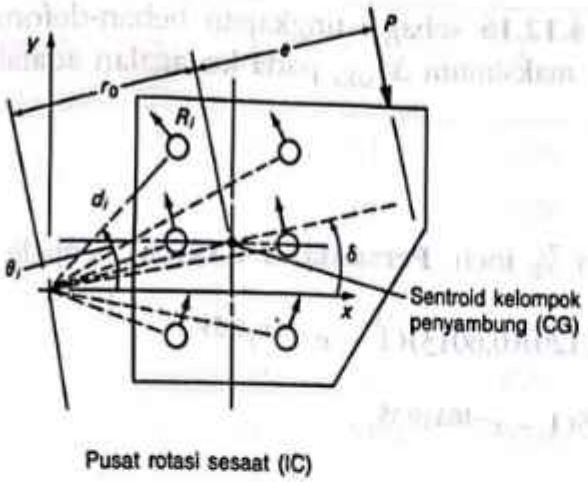
$$\Sigma F_H = 0; \quad \sum_{i=1}^{n} R_i \sin \theta_i - P \sin \delta = 0 \qquad (4.12.1)$$

$$\Sigma F_V = 0; \quad \sum_{i=1}^{n} R_i \cos \theta_i - P \cos \delta = 0 \qquad (4.12.1)$$

$$\Sigma M = 0; \quad \sum_{i=1}^{n} d_i R_i - P(e + r_0) = 0 \qquad (4.12.1)$$

Sebenarnya, konsep pusat sesaat identik dengan metode (vektor) elastik bi resistansi R_i diasumsikan sebanding dengan deformasinya (yakni tegangan ya sebanding dengan regangan). Baik untuk metode elastik maupun metode kek atan, deformasi adalah sebanding dengan jarak d_i dari pusat rotasi sesaat.

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 4.12.7 Pusat rotasi sesaat

Untuk analisis kekuatan, telah digunakan dua pendekatan [3.1]. Untuk sambungan *tipe tumpu*, gelincir diabaikan sehingga *deformasi* dari masing-masing penyambung sebanding dengan jaraknya dari pusat sesaat. Resistansi dari setiap penyambung berkaitan dengan deformasinya menurut hubungan deformasi-bebannya. Fisher [4.21] mengusulkan suatu ungkapan yang oleh Crawford dan Kulak [4.17] digunakan untuk beban R vs deformasi Δ:

$$R_i = R_{ult}(1 - e^{-10\Delta})^{0.55} \tag{4.12.16}$$

di mana $R_{ult} = \tau_u A_b$. Koefisien 10 dan 0.55 ditentukan secara eksperimental dan Δ maksimum pada kegagalan adalah sekitar 0.34 inch [3.1]. Perhatikan bahwa e dalam **Persamaan 4.12.16** merupakan basis Naperian (2.718) dan bukan eksentrisitas. Untuk baut A325, kekuatan geser ultimit τ_u mendekati 70% dari kekuatan tarik (minimum 120 ksi). Sebenarnya hasil eksperimental yang diperoleh secara langsung $\tau_u A_b$ adalah sebesar 74 kips untuk baut A325 berdiameter $^3/_4$ inch pada geser ganda yang membuat τ_u sama dengan 0.7 dari 120 ksi.

Hasil eksperimental yang berkaitan dengan **Persamaan 4.12.16** menggunakan baut-baut yang dibebani secara simetrik (yakni dalam geser ganda); meskipun demikian, metode kekuatan umum dapat menggunakan hubungan beban R vs deformasi Δ *mana pun* yang cocok, tidak perlu harus **Persamaan 4.12.16**.

Untuk sambungan *gelincir-kritik*, dapat digunakan pendekatan metode kekuatan yang sudah dimodifikasi bilamana resistansi R_i dari setiap penyambung adalah sama, misalnya sama dengan R_s. Dengan transmisi beban gesekan, resistansi gesekan yang diberikan oleh setiap penyambung pada dasarnya sama.

■ Contoh 4.12.3

Lukiskanlah metode kekuatan umum dengan menentukan beban kekuatan nominal P_n yang dapat dikenakan terhadap kelompok penyambung dari **Gambar**

Dipindai dengan CamScanner

4.12.5. Gunakan **Persamaan 4.12.16** sebagai ungkapan beban-deformasi, dan asumsikanlah bahwa deformasi maksimum Δ_{maks} pada kegagalan adalah sebesar 0.34 inch.

Penyelesaian:
Untuk baut A325 berdiameter $\frac{7}{8}$ inch, **Persamaan 4.12.16** menjadi:

$$R_i = 0.7(120)(0.6013)(1 - e^{-10\Delta})^{0.55}$$

$$= 50.5(1 - e^{-10\Delta})^{0.55}$$

Beban dikenakan dalam arah y; maka dari itu $\Delta = 0$ (**Gambar 4.12.7**). Dengan menggunakan y_i/d_i untuk sin θ_i dan x_i/d_i untuk cos θ_i, **Persamaan 4.12.13** melalui **4.12.15** menjadi:

$$\Sigma R_i \frac{y_i}{d_i} = 0 \tag{4.12.17}$$

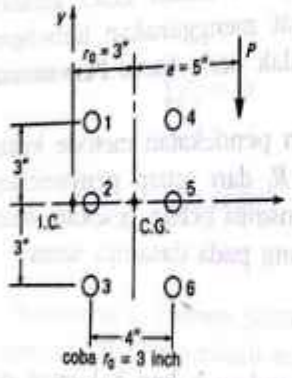
$$\Sigma R_i \frac{x_i}{d_i} = P_n \tag{4.12.18}$$

$$\Sigma R_i d_i = P_n (e + r_o) \tag{4.12.19}$$

Demikian pula, asumsi deformasi dasarnya adalah:

$$\Delta_i = \frac{d_i}{d_{maks}} \Delta_{maks} = \frac{d_i}{d_{maks}} (0.34)$$

(*a*) Karena dibutuhkan suatu proses iteratif untuk menyelesaikan persamaan-persamaan (**4.12.17** sampai **4.12.19**), misalkan coba pertama adalah $r_0 = 3$ inch (*lihat* **Gambar 4.12.8**).



Gambar 4.12.8 Metode kekuatan untuk Contoh 4.12.3

Dipindai dengan CamScanner

Penyambung	x_i	y_i	d_i	Δ_i	R_i	$\frac{R_i x_i}{d_i}$	$R_i D_i$
1	1	3	3.162	0.184	45.09	14.53	145.3
2	1	0	1.0	0.058	32.2	32.23	32.2
3	1	−3	3.162	0.184	45.09	14.53	145.3
4	5	3	5.831	0.340	49.6	42.51	289.1
5	5	0	5.0	0.292	49.0	48.99	244.9
6	5	−3	5.831	0.340	49.6	42.51	289.1
						195.30	1145.9

Persamaan 4.12.18: $P_n = 195$ kips

Persamaan 4.12.19: $P_n = \frac{1145.9}{8}$ 143 kips

Karena harga-harga tersebut tidak identik, dibutuhkan percobaan-percobaan lebih lanjut. Pada umumnya akan ditemukan bahwa P_n dari **Persamaan 4.12.19** relatif mendekati harga yang tepat meskipun **Persamaan 4.12.18** dan **4.12.19** memberikan harga-harga yang tidak terlalu dekat. Harga coba r_0 yang akan memberikan P_n di antara kedua harga tersebut namun mendekati dengan harga dari **Persamaan 4.12.19** akan membuat perhitungan berkonvergensi dengan cepat. Harga yang tepat adalah $r_0 = 2.06$ inch seperti dalam tabel berikut ini:

Penyambung	x_i	y_i	d_i	Δ_i	R_i	$\frac{R_i x_i}{d_i}$	$R_i d_i$
1	0.06	3	3.001	0.202	46.7	0.93	140.2
2	0.06	0	0.060	0.004	8.6	80.55	0.5
3	0.06	−3	3.001	0.202	46.7	0.93	140.2
4	4.06	3	5.048	0.340	49.6	39.87	250.3
5	4.06	0	4.060	0.273	48.7	48.68	197.6
6	4.06	−3	5.048	0.340	49.6	39.87	250.3
						138.85	979.0

Persamaan 4.12.18: $P_n = 139$ kips

Persamaan 4.12.19: $P_n = \frac{979.0}{7.06} = 139$ kips

Dengan demikian, $P_n = 139$ kips. ■

Berbagai studi [4.17, 4.18, 4.20, 4.22] telah menunjukkan bahwa analisis (plas-

Dipindai dengan CamScanner

tik) kekuatan ultimit merupakan pendekatan yang paling rasional untuk memperoleh kekuatan sambungan geser eksentrik. Analisis vektor (elastik) terbukti konservatif dengan membuat rasio antara kekuatan dan beban layanan berkisar dari 2.5 hingga 3.0. Meskipun demikian, karena metode elastik tidak dengan tepat menggambarkan perilaku yang sebenarnya, margin keamanan bervariasi dari satu kasus ke kasus yang lain sehingga dipandang konservatif.

Tabel "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS" yang diberikan dalam Manual AISC [1.7, 1.17] untuk geser eksentrik didasarkan atas konsep kekuatan ultimit yang dibicarakan dalam bab ini. Edisi pertama dari *Guide* [1.3] mengandung beberapa fungsi polinomial yang mendekati penyelesaian-penyelesaian teoretik untuk baut pada satu atau dua baris penyambung. Brandt [4.19] telah memberikan suatu cara praktis untuk membuat penyelesaian umum terhadap masalah-masalah tersebut.

4.12.3 Sambungan Gelincir-Kritik

Prosedur kekuatan yang sama dianjurkan [3.1] untuk sambungan gelincir-kritik sebagai sambungan tipe tumpu. Karena resistansi gelincir merupakan persyaratan daya layanan, bukan persyaratan kekuatan, masuk akallah menyelidiki kekuatan sambungan tipe mana pun dengan pendekatan kekuatan ultimit yang dibicarakan di atas.

Suatu prosedur yang lebih disukai untuk menganalisis sambungan gelincir-kritik pada beban layanan adalah menganggap resistansi R_i sebagai konstan untuk semua penyambung, misalnya, pada "tegangan geser" maksimum yang dapat diterima F_v (*lihat* **Tabel 4.9.1** dari RCSC [4.7]) seberapa pun besarnya. Karena baut pada simpul gelincir-kritik harus dipasang dengan gaya tarik awal, akan ada cengkeraman yang cukup seragam di antara bagian-bagian yang disambungkan.

■ **Contoh 4.12.4**

Ulangi **Contoh 4.12.3** (**Gambar 4.12.5**) dengan menggunakan $R_i = R_s$ seperti pada sambungan gelincir-kritik yang menggunakan pendekatan pusat sesaat, serupa dengan metode kekuatan ultimit.

Penyelesaian:

Untuk $R_i = R_s$ dan $\delta = 0$, **Persamaan 4.12.13** sampai **4.12.15** menjadi:

$$R_s \Sigma \frac{y_i}{d_i} = 0 \tag{4.12.20}$$

$$R_s \Sigma \frac{x_i}{d_i} - P = 0 \tag{4.12.21}$$

$$R_s \Sigma d_i - P(e + r_0) = 0 \tag{4.12.22}$$

Dipindai dengan CamScanner

Coba r_0 = 2 inch. Dengan mengacu **Persamaan 4.12.8**:

Penyambung	x_i	y_i	d_i	$\frac{X_i}{d_i}$
1	0	3	3.0	0
2	0	0	0	0
3	0	−3	3.0	0
4	4	3	5.0	0.8
5	4	0	4.0	1.0
6	4	−3	5.0	0.8
			20.0	2.6

Persamaan 4.12.21: $$P = R_s \Sigma \frac{x_i}{d_i} = 2.6R_s$$

Persamaan 4.12.22: $$P = \frac{R_s \Sigma d_i}{e + r_0} = \frac{R_s(20)}{7} = 2.86R_s$$

Untuk asumsi ini, penyambung No. 2 berada pada pusat rotasi dan dari sebab itu tidak terlibat dalam **Persamaan 4.12.22**. Demikian pula, penyambung No.2 diasumsikan *tidak* mempunyai andil apa pun terhadap **Persamaan 4.12.21**. Bila r_0 diasumsikan sedikit lebih besar daripada 2.0, **Persamaan 4.12.21** akan memberikan $P = 3.6R_s$ karena $x_i/d_i = 1.0$ untuk penyambung No. 2. Bila r_0 diasumsikan sedikit lebih kecil dari 2.0, **Persamaan 4.12.21** akan memberikan $P = 1.6R_s$ karena $x_i/d_i = -1$ untuk penyambung yang sama. Dengan demikian, harga $P = 2.86R_s$ dari **Persamaan 4.12.22** dapat diterima sebagai jawaban yang dimaksud (yakni r_0 = 2.0 inch). Bila digunakan suatu faktor keamanan, R_s dapat ditafsirkan sebagai harga yang diijinkan untuk sambungan kritik gelincir dan P beban kerja yang aman. Untuk penyambung berdiameter $^7/_8$ inch, dengan F_u = 17 ksi (*lihat* **Tabel 4.9.1**), pada geser tunggal akan didapatkan:

$$R_{ss} = 17(0.6013) = 10.2 \text{ kips}$$

dan kapasitas beban layanannya akan menjadi:

$$P = 2.86(10.2) = 29.2 \text{ kips}$$ ■

4.12.4 Load and Resistance Factor Design

■ **Contoh 4.12.5**

Bandingkan kapasitas-kapasitas beban layanan P dari sambungan geser eksentrik pada **Gambar 4.12.5** bila diselidiki dengan berbagai metode. Selesaikanlah de-

Dipindai dengan CamScanner

ngan mengasumsikan sambung
ulir terpisah dari bidang geser, dan (*b*) sambungan gelincir-kritik (tipe gesek
Asumsikan beban hidupnya sebesar 80% dan beban mati 20% dari beban t
Asumsikan pelatnya cukup tebal sehingga tumpu pada pelat tidak berpenga
Gunakan baut A325 berdiameter $\frac{7}{8}$ inch dan Spesifikasi *Load and Resist*
Factor Design AISC.

Penyelesaian:

(*a*) Analisis elastik — sambungan tipe tumpu:

R = 10 kips (penyambung 4 dan 6 dalam **Contoh 4.12.1**)

Kekuatan desain ϕR_n dalam geser pada baut untuk sambungan tipe tumpu (A
X) adalah:

$$\phi R_n = \phi(0.60F_u^b)\, m A_b \qquad [4$$

$$= 0.65(0.60)(120)(1)0.6013 = 28.1 \text{ kips/baut}$$

Beban layanan terfaktor R_u adalah:

$$R_u = 1.2D + 1.6L = 1.2(2) + 1.6(8) = 15.2 \text{ kips}$$

Karena beban terfaktor (15.2 kips) pada penyambung kritik cukup jauh di ba
kekuatan desain sebesar 28.1 kips, beban P pada sambungan eksentrik dapa
tingkatkan secara proporsional. Dengan demikian:

$$P = 24(28.1/15.2) = 44.4 \text{ kips}$$

(*b*) Analisis elastik—sambungan gelincir-kritik. Kekuatan desain ϕR_n ad
tetap 28.1 kips/baut seperti hitungan pada (*a*). "Tegangan geser" F_v dari **Ta**
4.9.1 adalah 17 ksi untuk baut A325 dalam lobang standar. Dengan demik
kapasitas baut beban layanan untuk resistansi gelincir adalah:

$$R \text{ yang diijinkan} = F_v m A_b = 17(1)0.6013 = 10.2 \text{ kips/baut}$$

Beban maksimum hitungan per baut adalah 10 kips, sangat dekat dengan b
untuk sambungan kritik gelincir. Kekuatan dalam geser tidak menentukan. Den
demikian:

$$P = 24(10.2/10) = 24.5 \text{ kips}$$

(*c*) Kekuatan ultimit—sambungan tipe tumpu. Kekuatan desain ϕR_n tetap s
sar 28.1 kips/baut seperti hitungan (*a*) yang berarti bahwa resistansi nom
maksimum R_n per baut adalah $28.1/\phi = 43.2$ kips. Dengan demikian, P_n
Contoh 4.12.3 harus direduksi dengan rasio 43.2 ke R_t maksimum (yakni
kips). Dengan demikian,

Dipindai dengan CamScanner

$$\phi P_n = 0.65(139)\ (43.2/49.6) = 78.7 \text{ kips}$$

Beban terfaktor pada sambungan tersebut adalah:

$$P_u = 1.2(0.2P) + 1.6(0.8P) = 1.52P$$

Bila P_u disamakan dengan ϕP_n akan diperoleh:

$$P = 78.7/1.52 = 51.8 \text{ kips}$$

(*d*) Pusat sesaat—sambungan gelincir-kritik. Kapasitas beban layanan dari **Contoh 4.12.4** adalah:

$$P = 29.2 \text{ kips}$$

(*e*) Tabel-tabel Manual AISC [1.17], "ECCENTRIC LOAD ON FASTENER GROUPS" —sambungan tipe tumpu. Karena jarak antar baut secara horisontal adalah 4 inch, tabel-tabel AISC tidak dapat diterapkan begitu saja. Namun kita *bisa* meng-interpolasi di antara TABEL XI untuk 3 inch dan TABEL XII untuk $5^1/_2$ inch.

x_0 = 5 inch	TABEL XI	TABEL XII
n = 3 baut	(p. 5-66)	(p. 5-69)
	Sudut = 0°	Sudut = 0°
Koefisien C =	2.59	2.97

Diinterpolasi $C = 2.59 + (2.97 - 2.59)(1/2.5) = 2.74$

$$\phi P_n = C\phi r_v$$

di mana $\phi r_v = \phi R_n$ = kekuatan desain untuk satu penyambung. Dengan demikian:

$$\phi P_n = 2.74(28.1) = 77.0 \text{ kips}$$
$$P = 77.1/1.52 = 50.7 \text{ kips}$$

Dalam hal ini, kekuatan desain terinterpolasi lebih kecil daripada harga hitungan dalam **Contoh 4.12.3**; suatu hasil konservatif. Secara umum, karena sudut gaya-gaya resultan pada penyambung berubah dengan adanya perubahan pada susunan baut, interpolasi hendaknya tidak digunakan. Interpolasi di atas hanya digunakan sebagai sebuah ilustrasi dari makna yang terdapat dalam istilah-istilah dalam tabel-tabel Manual AISC.

(*f*) tabel-tabel Manual AISC [1.17]—sambungan gelincir-kritik. Koefisien C ter-interpolasi = 2.74 dari (*e*) dikalikan dengan kapasitas beban layanan (10.2 kips) per baut dari (*b*). Dengan demikian:

$$P = 2.74(10.2) = 27.9 \text{ kips}$$

Dipindai dengan CamScanner

(g) Rangkuman:

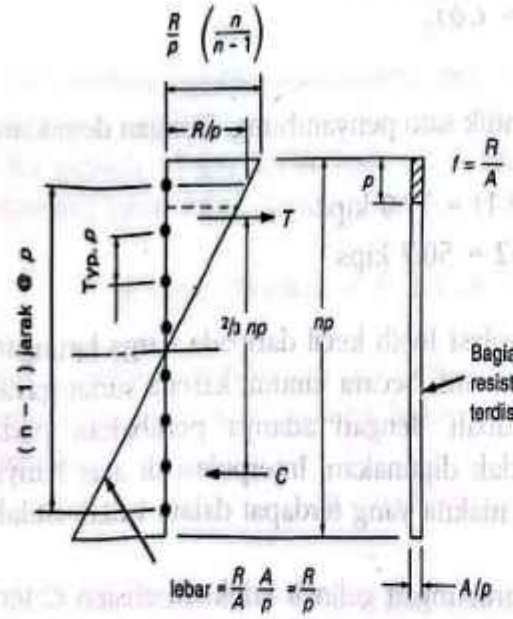
Prosedur	Beban Tipe-Pikul P	Beban Kritik-Gelincir P
Metode (vektor) elastik	44.4 kips	24.5 kips
Analisis kekuatan	51.8 kips	–
Pusat sesaat	–	29.2 kips
Manual AISC–diinterpolasi	50.7 kips	27.9 kips

Dengan demikian, dapat kita perhatikan bahwa metode (vektor) elastik menghasilkan hasil yang paling konservatif. ■

4.12.5 *Formula Desain untuk Momen pada Barisan Tunggal Penyambung*

Manual AISC [1.7, 1.17] dalam bagiannya "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS" memberikan serangkaian tabel yang memungkinkan desainer untuk menentukan banyaknya konektor yang dibutuhkan untuk suatu beban dan eksentrisitas tertentu. Dalam kasus khusus di mana tabel-tabel tersebut tidak berlaku, atau bila tabel belum tersedia, dibutuhkan suatu metode alternatif sederhana. Pengembangan berikut ini dari Shedd* memberikan formula sederhana yang berguna.

Perhatikan suatu barisan tunggal penyambung n yang berjarak sama satu sama lain yang hanya dipengaruhi momen saja seperti **Gambar 4.12.9**. Karena dengan



Gambar 4.12.9 Momen pada sebuah barisan tunggal penyambung

*Thomas C. Shedd, *Structural Design in Steel* (John Wiley & Sons, New York 1934), p. 287

Dipindai dengan CamScanner

jarak antar penyambung yang sama, resistansi penyambung seragam dari atas ke bawah, menurut **Persamaan 4.12.6**, $R = Md/(\Sigma d^2)$, gayanya akan berubah secara linear seperti **Gambar 4.12.9**.

Dengan mengasumsikan R merupakan gaya pada penyambung yang paling luar dan bahwa R tersebut mewakili akumulasi tegangan yang akan terjadi pada bagian segi-empat penahan sepanjang jarak p, kita dapat menyebutkan beban rata-rata per inch tinggi pada penyambung yang paling luar sebagai R/p.

Dengan menggunalan segitiga-segitiga serupa, beban per inch pada serat terluar dapat ditentukan:

$$\text{Harga serat terluar} = \frac{R}{p}\left(\frac{n}{n-1}\right) \tag{4.12.23}$$

Gaya tariknya merupakan daerah segitiga yang diwakili oleh diagram gaya per inch: diagram,

$$T = \frac{1}{2}\left(\frac{np}{2}\right)\left(\frac{R}{p}\right)\left(\frac{n}{n-1}\right) = \frac{Rn^2}{4(n-1)} \tag{4.12.24}$$

Momen resistan internalnya adalah:

$$M = T\left(\frac{2}{3}\,np\right) \tag{4.12.25}$$

Substitusi dari **Persamaan 4.12.24** ke dalam **4.12.25** memberikan:

$$M = \frac{Rn^2}{4(n-1)}\left(\frac{2}{3}\,np\right) = \frac{Rn^3p}{6(n-1)} \tag{4.12.26}$$

Dengan menyelesaikan **Persamaan 4.12.26** untuk n^2 akan diperoleh:

$$n = \sqrt{\frac{6M}{Rp}\left(\frac{n-1}{n}\right)} \tag{4.12.27}$$

yang sebagai pendekatan pertama menjadi:

$$n = \sqrt{\frac{6M}{Rp}} \tag{4.12.28}$$

yang dianjurkan untuk digunakan dalam desain.

Karena **Persamaan 4.12.28** hanya untuk momen saja yang bekerja pada sebuah barisan tunggal penyambung, harga numerik untuk R yang akan digunakan di dalamnya harus disesuaikan untuk memperhitungkan geser langsung dan untuk lebih dari satu baris penyambung. Dianjurkan untuk menggunakan R efektif yang sudah direduksi untuk efek geser langsung dan dianjurkan menggunakan R efektif yang telah ditingkatkan untuk efek dari penyebaran lateral.

Dipindai dengan CamScanner

Untuk penyebaran lateral, gunakanlah suatu pengali pada R sebesar 1.0 untuk satu baris sampai dengan sekitar 2.0 untuk deretan persegi konektor.

Formula-formula lain yang lebih rumit telah dikembangkan pula untuk menghitung tegangan maksimum atau gaya pada penyambung, namun toh belum ada penyelesaian langsung untuk mendapatkan banyaknya konektor atau banyaknya baris yang mungkin dari persamaan-persamaan semacam itu.

■ **Contoh 4.12.6**

Tentukan banyaknya baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch yang dibutuhkan untuk sebaris vertikal penyambung Ⓐ—Ⓐ pada **Gambar 4.12.10**. Asumsikan sebagai sambungan tipe tumpu dengan ulir pada bidang geser (A325-N). Gunakan *Load and Resistance Factor Design*.

Penyelesaian:

(*a*) Beban terfaktor. Dengan menggunakan persamaan gaya berat **1.8.3**:

$$P_u = 1.2(7) + 1.6(41) = 74 \text{ kips}$$

(*b*) Kekuatan desain dari sebuah penyambung pada sambungan tipe tumpu:

$$\phi R_n = \phi(0.45F_u^b)mA_b \quad \text{(kekuatan geser—geser ganda)}$$

$$= 0.65(0.45)(120)(2)(0.601) = 42.2 \text{ kips} \quad \text{(kontrol)}$$

$$\phi R_n = \phi(2.4F_u dt) \quad \text{(kekuatan tumpuan)}$$

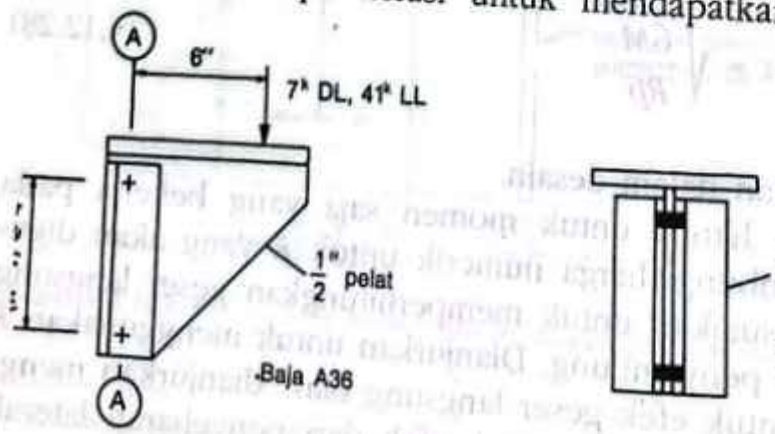
$$= 0.75(2.4)(58)(0.875)0.5 = 45.7 \text{ kips}$$

(*c*) Taksirlah banyaknya baut yang dibutuhkan dengan **Persamaan 4.12.28**:

$$n = \sqrt{\frac{6M}{Rp}} = \sqrt{\frac{6M_u}{\phi R_n p}} = \sqrt{\frac{6(74)(6)}{42.2(4)}} = 4.0$$

Harga R (di sini ϕR_n) *belum* disesuaikan bagi efek geser langsung; dicoba 4 penyambung.

(*d*) Cek cukup tidaknya dengan analisis kekuatan ultimit umum. Dimulai dengan asumsi bahwa pusat sesaat adalah 3 inch di kiri garis vertikal penyambung, dibutuhkan beberapa iterasi untuk mendapatkan hasil yang memuaskan dari



Gambar 4.12.10 Contoh 4.12.6

Dipindai dengan CamScanner

Persamaan 4.12.17 sampai **4.12.19**. Hasil akhirnya ditabulasikan di bawah ini. Dapat dilihat bahwa mungkin dibutuhkan iterasi yang lumayan jumlahnya untuk mendapatkan harga P_n dari **Persamaan 4.12.18** dan **4.12.19** yang benar-benar sama, meskipun asumsi awal dari $r_0 = 3$ inch memberikan $P_n = 111$ kips dari **Persamaan 4.12.19**. Penulis menemukan bahwa ternyata percobaan pertama pun dapat memberikan pendekatan yang masuk akal terhadap jawaban yang diinginkan.

Verifikasikan sehingga jawabannya adalah $r_0 = 2.55$ inch ke sebelah kiri penyambung:

Penyambung	x_i	y_i	d_i	Δ_i	R_i	$\frac{R_i x_i}{d_i}$	$R_i d_i$
1	2.55	6.00	6.519	0.340	49.6	19.39	323.2
2	2.55	2.00	3.241	0.169	45.2	35.53	146.3
3	2.55	−2.00	3.241	0.169	45.2	35.53	146.3
4	2.55	−6.00	6.519	0.340	49.6	19.39	323.2
						109.84	939.1

Persamaan 4.12.18: $P_n = 110$ kips
Persamaan 4.12.19: $P_n = 110$ kips (Bukti jawaban sama)

Perhatikan bahwa penyelesaian di atas berlaku untuk geser tunggal dan berasumsikan bahwa tidak ada ulir pada bidang geser (A325-X). Demikian pula; meskipun secara logis dihitung dengan **Persamaan 4.12.16**, R_i maksimum tidak dapat melampaui harga yang dispesifikasikan LRFD-Tabel J3.2 (berdasar pada $0.6F_u^b = 72$ ksi):

$$R_n = 0.6F_u^b A_b = 72.0(0.6013) = 43.3 \text{ kips}$$

Maka P_n harus direduksi dalam proporsi 43.3 kips terhadap R_i maksimum (yakni 49.6 kips) dalam tabel di atas:

$$P_n = 110(43.3/49.6) = 96 \text{ kips}$$

untuk A325-X dalam *geser tunggal.*

Untuk A325-N, harga ini harus dikalikan 2 untuk geser ganda, dan harus dikalikan 0.7 karena ada kemungkinan ulir terdapat pada bidang geser (A325-N).

Bandingkan ϕP_n terhadap P_u dengan harga ϕ untuk geser karena geser di sini mempengaruhi kekuatan penyambung:

$$[\ \phi P_n = 0.65(96)2(0.7) = 87 \text{ kips}] > [\ P_u = 74 \text{ kips}\ ] \quad \text{OK}$$

Hasil di atas menunjukkan bahwa 4 penyambung pada satu baris sudah lebih dari cukup. Penyelidikan (tidak diperlihatkan) untuk 3 penyambung menunjukkan bahwa 3 belum mencukupi.

Dipindai dengan CamScanner

(e) Cek cukup tidaknya dengan metode (vektor) elastik. Komponen geser lang-sung R_{us} dari **Persamaan 4.12.11** adalah:

$$R_{us} = \frac{P_u}{\Sigma N} = \frac{72}{4} = 18.0 \text{ kips} \downarrow$$

Komponen momen R_{ux} dari **Persamaan 4.12.19a** (perhatikan bahwa M sama dengan P_u kali e) adalah:

$$R_{ux} = \frac{P_u e y}{\Sigma x^2 + \Sigma y^2} \qquad [4.12.19a]$$

$$\Sigma x^2 + \Sigma y^2 = 2[(2)^2 + (6)^2] = 80 \text{ inch}^2$$

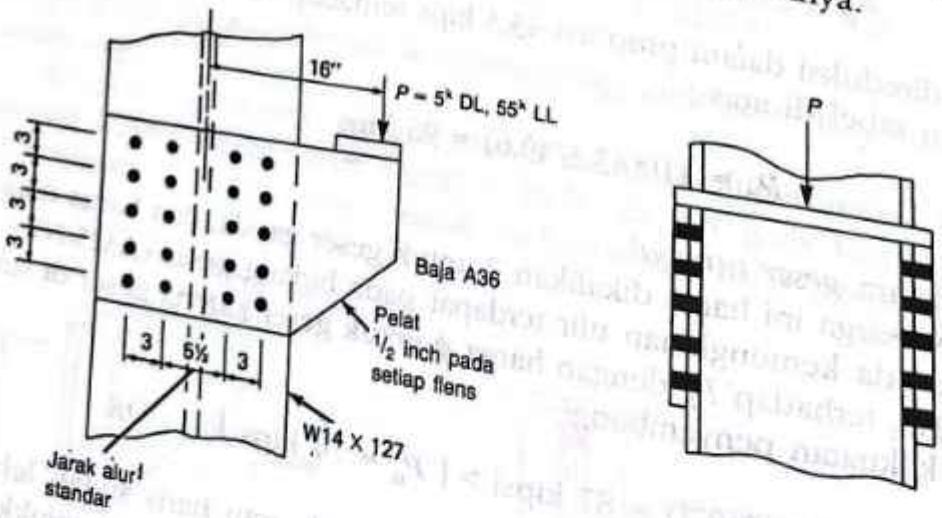
$$R_{ux} = \frac{72(6)6}{80} = 32.4 \text{ kips} \rightarrow$$

Kemudian, dengan **Persamaan 4.12.12** akan diperoleh resultan:

$$R_u = \sqrt{(18)^2 + (32)^2} = 36.7 \text{ kips} < [\phi R_n = 42.2 \text{ kips}]$$

Dengan demikian, beban terfaktor R_u pada baut yang dibebani paling berat tidak melampaui kekuatan desain $\phi R_n = 42.2$ kips untuk A325-N. Jadi, 4 penyambung sudah dapat diterima.

Harus diperhatikan bahwa jarak pinggir L yang diukur dalam arah gaya resultan harus memenuhi **Persamaan 4.7.13** (LRFD-J3.10) yang menyaratkan bahwa $L \geq R_u/(\phi F_u t)$. Perhatikan bahwa gaya terfaktor R_u pada baut yang dibebani paling berat digunakan sebagai P dalam persamaan aslinya.



Gambar 4.12.11 Sambungan geser eksentrik dari Contoh 4.12.7

Dipindai dengan CamScanner

Gunakan 4 — baut A325-N berdiameter $^7/_8$ inch dengan jarak @ 4 inch.

■ **Contoh 4.12.7**

Tentukan banyaknya baut A325 berdiameter $^3/_4$ inch dalam lobang standar yang dibutuhkan untuk pelat apit dari **Gambar 4.12.11** dengan mengasumsikan 4 baris vertikal. Gunakan sambungan gelincir-kritik dengan kondisi permukaan skala giling bersih (Kelas A) dan gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC.

Penyelesaian:

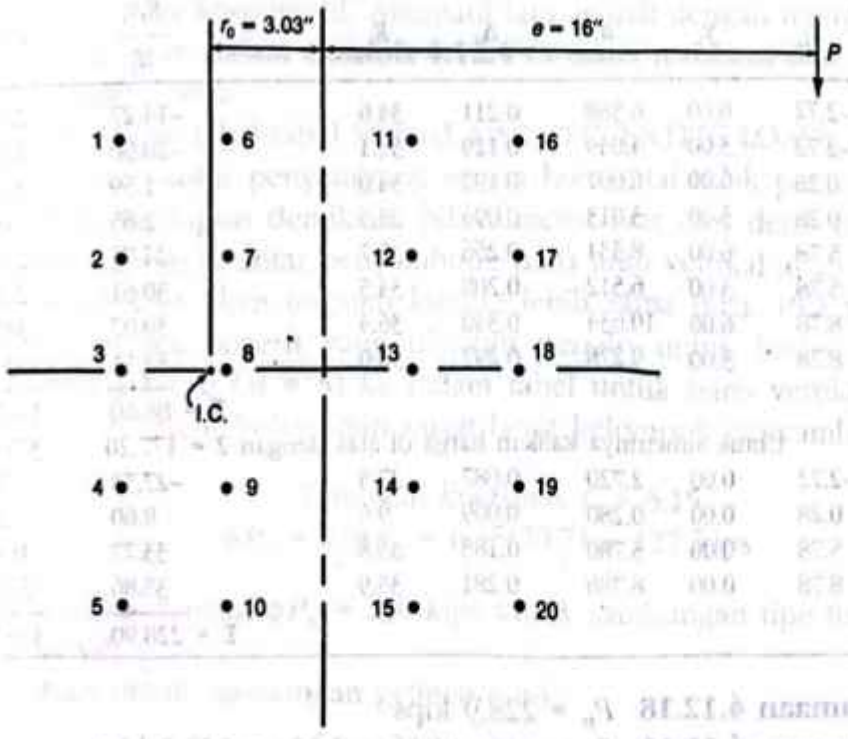
(*a*) Beban terfaktor. Karena separuh beban ditanggung oleh masing-masing pelat dalam situasi geser tunggal, gunakan separuh beban total dalam semua perhitungan untuk satu pelat. Gunakan persamaan beban gaya berat, **Persamaan 1.8.3**:

$$P_u = 1.2(5) + 1.6(55) = 94 \text{ kips (atau 47 kips/pelat)}$$

(*b*) Kekuatan desain dari sebuah penyambung pada sambungan gelincir-kritik. Untuk kekuatan, harga-harganya adalah seperti untuk sambungan tipe tumpu. Asumsikan bahwa tidak ada ulir berada dalam bidang geser (A325-X). Untuk geser tunggal:

$$\phi R_n = (0.60F_u^b)\, mA_b \qquad \text{(kekuatan geser — geser tunggal)}$$

$$= 0.65(0.60)(120)(1)(0.4418) = 20.7 \text{ kips (kontrol)}$$



Gambar 4.12.12 Penomoran penyambung untuk Contoh 4.12.7

Dipindai dengan CamScanner

$$\phi R_n = \phi(2.4F_u dt) \qquad \text{(kekuatan tumpu)}$$
$$= 0.75(2.4)(58)(0.75)0.5 = 39.2 \text{ kips}$$

Untuk resistansi gelincir, kapasitas beban layanan adalah:

$$R = mF_i A_b = 1.0(17)(0.4418) = 7.5 \text{ kips}$$

(*c*) Dengan **Persaman 4.12.28**, taksirlah banyaknya baut yang dibutuhkan. Diasumsikan bahwa resistansi gelincir pada beban layanan merupakan keadaan batas yang menentukan; kekuatan dicek kemudian:

$$n = \sqrt{\frac{6M}{Rp}} = \sqrt{\frac{6(30/4)(16)}{7.5(3)}} = 5.7$$

Pada persamaan di atas, beban layanan per pelat adalah 30 kips, dan beban per baris penyambung adalah 30/4 yang harus digunakan karena **Persamaan 4.12.28** berlaku untuk satu baris. Tidak ada penyesuaian pada R yang dibuat baik untuk geser langsung atau pun beberapa baris penyambung. Cobalah 5 baut per baris.

(*d*) Cek cukup tidaknya dengan analisis kekuatan ultimit umum. Dengan mengacu pada **Persamaan 4.12.12** dan dengan metode yang sama dengan yang dilukiskan dalam **Contoh 4.12.6**, harga r_0 ditemukan sebesar 3.03 inch ke kiri dari sentroid kelompok penyambung.

Penyambung	x_i	y_i	d_i	Δ_i	R_i	$\frac{R_i x_i}{d_i}$	$R_i d_i$
1	-2.72	6.00	6.588	0.211	34.6	-14.27	227.6
2	-2.72	3.00	4.049	0.129	31.1	-20.90	126.0
6	0.28	6.00	6.007	0.192	34.0	1.59	204.3
7	0.28	3.00	3.013	0.096	28.5	2.65	85.8
11	5.78	6.00	8.331	0.266	35.7	24.74	297.1
12	5.78	3.00	6.512	0.208	34.5	30.61	224.6
16	8.78	6.00	10.634	0.340	36.4	30.07	387.3
17	8.78	3.00	9.278	0.297	36.0	34.11	334.5
						Σ = 88.60	1887.2
			Untuk simetrinya kalikan harga di atas dengan 2			= 177.20	3774.4
3	-2.72	0.00	2.720	0.087	27.5	-27.53	74.9
8	0.28	0.00	0.280	0.009	9.6	9.60	2.7
13	5.78	0.00	5.780	0.185	33.8	33.77	195.2
18	8.78	0.00	8.780	0.281	35.9	35.86	314.9
						Σ = 228.90	4362.1

Persamaan 4.12.18: P_n = 228.9 kips
Persamaan 4.12.19: P_n = 4362.1/(16 + 3.03) = 229.2 kips

Perhatikan bahwa penyelesaian di atas berlaku untuk geser tunggal dan ber-

Dipindai dengan CamScanner

asumsi bahwa tidak ada ulir pada bidang geser (A325-X). Sebagai tambahan, anggaplah bahwa LRFD membatasi kekuatan maksimum sebuah baut dalam geser sampai:

$$P_n = 0.6F_u^b A_b = 0.6(120)0.4418 = 31.8 \text{ kips}$$

Dengan mereduksi P_n dari analisis kekuatan:

$$P_n = 229(31.8/36.4) = 200 \text{ kips}$$

Bandingkan ϕP_n terhadap P_u dengan harga ϕ untuk geser karena geser mempengaruhi kekuatan penyambung:

$$[\ \phi P_n = 0.65(200) = 130 \text{ kips }] > [\ P_u = 47 \text{ kips }] \quad \text{OK}$$

Kekuatan lebih dari cukup; tidak diharapkan bahwa kekuatan akan menentukan pada sambungan penahan gelincir dengan lobang standar dan kondisi permukaan Kelas A ini. Hanya bila menggunakan kondisi permukaan dengan koefisien gelincir yang sangat tinggi akan terjadi kemungkinan nyata berpengaruhnya kekuatan.

(*e*) Dengan pendekatan analisis kekuatan namun dengan mereduksi kapasitas secara proporsional sehingga kapasitas ijin [7.5 kips dari bagian (*b*)] sambungan gelincir-kritik mencapai gaya (36.4 kips) pada penyambung yang mendapat pembebanan paling berat pada analisis kekuatan sambungan tipe tumpu tersebut, akan diperoleh kapasitas beban layanan sebesar:

$$P = 229(7.5/36.4) = 47.1 \text{ kips} > [30 \text{ kips yang dibutuhkan}]$$

Prosedur ini selalu konservatif. Alternatif lain adalah dengan menganalisis seperti yang diterangkan dalam **Contoh 4.12.4** di mana resistansi dari masing-masing penyambungnya sama.

(*f*) Cek dengan tabel-tabel Manual AISC, "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS". Jarak antar penyambung secara horisontal tidak persis sama dengan TABEL XVII; meskipun demikian, bila dimensi luar dari deret tersebut kurang lebih sama, dan jarak antar penyambung pada arah vertikal akan sesuai dengan tabel, koefisiennya akan terbukti kurang lebih sama pula. Bila tabel LRFD diasumsikan berlaku seperti yang diyakini penulis untuk kasus ini, masukkan banyak penyambung ($n = 5$) ke dalam tabel untuk baris vertikal, dan eksentrisitas ($x_0 = 16$ inch) beban dari pusat berat kelompok penyambung:

$$\text{Temukan koefisien } C = 6.15$$
$$\phi P_n = C\phi R_n = 6.15(20.7) = 127 \text{ kips}$$

yang sebanding dengan $\phi P_n = 130$ kips untuk sambungan tipe tumpu dari analisis dalam (*d*).

Sedangkan untuk sambungan gelincir-kritik:

$$P = CR = 6.15(7.5) = 46 \text{ kips}$$

yang sebanding dengan $P = 47.1$ kips hitungan pada (*e*).

Dipindai dengan CamScanner

(g) Selidikilah sambungan tersebut dengan menggunakan metode (vektor) el
Karena kondisi beban layanan gelincir-kritik telah terbukti yang menentukan,
trasi mengenai penggunaan metode (vektor) elastik dilakukan untuk beban laya
nya (30 kips pada satu pelat). Cek 5 baut per baris dengan metode elastik:

$$R_s = \frac{P}{n} = \frac{30}{20} = 1.50 \text{ kips} \downarrow$$

$$\Sigma x^2 + \Sigma y^2 = 10[(2.75)^2 + (5.75)^2] + 8[(3)^2 + (6)^2] = 766 \text{ in}$$

$$R_x = \frac{M_y}{\Sigma x^2 + \Sigma y^2} = \frac{30(16)6}{766} = 3.76 \text{ kips} \rightarrow$$

$$R_y = \frac{M_x}{\Sigma x^2 + \Sigma y^2} = \frac{30(16)5.75}{766} = 3.60 \text{ kips} \downarrow$$

$$R \text{ sebenarnya} = \sqrt{(1.50 + 3.60)^2 + (3.76)^2} = 6.34 \text{ kips} < 7.5 \quad \text{OK}$$

Gunakan per baris 5 — baut A325 diameter $^3/_4$ inch. Penyambung-penyambu
(3, 8, 13, dan 18) yang ditempatkan pada sumbu -x dapat dihilangkan; meskip
demikian, pola regular dari **Gambar 4.12.11** lebih disukai.

4.13 Penyambung yang Bekerja pada Tarik Aksial

Gaya tarik aksial tanpa disertai geser dapat terjadi pada penyambung batang ta
seperti penggantung (*lihat* **Gambar 4.6.1c**) atau batang lain yang garis kerjan
tegak lurus terhadap batang yang dihubungkan dengannya. Bila batang ta
sedemikian tidak tegak lurus terhadap batang penghubung, penyambung ak
dipengaruhi oleh gaya tarik aksial maupun geser. Kasus kedua yang lebih tipil
itu dibicarakan dalam **Bagian 4.14**.

Bagian 4.6.1 membicarakan kekuatan nominal R_n untuk penyambung yang
pengaruhi oleh gaya tarik aksial; **Persamaan 4.6.1** memberikan kekuatan sebag

$$R_n = F_u^b(0.75A_b) \qquad [4.6$$

Bila **Persamaan 4.6.1** digunakan dalam *Load and Resistance Factor Desi*
(LRFD-Tabel J3.2), kekuatan desain ϕR_n dengan menggunakan faktor resistans
sebesar 0.75 adalah:

$$\phi R_n = 0.75F_u^b(0.75A_b) \qquad (4.13$$

Harga-harga $\phi(0.75F_u^b)$ telah diberikan dalam **Tabel 4.7.1**.

Bila **Persamaan 4.6.1** digunakan *Allowable Stress Design* (ASD-Tabel J3.2),
pasitas beban layanan R merupakan kekuatan nominal R_n dibagi dengan fak
keamanan sebesar 2. Dengan demikian:

$$R = 0.5F_u^b(0.75A_b) = 0.375F_u^bA_b$$
$$R = F_tA_b \qquad (4.13$$

Dipindai dengan CamScanner

di mana F_t = tegangan nominal beban layanan yang diijinkan, T/A_b
= 0.375(120) ≈ 44 ksi (ASD-Tabel J3.2) untuk baut A325
= 0.375(150) ≈ 54 ksi (ASD-Tabel J3.2) untuk baut A490
A_b = luas penampang lintang bruto penyambung
F_u^b = kekuatan tarik dari bahan penyambung (120 ksi untuk A325 dan 150 ksi untuk baut A490)
T = beban tarik layanan pada sebuah penyambung

Penyambung yang mengalami gaya tarik aksial harus diberi pratarik menurut **Tabel 4.4.2** baik untuk desain sambungan tipe tumpu atau sambungan gelincir-kritik [4.7].

4.13.1 Efek Prategang Baut Berkekuatan Tinggi di bawah Tarik Eksternal

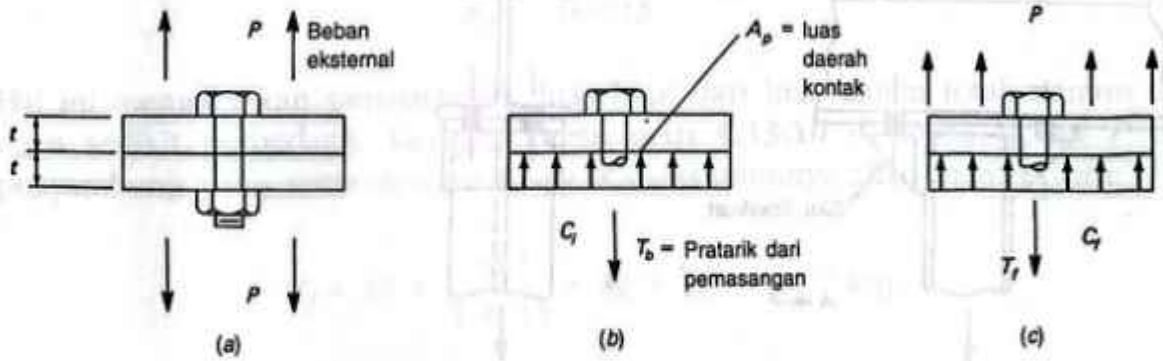
Untuk memahami efek beban eksternal pada baut berkekuatan tinggi yang dipratarik, perhatikan baut tunggal dan bagian ikutan dari pelat yang disambungkan seperti **Gambar 4.13.1*a***. Bagian-bagian yang disambungkan tersebut memiliki ketebalan t dan luas daerah kontaknya adalah A_n. Sebelum beban eksternal bekerja, situasinya seperti **Gambar 4.13.1*b*** di mana baut telah dipasang dengan gaya pratarik T_b (harga-harga seperti **Tabel 4.4.2**). Bagian-bagian yang disambungkan mengalami tekan awal sebesar C_i. Untuk keseimbangan:

$$C_i = T_b \tag{4.13.3}$$

Kemudian dikenakan beban eksternal P dan gaya-gaya yang bekerja seperti **Gambar 4.13.1*c***. Kali ini keseimbangan membutuhkan:

$$P + C_f = T_f \tag{4.13.4}$$

di mana subskrip f menunjuk pada kondisi final setelah pengenaan beban P.



Gambar 4.13.1 *Efek prategang pada sambungan baut*

Dipindai dengan CamScanner

Gaya P yang bekerja pada sistem tersebut akan memperpanjang baut sebe
Δ_b di antara sisi bawah kepala baut dan permukaan kontak di antara kedua pe
yang disambungkan:

$$\delta_b = \frac{T_f - T_b}{A_b E_b} \qquad (4.13.$$

di mana E_b = modulus elastisitas baut
T_f = gaya final di dalam baut setelah beban eksternal dipakai

Pada tekanan yang sama, tekanan antara pelat menurun dan ketebalan pe
naik sebesar δ_p

$$\delta_p = \frac{C_i - C_f}{A_p E_p} t \qquad (4.13.$$

di mana E_p = modulus elastisitas dari materi pelat
C_f = gaya tekan final antara bagian-bagian yang disambungkan set
lah beban eksternal dikenakan

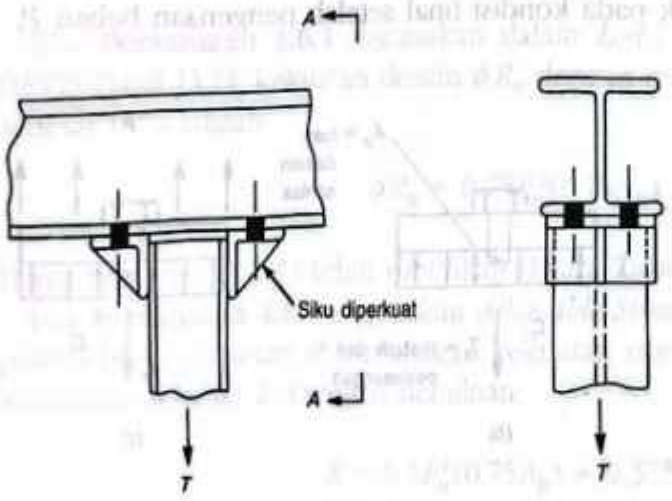
Bila kontak terus berlangsung, kompatibilitas deformasi menginginkan ag
$\delta_b = \delta_p$; dengan demikian **Persamaan 4.13.5** bila disamakan dengan **4.13.6** aka
memberikan:

$$\frac{T_f - T_b}{A_b E_b} = \frac{C_i - C_f}{A_p E_p} \qquad (4.13.7$$

Kemudian, substitusi dari **Persamaan 4.13.3** untuk C_f ke dalam **Persamaa**
4.13.7 akan memberikan:

$$\frac{T_f - T_b}{A_b E_b} = \frac{T_b - T_f + P}{A_p E_p} \qquad (4.13.8$$

Modulus elastisitas E_b untuk baut dan E_p untuk pelat pada hakikatnya sama da
dapat dieliminasi. Kemudian penyelesaian untuk T_f akan memberikan:



Potongan A — A **Gambar 4.13.2** *Contoh 4.13.1*

Dipindai dengan CamScanner

$$(T_f - T_b \frac{A_p}{A_b}) = T_b - T_f + P \tag{4.13.9}$$

$$T_f \left(1 + \frac{A_p}{A_b}\right) = T_b \left(1 + \frac{A_p}{A_b}\right) + P$$

$$T_f = T_b + \frac{P}{1 + A_p/A_b} \tag{4.13.10}$$

■ **Contoh 4.13.1**

Asumsikan baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch digunakan pada situasi tarik langsung seperti **Gambar 4.13.2**. Dengan jarak antar baut 3 inch dan jarak pinggir $1^1/_2$ inch dan daerah ikutan kontak boleh sekitar 9 inch^2. Bila digunakan beban tarik eksternal maksimum yang diijinkan oleh *Load and Resistance Factor Design*, berapakah kenaikan gaya tarik baut? Asumsikan bahwa beban layanannya adalah 20% beban mati dan 80% beban hidup.

Penyelesaian:

(*a*) Kekuatan desain ϕR_n. Dengan **Persamaan 4.13.1**:

$$\phi R_n = 0.75 F_u^b (0.75 A_b) = 0.75(120)(0.75)0.6013 = 40.6 \text{ kip}$$

(*b*) Beban layanan R yang diijinkan per baut. Bila kekuatan desain ϕR_n disamakan dengan beban terfaktor R_u akan diperoleh:

$$R_u = 1.2(0.2R) + 1.6(0.8R) = 1.52R$$
$$1.52R = 40.6 \text{ kips}$$
$$R = 26.7 \text{ kips}$$

(*c*) Gaya tarik awal pada baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch. Dari **Tabel 4.4.2**:

$$T_b = 39 \text{ kips}$$

(*d*) Tentukan gaya tarik final pada baut. Rasio daerah kontak pelat dengan baut adalah:

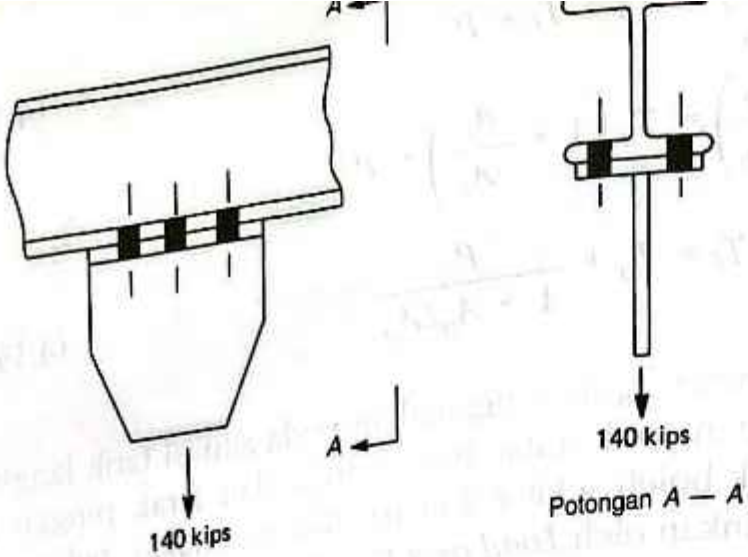
$$\frac{A_p}{A_b} = \frac{9}{0.6013} = 15$$

Hal ini mengabaikan pengurangan luas baut dari luas ikutan total, namun dengan sedikit perbedaan. Dengan **Persamaan 4.13.10** di mana beban P per penyambung yang sama dengan harga R maksimumnya akan memberikan:

$$T_f = 39 + \frac{26.7}{1 + 15} = 39 + 1.7 = 40.7 \text{ kips}$$

Peningkatan dalam gaya tarik adalah sebesar 4.3%. Variasi pada pratarik aktual yang berasal dari pemasangan dapat diharapkan akan melampaui jumlah ini, sehingga pening-

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 4.13.3 Contoh 4.13.2.

katan di atas tidak berarti. Apalagi luas ikutan (*tributary area*) untuk contoh tersebu (9 inch^2) mungkin merupakan nilai terkecil yang mungkin dijumpai dalam praktek karena jarak alur (*pitch*) dan jarak antar baut yang kurang dari 3 inch jarang digunakan.

Kesimpulan penting dari contoh ini adalah bahwa *tidak terjadi peningkatan yang signifikan pada gaya tarik baut sampai beban eksternal sama atau melebihi gaya pratarik*, dalam hal mana bagian-bagian yang disambung tidak lagi bersentuhan dan gaya yang bekerja sama dengan gaya tarik baut.

Bila sambungan dapat mengalami distorsi dan menimbulkan "gaya ungkit" (*prying force*), keadaan ini harus diperhitungkan. (*Lihat* LRFD-J3 dan ASD-J4 dan pembahasan pada "Sambungan T Ganda" *Split Beam Tee Connections* dari Bagian 13.6). Pada **Contoh 4.13.1**, perkiraan faktor keamanan terhadap gaya tekan awal di antara bagian-bagian yang disambungkan adalah:

$$\text{FS} = \frac{T_b}{P} = \frac{39}{26.7} \approx 1.5$$

Secara umum, untuk baut A325 berdasarkan LRFD J3 atau ASD-J4, margin keamanan terhadap beban layanan yang melampaui beban bukti mendekati 1.5 untuk diameter hingga 1 inch dan mendekati 1.3 untuk diameter lebih dari 1 inch. ∎

■ Contoh 4.13.2

Tentukan banyaknya baut A490 berdiameter $^3/_4$ inch yang dibutuhkan untuk sambungan seperti **Gambar 4.13.3**. Asumsikan bahwa dimensi bagian-bagian yang membentuk sambungan tersebut sudah mencukupi sehingga tegangan tarik nominal pada bautlah yang menentukan. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* dengan mengasumsikan bebannya 10% beban mati dan 90% beban hidup.

Penyelesaian:

(*a*) Kekuatan desain ϕR_n per baut. Dengan **Persamaan 4.13.1**

$$\phi R_n = 0.75F_u^b(0.75A_b) = 0.75(150)(0.75)0.4418 = 37.3 \text{ kips}$$

Dipindai dengan CamScanner

(*b*) Hitung gaya tarik terfaktor T_u.

$$T_u = 1.2(0.1)(140) + 1.6(0.9)(140) = 218 \text{ kips}$$

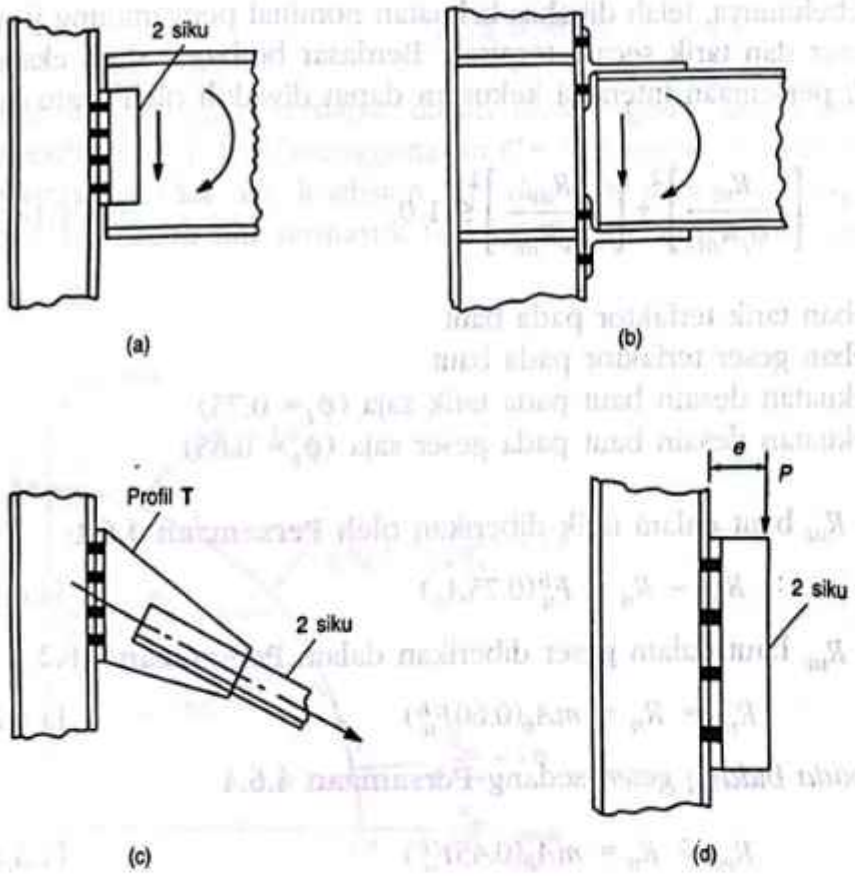
(*c*) Tentukan banyaknya baut n yang dibutuhkan.

$$n = \frac{T_u}{\phi R_n} = \frac{218}{37.3} = 5.9, \text{ katakanlah } 6$$

Gunakan 6 — baut A490 berdiameter $^3/_4$ inch.

4.14 Kombinasi Geser dan Tarik

Pada sebagian besar sambungan yang biasa digunakan, gaya geser maupun gaya tarik terjadi secara bersama-sama, dan dalam desain harus diperhitungkan. **Gambar 4.14.1** memperlihatkan sejumlah sambungan tipikal di mana konektor-konektor secara serentak mengalami gaya geser dan tarik. Sambungan dalam **Gambar 4.14.1*a*** merupakan sebuah contoh yang umum di mana dua profil siku menghubungkan pelat badan balok dengan flens kolom. Dari gaya momen yang



Gambar 4.14.1 *Sambungan dengan kombinasi geser dan tarik tipikal*

Dipindai dengan CamScanner

ditunjukkan dalam gambar tersebut, penyambung bagian atas mengalami tarik yang sebanding dengan besarnya momen yang bekerja. Meskipun demi berdasarkan analisis struktur kita ingat bahwa hanya dibutuhkan sedikit ujung saja untuk mengubah kondisi jepit ke dalam kondisi sendi. Tambahan pelat badan tersebut hanya menanggung sebagian kecil momen lenturnya. Dem demikian, secara intuitif kita dapat merasakan bahwa momen ini akan tidak han sebelum terbentuk gaya tarik yang signifikan pada penyambung. Sambun semacam ini digunakan bila dikehendaki hanya sebagian kecil momen ujung dapat ditransmisikan/ditahan. Kekecualian terhadap hal ini terjadi pada ka balok sangat tinggi seperti gelagar pelat.

Dengan mengacu pada **Gambar 4.14*b*** di mana momen yang bekerja ditr misikan melalui flens balok, situasinya berbeda. Dalam kasus ini, momen y besar sengaja ditransmisikan sehingga sambungan dibuat pada flens, elemen- men yang menanggung sebagian besar momen. **Bab 13** membahas sambun tipe ini. **Gambar 4.14.1*c*** dan **4.14.1*d*** mencirikan kedua tipe pembeba penyambung dalam kombinasi geser dan tarik yang dibahas lebih lanjut dal pasal berikut ini.

4.14.1 Sambungan Tipe Tumpu — Load and Resistance Fact Design

Pada pasal-pasal sebelumnya, telah dibahas kekuatan nominal penyambung y dibebani dalam geser dan tarik secara terpisah. Berdasar berbagai studi eks rimental [4.23, 3.1], persamaan interaksi kekuatan dapat diwakili oleh suatu bungan sirkular:

$$\left[\frac{R_{ut}}{\phi_t R_{nt}}\right]^2 + \left[\frac{R_{uv}}{\phi_v R_{nv}}\right]^2 \leq 1.0 \qquad (4.14$$

di mana R_{ut} = beban tarik terfaktor pada baut
R_{uv} = beban geser terfaktor pada baut
$\phi_t R_{ut}$ = kekuatan desain baut pada tarik saja ($\phi_t = 0.75$)
$\phi_v R_{uv}$ = kekuatan desain baut pada geser saja ($\phi_v = 0.65$)

Kekuatan nominal R_{ut} baut dalam tarik diberikan oleh **Persamaan 4.6.1**:

$$R_{nt} = R_n = F_u^b(0.75A_b) \qquad [4.6$$

Kekuatan nominal R_{uv} baut dalam geser diberikan dalam **Persamaan 4.6.2**:

$$R_{nv} = R_n = mA_b(0.60F_u^b) \qquad [4.6$$

bila *tak ada ulir pada bidang geser*, sedang **Persamaan 4.6.4**

$$R_{nv} = R_n = mA_b(0.45F_u^b) \qquad [4.6$$

bila *mungkin terdapat ulir pada bidang geser.*

Dipindai dengan CamScanner

Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] telah menyederhanakan hubungan interaksi sirkular dari **Persamaan 4.14.1** menjadi hubungan garis lurus yang membutuhkan reduksi hanya pada kasus-kasus pembebanan yang paling berat. Hubungan garis lurusnya adalah:

$$\frac{R_{ut}}{\phi_t R_{nt}} + \frac{R_{uv}}{\phi_v R_{nv}} \leq C \tag{4.14.2}$$

di mana C merupakan suatu konstanta. Dalam **Gambar 4.14.2** diperlihatkan kesesuaian dengan hubungan yang lebih tepat. Bila **Persamaan 4.14.2** dikalikan dengan $\phi_t R_{nt}$ dan diselesaikan untuk R_{ut} akan diperoleh:

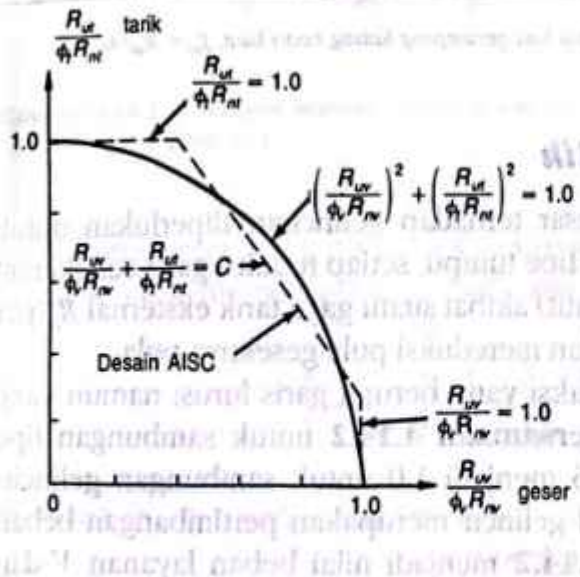
$$R_{ut} \leq C\phi_t R_{nt} - \frac{\phi_t R_{nt}}{\phi_v R_{nv}} R_{uv} \tag{4.14.3}$$

Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] menggunakan *format tegangan* dengan membagi semua pembilang dengan luas penampang lintang bruto A_b. Lagi pula bila $\phi_t R_{nt}$ dan $\phi_v R_{nv}$ disbustitusikan, **Persamaan 4.14.3** akan menjadi:

$$\frac{R_{ut}}{A_b} \leq C\frac{0.75(0.75F_u^b)A_b}{A_b} - \frac{0.75(0.75F_u^b)A_b}{0.65(0.60F_u^b)A_b}\frac{R_{uv}}{A_b} \tag{4.14.4}$$

$$f_{ut} \leq 0.56F_u^b C - 1.44f_{uv} \tag{4.14.5}$$

Bila ulir mungkin terdapat dalam bidang geser, koefisien 1.44 menjadi 1.92. Spesifikasi [1.5, 1.15] menggunakan $C = 1.25$ untuk memperoleh garis lurus dalam **Gambar 4.14.2** dan koefisien 1.44 dan 1.92 diambil masing-masing sebagai 1.4 dan 1.8 untuk ulir termasuk (*iNcluded*) dan terpisah (*eXcluded*) dalam bidang



Gambar 4.14.2 Kurva interaksi kekuatan geser-tarik nominal: sambungan tipe tumpu

Dipindai dengan CamScanner

geser. Nilai F_{ut}' digunakan untuk menggantikan f_{ut} untuk menandai batas a
dari tegangan nominal yang dihitung pada tingkat beban terfaktor. Untuk b
A325 (A325-X) **Persamaan 4.14.5** menjadi:

$$F_{ut}' \leq 0.56(120)(1.25) - 1.44f_{uv} \quad (4.14.6$$

$$F_{ut}' \leq 84 - 1.44f_{uv} \quad (4.14.7$$

Dengan demikian, untuk A325-X, LRFD-J3.4 dan Tabel J3.3 memberikan:

$$F_{ut}' \leq 85 - 1.4f_{uv} \quad (4.14.7$$

Persamaan 4.14.7 melukiskan format Spesifikasi AISC tipikal untuk digunakan dengan sambungan tipe tumpu. Persamaan-persamaan spesifik dirangkumkan dan LRFD-Tabel J3.3 dalam **Tabel 4.14.1**, sedangkan persamaan-persamaan A325 dan A490 diperlihatkan dalam **gambar 4.14.3**.

Tabel 4.14.1 Batas tegangan tarik* F_{ut}' bila dikombinasikan dengan geser (untuk sambungan tipe tumpu)(dari LRFD-Tabel J3.3)

Penyambung	F_{ut}' (ksi)	F_{ut}' (MPa)
Baut A307	$39 - 1.8f_{uv} \leq 30$	$270 - 1.8f_{uv} \leq 210$
Baut A325-N (ulir *tidak* terpisah)	$85 - 1.8f_{uv} \leq 68$	$590 - 1.8f_{uv} \leq 470$
Baut A325-X (ulir terpisah)	$85 - 1.4f_{uv} \leq 68$	$590 - 1.4f_{uv} \leq 470$
Baut A490-N (ulir *tidak* terpisah)	$106 - 1.8f_{uv} \leq 84$	$730 - 1.8f_{uv} \leq 580$
Baut A490-X (ulir terpisah)	$106 - 1.4f_{uv} \leq 84$	$730 - 1.4f_{uv} \leq 580$

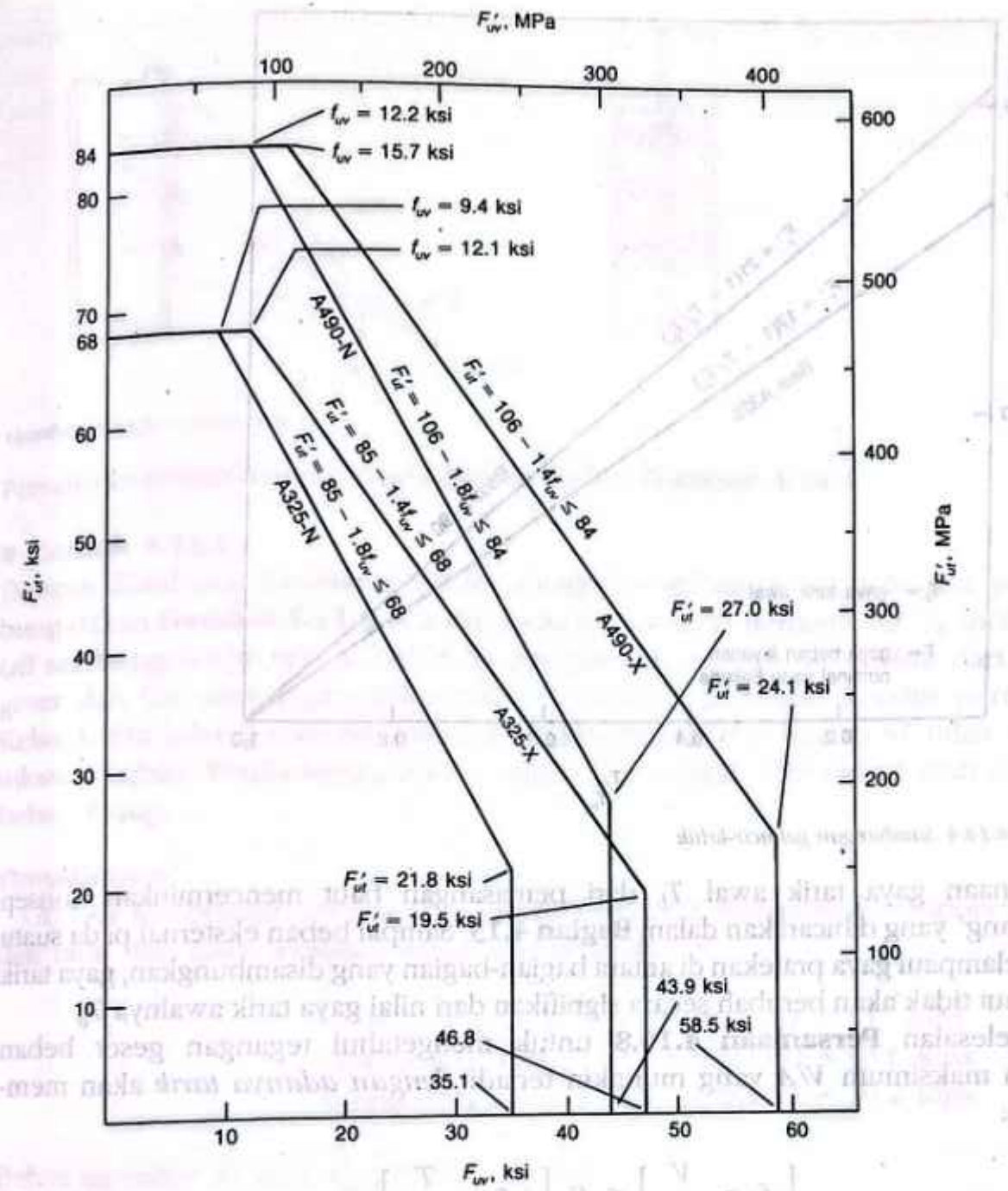
* Tegangan nominal karena beban terfaktor yang bekerja pada luas penampang lintang bruto baut, $f_{ut} = R_{ut}/A_b$

4.14.2 Sambungan Gelincir-Kritik

Karena faktor keamanan yang lebih besar terhadap gelinciran diperlukan untuk sambungan gelincir-kritik daripada untuk tipe tumpu, setiap reduksi gaya cengkeram (yang terbentuk selama proses pratarik baut) akibat suatu gaya tarik eksternal R_t (per baut) akan mereduksi gaya cengkeram, dan mereduksi pula geseknya pula.

Sekali lagi digunakan hubungan interaksi yang berupa garis lurus; namun yang ini lebih konservatif ketimbang tipe **Persamaan 4.14.2** untuk sambungan tipe tumpu. Konstanta C direduksi dari 1.25 menjadi 1.0 untuk sambungan gelincir-kritik. Tambahan pula, karena resistansi gelincir merupakan pertimbangan beban layanan, pembilang dari **Persamaan 4.14.2** menjadi nilai beban layanan V dan T (tarik dan geser pada baut) yang mungkin bekerja secara simultan, sedang

Dipindai dengan CamScanner



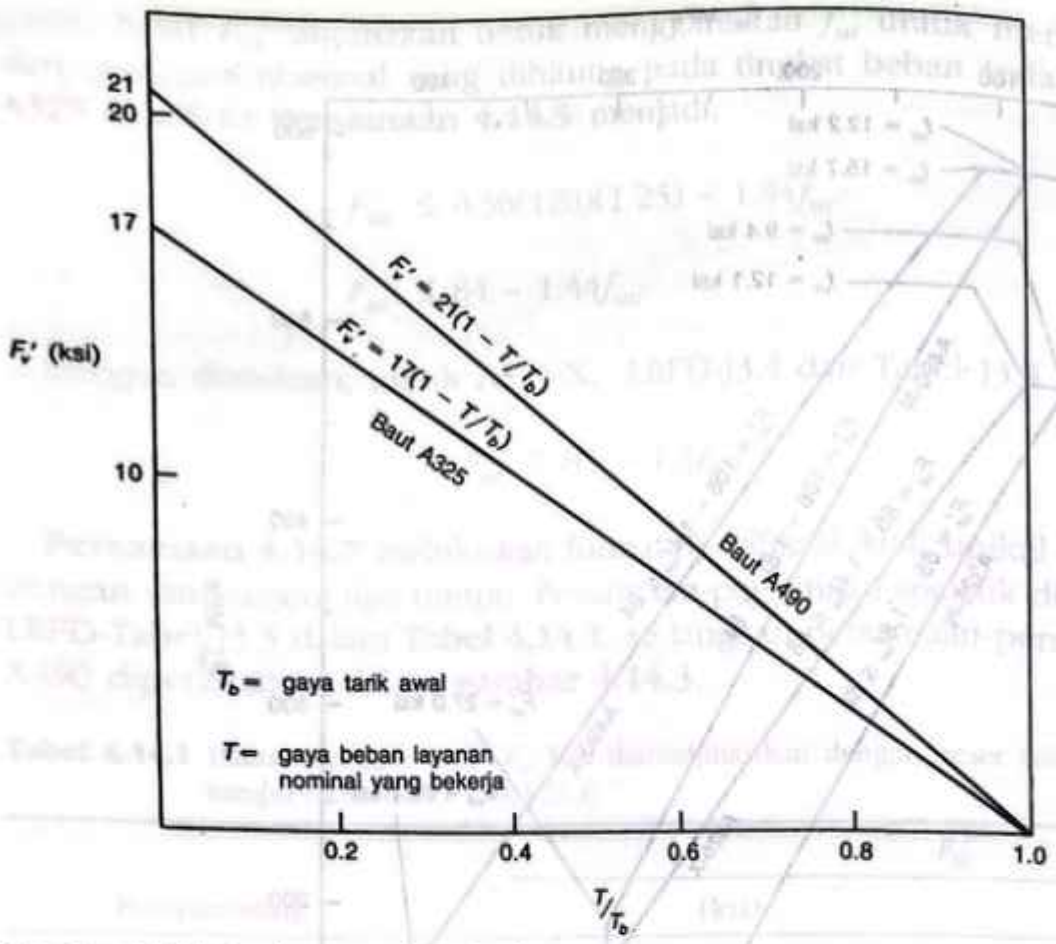
Gambar 4.14.3 *Hubungan interaksi untuk kombinasi geser dan tarik pada sambungan tipe tumpu, LRFD-Tabel J3.3*

penyebutnya menjadi gaya-gaya maksimum yang diijinkan pada sambungan gelincir-kritik yang mengalami gaya tarik atau geser saja:

$$\left[\frac{V}{F_v A_b}\right] + \left[\frac{T}{T_b}\right] \le 1.0 \qquad (4.14.8)$$

di mana F_v = tegangan geser beban layanan nominal maksimum V/A_b yang diijinkan pada sambungan gelincir-kritik yang hanya mengalami gaya geser saja (LRFD-J3.5, Tabel J3.4)

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 4.14.4 *Sambungan gelincir-kritik*

Penggunaan gaya tarik awal T_b dari pemasangan baut mencerminkan konsep "prategang" yang dibicarakan dalam **Bagian 4.13**. Sampai beban eksternal pada suatu baut melampaui gaya pratekan di antara bagian-bagian yang disambungkan, gaya tarik pada baut tidak akan berubah secara signifikan dari nilai gaya tarik awalnya T_b.

Penyelesaian **Persamaan 4.14.8** untuk mengetahui tegangan geser beban layanan maksimum V/A yang mungkin terjadi *dengan adanya tarik* akan memberikan:

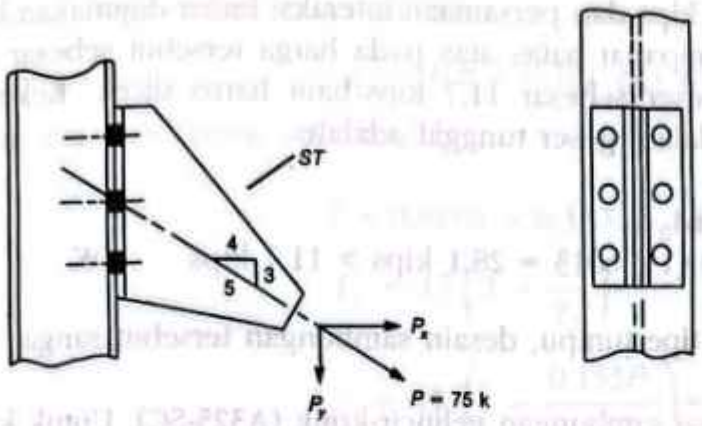
$$\left[f_v = \frac{V}{A_b} \right] \leq F_v \left[1.0 - \frac{T}{T_b} \right] \tag{4.14.9}$$

Dengan memisalkan f_v sebagai F_v', tegangan geser ijin di mana ada gaya tarik eksternal, dan dengan substitusi harga-harga F_v, tegangan geser di mana tidak ada gaya tarik untuk baut dalam lobang standar, dari **Persamaan 4.14.9** kita dapat memperoleh pembatasan LRFD-J3.5:

$$F_v' \leq 17 \left(1 - \frac{T}{T_b} \right) \quad \text{Baut A325 dalam lobang standar} \tag{4.14.10}$$

$$F_v' \leq 21 \left(1 - \frac{T}{T_b} \right) \quad \text{Baut A325 dalam lobang standar} \tag{4.14.11}$$

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 4.14.5 Contoh 4.14.1

Persamaan-persamaan ini diperlihatkan dalam **Gambar 4.14.4**.

■ Contoh 4.14.1

Dengan *Load and Resistance Factor Design*, tentukan cukup tidaknya penyambung dalam **Gambar 4.14.5** bila digunakan baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch dalam (*a*) sambungan tipe tumpu (A325-X) dengan ulir terpisah (*eXcluded*) dari bidang geser dan (*b*) sambungan gelincir-kritik (A325-SC) dengan kondisi permukaan Kelas A dan lobang standar. Asumsikan flens kolom dan bagian ST tidak menentukan jawaban. Pembebanan karena gaya berat adalah 10% beban mati dan 90% beban hidup.

Penyelesaian:

(*a*) Cek sambungan sebagai tipe tumpu (A325-X). Komponen-komponen geser dan tarik dari gaya terfaktor yang bekerja adalah:

$$P_u = 1.2(0.1)(75) + 1.6(0.9)(75) = 117 \text{ kips}$$
$$\text{Komponen tarik} = P_{ux} = 0.8(117) = 93.6 \text{ kips}$$
$$\text{Komponen geser} = P_{uy} = 0.6(117) = 70.2 \text{ kips}$$

Beban terfaktor T_u dan V_u per baut adalah:

$$\text{Tarik } T_u = 93.6/6 = 15.6 \text{ kips/baut}$$
$$\text{Geser } V_u = 70.2/6 = 11.7 \text{ kips/baut}$$

Dengan **Tabel 4.14.1**:

$$F_{ut}' = 85 - 1.4 f_{uv} \leq 68 \text{ ksi}$$

Bila dikalikan dengan A_b untuk baut berdiameter $^7/_8$ inch, persamaan di atas menjadi:

$$T_u \text{ maks} = F_{ut}' A_b$$
$$= 85(0.6013) - 1.4 V_u \leq 68(0.6013)$$
$$= 51.1 - 1.4 V_u \leq 40.9 \text{ kips}$$
$$T_u = 15.6 < [T_u \text{ maks} = 51.1 - 1.4(11.7) = 34.7 \text{ kips}]$$

Dipindai dengan CamScanner

Perhatikan bahwa batas 34.7 kips dari persamaan interaksi linear digunakan karena nilai tersebut tidak melampauai batas atas pada harga tersebut sebesar 40.9 kips. Lagipula, nilai gaya geser sebesar 11.7 kips/baut harus dicek. Kekuatan desain (**Persamaan 4.7.1**) dalam geser tunggal adalah:

$$\phi_v R_{nv} = 0.65(0.60F_u^b)mA_b$$
$$= 0.65(0.60)(120)(1)0.6013 = 28.1 \text{ kips} > 11.7 \text{ kips} \qquad \text{OK}$$

Sebagai sebuah sambungan tipe tumpu, desain sambungan tersebut sangat konservatif.

(*b*) Cek sambungan sebagai sambungan gelincir-kritik (A325-SC), Untuk kekuatan, sambungan gelincir-kritik harus memenuhi kriteria kekuatan terkait yang sama dari sambungan tipe tumpu. Kekuatan geser telah diselidiki dalam (*a*); sedangkan kekuatan tumpu dinyatakan dalam problema ini sebagai tidak menentukan.

Untuk daya layanan, cukup tidaknya resistansi geser harus dicek. Gaya-gaya beban layanan per baut adalah:

$$T = 0.8(75)/6 = 10 \text{ kips/baut}$$
$$V = 0.6(75)/6 = 7.5 \text{ kips/baut}$$

Dari LRFD-J3.5, **Persamaan 4.14.10**:

$$F_v' = 17\left[1 - \frac{T}{T_b}\right] = 17\left[1 - \frac{10}{39}\right] = 12.6 \text{ ksi}$$

Kapasitas geser beban layanan per baut adalah:

$$V \text{ maks} = F_v' A_b = 12.6(0.6013) = 7.6 \text{ kips/baut}$$

yang melampaui harga $V = 7.5$ kips. Maka dari itu, baut-baut tersebut memenuhi sebagai sambungan gelincir-kritik. ■

■ **Contoh 4.14.2**

Tentukan harga maksimum beban P dalam **Contoh 4.14.1** dengan mengasumsikan (*a*) sambungan gelincir-kritik, dan (*b*) sambungan tipe tumpu (A325-N) dengan ulir mungkin terdapat dalam bidang geser. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC dan asumsikan kondisi permukaan kelas A dengan lobang standar.

Penyelesaian:

(*a*) Sambungan gelincir-kritik. Gaya-gaya beban layanannya adalah:

$$\text{Komponen tarik} = P_x = 0.8\ P$$
$$\text{Komponen geser} = P_y = 0.6\ P$$

Dipindai dengan CamScanner

Beban per baut dalam geser adalah:

$$V = 0.6P/6 = 0.10P \text{ per baut}$$

Beban per baut dalam tarik adalah:

$$T = 0.8P/6 = 0.133 \text{ per baut}$$

$$F'_v = 17\left(1 - \frac{T}{T_b}\right) \qquad [4.14.10]$$

$$F'_v = 17\left(1 - \frac{0.133P}{39}\right) = 17 - 0.058P$$

Geser beban layanan maksimum V per baut yang diijinkan pada baut berdiameter $^7/_8$ inch adalah:

$$V \text{ maks} = F'_v A_b = (17 - 0.058P)0.6013 = 10.2 - 0.035\ P$$

Bila V disamakan dengan V maks akan diperoleh:

$$0.10P = 10.2 - 0.035P$$
$$P = 76 \text{ kips}$$

Kekuatan dalam geser, tarik, dan tumpu juga harus dicek seolah-olah merupakan sambungan tipe tumpu. Untuk beberapa kondisi permukaan yang sangat resistan terhadap gelinciran, kekuatan sebagai sambungan tipe tumpu mungkin lebih berpengaruh ketimbang ketahanan gelincirnya; suatu situasi yang relatif tidak biasa.

(*b*) Sambungan tipe tumpu (A325-N) dengan ulir yang mungkin terdapat dalam bidang geser. Beban-beban terfaktornya adalah:

$$P_u = 1.2(0.1)P + 1.6(0.9)P = 1.25 \text{ kips}$$
$$\text{Komponen tarik} = P_{ux} = 0.8(1.56P) = 1.25P \text{ kips}$$
$$\text{Komponen geser} = P_{uy} = 0.6(1.56P) = 0.94P \text{ kips}$$

Beban-beban terfaktor per baut adalah:

$$T_u = 1.25P/6 = 0.208P$$
$$V_u = 0.94P/6 = 0.156P$$

Dari **Tabel 4.14.1**:

$$F'_{ut} = 85 - 1.8f_{uv} \leq 68 \text{ ksi}$$

Bila persamaan di atas dikalikan dengan A_b untuk baut berdiameter $^7/_8$ inch akan menjadi:

$$T_u \text{ maks} = F'_v A_b$$
$$= 85(0.6013) - 1.8V_u \leq 68(0.6013)$$
$$= 51.1 - 1.8V_u \leq 40.9 \text{ kips}$$

Dipindai dengan CamScanner

Bila T_u disamakan dengan T maks akan diperoleh:

$$0.208P = 51.1 - 1.8(0.156P) = 51.1 - 0.281P$$
$$P = 105 \text{ kips}$$

Periksalah bahwa T_u maks dari interaksi linear tidak melampaui batas atas sebesar 40.9 kips:

$$T_u \text{ maks} = 51.1 - 0.281(105) = 21.7 \text{ kips} < 40.9 \text{ kips} \quad \text{OK}$$

Tambahan pula, kekuatan geser harus dicek:

$$\phi_v R_n = 0.65(0.45F_u^b)mA_b$$
$$= 0.65(0.45)(120)(1)(0.6013) = 21.1 \text{ kips}$$
$$V_u = 0.156P = 0.156(105) = 16.4 \text{ kips} < 21.1 \text{ kips} \quad \text{OK}$$

Dengan demikian, harga maksimum dari beban layanan P adalah 76 kips sebagai sambungan gelincir-kritik dan 105 kips sebagai sambungan tipe tumpu.

■ Contoh 4.14.3

Tentukan banyaknya baut A325 berdiameter $^3/_4$ inch yang dibutuhkan untuk menanggung gaya geser yang terdiri dari 14 kips beban mati dan 56 kips beban hidup, dan gaya tarik sebesar 24 kips beban mati dan 96 kips beban hidup. Sambungan akan didesain sedemikian rupa sehingga gaya resultannya bekerja melalui sentroid sambungan. Gunakan *Load and Resistance Factor Design*. (*a*) Desainlah sebagai sambungan tipe tumpu (A325-X), dan (*b*) desainlah sebagai sambungan gelincir-kritik (A325-SC) yang memiliki kondisi permukaan Kelas A dan lobang standar.

Penyelesaian:

Dalam desain ini, tampak jelaslah bahwa, karena besar gaya tarik dan geser sebanding, tak satu pun dari kekuatan geser maksimum atau kekuatan tarik maksimum yang dapat digunakan, seperti terlihat dari **Gambar 4.14.3**. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah *design charts* [4.24]. Bila belum tersedia *charts*, pendekatan berikut ini [4.24] dapat digunakan :

(*a*) Sambungan tipe tumpu. Dari **Tabel 4.14.1** (LRFD-Tabel J3.3), kriteria interaksi untuk tegangan nominal maksimum dalam tarik di bawah beban-beban terfaktor (ulir terpisah dari bidang geser) adalah:

$$F'_{ut} = 85 - 1.4f_{uv} \leq 68 \text{ ksi (A325-X)}$$

dan kekuatan geser desain adalah:

$$\phi_v R_{nv} = 0.65(0.60F_u^b)mA_b$$

Dipindai dengan CamScanner

Persamaan interaksi linear untuk F'_v secara umum dapat dinyatakan sebagai:

$$F'_{ut} = C_1 - C_2 f_{uv} \leq F_{ut} \qquad (a)$$

di mana C_1 dan C_2 merupakan konstanta.

Ubahlah **Persamaan (*a*)** menjadi persamaan gaya dengan cara mengalikannya dengan luas baut A_b:

$$F'_{ut} A_b = C_1 A_b - C_2 f_{uv} A_b \leq F_{ut} A_b \qquad (b)$$

atau, bila ΣA_b mewakili luas total semua baut, $F'_{ut} \Sigma A_b = \Sigma T_u$ dan $f_{uv} \Sigma A_b = \Sigma V_u$ akan diperoleh:

$$\Sigma T_u = C_1 \Sigma A_b - C_2 \Sigma V_u \leq \phi R_{nt} \qquad (c)$$

di mana ΣT_u dan ΣV_u masing-masing merupakan gaya-gaya tarik dan geser terfaktor yang dikenakan terhadap sambungan tersebut. Penyelesaian **Persamaan (*c*)** untuk ΣA_b akan memberikan:

$$\Sigma A_b = \frac{\Sigma T_u + C_2 \Sigma V_u}{C_1} \qquad (d)$$

yang merupakan *persamaan desain* dasar untuk sambungan tipe tumpu. Harga-harga C_1 adalah 85 untuk A325 dan 106 untuk A490, sedang harga-harga C_2 adalah 1.4 bila ulir di luar bidang geser, dan 1.8 bila ulir berada dalam bidang geser (A325-N).

Untuk baut A325-X, **Persamaan (*d*)** menjadi:

$$\Sigma A_b = \frac{\Sigma T_u + 1.4 \Sigma V_u}{85} \qquad (e)$$

Untuk contoh ini, beban-beban layanan terfaktornya adalah:

$$\Sigma T_u = 1.2(24) + 1.6(96) = 182 \text{ kips}$$
$$\Sigma V_u = 1.2(14) + 1.6(56) = 106 \text{ kips}$$

dan dengan **Persamaan (*d*)** yang diharapkan akan menentukan, diperoleh:

$$\Sigma A_b \text{ yang dibutuhkan} = \frac{\Sigma T_u + 1.4 \Sigma V_u}{85} = \frac{182 + 1.4(106)}{85} = 3.9 \text{ inch}^2$$

Penggunaan **Persamaan (*e*)** ternyata memenuhi persyaratan tarik. Kekuatan geser harus juga diperiksa:

$$\phi_v R_{nv} = 0.65(0.60)(120)(1) A_b = 46.8 A_b \text{ kips/baut}$$

Dipindai dengan CamScanner

Luas baut total ΣA_b yang dibutuhkan untuk menanggung ΣV_u akan menjadi:

$$\Sigma A_b \text{ yang dibutuhkan} = \frac{106}{46.8} = 2.3 \text{ inch}^2 < 2.9 \text{ inch}^2$$

Seperti yang diharapkan, pembatasan gaya tarik berdasar persamaan interaksi linear ternyata menentukan. Banyaknya baut n yang dibutuhkan adalah:

$$n \text{ yang dibutuhkan} = \frac{3.9}{0.4418} = 8.8 \text{ baut}$$

Gunakan 10 — baut A325-X berdiameter $^3/_4$ inch untuk sambungan tipe tumpu.

(*b*) Sambungan gelincir-kritik. Semua persyaratan kekuatan seperti dicek dalam (*a*) untuk sambungan tipe tumpu juga berlaku untuk sambungan kritik gelincir. Hubungan interaksi, **Persamaan 4.14.10** dari LRFD-J3.5 adalah:

$$F_v' = 17\left(1 - \frac{T}{T_b}\right) \qquad [4.14.10]$$

Untuk baut berdiameter $^3/_4$ inch, $T_b = 28$ kips. Bila **Persamaan 4.14.10** dikalikan dengan A_b akan diperoleh:

$$F_v' A_b = 17A_b\left(1 - \frac{T(0.4418)}{28A_b}\right) \qquad (f)$$

Perhatikan bahwa dalam **Persamaan (*f*)**, A_b dapat merupakan luas total ΣA_b dari semua baut yang berperan serta dan T dapat merupakan ΣT. Meskipun demikian, T_b merupakan tarik awal pada *satu* baut; maka pada pembilang muncul satu luasan (0.4418) untuk memberikan satuan tegangan. Keadaan ini akan berlaku meskipun variabel-variabel lainnya merupakan $\Sigma T/\Sigma A_b$ untuk semua baut ataukah T/A_b untuk satu baut. Bila luas A_b dianggap sebagai luas total ΣA_b dari semua baut yang ikut serta, bila demikian **Persamaan (*f*)** dapat ditulis:

$$\Sigma V = 17\Sigma A_b - 0.27\Sigma T \qquad (g)$$

Perhatikan bahwa $0.27 = 17(0.4418)/28$. Penyelesaian untuk luas total baut yang dibutuhkan ΣA_b akan memberikan:

$$\Sigma A_b \text{ yang dibutuhkan} = \frac{\Sigma V + 0.27\,\Sigma T}{17} \qquad (g)$$

yang dapat dianggap sebagai *persamaan desain* untuk baut A325 dalam sambungan gelincir kritik dengan kondisi permukaan Kelas A dan lobang standar.

Dipindai dengan CamScanner

Untuk baut A490, penyebut dari **Persamaan (*b*)** menjadi 21. Meskipun dalam pengembangan ini digunakan baut berdiameter $^3/_4$ inch, dapat dilihat bahwa A_b/T_b cukup konstan dengan **Persamaan (*b*)** sebagai persamaan desain bagi semua ukuran baut.

Untuk contoh ini:

$$\Sigma A_b \text{ yang dibutuhkan} = \frac{\Sigma V + 0.27\Sigma T}{17} = \frac{70 + 0.27(120)}{17} = 6.0 \text{ inch}^2$$

Penggunaan **Persamaan (*b*)** memenuhi persyaratan geser untuk resistansi geseran. Tarik maksimum juga harus dicek. Kekuatan tarik desain $\phi_t R_{nt}$ per baut adalah:

$$\phi_t R_{nt} = 0.75(0.75F_u^b)A_b = 0.75(0.75)(120)A_b = 67.5A_b \text{ kips}$$

Dengan beban terfaktor $\Sigma T_u = 182$ kips dari (*a*), luas total baut yang dibutuhkan adalah:

$$\Sigma A_b \text{ yang dibutuhkan} = \frac{182}{67.5} = 2.7 \text{ inch} < 6.0 \text{ inch}$$

Jelaslah bahwa resistansi gelincir dalam geser bersifat menentukan. Jumlah baut yang dibutuhkan adalah:

$$n \text{ yang dibutuhkan} = \frac{6.0}{0.4418} = 13.6 \text{ baut}$$

Gunakan 14 — baut A325 berdiameter $^3/_4$ inch untuk sambungan gelincir-kritik ini. ■

4.15 Geser dan Tarik dari Pembebanan Eksentrik

Pada sambungan konsol seperti **Gambar 4.14.1*a*** dan ***c***, beban eksentrik menimbulkan gaya geser maupun tarik pada penyambung bagian atas. Seperti dalam kebanyakan sambungan lain, perilaku masing-masing bagian yang disambung sangat kompleks. Meskipun demikian, gaya-gaya nominal yang ditanggung oleh penyambung biasanya ditentukan dengan salah satu dari dua pendekatan berikut: (1) dengan pengabaian semua gaya tarik awal pada penyambung atau (2) dengan menganggap adanya pratarik pada penyambung. Bila digunakan penyambung seperti baut A307, besarnya tarik awal yang ada biasanya kecil dan tidak dapat ditentukan. Karenanya, dalam kasus ini, pengabaian semua gaya tarik awal masih masuk akal dan masih dapat memberikan hasil yang konservatif. Di lain pihak, bila digunakan baut berkekuatan tinggi, gaya-gaya pratarik ada dan harus diperhitungkan.

Bila tarik awal tidak ada sampai sejumlah tertentu, pengenaan momen *Pe*

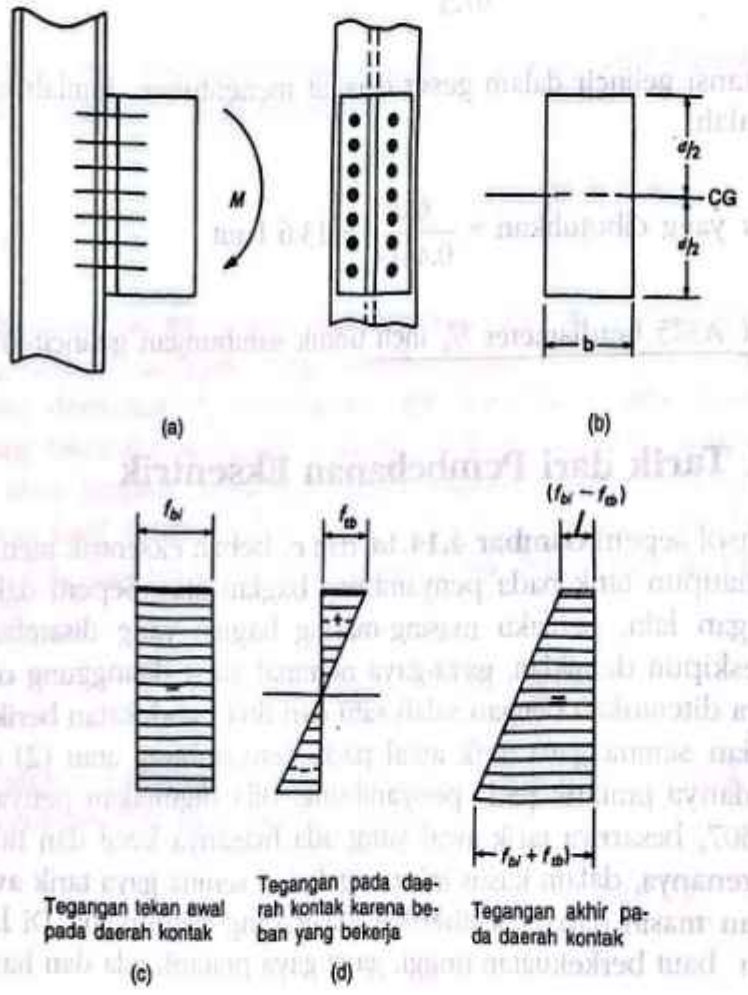
Dipindai dengan CamScanner

(**Gambar 4.14.1c**) akan menghasilkan suatu tarik yang maksimum pada baut-baut puncak. Dekat dengan bagian bawah sambungan, tekan akan terjadi di antara bagian-bagian yang disambungkan dengan sedikit efek langsung ke baut. Geser langsung akan ditanggung hampir seluruhnya oleh baut karena akan terjadi sedikit gesekan selama pemasangan baut. Penggunaan baut A307 dengan sedikit tarik awal jarang terjadi pada sambungan-sambungan penting yang memiliki geser dalam kombinasi dengan gaya tarik yang diinduksi momen; dengan demikian dalam analisis yang mengabaikan tarik awal tidak diberikan perlakuan lebih lanjut.

Veillette dan De Wolf [4.25] telah melakukan berbagai tes terhadap sambungan **T** dengan baut yang dibebani gaya geser dan tarik.

4.15.1 Tarik dari Momen Lentur dengan Tarik Awal

Perhatikan momen beban layanan M yang dikenakan pada sambungan konsol (*bracket*) **Gambar 4.15.1** yang menyebabkan gaya tarik pada baut-baut sebelah atas (maksimum pada baut paling atas dari setiap barisan baut yang diperlihatkan



Gambar 4.15.1 *Tegangan-tegangan pada permukaan kontak dari sambungan yang menahan momen dengan memperhitungkan tarik awal pada baut*

Dipindai dengan CamScanner

sebagai titik-titik hitam). Baut berkekuatan tinggi yang digunakan sebagai penyambung sedemikian perlu dipasang dengan suatu gaya tarik awal tertentu baik bila sambungan tersebut dianggap sebagai tipe tumpu atau pun sebagai sambungan gelincir-kritik (RCSG [4.7], Bagian 8). Gaya tarik ini pada masing-masing baut akan memberikan pratekan terhadap pelat-pelat atau bagian-bagian yang disambungkan. Untuk situasi **Gambar 4.15.1**, sumbu netral akibat momen M akan terletak pada sentroid (CG) dari daerah kontak; yakni pada jarak $d/2$ dari daerah kontak segi panjang yang terlihat.

Tekanan tumpu awal f_{bi} seperti **Gambar 4.15.1c** diasumsikan seragam di seluruh daerah kontak bd dan sama dengan:

$$f_{bi} = \frac{\Sigma T_b}{bd} \tag{4.15.1}$$

di mana ΣT_b = beban pratarik dikalikan dengan banyaknya baut. Tegangan tarik f_{tb} pada bagian atas yang disebabkan oleh momen adalah:

$$f_{tb} = \frac{Md/2}{I} = \frac{6M}{bd^2} \tag{4.15.2}$$

dan tidak boleh melebihi f_{bi} bila tekan di antara bagian-bagian yang disambung dikehendaki tetap di puncak.

Beban T pada baut puncak sama dengan produk luas ikutan baut (lebar b dikalikan dengan jarak antar baut p) dikalikan dengan f_{tb}. Dengan demikian:

$$T = f_{tb}bp \tag{4.15.3}$$

Substitusi **Persamaan 4.15.2** ke dalam **4.15.3** akan memberikan beban pada baut puncak sebagai:

$$T = \frac{6M}{bd^2}\, bp = \frac{6Mp}{d^2} \tag{4.15.4}$$

Dengan mengasumsikan baut puncak sekitar $p/2$ dari puncak, harga T dapat dimodifikasi menjadi:

$$T_{\text{termodifikasi}} = T\left(\frac{d-p}{d}\right)$$

$$= \frac{6Mp}{d^2}\left(\frac{d-p}{d}\right) \tag{4.15.5}$$

Bila dalam analisis digunakan beban layanan, masuk-akallah penggunaan prose-

Dipindai dengan CamScanner

dur ini dalam *Allowable Stress Design*. Penulis berpendapat bahwa penggunaan metode ini dalam *Load and Resistance Factor Design* dapat diterima pula.

■ Contoh 4.15.1

Tentukan kapasitas P untuk sambungan pada **Gambar 4.15.2** bila penyambung yang digunakan adalah baut A325-X berdiameter $^3/_4$ inch yang mengalami oleh geser dan tarik pada sambungan tipe tumpu dengan ulir di luar bidang geser nya. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC dengan asumsi 20% beban mati dan 80% beban hidup gaya berat.

Penyelesaian:

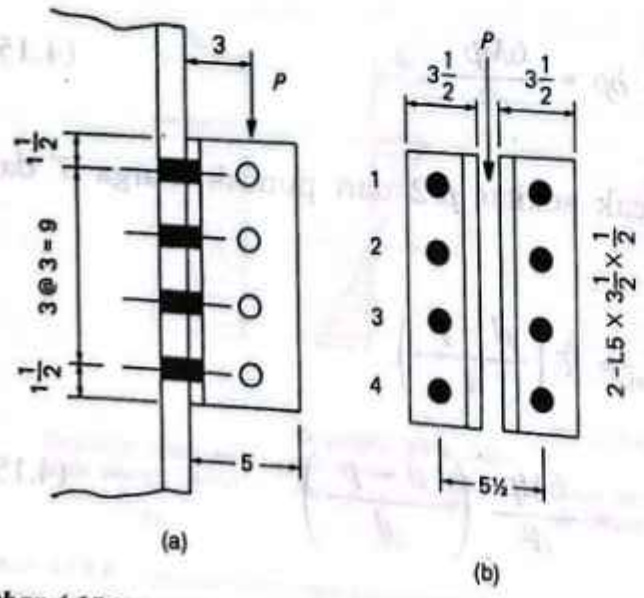
(*a*) Hitung beban terfaktor P_u:

$$P_u = 1.2(0.2P) + 1.6(0.8P) = 1.52P$$

(*b*) Hitunglah geser dan tarik terfaktor pada baut dengan asumsi bahwa beban-beban yang bekerja tidak mengatasi tekan awal di antara bagian-bagian yang disambungkan. Dengan mengacu pada **Gambar 4.15.2**, sumbu netral untuk lentur terletak pada pertengahan daerah kontak. Dengan menggunakan momen terfaktor M_u dan beban terfaktor maksimum T_u per baut masing-masing untuk M dan $T_{\text{termodifikasi}}$, dan dengan memperhatikan momen M_u sama dengan beban P_u kali eksentrisitas e sebesar 3 inch, **Persamaan 4.15.5** akan memberikan:

$$T_u = \frac{6M_u p}{d^2}\left[\frac{d-p}{d}\right] = \frac{6(1.52P)(3)3}{2(12)^2}\left[\frac{12-3}{12}\right] = 0.214P$$

Perhatikan bahwa karena ada dua baris vertikal penyambung, dalam persamaan di atas terdapat pula penyebut 2.



Gambar 4.15.2 Sambungan tarik karena induksi momen dan geser untuk Contoh 4.15.1

Dipindai dengan CamScanner

Komponen geser yang diambil sama oleh semua baut adalah:

$$V_u = \frac{P_u}{\Sigma n} = \frac{1.52P}{8} = 0.190P$$

(*c*) Kekuatan desain ϕR_n dari baut dalam geser dan tarik. Dalam geser, kekuatan desainnya adalah:

$$\phi_v R_{nv} = 0.65(0.60F_u^b)mA_b$$
$$= 0.65(0.60)(120)(1)0.4418 = 20.7 \text{ kips}$$

sedangkan dalam tarik, kekuatan desain $F'_{ut}A_b$ direduksi dari harga maksimumnya dengan geser lain yang bekerja serentak; dengan demikian setelah dikalikan dengan A_b:

$$F'_{ut}A_b = 85A_b - 1.4f_{uv}A_b \leq 68A_b$$
$$F'_{ut}A_b = 85((0.4418) - 1.4V_u \leq 68(0.4418)$$
$$T_u \text{ maks} = 37.6 - 1.4V_u \leq 30.0 \text{ kips}$$

Dengan asumsi bahwa persamaan interaksi berpengaruh, penyelesaian untuk P dengan menyamakan T_u ke T_u maks:

$$0.214P = 37.6 - 1.4(0.190P)$$
$$P = 78.4 \text{ kips}$$

Kemudian, cek V_u maksimum dan batas atas (30.0 kips/baut) pada T_u:

$$V_u = 0.190P = 0.190(78.4) = 14.9 \text{ kips} < 20.7 \text{ kips} \quad \text{OK}$$
$$T_u = 0.214P = 0.214(78.4) = 16.8 \text{ kips} < 30.0 \text{ kips} \quad \text{OK}$$

Maka dari itu, kapasitas beban layanannya P adalah 78.4 kips. ■

4.15.2 Memperhatikan Tarik Awal — Prosedur yang Disederhanakan

Selama tekan awal di antara pelat-pelat yang diakibatkan oleh tarik awal pada baut terpasang tidak sepenuhnya dilawan oleh beban eksternal, kita dapat menghitung tegangan tarik pada suatu baut dengan rumus lentur (*flexure*) $f = My/I$ jika hanya luas penampang lintang baut yang memberikan resistansi:

$$f_t = \frac{My}{I} = \frac{My}{\Sigma A_b y^2} \tag{4.15.6}$$

Bila semua penyambungnya berukuran sama (seperti biasanya), A_b dapat dikom-

Dipindai dengan CamScanner

binasikan dengan f_t untuk mendapatkan gaya tarik T pada sebuah baut. Dengan demikian:

$$T = A_b f_t = \frac{My}{\Sigma y^2} \tag{4.15.7}$$

Untuk menunjukkan bahwa **Persamaan 4.15.5** identik dengan **4.15.7**, dimisalkan kedalaman d dari daerah kontak sama dengan np, di mana n merupakan banyaknya penyambung pada satu barisan; kemudian **Persamaan 4.15.5** menjadi:

$$T = \frac{6Mp}{n^2p^2}\left(\frac{np - p}{np}\right) = \frac{12M}{n^3p^2}\left(\frac{p(n-1)}{2}\right) \tag{4.15.8}$$

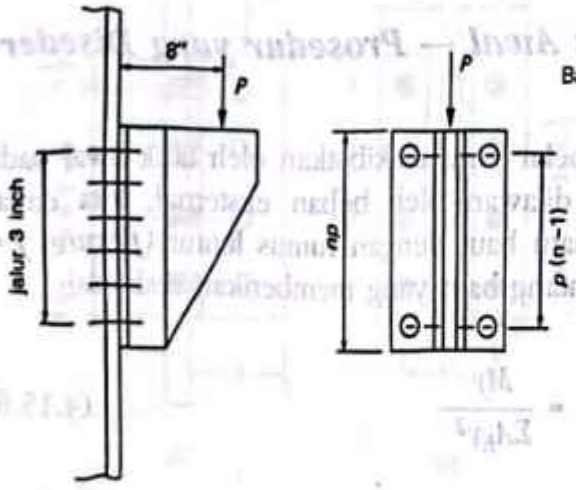
Perhatikan bahwa $p(n - 1)/2$ merupakan jarak dari pertengahan tinggi ke penyambung terluar dan berpasangan dengan y dari **Persamaan 4.15.6**. Lebih jauh lagi, suatu barisan penyambung tunggal yang masing-masing berjarak p dapat diperlakukan sebagai luasan persegi panjang yang melakukan resistansi dengan lebar A/p dan kedalaman np. Momen inersia dari luasan sedemikian adalah:

$$I = \frac{1}{12}\left(\frac{A}{p}\right)(np)^3 \tag{4.15.9}$$

yang kurang lebih berpasangan dengan momen inersia dari luas baut $\Sigma A_b y^2$. Dengan demikian, **Persamaan 4.15.7** dan **4.15.8** pada hakikatnya adalah sama. Berdasarkan penalaran ini, **Persamaan 4.12.28** desain dapat pula digunakan untuk mengestimasi banyaknya penyambung yang dibutuhkan bila penyambung tersebut akan dipengaruhi oleh momen yang menyebabkan tarik atau geser dan tarik.

■ Contoh 4.15.2

Untuk sambungan konsol (*bracket*) seperti **Gambar 4.15.3** terhadap kolom, ten-



Gambar 4.15.3 Contoh 4.15.2 Desain untuk geser dan tarik

Dipindai dengan CamScanner

binasikan dengan f_t untuk mendapatkan gaya tarik T pada sebuah baut. Dengan demikian:

$$T = A_b f_t = \frac{My}{\Sigma y^2} \tag{4.15.7}$$

Untuk menunjukkan bahwa **Persamaan 4.15.5** identik dengan **4.15.7**, dimisalkan kedalaman d dari daerah kontak sama dengan np, di mana n merupakan banyaknya penyambung pada satu barisan; kemudian **Persamaan 4.15.5** menjadi:

$$T = \frac{6Mp}{n^2p^2}\left(\frac{np-p}{np}\right) = \frac{12M}{n^3p^2}\left(\frac{p(n-1)}{2}\right) \tag{4.15.8}$$

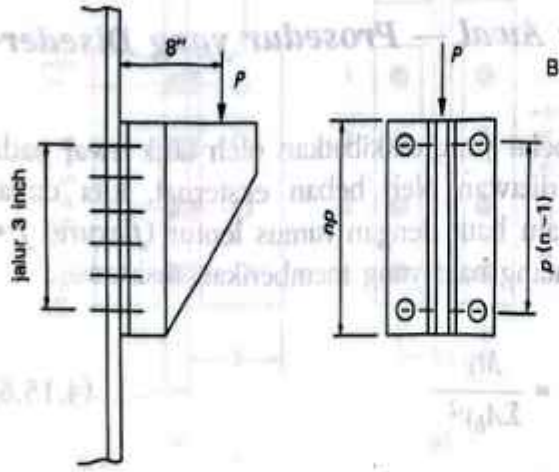
Perhatikan bahwa $p(n - 1)/2$ merupakan jarak dari pertengahan tinggi ke penyambung terluar dan berpasangan dengan y dari **Persamaan 4.15.6**. Lebih jauh lagi, suatu barisan penyambung tunggal yang masing-masing berjarak p dapat diperlakukan sebagai luasan persegi panjang yang melakukan resistansi dengan lebar A/p dan kedalaman np. Momen inersia dari luasan sedemikian adalah:

$$I = \frac{1}{12}\left(\frac{A}{p}\right)(np)^3 \tag{4.15.9}$$

yang kurang lebih berpasangan dengan momen inersia dari luas baut $\Sigma A_b y^2$. Dengan demikian, **Persamaan 4.15.7** dan **4.15.8** pada hakikatnya adalah sama. Berdasarkan penalaran ini, **Persamaan 4.12.28** desain dapat pula digunakan untuk mengestimasi banyaknya penyambung yang dibutuhkan bila penyambung tersebut akan dipengaruhi oleh momen yang menyebabkan tarik atau geser dan tarik.

■ **Contoh 4.15.2**

Untuk sambungan konsol (*bracket*) seperti **Gambar 4.15.3** terhadap kolom, ten-



Gambar 4.15.3 *Contoh 4.15.2 Desain untuk geser dan tarik*

Dipindai dengan CamScanner

tukan banyaknya baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch yang dibutuhkan untuk mentransmisikan gaya-gaya geser dan tarik. Gunakan jalur vertikal 3 inch. (*a*) Gunakan sambungan tipe tumpu (A325-X) dengan ulir terpisah dari bidang geser, dan (*b*) gunakan sambungan gelincir kritik (A325-SC). Gunakan *Load and Resistance Factor Design* dengan berasumsi bahwa bahwa bebannya adalah beban hidup gaya berat 52 kips sedang beban matinya 8 kips.

Penyelesaian:

(*a*) Sambungan tipe tumpu (A325-X). Beban terfaktor P_u sebesar:

$$P_u = 1.2(8) + 1.6(52) = 92.8 \text{ kips}$$

Kekuatan geser desain ϕR_n untuk penyambung yang terkena geser saja adalah:

$$\phi_v R_{nv} = 0.65(0.60F_u^b)\, mA_b$$
$$= 0.65(0.60)(120)(1)0.6013 = 28.1 \text{ kips}$$

Kekuatan tarik desain ϕR_n untuk penyambung yang terkena tarik saja adalah:

$$\phi_t R_{nt} = 0.75(0.75F_u^b)A_b$$
$$= 0.75(0.75)(120)0.6013 = 40.6 \text{ kips}$$

Dengan memperhatikan bahwa M untuk **Persamaan 4.12.28** adalah 92.8(8)/2 = 371 inch–kips per baris penyambung vertikal, banyaknya penyambung n yang dibutuhkan per baris adalah sekitar:

$$n = \sqrt{\frac{6M}{Rp}} = \sqrt{\frac{6(371)}{40.6(3)}} = 4.3 \text{ yang dibutuhkan untuk } M \text{ saja}$$

$$n = \frac{P}{2R} = \frac{92.8}{2(28.1)} = 1.7 \text{ yang dibutuhkan untuk geser saja}$$

Coba 10 baut (5 baut per baris):

$$\Sigma y^2 = 4[(3)^2 + (6)^2] = 180 \text{ inch}^2$$

$$R_{ut} = \frac{M_u y}{\Sigma y^2} = \frac{92.8(8)6}{180} = 24.7 \text{ kips} < 40.6 \text{ kips} \quad \text{OK}$$

$$R_{uv} = \frac{P_u}{\Sigma n} = \frac{92.8}{10} = 9.3 \text{ kips} < 28.1 \text{ kips} \quad \text{OK}$$

Kemudian cek interaksi di antara geser dan tarik. Dari **Tabel 4.14.1**:

$$F'_{ut} = 85 - 1.4f_{uv} \leq 68 \text{ ksi}$$

Dipindai dengan CamScanner

$$\phi R'_{ut} = F'_{ut} A_b = 85(0.6013) - 1.4R_{uv} \leq 68(0.6013)$$
$$= 51.1 - 1.4R_{uv} \leq 40.9 \text{ kips}$$
$$= 51.1 - 1.4(9.3) = 38.1 \text{ kips} > 24.7 \text{ kips} \quad \text{OK}$$

Kita dapat mengecek 4 baut per baris:

$$\Sigma y^2 = 4[(1.5)^2 + (4.5)^2] = 90 \text{ inch}^2$$
$$R_{ut} = \frac{M_u y}{\Sigma y^2} = \frac{92.8(8)4.5}{90} = 37.1 \text{ kips} < 38.1 \text{ kips} \quad \text{OK}$$

Jelaslah bahwa 4 baut per baris tidak mencukupi. Perhatikan bahwa ada sedi ketidakcocokan antara $\phi R_{nt} = 40.6$ kips dan batas atas pada interaksi baris (4 kips). Hal ini timbul dari usaha menyederhanakan persamaan linear tersebut; n sing-masing limit tampaknya dapat diterima.
Gunakan 10 — baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch per baris.

(*b*) Sambungan gelincir kritik. Persyaratan kekuatan yang terlihat dalam masih dapat diterapkan di sini; meskipun demikian, biasanya pembatasan beb layanan yang berkaitan dengan dengan resistansi gelincir yang akan menentuka **Persamaan 4.12.28** dapat digunakan dengan beban-beban layanan dan krite resistansi ijin yang dimasuki:

$$M = 60(8)/2 = 240 \text{ inch–kips per baris baut}$$
$$R_v = F_v m A_b = 17(1)(0.6013) = 10.2 \text{ kips/baut}$$

Harga geser tereduksi dengan adanya tarik adalah:

$$F'_v = F_v(1 - T/T_b) \qquad \text{(LRFD–J3.5)}$$

Karena kekuatan harus dicek meskipun sambungan tersebut merupakan sa bungan gelincir kritik, banyaknya penyambung untuk menahan gaya tarikn adalah sama dengan hasil perhitungan dalam (*a*) di mana ditunjukkan 4 penyambung per baris. Di sini tampaknya geser lebih berpengaruh; denga demikian, estimasi R pada suatu harga yang sedikit kurang dari 10.2 kips, kataka 8 kips:

$$n = \frac{P}{2R} = \frac{60}{2(8)} = 3.8 \text{ taksiran untuk geser saja}$$

Dengan sekitar 4 baut yang dibutuhkan untuk geser dan 4 untuk tarik, har dilakukan penyelidikan atas lebih dari 4 baut. Dicoba 5 baut per baris. Beba layanan maksimum per baut dalam tarik dan geser adalah sebagai berikut:

Dipindai dengan CamScanner

$$R_t = \frac{My}{\Sigma y^2} = \frac{60(8)6}{180} = 16.0 \text{ kips}$$

$$R_v = \frac{P}{\Sigma n} = \frac{60}{10} = 6.0 \text{ kips}$$

$$F_v' = F_v(1 - T/T_b)\, A_b$$
$$= 17(1 - 16.0/39) = 10.0 \text{ ksi}$$

$$R_v \text{ maks} = F_v' A_b = 10.0(0.6013)$$
$$= 6.0 \text{ kips} \approx [R_v = 6.0 \text{ kips}] \quad \text{OK}$$

Dengan demikian, 5 baut per baris jelas memenuhi persyaratan resistansi gelincir dan lebih dari cukup untuk persyaratan kekuatan geser dan tarik. ■

Gunakan 10 — baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch per baris.

Acuan Terpilih

4.1. C. Batho and E. H. Bateman. "Investigations on Bolts and Bolted Joints," Second Report of the Steel Structures Research Committee. London: His Majesty's Stationery Office, 1934.

4.2. W. M. Wilson and F. P. Thomas. "Fatigue Tests on Riveted Joints," Bulletin 302, Engg. Experiment Station, U. of Illinois, Urbana, IL., 1938.

4.3. A. E. R. De Jonge. "Riveted Joints; a Critical Review of the Literature Covering Their Development." New York: American Society of Mechanical Engineers, 1945.

4.4. AISC. "Symposium on HighStrength Bolts," *Proceedings of AISC National Engineering Conference*. New York: American Institute of Steel Construction, 1950, 22–43.

4.5. William H. Munse. "Research on Bolted Connections," *Transactions*, ASCE, 121 (1956), 1255–1266.

4.6. "Rivets and High-Strength Bolts, A Symposium," *Transactions*, ASCE, 126, Part II (1961), 693-820.

4.7. Research Council on Structural Connections. *Allowable Stress Design Specification for Structural Joints Using ASTM A 325 or A 490 Bolts*. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, November 13,1985.

4.8. Research Council on Structural Connections. *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts*. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, September 1,1986.

4.9. Research Council on Structural Connections. *Commentary on Specifications for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts*. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction, November 13,1985.

4.10. John W. Fisher, Theodore V. Galambos, Geoffrey L. Kulak, and Mayasandra

Dipindai dengan CamScanner

K. Ravindra. "Load and Resistance Factor Design Criteria for Connectors," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 104, ST9 (September 1978), 1427–1441.

4.11. J. W. Fisher, P. 0. Ramseier, and L. S. Beedle. "Strength of A440 Steel Joints Fastened with A325 Bolts," *Publications,* IABSE, 23 (1963).

4.12. John L. Rumpf and John W. Fisher, "Calibration of A325 Bolts," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 89, ST6 (December 1963), 215–234.

4.13. John H. A. Struik, Abayomi 0. Oyeledun, and John W. Fisher. "Bolt Tension Control with a Direct Tension Indicator," *Engineering Journal,* AISC, 10,1 (First Quarter 1973), 1–5.

4.14. Desi D. Vasarhelyi and Kah Ching Chiang. "Coefficient of Friction in Joints of Various Steels," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 93, ST4 (August 1967), 227–243.

4.15. Joseph A. Yura and Karl H. Frank. "Testing Method to Determine the Slip Coefficient for Coatings Used in Bolted Joints," *Engineering Journal,* AISC, 22, 3 (3rd Quarter 1985), 151–155. (also available in AISC *LRFD Manual* [1.17], p. 6-278)

4.16. Theodore V. Galambos, T. A. Reinhold, and Bruce Ellingwood. "Serviceability Limit States: Connection Slip," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 108 ST12 (December 1982), 2668–2680. 4.17. Sherwood F. Crawford and Geoffrey L. Kulak "Eccentrically Loaded Bolted Connections," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 97, ST3 (March 1971), 765–783.

4.18. Geoffrey L. Kulak. "Eccentrically Loaded Slip-Resistant Connections," *Engineering Journal,* AISC, 12, 2 (2nd Quarter 1975), 52–55.

4.19. G. Donald Brandt. "Rapid Determination of Ultimate Strength of Eccentrically Loaded Groups," *Engineering Journal,* AISC, 19, 2 (2nd Quarter 1982), 94–100. Disc. by Cedric Marsh, *Engineering Journal, 19,* 4 (4th Quarter 1982), 214–215; Nestor Iwankiw, *Engineering Journal,* 20, 1 (lst Quarter 1983), 46; 2 (2nd Quarter 1983), 88.

4.20. Avigdor Rutenberg. "Nonlinear Analysis of Eccentric Bolted Connections," *Engineering Journal,* AISC, 21, 4 (4th Quarter 1984), 227–236.

4.21. J. W. Fisher. "Behavior of Fasteners and Plates with Holes," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 91, ST6 (December 1965), 265–286.

4.22. Carl L. Shermer. "Plastic Behavior of Eccentrically-Loaded Connections," *Engineering Journal,* AISC, 8, 2 (April 1971), 48–51.

4.23. Eugene Chesson, Jr., Norberto L. Faustino, and William H. Munse. "High-Strength Bolts Subjected to Tension and Shear," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 91, STS (October 1965),155–180.

4.24. Hans William Hagen and Richard C. Penkul. "Design Charts for Bolts with Combined Shear and Tension," *Engineering Journal,* AISC, 2, 2 (April 1965), 42–45.

4.25. John R. Veillette and John T. DeWolf. "Eccentrically Loaded High Strength Bolted Connections," *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 111, 5 (May 1985), 1003–1018.

Dipindai dengan CamScanner

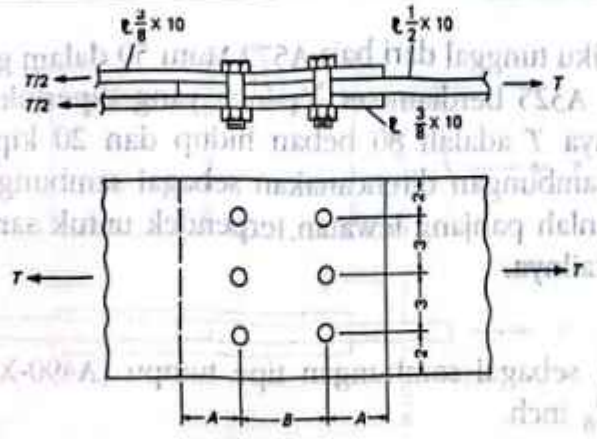
Soal-soal

Semua soal hendaknya dikerjakan menurut *Load and Resistance Factor Design* AISC atau *Allowable Stress Design*. Semua beban yang diberikan merupakan beban layanan, kecuali bila diberikan keterangan khusus. Semua lobang merupakan lobang *standar* sedang kondisi permukaannya adalah *skala gilingan bersih* (*clean mill scale*) (Kelas A) kecuali bila ada keterangan khusus. Bila diminta analisis kekuatan ultimit pada sebuah soal *Allowable Stress Design*, gunakan faktor keamanan sebesar 2.5 untuk mendapatkan harga yang diijinkan. Bila dibutuhkan, asumsikan bahwa jarak dari pusat lobang ke pinggir terdekat (jarak pinggir atau jarak ujung) adalah sebesar $1^1/_2$ inch, kecuali bila diberikan keterangan khusus.

Harga-harga tegangan leleh F_y dan kekuatan tarik F_u untuk batang baja tersedia dalam **Tabel 2.1.1**. Untuk baut A325, F_u^b minimum = 120 ksi untuk baut berdiameter $^1/_2$ sampai dengan 1 inch, dan minimum 105 ksi untuk baut berdiameter $1^1/_8$ sampai dengan $1^1/_2$ inch. Untuk baut A490, F_u^b minimum = 150 ksi untuk diameter $^1/_2$ sampai dengan $1^1/_2$ inch.

4.1 Tentukan kapasitas tarik beban layanan dari sambungan dalam gambar berikut untuk kasus yang ditunjukkan. Selidikilah sebagai sambungan tipe tumpu dengan ulir terpisah (X) dari bidang geser, sebagai tipe tumpu dengan ulir berada dalam bidang geser (N), atau sebagai sambungan gelincir kritik (SC), seperti yang ditunjukkan dalam judul "Tipe Sambungan". Spesifikasikan dimensi minimum A dan B yang sesuai untuk sambungan tersebut.

Kasus	% Beban Mati	% Beban Hidup	Baja Pelat	Diameter Baut (inch)	Tipe Sambungan
1	10	90	A36	3/4	A325–X
2	15	85	A36	3/4	A325–SC
3	15	85	A572 Gr 50	3/4	A325–N
4	20	80	A572 Gr 50	3/4	A325–SC
5	20	80	A572 Gr 60	7/8	A325–X
6	40	60	A572 Gr 60	7/8	A325–SC
7	15	85	A572 Gr 65	7/8	A490–X
8	15	85	A572 Gr 65	7/8	A490–SC



Soal 4.1

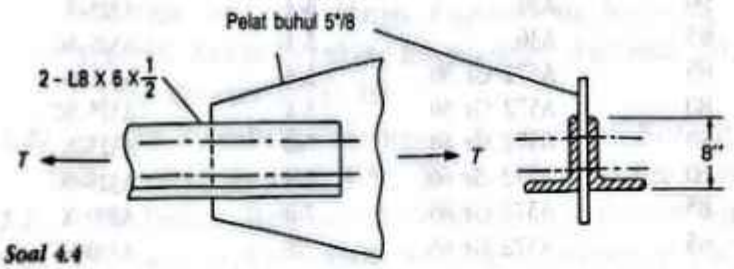
Dipindai dengan CamScanner

4.2 Untuk kasus mana pun yang diselesaikan dalam **Soal 4.1**, tentukan keamanan terhadap gelinciran pada beban layanan. Apakah Saudara menghe daki gelinciran terjadi pada beban layanan? Bila kekuatan baut telah mer tukan, apakah gelinciran dapat diharapkan terjadi pada beban layanan?

4.3 Tentukan kapasitas beban layanan untuk T untuk sambungan baut dari **So 3.15** bila $s = s_2 = 2$ inch dan digunakan baut A325 dengan ulir di luar bidan geser. Spesifikasikan jarak ujung yang dibutuhkan dan evaluasilah apaka jarak silang (*stagger*) sebesar 2 inch sudah mencukupi. Bila belum, berapaka harga yang seharusnya digunakan. Gunakan (*a*) sambungan tipe tumpu (A32 X) dan (*b*) sambungan gelincir kritik (A325-SC).

4.4 Untuk kasus yang dipilih, tentukan banyaknya baut yang dibutuhkan untu mendapatkan kapasitas penuh daribatang tarik siku ganda seperti dalam gam bar berikut ini. Gunakan dua baris baut tanpa bersilang. Buatlah detil sam bungan tersebut.

Kasus	% Beban mati	% Beban hidup	Baja pelat	Diameter baut (inch)	Tipe sambungan
1	10	90	A572 Gr 50	3/4	A325–X
2	15	85	A572 Gr 50	3/4	A325–SC
3	30	70	A572 Gr 50	7/8	A325–N
4	40	60	A572 Gr 50	7/8	A325–SC

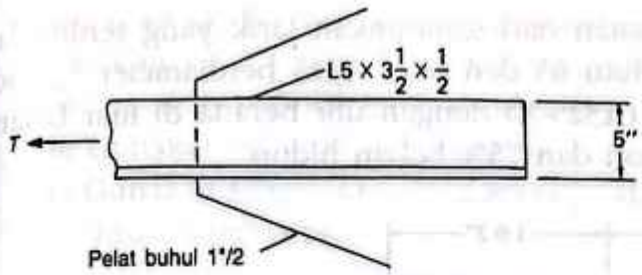


Soal 4.4

4.5 Untuk batang tarik siku tunggal dari baja A572 Mutu 50 dalam gambar berikut berapa jumlah baut A325 berdiameter $^3/_4$ inch yang diperlukan untuk sam bungannya? Bebannya T adalah 80 beban hidup dan 20 kips beban mati Asumsikan bahwa sambungan direncanakan sebagai sambungan gelincir-kri tik (A325-SC). Desainlah panjang lewatan terpendek untuk sambungan terse but dan buatlah detailnya.

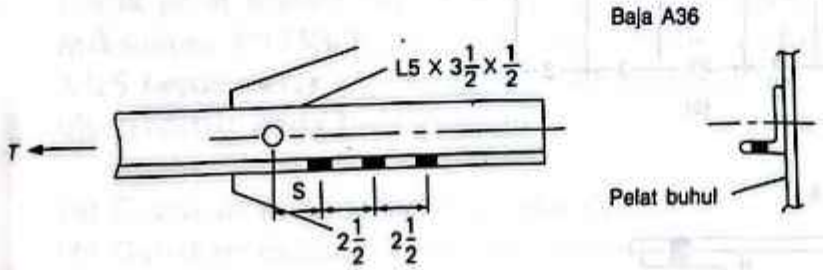
4.6 Selesaikan **Soal 4.5** sebagai sambungan tipe tumpu (A490-X) dengan baut A490 berdiameter $^5/_8$ inch.

Dipindai dengan CamScanner



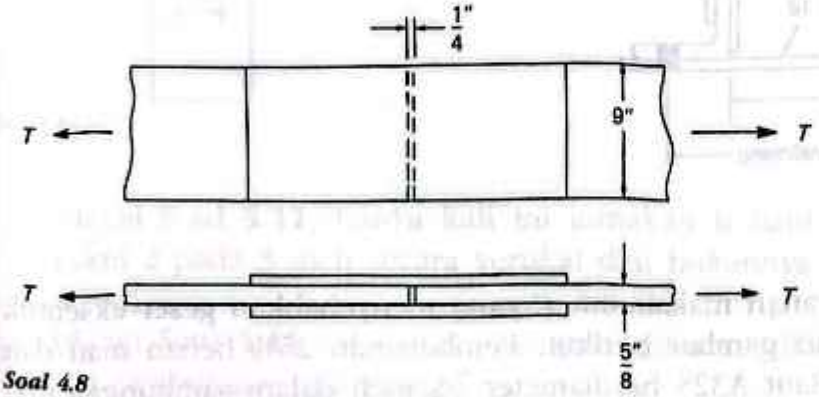
Soal 4.5 dan 4.6

4.7 Untuk batang tarik siku tunggal dari baja A36 dalam gambar berikut, tentukan banyaknya baut A325 berdiameter $^{7}/_{8}$ inch yang dibutuhkan pada sambungan tipe tumpu (A325-N) di mana ulir boleh terdapat pada bidang geser. Bebannya adalah 7 kips beban mati dan 70 kips beban hidup. Asumsikan bahwa ada tiga *lobang kosong* berdiameter $^{15}/_{16}$ inch pada bagian kaki yang menonjol dan bukan menjadi bagian dari sambungan tersebut. Baut-baut pemikul beban berada dalam baris tunggal dengan baut pertama terletak pada suatu jarak *S* di muka lobang kosong pertama. Buatlah detail sambungan tersebut.



Soal 4.7

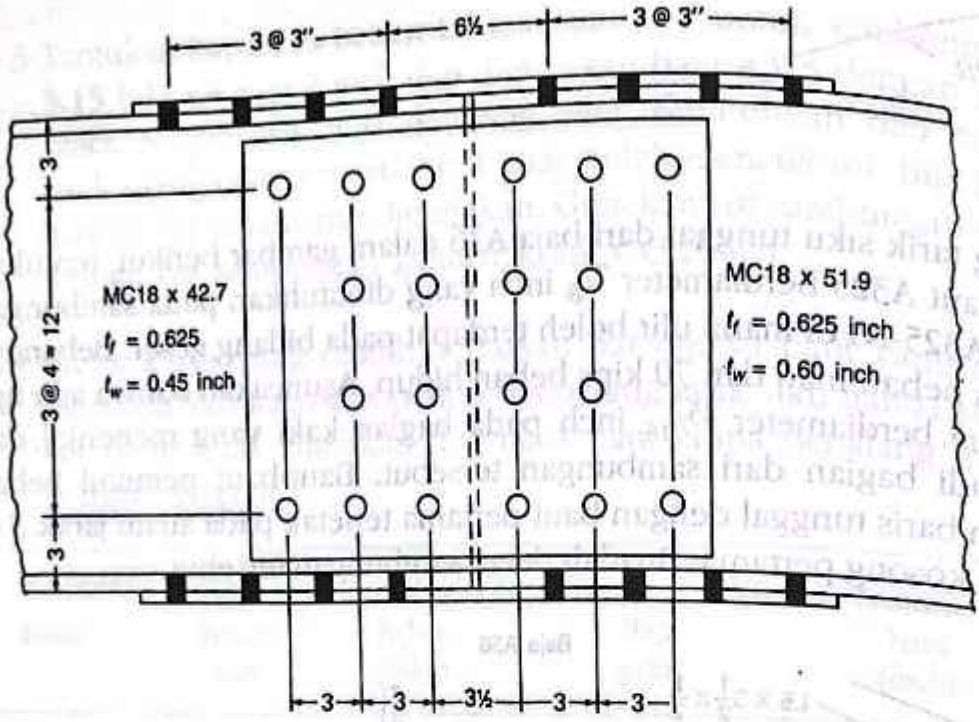
4.8 Buatlah desain dan detail sambungan dua tangkup seperti terlihat dalam gambar berikut sehingga mampu memiliki kapasitas tarik maksimum dengan asumsi beban mati 20% dan beban hidup 80%. Baja yang digunakan adalah A36 dan baut A325 berdiameter $^{7}/_{8}$ inch pada sambungan tipe tumpu (A325-X) ulir di luar bidang geser. Berapakah kapasitas beban layanan yang dihasilkan sambungan tersebut?



Soal 4.8

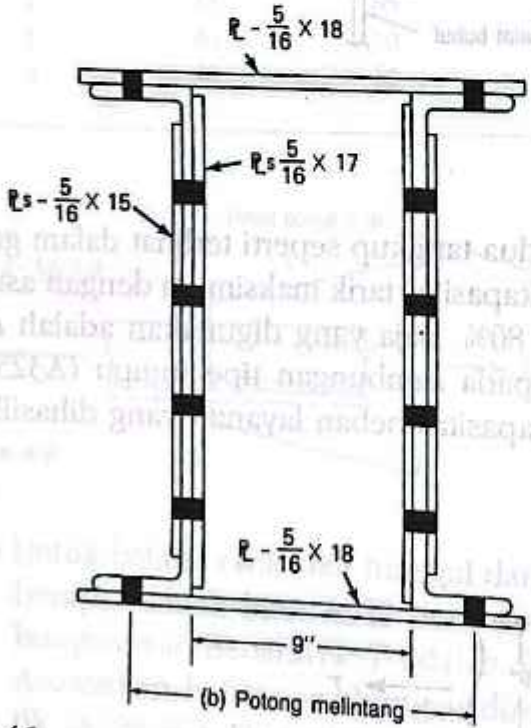
Dipindai dengan CamScanner

4.9 Tentukan kapasitas beban layanan dari sambungan tarik yang terdiri dari dua kanal ini. Bajanya A572 Mutu 65 dan baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch dalam sambungan tipe tumpu (A325-X) dengan ulir berada di luar bidang geser. Bebannya 25% beban mati dan 75% beban hidup.



(a)

Soal 4.9



Soal 4.9

4.10 Hitunglah beban layanan maksimum P yang menyebabkan geser eksentrik pada sambungan dari gambar berikut. Pembebanan 25% beban mati dan 75% beban hidup. Baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch dalam sambungan tipe

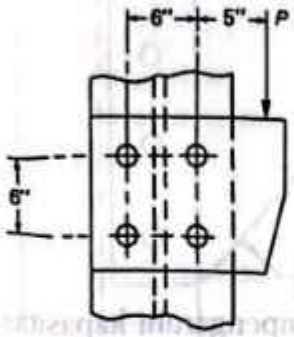
Dipindai dengan CamScanner

tumpu (A325-X) dengan ulir terpisah dari bidang geser. Asumsikan bahwa kekuatan pelat konsol (*bracket*) mencukupi.

(*a*) Gunakan metode (vektor) elastik.

(*b*) Gunakan metode kekuatan dengan rotasi di sekitar pusat sesaat.

(*c*) Gunakan tabel AISC, "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS", dengan interpolasi.



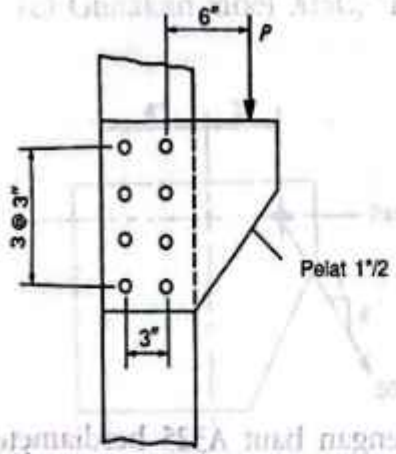
Soal 4.10

4.11 Untuk pelat konsol baja A36 dari gambar berikut, hitunglah beban layanan maksimum P (15% beban mati dan 85% beban hidup) bila digunakan baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch dalam sambungan tipe tumpu (A325-N) dengan ulir terdapat pada bidang geser.

(*a*) Gunakan metode (vektor) elastik.

(*b*) Gunakan metode kekuatan ultimit.

(*c*) Gunakan tabel-tabel AISC, "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS".



Soal 4.11

4.12 Ulangi **Soal 4.11**, hanya kali ini gunakan 6 baut dan bukannya 8 baut; yakni 2 pada 3 inch secara vertikal dan bukannya 3 pada 3 inch.

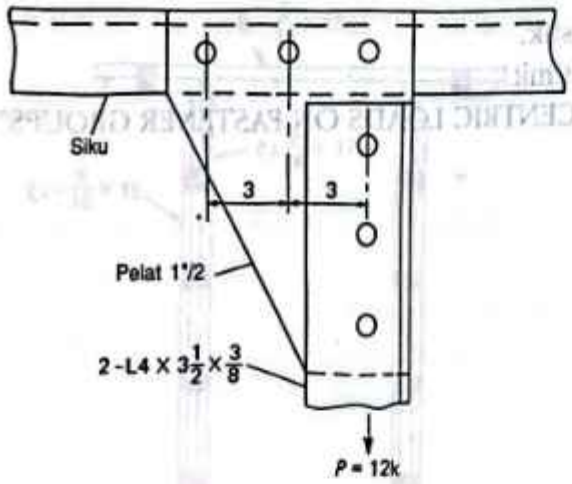
4.13 Ulangi **Soal 4.11** sebagai sambungan gelincir kritik (A325-SC) dan bukannya sambungan tipe tumpu.

Dipindai dengan CamScanner

4.14 Pilihlah diameter baut A490 untuk sambungan tipe tumpu (A490-X) bila 10% bebannya adalah beban mati dan 90% beban hidup.
(*a*) Gunakan metode (vektor) elastik.
(*b*) Gunakan analisis kekuatan ultimit.
(*c*) Gunakan tabel AISC, "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS".

Soal 4.14

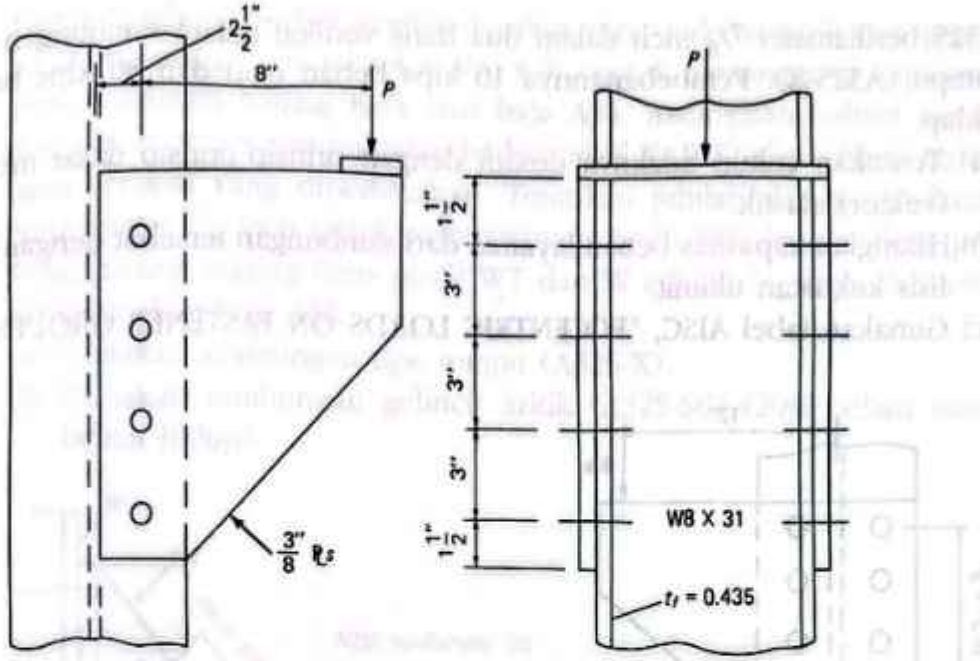
4.15 Dengan mengasumsikan bahwa penyambung mempengaruhi kapasitas, tentukan ukuran baut yang dibutuhkan untuk sambungan dalam gambar berikut bila 10% beban merupakan beban mati dan 90% beban hidup. Sambungan adalah tipe tumpu (A325-X) yang terdiri dari baut A325.
(*a*) Gunakan metode (vektor) elastik.
(*b*) Gunakan analisis kekuatan ultimit.
(*c*) Gunakan tabel AISC, "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS".



Soal 4.14

4.16 Untuk sambungan dari gambar berikut dengan baut A325 berdiameter ¾ inch dalam gelincir kritik, tentukan kapasitas beban layanan P (beban mati 15% dan beban hidup 85%) dengan metode-metode berikut, dan bandingkan hasilnya:
(*a*) Gunakan metode vektor (elastik).
(*b*) Gunakan pusat sesaat—metode resistansi gelincir konstan untuk sambungan gelincir kritik (*lihat* **Contoh 4.12.4**).
(*c*) Gunakan tabel AISC, "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS".

Dipindai dengan CamScanner



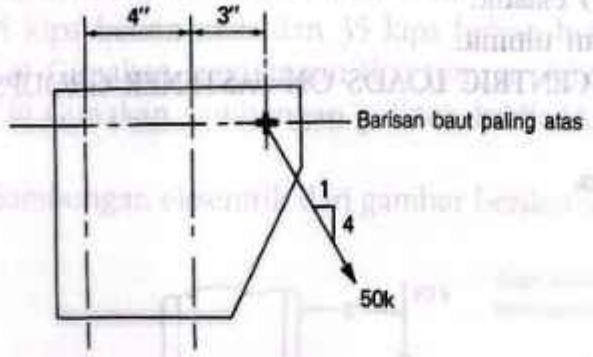
Soal 4.16

4.17 Untuk pembebanan geser eksentrik dari gambar berikut, digunakan dua baris vertikal dari baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch dengan jarak antar baut 3 inch. Pilihlah banyaknya baut yang tepat untuk sambungan tipe tumpu (A325-X). Bebannya 40% beban mati dan 60% beban hidup.

(*a*) Gunakan metode (vektor) elastik

(*b*) Gunakan metode kekuatan ultimit.

(*c*) Gunakan tabel AISC, "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS".



Soal 4.17

4.18 Ulangi **Soal 4.17** dengan baut A490 berdiameter $^3/_4$ inch.

4.19 Untuk pembebanan geser eksentrik dari gambar berikut, digunakan baut

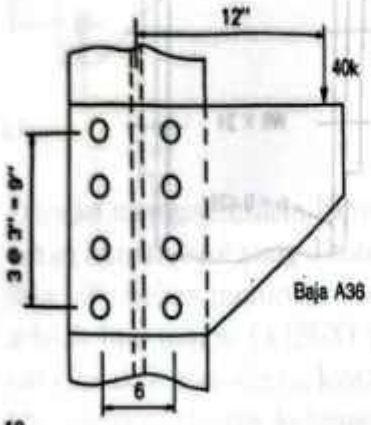
Dipindai dengan CamScanner

A325 berdiameter $^7/_8$ inch dalam dua baris vertikal dalam sambungan tipe tumpu (A325-X). Pembebanannya 10 kips beban mati dan 30 kips beban hidup.

(*a*) Tentukan cukup tidaknya desain dengan prinsip-prinsip dasar metode (vektor) elastik.

(*b*) Hitunglah kapasitas beban layanan dari sambungan tersebut dengan analisis kekuatan ultimit.

(*c*) Gunakan tabel AISC, "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS".



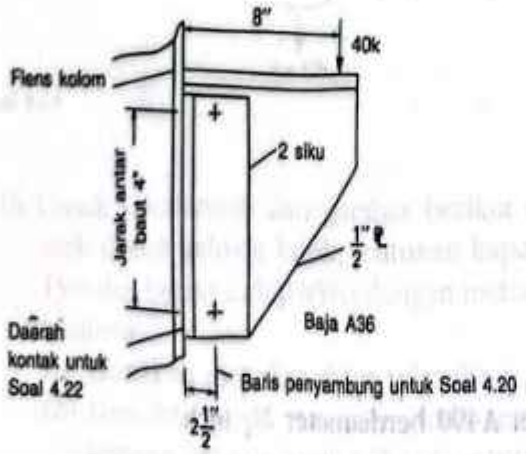
Soal 4.19

4.20 Untuk pembebanan geser eksentrik dari gambar berikut, digunakan barisan tunggal baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch dalam sambungan tipe tumpu (A325-X). Pembebanan 7 kips beban mati dan 33 kips beban hidup. Tentukan banyaknya baut yang dibutuhkan. Berapakah tebal bagian-bagian sambungan yang diperlukan agar tegangan tumpu tidak menentukan dengan tetap menggunakan jarak pinggir minimum (*lihat* LRFD-Tabel J3.7 atau ASD-Tabel J3.5).

(*a*) Gunakan metode (vektor) elastik.

(*b*) Gunakan metode kekuatan ultimit.

(*c*) Gunakan tabel AISC, "ECCENTRIC LOADS ON FASTENER GROUPS".



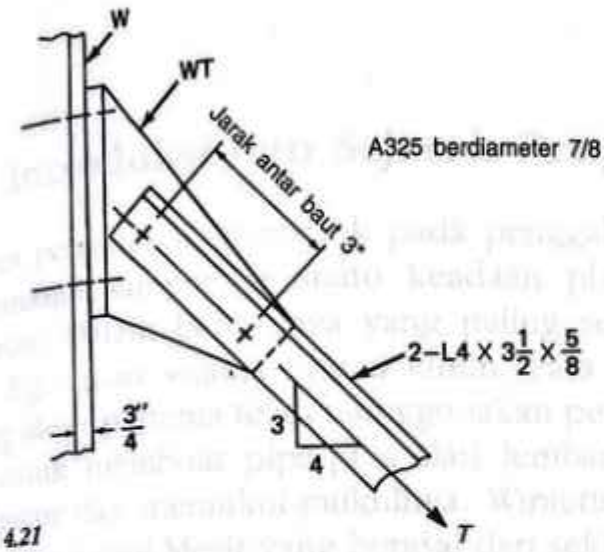
Soal 4.20 dan 4.22

Dipindai dengan CamScanner

4.21 Untuk sambungan dari gambar berikut yang terkena tarik dan geser langsung, digunakan dua siku 4 x $3^1/_2$ x $^5/_8$ untuk menanggung kapasitas maksimum sebagai batang tarik dari baja A36. Asumsikan bahwa sambungan dari siku-siku tersebut terhadap badan profil T (WT) akan dibuat dalam satu baris serperti yang diperlihatkan. Tentukan jumlah dan posisi baut A325 berdiameter $^7/_8$ inch untuk menyambung profil WT dengan flens profil W. Tebal masing-masing flens profil WT dan W adalah $^3/_4$ inch, dan keduanya menggunakan baja A36.

(*a*) Gunakan sambungan tipe tumpu (A325-X).

(*b*) Gunakan sambungan gelincir kritik (A325-SC) (20% beban mati; 80% beban hidup).



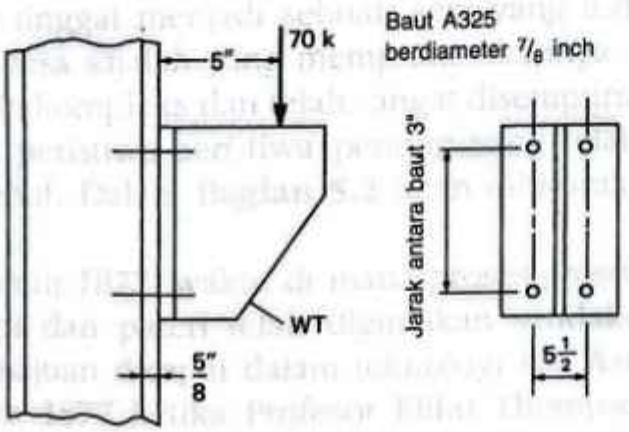
Soal 4.21

4.22 Sambungan eksentrik dari gambar soal berikut ini menyebabkan geser dan tarik pada penyambung yang menghubungkan profil siku-siku dengan flens kolom. Tentukan jumlah dan jarak antar baut berdiameter $^7/_8$ inch yang dibutuhkan untuk membuat sambungan ke flens kolom $^3/_4$ inch. Bebannya 5 kips beban mati dan 35 kips beban hidup.

(*a*) Gunakan sambungan tipe tumpu (A325-X).

(*b*) Gunakan sambungan gelincir kritik (A325-SC).

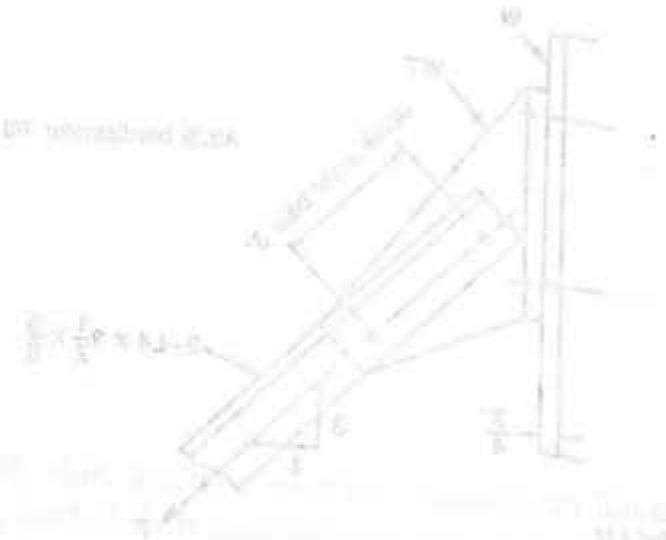
4.23 Sambungan eksentrik dari gambar berikut menyebabkan geser dan tarik pada

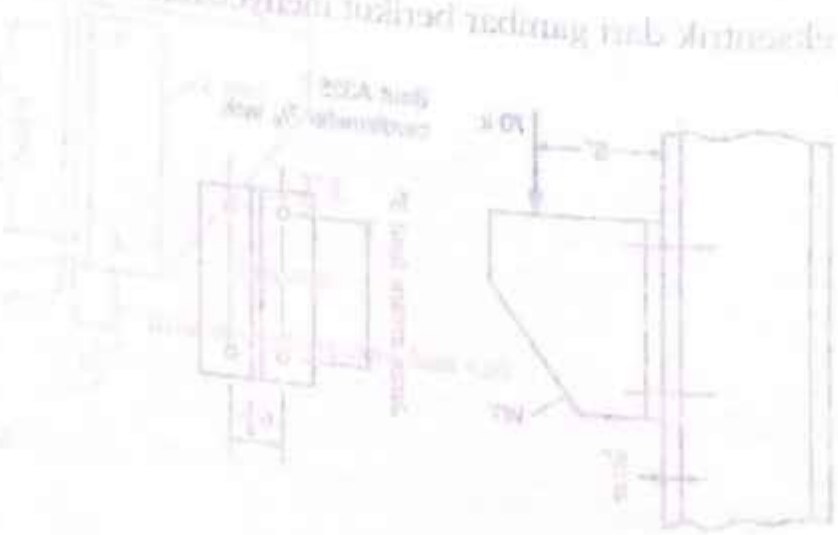


Soal 4.23

Dipindai dengan CamScanner

penyambung yang menghubungkan profil T (WT) dengan flens kolom. Tentukan banyaknya baut berdiameter $^{7}/_{8}$ inch, dengan jarak vertikal antar baut sebesar 3 inch, yang dibutuhkan untuk membuat sambungan ke flens kolom $^{5}/_{8}$ inch. Bebannya, 10 kips beban mati dan 60 kips beban hidup.
(*a*) Gunakan sambungan tipe tumpu (A325-X).
(*b*) Gunakan sambungan gelincir kritik (A325-SC).





Dipindai dengan CamScanner

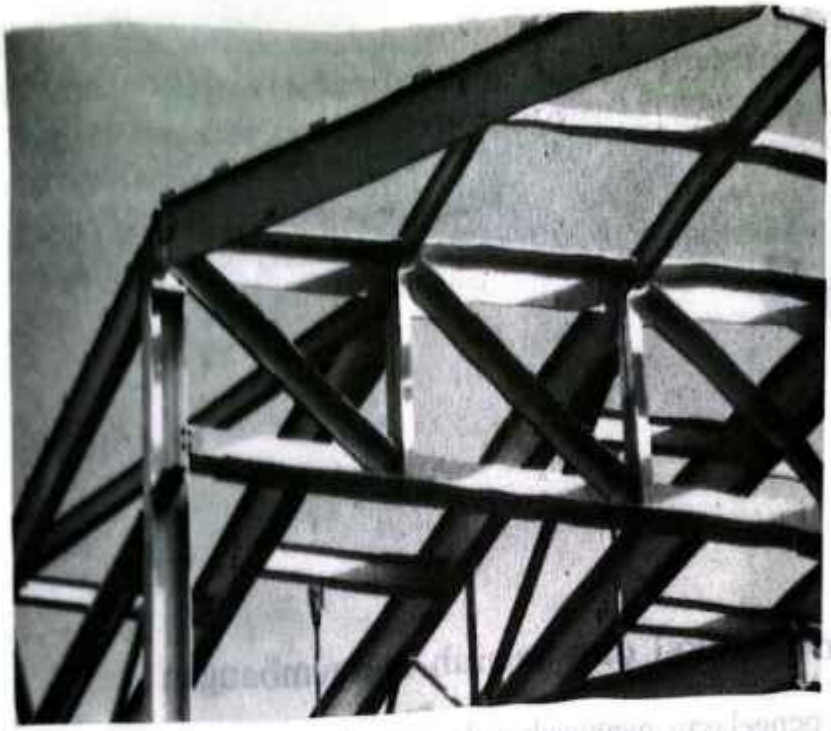
5
LAS

5.1 Introduksi dan Sejarah Pengembangan

Proses pengelasan menunjuk pada penggabungan bagian-bagian logam dengan pemanasan sampai ke suatu keadaan plastik atau fluid, dengan atau tanpa tekanan. Dalam bentuknya yang paling sederhana, "pengelasan" telah dikenal dan digunakan selama ribuan tahun. Para ahli sejarah menduga bahwa orang-orang Mesir pertama telah menggunakan pengelasan dengan tekanan sekitar 5500 SM untuk membuat pipa-pipa dari lembaran tembaga dengan menangkupkan pinggiran dan memukul-mukulnya. Winterton [5.1] telah melaporkan bahwa banyak objek seni Mesir yang berasal dari sekitar 3000 SM telah ditemukan di mana lempengan emas dipadukan dengan tembaga dengan cara dipukul-pukulkan dan dijejalkan ke dasaran baja. Pada tipe pengelasan ini, yang disebut *las tempa* (*forged welding*), merupakan proses pertama manusia untuk menggabungkan bagian-bagian logam. Contoh terkenal las tempa kuno adalah pedang Damaskus yang dibuat dengan menempa lapisan-lapisan logam dari berbagai sifat. Yang menarik, las tempa cukup dikembangkan dan menjadi hal yang penting bagi orang Romawi sehingga mereka menamakan salah satu dewa mereka sebagai Vulcan (dewa api dan pekerjaan besi) untuk mewakili seni tersebut. Dewasa ini, kata vulkanisasi digunakan dalam kaitannya dengan pemberian perlakuan pada karet dengan belerang, namun awal-mulanya berarti "memperkeras". Sekarang, las tempa praktis tinggal menjadi sebuah seni yang terlupakan di mana tinggal para pandai besi desa sajalah yang mempraktekkannya. Las seperti yang dikenal sekarang jauh lebih kompleks dan telah sangat disempurnakan. Selanjutnya bagian ini akan melacak peristiwa-peristiwa penting yang telah menyumbang perkembangan seni tersebut. Dalam **Bagian 5.2** akan dibicarakan proses-proses pengelasan tertentu.

Sampai pada tahun 1877, waktu di mana proses-proses yang sudah lama dikenal seperti las api dan pateri telah digunakan setidaknya selama 3000 tahun, hanya sedikit kemajuan dicapai dalam teknologi las. Asal-usul las resistansi berawal sekitar tahun 1877 ketika Profesor Elihu Thompson memulai serangkaian

Dipindai dengan CamScanner



Kerangka dilas sebagai bagian dari sistem kerangka ruang untuk atap (Foto oleh C.G. Salmon)

percobaan [5.2] yang membalikkan polaritas koil-koil tranformer. Ia mendapatkan patennya yang pertama [5.3] pada tahun 1885, dan mesin las tumpu resistansi yang pertama didemonstrasikan pada *American Institute Fair* tahun 1887. Pada tahun 1889, Charles Coffin [5.2] mendapatkan paten untuk las tumpu nyala dan las ini menjadi salah satu proses las yang paling penting.

Zerner dalam tahun 1885 memperkenalkan proses las busur karbon yang menggunakan dua elektroda karbon, sedang N.G. Slavianoff [5.5] dalam tahun 1888 di Rusia menjadi orang pertama yang menggunakan proses busur logam dengan elektroda-lektroda telanjang tanpa pelapis. Secara independen, Coffin juga menyelidiki proses busur logam dan mendapatkan paten Amerika Serikat dalam tahun 1892. pada tahun 1889, A.P. Strohmeyer [5.2] memperkenalkan konsep elektroda logam berlapis untuk mengeliminasi banyak permasalahan yang terkait dengan penggunaan elektroda telanjang.

Thomas Fletcher [5.1] dalam tahun 1887 menggunakan sebuah pipa hembus yang membakar hidrogen dan oksigen, dan ia pun menunjukkan bahwa ia berhasil memotong atau melelehkan logam. Antara 1901-1903, Fouche dan Picard mengembangkan suluh (*torch*) yang dapat digunakan dengan asetilen dan dari situ dimulailah era pengelasan dan pemotongan dengan oksiasetilen.

Periode antara 1903 dan 1918 melihat penggunaan las terutama sebagai metode perbaikan dengan dorongan paling kuat terjadi selama Perang Dunia I (1914-1918). Teknik-teknik pengelasan khususnya terbukti dapat diterapkan pada perbaikan kapal-kapal yang mengalami kerusakan. Winterton [5.1] melaporkan bahwa dalam tahun 1917 terdapat 103 kapal musuh yang diinternir di Amerika Serikat

Dipindai dengan CamScanner

saja yang mengalami kerusakan, dan banyaknya orang yang dipekerjakan dalam operasi pengelasan meningkat dari 8000 menjadi 33000 selama periode 1914-1918.

Setelah Perang Dunia I (1918), dilakukan percobaan lanjutan dengan elektroda-elektroda dan berbagai gas untuk melindungi busur dan daerah las yang kemudian menghasilkan pengembangan las busur dengan gas tungsten dan las busur logam (*lihat* **Bagian 5.2**). Selama periode 1930 sampai 1950 terjadi banyak penyempurnaan, termasuk pengenalan penggunaan fluks granular dalam tahun 1932 untuk melindungi las yang bila digabungkan dengan elektroda yang diumpankan terus-menerus akan menghasilkan pengembangan las busur terbenam (*lihat* **Bagian 5.2**) di mana busur nyalanya tertutup di bawah fluks granular nya. Metode yang populer dalam tahun 1980-an ini telah mendapatkan paten pada tahun 1935.

Pada tahun 1958, dikembangkan pengelasan busur berinti fluks berpelindung sendiri, di mana fluks granular yang digunakan untuk melindungi las terkandung dalam inti material elektroda kontinu, dan dengan demikian memungkinkan penggunaan peralatan otomatik dan semi-otomatik yang lebih luas.

Pada tahun 1980-an, otomasi telah menjadi suatu faktor signifikan dalam teknologi las dan terjadilah penggunaan robotika las secara besar-besaran.

Kini telah tersedia banyak macam proses las untuk menggabungkan berbagai logam serta paduan-paduannya. Proses-proses yang memiliki arti penting khusus bagi baja struktur dan para perekayasa struktur akan dibahas dalam **Bagian 5.2**.

5.2 Proses-proses Dasar

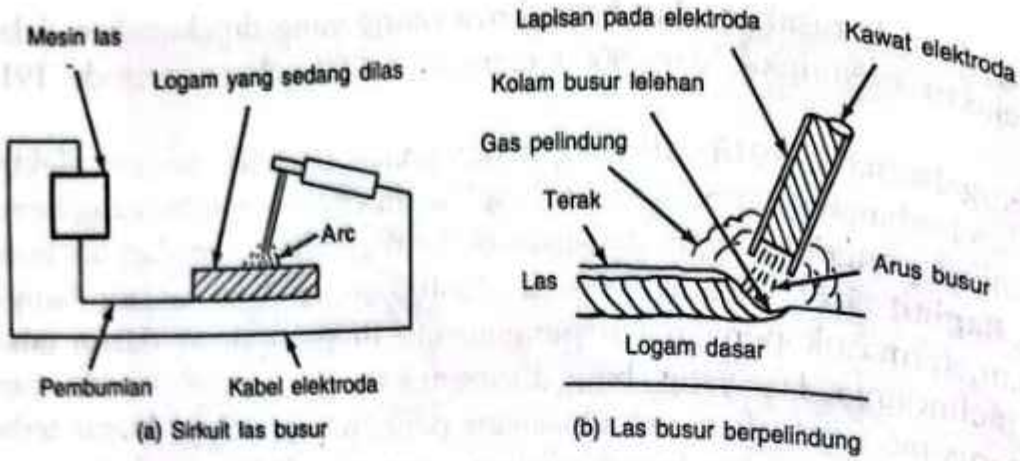
Pengelasan merupakan proses penggabungan material-material (biasanya logam) dengan pemanasan sampai ke temperatur yang sesuai sedemikian rupa sehingga bahan-bahan tersebut melebur menjadi satu material. Mungkin dengan tekanan dan mungkin pula tidak; mungkin dengan material pengisi dan mungkin pula tidak. *Las busur* (*arc welding*) merupakan istilah umum bagi banyak proses yang menggunakan energi listrik dalam bentuk busur listrik untuk menghasilkan panas yang diperlukan bagi pengelasan.

Ada banyak proses pengelasan yang memiliki kegunaan khusus untuk jenis-jenis logam tertentu dan untuk berbagai macam ketebalan. Pasal ini menekankan proses-proses yang digunakan dalam pengelasan baja karbon dan baja paduan rendah untuk bangunan dan jembatan. Las busur merupakan kategori proses yang memiliki arti penting khusus. Untuk beberapa situasi yang melibatkan baja ukuran kecil, mungkin las resistansi penting juga. Penjelasan lebih lengkap dapat dijumpai dalam *Welding Handbook* [2.22, 5.10].

5.2.1 Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

Shielded metal arc welding (= las busur logam berpelindung) merupakan salah satu tipe yang paling tua, paling sederhana, dan barangkali yang paling luwes

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 5.2.1 *Shielded metal arc welding (SMAW)*

untuk pengelasan baja struktur. Proses SMAW seringkali disebut sebagai *proses elektroda batang manual*. Pemanasan dicapai dengan penggunaan sebuah busur listrik di antara elektroda berpelapis dan material yang sedang digabungkan. Dalam **Gambar 5.2.1*a*** diperlihatkan sirkuit pengelasan tersebut.

Selama proses pengelasan elektroda berlapis tersebut akan termakan pada saat logam ditransfer dari elektroda ke materail dasar. Kawat elektroda menjadi bahan pengisi dan pelapisan sebagian dikonversikan ke dalam gas pelindung, sebagian lagi ke dalam terak, dan sebagian lagi diserap oleh logam las. Lapisan tersebut merupakan campuran seperti lumpur yang terdiri dari pengikat silikat dan material bubukan seperti fluorida, karbonat, oksida, paduan-paduan logam, dan selulosa. Campuran tersebut diekstrusi dan dimatangkan hingga menghasilkan lapisan yang kering, keras dan konsentrik.

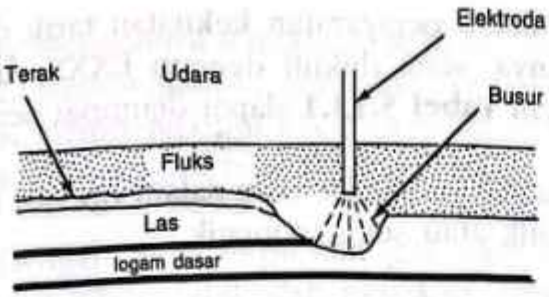
Transfer logam dari elektroda ke bahan yang dilas dengan induksi tarik-menarik molekular dan tarik permukaan, tanpa pemberian tekanan. Pelindung busur akan mencegah terjadinya kontaminasi atmosferik dari logam yang meleleh dalam arus busur dan dalam kubangan busur. Hal ini akan mencegah tertariknya nitrogen dan oksigen dan membentuk nitrida dan oksida yang mungkin menyebabkan terjadinya sifat getas.

Lapisan elektroda dapat berfungsi sebagai berikut:

1. Menghasilkan gas pelindung untuk mencegah masuknyam udara dan menstabilkan busur.
2. Memasukkan material-material lain seperti pendeoksidasi untuk memperbaiki struktur butiran logam las.
3. Menghasilkan suatu selimut terak di atas kolam lelehan dan memadatkan las untuk melindungnya dari pengaruh oksigen dan nitrogen di udara, dan juga menghambat pendinginan.

Material elektroda dispesifikasikan oleh *American Welding Society* seperti dalam AWS [2.24] Tabel 4.1.1, dan rangkumannya terdapat dalam **Tabel 2.3.1**. Penamaan seperti E60XX atau E70XX untuk menunjukkan kekuatan tarik masing-masing 60 ksi dan 70 ksi. Huruf X menunjukkan faktor-faktor seperti posisi pengelasan,

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 5.2.2 *Submerged arc welding (SAW)*

power supply yang dianjurkan, tipe lapisan, dan tipe karakteristik busur. Morgan [5.6] telah membuat pedoman yang baik tentang klasifikasi dan penggunaan elektroda berpelapis baja lunak. **Tabel 5.13.1** menunjukkan elektroda berlapis manakah yang seharusnya digunakan untuk setiap jenis baja struktur tertentu.

Untuk pengelasan baja karbon tinggi atau baja paduan rendah, oleh AWS [2.24] dikehendaki penggunaan elektroda hidrogen rendah dengan SMAW untuk semua baja yang tegangan lelehnya lebih dari 36 ksi (248 MPa). Elektroda hidrogen rendah merupakan batang berpelapis karbonat soda, atau lapisan "kapur". Elektroda ini membutuhkan teknik yang berbeda dari penggunaan elektroda konvensional dalam hal bahwa harus dibuat suatu busur pendek dan harus menghasilkan deposisi logam tipe globular, dan bukannya deposisi tipe semprotan. Dalam desain, elektroda ini sangat disukai karena sifat-sifat mekanik hasil pengelasannya terbukti lebih unggul ketimbang sifat-sifat yang diperoleh dengan pelapisan elektroda bertipe lain.

5.2.2 Submerged Arc Welding (SAW)

Dalam proses *Submerged Arc Welding* (Las busur terbenam) SAW, busurnya tidak kelihatan karena tertutup oleh sebuah selimut granular, bahan yang dapat melebur, seperti dalam **Gambar 5.2.2**. Elektroda logam telanjang akan habis karena elektroda tersebut diendapkan sebagai bahan pengisi. Ujung elektroda dijaga tetap terlindung oleh fluks lelehan yang di atasnya terbentuk suatu lapisan fluks granular yang tak melebur.

Fluks, yang menjadi ciri khas metode ini, memberikan suatu penutup yang memungkinkan las dapat dibuat tanpa percikan, pijaran, atau asap. Fluks granular biasanya secara otomatik akan terletak sepanjang kampuh mendahului lintasan. Fluks tersebut akan melindungi kolam las terhadap atmosfir, membersihkan logam las, dan memodifikasi komposisi logam las.

Las yang dibuat dengan proses busur terbenam terbukti berkualitas tinggi; menunjukkan kekenyalan yang baik, kekuatan kejut yang tinggi, densitas yang tinggi, dan resistansi terhadap korosi yang baik. Sifat-sifat mekanik las ini secara konsisten dapat sebaik logam dasarnya.

Kombinasi elektroda batang telanjang dan fluks granular diklasifikasikan dalam AWS A5.17 atau A5.23. Kombinasi ini diberi tanda dengan awalan F yang diikuti

Dipindai dengan CamScanner

dengan bilangan dua angka yang menunjukkan persyaratan kekuatan tarik dan kekuatan kejut untuk las yang dihasilkannya, serta diikuti dengan EXXX yang menunjukkan klasifikasi elektrodanya. Dalam **Tabel 5.13.1** dapat dijumpai perincian dalam proses SAW.

Metode busur terbenam umum dipakai untuk mengelas baja dalam operasi fabrikasi di bengkel dengan peralatan otomatik atau semi otomatik.

5.2.3 Gas Metal Arc Welding (GMAW)

Dalam proses *Gas Metal Arc Welding* (Las busur logam gas) GMAW, elektrodanya berupa kawat menerus yang diumpankan dari sebuah gulungan melalui pegangan elektroda, yakni alat yang bentuknya mirip senjata seperti **Gambar 5.2.3**. Perlindungan dilakukan sepenuhnya oleh gas atau campuran gas yang dipasok secara eksternal. Keistimewaan metode ini adalah kecepatan transfer material pengisinya tinggi dan pelindung gas terbentuk merata di sekitar lelehan las. Craig [5.7], Little [5.8], dan Dillenbeck dan Castagno [5.9] menguraikan kegunaan khusus metode ini.

Gambar 5.2.3 *Gas metal arc welding (GMAW)*

Semula, metode ini hanya dengan pelindungan gas inert saja, dari sinilah timbul nama MIG (*metal inert gas*). Gas-gas reaktif saja pada umumnya tidak praktis; kecuali CO_2 (karbon dioksida). CO_2 telah luas digunakan pada pengelasan baja, baik sendirian saja maupun dicampur dengan gas-gas inert.

Argon sebagai gas pelindung berguna pada pengelasan segala macam logam; akan tetapi, gas ini tidak dianjurkan untuk baja karena harganya mahal dan toh masih ada gas atau campuran gas lain yang masih dapat diterima. Untuk pengelasan baja karbon dan beberapa baja paduan rendah, riset mutakhir [5.9] menunjukkan bahwa hasil keseluruhan terbaik dapat diperoleh dengan 80% CO_2 dan 20% helium. Secara tradisional, dianjurkan [5.10] penggunaan campuran 75% argon dan 25% CO_2 atau 100% CO_2. Untuk baja paduan rendah di mana yang penting adalah keuletan, dianjurkan [5.10] campuran 60 sampai 70% helium, 25 sampai 30% argon, dan 4 sampai 5% CO_2.

Selain melindungi logam lelehan dari atmosfir, gas pelindung juga berfungsi untuk:

Dipindai dengan CamScanner

1. Mengontrol karakteristik busur dan transfer logam.
2. Mempengaruhi penetrasi, lebar leburan, dan bentuk daerah las.
3. Mempengaruhi kecepatan pengelasan.
4. Mengontrol terjadinya peleburan berlebihan (*undercut ting*).

Dengan mencampurkan gas inert dengan gas reaktif, busur mungkin dapat dibuat lebih stabil, dan percikan yang terjadi selama transfer logam pun dapat direduksi. Yang paling murah bila hanya digunakan CO_2 saja untuk mengelas baja, karena biaya untuk gas pelindungnya juga murah, kecepatan las lebih tinggi, penetrasi sambungan lebih baik, dan depositnya halus, serta sifat-sifat mekaniknya baik. Satu-satunya kekurangan hanyalah bahwa percikannya kasar dan berlebihan.

Bahan elektroda untuk mengelas baja karbon adalah baja lunak tak berlapis, baja mangan karbon dideoksidasi yang terdapat dalam AWS A5.18 dan **Tabel 5.13.1** (*lihat* juga **Tabel 2.3.1**). Untuk pengelasan baja paduan rendah, dibutuhkan bahan paduan rendah di-deoksidasi.

Proses GMAW dengan pelindungan CO_2 bagus untuk baja karbon lebih rendah dan baja paduan rendah yang digunakan pada bangunan dan jembatan.

5.2.4 Flux Cored Arc Welding (FCAW)

Proses *Flux Cored Arc Welding* (Las busur berinti fluks) (FCAW) mirip GMAW, kecuali bahwa elektroda logam pengisi yang terus diumpankan berbentuk tubular dan mengandung material fluks di dalam intinya. Bahan inti memberikan fungsi yang sama dengan lapisan pada SMAW atau fluks granular pada SAW. Untuk kawat yang terus diumpankan, lapisan luar tentu saja tidak akan terus menempel pada kawat itu. Gas pelindung diberikan oleh inti fluks (yang telah memiliki pelindung sendiri), namun seringkali masih ditambah pelindung gas dengan CO_2. Untuk kondisi lapangan dengan cuaca yang sangat dingin, las busur berinti fluks sangat berguna [5.11]. Prosedur ini juga berguna untuk mempercepat konstruksi bangunan tinggi [5.12].

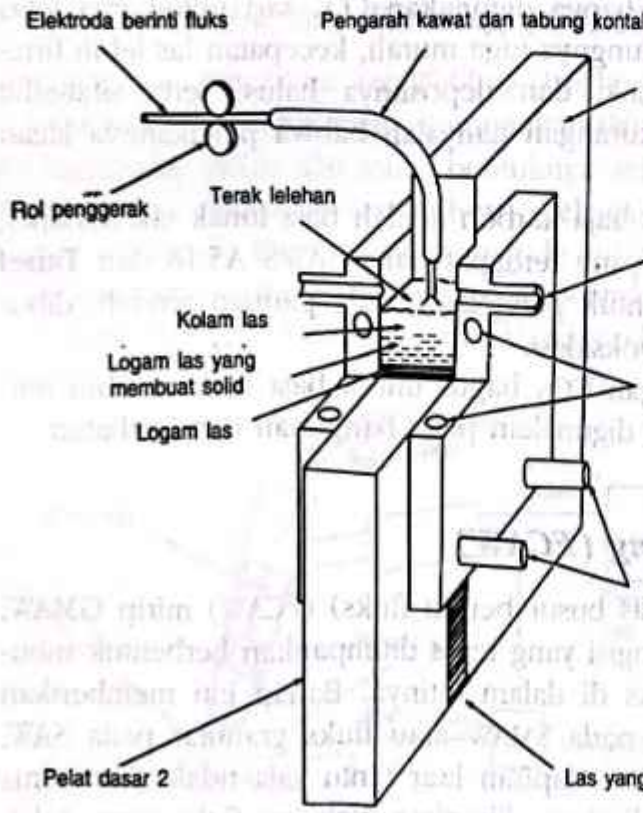
Elektroda-elektroda untuk memperoleh logam las dengan kekuatan leleh minimum sebesar 60 ksi (415 MPa) atau kurang dapat dijumpai dalam AWS A5.20. Elektroda tersebut diberi nama E6XT untuk kekuatan tarik sebesar 60 dan E7XT untuk 70 ksi. Bila dikehendaki hasil logam las dengan kekuatan leleh lebih dari 60 ksi (415 MPa), elektroda-elektrodanya dapat dijumpai dalam AWS A5.29, dengan nama E8XT, E10XT, dan E11XT, masing-masing untuk kekutan tarik sebesar 80. 100, dan 110 ksi (550, 690, dan 760 MPa).

5.2.5 Electrogas Welding (EGW)

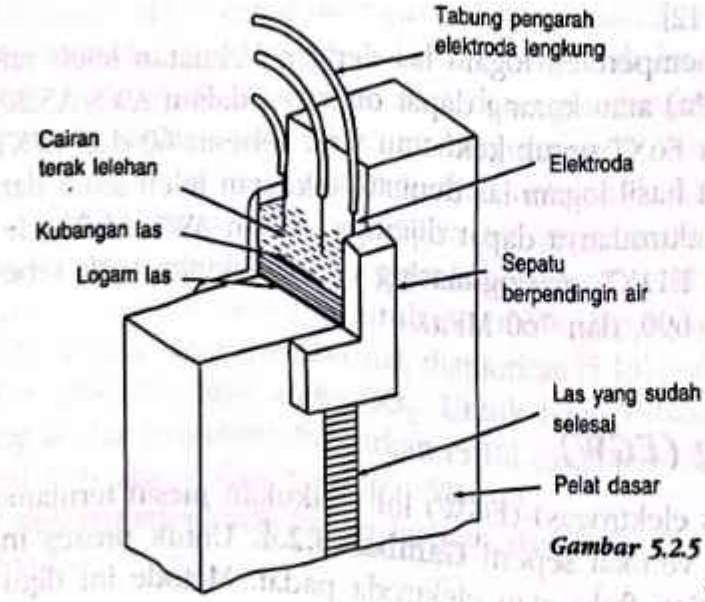
Proses *Electrogas Welding* (Las elektrogas) (EGW) ini dilakukan mesin terutama untuk pengelasan pada posisi vertikal seperti **Gambar 5.2.4**. Untuk proses ini dapat digunakan elektroda berinti fluks atau elektroda padat. Metode ini digu-

Dipindai dengan CamScanner

nakan untuk mendapatkan las pas tunggal seperti pada sambungan kolom ber
Logam las didepositkan ke dalam alur lobang yang terbentuk oleh pinggir-pin
gir pelat yang terpisah dan "sepatu" berpendingin air atau pengarah ya
berfungsi menjaga agar logam lelehan tetap berada dalam lokasinya pada ked
sisi. Pelindungan gas diberikan oleh elektroda berinti fluks, gas yang dipasokk
dari luar, atau kedua-duanya.



Gambar 5.2.4 Las elektrogas dengan elektroda berinti fluks (Dari Welding Handbook [2.21])



Gambar 5.2.5 Metode las terak listrik dengan pengu
tak termakan (tiga elektroda). (
Welding Handbook [2.22])

Dipindai dengan CamScanner

5.2.6 Electroslag Welding (ESW)

Proses *Electroslag Welding* (Las terak listrik) (ESW), dalam **Gambar 5.2.5** serupa dengan las elektrogas, kecuali bahwa las tersebut dilakukan oleh panas yang dihasilkan melalui resistansi terak terhadap aliran arus. Terak konduktif lelehan akan melindungi las dan melelehkan logam pengisi dan pinggiran pelat. Karena terak yang solid tidak konduktif, untuk memulai proses ini dibutuhkan suatu busur dengan melelehkan terak dan memanaskan pelat. Karena pada kenyataan digunakan pemanasan resistansi pada semua tahap selain tahap awal, sebenarnya ESW bukan merupakan proses las busur. Pengarah sisi atau "sepatu" mungkin saja tidak termakan seperti yang terlihat dalam **Gambar 5.2.5** dan mungkin pula termakan. Proses terak listrik memungkinkan pengelasan pada semua ketebalan dengan sekali jalan; maka dari itu, las elektrogas dan las terak listrik menjadi ekonomis bila ketebalan las yang dibutuhkan cukup besar. Karena kecepatan jalan proses ini relatif lambat, las yang dihasilkan memiliki butiran kasar dan keuletan takik yang rendah.

Raman [5.14] telah membuat ulasan yang istimewa mengenai las terak listrik, sedangkan Schilling dan Klippstein [5.15] telah melaporkan riset mengenai las terak listrik untuk jembatan; dan Pense, Wood, dan Fisher [5.16] melaporkan pengalaman dengan terak listrik pada jembatan.

5.2.7 Las Stud

Yang paling banyak digunakan pada pengelasan stud logam ke suatu bahan dasar adalah las stud busur (*arc stud welding*), yang pada hakikatnya merupakan proses otomatik namun serupa karakteristiknya dengan proses SMAW. Stud tersebut bertindak sebagai elektroda, dan busur elektrik terbentuk dari ujung stud ke pelat. Stud dikandung dalam sebuah alat tembak (*gun*) yang mengontrol pewaktuan selama proses berlangsung. Pelindungan dicapai dengan menempatkan suatu cincin api keramik di sekitar ujung stud pada alat tembak itu. Kemudian alat tembak ditempatkan pada posisinya dan busur pun ditimbulkan pada saat cincin berisi logam lelehan. Setelah beberapa saat, alat itu akan mendorong stud ke kolam lelehan dan terbentuklah las sudut di sekitar stud. Biasanya dalam waktu kurang dari satu detik penetrasi penuh di sekitar penampang stud sudah dapat diperoleh dan las pun selesai dilakukan.

5.3 Kemampuan Las Baja Struktur

Kebanyakan baja konstruksi dalam spesifikasi ASTM dapat dilas tanpa perhitungan atau prosedur khusus. **Bagian 5.13** membicarakan perlunya memilih elektroda yang tepat untuk penggabungan baja dengan mutu tertentu; sedangkan rangkuman mengenai "pasangan" antara elektroda dengan baja dasarnya dapat dijumpai dalam **Tabel 5.13.1**.

Kemampuan dilas (*weldability*) merupakan ukuran kemudahan untuk menghasilkan sambungan yang bebas retakan dan halus. Beberapa baja struktur lebih

Dipindai dengan CamScanner

cocok dengan las ketimbang lainnya; masalah ini dibahas dalam **Bab 2**. Prosedur-prosedur las harus lebih didasarkan atas kimiawi baja dan bukannya atas kandungan paduan maksimum yang diterbitkan, karena kebanyakan produksi pabrik berada di bawah batas paduan maksimum yang ditetapkan dalam spesifikasinya. **Tabel 5.3.1** memperlihatkan analisis kimiawi ideal baja karbon. Kebanyakan baja lunak berada dalam kisaran ini, sedang baja dengan kekuatan lebih tinggi mungkin dapat melampaui analisis ideal dalam tabel tersebut.

Tabel 5.3.1 Analisis baja karbon yang diinginkan [5.17] untuk kemampuan dilas yang baik.

Unsur	Rentang normal (%)	Persentase yang memerlukan perhatian khusus
Karbon	0.06–0.25	0.35
Mangan	0.35–0.80	1.40
Silikon	maks 0.10	0.30
Belerang	maks 0.035	0.050
Fosfor	maks 0.030	0.040

Bila suatu pabrik memproduksi baja, pabrik tersebut akan menyimpan catatan lengkap tentang kandungan kimia yang terdapat dalam semua profil yang dibuat dari cetakan tertentu. Bila desainer ingin mengetahui kandungan kimia suatu golongan baja, ia dapat meminta Laporan Uji Cetakan. Variasi dalam kandungan kimia yang lebih besar daripada harga-harga ideal harus dievaluasi, dan untuk itu harus ditetapkan prosedur pengelasan khusus untuk menjamin diperolehnya sambungan las yang tepat.

5.4 Tipe-tipe Sambungan

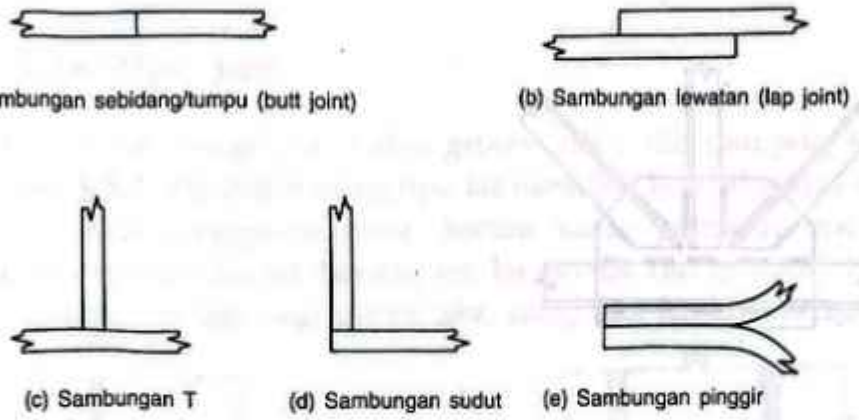
Tipe sambungan tergantung pada berbagai faktor seperti ukuran dan bentuk batang yang akan membentuk sambungan, tipe pembebanan, besarnya luas sambungan yang akan dilas, dan biaya relatif untuk berbagai macam sambungan las. Ada lima tipe dasar sambungan las, meskipun dalam prakteknya dapat ditemukan banyak variasi dan kombinasi. Kelimanya adalah sambungan tumpu/sebidang (*butt joint*), sambungan lewatan (*lap joint*), sambungan **T**, sambungan sudut, dan sambungan pinggir seperti yang terdapat dalam **Gambar 5.4.1**.

5.4.1 Sambungan Tumpu

Sambungan tumpu terutama digunakan untuk menyambungkan ujung-ujung pelat datar dengan ketebalan yang sama atau hampir sama. Kelebihan utama tipe ini adalah mampu mengeliminasi eksentrisitas yang terjadi pada sambungan lewatan tunggal seperti **Gambar 5.4.1*b***. Bila digunakan bersama dengan las *groove* (las tumpul penetrasi penuh, sambungan tumpu dapat meminimumkan ukuran sambungan, di samping biasanya tampak lebih estetik ketimbang sambungan *built*

Dipindai dengan CamScanner

up. Kekurangannya yang utama terletak pada kenyataan bahwa pinggiran yang akan dihubungkan harus dipersiapkan secara khusus (diserongkan atau benar-benar diratakan) dan benar-benar dipaskan dengan cermat sebelum dilas. Mungkin dilakukan sedikit penyesuaian dan bagian-bagian tersebut harus didetil dan difabrikasi. Akibatnya, kebanyakan sambungan tumpu harus dibuat di pabrik di mana proses pengelasan dapat dikontrol dengan lebih akurat.



Gambar 5.4.1 *Tipe-tipe dasar sambungan las*

5.4.2 Sambungan Lewatan

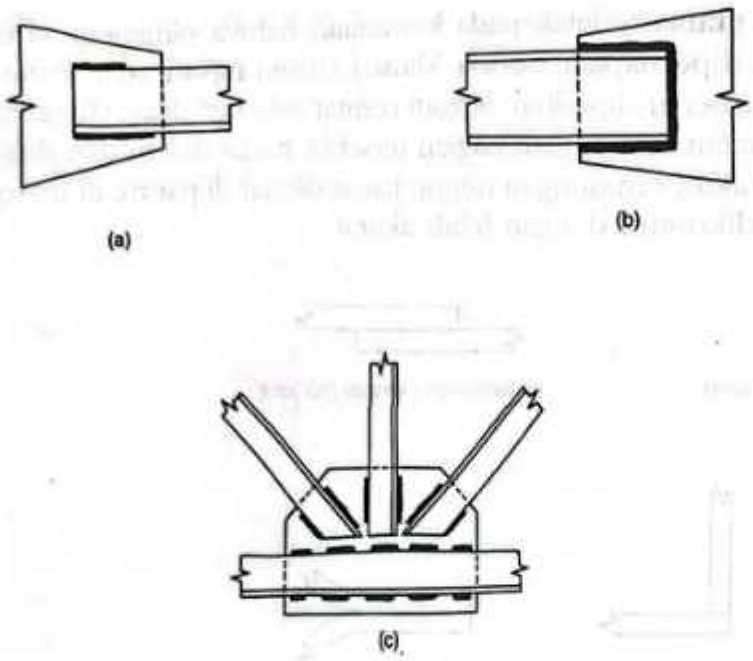
Sambungn ini, seperti dalam **Gambar 5.4.2**, merupakan tipe yang paling umum. Ada dua keunggulan utama tipe ini:

1. *Kemudahan pengepasan.* Bagian-bagian yang akan disambungkan tidak membutuhkan ketelitian dalam fabrikasinya seperti tipe sambungan lain. Bagian-bagian tersebut dapat sedikit digeser-geser untuk mengakomodasi kesalahan-kesalahan kecil dalam fabrikasi atau untuk membuat penyesuaian dalam panjangnya.

2. *Kemudahan penyambungan.* Pinggiran bagian-bagian yang akan disambung tidak membutuhkan persiapan khusus, dan biasanya cukup diiris atau dipotong dengan api. Sambungan ini memanfaatkan las sudut dan karenanya cocok digunakan baik di bengkel maupun di lapangan. Pada kebanyakan kasus, bagian-bagian yang disambungkan cukup ditempelkan begitu saja tanpa perlu pencengkeram khusus. Kadangkala, bagian-bagian tersebut dipaskan dengan sejumlah baut sementara yang dapat dibiarkan saja atau diambil lagi setelah selesai pengelasan.

Kelebihan lain sambungan lewatan adalah bahwa pelat-pelat dengan ketebalan yang berlainan mudah disambungkan, seperti sambungan lewatan ganda dalam **Gambar 5.4.2*e***. Para pembaca hendaknya diharapkan secara khusus memperhatikan sambungan kerangka dalam **Gambar 4.5.2*c*** dan mempertimbangkan kesulitan yang terjadi bila sambungan itu dibuat dengan tipe lain.

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 5.4.2 Contoh-contoh sambungan lewatan

5.4.3 Sambungan T

Tipe sambungan ini digunakan untuk memfabrikasi bagian-bagian *built up* sep ti profil **T**, profil I, gelagar pelat, pengaku tumpu (*bearing stiffener*), pengga tung, konsol, dan secara umum, bagian-bagian yang berbentuk kerangka sik siku seperti **Gambar 5.4.1c**. Tipe sambungan ini secara khusus bermanfaat kare memungkinkan bagian-bagian dibuat dari pelat-pelat datar yang dapat digabun kan dengan las *groove* atau las *fillet*.

5.4.4 Sambungan Sudut

Sambungan sudut terutama digunakan untuk membentuk penampang boks s empat *built up* (terangkai) seperti untuk kolom atau balok-balok yang mem tuhkan ketahanan terhadap gaya torsi yang tinggi.

5.4.5 Sambungan Pinggir

Sambungan pinggir pada umumnya tidak bersifat struktural namun kerap dipa

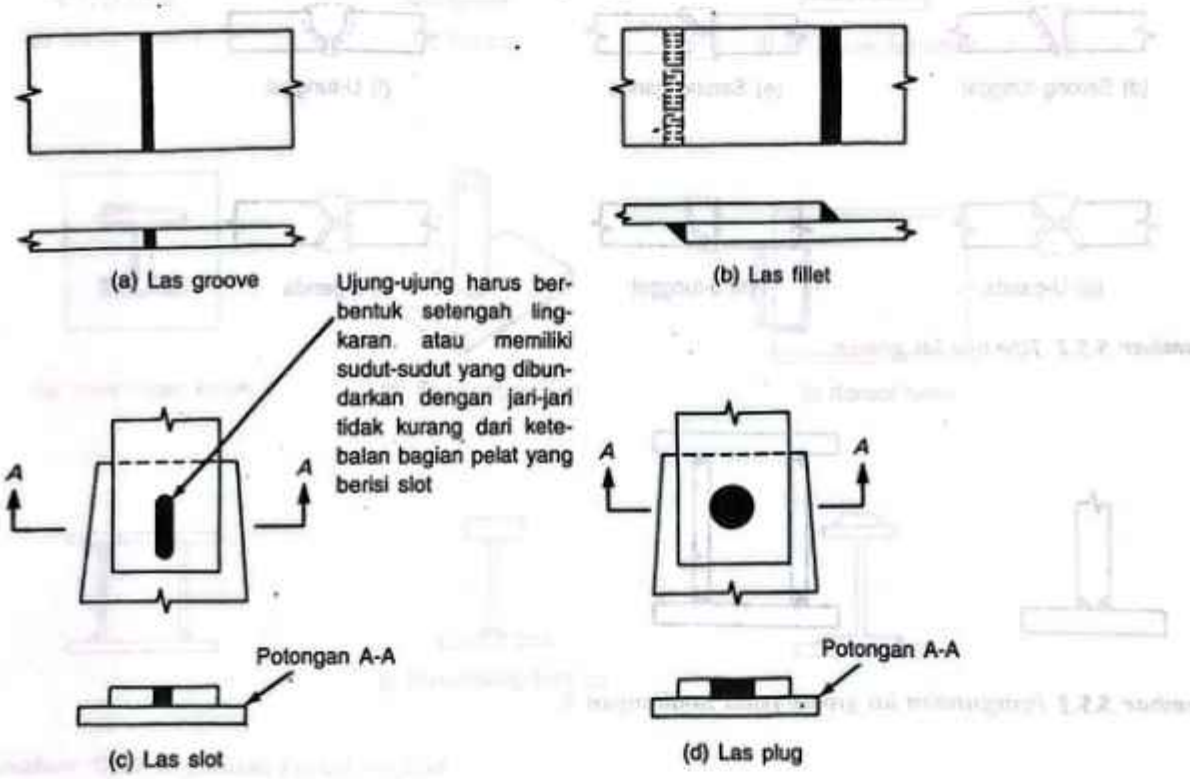
Dipindai dengan CamScanner

untuk menjaga dua atau lebih pelat agar tetap pada suatu bidang tertentu atau pun untuk mempertahankan kedudukan seperti semula.

Seperti yang disimpulkan dari pembahasan di muka, banyaknya variasi dan kombinasi dari kelima tipe dasar las sebenarnya tidak terbatas. Karena biasanya ada lebih dari satu cara untuk menyambungkan suatu batang struktur ke batang lainnya, desainer harus membuat keputusan mengenai pemilihan sambungan (atau sambungan kombinasi) terbaik untuk setiap situasi tertentu.

5.5 Tipe-tipe Las

Ada empat tipe pengelasan yakni *groove*, *fillet*, *slot*, dan *plug* seperti terlihat dalam **Gambar 5.5.1**. Masing-masing tipe las memiliki kelebihannya sendiri yang menentukan rentang penggunaannya. Secara kasar, keempat tipe tersebut mewakili persentasi konstruksi las berikut ini: las *groove* (las tumpul) 15%, *fillet* (las sudut) 80%, sisanya terbagi-bagi untuk *slot*, *plug*, dan las-las khusus lainnya.



***Gambar 5.5.1** Tipe-tipe las*

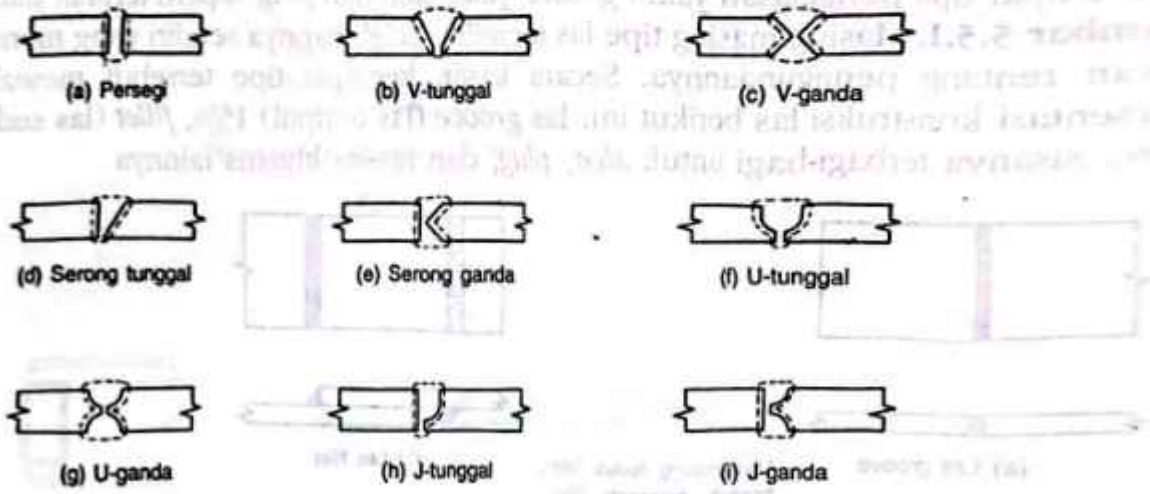
5.5.1 Las Groove

Kegunaan utama las *groove* adalah untuk menghubungkan batang-batang struktur yang dipaskan pada bidang yang sama. Karena las *groove* biasanya dimaksudkan untuk mentransmisikan beban penuh batang-batang yang dihubungkannya, las tersebut harus memiliki kekuatan yang sama dengan batang-batang yang digabungkan. Las *groove* demikian ini disebut sebagai *las groove dengan penetrasi sambungan yang lengkap*. Bila sambungan didesain sedemikian rupa sehing-

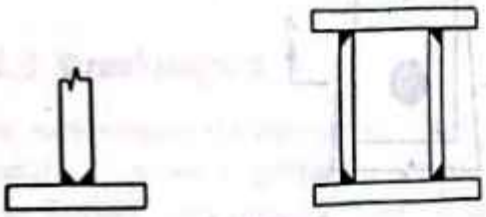
Dipindai dengan CamScanner

ga las *groove* tidak sepenuhnya menjangkau ketebalan bagian-bagian yang digabungkan, las sedemikian disebut sebagai *las groove dengan penetrasi sambungan sebagian*. Untuk ini, berlaku persyaratan-persyaratan desain yang khusus.

Ada banyak variasi las *groove* dan masing-masing diklasifikasikan menurut bentuknya yang khusus. Kebanyakan las *groove* membutuhkan persiapan pinggiran yang khusus dan diberi nama menurut persiapannya. **Gambar 5.5.2** menunjukkan beberapa tipe las *groove* dan menunjukkan persiapan *groove* yang dibutuhkan. Pemilihan las *groove* yang tepat tergantung pada proses pengelasan yang digunakan, biaya persiapan pinggiran, dan biaya pembuatan las. Las *groove* dapat juga digunakan pada sambungan T seperti **Gambar 5.5.3**.



Gambar 5.5.2 *Tipe-tipe las groove*



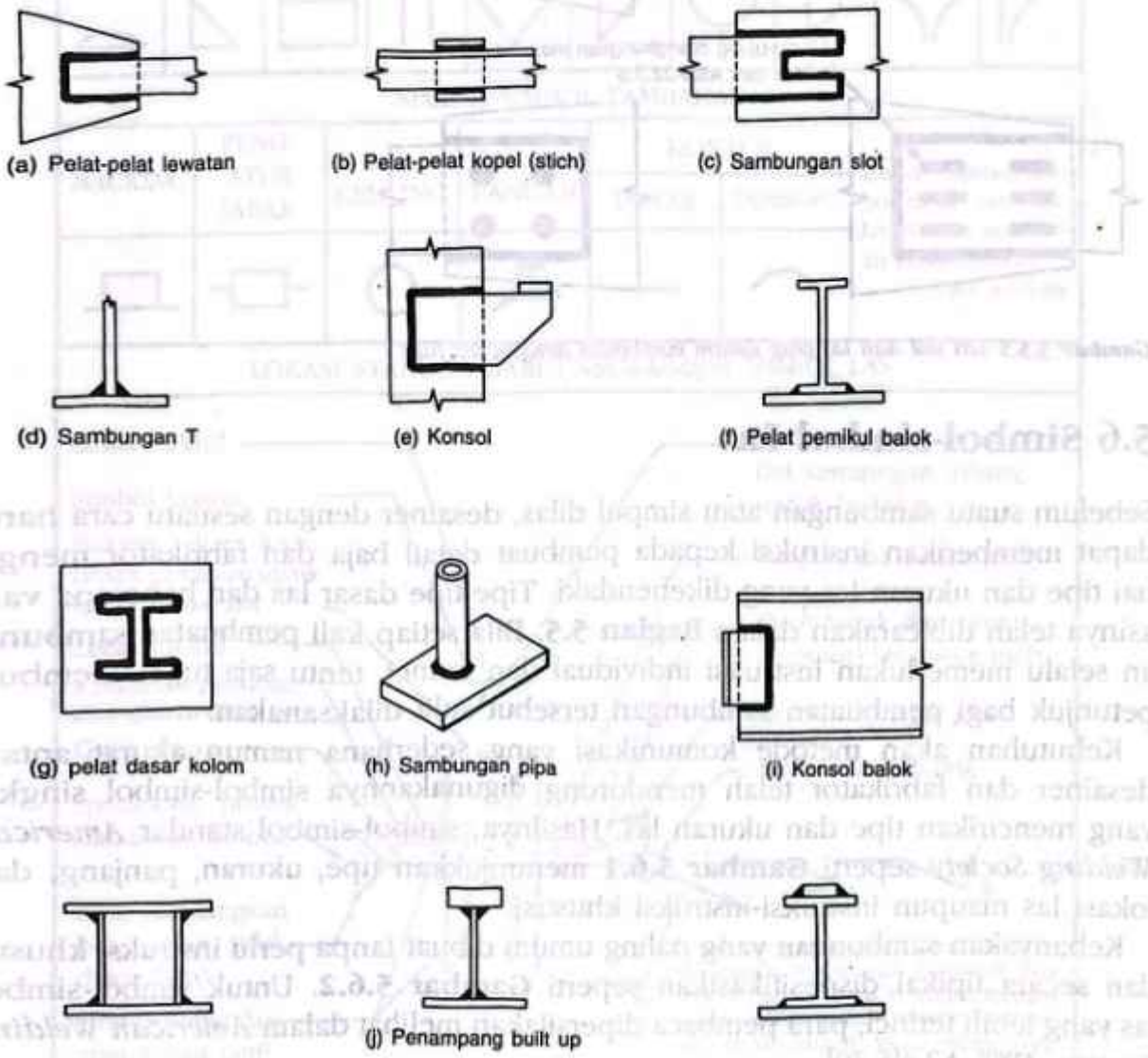
Gambar 5.5.3 *Penggunaan las groove pada sambungan T*

5.5.2 Las fillet

Karena hemat, mudah difabrikasi, dan adaptibilitasnya baik, las sudut (*fillet weld*) merupakan jenis las yang paling banyak digunakan. Dalam **Gambar 5.5.4** diperlihatkan beberapa kegunaan las *fillet*. Pada umumnya jenis las ini kurang membutuhkan presisi pada "pengepasannya" karena masing-masing bagian itu cukup ditumpang-tindihkan, sedangkan las *groove* membutuhkan pengepasan yang teliti dengan celah alur bukaan tertentu (bukaan akar) di antara bagian-bagiannya. Las *fillet* secara khusus berguna bagi pengelasan di lapangan, pengepasan kembali batang-batang, atau pun pada sambungan-sambungan yang difabrikasi dengan toleransi yang masih dapat diterima namun mungkin tidak dipasang pas seperti

Dipindai dengan CamScanner

yang dikehendaki. Lagipula, pinggiran bagian-bagian yang disambungkan jarang membutuhkan persiapan.khusus seperti pemotongan miring atau pengirisan tegak, karena kondisi pinggiran hasil pemotongan dengan api atau pengirisan pun sudah memadai.

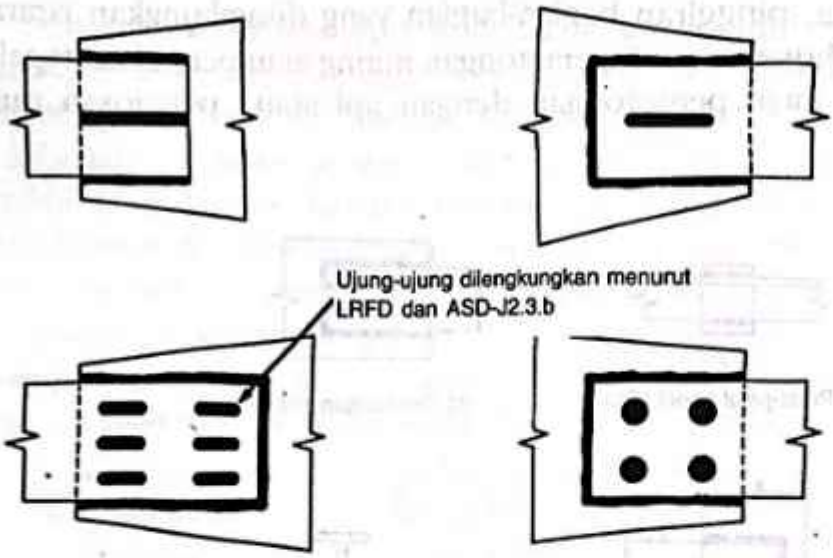


***Gambar 5.5.4** Kegunaan tipikal las fillet*

5.5.3 Las Slot dan Plug

Las *slot* dan *plug* dapat digunakan secara eksklusif hanya dalam sambungan seperti **Gambar 5.5.1*c*** dan ***d*** atau dalam kombinasi dengan las *fillet* seperti **Gambar 5.5.5**. Kegunaan utama las *plug* dan *slot* adalah untuk mentransmisikan geser pada sambungan impit bila ukuran sambungan tersebut tidak cukup untuk las *fillet* atau las pinggir lainnya. Las *slot* dan *plug* juga berguna untuk mencegah agar bagian-bagian yang saling tumpang tindih tidak mengalami tekuk.

Dipindai dengan CamScanner



Gambar 5.5.5 Las slot dan las plug dalam kombinasi dengan las fillet

5.6 Simbol-simbol Las

Sebelum suatu sambungan atau simpul dilas, desainer dengan sesuatu cara harus dapat memberikan instruksi kepada pembuat detail baja dan fabrikator mengenai tipe dan ukuran las yang dikehendaki. Tipe-tipe dasar las dan beberapa variasinya telah dibicarakan dalam **Bagian 5.5**. Bila setiap kali pembuatan sambungan selalu memerlukan instruksi individual dan terinci, tentu saja tugas membuat petunjuk bagi pembuatan sambungan tersebut sulit dilaksanakan.

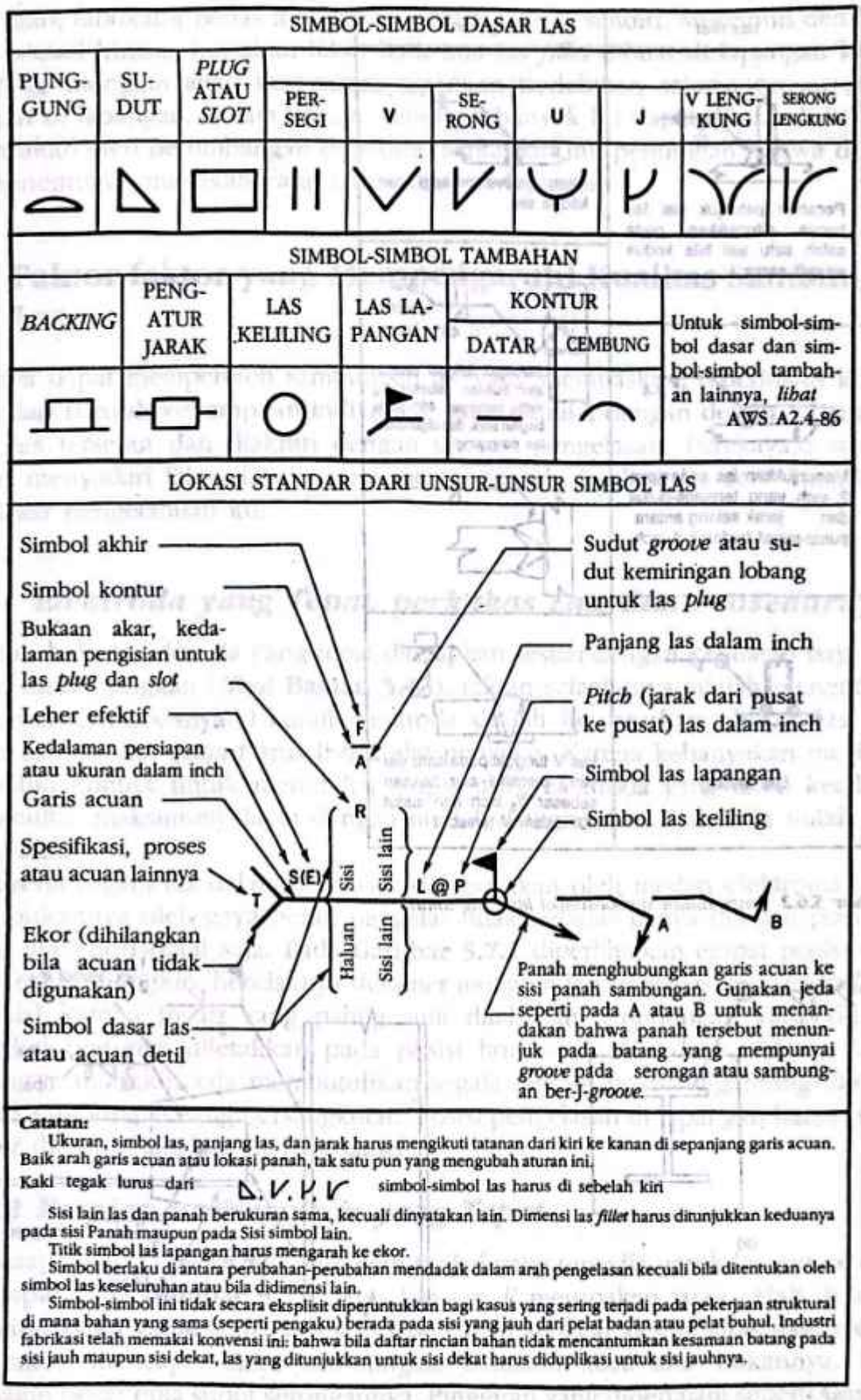
Kebutuhan akan metode komunikasi yang sederhana namun akurat antara desainer dan fabrikator telah mendorong digunakannya simbol-simbol singkat yang mencirikan tipe dan ukuran las. Hasilnya, simbol-simbol standar *American Welding Society* seperti **Gambar 5.6.1** menunjukkan tipe, ukuran, panjang, dan lokasi las maupun instruksi-instruksi khusus,

Kebanyakan sambungan yang paling umum dibuat tanpa perlu instruksi khusus dan secara tipikal dispesifikasikan seperti **Gambar 5.6.2**. Untuk simbol-simbol las yang lebih terinci, para pembaca dipersilakan melihat dalam *American Welding Society*, AWS A2.4[5.39].

Mungkin para pembaca akan merasa bahwa banyaknya simbol sangat membebani. Meskipun demikian, sistem penamaan las telah dipecah-pecah menjadi beberapa tipe dasar yang sudah terpaket sehingga dapat memberikan serangkaian instruksi yang lengkap. Apabila suatu macam sambungan digunakan dalam banyak bagian dari struktur yang sama, mungkin cukup ditunjukkan detail tipikalnya saja seperti **Gambar 5.6.3*a***. Bila digunakan sambungan-sambungan khusus, sambungan-sambungan tersebut harus didetail secukupnya sehingga tidak menimbulkan keraguan mengenai maksud desainernya, seperti **Gambar 5.6.3*b***.

Dalam **Gambar 5.6.3*b***, desainer menetapkan bahwa las *plug* harus dibuat di bengkel sedangkan las miring ganda yang menghubungkan pelat buhul dengan kolom dibuat di lapangan. Karena desainer tidak menentukan apakah las *fillet* yang menghubungkan siku dengan pelat buhul harus dibuat di bengkel atau di

Dipindai dengan CamScanner



Catatan:

Ukuran, simbol las, panjang las, dan jarak harus mengikuti tatanan dari kiri ke kanan di sepanjang garis acuan. Baik arah garis acuan atau lokasi panah, tak satu pun yang mengubah aturan ini.

Kaki tegak lurus dari Δ, V, Y, V simbol-simbol las harus di sebelah kiri

Sisi lain las dan panah berukuran sama, kecuali dinyatakan lain. Dimensi las *fillet* harus ditunjukkan keduanya pada sisi Panah maupun pada Sisi simbol lain.

Titik simbol las lapangan harus mengarah ke ekor.

Simbol berlaku di antara perubahan-perubahan mendadak dalam arah pengelasan kecuali bila ditentukan oleh simbol las keseluruhan atau bila didimensi lain.

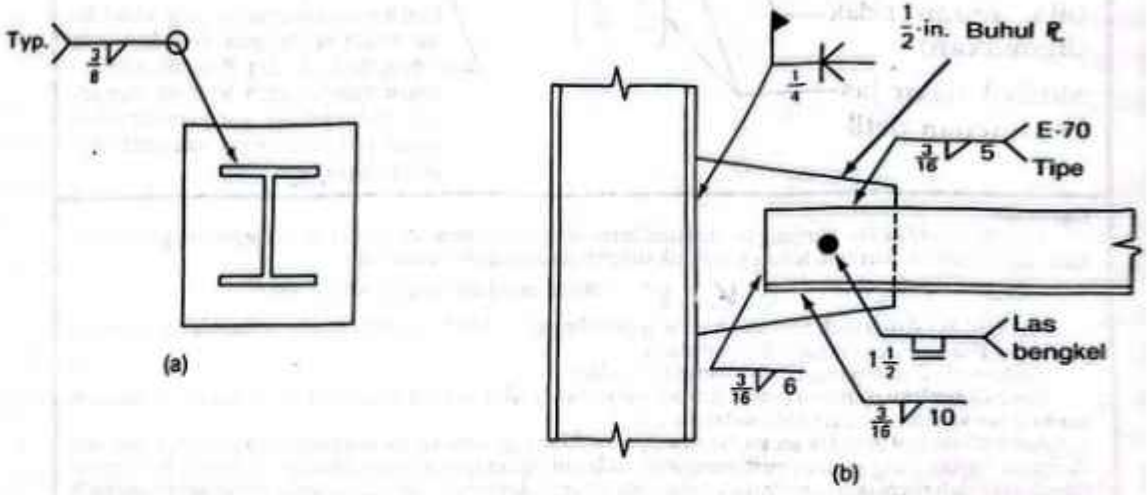
Simbol-simbol ini tidak secara eksplisit diperuntukkan bagi kasus yang sering terjadi pada pekerjaan struktural di mana bahan yang sama (seperti pengaku) berada pada sisi yang jauh dari pelat badan atau pelat buhul. Industri fabrikasi telah memakai konvensi ini: bahwa bila daftar rincian bahan tidak mencantumkan kesamaan batang pada sisi jauh maupun sisi dekat, las yang ditunjukkan untuk sisi dekat harus diduplikasi untuk sisi jauhnya.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION

Gambar 5.6.1 *Simbol standar pengelasan (Dari LRFD Manual [1.17] dan AWS A2.4 [5.39]).*

Dipindai dengan CamScanner

Gambar 5.6.2 *Penggunaan simbol-simbol las yang umum*



Gambar 5.6.3 *Detail yang menunjukkan simbol-simbol pengelasan*

Dipindai dengan CamScanner

lapangan, fabrikator bebas mengambil keputusannya sendiri. Meskipun demikian, pada detail khusus ini, akan lebih baik bila las *fillet* dibuat di lapangan karena las *plug* mungkin akan mengalami tegangan berlebihan selama proses pemasangan di lapangan. Secara umum, seberapa banyak las dapat dibuat di bengkel ditentukan oleh pertimbangan ekonomi. Maka dari itu, pentinglah bahwa desainer menentukan manakah yang harus dilas di lapangan.

5.7 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kualitas Sambungan Las

Supaya dapat memperoleh sambungan las yang memuaskan, diperlukan kombinasi dari banyak ketrampilan individual, yang dimulai dengan desain sebenarnya dari las tersebut dan diakhiri dengan operasi pengelasan. Perekayasa struktur perlu menyadari faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas las serta mendesain berdasar pengetahuan itu.

5.7.1 Elektroda yang Tepat, perkakas Las, dan Prosedurnya

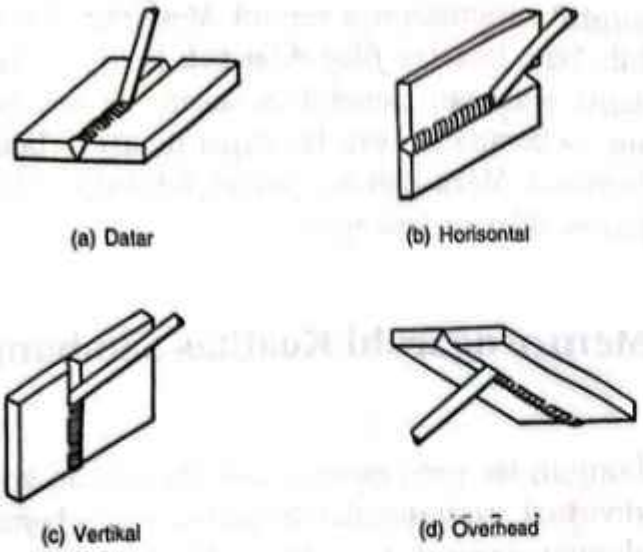
Setelah bahan elektroda yang tepat ditetapkan sesuai dengan kekuatan baja yang akan disambungkan (*lihat* **Bagian 5.13**), giliran selanjutnya adalah menentukan diameter elektrodanya. Ukuran elektroda dipilih berdasarkan ukuran las yang akan dibuat dan *output* arus listrik alat pengelas. Karena kebanyakan mesin las memiliki kontrol untuk mereduksi *output* arus, elektroda yang lebih kecil dari kapabilitas maksimum dapat dengan mudah diakomodasi. Elektroda itulah yang digunakan.

Karena logam las dalam las busur didepositkan oleh medan elektromagnetik, dan bukannya oleh gaya berat, pengelas tidak terbatas hanya dengan posisi las datar atau horisontal saja. Pada **Gambar 5.7.1** diperlihatkan empat posisi dasar las. Sejauh mungkin, hendaknya desainer menghindari pengelasan *overhead* (dari bawah) karena inilah yang paling sulit dilakukan. Sambungan yang dilas di bengkel biasanya diletakkan pada posisi horisontal atau datar, namun las di lapangan mungkin saja membutuhkan segala macam posisi tergantung dari orientasi sambungan yang bersangkutan. Posisi pengelasan di lapangan harus benar-benar dipertimbangkan oleh desainer.

5.7.2 Persiapan Pinggiran yang Tepat

Beberapa macam persiapan pinggiran tipikal yang tersedia untuk las *groove* dapat dijumpai pada **Gambar 5.7.2**. Alur bukaan R merupakan jarak celah di antara bagian-bagian yang akan dilas dan disediakan sebagai aksesibilitas bagi elektroda untuk mencapai dasar sambungan. Semakin kecil alur bukannya, harus semakin besar pula sudut serongannya. Pinggiran yang dipertajam seperti **Gambar 5.7.2*a*** cenderung terbakar seluruhnya, kecuali bila telah dilandasi dengan sebuah pelat landasan seperti **Gambar 5.7.2*b***. Pelat landasan biasanya digunakan hanya

Dipindai dengan CamScanner



***Gambar 5.7.1** Posisi pengelasan*

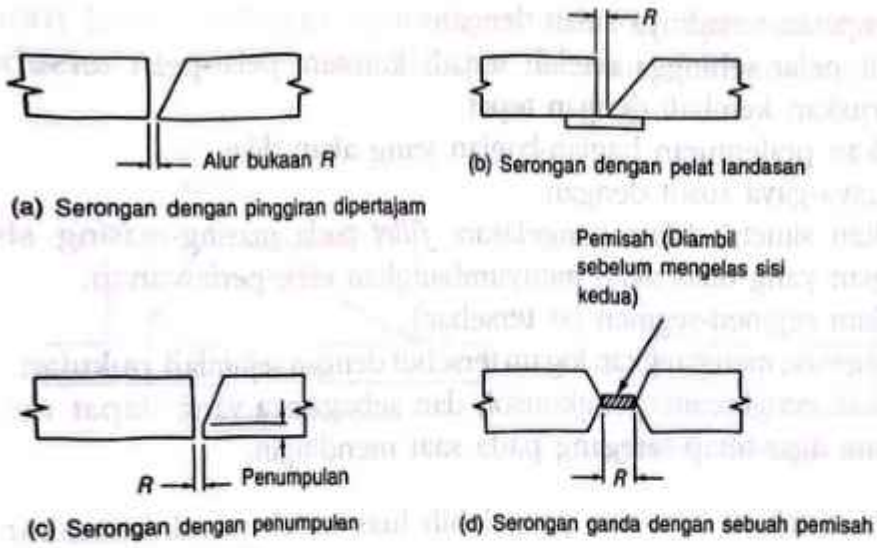
bila las dibuat dari salah satu sisi saja. Permasalahan terbakar seluruhnya dapa dikurangi bila serongan ditumpulkan seperti **Gambar 5.7.2*c***. Namun pengela hendaknya *tidak* memasang pelat landasan bila serongan telah ditumpulkan kare na ada kemungkinan besar akan terbentuk kantong-kantong gas yang mencegal penetrasi las secara penuh. Kadangkala dipasang sebuah ganjal seperti **Gamba 5.7.2*d*** untuk mencegah terbakar seluruhnya, namun ganjal tersebut diambi sebelum sisi kedua dilas.

5.7.3 Kontrol terhadap Distorsi

Salah satu faktor lain yang mempengaruhi kualitas las adalah susut. Bila dibua suatu alur las tunggal secara menerus pada sebuah pelat, alur tersebut dapa menyebabkan pelat mengalami distorsi seperti **Gambar 5.7.3**. Distorsi sedemikian akan terjadi kecuali bila desain sambungan dan prosedur pengelasan dilakukan dengan sangat cermat. **Gambar 5.7.4** menunjukkan hasil penggunaan las tak-simetri yang dibandingkan dengan las simetri. Meskipun ada banyak teknik yang tersedia untuk meminimalkan distorsi, namun yang paling umum adalah dengan las yang dibuat terputus secara berselang-seling seperti **Gambar 5.7.5*a*** dan kemu-dian melas kembali ruang-ruang kosong seperti **Gambar 5.7.5*b***. Untuk banyak struktur, seperti gelagar pelat, segmen-segmen pendek las (meskipun biasanya bukan las berselang-seling secara teratur) dapat digunakan pada lokasi-lokasi strategis untuk memberikan kekuatan yang cukup agar semua bagian tetap ber-ada pada tempatnya; baru kemudian dibuat alur menerus las.

Untuk meminimalkan susut dan menjamin duktilitas yang cukup, Peraturan AWS (**Tabel 4.2** dari **Acuan 5.25**) telah menetapkan pemanasan pendahuluan dan temperatur *interpass* minimum. Untuk las yang membutuhkan lebih dari satu lintasan (satu *pass*) operasi pengelasan pada suatu sambungan, temperatur *interpass* adalah temperatur las yang telah terdeposit pada saat *pass* berikutnya dimulai.

Dipindai dengan CamScanner



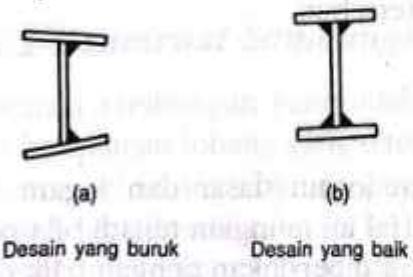
Gambar 5.7.2 *Persiapan-persiapan pinggiran tipikal untuk las groove*

Berikut ini rangkuman cara-cara meminimumkan distorsi:

1. Kurangilah gaya-gaya susut dengan:

- **(a)** Menggunakan logam las minimum; untuk *groove*, alur bukaan tidak boleh lebih besar dari yang dibutuhkan; dan jangan mengelas berlebihan.
- **(b)** Menggunakan lintasan *pass* sesedikit mungkin.
- **(c)** Menggunakan persiapan pinggir dan pengepasan yang tepat.
- **(d)** Menggunakan las berselang-seling, paling tidak untuk sambungan pendahuluan.
- **(e)** Menggunakan langkah mundur; mendepositkan segmen-segmen las terhadap las yang telah diselesaikan sebelumnya; yakni mendepositkan menurut arah berlawanan dengan arah pengelasan sambungan.

Gambar 5.7.3 *Distorsi pelat*

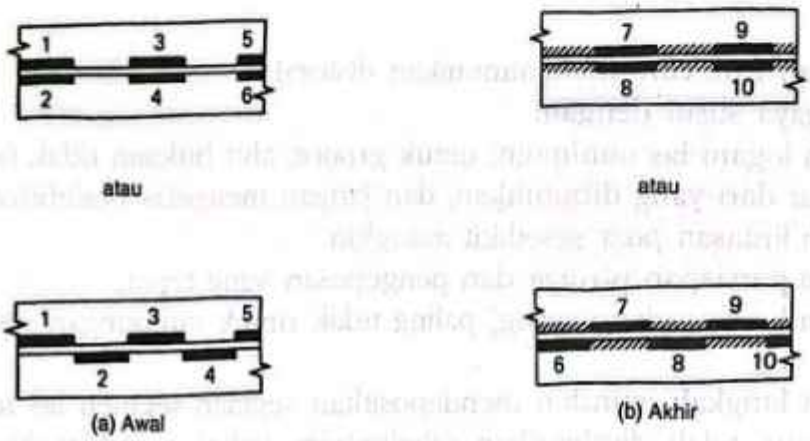


Gambar 5.7.4 *Efek penempatan las*

Dipindai dengan CamScanner

2. Memberi kesempatan terjadinya susut dengan:
   (a) Mengungkit pelat sehingga setelah terjadi kerutan, pelat-pelat tersebut dapat diluruskan kembali dengan tepat.
   (b) Menggunakan pralenturan bagian-bagian yang akan dilas.
3. Seimbangkan gaya-gaya susut dengan:
   (a) Menggunakan simetri dalam pengelasan; *fillet* pada masing-masing sisi bagian-bagian yang dilas akan menyumbangkan efek perlawanan.
   (b) Menggunakan segmen-segmen las tersebar.
   (c) Mengetuk-ngetuk; meregangkan logam tersebut dengan sejumlah pukulan.
   (d) Menggunakan cengkeram, pengkonsol, dan sebagainya yang dapat memaksa logam agar tetap teregang pada saat mendingin.

Blodgett [5.18] telah membuat cara-cara yang lebih luas untuk meminimumkan distorsi.



Gambar 5.7.5 *Sekuensi untuk las berselang-seling.*

5.8 Kemungkinan Cacat pada Las

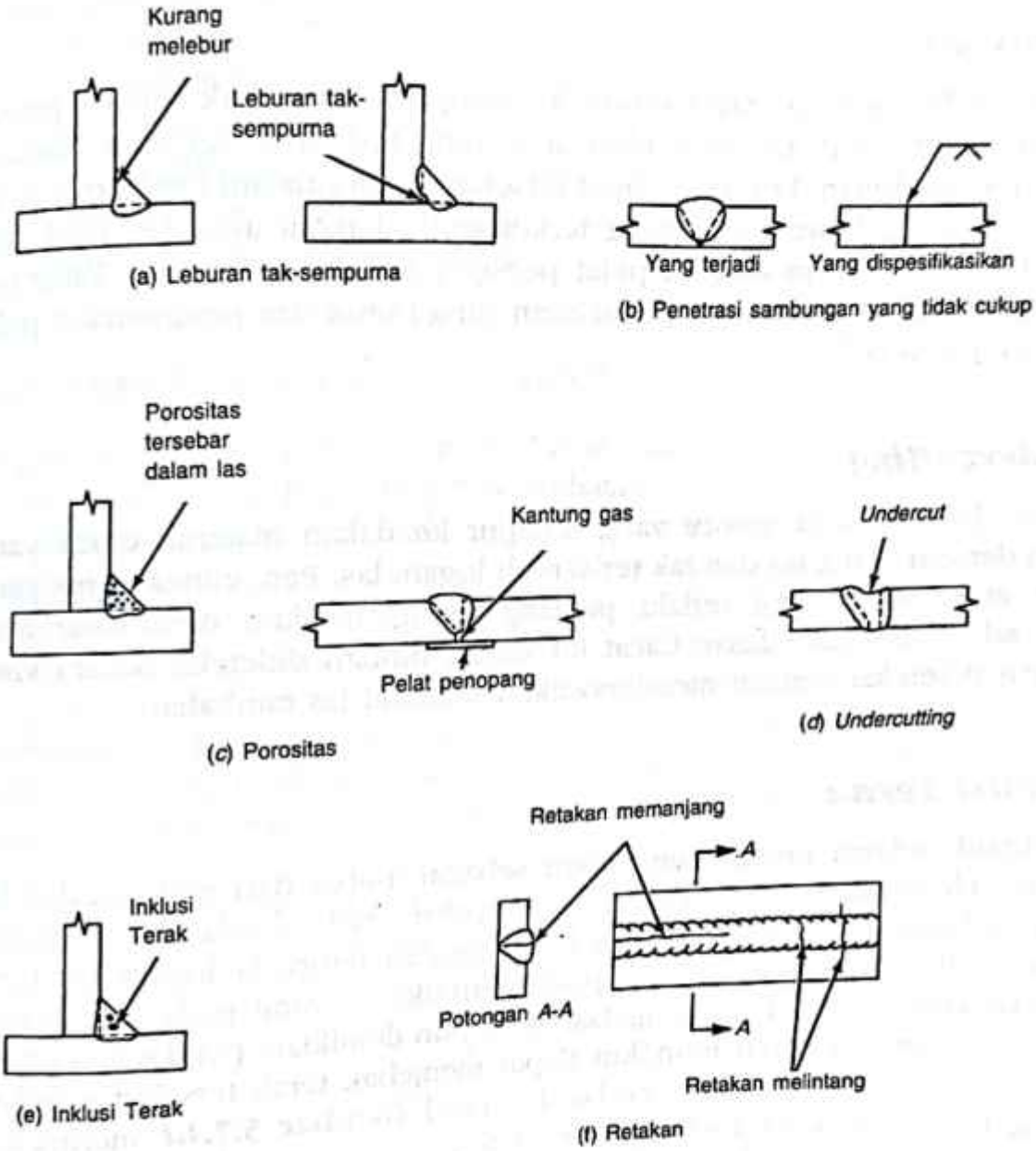
Tanpa teknik dan prosedur pengelasan yang baik, mungkin saja timbul sejumlah cacat yang berupa diskontinuitas pada las. Beberapa cacat yang umum dijumpai adalah: leburan yang tidak sempurna, penetrasi sambungan yang tidak mencukupi, porositas, *undercutting*, inklusi terak, dan retakan. Dalam **Gambar 5.8.1** terdapat beberapa contoh dari cacat-cacat tersebut.

5.8.1 Leburan Tak-Sempurna

Leburan yang tidak sempurna adalah kegagalan logam dasar dan logam las didekatnya untuk melebur bersama sepenuhnya. Hal ini mungkin terjadi bila permukaan-permukaan yang akan disambungkan tidak dibersihkan dengan baik dan terselimuti oleh terak, oksida, atau bahan-bahan asing lain yang berukuran kecil. Salah satu penyebab lain adalah tidak tepatnya arus yang digunakan pada per-

Dipindai dengan CamScanner

alatan lasnya, sehingga logam dasar tidak mencapai titik lebur. Laju pengelasan yang terlampau cepat juga akan memberikan efek yang sama.



***Gambar 5.8.1** Kemungkinan cacat las*

5.8.2 Penetrasi Sambungan yang Tidak Memadai

Penetrasi sambungan yang tidak memadai berarti bahwa kedalaman las kurang dari kedalaman lobang yang ditetapkan seperti yang diperlihatkan **Gambar 5.8.1**, di mana seharusnya berupa penetrasi sempurna. Penetrasi sambungan sebagian hanya dapat diterima hanya bila telah dispesifikasikan demikian.

Cacat ini, terutama pada las *groove* terjadi karena desain *groove* yang tidak tepat bagi proses pengelasan yang dipilih, elektroda yang berlebihan besarnya, arus pengelasan yang tidak cukup, atau laju pengelasan yang berlebihan.

Rancangan sambungan yang disyaratkan oleh AWS [5.25, Bagian 2.6 sampai 2.10] harus selalu digunakan.

5.8.3 Porositas

Porositas terjadi bila rongga atau kantung-kantung hawa terjebak selama proses pendinginan. Cacat ini diakibatkan oleh arus yang terlalu tinggi atau panjang busur las yang berlebihan. Porositas dapat tersebar merata dalam keseluruhan las atau berupa kantung hawa besar yang terkonsentrasi pada akar las *fillet* atau pada akar yang berdekatan dengan pelat penopang pada las *groove*. Yang terakhir ini disebabkan oleh prosedur pengelasan yang buruk dan penggunaan pelat penopang yang ceroboh.

5.8.4 Undercutting

Undercutting berarti suatu *groove* yang terlebur ke dalam material dasar yang berdekatan dengan ujung las dan tak terisi oleh logam las. Penggunaan arus yang berlebihan atau busur yang terlalu panjang mungkin akan membakar atau melobangi sebagian logam dasar. Cacat ini sangat mudah dideteksi secara visual dan dapat dikoreksi dengan mendepositkan material las tambahan.

5.8.5 Inklusi Terak

Terak terbentuk selama proses pengelasan sebagai akibat dari reaksi-reaksi kimia lapisan elektroda yang meleleh dan terdiri dari oksida-oksida logam dan senyawa lainnya. Kepadatan terak lebih rendah daripada logam las yang meleleh, terak biasanya mengambang pada permukaan, yang pada saat pendinginan mudah disingkirkan oleh pengelas. Meskipun demikian, pendinginan sambungan yang terlampau cepat mungkin dapat menjebak terak tersebut sebelum sempat naik ke permukaan. Las *overhead* seperti **Gambar 5.7.1*d*** merupakan yang paling mudah terkena inklusi terak, dan dari sebab itu harus diinspeksi dengan cermat. Bila dibutuhkan beberapa lintasan untuk mendapatkan ukuran yang diinginkan, pengelas harus menyingkirkan terak sebelum membuat lintasan baru. Inklusi terak pada umumnya disebabkan oleh kegagalan melakukan ini dengan tepat.

5.8.6 Retakan

Retak adalah pecahan pada logam las, baik memanjang atau melintang terhadap garis las, yang diakibatkan oleh tegangan internal. Retak dapat juga memanjang dari logam las ke dalam logam dasar atau seluruhnya terjadi pada logam dasar di dekat las. Barangkali retak merupakan cacat las yang paling buruk; meskipun demikian, retakan tipis yang disebut *microfisure* mungkin efeknya tidak terlalu berbahaya.

Beberapa retakan terbentuk pada saat las mulai memadat, yang pada umumnya disebabkan oleh unsur-unsur konstituen getas, baik getas besi atau elemen-elemen paduan yang terbentuk di sepanjang perbatasan butiran. Retakan "panas" dapat dicegah dengan pemanasan yang lebih seragam dan pendinginan yang lebih lambat.

Retak pada bahan dasar di bawah dan sejajar las mungkin juga terbentuk pada temperatur kamar. Retak ini terjadi pada baja paduan rendah akibat kombinasi pengaruh hidrogen, mikrostruktur martensit getas, dan kekangan terhadap susut dan distorsi. Retakan "dingin" dapat diminimumkan dengan penggunaan elektroda hidrogen-rendah bersama dengan pra-pemanasan dan pasca-pemanasan.

5.9 Pengawasan dan Kontrol

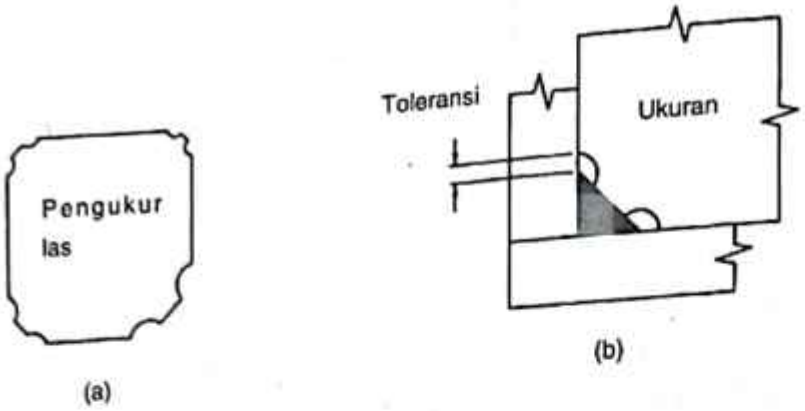
Keberhasilan dan perkembangan besar dalam beberapa tahun terakhir ini di bidang las struktur bangunan dan jembatan tidak akan dapat terjadi tanpa adanya pengawasan dan kontrol. Industri pengelasan telah mengeluarkan petunjuk-petunjuk, yang bila diikuti, dapat menjamin diperolehnya las yang baik. Prosedur pengawasan dan kontrol harus sudah dimulai sebelum busur pertama dilecutkan dan terus berlanjut selama proses pengelasan, dan bila perlu, pra-uji terhadap sambungan tersebut perlu dilakukan untuk menjamin diperolehnya unjuk kerja yang memuaskan. Karena supervisi seketat ini tidak mungkin dilaksanakan terhadap setiap las yang dilakukan, beberapa anjuran berikut ini dapat berfungsi sebagai petunjuk untuk mendapatkan las struktur yang baik:

1. Tetapkan prosedur pengelasan yang baik.
2. Hanya gunakan pengelas yang telah diprakualifikasi.
3. Gunakan pengawas yang *qualified* dan hendaknya terus hadir.
4. Bila perlu, gunakan teknik-teknik pengawasan khusus.

Prosedur pengawasan yang baik dapat dikembangkan dari rekomendasi AWS, AISC, dan pembuat/pemasok serta peralatan las. Prosedur yang harus diikuti ditentukan oleh sifat-sifat kimia dan fisika materialnya, tipe dan ukuran las, dan peralatan khusus yang digunakan.

Semua pengelas (di Amerika Serikat–**Pen.**) hendaknya telah lulus dari *American Welding Society Qualification Test* sebelum diijinkan membuat sambungan struktur. Meskipun biasanya telah dianggap cukup, toh ini belum membuktikan kemampuan pengelas untuk mengelas *on site* pekerjaan yang sebenarnya, khususnya bila las tersebut tidak biasa dan tidak dispesifikasikan dalam *Qualification Test*. Untunglah bahwa kebanyakan kontraktor las dalam situasi sedemikian biasanya melakukan kontrol terhadap para pengelasnya.

Pemakaian pengawas pengelasan yang *qualified* di lokasi pekerjaan pada umumnya akan membuat pengelas bekerja sebaik-baiknya, karena merasa bahwa pengawas mampu mengetahui kualitas las mereka. Pengawas pengelasan haruslah seorang pengelas yang cakap dan mampu mengetahui adanya



Gambar 5.9.1 *Pemeriksaan ukuran las filet*

cacat. Setiap las yang meragukan atau yang buruk harus segera dipotong dan diganti.

Metode pengawasan paling sederhana dan paling murah adalah secara *visual*, namun ini tergantung dari kecakapan si pengamat dan mungkin saja ia terkecoh oleh penampilan las [5.20]. Dalam beberapa hal, las yang buruk boleh diabaikan. Pengukur las seperti dalam **Gambar 5.9.1*a*** dapat dengan cepat memeriksa ukuran las *fillet*.

Pada struktur-struktur yang lebih penting, untuk las di mana keletihan menjadi salah satu pertimbangan, atau las yang bila gagal dapat menimbulkan bencana, harus digunakan teknik-teknik pengawasan yang lebih ketat [5.20]. Beberapa teknik yang bermanfaat di antaranya adalah metoda ultrasonik, radiografik, dan metode partikel magnetik. Metode *ultrasonik* [5.21-5.23] melepaskan gelombang-gelombang suara berfrekuensi ultra-tinggi melalui bagian yang dilas. Cacat-cacat pada suatu las tertentu akan memantulkan gelombang suara, sementara las tanpa cacat tidak akan menghalangi jalannya gelombang. Metode *radiografik* meliputi penggunaan sinar-X dan sinar gamma. Dalam metode ini, sumber radiasi ditempatkan pada salah satu sisi las, sedang pada sisi lainnya ditempatkan pelat fotografik. Metode ini mahal dan membutuhkan perhatian khusus terhadap kemungkinan radiasi yang tak teratur. Meskipun demikian, metode ini dapat dipercaya dan hasilnya sangat bagus. Metode pengujian dengan *partikel magnetik* [5.24] menggunakan serbuk besi yang ditaburkan di sekitar area las dan dipolarisasi dengan melewatkan suatu arus listrik melalui las tersebut. Akan terbentuk beberapa kutub kecil pada pinggir-pinggir cacat yang dapat diinterpretasi oleh seorang pengamat yang berpengalaman.

Welding Handbook [2.22, pp. 468-515] memberikan ulasan yang menyeluruh dari banyak metode uji yang tidak destruktif.

5.10 Perhitungan Ekonomi untuk Batang dan Sambungan Built-up

Penghematan secara keseluruhan pada sambungan las sulit dievaluasi. Beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan seperti banyaknya material elektroda yang di-

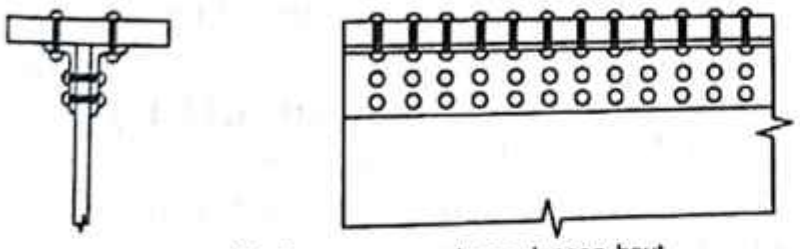
gunakan dapat dengan mudah dihitung, sementara faktor-faktor lain seperti nilai estetika sulit diukur. Penghematan aktual sambungan las harus dilihat dari suatu aspek yang luas dan meliputi keseluruhan desain sistem struktur yang bersangkutan.

Sambungan las biasanya lebih bersih dalam wujud penampilannya dan memberikan efek yang lebih sederhana dibanding sambungan baut. Gambar 5.10.1 menunjukkan perbandingan antara bagian gelagar pelat dengan sambungan las dan gelagar pelat dengan sambungan baut. Di samping penampilan sambungan las yang lebih bersih, sambungan las memberikan kebebasan yang lebih besar kepada desainer dalam berinovasi pada keseluruhan konsep desainnya. Desainer tidak dibatasi pada profil-profil standar saja, namun bebas membuat penampang bentukan yang paling menguntungkan. Demikian pula, konfigurasi terbaik untuk mentransmisikan beban dari satu batang ke batang lainnya juga dapat digunakan.

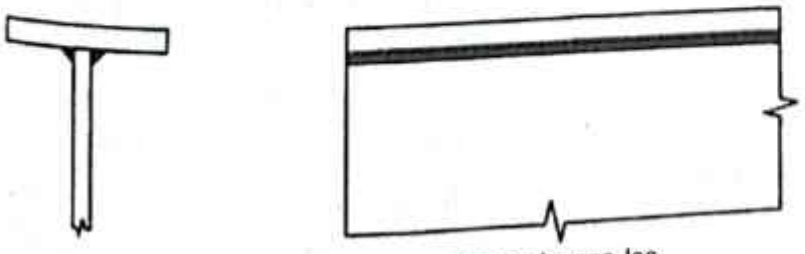
Dengan sambungan las, tidak dibutuhkan lagi lobang-lobang pada batang, kecuali mungkin untuk keperluan pemasangan saja. Karena biasanya yang menentukan desain batang tarik dengan baut adalah lobang-lobang pada ujung batang, dengan sambungan las tentu dapat diperoleh penampang yang lebih kecil.

Sambungan las sering juga dapat mereduksi biaya konstruksi lapangan, karena batang-batangnya dapat sedikit diubah untuk mengakomodasi kesalahan-kesalahan kecil pada saat fabrikasi dan pemasangan. Demikian pula, ukuran batang pun dapat diperpendek dengan pemotongan dan penggabungan kembali dengan las yang sesuai, serta dapat pula diperpanjang lagi dengan menyelipkan potongan dengan penampang lintang yang sama.

Selain itu, beberapa faktor langsung juga mempengaruhi biaya pengelasan. Pada umumnya, las yang dikerjakan di bengkel lebih murah ketimbang las di lapangan. Alasannya, di antaranya, adalah bahwa di bengkel tersedia mesin las otomatik, lingkungan yang lebih menyenangkan dan lebih bersahabat (misalnya cuaca), dan tersedia pula alat-alat khusus untuk memegangi bagian-bagian yang akan dilas dengan posisi yang lebih menguntungkan. Demikian pula, untuk operasi terus menerus, pekerjaan dapat dijadwalkan; sedangkan pengelasan di lapangan kadang



(a) Penampang gelagar dengan baut



(b) Penampang gelagar dengan las

Gambar 5.10.1 *Perbandingan antara gelagar-gelagar pelat*

harus bergiliran menanti derek serta peralatan pemasangan lainnya. Operasi operasi lain seperti pra-pemanasan yang tepat atas bagian-bagian yang akan dilas akan sulit–bila tidak mustahil–dilakukan di lapangan. Faktor-faktor lain yang mem pengaruhi biaya pengelasan adalah:

1. Biaya persiapan pinggiran yang akan dilas.
2. Banyaknya material yang dibutuhkan.
3. Rasio waktu busur aktual dengan keseluruhan waktu pengelasan.
4. Banyaknya penanganan yang dibutuhkan.
5. Biaya *overhead* keseluruhan.

Faktor-faktor di atas pada umumnya tidak diketahui desainer karena fabrikator biasanya tidak diseleksi sampai desainnya selesai. Meskipun demikian, desainer harus tetap mengambil keputusan—apakah akan digunakan las *fillet* berukuran besar yang pendek ataukah yang lebih kecil namun lebih panjang? Apakah menggunakan las *fillet* besar atau las *groove*? Bila keputusannya adalah las *groove*, masih harus diseleksi lagi tipe manakah yang paling tepat dan ekonomis.

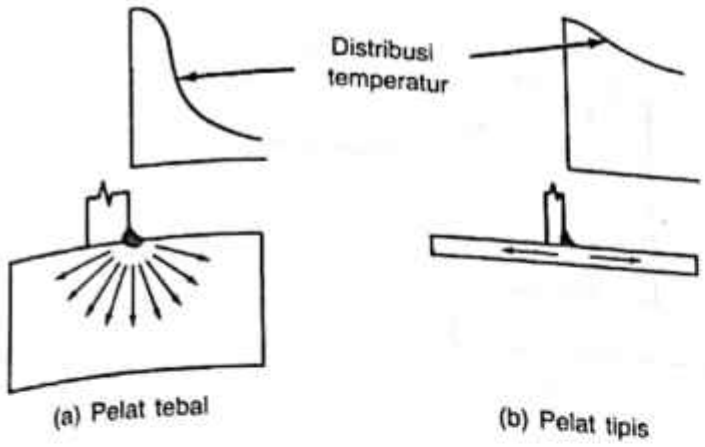
Dalam kebanyakan hal, desainer lebih memperhatikan *biaya relatif* suatu tipe las ketimbang biaya sebenarnya.

Donnely [5.26] telah mengembangkan faktor-faktor yang mengaitkan biaya las *fillet* dan las *groove* berukuran umum dengan biaya las *fillet* $^1/_4$ inch lintasan tunggal.

Dewasa ini (1990), sambungan las digunakan untuk sebagian besar sambungan yang dibuat di bengkel dan sebagian besar, meskipun bukan mayoritas, sambungan yang dibuat di lapangan. Pembahasan yang lebih ekstensif mengenai biaya las dapat ditemukan dalam *Welding Handbook* [2.22, Bab 8] dan Blodgett [5.27].

5.11 Pembatasan Ukuran dan Panjang Las Fillet

Karena semua las melibatkan pemanasan logam, pencegahan laju pendinginan yang terlalu cepat merupakan hal yang fundamental untuk mendapatkan las yang baik. Perhatikan dua ketebalan ekstrem pelat dalam **Gambar 5.11.1** yang masing-masing telah mendapatkan kampuh las *fillet*. Kebanyakan energi panas yang diberikan selama proses pengelasan diabsorpsi oleh pelat-pelat yang akan disambungkan. Pelat yang tebal menghamburkan panas secara vertikal maupun horisontal, sementara pelat yang tipis pada hakikatnya hanya menyebarkan panas secara horisontal saja. Dengan kata lain, semakin tebal pelat, semakin cepat panas tersingkirkan dari area pengelasan dan dengan demikian akan menurunkan temperatur pada daerah las itu. Dibutuhkan temperatur minimum untuk mencairkan logam dasarnya, maka dibutuhkan pula ukuran las (dan kandungan panas) minimum yang cukup untuk mencegah agar pelat tidak memindahkan panas dengan laju yang lebih cepat melebihi yang diberikan. Bila temperatur yang tepat tidak dipertahankan di daerah yang dilas, akan terjadi peristiwa peleburan yang kurang sempurna.



Gambar 5.11.1 Efek ketebalan terhadap laju pendinginan.

Tabel 5.11.1 Ukuran minimum las *fillet* dan leher efektif minimum untuk las *groove* penetrasi sambungan sebagian (Diadaptasi AWS D1.1[5.25], Tabel 2.7 dan 2.10.3)

Ketebalan logam dasar (T) bagian yang lebih tebal[4] yang disambungkan						Ukuran minimum[1] las *fillet*		Leher efektif minimum (t_e) untuk las *groove* penetrasi parsial	
(inch)			(mm)			(inch)	(mm)	(inch)	(mm)
1/8	< T ≤	3/16	3.2	< T ≤	4.8	1/8[2]	3[3]	1/16	2
3/16	< T ≤	1/4	4.8	< T ≤	6.4	1/8[2]	3	1/8	3
1/4	< T ≤	1/2	6.4	< T ≤	12.7	3/16	5	3/16	5
1/2	< T ≤	3/4	12.7	< T ≤	19.0	1/4	6	1/4	6
3/4	< T ≤	1 1/2	19.0	< T ≤	38.1	5/16	8	5/16	8
1 1/2	< T ≤	2 1/4	38.1	< T ≤	57.1	5/16	8	3/8	10
2 1/4	< T ≤	6	57.1	< T ≤	152	5/16	8	1/2	13
6	< T		152	< T		5/16	8	5/8	16

[1] Ukuran las adalah panjang kaki *fillet*. Ukuran las tidak perlu melebihi ketebalan bagian sambungan yang lebih tipis. Untuk kekecualian ini, perlu diambil perhatian khusus sehingga dapat memberikan pra-pemanasan yang cukup untuk menjamin las yang rapat.

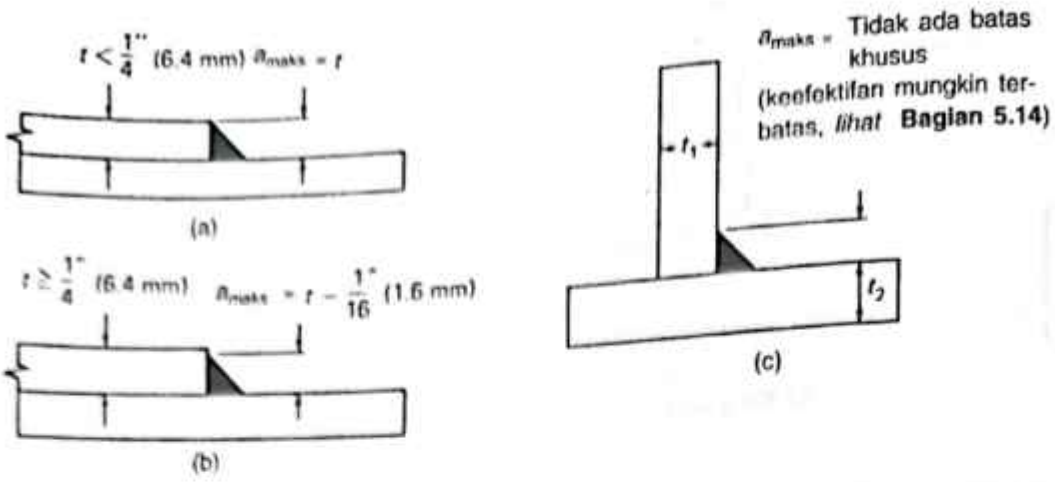
[2] Ukuran minimum pada jembatan adalah $^3/_{16}$ inch.

[3] Untuk metrik, harus digunakan las lintasan tunggal minimum.

[4] kekecualian: T merupakan bagian yang tipis yang akan disambungkan bila digunakan ketentuan pra-pemanasan khusus AWS-4.2.2

5.11.1 Ukuran Las Minimum

Untuk membantu kepastian leburan dan meminimumkan distorsi, Spesifikasi AWS [5.25] dan AISC [1.5, 1.15] telah menyediakan ukuran las minimum berdasarkan bagian yang tebal yang akan disambungkan. Persyaratan untuk las *fillet* berdasarkan dimensi kaki a pada *fillet* tersebut, dan untuk las *groove* penetrasi sambungan sebagian berdasarkan leher efektif (*lihat* **Bagian 5.12**) diberikan dalam **Tabel 5.11.1**.

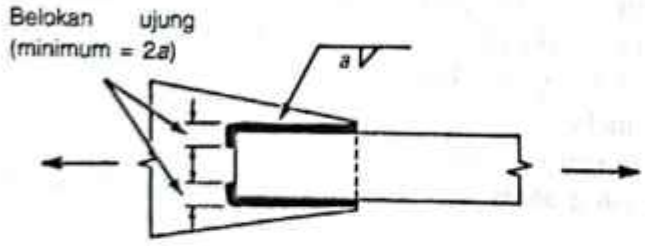


Gambar 5.11.2 *Ukuran las minimum*

5.11.2 Ukuran Las Fillet Minimum sepanjang Pinggiran

Ukuran maksimum las *fillet* yang digunakan di sepanjang pinggiran bagian-bagian yang akan digabungkan dibatasi (LRFD dan ASD-J2.2.b) supaya dapat mencegah melelehnya material dasar pada lokasi di mana *fillet* akan bertemu dengan sudut pelat bila *fillet* tersebut dibuat setebal pelat penuh. Ukuran maksimum yang diijinkan adalah (*lihat* **Gambar 5.11.2**):

1. Sepanjang pinggiran material dengan ketebalan kurang dari $^1/_4$ inch (6.4 mm), ukuran minimum boleh sama dengan ketebalan material yang bersangkutan.
2. Sepanjang pinggiran material dengan ketebalan $^1/_4$ inch (6.4 mm) atau lebih, ukuran maksimum harus $^1/_{16}$ inch (1.6 mm) kurang dari ketebalan material yang bersangkutan, kecuali bila dalam gambar desain telah disebutkan agar dilas menurut ketebalan leher penuh.



Gambar 5.11.3 *Penggunaan belokan ujung*

5.11.3 Panjang Efektif Minimum Las Fillet

Pada saat menempatkan suatu las *fillet*, pengelas membentuk las dengan dimensi penuh dan merata sejak awal pengelasan. Meskipun demikian, selalu ada sedikit bentuk peruncingan pada daerah ujung awal dan ujung akhir las. Maka dari

itu, panjang efektif minimum las *fillet* adalah empat kali ukuran nominal (LRFD dan ASD-J2.2.b). Bila persyaratan ini tidak dipenuhi, ukuran las harus dianggap seperempat dari panjang efektifnya.

LRFD dan ASD-J2.2.b merekomendasikan penggunaan belokan pada ujung las, sejauh mungkin, seperti **Gambar 5.11.3**. Untuk pembatasan lain, para pembaca dipersilakan membuka Spesifikasi AISC [1.5, 1.15].

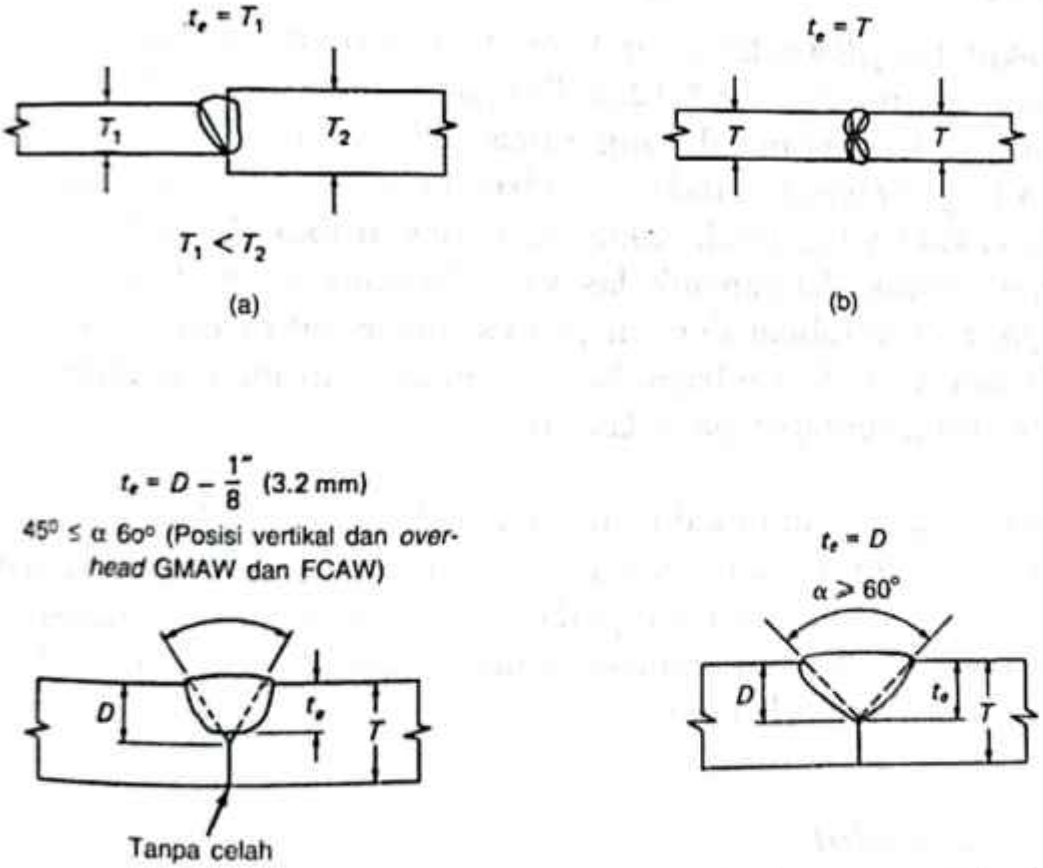
5.12 Luas Las Efektif

Kekuatan berbagai las yang dibicarakan dalam **Bagian 5.5** didasarkan atas *luas efektif*. Luas efektif las *groove* atau *fillet* merupakan hasil kali dimensi *leher efektif* t_e dikalikan dengan panjangnya las.

Dimensi leher efektif tergantung pada ukuran nominal dan bentuk las, dan dapat dianggap sebagai lebar minimum dari bidang kegagalan yang diharapkan.

5.12.1 Las Groove

Yang disebut dimensi leher efektif las *groove* penetrasi penuh adalah ketebalan bagian tipis yang akan disambungkan seperti **Gambar 5.12.1*a*** dan ***b***. Untuk las



Gambar 5.12.1 *Dimensi leher efektif untuk las groove (LRFD dan ASD-J2.1.a) yang dibuat dengan SMAW, SAW, GMAW, dan FCAW*

groove penetrasi sambungan parsial, leher efektif boleh kurang dari kedalaman alur. Sebagai contoh, bila *groove* sambungan serong atau **V** mempunyai sudut dalam pada akar *groove* kurang dari 60° namun lebih dari 45° dan proses yang digunakan adalah SMAW atau SAW, atau bila posisinya *overhead* dengan GMAW atau FCAW, leher efektif adalah kedalaman alur kurang $^1/_8$ inch. Bila sudut dalamnya 60° atau lebih, leher efektif untuk keempat proses di muka adalah kedalaman penuh alur. Persyaratan leher efektif untuk situasi *groove* di atas, demikian pula untuk yang lainnya, diberikan dalam LRFD dan ASD-J2.1.a.

Gambar 5.12.2 *Dimensi leher efektif untuk las fillet (kecuali dengan proses busur tenggelam)*

5.12.2 Las Fillet

Dimensi leher efektif las *fillet* adalah jarak nominal terpendek dari akar (titik siku) ke muka las, seperti **Gambar 5.12.2**. Dengan mengasumsikan bahwa las *fillet* memiliki panjang kaki nominal yang sama dengan a, leher efektifnya t_e adalah $0.707a$. Bila las *fillet* tersebut didesain sebagai tak simetrik (hal yang jarang terjadi) dengan kaki-kaki yang tidak sama, seperti **Gambar 5.12.2*b***, harga t_e harus dihitung dari bentuk diagramatik las yang bersangkutan. Dimensi leher efektif untuk las *fillet* yang dibuat dengan proses busur terbenam (SAW) dimodifikasi oleh LRFD dan ASD-J2.2a sebagai berikut ini dengan mempertimbangkan keunggulan kualitas yang terdapat pada las itu:

1. Untuk las *fillet* dengan ukuran kaki yang sama dengan atau lebih kecil dari $^3/_8$ inch (9.5 mm), dimensi leher efektif diambil sama dengan ukuran kaki a.
2. Untuk las *fillet* yang lebih besar daripada $^3/_8$ inch (9.5 mm), dimensi leher efektif diambil sesuai dengan dimensi leher teoretik ditambah 0.11 inch (2.8 mm)(yakni $0.707a + 0.11$).

5.12.3 Las Plug dan Slot

Luas geser efektif las *slot* atau *plug* adalah luas nominalnya pada bidang geser (kadang kala disebut sebagai *bidang sambungan/faying surface*). Resistansi las *plug* atau *slot* merupakan hasil kali luas penampang lintang nominal dengan tegangan pada bidang luasan.

5.13 Kekuatan Nominal Las

Karena las harus mentransmisikan seluruh beban dari satu batang ke batang lainnya, las pun harus didimensi sesuai dengan dan dibentuk dari material elektroda yang tepat. Untuk keperluan desain, las *fillet* diasumsikan mentransmisikan beban melalui *tegangan geser* pada area efektif, apa pun orientasi *fillet* pada sambungan strukturalnya. Las *groove* mentransmisikan beban tepat seperti pada bagian-bagian yang dihubungkannya.Material elektroda yang digunakan pada las harus memiliki sifat-sifat material dasar. Bila sifat-sifat agak berbeda, logam las disebut sebagai logam las "pasangan" ("*matching*"). **Tabel 5.13.1** memberikan logam las "pasangan" untuk berbagai baja struktur ASTM yang digunakan pada bangunan dan jembatan.

5.13.1 Kekuatan Las Groove

Las *groove* penetrasi penuh dianggap memiliki kekuatan terhadap *luas efektif* yang sama dengan bagian-bagian yang disambungkan. Las yang akan terkena gaya tarik tegak lurus luas efektif harus dibuat dengan logam las "pasangan"-nya, yang sifat sifat logamnya sebanding dengan logam dasar. Pada kondisi tekan, di mana yang menjadi faktor utama adalah stabilitas batang tekan, kekuatan logam las ini diijinkan memiliki berharga satu klasifikasi (10 ksi) lebih rendah dari persyaratan logam dasar "pasangan"-nya. Meskipun demikian, penulis menganjurkan agar elektroda pasangannya digunakan bila nantinya batang tersebut mungkin berfungsi sebagai batang tarik.

Dengan demikian, kekuatan nominal R_{nw} las per inch panjang didasarkan atas lelehan logam dasar yang memberikan:

$$R_{nw} = t_e F_y \qquad \text{tekan atau tarik} \qquad (5.13.1)$$

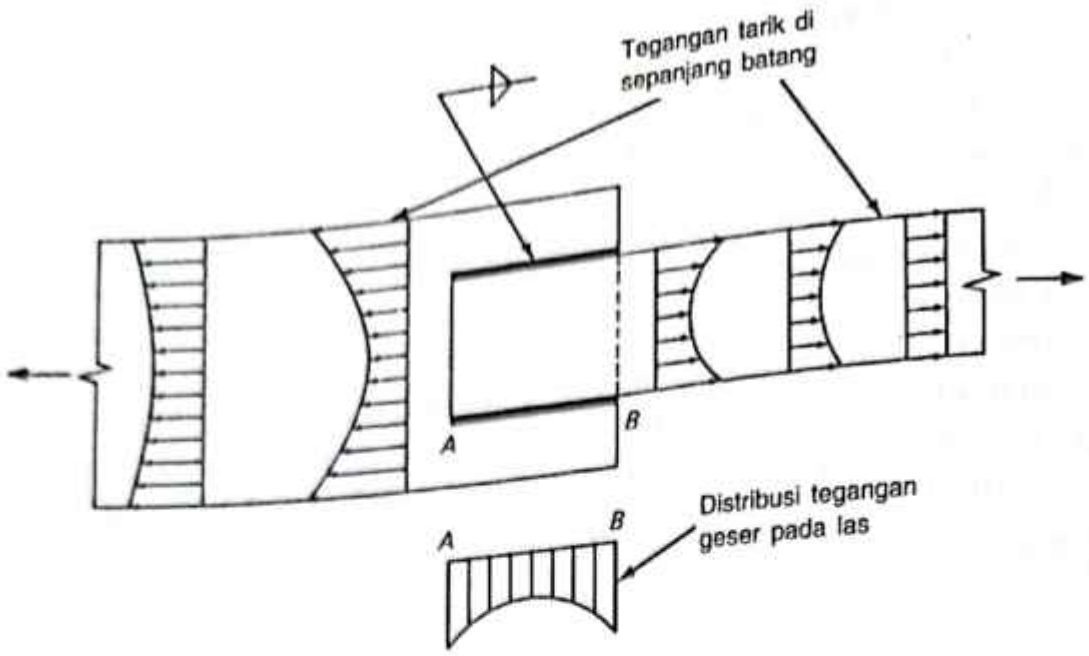
$$R_{nw} = t_e(0.60\ F_y) \qquad \text{geser} \qquad (5.13.2)$$

di mana: t_e = tebal efektif (*lihat* **Bagian 5.11**)

F_y = tegangan leleh logam dasar

Perhatikan bahwa sebagaimnana dibicarakan dalam **Bagian 2.6**, tegangan leleh geser diambil sekitar $^2/_3$ (sebenarnya 0.6) dari tegangan leleh tarik-tekan. Bila digunakan material elektroda "pasangan", material las sedikit lebih kuat daripada material dasarnya; dengan demikian, kekuatan sambungan las ditentukan oleh sifat material dasarnya.

Bila sambungan las *groove* akan terkena geser, logam las [AWS-Tabel 8.4.1 [2.24]) diijinkan lebih rendah daripada logam dasarnya; yakni, kurang dari logam las "pasangan"-nya, di mana kekuatan F_{EXX} material las harus digunakan untuk menggantikan F_y dalam perhitungan R_{nw}



Gambar 5.13.1 *Distribusi tegangan tipikal pada lap joint(sambungan lewatan) dengan las fillet longitudinal*

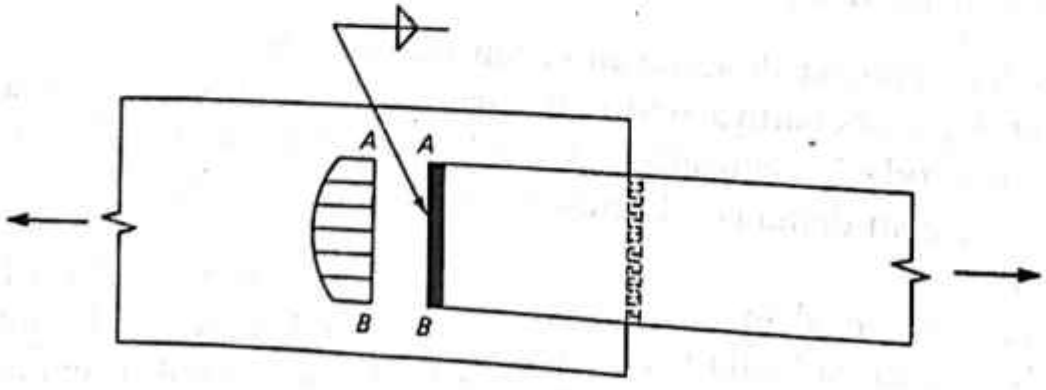
5.13.2 Kekuatan Las Fillet

Kekuatan R_{nw} las *fillet* per inch panjang didasarkan atas asumsi bahwa kegagalan las sedemikian dikarenakan oleh geser terhadap luas efektif, baik bila geser itu sejajar atau tegak lurus terhadap sumbu alur las *fillet* yang bersangkutan. Dalam kenyataannya, kekuatan tersebut lebih besar bagi transfer geser yang tegak lurus terhadap sumbu las; meskipun demikian, untuk mudahnya situasi-situasi tersebut diperlakukan sama. Dengan demikian, kekuatan las *fillet* mungkin ditentukan oleh kekuatan elektroda las *atau* kekuatan geser material dasar. Kekuatan nominal R_{nw} per inch panjang las dapat diwujudkan sebagai:

$$R_{nw} = t_e(0.60F_{EXX}) \quad \text{logam las} \tag{5.13.3}$$

atau

$$R_{nw} = t(0.60F_u) \quad \text{logam dasar} \tag{5.13.4}$$



Gambar 5.13.2 *Distribusi tegangan tipikal pada suatu sambungan impit yang transversal terhadap las fillet*

Tabel 5.13.1 Persyaratan logam pengisi pasangan (Diadaptasi dari AWS-Tabel 4.1.1[2.24])

Kelompok	Spesifikasi baja Logam dasar[1]	Proses pengelasan[2,3]			
		Shielded metal arc welding (SMAW)	*Submerged arc welding* (SAW)	*Gas metal arc welding* (GMAW)	*Flux cored arc welding* (FCAW)
I	ASTM A36, A53 Gol.B, A500, A501, A529, A570 Gol. 40, 45, dan 50 A709 Gol. 36	AWS A5.1 atau A5.5 E60XX atau E70XX	AWS A5.17 atau A5.23 F6X atau F7X-EXXX	AWS A5.18 ER70S-X	AWSA5.20 E6XT-X dan E7XT-X (kec.–2, 3, –10 –GS)
II	ASTM A242[6] a572 Gol. 42 dan 50 A588 A709 Gol. 50 dan 50W	AWS A5.1 atau A5.5 E70XX[4]	AWS A5.17 atau A5.23 F7X-EXXX	AWS A5.18 ER70S-X	AWS A5.20 E7XT-X *(kecuali –2, –3, –10, –GS)*
III	ASTM A572 Gol. 60 & 65	AWS A5.5 E80XX[4]	AWS A5.23 F8X-EXXX[5]	AWS A5.28 ER80S[5]	AWS A5.29 E8XT[5]
IV	ASTM A514 (tebal>$2^1/_2$inch) A709 Gol.100 dan 100W ($2^1/_2$ sampai 4 inch)	AWS A5.5 E100XX[4]	AWS A5.23 F10X-EXXX[5]	AWS A5.28 ER100S[5]	AWS A5.29 E10XT[5]
V	ASTM A514 ($2^1/_2$ inch>tebal) A709 Gol. 100 dan 100W ($2^1/_2$ inch dan kurang)	AWS A5.5 E110XX[4]	AWS A5.23 F11X-EXXX[5]	AWS A5.28 ER110S[5]	AWS A5.29 E11XT[5]

[1]Pada sambungan-sambungan dengan logam-logam dasar yang berlainan kelompok, dapat digunakan persyaratan logam pengisi hidrogen-rendah yang berlaku untuk kelompok kekuatan yang lebih rendah. Proses-proses hidrogen-rendah harus mengikuti persyaratan teknik yang berlaku untuk kelompok kekuatan yang lebih tinggi.

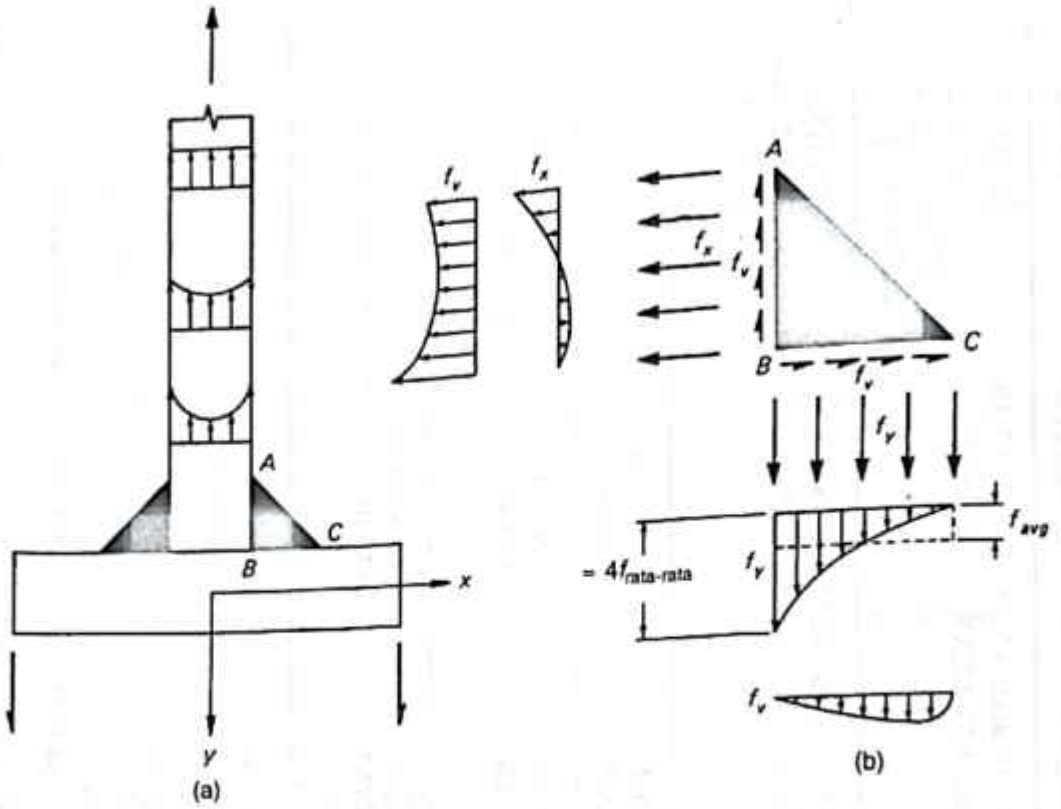
[2]Bila las akan mendapat peredaan tegangan, logam las yang terdeposit tidak boleh melebihi vanadium 0.05 persen.

[3]Untuk persyaratan terak listrik dan logam las terak listrik *lihat* AWS D1.1-88, Bagian 4.20.

[4]Hanya klasifikasi-klasifikasi hidrogen-rendah.

[5]Logam las terdeposit harus memiliki kekuatan kejut minimum sebesar 20 ft-lb (27.1J) pada 0°F (-18°C) bila digunakan spesimen takik-V Charpy. Persyaratan ini hanya berlaku untuk jembatan.

[6]Mungkin dibutuhkan material dan prosedur pengelasan khusus untuk mengimbangi keuletan takikan logam dasar atau untuk mendapatkan karakteristik-katakteristik korosi dan pelapukan.



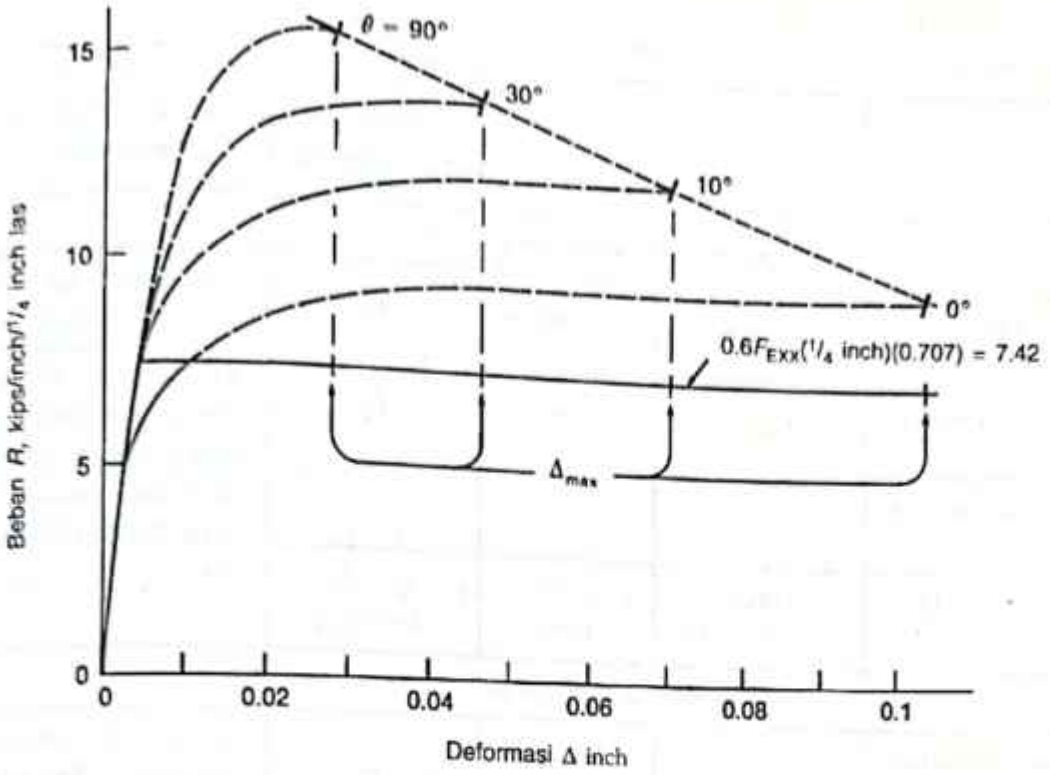
Gambar 5.13.3 *Distribusi tegangan tipikal pada sebuah sambungan T dengan las fillet (geser transversal terhadap fillet)*

Distribusi tegangan pada sambungan las itu kompleks dan tidak seragam. **Gambar 5.13.1** menunjukkan distribusi tegangan tipikal pada beban layanan untuk las *fillet* longitudinal pada sebuah *lap joint* (sambungan lewatan). Variasi aktual tegangan geser pada las dari titik *A* ke *B* tergantung pada panjangnya las maupun rasio lebar pelat-pelat yang disambungkan. **Gambar 5.13.2** menunjukkan variasi geser tipikal untuk las *fillet* yang mendapat pembebanan transversal terhadap sumbu las. Distribusi tegangan pada las *fillet* yang digunakan untuk menghubungkan sambungan-sambungan **T** lebih kompleks, seperti terlihat dalam **Gambar 5.13.3**. Karena kecenderungan *fillet* untuk berotasi di seputar titik *C*, tegangan maksimum f_y menurut arah y akan mendekati empat kali tegangan rata-rata $f_{\text{rata-rata}}$.

Hubungan beban-deformasi las *fillet* telah dipelajari oleh Butler, Pal, dan Kulak [5.29], Kulak dan Timmler [5.30], Swannell [5.31, 5.32] dan Neis [5.33] dan diperlihatkan dalam **Gambar 5.13.4** di mana kita dapat mengamati bahwa kekuatan berkaitan dengan sudut di mana las tersebut terbebani. Las longitudinal pada **Gambar 5.13.1** dibebani pada sudut 0° (sejajar dengan sumbu las); **Gambar 5.13.4** menunjukkan duktilitas yang dapat diperhitungkan (kemampuan deformasi yang besar) untuk las sedemikian. **Gambar 5.13.2** menunjukkan las transversal yang dibebani pada sudut 90°; sedangkan **Gambar 5.13.4** menunjukkan kekuatan yang lebih besar namun duktilitasnya lebih kecil untuk las sedemikian.

Dari **Gambar 5.13.4** perhatikan pula bahwa meskipun kekuatan suatu las *fillet* bertambah besar pada saat sudut terhadap sumbu las bertambah, oleh

PERPUSTAKAAN D III F. TEKNIK



Gambar 5.13.4 Hubungan beban-deformasi untuk las fillet E70 sebesar 1/4 inch (Dari Manual LRFD [1.17]).

Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] kekuatan ekstra itu toh tidak digunakan. Batas yang digunakan adalah kekuatan geser material las yang diambil pada $0.6F_{EXX}$.

Fakta bahwa las akan mengalami deformasi plastis (beban konstan dengan peningkatan deformasi) sebelum terjadinya kegagalan (*failure*) memungkinkan perlakuan relatif sederhana atas las *fillet* yang dibebani sejajar ($\theta = 0°$) maupun tegak lurus ($\theta = 0°$) terhadap sumbu las. Diasumsikan bahwa deformasi plastik akan memungkinkan semua las demikian dapat memberikan resistansi yang sama di sembarang tempat menurut arah panjangnya.

5.14 Load and Resistance Factor Design — Las

Filosofi umum *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) telah dibeberkan dalam **Bagian 1.8** dan **1.9**. **Persamaan 1.8.1** memberikan persyaratan keamanan sebagai berikut:

$$\phi R_n \geq \Sigma \gamma_i Q_i \qquad [1.8.1]$$

di mana ϕ = faktor resistansi (faktor reduksi kekuatan), harga-harganya untuk las diberikan dalam **Tabel 5.14.1**

R_n = resistansi nominal (kekuatan) untuk las R_{nw}

γ_i = faktor kelebihan beban (LRFD-A4.1)

Q_i = beban-beban layanan (*lihat* **Bagian 1.8** dan **1.9**)

Persamaan 1.8.1 mensyaratkan bahwa *kekuatan desain* ϕR_n adalah sama atau melebihi jumlah *beban-beban terfaktor*, atau secara khusus untuk las, persamaan **[1.8.1]** tersebut menjadi:

Tabel 5.14.1 Kekuatan desain las (dari Manual LRFD [1.17]), Tabel J2.3)

Tipe Las dan Tegangan[a]	Material	Faktor Resistansi ϕ	Kekuatan nominal F_{NM} atau F_w	Tingkat kekuatan las yang disyaratkan[b,c]
Las *groove* penetrasi penuh				
Tarik tegak lurus terhadap luas efektif	Dasar	0.90	F_y	Las "pasangan" harus digunakan
Tekan tegak lurus terhadap luas efektif	Dasar	0.90	F_y	Logam las dengan kekuatan yang sama atau kurang dari las "pasangan" nya boleh digunakan
Tarik atau tekan sejajar dengan sumbu las				
Geser pada luas efektif	Dasar Elektroda las	0.90 0.80	$0.60F_y$ $0.60F_{EXX}$	
Las *groove* penetrasi parsial				
Tekan normal terhadap luas efektif	Dasar	0.90	F_y	Logam las dengan tingkat kekuatan yang sama atau kurang dari logam las "pasangan"-nya boleh digunakan
Tarik atau tekan sejajar terhadap sumbu las[d]				
Geser sejajar dengan sumbu las	Dasar[e] Elektroda las	0.75	$0.60F_{EXX}$	
Tarik tegak lurus terhadap luas efektif	Dasar Elektroda las	0.90 0.80	F_y $0.60F_{EXX}$	
Las *fillet*				
Tegangan pada luas efektif	Dasar[e] Elektroda las	0.75	$0.60F_{EXX}$	Logam las dengan tingkat kekuatan yang sama atau kurang dari logam las "pasangan"-nya boleh digunakan
Tarik atau tekan sejajar terhadap sumbu las[d]	Dasar	0.90	F_y	
Las *plug* atau *slot*				
Geser sejajar dengan bidang sambungan (pada luas efektif)	Dasar[e] Elektroda las	0.75	$0.60F_{EXX}$	Logam las dengan tingkat kekuatan yang sama atau kurang dari logam las "pasangan"-nya boleh digunakan

[a] Untuk definisi mengenai luas efektif, *lihat* **Bagian J2**
[b] Untuk logam las "pasangan", *lihat* **Tabel 4.1.1**, AWS D1.1
[c] Logam las dengan satu tingkat di atas tingkat kekuatan logam las "pasangan"-nya boleh digunakan.
[d] Las *fillet* dan las *groove* penetrasi sebagian yang menggabungkan komponen-komponen *built-up*, seperti sambungan flens–ke–badan, dapat didesain tanpa memperhatikan tegangan tarik atau tekan pada elemen-elemen yang sejajar dengan sumbu las.
[e] Desain material yang dihubungkan diatur oleh **Bagian J4**

$$\phi R_{nw} \geq R_u \qquad (5.14.1)$$

di mana ϕ = faktor resistansi (untuk las, faktor ϕ adalah sama dengan faktor untuk material yang dihubungkannya; yakni 0.90 untuk keadaan batas, leleh dan 0.75 untuk keadaan retakan)

R_{nw} = kekuatan nominal per satuan panjang las, namun tidak melebihi kekuatan nominal per satuan panjang material dasar di dekatnya

R_u = beban terfaktor per satuan panjang las

5.14.1 Las Groove

Kekuatan desain (LRFD-J2.1) per panjang satuan las *groove* penetrasi penuh tergantung pada tipe tegangan yang digunakan:

1. *Tarik* dan *tekan* tegak lurus terhadap luas efektif*, dan tarik dan tekan sejajar dengan sumbu las:

$$\phi R_{nw} = 0.90 t_e F_y \qquad \text{material dasar} \qquad (5.14.2)$$

$$\phi R_{nw} = 0.90 t_e F_{yw} \qquad \text{logam las} \qquad (5.14.3)$$

di mana F_y dan F_{yw} masing-masing merupakan tegangan pada logam dasar dan logam las. Bila digunakan las "pasangan" seperti ditunjukkan dalam **Tabel 5.13.1**, F_{yw} diambil sebagai tegangan leleh material dasar.

2. *Geser* pada luas efektif*:

$$\phi R_{nw} = 0.90 t_e \tau_y$$

$$= 0.90 t_e (0.60 F_y) \qquad \text{logam dasar} \qquad (5.14.4)$$

$$\phi R_{nw} = 0.80 t_e (0.60 F_{EXX}) \qquad \text{logam las} \qquad (5.14.5)$$

Perhatikan bahwa dalam uraian di atas, tegangan leleh geser diambil sekitar $0.6F_y$ untuk logam dasar dan 0.6 dari *kekuatan tarik* untuk logam las; dengan demikian, faktor ϕ yang lebih rendah sebesar 0.80 digunakan untuk logam las.

Las *groove* penetrasi parsial diperlakukan demikian pula dan dalam **Tabel 5.14.1** diberikan rangkuman kekuatan desainnya.

5.14.2 Las Fillet

Kekuatan desain (LRFD-J2.2) per satuan panjang las *fillet* didasarkan atas resistansi geser melalui leher las sebagai berikut:

---

*Lihat **Bagian 5.12** untuk definisi mengenai luas efektif*

$$\phi R_{nw} = 0.75 t_e (0.60 F_{EXX}) \quad \text{las } \textit{fillet} \tag{5.14.6}$$

namun tidak kurang dari kekuatan patahan (*rupture*) geser (LRFD-J4) dari logam dasar di dekatnya.

$$\phi R_{nw} = 0.75 t (0.60 F_u) \quad \text{logam dasar} \tag{5.14.7}$$

di mana t_e = dimensi leher efektif (*lihat* **Bagian 5.12**)
F_{EXX} = kekuatan tarik material elektroda
t = tebal material dasar di sepanjang las
F_u = kekuatan tarik logam dasar

Perhatikan bahwa keadaan batas untuk las *fillet* adalah retakan melalui leher *fillet* tersebut; dengan demikian, faktor ϕ-nya adalah 0.75. Harga-harga ϕR_{nw} berdasarkan **Persamaan 5.14.6** untuk berbagai macam kekuatan elektroda diberikan dalam **Tabel 5.14.2** untuk *shielded metal arc welding* (SMAW) dan dalam **Tabel 5.14.3** untuk *submerged arc welding* (SAW).

Tabel 5.14.2 Kekuatan geser desain las *fillet*, ϕR_{nw}(kips/inch) (*Shielded Metal Arc Welding*)

Ukuran nominal (inch)	Leher efektif (inch)	Kekuatan tarik minimum las (ksi)					
		60	70	80	90	100	110
1/8	0.088[a]	2.38[b]	2.77	3.17	3.56	3.96	4.36
3/16	0.133	3.58	4.18	4.77	5.37	5.97	6.56
1/4	0.177	4.77	5.57	6.36	7.16	7.95	8.75
5/16	0.221	5.97	6.96	7.95	8.95	9.94	10.94
3/8	0.265	7.16	8.35	9.54	10.47	11.93	13.12
7/16	0.309	8.35	9.74	11.14	12.53	13.92	15.31
1/2	0.354	9.54	11.14	12.73	14.32	15.91	17.50
9/16	0.398	10.74	12.53	14.32	16.11	17.90	19.69
5/8	0.442	11.93	13.92	15.91	17.90	19.88	21.87
11/16	0.486	13.12	15.31	17.50	19.69	21.87	24.06
3/4	0.530	14.32	16.70	19.09	21.48	23.86	26.25

[a] t_e = 0.707 kali ukuran sisi a = (0.707(1/8) = 0.088 inch
[b] $\phi t_e(0.60F_{EXX})$ = 0.75(0.707a)(0.60 kali kekuatan tarik)
= 0.75(0.70)(1/8)(0.60)(60) = 2.38 kips/inch

Dalam **Tabel 5.14.1** diberikan rangkuman kekuatan desain las, sedang dalam **Tabel 5.14.4** rangkuman dari pasal-pasal Spesifikasi AISC.

■ Contoh 5.14.1

Tentukan dimensi leher efektif las *fillet* $^7/_{16}$ inch yang dibuat dengan (*a*) *shielded metal arc welding* (SMAW), dan (*b*) *submerged arc welding* (SAW), sesuai dengan Spesifikasi AISC [1.5, 1.15].

Tabel 5.14.3 Kekuatan desain per inch dari las sudut, ϕR_n (kips/inch) (*Submerged Arc Welding*)

Ukuran nominal (inch)	Leher efektif (inch)	Kekuatan tarik minimum las (ksi)					
		60	70	80	90	100	110
1/8	0.125[a]	3.38[c]	3.94	4.50	5.06	5.63	6.19
3/16	0.188[a]	5.06	5.91	6.75	7.59	8.44	9.28
1/4	0.250[a]	6.75	7.88	9.00	10.13	11.25	12.38
5/16	0.313[a]	8.44	9.84	11.25	12.66	14.06	15.47
3/8	0.375[a]	10.13	11.81	13.50	15.19	16.88	18.56
7/16	0.419[b]	11.32	13.21	15.10	16.98	18.87	20.76
1/2	0.463	12.51	14.60	16.69	18.77	20.86	22.94
9/16	0.508	13.71	15.99	18.28	20.56	22.85	25.13
5/8	0.552	14.90	17.38	19.87	22.35	24.83	27.32
11/16	0.596	16.09	18.87	21.46	24.14	26.82	29.51
3/4	0.640	17.29	20.17	23.05	25.93	28.81	31.69

[a] $t_e = a$ =ukuran sisi untuk ukuran-ukuran yang ≤ 3/8 inch
[b] $t_e = 0.707a + 0.11$ untuk ukuran-ukuran yang > 3/8 inch
[c] $\phi t_e(0.60F_{EXX})$ = 0.75(*a*)(0.60 kali kekuatan tarik)
= 0.75(1/8)(0.60)(60) = 3.38 kips/inch

Tabel 5.14.4 Las — Acuan spesifikasi AISC

Topik	Pasal spesifikasi	
	LRFD [1.15] 1986	ASD [1.5] 1989
Logam pengisi dan fluks untuk pengelasan	A3.5	A3.6
Luas bersih efektif	B3	B3
Kekuatan tarik desain	D1	D1
Umum	J1	J1
Kekuatan sambungan minimum	J1.5	J1.6
Sambungan las seimbang	J1.6	J1.9
Las	J2	J2
Las *groove*	J2.1	J2.1
Luas efektif	J2.1.a	J2.1.a
Pembatasan	J2.1.b	J2.1.b
Las *fillet*	J2.2	J2.2
Las efektif	J2.2.a	J2.2.a
Pembatasan	J2.2.b	J2.2.b
Las *plug* dan *slot*	J2.3	J2.3
Kekuatan desain	J2.4	J2.4

Penyelesaian:

(a) $t_e = 0.707a = 0.707(0.4375) = 0.309$ inch

(b) $t_e = 0.707a + 0.11 = 0.707(0.4375) + 0.11 = 0.419$ inch

Harga-harga ini sesuai dengan yang diberikan dalam **Tabel 5.14.2** (untuk SMAW) dan **5.14.3** (untuk SAW). ■

■ **Contoh 5.14.2**

Tentukan kekuatan geser desain ϕR_{nw} dari las *fillet* sebesar $^3/_8$ inch yang dihasilkan dari (*a*) *shielded metal arc welding*, dan (*b*) *submerged arc welding*. Asumsikan bahwa digunakan elektroda E70 yang memiliki kekuatan tarik minimum F_{EXX} sebesar 70 ksi, menurut Spesifikasi LRFD AISC.

Penyelesaian:

(a) Proses SMAW. $t_e = 0.707a = 0.707(0.375) = 0.265$ inch. Menurut **Persamaan 5.14.6**:

$$\phi R_{nw} = \phi t_e(0.60F_{EXX}) = 0.75(0.265)(0.60)70 = 8.35 \text{ kips/inch}$$

(b) Proses SAW. $t_e = a = 0.375$ inch

$$\phi R_{nw} = \phi t_e(0.60F_{EXX}) = 0.75(0.375)(0.60)70 = 11.81 \text{ kips/inch}$$

Harga-harga ini sesuai dengan yang ada pada **Tabel 5.14.2** dan **5.14.3**. ■

■ **Contoh 5.14.3**

Tentukan kekuatan geser desain ϕR_n untuk las *plug* berdiameter $^3/_4$ inch dengan material elektroda E70. Gunakan Spesifikasi LRFD AISC.

Penyelesaian:

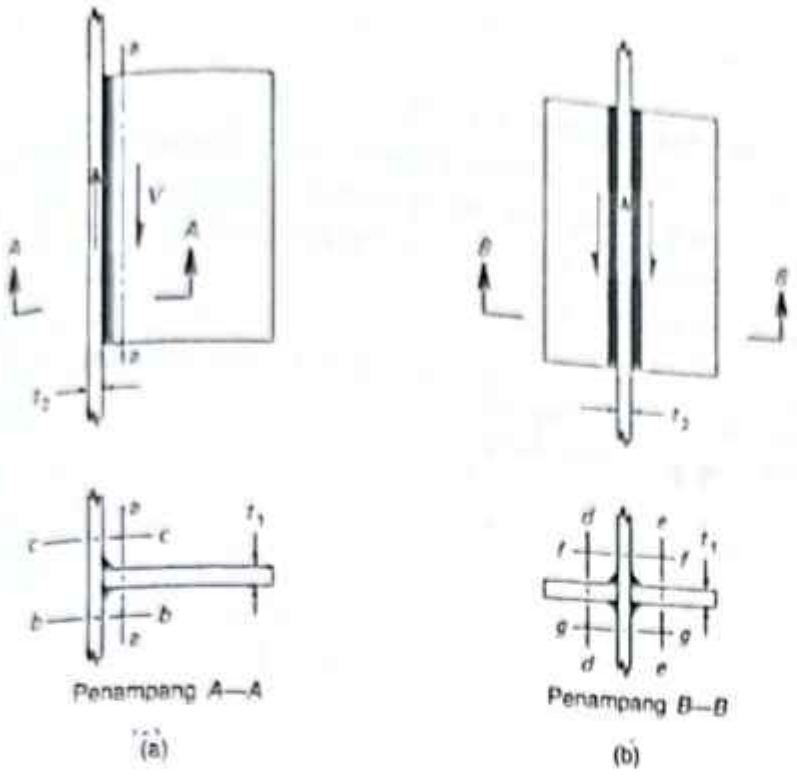
Dengan mengasumsikan bahwa diameter las D memenuhi pembatasan LRFD-J2.3b yang berkaitan dengan dimensi batang di mana las *plug* tersebut dibuat,

$$\phi R_n = 0.75(\text{luas bidang sambungan, } \tau D^2/4)(0.60F_{EXX})$$
$$= 0.75(0.4418)(0.60)70 = 13.9 \text{ kips}$$

5.14.3 Ukuran Las Fillet Efektif Maksimum

Dalam **Bagian 5.11**, telah diberikan pembatasan ukuran dan panjang maksimum dan minimum las *fillet* yang berkaitan dengan pertimbangan-pertimbangan desain praktis. Persyaratan-persyaratan tersebut berkaitan dengan ukuran sebenarnya. Meskipun demikian, untuk kekuatan, tak satu pun ukuran las yang didesain dengan kekuatan lebih besar daripada kekuatan material dasar di dekatnya.

Perhatikan dua baris las yang mentransmisikan geser V sepanjang potongan a—a pada **Gambar 5.14.1*a***. Kekuatan desain ϕR_{nw} las *fillet* diberikan oleh **Persamaan 5.14.6**. Kekuatan patah geser desain $\phi F_n A_{ns}$ untuk material dasar adalah $0.75(0.6F_u)$ (luas bersih pada material dasar yang terkena geser) menurut LRFD-J4. Dengan menyamakan kapasitas per inch logam las dengan kapasitas geser per inch material dasar untuk *shielded metal arc welding* akan diperoleh:



Gambar 5.14.1 Penampang kritik terhadap kemungkinan kelebihan tegangan pada material dasar

$$\phi R_{nw} \text{ (las)} = \phi R_n \text{ (logam dasar)}$$

$$2\phi a(0.707)(0.60F_{EXX}) = \phi(0.6F_u)t_1 \tag{5.14.8}$$

$$a_{\text{eff.maks}} = \frac{0.6F_u t_1}{2(0.707)0.60F_{EXX}} = 0.707\,\frac{F_u t_1}{F_{EXX}} \tag{5.14.9}$$

di mana t_1 = tebal material dasar
F_u = kekuatan tarik material dasar
F_{EXX} = kekuatan tarik material elektroda (70 ksi untuk elektoda E70)

Penampang *b–b* dan *c–c* tidak akan kritik karena dua baris las mentransfer beban melalui dua penampang, seperti terlihat dalam persamaan ukuran las efektif maksimum melalui penampang-penampang tersebut:

$$\phi a(0.707)(0.60F_{EXX}) = \phi(0.6F_u)t_2 \tag{5.14.10}$$

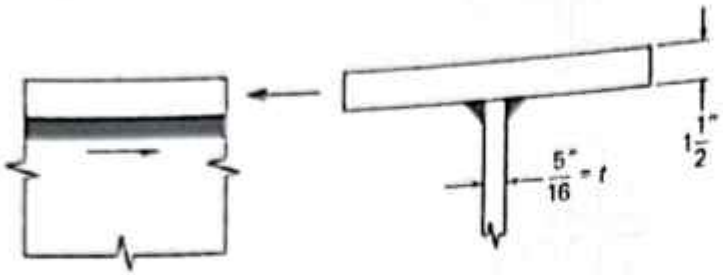
$$a_{\text{eff maks}} = 1.41\,\frac{F_u t_2}{F_{EXX}} \tag{5.14.11}$$

Dengan menganggap keempat las *fillet* pada **Gambar 5.14.1*b***, penampang *d—d* dan *e—e* sama dengan penampang *a—a*, akibatnya **Persamaan 5.14.9** akan berlaku. Pada penampang *f—f* dan *g—g*, empat las *fillet* mentransfer beban melalui dua penampang. Dengan demikian:

$$\phi 4a(0.707)(0.60F_{EXX}) = \phi 2(0.6F_u)t_2 \qquad (5.14.12)$$

dan sekali lagi hasilnya adalah **Persamaan 5.14.9**.

Bahkan bila las *fillet* menghubungkan batang-batang yang berada dalam tarik, transfer beban dengan las merupakan transfer geser untuk batang dasarnya, yakni bila las *fillet*-nya sejajar arah beban. Untuk kasus-kasus semacam ini, konsep ukuran las efektif maksimum tetap berlaku.



Gambar 5.14.2 *Contoh 5.14.4*

■ **Contoh 5.14.4**

Tentukan kekuatan geser desain ϕR_{nw} yang harus digunakan pada sambungan flens ke badan dalam **Gambar 5.14.2**. Pelat-pelatnya dari baja A36, sedang elektrodanya yang memiliki F_{EXX} = 70 ksi akan digunakan dengan (*a*) *shielded metal arc welding* (SMAW) dan (*b*) *submerged arc welding* (SAW).

Penyelesaian:

Ukuran las minimum = a_{min} = $^5/_{16}$ inch (LRFD-Tabel J2.5).

(a) Proses SMAW. Berlaku **Persamaan 5.14.9**:

$$a_{\text{eff. maks}} = 0.707\,\frac{F_u t_1}{F_{EXX}} = 0.707\,\frac{58t}{70} = 0.59t$$

$$= 0.59(0.3125) = 0.183 \text{ inch}$$

$$\phi R_{nw} = 0.75(0.183)(0.707)(0.60)(70) = 4.08 \text{ kips/inch}$$

atau untuk dua *fillet*, kekuatan desainnya adalah 2(4.08) = 9.16 kips/inch. Dengan demikian, meskipun harus ditempatkan suatu las *fillet* berukuran $^5/_{16}$ inch, kekuatannya dalam desain tidak boleh melampaui kekuatan dengan asumsi a = 0.183 inch.

(b) Proses SAW. Di sini dimensi leher efektif sama dengan ukuran las. Dengan menyamakan kekuatan las dengan kekuatan pelat akan diperoleh:

$$2a(0.60)70 = 0.60(58)t$$
$$a_{\text{eff. maks}} = 0.414t = 0.414(5/16) = 0.129 \text{ inch}$$
$$\phi R_{nw} = 0.75(0.129)(0.60)70 = 4.08 \text{ kips/inch}$$

atau, 9.16 kips/inch untuk dua *fillet*. Sekali lagi hasil yang sama diperoleh seperti dalam (*a*) karena 9.16 kips/inch merupakan kekuatan desain berdasarkan pada pelat badan berukuran $^5/_{16}$ inch yang lebih rendah dari kekuatan logam las.

5.15 Allowable Stress Design — Las

Filosofi umum *Allowable Stress Design* (ASD) telah dibahas dalam **Bagian 1.8** dan **1.9**. **Persamaan 1.8.8** memberikan persyaratan keamanan struktur sebagai berikut:

$$\frac{\phi R_n}{\gamma} \geq \Sigma Q_i \qquad [1.8.8]$$

Seperti yang telah dibicarakan sebelumnya dalam **Bagian 4.10** untuk baut, pembagian **Persamaan 1.8.8** dengan ketentuan keamanan γ/ϕ akan memberikan:

$$\left[\frac{R_n}{\gamma/\phi} = \frac{R_n}{\text{FS}} \right] \geq R \qquad [4.10.1]$$

Karena filosofi *allowable stress design* adalah menghitung "tegangan-tegangan" pada beban layanan, **Persamaan 4.10.1** dapat dibagi dengan luas "efektif" las per inch. Ruas-ruas persamaan tersebut bila dipertukarkan (mengubah pertidaksamaannya) akan memberikan:

$$\left[f = \frac{R}{t_e} \right] \leq \left[F = \text{Tegangan yang diijinkan} = \frac{R_n}{(\text{FS})t_e} \right] \qquad (5.15.1)$$

atau beban layanan R per inch las tidak boleh melampaui beban R_w yang *diijinkan* (*allowable*) per inch las. Ini dapat diwujudkan sebagai:

$$R \leq [\ R_w = \text{Tegangan ijin kali } t_e\ ] \qquad (5.15.2)$$

Tegangan-tegangan yang diijinkan untuk (1) geser pada luas efektif semua las dan (2) tegangan tarik yang tegak lurus terhadap sumbu pada luas efektif las *groove* penetrasi parsial adalah sama dengan 0.30 kali kekuatan tarik elektroda. Meskipun demikian, tegangan logam dasar yang berdekatan tidak boleh melampaui $0.60F_y$ untuk tarik atau $0.40F_y$ untuk geser. Rangkuman tegangan-tegangan yang diijinkan diberikan dalam **Tabel 5.15.1**, dan harga-harga R_w resistansi geser per inch untuk berbagai kekuatan elektroda masing-masing diberikan untuk SMAW dan SAW dalam **Tabel 5.15.2** dan **5.15.3**.

Pembatasan ukuran las maksimum dan minimum telah dibahas dalam **Bagian 5.11**, sedang luas efektif dibicarakan dalam **Bagian 5.12**.

Rangkuman umum ketentuan-ketentuan *Allowable Stress Design* AISC yang berkaitan dengan las dapat dijumpai dalam **Tabel 5.14.4**.

Tabel 5.15.1 Tegangan-tegangan yang diijinkan pada luas efektif las
(Digunakan dengan ijin AISC)

Tipe las dan tegangan[a]	Tegangan ijin	Tingkat kekuatan las yang disyaratkan[b,c]
Las *groove* penetrasi penuh		
Tarik tegak lurus terhadap luas efektif	Sama dengan material dasar	Logam las dengan tingkat kekuatan yang sama atau kurang dari logam las "pasangan" boleh digunakan
Tekan tegak lurus terhadap luas efektif	Sama dengan material dasar	
Geser pada luas efektif	0.30 × kekuatan tarik nominal dari logam las (ksi)	
Las *groove* penetrasi parsial[d]		
Tekan tegak lurus terhadap luas efektif	Sama dengan material dasar	Logam las dengan tingkat kekuatan yang sama atau kurang dari logam las "pasangan" boleh digunakan
Tarik atau tekan sejajar dengan sumbu las	Sama dengan material dasa	
Geser sejajar dengan sumbu las	0.30 × kekuatan tarik nominal dari logam las (ksi)	
Tarik tegak lurus terhadap luas efektif	0.30 × kekuatan tarik nominal dari logam las (ksi), kecuali tegangan tarik pada logam dasar, tidak boleh melampaui 0.60 kali tegangan leleh logam dasarnya	
Las *fillet*		
Geser pada luas efektif	0.30 × kekuatan tarik nominal dari logam las (ksi)	Logam las dengan tingkat kekuatan yang sama atau kurang dari logam las "pasangan" boleh digunakan
Tarik atau tekan sejajar dengan sumbu las[e]	Sama dengan material dasa	
Las *plug* dan *slot*		
Geser sejajar dengan bidang sambungan (pada luas efektif)	0.30 × kekuatan tarik nominal dari logam las (ksi)	Logam las dengan tingkat kekuatan yang sama atau kurang dari logam las "pasangan" boleh digunakan

[a]Untuk definisi luas efektif, *lihat* ASD-J2.

[b]Untuk logam las "pasangan", *lihat* **Tabel 4.1.1**, AWS D1.1[2.24]

[c]Logam las dengan satu tingkat lebih kuat daripada logam las "pasangan" boleh digunakan.

[d]*Lihat* ASD-J2.1.b untuk pembatasan mengenai penggunaan sambungan las *groove* penetrasi parsial.

[e]Las *fillet* dan las *groove* penetrasi parsial yang menyambungkan elemen-elemen komponen profil *built-up*, seperti sambungan flens ke pelat badan, dapat didesain tanpa memperhitungkan tegangan tarik atau tekan pada elemen-elemen yang sejajar dengan sumbu las.

Tabel 5.15.2 Resistansi ijin R_w las *fillet*, kips/inch (*Shielded Metal Arc Welding*)

Ukuran nominal (inch)	Leher efektif (ASDJ2.2.A) (inch)	Kekuatan tarik minimum las (ksi)					
		60	70	80	90	100	110
1/8	0.088	1.59	1.86	2.12	2.39	2.69	2.92
3/16	0.132	2.38	2.78	3.18	3.58	3.97	4.37
1/4	0.177	3.18	3.71	4.24	4.77	5.30	5.83
5/16	0.221	3.98	4.64	5.30	5.96	6.63	7.30
3/8	0.265	4.77	5.57	6.36	7.16	7.95	8.75
7/16	0.309	5.57	6.49	7.42	8.35	9.28	10.21
1/2	0.353	6.36	7.42	8.48	9.54	10.60	11.66
9/16	0.398	7.16	8.35	9.54	10.74	11.93	13.12
5/8	0.442	7.95	9.28	10.61	11.93	13.26	14.58
11/16	0.486	8.75	10.21	11.67	13.12	14.58	16.04
3/4	0.530	9.54	11.13	12.72	14.31	15.91	17.50

Contoh 5.15.1

Tentukan resistansi geser ijin untuk las *fillet* berukuran $^3/_8$ inch yang dihasilkan dengan (*a*) *shielded metal arc process* dan (*b*) *submerged arc process*. Asumsikan penggunaan elektroda E70 yang memiliki kekuatan tarik minimum F_{EXX} sebesar 70 ksi, dan gunakan *Allowable Stress Design*.

Penyelesaian:

(a) Proses SMAW. $t_e = 0.707a = 0.707(0.375) = 0.265$ inch.

$$R_w = t_e\,(0.30F_{EXX}) = 0.265(0.3)70 = 0.265(21) = 5.57 \text{ kips/inch}$$

(b) Proses SAW. $t_e = a = 0.375$ inch.

$$R_w = t_e(0.30F_{EXX}) = 0.375(21.0) = 7.87 \text{ kips/inch}$$

Tabel 5.15.3 Resistansi yang diijinkan R_w las *fillet*, kips/inch (*Submerged Arc Welding*)

Ukuran nominal (inch)	Leher efektif (ASDJ2.2.A) (inch)	Kekuatan tarik minimum las (ksi)					
		60	70	80	90	100	110
1/8	0.125	2.25	2.62	3.00	3.37	3.75	4.12
3/16	0.187	3.37	3.94	4.50	5.06	5.62	6.19
1/4	0.250	4.50	5.25	6.00	6.75	7.50	8.25
5/16	0.312	5.62	6.56	7.50	8.44	9.37	10.31
3/8	0.375	6.75	7.87	9.00	10.12	11.25	12.37
7/16	0.419	7.55	8.80	10.06	11.32	12.58	13.84
1/2	0.463	8.34	9.73	11.12	12.51	13.90	15.30
9/16	0.508	9.14	10.66	12.18	13.71	15.23	16.75
5/8	0.552	9.93	11.59	13.25	14.90	16.56	18.21
11/16	0.596	10.73	12.52	14.31	16.09	17.88	19.67
3/4	0.640	11.52	13.44	15.36	17.28	19.21	21.13

Harga-harga ini dapat diperiksa dengan mengacu pada **Tabel 5.15.2** dan **5.15.3**

Kita dapat menentukan ketentuan keamanan nominal (γ/ϕ) dengan membandingkan kekuatan desain ϕR_{nw} dalam *Loadand Resistence Factor Design* (**Bagian 5.14**) dengan beban ijin R_w. Dengan menggunakan harga-harga yang dihitung dalam **contoh 5.14.2** dan **5.15.1** untuk las *fillet* berukuran $^3/_8$ inch dengan proses SMAW dan elektroda:

$$\phi R_{nw} = 8.35 \text{ kips/inch kekuatan desain LRFD}$$

$$R_{nw} = 5.57 \text{ kips/inch Beban ijin ASD}$$

Dari **Persamaan 5.15.1** dan dengan 0.75 sebagai faktor ϕ

$$\text{FS} = \frac{R_{nw}}{R_w} = \frac{8.35}{0.75(5.57)} = 2.00$$

Dengan demikian, kekuatan nominal R_{nw} yang digunakan dalam LRFD adalah dua kali beban ijin R_w yang digunakan dalam ASD. Demikian pula, beban layanan yang diijinkan diperoleh dengan memberi kekuatan tersebut dengan suatu faktor yang dikehendaki; untuk sambungan, biasanya digunakan 2.0. Setelah beban layanan yang aman ditentukan, beban tersebut dapat dibagi dengan suatu sifat penampang lintang elastik, seperti luas, untuk mendapatkan tegangan yang diijinkan.

5.16 Las yang Menghubungkan Batang-batang yang Terkena Beban Aksial Langsung

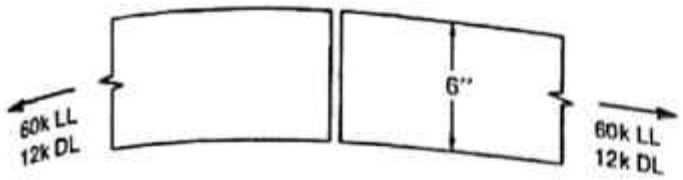
Pada desain las yang menghubungkan batang tarik dan tekan, tugas utama adalah menjamin bahwa las tersebut paling tidak sekuat batang-batang yang dihubungkan dan bahwa sambungan tersebut tidak menimbulkan eksentrisitas pembebanan yang besar.

5.16.1 Las Groove

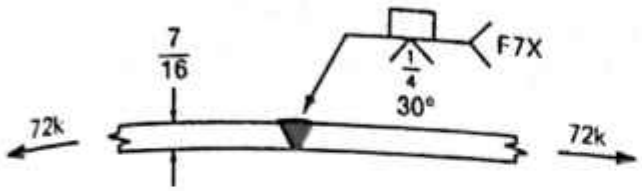
Dalam hal las *groove* penetrasi penuh seperti **Gambar 5.5.2**, kekuatan penuh penampang lintang dapat dicapai dengan memilih material elektroda yang tepat sesuai dengan material dasarnya seperti ditunjukkan dalam **Tabel 5.13.1**, dan menetapkan sambungan menurut prakualifikasi AWS.

■ **Contoh 5.16.1**

Untuk pelat tarik (**Gambar 5.16.1**) yang memikul beban layanan aksial sebesar 60 kips beban hidup dan 12 kips beban mati, pilihlah tebal pelat yang dibu-



Gambar 5.16.1 Contoh 5.16.1



Gambar 5.16.2 Sketsa desain untuk Contoh 5.16.1

tuhkan (baja A572 Mutu 50), material elektroda yang tepat, dan tetapkan sambungan prakualifikasi AWS-nya. Gunakan *Load and Resistance Factor Design.*

Penyelesaian:

(*a*) Hitunglah beban terfaktor yang harus dipikul:

$$T_u = 1.2(12) + 1.6(60) = 110.4 \text{ kips}$$

(*b*) Hitung ketebalan pelat yang dibutuhkan:

$$\phi T_n = \phi F_y A_g = 0.90(50)A_g \quad \text{(keadaan batas leleh)}$$

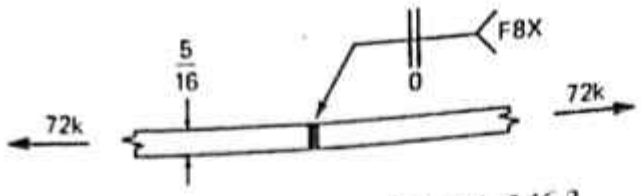
$$\phi T_n = \phi F_u A_e = 0.75(65)A_e \quad \text{(keadaan batas patah)}$$

Karena tidak ada lobang dan tidak ada eksentrisitas pembebanan, luas efektif bersih A_e sama dengan luas kotor A_g. Dengan demikian, dari kedua persamaan di atas dapat terlihat bahwa $0.90(50) < 0.75(65)$; dari sebab itu:

$$A_g \text{ yang dibutuhkan} = \frac{T_u}{0.90(50)} = \frac{110.4}{45} = 2.45 \text{ inch}^2$$

$$t \text{ yang dibutuhkan} = \frac{2.45}{6} \quad 0.41 \text{ inch.} \quad \underline{\textit{Gunakan} \text{ pelat } {}^{7}/_{16} \times 6.}$$

(*c*) Pilih elektroda dan sambungan yang telah diprakualifikasi AWS. Dari **Tabel 5.13.1**, gunakan kombinasi elektroda fluks F7X-EXXX (F_{EXX} = 70 ksi). Dengan mengacu pada Manual LRFD AISC [1.17] pasal "WELDED JOINTS" atau AWS [2.25] Tabel 2.9.1, pilihlah las *groove* V tunggal yang telah diprakualifikasi untuk B-L2a-S. Penamaan B menunjuk pada sambungan *butt joint*, L menunjuk pada ketebalan terbatas untuk las ini (dalam kasus ini maksimum 2 inch), dan S



Gambar 5.16.3 Sketsa desain untuk Contoh 5.16.2

menunjuk pada *submerged arc welding*. Las tersebut mensyaratkan bahwa perlu digunakan suatu pelat penopang. Detail dan simbol-simbol las ditunjukkan dalam **Gambar 5.16.2**. ∎

■ **Contoh 5.16.2**

Ulangi **Contoh 5.16.1**, kecuali gunakan 5 pelat A572, las *groove* bujur sangkar dan *submerged arc welding* (SAW)

Penyelesaian:

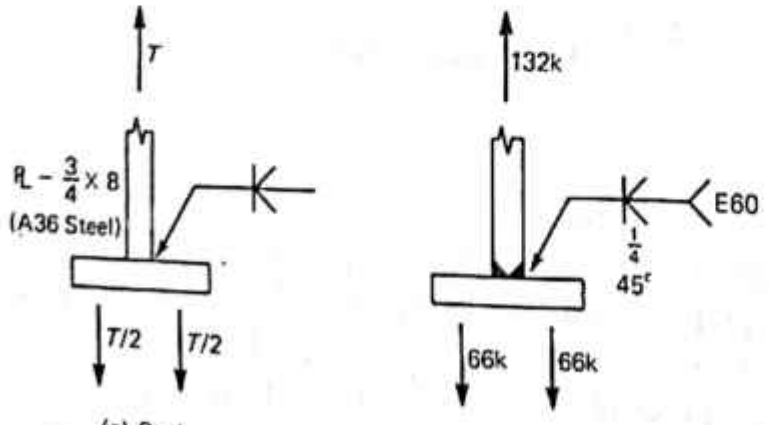
(*a*) Tentukan ketebalan pelat yang dibutuhkan:

$$A_g \text{ yang dibutuhkan} = \frac{T_u}{0.90(65)} = \frac{110.4}{58.5} = 1.89 \text{ inch}^2$$

$$t \text{ yang dibutuhkan} = \frac{1.89}{6} = 0.31 \text{ inch} \quad \underline{\textit{Gunakan} \text{ pelat } {}^{5}/_{16} \times 6}$$

(*b*) Pilihlah elektroda dan tetapkan sambungan yang telah diprakualifikasi. Dari **Tabel 5.13.1**, gunakan kombinasi elektroda fluks F8X-EXXX. Dari Manual LRFD [1.17] atau AWS [2.25] Tabel 2.9.1, pilihlah las *groove* bujur sangkar yang diberi nama B-L1-S (Manual LRFD p. 5-181) seperti ditunjukkan dalam **Gambar 5.16.3**. Las ini memiliki alur bukaan nol dan diprakualifikasikan untuk material yang tidak lebih tebal dari $^{3}/_{8}$ inch. ∎

Perhatikan: Dalam **Contoh 5.16.1** dan **5.16.2** kita tidak perlu menyertakan ukuran atau panjang las karena pada contoh-contoh tersebut las akan dibuat dengan penetrasi penuh dan selebar pelatnya, kecuali bila dinyatakan lain.



Gambar 5.16.4 Contoh 5.16.2

Contoh 5.16.3

Tentukan kapasitas beban layanan, dengan asumsi 70% berupa beban hidup, dengan sambungan **T** seperti dalam **Gambar 5.16.4**, dan buatlah detail las *groove* serongan ganda yang tepat untuk proses SMAW. Asumsikan bahwa flens **T** itu tidak menentukan desain. Gunakan *Load and Resistance Factor Design.*

Penyelesaian:

(*a*) Tentukan kekuatan pelat $^3/_4 \times 8$:

$$\phi T_n = \phi F_y A_g = 0.90(36)(^3/_4)8 = 194.4 \text{ kips}$$

$$T_u = 1.2T_D + 1.6T_L = 1.2(0.2T) + 1.6(0.8T) = 1.512T$$

$$\phi T_n = T_u.$$

$$T = \frac{194.4}{1.52} = 128 \text{ kips}$$

Gaya tarik beban layanan yang diijinkan oleh LRFD adalah 128 kips.

(*b*) Pilihlah material elektroda dan pilihlah sambungan AWS yang tepat. Dari **Tabel 5.13.1**, gunakan elektroda E60. Dari Manual LRFD [1.17, p. 5-187] atau AWS [2.25] Tabel 2.9.1, pilihlah sambungan *groove* serongan ganda yang diberi nama TC-U5a.

Perhatikan: Dengan pertimbangan kekuatan saja, selain las *groove* serongan ganda yang telah dispesifikasikan, dapat digunakan serongan tunggal $^3/_4$ inch (TC-U4b). Meskipun demikian, mengelas batang **T** hanya dari satu sisi saja dapat menyebabkan pelengkungan (*warping*) yang besar dan menimbulkan eksentrisitas pada sambungan tersebut.

5.16.2 Las Fillet

Las *fillet* direncanakan berdasarkan atas tegangan geser nominal pada bidang efektifnya seperti yang dibicarakan dalam **Bagian 5.12**. Pemilihan ukuran las *fillet* didasarkan atas ketebalan bagian-bagian yang akan disambungkan dan panjang yang tersedia bagi pembuatan las tersebut. Faktor-faktor lain seperti tipe peralatan las yang digunakan, apakah las akan dibuat di bengkel atau di lapangan, dan ukuran las-las lain yang sedang dibuat, juga mempengaruhi ukuran las *fillet*. Las *fillet* yang besar membutuhkan elektroda dengan diameter yang lebih besar, dan ini berarti pula membutuhkan peralatan las yang lebih besar yang tidak sesuai bila digunakan di lapangan. Ukuran las *fillet* yang paling ekonomis biasanya adalah yang dibuat dalam satu lintasan (*pass*); sekitar $^5/_{16}$ inch untuk SMAW dan $^1/_2$ untuk SAW. Demikian pula, bila digunakan suatu ukuran las *fillet* tertentu pada daerah-daerah yang berdekatan dengan sambungan yang sedang diperhitungkan, dianjurkan untuk menggunakan ukuran yang sama, karena de-

ngan demikian dapat digunakan elektroda dan peralatan las yang sama, dan pengelas tidak perlu mengubah prosedurnya untuk mengakomodasi las yang lebih besar atau lebih kecil. Selain itu, pengawasan atas las dapat lebih disederhanakan.

■ **Contoh 5.16.4**

Tentukan ukuran dan panjang las *fillet* untuk sambungan lewatan (*lap joint*) seperti dalam **Gambar 5.16.5** dengan proses SAW, bila pelat yang digunakan dari baja A36. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC.

Penyelesaian:

Mengacu pada **Bagian 5.11**, LRFD-J2.2.b memberikan batas-batas berikut ini:

$$\text{Ukuran maksimum} = {}^5/_8 - {}^1/_{16} = {}^9/_{16} \text{ inch}$$
$$\text{Ukuran minimum} = {}^1/_4 \text{ inch}$$

Gunakan las *fillet* $^1/_2$ inch, karena harga inilah yang mendekati ukuran maksimum yang dapat dibuat dalam sekali lintasan dengan proses SAW.

Karena las *fillet* tersebut melampaui $^3/_8$ inch, LRFD-J2.2.a menyatakan bahwa leher efektif t_e sama dengan leher teoretik ($0.707a$) ditambah 0.11 inch:

$$t_e = 0.707(0.50) + 0.11 = 0.464 \text{ inch}$$

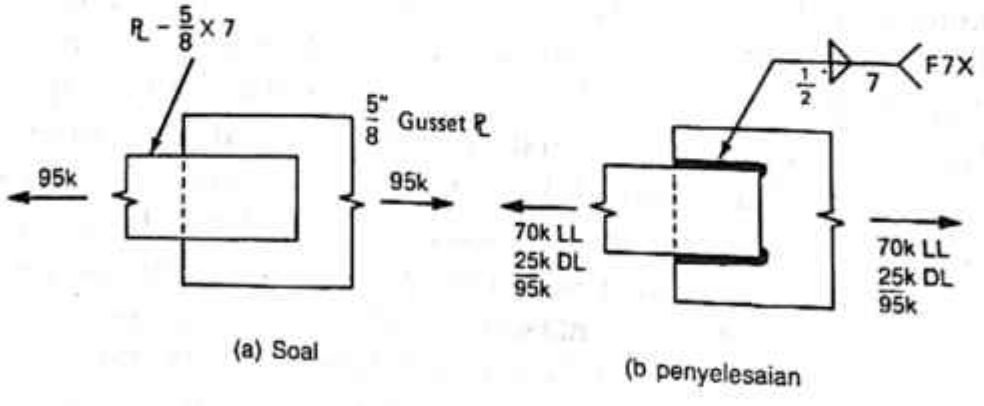
Dari **Tabel 5.13.1**, gunakan kombinasi elektroda fluks F7X-EXXX.

Kekuatan desain las *fillet* $^1/_2$ inch per inch panjang, menurut **Persamaan 5.14.6**, adalah:

$$\phi R_{nw} = \phi t_e(0.60F_{EXX}) = 0.75(0.464)42 = 14.6 \text{ kips/inch}$$

Karena kapasitas las tidak boleh melebihi kekuatan patah geser pelat, menurut **Persamaan 5.14.7**:

$$\phi R_{nw}\text{maks} = \phi t(0.60F_u) = 0.75(0.625)(0.60)58 = 16.3 \text{ kips/inch}$$



Gambar 5.16.5 *Contoh 5.16.4*

Kekuatan las menentukan.

Beban tarik terfaktor yang harus dipikul adalah:

$$T_u = 1.2(25) + 1.6(70) \text{ kips}$$

Panjang total L_w dari las *fillet* yang dibutuhkan adalah:

$$L_w = \frac{142}{14.6} = 9.7 \text{ inch}$$

Untuk memenuhi persyaratan kekuatan, hanya dibutuhkan las *fillet* berukuran 5 inch pada setiap sisi. Meskipun demikian, untuk menghindari terjadinya ketidakseragaman pembebanan yang berlebihan (yakni terjadinya *shear lag*, **Bagian 3.5**) pada pelat, LRFD-J2.2.b mensyaratkan "Bila las *fillet* longitudinal digunakan sendirian pada sambungan-sambungan ujung atau batang-batang tarik datar, panjang masing-masing las *fillet* tidak boleh kurang dari jarak tegak lurus antar las". Dalam kenyataan, jarak transversal antar las *fillet* longitudinal tidak boleh melebihi 8 inch, kecuali ketentuan luas efektif LRFD-B3 berlaku.

Dalam contoh ini, gunakan las *fillet* $^1/_2$ inch, 7 inch pada masing-masing sisi seperti terlihat dalam **Gambar 5.16.5*b***.

■ Contoh 5.16.5

Ulangi **Contoh 5.16.4** dengan las *fillet* $^1/_4$ inch.

Penyelesaian:

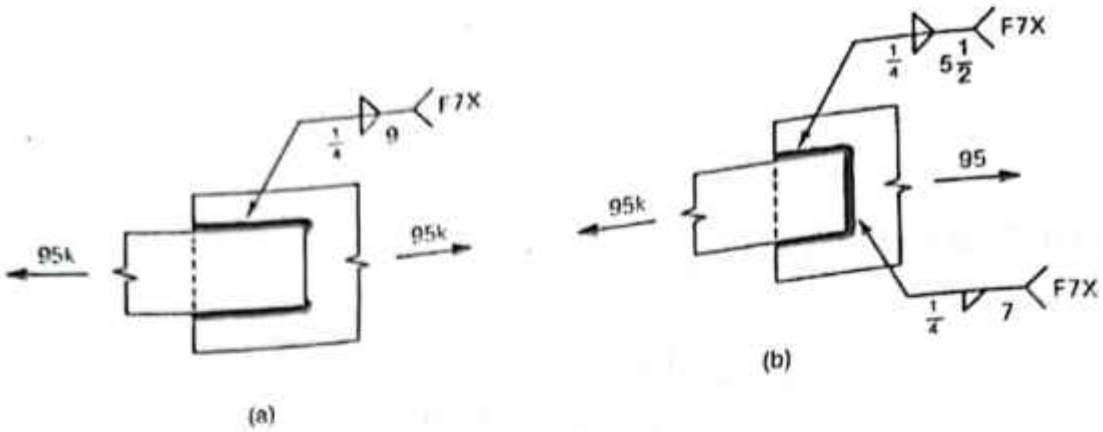
Karena ukuran nominalnya kurang dari $^3/_8$ inch, leher efektif t_e merupakan dimensi sisi penuh bila menggunakan *submerged arc welding*.

$$\phi R_{nw} = \phi t_e \, (0.60F_{EXX}) = 0.75(0.25)42 = 7.87 \text{ kips/inch}$$

yang berada di bawah kekuatan patah geser pelat sebesar 16.3 kips/inch. Panjang total L_w dari las *fillet* yang dibutuhkan adalah:

$$L_w = \frac{142}{7.87} = 18.0 \text{ inch}$$

Kedua kemungkinan penyelesaian diperlihatkan dalam **Gambar 5.16.6**, yang masing-masing memberikan las *fillet* berukuran $^1/_4$ inch sepanjang 9 inch. Penyelesaian dalam **Gambar 5.16.6*b*** lebih disukai karena lebih kompak dan dapat mengurangi panjang total sambungan tersebut; maka dari itu distribusi tegangannya lebih baik. ■



Gambar 5.16.6 Penyelesaian untuk Contoh 5.16.5

5.16.3 Sambungan Seimbang

Dalam sejumlah kasus, batang-batang yang mengalami tegangan aksial langsung merupakan batang-batang yang tidak simetris dan ini menimbulkan eksentrisitas pada sambungan las. Perhatikan batang tarik siku pada **Gambar 5.16.7** yang dilas seperti yang ditunjukkan. Gaya T yang diterapkan pada jarak tertentu dari sambungan akan bekerja di sepanjang sentroid batang seperti yang terlihat. Gaya T akan dilawan oleh gaya-gaya F_1, F_2, dan F_3 yang terjadi di sepanjang alur las. Gaya-gaya F_1 dan F_3 diasumsikan bekerja pada pinggir siku tersebut, walaupun sebenarnya bekerja di pusat leher efektif. Gaya F_2 akan bekerja pada sentroid las yang terletak pada $d/2$. Dengan mengambil momen-momen di sekitar A yang terletak pada pinggir bawah batang tersebut, dan dengan menganggap momen positif yang berputar searah jarum jam:

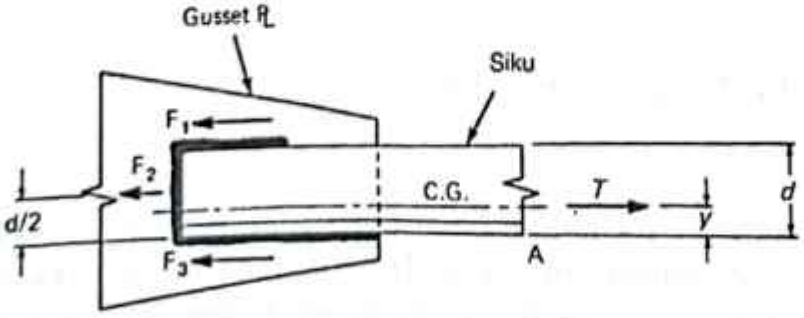
$$\Sigma M_A = -F_1 d - F_2 d/2 + Ty = 0 \tag{5.16.1}$$

atau:

$$F_1 = \frac{Ty}{d} - \frac{F_2}{2} \tag{5.16.2}$$

Gaya F_2 sama dengan resistansi R_w las per inch kali panjang las L_w:

$$F_2 = R_w L_{w2} \tag{5.16.3}$$



Gambar 5.16.7 Las seimbang pada sambungan batang tarik.

Keseimbangan gaya-gaya horisontal memberikan:

$$\Sigma F_H = T - F_1 - F_2 - F_3 = 0 \tag{5.16.4}$$

Bila **Persamaan 5.16.1** dan **5.16.4** diselesaikan bersama-sama akan diperoleh:

$$F_3 = T\left(1 - \frac{y}{d}\right) - \frac{F_2}{2} \tag{5.16.5}$$

Mendesain sambungan dalam **Gambar 5.16.7** untuk mengeliminasi eksentrisitas akibat las tak simetrik disebut *menyeimbangkan las*. Prosedur penyeimbangan las dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Setelah memilih ukuran las dan elektroda yang tepat, hitunglah gaya yang ditahan oleh las ujung F_2 (bila ada) dengan **Persamaan 5.16.3**.
2. Hitunglah F_1 dengan **Persamaan 5.16.2**
3. hitunglah F_3 dengan **Persamaan 5.16.5** atau

$$F_3 = T - F_1 - F_2 \tag{5.16.6}$$

4. Hitunglah panjang L_{w1} dan L_{w3} atas dasar:

$$L_{w1} = \frac{F_1}{R_w} \tag{5.16.7a}$$

dan:

$$L_{w3} = \frac{F_3}{R_w} \tag{5.16.7b}$$

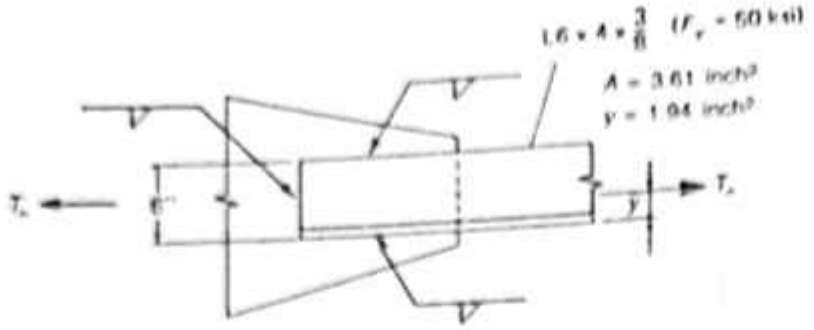
Alternatif untuk cara di atas adalah dengan menghitung panjang total las L_w yang dibutuhkan untuk memikul beban, mengurangi panjang pada bagian ujung, dan mengalokasikan sisa panjang yang dibutuhkan dalam proporsi terbalik F_1 dan F_3 menurut jarak terhadap titik berat.

Perhatikan bahwa las yang mendekati seimbang "sangat dikehendaki"; meskipun demikian, LRFD-J1.6 *tidak* menyaratkannya untuk "...sambungan ujung dari batang siku tunggal, siku ganda, atau yang serupa, yang mendapat pembebanan statik".

Pembahasan sejauh ini mengenai las seimbang berlaku untuk *Load and Resistance Factor Design* dan *Allowable Stress Design*. Beban layanan T pada ASD akan menjadi beban terfaktor T_u dalam LRFD; resistansi ijin R_w dalam ASD akan menjadi kekuatan desain ϕR_{nw} dalam LRFD.

■ Contoh 5.16.6

Desainlah las *fillet* agar didapatkan kekuatan penuh pada siku dalam **Gambar**



Gambar 5.16.8 Contoh 5.16.6

5.16.8 dengan meminimumkan efek eksentrisitas. Asumsikan bahwa pelat buhul tidak menentukan dan bahwa digunakan proses SMAW. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC.

Penyelesaian:

(*a*) Hitunglah kekuatan batang tersebut. Dari **Tabel 3.5.1**, luas bersih efektif A_e adalah:

$$A_e = UA_g = 0.85A_g = 0.85(3.61) = 3.07 \text{ inch}^2$$

Dari LRFD-B3 kategori *b*, hal ini mengikuti LRFD Persamaan (B3-2).

Sedangkan kekuatan desain batang siku adalah nilai terkecil dari yang berikut ini:

$$\phi T_n = 0.90F_yA_g = 0.90(50)3.61 = 162 \text{ kips}$$

$$\phi T_n = 0.75F_uA_e = 0.75(65)3.07 = 150 \text{ kips (kontrol)}$$

(*b*) Pilih ukuran las dan hitunglah kekuatannya.

Las *fillet* ukuran minimum = $^3/_{16}$ inch (**Tabel 5.11.1**)
Las *fillet* ukuran maksimum = $^3/_8 - ^1/_{16} = ^5/_{16}$ inch (**Gambar 5.11.2**

Gunakan las *fillet* $^3/_{16}$ inch dengan elektroda E70. Kekuatan desain ϕR_{nw} adalah:

$$\phi R_{nw} = \phi t_e(0.60F_{EXX}) = 0.75(^3/_{16})(0.707)42 = 4.18 \text{ kips/inch}$$

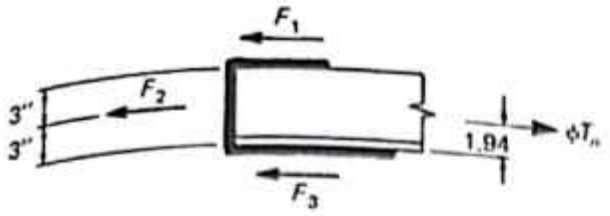
di mana yang tidak dapat melebihi kekuatan patah·geser siku dari logam dasar

$$\phi R_{nw}\text{Maks} = \phi t(0.60F_u) = 0.75(0.375)(0.60)65 = 11.0 \text{ kips/inch}$$

Las menentukan.

(*c*) Tentukan panjang las yang harus digunakan untuk sambungan tersebut. Dengan mengacu pada **Gambar 5.16,9**:

$$F_2 = \phi R_{nw}L_w = 4.18(6) = 25.1 \text{ kips}$$



Gambar 5.16.9 Penyeimbangan las untuk **Contoh 5.16.6**

Untuk keseimbangan momen di sekitar punggung siku (pada F_3):

$$F_1 = \frac{150(1.94) - 25.1(3)}{6} = 36.0 \text{ kips}$$

Penjumlahan gaya-gaya memberikan:

$$F_3 = T_u - F_1 - F_2 = 150 - 36.0 - 25.1 = 88.9 \text{ kips}$$

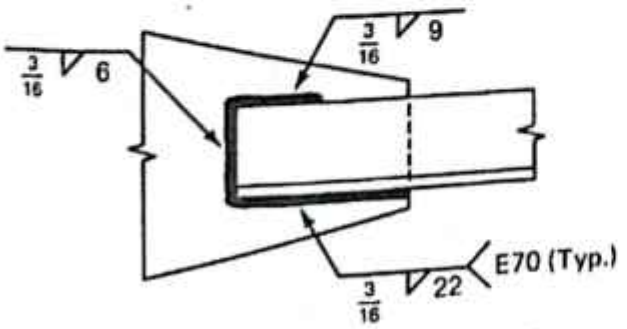
$$L_{w1} = \frac{F_1}{\phi R_{nw}} = \frac{36.0}{4.18} = 8.6 \text{ inch} \qquad \underline{\textit{Gunakan } 9 \text{ inch}}$$

$$L_{w3} = \frac{F_3}{\phi R_{nw}} = \frac{88.9}{4.18} = 21.2 \text{ inch} \qquad \underline{\textit{Gunakan } 22 \text{ inch}}$$

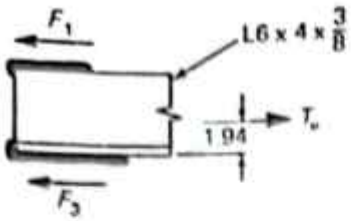
Gunakan las seperti **Gambar 5.16.10**, meskipun untuk penghematan yang lebih baik, lebih disukai ukuran las terbesar yang dapat ditempatkan dalam satu lintasan, dan ini sekaligus akan mereduksi panjangnya. ■

■ Contoh 5.16.7

Ulangi **Contoh 5.16.6** bila las pada ujung siku dihilangkan, dan sebagai ganti SMAW digunakan proses SAW.



Gambar 5.16.10 Penyelesaian untuk **Contoh 5.16.6**



Gambar 5.16.11 *Gaya-gaya yang bekerja pada* ***Contoh 5.16.7***

Penyelesaian:

Kali ini cobalah $^5/_{16}$ inch yang lebih ekonomik dan toh masih dapat ditempatkan dalam satu lintasan. Gunakan gaya-gaya pada **Gambar 5.16.11**.

$$F_1 = \frac{150(1.94)}{6} = 48.5 \text{ kips}$$

$$F_3 = T_u - F_1 - F_2 = 150 - 48.5 = 101.5 \text{ kips}$$

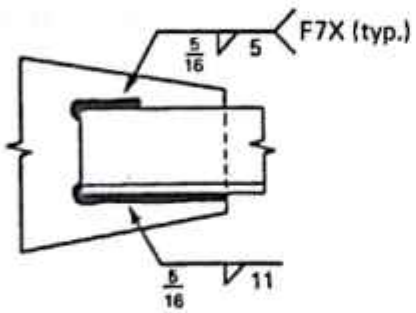
$$\phi R_{nw} = \phi t_e(0.60F_{EXX}) = 0.75(^5/_6)42 = 9.84 \text{ kips/inch}$$

yang lebih kecil daripada kekuatan patah geser siku tersebut (11.0 kips/inch); maka dari itu las akan menentukan:

$$L_{w1} = \frac{F_1}{\phi R_{nw}} = \frac{48.5}{9.84} = 4.9 \text{ inch} \qquad \textit{Gunakan } 5 \text{ inch}$$

$$L_{w3} = \frac{F_3}{\phi R_{nw}} = \frac{101.5}{9.84} = 10.3 \text{ inch} \qquad \textit{Gunakan } 11 \text{ inch}$$

Gunakan las seperti yang dirangkum dalam **Gambar 5.16.2**. ∎



Gambar 5.16.12 *Penyelesaian untuk* ***Contoh 5.16.7***

5.16.4 Las Slot dan Plug

Kekuatan las *slot* dan *plug* didasarkan atas luas bidang geser di antara pelat-pelat yang disambungkan. Seperti ditunjukkan dalam **Bagian 5.5**, las-las tersebut terut

ma digunakan pada sambungan lewatan (*lap joint*). Kadangkala, las *plug* digunakan untuk mengisi lobang-lobang pada sambungan seperti penyiku kolom ke balok di mana baut-baut sementara dipasang untuk mengepaskan batang-batang sebelum dilas. Kekuatan las sedemikian dapat diikutkan atau tidak diikutkan dalam kekuatan desain sambungan. Berlaku sebuah aturan, las *slot* dan *plug* didesain untuk bekerja bersama-sama dengan las lain, biasanya las *fillet* pada sambungan lewatan seperti **Gambar 5.5.5**.

■ Contoh 5.16.8

Tentukan beban layanan T yang diijinkan pada sambungan dalam **Gambar 5.16.13** bila intensitas beban hidup 80% dan beban mati 20%. Digunakan baja A36 dan *Load and Resistance Factor Design.*

Penyelesaian:

Kekuatan desain ϕR_{nw} per inch yang diberikan oleh las *fillet* adalah:

$$\phi R_{nw} = \phi t_e(0.60F_{EXX})$$

$$= 0.75[0.5(0.707)+0.11)]42 = 14.6 \text{ kips/inch}$$

namun tidak melampaui kekuatan patah geser pelat:

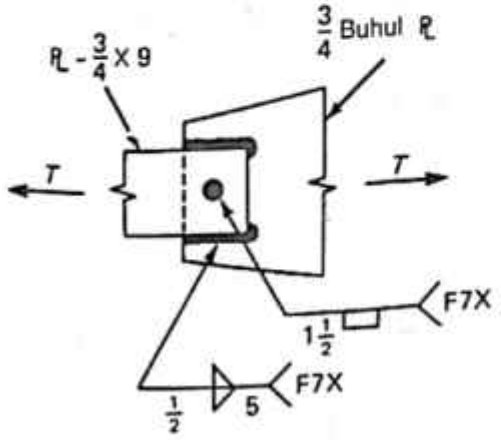
$$\phi R_{nw} \text{ maks} = \phi t(0.60F_u) = 0.75(0,75)(0.60)58 = 19.6 \text{ kips/inch}$$

Kekuatan yang diberikan oleh las *fillet*-nya adalah:

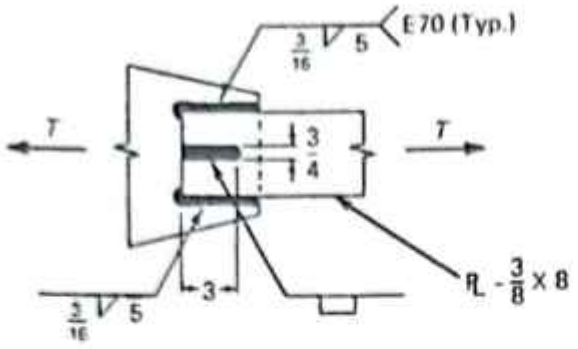
$$T_1 = L_u(\phi R_{nw}) = 10(14.6) = 146 \text{ kips}$$

Kekuatan desain ϕR_n yang diberikan oleh las *plug* berdiameter $1^1/_2$ inch adalah:

$$T_2 = \phi R_n = 0.75 \frac{\pi(1.5)^2}{4}(0.60)70 = 74 \text{ kips}$$



Gambar 5.16.13 Contoh 5.16.8



Gambar 5.16.14 Contoh 5.16.9

Beban terfaktor total dapat disamakan dengan kekuatan desain total:

$$T_u = T_1 + T_2 = 146 + 74 = 220 \text{ kips}$$

Cek kapasitas tarik pelat:

$$\phi T_n = 0.90 F_y A_g = 0.90(36)(9)0.75 = 219 \text{ kips (kontrol)}$$

$$\phi T_n = 0.75 F_u A_e = 0.75(58)(9)0.75 = 294 \text{ kips}$$

yang membuat kapasitas beban layanan T:

$$219 = 1.2(0.2T) + 1.6(0.8T) = 1.52T$$
$$T = 144 \text{ kips}$$

■

■ **Contoh 5.16.9**

Hitunglah kapasitas beban layanan sambungan pada **Gambar 5.16.14** bila digunakan baja A573 dan las dengan proses SMAW. Asumsikan beban hidupnya 83% sedang beban mati 17%. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC.

Penyelesaian:

Dari **Tabel 5.14.2**, las *fillet* E70 berukuran $^3/_{16}$ inch memberikan $\phi R_{nw} = 4.18$ kips/inch. Resistansi T_1 yang diberikan oleh las *fillet* tersebut adalah:

$$T_1 = L_w(\phi R_{nw}) = 2(5)(4.18) = 41.8 \text{ kips}$$

Resistansi T_2 yang diberikan oleh las *slot* selebar $^3/_4$ inch adalah:

$$\text{Luas bidang sambungan} = \frac{\pi(3/4)^2}{8} + 2.25(^3/_4) = 1.91 \text{ inch}^2$$

$$T_2 = \phi R_n = 0.75(1.91)(0.60)70 = 60.1 \text{ kips}$$

$$\phi T_n = T_1 + T_2 = 41.8 + 60.1 = 101.9 \text{ kips} \quad \text{(kontrol)}$$

Perhatikan bahwa *slot* memiliki ujung setengah lingkaran (LRFD-J2.3.b, alinea 4). Ceklah kapasitas tarik pelat:

$$\phi T_n = 0.90 F_y A_g = 0.90(50)(8)0.375 = 135 \text{ kips}$$

$$\phi T_n = 0.75 F_u A_e = 0.75(65)(8)0.375 = 146 \text{ kips}$$

Dengan demikian, kapasitas beban layanan T adalah:

$$101.9 = 1.2(0.17T) + 1.6(0.83T) = 1.53T$$

$$T = 67 \text{ kips}$$

■

■ Contoh 5.16.10

Desainlah sebuah sambungan ujung sehingga didapatkan kekuatan tarik penuh dari profil C8x13,75 dengan panjang lewatan sebesar 5 inch. Kanal baja A572 mutu 50 dihubungkan dengan sebuah pelat buhul $^3/_4$ inch, dan las *fillet* dibuat dengan proses SMAW dan tidak boleh melebihi $^3/_8$ inch. Gunakan *Load and Resistance Factor Design.*

Penyelesaian:

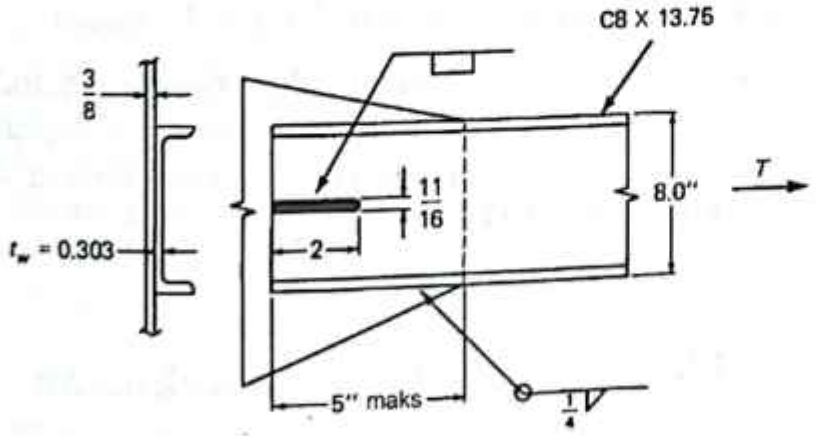
(*a*) Hitunglah kekuatan desain kanal tersebut. Dari **Tabel 3.5.1**, luas bersih efektif A_e adalah $0.85A_g$.

$$\phi T_n = 0.90 F_y A_g = 0.90(50)4.04 = 182 \text{ kips}$$

$$\phi T_n = 0.75 F_u A_e = 0.75(65)(0.85)4.04 = 167 \text{ kips}$$

(*b*) Pilihlah ukuran las *fillet a* dan hitunglah panjang yang dibutuhkan.

a min. = $^3/_{16}$ inch (**Tabel 5.11.1**)
a maks. = 0.303 – $^1/_{16}$ inch = 0.24 inch, katakan $^1/_4$ inch (**Gambar 5.11.2**)



Gambar 5.16.15 *Penyelesaian untuk* **Contoh 5.16.10**

PERPUSTAKAAN D III F. TEKNIK

Sementara bila pada salah satu ujung sepanjang badan kanal dapat digunakan las $^1/_4$ inch, las $^3/_8$ inch dapat digunakan di sepanjang flens. Supaya tidak kacau ukuran *fillet*-nya, lebih baik cobalah ukuran $^1/_4$ inch untuk semuanya.

$$\phi R_{nw} = \phi t_e(0.60F_{EXX}) = 0.75(^1/_4)(0.707)42 = 5.57 \text{ kips/inch}$$

yang tidak dapat melampaui kekuatan patah geser logam dasarnya:

$$\phi R_{nw} \text{ maks} = \phi t_e(0.60F_u) = 0.75(0.375)(0.60)65 = 11.0 \text{ kips/inch}$$

Las menentukan.

$$l_w \text{ yang dibutuhkan} = \frac{T_u}{\phi R_{nw}} = \frac{167}{5.57} = 30 \text{ inch}$$

Karena panjang seluruhnya hanya 26 inch, dibutuhkan kapasitas tambahan las *fillet* dalam *slot*, las *slot*, atau las *plug*.

(c) Las *slot*. Cobalah las *slot* yang sesuai dengan LRFD-J2.3.b.

Lebar minimum *slot* = $(t + {}^5/_{16})$ (dibulatkan ke pecahan terdekat $^1/_{16}$ inch)

= 0.303 + 0.3125 = 0.6155, katakan $^{11}/_{16}$ inch

Lebar maksimum *slot* = $2^1/_4$ (tebal las) = $2^1/_4(0.303)$ = 0.68 inch

Beban T_u yang harus dipikul las *slot*:

$$T_u \text{ yang dibutuhkan} = 167 - (26 - 0.68)5.57 = 26 \text{ kips}$$

Cobalah $^{11}/_{16}$ inch lebar *slot* dan *taksirlah* luas *slot* sebagai bentuk persegi panjang meskipun ujungnya berbentuk bundar:

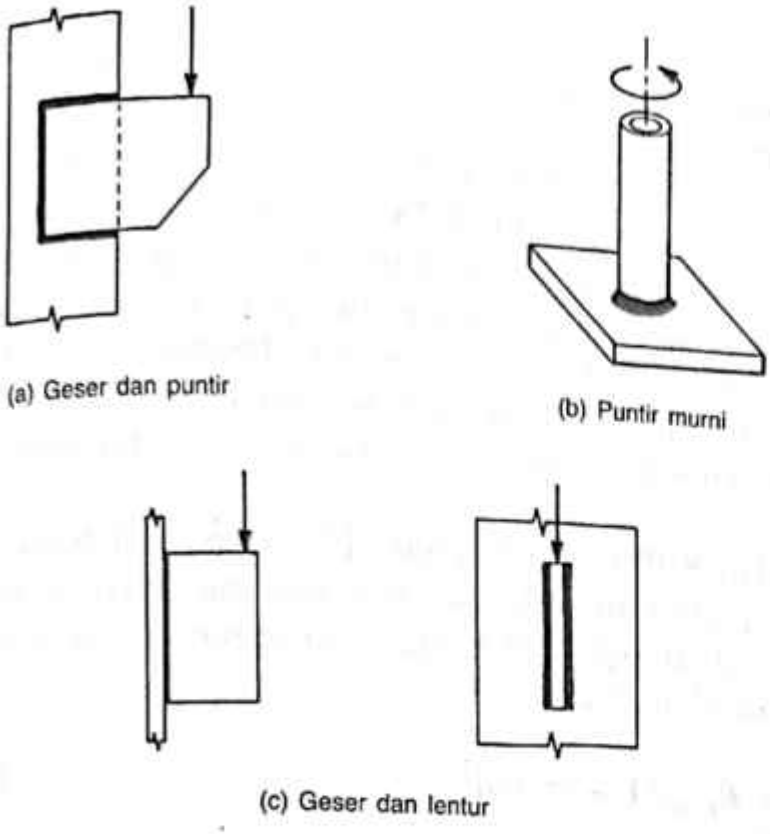
$$\text{Panjang yang dibutuhkan} = \frac{26}{0.75(11/16)42} = 1.2 \text{ inch}$$

Panjang maksimum *slot* = 10 (Tebal las) = 10(0.303) = 3.03 inch

Gunakan las *slot* $^{11}/_{16} \times 2$. Desain finalnya diperlihatkan dalam **Gambar 5.16.15**. Perhatikan bahwa ujung sebelah dalam *slot* harus berbentuk setengah lingkaran atau memiliki pojok-pojok yang dibundarkan dengan jari-jari tidak kurang dari ketebalan pelat di mana *slot* tersebut berada (LRFD-J2.3.b). ∎

5.17 Sambungan Geser Eksentrik — Analisis Kekuatan

Ada banyak situasi di mana pembebanan terhadap las *fillet* tidak sejajar atau tidak transversal terhadap sumbu las itu, seperti dalam **Gambar 5.17.1**. Analisis



Gambar 5.17.1 Tipe pembebanan eksentrik

kasus-kasus pembebanan sedemikian sangat rumit dengan kenyataan bahwa, sebagaimana ditunjukkan dalam **Gambar 5.13.4**, perilaku beban—deformasi merupakan suatu fungsi dari sudut θ antara arah resistansi dan sumbu las *fillet*.

Dengan cara yang serupa dengan yang digunakan untuk pembebanan eksentrik pada sambungan baut (*lihat* **Bagian 4.12**), kekuatan suatu konfigurasi las *fillet* yang dibebani secara eksentrik dapat ditentukan dengan menempatkan pusat sesaat rotasi, dengan menggunakan hubungan beban—deformasi las *fillet*. Resistansi R_i segmen las pada suatu jarak dari pusat sesaat adalah sebanding dengan jarak tersebut dan bekerja menurut arah yang tegak lurus terhadap jarak radial ke segmen yang bersangkutan. Meskipun demikian, tidak seperti baut di mana hubungan beban—deformasi tidak tergantung arah kerja gaya geser pada penampang lintang baut yang berbentuk lingkaran, kekuatan las *fillet* tergantung pada sudut antara gaya yang bekerja dan sumbu las yang menahannya.

Sebelum ada kalkulator yang dapat dengan mudah memberikan hasil hitungan rumus-rumus yang rumit, prosedur *trial and error* untuk menentukan kekuatan sambungan yang terbebani secara eksentrik, baik dengan las atau baut, tidak mudah dilakukan. Dengan demikian, analisis vektor tradisional yang serupa dengan yang dibicarakan untuk baut juga telah digunakan untuk las yang terbebani secara eksentrik, sebagaimana akan dijelaskan dalam pasal berikut (**Bagian 5.18**).

Meskipun Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] *tidak* mensyaratkan metode analisis yang harus digunakan untuk las *fillet* yang dibebani secara eksentrik dalam geser, prosedur yang paling rasional adalah analisis kekuatan menurut usulan Butler, Pal, dan Kulak [5.28, 5.29] yang menjadi basis bagi tabel-tabel Manual ASD 1978. Beberapa modifikasi berdasarkan karya mutakhir Kulak dan Timmler [5.30] telah

digunakan dalam penyusunan tabel-tabel Manual LRFD [1.17]. Konsep dan prosedur umum analisis kekuatan untuk kedua kelompok tabel tersebut sama.

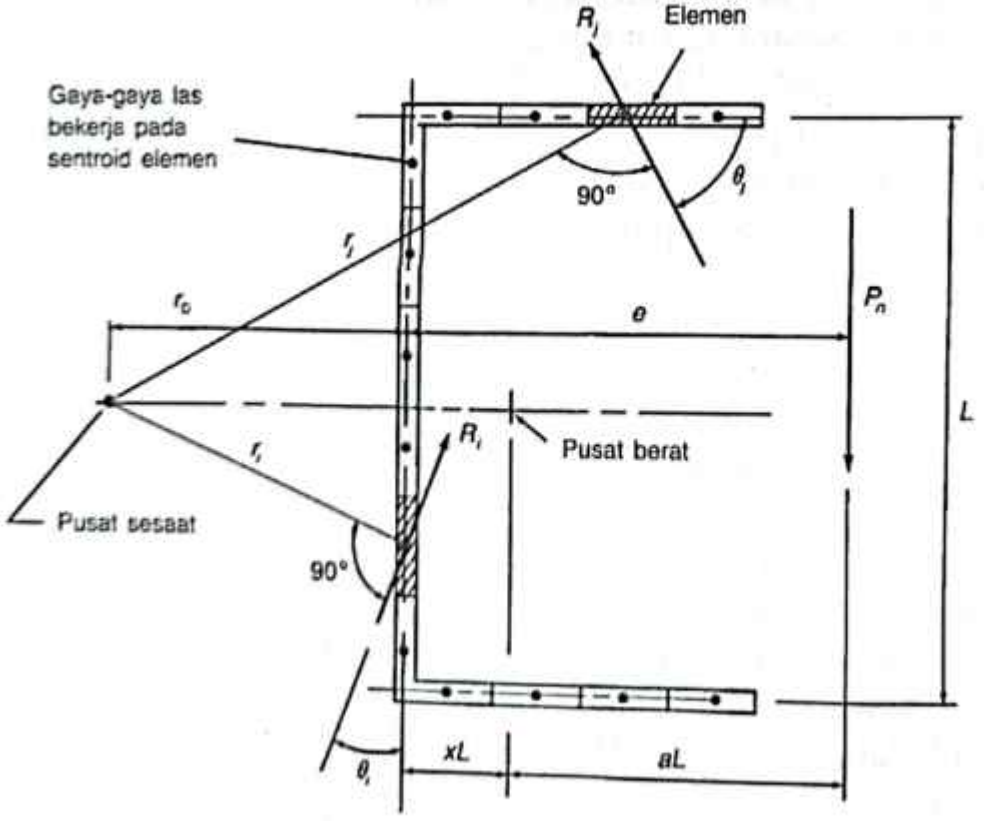
Tide [5.34, 5.35] dan Brandt [5.36] telah memberikan pembahasan terinci yang bagus tentang metode yang digunakan oleh AISC untuk Manual ASD [1.7]. Program komputer karya Brandt [5.36] juga sangat bermanfaat.

Permasalahan yang lebih rumit mengenai geser eksentrik yang paralel dengan salah satu sumbu konfigurasi las yang dikombinasikan dengan gaya yang bekerja pada 90° terhadap gaya geser telah dibahas oleh Loomis, Thornton, dan Kane [5.37]. Tujuannya terutama membantu desain las sambungan balok siku, termasuk profil–C, profil–L, dan garis-garis di mana balok tersebut dapat terkena gaya aksial tekan atau tarik.

Karya yang lebih mutakhir dari Kulak dan Timmler [5.30] menjadi basis bagi presentasi berikutnya. Aplikasi praktis metode ini oleh seorang desainer membutuhkan *spreadsheet* komputer atau *software* lainnya. Kekuatan suatu segmen las per panjang satuan diberikan oleh [5.29]:

$$R_i = R_{i,\,\text{ult}}[1 - e^{-\mu\Delta_i}]^{\lambda} \tag{5.17.1}$$

yang merupakan suatu kurva seperti kurva untuk $\theta = 0$, 10, 30, dan 90° dalam **Gambar 5.13.4**. Karya dan rumus-rumus asalnya hanya untuk las *fillet* berukuran $^1/_4$ inch dengan elektroda E60, sedangkan karya penyempurnaan berikutnya menggunakan las berukuran $^1/_4$ inch dengan elektroda E70. Prosedurnya mencakup pembagian konfigurasi las menjadi elemen-elemen seperti **Gambar 5.17.2**.



Gambar 5.17.2 *Resistansi R dari segmen las fillet*

Bila suatu beban eksentrik menyebabkan translasi dan rotasi konfigurasi lasnya, akan terjadi suatu titik di mana keseluruhan deformasi akan bersifat rotasional terhadapnya; yakni bahwa kombinasi dari bagian-bagian rotasional dan translasional akan menjadi rotasional murni terhadap pusat sesaat.

Dengan simbol-simbol Manual LRFD [1.17], **Persamaan 5.17.1** dapat diwujudkan menjadi:

$$R_i = R_{i,\,\text{ult}}[1 - e^{(-k_1\,\Delta_i/\Delta_0)}]^{k_2} \tag{5.17.2}$$

di mana e = basis logaritma natural = 2.718...

$R_{i,\,\text{ult}}$ = beban geser ultimit pada sebuah elemen

$$R_{i,\,\text{ult}} = \frac{10 + \theta}{10 + 0.582\,\theta}(0.791 F_{EXX} t_e) \qquad (\theta \text{ dalam derajat}) \tag{5.17.3}$$

$$k_1 = \mu\Delta_0 = 8.274e^{0.0114\,\theta} \tag{5.17.4}$$

$$\Delta_i = \text{deformasi sebuah elemen} = \frac{r_i}{r_{\text{maks}}}\Delta_{i,\,\text{maks}} \tag{5.17.5}$$

Δ_0 = 0.11 inch (deformasi maksimum untuk $\theta = 0°$)

r_i = jarak dari pusat sesaat ke sebuah elemen

r_{maks} = jarak ke elemen terjauh dari pusat sesaat

$$\Delta_{i,\,\text{maks}} = \Delta_0\left[\frac{\theta}{5} + 1\right]^{-0.47} \qquad (\theta \text{ dalam derajat}) \tag{5.17.6}$$

$$k_2 = \lambda = 0.4e^{0.0146\,\theta} \tag{5.17.7}$$

Prosedurnya adalah sebagai berikut:

1. Bagilah konfigurasi las menjadi segmen-segmen, katakan segmen-segmen berukuran 1 inch panjang.
2. Pilihlah suatu lokasi coba untuk pusat sesaat rotasi (*lihat* **Gambar 5.17.2**)
3. Asumsikan gaya yang memberi resistansi R_i atau R_j pada segmen las mana pun dengan arah tegak lurus terhadap garis radial dari pusat sesaat ke sentroid segmen las.
4. Hitunglah sudut θ (dalam derajat) antara arah gaya resistansi R_i atau R_j dan sumbu las.
5. Hitunglah deformasi maksimum $\Delta_{i,\,\text{maks}}$ yang dapat terjadi pada θ tertentu sebelum segmen las yang bersangkutan mengalami kegagalan dengan menggunakan **Persamaan 5.17.6**.
6. Deformasi pada segmen-segmen las diasumsikan bervariasi secara linear menurut jarak dari pusat sesaat ke sentroid segmen las yang bersangkutan.

Dengan demikian, segmen kritis merupakan segmen yang rasio dari $\Delta_{i,\,maks}$ ke jarak radialnya r_i merupakan yang *terkecil*.

7. Deformasi yang kompatibel Δ_i menurut **Persamaan 5.17.5**, kemudian dapat dihitung untuk masing-masing segmen las.
8. Hitunglah beban geser ultimit $R_{i,\,ult}$ pada masing-masing segmen las dengan **Persamaan 5.17.3**.
9. Hitunglah gaya yang memberi resistansi R_i pada masing-masing segmen las yang terjadi pada saat segmen kritik mencapai kondisi kegagalan dengan **Persamaan 5.17.2**.
10. Dengan statika, hitunglah beban P_n yang mewakili kekuatan nominal sambungan tersebut bila beban dikenakan pada eksentrisitas sebesar e. Untuk P_n yang dikenakan menurut arah y seperti **Gambar 5.17.2**, persamaan statikanya adalah:

$$\Sigma M = 0; \qquad P_n(e + r_0) = \Sigma R_i r_i + \Sigma R_j r_j \tag{5.17.8}$$

$$P_n = \frac{\Sigma R_i r_i + \Sigma R_j r_j}{e + r_0} \tag{5.17.9}$$

$$\Sigma F_y = 0; \qquad P_n = \Sigma (R_i)_y + \Sigma (R_j)_y \tag{5.17.10}$$

$$P_n = \Sigma R_i \cos \theta_i + \Sigma R_j \sin \theta_j \tag{5.17.11}$$

11. Bandingkan harga-harga P_n dari **Persamaan 5.17.9** dan **5.17.11**. Bila keduanya sama, berarti penyelesaian tersebut benar. Bila tidak sama, revisilah harga coba dari r_0 dan ulangi proses tersebut sampai **Persamaan 5.17.9** dan **5.17.11** memberikan hasil yang sama.

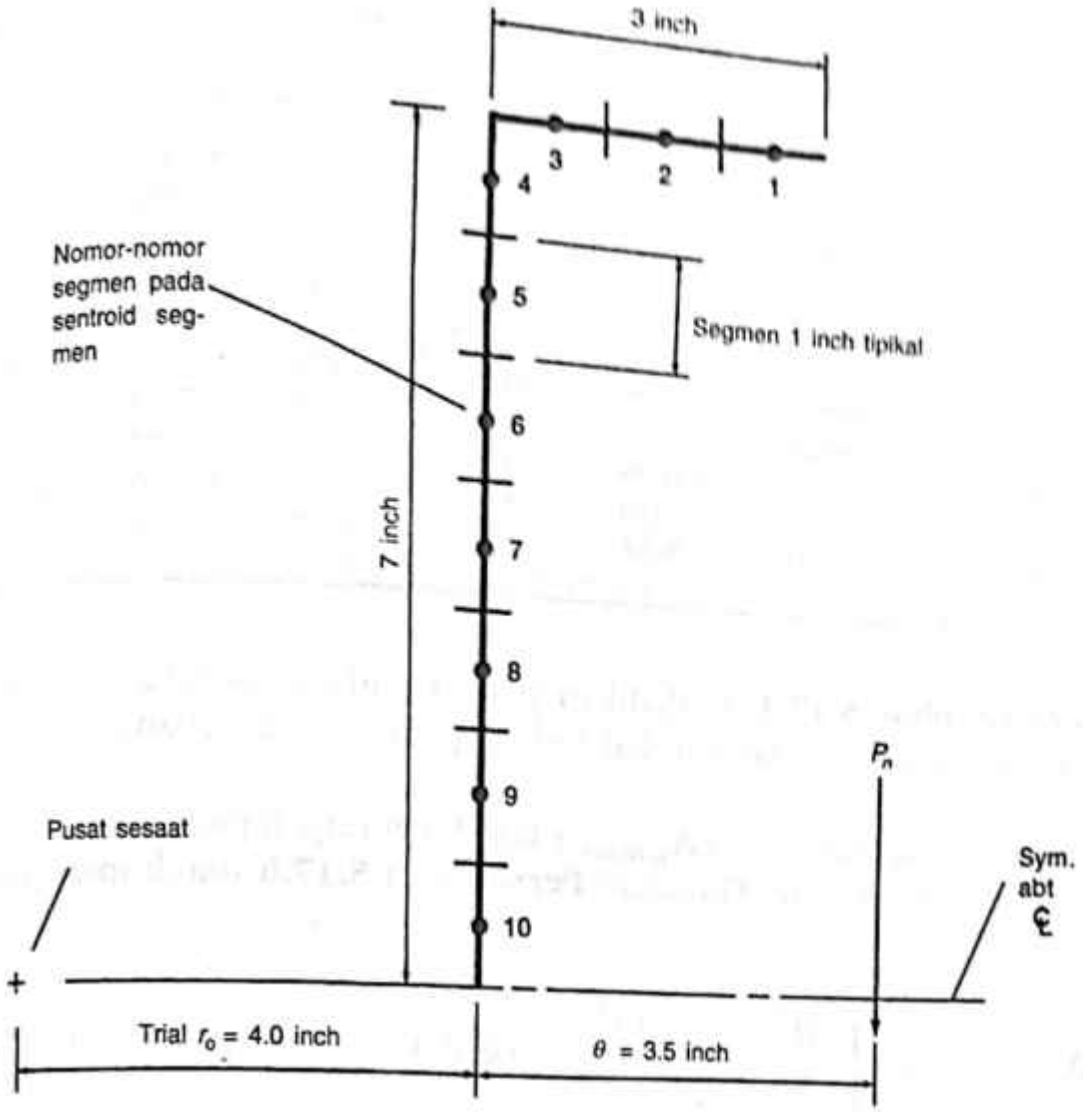
■ Contoh 5.17.1

Tentukan kekuatan nominal P_n dari konfigurasi las *fillet* berbentuk–C dalam **Gambar 5.17.3**. Panjang horisontal masing-masing 3 inch sedang panjang vertikalnya adalah 14 inch. Beban eksentrik dikenakan pada 3.5 inch dari panjang yang 14 inch. Ukuran lasnya adalah $^1/_4$ inch dan elektroda yang digunakan adalah E70 dengan proses SMAW. Asumsikan bahwa kekuatan material dasar tidak menentukan.

Penyelesaian:

(*a*) Bagilah konfigurasi las menjadi segmen-segmen sepanjang 1 inch. Gaya resistansi diasumsikan bekerja pada pusat setiap segmen. Pusat sesaat akan digunakan sebagai titik asal seperti **Gambar 5.17.3**.

(*b*) Pilihlah suatu lokasi coba untuk pusat sesaat (*instantenous center* = IC) rotasi. Asumsikan, misalnya $r_0 = 4$ inch. Kemudian hitunglah koordinat sentroid segmen-segmen dan sudut θ_i dan θ_j masing-masing untuk segmen vertikal dan



Gambar 5.17.3 *Segmen-segmen las untuk Contoh 5.17.1*

Tabel 5.17.1 Geometri untuk coba 1 (r_0 = 4 inch) dari **Contoh 5.17.1**

Segmen horisontal	Panjang (inch)	x (inch)	y (inch)	r_i (inch)	θ_j (radian)	θ_j (derajat)
1	1	6.50	7.00	9.552	0.748	42.9
2	1	5.50	7.00	8.902	0.666	38.2
3	1	4.50	7.00	8.322	0.571	32.7
Segmen vertikal	**Panjang (inch)**	**x (inch)**	**y (inch)**	**r_i (inch)**	**θ_j (radian)**	**θ_j (derajat)**
4	1	4.00	6.50	7.632	1.019	58.4
5	1	4.00	5.50	6.801	0.942	54.0
6	1	4.00	4.50	6.021	0.844	48.4
7	1	4.00	3.50	5.315	0.719	41.2
8	1	4.00	2.50	4.717	0.559	32.0
9	1	4.00	1.50	4.272	0.359	20.6
10	1	4.00	0.50	4.031	0.124	7.1

Tabel 5.17.2 Resistansi pada masing-masing segmen—coba 1 (r_0 = 4.0 inch)

Segmen	$\Delta_{i,\ maks}$	$\Delta_{i,\ maks}/r_i$	Δ_i	$R_{i,\ ult}$	k_1	k_2	R_i
1	0.0380	0.00398	0.0380	14.805	13.49	0.7481	14.70
2	0.0399	0.00449	0.0354	14.633	12.78	0.6982	14.47
3	0.0425	0.00511	0.0331	14.396	12.02	0.6451	14.15
4	0.0333	0.00437	0.0304	15.218	16.10	0.9382	15.05
5	0.0345	0.00507	0.0271	15.118	15.31	0.8796	14.18
6	0.0361	0.00600	0.0240	14.973	14.36	0.8105	14.44
7	0.0387	0.00728	0.0212	14.746	13.23	0.7298	13.89
8	0.0429	0.00910	0.0188	14.360	11.92	0.6383	13.13
9	0.0511	0.01196	0.0170	13.615	10.46	0.5400	12.08
10	0.0725	0.01799	0.0161	11.847	8.97	0.4439	10.30

horisontal seperti **Gambar 5.17.1**. Perhatikan bahwa pada umumnya IC berada pada sisi berlawanan dari garis las vertikal terhadap titik kerja beban*.

(*c*) Hitunglah deformasi maksimum $\Delta_{i,\ maks}$ yang dapat terjadi pada setiap harga θ untuk segmen-segmen tersebut. Gunakan **Persamaan 5.17.6** untuk menggambarkan segmen 1.

$$\Delta_{i,\ maks} = \Delta_0 \left[\frac{\theta}{5} + 1 \right]^{-0.47} \qquad (\theta \text{ dalam derajat}) \qquad [5.17.6]$$

$$\Delta_{i,\ maks} = \Delta_0 \left[\frac{42.9}{5} + 1 \right]^{-0.47} = 0.0380 \text{ inch}$$

(*d*) Hitunglah rasio $r_i/(\Delta_{i,\ maks})$ untuk masing-masing segmen. Hasil-hasil tersebut dirangkum dalam **Tabel 5.17.2**.

(*e*) Hitunglah $R_{i,\ ult}$ untuk masing-masing segmen. Untuk segmen 1:

$$R_{i,\ ult} = \frac{10 + \theta}{10 + 0.582\theta} (0.791 F_{EXX} t_e) \qquad [5.17.3]$$

Untuk $^1/_4$ inch, $t_e = 0.25(0.707)$, dan untuk E70, $F_{EXX} = 70$ ksi:

$$R_{i,\ ult} = \frac{10 + 42.9}{10 + 0.582(42.9)} (0.791)(70)(0.25)0.707 = 14.805 \text{ kips}$$

*Penggunaan suatu program spreadsheet, seperti Lotus 1-2-3, akan memungkinkan problema ini dapat diselesaikan dengan cepat melalui trial and error ini.

(*f*) Hitunglah gaya R_i yang bekerja pada masing-masing segmen bila kekuatan nominal sambungan itu dapat tercapai. Untuk segmen 1:

$$k_1 = 8.274e^{0.0114\theta} = 8.274e^{0.0114(42.9)} = 13.49 \qquad [5.17.4]$$

$$k_2 = 0.4e^{0.0146\theta} = 0.4e^{0.0146(42.9)} = 0.7481 \qquad [5.17.7]$$

$$R_i = R_{i,\,ult}\,[1 - e^{(-k_1\,\Delta_i/\Delta_0)}]^{k_2} \qquad [5.17.2]$$

$$R_i = 14.805[1 - e^{[-13.49(0.0380)/0.11]}]^{0.7481} = 14.70 \text{ kips}$$

(*g*) Hitunglah secara statika untuk menentukan ketepatan harga coba r_0. Dengan **Persamaan 5.17.9** dan **5.17.11**, hasilnya dirangkum dalam **Tabel 5.17.3**.

Tabel 5.17.3 Pemeriksaan statika untuk coba 1 (r_0 = 4.0 inch)

Segmen	R_i	r_i	x	y	$(R_i)_x$	$(R_i)_y$	$R_i r_i$
1	14.70	9.55	6.50	7.00	10.77	10.00	140.4
2	14.47	8.90	5.50	7.00	11.38	8.94	128.79
3	14.15	8.32	4.50	7.00	11.90	7.65	117.72
4	15.05	7.63	4.00	6.50	12.82	7.89	114.87
5	14.81	6.80	4.00	5.50	11.98	8.71	100.73
6	14.44	6.02	4.00	4.50	10.79	9.59	86.94
7	13.89	5.32	4.00	3.50	9.15	10.46	73.85
8	13.13	4.72	4.00	2.50	6.96	11.14	61.95
9	12.08	4.27	4.00	1.50	4.24	11.31	51.62
10	10.30	4.03	4.00	0.50	1.28	10.22	41.53
					Σ = 91.27	95..91	918.42

Dari **Persamaan 5.17.9**, diperoleh keseimbangan rotasional:

$$P_n = 2(918.42)/(4.0 + 3.5) = 244.9 \text{ kips}$$

Dari **Persamaan 5.17.11**, keseimbangan gaya pada arah–y memberikan:

$$P_n = 2(95.91) = 191.8 \text{ kips}$$

Karena harga-harga P_n dari persamaan statika itu tidak sama, lokasi yang diasumsikan dari pusat sesaatnya ternyata tidak tepat. Cobalah harga r_0 yang baru dan ulangi analisis sampai diperoleh harga yang sama antara **Persamaan 5.17.9** dengan **5.17.11**. Karena beban yang dikenakan P_n untuk contoh ini berada dalam arah–y, penjumlahan gaya-gaya dalam arah–x secara otomatik akan

terpenuhi; 91.27 kips yang bekerja pada salah satu arah segmen itu menurut salah satu sisi sumbu simetri, dan gaya yang sama juga bekerja pada sudut 180° terhadap segmen-segmen itu pada sisi lain sumbu simetrinya.

(*b*) Setelah beberapa coba, harga r_0 ditentukan sebesar 8.00 inch. **Tabel 5.17.4** memberikan penyelesaian yang tepat.

Tabel 5.17.4 Solusi untuk contoh 5.17.1 (r_0 = 8.00 inch)

Segmen	θ_i	$\Delta_{i,\,maks}$	$\Delta_{i,\,maks}/r_j$	Δ_i	$R_{i,\,ult}$	R_i	$(R_i)_y$	$R_i r_i$
1	56.3	0.0339	0.00268	0.0339	15.17	15.06	12.53	190.0
2	53.6	0.0346	0.00293	0.0317	15.11	14.95	12.03	176.3
3	50.5	0.0355	0.00322	0.0296	15.03	14.79	11.42	162.8
4	39.1	0.0395	0.00384	0.0277	14.67	14.26	11.07	147.0
5	34.5	0.0416	0.00429	0.0261	14.48	13.95	11.49	135.4
6	29.4	0.0445	0.00484	0.0246	14.22	13.56	11.81	124.4
7	23.6	0.0484	0.00555	0.0234	13.86	13.06	11.97	114.0
8	17.4	0.0544	0.00649	0.0225	13.32	12.42	11.85	104.0
9	10.6	0.0644	0.00791	0.0218	12.47	11.52	11.32	93.7
10	3.6	0.0854	0.01065	0.0215	11.00	10.09	10.07	80.8
							Σ = 115.56	1328.6

Dari **Persamaan 5.17.9**, keseimbangan rotasional memberikan

$$P_n = 2(1328.6)/(8.0 + 3.5) = 231.1 \text{ kips}$$

Dari **Persamaan 5.17.11**, keseimbangan gaya dalam arah–y memberikan:

$$P_n\ 2(115.56) = 231.1 \text{ kips}$$

Dengan demikian, kekuatan nominal P_n-nya adalah 231 kips. ∎

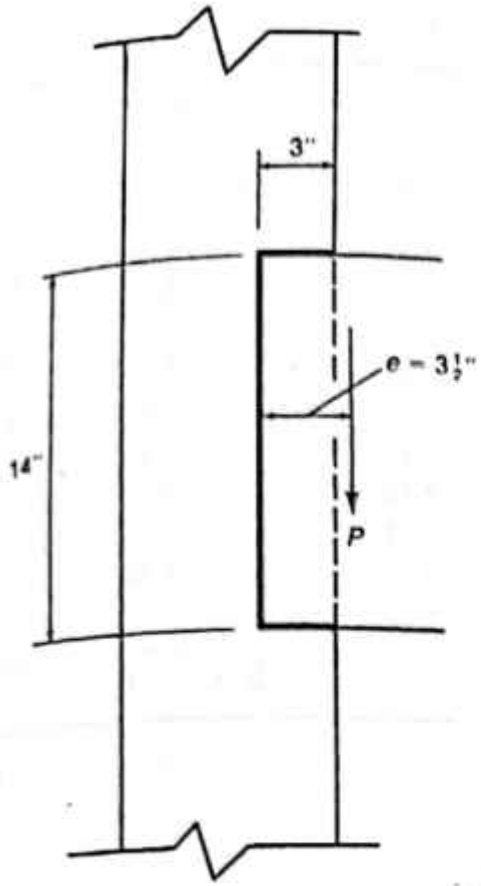
■ Contoh 5.17.2

Tentukan beban layanan maksimum P yang dapat diijinkan untuk dipikul oleh sambungan geser eksentrik pada **Gambar 5.17.4** dengan analisis kekuatan dan Spesifikasi *Load and Resistance Factor Design* AISC. Beban hidup mencapai tiga kali beban mati. Lasnya berukuran $^1/_4$ inch dengan elektroda E70 dan proses SMAW. Asumsikan bahwa material dasar tidak menentukan.

Penyelesaian:

(*a*) Analisis kekuatan dengan konsep-konsep dasar. Kekuatan nominal sambungan ini seperti yang ditentukan dalam **Contoh 5.17.1** adalah:

P_n = 231 kips



Gambar 5.17.4 Pembebanan untuk ***Contoh 5.17.2***

(*b*) Kekuatan nominal sebuah las *fillet*. Dari LRFD-J2.2, kekuatan nominal maksimumnya adalah:

$$R_n = t_e(0.60F_{EXX}) = 0.707(0.25)(0.60)70 = 7.42 \text{ kips/inch}$$

(*c*) Sesuaikan kekuatan nominal hitungan sedemikian rupa sehingga gaya maksimum pada setiap segmen las tidak melampaui 7.42 kips/inch. Resistansi maksimumnya adalah 15.06 kips/inch pada segmen 1 (**Tabel 5.17.4**):

$$P_n \text{ hasil koreksi} = 231 \frac{7.42}{15.06} = 114 \text{ kips}$$

(*d*) Prosedur alternatif dengan resistansi konstan bila resistansi rumus hitungan R_i akan melampaui 7.42 kips/inch. Karena Spesifikasi LRFD AISC tidak mengijinkan R_i melampaui 7.42 kips/inch (untuk $^1/_4$ inch E70 dengan prosedur SMAW), analisis kekuatan dapat dilakukan dengan menetapkan nilai maksimum R_i = 7.42 kips/inch selama analisis untuk menemukan pusat sesaat. Dari **Gambar 5.13.4** dapat diamati bahwa penggunaan resistansi konstan sebesar 7.42 kips/inch bila R_i hitungan melampaui harga tersebut akan mengakibatkan las tersebut menunjukkan perilaku elastik–plastik. Dengan asumsi ini, penyelesaian untuk pusat sesaat memberikan r_0 = 7.08 inch dan detail hitungannya dapat dijumpai dalam **Tabel 5.17.5**.

Tabel 5.17.5 Penyelesaian untuk **Contoh 5.17.2** (r_0 = 7.08 inch)

Segmen	θ_i	$\Delta_{i,\text{maks}}$	Δ_i	$R_{i,\text{ult}}$	Hitungan R_i	Digunakan R_i	$(R_i)_y$	$R_i r_i$
1	47.3	0.0365	0.0300	14.94	14.69	7.42	5.46	76.61
2	50.8	0.0354	0.0322	15.04	14.87	7.42	5.75	82.22
3	53.9	0.0345	0.0345	15.12	15.01	7.42	6.00	88.10
4	42.5	0.0382	0.0278	14.79	14.43	7.42	5.47	71.37
5	37.8	0.0401	0.0261	14.62	14.12	7.42	5.86	66.57
6	32.4	0.0427	0.0244	14.38	13.73	7.42	6.27	62.30
7	26.3	0.0465	0.0230	14.04	13.22	7.42	6.66	58.65
8	19.4	0.0522	0.0219	13.52	12.56	7.42	7.00	55.76
9	12.0	0.0620	0.0211	12.67	11.64	7.42	7.26	53.75
10	4.0	0.0833	0.0207	11.12	10.14	7.42	7.41	52.71
							Σ = 63.14	668.03

Dari **Persamaan 5.17.9**:

$$P_n = 2(63.14) = 126.3 \text{ kips}$$

Dari **Persamaan 5.17.11**:

$$P_n = 2(668.03)/(7.08 + 3.5) = 126.3 \text{ kips}$$

Dengan demikian, kekuatan nominal P_n-nya adalah 126.3 kips.

(*e*) Gunakan tabel-tabel Manual LRFD [1.17], p. 5–103. Untuk las $^1/_4$ inch dengan elektroda E70:

$$a = (e - xL)/L = (3.5 - 0.45)/14 = 0.218$$
$$k = kL/L = 3.0/14 = 0.214$$

		k = 0.2	0.214	0.3	
a =	0.2	1.694		1.962	
	0.218	1.655	1.692	1.920	c = 1.692
	0.3	1.473		1.725	

Harga menurut tabel = $\phi P_n = CC_1DL = 1.692(1.0)(4)14 = 94.8$ kips

di mana: C_1 = koeefisien elektroda = (Elektroda yang digunakan)/70
D = banyaknya $^1/_{16}$-an dari setiap inch dalam ukuran las
L = panjang las vertikal (inch)

(*f*) Rangkuman. Bandingkan harga-harga dari kekuatan desain ϕP_n.

1. Analisis kekuatan mereduksi P_n setelah analisis diselesaikan:

$$\phi P_n = 0.75(114) = 85.5 \text{ kips}$$

2. Analisis kekuatan dengan maksimum R_i = 7.42 kips/inch:

$$\phi P_n = 0.75(126.3) = 94.7 \text{ kips}$$

3. Tabel-tabel Manual LRFD:

$$\phi P_n = 94.8 \text{ kips}$$

(g) Hitunglah beban layanan yang aman P dengan kombinasi beban gravitasi terfaktor, LRFD-A4.1, Persamaan (A4-2). Untuk beban hidup sebesar 75% dan beban mati 25%:

$$P_u = 1.2D + 1.6L$$

$$\phi P_n = P_u = 1.2(0.25P) + 1.6(0.75P) = 1.5P$$

$$P = \frac{\phi P_n}{1.5} = \frac{94.8}{1.5} = 63 \text{ kips}$$

■

■ **Contoh 5.17.3**

Tentukan beban layanan maksimum P yang dapat diijinkan untuk dipikul oleh sambungan geser eksentrik pada **Gambar 5.17.4** (soal yang sama dengan **Contoh 5.17.2**) dengan analisis kekuatan dan Spesifikasi *Allowable Stress Design* ASD. Las berukuran $^1/_4$ inch dengan elektroda E70 dan proses SMAW. Asumsikan bahwa kekuatan material dasar tidak menentukan.

Penyelesaian:

(a) Analisis kekuatan dengan konsep-konsep dasar. Kekuatan nominal dari sambungan ini sebagaimana yang ditentukan dalam **Contoh 5.17.1** adalah:

$$P_n = 231 \text{ kips}$$

(b) Tegangan ijin pada sebuah las *fillet*. Dari ASD-J2.4, resistansi ijin R adalah:

$$R = t_e(0.3F_{EXX})$$
$$= 0.707(0.25)(0.30)70 = 3.71 \text{ kips/inch}$$

(c) Reduksilah kekuatan nominal hitungan ke dalam rentang beban layanan sehingga gaya maksimum pada setiap segmen las tidak melampaui 3.71 kips/inch. Resistansi maksimumnya adalah 15.06 kips/inch pada segmen 1 (**Tabel 5.17.4**). Dengan demikian, beban layanan ijin P adalah:

$$P \text{ hasil koreksi} = 231 \frac{3.71}{15.06} = 57 \text{ kips}$$

(d) Gunakan tabel-tabel Manual ASD 1978, p. 4-80. Untuk las $^1/_4$ inch dengan elektroda E70:

$a = (e - xL)/L = (3.5 - 0.45)/14 = 0.218$
$k = kl/L \quad = 3.0/14 = 0.214$

	$k = 0.2$	0.214	0.3	
$a = 0.2$	1.02		1.18	
0.218	1.020	1.043	1.180	$c = 1.043$
0.25	0.972		1.12	

Harga menurut tabel = $P = CC_1DL = 1.043(1.0)(4)14 = 58.4$ kips

di mana: C_1 = koefisien elektroda = (Elektroda yang digunakan)/70
D = banyaknya $^1/_{16}$-an dari setiap inch ukuran las
L = panjang las vertikal (inch)

(e) Rangkuman. Bandingkan harga-harga beban layanan P.

1. Analisis kekuatan mereduksi P_n setelah penyelesaian analisis : $P = 57$ kips
2. Tabel-tabel Manual ASD: $P = 58$ kips

Perhatikan bahwa tabel-tabel Manual ASD menggunakan persamaan-persamaan yang sedikit berbeda dengan yang digunakan untuk analisis kekuatan dalam Manual LRFD; meskipun demikian, perbedaan tersebut tidak signifikan. Beban layanan yang aman dengan ASD adalah 58 kips dibandingkan dengan 63 kips dengan LRFD. Harga LRFD tergantung pada rasio antara beban hidup dan beban mati, sedangkan harga ASD adalah sama untuk semua rasio beban hidup dan beban mati. Hasil dari LRFD dan ASD cukup bersesuaian. ■

5.18 Sambungan Geser Eksentrik — Analisis (Vektor) Elastik

Bila tidak tersedia komputer atau tabel-tabel Manual AISC, analisis vektor elastik tradisional lebih mudah dilakukan ketimbang metoda kekuatan. Metoda vektor elastik bersifat konservatif, bahkan kadangkala terlalu berlebihan. Metoda elastik menggunakan asumsi-asumsi berikut:

1. Setiap segmen las, bila ukurannya sama, akan menahan beban yang dikenakan secara konsentrik dengan gaya yang sama. Konsep ini digunakan untuk las pada batang tarik dalam **Bagian 5.16**.
2. Rotasi akibat momen puntir diasumsikan terjadi di sekitar sentroid konfigurasi las.
3. Beban pada suatu segmen las akibat momen puntir diasumsikan sebanding dengan jarak dari sentroid konfigurasi las.
4. Arah gaya pada suatu segmen las akibat puntiran diasumsikan sebagai tegak lurus terhadap jarak radial dari sentroid konfigurasi las.
5. Komponen gaya-gaya yang disebabkan oleh beban langsung dan puntiran dapat dikombinasikan secara vektorial sehingga diperoleh suatu gaya resultan.

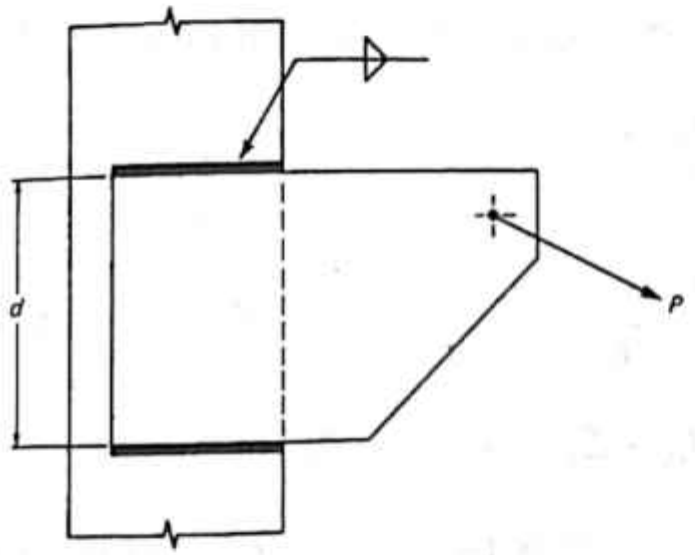
Akan lebih mudah memahami analisis ini dengan menggunakan prinsip-prinsip mekanika pada material homogen yang mengkombinasikan geser langsung dengan puntiran. Dimulai dengan tegangan-tegangan pada penampang homogen:

$$f' = \frac{P}{A} = \text{tegangan akibat geser langsung} \qquad (5.18.1)$$

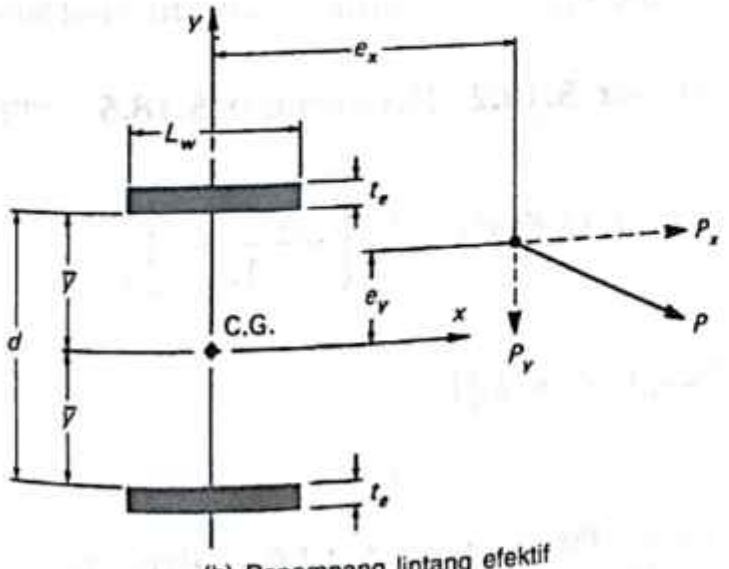
$$f'' = \frac{Tr}{I_p} = \text{tegangan akibat momen puntir} \qquad (5.18.2)$$

di mana r = jarak radial dari sentroid ke titik tegangan
I_p = momen inersia polar

Untuk menghitung tegangan atau gaya nominal, *lokasi* garis-garis las didefinisikan sebagai garis pinggir di sepanjang mana las *fillet* tersebut ditempatkan, dan tidak sebagai garis pusat leher efektif. Hal ini menimbulkan sedikit perbedaan mengingat bahwa dimensi leher biasanya cukup kecil.

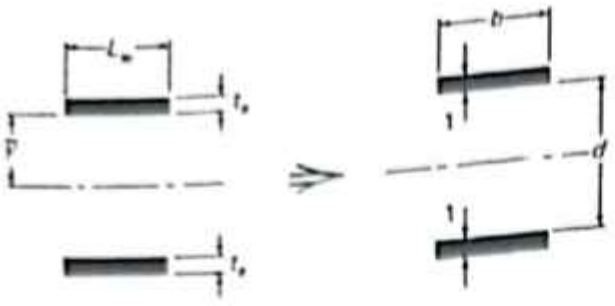


(a) Sambungan



(b) Penampang lintang efektif

Gambar 5.18.1 Sambungan konsol eksentrik



Gambar 5.18.2 Perlakuan dari konfigurasi las sebagai garis-garis yang memiliki ketebalan satuan

Untuk kasus umum seperti **Gambar 5.18.1**, komponen-komponen tegangan karena geser langsung adalah:

$$f'_x = \frac{P_x}{A} \tag{5.18.3a}$$

$$f'_y = \frac{P_y}{A} \tag{5.18.3b}$$

Komponen-komponen x dan y dari f'' yang diakibatkan oleh puntiran adalah:

$$f''_x = \frac{Ty}{I_p} = \frac{(P_x e_y + P_y e_x)y}{I_p} \tag{5.18.4a}$$

$$f''_y = \frac{Tx}{I_p} = \frac{(P_x e_y + P_y e_x)x}{I_p} \tag{5.18.4b}$$

di mana:
$$I_p = I_x + I_y = \Sigma I_{xx} + \Sigma A\bar{y}^2 + \Sigma I_{yy} + \Sigma A\bar{x}^2 \tag{5.18.5}$$

Dalam **Persamaan 5.18.5**, $\bar{x}$ dan $\bar{y}$ menunjuk pada jarak-jarak dari pusat berat kelompok las ke pusat berat segmen-segmen las individual. I_{xx} dan I_{yy} menunjuk momen inersia dari segmen-segmen individual menurut masing-masing sumbu sentroidnya.

Dengan demikian, untuk situasi **Gambar 5.18.2**, **Persamaan 5.18.5** menjadi:

$$I_p = 2\left[\frac{L_w(t_e)^3}{12}\right] + 2[L_w(t_e)(\bar{y})^2] + 2\left[\frac{t_e(L_w)^3}{12}\right]$$

$$= \frac{t_e}{6}[L_w(t_e)^2 + 12L_w(\bar{y})^2 + L_w^3] \tag{5.18.6}$$

Untuk situasi-situasi praktis, suku pertama **Persamaan 5.18.6** diabaikan, karena dengan t_e yang kecil, suku tersebut tidak signifikan dibandingkan dengan suku-suku lainnya. Dari sini:

$$I_p \approx \frac{t_e}{6}\left[12L_w(\bar{y})^2 + L_w^3\right] \tag{5.18.7}$$

Perhatikan bahwa I_p sama dengan ketebalan leher t_e kali sifat *garis-garis*, yakni suatu elemen yang hanya didefinisikan dengan panjang, sedang lebarnya adalah satu satuan. Sebenarnya, luas A dalam **Persamaan 5.18.3** sama dengan ketebalan t_e kali panjang total konfigurasi las; dan dalam **Persamaan 5.18.5**, momen inersia polar sama dengan tebal t_e kali momen inersia polar konfigurasi yang diasumsikan sebagai *garis*. Bila tegangan f dikalikan dengan t_e, tegangan itu akan menjadi gaya R per panjang satuan, katakan, kips/in.

Dengan memperlakukan las yang membentuk penampang lintang efektif dalam **Gambar 5.18.2** sebagai las garis (yakni seperti dalam derivasi **Persamaan 5.18.7** dengan $t_e = 1$) dan dengan menggunakan notasi umum b dan d, seperti dalam **Gambar 5.18.2**, **Persamaan 5.18.7** menjadi:

$$I_p \approx \frac{1}{6}\left[12b\left(\frac{d}{2}\right)^2 + b^3\right] = \frac{b}{6}\left[3d^2 + b^2\right] \tag{5.18.8}$$

Tabel 5.18.1 memberikan harga-harga I_p yang dianggap sebagai sifat-sifat garis bagi konfigurasi las umum lainnya.

▮ Contoh 5.18.1

Hitunglah beban maksimum (kips/inch) pada konfigurasi las seperti untuk konsol pada **Gambar 5.18.3** dengan metode elastik (vektor). Asumsikan bahwa tebal pelat tidak mempengaruhi hasil.

Penyelesaian:

Gaya maksimum R akan terjadi pada titik A dan B. Sifat-sifat garis akan digunakan:

(a) Tentukan sentroid konfigurasi tersebut. Dengan mengambil momen-momen di sekitar las vertikal:

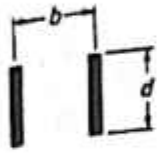
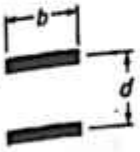
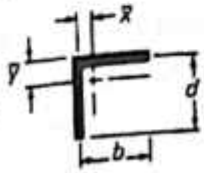
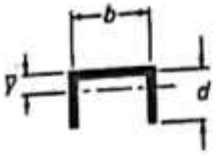
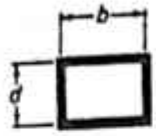
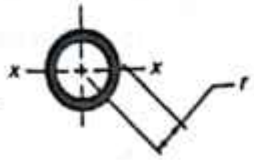
$$\bar{x} = \frac{2(6)3}{2(6) + 8} = 1.8 \text{ inch}$$

(b) Hitunglah luas (panjang) dan momen inersia polar terhadap sentroid konfigurasi tersebut:

$$L = 2(6) + 8 = 20 \text{ inch}$$

$$I_p = \underbrace{\frac{(8)^3}{12} + 2[6(4)^2]}_{I_x} + \underbrace{2\left[\frac{(6)^3}{12}\right] + 2[6(1.2)^2] + 8(1.8)^2}_{I_y} = 314 \text{ inch}^3$$

Tabel 5.18.1 Sifat-sifat las yang diperlakukan sebagai garis

Penampang b = Lebar; d = Kedalaman		Modulus Penampang Γ_x/y	Momen Inersia Polar, I_p terhadap Pusat Berat
1.		$S=\frac{d^2}{6}$	$I_p=\frac{d^3}{12}$
2. 		$S=\frac{d^2}{3}$	$I_p=\frac{d(3b^2+d^2)}{6}$
3. 		$S=bd$	$I_p=\frac{b(3d^2+b^2)}{6}$
4. 	$\bar{y}=\frac{d^2}{2(b+d)}$ $\bar{x}=\frac{b^2}{2(b+d)}$	$S=\frac{4bd+d^2}{6}$	$I_p=\frac{(b+d)^4-6b^2d^2}{12(b+d)}$
5.	$\bar{x}=\frac{b^2}{2b+d}$	$S=bd+\frac{d^2}{6}$	$I_p=\frac{8b^3+6bd^2+d^3}{12}-\frac{b^4}{2b+d}$
6. 	$\bar{y}=\frac{d^2}{b+2d}$	$S=\frac{2bd+d^2}{3}$	$I_p=\frac{b^3+6b^2d+8d^3}{12}-\frac{d^4}{2d+b}$
7. 		$S=bd+\frac{d^2}{3}$	$I_p=\frac{(b+d)^3}{6}$
8.	$\bar{y}=\frac{d^2}{b+2d}$	$S=\frac{2bd+d^2}{3}$	$I_p=\frac{b^3+8d^3}{12}-\frac{d^4}{b+2d}$
9.		$S=bd+\frac{d^2}{3}$	$I_p=\frac{b^3+3bd^2+d^3}{6}$
10. 		$S=\pi r^2$	$I_p=2\pi r^3$

Beban maksimum (kips/inch) pada las karena beban terfaktor P (dengan hasil dari **Contoh 5.18.1** untuk P = 15 kips) akan menjadi:

$$R_u = 3.96(22.8/15) = 6.02 \text{ kips/inch}$$

$$\text{Resistansi las } \phi R_{nw} = 0.75a(0.707)(0.60F_{EXX})$$

$$= 0.75a(0.707)(0.60)70 = 22.3a$$

Kemudian, ukuran las yang dibutuhkan adalah:

$$a \text{ yang dibutuhkan} = \frac{R_u}{\phi R_{nw}} = \frac{6.02}{22.3} = 0.27 \text{ inch, katakanlah } \frac{5}{16} \text{ inch}$$

Gunakan las *fillet* $^5/_{16}$ inch E70.

(*b*) Metode analisis kekuatan. Pertama, harus dilakukan analisis kekuatan. Bagilah las horisontal berukuran 6 inch menjadi 6 segmen dan las vertikal sepanjang 8 inch menjadi 16 segmen masing-masing berukuran $^1/_2$ inch, meskipun biasanya dianggap cukup untuk selalu menggunakan segmen berukuran 1 inch. Modifikasi metode kekuatan digunakan bilamana R_i diambil sama dengan 7.42 kips/inch, yaitu apabila harga R hitungan melampui harga tersebut. Pusat sesaat ditemukan dengan *trial and error* sebesar–0.11.5 inch dari garis las vertikal; di mana tanda negatif menunjukkan bahwa lokasi pusat sesaat mengarah ke beban yang bekerja P. Rincian penyelesaian diberikan dalam **Tabel 5.18.2** dan **5.18.3**.

Tabel 5.18.2 Geometri dan $R_{i,\,ult}$, **Contoh 5.18.2**

Segmen (nomor)	Panjang (inch)	x (inch)	y (inch)	r_j (inch)	θ_1 (derajat)	$\Delta_{i,\,maks}$ (inch)	Δ_i (inch)	R_i, *ult* (kips)
1	1	0.39	4.00	4.02	5.5	0.0776	0.0208	11.491
2	1	1.39	4.00	4.23	19.1	0.0525	0.0219	13.487
3	1	2.39	4.00	4.66	30.8	0.0436	0.0241	14.299
4	1	3.39	4.00	5.24	40.2	0.0391	0.0271	14.712
5	1	4.39	4.00	5.94	47.6	0.0364	0.0307	14.952
6	1	5.39	4.00	6.71	53.4	0.0347	0.0347	15.104
7	0.50	–0.12	3.75	3.75	–88.2	0.0278	0.0194	7.835
8	0.50	–0.12	3.25	3.25	–88.0	0.0278	0.0168	7.834
9	0.50	–0.12	2.75	2.75	–87.6	0.0279	0.0142	7.832
10	0.50	–0.12	2.25	2.25	–87.1	0.0280	0.0116	7.829
11	0.50	–0.12	1.75	1.75	–86.2	0.0281	0.0091	7.824
12	0.50	–0.12	1.25	1.26	–84.7	0.0283	0.0065	7.815
13	0.50	–0.12	0.75	0.76	–81.3	0.0288	0.0039	7.795
14	0.50	–0.12	0.25	0.28	–65.3	0.0318	0.0014	7.670

Tabel 5.18.3 Penyelesaian untuk **Contoh 5.18.2***b* (r_0 = –0.115 inch)

Segmen (nomor)	Hitungan R_i (kips)	Digunakan R_i (kips)	$(R_i)_y$ (kips)	$R_i r_i$ (kips–inch)
1	10.49	7.42	0.71	29.83
2	12.53	7.42	2.32	31.27
3	13.61	7.42	3.72	34.32
4	14.29	7.42	4.74	38.59
5	14.73	7.42	5.45	43.70
6	14.99	7.42	5.93	49.41
7	7.62	3.72	–0.11	13.93
8	7.47	3.72	–0.13	12.07
9	7.22	3.72	–0.16	10.22
10	6.80	3.72	–0.19	8.36
11	6.10	3.72	–0.24	6.51
12	4.99	3.72	–0.34	4.66
13	3.35	3.35	–0.50	2.54
14	1.46	1.46	–0.61	0.40
			Σ = 20.59	285.80

Dari **Persamaan 5.17.9** dan dengan dikalikan 2 karena simetri, akan diperoleh:

$$P_n = \frac{\Sigma R_i r_i}{e + r_0} = \frac{2(285.80)}{14.0 - 0.115} = 41.2 \text{ kips}$$

$$P_n = \Sigma(R_i)_y = 2(20.59) = 41.2 \text{ kips}$$

Kekuatan nominal P_n = 41.2 kips. Ini merupakan kekuatan dengan las $^1/_4$ inch, elektroda E70, dan proses SMAW. Kekuatan desain ϕP_n-nya adalah 0.75(41.2) = 30.9 kips. Ukuran las yang dibutuhkan adalah:

$$P_u = 22.8 \text{ kips} = \phi P_n = 30.9 \frac{a}{0.25}$$

$$\text{Luas las yang dibutuhkan } a = \frac{22.8(0.25)}{30.9} = 0.18 \text{ inch}$$

(c) Gunakan tabel-tabel Manual LRFD [1.17], p. 5-103. Untuk las $^1/_4$ inch dengan elektroda E70:

$$a = (e - xL)/L = (14.0 - 1.80)/8 = 1.525$$

$$k = kL/L = 6.0/8 = 0.75$$

	k = 0.7	0.75	0.8	
a = 1.4			1.11	
	0.983		1.011	c = 0.952
1.525	0.893	0.952	0.99	
1.6	0.874			

Harga menurut tabel = $\phi P_n = CC_1DL = 0.952(1.0)(4)8 = 30.5$ kips

Seperti terlihat, tabel-tabel LRFD pada hakikatnya memberikan hasil yang sama dengan yang diperoleh pada bagian (*b*).

(d) Rangkuman. Ukuran las *a* yang dibutuhkan dengan elektroda E70 dan proses SMAW adalah:

Metode (vektor) elastik, *a* yang dibutuhkan = $^5/_{16}$ inch.

Analisis kekuatan, *a* yang dibutuhkan = $^3/_{16}$ inch.

Yang jelas akan selalu terjadi, metode vektor elastik bersifat konservatif.

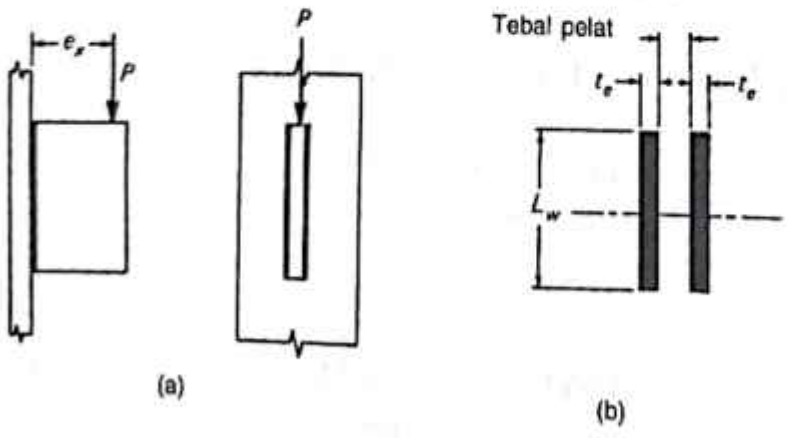
5.19 Beban-beban Eksentrik terhadap Bidang Las

Bila suatu beban bekerja eksentrik terhadap *bidang* konfigurasi las, seperti **Gambar 5.19.1**, metode analisis kekuatan masih dapat digunakan selama bidang las tersebut *rigid*. Dalam **Gambar 5.19.1**, bidang las *rigid* karena las berada di setiap sisi pelat; yakni, terdapat rigiditas yang cukup pada kedua baris las sedemikian rupa sehingga *material yang sedang dilas* tidak mengalami lenturan pada bidang lasnya.

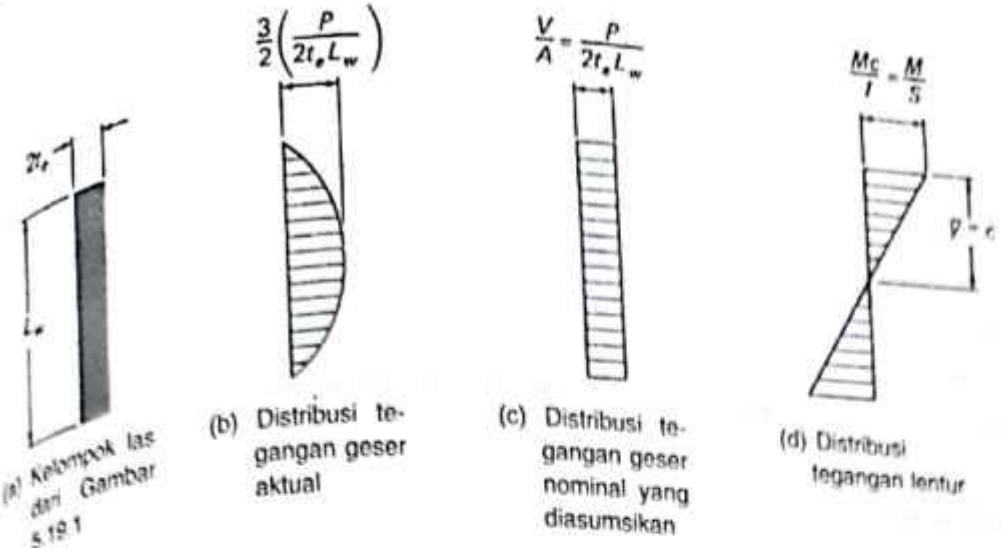
Seperti telah dibahas dalam **Bagian 5.17**, kekuatan segmen las tergantung pada sudut θ_i dari gaya yang memberikan resistansi R_i terhadap sumbu las. Tidak ada perbedaan apakah R_i bekerja pada suatu sudut terhadap bidang las (**Gambar 5.19.1**) atau bekerja pada bidang las itu sendiri (geser eksentrik seperti dalam **Bagian 5.17** dan **5.18**).

Situasi dalam **Gambar 5.19.1** biasa disebut sebagai geser dan lentur yang sebenarnya merupakan kondisi tegangan pada pelat konsol yang mendukung beban *P*. Las tersebut harus memikul beban dengan cara yang sama seperti yang dilakukan batang-batang yang disambungkan. Dalam **Gambar 5.19.2** diperlihatkan tegangan-tegangan yang dimaksud.

Untuk pembebanan konfigurasi las dalam geser dan tarik, kita harus menyadari bahwa segmen-segmen las yang terkena tekan tidak bebas rotasi; dengan demikian, pada saat melakukan analisis kekuatan, daerah tekan harus diasum-



Gambar 5.19.1 *Las dalam geser dan lentur*



Gambar 5.19.2 Tegangan-tegangan pada garis-garis vertikal las yang bekerja dalam geser dan lentur

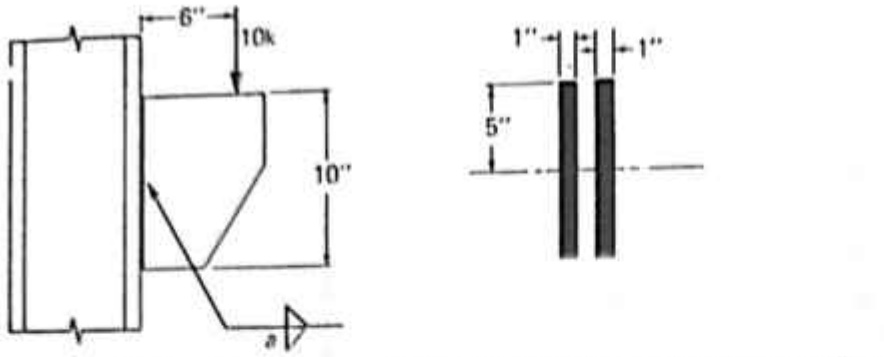
sikan memiliki distribusi tegangan tekan di antara bagian-bagian yang dilas. Dawe dan Kulak [5.38] melaporkan bahwa kesesuaian yang relatif bagus dengan hasil pengujian dapat diperoleh dengan menggunakan distribusi tegangan segitiga, parabolik, atau persegi panjang pada sisi tekan sumbu netralnya.

Manual LRFD [1.17] tidak berisi tabel-tabel untuk kasus geser dan lentur. Penggunaan tabel-tabel untuk geser eksentrik dianjurkan [1.17] bagi semua kasus di mana "material sambungan antara las-las itu bersifat *solid* dan tidak melentur pada bidang lasnya".

Alternatif lain, metode (vektor) elastik cukup konservatif dan relatif mudah digunakan untuk pembebanan dalam geser dan tarik.

Dengan demikian, ada empat metode (No. 2 dan 3 sebenarnya identik) yang dianjurkan penggunaannya:

1. Analisis kekuatan dengan membagi las pada sisi tarik sumbu netral menjadi segmen-segmen; di sini resistansi masing-masing segmennya tergantung pada sudut antara arah resistansi dan sumbu las, dan rumus-rumus yang digunakan terdapat dalam **Bagian 5.17**. Las pada sisi tekan pada sumbu netral diasumsikan hanya memiliki resistansi yang sejajar sumbu las. Gaya tekan akibat lentur diasumsikan akan dipikul menurut arah tekan bagian-bagian yang dilas dengan menggunakan distribusi tegangan segitiga dengan tegangan leleh terletak pada serat tekan terluar. Lokasi pusat sesaat kemudian ditentukan dengan *trial and error* serupa dengan yang digunakan untuk geser eksentrik. Rincian prosedurnya diuraikan oleh Dawe dan Kulak [5.38].
2. Analisis kekuatan persis sama untuk geser eksentrik. Dalam prosedur ini semua segmen las, baik pada sisi tekan maupun tarik sumbu netral, diasumsikan memiliki resistansi. Prosedur ini akan memberikan harga-harga dalam tabel Manual LRFD.
3. Tabel-tabel Manual LRFD.
4. Analisis (vektor) elastik.



(a) Konsol (b) Penampang lintang las yang diasumsikan

Gambar 5.19.3 Contoh 5.19.1

■ Contoh 5.19.1

Hitunglah ukuran las *fillet* yang dibutuhkan untuk sambungan geser dan tarik dalam **Gambar 5.19.3*a*** dengan proses SMAW. Asumsikan bahwa kolom dan pelat konsolnya tidak menentukan. Pembebanan 80% beban hidup dan 20% beban mati dan gunakan *Load and Resistance Factor Design.*

Penyelesaian:

(a) Hitunglah beban terfaktor P_u:

$$P_u = 1.2(0.2)10 + 1.6(0.8)10 = 15.2 \text{ kips}$$

(b) Gunakan metode (vektor) elastik tradisional. Segmen-segmen las diperlakukan sebagai garis dengan ketebalan satu (1.0). Komponen geser langsung diasumsikan dipikul seragam oleh setiap segmen las :

$$(R_n)_v = \frac{P}{A} = \frac{P}{2(1)L_w} = \frac{15.2}{2(1)10} = 0.76 \text{ kips/inch}$$

Komponen tarik (horisontal) karena momen P_e adalah:

$$(R_n)_t = \frac{Mc}{I} = \frac{15.2(6)5}{166.7} = 2.74 \text{ kips/inch}$$

di mana $I = \frac{1}{12}[2(1)(10)^3] = 166.7 \text{ inch}^4$.

Gaya resultannya adalah :

$$\phi R_n \text{ yang dibutuhkan} = \sqrt{(0.76)^2 + (2.74)^2} = 2.84 \text{ kips/inch}$$

Kekuatan desain las *fillet* dengan elektroda E70 adalah:

$$\phi R_{nw} = \phi t_e(0.60F_{EXX}) = 0.75(0.707)a(0.60)70 = 22.3a$$

dan ukuran las *fillet* a yang dibutuhkan adalah:

$$a \text{ yang dibutuhkan} = \frac{2.84}{22.3} = 0.13 \text{ inch, katakanlah } \frac{3}{16} \text{ inch}$$

(*c*) Gunakan tabel-tabel Manual LRFD [1.17], p.5-91. Untuk las dengan elektroda E70:

$$a = e/L = 6/10 = 0.60$$
$$k = 0$$
C ditemukan = 1.107

Harga menurut tabel = $\phi P_n = CC_1DL = 1.107(1.0)(D)10 = 11.07D$ kips

D yang dibutuhkan = 15.2/11.07 = 1.4

a yang dibutuhkan = 1.4/16 = 0.09 inch, katakan $\frac{1}{8}$ inch

Metode (vektor) elastik, seperti yang diharâpkan, ternyata lebih konservatif ketimbang metode kekuatan yang diwakili oleh tabel-tabel Manual LRFD. Ukuran minimum yang diinginkan untuk situasi ini barangkali sebesar $^3/_{16}$ inch.
Gunakan las *fillet* $^3/_{16}$ inch E70. ■

5.19.1 Desain Garis-garis Las yang Terkena Momen lentur

Meskipun ada beberapa belokan pada puncak garis-garis las *fillet*, perkiraan panjang yang dibutuhkan dapat diperoleh dengan pendekatan yang sama dengan yang digunakan untuk menentukan banyaknya baut dalam satu garis seperti pada **Bagian 4.12**. Dalam **Gambar 4.12.9**, satuan R/p adalah kips/inch dan menjadi ϕR_{nw}, yakni kekuatan desain pada puncak garis las.

Untuk momen saja pada satu garis las:

$$R = \frac{M}{S} = \frac{M}{(^1/_6 L_w^2)} \text{ kips/inch} \qquad (5.19.1)$$

Karena harga maksimum dari R adalah ϕR_{nw}:

$$\phi R_{nw} = \frac{6M}{L_w^2}$$

$$L_w \text{ yang dibutuhkan} = \sqrt{\frac{6M}{\phi R_{nw}}} \qquad (5.19.2)$$

Persamaan 5.19.2 untuk las bersesuaian dengan **Persamaan 4.12.28** untuk baut.

Persamaan tersebut hanya tepat untuk momen saja, maka untuk memperhitungkan geser langsung R_{nw} harus dimasukkan sebagai harga yang telah direduksi.

■ Contoh 5.19.2

Tentukan panjang L yang dibutuhkan untuk memikul beban seperti dalam **Gambar 5.19.4** dengan 75% beban hidup dan 25% beban mati. Digunakan las *fillet* E70 berukuran $^5/_{16}$ inch. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC.

Penyelesaian:

(a) Hitunglah beban terfaktor P_u:

$$P_u = 1.2(0.25)40 + 1.6(0.75)40 = 60 \text{ kips}$$

(b) Taksirlah panjang las yang dibutuhkan L dengan **Persamaan 5.19.2**:

$$\phi R_{nw} = 0.75(a)(0.707)(0.60)70 = 22.3\,a \text{ kips/inch}$$

$$= 22.3(5/16) = 6.96 \text{ kips/inch.}$$

$$M_u = 60(4) = 240 \text{ inch kips per 2 baris las}$$

$$L \text{ yang dibutuhkan} \approx \sqrt{\frac{6M_u}{\phi R_{nw}}} = \sqrt{\frac{6(240/2)}{6(\text{est})}} = 11 \text{ inch}$$

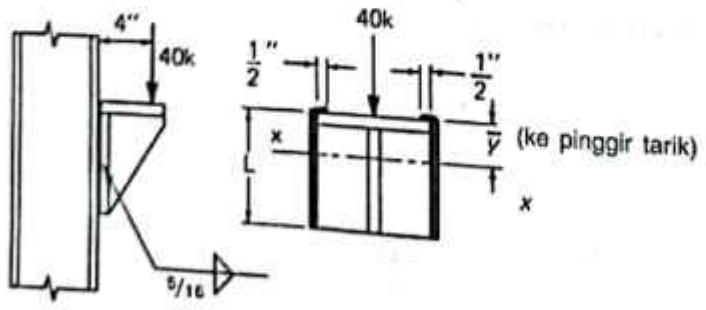
Harga ϕR_{nw} yang direduksi telah digunakan untuk memperhitungkan efek geser langsung. Karena belokan $^1/_2$ inch pada puncak sedikit memberikan tambahan: cobalah $L = 10$ inch.

(c) Bila belokan diabaikan, tabel-tabel Manual LRFD [1.17], p. 5-91 dapat digunakan untuk memperoleh hasil pendekatan sebagai berikut:

$$a = e/L = 4/10 = 0.40$$

$$k = 0$$

$$C \text{ ditemukan} = 1.549$$



Gambar 5.19.4 Contoh 5.19.2

PERPUSTAKAAN D III F. TEKNIK

Harga menurut tabel = $\phi P_n = CC_1DL = 1.549(1.0)(a)10 = 15.49D$ kips

D yang dibutuhkan = 60/15.49 = 3.9

a yang dibutuhkan = 3.9/16 = 0.24 inch, katakan $\frac{1}{4}$ inch

Untuk L = 8 inch:

Ditemukan C = 1.299, a yang dibutuhkan = 0.29 inch, katakan $^5/_{16}$ inch.

(d) Metode (vektor) elastik. Konfigurasi las sebenarnya mempunyai belokan $^1/_2$ inch yang membuat pusat berat konfigurasi las terletak lebih dekat dengan punggungnya ketimbang dengan pertengahan kedalaman sebagaimana diasumsikan dalam bagian (*c*). Demikian pula, tidak ada indikasi dalam tabel-tabel LRFD bahwa tabel-tabel itu harus digunakan bila beban dikenakan sedemikian rupa sehingga menimbulkan momen dan geser. Dengan demikian, lebih bijaksana menggunakan analisis (vektor) elastik yang konservatif.

Tentukan lokasi pusat berat konfigurasi itu:

$$\bar{y} = \frac{2(10)5}{2(10 + 0.5)} = \frac{100}{21} = 4.76 \text{ inch}$$

Komponen geser langsung $(R_n)_v$ dihitung berdasar asumsi bahwa geser sama sekali tidak dipikul belokan:

$$(R_n)_v = \frac{P}{2L} = \frac{60}{2(10)} = 3.00 \text{ kips}$$

Komponen tarik yang disebabkan oleh momen Pe adalah:

$$I_x = \frac{2L^3}{12} + 2L(5 - 4.67)^2 + 2(0.5)(4.76)^2$$

$$= \frac{(10)^3}{6} + 20(0.24)^2 + (4.76)^2 = 190.5 \text{ inch}^3$$

$$(R_n)_t = \frac{60(4)4.76}{190.5} = 6.00 \text{ kips/inch}$$

Gaya resultannya adalah:

ϕR_n yang dibutuhkan = $\sqrt{(3.00)^2 + (6.00)^2} = 6.71$ kips/inch

Kekuatan desain las *fillet* elektroda E70 berukuran $^5/_{16}$ inch adalah:

$$\phi R_{nw} = \phi t_e(0.60F_{EXX})$$

$$= 0.75(0.707)(^5/_{16})(0.60)70 = 6.97 \text{ kips/inch}$$

Kekuatan desain ϕR_{nw} melampaui harga 6.71 kips/inch yang dibutuhkan; dengan demikian $l = 10$ inch sudah mencukupi.

Gunakan $l = 10$ inch.

Pembahasan beban eksentrik lainnya terhadap las dapat ditemukan dalam Bab 13 tentang sambungan.

Acuan Terpilih

5.1. K. Winterton. "A Brief History of Welding Technology," *Welding and Metal Fabrication*, November 1962; December 1962.

5.2. "100 Years of Metalworking—Welding, Brazing and Joining," *The Iron Age*, June 1955.

5.3. H. Carpmael. *Electric Weeding and Welding Appliances*. London: D. Van Nostrand Company, 1920.

5.4. Preston M. Hall. " 77 Years of Resistance Welding." *The Welding Engineer*, February 1954, 54–55, March 1954, 36–37; April 1954, 62–63.

5.5. W. L. Miskoe. "The Centenary of Modern Welding, 1885-1985—A Commemoration," *Welding Journal*, 65, April 1986, 1924.

5.6. D. W. Morgan. "Classification and Use of Mild Steel Covered Electrodes," *Welding Journal*, December 1976, 1035–1038.

5.7. E. Craig. "A Unique Mode of GMAW Transfer," *Welding Journal*, 66, September 1987, 51–55.

5.8. K. A. Lyttle. "GMAW—A Versatile Process on the Move," *Welding Journal*, 62, March 1983, 15-23.

5.9. V. R. Dillenbeck and L. Castagno. "The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel," *Welding Journal*, 66, September 1987, 45–49. (Lihat juga surat dari Nils Larson, Chairman, Committees CSO dan ASS, American Welding Society, dan jawaban penulis, 67, March 1988, 6.)

5.10. AWS. *Welding Handbook*, 7th ed., Vols. 2 and 3. Miami, FL: American Welding Society, 1978, 1980.

5.11. ———. "Office Building Columns Field Spliced with SelfShielded Welding Wire," *Welding Journal*, 65, October 1986, 53–54.

5.12. ———. "Self-Shielded FCAW Speeds High-Rise Construction," *Welding Journal*, 63, April 1984, 47–49.

5.13. ———. "Self-Shielded FCAW Welding is a Breeze in the Windy City," Welding *Journal*, 67, March 1988, 47–48.

5.14. A. Raman. "Electroslag Welds: Problems and Cures," *Welding Journal*, 60, December 1981, 17–21.

5.15. C. G. Schilling and K. H. Klippstein. "Tests of Electroslag-Welded Bridge Girders," *Welding Journal*, 60, December 1981, 23–30.

5.16. A. W. Pense, J. D. Wood, and J. W. Fisher. "Recent Experiences with

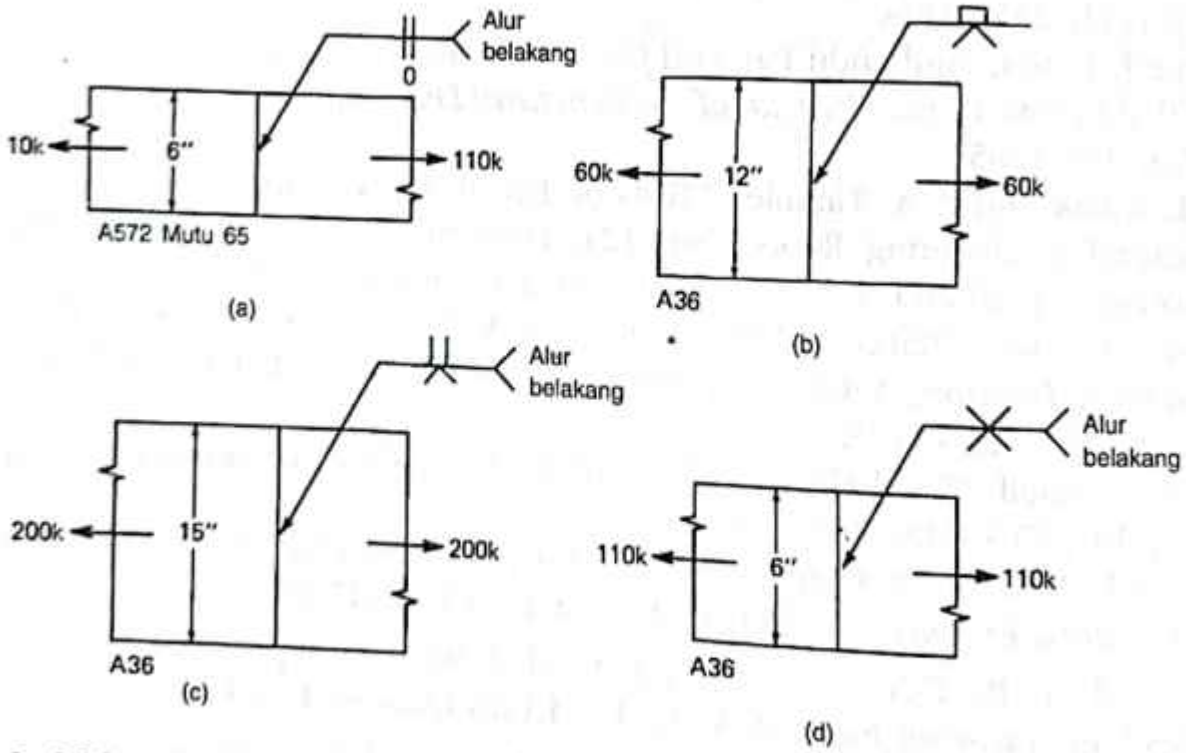
Electroslag Welded Bridges," *Welding Journal*, 60, December 1981, 33–42.
5.17. Omer W. Blodgett. "Distortion... How to Minimize it with Sound Design Practices and Controlled Welding Procedures Plus Proven Methods for Straightening Distorted Members," *Bulletin* G261. Cleveland, OH: The Lincoln Electric Company. (No date)
5.18. Omer W. Blodgett. "Shrinkage Control in Welding," Civil *Engineering*, November 1960, 56–61.
5.19. E. R. Holby. "Weld Appearances May Be Deceiving," *Welding Journal, 63*, May 1984, 33–36.
5.20. J. E. Jones. "Inspecting for Fatigue," *Welding Journal*, 62, May 1983, 21–24.
5.21. R. Fenn. "Ultrasonic Monitoring and Control During Arc Welding," *Welding Journal*, 64, September 1985, 18–22.
5.22. Paul D. Watson. "Design for Welding Examination," *Welding Journal, 61*, February 1982, 32–35.
5.23. C.M. Fortunko and R.E. Schramm. "Ultrasonic Nondestructive Evaluations of Butt Welds Using Electromagnetic-Acoustic Transducers," *Welding Journal*, 61, February, 1982, 39–46
5.24. Ronald Selner. " Dye Penetrant and Magnetic Particle Inspection," *Welding Journal*, 61, February 1982, 28–31.
5.25. AWS. *Structural Welding Code—Steel* (ANSI/AWS D1.188), 11th edition. Miami, FL: American Welding Society, 1988 [same as 2.24].
5.26. J. A. Donnelly. "Determining the Cost of Welded Joints," *Engineering Journal*, AISC, 5, 4 (October 1968), 146-147.
5.27. Omer W. Blodgett. "How to Determine the Cost of Welding," *Bulletin C610*. Cleveland, OH: The Lincoln Electric Company. (No date)
5.28. L. J. Butler and G. L. Kulak. "Strength of Fillet Welds as a Function of Direction of Load," *Welding Journal* (Welding Research Supplement), 36, May 1971, 231s–234s.
5.29. Lorne J. Butler, Shubendu Pal, and Geoffrey L. Kulak. "Eccentrically Loaded Welded Connections," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 98, STS (May 1972), 989–1005.
5.30. G. L. Kulak and P. A. Timmler. "Tests on Eccentrically Loaded Fillet Welds," Structural Engineering Report No. 124, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, December, 1984 (23 pp).
5.31. Peter Swannell. "Rational Design of Fillet Weld Groups," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 107, STS (May 1981), 789–802. Disc. 108, STS (May 1982), 1197–1198.
5.32. Peter Swannell. "Weld Group Behavior," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 107, STS (May 1981), 803–815.
5.33. Vernon V. Neis. "New Constitutive Law for Equal Leg Fillet Welds," *Journal of Structural Engineering*, 111, 8, August 1985,1747–1759.
5.34. Raymond H. R. Tide. "Eccentrically Loaded Weld Groups—AISC Design Tables," *Engineering Journal*, AISC, 17, 4 (4th Quarter 1980), 90–95.
5.35. Raymond H. R. Tide. Disc. of "Rational Design of Fillet Weld Groups,"

Journal of the Structural Division, ASCE, 108, STS (May 1982),1197–1198.
5.36. G. Donald Brandt. "A General Solution for Eccentric Loads on Weld Groups," *Engineering Journal*, AISC, 19, 3 (3rd Quarter 1982),150–159.
5.37. Kenneth M. Loomis, William A. Thornton, and Thomas Kane. "A Design Aid for Connection Angle Welds Subjected to Combined Shear and Axial Loads," *Engineering Journal*, AISC, 22, 4 (4th Quarter 1985),178–196.
5.38. John L. Dawe and Geoffrey L. Kulak. "Welded Connections under Combined Shear and Moment," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 100, ST4 (April 1974), 727–741.
5.39. AWS. *Symbols for Welding, Brazing and Nondestructive Examination* (A2.4–86). Miami, FL: American Welding Society, 1986.

Soal-soal

Semua soal hendaknya dikerjakan menurut *Load and Resistance Factor Design* AISC atau *Allowable Stress Design* seperti yang ditunjukkan. Semua beban yang diberikan merupakan beban layanan, kecuali bila diberi keterangan lain. Apabila mungkin, tunjukkan semua jawaban dalam sebuah sketsa (digambar skalatis) dengan menggunakan simbol-simbol pengelasan yang tepat.

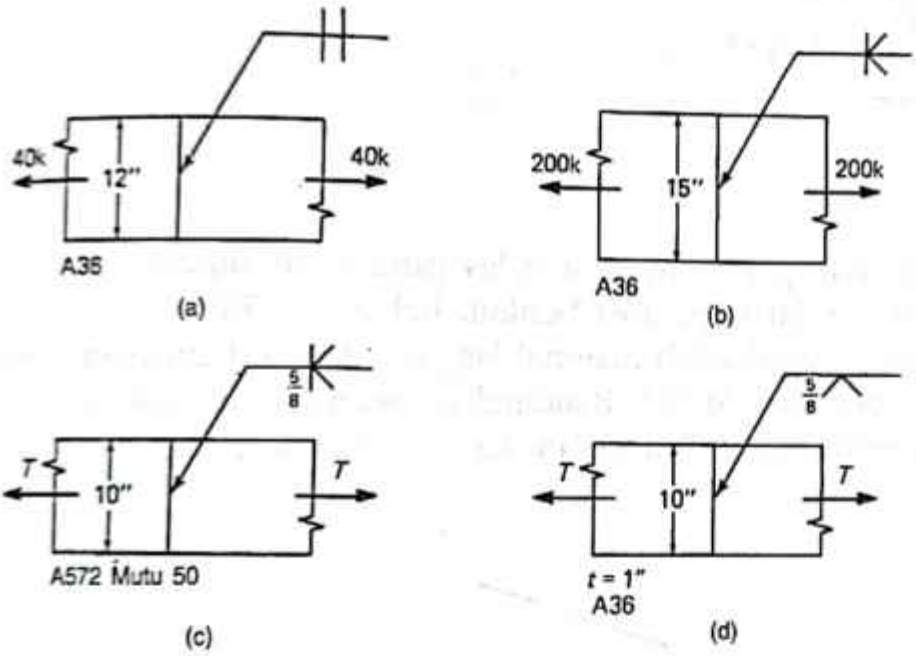
5.1 Secara spesifik, identifikasikan Penamaan Sambungan AWS D1.1 bagi masing-masing *butt joint* yang telah di—"prakualifikasi" berikut ini yang dibuat dengan *submerged arc process* (SAW). Spesifikasikan ketebalan yang tepat untuk masing-masing pelat, sudut *groove*, bukaan akar, dan persyaratan-persyaratan lain untuk las tersebut. Bebannya 85% beban hidup dan 15% beban



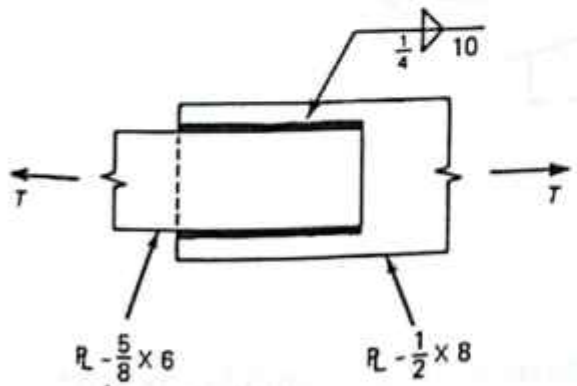
Soal 5.1

mati. Mengaculah pada aWS D1.1 [2.24], Manual ASD [1.7] bagian "SAM-BUNGAN LAS", atau Manual LRFD [1.17] bagian "SAMBUNGAN LAS". Sambungan yang diberikan (*a*) las *groove* bujur sangkar, penetrasi penuh; (*b*) Las *groove* V-tunggal, penetrasi penuh; (*c*) Las *groove* V—ganda, penetrasi penuh.

5.2 Secara spesifik, identifikasikan Penamaan Sambungan AWS D1.1 untuk masing-masing *butt joints* yang telah di—"prakualifikasi" berikut ini, yang dibuat dengan *shielded metal arc process* (SMAW). Spesifikasikan ketebalan yang tepat untuk masing-masing pelat, atau tentukan kapasitas beban layanan dengan asumsi 85% beban hidup dan 15% beban mati. Tunjukkan segala pembatasan yang terkait dengan ketebalan dan gambarlah penampang lintang setiap las. Mengaculah pada AWS D1.1 [2.24], Manual ASD [1.7] bagian "SAMBUNGAN LAS" atau Manual LRFD [1.17] bagian "SAMBUNGAN LAS". Sambungan yang diberikan adalah (*a*) Las *groove*—bujur sangkar, penetrasi penuh; (*b*) Las *groove*—serongan ganda, penetrasi penuh; (*c*) Las *groove* serongan ganda, penetrasi parsial; dan (*d*) Las *groove* V—tunggal, penetrasi parsial.



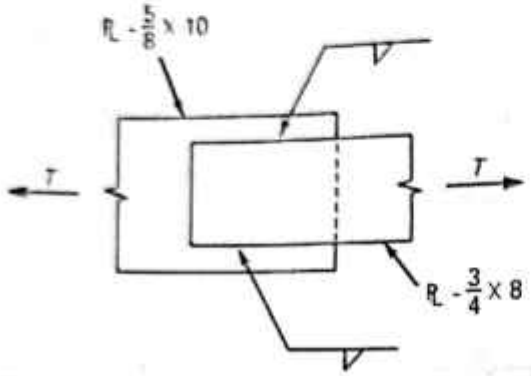
Soal 5.2



Soal 5.3

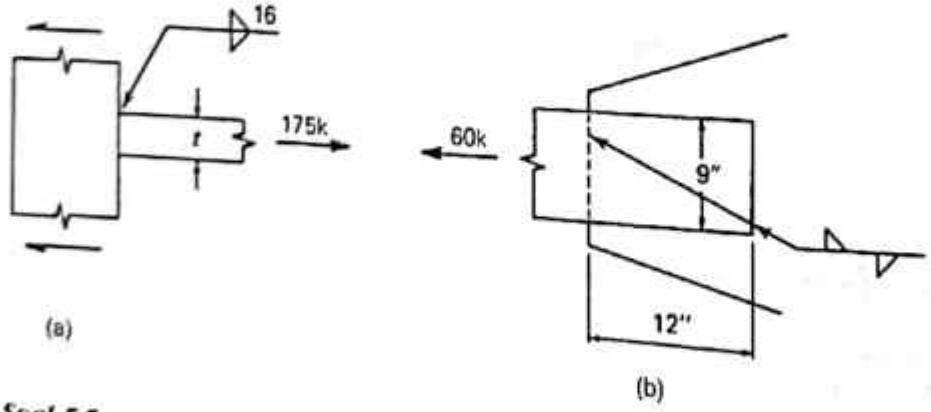
5.3 Tentukan kapasitas beban layanan T untuk sambungan dalam gambar berikut, bila digunakan proses *submerged arc welding* (SAW). Bebannya, 85% beban hidup dan 15% beban mati. Gunakan (*a*) Baja A36, dan (*b*) Baja A572 Mutu 65. Asumsikan bahwa digunakan material elektroda yang tepat.

5.4 Spesifikasikan las *fillet* yang dibutuhkan untuk menghasilkan kekuatan sambungan dalam gambar berikut. Nyatakanlah beban layanan maksimum T yang boleh dipikul. Bebannya, 90% beban hidup dan 10% beban mati. Spesifikasikan material fluks-elektroda yang tepat bila digunakan *submerged arc process*. Gunakan (*a*) Baja A572 Mutu 42, dan (*b*) Baja A514.



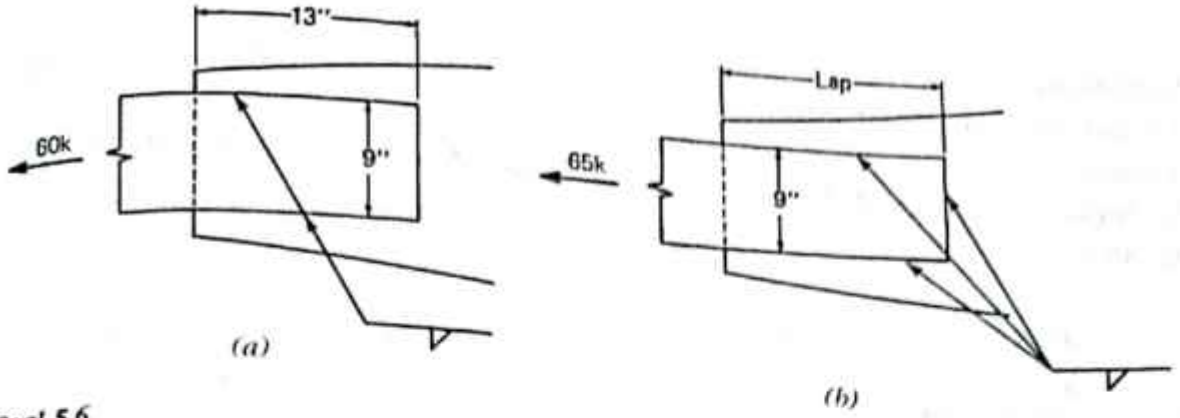
Soal 5.4

5.5 Spesifikasikan ketebalan pelat dan ukuran las yang harus digunakan untuk sambungan-sambungan dalam gambar berikut. Bebannya, 70% beban hidup dan 30% beban mati. Nyatakanlah material las yang harus digunakan untuk *shielded metal arc process* (SMAW). Bandingkan penggunaan baja A36 dan A572 untuk setiap sambungan. Tunjukkan desain yang lebih baik untuk setiap sambungan.



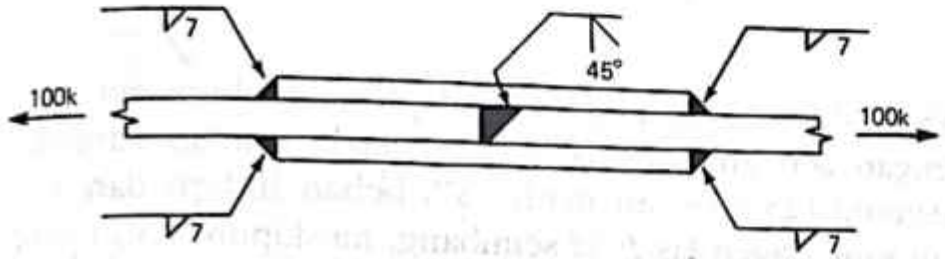
Soal 5.5

5.6 Untuk sambungan-sambungan dalam gambar berikut, penuhilah persyaratan yang diminta dalam **Soal 5.5**.



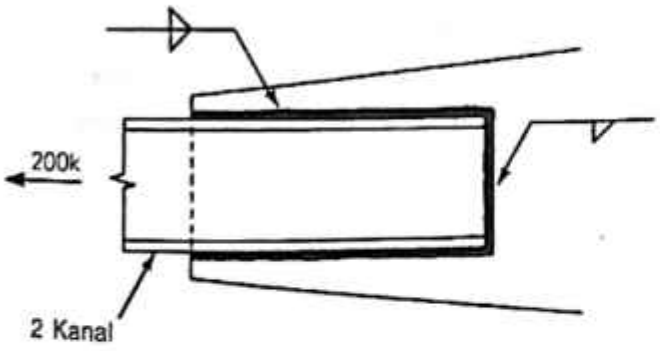
Soal 5.6

5.7 Desainlah sambungan lewatan (*lap joint*) dengan perkuatan dalam gambar berikut. Pelatnya dari baja A36 dengan lebar 7 inch dan dilas dengan proses SMAW. Mengaculah pada Penamaan Sambungan AWS BTC-P4. Bebannya adalah 25% beban mati dan 75% beban hidup.



Soal 5.7

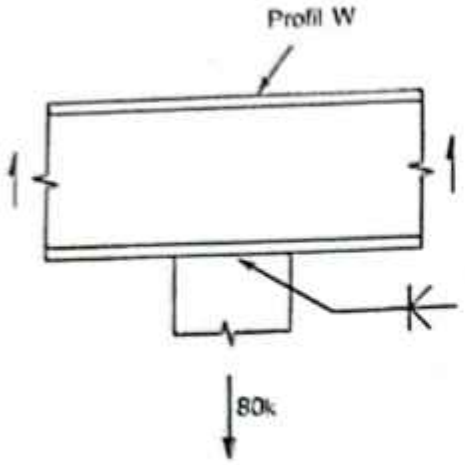
5.8 Pilihlah sepasang kanal dan desainlah las *fillet* dengan proses SMAW. Pembebanannya, 85% beban hidup dan 15% beban mati. Bandingkan untuk (*a*) Baja A36 dan (*b*) Baja A572 Mutu 60.



Soal 5.8

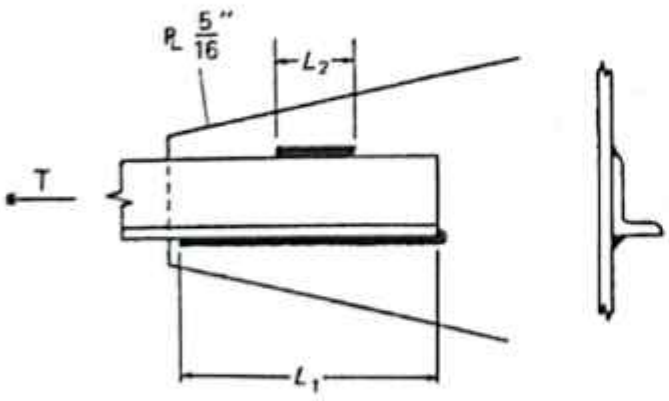
5.9 Desainlah pelat tarik yang direkatkan pada profil flens lebar (W) maupun sambungan lasnya dengan asumsi penggunaan proses SMAW. Bebannya, 70% beban hidup dan 30% beban mati.
(*a*) Gunakan baja A572 Mutu 42.

(*b*) Gunakan baja A572 mutu 65.
(*c*) Gunakan baja A572 Mutu 42, dengan las *fillet* sebagai ganti dari las *groove*.
(*d*) Gunakan baja A572 Mutu 65, dengan las *fillet* sebagai ganti dari las *groove*.



Soal 5.9

5.10 Sebuah baja siku A572 Mutu 50 berukuran $5\times3^{1}/_{2}\times{}^{3}/_{8}$ dihubungkan pada kaki panjangnya dengan sebuah pelat buhul $^{5}/_{16}$ inch. Carilah kapasitas beban layanan maksimum (25% beban mati, 75% beban hidup) dari siku tersebut, dan gunakan sambungan las *fillet* seimbang, meskipun AISC mengijinkan pengabaian eksentrisitas dalam kasus-kasus beban statik. Digunakan proses SMAW. Nyatakanlah kapasitas beban layanan. Gunakan persyaratan-persyaratan berikut untuk desainnya:
(*a*) Las berukuran $^{5}/_{16}$ inch pada telapak dan punggung, dan tidak ada las pada ujung.
(*b*) Las berukuran $^{1}/_{4}$ inch pada telapak dan $^{3}/_{8}$ inch pada punggung, dan tidak ada las pada ujung.

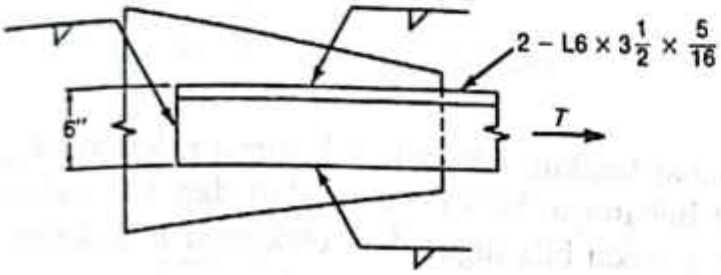


Soal 5.10

5.11 Desainlah sambungan seimbang untuk dua siku $7\times4\times{}^{1}/_{2}$ yang dihubungkan pada kaki-kaki panjang mereka dengan sebuah pelat buhul $^{3}/_{8}$ inch. Carilah

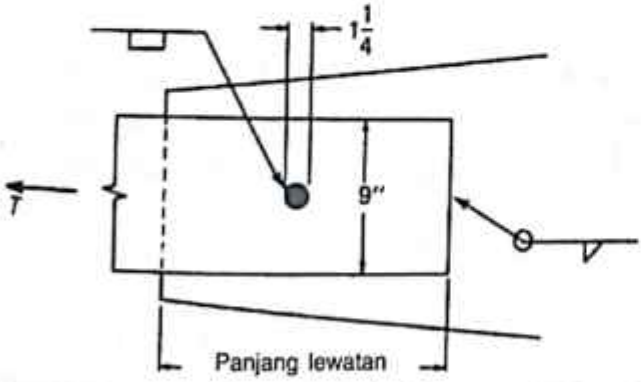
kapasitas beban layanan maksimum (20% beban mati; 80% beban hidup) dan nyatakanlah harganya. Digunakan baja A572 Mutu 60 dan las dengan proses SMAW. Buatlah detil sambungan yang seimbang dengan beban-beban namun masih tetap memungkinkan panjang lewatan (*overlap*) sependek mungkin.

5.12 Desainlah las yang dapat menghasilkan kekuatan penuh pada profil siku dan yang dapat meminimumkan eksentrisitas. Asumsikan beban layanannya 20% beban mati dan 80% beban hidup. Gunakan proses las SAW.
(*a*) Gunakan baja A36.
(*b*) Gunakan baja A572 Mutu 50.
(*c*) Gunakan baja A572 Mutu 65.
(*d*) Gunakan baja A36, tapi abaikan las pada ujung siku.
(*e*) Gunakan baja A572 Mutu 65, tapi abaikan pada ujung-ujung siku.



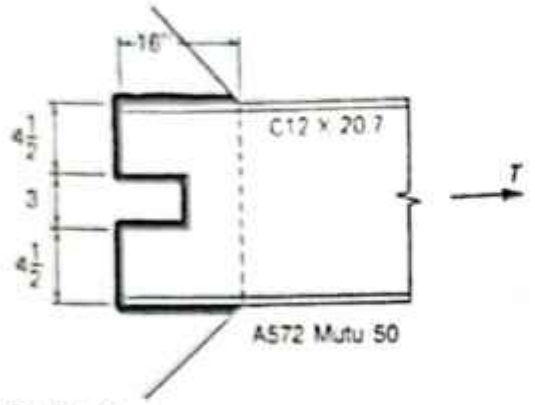
Soal 5.12

5.13 Asumsikan suatu pelat dengan lebar 9 inch yang digunakan pada suatu *lap joint* harus memikul beban sebesar 30 kips beban mati dan 115 kips beban hidup, dan ada kemungkinan aksidental terjadinya eksentrisitas yang tak dapat dihitung. Untuk menjamin diperolehnya sambungan yang lebih ketat, digunakan las *plug* berdiameter $1^1/_2$ inch. Tentukan ketebalan pelat, besarnya lewatan (*lap*) dan ukuran las untuk mendapatkan sambungan terbaik. Asumsikan pelat buhul yang dilas dengan pelat 9 inch tersebut tidak menentukan desain sama sekali. Gunakan proses SMAW dan baja A572 Mutu 50.



Soal 5.13

5.14 Tentukan panjang minimum suatu las *slot* sehingga diperoleh kekuatan penuh sebuah C12x20.7 yang dilaskan ke pelat $^3/_8$ inch. Gunakan las *fillet* berukuran sama di seluruh panjangnya, dan asumsikan bahwa las tersebut dipasang dengan proses SMAW. Asumsikan beban layanan 35% beban mati dan 65% beban hidup.



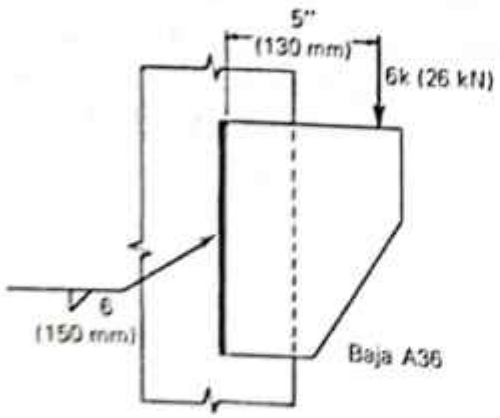
Soal 5.14

5.15 Untuk sambungan dalam gambar berikut, berapakah kekuatan desain ϕP_n maksimum yang dibutuhkan? Bebannya, 90% beban hidup dan 10% beban mati. Berapa ukuran las yang dipakai bila digunakan elektroda E70 dengan proses SMAW?

(*a*) Gunakan analisis kekuatan (yakni lokasikan pusat sesaat dengan coba-coba).

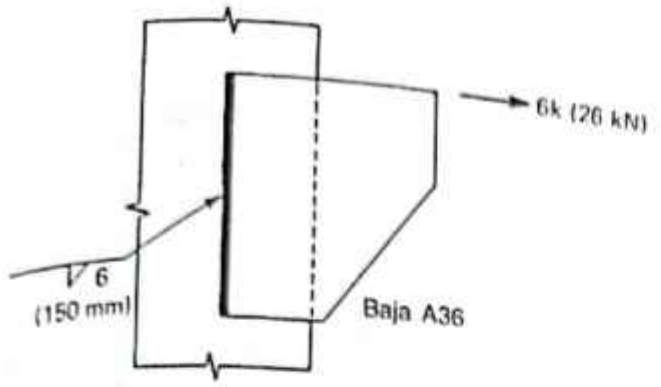
(*b*) Gunakan tabel-tabel Manual AISC, "ECCENTRIC LOADS ON WELD GROUPS".

(*c*) Gunakan metode (vektor) elastik.



Soal 5.15

5.16 Untuk sambungan dalam gambar berikut, penuhilah persyaratan-persyaratan dari **Soal 5.15**



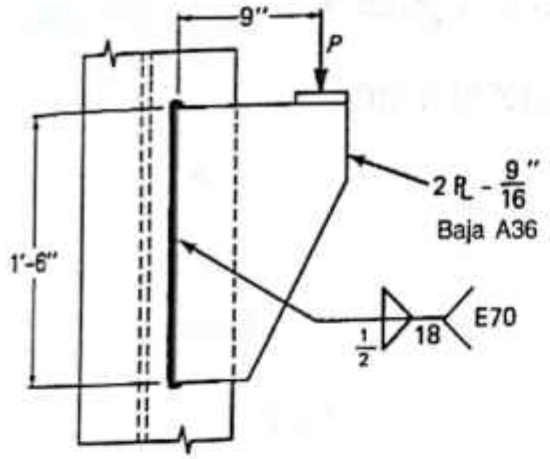
Soal 5.16

5.17 Untuk konsol dalam gambar berikut, hitunglah kapasitas beban layanan P (90% beban hidup dan 10% beban mati) berdasarkan lasnya. Abaikan belokan pada ujung-ujung, dan asumsikan bahwa digunakan proses SMAW.

(*a*) Gunakan analisis kekuatan (yakni lokasikan pusat sesaatnya dengan coba-coba).

(*b*) Gunakan tabel-tabel Manual AISC, "ECCENTRIC LOADS ON WELD GROUPS".

(*c*) Gunakan metode (vektor).



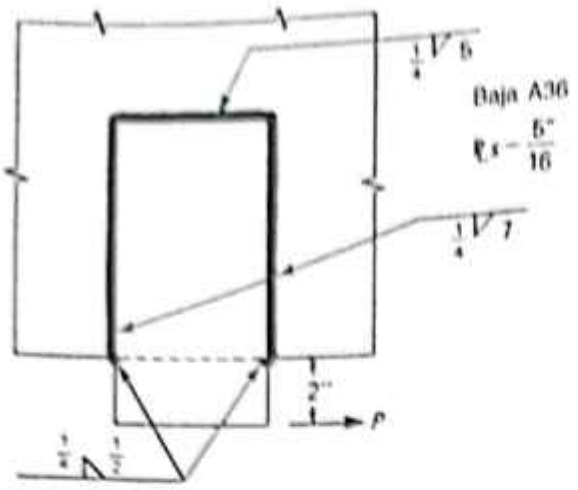
Soal 5.17

5.18 Hitunglah beban layanan maksimum yang dapat diterima P untuk sambungan dari gambar berikut. Bebannya, 85% beban hidup dan 15% beban mati. Abaikan efek belokan pada ujung bawah dari sambungan ini.

(*a*) Gunakan analisis kekuatan (yakni lokasikan pusat sesaatnya dengan coba-coba).

(*b*) Gunakan tabel-tabel Manual AISC, "ECCENTRIC LOADS ON WELD GROUPS".

(*c*) Gunakan metode (vektor) elastik.



Soal 5.18 dan 5.19

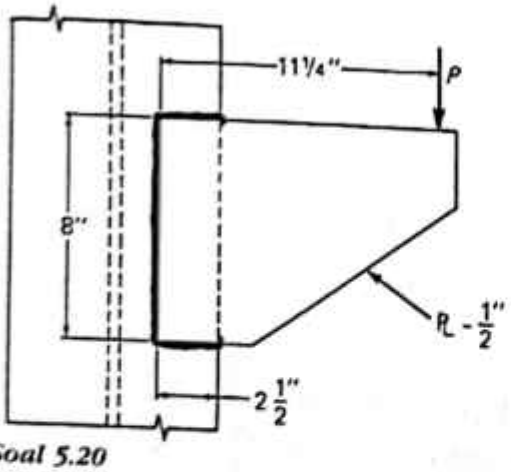
5.19 Ulangi **Soal 5.18** kecuali gunakan las *fillet* $^3/_8$ inch pada sisi dan $^1/_4$ inch pada ujung. Bajanya adalah A572 Mutu 50.

5.20 Hitunglah kapasitas beban layanan P untuk konsolan yang dilas dalam gambar berikut. Bebannya, 70% beban hidup dan 30% beban mati. Abaikan belokan pada ujung luar dari konfigurasi las profil C. Ukuran lasnya $^3/_8$ inch dan elektroda yang digunakan adalah E70 dalam *shielded metal arc process*.

(*a*) Gunakan analisis kekuatan (yakni lokasikan pusat sesaat dengan coba-coba).

(*b*) Gunakan tabel-tabel Manual AISC, "ECCENTRIC LOADS ON WELD GROUPS".

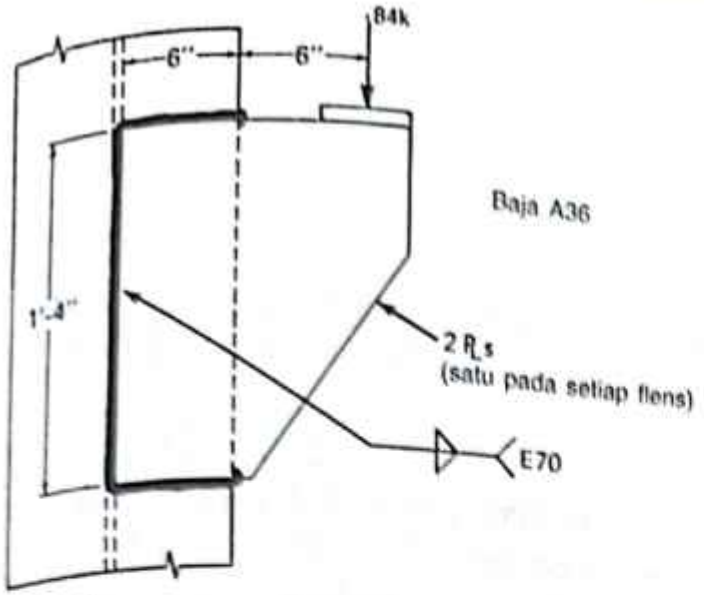
(*c*) Gunakan metode (vektor) elastik.



Soal 5.20

5.21 Ulangi **Soal 5.20** bila dimensi vertikal dari konfigurasi lasnya adalah 12 inch dan bukan 8 inch.

5.22 Ulangi **Soal 5.20** bila dimensi vertikal dari konfigurasi lasnya adalah 4 inch dan bukan 8 inch.



Soal 5.23

5.23 Hitunglah ukuran las teoretik yang dibutuhkan untuk konsolan dari gambar berikut bila digunakan proses SMAW. Bebannya, 60% beban hidup dan 40% beban mati. Abaikan belokan pada ujung-ujung luar dari konfigurasi las profil C.

(*a*) Gunakan analisis kekuatan (yakni lokasikan pusat sesaatnya dengan coba-coba).

(*b*) Gunakan tabel-tabel Manual AISC, "ECCENTRIC LOADS ON WELD GROUPS".

(*c*) Gunakan metode (vektor) elastik.

5.24 Ulangi **Soal 5.23** bila dimensi vertikalnya adalah 12 inch dan bukan 16 inch.

5.25 Ulangi **Soal 5.23** bila dimensi vertikalnya adalah 8 inch dan bukan 16 inch.

5.26 Ulangi **Soal 5.23** bila dimensi horisontalnya adalah 4 inch dan bukan 16 inch.

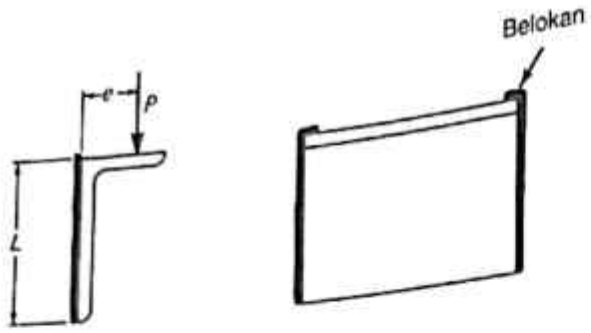
5.27 Gunakan metode (vektor) elastik untuk menurunkan suatu pernyataan umum bagi ukuran las yang dibutuhkan pada profil siku duduk pada gambar berikut menurut beban layanan P_u, panjang kaki L, dan eksentrisitas e dari beban yang diberikan. Asumsikan digunakan elektroda E70 dan proses SMAW. Gunakan asumsi-asumsi berikut:

(*a*) Abaikan belokan pada puncak.

(*b*) Gunakan belokan rata-rata sebesar $L/12$.

(*c*) Gunakan suatu belokan yang sama dengan dua kali ukuran las.

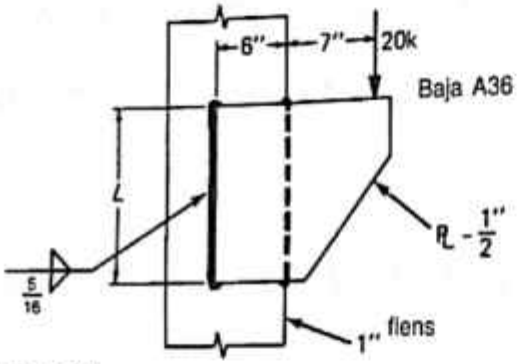
Bila $e = 2^3/_4$ inch, dan $L = 6$ inch, tentukan ukuran las yang dibutuhkan untuk memikul $P = 38$ kips (80% beban hidup dan 20% beban mati). Untuk ukuran las yang dipilih, ceklah kapasitas P dengan ketiga asumsi tersebut, dan bandingkan pula dengan hasil yang diperoleh dengan Manual AISC, "SEATED BEAM CONNECTIONS".



Soal 5.27

5.28 Untuk konsol pada gambar berikut, tentukan panjang L yang dibutuhkan bila digunakan las *fillet* $^5/_{16}$ inch dengan proses SMAW. Bebannya 70% beban hidup dan 30% beban mati. Buktikan jawaban Saudara dengan prosedur prosedur berikut:

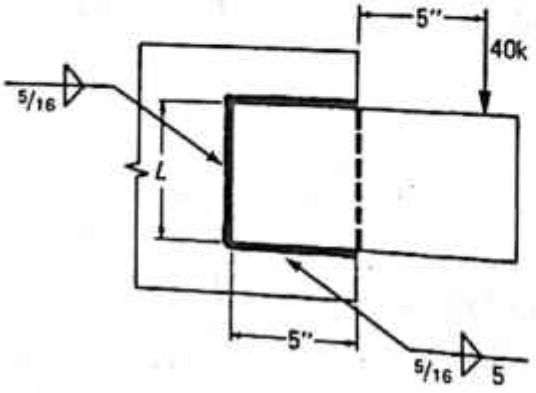
(*a*) Analisis kekuatan (yakni lokasikan pusat sesaatnya dengan coba-coba).
(*b*) Tabel-tabel Manual AISC, "ECCENTRIC LOADS ON WELD GROUPS".
(*c*) Metode (vektor) elastik.



Soal 5.28

5.29 Ulangi **Soal 5.28** bila beban layanannya adalah 40 kips.

5.30 Untuk konsol pada gambar berikut, penuhilah persyaratan-persyaratan dari **Soal 5.28**. Perhatikan bahwa digunakan baja A572 Mutu 50 sebagai ganti A36.



Soal 5.30

6
BATANG TEKAN
Bagian I: Kolom

6.1 Umum

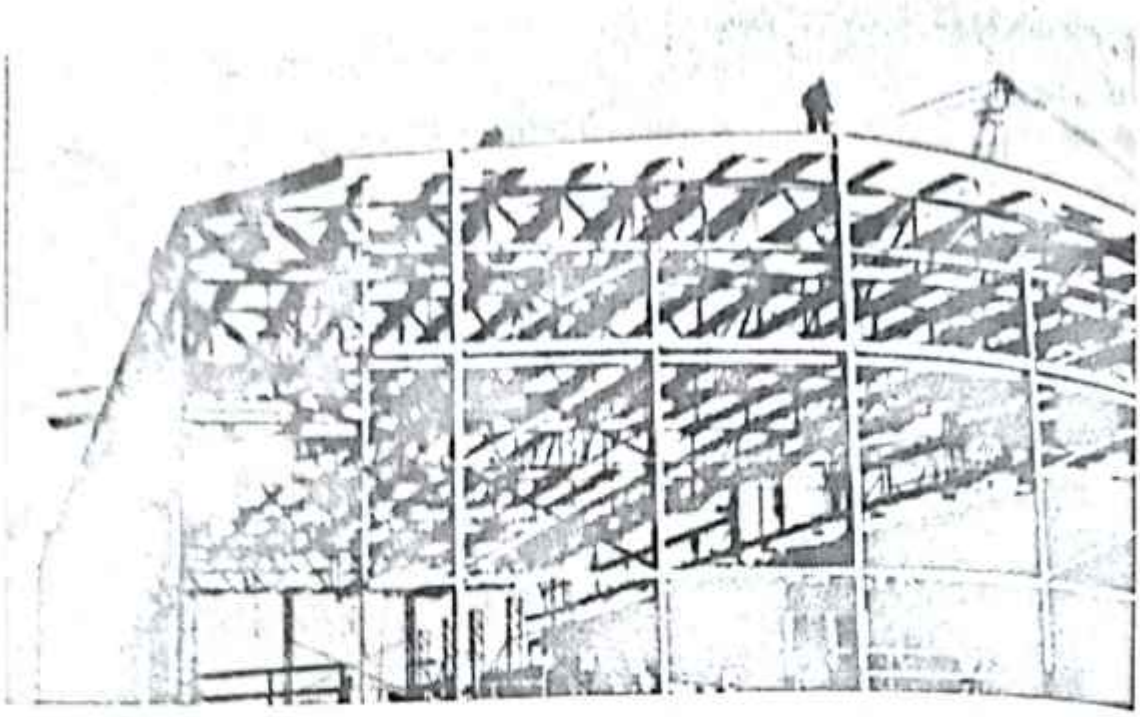
Dalam bab ini, dibahas batang-batang yang terkena gaya aksial tekan. Dengan berbagai nama, seperti kolom (*column*), penyangga (*stanchion*), tiang (*post*), dan penopang (*strut*), batang-batang ini jarang hanya memikul gaya aksial tekan saja. Namun, bila pembebanan disusun sedemikian rupa sehingga perlawanan rotasional ujung dapat diabaikan atau pun pembebanannya dikenakan secara simetrik dari batang-batang yang terangkai pada ujung kolom, dan lentur dianggap dapat diabaikan bila dibandingkan dengan gaya tekan langsungnya, batang tersebut dapat secara aman didesain sebagai kolom yang dibebani secara konsentrik.

Dari mekanika bahan dasar diketahui bahwa hanya kolom yang sangat pendek saja yang dapat dibebani sampai ke tegangan lelehnya; situasi yang umum, yakni tekukan (*buckling*) atau lenturan tiba-tiba akibat ketidakstabilan, terjadi sebelum tercapainya kekuatan penuh material batang yang bersangkutan. Dengan demikian, untuk desain batang-batang tersebut dalam struktur baja, diperlukan pengetahuan yang mendalam tentang stabilitas batang tekan.

6.2 Tekuk Elastik Euler dan Latar Belakang Sejarah

Teori tekukan kolom berasal dari Leonhard Euler dalam tahun 1744 [6.1]. Suatu batang yang semula lurus mendapat pembebanan konsentrik, di mana semua serat tetap dalam keadaan elastik sampai terjadi tekukan, akan sedikit bengkok seperti dalam **Gambar 6.2.1**. Meskipun Euler membahas tentang batang yang terjepit (*built in*) pada salah satu ujungnya dan bertumpuan sederhana pada ujung lainnya, logika yang sama juga dapat diterapkan pada kolom berujung sendi. Karena memiliki perlawanan rotasional ujung sama dengan nol, batang itu menjadi batang dengan kekuatan tekuk terkecil.

Pada sembarang lokasi z, momen lentur M_z pada batang yang sedikit terbengkokkan terhadap sumbu utama x adalah:



Kerangka baja yang terutama memperlihatkan kolom-kolom eksterior. Southeast Recreation Facility, University of Wisconsin—Madison Campus. (Foto oleh CG Salmon)

$$M_z = Py \tag{6.2.1}$$

dan karena:

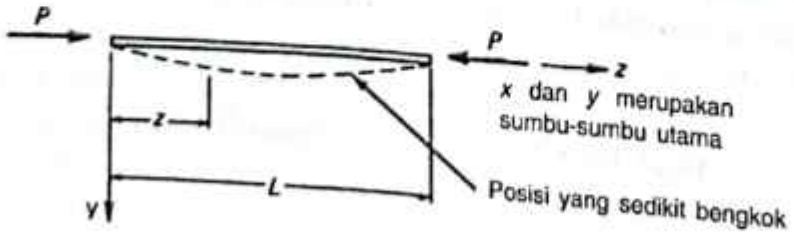
$$\frac{d^2y}{dz^2} = -\frac{M_z}{EI} \tag{6.2.2}$$

persamaan diferensialnya menjadi:

$$\frac{d^2y}{dz^2} + \frac{P}{EI}\,y = 0 \tag{6.2.3}$$

Dengan memisalkan $k^2 = P/EI$, penyelesaian persamaan diferensial linear tingkat dua ini dapat diwujudkan menjadi:

$$y = A \sin kz + B \cos kz \tag{6.2.4}$$



Gambar 6.2.1 *Kolom Euler*

Dengan menerapkan syarat batas, (*a*) $y = 0$ pada $z = 0$, dan (*b*) $y = 0$ pada $z = L$, dapat diperoleh untuk kondisi (*a*), $B = 0$; dan untuk kondisi (*b*):

$$0 = A \sin kL \tag{6.2.5}$$

pemenuhan **Persamaan 6.2.5** dapat dicapai dengan tiga macam cara: (*a*) konstanta $A = 0$; yakni tidak ada defleksi; (*b*) $kL = 0$; yakni tidak ada beban luar; dan (*c*) $kL = N\pi$, yakni syarat terjadinya tekukan. Dengan demikian,

$$\left(\frac{N\pi}{L}\right)^2 = \frac{2}{EI}$$

$$P = \frac{N^2\pi^2 EI}{L^2} \tag{6.2.6}$$

Ragam tekukan fundamental, defleksi kurvatur tunggal ($y = A \sin \pi z/L$ dari **Persamaan 6.2.4**), akan terjadi bila $N = 1$; dengan demikian, beban kritik Euler untuk kolom dengan kedua ujung sendi adalah:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{6.2.7}$$

atau dinyatakan dalam tegangan tekan rata-rata, dengan $I = A_g r^2$:

$$P_{cr} = \frac{P_{cr}}{A_g} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \tag{6.2.8}$$

Pendekatan Euler pada umumnya tidak dipakai dalam desain karena tidak sesuai dengan hasil percobaan; kolom dengan panjang yang biasa digunakan dalam desain tidak sekuat yang ditunjukkan oleh **Persamaan 6.2.7**.

Considére dan Engesser [6.2, 6.3] dalam tahun 1889 secara terpisah menyadari bahwa sebagian kolom dengan panjang biasa akan menjadi tidak elastik sebelum terjadinya tekuk dan bahwa harus digunakan suatu harga E sehingga dapat memperhitungkan sejumlah serat yang tertekan dengan regangan di luar batas proporsional. Maka dari itu disadari bahwa sesungguhnya kolom dengan *panjang biasa* akan mengalami kegagalan akibat tekuk tak elastik ketimbang akibat tekuk elastik.

Akan tetapi, pemahaman lengkap tentang perilaku kolom yang dibebani konsentrik belum dapat dicapai hingga tahun 1946 ketika Shanley [6.4, 6.5] memberikan penjelasan yang sekarang terbukti benar. Ia berpendapat bahwa sebenarnya kolom masih dapat memikul gaya aksial tekan yang lebih besar walaupun telah melentur, namun bahwa kolom tersebut *mulai* melentur mencapai beban yang biasa disebut sebagai *beban tekuk*, yang mencakup efek-efek tak elastik

pada sebagian atau semua serat dari penampang lintangnya. Efek-efek tak elastik ini dibahas secara terinci dalam **Bagian 6.4**.

Ulasan historik yang lengkap tentang perkembangan teori kolom diberikan oleh BG Johnston [6.6].

6.3 Kekuatan Kolom Dasar

Untuk menentukan kekuatan kolom dasar, beberapa kondisi perlu diasumsikan bagi sebuah kolom ideal [6.7]. Sedang mengenai materialnya, dapat diasumsikan bahwa (1) terdapat sifat tegangan—regangan tekan yang sama di seluruh penampang; (2) tidak terdapat tegangan internal awal seperti yang terjadi karena pendinginan setelah penempaan (*rolling*) atau akibat pengelasan. Menngenai bentuk dan kondisi ujung, dapat diasumsikan bahwa (3) kolom tersebut lurus dan prismatik sempurna; (4) resultan beban bekerja melalui sumbu sentroid batang sampai batang tersebut mulai melentur; (5) kondisi ujung harus ditentukan sehingga dapat panjang ujung jepit ekuivalennya dapat dipastikan. Kemudian, asumsi lebih lanjut tentang tekuk, seperti (6) teori defleksi kecil pada problema lentur biasa dapat diberlakukan dan gaya geser dapat diabaikan; dan (7) puntiran atau distorsi penampang lintang tidak terjadi selama lenturan.

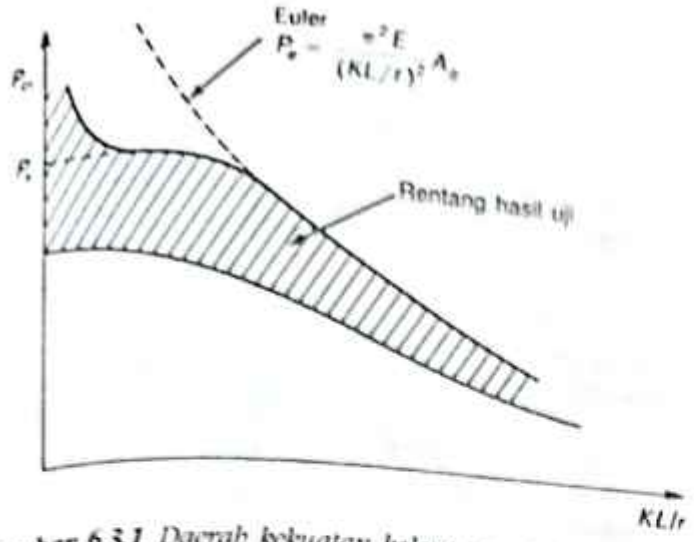
Setelah asumsi-asumsi di atas dibuat, sekarang dapat disepakati [6.8] bahwa kekuatan sebuah kolom dapat diwujudkan sebagai:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} A_g = F_{cr} A_g \tag{6.3.1}$$

di mana E_t = modulus tangensial elastisitas pada tegangan P_{cr}/A_g
A_g = luas penampang kotor batang tersebut.
KL/r = rasio kerampingan efektif (atau ujung sendi ekuivalennya)
K = faktor panjang efektif (dibahas dalam pasal [**6.9**])
L = panjang batang
r = radius girasi = $\sqrt{I/A_g}$
I = momen inersia

Telah diketahui bahwa batang tekan yang panjang akan mengalami kegagalan karena tekuk elastik, sedang batang tekan yang gemuk pendek dapat dibebani sampai materialnya leleh atau bahkan mungkin hingga mencapai daerah pengerasan regangan (*strain hardening*). Akan tetapi, dalam sebagian besar situasi biasa, kegagalan akibat tekuk terjadi setelah sebagian penampang lintang mengalami leleh. Hal ini dikenal sebagai *tekuk tak-elastik*.

Sebenarnya, tekuk murni akibat beban aksial hanya terjadi bila asumsi (1) sampai (7) di atas berlaku. Kolom biasanya merupakan suatu bagian integral struktur dan karena itu *tidak dapat* sepenuhnya berperilaku independen. Dalam praktek, istilah *tekuk* diartikan sebagai batas antara defleksi stabil dan tak stabil suatu



Gambar 6.3.1 Daerah kekuatan kolom vs rasio kerampingan tipikal

batang tekan; jadi bukan merupakan suatu kondisi sesaat yang terjadi pada batang langsing elastik yang terisolasi.

Seperti telah disebutkan di muka, selama bertahun-tahun penentuan teoretik kekuatan kolom tidak sesuai dengan hasil uji. Hasil uji mencakup pengaruh-pengaruh bengkokan awal batang, eksentrisitas beban tak sengaja, perlawanan ujung, tekuk setempat atau lateral, dan tegangan residu. Kurva tipikal untuk kekuatan-kekuatan hasil pengamatan diperlihatkan dalam **Gambar 6.3.1**. Karenanya, rumus-rumus desain didasarkan atas hasil-hasil empirik sedemikian. Berbagai rumus garis lurus dan parabola maupun persamaan lain yang lebih kompleks telah digunakan untuk mendekati kurva hasil uji tersebut dengan akurat namun masih cukup praktis.

Sebagai pendekatan umum, tekuk elastik Euler akan menentukan kekuatan untuk rasio kerampingan yang besar, kekuatan leleh $P_y = F_y A_g$ digunakan untuk kolom pendek, dan kurva transisi harus digunakan untuk tekuk tak elastik.

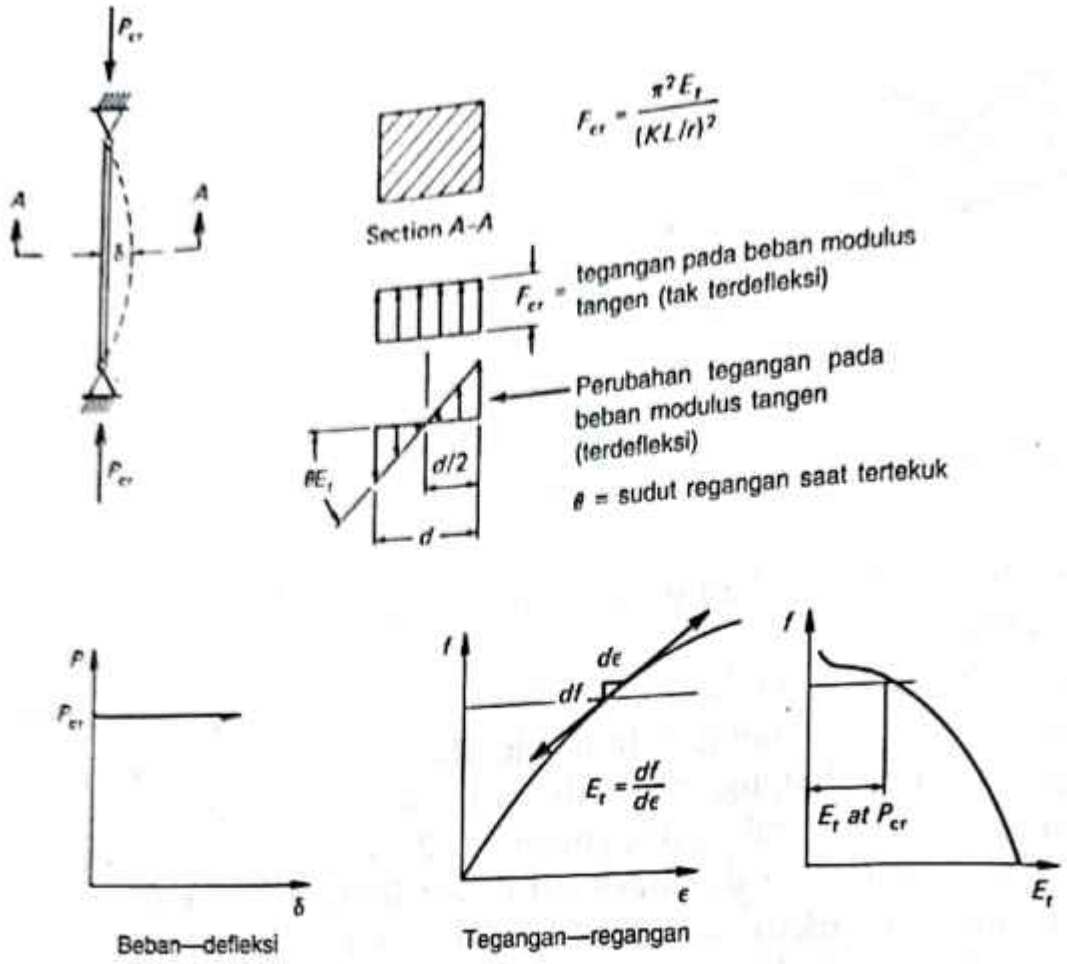
6.4* Tekuk Tak–elastik

Kolom dengan panjang biasa akan mengalami tekuk bila sebagian seratnya tidak elastik dengan modulus elastisitas yang lebih kecil daripada harga elastik awalnya. Untuk itu, dalam bagian ini akan dijabarkan dasar pemikiran Engesser, Conside`re, dan Shanley yang pada hakikatnya mengikuti Bleich [6.9, pp. 8-20].

6.4.1 Teori Modulus Tangen Dasar

Teori Euler hanya berlaku pada situasi-situasi di mana tegangan tekan yang berada di bawah batas elastik bekerja secara seragam pada penampang lintangnya bila terjadi keseimbangan tak stabil. Engesser [6.3] dan Considére [6.2] merupakan orang-orang pertama yang memanfaatkan modulus elastisitas yang berubah-ubah.

*Bagian yang diberi tanda seperti ini dapat dihilangkan tanpa mengganggu kontinuitas



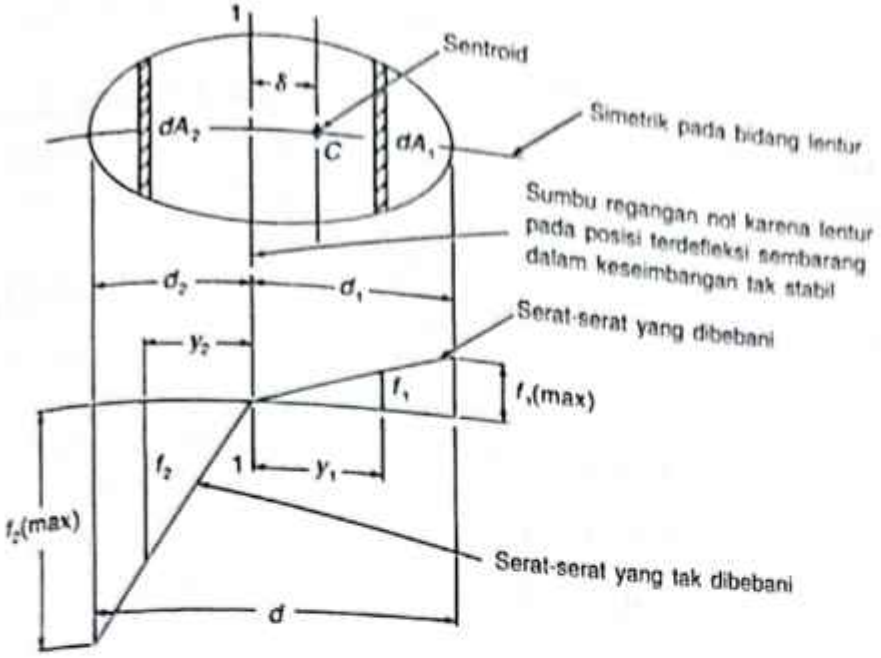
Gambar 6.4.1 *Teori modulus tangen asli dari Engesser, 1889*

Dalam teori modulus tangen (singgung) Engesser, kolom tetap dalam keadaan lurus sampai sesaat sebelum terjadinya kegagalan dan modulus elastisitas saat runtuh merupakan tangen sudut kurva tegangan—regangan tersebut. Hubungan ini diperlihatkan dalam **Gambar 6.4.1**. Teori tersebut menyatakan bahwa pada tegangan tertentu, $F_{cr} = P_{cr}/A_g$, batang tersebut dapat mengalami bentuk defleksi tak stabil dan deformasi pada F_{cr} ditentukan oleh $E_t = df/d\epsilon$. Dengan demikian Engesser memodifikasi persamaan Euler menjadi:

$$F_{cr} = \frac{P_t}{A_g} = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \tag{6.4.1}$$

di mana P_t merupakan beban modulus tangen.

Meskipun demikian, teori ini masih belum sesuai dengan hasil uji dengan hasil beban hitungan ternyata lebih rendah dari kapasitas ultimit hasil percobaan. Asumsi utama yang menyebabkan teori modulus tangen ini dianggap keliru adalah bahwa pada saat batang tersebut mengalami perubahan dari keadaan lurus menjadi bengkok, tidak terjadi pembalikan regangan sema sekali. Dalam tahun 1895, Engesser mengubah teorinya dengan alasan bahwa selama lenturan, sejumlah serat mengalami pertambahan regangan (penurunan modulus tangen) dan bebe-



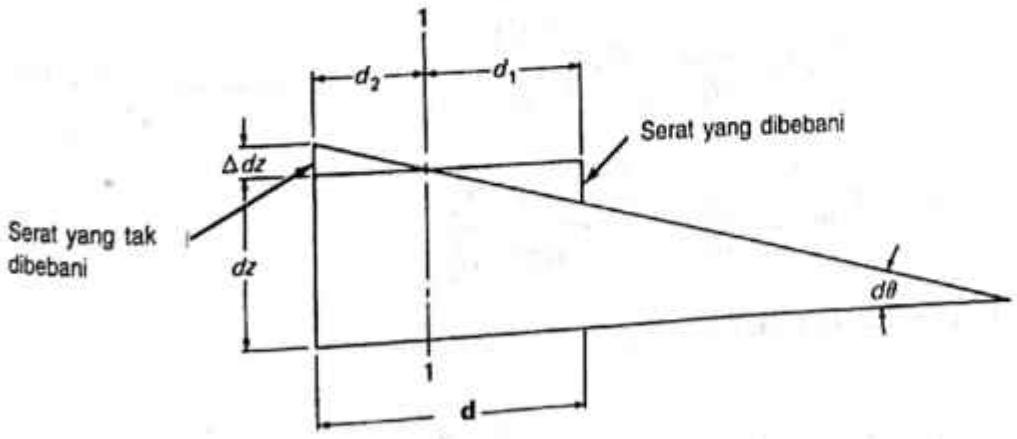
Gambar 6.4.2 Distribusi tegangan dalam kondisi keseimbangan tak stabil (teori modulus ganda)

rapa serat terbebaskan dari beban (modulus yang lebih tinggi pada regangan yang tereduksi); maka dari itu harus digunakan suatu harga kombinasi untuk modulus itu.

6.4.2 Teori Modulus Ganda

Untuk menyelidiki proses pelenturan kolom pada tegangan di luar batas elastik, perhatikan penampang **Gambar 6.4.2** yang menjadi dasar pengembangan modulus ganda Engesser, atau modulus "tereduksi". Logika konsep dapat diterima namun hasil kekuatan hitungannya lebih tinggi dari harga hasil uji. Inkonsistensi ini tetap tak terpecahkan sampai muncul penjelasan dari Shanley.

Pada keseimbangan tak stabil, tegangan pada sumbu netral (penampang 1—1 pada **Gambar 6.4.2**) akan tetap seperti keadaan sebelum terjadi defleksi δ. Pada serat-serat yang dibebani, di mana regangan bertambah, kenaikan regangan sebanding dengan $E_t = df/d\epsilon$, sedangkan pada serat-serat yang tidak dibebani,



Gambar 6.4.3 Elemen dz sepanjang sumbu kolom pada posisi keseimbangan tak stabil

penurunan regangan akan memperkecil regangan elastik; dengan demikian penurunan tegangan akan sebanding dengan modulus elastik E.

Seperti tampak dalam **Gambar 6.4.3**, regangan pada penampang lintang akan bersifat linear. Pada serat terluar yang tak dibebani, penerapan Hukum Hooke pada tegangan akan menjadi:

$$f_{2(\text{maks})} = (\text{regangan satuan})\ E = \frac{\Delta\, dz}{dz} E \tag{6.4.2}$$

dan pada serat yang dibebani:

$$f_{1(\text{maks})} = \frac{\Delta\, dz d_1}{d_2} \frac{E_t}{dz} \tag{6.4.3}$$

$$\frac{\Delta\, dz}{d_2} = d\theta \tag{6.4.4}$$

Dengan demikian:

$$f_{2(\text{maks})} = E d_2 \frac{d\theta}{dz}\ ; \qquad f_{1(\text{maks})} = E_t d_1 \frac{d\theta}{dz} \tag{6.4.5}$$

Untuk kurvatur kecil:

$$\frac{1}{\text{radius kurvatur}} = \frac{M}{E_r I} = \frac{d\theta}{dz} = \frac{d^2y}{dz^2} \tag{6.4.6}$$

di mana E_r = modulus ganda Engesser.

Momen perlawanan internal untuk kondisi tegangan pada **Gambar 6.4.2** memberikan:

$$M = -Py = \int_0^{d_1} f_1(y_1 - \delta)\ dA_1 + \int_0^{d_2} f_2(y_2 + \delta)\ dA_2 \tag{6.4.7}$$

dan dari distribusi tegangan linear dan **Persamaan 6.4.5**:

$$f_1 = f_{1(\text{maks})} \frac{y_1}{d_1} = E_t d_1 \frac{d^2y}{dz^2} \cdot \frac{y_1}{d_1} \tag{6.4.8}$$

$$f_2 = f_{2(\text{maks})} \frac{y_2}{d_2} = E d_2 \frac{d^2y}{dz^2} \frac{y_2}{d_2}$$

Dengan demikian **Persamaan 6.4.7** menjadi:

$$-Py = E_t \frac{d^2y}{dz^2} \int_0^{d_1} y_1(y_1 - \delta)\ dA_1 + E \frac{d^2y}{dz^2} \int_0^{d_2} y_2(y_2 + \delta)\ dA_2 \tag{6.4.9}$$

Keseimbangan gaya mensyaratkan:

$$\int_0^{d_1} f_1 \, dA_1 = \int_0^{d_2} f_2 \, dA_2$$

yang, dengan **Persamaan 6.4.8**, memberikan:

$$E_t \frac{d^2y}{dz^2} \int_0^{d_1} y_1 \, dA_1 = E \frac{d^2y}{dz^2} \int_0^{d_2} y_2 \, dA_2 \tag{6.4.11}$$

Dengan menggunakan **Persamaan 6.4.11**, tampaknya suku-suku yang mengandung δ saling menghilangkan dalam **Persamaan 6.4.9**, sehingga memberikan:

$$-Py = E_t \frac{d^2y}{dz^2} \int_0^{d_1} y_1^2 \, dA_1 = E \frac{d^2y}{dz^2} \int_0^{d_2} y_2^2 \, dA_2$$

$$\therefore \frac{d^2y}{dz^2} \left[E_t \int_0^{d_1} y_1^2 \, dA_1 + E \int_0^{d_2} y_2^2 \, dA_2 \right] + Py = 0 \tag{6.4.12}$$

Persamaan 6.4.12 jelas memiliki bentuk yang sama dengan persamaan tekuk elastik **6.2.3**. Dengan demikian, untuk teori modulus ganda:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2}{L^2} \left[E_t \int_0^{d_1} y_1^2 \, dA_1 + E \int_0^{d_2} y_2^2 \, dA_2 \right] \tag{6.4.13}$$

6.4.3 *Konsep Shanley — Perilaku Kolom yang Benar*

Untuk memahami perilaku sebenarnya suatu kolom seperti yang diterangkan oleh Shanley [6.4] dalam tahun 1946, perhatikan penampang persegi panjang dari **Gambar 6.4.4** yang terkena tekan aksial. Untuk beban-beban di bawah beban

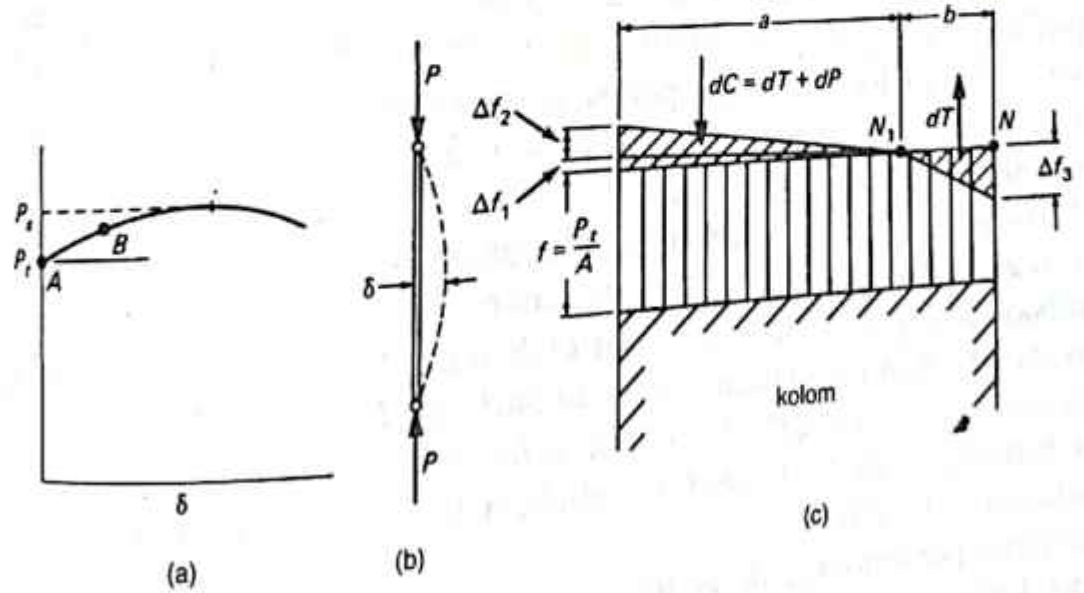


Figure 6.4.4 Konsep Shanley – Perilaku kolom yang benar

modulus tangen P_t, kolom ideal tetap lurus sempurna dengan defleksi nol (titik A pada **Gambar 6.4.4*a***). Beban P_t pada titik A dapat didefinisikan dengan sangat tepat sebagai berikut [6.10]: "Beban modulus tangen merupakan nilai beban aksial terkecil di mana pergeseran (*bifurcation*) posisi keseimbangan dapat terjadi tanpa memandang apakah transisi ke posisi lentur membutuhkan tambahan beban aksial ataupun tidak". Perhatikan bahwa pada permulaan lenturan (kurvatur yang sangat kecil) akan terjadi pertambahan regangan dan tegangan aksial Δf_1 yang sangat kecil. Pada saat kurvatur mulai memiliki harga (*finite*), yakni titik N bergerak ke N_1, sejumlah pembalikan regangan harus terjadi bila penampang lintang kolom tersebut mengembangkan momen perlawanan guna mengimbangi momen akibat beban luar $P\delta$. Untuk harga kurvatur yang kecil namun berhingga, pertambahan beban yang dinyatakan oleh tegangan yang pada daerah regangannya bertambah akan melampaui pertambahan beban yang dinyatakan oleh tegangan pada daerah yang regangannya berkurang; dengan demikian P bertambah sebesar dP (titik B dari **Gambar 6.4.4*a***). Pada saat berlangsungnya pertambahan kurvatur, P akan terus bertambah selama $dC > dT$. Gaya tekan yang bertambah dC dihitung dengan modulus tangen E_t; sementara pada daerah perlawanan regangan, modulus elastis E digunakan untuk menghitung dT. Teori modulus ganda, yang memperlakukan serat terbebani maupun tak terbebani dengan cara yang serupa, tidak menerima $dC > dT$, namun hanya meninjau posisi keseimbangan di dekat posisi yang lurus sempurna saja.

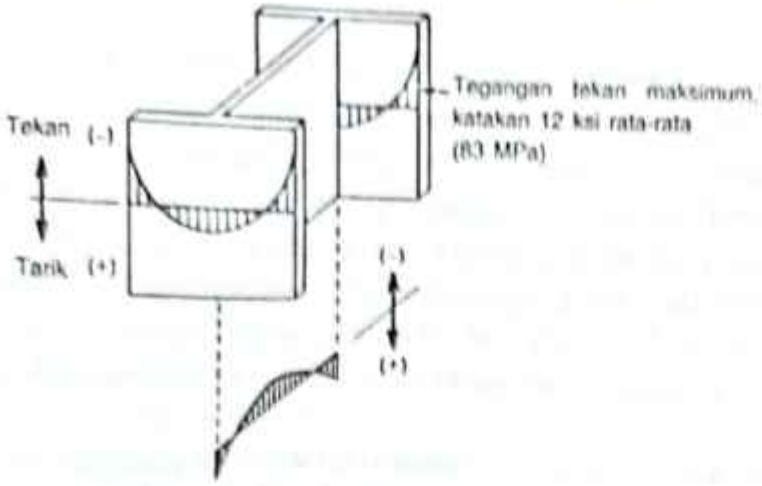
Untuk keperluan praktik, penambahan kapasitas dari P_t ke P_s (**Gambar 6.4.4*a***) dapat diabaikan dalam desain. Maka dari itu, beban modulus tangen dapat diperlakukan sebagai beban kritik, yakni beban di mana mulai terjadi lenturan.

6.5 Tegangan Sisa

Tegangan sisa (*residual stress*) merupakan tegangan yang tetap berada dalam batang setelah batang tersebut dibentuk menjadi produk akhir. Tegangan sedemikian berasal dari deformasi plastik, yang pada baja struktur dapat berasal dari beberapa sumber: (1) pendinginan yang tidak merata setelah penempaan panas profil-profil struktur; (2) pelenturan atau pembengkokan dingin selama fabrikasi; (3) penceklokan lobang dan operasi pemotongan selama fabrikasi; dan (4) pengelasan. Dalam kondisi biasa, tegangan sisa akibat pendinginan tak merata dan pengelasan merupakan yang paling penting. Sebenarnya, tegangan sisa akibat pengelasan juga merupakan hasil pendinginan tak merata.

Mekanisme tegangan sisa karena pendinginan tak merata dibahas dalam *Welding Handbook* [2.22, Bab 7], sedangkan efek tegangan sisa terhadap batang struktur tekan dapat dijumpai dalam *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures* [6.8, pp. 33—45] yang disusun oleh *Structural Stability Research Council* (Dewan Riset Stabilitas Struktur) (SSRC). Publikasi yang terakhir ini selanjutnya akan diacu sebagai *SSRC Guide*.

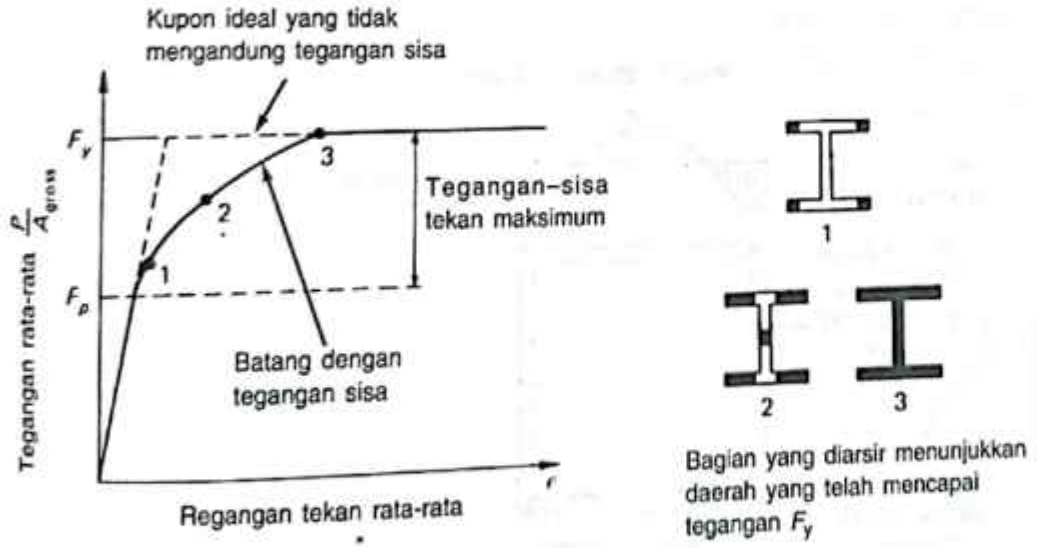
Pada penampang-penampang flens lebar atau profil H, setelah penempaan panas, flensnya, karena merupakan bagian yang lebih tebal, akan mendingin lebih



Gambar 6.5.1 Pola tegangan sisa tipikal pada profil tempaan

lambat daripada bagian pelat badannya. Tambahan pula, ujung flens yang lebih banyak terkena udara akan mendingin lebih cepat daripada daerah pertemuan antara flens dengan pelat badan. Konsekuensinya, tegangan-sisa tekan terjadi pada ujung flens dan pada bagian tengah badan (daerah yang mendingin paling cepat), sementara tegangan-sisa tarik terjadi pada daerah pertemuan flens dan badan. **Gambar 6.5.1** memperlihatkan distribusi tegangan sisa tipikal pada balok tempaan. Sejumlah variasi dapat diharapkan terjadi, karena pola yang benar merupakan fungsi dari dimensi penampangnya.

Pada titik ini, kita dapat mempertanyakan apakah persamaan kekuatan kolom umum (**Persamaan 6.3.1**) yang dibahas dalam bagian sebelumnya masih dapat diberlakukan. Teori tersebut dapat berlaku, namun semua serat pada penampang lintangnya tidak dapat dianggap mendapat tegangan yang sama besar pada kondisi beban layanan tekan. Modulus tangen E_t pada satu serat tidak sama dengan modulus pada serat lain di dekatnya.



Gambar 6.5.2 Pengaruh tegangan sisa terhadap kurva tegangan—regangan

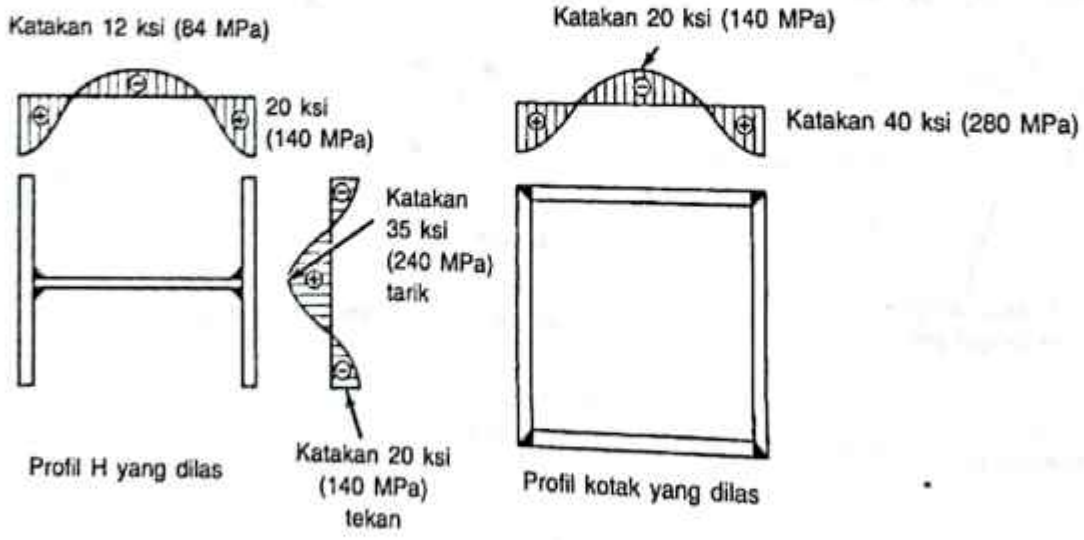
PERPUSTAKAAN D III F. TEKNIK

Pada suatu profil baja tempa, pengaruh tegangan sisa pada kurva tegangan—regangan diperlihatkan dalam **Gambar 6.5.2**, dengan menggunakan tegangan rata-rata pada luas bruto sebagai ordinatnya. Terlihat bahwa tegangan sisa pada material elastik—plastik, seperti baja, memberikan efek yang sama dengan yang diperoleh untuk suatu material seperti aluminum, yang tidak elastik sempurna, bila alumunium ini tidak mengandung tegangan sisa sama sekali. Dengan demikian, dengan asumsi bahwa berlaku konsep modulus tangen, kekuatan kolom dapat dikatakan berdasarkan pada tekuk tak elastik karena kurva tegangan—regangan rata-ratanya tak linear (nonlinear) pada saat kekuatan kolom maksimum tercapai.

Bila sebelumnya diyakini bahwa bagian nonlinear dari kurva tegangan—regangan rata-rata untuk batang tekan yang terbebani secara aksial disebabkan sepenuhnya oleh kurvatur awal dan eksentrisitas aksidental, Huber dan Beedle [6.11] telah membuktikan bahwa tegangan sisalah yang menjadi penyebab utama, sedangkan faktor-faktor lain efeknya relatif kecil. Tegangan sisa pada ujung flens profil-profil tempaan telah diukur sebesar 20 ksi (138 MPa), suatu persentase yang tinggi untuk tegangan leleh spesifikasi minimum pada baja seperti A36. Tegangan sisa pada hakikatnya tidak berkaitan tegangan leleh; sebaliknya justru tergantung pada dimensi dan konfigurasi penampang lintangnya karena faktor-faktor itulah yang menentukan laju pendinginan [6.12].

Pengelasan profil-profil bentukan mempunyai andil yang lebih besar terhadap tegangan sisa ketimbang pendinginan profil H—tempaan panas [6.13]. Pelat-pelat itu sendiri pada umumnya memiliki tegangan sisa yang kecil terutama karena pendinginan yang relatif seragam setelah penempaan. Meskipun demikian, setelah panas digunakan untuk mengelas, pendinginan tak-seragam ikutan serta perlawanan terhadap distorsi akan menimbulkan tegangan sisa yang tinggi. **Gambar 6.5.3** menunjukkan pola tegangan sisa tipikal pada profil H—las-lasan dan profil kotak bentukan (*built-up*).

Kita harus memperhatikan bahwa tegangan-sisa tekan yang secara tipikal ter-



Gambar 6.5.3 *Distribusi tegangan sisa tipikal pada profil yang dilas*

jadi pada ujung flens akan lebih tinggi pada profil H las-lasan ketimbang profil H tempaan. Dengan demikian, kekuatan kolom profil las-lasan sedemikian ini akan menjadi lebih rendah daripada profil-profil tempaan pasangannya. Di lain pihak, profil kotak las-lasan, karena memiliki tegangan-sisa tarik pada daerah-daerah sudut yang mampu memberikan kontribusi terbesar bagi kekakuan kolom, akan lebih kuat daripada profil tempaan dengan rasio kerampingan yang sama. Sherman [6.14, 6.15] telah mempelajari tegangan sisa yang terjadi pada batang tubular tempaan.

Setelah menerima kenyataan bahwa tegangan sisa memang benar-benar ada, informasi sedemikian harus digunakan untuk memperoleh kurva kekuatan kolom (tegangan rata-rata *vs* rasio kerampingan) yang dapat menjadi basis desain. Sampai awal tahun 1950-an, desain kolom didasarkan pada banyak rumusan, yang kesemuanya mencoba secara empirik memperhitungkan perilaku kolom seperti yang terlihat selama pengujian. *Column Research Council* (sekarang *Structural Stability Research Council* [6.8]) telah memberikan sumbangan besar dengan menetapkan modulus tangen sebagai kriterium kekuatan yang tepat serta menjabarkan peranan tegangan sisa.

6.6* Pengembangan Kurva Kekuatan Kolom yang Mencakup Tegangan Sisa

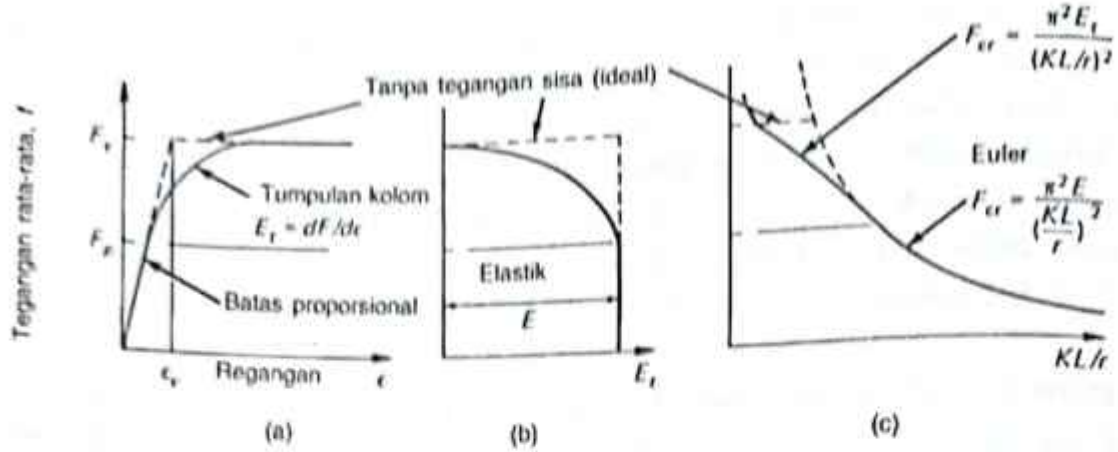
Pendekatan analitik berikut ini, yang dipolakan menurut Huber dan Beedle [6.11] dan Beedle dan Tall [6.16], dimaksudkan untuk menunjukkan logika untuk mendapatkan persamaan kekuatan kolom. Kekuatan kolom dapat diperoleh melalui dua metode umum. Metode pertama menggunakan distribusi tegangan sisa, baik variasi aktual dari pengukuran ataupun model matematik, bersama dengan hubungan tegangan—regangan untuk material yang bersangkutan (katakan misalnya sepotong spesimen baja uji kecil).

Metode lain adalah dengan menentukan hubungan tegangan—regangan secara eksperimental dengan menguji profil tempaan pendek yang mengandung tegangan sisa. Kemudian, kekuatan kolom dapat ditentukan dari hasil-hasil uji dengan menggunakan modulus tangen dari kurva eksperimental dalam kombinasi dengan rasio kerampingan yang sesuai. Pengetahuan tentang pola tegangan sisa tidak digunakan dalam pendekatan yang kedua ini.

Yu dan Tall [6.17] telah membahas pendekatan-pendekatan ini secara terinci. Johnston [6.18] dan Batterman dan Johnston [6.19] telah membahas penerapan modulus tangen terhadap tekuk tak elastik pada kolom.

Pengembangan berikut ini dibuat dengan sasaran untuk memperoleh suatu hubungan antara tegangan eksternal rata-rata dan rasio kerampingan. Dengan demikian, kapasitas suatu batang dapat diperoleh dengan perkalian sederhana dari tegangan aman dengan luas bruto, tanpa memperhatikan tegangan aktual pada suatu titik dalam penampang lintang maupun pola tegangan sisanya.

Sebagai awal pembahasan, perhatikanlah baja sebagai suatu material elastik sempurna sampai tercapai suatu regangan tertentu ϵ_y dan kemudian bersifat plas-



Gambar 6.6.1 *Perbandingan antara kupon dengan penampang profil H yang mengandung tegangan sisa*

tik (yakni tegangan tetap dengan bertambahnya regangan). Sebuah potongan kupon dari pelat badan suatu profil tempaan menunjukkan perilaku sedemikian, seperti ditunjukkan oleh garis putus-putus dalam **Gambar 6.6.1**. Garis-garis utuh menunjukkan perilaku profil H tempaan dengan tegangan sisa.

Untuk memperhitungkan pengaruh pelelehan awal karena tegangan sisa, perhatikan sebuah serat pada jarak x dari sumbu ragangan nol akibat lenturan (**Gambar 6.6.2**). Lenturan diambil sebagai besaran yang sangat kecil yang konsisten dengan keseimbangan pada beban modulus tangennya. Kontribusi momen lentur dari tegangan pada satu serat adalah:

$$dM = (\text{tegangan})(\text{luas})(\text{lengan momen}) = (\theta E_t x)(dA)(x) \tag{6.6.1}$$

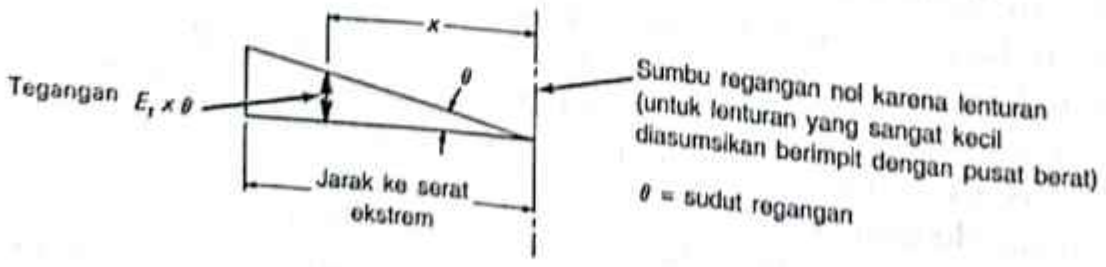
yang untuk keseluruhan penampang lintang menjadi:

$$M = \int_A \theta E_t x^2 \, dA = \theta \int_A E_t x^2 \, dA \tag{6.6.2}$$

Dari teori lenturan elementer, radius kurvaturnya adalah:

$$R = \frac{1}{\theta}$$

$$\theta = \frac{1}{R} = \frac{M}{\text{ekuivalen } EI} = \frac{M}{E'I} \tag{6.6.3}$$



Gambar 6.6.2 *Tegangan pada serat pada jarak x dari sumbu regangan akibat lenturan*

Dengan demikian:

$$E'I = \frac{M}{\theta} = \int_A E_t x^2 \, dA$$

$$E' = \frac{1}{I}\int_A E_t x^2 \, dA \qquad (6.6.4)$$

yang dapat disebut sebagai *modulus efektif* dan digunakan dalam **Persamaan 6.4.1** sebagai harga ekuivalen untuk E_t

Bila kurva elastik–plastik f–ϵ yang diidealkan dari **Gambar 6.6.1*a*** (garis putus-putus) digunakan (untuk $f < F_y$, $E_t = E$ dan untuk $f = F_y$, $E_t = 0$), kekakuan lentur bagian-bagian yang meleleh menjadi nol; meskipun demikian, kekuatan tekuk akan sama dengan sebuah kolom yang momen inersianya I_e merupakan momen inersia dari bagian yang tetap elastik. Kemudian, **Persamaan 6.6.4** menjadi:

$$E' = \frac{E}{I}\int_{A\ (\text{hanya bagian elastik saja})} x^2 \, dA = E\frac{I_e}{I} \qquad (6.6.5)$$

Dari **Persamaan 6.3.1**, tegangan di mana kolom sudah mulai melentur adalah:

$$P_{cr} = \left(\frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}\,\frac{\int_A x^2 \, dA}{I}\right) A_g = F_{cr} A_g \qquad (6.6.6)$$

$$P_{cr} = \left(\frac{\pi^2 E(I_e/I)}{(KL/r)^2}\right) A_g = F_{cr} A_g \qquad (6.6.7)$$

Supaya **Persamaan 6.6.7** dapat dimanfaatkan, harus ditetapkan hubungan antara F_{cr} dan I_e

6.6.1 Kasus A: Tekuk terhadap Sumbu Lemah

Asumsi yang masuk akal adalah bahwa flens menjadi sepenuhnya plastik sebelum pelat badan meleleh (*lihat* **Gambar 6.6.3**).

Misalkan k = proporsi bagian flens yang tetap elastik = $2\,x_0/b = A_e/A_f$

Kemudian **Persamaan 6.6.5** menjadi:

$$E\frac{I_e}{I} = E\frac{t_f\,(2x_0)^3}{12}\left(\frac{12}{t_f b^3}\right) = Ek^3 \qquad (6.6.8)$$

bila dalam penghitungan I, pelat badan diabaikan. Dengan menerapkan definisi modulus tangen:

$$E_t = \frac{\text{pertambahan tegangan nominal}}{\text{pertambahan regangan elastik}} = \frac{dP/A}{\dfrac{dP/A_e}{E}} = \frac{A_e E}{A} \qquad (6.6.9)$$

$$E_t A = A_e E = (A_w + 2kA_f)E \qquad (6.6.10)$$

di mana A_w = luas badan
A_f = luas bruto dari satu flens
A = luas penampang bruto total

Penyelesaian **Persamaan 6.6.10** untuk k dan penggunaan **Persamaan 6.6.8** dalam **6.6.7** akan memberikan:

$$k = \frac{E_t A}{2EA_f} - \frac{A_w}{2A_f} \qquad (6.6.11)$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 Ek^3}{(KL/r)^2} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}\left[\frac{AE_t}{2A_f E} - \frac{A_w}{2A_f}\right]^3 \qquad (6.6.12)$$

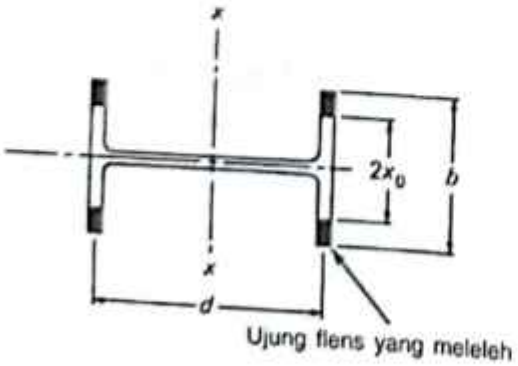
yang mencakup pengaruh pelat badan elastik untuk tekukan pada sumbu lemah (y–y).

6.6.2 *Kasus B: Tekuk terhadap Sumbu Kuat*

Sekali lagi, asumsikan bahwa pelat badannya elastik namun dengan mengabaikan kontribusinya terhadap momen inersia. Secara pendekatan akan diperoleh:

$$E\frac{I_e}{I} \approx E\frac{2A_e(d/2)^2}{2A_f(d/2)^2} = Ek \qquad (6.6.13)$$

Bila badan yang elastik diikutsertakan:



Gambar 6.6.3 *Bagian penampang yang telah meleleh*

$$E\frac{I_e}{I} = E\left[\frac{2kA_f(d^2/4) + t_w d^3/12}{2A_f(d^2/4) + t_w d^3/12}\right] \tag{6.6.14}$$

$$= E\left[\frac{2kA_f + A_w/3}{2A_f + A_w/3}\right] \tag{6.6.15}$$

Dengan menggunakan definisi modulus tangen dan **Persamaan 6.6.10**:

$$2kA_f = \frac{E_t A}{E} - A_w$$

yang, dengan eliminasi suku $2kA_f$ dari **Persamaan 6.6.15** akan memberikan:

$$E\frac{I_e}{I} = \left[\frac{E_t A/E - 2A_w/3}{2A_f + A_w/3}\right] E \tag{6.6.16}$$

sehingga:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 Ek}{(KL/r)^2} \tag{6.6.17}$$

merupakan persamaan pendekatan yang menggunakan **Persamaan 6.6.11** untuk k, atau lebih tepat memasukkan **Persamaan 6.6.16** ke dalam **Persamaan 6.6.7** sehingga diperoleh:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}\left[\frac{E_t A/E - 2A_w/3}{2A_f + A_w/3}\right] \tag{6.6.18}$$

untuk tekuk pada sumbu kuat (x–x).

Dari uraian di atas, jelaslah bahwa diperlukan dua persamaan untuk menentukan kekuatan kolom profil I dengan tepat; satu persamaan untuk tekuk sumbu kuat, dan satu lagi untuk tekuk sumbu lemah. Walaupun harga I_e/I itu sendiri bukan fungsi distribusi tegangan sisa meski harganya memenuhi persyaratan geometrik umum seperti dalam **Gambar 6.6.3**; namun, tegangan kritik F_{cr}, yang dihitung sebagai beban tekuk dibagi luas bruto, toh punya hubungan dengan KL/r yang tergantung pada tegangan sisa.

Perhatikan bahwa bila kurva tegangan—regangan untuk material tersebut tidak elastik—plastik, yakni bila E_t tidak sama dengan E atau nol, sebagai ganti dari **Persamaan 6.6.5** harus digunakan **Persamaan 6.6.4**.

■ Contoh 6.6.1

Buatlah kurva kekuatan kolom (F_{cr} vs KL/r) untuk tekukan sumbu lemah suatu profil H baja dengan tegangan leleh sebesar 100 ksi (690 MPa) yang menun-

jukkan kekuatan elastik—plastik sempurna pada suatu uji kupon (**Gambar 6.6.4*b***), dan pola tegangan sisa yang sangat disederhanakan seperti dalam **Gambar 6.6.4*a***). Abaikan kontribusi pelat badannya.

Penyelesaian:

Untuk setiap beban eksternal, regangan pada setiap serat adalah sama. Sampai suatu serat mencapai regangan ϵ_y pada lelehan pertama, beban yang dikenakan adalah:

$$P = \int_A f\,dA = fA$$

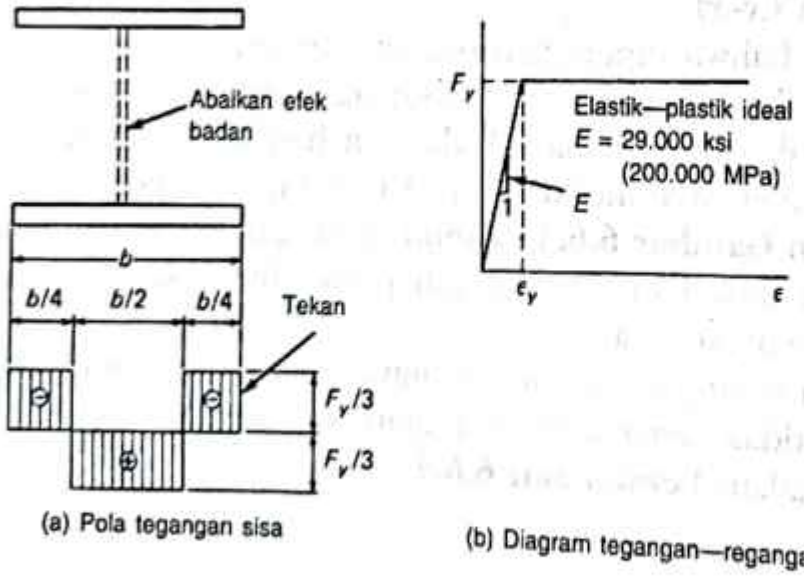
Setelah sebagian menjadi plastik, beban yang dikenakan adalah:

$$P = (A - A_e)F_y + \int_{A_e} f\,dA$$

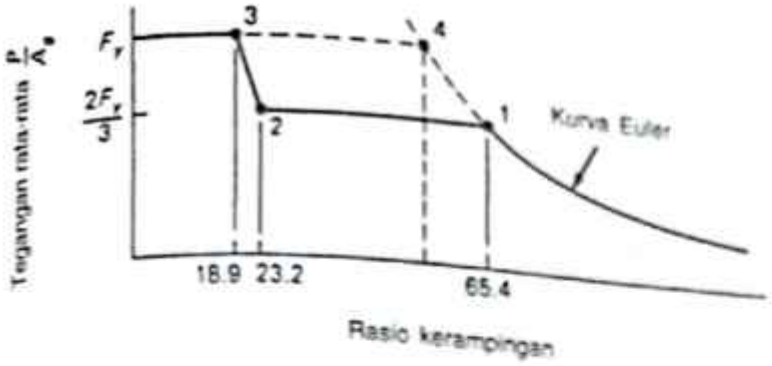
Dalam soal ini, untuk $F_{cr} = P/A \le 2\,F_y/3$, keseluruhan penampang masih tetap elastik, $E_t = E$, di mana E' merupakan EI_e/I dan $I_e = I$; dengan demikian:

$$F_{cr} = \frac{2F_y}{3} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

$$\frac{KL}{r} = \sqrt{\frac{\pi^2(29.000)}{(2/3)(100)}} = 65.4 \text{ (titik 1, } \textbf{Gambar 6.6.5)}$$



Gambar 6.6.4 *Data untuk* ***Contoh 6.6.1***



Gambar 6.6.5 *Kurva kekuatan kolom untuk* **Contoh 6.6.1**

Bila $F_{cr} = P/A > 2F_y/3$, ujung flens telah meleleh yang menyebabkan I_e lebih kecil daripada I, dengan demikian:

$$\frac{I_e}{I} = \frac{(b/2)^3}{b^3} = \frac{1}{8}$$

$$F_{cr} = \frac{2F_y}{3} = \frac{\pi^2 E(I_e/I)}{(KL/r)^2} = \frac{\pi^2 E}{8(KL/r)^2}$$

$$\frac{KL}{r} = 23.2 \text{ (titik 2, } \textbf{Gambar 6.6.5}\text{)}$$

untuk tegangan rata-rata yang sedikit lebih besar dari $2F_y/3$. Bila $F_{cr} = P/A = F_y$:

$$F_{cr} = F_y = \frac{\pi^2 E}{8(KL/r)^2}$$

$$\frac{KL}{r} = 18.9 \text{ (titik 3, } \textbf{Gambar 6.6.5}\text{)}$$

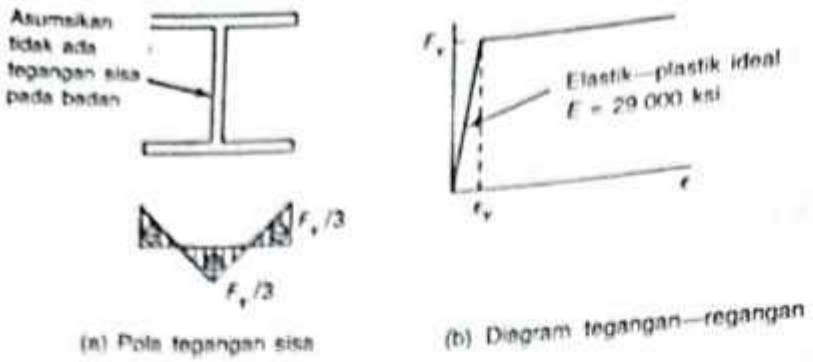
bila beban total $P = F_y A$. Hasil-hasilnya diperlihatkan dalam **Gambar 6.6.5**. Bila sebelumnya tidak ada tegangan sisa pada $F_{cr} = F_y$:

$$\frac{KL}{r} = 53.5 \text{ (titik 4, } \textbf{Gambar 6.6.5}\text{)}$$

■

■ **Contoh 6.6.2**

Buatlah kurva kekuatan kolom untuk distribusi linear yang lebih realistik dari tegangan sisa dalam **Gambar 6.6.6**. Perhatikan tekukan sumbu lemah dari penampang profil H baja baik untuk (*a*) $F_y = 36$ ksi (250 MPa) maupun (*b*) $F_y = 100$ ksi (690 MPa). Abaikan efek badannya.



(a) Pola tegangan sisa (b) Diagram tegangan—regangan

Gambar 6.6.6 *Data untuk* **Contoh 6.6.2**

Penyelesaian:

Untuk tegangan rata-rata $f = P/A \leq 2F_y/3$, keseluruhan penampang tetap elastik (**Gambar 6.6.7*a***); maka dari itu $E_t = E$, dan:

$$F_{cr} = \frac{2F_y}{3} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

Untuk tegangan rata-rata akibat beban luar lebih besar dari $2F_y/3$, sebagian penampang lintangnya akan menjadi plastik dan sebagian lagi elastik seperti dalam **Gambar 6.6.7*b***. Selama tahap ini, *perubahan tegangan tidak sama pada semua serat* karena modulus elastisitas setiap serat tidak sama.

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E I_e / I}{(KL/r)^2}$$

$$\frac{I_e}{I} = \frac{2(1/12)(2x_0)^3 t}{2(1/12)b^3 t} = \frac{8x_0^3}{b^3}$$

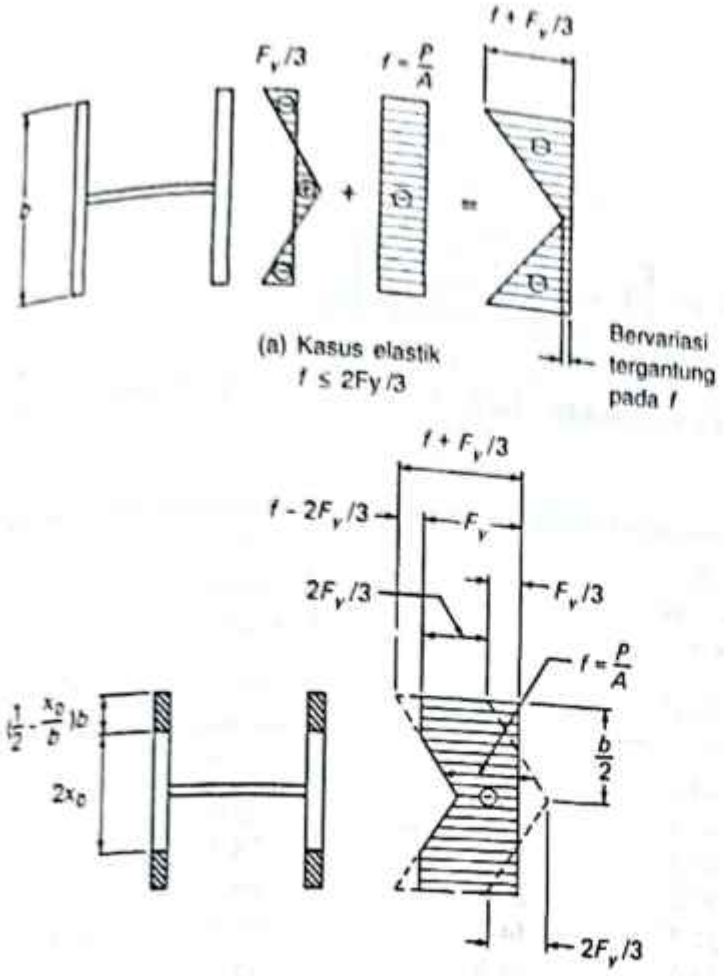
dengan pengabaian efek badannya:

$$F_{cr} = \frac{8\pi^2 E(x_0/b)^2}{(KL/r)^2} \tag{a}$$

yang menyatakan F_{cr} sebagai fungsi dari dua variabel, x_0/b dan KL/r. Masih dibutuhkan sebuah hubungan tambahan. Beban total selama tahap elasto—plastik dapat diwujudkan sebagai:

$$P_{cr} = 2\left[fbt - 2\left(\frac{1}{2}\right)\left(f - \frac{2F_y}{3}\right)\left(\frac{1}{2} - \frac{x_0}{b}\right)bt\right] \tag{b}$$

yang merupakan daerah yang diarsir dari diagram tegangan dalam **Gambar 6.6.7*b***.



Gambar 6.6.7 Distribusi tegangan dengan tegangan sisa linear

Dari segitiga serupa pada segitiga yang garisnya putus-putus pada **Gambar 6.6.7*b***:

$$\frac{f - 2F_y/3}{\left(\frac{1}{2} - \frac{x_0}{b}\right)b} = \frac{2F_y/3}{b/2}$$

Penyelesaian untuk f :

$$f = \left[1 - \frac{x_0}{b}\right] \frac{4F_y}{3} . \qquad (c)$$

Penggunaan **Persamaan (*c*)** untuk mengeliminasi f dari **Persamaan (*b*)** memberikan:

$$P_{cr} = 2bt \left\{\left(1 - \frac{x_0}{b}\right)\frac{4F_y}{3} - \left[\left(1 - \frac{x_0}{b}\right)\frac{4F_y}{3} - \frac{2F_y}{3}\right]\left(\frac{1}{2} - \frac{x_0}{b}\right)\right\}$$

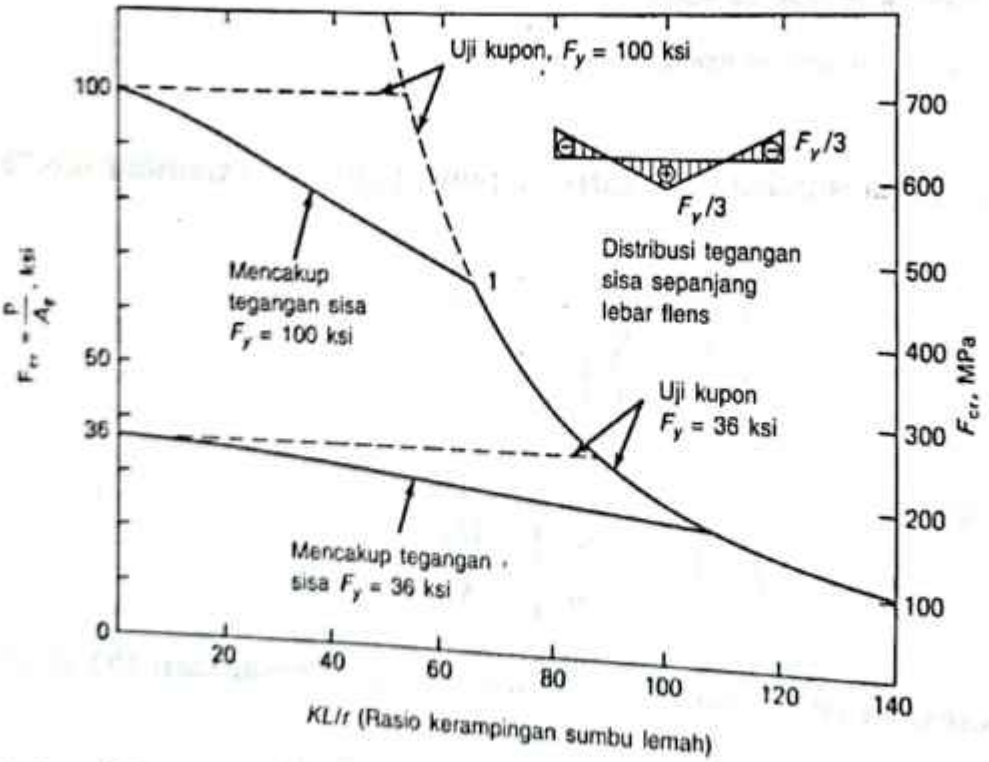
$$= A_g F_y \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{x_0}{b} \right)^2 \right] \tag{d}$$

Dengan demikian

$$F_{cr} = \frac{P}{Ag} = Fy \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{x_0}{b} \right)^2 \right] \tag{e}$$

yang digunakan bersama dengan **Persamaan (*a*)**. Hasil-hasilnya diperlihatkan dalam **Gambar 6.6.8**.

$\frac{x_0}{b}$	F_{cr}	F_{cr} untuk F_y = 36 ksi (ksi)	$\frac{KL}{r}$	F_{cr} untuk F_y = 100 ksi (ksi)	$\frac{KL}{r}$
0.50	$0.66F_y$	24.0	109.2	66.7	65.4
0.45	0.73	26.3	89.0	73.0	53.4
0.40	0.787	28.3	72.0	78.7	43.1
0.35	0.837	30.2	57.0	83.7	34.2
0.30	0.880	31.7	44.1	88.0	26.5
0.25	0.917	33.0	32.9	91.7	19.7
0.20	0.947	34.1	23.2	94.7	13.9
0.10	0.987	35.5	8.0	98.7	4.8



Gambar 6.6.8 *Kurva kekuatan kolom yang menunjukkan efek tegangan sisa (E = 29,000 ksi). Penyelesaian untuk* ***Contoh 6.6.2***

Bila badan dari penampang yang bersangkutan ingin diikutsertakan, I_e/I dapat dengan mudah mencakupnya. Tambahan pula **Persamaan (b)** juga dapat mencakup bagian badan tersebut. Pengikutsertaan efek badan sedemikian akan membawa variabel A_w/A_f dan dalam banyak kasus efek ini cukup kecil.

Akhirnya, kurva-kurva yang serupa dengan yang terdapat pada **Gambar 6.6.8** dapat diperoleh dengan menggunakan kurva tegangan—regangan rata-rata untuk profil tempaan pendek seperti yang ditunjukkan sebelumnya dalam bagian ini, dalam kasus mana **Persamaan 6.6.12** dan **6.6.18** dapat digunakan dengan E_t yang diperoleh dari kurva tegangan—regangan "penampang lintang".

6.7 Kurva Kekuatan menurut Structural Stability Research Council (SSRC)

6.7.1 *Persamaan Parabolik — Basis untuk Allowable Stress Design*

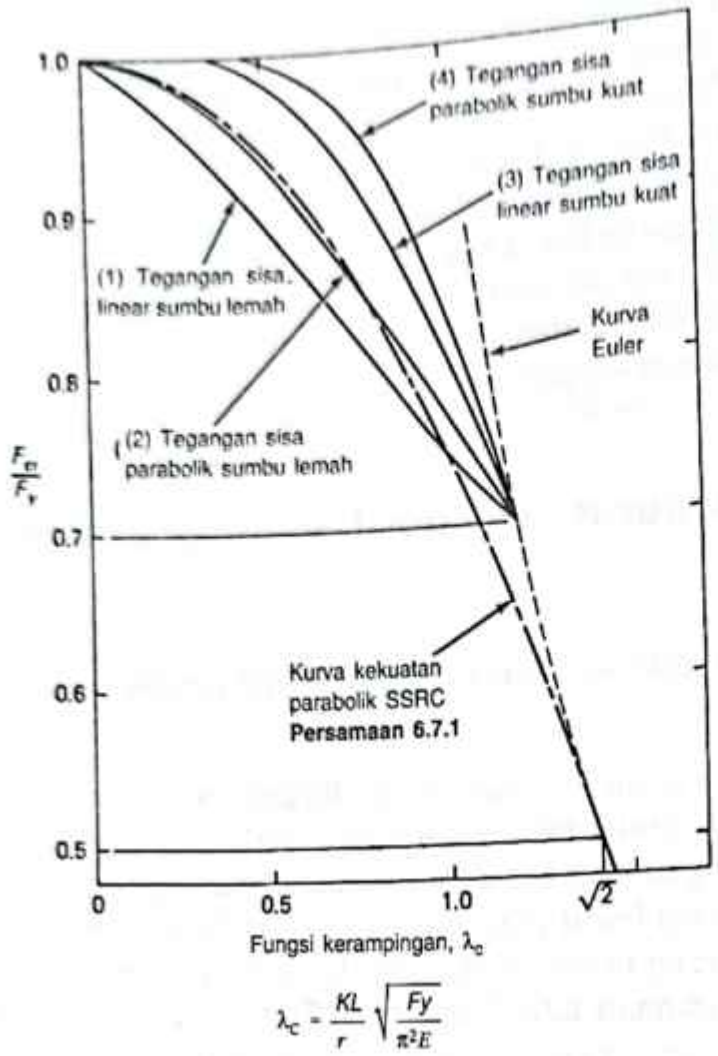
Berdasarkan metode-metode yang dibicarakan dalam **Bagian 6.6**, kurva-kurva kekuatan kolom dapat diperoleh untuk tekukan sumbu lemah atau sumbu kuat dengan berbagai distribusi tegangan sisa. Untuk kebanyakan situasi praktis, telah ditemukan bahwa asumsi distribusi linear tegangan sisa dalam flens akan menghasilkan kurva kolom rata-rata yang masuk akal [6.20]. Lebih lanjut, pembahasan dalam bagian sebelumnya (**Persamaan 6.6.12** dan **6.6.17**) menunjukkan bahwa untuk rasio kerampingan *yang sama*, penampang kolom profil H yang diijinkan melentur pada arah sumbu lemah hanya dapat memikul beban yang lebih kecil ketimbang kolom yang diijinkan melentur hanya pada arah yang kuat saja. Tegangan sisa tekan yang harganya paling besar pada ujung flens merupakan penyebab perbedaan kekuatan ini.

Kurva-kurva tipikal kekuatan kolom untuk distribusi linear dan parabolik untuk tegangan sisa sepanjang flens diperlihatkan dalam **Gambar 6.7.1**. Untuk baja karbon struktur, harga rata-rata tegangan sisa tekan adalah 12 sampai 13 ksi (83 sampai 90 MPa), yang secara kasar bersesuaian dengan $0.3F_y$. Untuk baja berkekuatan tinggi, tegangan sisa pada umumnya merupakan suatu pecahan yang lebih rendah dari $0.3\ F_y$.

Sejak tahun 1960, desain baja struktur menurut Spesifikasi *Allowable Stress Design* AISC telah menggunakan persamaan parabolik SSRC berdasarkan usulan Bleich [6.9]. Kurva parabolik SSRC adalah:

$$F_{cr} = F_y \left[1 - \frac{F_y}{4\pi^2 E} \left(\frac{KL}{r} \right)^2 \right] \tag{6.7.1}$$

Dalam **Gambar 6.7.1**, **Persamaan 6.7.1** diperbandingkan dengan kurva-kurva lain yang membedakan pola-pola tegangan sisa dari sumbu lenturan. Kurva SSRC mampu memberikan kesesuaian yang benar-benar bagus untuk kurva sumbu le-



Gambar 6.7.1 *Kurva-kurva kekuatan kolom untuk penampang H dengan tegangan sisa pada ujung-ujung flens. (Diadaptasi dari Acuan 6.20)*

mah pada penampang H, khususnya bila diingat bahwa tegangan sisa parabolik lebih mewakili situasi aktual ketimbang tegangan sisa linear.

Dari **Gambar 6.7.1**, dapat kita perhatikan bahwa untuk memperoleh tingkat keamanan yang sama pada semua kolom, ternyata dibutuhkan beberapa kurva kekuatan yang berbeda-beda tergantung pada distribusi tegangan sisa yang diharapkan, bentuk penampang, dan sumbu lenturan pada saat kolom mengalami tekukan.

Perhatikan bahwa **Persamaan 6.7.1** memperkenalkan fungsi kerampingan λ_c yang diambil sebagai parameter kerampingan (sebagai ganti KL/r) menurut Spesifikasi *Load and Resistance Factor Design*. Parameter kerampingan λ_c didefinisikan sebagai:

$$\lambda_c^2 = \frac{F_y}{F_{cr}(\text{Euler})} = \frac{F_y}{\left(\dfrac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}\right)} \tag{6.7.2}$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{r}\sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} \tag{6.7.3}$$

Dalam bentuk parameter kerampingan λ_c, parabola SSRC menjadi:

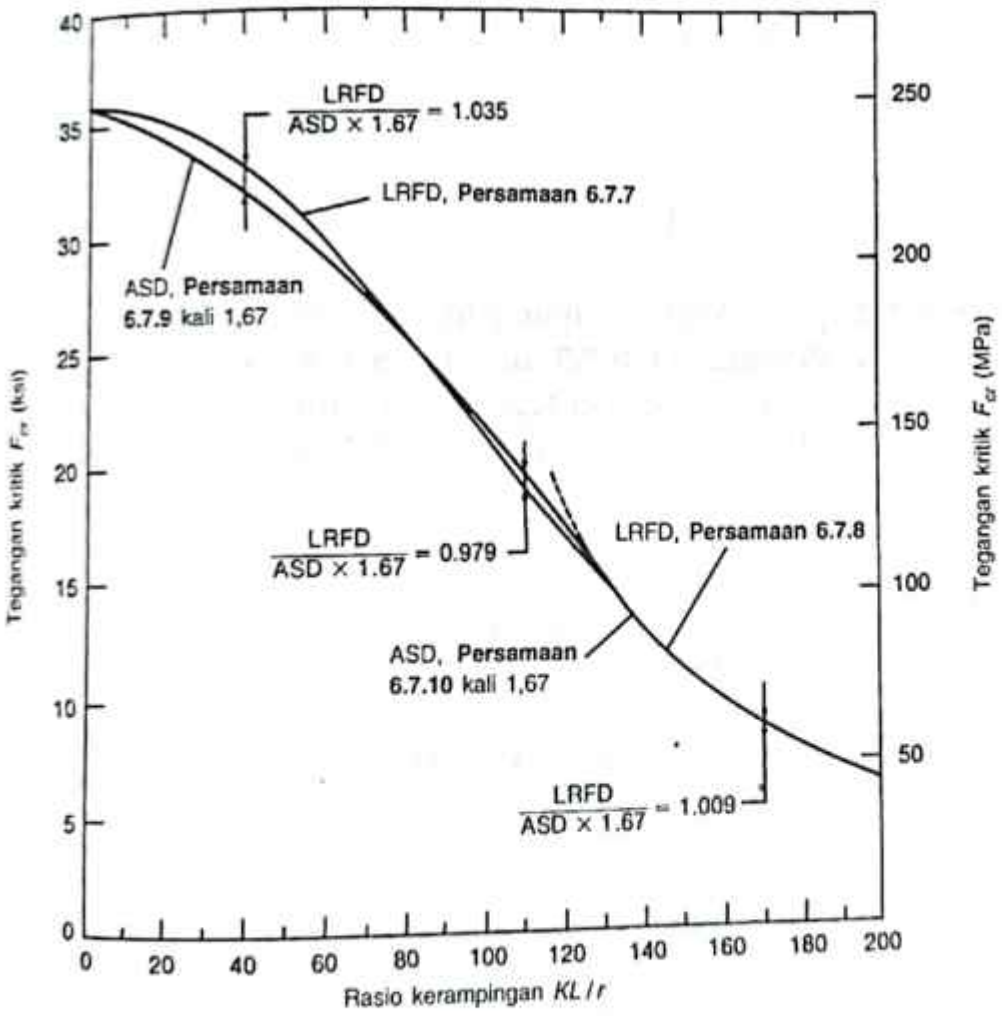
$$\frac{F_{cr}}{F_y} = 1 - \frac{\lambda_c^2}{4} \qquad \text{untuk } \lambda_c \le \sqrt{2} \tag{6.7.4}$$

Perhatikan bahwa $\lambda_c = \sqrt{2}$ bila parabola dan hiperbola Euler tersebut saling menyinggung satu sama lain. Dengan demikian, **Persamaan 6.7.4** berlaku untuk $\lambda_c \le \sqrt{2}$, untuk harga-harga λ_c yang lebih besar, persamaan Euler berlaku:

$$\frac{F_{cr}}{F_y} = \frac{1}{\lambda_c^2} \qquad \text{untuk } \lambda_c \le \sqrt{2} \tag{6.7.5}$$

6.7.2 *Persamaan Kekuatan – Basis untuk Load and Resistance Factor Design*

Persamaan parabolik, **Persamaan 6.7.4**, memberikan aproksimasi yang cukup masuk akal untuk kurva kekuatan kolom dengan transisi antara tekuk elastik dan lelehan, yang pada hakikatnya mencerminkan efek tegangan sisa. Secara tradi-



Gambar 6.7.2 *Perbandingan tegangan kritik kolom F_{cr} untuk menggunakan LRFD Persamaan 6.7.7 dan 6.7.8 dengan 1.67 kali ASD Persamaan 6.7.9 dan 6.7.10, untuk Fy = 36 ksi*

sional, eksentrisitas aksidental dan ketidaklurusan awal (*initial out-of-straightness*) diperhitungkan dengan faktor keamanan yang bertambah besarnya sejalan dengan bertambahnya kerampingan. Filosofi desain faktor beban dan resistansi (LRFD) bertujuan memberikan margin keamanan yang konstan bagi *semua* kolom. Bila kekuatan tersebut memang benar bervariasi menurut kerampingan, tentulah variasi ini harus dicakup dalam kekuatan nominal P_n.

Bjorhovde, seperti tercantum dalam *SSRC Guide* [6.8], membuktikan bahwa tiga kurva kekuatan kolom sudah memadai untuk mendekati kekuatan semua bentuk praktis. Kurva-kurva ini disebut sebagai Kurva SSRC 1, 2, dan 3 sedangkan detailnya dapat dijumpai dalam *SSRC Guide* [6.8, pp 59–62].

Dalam pengembangan spesifikasi desain faktor beban dan resistansi, Komite Spesifikasi AISC memutuskan untuk terus menggunakan hanya salah satu kurva kekuatan kolom untuk desain baja. Sebuah persamaan telah ditetapkan sehingga dapat mendekati modifikasi kurva SSRC 2 guna mencerminkan kemelencengan awal sebesar sekitar 1/1500.

Kekuatan nominal P_n dari batang tekan profil tempa diberikan oleh:

$$P_n = A_g F_{cr} \tag{6.7.6}$$

1. Untuk $\lambda_c \leq 1.5$:

$$F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \tag{6.7.7}$$

2. Untuk $\lambda_c > 1.5$:

$$F_{cr} = \left[\frac{0.887}{\lambda_c^2} \right] F_y \tag{6.7.8}$$

Dalam **Gambar 6.7.2**, para Pembaca mungkin akan melihat perbandingan antara kurva-kurva baru, **Persamaan 6.7.7** dan **6.7.8** dan kekuatan F_{cr} yang diperoleh dengan memperbesar persamaan tegangan ijin tradisional dengan faktor sebesar 1.67. Dalam *allowable stress design*, ASD-E2 memberikan tegangan aksial tekan F_a sebagai:

1. Untuk $\frac{KL}{r} < C_c$,

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} \tag{6.7.9}$$

2. Untuk $\frac{KL}{r} > C_c$,

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \tag{6.7.10}$$

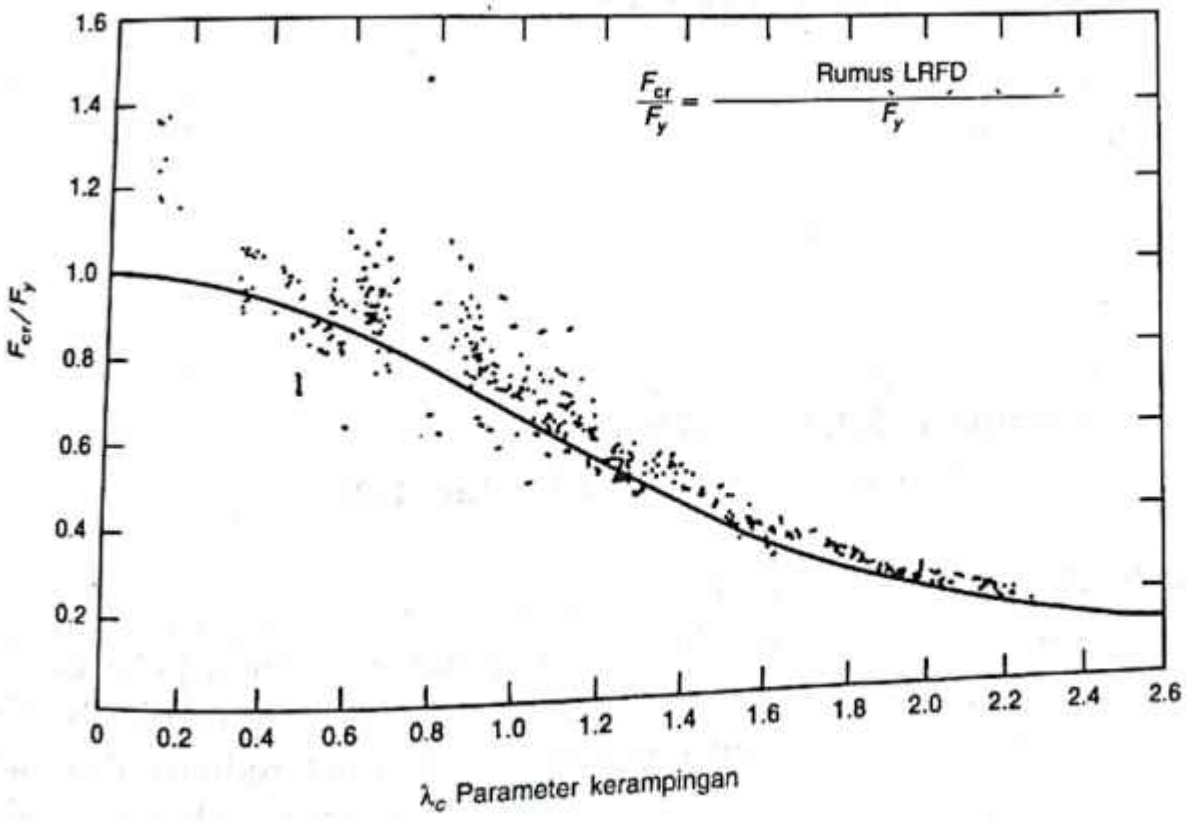
di mana:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \tag{6.7.11}$$

Penyebut dalam **Persamaan 6.7.9** merupakan faktor keamanan yang akan bertambah besar dengan bertambahnya rasio kerampingan. Pemasukan sebagian hubungan kekuatan ke dalam faktor keamanan dapat menyembunyikan fakta bahwa kekuatan nominal akan berkurang pada saat kerampingan naik akibat ketidak-lurusan awal. Kekuatan aktual yang tersirat dalam **Persamaan 6.7.9** adalah bahwa persamaan tersebut dikalikan dengan 1.67 (faktor keamanan nominal). **Gambar 6.7.9** membandingkan $1.67F_a$ yang menggunakan **Persamaan 6.7.9** dan **6.7.10** dengan F_{cr} yang menggunakan **Persamaan 6.7.7** dan **6.7.8**.

Persamaan kolom panjang, **Persamaan 6.7.10**, pada dasarnya merupakan persamaan Euler. Untuk konsistensi dengan desain tradisional, F_{cr} dari **Persamaan 6.7.10** dikalikan dengan 1.67 untuk mendapatkan ekspresi F_{cr} pada kolom panjang. Karena **Persamaan 6.7.10** merupakan persamaan Euler dibagi dengan 1.92, pengalian dengan 1.67 akan memberikan persamaan Euler dikalikan dengan (1.67/1.92), atau 0.87 kali persamaan Euler. Pada hakikatnya ini memberikan persamaan tegangan tekuk nominal kolom panjang F_{cr}, **Persamaan 6.7.8**, yang digunakan dalam *Load and Resistance Factor Design.*

Penentuan suatu persamaan *tunggal* untuk tegangan kritik F_{cr} yang diterima telah menjadi pokok kontroversi karena, seperti telah dibahas di muka, bentuk penampang lintang dan metode manufaktur (yakni tempa panas atau pengelasan) juga mempengaruhi kekuatan. Tambahan pula, tegangan sisa dan ketidak-lu-



Gambar 6.7.3 *Perbandingan persamaan LRFD untuk Fcr bagi kolom-kolom dengan data yang berasal dari uji fisik. (Data uji dari Hall [6.24])*

rusan menjadi parameter yang sangat berpengaruh namun tidak dapat dikuantifikasi. Faktor utama lainnya yang mempengaruhi kekuatan kolom adalah kondisi kekangan ujung, terutama pada situasi di mana simpulnya *tidak* rigid; Bjorhovde [6.21] telah memberikan pembahasan terinci yang berkaitan dengan berbagai situasi desain praktis. Bjorhovde [6.22, 6.23] juga telah meninjau ulang keseluruhan pokok tersebut dalam konteks desain faktor beban dan resistansi.

Selanjutnya, Hall [6.24] membandingkan data dari uji fisik dan menyajikan secara statistik berbagai ekspresi untuk F_{cr}. Meskipun persamaan-persamaan LRFD AISC yang sebenarnya tidak diacu oleh Hall, **Gambar 6.7.3** di sini ditampilkan untuk membandingkan data eksperimental [6.24] dengan persamaan LRFD untuk F_{cr}. Usulan mutakhir lain untuk kurva kekuatan kolom telah diberikan pula oleh Rondal dan Maquoi [6.26] dan Rotter [6.25] beserta Kurva SSRC 1, 2, dan 3 yang telah dibahas di muka [6.8]. Lui dan Chen [6.27] telah membahas desain kolom yang tidak sempurna dengan menggunakan pendekatan balok—kolom (*lihat* **ab 12**).

6.7.3 Kolom dengan Beban Aksial yang Bervariasi, Kolom Berjenjang, dan Kolom Tirus

Dibutuhkan perlakuan khusus bila beban aksial bervariasi di sepanjang kolom dan/atau batang tersebut tidak prismatik pada keseluruhan panjangnya. Para Pembaca dianjurkan melihat Anderson dan Woodward [6.28] dan Castiglioni [6.29] untuk kolom berjenjang, Shrivastava [6.30] untuk kolom yang beban aksialnya bervariasi, Sandhu [6.31] untuk kolom dengan beban aksial intermediat, dan Ermopoulos [6.32] untuk batang tirus di bawah beban aksial berjenjang.

6.8 Load and Resistance Factor Design

Persyaratan kekuatan dalam desain faktor beban dan resistansi menurut LRFD-E2 dapat dinyatakan sebagai:

$$\phi_c P_n \geq P_u \tag{6.8.1}$$

di mana: ϕ_c = 0.85
P_n = kekuatan nominal = $A_g F_{cr}$
F_{cr} = **Persamaan 6.7.7** dan **6.7.8**
P_u = beban layanan terfaktor (*lihat* **Bagian 1.9**)

Persamaan 6.7.7 dan **6.7.8** untuk F_{cr} dapat diterapkan dalam desain kolom profil **H** tempa biasa; meskipun demikian, bila digunakan elemen pelat berdinding tipis dalam penampang lintangnya, LRFD-E2 dan LRFD-Apendiks B telah memberi ketentuan untuk menggunakan efisiensi penampang tereduksi. Bila suatu elemen tipis menunjukkan ketidakstabilan (tekuk lokal), elemen sedemikian tidak dapat memikul porsi bebannya yang sebanding. Hal ini mungkin terjadi bila batas rasio lebar/ketebalan λ_r dari LRFD-Tabel B5.1 terlampaui.

LRFD-Apendiks B memperkenalkan faktor reduksi Q ke dalam **Persamaan 6.7.7** dan **6.7.8** bila pembatasan lebar/ketebalan dari LRFD-Tabel B5.1 tidak dipenuhi. Dengan demikian, bila tekuk lokal pada satu atau lebih komponen penampang lintang pelat dapat terjadi sebelum tercapainya keseluruhan kekuatan tekuk batang tersebut, F_y dalam persamaan-persamaan F_{cr} menjadi $\sqrt{Q}\,F_y$ yang untuk tegangan kritik F_{cr} memberikan hasil sebagai berikut:

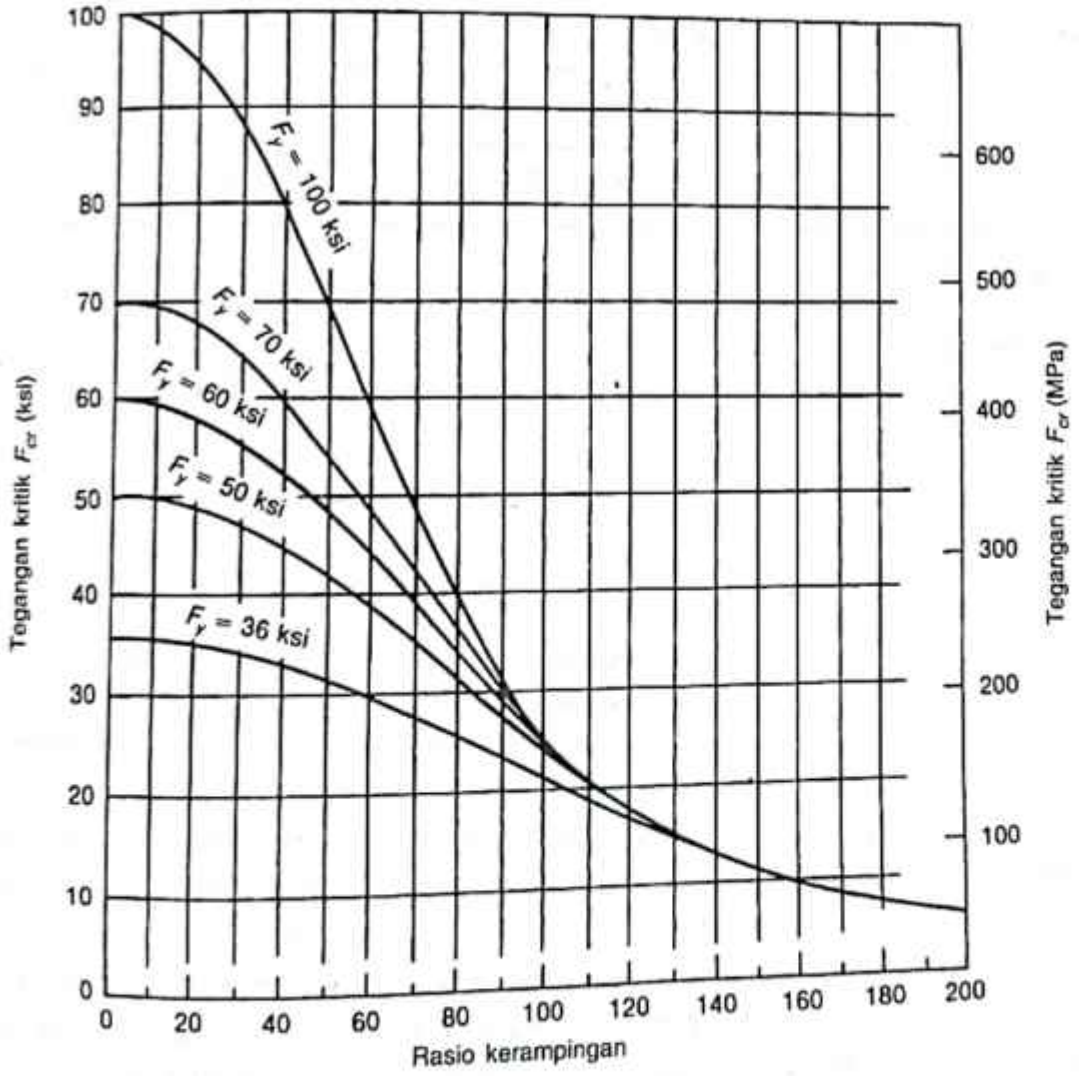
1. Untuk $\lambda_c\sqrt{Q} \le 1.5$,

$$F_{cr} = (0.658^{Q\lambda_c^2})QF_y \qquad (6.8.2)$$

2. Untuk $\lambda_c\sqrt{Q} > 1.5$,

$$F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_y \qquad (6.8.3)$$

Karena $Q = 1$ untuk semua penampang profil **H** tempa (profil standar W, S, dan M), pembahasan tentang alasan penggunaan faktor Q akan ditunda dahulu sampai **Pasal 6.18** dalam **Bagian II** mengenai tekukan pelat.



Gambar 6.8.1 *Tegangan kolom kritik Fcr versus Kl/r menurut Load and Resistance Factor Design untuk berbagai tegangan leleh*

Persamaan-persamaan tegangan [illegible] ksi. Dalam lihatkan dalam **Gambar 6.8.1** untuk F_y = 50, [illegible] **Tabel 6.8.1** diberikan acuan pasal-pasal Spesifikasi LRFD untuk aksial tekan.

6.8.1 Profil T dan Siku Ganda Bersimetri Tunggal

Penampang siku ganda dan profil **T** tempaan panas biasanya akan mengalami tekuk dalam ragam fleksural berdasarkan Kl/r menurut sumbu x atau y. Meskipun demikian, karena pusat geser (*lihat* **Bagian 8.4**) tidak berimpit dengan sentroid penampang, mungkin saja terjadi efek puntiran. Meskipun masalah puntir (torsi) baru dibahas dalam **Bab 8**, para Pembaca hendaknya memperhatikan bahwa tabel-tabel "KOLOM" Manual LRFD yang memberikan kekuatan aksial desain $\phi_c P_n$ untuk siku ganda dan profil **T** telah memasukkan pengaruh keadaan batas tekuk puntir-fleksural dalam perhitungan F_{cr}. Karena kekakuan puntir jelas berkaitan dengan kubus ketebalan elemennya (flens dan badan), efek ini hanya akan berpengaruh pada penampang-penampang dengan komponen yang sangat tipis, seperti penampang beralur kecil. Modifikasi λ_c dalam persamaan F_{cr} untuk memperhitungkan tekuk puntir-fleksural diberikan dalam LRFD-Apendiks E3.

Tabel 6.8.1 Aksial tekan — Acuan Spesifikasi AISC

Topik	Bagian dari spesifikasi	
	LRFD[1.15]	ASD[1.5]
Batas tekuk lokal untuk penampang "nonkompak"	B5.1	B5.1
Batas tekuk lokal untuk penampang "kompak"	B5.1	B5.1
Batas kerampingan	B7	B7
Braced frame, definisi	C2.1	C2.1
Unbraced frame, definisi	C2.2	C2.2
Faktor-faktor panjang efektif	C2	C2
Rumus-rumus kolom, dasar	E2	E2
Batang-batang *built-up*	E4	E4
Elemen-elemen tekan yang ramping	Apendiks B5.2	Apendiks B5.2
Chart penyesuaian	Komentar C2	Komentar C2

Kekuatan batang tekan penampang *built-up*, seperti batang siku ganda, juga dipengaruhi oleh jarak penyambung yang merekatkan elemen-elemen dan resistansi gelincir dari sambungan tersebut. Suatu batang tekan siku ganda pada sebuah struktur rangka hanya akan berfungsi sebagai sebuah batang tekan tunggal bila kedua profil siku tersebut direkatkan satu sama lain sehingga bila keadaan batas tekuk fleksural tercapai, tidak akan terjadi pergerakan aksial relatif (deformasi geser) pada salah satu siku secara relatif terhadap siku lainnya. Efek jarak antar penyambung dan eratnya sambungan (resistansi gelincir) telah dipelajari

oleh Libove [6.39], Astaneh, Goel, dan Hanson [6.40], dan Zahn dan Haaijer [6.41]. Aturan desain LRFD-E4 untuk batang-batang *built-up* dibahas secara rinci oleh Duan dan Chen [6.82] maupun dalam **Acuan 6.41**.

6.8.2 Kekuatan Kolom karena Pengaruh Jarak Konektor

Bila ragam tekuk yang menentukan "melibatkan deformasi relatif yang menimbulkan gaya-gaya geser pada konektor di antara masing-masing profil", harus digunakan rasio kerampingan yang telah dimodifikasi $(KL/r)_m$. Untuk penampang siku ganda, ini akan terjadi bila tekuk fleksural yang menentukan muncul pada bidang sejajar dengan kaki utama (sumbu y dalam sifat penampang Manual LRFD). Bila keadaan batas tekuk fleksural yang menentukan berdasarkan kerampingan KL/r pada bidang yang sejajar dengan kaki-kaki yang saling beradu punggung (sumbu x dalam sifat penampang Manual LRFD), siku-siku tersebut akan bergerak sejajar satu sama lain dan konektornya tidak akan mempengaruhi kekuatan tekannya.

Rasio kerampingan yang telah dimodifikasi $(KL/r)_m$ juga tergantung pada resistansi gelincir sambungan yang bersangkutan. LRFD-E4 memberikan:

1. Untuk *sambungan baut yang cukup kencang*:

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{a}{r_i}\right)^2} \tag{6.8.4}$$

2. Untuk *konektor las* dan untuk *sambungan baut yang dikencangkan penuh*:

Untuk $\dfrac{a}{r_i} \leq 50$,

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{a}{r_i} - 50\right)^2} \tag{6.8.5}$$

Untuk $\dfrac{a}{r_i} > 50$,

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \left(\frac{KL}{r}\right)_0 \tag{6.8.6}$$

di mana $\left(\dfrac{KL}{r}\right)_0$ = rasio kerampingan dari batang *built-up* yang bekerja sebagai satu kesatuan (untuk sumbu-y pada batang siku ganda)

$\dfrac{a}{r_i}$ = rasio kerampingan terbesar dari sebuah komponen individual (untuk sumbu-z siku tunggal dari batang siku ganda)

$\left(\frac{Kl}{r}\right)_m$ = rasio kerampingan yang sudah dimodifikasi (diperbesar berdasarkan konektornya (untuk batang siku ganda, ini menggantikan Kl/r berdasarkan sumbu y)

a = jarak antara konektor yang diukur menurut panjang batang

r_i = radius girasi minimum komponen individual (untuk sumbu z dari sebuah siku)

Penerapan rasio kerampingan yang dimodifikasi untuk batang siku ganda hanya berlaku bila $(Kl/r)_y$ melebihi $(Kl/r)_x$; meskipun demikian, rasio yang dimodifikasi itu juga harus dicek bila $(Kl/r)_x$ hanya lebih besar sedikit saja. Akibatnya, harga yang dimodifikasi *selalu* menggantikan $(Kl/r)_y$ untuk batang siku ganda.

6.8.3 Penampang Tubular

Rumus-rumus F_{cr} berlaku pula untuk penampang tubular. Informasi tambahan mengenai batang tekan tubular dapat dijumpai dalam karya Sherman [6.14, 6.15, 6.33], maupun Snyder dan Lee [6.34, 6.35], Chen dan Ross [6.36], dan Ross, Chen, dan Tall [6.37]. Untuk kolom bulat, *lihat* Galambos [6.38].

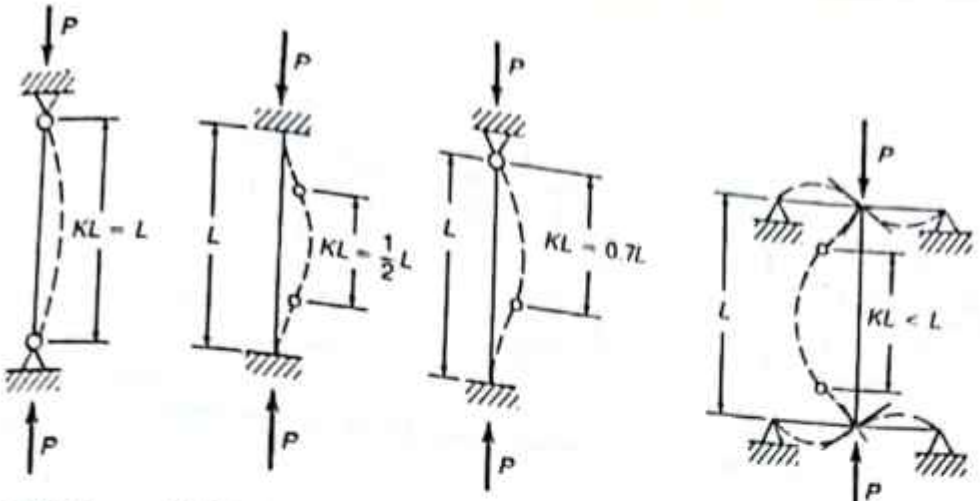
6.8.4 Penampang Tak–Simetrik

Penampang tak simetrik, seperti siku tunggal, dan kasus-kasus khusus seperti bentuk salib dan penampang **Z**, membutuhkan pertimbangan khusus dengan menggunakan aturan LRFD-Apendiks E. Kekuatan penopang (*strut*) siku ganda dan penampang *built-up* lainnya yang dihubungkan dengan penyambung (*fastener*) dipengaruhi oleh jarak antar penyambung sebagaimana telah dibicarakan di muka.

Pembahasan terinci tentang penampang tak simetrik berada di luar cakupan buku ini. Para Pembaca dianjurkan mengacu pada Kennedy dan Murty [6.42, 6.43], Woolock dan Kitipornchai [6.44], El-Tayem dan Goel [6.45, 6.46], Chuenmei [6.47], dan Smith [6.48]. Untuk desain batang siku tunggal, Pembaca dianjurkan membuka *Specification for Allowable Stress Design of Single—Angle Members* [6.83]. Spesifikasi LRFD sudah cukup terinci membahas penampang-penampang sedemikian, sehingga tidak diperlukan aturan khusus lagi.

6.9 Panjang Efektif

Sejauh ini, pembahasan mengenai kekuatan kolom mengasumsikan ujung sendi di mana tidak ada kekangan rotasional momen. Kekangan momen nol pada ujung merupakan situasi paling lemah untuk batang tekan yang salah satu ujungnya



(a) Rotasi ujung tak ditahan (b) Rotasi ujung ditahan penuh (c) Salah satu ujung ditahan, yang lain bebas (d) Masing-masing ujung ditahan sebagian

Gambar 6.9.1 Panjang efektif KL; tidak ada translasi simpul

tidak dapat bergerak transversal relatif terhadap ujung lainnya. Untuk kolom berujung sendi semacam ini, panjang ekivalen ujung sendi KL merupakan panjang L sebenarnya; dengan demikian $K = 1.0$ seperti dalam **Gambar 6.9.1*a***. Panjang ekivalen berujung sendi disebut sebagai *panjang efektif.*

Untuk kebanyakan situasi nyata, kekangan momen pada ujung-ujung batang memang benar-benar ada sehingga menyebabkan titik momen nol (titik balik/*inflection point*) bergerak menjauhi ujung-ujung yang ditahan seperti pada **Gambar 6.9.1*b***, ***c***, dan ***d*** di mana panjang efektif KL tereduksi.

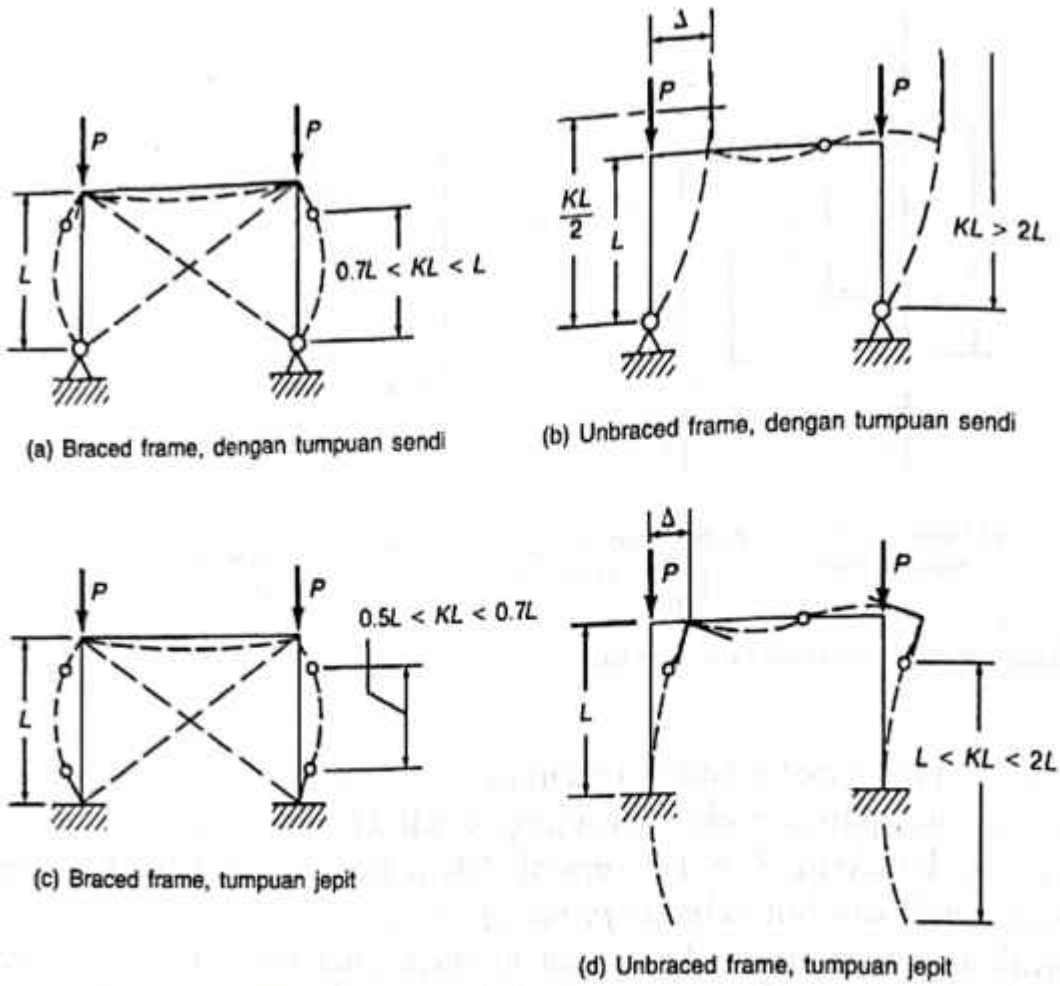
Dalam banyak situasi, sangat sulit, atau bahkan tidak mungkin, untuk menilai secara tepat derajat kekangan momen yang disumbangkan oleh batang-batang berdekatan yang mengikat ke kolom, oleh pondasi setempat dan lapisan tanah di bawahnya, dan interaksi penuh semua batang dalam struktur rangka baja.

Baik apakah derajat kekangan ujung dapat ditentukan dengan tepat atau tidak, desainer harus memahami konsep tentang *braced frame* (rangka dengan sabuk penyokong) dan *unbraced frame* (rangka tanpa sabuk penyokong). Pembahasan yang lebih lengkap mengenai struktur rangka diberikan dalam **Bab 14**.

6.9.1 Braced Frame

Menurut LRFD-C2.1, *braced frame* adalah rangka di mana "stabilitas lateralnya diberikan oleh sabuk sokongan diagonal, dinding geser, atau sejenisnya". Sistem sabukan vertikal harus "mencukupi, sebagaimana ditentukan oleh analisis struktur, untuk mencegah tekuk dari struktur dan menjaga stabilitas lateral struktur itu, termasuk pengaruh momen sekunder dari goyangan (*drift*), dalam kondisi beban terfaktor ..." Perhatikan bahwa kolom vertikal pada suatu rangka tak bergoyang (*braced frame*) tidak akan mengalami pergoyangan titik ujung atasnya relatif terhadap titik ujung bawah.

Gambar 6.9.1 melukiskan panjang efektif kolom pada sebuah *braced frame.*



Gambar 6.9.2 *Panjang efektif KL untuk struktur rangka*

Bila telah ditentukan sebelumnya bahwa rangka diberi sabuk, sabukan tersebut dianggap dapat memberikan kekangan lateral yang dibutuhkan, seperti dalam **Gambar 6.9.2*a*** dan ***c***; karenanya, titik simpulnya diasumsikan tidak dapat bergerak secara lateral (paling tidak pada analisis struktur tingkat pertama) dan setiap kolom dapat didesain seolah-olah berupa kolom tunggal setelah faktor panjang efektif K ditentukan.

Dari **Gambar 6.9.1** dan **6.9.2*a*** dan ***c***, dapat kita amati bahwa kekangan ujung pada rangka tak bergoyang (*braced frame*) selalu mereduksi jarak antara titik balik (*inflection point*); yakni mereduksi panjang efektif KL dari kondisi ujung sendi. Faktor panjang efektif KL akan selalu kurang dari satu.

6.9.2 Unbraced Frame

Menurut LRFD-C2.2, *unbraced frame* adalah struktur rangka di mana "stabilitas lateralnya tergantung pada kekakuan lentur balok dan kolom yang disambung dengan rigid. Tekuk pada *unbraced frame* merupakan salah satu goyangan di mana, misalnya, puncak kolom bergerak ke samping relatif terhadap landasannya. Dalam **Gambar 6.9.2*b*** dan ***d***, suatu *unbraced frame* diperlihatkan memiliki tekuk goyangan. Bentuk yang dapat mengalami tekuk, dan dari sebab itu

kini menjadi panjang efektif kolom, akan tergantung pada kekakuan batang-batang yang ikut menahan lenturan. Panjang efektif KL dapat diperoleh dengan mencocokkan bentuk tekuk kolom dengan bentuk tekukan kolom berujung sendi. Seperti terlihat dalam **Gambar 6.9.2**, KL akan selalu melebihi L.

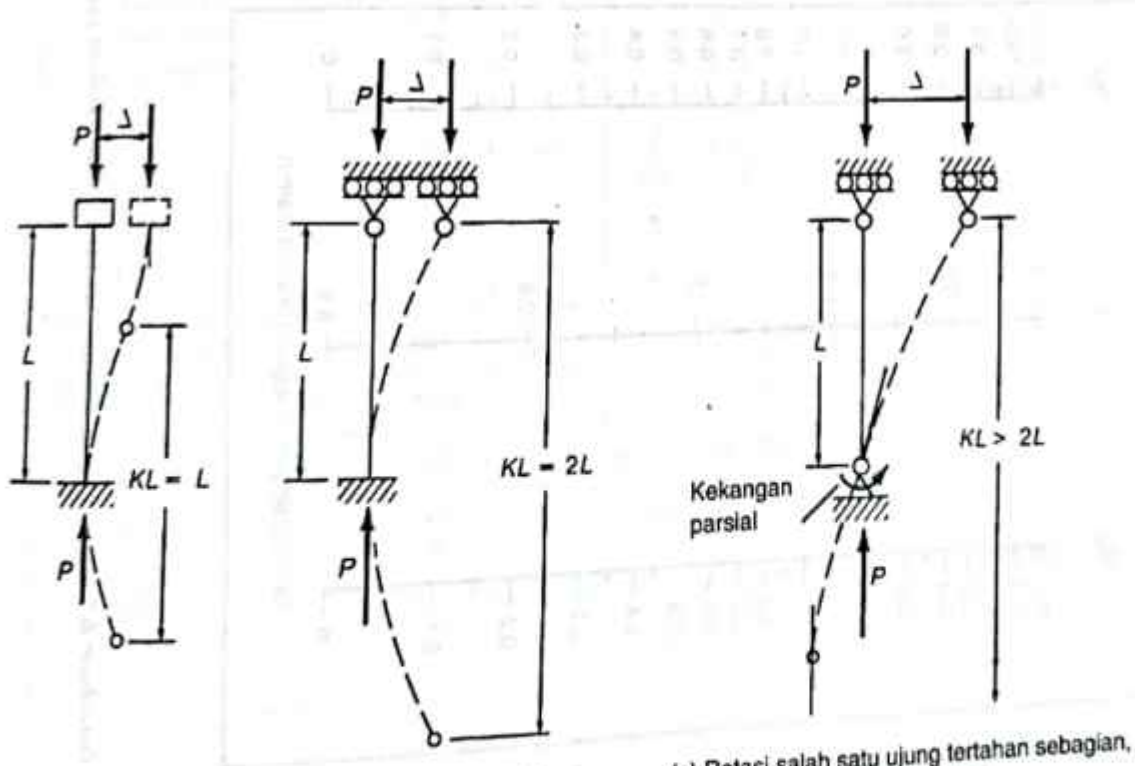
Untuk memahami mengapa harga *minimum* K pada *unbraced frame* secara teoretik adalah 1.0, perhatikan struktur kerangka pada **Gambar 6.9.2*d***. Situasi paling kaku akan terjadi bila balok tersebut sangat kaku, yakni tidak dapat melentur. Maka titik baliknya akan berada pada pertengahan tinggi dan bentuk tekukan akan seperti **Gambar 6.9.3*a***.

Situasi praktis pada *unbraced frame* adalah bahwa K selalu *lebih besar dari satu*. Di samping itu, tak ada cara yang sederhana untuk mendapatkan suatu harga selain dengan mengevaluasi kekangan ujungnya. LRFD-C2.2 mensyaratkan bahwa K "harus ditentukan dengan analisis struktur dan tidak boleh kurang dari satu".

6.9.3 Nomograf untuk Mengevaluasi Faktor Panjang Efektif K

Untuk desain pada umumnya, adalah sangat tidak praktis menganalisis keseluruhan rangka hanya untuk menentukan kekuatan tekuk dan panjang efektif batang-batangnya.

Berbagai peneliti telah membuat nomograf untuk memudahkan penentuan beban tekuk dan panjang efektif pada situasi-situasi yang sering dijumpai. Faktor panjang efektif K diberikan oleh Anderson dan Woodward [6.28] untuk kolom berjenjang, Sandhu [6.31] untuk kolom dengan beban aksial intermediat, Lu [6.49]



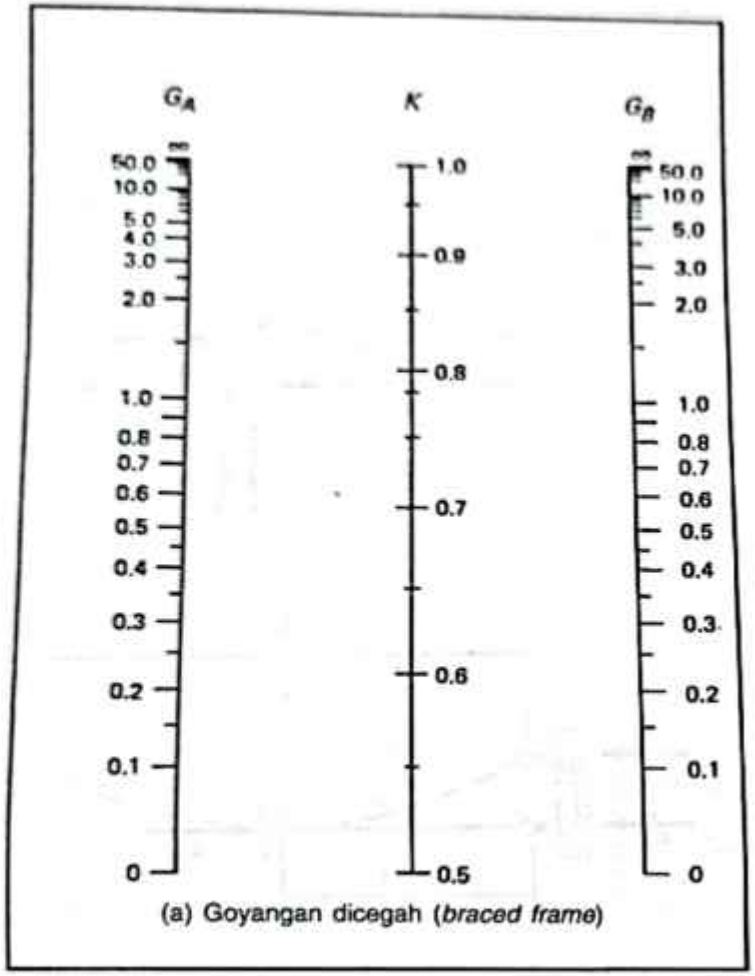
(a) Rotasi ujung yang sepenuhnya tertahan

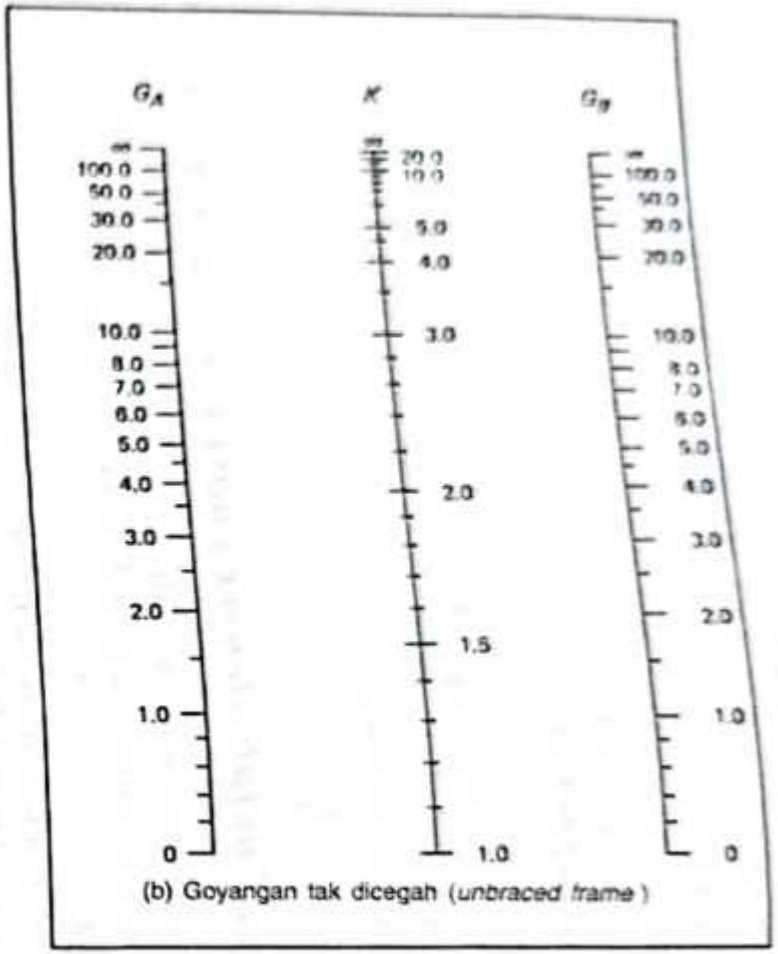
(b) Rotasi salah satu ujung sepenuhnya tertahan, sedang ujung lainnya bebas

(c) Rotasi salah satu ujung tertahan sebagian, sedang ujung lainnya bebas

Gambar 6.9.3 *Panjang efektif KL: translasi sambungan mungkin terjadi*

PERPUSTAKAAN D III F. TEKNIK



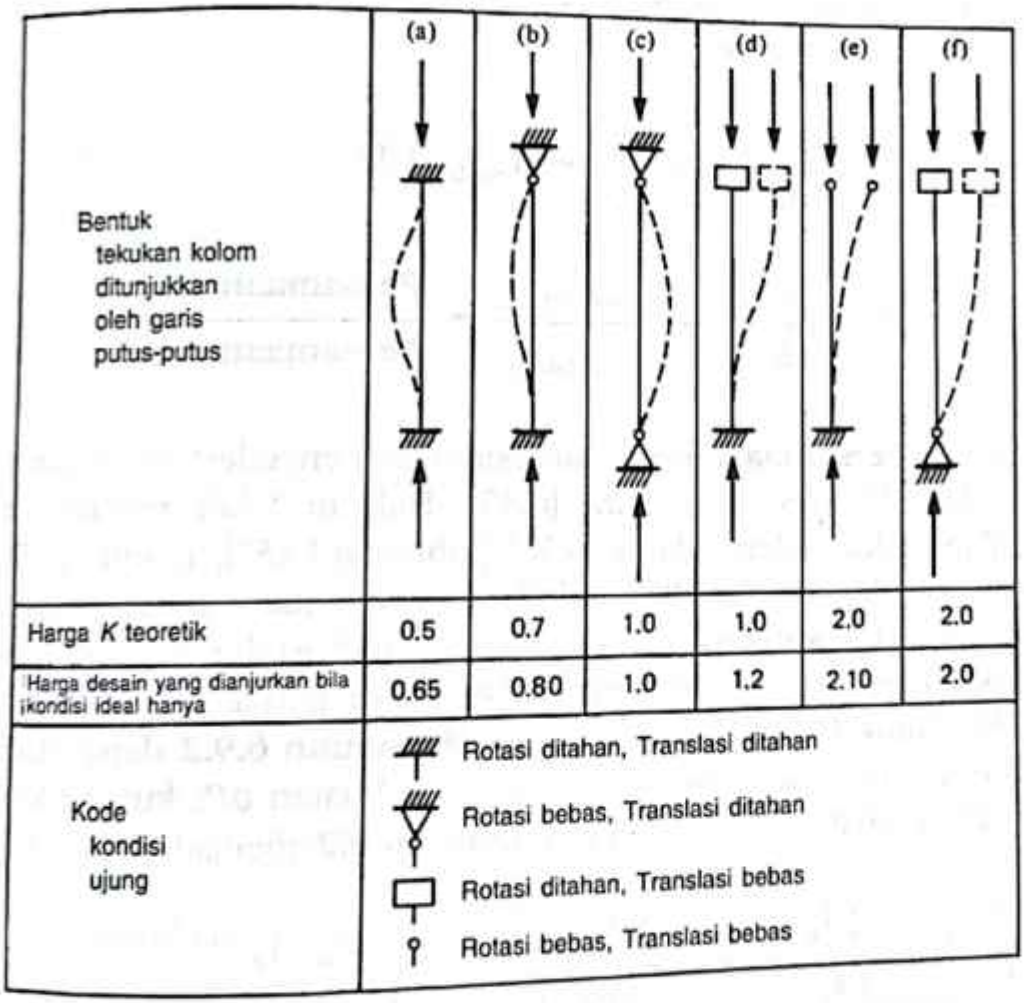


Gambar 6.9.4 *Nomograf untuk panjang efektif kolom pada rangka menerus [6.46], di mana* $G = \dfrac{(\Sigma I/L \text{ kolom})}{(\Sigma I/L \text{ gelagar})}$

untuk rangka pelana (*gabled frame*), dan Hassan [6.50] untuk rangka satu lantai, satu bentang, dengan beban vertikal yang bekerja pada titik tengah kolom sebagai tambahan terhadap beban pada puncak. Galambos [6.51] telah menjabarkan faktor tersebut untuk rangka satu dan dua lantai, rangka lebar satu bentangan; sedangkan Gurfinkel dan Robinson [6.52] telah memberikan harga-harga K untuk kasus umum pada kolom yang mempunyai kekangan rotasional elastik (baik dengan ataupun tanpa kekangan elastik goyangan). Switsky dan Wang [6.53] telah membuat rangkuman data beban tekuk dari mana dapat ditentukan panjang efektif rangka lebar satu bentang hingga rangka lima lantai.

Prosedur yang paling banyak digunakan untuk mendapatkan panjang efektif ialah dengan nomograf (*alignment chart*) yang pertama kali dibuat oleh O.J. Julian dan L.S. Lawrence; dan dipresentasikan secara terinci oleh T.C. Kavanagh [6.54]*. Metode nomograf dengan menggunakan **Gambar 6.9.4** juga dianjurkan Komentar LRFD sebagai telah memenuhi persyaratan "analisis" LRFD-C2.2 untuk mendapatkan harga-harga K yang "memadai".

Untuk situasi-situasi sederhana, kita dapat menggunakan **Gambar 6.9.5** dari *SSRC Guide* [6.8]. Untuk *braced frame*, harga faktor K sebesar satu sudah cukup



Gambar 6.9.5 *Faktor panjang efektif untuk kolom yang mendapat pembebanan terpusat dengan berbagai idealisasi kondisi ujung. (Diadaptasi dari Acuan 6.8, p.52)*

*Derivasi diberikan secara terinci dalam edisi kedua buku ini (1980) (pp.843-851)

konservatif, dan masih dapat dilakukan interpolasi dari **Gambar 6.9.5**. Untuk *unbraced frame*, kecuali mungkin untuk kondisi tipe tiang bendera dari **Gambar 6.9.5** kasus (*e*), harga *K* sembarang tidak cukup memuaskan untuk desain.

6.9.4 *Penggunaan Nomograf Faktor K untuk Perilaku Kolom Tak—Elastik*

Desain kolom dalam konstruksi biasa melibatkan rasio kerampingan KL/r dalam rentang tekuk tak elastik (yakni, $\lambda <$ atau $F_{cr} >$ sekitar $0.5F_y$. Kekuatan tekuk tak elastik diberikan oleh **Persamaan 6.3.1**:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \qquad [6.3.1]$$

di mana E_t merupakan modulus elastisitas tangen pada tegangan P_{cr}/A_g. Bila digunakan nomograf untuk mengevaluasi *K*, secara implisit diasumsikan tekuk elastik menentukan. Bila kolomnya tak elastik dan baloknya elastik, penyesuaian dapat dilakukan pada faktor kekangan *G* yang digunakan dalam nomograf tersebut. Kemudian faktor *G* akan menjadi:

$$G_{\text{tak elastik}} = \frac{\Sigma(E_t I/L)_{\text{kolom}}}{\Sigma(EI/L)_{\text{balok}}} = G_{\text{elastik}}\ [\beta_s] \qquad (6.9.1)$$

di mana:

$$\beta_s = \frac{E_t}{E} = \frac{F_{\text{cr, tak elastik}}}{F_{\text{cr, elastik}}} = \frac{\textbf{Persamaan 6.8.2}}{\textbf{Persamaan 6.8.3}} \qquad (6.9.2)$$

Prosedur penggunaan **Persamaan 6.9.2** dan berbagai penyederhanaan untuk kegunaan praktis telah dibahas oleh Yura [6.55]. Hal ini telah merangsang dilakukannya sejumlah diskusi oleh Adams [6.56], Johnston [6.57], Disque [6.58], Smith [6.59], Matz [6.60], dan Stockwell [6.61]. LRFD-Komentar C2 mensyahkan prosedur Yura yang telah dimodifikasi oleh Disque [6.58]. Prosedur Yura—Disque dipresentasikan dalam konteks *Allowable Stress Design* di mana E_t/E dapat dianggap sebagai f_a/F'_e. Untuk LRFD, pembilang dari **Persaman 6.9.2** dapat dibil sebagai P_u/A_g karena, bila didesain dengan tepat, kekuatan ϕP_n kurang lebih akan sama dengan P_u. Perhatikan bahwa **Persamaan 6.9.2** menjadi:

$$\beta_s = \frac{E_t}{E} \approx \frac{\phi[F_{\text{cr, pendek}}]A_g}{\phi[F_{\text{cr, panjang}}]A_g} \approx \frac{\phi P_n}{\phi\left[\begin{matrix}\text{Persamaan}\\ \text{Euler}\end{matrix}\right]A_g} = \frac{P_u/A_g}{\phi\left[\begin{matrix}\text{Persamaan}\\ \text{Euler}\end{matrix}\right]} \qquad (6.9.3)$$

LRFD Persamaan(E2-3), **Persamaan 6.8.3** sebenarnya merupakan 0.877 kali persamaan Euler, yang hampir sama dengan ϕ (yakni, 0.85) kali persamaan tersebut.

Tabel 6.9.1 Penyesuaian β_s dari faktor kekangan G* untuk memperhitungkan tekuk tak elastik – untuk baja A36

$$\beta_s = \frac{E_t}{E} = \frac{F_{cr,\ tak\ elastik}}{F_{cr,\ elastik}} = \frac{\text{LRFD Persamaan (E2-2)}}{\text{LRFD Persamaan (E2-3)}} = \frac{\textbf{Persamaan 6.8.2}}{\textbf{Persamaan 6.8.3}}$$

λ_c	$\frac{Kl}{r}$	F_{cr}	β_s	λ_c	$\frac{Kl}{r}$	F_{cr}	β_s
0.20	17.8	35.4	0.04	0.82	73.1	27.2	0.58
0.22	19.6	35.3	0.05	0.84	74.9	26.8	0.60
0.24	21.4	35.1	0.06	0.86	76.7	26.4	0.62
0.26	23.2	35.0	0.07	0.88	78.5	26.0	0.64
0.28	25.0	34.8	0.09	0.90	80.2	25.6	0.66
0.30	26.7	34.7	0.10	0.92	82.0	25.3	0.68
0.32	28.5	34.5	0.11	0.94	83.8	24.9	0.70
0.34	30.3	34.3	0.13	0.96	85.6	24.5	0.71
0.36	32.1	34.1	0.14	0.98	87.4	24.1	0.73
0.38	33.9	33.9	0.15	1.00	89.2	23.7	0.75
0.40	35.7	33.7	0.17	1.02	90.9	23.3	0.77
0.42	37.4	33.4	0.19	1.04	92.7	22.9	0.78
0.44	39.2	33.2	0.20	1.06	94.5	22.5	0.80
0.46	41.0	32.9	0.22	1.08	96.3	22.1	0.82
0.48	42.8	32.7	0.24	1.10	98.1	21.7	0.83
0.50	44.6	32.4	0.26	1.12	99.9	21.3	0.85
0.52	46.4	32.1	0.28	1.14	101.6	20.9	0.86
0.54	48.1	31.9	0.29	1.16	103.4	20.5	0.87
0.56	49.9	31.6	0.31	1.18	105.2	20.1	0.89
0.58	51.7	31.3	0.33	1.20	107.0	19.7	0.90
0.60	53.5	31.0	0.35	1.22	108.8	19.3	0.91
0.62	55.3	30.6	0.37	1.24	110.6	18.9	0.92
0.64	57.1	30.3	0.39	1.26	112.3	18.5	0.93
0.66	58.8	30.0	0.41	1.28	114.1	18.1	0.94
0.68	60.6	29.7	0.43	1.30	115.9	17.7	0.95
0.70	62.4	29.3	0.46	1.32	117.7	17.4	0.96
0.72	64.2	29.0	.048	1.34	119.5	17.0	0.97
0.74	66.0	28.6	0.50	1.36	121.3	06.6	0.97
0.76	67.8	28.3	0.52	1.38	123.0	16.2	0.98
0.78	69.5	27.9	0.54	1.40	124.8	15.8	0.98
0.80	71.3	27.5	0.56	1.42	126.6	15.5	0.99

*G didefinisikan dalam **Gambar 6.9.4** dan digunakan dengan nomograf (**Gambar 6.9.4**)

Dengan demikian, tampaknya cukup masuk akal untuk menggunakan tegangan nominal P_u/A_g akibat beban terfaktor sebagai pembilang dari **Persamaan 6.9.2** sedangkan **Persamaan 6.8.3** sebagai penyebutnya.

Harga-harga β_s (**Persamaan 6.9.2**) telah ditabulasikan untuk baja A36 dalam **Tabel 6.9.1**. LRFD Manual [1.17] menyebutnya sebagai "Faktor Reduksi Kekakuan" (*stiffness reduction factor*), dan juga mencakup harga-harga untuk F_y = 50 ksi.

Untuk batang tekan pada struktur rangka, kekangan ujung mungkin terjadi dan

translasi simpul dicegah sedemikian rupa sehingga K dapat secara logis kurang dari 1.0. Dengan pembebanan statik, tegangan pada semua batang tetap dalam proporsi yang sama terhadap yang lain untuk berbagai macam beban. Bila semua batang didesain untuk berat minimum, batang-batang tersebut akan mencapai kapasitas ultimit secara serentak di bawah beban hidup. Dengan demikian, kekangan yang diberikan oleh rangkaian batang-batang pada sambungan akan hilang, atau paling tidak sangat berkurang. Maka dari itu, SSRC memperkenankan penggunaan $K = 1.0$ untuk batang-batang rangka yang didesain untuk posisi pembebanan tetap. Bila didesain untuk sistem pembebanan yang bergerak pada pada rangka, untuk menciptakan kekangan ujung, K dapat direduksi sampai 0.85 karena kondisi yang menyebabkan tegangan maksimum pada batang yang bersangkutan tidak akan menyebabkan tegangan maksimum pada rangkaian batang-batang tersebut [6.8].

Bila batang-batang di dekat ujung kolom merupakan batang yang mendapat beban tekan yang berat, batang-batang tersebut dapat memberikan efek destabilisasi dan bukan efek stabilisasi terhadap batang yang sedang dihitung; akibatnya, faktor G akan *negatif*. Bridge dan Fraser [6.8.1] telah memberikan suatu prosedur untuk memperhitungkan faktor G negatif ini.

6.10 Load and Resistance Factor Design pada Profil-profil Tempa (W, S, dan M) yang Terkena Aksial Tekan

Bagian ini mengacu pada Manual LRFD, Bagian 1 tentang sifat-sifat profil tempa dan Bagian 2 tentang tabel beban kolom.

6.10.2 Prosedur Umum

Baik dengan *Load and Resistance Factor Design* ataupun *Allowable Stress Design*, kekuatan batang tekan didasarkan atas luas brutonya A_g. Kekuatannya selalu merupakan fungsi rasio kerampingan efektif KL/r. Sedangkan untuk kolom pendek, kekuatan merupakan fungsi tegangan leleh F_y bajanya. Karena radius girasi r tergantung pada penampang yang dipilih, desain batang tekan merupakan suatu proses tidak langsung kecuali bila tersedia tabel beban kolom. Prosedur umum untuk memenuhi **Persamaan 6.8.11** adalah sebagai berikut:

1. Hitunglah beban layanan terfaktor P_u dengan menggunakan semua beban kombinasi yang sesuai seperti yang dibahas dalam **Bagian 1.8**.
2. Asumsikan nilai tegangan kritik F_{cr} berdasarkan KL/r yang diasumsikan.
3. Hitunglah luas bruto A_g yang dibutuhkan dari $P_u/(\phi_c F_{cr})$.
4. Pilihlah suatu penampang. Perhatikan bahwa pembatasan lebar/tebal λ_r dar LRFD-Tabel B5.1 untuk mencegah terjadinya tekuk lokal, harus dipenuhi Hal ini dibahas dalam **Bagian II** dari bab ini, khususnya **Bagian 6.16**.
5. Berdasarkan harga yang lebih besar dari $(KL/r)_x$ atau $(KL/r)_y$ untuk penam pang yang dipilih, hitunglah tegangan ktitik F_{cr}.

6. Hitunglah kekuatan desain $\phi_c P_n = \phi_c P_{cr} A_g$ untuk penampang tersebut.
7. Bandingkan $\phi_c P_n$ dengan P_u. Bila kekuatan yang dicapai hanya beberapa-persen kurang dari kekuatan yang diminta, desain tersebut masih dapat diterima. Bila tidak, ulangi langkah 1 sampai 7.

■ Contoh 6.10.

Pilihlah penampang **W** yang paling ringan dari baja A36 guna berfungsi sebagai batang kolom berujung sendi sepanjang 16 ft untuk memikul beban aksial tekan sebesar 95 kips beban mati dan 100 kips beban hidup pada suatu struktur bersabuk, seperti dalam **Gambar 6.10.1**. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* dan tunjukkan tiga pilihan pertama.

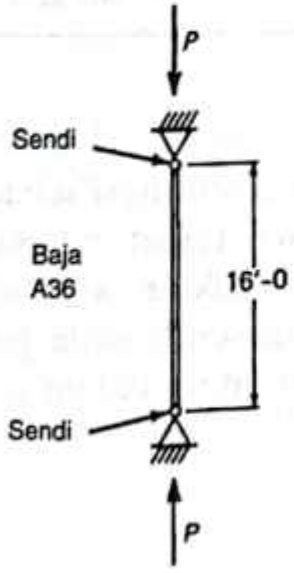
Penyelesaian:

(a) Carilah beban-beban terfaktor:

$$P_u = 1.2D + 1.6L = 1.2(95) + 1.6(100) = 274 \text{ kips}$$

(b) Taksirlah rasio kerampingan dan carilah F_{cr}. Karena diasumsikan berujung sendi, panjang efektif KL sama dengan panjang L yang sebenarnya, yakni $K = 1.0$. Dengan menganggap $KL = 16$ ft sebagai batang yang cukup panjang, rasio kerampingan tersebut dapat diperkirakan sekitar 70 atau 80. Untuk profil **W**, $Q = 1.0$, sehingga ketentuan khusus dari LRFD–Apendiks B tidak terpakai. Dari **Gambar 6.8.1** kita dapat memperkirakan $F_{cr} \approx 27$ ksi ($KL/ \approx 75$). Bila tidak, LRFD-Formula (E2-2) atau LRFD "NUMERICAL VALUES" TABEL 3–36 dapat digunakan pula. Kemudian, luas yang diminta dapat dihitung sebagai:

$$A_g \text{ yang diminta} = \frac{P_u}{\phi_c F_{cr}} = \frac{274}{0.85(27)} = 11.9 \text{ inch}^2$$



Gambar 6.10.1 Contoh 6.10.1

(c) Pilih suatu penampang. Karena tekuk dalam arah yang lemah [berdasarkan $(KL/r)_y$)] akan menentukan untuk profil **W** bila nilai KL sama untuk arah sumbu x maupun y. penampang yang paling ringan untuk soal ini adalah yang memiliki r_x/r_y terkecil. Harga r_x yang tinggi menunjukkan kekuatan berlebihan pada sumbu yang kuat, yang hanya dapat dimanfaatkan dengan pemberian sabukan tambahan pada arah yang lemah.

Dengan menggunakan Tabel Beban Kolom dalam LRFD-Manual [1.17] **Bagian 2**, kita dapat memilih profil W8×48, profil W8 teringan yang paling tidak memiliki luas yang dibutuhkan. Lagipula, penampang W8 ini memiliki r_x/r_y terkecil untuk luas penampang yang diberikan. Coba, penampang W8×48.

(d) Cek penampang W8×48. $A = 14.1$ inch^2:

$$\frac{KL}{r_y} = 92; \qquad F_{cr} = 23.0 \text{ ksi}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 0.85(23.0)14.1 = 19.5(14.1) = 276 \text{ kips}$$

$$[\phi_c P_n = 276 \text{ kips}] \geq [P_u = 274 \text{ kips}] \quad \text{OK}$$

Perhatikan bahwa LRFD Manual "NUMERICAL VALUES" TABEL 3–36 telah menyediakan suatu tabulasi dari $\phi_c F_{cr}$ untuk harga-harga KL/r.

Karena kekuatan desain ϕP_n melampaui beban terfaktor P_u, dan karena tidak ada penampang lain yang dengan luas ini memiliki r_x/r_y terkecil, W8×48 merupakan penampang teringan yang memenuhi. Penampang-penampang lain yang lebih dalam akan lebih berat, seperti berikut ini:

Penampang	Luas (inch^2)	KL/r_y	F_{cr} (ksi)	$\phi_c P_n$(kips)	
W8×48	14.1	92	23.0	276	Pilihan ke-1
W10×49	14.4	76	26.0	326	Pilihan ke-2
W12×50	14.7	98	21.7	271	Abaikan 1% kurang
W14×53	15.6	100	21.3	282	Pilihan ke-3

■

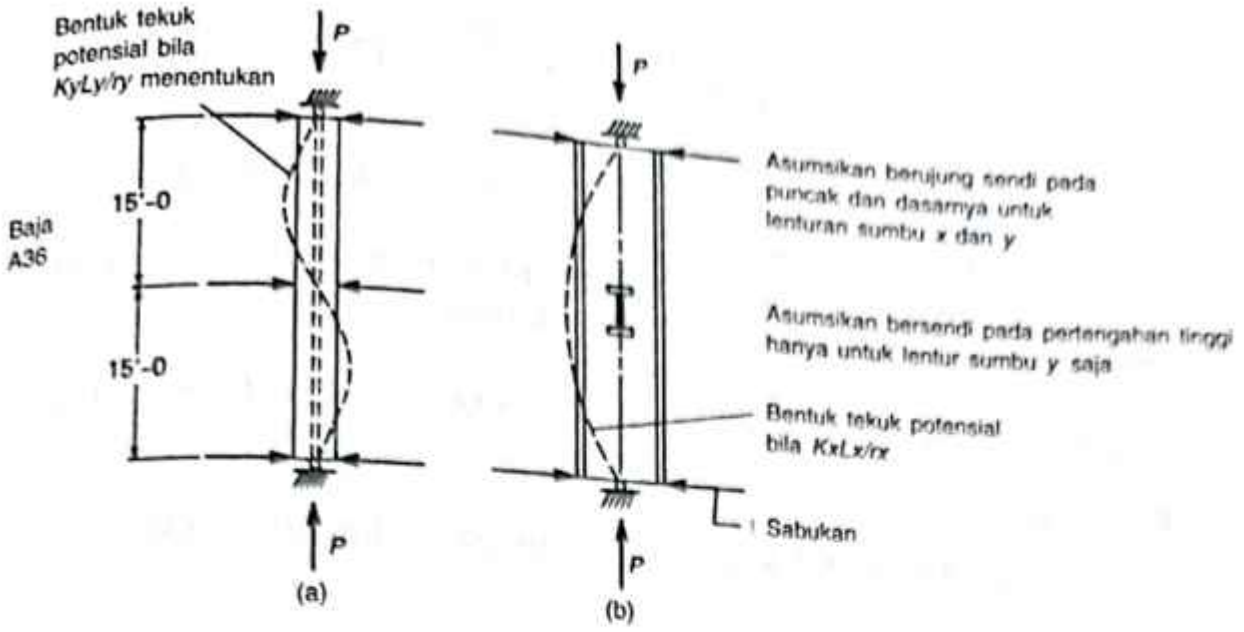
■ Contoh 6.10.2

Pilihlah penampang **W** teringan dari baja A36 yang akan berfungsi sebagai batang utama sepanjang 30 kaki untuk memikul beban aksial tekan sebesar 50 kips beban mati dan 110 kips beban hidup dalam sebuah struktur bersabuk, seperti **Gambar 6.10.2**. Batang tersebut diasumsikan berujung sendi pada puncak dan dasarnya; dan mempunyai tumpuan pada pertengahan tinggi dalam arah lemah. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC.

Penyelesaian:

(a) Carilah beban terfaktor:

$$P_u = 1.2D + 1.6L = 1.2(50) + 1.6(110) = 236 \text{ kips}$$



Gambar 6.10.2 *Contoh 6.10.2*

(b) Pilihlah dari Tabel Beban Kolom LRFD. Faktor panjang efektif K untuk tekuk pada arah sumbu kuat maupun lemah sama dengan satu; yakni $K_x = K_y = 1.0$. Karena Tabel Beban Kolom AISC dihitung dengan asumsi bahwa $(KL/r)_y$ menentukan, masukkan tabel-tabel ini dengan panjang efektif $(KL)_y$. Dengan demikian, masukkan dengan:

$$P_u = 236 \text{ kips}; \qquad (KL)_y = 15 \text{ ft}$$

Mulailah dengan penampang W8 yang dangkal dan diteruskan dengan penampang-penampang yang lebih dalam, carilah:

W8×40	$\phi_c P_n = 238$ kips	$r_x/r_y = 1.73$
W10×45	$\phi_c P_n = 267$ kips	$r_x/r_y = 2.15$
W12×45	$\phi_c P_n = 257$ kips	$r_x/r_y = 2.65$

Karena kondisi tumpuan aktual adalah sedemikian rupa sehingga $(KL)_x = 2(KL)_y$, bila $r_x/r_y \geq 2$, sumbu lemah akan menentukan, dan beban-beban menurut tabel pun memberikan jawaban yang tepat. Dengan demikian, W10×45 dan W12×45 jelas dapat diterima.

Karena r_x/r_y untuk W8×40 lebih kecil dari 2, lentur sumbu kuat akan menentukan. Kekuatan tersebut dapat diperoleh dari tabel dengan memasukkan $(KL)_y$ ekuivalen yang bersesuaian dengan $(KL)_x = 30$ ft. Untuk kekuatan yang sama pada sumbu x dan y:

$$\frac{(KL)_x}{r_x} = \frac{(KL)_y}{r_y}$$

$$(KL)_y \text{ ekuivalen} = \frac{(KL)_x}{r_x/r_y} = \frac{30}{1.73} = 17.3 \text{ ft}$$

Untuk $(KL)_y$ = 17.3 ft, W8×40 memiliki kekuatan desain $\phi_c P_n$ hanya sebesar 208 kips; karenanya tidak dapat diterima.

(c) Cek penampangnya. *Selalu* dianjurkan untuk mengadakan cek akhir terhadap penampang yang kelihatannya dapat diterima:

$$\text{W10×45,} \qquad (KL/r)_y = 15(12)/2.01 = 89.6, \qquad \phi_c F_{cr} = 20.1 \text{ ksi}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g$$
$$= 20.1(13.3) = 267 \text{ kips} > 236 \text{ kips yang diminta} \quad \text{OK}$$

Gunakan W10×45

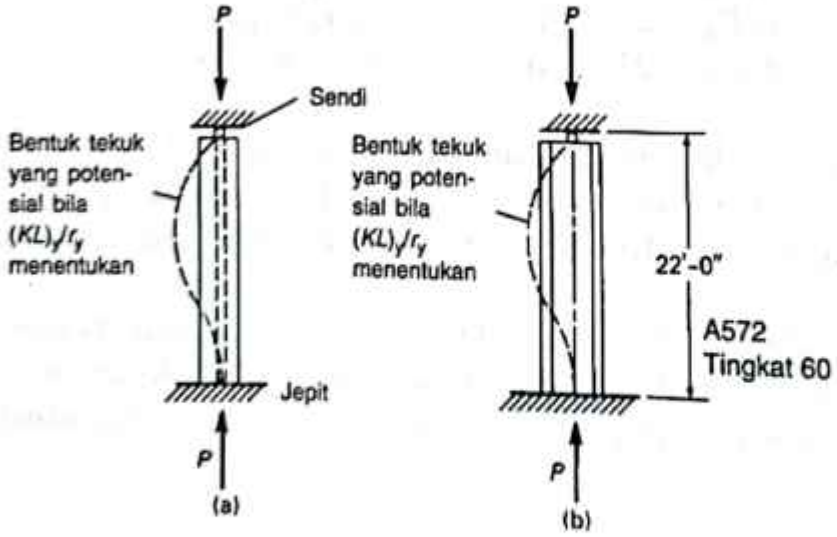
■ Contoh 6.10.3

Pilihlah penampang **W** yang paling ringan dari baja A572 Mutu 60 yang akan berfungsi sebagai batang utama sepanjang 22 ft untuk memikul beban aksial sebesar 100 kips beban mati dan 200 kips beban hidup pada suatu struktur bersabuk, seperti **Gambar 6.10.3**. Asumsikan batang tersebut bertumpuan sendi pada ujung atas dan jepit pada bagian dasarnya untuk tekuk dalam setiap arah utama. Gunakan *Load and Resistance Factor Design* AISC.

Penyelesaian:

(*a*) Carilah beban terfaktor:

$$P_u = 1.2D + 1.6L = 1.2(100) + 1.6(200) = 440 \text{ kips}$$



Gambar 6.10.3 *Contoh 6.10.3*

(*b*) Pilihlah penampangnya. Untuk soal ini, tidak tersedia Tabel Beban Kolom AISC sehingga kita dapat memilih penampang secara langsung. Untuk membuat taksiran terhadap penampang yang diminta, gunakan Tabel Beban Kolom untuk F_y = 50 ksi. Karena batang tersebut terjepit pada salah satu ujungnya, seperti **Gambar 6.9.5**, asumsikan K = 0.8. Pilihlah untuk $(KL)_y$ = 0.8(22) = 17.6 ft dan:

$$\phi_c P_n \text{ yang diminta} = 440\left[\frac{50}{60}\right] = 367 \text{ kips}$$

Cobalah: W10×49: $\phi_c P_n$ = 369 kips untuk F_y = 50 ksi

W12×53: $\phi_c P_n$ = 390 kips untuk F_y = 50 ksi

Tidak ada jaminan bahwa penampang-penampang yang dipilih dengan rasio 50/60 akan memenuhi persyaratan desain; meskipun demikian, prosedur seperti ini akan dapat berfungsi sebagai coba pertama. Cek W10×49 untuk P_u = 440 kips dengan F_y = 60 ksi. Dengan **Persamaan 6.7.3** didapatkan λ_c:

$$\lambda_c = \frac{KL}{r_y}\sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} = \frac{17.6(12)}{2.54}\sqrt{\frac{60}{\pi^2 29{,}000}} = 1.20$$

Kemudian dengan menggunakan AISC "NUMERICAL VALUES" TABEL 4, diperoleh $\phi_c F_{cr}/F_y$:

$$\phi_c F_{cr}/F_y = 0.465$$

$$\phi_c F_{cr} = 0.465(60) = 27.9 \text{ ksi}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 27.9(14.4) = 400 \text{ kips}$$

Berarti, W10×49 tidak dapat diterima.

Cek W10×54:

$$\frac{KL}{r_y} = \frac{0.8(22)12}{2.56} = 82.5; \qquad \lambda_c = 1.19$$

$$\phi_c F_{cr}/F_y = 0.468$$

$$\phi_c F_{cr} = 0.468(60) = 28.1 \text{ ksi}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 28.1(15.8) = 443 \text{ kips} > 440 \text{ kips} \qquad \text{OK}$$

■

Gunakan W10×54, A572 Mutu 60

■ **Contoh 6.10.4**

Desainlah kolom *A* dari *unbraced frame* dalam **Gambar 6.10.4** sebagai sebuah batang yang mendapat beban tekan aksial yang memikul beban mati sebesar 55

kips dan beban hidup 220 kips dengan baja A36. Pada bidang yang tegak lurus terhadap rangka, sistemnya diberi sabuk sokongan (*bracing*), dengan pendukung pada bagian puncak dan dasarnya setinggi 21 ft.

Penyelesaian:

(a) Carilah beban terfaktor:

$$P_u = 1.2D + 1.6L = 1.2(55) + 1.6(220) = 418 \text{ kips}$$

(b) Pilihlah suatu ukuran pendahuluan sebagai basis untuk mengevaluasi faktor panjang efektif K. Meskipun jarang suatu batang rangka didesain sebagai dibebani secara aksial, toh kadangkala untuk beberapa batang interior dengan pembebanan simetrik masih tepat pula. Perhatikan bahwa batang yang dibebani secara aksial merupakan salah satu batas untuk rumus interaksi balok—kolom yang lebih tipikal, dan ini akan dibahas dalam **Bab 12**.

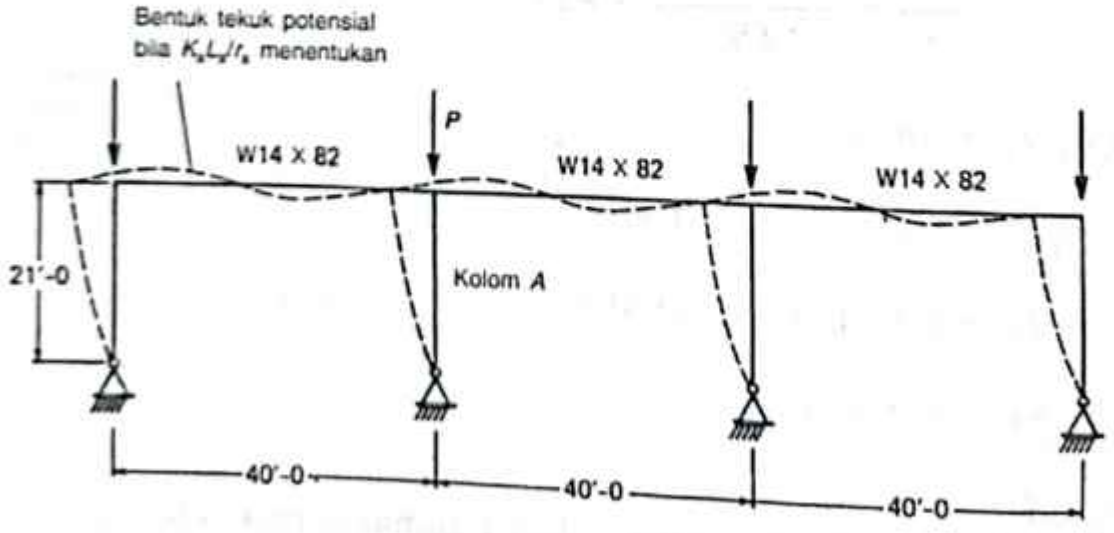
Diketahui $(KL)_y = 21$ ft untuk bidang yang tegak lurus terhadap rangka; dengan demikian, suatu batang pendahuluan dapat ditentukan dari interpolasi Tabel Beban Kolom Manual LRFD:

$$(KL)_y = 21 \text{ ft} \qquad \text{Temukan W12×72,} \qquad \phi_c P_n = 449 \text{ kips}$$

(c) Evaluasilah faktor panjang efektif K. Dengan $I = 597$ inch^4. Untuk W12×72, hitunglah G_{atas} seperti **Gambar 6.9.4** dan seperti yang dibahas dalam LRFD-Komentar C2:

$$G_{atas} = \frac{\Sigma(EI/L)_{kolom}}{\Sigma(EI/L)_{balok}} = \frac{597/21}{2(882)/40} = 0.64$$

$$G_{bawah} = 10 \text{ (menurut LRFD-Gambar C–C2.2)}$$



Gambar 6.10.4 *unbraced frame untuk Contoh 6.10.4*

Dengan menggunakan **Gambar 6.9.4**:

Temukan $K_x = 1.8$

$(KL)_x = 1.8(21) = 37.8$ ft

Untuk kekuatan yang sama terhadap masing-masing sumbu:

$$\frac{r_x}{r_y} = \frac{37.8}{21} = 1.8 \text{ (kebetulan sama dengan } K_x)$$

(d) Pilihlah penampang dari Tabel Beban Kolom LRFD:

W12×72: r_x/r_y ekivalen $(KL)_y = 37.8/1.75 = 21.6$ ft $\quad \phi_c P_n = 440$ kips OK

W14×74: r_x/r_y $(KL)_y = 21$ ft $\quad \phi_c P_n = 387$ kips Abaikan

(e) Lakukan pengecekan terakhir terhadap W12×72, $I = 597$ inch^4. Pada titik ini patut dicatat bahwa modifikasi Yura—Disque terhadap G untuk tekuk tak elastik dapat dilakukan. Semakin rendah rasio kerampingan, semakin besar reduksinya terhadap G. Berikut ini dilukiskan prosedur tersebut. Hitunglah rasio kerampingannya:

$$\frac{(KL)_y}{r_y} = \frac{1.8(21)12}{5.31} = 85.4; \qquad \frac{(KL)_x}{r_x} = \frac{1.0(21)12}{3.04} = 82.9$$

Dari **Tabel 6.9.1**, untuk rasio kerampingan 85.4 ditemukan $\beta_s = 0.71$. Sekarang harga G elastik harus direduksi sehingga:

$$G_{\text{tak elastik}} = G_{\text{elastik}}\ (\beta_s) = 0.64(0.71) = 0.45$$

Dari nomograf, **Gambar 6.9.4**, ditemukan $K_x = 1.75$. Hal ini tidak akan membuat perbedaan yang berarti terhadap ϕP_n untuk soal ini. KL/r menjadi 83.1:

$\phi_c F_{cr.} = 21.3$ ksi dari LRFD "NUMERICAL VALUES" TABEL 3–36

$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 21.3(21.1) = 449$ kips > 418 kips OK

■

Gunakan W12×72, A36

6.11 Allowable Stress Design

Persyaratan keamanan untuk kolom yang dibebani secara aksial dalam *Allowable Stress Design* (ASD) menurut ASD–E2 dapat dinyatakan sebagai:

$$f_a \le F_a \tag{6.11.11}$$

di mana f_a = tegangan tekan beban layanan = P/A_g
P = gaya aksial tekan beban layanan
A_g = luas penampang lintang bruto kolom
F_a = tegangan ijin pada beban layanan = **Persamaan 6.7.9** atau **6.7.10**

Persamaan 6.7.9 dan **6.7.10** digunakan untuk penampang-penampang W tipikal yang memenuhi batasan rasio lebar/tebal untuk tekuk lokal dari elemen elemen pelat tekan yang diberikan dalam ASD-B5.1. **Tabel 6.8.1** memberikan acuan penampang Spesifikasi ASD untuk batang-batang yang terkena aksial tekan

■ Contoh 6.11.1

Ceklah cukup tidaknya penampang W10×45 untuk kondisi pada **Gambar 6.10.2** bila digunakan *Allowable Stress Design*. Penampang ini merupakan penampang yang dipilih dengan LRFD dalam **Contoh 6.10.2**. Digunakan baja A36 dan beban layanannya adalah 50 kips beban mati dan beban hidup 110 kips.

Penyelesaian

(a) Hitunglah rasio kerampinganya:

$$\frac{(KL)_x}{r_x} = \frac{1.0(30)12}{4.32} = 83.3 \qquad \frac{(KL)_y}{r_y} = \frac{1.0(15)12}{2.01} = 89.6$$

(b) Hitunglah tegangan ijin F_a. Bandingkan KL/r dengan C_c (**Persamaan 6.7.11**) untuk menentukan apakah berlaku rumus kolom panjang atau kolom pendek.

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 29{,}000}{36}} = 126 \qquad [6.7.11]$$

Karena KL/r yang menentukan sebesar 89.6 lebih kecil daripada C_c, tegangan ijin didasarkan atas persamaan parabolik untuk tekuk tak elastik, **Persamaan 6.7.9**. Dengan demikian, dengan perhitungan atau ASD "NUMERICAL VALUES" TABEL 3 diperoleh:

$$F_a = \frac{\left[1 - \dfrac{(KL/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{\dfrac{5}{3} + \dfrac{3(KL/r)}{8C_c} - \dfrac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} = 14.3 \text{ ksi} \qquad [6.7.9]$$

(c) Perbandingan tegangan:

$$f_a = \frac{P}{A_g} = \frac{160}{13.3} = 12.0 \text{ ksi} < [F_a = 14.3 \text{ ksi}]$$

Profil W10×45 jelas tidak mengalami kelebihan tegangan; meskipun demikian, tegangan beban layanan f_a cukup rendah. Bila dipilih W10 lain yang lebih ringan, barangkali akan memenuhi syarat pula. Coba W10×39.

$$\frac{(Kl)_y}{r_y} = \frac{1.0(15)12}{1.98} = 90.9 \quad \text{memberikan} \quad F_a = 14.1 \text{ ksi}$$

$$f_a = \frac{P}{A_g} = \frac{160}{11.5} = 13.9 \text{ ksi} < [F_a = 14.1 \text{ ksi}] \quad \text{OK}$$

Dalam kasus ini *Allowable Stress Design* ternyata kurang konservatif daripada *Load and Resistance Factor Design*.

Gunakan W10×39

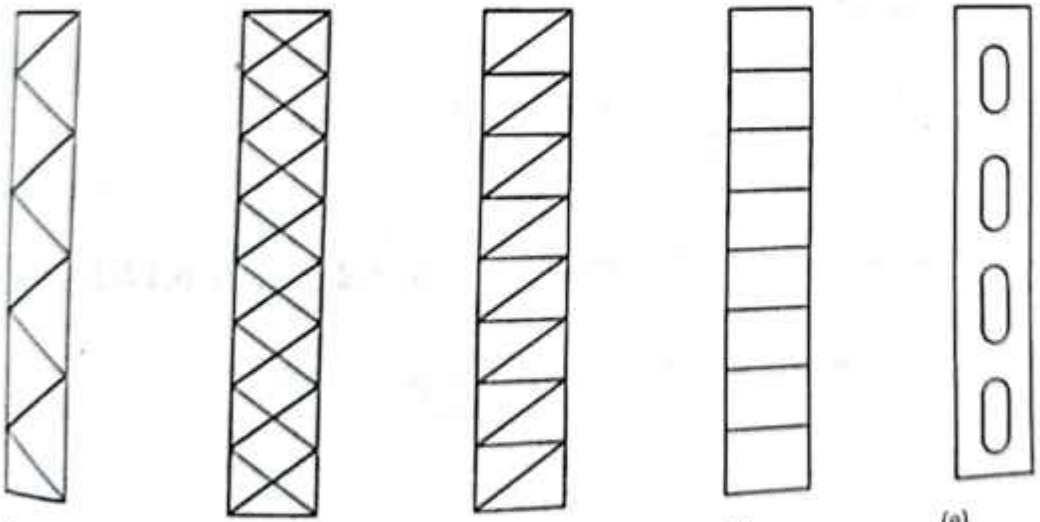
■

6.12* Efek Geser

Tujuan penyusunan batang-batang bentukan (*built-up member*) disusun dengan memakai batang silang/diagonal adalah membuat semua komponen bekerja sebagai satu kesatuan. Pada saat suatu batang tekan melentur, terjadilah komponen geser dari beban aksialnya. Besarnya efek geser dalam mengurangi kekuatan kolom berbanding lurus dengan besarnya deformasi yang dapat ditimbulkan oleh gaya geser tersebut.

Menurut *SSRC Guide* [6.8], geser pada kolom disebabkan oleh:

1. Beban lateral, yang diakibatkan oleh angin, beban gempa, atau penyebab lainnya.
2. Kemiringan, menurut garis dorongannya, baik karena pelengkungan awal yang tak disengaja maupun pelengkungan tambahan yang terjadi selama proses tekuk.



Gambar 6.12.1 *Jenis-jenis kolom bersusun*

3. Eksentrisitas ujung karena beban, yang diakibatkan oleh sambungan ujung maupun cacat pada fabrikasinya.

Tentu saja gaya geser dari beban lateral harus selalu dipertimbangkan dalam desain. Setidaknya, butir ke-2 dan 3 di atas harus diperkirakan. Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] mensyaratkan tersedianya resistansi geser sembarang (sebagai tambahan pada geser yang dapat dihitung) sebesar 2% dari kekuatan tekan batang untuk batang silangan (*lacing bar*) pada kolom bersusun (*lihat* **Gambar 6.12.1**).

Penampang-penampang berbadan solid, seperti profil **W**, memiliki deformasi geser yang lebih kecil daripada kolom tersusun (*latticed column*) yang menggunakan batang silang dan/atau pelat kopel (*batten*).

Lagi pula, seperti akan terlihat nanti, gaya geser pengaruh yang tak berarti terhadap reduksi kekuatan kolom untuk profil-profil berbadan solid, dan dapat diabaikan tanpa mengurangi keamanan. Meskipun demikian, pada kolom bersusun, pengaruh geser tidak boleh diabaikan.

Untuk mencakup pengaruh geser, kurvatur akibat geser harus ditambahkan pada kurvatur tekuk sehingga didapatkan kurvatur total. Kita ketahui bahwa:

$$V = \frac{dM_z}{dz} = P\frac{dy}{dz} \tag{6.12.1}$$

mengingat bahwa $M_z = Py$ dari **Persamaan 6.2.1** (*lihat* **Gambar 6.2.1**).

Kemiringan θ karena deformasi gesernya adalah:

$$\theta = \frac{\text{tegangan geser}}{\text{modulus geser}} = \frac{\beta_v V}{AG} \tag{6.12.2}$$

di mana β_v merupakan suatu faktor untuk mengoreksi karena adanya tegangan tak seragam di sepanjang berbagai bentuk penampang lintang. Kontribusi geser terhadap kurvatur tersebut menjadi:

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{\beta_v}{AG}\frac{dV}{dz} = \frac{P\beta_v}{AG}\frac{d^2y}{dz^2} \tag{6.12.3}$$

Kurvatur totalnya merupakan jumlah dari **Persamaan 6.2.3** dan **6.12.3**:

$$\frac{d^2y}{dz^2} = -\frac{Py}{EI} + \frac{P\beta_v}{AG}\frac{d^2y}{dz^2}$$

yang memberikan:

$$\frac{d^2y}{dz^2} + \frac{P}{EI}\left[\frac{1}{1 - P\beta_v/AG}\right] y = 0 \tag{6.12.4}$$

yang bentuknya sama dengan **Persamaan 6.2.3**, maka dari itu bentuk modifikasi beban kritik Eulernya adalah:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \underbrace{\frac{1}{\left[1 + \frac{\beta_v}{AG}\frac{\pi^2 EI}{L^2}\right]}}_{\text{modifikasi untuk efek geser}} \tag{6.12.5}$$

Sejalan dengan pembahasan sebelumnya mengenai kekuatan dasar kolom, G dan E dapat digantikan oleh harga modulus tangennya, G_t dan E_t, dan $E_t/G_t = 2(1 + \mu)$, dan L dapat diganti dengan panjang efektif KL. Selanjutnya, kombinasi efek geser dan KL akan memberikan:

$$F_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E_t}{(\alpha_v KL/r)^2} \tag{6.12.6}$$

di mana:

$\alpha_v = \sqrt{1 + 2(1 + \mu)\pi^2 \beta_v/(KL/r)^2}$ bagian bawah tanpa nomor pada kalimat

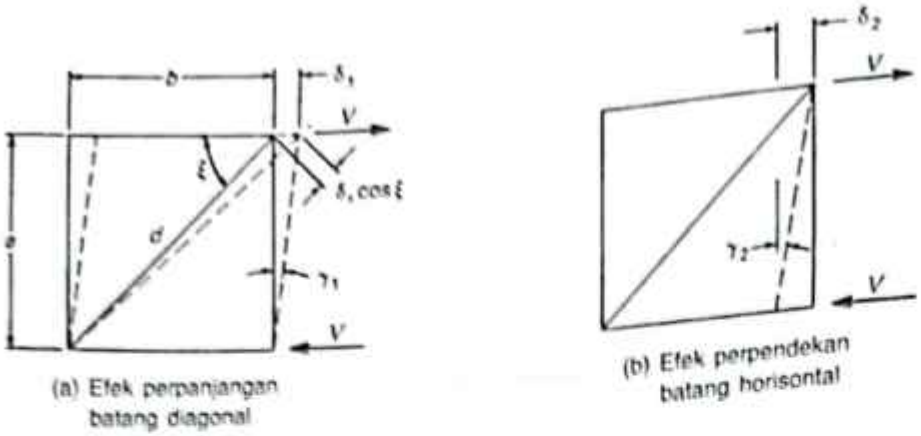
Dengan demikian efek geser dapat diperhitungkan dengan suatu penyesuaian terhadap panjang efektifnya. Untuk profil **W** yang melentur terhadap sumbu lemah, β_v rata-rata sekitar 2. Dengan $\mu = 0.3$ untuk baja, harga-harga tipikal untuk α adalah:

$KL/r = 50$	$\alpha_v = 1.01$
$= 70$	$= 1.005$
$= 100$	$= 1.003$

Untuk rasio kerampingan yang kurang dari 50, leleh akan menentukan, sehingga efek geser pada kolom **H** solid adalah ekuivalen dengan pertambahan panjang efektif sebesar kurang dari 1%, yang dapat diabaikan dengan aman.

6.12.1 *Kolom Tersusun*

Batang silang atau pelat kopel yang digunakan untuk mengikat elemen-elemen longitudinal tekan juga akan terkena deformasi aksial. Misalnya, dari **Gambar 6.12.2*a***, perpanjangan batang diagonal akan memberikan kemiringan γ_1 terhadap panjang panel a; sedangkan dari **Gambar 6.12.2*b***, perpendekan batang horisontal akan memberikan kemiringan γ_2 terhadap panjang panel a. Karena elemen-elemen silang relatif kecil penampang lintangnya, kekakuan batang-batang ini untuk



Gambar 6.12.2 Deformasi geser pada kolom tersusun

menahan geser transversal cukup kecil dibanding batang dengan badan yang solid. Pembahasan lebih lanjut tentang kolom dengan batang silang, pelat kopel, atau pelat berlobang dapat ditemukan dalam *SSRC Guide* [6.8] dan [6.62—6.64].

Structural Stability Research Council [6.8] melaporkan anjuran Bleich [6.9] bahwa "taksiran konservatif dari pengaruh batang silang 60° atau 45°, seperti yang biasanya dispesifikasikan untuk desain jembatan, dapat dilakukan dengan mengubah faktor panjang efektif" K menjadi sebuah faktor baru $\alpha_v K$ sebagai berikut:

$$\text{Untuk } \frac{KL}{r} > 40, \qquad \alpha_v = \sqrt{1 + 300/(KL/r)^2} \tag{6.12.7}$$

$$\text{Untuk } \frac{KL}{r} \leq 40, \qquad \alpha_v = 1.1 \tag{6.12.8}$$

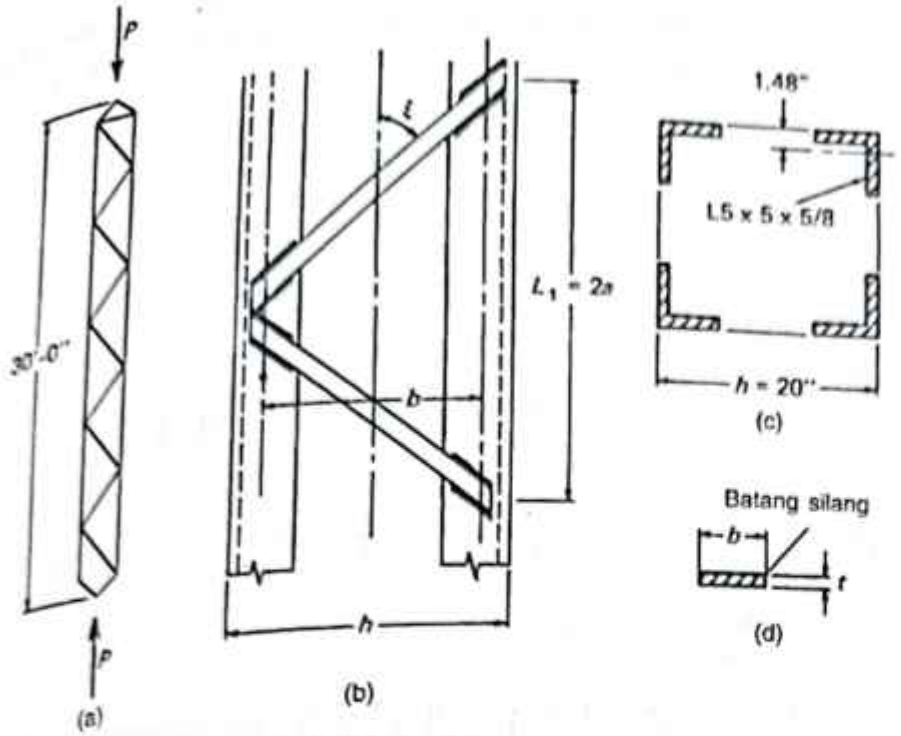
Modifikasi panjang efektif semacam ini jarang mempengaruhi desain kolom pendek pada sistem struktur bersabuk sokongan.

6.13* Desain Batang Tersusun

Pada kebanyakan spesikasi, batang tersusun didesain sesuai dengan aturan empirik yang terinci, yang umumnya berkaitan dengan persyaratan tekuk lokal. Dua contoh berikut ini memberikan ilustrasi mengenai beberapa ketentuan dari LRFD-E4 (serupa dengan ASD-E4) maupun prosedur umum untuk penampang *built-up*. Para Pembaca dianjurkan membaca boldgett [6.65] yang telah merangkumkan ketentuan AISC bersama dengan informasi lain mengenai desain penampang *built-up*.

■ Contoh 6.13.1

Desainlah kolom tersusun seperti **Gambar 6.13.1** yang terdiri dari empat profil siku untuk memikul gaya aksial tekan dari beban mati sebesar 100 kips dan beban hidup sebesar 475 kips. Panjang efektif KL adalah 30 ft. Asumsikan semua sambungan akan dilas dan digunakan baja A572 Mutu 50.



Gambar 6.13.1 Detil untuk Contoh 6.13.1

Penyelesaian:

(a) Tentukan kedalaman h dari penampang tersebut. Radius girasi kolom empat profil siku hanya tergantung pada h dan pada hakikatnya tidak tergantung pada ketebalan. Dengan demikian, pemilihan h akan menentukan rasio kerampingan, dan sebaliknya. **Apendiks Tabel A1** menunjukkan hubungan antara radius girasi dengan geometri penampang lintangnya. Dengan demikian, dari teks apendiks tersebut:

$$r \approx 0.42h$$

$$\text{Aproksimasi } \frac{KL}{r} = \frac{360}{0.42h} = \frac{857}{h}$$

$$P_u = 1.2(100) + 1.6(475) = 880 \text{ kips}$$

b (inch)	Aproks. KL/r	F_{cr} (ksi)	$\phi_c F_{cr}$† (ksi)	Luas yang diminta* A_g (inch²)	Profil siku
24	35.7	45.5	38.7	22.7	L6×6×½ A = 23.0 L5×5×⅝ A = 23.44
	22	39.0	44.7	38.0	23,1 Sama dengan atas
21	40.8	44.3	37.6	23.4	L5×5×⅝
20	42.9	43.7	37.2	23.7	L5×5×⅝

† Juga dari LRFD "NUMERICAL VALUES" TABEL 3-50

* A_g yang diminta = $P_u/(\phi_c F_{cr})$

lebih disukai penampang 20 inch, karena luas lantai yang dipakai cenderung lebih penting ketimbang pertambahan penampang lintang sebesar 0.44 inch². Selidikilah 4—$15\times5\times{}^5/_8$, dengan asumsi $Q = 1.0$:

$$I_x = I_y = 4[13.6 + 5.86(10.0 - 1.48)^2] = 1756 \text{ inch}^4$$

$$r_x = r_y = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{1756}{23.44}} = 8.66 \text{ inch} \quad (\text{Aproks } 0.42(20) = 8.40 \text{ inch})$$

$$\frac{Kl}{r} = \frac{1.0(30)12}{8.66} = 41.6; \qquad \phi_c F_{cr} = 37.5 \text{ ksi TABEL 3-50}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 37.5(23.44) = 878 \text{ kips} \approx (P_u = 880 \text{ kips}) \qquad \text{OK}$$

Gunakan 4—$15\times5\times{}^5/_8$ dengan $b = 20$ inch.

(b) Tekuk lokal menentukan. Untuk $Q = 1.0$, profil siku harus memenuhi batas lebar/tebal LRFD—B5.1 untuk mencegah terjadinya tekuk lokal. Dalam kasus ini

$$\left[\frac{b}{t} = \frac{5}{0.625} = 8\right] < \left[\frac{76}{\sqrt{50}} = 10.7\right] \qquad \text{OK}$$

Pengembangan batas-batas AISC terdapat dalam **Bab 6 Bagian II** mengenai kekuatan pelat.

(c) Desainlah batang silang tunggal. Menurut LRFD-E4, "Inklinasi batang silang terhadap sumbu batang tersusun, hendaknya tidak kurang dari 60° untuk silang tunggal..."

Untuk $\xi = 60°$ (**Gambar 6.13.1*b***), $b = 20 - 2(3) = 14$ inch, dengan asumsi bahwa digunakan jarak standar baut. Jarak ini mendekati jarak dari pusat ke pusat sambungan las. Dengan demikian:

$$L_1 = 2b \tan 30° = 2(14)0.577 = 16.2 \text{ inch. Gunakan 16 inch.}$$

Boleh jadi kita lebih suka menggunakan 15 inch, karena LRFD- E4 menyatakan "Bila jarak antara alur-alur las ... lebih dari 15 inch, batang silang hendaknya rangkap dua atau dibuat dari profil siku."

Untuk baja siku tunggal:

$$\frac{L_1}{r_z} = \frac{16}{0.978} = 16.4 < 41.6 \left[\begin{array}{c}\text{rasio kerampingan untuk}\\ \text{keseluruhan batang}\end{array}\right] \qquad \text{OK}$$

Menurut LRFD-E4, "Batang silang harus dibuat sebanding sehingga dapat mem-

berikan kekuatan geser yang tegak lurus terhadap sumbu batang tersusun tersebut sebesar 2% dari kekuatan desain tekan batang tersusun":

$$V = 0.02(880) = 17.6 \text{ kips (8.8 kips per sisi)}$$

Gaya pada satu batang silang adalah:

$$P_u = V / \cos \xi \approx V/\cos 30^\circ = 8.8/0.866 = 10.2 \text{ kips}$$

$$\frac{L}{r} \leq 140 \text{ untuk batang silang tunggal}$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{{}^1/_{12}\ bt^3}{bt}} = 0.288t \quad \textbf{(Gambar 6.13.1}d\textbf{)}$$

$$t_{\text{minimum}} = \frac{16.1}{0.288(140)} = 0.397 \text{ inch} \quad \text{Gunakan } {}^7/_{16} \text{ inch}$$

Untuk $t = {}^7/_{16}$ inch, $\quad \dfrac{L}{r} = \dfrac{16.1}{0.288(0.4375)} = 128$

Dari LRFD "NUMERICAL VALUES" TABEL 3–36, $\phi_c F_{cr} = 13.0$ ksi:

$$A \text{ yang diminta} = \frac{10.2}{13.0} = 0.78 \text{ inch}$$

$$\text{Lebar } b = \frac{0.78}{0.4375} = 1.78 \text{ inch}$$

Karena tidak ada lobang yang dibutuhkan untuk konektor, gaya tarik pada penampang bersih dalam desain ini tidak perlu diselidiki.

Gunakan batang ${}^7/_{16} \times 1{}^3/_4$

(d) Desainlah pelat-pelat pada ujung (LRFD—E4, paragraf 7). Pelat pengikat (kopel) harus memanjang melewati panjang batangnya sejarak b (**Gambar 6.13.1**) dari ujung batang yang bersangkutan. Gunakan panjang 14 inch.

$$t \geq \frac{b}{.50} = \frac{14}{50} = 0.28 \text{ inch}$$

Gunakan pelat pengikat ${}^5/_{16} \times 14 \times 1'\text{-}8''$

(c) Selidikilah efek geser terhadap panjang efektif, **Persamaan 6.12.7** atau **6.12.8**:

$$\frac{KL}{r} = 41.6 > 40, \quad \textit{Gunakan } \textbf{Persamaan 6.12.7}$$

$$\alpha_r = \sqrt{1 + 300/(KL/r)^2}$$

$$= \sqrt{1 + 300/(41.6)^2} = 1.08$$

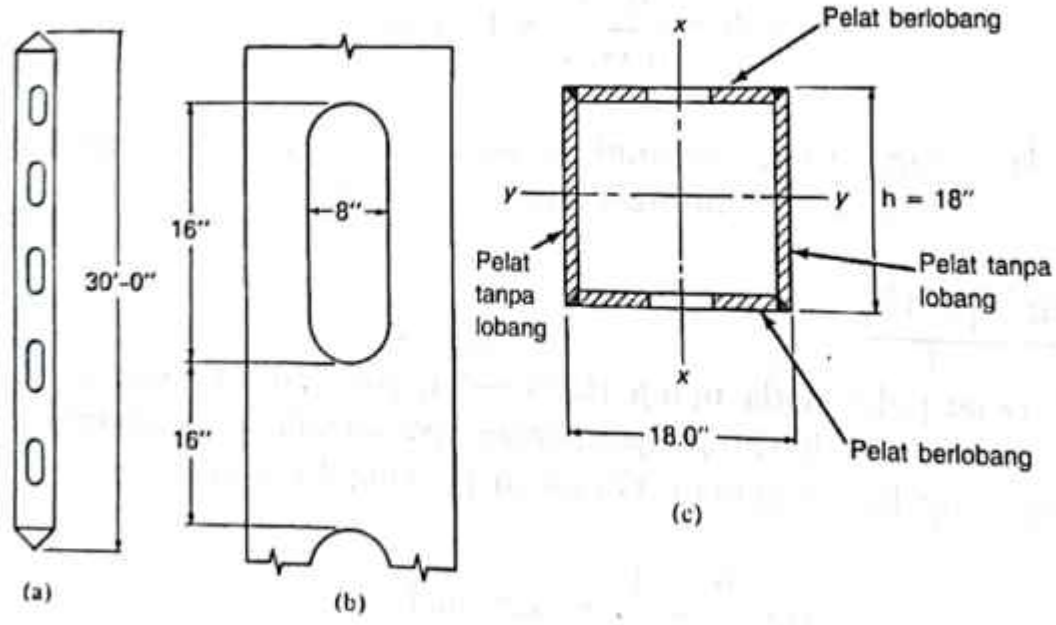
Dengan demikian, panjang efektif harus ditambah sebesar 8% akibat geser. Pada banyak hal, pengabaikan kekangan ujung mungkin sama dengan penambahan panjang efektif yang hampir sama. ■

■ **Contoh 6.13.2**

Desainlah kembali kolom dari **Contoh 6.13.1** dengan menggunakan profil boks berlobang las-lasan (*welded perforated box*) (**Gambar 6.13.2**). Beban terfaktor P_u = 880 kips seperti hitungan dalam **Contoh 6.13.1**.

Penyelesaian:

Salah satu kelebihan utama dari profil las-lasan adalah banyaknya komponen individual dalam profil tersebut dapat diminimumkan. Untuk profil ini cukup digunakan empat pelat, sedangkan pada penampang yang dibaut atau dikeling masih memerlukan empat profil siku selain pelat.



Gambar 6.13.2 *Detil dari Contoh 6.13.2*

(a) Pilih penampang coba. Dengan menggunakan **Apendiks Tabel A1** untuk profil boks

$$r \approx 0.40b$$

$$\frac{KL}{r} = \frac{360}{0.4h} = \frac{900}{b}$$

$$\text{Luas} \approx 4bt$$

b (inch)	Aproks. KL/r	F_{cr} (ksi)	$\phi_c F_{cr}$† (ksi)	Luas yang diminta* A_g (inch²)	Tebal pelat (inch)
21	42.9	43.7	37.2	23.7	0.28
	$\frac{b}{t}$ (Pelat tanpa lobang) $= \frac{21}{5/16} = 67 > \left(\frac{238}{\sqrt{F_y - 16.5}} = 41.1 \right)$				NG
18	50	41.6	35.4	24.9	0.35
16	56.3	39.7	33.7	26.1	0.41
15	60	38.4	32.7	26.9	0.45

† Juga dari LRFD "NUMERICAL VALUES" TABEL 3-50

* A_g yang diminta = $P_u/(\phi_c F_{cr})$

Bila tanpa lobang, **2PL**—$^7/_{16}$×16 dan **2PL**—$^7/_{16}$×15 barangkali sudah dapat diterima, karena telah memenuhi rasio b/t sesuai dengan LRFD-B5.1.

Meskipun demikian, profil seperti itu digunakan pada jembatan di mana dibutuhkan akses untuk pemeliharaan, sehingga pelat berlobang lebih disukai.

Diasumsikan lebar lobang 8 inch (biasanya separuh atau kurang dari setengah lebar total) dan b = 18 inch:

Luas netto yang tersedia = $2(18)(^7/_{16}) + 2(17 - 8)(^1/_2) = 24.75$ inch²

$$I_x = 2(18)(^7/_{16})(8.719)^2 + {}^2/_{12}\,[(17)^3 - (8)^3]\,{}^1/_2 = 1564 \text{ inch}^4$$

$$I_y = {}^2/_{12}(18)^3(^7/_{16}) + 2(9)(^1/_2)(8.75)^2 = 1114 \text{ inch}^4$$

$$r_y = \sqrt{\frac{1114}{24.75}} = 6.71 \text{ inch}^4$$

$$\frac{KL}{r} = \frac{1.0(30)12}{6.71} = 53.7; \qquad \phi_c F_{cr} = 34.4 \text{ ksi (TABLE 3–50)}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 34.4(24.75) = 852 \text{ kips} < (P_u = 880 \text{ kips}) \qquad \text{NG}$$

Dicoba 2PL— $\frac{1}{2}$ × 18 dan 2PL— $\frac{1}{2}$ × 17 (berlobang):

$A_g = 27.0$ inch^2 $\quad I_y = 1175$ inch^4

$I_x = 1744$ inch^4 $\quad r_y = 6.60$ inch

$$\frac{KL}{r} = \frac{1.0(30)12}{6.60} = 54.6; \qquad \phi_c F_{cr} = 34.2 \text{ ksi} \quad \text{(TABLE 3–50)}$$

(b) Cek perbandingan pelat (LRFD-E4):

1. Cek rasio *b*/*t* untuk keseluruhan pelat berlobang (*perforated plate*):

$$\frac{b}{t} = \frac{17}{0.5} = 34 > \left(\frac{317}{\sqrt{F_y - 16.5}} = 54.8 \right) \qquad \text{OK}$$

2. Cek rasio *b*/*t* untuk bagian yang tidak diberi pengaku dalam lobang:

$$\frac{b}{t} = \frac{4.5}{0.5} = 9 > \left(\frac{76}{\sqrt{F_y}} = 10.7 \right) \qquad \text{OK}$$

3. Cek proporsi lobang-lobang akses (LRFD-E4):

$$\frac{\text{Panjang lobang}}{\text{Lebar lobang}} \leq 2 \qquad \text{Panjang lobang} = 2(8) = 16 \text{ inch(maks)}$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{Jarak bersih} \\ \text{di antara lobang-} \\ \text{lobang} \end{array} \right) \geq \left(\begin{array}{l} \text{Jarak transversal di antara} \\ \text{baris-baris las penghubung} \\ \text{terdekat} \end{array} \right)$$

Jarak bersih di antara lobang-lobang = 17 inch minimum.

Gunakan 2PL — $^1/_2$ × 18 (tanpa lobang) dan 2PL — $^1/_2$ × 17 (berlobang) dengan lobang-lobang berukuran 16″ kali 8″ dengan jarak dari pusat ke pusat sebesar 2′-8″.

Bagian II: Pelat

6.14* Introduksi Stabilitas Pelat

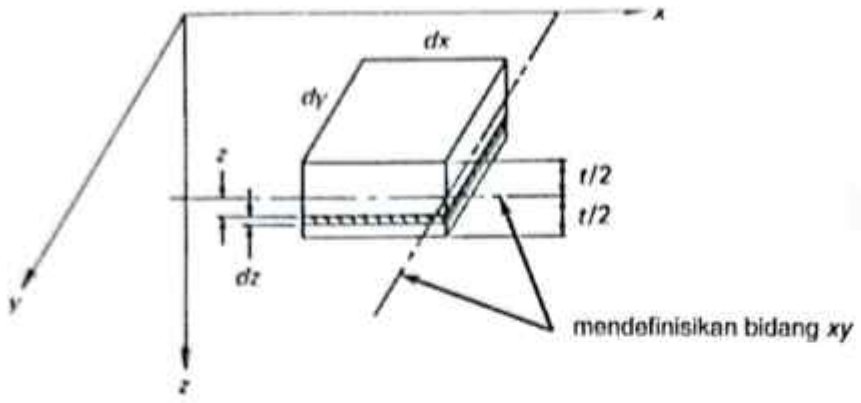
Semua penampang kolom baik dari profil tempa maupun *built-up* terdiri dari elemen pelat. Sampai pasal sebelum bagian ini, kita hanya memperhatikan kemungkinan tekuk batang berdasarkan rasio kerampingan untuk keseluruhan penampang lintang. Akan tetapi, mungkin saja tekuk lokal terjadi lebih dahulu pada salah satu elemen pelat pembentuk penampang tersebut. Tekuk lokal menyebabkan elemen yang tertekuk tidak dapat lagi menanggung bagian beban yang harus diterimanya bila kolom menerima *tambahan* beban; dengan kata lain, efisiensi penampang lintangnya akan mengalami penurunan.

Teori lentur pelat dan stabilitas elastik pelat merupakan pokok yang harus dipelajari secara mendalam oleh mahasiswa tingkat lanjut dalam teknik struktur. Pembahasan singkat berikut ini dimaksudkan untuk memberikan pengertian umum kepada pembaca mengenai tekuk pelat yang perlu digunakan secara tepat serta untuk memahami spesikasi baja dewasa ini. Pendekatan umum serta terminologi yang digunakan mengikuti Timoshenko [6.66, 6.67].

Sebelum kita dapat membahas masalah stabilitas, dibutuhkan persamaan diferensial untuk lentur pelat, seperti halnya persamaan diferensial untuk lentur balok, **Persamaan 6.2.2**, digunakan pada pembahasan stabilitas kolom ramping dalam **Bagian 6.2**.

6.14.1 Persamaan Diferensial untuk Lentur Pelat Homogen

Pertama-tama, regangan akan diperoleh dalam bentuk displasemen. Misalkan b = tebal pelat, dan u, v, dan w masing-masing sama dengan displasemen dalam arah x, y, dan z. Dengan melihat **Gambar 6.14.1**, perhatikan sebuah elemen pelat $dx\ dy$, dan asumsikan tidak ada peregangan pada bidang netral di $z = 0$. Dengan menyelidiki bagian $dx\ dy\ dz$ elemen pelat yang berada sejauh z dari bidang netral, dalam **Gambar 6.14.2** terlihat koordinat regangan satuan ϵ_x, ϵ_y, dan regangan geser γ_{xy}. Dengan demikian:



Gambar 6.14.1 *Elemen pelat, definisi sistem koordinat*

$$\epsilon_x = \frac{u + \dfrac{\partial u}{\partial x}\,dx - u}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} \tag{6.14.1a}$$

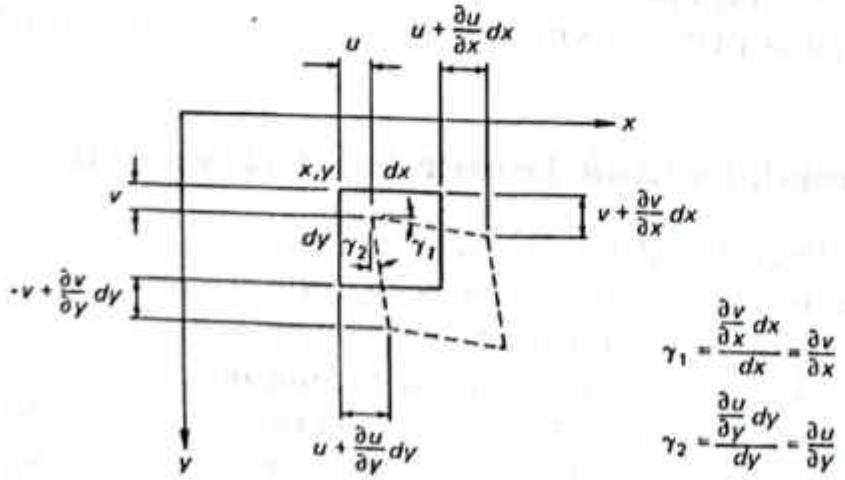
$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{6.14.1b}$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_1 + \gamma_2 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \tag{6.14.1c}$$

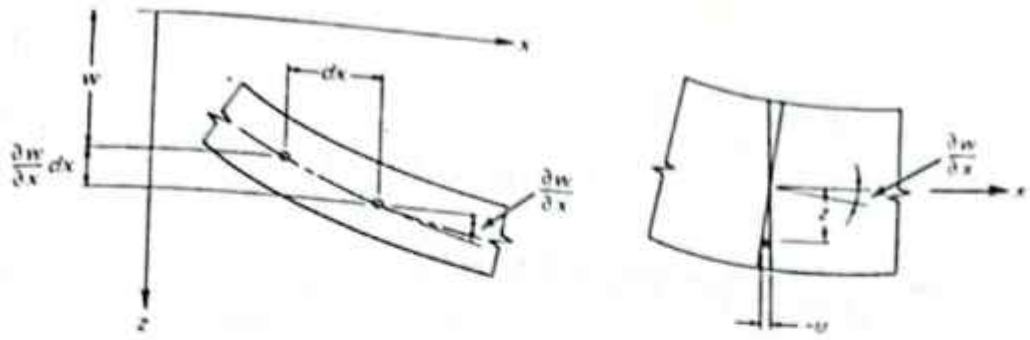
Dengan mengekspresikan displasemen pada bidang pelat dalam defleksi lateral w, seperti terlihat dalam **Gambar 6.14.3**, dan dengan mengingat bahwa kemiringan positif akan memberikan displasemen negatif u atau v, kita peroleh:

$$-u = z\frac{\partial w}{\partial x}; \qquad -v = z\frac{\partial w}{\partial y} \tag{6.14.2}$$

Substitusi **Persamaan 6.14.2** ke dalam **Persamaan 6.14.1** akan memberikan regangan dalam bentuk kurvatur untuk lentur arah x, arah y, dan puntir:



Gambar 6.14.2 *Deformasi elemen pelat pada bidang xy*



Gambar 6.14.3 Deformasi elemen pelat yang tegak lurus bidang xy

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial_x} = - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \tag{6.14.3a}$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial_y} = - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \tag{6.14.3b}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = - z \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \, \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \, \partial y} \right) = - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \, \partial y} \tag{6.14.3c}$$

Kemudian dengan menggunakan Hukum Hooke yang menyatakan regangan dalam tegangan σ_x, σ_y, tegangan normal dalam arah x dan y, dan τ_{xy}, tegangan geser:

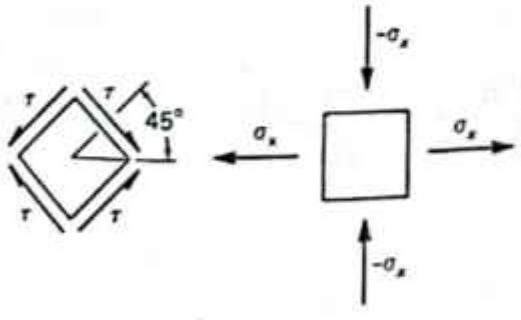
$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu \sigma_x] \tag{6.14.4a}$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [- \mu \sigma_x + \sigma_y] \tag{6.14.4b}$$

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy} / G \tag{6.14.4c}$$

di mana μ = rasio Poisson (*lihat* **Bagian 2.6**) dan G = modulus elastik geser.

Untuk setiap kondisi tegangan, seperti $\sigma_y = -\sigma_y$ yang memberikan geser murni pada elemen yang diputar 45° terhadap sumbu x, kerja yang dilakukan oleh sistem ekuivalen **Gambar 6.14.4** harus konstan:



(a) (b)

Gambar 6.14.4 Sistem ekuivalen

PERPUSTAKAAN D III F. TEKNIK

$$-\frac{1}{2}\sigma_x \epsilon_x - \frac{1}{2}\sigma_x \epsilon_y = \frac{1}{2}\tau\gamma \qquad (6.14.5)$$

Substitusi **Persamaan 6.14.4** ke dalam **Persamaan 6.14.5** akan memberikan:

$$\frac{\sigma_x}{E}\left(\sigma_x - \mu\sigma_y - \mu\sigma_x - \sigma_y\right) = \frac{\tau^2}{G}$$

Bila $\sigma_y = -\sigma_x$, maksimum $\tau = \sigma_x$; dengan demikian:

$$\frac{1}{E}\left(1 + \mu + \mu + 1\right) = \frac{1}{G}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \qquad (6.14.6)$$

Penyelesaian **Persamaan 6.14.4** untuk tegangan yang dinyatakan dalam regangan dan substitusi **Persamaan 6.14.3** untuk regangan akan menghasilkan tegangan dalam bentuk kurvatur:

$$\sigma_x = \frac{-zE}{1-\mu^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \qquad (6.14.7a)$$

$$\sigma_y = \frac{-zE}{1-\mu^2}\left(\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \qquad (6.14.7b)$$

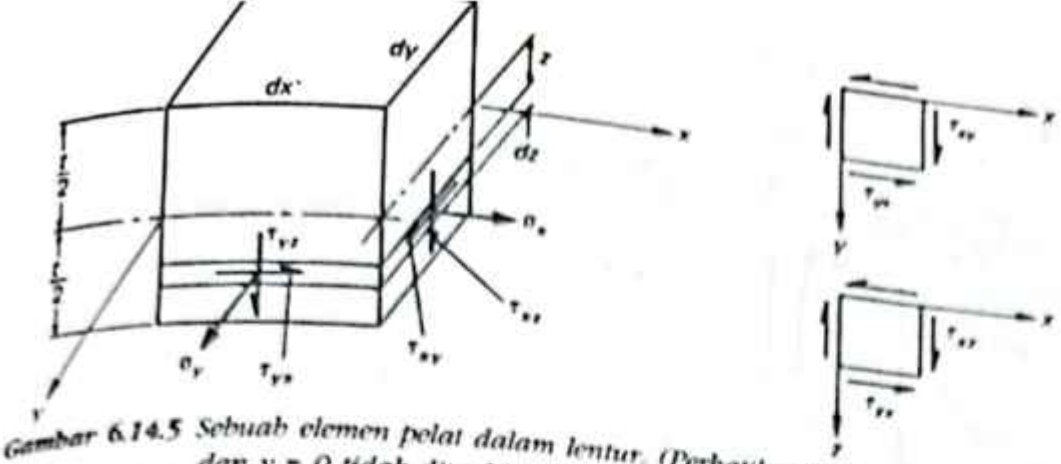
$$\tau_{xy} = -2zG\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \qquad (6.14.7c)$$

Kemudian, kita perlu menghubungkan kurvatur dengan momen lentur. Dengan memperhatikan **Gambar 6.14.5** dan dengan menggunakan kaidah tangan kanan untuk puntir positif, terlihat bahwa momen per lebar satuan adalah:

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} z\sigma_x\, dz = \frac{-Et^3}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \qquad (6.14.8a)$$

$$M_y = \int_{-t/2}^{t/2} z\sigma_y\, dz = \frac{-Et^3}{12(1-\mu^2)}\left(\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \qquad (6.14.8b)$$

$$M_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z\, dz = +2G\left(\frac{t^3}{12}\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \qquad (6.14.8c)$$



Gambar 6.14.5 Sebuah elemen pelat dalam lentur. (Perhatikan bahwa gaya-gaya pada permukaan di $x = 0$ dan $y = 0$ tidak diperlihatkan

Perhatikan bahwa lentur pelat melibatkan kurvatur ganda (permukaan deflek-si pelat berbentuk piring). Semakin sempit dan semakin panjang denah suatu pelat, semakin cenderunglah lentur menimbulkan kurvatur satu arah. Balok merupakan kasus khusus dari pelat karena balok memiliki lebar yang sempit dan bentang yang panjang. Untuk balok, efek rasio Poisson (μ) dapat diabaikan. Misalnya, bila batang sempit dalam arah y, dan panjang dalam arah x, untuk pelat menjadi:

Persamaan 6.14.8a

$$M_x = \frac{-Et^3}{12}\frac{d^2w}{dx^2} \tag{6.14.9}$$

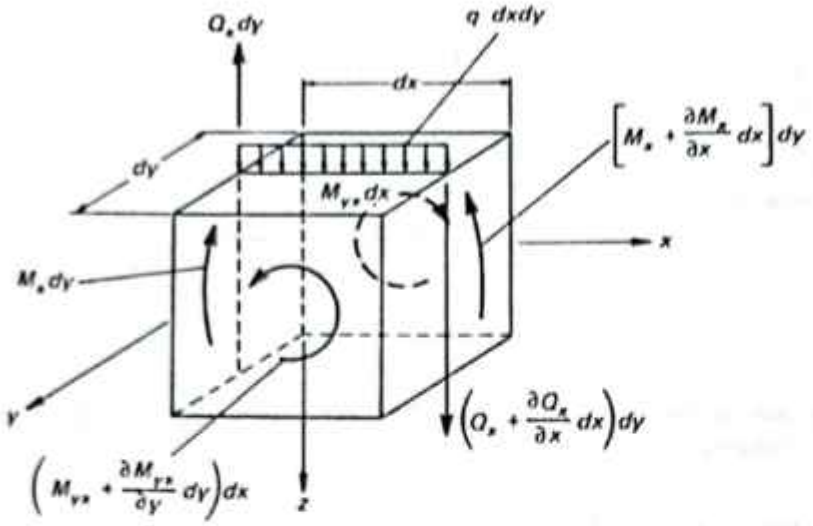
di mana turunan parsialnya hilang karena w tidak lagi merupakan fungsi y. Bila **Persamaan 6.14.9** dikalikan dengan lebar b untuk mengubah dari momen per lebar satuan dalam arah y menjadi momen total, **Persamaan 6.14.9** akan menjadi persamaan diferensial untuk balok:

$$M_x = -EI\frac{d^2w}{dx^2} \tag{6.14.10}$$

di mana $I = t^3b/12$.

Dalam teori pelat, perjanjian tandanya adalah M_x untuk menyatakan momen lentur yang disebabkan oleh *tegangan* σ_x yang bekerja pada arah x. Dalam teori balok, biasanya subskrip pada M menunjukkan sumbu tegangan nol dalam lentur, yakni sumbu netral. Dengan demikian, untuk bentang dalam arah x dan lebar dalam arah y seperti yang diasumsikan untuk **Persamaan 6.14.10**, M_y (dan bukan M_x) harus digunakan dalam teori balok, karena sumbu y merupakan sumbu netral di mana lentur terjadi.

Untuk meneruskan penurunan persamaan diferensial lentur pelat, perhatikan keseimbangan semua gaya dan momen yang bekerja pada elemen pelat. Penjumlahan momen terhadap sumbu x dan y dan penjumlahan gaya dalam arah z memberikan tiga persamaan. **Gambar 6.14.6** merupakan benda bebas (*free body*) elemen pelat yang hanya menunjukkan gaya-gaya yang terlibat dengan momen terhadap sumbu y.



Gambar 6.14.6 *Gaya-gaya benda bebas yang terlibat dalam rotasi terhadap sumbu y. (Gaya-gaya yang terlibat dalam rotasi di sekitar sumbu x tidak terlibat)*

Perhitungan momen terhadap sumbu y menghasilkan:

$$\cancel{M_x\,dy} + \frac{\partial M_x}{\partial x}\,dx\,dy - \cancel{M_x\,dy} + \cancel{M_{yx}\,dx} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y}\,dy\,dx - \cancel{M_{yx}\,dx}$$

$$- \left(Q_x\,dy + \cancel{\frac{\partial Q_x}{\partial x}\,dx\,dy}\right) dx - q\,\cancel{dx\,dy}\,\cancel{\frac{dx}{2}} = 0$$

abaikan (suku ke-3) — lengan momen (suku ke-4) — abaikan (suku ke-5)

Dengan mengabaikan suku berordo tinggi dan pembagian dengan $dxdy$ akan diperoleh:

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} - Q_x = 0 \tag{6.14.11}$$

Demikian pula untuk momen terhadap sumbu x:

$$\frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y = 0 \tag{6.14.12}$$

Keseimbangan gaya dalam arah z memberikan:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q = 0 \tag{6.14.13}$$

Dengan **Persamaan 6.14.11** dan **6.14.12** untuk Q_x dan Q_y, dan substitusi ke dalam **Persamaan 6.14.13** akan diperoleh:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + 2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} = -q \tag{6.14.14}$$

Dengan mendefinisikan $D = Et^3/[12(1 - \mu^2)]$ dan substitusi **Persamaan 6.14.8** ke dalam **Persamaan 6.14.14** akan diperoleh persamaan diferensial untuk lentur pelat homogen:

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) = q \tag{6.14.15}$$

Persamaan 6.14.15, bila ditulis untuk balok dengan lebar b, menjadi persamaan diferensial untuk beban:

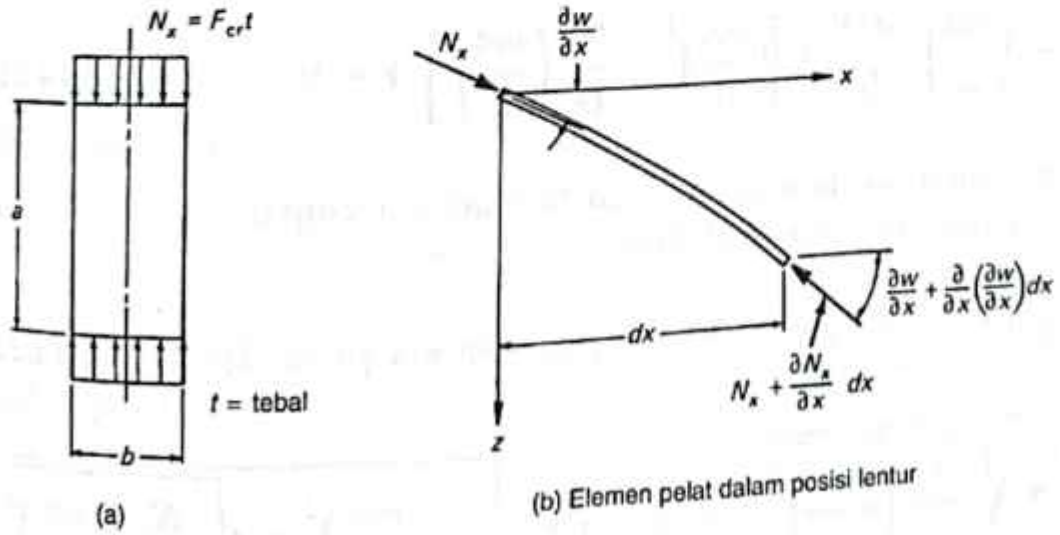
$$EI\frac{d^4 w}{dx^4} = qb \tag{6.14.16}$$

di mana qb merupakan beban panjang satuan di sepanjang bentang balok.

6.14.2 Tekuk Pelat yang Ditekan secara Merata

Pendekatan berikut ini sebenarnya mengikuti Timoshenko [6.67] yang kemudian oleh Gerstle [6.68]. Di samping suku umum q yang mewakili komponen beban transversal yang menyebabkan lentur pelat, perlu pula ditinjau komponen transversal gaya tekan N_x bila pelat tersebut terdefleksi ke posisi yang sedikit tertekuk. Penjumlahan gaya-gaya dalam arah z pada elemen pelat dari **Gambar 6.14.7b** memberikan:

$$N_x\,dy\,\frac{\partial w}{\partial x} - \left(N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x}\,dx\right)dy\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\,dx\right) = q\,dx\,dy$$



Gambar 6.14.7 Pelat yang mendapat tekanan merata

$$- \left(N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial N_x}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) dy\, dx = q\, dx\, dy \qquad (6.14.17)$$

yang dengan pengabaian suku kecil berordo tinggi memberikan:

$$q = - N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \qquad (6.14.18)$$

Kemudian, persamaan diferensial, **Persamaan 6.14.15**, menjadi:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2\, \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = - \frac{N_x}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \qquad (6.14.19)$$

yang merupakan persamaan diferensial parsial di mana w merupakan fungsi x dan y. Defleksi w dapat dinyatakan sebagai perkalian dari fungsi x, (X), dan fungsi y, (Y). Lagi pula, tekuk dapat diasumsikan memberikan variasi sinusoidal dalam arah x. Dengan demikian:

$$w = X(x)\ Y(y) \qquad (6.14.20)$$

Dengan memisalkan:

$$X(x) = \sin \frac{m\pi x}{a}$$

di mana fungsi X memenuhi syarat defleksi nol dan momen nol dari tumpuan sederhana pada $x = 0$ dan $x = a$. Substitusi **Persamaan 6.14.20** ke dalam **Persamaan 6.14.19**, setelah eliminasi suku sin $m\pi x/a$, akan memberikan:

$$\left(\frac{m\pi}{a}\right)^4 Y - 2\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \frac{d^2Y}{dy^2} + \frac{d^4Y}{dy^4} = + \frac{N_x}{D} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 Y$$

$$\frac{d^4Y}{dy^4} - 2\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \frac{d^2Y}{dy^2} + \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^4 - \frac{N_x}{D} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2\right] Y = 0 \qquad (6.14.21)$$

sebuah persamaan diferensial homogen biasa berpangkat empat.

Penyelesaiannya dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$Y = C_1 \sinh \alpha y + C_2 \cosh \alpha y + C_3 \sin \beta y + C_4 \cos \beta y \qquad (6.14.22)$$

di mana:

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \sqrt{\frac{N_x}{D} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}} \quad \text{dan} \quad \beta = \sqrt{-\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \sqrt{\frac{N_x}{D} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}}$$

Dengan demikian, persamaan defleksi pelat keseluruhan adalah:

$$w = \left(\sin\frac{m\pi x}{a}\right)(C_1 \sinh \alpha y + C_2 \cosh \alpha y + C_3 \sin \beta y + C_4 \cos \beta y) \quad (6.14.23)$$

yang harus memenuhi syarat batas. Dengan mengasumsikan sumbu x sebagai sumbu simetri pelat, yakni kondisi tumpuan sepanjang kedua tepi yang sejajar arah pembebanan, koefisien fungsi yang ganjil C_1 dan C_3 harus sama dengan nol. Dengan demikian:

$$w = (C_2 \cosh \alpha y + C_4 \cos \beta y) \sin\frac{m\pi x}{a} \quad (6.14.24)$$

Dengan kondisi tumpuan sederhana di $y = b/2$ dan $y = -b/2$, syarat di $y = \pm b/2$ adalah:

$$w = 0 = \left(C_2 \cosh \alpha \frac{b}{2} + C_4 \cos \beta \frac{b}{2} \right) \sin \frac{m\pi x}{a}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 = \left(C_2 \alpha^2 \cosh \alpha\frac{b}{2} - C_4\beta^2 \cos \beta\frac{b}{2} \right) \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (6.14.25)$$

Untuk penyelesaian selain $C_2 = C_4 = 0$, determinan koefisien-koefisien lain harus sama dengan nol. Dengan demikian,

$$(\alpha^2 + \beta^2) \cosh \alpha\frac{b}{2} \cos \beta\frac{b}{2} = 0 \quad (6.14.26)$$

Karena $\alpha^2 \neq -\beta^2$ kecuali bila $N_x = 0$ (penyelesaian trivial), dan karena cosh $\alpha(b/2) > 1$, satu-satunya cara agar **Persamaan 6.14.26** dapat dipenuhi dalam persoalan nyata adalah untuk:

$$\cos \beta\frac{b}{2} = 0$$

Maka dari itu:

$$\beta\frac{b}{2} = \frac{\pi}{2}, \quad \frac{3\pi}{2}, \quad \frac{5\pi}{2}, \quad \text{dan seterusnya}$$

Dengan menggunakan harga terendah dari $\beta(b/2)$ dan mensubstitusikan ke dalam β seperti yang didefinisikan di bawah ini, **Persamaan 6.14.22** memberikan:

$$\frac{b}{2}\sqrt{-\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \sqrt{\frac{N_x}{D}\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}} = \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{N_x}{D}\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 = \left[\frac{\pi^2}{b^2} + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2\right]^2$$

$$N_x = D\left[\frac{\pi^2}{b^2 m\pi} + \frac{m\pi}{a}\right]^2$$

$$N_x = \frac{D\pi^2}{b^2}\left[\frac{1}{m}\frac{a}{b} + m\frac{b}{a}\right]^2 \qquad (6.14.27)$$

Karena $N_x = F_{cr}t$ dan $D = Et^3/[12(1 - \mu^2)]$, tegangan unit tekuk elastik dapat dinyatakan sebagai:

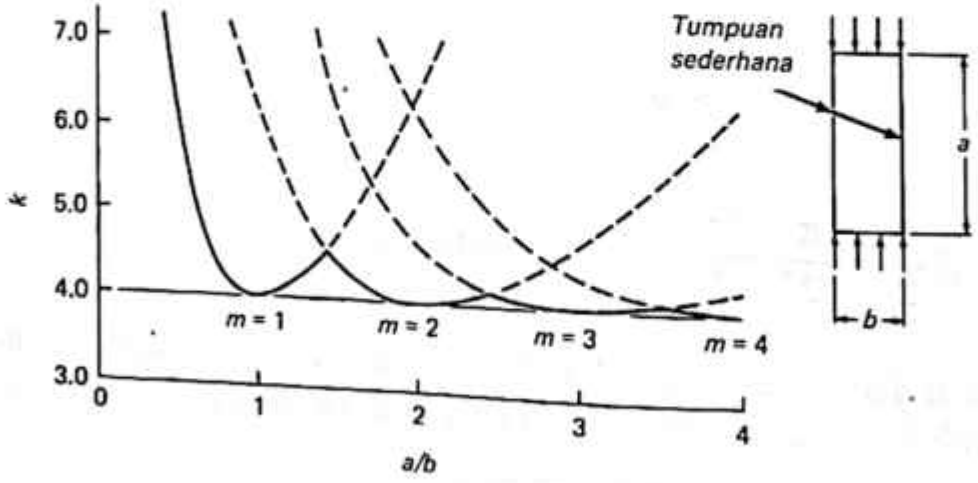
$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \qquad (6.14.28)$$

di mana untuk kasus khusus yang dibahas di sini:

$$k = \left[\frac{1}{m}\frac{a}{b} + m\frac{b}{a}\right]^2 \qquad (6.14.29)$$

Koefisien tekuk k merupakan fungsi dari jenis tegangan (dalam kasus ini tekanan merata pada dua tepi yang berlawanan) dan kondisi tumpuan tepi (dalam kasus ini, tumpuan sederhana pada keempat tepi), di samping rasio aspek a/b yang muncul secara langsung dalam persamaan tersebut.

Persamaan untuk tekuk pelat, **Persamaan.14.28**, sepenuhnya bersifat umum dalam bentuk k dan penurunannya untuk kasus yang dibahas di sini dapat dianggap sebagai ilustrasi prosedur bagi kasus lainnya. Bilangan bulat m menunjukkan banyaknya separuh gelombang yang terjadi dalam arah x pada saat tekuk. **Gambar 6.14.8** menunjukkan bahwa ada harga k minimum untuk jumlah separuh gelombang tertentu, yakni kondisi terlemah. Perhatikan bahwa situasi ter-



Gambar 6.14.8 *Koefisien tekuk untuk pelat yang mendapat tekanan merata — tepi longitudinal bertumpuan sederbana* ***(Persamaan 6.14.29)***

lemah ini terjadi pada saat panjang pelat merupakan kelipatan bulat dari lebarnya, dan bahwa kelipatan ini sama dengan banyaknya separuh gelombang.

Jadi, dengan $a/b = m$ akan diperoleh $k = 4$. Selanjutnya, bila m bertambah besar, persamaan k menjadi makin datar dan mendekati harga konstan 4 untuk rasio a/b yang besar. Hal ini memberikan persamaan tegangan tekuk elastik elemen pelat yang mengalami tekanan merata sepanjang dua tepi dan bertumpuan sederhana di sepanjang kedua tepi yang sejajar beban:

$$F_{cr} = \frac{4\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \qquad (6.14.30)$$

6.15* Kekuatan Pelat yang Memikul Tekanan Tepi Merata

Karena profil tempa, seperti halnya profil *built-up*, tersusun dari elemen pelat, kekuatan kolom penampang tersebut yang didasarkan atas rasio kerampingan keseluruhan hanya dapat terpenuhi bila elemen pelat tidak mengalami lokal. Tekuk lokal pada elemen pelat dapat menyebabkan terjadinya kegagalan prematur pada keseluruhan penampang, atau setidaknya akan menyebabkan tegangan tidak merata dan mengurangi kekuatan keseluruhan.

Dalam **Bagian 6.14**, diuraikan pendekatan dasar terhadap stabilitas elastik pelat. Tegangan tekuk elastik teoretik untuk pelat dapat dinyatakan sebagai:

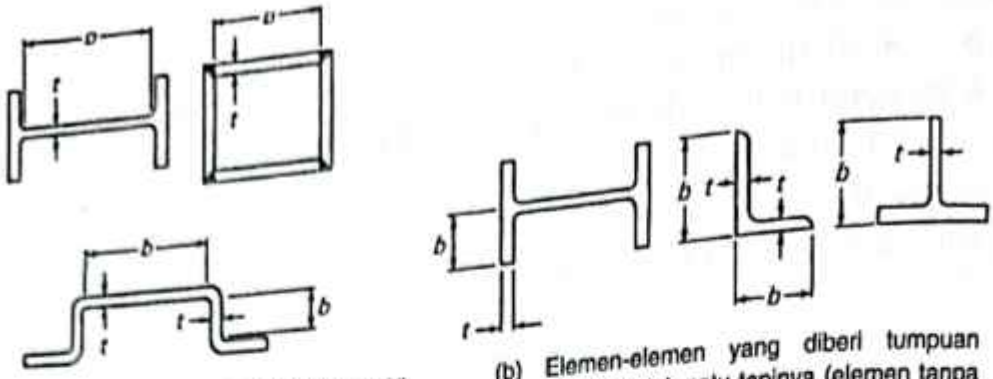
$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \qquad [6.14.28]$$

di mana k merupakan sebuah konstanta yang tergantung pada tipe tegangan, kondisi tumpuan tepi, dan rasio panjang terhadap lebar (rasio aspek) dari pelat yang bersangkutan, modulus elastisitas E, rasio Poisson μ, dan rasio lebar/tebal b/t.

Secara umum, elemen tekan pelat dapat dipisahkan menjadi dua kategori: (1) elemen dengan pengaku; yakni yang diberi tumpuan di sepanjang kedua tepi yang sejajar dengan arah tegangan tekan; dan (2) elemen tanpa pengaku; yakni yang diberi tumpuan pada salah satu tepi dan bebas di tepi lainnya yang sejajar dengan arah tegangan tekan. **Gambar 6.15.1** memperlihatkan contoh tipikal kedua situasi ini.

Elemen yang ada dalam **Gambar 6.15.1** memiliki berbagai derajat kekangan rotasi tepi. **Gambar 6.15.2** menunjukkan variasi k terhadap rasio aspek a/b untuk sebagian besar kondisi tepi ideal; yakni jepit, tumpuan sederhana, dan bebas.

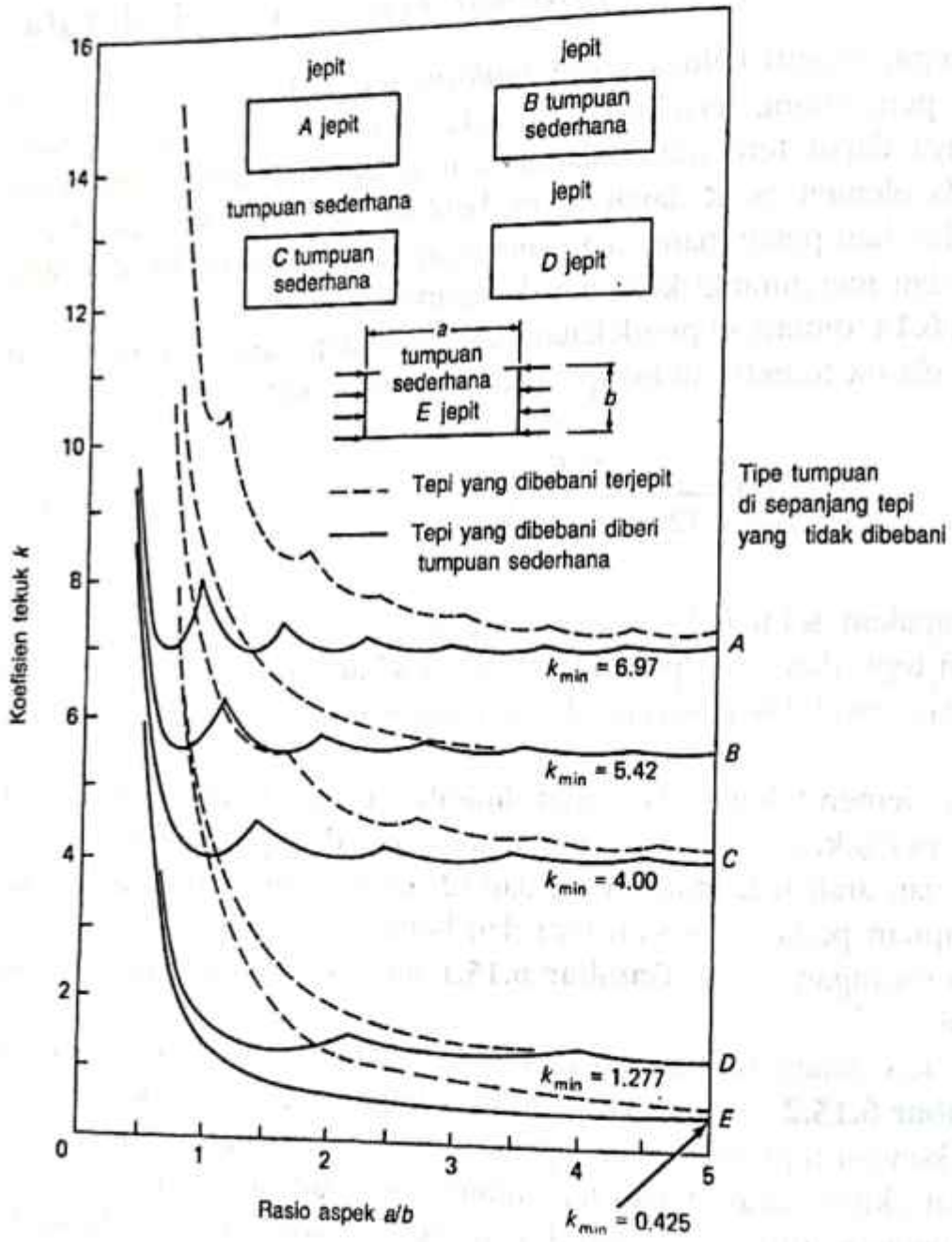
Kekuatan pelat aktual dalam tekan tergantung pada banyak faktor yang sama seperti yang mempengaruhi kekuatan kolom secara keseluruhan, khususnya tegangan sisa. **Gambar 6.15.3** menunjukkan perilaku tipikal pelat tertekan yang dibebani sampai beban ultimitnya. Dengan mengasumsikan bahwa material bersi-



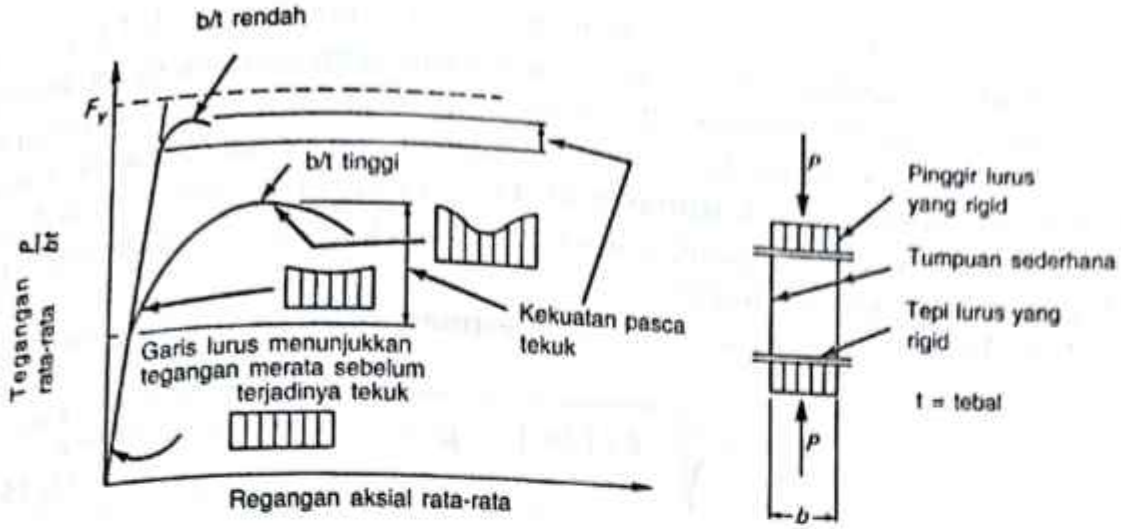
(a) Elemen-elemen yang diberi tumpuan di sepanjang dua tepinya (elemen dengan pengaku)

(b) Elemen-elemen yang diberi tumpuan hanya pada salah satu tepinya (elemen tanpa pengaku)

Gambar 6.15.1 *Elemen-elemen tertekan dengan dan tanpa pengaku*



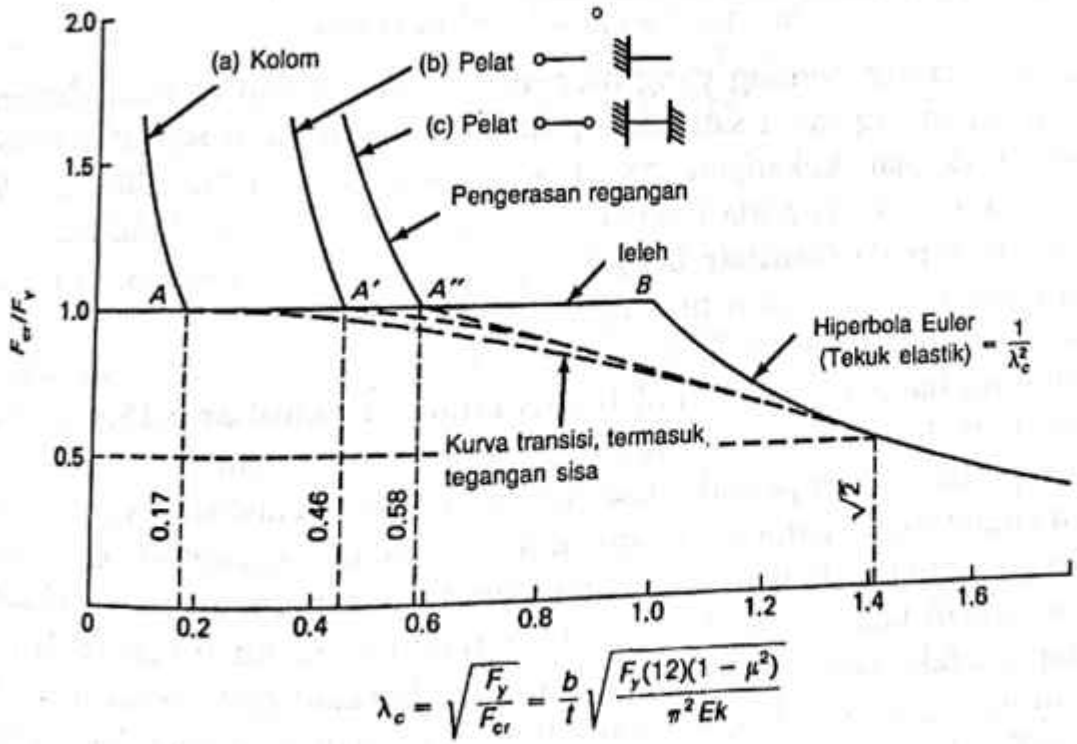
Gambar 6.15.2 *Koefisien tekuk elastik untuk tekan pada pelat segiempat (Diadaptasi dari Gerard dan Becker [6.69]).*



Gambar 6.15.3 Perilaku pelat akibat tekanan tepi

fat elastik-plastik ideal dan tidak mengandung tegangan sisa, distribusi tegangan akan tetap merata sampai tegangan tekuk elastik F_{cr} tercapai. Peningkatan beban lebih lanjut dapat dilakukan, namun bagian pelat yang paling jauh dari sisi tumpuannya akan melendut keluar dari bidang asalnya. Defleksi keluar dari bidang ini akan menyebabkan distribusi tegangan menjadi tidak merata, meskipun beban dikenakan melalui ujung-ujung yang rigid dan lurus sempurna.

Gambar 6.15.3 menunjukkan bahwa kekuatan pelat yang menerima tekanan tepi terdiri dari jumlah kedua komponen: (1) tegangan tekuk elastik atau tak-elastik yang diwakili oleh **Persamaan 6.14.28**, dan (2) kekuatan pasca tekuk. Kita harus memperhatikan pula bahwa kekuatan pasca tekuk akan menjadi lebih



Gambar 6.15.4 Perbandingan tekuk pelat dengan tekuk kolom (Diadaptasi dari Acuan 6.70)

tinggi pada saat rasio lebar/tebal b/t bertambah besar. Untuk harga b/t yang rendah, bukan hanya kekuatan pasca tekuk yang akan hilang, melainkan keseluruhan pelat pun mungkin telah meleleh dan mencapai kondisi pengerasan regangan (*strain hardening*), sehingga F_{cr}/F_y akan menjadi lebih besar dari satu. Untuk pelat *tanpa* tegangan sisa (*lihat* **Gambar 6.15.4**), kita harus memperhatikan dalam menentukan kekuatan: tekuk elastik (hiperbola Euler), leleh (segmen AB, $A'B$, dan $A''B$), dan pengerasan regangan.

Bila F_{cr}/F_y didefinisikan sebagai $1/\lambda_c^2$, **Persamaan 6.14.28** untuk pelat menjadi:

$$\lambda_c = \frac{b}{t}\sqrt{\frac{F_y(12)(1-\mu^2)}{\pi^2 Ek}} \tag{6.15.1}$$

Dari **Gambar 6.15.4** terlihat bahwa, bila dibandingkan dengan kolom (kurva *a*), pelat (kurva *b* dan *c*) mencapai kondisi pengerasan regangan pada harga λ_c yang relatif lebih tinggi. Dalam pembahasan di muka mengenai kolom, harga λ_c di mana pengerasan regangan berawal (λ_0) diasumsikan sama dengan nol karena harganya relatif kecil. Harga-harga λ_0 untuk kolom dan pelat yang mengalami tekanan tepi yang merata untuk F_y = 36 ksi (248 MPa) menurut Haaijer dan Thürlimann [6.70] diberikan sebagai berikut:

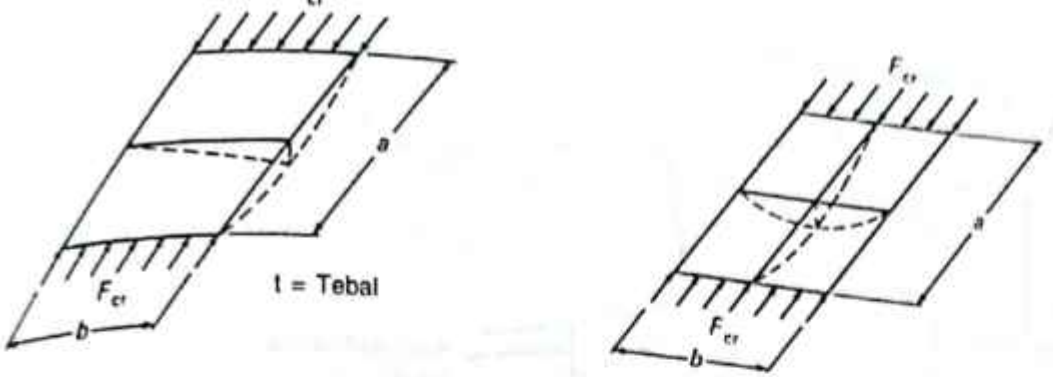
Kolom	$\lambda_0 = 0.173$	$(KL/r = 15.7)$
Flens panjang bersendi	$\lambda_0 = 0.455$	$(b/t = 8.15)$
Flens jepit	$\lambda_0 = 0.461$	$(b/t = 14.3)$
Badan (*web*) bersendi	$\lambda_0 = 0.588$	$(b/t = 32.3)$
Badan jepit	$\lambda_0 = 0.579$	$(b/t = 42.0$

Dari tabel di atas, faktor penting yang menentukan λ_0 adalah apakah elemen pelat ditumpu di sepanjang salah satu atau pun kedua tepi yang sejajar pembebanan; sedangkan derajat kekangan rotasi sepanjang tepi yang dibebani 9 tumpuan sederhana atau jepit) pada hakikatnya tidak berpengaruh. Jadi, masing-masing kurva *b* dan *c* pada **Gambar 6.15.4** dapat mewakili dua kasus, di mana titik A' diambil pada $\lambda_c = 0.46$ dan titik A'' pada $\lambda_c = 0.58$.

Karena pelat, seperti halnya profil tempa, mengandung tegangan sisa, kekuatan yang sebenarnya harus dinyatakan oleh kurva transisi, **Gambar 6.15.4**, antara kurva Euler dan titik di mana mulai terjadi pengerasan regangan.

Pada saat memperhitungkan perilaku tak elastik, modulus elastisitas yang digunakan untuk menghitung regangan dalam arah tegangan maksimum σ_x harus berupa modulus singgung E_t. Penyelidikan atas **Persamaan 6.14.4*a*** menunjukkan bahwa untuk regangan tak elastik dalam arah x namun regangan elastik dalam arah y, E tak dapat difaktorkan. Bleich [6.9] telah memberikan penyelesaian untuk kasus ini dengan menggunakan harga E yang berlainan, dan menganjurkan penggunaan harga $\sqrt{(E_t/E)}$ sebagai pengali **Persamaan 6.14.28**.

Ringkasnya, kekuatan pelat yang mengalami tekanan tepi ditentukan oleh (1)



(a) Elemen tanpa pengaku (pelat dengan satu tepinya bebas)

(b) Elemen dengan pengaku (pelat ditumpu pada keempat tepinya)

Gambar 6.16.1 Defleksi tekuk pelat yang ditekan secara merata

pengerasan regangan, harga λ_c yang rendah; (2) leleh, pada λ_c = katakan 0.5 sampai 0.6; (3) tekuk tak elastik, yang diwakili oleh kurva transisi (sebagian serat bersifat elastik sedang yang lain meleleh); (4) tekuk elastik yang diwakili oleh hiperbola Euler, pada λ_c sekitar 1.4; dan (5) kekuatan pasca tekuk dengan redistribusi tegangan dan deformasi yang besar, katakan untuk λ_c yang lebih besar dari 1.5.

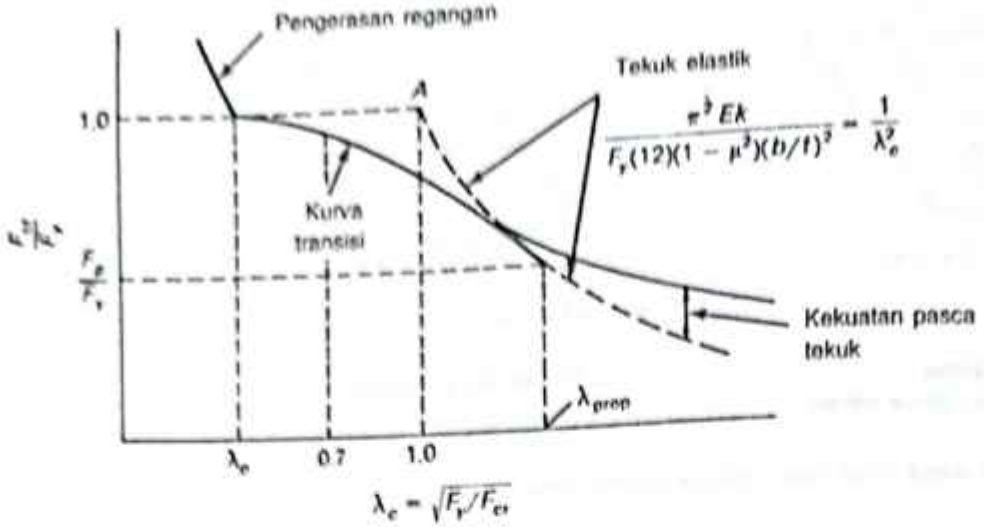
Untuk keperluan desain, kriteria kinerja (*performance*) harus ditetapkan untuk menentukan rentang harga λ_c yang masih dapat diterima dalam desain; dan sebe-rapa konservatif (dan sederhananya) atau seberapa liberal (dan seberapa tingkat kerumitan relatifnya) dalam spesifikasi kekuatan pelat yang bersangkutan.

6.16 Batas Lebar/Tebal λ_r AISC untuk Mencapai Tegangan Leleh tanpa Tekuk Lokal Pelat

Untuk lebih memahami latar belakang persyaratan ini dengan baik, kami mengajak para Pembaca untuk menyelidiki masalah stabilitas dan kekuatan pelat seperti yang diperkenalkan dalam **Bagian 6.14** dan **6.15**. Meskipun demikian, untuk kebanyakan keperluan, barangkali sudah cukup kalau kita memahami bahwa komponen-komponen seperti pelat flens, pelat badan, pelat siku, dan pelat penutup, yang digabungkan sehingga membentuk penampang kolom, dapat mengalami tekuk secara lokal sebelum keseluruhan penampang mencapai kapasitas maksimumnya. Dalam **Gambar 6.15.1** diperlihatkan elemen tipikal. Defleksi tekuk pelat yang mendapat tekan merata diperlihatkan dalam **Gambar 6.16.1** di mana kita jumpai dua kategori: (1) elemen pelat "tanpa pengaku" dengan satu tepi bebas yang sejajar dengan pembebanannya; dan (2) elemen pelat "dengan pengaku" yang ditumpu di sepanjang kedua tepi yang sejajar dengan pembebanannya.

Pada hakikatnya, pelat yang mengalami tekanan berperilaku sama dengan kolom. Ekspresi dasar tekuk elastik yang bersesuaian dengan persamaan Euler untuk kolom dapat dinyatakan sebagai **Persamaan 6.14.28**:

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \qquad [6.14.28]$$



Gambar 6.16.2 *Representasi tanpa dimensi untuk kekuatan pelat pada tekanan tepi*

di mana k merupakan konstanta yang tergantung pada tipe tegangan, kondisi tepinya, rasio panjang terhadap lebar; sedangkan μ adalah rasio Poisson, dan b/t adalah rasio lebar/tebal (*lihat* **Gambar 6.16.1**). Harga-harga k tipikal diberikan dalam **Gambar 6.15.2**.

Kita ketahui bahwa untuk harga b/t yang rendah, pengerasan regangan dapat tercapai tanpa terjadinya tekuk; sedang untuk harga b/t menengah, tegangan sisa dan ketidaksempurnaan menyebabkan tekuk tak elastik yang diwakili oleh kurva transisi. Untuk b/t yang besar, tekuk terjadi sesuai dengan **Persamaan 6.14.28**. Kekuatan aktual pelat dengan rasio b/t yang besar akan melampaui kekuatan tekuk, yakni bahwa pelat itu akan menunjukkan adanya kekuatan pasca tekuk. Dengan demikian, kekuatan pelat dapat diekspresikan tanpa dimensi seperti dalam **Gambar 6.16.2**.

Untuk menetapkan persyaratan desain, kriteria kinerja yang dikehendaki harus ditentukan. Tekuk lokal sebuah komponen kolom secara logis dapat dicegah sebelum kolom tersebut mencapai kekuatan penuh berdasarkan rasio kerampingan keseluruhannya KL/r. Maka, persyaratan kinerjanya akan menjadi:

$$\begin{matrix} F_{cr} \\ \text{elemen} \\ \text{komponen,} \\ \text{atau pelat} \end{matrix} \quad \geq \quad \begin{matrix} F_{cr} \\ \text{keseluruhan} \\ \text{kolom} \end{matrix} \tag{6.16.1}$$

yang berarti bahwa rasio b/t yang dapat diterima akan berbeda-beda tergantung pada rasio kerampingan keseluruhan kolom tersebut. Bila kekuatan pasca tekuk ikut diperhitungkan, hubungan tersebut akan bertambah rumit.

Selama bertahun-tahun, AISI Spesifikasi [1.12] untuk baja bentukan dingin telah menggunakan pendekatan dari **Persamaan 6.16.1**, dan mengikutsertakan pula kekuatan pasca tekuk. AISC (LRFD dan ASD Apendiks B) juga mencakup provisi serupa untuk memperhitungkan kekuatan pasca tekuknya. Setelah terjadi

tekuk dari elemen tekan, efisiensi dari elemen yang bersangkutan untuk memikul beban akan berkurang.

Batas-batas desain pada umumnya disederhanakan untuk menjamin bahwa elemen tekan yang bersangkutan akan mencapai tegangan leleh F_y tanpa terjadinya tekuk lokal, meskipun rasio kerampingan kolom dapat mencegah elemen tersebut untuk mencapai tegangan leleh. Rasio lebar/tebal (b/t) λ yang digunakan untuk mencegah tekuk lokal sampai tercapainya tegangan leleh adalah harga λ_r dari LRFD dan ASD-B5.

Persyaratan untuk mencapai tegangan leleh tanpa tekuk lokal adalah:

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \geq F_y \qquad (6.16.2)$$

Tabel 6.16.1 Batas-batas rasio lebar/tebal λ_r AISC untuk elemen pelat yang terkena tekan merata[a]

Elemen struktur (1)	Koefisien tekuk k (**Gbr.6.15.2**) (2)	b/t **Pers.6.16.4** (3)	F_y(psi) (4)	LRFD dan ASD-B5 (5)	F_y (MPa) F_y(ksi) (6)
Tanpa pengaku:					
(*a*) Siku tunggal	0.425	$2340/\sqrt{F_y}$	$2400/\sqrt{F_y}$	$76/\sqrt{F_y}$	$200/\sqrt{F_y}$
(*b*) Flens	0.70[b]	$3000/\sqrt{F_y}$	$3000/\sqrt{F_y}$	$95/\sqrt{F_y}$	$250/\sqrt{F_y}$
(*c*) Profil **T**	1.277	$4050/\sqrt{F_y}$	$4000/\sqrt{F_y}$	$127/\sqrt{F_y}$	$333/\sqrt{F_y}$
Dengan pengaku:					
(*a*) Flens tebal merata seperti penampang tubular			$7500/\sqrt{F_y}$[e]	$238/\sqrt{F_y}$[f]	$625/\sqrt{F_y}$
(*b*) Pelat penutup berlobang	6.97[d]	$9460/\sqrt{F_y}$	$10,000/\sqrt{F_y}$	$317/\sqrt{F_y}$[g]	$832/\sqrt{F_y}$
(*c*) Lainnya	5.0[c]	$8010/\sqrt{F_y}$	$8000/\sqrt{F_y}$	$253/\sqrt{F_y}$	$664/\sqrt{F_y}$

[a]ASD-Tabel B5.1 tidak menggunakan simbol λ_r untuk batas "nonkompak."

[b]Dipilih sembarang kira-kira di tengah antara tepi yang ditumpu sederhana dan jepit di sepanjang tepi yang ditumpu.

[c]Kekangan tepi diestimasi sekitar $^1/_3$ dari yang jepit (k = 4.0 untuk tumpuan sederhana, dan k = 6.697 untuk tumpuan jepit — *lihat* **Gambar 6.15.2**).

[d]Pertimbangkan terjepit sepenuhnya — penggunaan lebar pelat bersih akan memberikan cadangan yang mencukupi.

[e]Penampang berongga dengan tepi penumpu yang tipis umumnya mempunyai kekangan puntir yang dapat diabaikan; jadi koefisien yang sedikit lebih kecil dari 800 dapat digunakan.

[f]$238/\sqrt{(F_y - F_r)}$ untuk LRFD-B5

[g]$317/\sqrt{(F_y - F_r)}$ untuk LRFD-B5

di mana F_r = 10 ksi (untuk profil tempa)
= 16.5 ksi (untuk profil yang dilas)

Tabel 6.16.2 Harga batas rasio lebar/tebal λ_r untuk elemen pelat[1] untuk mencapai tegangan leleh pada tekanan aksial

	LRFD-B5 dan ASD-B5.1 F_y(ksi)					
Elemen struktur	36	42	50	60	65	100
Tanpa pengaku:						
(*a*) Flens tunggal	12.7	11.7	10.7	9.8	9.4	7.6
(*b*) Flens	15.8	14.7	13.4	12.3	11.8	9.5
(*c*) Profil T	21.2	19.6	18.0	16.4	15.8	12.7
Dengan pengaku:						
(*a*) Flens dengan tebal merata, seperti untuk penampang tubular						
LRFD-B5.1[2]	46.7	42.1	37.6	33.7	32.1	25.1
ASD-B5.1	39.7	36.7	33.7	30.7	29.5	23.8
(*b*) Pelat berlobang						
LRFD-B5.1[2]	62.2	56.0	50.1	44.8	42.7	33.4
ASD-B5.1	52.8	48.9	44.8	40.9	39.3	31.7
(*c*) Lainnya	42.2	39.0	35.8	32.7	31.4	25.3

[1]ASD-Tabel B5.1 tidak menggunakan simbol λ_r untuk batas "nonkompak".
[2]Mengasumsikan profil tempa dengan tegangan sisa F_r = 10 ksi.

Dengan menggunakan $\mu = 0.3$ untuk baja dan $E = 29,000,000$ psi dan F_y dalam psi:

$$\frac{b}{t} \leq 5120 \sqrt{\frac{k}{F_y, \text{ psi}}} \qquad (6.16.3)^*$$

yang pada **Gambar 6.16.2** diwakili oleh titik A pada $\lambda_c = 1.0$, titik yang terletak di atas kurva transisinya. Dengan demikian harus digunakan harga λ_c yang direduksi untuk meminimumkan deviasi antara F_y dan kurva transisi yang memperhitungkan tegangan sisa dan ketidaksempurnaan profil. Dengan demikian $\lambda_c = 0.7$ diambil sebagai harga yang rasional, yang memberikan b/t:

$$\frac{b}{t} \leq 5120\lambda_c \sqrt{\frac{k}{F_y}} = 3580 \sqrt{\frac{k}{F_y}} \qquad (6.16.4)$$

di mana F_y dalam psi. **Tabel 6.16.1** menunjukkan rasio lebar/tebal untuk berbagai situasi tekanan merata. Koefisien yang digunakan oleh AISC sejak 1969 cenderung menerapkan akurasi yang lebih besar dalam kriterianya ketimbang yang

* Untuk SI:

$$\frac{b}{t} \leq 425 \sqrt{\frac{k}{F_y}} \text{ dengan } F_y \text{ dalam MPa} \qquad (6.16.3)$$

dibenarkan. dengan F_y dalam psi, setelah dibutikan, koefisien-koefisien tersebut menjadi basis dari Spesifikasi ASD tahun 1963. Harga-harga sekarang diperoleh dengan membagi $\sqrt{1000}$, sehingga F_y dapat digunakan dalam ksi.

Tabel 6.16.2 memberikan batas λ_r yang telah dievaluasi dari LRFD dan ASD-B5.1* untuk berbagai tegangan leleh yang berlainan. Perlu diperhatikan bahwa untuk kasus (*a*) dan (*b*) dengan elemen berpengaku, batas LRFD λ_r memiliki tegangan sisa F_r yang didapatkan dari F_y di bawah tanda akar. Untuk profil tempa dan boks dilas, tegangan sisa *tarik* diinduksikan pada sudut-sudut seperti yang dibahas dalam **Bagian 6.5**. Hal ini berarti bahwa bila beban tekan eksternal dikenakan, tegangan tariknya harus direduksi sampai nol; dengan demikian, bila tegangan nominal P/A_g adalah F_y pada elemennya, sebenarnya yang berlaku adalah $(F_y - F_r)$ pada daerah-daerah penting di sekitar penumpunya. Karena tingkat tegangan yang saling bertumpang tindih sebenarnya kurang dari F_y, batas λ_r dapat diinkan lebih besar. Untuk elemen tanpa pengaku, tegangan pada tepi yang bebas lebih dominan, dan tegangan sisanya pada umumnya rendah atau bersifat tekan; dengan demikian untuk elemen seperti ini tidak diperlukan pengurang F_r.

6.17 Batas Lebar/Tebal AISC λ_p untuk Mencapai Deformasi Plastik yang Signifikan

Kadangkala elemen pelat dari penampang lintangnya tidak boleh tertekuk sampai mengalami regangan tekan signifikan yang melampaui regangan ϵ_y pada leleh pertama, yakni regangan ke dalam daerah plastik seperti terlihat dalam **Gambar 6.17.1** Semakin rendah rasio lebar/tebal, semakin besar pula regangan tekan ϵ yang dapat diserap tanpa mengalami tekuk. Pada kolom yang dibebani secara aksial, tidak diperlukan kemampuan untuk mengalami regangan plastik karena kekuatan keseluruhan kolom yang didasarkan nilai KL/r tidak membutuhkan deformasi plastik. Akan tetapi, pada balok, seperti yang dibahas dalam **Bab 7**, flens mungkin perlu mengalami regangan plastik yang cukup besar tanpa terjadinya tekuk lokal.

Dari **Gambar 6.16.2**, λ_c harus dibatasi agar tidak melampaui nilai λ_0 bila dikehendaki tercapainya pengerasan regangan tanpa adanya tekuk pelat. dari **6.15.4**, λ_c hendaknya tidak melampaui sekitar 0.46 untuk elemen tekan tanpa pengaku dan 0.58 untuk elemen tekan dengan pengaku.

Untuk *elemen tanpa pengaku*, **Persamaan 6.16.4**, dengan $\lambda_c = 0.46$ memberikan:

$$\frac{b}{t} \le 2350\sqrt{\frac{k}{F_y,\ \text{psi}}} \quad \text{atau} \quad 74.3\sqrt{\frac{k}{F_y,\ \text{ksi}}} \tag{6.17.1}$$

*ASD-B5.1 tidak menggunakan simbol λ untuk rasio lebar/tebal atau λ_r untuk batas "nonkompak"

Ketika $k = 0.425$ (harga terkecilnya), **Persamaan 6.17.1** memberikan:

$$\frac{b}{t} \le \frac{48.5}{\sqrt{F_y,\ \text{ksi}}} \tag{6.17.2}$$

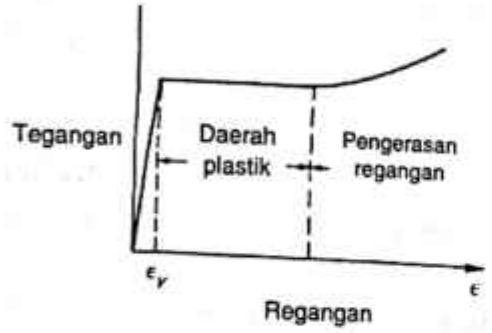
Karena pengaruh tegangan sisa akan hilang pada rentang plastik, sedangkan ketidaksempurnaan material hanya sedikit berpengaruh, **Persamaan 6.17.2** menjadi batasan yang terlalu ketat. Lagi pula, titik awal pengerasan regangan adalah 15 sampai 20 kali ϵ_y sehingga besarnya regangan plastik tidak diperlukan lagi, meskipun untuk mencapai kekuatan momen plastik seperti yang dibahas dalam **Bab 7**. Pembatasan λ_p dari LRFD dan ASD-B5.1 dimaksudkan untuk mencapai regangan plastik sekitar 7 sampai dengan 9 kali ϵ_y, sekitar satu setengah kali regangan yang dibutuhkan untuk mencapai pengerasan regangan. Dengan demikian, batas elemen tekan tanpa pengaku λ_p adalah:

$$\frac{b}{t} \le \frac{65}{\sqrt{F_y,\ \text{ksi}}} \tag{6.17.3}^{\bullet}$$

Untuk *elemen tanpa pengaku*, **Persamaan 6.16.4** dengan $\lambda_c = 0.58$ memberikan:

$$\frac{b}{t} \le 2965\sqrt{\frac{k}{F_y,\ \text{psi}}} \quad \text{atau} \quad 93.7\sqrt{\frac{k}{F_y,\ \text{ksi}}} \tag{6.17.4}$$

bila $k = 4$, yaitu harga minimum yang mengasumsikan kekangan rotasi tepi sebagai kondisi sendi (sebenarnya k terletak di antara harga untuk **Kasus A** dan **C** dari **Gambar 6.15.2**), **Persamaan 6.17.4** memberikan:



Gambar 6.17.1 *Daerah plastik dan pengerasan regangan dari hubungan tegangan-regangan untuk baja.*

•Untuk SI, dengan F_y dalam MPa:

$$\frac{b}{t} \le \frac{171}{\sqrt{F_y}} \tag{6.17.3}$$

$$\frac{b}{t} \le \frac{500}{\sqrt{F_y}} \tag{6.17.6}$$

$$\frac{b}{t} \le \frac{187}{\sqrt{F_y,\ \text{ksi}}} \qquad (6.17.5)$$

Tabel 6.17.1 Batas rasio lebar/tebal λ_p untuk elemen pelat supaya dapat mengakomodasi regangan plastik pada tekan aksial

F_y (ksi)	F_y (MPa)	Elemen tanpa pengaku LRFD dan ASD-B5.1 **(Persamaan 6.17.3)**	Elemen dengan pengaku LRFD dan ASD-B5.1 **(Persamaan 6.17.6)**
36	250	10.8	31.7
42	290	10.0	29.3
45	310	9.7	28.3
50	340	9.2	26.9
55	380	8.8	25.6
60	410	8.4	24.5
65	450	8.1	23.6

LRFD dan ASD-B5.1 menganjurkan batas untuk elemen tekan tanpa pengaku sebagai:

$$\frac{b}{t} \le \frac{190}{\sqrt{F_y,\ \text{ksi}}} \qquad (6.17.6)^*$$

Dalam **Tabel 6.17.1** dapat dijumpai tabulasi harga batas untuk elemen tanpa pengaku (**Persamaan 6.17.3**) dan elemen dengan pengaku (**Persamaan 6.17.4**). Pembahasan tambahan yang berkaitan dengan pembatasan tekuk lokal untuk mendapatkan kekuatan plastik diberikan oleh Lay dan McDermott [6.72].

6.18* Ketentuan AISC untuk Memperhitungkan Kekuatan Tekuk dan Pasca-tekuk pada Elemen Pelat

Sebagaimana telah dibicarakan dalam **Bagian 6.15** dan **6.16**, elemen pelat dalam tekan, baik dengan pengaku atau pun tanpa pengaku (*lihat* **Gambar 6.16.1**) masih memiliki kekuatan setelah terjadinya tekuk, yakni kekuatan pasca-tekuk. Elemen-elemen dengan pengaku memiliki kekuatan pasca tekuk yang besar sedangkan yang tanpa pengaku hanya kecil saja. Meskipun demikian, karena kekuatan elemen sedemikian dapat dievaluasi, cukup beralasan untuk membahas kegunaannya seperti yang dilakukan dalam *Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* [1.12] yang diperkenalkan pertama kali tahun 1946.

Dari **Gambar 6.18.1*a*** jelaslah bahwa kekuatan nominal P_n dari sebuah elemen berpengaku dapat diwujudkan sebagai:

$$P_n = t\int_0^b f(x)\,dx \tag{6.18.1}$$

yang melibatkan integrasi fungsi distribusi tegangan tak merata; atau alternatifnya, konsep "lebar efektif" (**Gambar 6.18.1*b***) dapat pula digunakan:

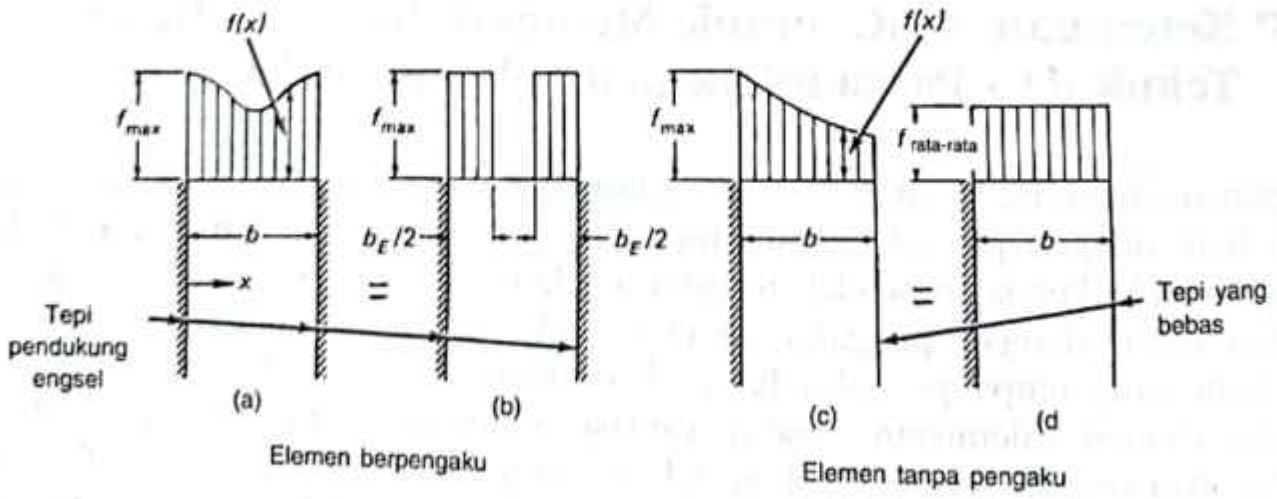
$$P_n = tb_E f_{\text{maks}} \quad A_{\text{eff}} f_{\text{maks}} \text{ (elemen berpengaku)} \tag{6.18.2}$$

di mana b_E = lebar efektif di mana tegangan maksimum dapat dianggap merata dan dapat memberikan kapasitas total yang tepat.

Gambar 6.18.1*c* menunjukkan bahwa **Persamaan 6.18.1** sama validnya untuk elemen tanpa pengaku kecuali bila distribusi tegangannya tidak simetrik terhadap pusat elemennya. Bila digunakan tegangan reduksi $f_{\text{rata-rata}} < f_{\text{maks}}$, kapasitas elemen tanpa pengaku dapat ditulis sebagai (**Gambar 6.18.1*d***):

$$P_n = tbf_{\text{rata-rata}} = A_{\text{bruto}} f_{\text{rata-rata}} \text{ (elemen tanpa pengaku)} \tag{6.18.3}$$

AISC dan AISI [1.12] telah memilih untuk memperlakukan elemen tipis menurut **Persamaan 6.18.2** dan **6.18.3**, meskipun sebenarnya kedua persamaan tersebut sama-sama dapat digunakan untuk kedua tipe elemen. Karena kekuatan pasca tekuk elemen berpengaku itu besar, kita dapat membayangkan bahwa elemen tersebut *telah* mengalami tekuk, dan sebagian elemen itu pun tidak aktif lagi. Di lain pihak, elemen tanpa pengaku, yang kekuatan pasca tekuknya relatif kecil dapat dianggap sebagai tidak mengalami tekuk karena penggunaan tegangan tereduksi.



Gambar 6.18.1 *Elemen-elemen pelat dibawah tekanan aksial, memperlihatkan distribusi regangan dan sistem ekivalen.*

6.18.1 Efek terhadap Kekuatan Kolom Keseluruhan

Untuk desain, dikehendaki penggunaan sifat-sifat penampang bruto; dengan demikian untuk elemen dengan pengaku:

$$P_n = \frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{bruto}}} f_{\text{maks}} A_{\text{bruto}} = Q_a f_{\text{maks}} A_{\text{bruto}} \qquad (6.18.4)$$

dan untuk elemen tanpa pengaku:

$$P_n = \frac{f_{\text{rata-rata}}}{f_{\text{maks}}} f_{\text{maks}} A_{\text{bruto}} = Q_s f_{\text{maks}} A_{\text{bruto}} \qquad (6.18.5)$$

di mana Q_a dan Q_s dapat dianggap sebagai faktor profil atau faktor bentuk.

Untuk menentukan tegangan rata-rata $f_{\text{rata-rata}}$, sistem tekan yang terdiri dari elemen berpengaku maupun tanpa pengaku akan diperlakukan sebagai tanpa pengaku; kemudian lebar efektif untuk elemen dengan pengakunya ditentukan dengan menggunakan $f_{\text{maks}} = f_{\text{rata-rata}}$. Dengan demikian, kapasitas totalnya akan menjadi:

$$P_n = f_{\text{rata-rata}} A_{\text{eff}} \qquad (6.18.6)$$

yang memberikan:

$$P_n = \frac{f_{\text{rata-rata}}}{f_{\text{maks}}} (f_{\text{maks}}) \frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{bruto}}} (A_{\text{bruto}}) = Q_s Q_a f_{\text{maks}} A_{\text{bruto}} \qquad (6.18.7)$$

Dari **Persamaan 6.18.4**,**6.18.5**, dan **6.18.7**, jelaslah bahwa efek tekuk lokal prematur sebelum kekuatan kolom keseluruhan tercapai akan mengalikan tegangan maksimum yang dapat dicapai dengan faktor bentuk Q. Bila kemungkinan terjadinya pengerasan regangan diabaikan, tegangan maksimumnya adalah tegangan leleh yang dari sebab itu harus dikalikan dengan Q.

Load and Resistance Factor Design. Untuk persamaan-persamaan yang digunakan dalam LRFD, λ_c akan menjadi $\lambda_c\sqrt{Q}$ dan persamaan kolom pendeknya menjadi **Persamaan 6.8.2** sebagai berikut:

untuk $\lambda_c\sqrt{Q} \le 1.5$: $$F_{cr} = (0.658^{Q\lambda_c^2}) Q F_y \qquad [6.8.2]$$

Allowable Stress Design. Untuk parabola SSRC dasar yang digunakan dalam ASD, **Persamaan 6.7.1** untuk kolom pendek menjadi:

Untuk $\frac{KL}{r} \le C_c$;

$$F_{cr} = QF_y \left[1 - \frac{QF_y}{4\pi^2 E} \left(\frac{KL}{r} \right)^2 \right] \tag{6.18.8}$$

di mana $Q = Q_s Q_a$. Dari **Persamaan 6.18.8**, bila $F_{cr} = QF_y/2$, rasio keramping-annya menjadi:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{QF_y}} \tag{6.18.9}$$

Apabila $\lambda_c\sqrt{Q} > 1.5$ dalam LRFD, atau $KL/r > C_c$ dalam ASD, efek dari tekuk lokal terhadap keseluruhan kekuatan kolom dapat diabaikan; dengan demikian, untuk kolom yang lebih ramping, Persamaan Euler menjadi basis kekuatan.

Karena faktor bentuk Q digunakan untuk memperhitungkan reduksi dalam efisiensi dari penampang lintangnya dan bukan untuk memodifikasi sifat-sifat penampang lintang tersebut, baik untuk Q lebih kecil dari satu atau tidak, kekuatan nominal P_n dihitung sebagai hasil kali F_{cr} dengan A_g, sedangkan nilai radius girasi r merupakan nilai dari penampang bruto dalam perhitungan KL/r.

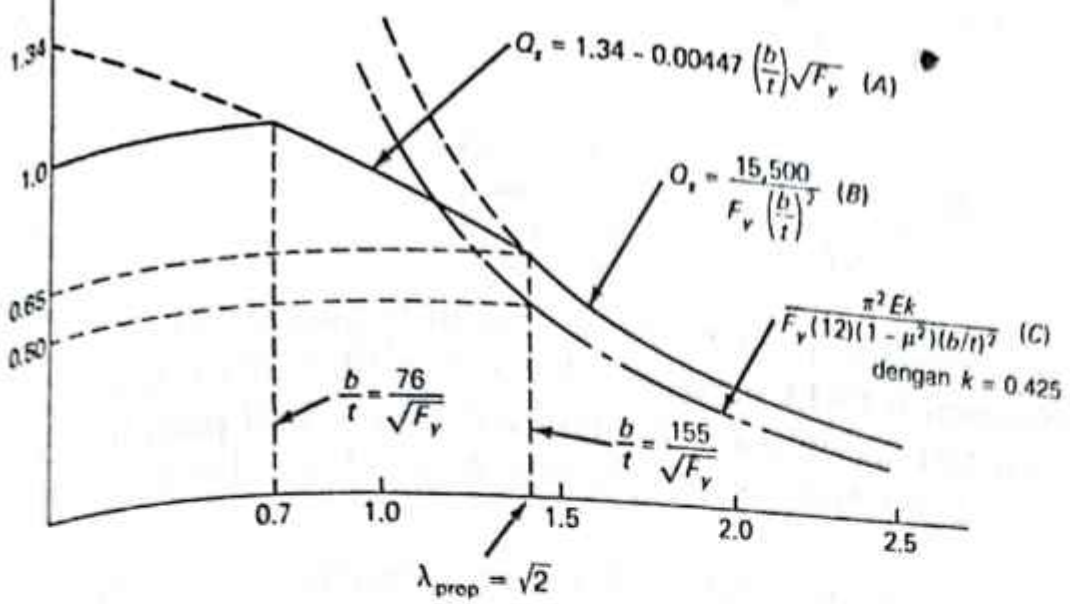
6.18.2 Faktor Bentuk Q_s untuk Elemen Tanpa-Pengaku

Bila kita lihat kembali **Gambar 6.16.2**, dapat kita perhatikan bahwa bila Q kurang dari 1.0 berarti bahwa $\lambda_c > \lambda_0$. Untuk menghitung tegangan tereduksi, dapat digunakan parabola transisi. Untuk penyederhananaan, digunakan sebuah garis lurus untuk siku-siku tunggal seperti Kurva *A* dalam **Gambar 6.18.2**. Garis lurus tersebut menggunakan $\lambda_c = 0.7$ sebagai nilai maksimumnya untuk mana $F_{cr} = F_y$, dan mengambil batas proporsional λ_{prop} pada $\sqrt{2}$, kurang lebih sama dengan untuk keseluruhan tekuk kolom. Meskipun demikian, disebabkan oleh kekuatan pasca tekuk, kurva tipe Euler teoretis (Kurva *C*) sedikit dinaikkan untuk menjadi kurva AISC (Kurva *B*). Berbagai ekspresi dapat digunakan dengan hasil yang sama logisnya.

LRFD-Apendiks B5.3a dan ASD-Apendiks B5.2a memberikan persamaan-persamaan reduksi tegangan yang serupa untuk flens tanpa pengaku dan batang profil T. Persamaan-persamaan yang lain ini kurang lebih proporsional dengan $\sqrt{k}$, seperti yang dapat kita perhatikan dari **Persamaan 6.16.4** dan **Tabel 6.16.1**. Tabel tersebut berisi harga k yang digunakan untuk berbagai kasus tanpa pengaku lainnya.

Proporsi pembatas untuk profil kanal dan T diberikan dalam LRFD dan ASD-Apendiks B, Tabel A-B5.1, yang dimaksudkan untuk menghindarkan terjadinya bentuk kegagalan tekuk puntir. Konsep ini dibahas dalam **Bagian 8.11**.

Meskipun Q_s sampai saat ini didefinisikan sebagai F_{cr}/F_y, ketika kolom mengalami tekuk (berdasarkan nilai KL/r-nya), tegangan rata-rata P_u/A_g selalu *kurang* dari F_y. Hal ini berarti bahwa tekuk lokal dari sebuah elemen tanpa pengaku akan mereduksi efisiensi dari penampang lintangnya *hanya* bila $F_{cr,\ pelat}$ untuk elemen pelat kurang dari $F_{cr,\ kolom}$.



$$\lambda_c = \frac{1}{109}\left(\frac{b}{t}\right)F_y = \sqrt{\frac{F_{cr}}{F_y}}$$

Gambar 6.18.2 Kekuatan pelat untuk elemen tekan tanpa pengaku (siku tunggal) dengan salah satu tepi bertumpuan sendi sedang yang lain bebas. (LRFD-Apendiks B5.3a dan ASD-Apendiks B5.2a)

Dengan demikian, secara umum untuk kolom:

$$Q_s = \frac{F_{\text{cr, pelat}}}{F_{\text{cr, kolom}}} \geq \frac{F_{\text{cr, pelat}}}{F_y} \tag{6.18.10}$$

dan untuk flens tekan dari balok:

$$Q_s = \frac{F_{\text{cr, pelat}}}{F_{\text{cr, flens balok}}} \geq \frac{F_{\text{cr, pelat}}}{F_y} \tag{6.18.11}$$

6.18.3 Faktor Bentuk Q_a untuk Elemen tanpa Pengaku

Konsep penggunaan lebar efektif yang tegangannya dianggap merata, meskipun sebenarnya tidak merata, dikembangkan oleh Kàrmàn [6.73] dan kelak dimodifikasi oleh Winter [6.74]. Persamaan Winter yang formatnya telah digunakan oleh AISI-Spesifikasi [1.12] sejak tahun 1946, adalah:

$$\frac{b_E}{t} = 1.9\sqrt{\frac{E}{f}}\left[1.0 - \frac{0.457}{(b/t)}\sqrt{\frac{E}{f}}\right] \tag{6.18.12}$$

di mana $f = P_u/A_g$, tegangan yang bekerja pada elemen
(f_{maks} dari **Gambar 6.18.1**)
b/t = rasio lebar/tebal aktual

Bentuk dan konstanta persamaan itu pada hakikatnya ditentukan agar dapat sesuai dengan hasil-hasil eksperimental.

Substitusi E = 29,000 ksi memberikan:

$$\frac{b_E}{t} = \frac{324}{\sqrt{f}}\left[1.0 - \frac{81}{(b/t)\sqrt{f}}\right] \qquad (6.18.13)$$

Pengalaman dengan baja standar ringan menunjukkan bahwa koefisien dari suku kedua dalam **Persamaan 6.18.13** dapat direduksi. Sejak tahun 1962, persamaan yang digunakan oleh AISI Spesifikasi [1.12] dan AISC-Spesifikasi pada hakikatnya tidak berubah. Dalam LRFD-Apendiks B5.3b diberikan sebagai berikut:

1. Untuk flens dari penampang bujursangkar dan persegipanjang dengan tebal merata:

$$\frac{b_E}{t} = \frac{326}{\sqrt{f}}\left[1.0 - \frac{64.9}{(b/t)\sqrt{f}}\right] \qquad (6.18.14)^*$$

2. Untuk elemen lain dengan tekan tak merata:

$$\frac{b_E}{t} = \frac{326}{\sqrt{f}}\left[1.0 - \frac{57.2}{(b/t)\sqrt{f}}\right] \qquad (6.18.15)$$

Perbedaan antara **Persamaan 6.18.14** dengan **6.18.15** sebagian dapat disebabkan oleh perbedaan dalam kekangan rotasional yang diasumsikan (momen sepanjang tepi yang ditumpu, **Gambar 6..18.1*b***).

Pembahasan tambahan mengenai lebar efektif untuk elemen-elemen dengan pengaku dalam tekan tersedia dalam buah karya Korol dan Sherbourne [6.75, 6.76], Dawson dan Walker [6.77], dan Abdel Sayed [6.78]. Sharp [6.79] telah membahas elemen dengan pengaku yang salah satu tepinya diperkaku dengan lipatan. Kalyanaraman, Pekoz, dan Winter [6.80] telah mengusulkan persamaan lebar efektif untuk elemen tanpa pengaku.

Karena penampang lintang sebuah kolom mungkin saja mengandung elemen tanpa pengaku yang dalam prosedur desain ini lebih menggunakan tegangan rata-rata tereduksi ketimbang lebar efektif, tegangan yang menentukan pada elemen tanpa pengaku digunakan sebagai tegangan maksimum yang dapat dikenakan pada elemen dengan pengaku. Dengan demikian, tegangan f adalah:

$$f = \frac{P_u}{A_g} \qquad (6.18.16)^*$$

---

*Untuk SI dengan f dalam MPa:

$$\frac{b_E}{t} = \frac{856}{\sqrt{f}}\left[1 - \frac{170}{(b/t)\sqrt{f}}\right] \qquad (6.18.14)$$

dan persyaratan desainnya adalah:

$$P_n = \phi_c (F_{cr,\ pelat}) A_g \tag{6.18.17}$$

Substitusi **Persamaan 6.18.17** ke dalam **Persamaan 6.18.16** menunjukkan bahwa:

$$f = \phi_c F_{cr,\ pelat} \tag{6.18.18}$$

dan dari **persamaan 6.18.11**:

$$F_{cr,\ pelat} = Q_s F_{cr,\ kolom} \tag{6.18.19}$$

Dengan demikian:

$$f = \phi_c Q_s F_{cr,\ kolom} \tag{6.18.20}$$

Perhatikan bahwa $Q_s F_{cr,\ kolom}$ adalah F_{cr} dalam LRFD-Apendiks B5.3c. Dengan kata lain, bila $Q < 1$, F_{cr} didefinisikan kembali sebagai QF_{cr} dalam LRFD-Spesifikasi.

Akhirnya, Q_a seperti didefinisikan oleh **Persamaan 6.18.4** adalah:

$$Q_a = \frac{A_{eff}}{A_{bruto}} = \frac{b_E t}{bt} \tag{6.18.4}$$

di mana $A_{eff} = A_{bruto} - \Sigma(b - b_E)t$.

6.18.4 *Sifat-sifat Desain*

Dalam menghitung kekuatan nominal, aturan berikut ini berlaku sesuai dengan LRFD-Apendiks B5.3.c:

Untuk tekan aksial:

1. Gunakan luas bruto A_g untuk $P_n = F_{cr} A_g$
2. Gunakan luas bruto untuk menghitung radius girasi i untuk KL/r.

Untuk lentur:

1. Gunakan sifat-sifat penampang reduksi untuk balok dengan flens yang terdiri dari elemen berpengaku.

Karena kekuatan balok tidak mengikutsertakan faktor Q yang berkaitan dengan elemen tekan tipis, tepatlah bila digunakan sifat-sifat penampang berdasarkan luas efektif.

Untuk balok—kolom:

1. Gunakan luas bruto untuk P_n

2. Gunakan sifat-sifat penampang tereduksi untuk M_{nx} dan M_{ny} dengan elemen tekan lentur diperkaku.
3. Gunakan Q_a dan Q_s untuk menentukan P_n.
4. Untuk F_{cr} berdasarkan tekuk lateral-puntir dari balok seperti yang dibahas dalam **Bab 9**, harga maksimum dari F_{cr} adalah $Q_s F_{cr}$ bila melibatkan elemen tekan tanpa pengaku.

6.18.5 Lebar Efektif dalam Allowable Stress Design

Dalam *Allowable Stress Design*, kekuatan nominal P_n harus dibagi dengan faktor keamanan untuk memberikan beban ijin P. Bila kekuatan nominal yang diberikan oleh **Persamaan 6.18.2** dibagi dengan faktor keamanan FS, akan diperoleh:

$$P = \frac{P_n}{FS} = b_E t \frac{f_{maks}}{FS} \tag{6.18.21}$$

Suku (f_{maks}/FS) dapat dianggap sebagai tegangan yang diijinkan F_a. Kesimpulan yang penting di sini adalah bahwa lebar efektif b_E yang harus digunakan dalam penghitungan kapasitas ijin pada beban layanan adalah *sama dengan* b_E *yang digunakan pada penghitungan kekuatan* P_n. Bila **Persamaan 6.18.14** atau **6.18.15** digunakan secara langsung, tegangan beban layanan f pertama-tama harus dikalikan dengan faktor FS. Bila tidak, ASD-Apendiks B5.2b mengubah rumus tersebut dengan mengganti f dengan $1.65f$, sehingga memberikan **Persamaan 6.18.14**:

$$\frac{b_E}{t} = \frac{253}{\sqrt{f}} \left[1.0 - \frac{50.3}{(b/t)\sqrt{f}} \right] \tag{6.18.22}$$

yang merupakan ASD-Apendiks B Formula (A-B5-7).

6.19 Desain Batang Tekan yang Dipengaruhi Provisi Tekuk Lokal

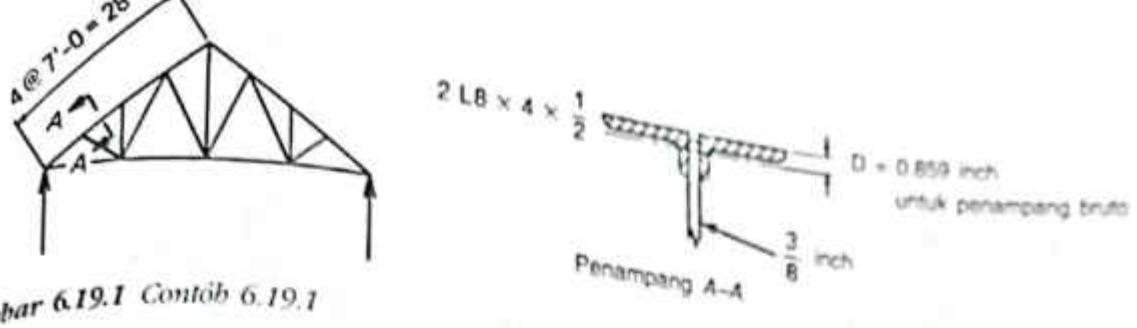
Desain *strut* siku tunggal dan ganda, profil T, profil I bentukan (*built-up*), dan sebagian besar penampang bentukan lainnya termasuk penampang tipe boks, perlu memperhatikan pembatasan lebar/tebal untuk mencegah terjadinya tekuk lokal. Profil tempa W, S, dan M memiliki proporsi sedemikian sehingga tidak akan terjadi tekuk lokal (yakni, $Q = 1.0$) sebelum tercapainya kekuatan penampang yang berdasarkan rasio kerampingan keseluruhan KL/r.

Contoh-contoh berikut ini melukiskan bila $Q < 1.0$.

■ Contoh 6.19.1

Sebuah batang tekan siku ganda untuk rangka batang dari **Gambar 6.19.1** terdiri dari 2—L8×4×$^1/_2$, kaki yang lebih pendek saling beradu punggung. Batang

PERPUSTAKAAN ITE TEKNIK



Gambar 6.19.1 Contoh 6.19.1

sepanjang 28 ft tersebut diberi sokongan silang (*brace*) pada bidang rangkanya setiap 7 ft, namun hanya pada ujung-ujung dalam arah transversal. Asumsikan kedua siku tersebut menyatu sempurna melalui baut yang diketatkan sepenuhnya, dan jarak konektornya cukup dekat sehingga batang dua siku tersebut dapat mencapai kekuatan beban aksial maksimum.* Abaikan kontribusi sokongan lateral yang berasal dari atap. Hitunglah beban tekan layanan aksial maksimum yang diijinkan dipikul oleh batang ini. Beban layanannya adalah 30% beban mati dan 70% beban hidup gravitasi. Gunakan baja A572 Mutu 50 dan *Load and Resistance Factor Design*.

Penyelesaian:

(*a*) Cek tekuk lokal. Kaki yang berukuran 8 inch pada batang siku ganda ini merupakan elemen tekan tanpa pengaku. Periksalah apakah rasio lebar/tebal λ melampaui λ_r LRFD- B5:

$$\left(\lambda = \frac{b}{t} = \frac{8}{0.50} = 16.0\right) > \left(\lambda_r = \frac{76}{\sqrt{F_y}} = \frac{76}{\sqrt{50}} = 10.7\right)$$

Karena $\lambda > \lambda_r$, tekuk lokal akan menentukan dan efisiensi penampang akan tereduksi. Dengan menggunakan LRFD-Apendiks B5.3a, faktor reduksi Q_s-nya adalah:

$$Q_s = 1.340 - 0.00447\left(\frac{b}{t}\right)\sqrt{F_y}$$

$$= 1.340 - 0.00447(16)\sqrt{50} = 0.834$$

(*b*) Hitunglah kekuatan desain $\phi_c P_n$. Untuk tekan aksial, digunakan sifat-sifat penampang bruto. Dari AISC-Manual untuk siku tunggal dan *strut* siku ganda dengan kaki pendek yang bertolak belakang:

*Reduksi kekuatan yang mungkin berkaitan dengan sambungan antara kedua siku itu dibahas dalam **Bagian 6.8** dan dicakup dalam LRFD-E4.

$A_g = 11.5$ inch^2 $r_y = 4.00$ inch untuk pelat buhul $^3/_8$ inch
$r_x = 1.08$ inch

Dengan asumsi $K = 1.0$ untuk batang rangka sebagaimana dibahas dalam **Bagian 6.9**:

$$\frac{(KL)_x}{r_x} = \frac{1.0(7)12}{1.08} = 78 \qquad \frac{(KL)_y}{r_y} = \frac{1.0(28)12}{4.00} = 84$$

Dengan LRFD-Formula (A-B5-11), **Persamaan 6.8.2**, dengan λ_c yang diberikan oleh **Persamaan 6.7.3**:

$$\lambda_c = \frac{KL}{r}\sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} = 84\sqrt{\frac{50}{\pi^2 29{,}000}} = 1.11 \qquad [6.7.3]$$

yang memberikan:

$$\lambda_c\sqrt{Q} = 1.11\sqrt{0.834} = 1.014 < 1.5$$

Untuk $\lambda_c\sqrt{Q} \leq 1.5$;

$$F_{cr} = (0.658^{Q\lambda_c^2})QF_y \qquad [6.8.2]$$

$$F_{cr} = (0.658^{0.834(1.11)^2})(0.834)50 = 27.1 \text{ ksi}$$

$$\phi_c F_{cr} = 0.85(27.1) = 23.1 \text{ ksi}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 23.1(11.5) = 265 \text{ kips}^*$$

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L = 1.2(0.3P) + 1.6(0.7P) = 1.48P$$

$$\phi_c P_n = P_u = 1.48P$$

$$P = 265/1.48 = 179 \text{ kips (kapasitas beban layanan maksimum)} \quad \blacksquare$$

■ Contoh 6.19.2

Desainlah sebuah batang tekan siku ganda yang digunakan sebagai batang pembagi (*spreader strut*) untuk mengangkat beban berat seperti **Gambar 6.19.2**. Beban yang diangkat adalah 60 ton, di mana yang 55 ton merupakan beban hidup termasuk kejut. Sisanya beban mati. Gunakan $F_y = 60$ ksi dan *Load and Resistance Factor Design.*

*Beban ini tidak sesuai dengan yang diberikan dalam tabel LRFD-Manual "COLUMNS" untuk $f_c P_n$. Beban-beban tabular tersebut diperuntukkan bagi sejumlah tertentu baut yang mempersatukan dua siku (LRFD-E4) dan juga mencakup *tekuk puntir-lentur* sesuai dengan LRFD-Apendiks E.$f_c P_n$ maksimumnya termasuk tekuk puntir-lentur (*flexural-torsional buckling*) adalah 260 kips; sekitar 2% lebih rendah dari hitungan di atas. Untuk penampang-penampang tempa panas, penulis tidak yakin perlunya mengikutsertakan efek ini. Bila digunakan penampang-penampang yang sangat tipis, seperti penampang ringan bentukan dingin, tekuk puntir-lentur *harus* dievaluasi pula.

Penyelesaian

(*a*) Hitunglah beban terfaktor P_u. Pada kemiringan kabel 4 : 1, beban tekan pada *strut* tersebut adalah 120 ton (240 kips):

$$P_u = 1.2\left(\frac{5}{60}\right)(240) + 1.6\left(\frac{55}{60}\right)(240) = 376 \text{ kips}$$

(*b*) Estimasi rasio kerampingan. Asumsikan $K = 1.0$ dan dengan mengacu pada **Gambar 6.19.2*b***, gunakan teks **Tabel Apendiks A1** untuk mengestimasi r:

$$r_x \approx 0.29b$$

$$r_y \approx 0.24b$$

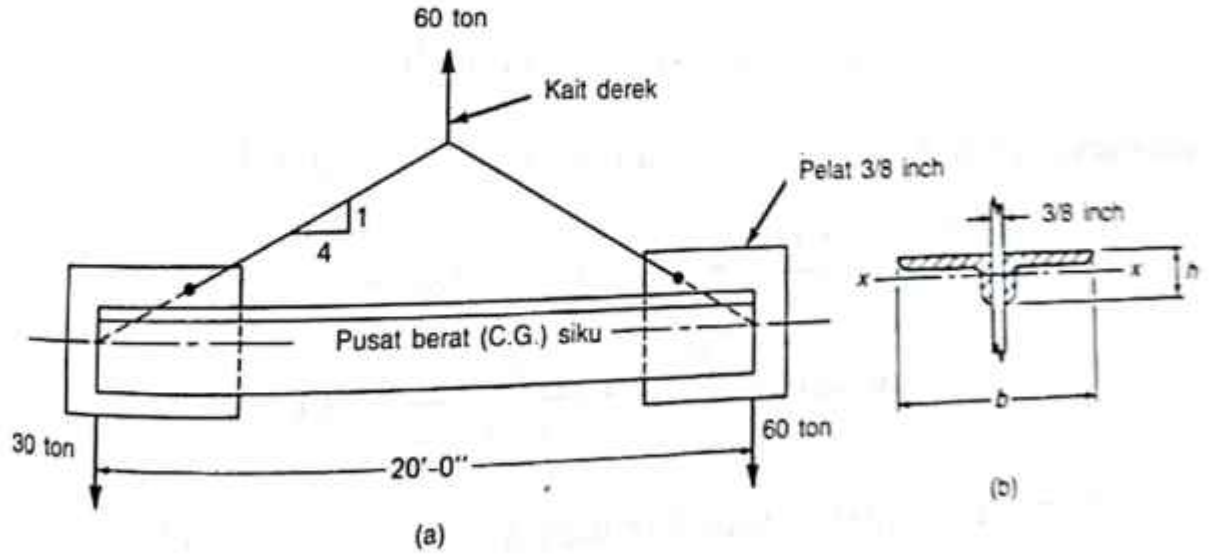
Bila digunakan kaki berukuran 8 inch, $r_x \approx 0.29(8) = 2.32$ inch.

$$\text{Estimasikan } \frac{KL}{r} \approx \frac{1.0(20)12}{2.3} = 104$$

(*c*) Pilih penampang. Dari LRFD "NUMERICAL VALUES" TABEL 3–50, estimasikan $\phi_c F_{cr} \approx 19.3(60/50) = 23$ ksi.

$$A_g \text{ yang diminta} = \frac{P_u}{\phi_c F_{cr}} = \frac{376}{23} = 16.3 \text{ inch}^2$$

Dicoba L8×8×$^5/_8$, $r_{min} = 2.49$ inch, $A_g = 19.2$ inch^2, $KL/r = 96.4$. Luas ini lebih besar dari yang dibutuhkan; meskipun demikian, siku lebih ringan berikutnya ($A = 15.5$ inch^2) tidak akan mencukupi. $\phi_c F_{cr}$ estimasi yang diperoleh dengan memperbesar $F_y = 50$ ksi dalam rasio tegangan leleh mungkin cukup tinggi untuk KL/r di atas 100.



Gambar 6.19.2 *Contoh 6.19.2* (b)

$$\left(\lambda = \frac{b}{t} = \frac{8}{0.625} = 12.8\right) > \left(\lambda_r = \frac{76}{\sqrt{F_y}} = \frac{76}{\sqrt{60}} = 9.8\right)$$

$$Q_s = 1.340 - 0.00447(12.8)\sqrt{60} = 0.897$$

$$\lambda_c = 1.40; \quad \lambda_c\sqrt{Q} = 1.32 < 1.5$$

Dengan demikian rumus kekuatan kolom pendek, **Persamaan 6.8.2** akan menentukan. Bila dievaluasi:

$$F_{cr} = 25.9 \text{ ksi}; \quad \phi_c F_{cr} = 22.0 \text{ ksi}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 22.0(19.2) = 423 \text{ kips} > P_u \quad \text{OK}$$

Gunakan 2–L8×8×$^5/_8$. Perhatikan bahwa kekuatannya berlebihan, namun L8×8×$^1/_2$ tidak akan mencukupi. ■

■ Contoh 6.19.3

Pilihlah tabung struktural 12×12 yang paling tipis untuk memikul beban aksial sebesar 60 kips beban mati dan 260 kips beban hidup. Panjang efektif KL adalah 18 ft dan batang tersebut merupakan bagian dari sistem berpenopang. Gunakan F_y = 65 ksi dan *Load and Resistance Factor Design*. Perhatikan bahwa bila digunakan F_y = 65 ksi menurut prosedur, Mutu 50 merupakan yang maksimum untuk tabung struktural menurut ASTM A500.

Penyelesaian:

(*a*) Hitung beban terfaktor P_u:

$$P_u = 1.2(60) + 1.6(260) = 488 \text{ kips}$$

(*b*) Carilah estimasi luas yang dibutuhkan. Gunakan teks **Tabel Apendiks A1** untuk mengestimasi radius girasi:

$$r \approx 0.4b = 0.4(12) = 4.8 \text{ inch}$$

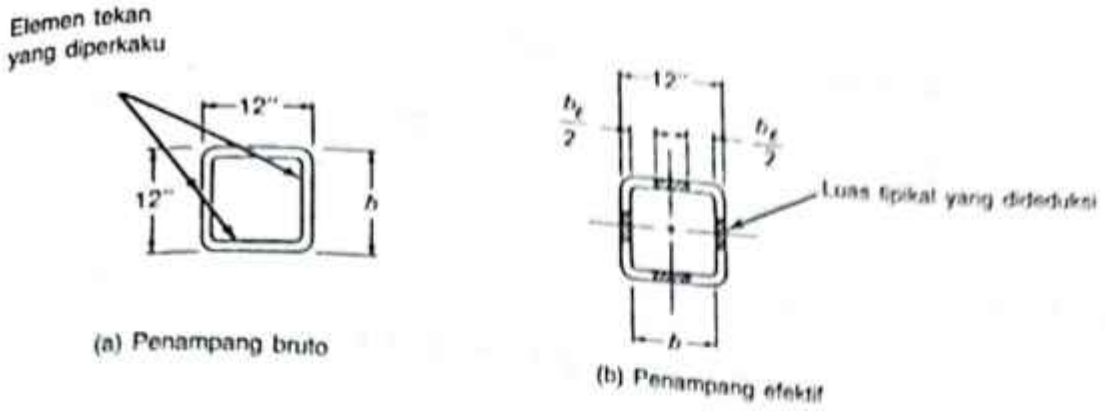
Dengan **Persamaan 6.8.2** untuk F_{cr} dengan coba pertama Q = 1:

$$\frac{KL}{r} = \frac{18(12)}{4.8} = 45; \quad F_{cr} = 53.6 \text{ ksi}$$

$$A_g \text{ yang dibutuhkan} = \frac{P_u}{\phi_c F_{cr}} = \frac{488}{0.85(53.6)} = 9.1 \text{ inch}^2$$

Coba tabung struktural 12×12×$^1/_4$ (**Gambar 6.19.3**):

$$A_g = 11.6 \text{ inch}^2 \qquad r_x = r_y = 4.78 \text{ inch}$$



Gambar 6.19.3 Contoh 6.19.3

(*c*) Hitung kekuatan dari penampang terpilih. Cek b/t pada elemen berpengaku. Lebar b merupakan lebar datar yang diukur antara "kaki-kaki flens" di mana radius luar pada pojok-pojoknya adalah sebesar dua kali tebalnya.

$$\left(\lambda = \frac{b}{t} = \frac{12 - 4(0.25)}{0.25} = 44\right) > \left(\lambda_r = \frac{238}{\sqrt{F_y - 10}} = 33.0\right)$$

Tekuk lokal akan mereduksi efisiensi penampang ini. Hitunglah faktor reduksi Q_a sesuai dengan LRFD-Apendiks B5.3a. Rasio lebar/tebal efektifnya adalah:

$$\frac{b_E}{t} = \frac{326}{\sqrt{f}}\left[1.0 - \frac{64.9}{(b/t)\sqrt{f}}\right] \qquad [6.18.14]$$

di mana $f = \phi_c(F_{cr}$ yang merupakan fungsi dari $Q_s)$. Untuk penampang yang tidak memiliki elemen tanpa pengaku ini $Q_s = 1{,}0$; dengan demikian, $Q = Q_a$. Coba $f = 0.85(53.6) = 45.6$ ksi seperti yang diperoleh dari estimasi KL/r yang pertama:

$$\frac{b_E}{t} = \frac{326}{\sqrt{45.6}}\left[1.0 - \frac{64.9}{(44.0)\sqrt{45.6}}\right] = 37.7$$

Dengan demikian, tekuk lokal akan menentukan efisiensi penampang untuk keempat sisi tabung tersebut. Luas efektifnya adalah:

$$A_{\text{eff}} = 11.6 - 4\left(\frac{b}{t} - \frac{b_E}{t}\right)t^2$$

$$= 11.6 - 4(44.0 - 37.7)(0.25)^2 = 10.0 \text{ inch}^2$$

$$Q_a = \frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{bruto}}} = \frac{10.0}{11.6} = 0.865$$

Hitung ulang harga KL/r untuk penampang coba:

$$\frac{KL}{r} = \frac{18(12)}{4.78} = 45.2; \qquad \lambda_c\sqrt{Q} = 0.633$$

Dengan F_{cr} dari LRFD-Apendiks B5.3c:

$$F_{cr} = 55.0 \text{ ksi}; \qquad \phi_c F_{cr} = 46.7 \text{ ksi}$$

Karena 46.7 ksi tidak banyak berbeda dari harga coba sebesar 45.6 ksi, tidak diperlukan coba lainnya. Dengan demikian:

$$\phi_c P_n = 46.7(11.6) = 542 \text{ kips} > (P_u = 488 \text{ kips}) \qquad \text{OK}$$

Gunakan 12×12×$^1/_4$ tabung struktural, $F_y = 65$ ksi

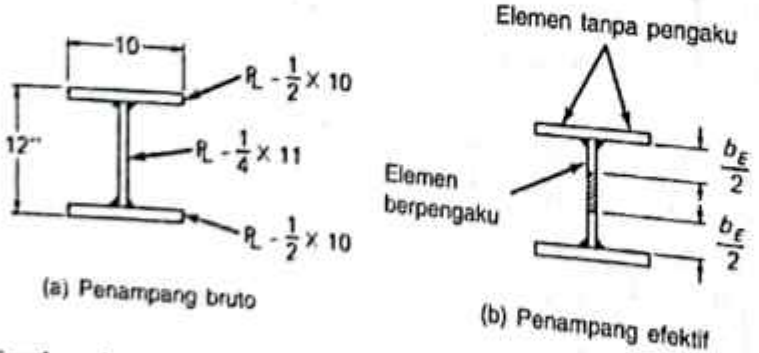
Untuk desain, selain sifat-sifat tabung struktural tempaan yang tersedia dalam AISC-Manual, tersedia pula *Manual of Cold Formed Welded Structural Steel Tubing** yang berisi tabel-tabel beban kolom dan balok.

■ Contoh 6.19.4

Tentukan kekuatan tekan aksial nominal P_n untuk profil non-standar dari **Gambar 6.19.4** untuk panjang efektif KL yang sama dengan 8 ft. Gunakan $F_y = 100$ ksi dan *Load and Resistance Factor Design.*

Penyelesaian:

Pada tekan aksial, penampang ini terdiri dari elemen tekan tanpa pengaku (flens)



Gambar 6.19.4 *Contoh 6.19.4*

*Edisi Pertama, 1974, diterbitkan oleh *Welded Steel Tube Institute, Inc, Structural Tube Division,* 522 Westgate Tower, Cleveland, Ohio 44116.

dan elemen tekan dengan berpengaku (badan). Elemen tanpa pengaku harus dibahas terlebih dahulu sehingga tingkat tegangan efektifnya dapat ditentukan.

(*a*) Sifat-sifat penampang bruto:

$$I_y = \text{dapat diabaikan (badan)} + 2(1/12)(0.5)(10)3 \text{ (flens)} = 83.4 \text{ inch}^4$$

$$A = 11(0.25) + 2(5.0) = 12.75 \text{ inch}^2$$

$$r_y = \sqrt{I/A} = \sqrt{83.4/12.75} = 2.56 \text{ inch}$$

(*b*) Elemen tanpa pengaku, LRFD-Bs.1:

$$\left(\lambda = \frac{b}{t} = \frac{5.0}{0.5} = 10.0\right) > \left(\lambda_r = \frac{95}{\sqrt{100}} = 9.5\right)$$

Dengan demikian, karena $\lambda > \lambda_r$, keadaan batas tekuk lokal akan menyebabkan berkurangnya efisiensi; $Q_s < 1.0$:

$$Q_s = 1.415 - 0.00437\left(\frac{b}{t}\right)\sqrt{F_y} \quad \text{LRFD Formula (A–B5–3)}$$

$$= 1.415 - 0.00437(10)\sqrt{100} = 0.978$$

(*c*) Elemen dengan pengaku, LRFD-B5.1:

$$\left(\lambda = \frac{b}{t} = \frac{11.0}{0.25} = 44.0\right) > \left(\lambda_r = \frac{253}{\sqrt{100}} = 25.3\right)$$

Dengan demikian $Q_a < 1.0$. Tegangan f yang bekerja pada elemen berpengaku adalah $\phi_c F_{cr}$ di mana F_{cr} mencakup Q, yakni **Persamaan 6.8.2**. Coba pertama dibuat dengan asumsi $Q = Q_s$, yakni $Q_a = 1.0$:

$$\frac{KL}{r} = \frac{8(12)}{2.56} = 37.5; \qquad \lambda_c\sqrt{Q} = 0.701\sqrt{0.978} = 0.69$$

Dari LRFD "NUMERICAL VALUES" TABEL 4, diperoleh koefisien 0.696 untuk $\lambda_c = 0.69$, dengan demikian:

$$\phi_c F_{cr} = 0.696 Q F_y = 0.696(0.978)100 = 68 \text{ ksi}$$

$$\frac{b_E}{t} = \frac{326}{\sqrt{68}}\left[1.0 - \frac{57.2}{(44.0)\sqrt{68}}\right] = 33.3$$

$$A_{\text{eff}} = 12.75 - (44.0 - 33.3)(0.25)^2 = 12.08 \text{ inch}^2$$

$$Q_a = \frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{bruto}}} = \frac{12.08}{12.75} = 0.948$$

Harga baru $\phi_c F_{\text{cr}}$ untuk $Q = Q_s Q_a = 0.978(0.948) = 0.93$ adalah:

$$\lambda_c \sqrt{Q} = 0.701\sqrt{0.93} = 0.676$$

$$\phi_c F_{\text{cr}} = 0.702 Q F_y = 0.702(0.93)100 = 65.3 \text{ ksi}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{\text{cr}} A_g = 65.3(12.75) = 832 \text{ kips}$$

$$P_n = 832/\phi_c = 832/0.85 = 978 \text{ kips}$$

Acuan Terpilih

6.1. L. Euler. *De Curvis Elasticis, Additamentum I, Methodus Inveniendi Lineas Curvas Maximi Minimive Proprietate Gaudentes.* Lausanne and Geneva, 1744 (pp. 267-268); and "Sur le Forces des Colonnes," *Memoires de l'Academie Royale des Sciences et Belles Lettres,* Vol. 13, Berlin, 1759; English translation of the letter by J. A. Van den Broek, "Euler's Classic Paper 'On the Strength of Columns'," *American Journal of Physics,* 15 (January-February 1947), 309-318.

6.2. A. Considere. "Resistance des pieces comprimees," *Congres International des Procedes de Construction,* Paris, 1891, 3, 371.

6.3. F. Engesser. "Ueber die Knickfestigkeit gerader Stabe," *Zeitschrift des Architekten und Ingenieur—Vereins zu Hannover,* 35 (1889), 455 and 462; also "Die Knickfestigkeit gerader Stabe," *Zentralblatt der Bauverwaltung,* Berlin (December 5, 1891), 483.

6.4. F. R. Shanley. "The Column Paradox," *Journal of the Aeronautical Sciences,* 13, 12 (December 1946), 678.

6.5. F. R. Shanley. "Inelastic Column Theory," *Journal of the Aeronautical Sciences* 14, 5 (May 1947), 261-264.

6.6. Bruce G. Johnston. "Column Buckling Theory: Historic Highlights," *Journal of Structural Engineering,* 109, 9 (September 1983), 2086-2096; Disc. by T. H. Lin, Zia Razzaq, and B. G. Johnston, 110, 8 (August 1984),1930-1933.

6.7. Bruce G. Johnston. "A Survey of Progress, 1944-51," Bulletin No. 1, Column Research Council, January 1952.

6.8. Theodore V. Galambos, ed. *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures,* 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1988.

6.9. Friedrich Bleich. *Buckling Strength of Metal Structures.* New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1952.

6.10. Bruce G. Johnston. "Buckling Behavior Above the Tangent Modulus Load," *Journal of the Engineering Mechanics Division,* ASCE, 87, EM6 (December 1961), 79-98.
6.11. A. W. Huber and L. S. Beedle. "Residual Stress and the Compressive Strength of Steel," *Welding Journal,* December 1954, 589s-614s.
6.12. C. H. Yang, L. S. Beedle, **and B. G. Johnston.** "Residual Stress and the Yield Strength of Steel Beams," ***Welding Journal,* April** 1952, 205s-229s.
6.13. N. R. Nagaraja Rao, F. R. Estuar, and L. Tall. "Residual Stresses in Welded Shapes," *Welding Journal,* July 1964, 295s-306s.
6.14. Donald R. Sherman. "Residual Stress Measurement in Tubular Members," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 95, ST4 (April 1969), 635-647.
6.15. Donald R. Sherman. "Residual Stresses and Tubular Compression Members," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 97, ST3 (March 1971), 891-904.
6.16. Lynn S. Beedle and Lambert Tall. "Basic Column Strength," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 86, ST7 (July 1960), 139-173. Also *Transactions,* ASCE, 127 (1962), part II, 138-179.
6.17. Ching K. Yu and Lambert Tall. "Significance and Application of Stub Column Test Results," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 97, ST7 (July 1971), 1841-1861.
6.18. Bruce G. Johnston. "Inelastic Buckling Gradient," *Journal of the Engineering Mechanics Division,* ASCE, 90, EM6 (December 1964), 31-47.
6.19. Richard H. Batterman and Bruce G. Johnston. "Behavior and Maximum Strength of Metal Columns," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 93, ST2 (April 1967), 205-230.
6.20. Bruce G. Johnston, ed. *Structural Stability Research Council, Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures.* 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1976.
6.21. Reidar Bjorhovde. "Effect of End Restraint on Column Strength—Practical Applications," *Engineering Journal,* AISC, 22,1 (First Quarter 1984),1-13.
6.22. Reidar Bjorhovde. "The Safety of Steel Columns," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 104, ST3 (March 1978), 463-477.
6.23. Reidar Bjorhovde. "Columns: From Theory to Practice," *Engineering Journal,* AISC, 26,1 (First Quarter 1988), 21-34.
6.24. Dann H. Hall. "Proposed Steel Column Strength Criteria," *Journal of the Structural Division,* 107, ST4 (April 1981), 649670. Disc. by Bruce G. Johnston, 108, ST4 (April 1982), 956-957; by ZuYan Shen and Le-Wu Lu, 108, ST7 (July 1982),1680-1681; by author, 108, ST12 (December 1982), 2853-2855.
6.25. J. Michael Rotter. "Multiple Column Curves by Modifying Factors," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 108, ST7 (July 1982),1665-1669.
6.26. Jacque Rondal and Rene Maquoi. "Single Equation for SSRC Column-Strength Curves," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 105, STl (January 1979), 247-250.
6.27. E. M. Lui and W. F. Chen. "Simplified Approach to the Analysis and Design

of Columns with Imperfections," *Engineering Journal,* AISC, 22, 2 (Second Quarter 1984), 99-117.
6.28. John P. Anderson and James H. Woodward. "Calculation of Effective Lengths and Effective Slenderness Ratios of Stepped Columns," *Engineering Journal,* AISC, 9, 3 (October 1972),157-166.
6.29. Carlo A. Castiglioni. "Stepped Columns: A Simplified Design Method," *Engineering Journal,* AISC, 24,1 (First Quarter 1986),1-8.
6.30. Suresh C. Shrivastava. "Elastic Buckling of a Column Under Varying Axial Force," *Engineering Journal,* AISC, 18,1 (First Quarter 1980),19-21.
6.31. Balbir S. Sandhu. "Effective Length of Columns with Intermediate Axial Load," *Engineering Journal,* AISC, 9, 3 (October 1972),154-156.
6.32. John C. Ermopoulos. "Buckling of Tapered Bars Under Stepped Axial Loads," *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 112, 6 (June 1986),1346-1354.
6.33. D. R. Sherman. *Tentative Criteria for Structural Applications of Steel Tubing and Pipe.* Washington, D.C.: American Iron and Steel Institute, 1976.
6.34. Julian Snyder and Seng-Lip Lee. "Buckling of Elastic-Plastic Tubular Columns," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 94, ST1 (January 1968),153-173.
6.35. Seng-Lip Lee and Julian Snyder. "Stability of Strain-Hardening Tubular Columns," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 94, ST3 (March 1968), 683-707.
6.36. Wai F. Chen and David A. Ross. "Tests of Fabricated Tubular Columns," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 103, ST3 (March 1977), 619-634.
6.37. David A. Ross, Wai Fah Chen, and Lambert Tall. "Fabricated Tubular Steel Columns," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 106, ST1 (January 1980), 265-282.
6.38. Theodore V. Galambos. "Strength of Round Steel Columns," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 91, ST1 (February 1965),121-140.
6.39. Charles Libove. "Sparsely Connected Built-Up Columns," *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 111, 3 (March 1985), 609-627.
6.40. Abolhassan Astaneh-Asl, Subhash C. Goel, and Robert D. Hanson. "Cyclic Out-of-Plane Buckling of Double-Angle Bracing," *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 111, 5 (May 1985),1135–1153.
6.41. Cynthia J. Zahn and Geerhard Haaijer. "Effect of Connector Spacing on Double Angle Compressive Strength," *Materials and Member Behavior,* Proceedings of Structures Congress '87, Orlando, FL, August 17-20,1987, pp. 199-212.
6.42. John B. Kennedy and Madugula K. S. Murty. "Buckling of Steel Angle and Tee Struts," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 98, ST11 (November 1972), 2507-2522.
6.43. John B. Kennedy and Madugula K. S. Murty. "Buckling of Angles: State of the Art," *Journal of the Structural Division,* ASCE, 108, ST9 (September 1982), 1967-1980. Disc., *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 109, 8 (August 1983), 2025-2029.

6.44. Scott T. Woolcock and Sritawat Kitipornchai. "Design of Single Angle Web Struts in Trusses," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 112, 6 (June 1986), 1327-1345.
6.45. Adel A. El-Tayem and Subhash C. Goel. "Effective Length Factor for Design of X-bracing Systems," *Engineering Journal*, AISC, 24, 4 (First Quarter 1986), 41-45.
6.46. Subhash C. Goel and Adel A. El-Tayem. "Cyclic Load Behavior of Angle X-Bracing," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 112, 11 (November 1986), 2528-2539.
6.47. Guo Chuenmei. "Elastoplastic Buckling of Single Angle Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 110, 6 (June 1984),1391-1395.
6.48. Erling A. Smith. "Buckling of Four Equal-Leg Angle Cruciform Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 109, 2 (February 1983), 439-450.
6.49. Le-Wu Lu. "Effective Length of Columns in Gable Frames," *Engineering Journal*, AISC, 2,1 (January 1965), 6-7.
6.50. Kamal Hassan. "On the Determination of Buckling Length of Frame Columns," *Publications*, International Association for Bridge and Structural Engineering, 28-II, 1968, 91-101 (in German).
6.51. Theodore V. Galambos. "Influence of Partial Base Fixity on Frame Stability," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 86, ST5 (May 1960), 85-108.
6.52. German Gurfinkel and Arthur R. Robinson. "Buckling of Elastically Restrained Columns," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 91, ST6 (December 1965), 159-183.
6.53. Harold Switzky and Ping Chun Wang. "Design and Analysis of Frames for Stability," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 95, ST4 (April 1969), 695-713.
6.54. Thomas C. Kavanagh. "Effective Length of Framed Columns," *Transactions*, ASCE, 127 (1962), Part II, 81-101.
6.55. Joseph A. Yura. " The Effective Length of Columns in Unbraced Frames," *Engineering Journal*, AISC, 8, 2 (April 1971), 37-42; Disc., 9, 3 (October 1972), 167-168.
6.56. Peter F. Adams. Discussion of "The Effective Length of Columns in Unbraced Frames," by Joseph A. Yura, *Engineering Journal*, AISC, 9, 1 (January 1972), 40-41.
6.57. Bruce G. Johnston. Discussion of "The Effective Length of Columns in Unbraced Frames," by Joseph A. Yura, *Engineering Journal*, AISC, 9, 1 (January 1972), 46.
6.58. Robert 0. Disque. "Inelastic K-factor for Column Design," *Engineering Journal*, AISC, 10, 2 (Second Quarter 1973), 33-35.
6.59. C. V. Smith, Jr. "On Inelastic Column Buckling," *Engineering Journal*, AISC, 13, 3 (Third Quarter 1976), 86-88; Disc., 14,1 (First Quarter 1977), 47-48.
6.60. Charles A. Matz. Discussion of "On Inelastic Column Buckling," by C. V. Smith, Jr., *Engineering Journal*, AISC, 14,1 (First Quarter 1977), 47-48.
6.61. Frank W. Stockwell, Jr. "Girder Stiffness Distribution for Unbraced Columns,"

Engineering Journal, AISC, 13, 3 (Third Quarter 1976), 82-85.
6.62. Cyrus Omid'varan. "Discrete Analysis of Latticed Columns," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 94, ST1 (January 1968),119-132.
6.63. Fung J. Lin, Ernst C. Glauser, and Bruce G. Johnston. "Behavior of Laced aud Battened Structural Members," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 96, ST7 (July 1970), 1377-1401. 6.64. Bruce G. Johnston. "Spaced Steel Columns," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 97, STS (May 1971),1465-1479.
6.65. Omer W. Blodgett. *Design of Welded Structures*. Cleveland, Ohio: James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1966.
6.66. S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger. *Theory of Plates and Shells*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1959 (pp. 79-82).
6.67. Stephen P. Timoshenko and James M. Gere. *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961 (pp. 319-328, 351-356).
6.68. Kurt H. Gerstle. *Basic Structural Design*. New York: McGrawHill Book Company, Inc., 1967 (pp. 88-90).
6.69. George Gerard and Herbert Becker. *Handbook of Structural Stability*, Part *I—Buckling of Flat Plates*, Tech. Note 3871, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, D.C., July 1957.
6.70. Geerhard Haaijer and Bruno Thurlimann. "On Inelastic Buckling in Steel," *Transactions*, ASCE, 125 (1960), 308-344.
6.71. Maxwell G. Lay. "Flange Local Buckling in Wide-Flange Shapes," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 91, ST6 (December 1965), 95-116.
6.72. John F. McDermott. "Local Plastic Buckling of A514 Steel Members," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 95, ST9 (September 1969),1837-1850.
6.73. Theodore von Karman, E. E. Sechler, and L. H. Donnell. "The Strength of Thin Plates in Compression," *Transactions*, ASME, 54, APM-54-5 (1932), 53.
6.74. G. Winter. "Strength of Thin Compression Flanges," *Transactions*, ASCE, 112 (1947), 527-576.
6.75. Robert M. Korol and Archibald N. Sherbourne. "Strength Predictions of Plates in Uniaxial Compression," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 98, ST9 (September 1972), 1965-1986. 6.76. Archibald N. Sherbourne and Robert M. Korol. " Post-Buckling of Axially Compressed Plates," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 98, ST10 (October 1972), 2223-2234.
6.77. Ralph G. Dawson and Alastair C. Walker. "Post-Buckling of Geometrically Imperfect Plates," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 98, ST1 (January 1972), 75-94.
6.78. George Abdel-Sayed. "Effective Width of Thin Plates in Compression," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 95, ST10 (October 1969), 2183-2203.
6.79. Maurice L. Sharp. "Longitudinal Stiffeners for Compression Members," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 92, STS (October 1966),187-211.
6.80. V. Kalyanaraman, Teoman Pekoz, and George Winter. "Unstiffened

Compression Elements," *Journal of the Structural Division*, ASCE, 103, ST9 (September 1977), 1833-1848.

6.81. Russell Q. Bridge and Donald J. Fraser. "Improved G-Factor Method for Evaluating Effective Lengths of Columns," *Journal of Structural Engineering*, 113, 6 (June 1987),1341-1356.

6.82. Lian Duan and Wai-Fah Chen. "Design Rules of Built-Up Members in Load and Resistance Factor Design," *Journal of Structural Engineering*, 114,11 (November 1988), 2544-2554.

6.83. AISC. *Specification for Allowable Stress Design of Single-Angle Members*. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1989.

Soal-soal

Semua soal hendaknya dikerjakan menurut *Load and Resistance Factor Design* AISC atau *Allowable Stress Design*. Semua beban yang diberikan merupakan beban layanan, kecuali bila diberi keterangan khusus. Untuk masing-masing soal, gambarlah bentuk tekuk potensialnya pada sebuah gambar yang menunjukkan kolom dan kekangannya menurut arah utama x dan y. Pemeriksaan akhir mengenai kekuatan (untuk LRFD) atau tegangan (untuk ASD) harus dilakukan pada semua soal.

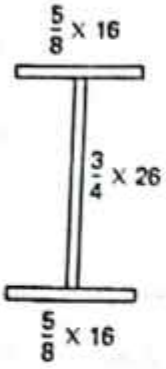
6.1 Untuk kasus yang ditentukan, pilihlah penampang W yang paling ringan untuk memikul beban aksial yang ditunjukkan. Batang tersebut merupakan bagian dari portal tak bergoyang (*braced frame*). Asumsikan bahwa ujung atas dan bawah batang tersebut adalah sendi.

Kasus	P_D Bebanmati (kips)	P_L Beban hidup (kips)	Panjang batang (ft)	Mutu baja
1	20	80	22	A36
2	20	80	22	A572 Mutu 50
3	20	80	14	A36
4	20	80	14	A572 Mutu 50
5	60	40	22	A36
6	60	40	14	A36
7	20	80	14	A572 Mutu 60
8	20	80	14	A572 Mutu 65

6.2 Pilihlah penampang W yang paling ringan untuk memikul beban tekan sebesar 200 kips beban mati dan 625 kips beban hidup. Panjang efektif KL-nya adalah 25 ft. Gunakan baja A36 atau A572 Mutu 50, mana yang lebih ekonomik, bila harga per pound Mutu 50 adalah 7% lebih mahal.

6.3 Hitunglah beban tekan aksial layanan maksimum yang boleh dipikul penam-

pang bentukan (*built-up*) dalam gambar berikut ini. Bebannya 30% beban hidup dan 70% beban mati. Baja yang digunakan adalah A572 Mutu 50, sedang panjang efektifnya adalah $(KL)_y$ = 14 ft dan $(KL)_x$ = 42 ft.



Soal 6.3

6.4 Untuk data dari **Soal 6.1**, anggaplah batang tersebut terjepit pada bagian bawah dan sendi pada bagian atas dan merupakan bagian dari sistem tak bergoyang (*braced system*). Pilihlah penampang W yang paling ringan untuk kasus yang dipilih.

6.5 Pilihlah penampang W yang paling ringan untuk kolom sepanjang 28 ft yang dibebani secara aksial, pada portal tak goyang, dengan tambahan tumpuan lateral pada pertengahan arah yang lemah. Beban yang dipikul adalah 65 kips beban mati dan 150 kips beban hidup. Asumsikan bahwa ujung atas dan bawah kolom tersebut ditumpu sendi.
(*a*) Gunakan baja A36 dan tunjukkan pilihan pertama dan kedua.
(*b*) Gunakan baja A572 Mutu 60, dan tunjukkan pilihan pertama dan kedua.

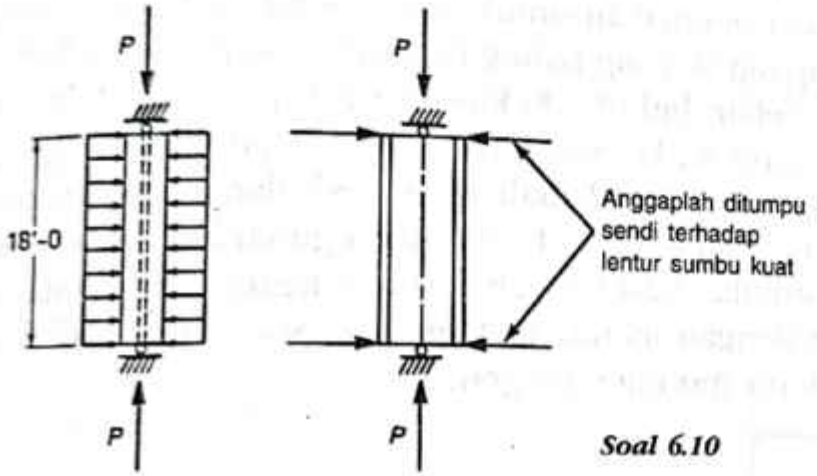
6.6 Pilihlah penampang W yang paling ekonomik untuk memikul beban tekan aksial sebesar 50 kips beban mati dan 100 kips beban hidup. Batang tersebut memiliki $(KL)_x = (KL)_y$ = 18 ft dan menjadi bagian dari sistem tak bergoyang. Asumsikan bahwa biaya relatif dari berbagai baja adalah sebagai berikut: A36, 1.0; A572 Mutu 50 1.14; A572 Mutu 60 1.20.

6.7 Desainlah kembali kolom dari **Soal 6.6** dengan asumsi adanya tumpuan tambahan pada pertengahan arah yang lemah.

6.8 Pilihlah penampang W yang paling ringan untuk memikul beban tekan aksial sebesar 60 kips beban mati dan 250 kips beban hidup. Batang tersebut merupakan bagian dari portal tak goyang dan diasumsikan berupa sendi pada bagian atas dan bawah dari panjangnya yang 30 ft, dan memiliki tambahan tumpuan pada arah yang lemah sejauh 14 ft dari bawah. Gunakan (*a*) baja A36; (*b*) F_y = 50 ksi; (*c*) F_y = 65 ksi.

6.9 Pilih penampang W yang paling ringan untuk memikul beban tekan aksial sebesar 90 kips beban mati dan 320 kips beban hidup. Batang tersebut merupakan bagian dari portal tak goyang. Idealisasi kondisi tumpuannya berupa sendi pada kedua arah utama pada puncak dari tingginya yang 30 ft itu; dan ditumpu pada arah lemah sejauh 14 ft dan 22 ft dari bawah, serta dijepit pada kedua arah utama di bagian bawahnya. Gunakan (*a*) baja A36; (*b*) F_y = 50 ksi; (*c*) F_y = 60 ksi.

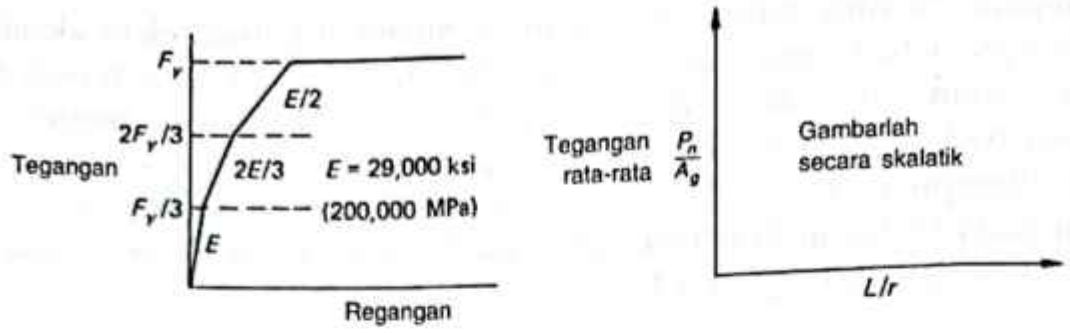
6.10 Pilih penampang W yang paling ringan untuk kolom seperti gambar berikut. Bebannya 30 kips beban mati dan 120 kips beban hidup gaya berat (gravitasi). Batang tersebut menyatu dengan dinding sehingga dapat dianggap tak bergoyang (*braced*) secara menerus pada arah lemahnya. *Perhatikan*: Tidak semua penampang W yang tersedia tercakup dalam AISC Manual Tabel Beban Kolom. Gunakan (*a*) baja A36; (*b*) F_y = 50 ksi; (*c*) F_y = 60 ksi.



Soal 6.10

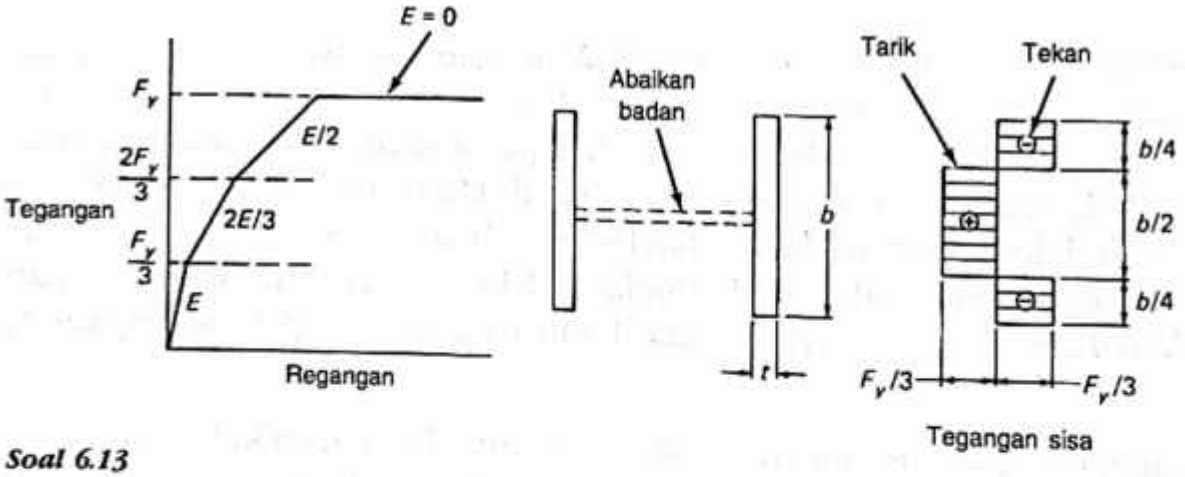
6.11 Desainlah kembali kolom dari **Soal 6.2** dengan asumsi bahwa tidak ada tegangan sisa atau eksentrisitas aksidental sedemikian rupa sehingga kekuatan tekuk kolom dapat dinyatakan oleh persamaan Euler, **6.2.8**, dengan *KL* untuk *L*. Bila desain menggunakan filosofi LRFD, gunakan ϕ_c = 0.85 dan kombinasi faktor beban dalam LRFD-A4.1. Bila digunakan filosofi ASD, gunakan penyebut dari ASD-Formula (E2-1) sebagai Faktor Keamanan. Gunakan F_y = 50 ksi dan perhatikan bahwa F_{cr} tidak dapat melampaui F_y.

6.12 Gunakan teori modulus tangen untuk menghitung hubungan kekuatan kolom (tegangan satuan rata-rata F_{cr} pada luas bruto versus rasio kerampingan *KL*/*r*). Buatlah diagram skalatik dan carilah harga F_{cr} dengan menskala dari diagram Anda. Baja tersebut memiliki F_y = 50 ksi tetapi kurva tegangan-regangan untuk material tersebut seperti dalam gambar berikut ini. Asumsikan tidak ada tegangan sisa. Dengan kurva F_{cr} Anda, pilihlah penampang W yang paling ringan untuk kondisi pembebanan dan tumpuan dari **Soal 6.2**. Bila digunakan filosofi LRFD, pakailah ϕ_c = 0.85 dan gunakan kombinasi beban terfaktor dari LRFD-A4.1. Bila digunakan filosofi ASD, pakailah penyebut dari ASD-Formula (E2-1) sebagai faktor keamanan.



Soal 6.12

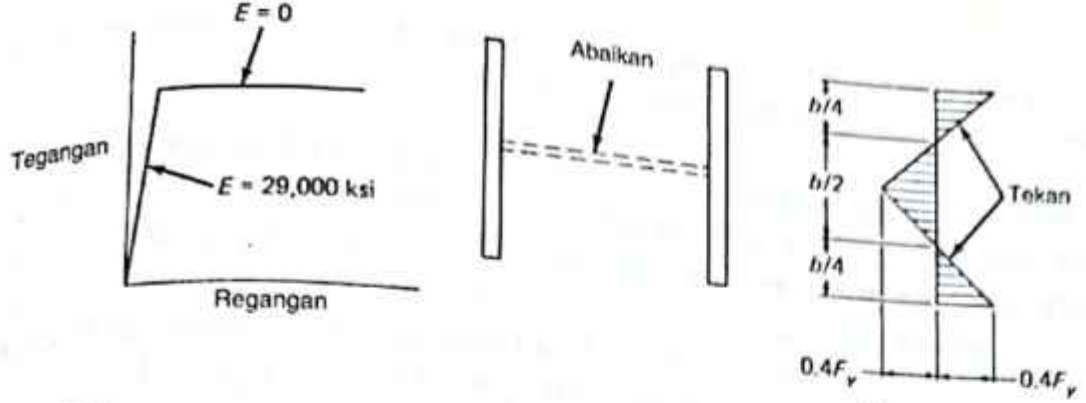
6.13 Dengan teori modulus tangen: (*a*) Gambarlah diagram kekuatan kolom ($F_{cr} = P_n/A_g$ versus KL/r) untuk penampang profil-H. Asumsikan lentur sumbu lemah (KL/r) menentukan dan abaikan efek pelat badan penampang tersebut. Asumsikan pula bahwa hubungan tegangan-regangan yang diidealkan seperti dalam gambar berikut digunakan untuk setiap serat dari penampang lintangnya. (*b*) Pilih penampang W yang paling ringan untuk memikul beban mati sebesar 100 kips dan beban hidup 200 kips dengan panjang efektif KL dari 30 ft. Gunakan kurva yang Anda buat sebagai hubungan antara F_{cr} dan KL/r. Bila digunakan filosofi LRFD, pakailah $\phi_c = 0.85$ dan gunakan pula kombinasi beban terfaktor dalam LRFD-A4.1. Bila Anda gunakan filosofi ASD, pakailah penyebut ASD-Formula (E2-1) sebagai faktor keamanan. Gunakan $F_y = 50$ ksi. (*c*) Selesaikan dengan menggunakan AISC Spesifikasi dan bandingkan hasilnya dengan teori modulus tangen.



Soal 6.13

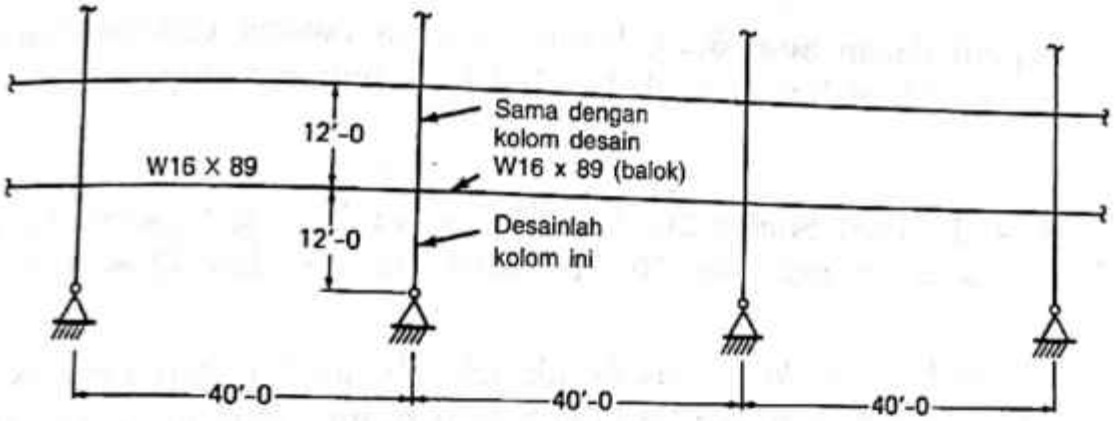
6.14 Ikuti persyaratan yang sama seperti untuk **Soal 6.13** untuk membuat kurva kekuatan kolom. Kali ini distribusi tegangan sisa bervariasi secara linear seperti dalam gambar berikut ini. Untuk (*b*) dan (*c*) gunakan kondisi beban dan tumpuan dari **Soal 6.2**.

6.15 Ulangi **Soal 6.14** kecuali untuk (*b*) dan (*c*) gunakan kondisi beban dan tumpuan dari **Soal 6.13**.



Soal 6.14

6.16 Desainlah sebuah kolom interior (gunakan profil W) untuk sebuah *rigid frame* banyak lantai. Tidak ada *bracing* pada bidang rangka. Pada bidang yang tegak lurus terhadap rangka tersebut, sabukan dipasang di bagian atas, bawah, dan pertengahan tinggi kolom. Digunakan pula sambungan balok-kolom fleksibel yang sederhana. Beban tekan aksialnya adalah sebesar 400 kips beban mati dan 1100 kips beban hidup, sedangkan momen lenturnya diabaikan. Gunakan baja A572 Mutu 50.



Soal 6.16

6.17 Suatu beban tekan aksial yang terdiri dari 100 kips beban mati dan 400 kips beban hidup akan dipikul oleh sebuah kolom yang panjang efektifnya KL = 28 ft. Gunakan baja A36 maupun A572 Mutu 50, pilih yang lebih ekonomik dari keduanya; bila fabrikasi baja A572 membutuhkan biaya 9% per pound lebih mahal ketimbang baja A36. Penuhilah batas-batas lebar/tebal λ_r dari LRFD atau ASD-B5.1.

(*a*) Desainlah penampang W tempa.
(*b*) Desainlah penampang I dilas yang paling ringan dengan menggunakan tiga pelat.
(*c*) Desainlah sebuah kolom ikat dilas (ikatan tunggal) yang terdiri dari empat profil siku.
(*d*) Desainlah sebuah boks dilas dengan pelat solid (tanpa lobang).
(*e*) Desainlah sebuah boks dilas dengan dua pelat berlobang.

6.18 Desainlah seperti **Soal 6.17**, kecuali bahwa beban aksialnya adalah 190 kips beban mati dan 210 kips beban hidup dan KL = 32 ft.

6.19 Hitunglah beban layanan maksimum (25% beban mati dan 75% beban hidup) yang dapat ditanggung oleh sebuah profil T struktural WT12×38 bila digunakan pada sebuah rangka bidang dengan *bracing* menurut bidang rangka tersebut pada setiap interval 20 ft, sedangkan *bracing* transversal bidang rangka terletak pada setiap interval 10 ft. Bila perlu gunakan aturan LRFD atau ASD-Apendiks B. Gunakan (*a*) baja A26; (*b*) F_y = 50 ksi; (*c*) F_y = 60 ksi.

6.20 Pilihlah batang tekan siku ganda yang paling ringan untuk memikul beban 110 kips beban mati dan 130 kips beban hidup. Panjang efektif KL = 20 ft. Asumsikan bahwa punggung-punggung dari profil siku tersebut dipisahkan oleh sebuah pelat buhul setebal $^3/_8$ inch. Tunjukkan orientasi dari kaki profil siku tersebut (yakni kaki yang panjang atau yang pendekkah yang saling beradu punggung). Bila profil siku dipilih untuk ketiga baja, tunjukkan pilihan yang ekonomik bila diketahui biaya relatifnya adalah A36 (1.0), F_y = 50 (1.07); dan F_y = 60 (1.10). Gunakan (*a*) baja A36; (*b*) F_y = 50 ksi; (*c*) F_y = 60 ksi.

6.21 Desainlah seperti dalam **Soal 6.20**, kecuali bahwa batang tersebut harus memikul beban 40 kips beban mati dan 140 kips beban hidup, dan KL = 16 ft.

6.22 Desainlah seperti dalam **Soal 6.20**, kecuali bahwa batang tersebut harus memikul 30 kips beban mati dan 50 kips beban hidup, dan KL = 16 ft.

6.23 Desainlah sebuah batang *chord* atas untuk sebuah rangka atap yang akan memikul 40 kips beban mati dan 80 kips beban hidup, dan 40 kips beban angin yang bekerja secara serentak. Asumsikan bahwa kombinasi pembebanan ini yang menentukan desain. Batang tersebut diberi sabukan pada bidang rangka dengan menyatukan pelat badan pada interval 5 ft. *Chord* tersebut diberi *bracing* pula secara transversal terhadap bidang rangka dengan interval 10 ft. Abaikan lentur yang diakibatkan oleh beban-beban atap. (*Perhatikan*: Hendaknya mengacu pada LRFD-A4.1 atau ASD-A5.2).

(*a*) Desainlah batang siku ganda yang dihubungkan dengan pelat buhu setebal $^1/_2$ inch.

(*b*) Desainlah profil T struktural.

6.24 Pilihlah profil T struktural (WT) yang paling ringan untuk digunakan sebagai batang tekan yang akan memikul 35 kips beban mati dan 100 kips beban hidup. Abaikan pengaruh lentur. Batang tersebut memiliki panjang efektif 9 ft untuk tekuk baik pada bidang x–x maupun y–y. Gunakan (*a*) baja A36; (*b*) F_y = 50 ksi; (*c*) F_y = 65 ksi.

6.25 Pilihlah profil T struktural (WT) yang paling ringan yang akan berfungsi sebagai *chord* tekan suatu rangka yangmemikul 40 kips beban mati dan 45 kips beban hidup. Pada bidang rangka tersebut, *chord* itu diberi *bracing* dengan menyatukan pelat badannya pada setiap interval 5 ft. Sedangkan tegak lurus terhadap bidang rangka itu, *chord* itu disabuki pada interval 10 ft oleh suatu sistem tumpuan lateral gording. Gunakan yang paling ekonomik dari baja A36 atau A572 Mutu 65 bila biaya Mutu 65 adalah 12% lebih mahal ketimbang A36.

6.26 Hitunglah beban tekan aksial layanan yang diijinkan pada sebuah tabung struktural berukuran $10\times10\times{}^1/_4$ dengan panjang efektif KL = 8 ft. Bebannya adalah 60% beban hidup. Gunakan (*a*) baja A36; (*b*) F_y = 60 ksi; (*c*) F_y = 100 ksi.

6.27 Hitunglah beban tekan aksial layanan pada tabung struktural berukuran $12\times8\times{}^1/_4$ yang panjang efektifnya $(KL)_y$ = 7 ft untuk lentur sumbu lemah, dan $(KL)_x$ = 10 ft untuk lentur sumbu kuat. Bebannya 35% beban mati dan 65% beban hidup. Gunakan (*a*) baja A36; (*b*) F_y = 65 ksi; (*c*) F_y = 90 ksi.

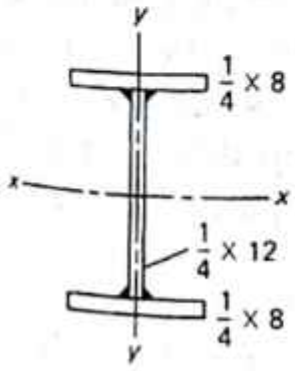
6.28 Desain kembali kolom dari **Soal 6.1**, dan pilihlah tabung struktural sebagai pengganti penampang W.

6.29 Desain kembali kolom dari **Soal 6.6** dan pilihlah tabung struktural sebagai pengganti penampang W.

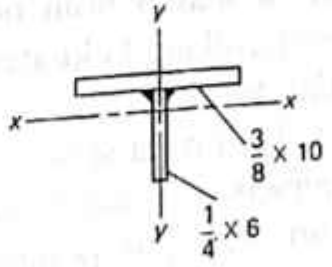
6.30 Desain kembali kolom dari **Soal 6.7** dan pilihlah tabung struktural sebagai pengganti penampang W.

6.31 Hitunglah beban tekan aksial layanan yang diijinkan pada penampang profil I non-standar seperti dalam gambar berikut ini bila bebannya 30% beban mati dan 70% beban hidup. Panjang efektif $(KL)_y$ = 12 ft dan $(KL_x$ = 6 ft. Gunakan (*a*) baja A36; (*b*) F_y = 60 ksi; (*c*) F_y = 100 ksi.

6.32 Ulangi **Soal 6.31** tetapi menggunakan penampang T non-standar dari gambar berikut ini.



Soal 6.31



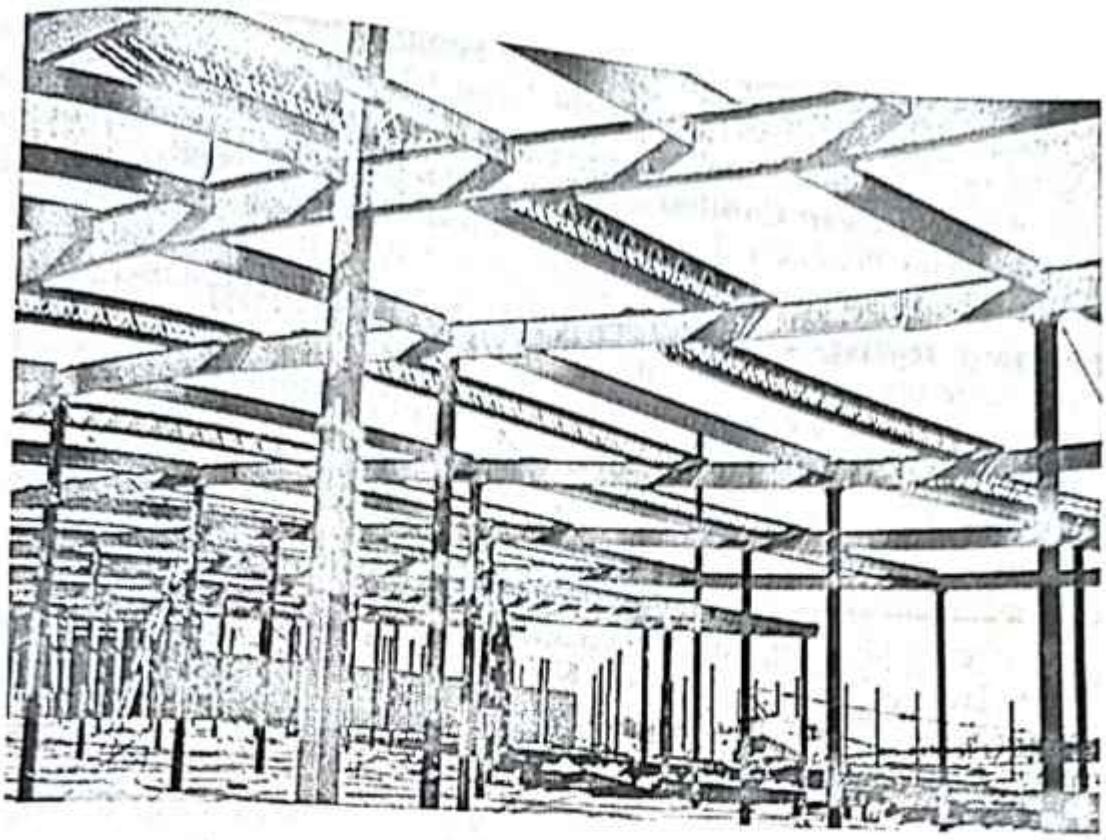
Soal 6.32

7
BALOK DENGAN TUMPUAN LATERAL

7.1 Introduksi

Pada umumnya, balok pada umumnya dipandang sebagai sesuatu batang yang terutama memikul pembebanan gravitasi secara transversal. Istilah pembebanan transversal diambil untuk dapat mencakup momen-momen ujung. Dengan demikian, yang disebut balok pada suatu struktur dapat berarti sebagai gelagar (*girder*), biasanya merupakan balok paling penting yang kerapkali berjarak berjauhan; balok anak (*joist*), biasanya merupakan balok yang kurang penting dan jaraknya berdekatan, kerapkali dengan badan tipe *truss*; gording (*purlin*), yakni balok atap yang membentang di antara kuda-kuda; balok penghubung longitudinal yang membentang di antara balok-balok lantai (*stringer*); balok-balok dinding horisontal yang terutama berfungsi untuk menahan lenturan akibat angin pada sisi bangunan industrial (*girts*), kerapkali mendukung dinding bergelombang; dan balok ambang (*lintel*), batang yang mendukung dinding di atas bukaan jendela atau pintu). Kadangkala digunakan pula istilah-istilah lain seperti *header*, *trimmer*, dan *rafter*, tapi identifikasi balok dengan istilah-istilah ini tidak berlaku umum.

Sebuah balok merupakan kombinasi dari elemen tarik dan tekan. Dalam pembahasan balok, konsep-konsep batang tarik dan tekan kini digunakan bersama-sama. Dalam bab ini, elemen tekan (sebuah flens) yang diberi topangan integral tegak lurus terhadap bidangnya oleh pelat badan yang menghubungkan dengan flens tarik stabil juga diasumsikan sebagai ditopang secara lateral pada arah tegak lurus terhadap bidang badan balok tersebut. Dengan demikian tekuk keseluruhan flens tekan sebagai sebuah kolom tidak dapat terjadi sebelum ia berpartisipasi penuh dalam menghasilkan kekuatan momen penampang tersebut. Walaupun sekilas terlihat sudah tepat bila pada situasi praktis balok cukup diberi topangan secara lateral sedemikian rupa sehingga stabilitas lateralnya tak perlu ditinjau lagi, namun ternyata persentase situasi yang stabil tidak setinggi yang diasumsikan. Dalam **Bab 9** akan dijumpai pembahasan penting mengenai stabilitas lateral. Galambos [7.1] telah mengisahkan sejarah yang menarik mengenai desain balok menurut berbagai edisi Spesifikasi AISC.

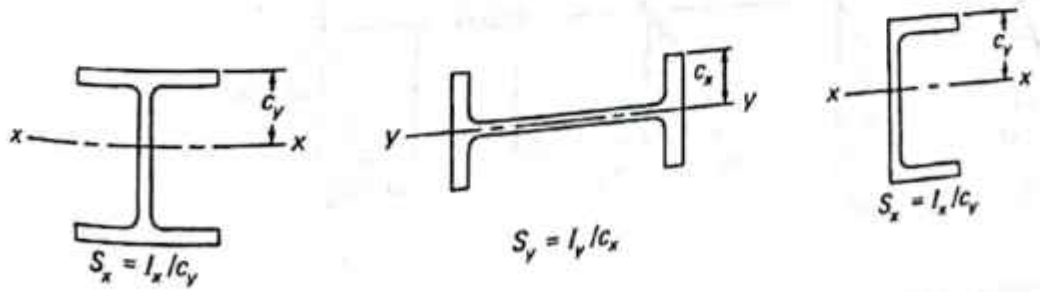


Balok-balok, termasuk balok anak badan terbuka, kanal, dan profil-profil W (wide flange), bersama dengan kolom-kolom tubular (Foto oleh C.G. Salmon)

7.2 Lentur Sederhana pada Profil Simetrik

Pada situasi desain biasa, profil tempaan flens lebar cukup dipilih dari tabel AISC. Kegiatan ini menjadi rutin, dan akibatnya perencana sering terlalu percaya diri dalam menangani balok. Telah diketahui dengan baik bahwa formula lentur ($f = Mc/I$) dapat diterapkan dalam situasi-situasi biasa. Tegangan pada penampang yang umum dari **Gambar 7.2.1** dapat dihitung dengan rumus lentur sederhana bila beban-beban bekerja pada salah satu arah utama. Bila suatu penampang yang paling tidak memiliki satu sumbu simetri dan dibebani melalui pusat gesernya sehingga mengalami momen lentur dalam arah sembarang, komponen M_{xx} dan M_{yy} pada arah utama dapat diperoleh, sehingga tegangannya dihitung sebagai:

$$f = \frac{M_{xx}}{S_x} = \frac{M_{yy}}{S_y} \tag{7.2.1}$$



Gambar 7.2.1

di mana S merupakan *modulus penampang*, yang didefinisikan sebagai momen inersia I dibagi dengan jarak c dari pusat berat ke serat terluar. Subskrip x dan y menunjukkan sumbu terhadap mana momen inersia dihitung dan terhadap mana jarak c diukur (*lihat* **Gambar 7.2.1**). Untuk batang tanpa paling tidak satu sumbu simetri, para Pembaca dianjurkan membuka **Bagian 7.10**

7.3 Perilaku Balok yang Secara Lateral Stabil

Bila balok memiliki stabilitas lateral yang cukup pada flens tekannya, satu-satunya keadaan batas yang mungkin membatasi kekuatan momen adalah tekuk lokal pada tekan flens dan/atau elemen pelat badan yang membentuk penampang lintang balok itu.

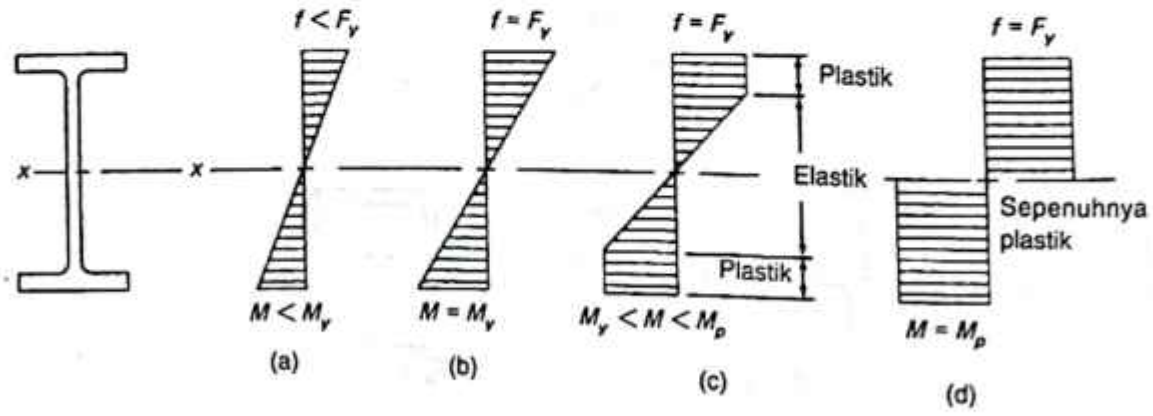
Distribusi tegangan pada profil flens lebat tipikal yang mengalami peningkatan momen lentur diperlihatkan dalam **Gambar 7.3.1**. Pada momen lentur dalam rentang beban layanan, penampang tersebut bersifat elastik seperti dalam **Gambar 7.3.1*a***, dan kondisi elastik akan terjadi sampai tegangan pada serat terluar mencapai tegangan leleh F_y (**Gambar 7.3.1*b***). Bila regangan ϵ mencapai ϵ_y (**Gambar 7.3.2**), peningkatan regangan tidak akan mengakibatkan peningkatan tegangan. Perilaku tegangan-regangan ini merupakan idealisasi yang diterima untuk baja struktural yang memiliki tegangan leleh sekitar F_y = 65 ksi (448 MPa) dan yang kurang dari itu.

Bila tegangan leleh tercapai pada serat terluarnya (**Gambar 7.3.1*b***), kekuatan momen nominalnya M_n disebut sebagai *momen leleh* M_y dan dihitung sebagai:

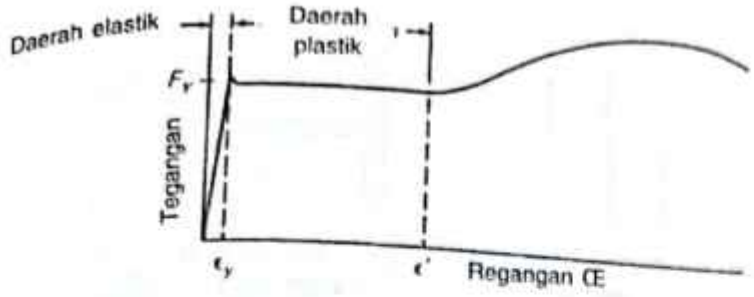
$$M_n = M_y = S_x F_y \tag{7.3.1}$$

Bila kondisi dari **Gambar 7.3.1*d*** tercapai, setiap serat akan memiliki regangan yang sama dengan atau lebih besar dari $\epsilon_y = F_y/E_s$, yang berada dalam rentang plastik. Karenanya, kekuatan momen nominal M_n disebut sebagai *momen plastik* M_p dan dihitung sebagai:

$$M_p = F_y \int_A y \, dA = F_y Z \tag{7.3.2}$$



Gambar 7.3.1 *Distribusi tegangan pada berbagai tahap pembebanan.*



Gambar 7.3.2 Diagram tegangan-regangan bagi kebanyakan baja struktural.

di mana $Z = \int y\, dA$ dapat disebut sebagai *modulus plastik*.

Akan terlihat bahwa rasio M_p/M_y merupakan sifat dari bentuk penampang lintang dan tidak tergantung dari sifat materialnya. Rasio ini disebut sebagai *faktor bentuk* ξ:

$$\xi = \frac{M_p}{M_y} = \frac{Z}{S} \tag{7.3.3}$$

Untuk profil flens lebar (W) dalam lentur terhadap sumbu kuat (x–x), faktor bentuknya berkisar 1.09 sampai sekitar 1.18 dengan harga normalnya sekitar 1.12. Secara konservatif kita dapat mengatakan bahwa kekuatan momen plastik M_p dari penampang W yang melentur terhadap sumbu kuatnya paling tidak akan 10% lebih besar daripada kekuatan M_y ketika serat terluarnya hanya mencapai tegangan leleh F_y.

Prosedur desain telah lama mengetahui bahwa balok memang menunjukkan perilaku yang dibahas di muka. Pengujian secara ekstensif cukup membuktikan bawa plastifikasi keseluruhan penampang lintang benar-benar terjadi [7.2] (dengan asumsi tidak terjadinya tekuk lateral-puntir seperti yang dibahas dalam **Bab 9** dan tekuk lokal seperti dalam bahasan **Bab 6 Bagian II**).

■ Contoh 7.3.1

Tentukan faktor bentuk untuk balok persegi panjang dengan lebar b dan kedalaman d.

Penyelesaian:

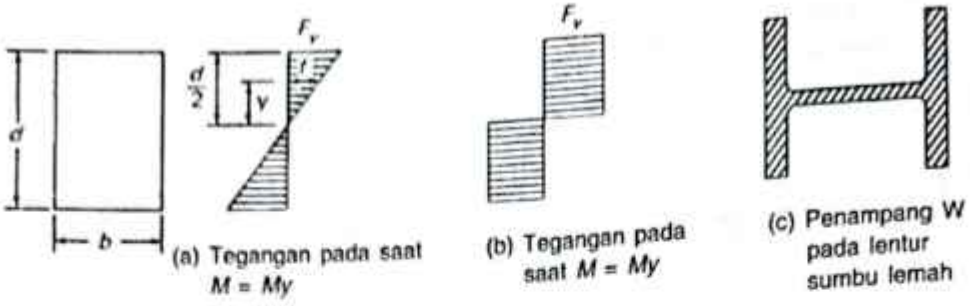
Mengacu pada **Gambar 7.3.3*a***, momen M_y pada leleh pertama adalah:

$$M_y = \int_A fy\, dA$$

dan:

$$f = F_y \frac{y}{d/2} = F_y \frac{2y}{d}$$

$$M_y = 2\int_0^{d/2} \frac{2F_y}{d}\, y^2 b\, dy = F_y \frac{bd^2}{6}$$



Gambar 7.3.3 *Sebuah penampang persegi panjang dan penampang W pada lentur sumbu lemah*

Dari **Gambar 7.3.3*b***:

$$M_p = \int_A fy\, dA = 2\int_0^{d/2} F_y by\, dy = F_y \frac{bd^2}{4}$$

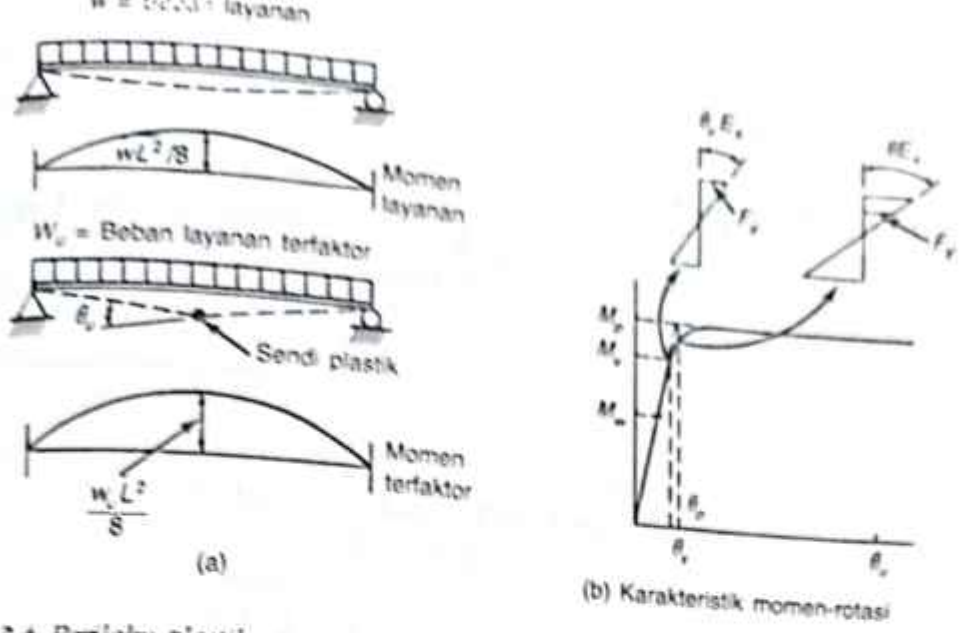
Maka faktor bentuknya adalah:

$$\xi = \frac{M_p}{M_y} = 1.5$$

yang melukiskan bahwa ada cadangan yang lebih besar atas daerah leleh pertama pada penampang persegi panjang yang mengalami lentur terhadap sumbu kuat ketimbang penampang profil I. Para Pembaca hendaknya waspada terhadap fakta bahwa profil W yang melentur terhadap sumbu *lemah* (y—y) pada hakikatnya merupakan suatu penampang persegi panjang (dua persegi panjang yang terpisah dalam jarak tertentu) (**Gambar 7.3.3*c***). ■

Bila kekuatan momen plastik M_p telah tercapai, penampang tersebut tidak dapat memberikan resistansi tambahan terhadap rotasi, dengan berperilaku sebagai sebuah sendi namun dengan resistansi tetap M_p, suatu kondisi yang dikenal sebagai *sendi plastik*. Pada suatu balok statik tertentu, seperti balok dengan tumpuan sederhana, adanya sebuah sendi plastik akan membuat struktur tersebut tidak stabil; sebuah sendi nyata pada masing-masing ujung dan sebuah sendi plastik pada daerah pertengahan bentang akan menciptakan situasi yang tidak stabil, yang disebut sebagai *mekanisme runtuh* (*collapse mechanism*). Secara umum, setiap kombinasi dari tiga sendi, nyata atau plastik, pada suatu bentang akan menghasilkan mekanisme runtuh.

Bila kita lihat lagi **Gambar 7.3.4**, dapat kita perhatikan bahwa sudut rotasi λ (radian/inch) bersifat elastik dari beban layanan M sampai serat terluar mencapai F_y pada M_y. Kemudian mulai bersifat tak elastik parsial hingga tercapainya momen plastik M_p. Setelah terjadi sendi plastik dan kurva M—θ menjadi horisontal, defleksi balok tersebut (rotasi dari penampang lintang yang mengalami plastifiksi) akan meningkat tanpa perlawanan. Pada kondisi runtuh, deformasi elastik akibat lentur pada segmen di antara ujung-ujung dan pertengahan bentang dapat diabaikan bila dibandingkan dengan rotasi θ_u yang terjadi pada sendi plastiknya. Dengan demikian, analisis tersebut dapat memperlakukan situasi runtuh sebagai



Gambar 7.3-4 Perilaku plastik

dua benda tegar (*rigid*) yang memiliki diskontinuitas angular θ_u pada pertengahan bentangnya. Seperti akan terlihat nanti dalam **Bagian 10.2**, hanya pada situasi-situasi statik tertentu saja dapat kita harapkan bahwa setiap titik di sepanjang diagram momen terfaktor akan proporsional terhadap diagram momen elastiknya.

Redistribusi momen yang terjadi selama pembebanan di atas rentang elastik dalam situasi statik tak tentu yang biasa; yakni, diagram momen lentur setelah terjadinya sendi plastik tidak akan lagi proporsional dengan diagram momen lentur elastiknya.

Sebagaimana telah dibahas oleh Yura, Galambos, dan Ravindra [7.3], meskipun balok tersebut memiliki resistansi yang cukup dalam tekuk lateral-puntir (**Bab 9**) dan terhadap tekuk lokal (**Bab 6**, **Bagian II**) untuk mencapai kekuatan momen plastiknya, keadaan batas aktualnya akan tetap runtuh karena tekuk lateral-puntir, tekuk lokal flens tekan, atau pun tekuk lokal badan, dalam rentang plastik. Dengan demikian, pencegahan keruntuhan akibat salah satu dari bentuk ketidakstabilan ini hingga tercapainya rotasi θ_u yang cukup, membutuhkan batasan jarak antara titik-titik tumpuan lateral, batas rasio lebar/tebal flens tekannya, serta batas rasio kedalaman/tebal badannya.

7.4 Balok dengan tumpuan Lateral — Load and Factor Resistance Design

Persyaratan kekuatan untuk balok pada desain faktor beban dan resistansi menurut LRFD-F2 dapat dinyatakan sebagai:

$$\phi_b M_n \geq M_u \tag{7.4.1}$$

di mana ϕ_b = faktor resistansi (yakni reduksi kekuatan) untuk lentur = 0.90

PERPUSTAKAAN D III F. TEKNIK

M_n = kekuatan momen nominal
M_u = momen beban layanan terfaktor (*lihat* **Bagian 1.9**)

7.4.1 Penampang Kompak

Kekuatan nominal M_n untuk "penampang kompak" yang secara lateral stabil menurut LRFD-Apendiks F1 dapat dinyatakan sebagai:

$$M_n = M_p \tag{7.4.2}$$

di mana M_p = kekuatan momen plastik = ZF_y
Z = modulus plastik, **Persamaan 7.3.2**
F_y = tegangan leleh yang ditentukan

Desain harus memperhitungkan fakta bahwa tekuk lokal flens tekan atau tekuk lokal badan dapat terjadi sebelum mencapai regangan tekan yang besar yang diperlukan untuk menimbulkan M_p. Bila batasan lebar/tebal λ_r dari LRFD atau ASD-B5 terpenuhi, tentu M_y akan tercapai (yakni, tekuk lokal pada suatu tegangan di bawah F_y akan dapat dicegah sebagaimana yang dibahas dalam **Bagian 6.16**). Batas λ_r untuk mencegah terjadinya tekuk lokal pada balok diberikan dalam **Tabel 7.4.1**. Hanya serat terluar dijamin mencapai $\in_y = F_y/E_s$. Untuk mendapatkan regangan yang lebih besar, harga b/t (yang oleh LRFD pada umumnya disebut sebagai λ) harus lebih dibatasi. Untuk mengalami regangan plastik yang besar harus dipenuhi pembatasan lebar/tebal λ_p yang lebih ketat seperti yang dibahas dalam **Bagian 6.17** dan yang dianjurkan untuk "penampang kompak", seperti yang diberikan dalam **Tabel 7.4.2**.

7.4.2 penampang Non-Kompak

Kekuatan nominal M_n untuk "penampang non-kompak" yang secara lateral stabil yang rasio lebar/tebalnya λ *benar-benar sama* dengan batas λ_r dari LRFD-Tabel B5.1 adalah kekuatan momen yang tersedia bila serat terluarnya berada pada tegangan leleh F_y. Karena adanya tegangan sisa, kekuatannya dinyatakan sebagai:

$$M_n = M_r = (F_y - F_r)\,S \tag{7.4.3}$$

di mana M_r merupakan "momen sisa" yang akan menyebabkan tegangan serat terluarnya meningkat dari harga tegangan sisanya F_r bila tidak ada beban luar yang bekerja hingga tegangan leleh F_y. Modulus penampang elastik S sama dengan momen inersia I dibagi dengan jarak c dari sumbu netral ke serat terluarnya.

7.4.3 Penampang Kompak Sebagian

Kekuatan nominal M_n untuk "penampang non-kompak" yang secara lateral sta-

bil yang rasio lebar/tebal λ-nya kurang dari λ_r namun tidak serendah λ_p harus diinterpolasi secara linear di antara M_p dan M_r sebagai berikut menurut LRFd-Apendiks F1-7:

$$M_n = M_p - (M_p - M_r)\left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}\right) \leq M_p \qquad (7.4.4)$$

Tabel 7.4.1 Batas lebar/tebal λ_r untuk balok-balok dengan "penampang non-kompak" untuk mencapai F_y pada serat terluar (LRFD-B5.1)

Tegangan leleh Fy (ksi)	Flens (Tanpa pengaku) profil I tempa $\frac{b_f}{2t_f} = \frac{141}{\sqrt{F_y - 10}}$	Flens (Tanpa pengaku) profil I las $\frac{b_f}{2t_f} = \frac{106}{\sqrt{F_y - 16.5}}$	Flens (Dengan pengaku) tabung tempa $\frac{b_f}{2t_f} = \frac{238}{\sqrt{F_y - 10}}$	Flens (Dengan pengaku) boks las $\frac{b_f}{t_f} = \frac{238}{\sqrt{F_y - 16.5}}$	Badan $\frac{h_c}{t_w} = \frac{970}{\sqrt{F_y}}$
36	27.7	24.0	46.7	53.9	161.7
42	24.9	21.0	42.1	47.1	149.7
45	23.8	19.9	40.2	44.6	144.6
50	22.3	18.3	37.6	41.1	137.2
55	21.0	17.1	35.5	38.4	130.8
60	19.9	16.1	33.7	36.1	125.2
65	19.0	15.2	32.1	34.2	120.3
90	15.8	12.4	26.6	27.8	102.2
100	14.9	11.6	25.1	26.0	97.0

di mana λ = $b_f/2t_f$ untuk flens batang profil I
= h_c/t_w untuk badan balok

b_f = lebar flens

t_f = tebal flens

h_c = tinggi pelat badan tanpa tumpuan (didefinisikan dalam LRFD-B5.1 sebagai "dua kali jarak dari sumbu netral ke sisi dalam flens tekan dikurangi radius *fillet* atau radius sudut")
= $d - 2k$ ditambah sediaan untuk *fillet* dalam yang berukuran lebih kecil pada flens tekan (sekitar $^1/_4$ inch) untuk penampang profil I tempa. Untuk keperluan praktis pada penampang tempaan, harga tabulasi h_c/t_w harus digunakan karena ukuran *fillet* minimum ini belum tersedia langsung.

t_w = tebal badan

λ_r = **Tabel 7.4.1** (LRFD dan ASD-Tabel B5.1)

λ_p = **Tabel 7.4.2** (LRFD dan ASD-Tabel B5.1)

Para Pembaca dapat memperhatikan bahwa ekspresi λ_r untuk flens tanpa pengaku yang diberikan dalam **Tabel 7.4.1** berbeda dari $95/\sqrt{F_y}$ yang diturunkan untuk tekan merata dalam **Bagian 6.16**. Perbedaan ini terjadi karena flens tersebut sebenarnya tidak tertekan secara merata, dan pada penampang I las maupun tempa

Tabel 7.4.2 Batas lebar/tebal λ_p untuk balok "penampang kompak"* untuk mencapai regangan plastik yang signifikan (LRFD dan ASD-B5)

F_y (ksi)	Elemen-elemen tanpa pengaku (Tekan merata) $\frac{b_f}{2t_f} \le \frac{65}{\sqrt{F_y}}$	Elemen-elemen dengan pengaku (Tekan merata) $\frac{b}{t_f} \le \frac{190}{\sqrt{F_y}}$	Elemen-elemen dengan pengaku (Lentur) $\frac{h_c}{t_w} \le \frac{640}{\sqrt{F_y}}$
36	10.8	31.7	107.
42	10.0	29.3	98.8
45	9.7	28.3	95.4
50	9.2	26.9	90.5
55	8.8	25.6	86.3
60	8.4	24.5	82.6
65	8.1	23.6	97.4

*Analisis plastic dibatasi oleh LRFD-A5 dan ASD-F1.1 sampai pada baja yang memiliki $F_y \le 65$ ksi (450 MPa)

terdapat tegangan sisa (diasumsikan sebesar 10 ksi untuk penampang tempa dan 16.5 ksi untuk penampang las). Batas h_c/t_w untuk pelat badannya timbul dari tekuk pelat dengan pengaku di bawah tegangan yang berubah-ubah secara linear (tegangan momen lentur), suatu kasus yang tidak tercakup dalam **Bagian 6.16**.

7.4.4 Penampang Ramping

Bila rasio lebar/tebal λ melampaui batas λ_r dari LRFD-B5.3, penampang tersebut disebut sebagai "ramping" dan harus diperlakukan menurut LRFD-Apendiks B.

■ Contoh 7.4.1

Pilihlah penampang M atau W yang paling ringan untuk memikul suatu beban mati yang terdistribusi merata sebesar 0.2 kips/ft (yakni sebagai tambahan berat baloknya) dan beban hidup sebesar 0.8 kip/ft. Bentangan tumpuan sederhana itu (**Gambar 7.4.1**) panjangnya 20 ft. Flens tekan baloknya ditahan sepenuhnya terhadap pergerakan lateral. Gunakan *Load and Resistance Factor Design*, dan pilihlah baja berikut ini: A36; A572 Mutu 50; dan A572 Mutu 65.

Penyelesaian:

(a) Hitunglah beban terfaktor M_u:

$$w_u = 1.2w_D = 1.6w_L = 1.2(0.2) + 1.6(0.8) = 1.52 \text{ kips/ft}$$

$$M_u = w_u L^2/8 = 1.52(20)^2/8 = 76 \text{ ft–kips} \quad \text{(tidak termasuk berat balok)}$$

(b) Baja A36. Asumsikan "penampang kompak" karena sebagian besar penampang tempa memenuhi $\lambda \le \lambda_p$ baik untuk flens maupun badan. Kekuatan desain $\phi_b M_n$-nya adalah:

$$\phi_b M_n = \phi_b M_p = \phi_b Z_x F_y$$

persyaratan desainnya adalah:

$$\phi_b M_n \text{ yang diminta} = M_u$$

$$Z_x \text{ yang diminta} = \frac{M_u}{\phi_b F_y} = \frac{76(12)}{0.90(36)} = 28.1 \text{ inch}^3$$

Pilih dari tabel LRFD "LOAD FACTOR DESIGN SELECTION TABLE":

Coba W12×22: $Z_x = 29.3$ inch^3

Cek batas "penampang kompak" λ_p (**Tabel 7.4.2**):

$$\left(\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{4.03}{2(0.425)} = 4.7\right) < \left(\lambda_p = \frac{65}{\sqrt{F_y}} = 10.8\right) \quad \text{OK}$$

$$\left(\lambda = \frac{h_c}{t_w} = 41.8\right) < \left(\lambda_p = \frac{640}{\sqrt{F_y}} = 107\right) \quad \text{OK}$$

Perhatikan bahwa harga h_c/t_w yang digunakan adalah yang ditabulasikan dalam LRFD-Manual. Bila dihitung sebagai $(d - 2k$ + radius sebesar $0.25)/t_w$, diperoleh $h_c/t_w = 41.6$. Maka dari itu dianjurkan menggunakan harga h_c/t_w Manual LRFD.

Cek kekuatan: Koreksilah momen terfaktor M_u untuk mencakup berat balok:

$$w_u = 1.2(0.222) + 1.6(0.8) = 1.55 \text{ kips/ft}$$

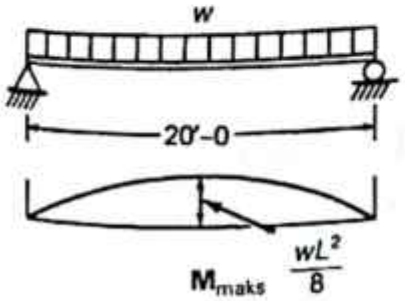
$$M_u = 76(1.55/1.52) = 77.3 \text{ ft-kips}$$

$$M_n = M_p \; Z_x F_y = 29.3(36)/12 = 87.9 \text{ ft-kips}$$

$$\phi_b M_n = \phi_b(87.9) = 0.90(87.9) = 79.1 \text{ ft-kips} > M_u \quad \text{OK}$$

Gunakan W12×22, $F_y = 36$ ksi.

(c) Baja A572 Mutu 50.



Gambar 7.4.1 *Contoh 7.4.1*

$$Z_x \text{ yang diminta} = \frac{M_u}{\phi_b F_y} = \frac{76(12)}{0.90(50)} = 20.3 \text{ inch}^3$$

Pilih dari tabel LRFD "LOAD FACTOR DESGIN SELECTION TABLE Z_x":

Coba M14×18: $Z_x = 24.9^{*} \text{ inch}^3$

Cek batas "penampang kompak" λ_p (**Tabel 7.4.2**):

$$\lambda_{\text{flens}} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{4.00}{2(0.270)} = 7.4 < 9.2 \qquad \text{OK}$$

$$\lambda_{\text{badan}} = \frac{h_c}{t_w} = 60.3 < 90.5 \qquad \text{OK}$$

Cek kekuatannya:

$$M_u = 76(1.54/1.52) = 77.1 \text{ ft–kips}$$
$$M_n = M_p = Z_x F_y = 24.9(50)/12 = 104 \text{ ft–kips}$$
$$\phi_b M_n = \phi_b(104) = 0.90(104)\ 93.4 \text{ ft–kips} > M_u \qquad \text{OK}$$

Penampang tersebut secara signifikan memang lebih kuat dari yang dibutuhkan, tetapi juga merupakan penampang yang paling ringan dan memiliki M_n yang diminta.

Gunakan M14×18, F_y = 50 ksi.

(d) Baja A572 Mutu 65.

$$Z_x \text{ yang diminta} = \frac{M_u}{\phi_b F_y} = \frac{76(12)}{0.90(65)} = 15.6 \text{ inch}^3$$

Pilih dari tabel LRFD "LOAD FACTOR DESIGN SELECTION TABLE":

Coba W12×14: Z_x 17.4 inch^3

Cek batas "penampang kompak" λ_p (**Tabel 7.4.2**):

$$\lambda_{\text{flens}} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{3.97}{2(0.225)} = 8.8 > 8.1 \qquad \text{NG}$$

$$\lambda_{\text{badan}} = \frac{h_c}{t_w} = 54.3 < 79.4 \qquad \text{OK}$$

Dalam hal ini, keadaan batas yang menentukan adalah tekuk lokal dari flensnya. Bila $\lambda_r > \lambda > \lambda_p$ seperti di atas, penampang tersebut diklasifikasikan sebagai "non-kompak".

Cek kekuatan. Kekuatan diperoleh dengan interpolasi antara M_p dan M_r de-ngan **Persamaan 7.4.4**. Pertama-tama, λ_r untuk flens harus diperoleh (dari **Tabel 7.4.1**) sebesar 19.0 yang melampaui $b_f/2t_f$ sebesar 8.8 dan penampangnya ter-masuk "nonkompak":

$$\lambda_r = \left(\frac{141}{\sqrt{F_y - 10}} = 19.0\right)$$

$$M_n = M_p - (M_p - M_r)\left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}\right) \leq M_p \qquad [7.4.4]$$

Kemudian dibutuhkan M_p dan M_r:

$$M_p = Z_x F_y = 17.4(65)/12 = 94.2 \text{ ft–kips}$$

$$M_r = S_x(F_y - F_r) = 14.9(65 - 10)/12 = 68.3 \text{ ft–kips}$$

Kemudian dari **Persamaan 7.4.4**:

$$M_n = 94.2 - (94.2 - 68.3)\left(\frac{8.8 - 8.1}{19.0 - 8.1}\right) = 92.5 \text{ ft–kips}$$

yang merupakan 0.98 M_p. Bila sebagai tambahan pelat badan juga memiliki $\lambda_r > \lambda > \lambda_p$, M_n juga harus dihitung dari **Persamaan 7.4.4** dengan menggunakan harga λ, λ_r, dan λ_p untuk pelat badan tersebut. Kekuatan yang rendah berkaitan dengan tekuk lokal flens dan tekuk lokal badan akan menjadi harga yang tepat untuk M_n. Bila pengecekan dilanjutkan:

$$M_u = 76(1.54/1.52) = 77.1 \text{ ft–kips}$$

$$M_n = 92.5 \text{ ft–kips}$$

$$\phi_b M_n = \phi_b(92.5) = 0.90(92.5) = 83.3 \text{ ft–kips} > M_u \quad \text{OK}$$

■

Gunakan W12×14, $F_y = 65$ ksi.

7.5 Balok dengan tumpuan Lateral — Allowable Stress Design

Menurut filosofi *Allowable Stress Design* yang dibicarakan dalam **Bagian 1.8** dan

1.9. **Persamaan 1.8.8** memberikan persyaratan keamanan struktural sebagai berikut:

$$\frac{\phi M_n}{\gamma} \geq \Sigma Q_i \qquad [1.8.8]$$

yang dapat dinyatakan sebagai:

$$\left(\frac{M_n}{\gamma/\phi} = \frac{M_n}{\text{FS}}\right) \geq M \qquad (7.5.1)$$

di mana M_n = kekuatan momen nominal
γ/ϕ = faktor kelebihan beban dibagi dengan faktor kurangnya kekuatan
FS = 1.67 = faktor keamanan nominal pada desain balok
M = momen lentur beban layanan

Untuk memperoleh **Persamaan 7.5.1** dalam format "tegangan", bagilah kedua sisi tersebut dengan modulus penampang S, sehingga menjadi:

$$\left(f_b = \frac{M}{S}\right) \leq \left(F_b = \frac{M_n}{(FS)\ S}\right) \qquad (7.5.2)$$

7.5.1 Penampang Kompak

Seperti yang dibicarakan dalam **Bagian 7.3** dan **7.4**, kekuatan nominal dari penampang sedemikian adalah kekuatan momen plastik M_p. **Persamaan 7.3.2** dan **7.3.3** menunjukkan bahwa M_p dapat dinyatakan dalam bentuk faktor bentuk ξ sebagai berikut:

$$M_p = ZF_y = \xi SF_y \qquad (7.5.3)$$

Untuk menghitung dan membandingkan tegangan, suatu harga faktor bentuk ξ harus dipilih bila dalam kenyataan setiap penampang tempa memiliki harga yang berlainan. Untuk lentur sumbu kuat dari penampang profil I, dipilih harga sebesar 1,10. Substitusi **Persamaan 7.5.3** dengan ξ = 1.10 ke dalam F_b pada ruas kanan dari **Persamaan 7.5.2** dan dengan menggunakan FS = 1.67 akan memberikan tegangan ijin F_b.

1. *Untuk penampang profil I, lentur terhadap sumbu x–x adalah:*

$$F_b = \frac{\xi SF_y}{(FS)S} = \frac{1.10S_xF_y}{(1.67)S_x} = 0.66F_y \qquad (7.5.4)$$

Supaya penampang dapat memenuhi kualifikasi "kompak", rasio lebar/tebal untuk

flens dan badan tidak boleh melebihi batas "kompak" dari ASD-Tabel B5.1 (harga λ_p dari **Tabel 7.4.2**).

2. *Untuk penampang profil I, lentur terhadap sumbu y-y adalah*

$$F_b = 0.75F_y \tag{7.5.5}$$

Untuk lentur terhadap sumbu lemah, faktor bentuk ξ-nya adalah 1.5 untuk penampang persegi panjang seperti dalam **Contoh 7.3.1**. Supaya tegangan beban layanan tidak mendekati tegangan leleh, tegangan ijin F_b untuk penampang sedemikian diijinkan lebih besar daripada 0.66 F_y namun tidak sebanding dengan faktor bentuknya. Hanya flensnya saja yang perlu memenuhi batas "kompak" dari **Tabel 7.4.2**.

7.5.2 Penampang Non-kompak

Bila rasio lebar/tebal melampaui batas "kompak" (dalam LRFD disebut sebagai batas λ_p) dari ASD-Tabel B5.1 namun tidak melampaui batas "non-kompak" dari tabel tersebut, kekuatan nominalnya tidak akan mencapai M_p. Seperti yang dikemukakan dalam **Bagian 6.16**, batas "non-kompak" dari ASD-Tabel 5.1 dimaksudkan untuk menjamin penampang tersebut mencapai tegangan leleh F_y pada serat terluar. Dengan demikian, bila batas "non-kompak" dari ASD-Tabel B5.1 (yang dalam **Bagian 7.4** disebut sebagai batas λ_r) *benar-benar terpenuhi*, kekuatan nominal M_n-nya adalah momen leleh M_y. Tegangan ijin F_b dari **Persamaan 7.5.2** menjadi:

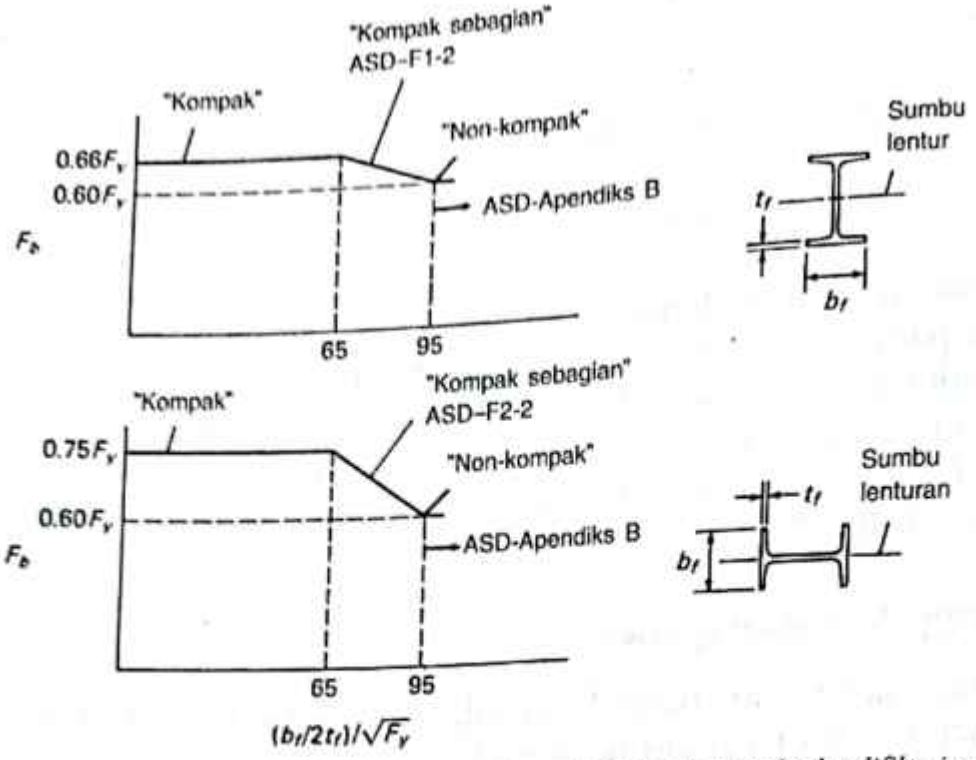
$$F_b = \frac{SF_y}{(FS)S} = \frac{F_y}{1.67} = 0.60F_y \tag{7.5.6}$$

7.5.3 Penampang Kompak Sebagian

Bila rasio lebar/tebal melampaui batas "kompak" namun kurang dari batas "non-kompak" dari ASD-Tabel B5.1, kekuatannya terletak di antara M_y dan M_p; maka dari itu, desainer dapat melakukan interpolasi linear di antara batas tersebut. Perhatikan bahwa batas "non-kompak" dari ASD-Tabel 5.1 (*lihat* **Tabel 6.16.1**) sedikit lebih konservatif (yakni lebih rendah) ketimbang batas λ_r dari LRFD-Tabel B5.1, meskipun maksudnya sama saja. Hubungan tegangan ijin ditunjukkan dalam **Gambar 7.5.1**.

7.5.4 Penampang Ramping

Bila rasio lebar/tebal melampaui batas "non-kompak" dari ASD-Tabel B5.1, penampang tersebut disebut sebagai "ramping" dan harus diperlakukan menurut ASD-Apendiks B.



Gambar 7.5.1 *Tegangan ijin pada penampang profil H dan I yang berkualifikasi sebagai "penampang kompak" kecuali untuk rasio lebar/tebal yang berlebihan pada elemen flens tekan tanpa pengaku.*

■ Contoh 7.5.1

Desainlah kembali balok dari **Contoh 7.4.1** dengan menggunakan *Allowable Stress Design* dengan baja A36.

Penyelesaian:

(*a*) Baja A36. Asumsikan "penampang kompak" karena hampir semua penampang memenuhi batas lebar/tebal λ_p; dengan demikian, tegangan ijin F_b akan menjadi:

$$F_b = 0.66F_y$$

Perhatikan bahwa harga yang dibulatkan (yakni 0.66 kali 36 = 23.8 ksi; gunakan 24 ksi) merupakan harga yang diterima menurut ASD -"NUMERICAL VALUES" TABEL 1. Momen lentur beban layanan yang dijumlahkan (1 kip/ft) adalah:

$$M = wL^2/8 = 1.0(20)^2/8 = 50 \text{ ft–kips}$$

$$S_x \text{ yang diminta} = \frac{M}{F_b} = \frac{50(12)}{24} = 25 \text{ inch}^3$$

Pilihlah dari ASD Manual "ALLOWABLE STRESS DESIGN SELECTION TABLE", penampang teringan yang memiliki minimum $S_x = 25$ inch^3:

$$\text{Coba W12×22;} \quad S_x = 25.4 \text{ inch}^3$$

Cek batas "kompak" (λ_p) dari ASD-Tabel B5.1:

$$\frac{b_f}{2t_f} = \frac{4.03}{2(0.425)} = 4.7 < 10.8 \quad \textbf{(Tabel 7.4.2)} \qquad \text{OK}$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{12.31}{0.260} = 47.3 < 107 \quad \textbf{(Tabel 7.4.2)} \qquad \text{OK}$$

Perhatikan bahwa ASD menggunakan kedalaman keseluruhan d sedangkan LRFD menggunakan tinggi tanpa pendukung b_e dari badan balok meskipun nilai batasnya sama.

Ceklah tegangan lentur:

$$M = 1.022(20)^2/8 = 51.1 \text{ ft–kips} \quad \text{(termasuk berat balok)}$$

$$f_b = \frac{M}{S_x} = \frac{51.1(12)}{25.4} = 24.1 \text{ ksi} \approx [F_b = 24 \text{ ksi}] \quad \text{katakan OK}$$

Gunakan W12×22, $F_y = 36$ ksi. ■

7.6 Defleksi

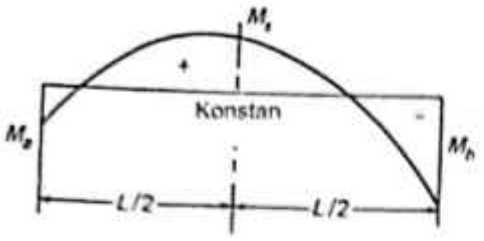
Bila balok digunakan pada bentang panjang (yakni rasio panjang bentang terhadap kedalaman penampang menjadi besar) atau digunakan penampang yang lebih dangkal dari baja berkekuatan tinggi, batasan defleksi sering akan menentukan desainnya.

Defleksi suatu lantai atau atap yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan terhadap elemen-elemen non struktural yang ditempelkan seperti partisi, dapat merusak kegunaan struktur, misalnya dengan mengubah kusen pintu sehingga tidak dapat dibuka atau ditutup, atau menyebabkan lantai "bergelombang". Ini semua merupakan *persyaratan daya layanan* yang tak ada kaitannya sama sekali dengan *kekuatan* sistem lantainya.

Komite Ad Hoc ASCE telah membuat penilaian yang bagus mengenai daya layanan struktur [7.34], sedangkan Galambos dan Ellingwood [7.4] telah membahas keadaan batas-keadaan batas daya layanan secara umum; Ellingwood [7.44] telah memberikan petunjuk umum untuk struktur baja. Defleksi yang berlebihan juga merupakan petunjuk dari kemungkinan terjadinya permasalahan vibrasi dan transmisi *noise*. Wright dan Walker [7.6], Murray [7.7, 7.8], dan Ellingwood dan Tallin [7.5] telah membahas vibrasi sistem lantai dan kaitan respon manusianya.

Pada atap, permasalahan yang berkaitan dengan defleksi adalah kubangan air; hal ini akan dibahas secara khusus kelak dalam bagian ini pula.

Banyak sekali metode analisis struktural yang telah tersedia untuk menghitung defleksi pada penampang dengan momen inersia merata atau variabel pada struk-



Gambar 7.6.1 *Diagram momen lentur tipikal untuk balok dengan beban merata*

tur statik tertentu maupun tak tertentu. Defleksi dari balok berjenjang telah dibahas oleh Yamamoto [7.4]. Secara umum, defleksi maksimum pada suatu batang elastik dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta_{\text{maks}} = \beta_1 \frac{WL^3}{EI} \tag{7.6.1}$$

di mana W = beban *layanan* total pada bentangan itu
L = panjang bentang
E = modulus elastisitas (29,000 ksi atau 200,000 MPa untuk baja)
I = momen inersia
β_1 = koefisien yang tergantung pada derajat kekangan tumpuan, variasi dalam momen inersia di sepanjang bentangan, dan distribusi pembebanan. (Untuk balok dengan tumpuan sederhana, β_1 = 5/384; harga lain tersedia dalam LRFD atau ASD-Manual pada bagian "BEAM DIAGRAMS AND FORMULAS")

Untuk balok menerus, defleksi pertengahan bentang pada situasi biasa dari suatu pembebanan merata pada batang prismatik dengan momen-momen ujung yang tidak sama (*lihat* **Gambar 7.6.1**) dapat dinyatakan* sebagai:

$$\Delta_{\text{pertengahan bentang}} = \frac{5L^2}{48EI} [M_s - 0.1 (M_a + M_b)] \tag{7.6.2}$$

Persamaan 7.6.2 akan memberikan hasil-hasil yang memuaskan bila dianggap sebagai defleksi maksimum untuk hampir semua pembebanan praktis untuk balok yang memiliki momen inersia merata. **Persamaan 7.6.2** dapat dibuktikan dengan menggunakan suatu metode seperti metode balok konjugasi.

Untuk balok dengan tumpuan sederhana yang dibebani secara merata, **Persamaan 7.6.1** menjadi:

*Lihat Chu Kia Wang dan Charles G. Salmon, *Reinforced Concrete Design*, edisi ke-4, (Harper & Row, Publishers, New York, 1985), p. 490)

$$\Delta_{maks} = \frac{5wl^4}{384EI} \qquad (7.6.3)$$

yang dengan substitusi $M = wl^2/8$, $f = Mc/I$, dan $c = d/2$, memberikan:

$$\Delta_{maks} = \frac{10fl^2}{48Ed} \qquad (7.6.4)$$

Persamaan 7.6.4 dapat digunakan sebagai pendekatan yang bagus bagi setiap balok dengan tumpuan sederhana sejauh tegangan maksimumnya terletak di dekat pertengahan bentang. Lihatlah kembali **Gambar 7.6.1** untuk harga yang tipikal.

Tabel 7.6.1 Hubungan defleksi menurut **Persamaan 7.6.4**

Δ_{maks}	L/d	L/d (f = 22 ksi)	L/d (f = 30 ksi)
$L/360$	$387/f$	17.6	12.9
$L/300$	$464/f$	21.1	15.5
$L/240$	$580/f$	26.3	19.3
$L/200$	$695/f$	31.6	23.2

ASD-L3.1 menyatakan, "Balok dan gelagar yang mendukung lantai dan atap hendaknya sebanding dengan defleksi yang diakibatkan oleh beban-beban desain". Tambahan pula, defleksi beban hidup di mana langit-langit plester ditumpu dibatasi sampai $L/360$.

Untuk pembatasan $L/360$, **Persamaan 7.6.4**, dengan E = 29,000 ksi menjadi:

$$\frac{L}{d} \le \frac{48(29{,}000)}{(10)360f} = \frac{387}{f} \qquad (7.6.5)^*$$

Di lain pihak, lRFD-L3 berisi pernyataan yang lebih umum, "Deformasi pada batang struktural dan sistem struktural akibat beban layanan tidak boleh merusakkan daya layanan struktur tersebut". Lebih jauh lagi, LRFD-L mengatakan bahwa harga pembatas untuk menjamin daya layanan, "sebaiknya dipilih berdasarkan fungsi penggunaan struktur tersebut".

Pada pembahasan defleksi, perlu diingat bahwa defleksi beban mati biasanya dapat diperhitungkan selama konstruksinya dengan pelengkungan ke atas (lentur negatif) atau penebalan slab atau lapisan lantai. Hanya defleksi yang terjadi akibat beban-beban yang bekerja setelah konstruksi selesai saja yang dapat merebak-takkan langit-langit, partisi, atau dinding.

*Untuk SI: $\frac{L}{d} = \frac{2667}{f}$ Untuk f dalam MPa (7.6.5)

Persyaratan spesifikasi untuk membatasi defleksi adalah kurang terinci karena tidak ada harga tunggal atau standar bagi defleksi yang dapat ditoleransi. Besarnya defleksi yang dapat diterima tergantung pada tipe dan susunan material yang didukung.

Sekedar sebagai petunjuk saja, ASD-Komentar L3.1 menyarankan pembatasan sebagai berikut:

Untuk balok dan gelagar yang mendapat tegangan penuh:

$$\frac{L}{d} \leq \frac{800}{F_y, \text{ ksi}} \tag{7.6.6}$$

Untuk balok dan gelagar lantai, yang mengalami beban kejut (*shock*) atau beban bergetar, yang mendukung bidang-bidang terbuka yang luas bebas partisi atau sumber redaman lainnya:

$$\frac{L}{d} \leq 20 \tag{7.6.7}$$

Gording atap dengan tegangan penuh, kecuali atap datar:

$$\frac{L}{d} \leq \frac{1000}{F_y, \text{ ksi}} \tag{7.6.8}$$

Dengan mengasumsikan tegangan beban layanan f sama dengan tegangan ijin ASD $0.66F_y$ untuk "penampang kompak", ASD-Komentar menganjurkan koefisien sebesar 800 sampai 1000 masing-masing bersesuaian dengan harga L/d sebesar $528/f$ dan $660/f$. Dengan menggunakan harga L/d dalam **Persamaan 7.6.4** akan memberikan harga batas untuk balok dengan tumpuan sederhana sebesar $L/260$ dan $L/210$.

Tentu saja, pada bentang menerus defleksi aktual yang lebih penting, dan bukan rasio L/d. Untuk defleksi balok menerus, perbandingan dari **Persamaan 7.6.2** dengan **7.6.4** menunjukkan bahwa **Persamaan 7.6.4** dapat pula digunakan untuk balok menerus bila tegangan f-nya dihitung dengan menggunakan momen lentur ekuivalennya:

$$M_e = M_s - 0.1(M_a + M_b) \tag{7.6.9}$$

■ Contoh 7.6.1

Pilihlah penampang W yang paling ringan untuk memikul suatu beban mati merata sebesar 0.5 kip/ft dan beban hidup sebesar 1.0 kip/ft pada bentang dengan tumpuan sederhana sepanjang 42 ft. Disediakan tumpuan lateral yang cukup. Defleksi beban hidupnya terbatas pada $L/360$. Gunakan baja A572 Mutu 50 dan *Load and Resistance Factor Design*.

Penyelesaian:

(a) Hitunglah momen terfaktor M_u. Estimasi berat beban pada 70 lb/ft:

$$w_u = 1.2w_D + 1.6w_L$$

$$= 1.2(0.5 + 0.07 \text{ est}) + 1.6(1.0) = 2.28 \text{ kips/ft}$$

$$M_u = w_u L^2/8 = 2.28(42)^2/8 = 504 \text{ ft–kips}$$

(b) Hitunglah modulus plastik Z_x yang diperlukan untuk memenuhi persyaratan keamanan. Dengan asumsi penampangnya kompak, kekuatan desainnya $\phi_b M_b$ adalah:

$$\phi_b M_n = \phi_b M_p = \phi_b Z_x F_y$$

$$Z_x \text{ yang diminta} = \frac{M_u}{\phi_b F_y} = \frac{504(12)}{0.90(50)} = 134 \text{ inch}^3$$

Pilihlah dari tabel LRFD "LOAD FACTOR DESIGN SELECTION TABLE":

Coba W24×55: $Z_x = 134 \text{ inch}^4$

Penampang tersebut kompak untuk $F_y = 50$ ksi.

(c) Hitunglah momen inersia I_x yang dibutuhkan untuk memenuhi batas defleksi. Momen beban layanan harus digunakan untuk menggantikan momen terfaktor karena di sini defleksinya diperhitungkan pada saat struktur digunakan, dan bukan pada saat menjelang terjadinya kegagalan.

$$M = wL^2/8 = 1.0(42)^2/8 = 221 \text{ ft–kips}$$

$$\Delta = \frac{5wL^4}{384EI} = \frac{5ML^2}{48EI}$$

$$I \text{ yang diminta} = \frac{5ML^2}{48E\,\Delta} = \frac{5(221)(42)^2(144)}{48(29000)(42/360)} = 1724 \text{ inch}^4$$

Pilihlah dari tabel LRFD "MOMENT OF INERTIA SELECTION TABLE":

Coba W24×68 $I_x = 1830 \text{ inch}^4$

Perhatikan bahwa penampang yang dibutuhkan untuk mengontrol defleksi adalah lebih besar daripada penampang yang dibutuhkan untuk kekuatan: yakni berarti defleksi menentukan.

(d) Cek penampang W24×68:

$$w_u = 1.2(0.5 + 0.068) + 1.6(1.0) = 2.28 \text{ kips/ft}$$

$$M_u = 503 \text{ ft–kips}$$

$$M_n = M_p = Z_x F_y = 177(50)/12 = 738 \text{ ft–kips}$$

$$\phi_b M_n = \phi_b(738) = 0.90(738) = 664 \text{ ft–kips} > M_u \qquad \text{OK}$$

Seperti yang diharapkan, kekuatan itu jelas melampaui kekuatan yang disyaratkan. Ceklah defleksinya:

$$M \text{ (beban hidup layanan)} = 221 \text{ ft-kips}$$

$$\Delta = \frac{5ML^2}{48EI} = \frac{5(221)(42)^2 1728}{48(29000)1830} = 1.32 \text{ inch} < \left(\frac{L}{360} = 1.40 \text{ inch}\right) \qquad \text{OK}$$

Perhatikan bahwa defleksi beban hidup dan batasnya begitu dekat (dalam 6%) namun kekuatannya jelas melampaui persyaratan (35% lebih besar); yakni berarti bahwa *defleksi menentukan.*

Gunakan W24×68, F_y = 50 ksi.

7.6.1 Penggenangan Air pada Atap Datar

Bila batang suatu sistem atap datar mengalami defleksi, terjadilah suatu volume yang mirip cekungan yang dapat menampung air. Pada saat air mulai berakumulasi, defleksi pun akan bertambah pula supaya dapat menampung bertambahnya volume air. Proses lingkaran setan ini terus berlangsung sampai apakah (1) pertambahan defleksi berikutnya bertambah kecil dan keseimbangan tercapai; atau (2) pertambahan defleksi berikutnya terus bertambah, sistem menjadi tidak stabil, dan akhirnya terjadi peristiwa runtuh. Retensi air ini, yang sepenuhnya berasal dari defleksi atap datar, disebut sebagai penggenangan (*ponding*). Dari segi daya layanan, penggenangan air ini merupakan alasan utama yang menyebabkan pecahnya membran atap dan mengakibatkan perlunya membran dan penyekatnya diganti, dan ini cukup memakan biaya.

Untuk mencegah terjadinya penggenangan air yang terakumulasi pada atap datar, Spesifikasi-AISC tahun 1963 mensyaratkan batang pendukung untuk memenuhi pembatasan:

$$\frac{L}{d} \le \frac{600}{f_b} \qquad (7.6.10)$$

di mana f_b merupakan nilai tegangan lentur beban layanan yang dihitung dalam ksi.

Dengan menggunakan **Persamaan 7.6.4**, secara kasar ini berkaitan dengan pembatasan defleksi sebesar $L/240$ pada suatu bentang dengan tumpuan sederhana.

Tentu saja soal menghindari terjadinya penggenangan air tidaklah sesederhana seperti yang dilukiskan oleh pembatasan di atas. Marino [7.10] telah membuat pembahasan panjang lebar yang menjadi basis bagi provisi AISC LRFD dan ASD-K2. Atap datar diperlakukan sebagai sistem dua arah batang-batang sekunder (misalnya gording) yang secara elastik didukung oleh batang primer (misalnya gelagar) yang secara rigid ditumpu oleh dinding dan kolom, seperti terlihat dalam **Gambar 7.6.2**.

LRFD dan ASD-K2 memberikan sebuah kriterium yang sederhana namun konservatif:

$$C_p + 0.9C_s \leq 0.25 \tag{7.6.11}$$

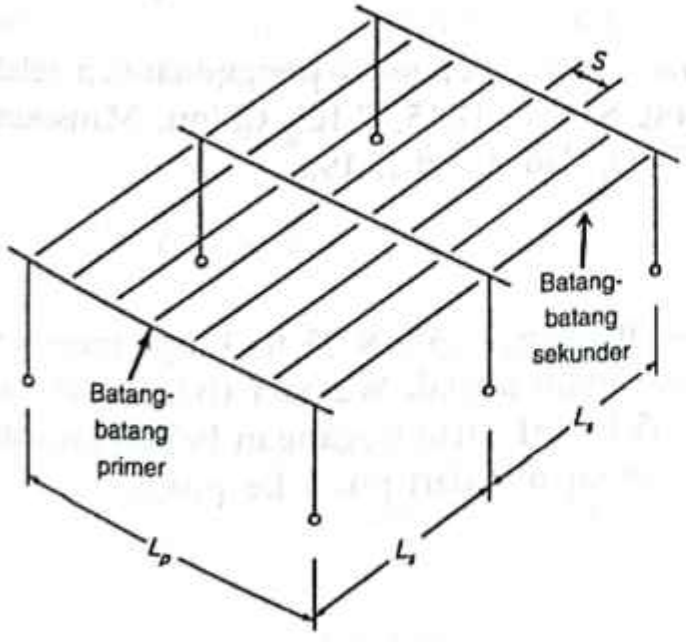
dan:

$$I_d \geq 25S^4 / 10^6 \tag{7.6.12}$$

di mana: $C_p = \dfrac{32L_sL_p^4}{10^7 I_p}$

$$C_s = \frac{32SL_s^4}{10^7 I_s}$$

L_p = panjang batang primer, ft
L_s = panjang batang sekunder, ft
S = jarak antara batang sekunder, ft
I_p = momen inersia batang primer, inch^4
I_s = momen inersia batang sekunder, inch
I_d = momen inersia dak baja yang ditumpu batang sekunder, inch^4 per ft



Gambar 7.6.2 *Susunan atap datar untuk analisis* ponding *(penggenangan). (Dari referensi 7.10)*

Kriterium $C_p + 0.9C_s \leq 0.25$ mengasumsikan bahwa batang penumpunya benar-benar mendapat tegangan penuh sebelum terjadinya penggenangan. Suku C_p dan C_s masing-masing menunjukkan kekakuan relatif dari sistem pendukung primer dan sekunder. Ruas kanan dari **Persamaan 7.6.11** merupakan suatu Indeks Tegangan U yang menyatakan rasio pertambahan tegangan akibat penggenangan air terhadap tegangan ijin beban layanan. Misalnya, dengan mengasumsikan bahwa tegangan pada batang yang menahan genangan air dapat diijinkan bertambah sampai $0.8F_y$ dari $0.6F_y$ atau $0.66F_y$, Indeks Tegangan U akan menjadi:

$$U = \frac{0.8F_y - 0.66F_y}{0.66F_y} = 0.212$$

$$U = \frac{0.8F_y - 0.6F_y}{0.6F_y} = 0.33$$

Indeks Tegangan U sebesar 0.25 merupakan batas bawah yang masuk akal untuk kuantitas tersebut. Dalam LRFD dan ASD-Komentar Gambar C-K2.1 dan C-K2.2 dapat dijumpai beberapa petunjuk desain; ini menunjukkan bahwa **Persamaan 7.6.11** cukup konservatif, dan akan semakin konservatif bila tegangan pada permulaan penggenangan cukup rendah. Burgett [7.11] telah membuat grafik-grafik sehingga kita dapat dengan cepat mengecek dengan menggunakan **Persamaan 7.6.11** dan **7.6.12**. Lebih mutakhir lagi, Ruddy [7.12] telah memberkan prosedur untuk lantai beton di atas dak logam dan ditumpu balok dan gelagar baja.

Persamaan 7.6.12 menyangkut dak atap yang ditumpu batang sekunder. Karena hal ini hanya berpengaruh sedikit terhadap penggenangan, hal ini dapat diperlakukan sebagai sebuah sistem satu arah menurut cara yang diberikan oleh Chinn [7.13]. Bila dak atapnya *adalah* batang sekunder, ia harus diperlakukan menurut **Persamaan 7.6.11**.

Pembahasan matematik yang lebih mendalam mengenai penggenangan telah diberikan oleh Salama dan Moody [7.14], Sawyer [7.15, 7.16], Chinn, Mansouri, dan Adams [7.17], Avent dan Stewart [7.18], dan Avent [7.19].

■ Contoh 7.6.2

Suatu atap datar untuk bangunan industrial luasnya 45 ft × 35 ft. Tanpa memperhatikan penggenangan air, gelagar yang dipilih adalah W24×84 (baja A36) dan balok anaknya membentang sepanjang 35 ft dari 24H6 (tegangan beban layanan maksimumnya = 30 ksi) dan berjarak sebesar 6 ft dari pusat ke pusat.

Diketahui:

W24×84, $I_p = 2370$ inch^4

$f_b = 22.5$ ksi (tegangan beban layanan total)

24H6, $I_s = 462(12)/30 = 185$ inch^4*

$f_b = 30$ ksi (tegangan beban layanan)

Asumsikan bahwa 60% dari beban layanan total bekerja pada permulaan penggenangan. Ceklah cukup tidaknya sistem tersebut.

Penyelesaian:

(a) Cek gelagarnya. Tegangan beban hidup f_0-nya adalah:

$$f_0 = 0.6(22.5) = 13.5 \text{ ksi}$$

$$U = \text{Indeks tegangan} = \frac{0.8F_y - f_0}{f_0} = \frac{0.8(36) - 13.5}{13.5} = 1.13$$

$$C_p = \frac{32(35)(45)^4}{10^7(2370)} = 0.19$$

$$C_s = \frac{32(6)(35)^4}{10^7(185)} = 0.16$$

$$C_p + 0.9C_s = 0.19 + 0.9(0.16) = 0.33 > 0.25$$

Dengan pengecekan konservatif, ini tampaknya tidak cukup. Dengan LRFD atau ASD-Komentar Gambar C-K2.1 diperoleh:

Untuk $U_p = 1.13$ dan $C_s = 0.16$

Cari C_p ijin $\approx 0.40 > 0.19$ OK

Dengan demikian gelagar tersebut OK.

(b) Cek balok anak:

$$f_0 = 0.6(30) = 18.0 \text{ ksi}$$

$$U_s = \text{indeks tegangan} = \frac{0.8F_y - f_0}{f_0} = \frac{0.8(50) - 18.0}{18.0} = 1.22$$

Pengecekan secara akurat dengan LRFD atau ASD-Komentar Gambar C-K2.2:

Untuk $U_s = 1.22$ dan $C_p = 0.19$

Cari C_s ijin $C_s \approx 0.35 > 0.16$ OK

*Dihitung dari "STANDARD LOAD TABLE" dalam *Standard Specifications Load Tables & Weight Tables for Steel Joists & Joists Girders* [1.13]. Perhatikan bahwa balok anak seri J-, LJ-, dan DLJ-, ditetapkan sebagai standar industri dalam tahun 1978.

Dengan demikian, kedua batang tersebut memenuhi provisi penggenangan. Bila indeks tegangan di atas sekitar 0.5, ekspresi sederhana LRFD atau ASD-K2 akan sangat konservatif.

7.7 Geser pada Balok Tempa

Apabila balok panjang ditentukan oleh defleksi dan balok dengan panjang menengah biasanya ditentukan oleh kekuatan lentur, balok bentang pendek mungkin akan ditentukan oleh geser.

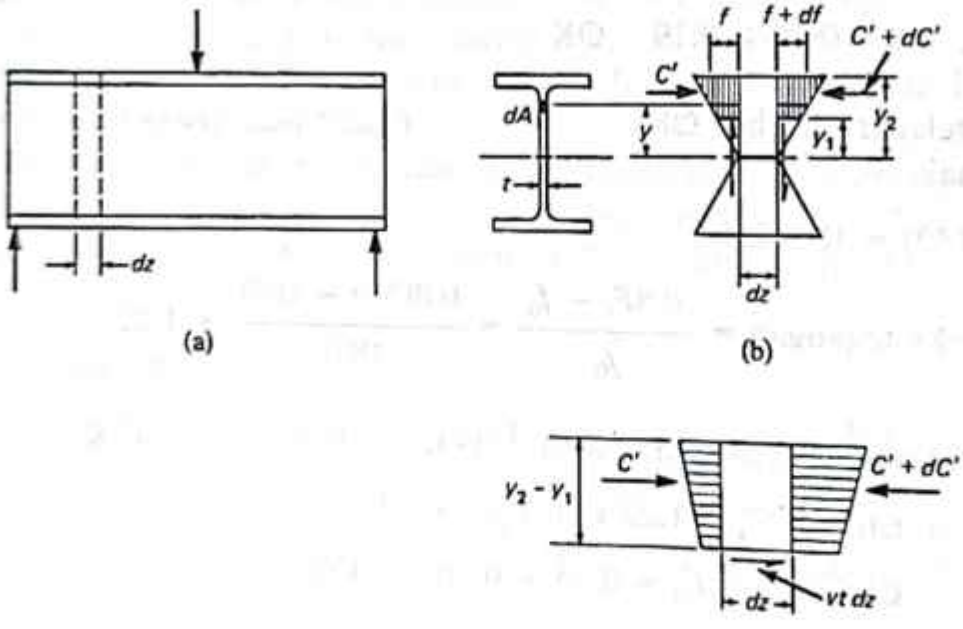
Untuk membahas kembali persamaan tegangan geser untuk penampang simetrik, perhatikan potongan dz dari balok dalam **Gambar 7.7.1*a*** yang terlihat sebagai benda bebas dalam **Gambar 7.7.1*b***. Bila dikehendaki tegangan geser satuan v pada suatu penampang y_1 dari sumbu netralnya, dari **Gambar 7.7.1*c*** terlihat bahwa:

$$dC' = vt\,dz \tag{7.7.1}$$

Gaya horisontal yang timbul dari momen lenturnya adalah:

$$C' = \int_{y_1}^{y_2} f dA$$

$$C' + dC' = \int_{y_1}^{y_2} (f + df)\, dA$$



Gambar 7.7.1 *Tegangan lentur yang terlibat dalam penurunan persamaan tegangan geser*

Dengan pengurangan:

$$dC' = \int_{y_1}^{y_2} df\, dA \tag{7.7.2}$$

$$df = \frac{dMy}{I} \tag{7.7.3}$$

$$dC' = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dMy}{I}\, dA = \frac{dM}{I} \int_{y_1}^{y_2} y\, dA \tag{7.7.4}$$

Substitusi **Persamaan 7.7.4** ke dalam **Persamaan 7.7.1** dan penyelesaian untuk tegangan geser v akan memberikan:

$$v = \frac{dM}{dz} \left(\frac{1}{tI}\right) \int_{y_1}^{y_2} y\, dA \tag{7.7.5}$$

dan dengan mengingat bahwa $V = dM/dz$, dan memisalkan:

$$Q = \int_{y_1}^{y_2} y\, dA$$

persamaan yang biasa:

$$v = \frac{VQ}{It} \tag{7.7.6}$$

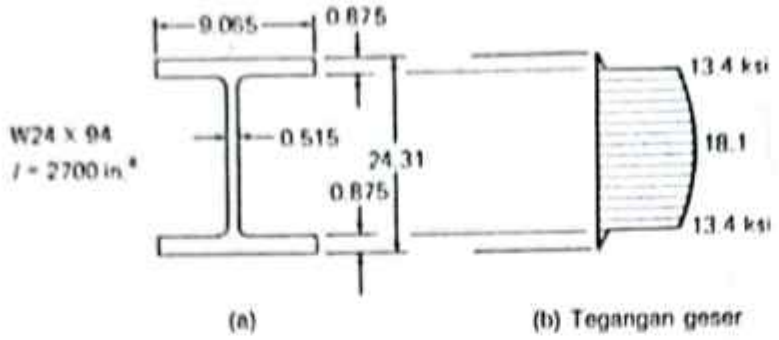
diperoleh bila Q merupakan momen statik terhadap sumbu x dari luas penampang lintang di antara serat terluar pada y_2 (**Gambar 7.7.1*b***) dan lokasi tertentu pada y_1 di mana tegangan geser tersebut akan ditetapkan.

Dengan prosedur desain yang biasa, tegangan geser dihitung sebagai harga rata-rata atas luas bruto dari badan dengan mengabaikan efek lobang alat penyambung manapun; dengan demikian:

$$f_v = \frac{V}{A_w} = \frac{V}{dt_w} \tag{7.7.7}$$

Perhatikan bahwa lobang-lobang besar pada badan balok yang berfungsi sebagai jalan lewat pipa-pipa, dan saluran (*duct*) membutuhkan perhatian khusus yang efeknya *tidak* boleh diabaikan begitu saja.

Contoh berikut ini memberi ilustrasi bahwa pada balok profil I, sebagian besar geser dipikul oleh badan balok tersebut.



Gambar 7.7.2 Contoh 7.7.1

■ **Contoh 7.7.1**

Tentukan distribusi tegangan geser elastik pada sebuah balok W24×94 yang terkena gaya geser beban layanan sebesar 200 kips. Hitunglah pula bagian geser yang dipikul oleh flens dan yang dipikul oleh badan baloknya. (*lihat* **Gambar 7.7.2**)

Penyelesaian:

(a) Tegangan pada pertemuan antara flens dan badan balok:

$$V = 200 \text{ kips}$$

$$Q = 9.065(0.875)(12.155 - 0.4375) = 92.9 \text{ inch}^3$$

$$v = \frac{200(92.9)}{2700(0.515)} = 13.4 \text{ ksi (badan balok)}, \quad v = 0.76 \text{ ksi (flens)}$$

(b) Tegangan pada sumbu netral:

$$Q = 92.9 + (12.155 - 0.875)^2(0.515)(0.5) = 92.9 + 32.8 = 125.7 \text{ inch}^3$$

$$v = \frac{200(125.7)}{2700(0.515)} = 18.1 \text{ ksi}$$

(c) Geser yang dipikul oleh flens dan badan balok. Gunakan suatu variasi linear pendekatan:

$$V \text{ (flens)} = 2(1/2)(0.76)(0.875)(9.065) = 6 \text{ kips}$$

$$V \text{ (badan balok)} = 200 - 6 = 194 \text{ kips}$$

Dalam kasus ini, 97% geser dipikul oleh badan balok.

(d) Tegangan geser rata-rata f_v pada badan balok:

$$f_v = \frac{V}{dt_w} = \frac{200}{24.31(0.515)} = 16.0 \text{ ksi}$$

yang merupakan 11.6% di bawah harga maksimumnya. ■

7.7.1 Kekuatan Geser Nominal V_n pada Balok Tempa

Seperti terlihat dalam **Contoh 7.7.1**, pelat badan merupakan elemen yang terutama memikul geser pada penampang profil I. Ini juga berlaku untuk pelat badan (badan-badan) dari "balok simetrik tunggal atau ganda ... yang terkena geser dalam bidang simetri, dan untuk kanal yang mengalami geser pada bagian badannya". (LRFD-F2).

Selama badan balok stabil, yakni ketidakstabilan yang diakibatkan oleh tegangan geser atau kombinasi geser dan tegangan lentur tidak dapat terjadi, kekuatan geser V_n dari penampang tersebut didasarkan pada lelehan geser keseluruhan badan tersebut. Dengan demikian:

$$V_n = \tau_y A_w \tag{7.7.8}$$

di mana: τ_y = tegangan leleh geser pelat badan

A_w = luas badan = dt_w untuk balok tempa

d = kedalaman keseluruhan dari balok tempa

t_w = ketebalan badan

Menurut teori "energi distorsi" (*lihat* **Bagian 2.6**), tegangan leleh geser τ_y sama dengan tegangan leleh tekan-tarik F_y dibagi dengan $\sqrt{3}$ bila tegangan geser bekerja sendirian (geser murni); dari **Persamaan 2.6.5**:

$$\tau_y = 0.58F_y \tag{2.6.5}$$

Dengan demikian, masuk akallah bagi LRFD-F2.2 untuk menggunakan $\tau_y = 0.6F_y$. **Persamaan 7.7.8** kemudian menjadi:

$$V_n = 0.6F_y A_w \tag{7.7.9}$$

Persamaan 7.7.9 menyiratkan bahwa rasio h/t_w tidak melampaui:

$$\frac{h}{t_w} = 187\sqrt{\frac{k}{F_{yw}}} \tag{7.7.10}$$

di mana k = koefisien tekuk untuk elemen pelat yang terkena geser saja; diam bila sebagai 5.0 untuk balok tanpa pengaku transversal

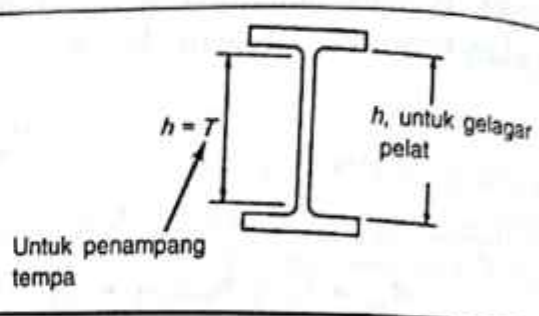
F_{yw} = tegangan leleh dari badan balok

Pengembangan **Persamaan 7.7.10** dapat dijumpai dalam **Bab 11 (Bagian 11.8)** pada gelagar pelat. Meskipun demikian, pelat-pelat tipikal seperti yang dikembangkan dalam **Bab 6** kekuatan tekuknya tergantung pada rasio kerampingan; dalam hal ini h/t_w seperti dalam**Gambar 7.7.3**. Dari gambar tersebut dapat kita

perhatikan bahwa kekuatan geser maksimum akan tercapai bila h/t_w tidak melampaui 69.7 (untuk baja A36). Batas h/t_w di mana **Persamaan 7.7.9** dapat diberlakukan untuk balok tempa tanpa pengaku yang diberikan dalam **Tabel 7.7.1**.

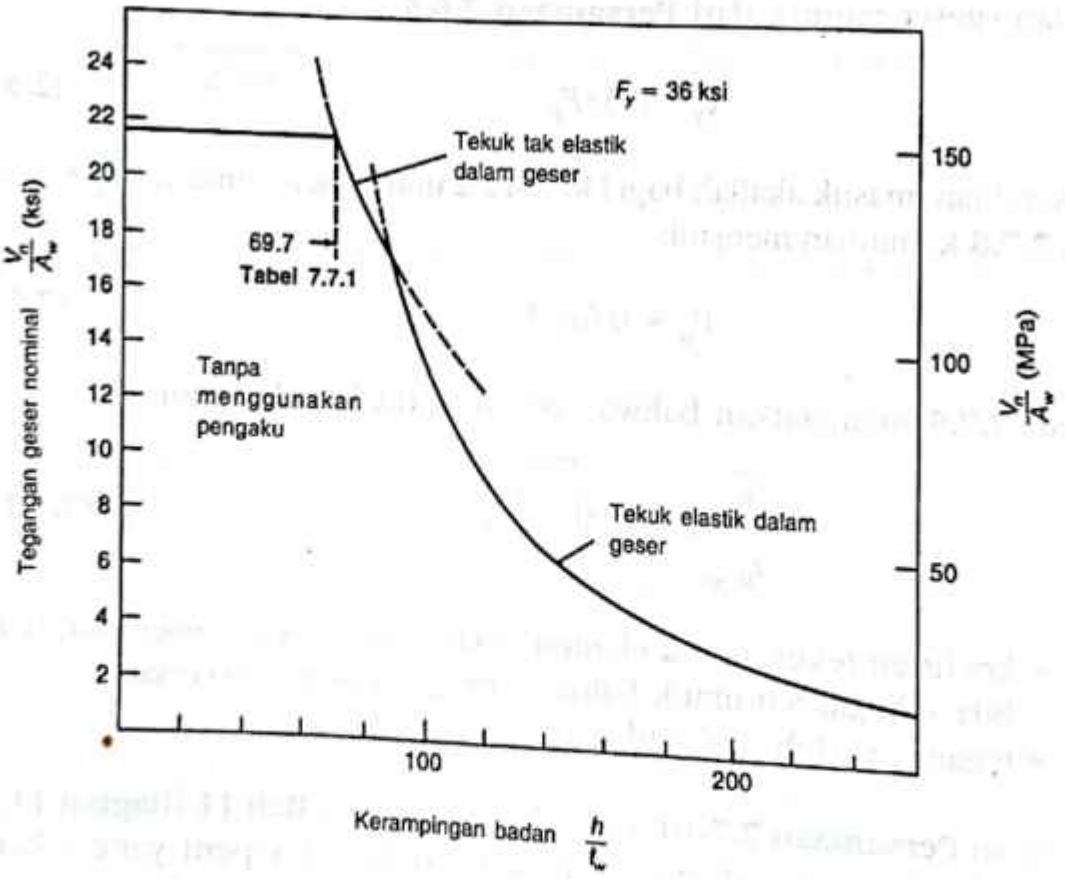
Tabel 7.7.1 batas h/t_w maksimum bila pengaku tidak digunakan pengaku (berdasarkan LRFD-F2.2 dan ASD-F4)

F_y (ksi)	F_y (MPa)	h/t_w* LRFD–F2.2	h/t_w* ASD–F4
36	248	69.7	63.3
42	290	64.5	58.6
45	310	62.3	56.6
50	345	59.1	53.7
60	414	54.0	49.1
65	448	51.9	47.1
100	689	41.8	38.0



*Persamaan 7.7.10

*Batas $h/t_w = 380/\sqrt{F_y}$, ksi; *lihat* **Bab 11 (Bagian 11.8)** untuk turunannya.



***Gambar** 7.7.3 Tegangan geser nominal V_n/A_w versus kerampingan badan h/t_w untuk balok baja A36 tanpa pengaku transversal*

7.7.2 Load and Resistance Factor Design untuk Geser pada Balok Tempa

Persyaratan kekuatan geser pada desain faktor beban dan resistansi menurut LRFD-F2 dapat dinyatakan sebagai:

$$\phi V_n \geq V_u \tag{7.7.11}$$

di mana ϕ = 0.90
V_n = kekuatan nominal dalam geser
= $0.6F_{yw}A_w$ (yakni **Persamaan 7.7.9**) untuk balok tanpa pengaku transversal dan tidak melampaui batas b/t_w yang diberikan dalam **Tabel 7.7.1**
V_u = geser beban layanan terfaktor (*lihat* **Bagian 1.9**)

7.7.3 Allowable Stress Design untuk Geser pada Balok Tempa

Persyaratan keamanan untuk geser pada *Allowable Stress Design* (ASD) menurut ASD-F4 dapat dinyatakan:

$$f_v \leq F_v \tag{7.7.12}$$

di mana f_v = tegangan geser rata-rata beban layanan = V/A_w
V = gaya geser beban layanan
A_w = luas badan = dt_w untuk balok tempa
F_v = tegangan geser ijin pada beban layanan = $0.40F_y$ untuk balok-balok tanpa pengaku transversal dan tidak melampaui batas b/t_w yang diberikan dalam **Tabel 7.7.1**

Persamaan 7.7.12 dapat diperoleh dari hubungan kekuatan yang diformulasikan kembali sebagai **Persamaan 1.8.8**:

$$\frac{\phi R_n}{\gamma} \geq \Sigma Q_i \tag{1.8.8}$$

Bila γ/ϕ faktor keamanan nominal total diambil sebagai harga ASD tradisional sebesar 1.67, R_n adalah V_n untuk geser dan ruas kanannya merupakan geser beban layanan total V, dan **Persamaan 1.8.8** menjadi:

$$\frac{V_n}{1.67} \geq V \tag{7.7.13}$$

Bila kedua ruas dibagi dengan luas badan balok A_w, setelah memperhatikan

bahwa $V_n = 0.6F_yA_w$, dan mempertukarkan ruas-ruas persamaan itu akan diperoleh:

$$\left(f_v = \frac{V}{A_w}\right) \le \left(F_v = \frac{0.6F_y}{1.67} = 0.36F_y\right) \tag{7.7.14}$$

Desain tegangan ijin tradisional menggunakan dua-pertiga dari tegangan leleh sebagai harga ijin (2/3 dari $0.6F_y$); dengan demikian, tegangan geser ijin F_v diambil sebagai $0.40F_y$.

Para Pembaca dapat memperhatikan bahwa batas LRFD h/t_w untuk digunakan pada kekuatan geser maksimum agak sedikit lebih tinggi daripada batas ASD untuk tegangan ijin maksimumnya. Hasil ini dari suatu pendekatan pada k yang digunakan untuk LRFD; namun secara filosofis tidak ada perbedaannya. Balok tempa pada umumnya memenuhi batas bawahnya (*lower limit*).

■ Contoh 7.7.2

Pilihlah penampang W dari baja A36 yang paling ringan untuk memikul beban hidup sebesar 19 kips/ft dan beban mati 1 kip/ft (sebagai tambahan terhadap beban dari baloknya). Bentangan yang diberi tumpuan sederhana itu panjangnya 15 ft. Untuk stabilitas lateral cukup digunakan sabukan lateral. Gunakan *Load and Resistance Factor Design.*

Penyelesaian:

Karena pembebanannya cukup berat dan bentangannya pendek, desainer hendaknya menyelidiki geser maupun lenturnya.

(a) Hitunglah beban-beban terfaktor M_u dan V_u:

$$W_u = 1.2w_D + 1.6w_L$$
$$= 1.2(1) + 1.6(19) = 32.0 \text{ kips/ft}$$
$$M_u = wL^2/8 = 32.0(5)^2/8 = 100 \text{ ft–kips}$$
$$V_u = wL/2 = 32.0(5)/2 = 80 \text{ kips}$$

Dengan beban-beban berat yang tersuperimposkan ini, berat balok hanya akan memiliki efek yang kecil saja.

(b) Pilih suatu penampang untuk lentur. Asumsikan "penampang kompak", kemudian:

$$\phi_b M_n = \phi_b M_p = \phi_b Z_x F_y$$

Persyaratan desainnya adalah bahwa $\phi_b M_n = M_u$; dengan demikian:

$$Z_x \text{ yang diminta} = \frac{M_u}{\phi_b F_y} = \frac{100(12)}{0.90(36)} = 37.0 \text{ inch}^3$$

PERPUSTAKAAN D III F. TEKNIK

Coba W12×26 dari LRFD "LOAD FACTOR DESIGN SELECTION TABLE" sebagai balok teringan yang memiliki $Z_x \geq 37.0$ inch^3.

(c) Ceklah gesernya:

$$\phi_v V_n = f_t(0.6F_y)A_w$$
$$= 0.90(0.6)(36)(12.22)(0.23) = 54.6 \text{ kips}$$

Karena $V_u = 80$ kips melampaui kekuatan geser yang disediakanoleh W12×26, penampang tersebut tidak mencukupi. Luas pelat badan yang dibutuhkan A_w untuk geser adalah:

$$A_w \text{ yang dibutuhkan} = \frac{V_u}{\phi_v(0.6F_y)} = \frac{80}{0.90(21.6)} = 4.12 \text{ inch}^2$$

Dari persyaratan momen lentur, penampang lebih berat berikutnya ternyata berukuran lebih tinggi, seperti misalnya W14 atau W16. Bila dipilih W16, tebal badan yang dibutuhkannya adalah 4.12/6 = 0.26 inch. Coba W16×31, $Z_x = 5.40$ inch^3. Untuk geser:

$$\phi_v V_n = 0.90(0.6)(36)(15.88)(0.275) = 84.9 \text{ kips}$$

yang melampaui geser terfaktor $V_u = 80.1$ kip (termasuk berat balok) dan harga ini dapat diterima.

Perhatikan bahwa rasio h/t_w tidak dapat melampaui harga dalam **Tabel 7.7.1**:

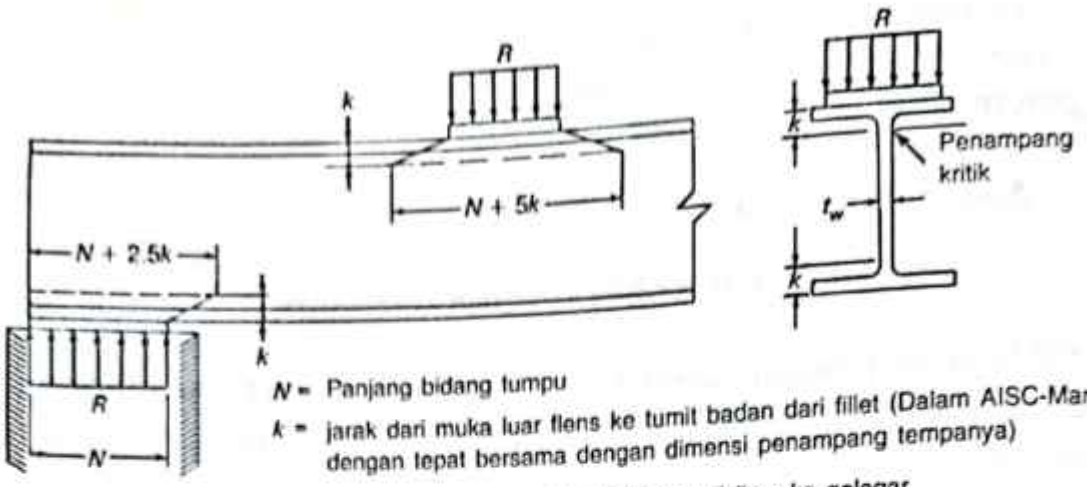
$$\frac{h}{t_w} = \frac{\text{tinggi tanpa penumpu, } T}{\text{tebal badan, } t_w} = \frac{13.625}{0.275} = 49.5$$

Ini lebih kecil daripada harga batas sebesar 69.7 dan memperkuat penggunaan **Persamaan 7.7.9** untuk kekuatan nominal V_n dalam geser. Pembahasan terinci mengenai penggunaan pengaku madya (*intermediate*) ketika h/t_w melampaui harga dari **Tabel 7.7.1** dapat dijumpai dalam **Bab 11** dalam ruaian gelagar pelat. Perhatikan bahwa harga h/t_w yang ditabulasikan dalam LRFD-Manual untuk W16×31 adalah 51.6 berdasarkan taksiran lebih rendah atas radius dari persambungan antara flens dengan badannya. Apabila tersedia harga tabulasi yang lebih besar, hendaknya harga itu yang digunakan. ■

Gunakan W16×31, $F_y = 36$ ksi.

7.8 Beban Terpusat yang Dikenakan terhadap Balok Tempa

Bila beban terpusat dikenakan pada balok, balok yang terletak pada tumpuan dan reaksi dari flens balok pada sambungan ke kolom, pelelehan setempat akan



N = Panjang bidang tumpu

k = jarak dari muka luar flens ke tumit badan dari fillet (Dalam AISC-Manual diberikan dengan tepat bersama dengan dimensi penampang tempanya)

R = Beban terpusat yang harus ditransmisikan ke gelagar

Gambar 7.8.1 *Peninjauan pelelehan lokal badan untuk menentukan panjang penumpu.*

terjadi di dekat beban terpusat tersebut dari tegangan tekan yang tinggi yang diikuti tekuk tak elastik pada daerah badan yang berdekatan dengan tumit *fillet*.

Keseluruhan perilaku ini dulunya dikombinasikan dalam kategori "pelipatan badan" (*web crippling*).

Sebagaimana dalam kebanyakan situasi yang berkaitan dengan tekan, terdapat dua kemungkinan: pelelehan atau ketidakstabilan. Spesifikasi AISC saat ini meninjau dua kategori: (*a*) pelelehan lokal badan dan (*b*) pelipatan badan.

Bila kita lihat lagi **Gambar 7.8.1**, reaksi terpusat R yang bekerja pada suatu balok diasumsikan kritis pada tumit *fillet*-nya (berjarak k dari muka balok). Bebannya diasumsikan terdistsribusi di sepanjang badan balok pada kemiringan 2.5 banding 1. Sebelum LRFD-Spesifikasi tahun 1986, distribusi tersebut diambil pada 45°. AISC-Spesifikasi tahun 1978 dan sebelumnya didasarkan atas karya dari Lyse dan Godfrey [7.20]. Para peneliti [7.21, 7.22] sejak saat itu telah membuktikan bahwa kemiringan sebesar 45° sangat konservatif; sedangkan beban sebenarnya lebih menyebar pada suatu jarak $(N + 5k)$ sampai dengan $(N + 7k)$ untuk beban interiornya ketimbang jarak $(N + 2k)$ yang digunakan sebelumnya.

Transmisi beban-beban terpusat pada sambungan balok ke kolom dibahas dalam **Bab 13** sedangkan beban-beban terpusat pada gelagar pelat dan desain pengaku tumpu (*bearing stiffener*) yang terkait dibicarakan dalam **bab 11**.

7.8.1 Load and Resistance Factor Design

Persyaratan dari LRFD-K1.3 dapat dinyatakan:

$$\phi R_n \geq R_u \tag{7.8.1}$$

di mana ϕ = faktor resistansi (reduksi kekuatan)
R_n = kekuatan reaksi nominal
R_u = reaksi terfaktor

7.8.2 Load and Resistance Factor Design — Pelelehan Lokal Badan

Kekuatan reaksi nominal R_n berdasarkan kekuatan leleh pada tumit dari suatu *fillet* pada balok tempa adalah sebagai berikut:

1. Untuk *beban-beban interior* di mana beban terpusat dikenakan pada suatu jarak dari ujung batang yang lebih besar daripada kedalaman (tinggi) batang yang bersangkutan:

$$R_n = (5k + N) F_{yw} t_w \tag{7.8.2}$$

2. Untuk *reaksi-reaksi ujung*:

$$R_n = (2.5k + N) F_{yw} t_w \tag{7.8.3}$$

di mana k = jarak dari muka luar flens ke tumit badan dari *fillet*
N = panjang bidang tumpuan
F_{yw} = tegangan leleh minimum pelat badan
t_w = tebal badan

Faktor reduksi kekuatan ϕ untuk pelelehan lokal badan adalah 1.0; ini mencerminkan faktor keamanan total tradisional yang rendah yang digunakan untuk mengontrol pelelehan lokal badan ketimbang digunakan bagi kekuatan keseluruhan batang.

7.8.3 Allowable Stress Design — Pelelehan Lokal Badan

Perumusan kembali hubungan kekuatan, **Persamaan 7.8.1** sebagai **Persamaan 1.8.8**:

$$\frac{\phi R_n}{\gamma} \geq \left(\Sigma Q_i = \frac{R_u}{\gamma} = R\right) \tag{7.8.4}$$

di mana Q_i = beban-beban layanan
γ = faktor kelebihan beban rata-rata
R = beban layanan total

Dengan memisalkan faktor keamanan kombinasi γ/ϕ = FS dan membagi **Persamaan 7.8.4** dengan luas kritik A_c akan diperoleh:

$$\frac{R_n}{(\text{FS})A_c} \geq \left(\frac{R}{A_c} = f_c\right) \tag{7.8.5}$$

Substitusi $(5k + N)t_w$ dan $(2.5k + N)t_w$ masing-masing untuk situasi interior dan

ujung, dan mengambil FS = 1.50 akan diperoleh pembatasan ASD-K1.3:

1. Untuk *beban-beban interior*:

$$f_c = \frac{R}{t_w(N + 5k)} \leq 0.66F_y \tag{7.8.6}$$

2. Untuk *reaksi-reaksi ujung*:

$$f_c = \frac{R}{t_w(N + 2.5k)} \leq 0.66F_y \tag{7.8.6}$$

Dalam ASD, panjang bidang tumpu N tidak boleh diambil kurang dari k untuk reaksi ujung; pembatasan ini tidak terdapat dalam LRFD. Tegangan ijin ASD-K1.3 tahun 1989 untuk keadaan batas ini telah direduksi menjadi $0.66F_y$ dari harga tradisional sebesar $0.75F_y$; sedikit mengimbangi pertambahan pada panjang bidang tumpu dari yang tradisional $(N + 2k)$ menjadi $(N + 5k)$ untuk lokasi bidang tumpu interior.

7.8.4 Load and Resistance Factor Design — Pelipatan Badan

Untuk mengontrol stabilitas badan pada beban-beban terpusat, telah ditambahkan aturan Spesifikasi baru dalam LRFD-K1.4 berdasarkan karya Roberts [7.23]. Kekuatan reaksi nominal berdasarkan kriterium stabilitas ini adalah:

1. Untuk *beban-beban interior*:

$$R_n = 135t_w^2\left[1 + 3\left(\frac{N}{d}\right)\left(\frac{t_w}{t_f}\right)^{1.5}\right]\sqrt{\frac{F_{yw}t_f}{t_w}} \tag{7.8.8}$$

2. Untuk *reaksi-reaksi ujung*:

$$R_n = 68t_w^2\left[1 + 3\left(\frac{N}{d}\right)\left(\frac{t_w}{t_f}\right)^{1.5}\right]\sqrt{\frac{F_{yw}t_f}{t_w}} \tag{7.8.9}$$

di mana t_f = ketebalan flens melalui mana beban terpusat tersebut ditransmisikan
d = kedalaman keseluruhan dari balok tersebut

Faktor reduksi kekuatannya ϕ adalah 0.75.

7.8.5 Allowable Stress Design — Pelipatan Badan

Untuk desain tegangan ijin, ASD-K1.4 memberikan reaksi beban layanan ijin R sebesar 0.5 R_n dari **Persamaan 7.8.8** dan **7.8.9**.

■ **Contoh 7.8.1**

Tentukan ukuran pelat pikul yang dibutuhkan untuk suatu reaksi ujung sebesar 10 kips beban mati dan 20 kips beban hidup pada sebuah balok W10×26 dari baja A36. Balok tersebut terletak pada suatu dinding beton yang memiliki kekuatan tekan 28 hari $f'_c = 3000$ psi. Gunakan *Load and Resistance Factor Design*.

Penyelesaian:

(a) Hitunglah reaksi terfaktor R_u dan R_n yang dibutuhkan.

$$R_u = 1.2(10) + 1.6(20) = 44 \text{ kips}$$

$$R_n \text{ yang dibutuhkan} = R_u/\phi = 44/1.0 = 44 \text{ kips}$$

(b) Tentukan dimensi denah dari pelat pikulnya. Panjang bidang tumpu harus memenuhi persyaratan yang lebih ketat dari **Persamaan 7.8.3** (pelelehan lokal badan) atau **Persamaan 7.8.8** (pelipatan badan). Penyelesaian **Persamaan 7.8.3** yang lebih sederhana untuk panjang bidang tumpu yang dibutuhkan N memberikan:

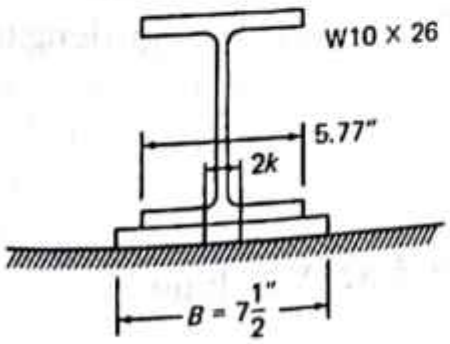
$$N = \frac{R_n}{F_{yw}t_w} - 2.5k = \frac{44}{36(0.260)} - 2.5(0.875) = 2.5 \text{ inch}$$

Coba pelat tumpu berukuran 3 inch. Secara praktis, 3 inch harus dianggap sebagai panjang tumpu minimum bila panjang bersih tidak mensyaratkan harga yang lebih rendah lagi.

Sebelum mengecek **Persamaan 7.8.8** (pelipatan badan), selidiki persyaratan untuk bidang tumpu pada beton. Kekuatan tumpu nominal P_p dari beton diberikan oleh LRFD-J9 sebagai:

$$P_p = 0.85f'_cA_1$$

di mana A_1 adalah luas baja yang secara konsentrik memikul pada suatu tumpuan beton. Persyaratannya adalah bahwa $\phi P_p \geq R_u$ (yakni beban tumpu terfaktor). Faktor reduksi kekuatan ϕ untuk bidang tumpu adalah 0.60. Dengan demikian penyelesaian untuk luas tumpu yang dibutuhkan A_1 memberikan:



Gambar 7.8.2 *Contoh 7.8.1*

$$P_p \text{ yang diminta} = \frac{A_1 \text{ yang diminta } P_p}{0.85f'_c} = \frac{R_u/\phi}{0.85f'_c} = \frac{44/0.60}{0.85(3)} = 28.8 \text{ inch}^2$$

Untuk panjang tumpu sebesar 3 inch, lebar B (*lihat* **Gambar 7.8.2**) haruslah sebesar 9.6 inch. Karena lebar flens balok hanya 5.77 inch, lebar B yang lebih kecil dari 9.6 inch lebih disukai. Panjang tumpu sebesar 4 inch membutuhkan lebar sebesar 7.2 inch. Coba suatu pelat 4 inch × 7.5 inch (A_1 = 30 inch^2).

Sekarang cek **Persamaan 7.8.9** (pelipatan badan) pada W10×26:

$$R_n = 68(0.260)^2\left[1 + 3\left(\frac{4}{10.33}\right)\left(\frac{0.260}{0.440}\right)^{1.5}\right]\sqrt{\frac{36(0.440)}{0.260}} = 54.8 \text{ kips}$$

Kemudian kekuatan desain $\times R_n$ = 0.75(54.8) = 41.1 kips. Karena ini kurang dari beban terfaktor R_u = 44 kips, panjang tumpu N harus ditambah. Panjang tumpu N berukuran 5 inch memberikan ϕR_n = 44.7 kips yang melampaui R_u dan dapat diterima.

Gunakan pelat tumpu, N = 5 inch × B = 6 inch.

(c) Tentukan tebal pelat tumpu. Tekanan tumpu merata (yang diasumsikan) di bawah beban terfaktor adalah:

$$\text{Tekanan tumpu merata } p = \frac{44}{5(6)} = 1.47 \text{ ksi}$$

Bagian kritik untuk lentur diambil pada tumit fleng ke *fillet* badan, suatu jarak k dari tengah ketebalan badan, dan flens baloknya diasumsikan tidak ikut serta. Momen lentur diperlakukan sebagai bekerja pada suatu balok kantilever. Momen terfaktornya M_u adalah:

$$M_u = \frac{p(B/2 - k)^2N}{2} = \frac{1.47(3 - 0.875)^2N}{2} = 3.23N \qquad \text{(a)}$$

Untuk penampang persegi, persyaratan kekuatan lenturnya adalah:

$$\phi M_n \geq M_u \qquad \text{(b)}$$

di mana ϕ = 0.90 dan $M_n = M_p = ZF_y$. Untuk penampang persegi dengan lebar N dan tebal t (*lihat* **Contoh 7.3.1**):

$$Z = Nt^2/4 \qquad \text{(c)}$$

Untuk memenuhi **Persamaan (*b*)** di atas, $\phi ZF_y = 3.32\ N$; sehingga:

$$\frac{0.90Nt^2F_y}{4} = 3.32N$$

dan untuk F_y = 36 ksi, tebal yang dibutuhkan menjadi:

$$t \text{ yang dibutuhkan} = \sqrt{\frac{3.32(4)}{0.90(36)}} = 0.64 \text{ inch} \quad \text{Gunakan } t = 3/4 \text{ inch}$$

Gunakan pelat tumpu, $3/4 \times 5 \times 0' - 6''$. ■

Secara umum, penyelesaian untuk tebal pelat tumpu adalah dengan menyamakan ϕM_n dengan M_u:

$$\phi \frac{Nt^2}{4} F_y = \frac{p(B/2 - k)^2 N}{2}$$

$$t \text{ yang dibutuhkan} = \sqrt{\frac{2p(B/2 - k)^2}{\phi F_y}} \tag{7.8.10}$$

7.9 Lobang-lobang pada Balok

7.9.1 *Lobang-lobang Flens*

Untuk batang tarik, efek dari lobang-lobang alat sambung telah dibahas dalam **Bab 3** di mana lobang-lobang dibuat dan akhirnya diperoleh penampang bersihnya. Untuk batang tekan, karena penyambung menempati sebagian besar ruang yang tersedia pada lobang tersebut, dalam desain alat sambung tersebut diasumsikan sepenuhnya mengisi lobang sehingga pengurangan karena adanya lobang tidak perlu dilakukan.

Bila kekuatan nominal M_n mencapai momen plastik M_p, tentu saja lobang-lobang flens tarik akan mengurangi kekuatan; meskipun demikian, toh akan terjadi pergeseran letak sumbu netral yang terkait dengan hilangnya kekuatan pada salah satu flens, suatu efek yang agak sedikit melawan efek dari lobang-lobang tersebut. Desain tradisional mengabaikan efek-efek lobang bila lobang tersebut tidak mewakili proporsi luas flens yang cukup signifikan. Bila kekuatan momen nominal M_n terbatas kurang dari M_p karena adanya sesuatu ketidakstabilan tertentu, efek lobang akan berkurang.

Secara tradisional, AISC-Spesifikasi telah menyaratkan pengurangan untuk lobang-lobang flens hanya bila luas lobang-lobang tersebut melampaui 15% dari luas flens bruto, dan kemudian hanya kelebihan luas sebesar 15% yang perlu dikurangkan. Tidak perlu ada pergeseran letak sumbu netral meskipun sebenarnya hanya lobang-lobang flens tarik saja yang perlu dikurangkan. LRFD-B1 masih terus melanjutkan praktek ini.

Meskipun demikian, ASD-B10 mensyaratkan penggunaan penampang bruto sehingga:

$$0.5F_u A_{fn} \geq 0.6F_y A_{fg} \tag{7.9.1}$$

di mana A_{fn} = luas flens bersih
A_{fg} = luas flens bruto

Persamaan 7.9.1 berarti bahwa luas flens bersih harus melampaui 0.74 dan 0.92 dari luas flens bruto masing-masing untuk baja A36 dan A572 Mutu 50, supaya dapat menggunakan luas bruto. Ini memungkinkan lobang-lobang sampai 25.5% yang dapat diabaikan untuk baja A36 dan bukannya 15%; namun untuk baja A572 Mutu 50, hanya 8% lobang yang dapat diabaikan. Bila **Persamaan 7.9.1** *tidak* dipenuhi, keadaan batas patahan (*fracture limit state*) akan menentukan. Dalam kasus sedemikian, pengurangan untuk lobang-lobang tampaknya cukup tepat juga. Bila keadaan batas patahan menentukan, ASD-B10 menyatakan, "sifat-sifat lentur harus didasarkan atas luas flens tarik efektif A_{fe} sebagai berikut:

$$A_{fe} = \frac{5F_u}{6F_y} A_{fn} \tag{7.9.2}$$

Untuk baja A36, **Persamaan 7.9.2** memungkinkan penggunaan luas flens efektif sebesar 34% lebih tinggi daripada luas bersih hitungan. Untuk baja A572 Mutu 50, luas flens efektif dapat diambil hanya 8% lebih tinggi dari luas bersih hitungan. Logisnya, efek lobang harus tergantung pada perkiraan bentuk patahan tarik yang melalui lobang-lobang tersebut sebagai keadaan batas yang menentukan.

Spesifikasi lain mengikuti prosedur yang lebih konservatif yang telah digunakan selama bertahun-tahun. *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [1.3] dan *American Railway Engineering Association* (AREA) [1.4] menggunakan penampang bersih (luas lobang dikurangkan dari kedua flens) untuk menghitung tegangan flens tarik, dan menggunakan penampang bruto (tidak ada lobang pada flens mana pun) untuk menghitung tegangan tekan.

Contoh-contoh prosedur untuk memperhitungkan lobang-lobang penyambung dapat dijumpai dalam **Bab 13** pada bagian mengenai sambungan balok dan gelagar.

7.9.2 Lobang-lobang Badan

Spesifikasi AISC [1.5, 1.15] mengijinkan pengabaian lobang-lobang alat sambung yang terletak pada badan balok, terutama karena alasan bahwa lobang-lobang alat sambung pada flens dapat juga diabaikan. Lobang-lobang besar yang dibuat pada badan balok benar-benar berlainan masalahnya. Untuk masalah lobang besar, dibutuhkan analisis khusus dan biasanya lobang ini harus diperkuat dengan menempelkan material pelat ekstra, kadang kala termasuk pengaku, di sekitar sisi-sisi lobang. Namun pembahasan mengenai hal ini di luar jangkauan buku ini; walaupun demikian toh para Pembaca dapat membuka karya Bower (7.24, 7.25, 7.26, dan 7.29], Frost dab Leffler [7.27], Mandel, Brennan, Wasil, dan Antoni [7.28], Cooper dan Snell [7.30], Chan dan Redwood [7.31, 7.32], Wang,

Snell, dan Cooper [7.33], Larson dan Shah [7.34], Cooper, Snell, dan Knotsman [7.35], Redwood, Baranda, dan Daly [7.36], Redwood dan Uenoya [7.37], Daugherty [7.38], dan Narayanan dan Der-Avanessian [7.39]. Redwood [7.40] telah membuat tabel-tabel untuk lobang-lobang persegi, dan Kussman dan Cooper [7.41] membuat sebuah contoh desain.

7.10 Teori Lentur secara Umum

Sejauh ini kita hanya memperhatikan profil-profil simetrik yang dibebani secara simetrik pula di mana $f = Mc/I$ dapat digunakan dengan tepat untuk menghitung tegangan lentur elastik. Pengembangan berikut ini membahas lenturan umum dari balok prismatik sembarang, yakni balok yang memiliki suatu bentuk penampang lintang yang tidak bervariasi sepanjang batangnya. Balok tersebut diasumsikan pula bebas dari puntiran.

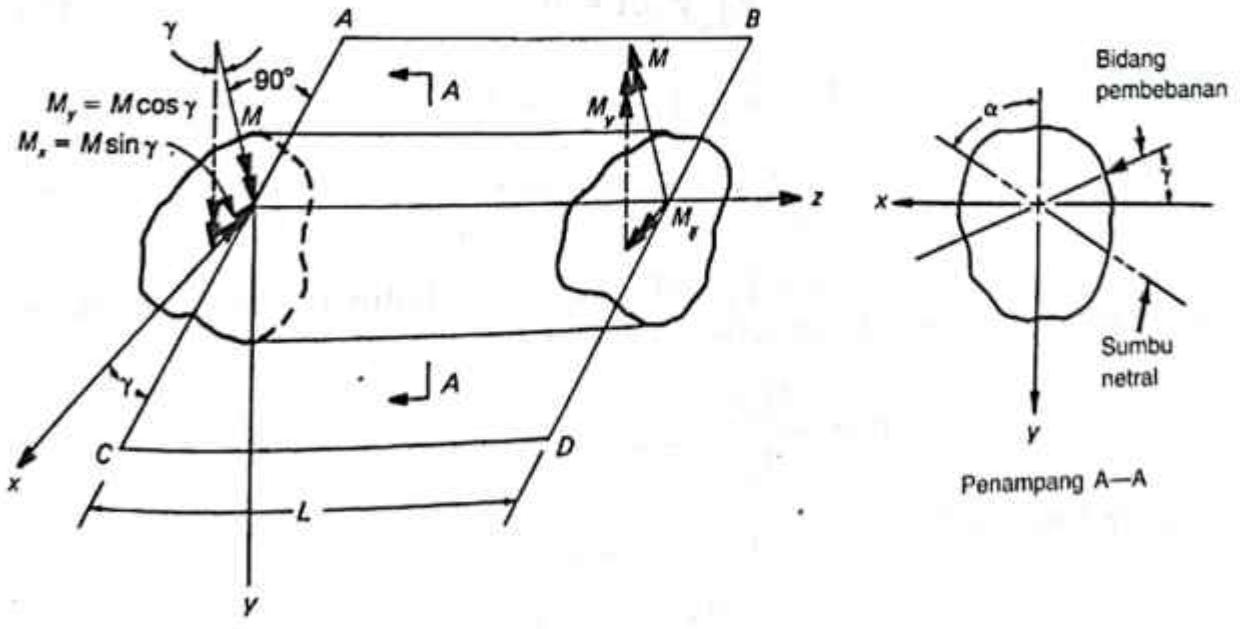
Perhatikanlah balok lurus berpenampang-lintang merata dalam **Gambar 7.10.1** yang dikenai momen murni pada bidang *ABCD* yang membentuk sudut γ terhadap bidang xz. Momen ini digambarkan oleh vektor-vektor yang tegak lurus terhadap bidang kerja (momen positif didefinisikan dengan menggunakan kaidah tangan kanan untuk rotasinya).

Kemudian selidikilah suatu bagian balok yang panjangnya z seperti **Gambar 7.10.2*a***. Untuk memenuhi keseimbangan benda bebasnya, dibutuhkan:

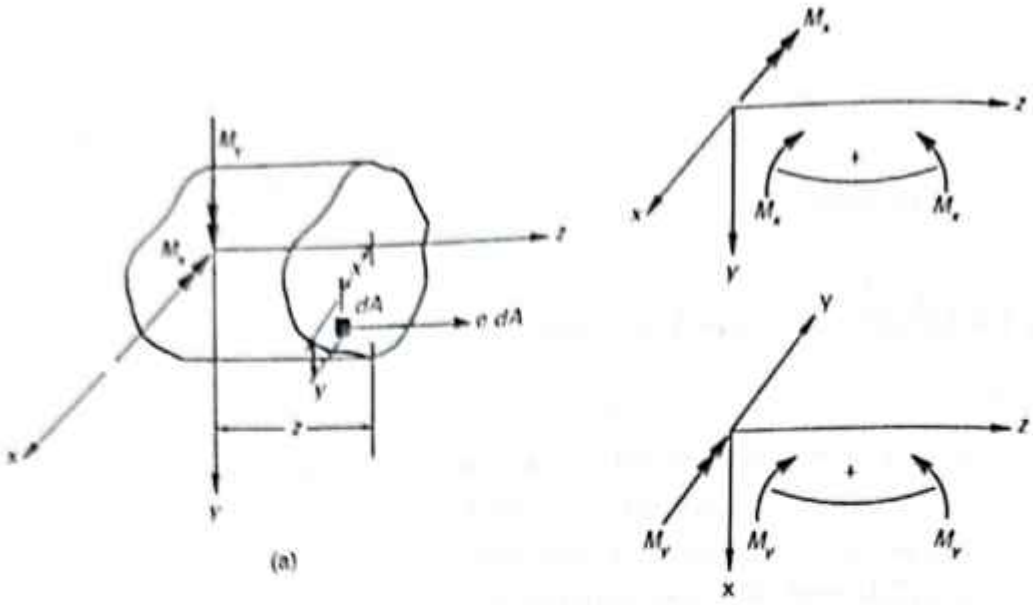
$$\Sigma F_z = 0, \qquad \int_A \sigma \, dA = 0 \tag{7.10.1}$$

$$\Sigma M_x = 0, \qquad M_x = \int_A y\sigma \, dA \tag{7.10.2}$$

$$\Sigma M_y = 0, \qquad M_y = \int_A x\sigma \, dA \tag{7.10.3}$$



Gambar 7.10.1 *Balok prismatik dalam lenturan murni.*



Gambar 7.10.2 Benda bebas bagian balok yang panjangnya z

Dari **Gambar 7.10.2*b*** perlu diperhatikan bahwa momen-momen M_x dan M_y kedua-duanya positif menurut konvensi umum yang menganggap lentur positif adalah yang menyebabkan tekan pada bagian atas balok tersebut. Demikian pula, subskrip untuk M juga menunjukkan sumbu *di mana* terjadi lenturan, yakni arah vektor momennya.

7.10.1 Lentur Hanya pada Bidang yz

Bila terjadi lentur pada bidang yz, tegangan σ akan sebanding dengan y. Dengan demikian:

$$\sigma = k_1 y \tag{7.10.4}$$

Dengan menggunakan **Persamaan 7.10.1** sampai **7.10.3** akan diperoleh:

$$k_1 \int_A y \, dA = 0 \tag{7.10.5}$$

$$M_x = k_1 \int_A y^2 \, dA = k_1 I_x \tag{7.10.6}$$

$$M_y = k_1 \int_A xy \, dA = k_1 I_{xy} \tag{7.10.7}$$

Dari persamaan pertama di atas, $\int_A y \, dA = 0$ berarti bahwa x merupakan sumbu sentroidal. Kemudian, tegangan tersebut dapat dihitung sebagai:

$$\sigma = \frac{M_x y}{I_x} \quad \text{atau} \quad \frac{M_y y}{I_{xy}} \tag{7.10.8}$$

dan sudut γ harus sedemikian rupa sehingga:

$$\tan \gamma = \frac{M_x}{M_y} = \frac{I_x}{I_{xy}} \tag{7.10.8}$$

Secara praktis, tampaknya tak mungkin suatu penampang balok tak simetrik dapat ditempatkan pada suatu bidang yang membentuk sudut γ dengan bidang xz dan hanya memiliki lentur yang terjadi pada bidang yz. **Persamaan 7.10.9** juga menunjukkan bila suatu penampang digunakan dengan paling tidak satu sumbu simetri (di mana $\int_A xy\,dA = I_{xy} = 0$), tan $\gamma = \infty$, $\gamma = 90°$, yang berarti bahwa pembebanan maupun lentur terjadi pada bidang xy.

Sebagai kesimpulan penting di sini adalah bahwa hanya bila $I_{xy} = 0$ saja lentur akan terjadi pada bidang pembebanan. Misalnya, untuk profil tak simetrik seperti siku-siku atau profil Z yang dibebani pada bidang xz atau yz, bidang pembebanan dan bidang lenturan akan berlainan.

7.10.2 Lentur Hanya pada Bidang xz

Bila lenturan terjadi pada bidang xz, tegangan σ akan proporsional dengan x. Dengan demikian:

$$\sigma = k_2 x \tag{7.10.10}$$

dan dari **Persamaan 7.10.1** sampai **7.10.3** akan diperoleh:

$$k_2 \int_A x\,dA = 0 \tag{7.10.11}$$

yang berarti bahwa y merupakan sumbu sentroidalnya. Demikian pula:

$$M_x = k_2 \int_A xy\,dA = k_2 I_{xy} \tag{7.10.12}$$

$$M_y = k_2 \int_A x^2\,dA = k_2 I_y \tag{7.10.13}$$

dan:

$$\tan \gamma = \frac{M_x}{M_y} = \frac{I_{xy}}{I_y} \tag{7.10.14}$$

Dalam kasus di mana $I_{xy} = 0$, tan $\gamma = 0$, yakni pembebanan dan lenturan keduaduanya terjadi pada bidang xz.

7.10.3 Lenturan Tidak pada Bidang xz maupun yz

Ini merupakan kasus yang realistik bila kita membicarakan lentur pada penampang tak simetrik. Karena diasumsikan bahwa semua tegangan berada dalam batas elastik, tegangan total σ merupakan jumlah dari tegangan yang disebabkan oleh lenturan pada masing-masing bidang xz dan yz. Dengan demikian:

$$\sigma = k_1 y + k_2 x \tag{7.10.15}$$

dan:

$$M_x = k_1 I_x + k_2 I_{xy} \tag{7.10.16}$$

$$M_y = k_1 I_{xy} + k_2 I_y \tag{7.10.17}$$

Penyelesaian **Persamaan 7.10.16** dan **7.10.17** untuk k_1 dan k_2 dan substitusi ke dalam **Persamaan 7.10.15** memberikan:

$$\sigma = \frac{M_x I_y - M_y I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2} y + \frac{M_y I_x - M_x I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2} x \tag{7.10.18}$$

yang merupakan persamaan lentur umum. Asumsi yang terkandung dalam **Persamaan 7.10.18** adalah (*a*) baloknya lurus; (*b*) penampang lintangnya konstan; (*c*) x dan y merupakan sumbu sentroid yang saling tegak lurus; dan (*d*) tegangannya sebanding dengan regangannya dan harga maksimumnya masih berada dalam batas proporsional.

7.10.4 Sumbu-sumbu Utama

Sumbu utama merupakan sumbu sentroid yang saling tegak lurus di mana momen inersianya maksimum atau minimum. Lagipula, hanya sumbu ini sajalah yang saling tegak lurus di mana produk inersianya I_{xy} sama dengan nol. Bila suatu penampang memiliki suatu sumbu simetri, sumbu tersebut merupakan sumbu utama, dan **Persamaan 7.10.18** menjadi:

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y + \frac{M_y}{I_y} x \tag{7.10.19}$$

Bila tidak ada sumbu simetri, **Persamaan 7.10.19** masih dapat digunakan sejauh sumbu utama diletakkan dan besarnya M_x, M_y, I_x, I_y, x, dan y kesemuanya dikoreksi seolah-olah mengacu kepada sumbu-sumbu utama. Biasanya transformasi sedemikian tidak memberikan keuntungan dalam penggunaan **Persamaan 7.10.18** secara langsung.

7.10.5 Inklinasi Sumbu Netral

Bila beban-beban yang bekerja pada suatu batang lentur melalui sentroid penampang lintangnya namun terinklinasi terhadap salah satu sumbu utamanya, tegangannya dapat ditentukan dengan menggunakan **Persamaan 7.10.18** atau **7.10.19**. Meskipun demikian, harus diperhatikan pula bahwa sumbu netralnya tidak perlu tegak lurus terhadap bidang pembebanan. Seperti diperlihatkan dari **Persamaan 7.10.9** dan **7.10.14** serta **Gambar 7.10.1**:

$$\tan \gamma = \frac{M_x}{M_y} \tag{7.10.20}$$

Karena tegangan di sepanjang sumbu netral sama dengan nol, σ dapat dibu-

at sama dengan nol dalam **Persamaan 7.10.18**. Dengan $\sigma = 0$, penyelesaian untuk $-x/y$ memberikan:

$$-\frac{x}{y} = \left(\frac{M_x I_y - M_y I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2}\right)\left(\frac{I_x I_y - I_{xy}^2}{M_y I_x - M_x I_{xy}}\right) \tag{7.10.21}$$

Dari **Gambar 7.10.1**, Penampang *A–A*, terlihat bahwa pada suatu titik pada sumbu netralnya, $\tan \alpha = -x/y$. Bila pembilang dan penyebut dari ruas kanan **Persamaan 7.10.21** dibagi dengan M_y akan diperoleh:

$$\tan \alpha = \frac{\frac{M_x}{M_y} I_y - I_{xy}}{I_x - \frac{M_x}{M_y} I_{xy}} \tag{7.10.22}$$

Substitusi dari **Persamaan 7.10.20** ke dalam **7.10.22** memberikan:

$$\tan \alpha = \frac{I_y \tan \gamma - I_{xy}}{I_x - I_{xy} \tan \gamma} \tag{7.10.23}$$

Bila suatu penampang diselidiki dengan sebuah sumbu simetri saja, $I_{xy} = 0$, **Persamaan 7.10.23** akan menjadi:

$$\tan \alpha = \frac{I_y}{I_x} \tan \gamma \tag{7.10.24}$$

■ Contoh 7.10.1

Sebuah profil W18×50 digunakan sebagai balok yang terkena pembebanan dengan inklinasi sebesar 5° dari sumbu vertikal seperti dalam **Gambar 7.10.3**. Tentukanlah inklinasi sumbu netralnya.

Penyelesaian

$$I_x = 800 \text{ inch}^4; \quad I_y = 40.1 \text{ inch}^4$$

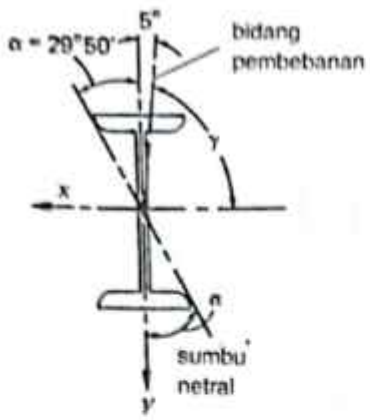
$$\tan 85^\circ = \tan \gamma$$

Dengan **Persamaan 7.10.24**:

$$\tan \alpha = \frac{I_y}{I_x} \tan \gamma = \frac{40.1}{800} \tan 85^\circ = 0.573$$

$$\alpha = 29.8^\circ \ (29^\circ 50')$$

■



Gambar 7.10.3 Balok yang dibebani secara biaksial dari Contoh 7.10.1

■ Contoh 7.10.2

Hitunglah tegangan lentur maksimum pada sebuah siku $6\times4\times{}^1/_2$ dengan kaki panjang ke arah bawah bila beban layanannya 0,5 kip/ft dengan panjang bentang 10 ft pada tumpuan sederhana (*lihat* **Gambar 7.10.4**). Bandingkan hasilnya bila profil siku tersebut diasumsikan sebagai bebas mengalami lenturan pada arah mana pun dengan bila diasumsikan bahwa lenturan hanya terjadi pada bidang vertikal saja.

Penyelesaian:

(a) Siku bebas melentur ke segala arah. Dengan menggunakan **Persamaan 7.10.18** dan sifat-sifat menurut AISC:

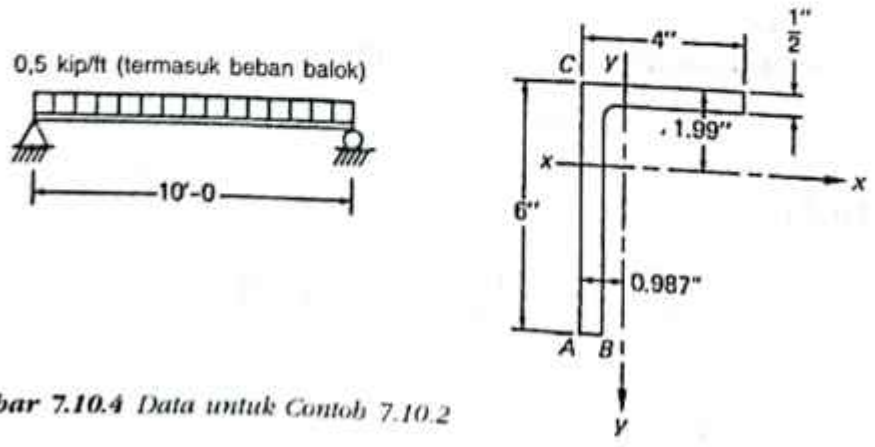
$$I_x = 17.4 \text{ inch}^4, \qquad I_y = 6.27 \text{ inch}^4$$

$$I_{xy} = [6(3.00 - 1.99)(-0.987 + 0.25) + 3.5(2.25 - 0.987)(-1.99 + 0.25)]0.50$$

$$= [(-4.47) + (-7.69)]0.50 = -6.08 \text{ inch}^4$$

$$M_x = {}^1/_8(0.5)(10)^2 = 6.25 \text{ ft-kips} = 75 \text{ in-kips}$$

$$M_y = 0$$



Gambar 7.10.4 Data untuk Contoh 7.10.2

Tegangan pada titik A:

$$f_A = \frac{M_x(I_y y - I_{xy} x)}{I_x I_y - I_{xy}^2} = \frac{6.25(12)[6.27(+4.01) - (-6.08)(-0.987)]}{17.4(6.27) - (6.08)^2}$$

$$= \frac{75(19.14)}{72.1} = 75(0.265) = +\ 19.9 \text{ ksi (tarik)}$$

Tegangan pada titik B:

$$f_B = \frac{75[6.27(+4.01) - (-6.08)(-0.487)]}{72.1}$$

$$= 75(0.308) = +23.1 \text{ ksi (tarik)}$$

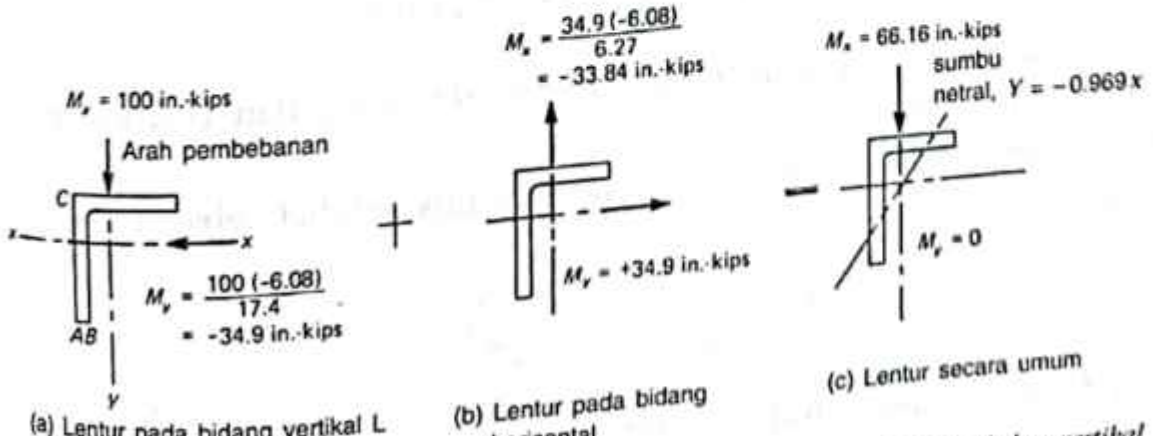
Tegangan pada titik C:

$$f_C = \frac{75[6.27(-1.99) - (-6.08)(-0.987)]}{72.1}$$

$$= 75(-0.256) = -19.2 \text{ ksi (tekan)}$$

(b) Siku bebas melentur ke segala arah. Gunakan metode lain yang dianjurkan oleh Gaylord dan Gaylord [7.42] (pp. 143—147). Hitunglah tegangan dengan pertama-tama mengasumsikan bahwa baloknya hanya melentur dalam bidang yz saja. Sebaiknya dimisalkan $M_x = 100$ inch.kips. Kemudian, menurut **Persamaan 7.10.9**, $M_y = M_x I_{xy}/I_x$ juga harus bekerja (**Gambar 7.10.5*a***) bila lentur hanya terjadi pada bidang yz saja.

Karena pembebanan sesungguhnya hanya memiliki M_x, akibatnya M_y harus disingkirkan dengan menggunakan suatu momen yang sama dan berlawanan, baru



Gambar 7.10.5 Penyelesaian dengan superposisi lenturan pada bidang horisontal dan vertikal

kemudian perhatikan bahwa lenturan hanya terjadi pada bidang xz saja. Artinya bahwa, menurut **Persamaan 7.10.14**, $M_x = M_y I_{xy}/I_y$ (*lihat* **Gambar 7.10.5b**) digunakan secara serentak.

Lentur pada bidang vertikal:

$$M_x = 75.0\left(\frac{100}{66.16}\right) = 113.4 \text{ inch-kips}$$

$$f_{A_1} = f_{B_1} = \frac{113.4(4.01)}{17.4} = 26.1 \text{ ksi} \quad \text{(tarik)}$$

$$f_{C_1} = \frac{113.4(1.99)}{17.4} = 13.0 \text{ ksi} \quad \text{(tekan)}$$

Lentur pada bidang horisontal:

$$M_y = -\,113.4\,(-6.08)/17.4 = 39.6 \text{ inch-kips}$$

$$f_{A_2} = f_{C_2} = \frac{39.6(0.987)}{6.27} = 6.2 \text{ ksi} \quad \text{(tekan)}$$

$$f_{B_2} = \frac{39.6(0.487)}{6.27} = 3.1 \text{ ksi} \quad \text{(tekan)}$$

Tegangan total pada lenturan umum:

$$f_A = +26.1 - 6.2 = +19.9 \text{ ksi} \quad \text{(tarik)}$$

$$f_B = +26.1 - 3.1 = +23.0 \text{ ksi} \quad \text{(tarik)}$$

$$f_C = -13.0 - 6.2 = -19.2 \text{ ksi} \quad \text{(tekan)}$$

yang masing-masing sesuai dengan harga sebesar 19.9; 23.1; dan 19.2 ksi seperti hitungan dengan rumus umum.

Persamaan umum untuk tegangan pada sesuatu titik terlihat sebagai:

$$f = \frac{113.4y}{17.4} + \frac{39.6x}{6.27}$$

di mana bila $f = 0$, sumbu netral $y = -0.969x$.

Metode superposisi ini memungkinkan desainer memvisualisasikan apa yang

terjadi. Bila konstruksi yang tertempel padanya menghalangi penampang tak simetrik melentur pada bidang vertikal, kapasitas momen perlawanannya dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 7.10.9**.

(c) Siku dihalangi melentur pada bidang vertikal:

$$f_A = f_B = \frac{75(4.01)}{17.4} = +17.3 \text{ ksi} \quad \text{(tarik)}$$

$$f_C = \frac{75(-1.99)}{17.4} = -8.6 \text{ ksi} \quad \text{(tekan)}$$

Kecuali bila kendala horisontal memang bekerja, tegangan tarik pada titik B diestimasi lebih rendah 25% dan tegangan tekan di C diestimasi lebih rendah 55%.

Kerapkali desainer mengasumsikan $f = M_y/I$ dapat diterapkan tanpa memperhatikan ada atau tidaknya kekangan horisontal yang cukup. Meskipun biasanya terdapat kekangan dalam batas-batas tertentu, sebaiknya balok tak simetrik perlu direncanakan dengan hati-hati. Pengabaian komponen lateral (horisontal) selalu berada pada peninjauan yang tidak aman. ■

7.11 Lentur Biaksial pada Penampang Simetrik

Tegangan lentur pada penampang yang memiliki paling sedikit satu sumbu simetri dan dibebani melalui sentroidnya dapat dihitung dengan **Persamaan 7.10.19** yang bila dimodifikasi dapat memberikan tegangan maksimum σ sebagai:

$$\sigma = \frac{M_x}{S_x} + \frac{M_y}{S_y} \tag{7.11.1}$$

di mana $S_x = I_x/(d/2)$ dan $S_y = I_y/(b/2)$ merupakan nilai modulus penampangnya.

7.11.1 Kekuatan Nominal

Kekuatan nominal dari suatu penampang yang terkena lenturan biaksial tidak dapat segera ditentukan. Kekuatan tersebut akan tergantung pada proporsi penampang dan besar relatif momen M_x dan M_y yang bekerja. Penggunaan suatu persamaan interaksi seperti yang digunakan untuk balok-kolom tidak dianggap cukup konservatif untuk kasus-kasus di mana tidak ada tekan atau tarik aksial. Spesifikasi ASD AISC secara tradisional membatasi tegangan kombinasi menurut **Persamaan 7.11.1** sampai pada tegangan maksimum sebesar 0.60 F_y. Hal ini secara efektif berarti bahwa kekuatan nominal dari penampang dengan kombinasi M_y dan M_x akan tercapai bila tegangan serat terluarnya mencapai tegangan leleh F_y. Dengan

demikian, seluruh penampang lintang akan bersifat elastik; tanpa memperhatikan kemampuan penampang tersebut untuk mengalami deformasi plastik. Tentu saja pendekatan ini konservatif.

Menurut pendekatan di atas, persamaan tegangan elastik, **Persamaan 7.11.1**, dapat digunakan dengan momen kekuatan maksimum nominal, M_{nx} dan M_{ny}, dan tegangan maksimum F_y. Dengan demikian, kekuatan nominalnya dapat diasumsikan tercapai bila:

$$\frac{M_{nx}}{S_x} + \frac{M_{ny}}{S_y} = F_y \tag{7.11.2}$$

Alternatif lain akan membutuhkan hubungan interaksi yang lebih kompleks, seperti yang diberikan dalam LRFD-Apendiks H3. Untuk lentur biaksial dari batang berprofil I, persamaan interaksi diberikan dengan memperhitungkan pengaruh parameter penampang lintang b_f/d (yakni lebar flens dibanding kedalaman/tinggi profil).

7.11.2 Load and Resistance Factor Design

Metode 1. LRFD-H2 menggunakan pendekatan tegangan kombinasi dari **Persamaan 7.11.2** dengan mengingat bahwa provisi keamanan memasukkan efek kelebihan beban dan pengaruh kekuatan yang lebih rendah. M_{nx} *yang dibutuhkan* sama dengan M_{nx} dibagi dengan faktor reduksi kekuatan ϕ. Substitusi untuk M_{nx} dan M_{ny} dalam **Persamaan 7.11.2** memberikan:

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b S_x} + \frac{M_{uy}}{\phi_b S_y} \leq F_y \tag{7.11.3}$$

di mana $\phi = 0.90$.

Untuk keperluan desain, perkalian **Persamaan 7.11.3** dengan S_x dan membaginya dengan F_y akan memberikan:

$$S_x \geq \frac{M_{ux}}{\phi_b F_y} + \frac{M_{uy}}{\phi_b F_y}\left(\frac{S_x}{S_y}\right) \tag{7.11.4}$$

Untuk pemilihan profil tempa standar, kita temukan bahwa untuk kedalaman/tinggi penampang tertentu, rasio S_x/S_y relatif konstan. Dalam **Tabel 7.11.1** diberikan rentang tipikal dari rasio harga semacam itu. Penampang paling ringan dengan tinggi/kedalaman tertentu akan merupakan penampang yang paling sempit sehingga memiliki harga S_x/S_y yang lebih besar.

Tabel 7.11 Harga S_x/S_y tipikal

Profil	Kedalaman d (inch)	S_x/S_y
M	6,8	5—7
M'	10,12	8—11
M	14,16	11—12
W dan M ringan	4—8	3
W	8,10	3—4
W	12	3—6
W	14(sampai 84 lb/ft)	4—8
W	14(lebih dari 84 lb/ft)	$2^1/_2$—3
W	16,18,21	5—9
W	24—27	6—10
W	30,33,36	7—12
S	6—8	d
S	10—18	$0{,}75d$
C	sampai dengan 7	$1{,}5d$
C	8—10	$1{,}25d$
C	12,15	d

Gaylord dan Gaylord [7.42] (p.168) memberikan sebuah metoda alternatif untuk penampang profil I (W, M, dan S). Besarnya S_x/S_y dihitung secara pendekatan dengan menggunakan sifat-sifat balok dengan mengabaikan pengaruh pelat badan. Dengan b_f = lebar flens dan d = kedalaman, ini memberikan:

$$\frac{S_x}{S_y} = \frac{I_x(b_f/2)}{(d/2)I_y} = \frac{2b_f t(d/2)^2(b_f/2)}{(d/2)(2)(1/12)tb_f^3} = \frac{3d}{b_f} \qquad (7.11.5)$$

yang dianjurkan dinaikkan sampai $3.5d/b_f$ untuk memperhitungkan kesalahan yang lebih besar pada pembilang ketimbang pada penyebutnya yang diakibatkan oleh pengabaian pelat badannya.

Metode 2. Persamaan interaksi dari LRFD-Apendiks H3 adalah sebagai berikut:

1. Untuk $0.5 \leq b_f/d \leq 1.0$:

$$\left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}}\right)^{1.6} + \left(\frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right)^{1.6} \leq 1 \qquad (7.11.5)$$

2. Untuk $0.3 \leq b_f/d \leq 0.5$:

$$\left(\frac{C_{mx}M_{ux}}{\phi_b M_{nx}}\right)^{0.4 + b_f/d} + \left(\frac{C_{my}M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right)^{0.4 + b_f/d} \leq 1 \qquad (7.11.6)$$

di mana C_{mx} dan C_{my} merupakan suku-suku gradien momen yang penurunan-

nya kita bicarakan dalam **Bab 12** mengenai balok-kolom. Pengambilan C_{mx} dan C_{my} sama dengan 1.0 selalu konservatif dengan asumsi momen lenturnya konstan di sepanjang bentangnya.

3. Untuk $b_f/d < 0.3$:

$$\left(\frac{C_{mx}M_{ux}}{\phi_b M_{nx}}\right)^{1.0} + \left(\frac{C_{my}M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right)^{1.0} \leq 1 \qquad (7.11.7)$$

di mana $\phi_b = 0.90$ untuk **Persamaan 7.11.5** sampai dengan **7.11.7**.

Persamaan di atas berlaku untuk balok-balok dari *braced frame* (*lihat* **Bagian 6.9**) yang memiliki tumpuan lateral maupun tidak. Persamaan pertama, **Persamaan 7.11.5** berlaku untuk penampang yang flensnya relatif lebar dibandingkan kedalaman keseluruhan; dari sebab itu, tumpuan lateral tidak diperhatikan. Perilaku tak elastik dianggap dapat saja terjadi; sehingga, M_{nx} dan M_{ny} dapat diambil sebagai kekuatan momen plastik. Ini berarti bahwa penampang tersebut "kompak" untuk tekuk lokal.

Untuk **Persamaan 7.11.6** dan **7.11.7**, M_{nx} dan M_{ny} ditentukan sama seperti kekuatan nominal untuk suatu balok yang dibebani secara uniaksial; harga maksimumnya merupakan momen plastik untuk semua penampang kompak yang diberi topangan secara leteral.

7.11.3 Allowable Stress Design

Bila kedua ruas **Persamaan 7.11.3** dibagi dengan faktor keamanan $\gamma/\phi = 1.67$, akan memberikan hubungan antara tegangan kombinasi beban layanan f_b dengan tegangan ijin F_b:

$$\left(f_b = \frac{M_x}{S_x} + \frac{M_y}{S_y}\right) \leq \left(F_b = \frac{F_y}{\gamma/\phi} = 0.60\ F_y\right) \qquad (7.11.8)$$

dan format desain yang serupa dengan **Persamaan 7.11.4** menjadi:

$$S_x \geq \frac{M_x}{F_b} + \frac{M_y}{F_b}\left(\frac{S_x}{S_y}\right) \qquad (7.11.9)$$

■ Contoh 7.11.1

Pilihlah penampang W atau M yang paling ringan untuk memikul momen beban layanan $M_x = 15$ ft-kips dan $M_y = 5$ ft-kips, dan momen beban hidup $M_x = 45$ ft-kips dan $M_y = 20$ ft-kips. Anggaplah terdapat sabukan lateral yang mencukupi. Gunakan baja dengan $F_y = 50$ ksi. Gunakan *Load and Resistance Factor Design*.

Penyelesaian:

(a) Hitung beban terfaktor M_{ux} dan M_{uy}:

$$M_{ux} = 1.2(15) + 1.6(45) = 90 \text{ ft-kips}$$

$$M_{uy} = 1.2(5) + 1.6(20) = 38 \text{ ft-kips}$$

(b) Dengan menggunakan *Metode 1*, tentukan modulus penampang S_x yang dibutuhkan, dan pilihlah penampangnya. **Persamaan 7.11.4** memberikan:

$$S_x \text{ yang dibutuhkan} \geq \frac{90(12)}{0.90(50)} + \frac{38(12)}{0.90(50)}\left(\frac{S_x}{S_y}\right)$$

$$\geq 24 + 10S_x/S_y$$

Dari **Tabel 7.11.1**, rasio S_x/S_y dapat diharapkan berada dalam rentang nilai 3 atau 4; dengan demikian $S_x \approx 54$ sampai 64 inch^3.

Di sini akan lebih mudah menggunakan tabel ASD-Manual [1.7], "ALLOWABLE STRESS DESIGN SELECTION TABLE", untuk menemukan W16×40, $S_x = 64.7$ inch^3. Untuk balok ini, $S_x/S_y = 64.7/8.25$, dan jelaslah bahwa balok tersebut tidak mencukupi. Masih dalam tabel yang sama, terlihat bahwa profil-profil W paling ringan (tipe *boldface*) tetap tidak mencukupi sampai dengan W21×62 yang memiliki $S_x/S_y \approx 9$. Dengan demikian, tampaknya beratnya sekitar 60 lb/ft.

Hanya dengan menggunakan LRFD-Manual [1.17], kita harus menggunakan tabel modulus plastik Z_x, "LOAD FACTOR DESIGN SELECTION TABLE". Modulus penampang S_x dapat secara pendekatan dikonversikan menjadi Z_x dengan dikalikan dengan faktor bentuk rata-rata sebesar 1.12 (*lihat* **Bagian 7.3**). Untuk kasus ini, harga coba S_x mula-mula adalah 54 sampai dengan 64 yang akan menjadi $Z_x \approx 61$ sampai dengan 72 inch^3, dan akan diperoleh pula penampang coba yang sama yakni W16×40.

Coba W10×60:

$$S_x/S_y = 66.7/23.0 = 2.9$$

$$S_x \text{ yang dibutuhkan} = 24 + 10(2.9) = 53 \text{ inch}^3 < 66.7 \text{ inch}^3 \quad \text{OK}$$

Untuk W10×49:

$$S_x/S_y = 54.6/18.7 = 2.92$$

$$S_x \text{ yang dibutuhkan} = 24 + 10(2.92) = 53.6 \text{ inch}^3 \approx 54.6 \text{ inch}^3 \quad \text{OK}$$

Gunakan W10×49, $F_y = 50$ ksi.

Bila telah kita asumsikan bahwa diinginkan kedalaman sebesar 10 inch, dan digunakan **Persamaan 7.11.4** dengan koefisien 3.5 dan bukannya 4:

$$S_x \text{ yang dibutuhkan} = 24 + 10(3.5d/b_f)$$

Untuk penampang W10, d/b_f adalah 1 atau 1.25:

$$S_x \text{ yang dibutuhkan} = 24 + 35 = 59 \text{ inch}^3$$

yang juga akan membutuhkan pengecekan terhadap dua penampang. Pendekatan yang lebih umum menggunakan harga S_x/S_y tipikal yang tampaknya paling bermanfaat bila tidak disyaratkan suatu kedalaman tertentu.

(c) Gunakan *Metode 2* dan lihatlah apakah dapat diterima suatu penampang lain yang lebih ringan. Karena tampaknya terdapat kemampuan deformasi tak elastik dari penampang profil I, *Metode 1* diharapkan cukup konservatif.

Selidikilah W10×49 yang dipilih pada bagian (b):

$$\text{Hitunglah } b_f/d = 10.00/9.98 = 1.00$$

Karena $0.5 \leq bf/d \leq 1.0$ hampir terpenuhi, gunakan **Persamaan 7.11.5**. Kekuatan momen nominal M_{nx} dan M_{ny} merupakan kekuatan momen plastik untuk lentur uniaksial:

$$M_{nx} = M_{px} = Z_x F_y = 60.4(50)/12 = 252 \text{ ft-kips}$$

$$M_{ny} = M_{py} = Z_y F_y = 28.3(50)/12 = 118 \text{ ft-kips}$$

Substitusi ke dalam **Persamaan 7.11.5** dengan $\phi_b = 0.90$ memberikan:

$$\left(\frac{90}{0.90(252)}\right)^{1.6} + \left(\frac{38}{0.90(118)}\right)^{1.6} \leq 1$$

$$(0.397)^{1.6} + (0.358)^{1.6} = 0.77 < 1$$

Dengan kriterium ini, batang tersebut didesain berlebihan, pilihlah penampang yang lebih ringan. Coba W10×39:

$$\left(\frac{90}{0.90(195)}\right)^{1.6} + \left(\frac{38}{0.90(71.7)}\right)^{1.6} = 0.77 < 1$$

Meskipun kriterium tersebut tetap menunjukkan bahwa penampang ini lebih kuat dari yang dibutuhkan, penampang teringan berikutnya (W10×33) memberikan nilai kriterium sebesar 1.06.

Gunakan W10×39, $F_y = 50$ ksi.

Acuan Terpilih

7.1. T. V. Galambos. "History of Steel Beam Design," *Engineering Journal*, AISC, 14 4 (Fourth Quarter 1977),141-147.