

621.184

DJO

k

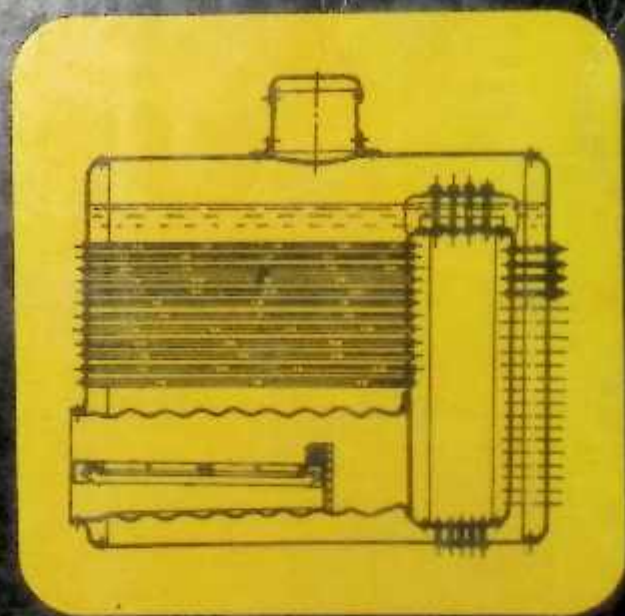
1987

CI

PERPUS DIISI F
U N D I P

KETEL UAP

Ir. M. J. Djokosetyardjo



AN
S

Ketel Uap



P 9 9 0 9 2 4

Joko setyarjo, M.Y., 1932 —

Ketel Uap/M.J. Djokosetyardjo. —Cet. 1 —

Jakarta: Pradnya Paramita, 1987.

xv; 326 hal.; illus.; 23,5 cm.

ISBN 979-408-121-3

1. ketel uap. I. Judul

621.184

PERPUSTAKAAN : D III F	
No. INV	: 0924/PP/c1
TANGGAL	: 15/3 99

Ketel Uap

Oleh: Ir. M.J. Djokosetyardjo

© Hak cipta Dilindungi oleh Undang-undang

Penerbit: PT Pradnya Paramita
Jalan Kebon Sirih 46
Jakarta 10340

Cetakan Pertama tahun 1987

Pencetak: CV Pelita Kasih
SP. 011-02.SP/PPP/I

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS



1. JUDUL NASKAH YANG DITULIS: KETEL UAP
2. NAMA PENULIS : Ir. M.J. Djokosetyardjo
3. TEMPAT/TANGGAL LAHIR : Sragen, Sala. / 14 Mei 1932
4. ALAMAT : a. KANTOR : PERUM OTORITA
JATILUHUR
Jl. Rasuna Said Kv. 5B
JAKARTA
Telpon: 517093
b. RUMAH : Kompleks P.L.N. no. 15
Senayan
JAKARTA SELATAN
Telpon: 5482521
5. RIWAYAT HIDUP:
 - a. PENDIDIKAN:
 - 1938-1944: Sekolah Dasar 6 tahun, Bumijawa, Tegal.
 - 1944-1948: S.M.P. Pekalongan/Klaten.
 - 1950-1952: S.M.A. Pekalongan.
 - 1952-1958: Fakultas Teknik Bandung (Sekarang ITB) Jurusan MESIN.
 - b. PEKERJAAN UTAMA:
 - 1958-1960: Kepala Bagian Pembangkitan PLN Pusat Distribusi.
 - 1960-1963: Wajib Militer pada TNI AL,
Pangkat terakhir: Kapten,
Jabatan: Assisten Perwira Logistik Angkatan Laut
Mandala Trikora/Komando Armada Tugas I

- 1963-1965: Kepala Urusan Mesin PLN Direksi Konstruksi.
- 1965-1968: Pemimpin PLN Daerah Eksplotasi IX Jawa Timur.
- 1968-1970: Kepala Dinas Perencanaan Perbekalan, Direktorat Jendral Tenaga Listrik.
- 1970-1973: Tenaga Ahli pada Proyek P₄S, Departemen Pekerjaan Umum.
- 1973-1980: Inspektur Pembantu pada Inspektorat Jendral Departemen Pekerjaan Umum.
- 1980-1984: Inspektur pada Inspektorat Jendral Departemen PU.
- 1984-sekarang: Direktur Perlistrikan PERUM OTORITA JATI-LUHUR.

c. PEKERJAAN DI BIDANG PENDIDIKAN:

- 1958-1960: Dosen Motor Bakar pada Akademi Teknik Nasional, Jakarta.
- 1960-1963: Dosen Ketel Uap pada Institut 10 November di Surabaya.
- 1963-1965: Dosen Ketel Uap pada Universitas Pancasila di Jakarta.
Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Pancasila di Jakarta.
- 1965-1970: Ketua Jurusan Mesin INSTITUT TEKNOLOGI SURABAYA.
- 1970-1986: Dosen Ketel Uap Fakultas Teknik Universitas Pancasila di Jakarta, dan merangkap sebagai Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Pancasila di Jakarta.
- 1975-1986: Dosen Ketel Uap pada STTN/ISTN.
- 1978-1986: Dosen Ketel Uap pada Fakultas Teknik Universitas Katolik Atmajaya di Jakarta. Tahun 1981-1984 sebagai Ketua Jurusan Mesin, pada Fakultas Teknik Universitas Katolik Atmajaya di Jakarta.
- 1978-1986: Dosen Motor Bakar pada Fakultas Teknik, Universitas Trisakti di Jakarta.
- 1978-1986: Dosen Ketel Uap pada Fakultas Teknik Universitas Krisnadwipayana di Jakarta. Tahun 1980-1986 sebagai Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Krisnadwipayana di Jakarta.
- 1980-1986: Dosen Ketel Uap pada Fakultas Teknik Universitas Tarumanegara di Jakarta merangkap sebagai Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Tarumanegara di Jakarta.

PRABATA

BERITA PENERBIT

Buku ini kami terbitkan guna melengkapi kepastakaan di bidang permesinan. Semoga dapat menambah pengetahuan pembaca tentang ketel uap.

Jakarta, Maret 1987

PT. Pradnya Paramita

PRAKATA

Pada masa pembangunan dewasa ini, kebutuhan akan daya di Indonesia hari demi hari makin meningkat. Usaha-usaha untuk memenuhinya dilakukan dengan berbagai macam cara, di antaranya dengan memanfaatkan sumber-sumber daya alamiah, seperti memanfaatkan aliran air ataupun air terjun. Namun memanfaatkan sumber daya air semacam ini sering kurang menguntungkan, mengingat jarak lokasi sumber daya air tersebut yang sering kali sangat jauh dari para pemakai daya. Contoh sumber daya air yang terdapat di Irian Jaya yang akan dimanfaatkan di pulau Jawa memberikan keterbatasan-keterbatasan yang sukar untuk diatasi.

Cara yang lain untuk memenuhi kebutuhan daya yang sangat meningkat tersebut ialah dengan mengkonversikan energi yang terkandung dalam bahan bakar konvensional menjadi daya yang dibutuhkan dalam pembangunan.

Pemanfaatan bahan bakar konvensional untuk dikonversikan menjadi daya yang dibutuhkan dalam pembangunan, dapat menggunakan mesin-mesin torak diesel ataupun turbin gas, untuk skala kecil ataupun skala sedang. Namun untuk konversi tenaga dengan skala besar dari bahan bakar konvensional menjadi daya yang dibutuhkan dalam pembangunan hanya dapat menggunakan kombinasi ketel uap dengan turbin uap.

Kurangnya literatur di bidang permesinan, khususnya dalam pengetahuan di bidang ketel uap, mendorong penulis memberanikan diri menulis buku ini, dengan diwarnai oleh kekurangan di sana-sini.

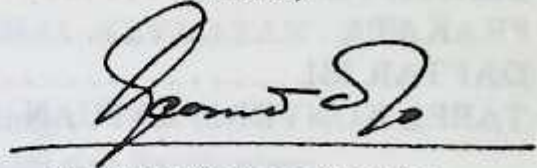
Buku ini sekedar pegangan sementara bagi para mahasiswa ataupun pembaca lainnya yang berminat, yang ingin tahu serba sedikit perihal KETEL UAP. Untuk memperdalam pengetahuan di bidang ketel uap, dianjurkan kepada para pembaca untuk menambah bacaannya pada buku-buku lain yang ditulis lebih profesional oleh pengarang-pengarang yang lain.

Kepada teman-teman sejawat, para dosen yang mengetahui kekurangan-kekurangan di dalam buku ini, penulis mohon dengan sangat bantuan koreksi dan penyempurnaannya demi mencerdaskan kehidupan bangsa.

Akhirnya atas kekurangan-kekurangan tersebut, penulis mohon maaf sebesar-besarnya serta mengharapkan maklum adanya.

Jakarta, 14 Mei 1986

Penulis,



Ir. M.J. Djokosetyardjo

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS	v
BERITA PENERBIT	vii
PRAKATA	viii
DAFTAR ISI	x
TABEL KONVERSI SATUAN	xii
BAB I. BEBERAPA PENGERTIAN POKOK	1
1. Satuan-satuan yang Digunakan dalam Ketel Uap	1
2. Proses Pembentukan Uap	1
3. Uap Kenyang dan Uap yang Dipanaskan Lanjut	3
4. Kebutuhan Panas, Panas Penguapan, dan Pengertian mengenai Entalpi.	7
5. Penggunaan Tabel Uap Kenyang dan Tabel Uap yang dipanaskan lanjut	12
6. Perpindahan Panas pada Ketel Uap	23
7. Beberapa Pengertian Istilah dalam Ketel Uap	35
BAB II. BERBAGAI MACAM BAHAN BAKAR	38
8. Bahan Bakar	38
9. Bahan Bakar Padat	38
10. Sifat-sifat Bahan Bakar Padat Berupa yang Batubara	43
11. Bahan Bakar Cair	53
12. Bahan Bakar Gas	54
13. Bahan Bakar Nuklir atau Sumber Energi Nuklir	57
BAB III. PROSES PENGOPAKAN ATAU STOKE PROCESS	62
14. Proses Pengopakan (= Proses Melayani Api = Store Process).	62
15. Jumlah Udara Pembakar	71
16. Jumlah Gas Asap yang Terbentuk	74
17. Pengukuran Volume Gas Asap	78
18. Temperatur Pembakaran	80
19. Prosesntase CO ₂ Maksimum	82

BAB IV. PERALATAN PEMBAKAR	84
20. Peralatan Pembakar untuk Bahan Bakar Padat	84
21. Pembakaran dengan Minyak Bakar (Oil Burner)	150
22. Pembakar dengan Bahan Bakar Gas	156
23. Konstruksi Dinding Tungku	156
24. Reaktor Nuklir	163
 BAB V PERHITUNGAN MENGENAI KEKUATAN DIN- DING KETEL	172
25. Perhitungan Tebalnya Dinding	172
26. Proses Pembuatan Drum Ketel dan Sambungan- Sambungannya	181
 BAB VI. BEBERAPA JENIS KETEL UAP	183
27. Klasifikasi Ketel Uap	183
28. Ketel-ketel Pipa Api dan Ketel-Ketel Lorong Api ...	185
29. Ketel-ketel Pipa Air dengan Desain Biasa	204
30. Ketel-ketel Pipa Air dengan Perencanaan Khusus ...	231
 BAB VII. BAGIAN-BAGIAN KETEL UAP	284
31. Pemanas Lanjut Uap atau Steam Superheater	284
32. Ekonomiser	293
33. Pemanas Udara atau Air Preheater	297
34. Peralatan untuk Pembersihan Ketel Uap	302
35. Penangkap Debu atau Dust Collector atau Praeci- pator	313
 BAB VIII. CEROBONG DAN VENTILATOR	319
36. Cerobong	319
37. Ventilator	322
 DAFTAR PUSTAKA	326

Tabel Konversi Satuan

<p><u>SATUAN PANJANG:</u></p> <p>1 mil = 1760 yards = 5280 feet = 1,609 km.</p> <p>1 yard = 3 feet = 0,914 meter</p> <p>1 foot = 12 inches = 308,4 mm</p> <p>1 inch = 25,4 mm</p> <p>100 ft/min = 0,508 m/det.</p> <p>1 km = 1000 meter = 0,621 mil</p> <p>1 meter = 1000 mm. = 1,094 yard. = 3,281 feet = 39,37 inches</p> <p>1 mikron = 0,001 mm = 0,000039 inch</p> <p>1 m/det. = 196,9 ft/min.</p> <p><u>SATUAN LUAS:</u></p> <p>1 mil.2 = 640 Acres = 259 Hektar</p> <p>1 Acre = 4840 sq. yards = 0,4047 Hektar</p> <p>1 sq. yard = 9 sq. feet = 0,836 m²</p> <p>1 sq. foot = 144 sq. inches = 0,0929 m²</p> <p>1 km² = 100 Hektar = 0,3861 sq. mile</p> <p>1 Hektar = 10.000 m² = 2,471 Acres</p> <p>1 m² = 1.000.000 mm² = 1,196 sq. yards = 10,76 sq. feet</p>	<p><u>SATUAN BERAT:</u></p> <p>1 US Long ton = 2240 lbs. = 1016 kg.</p> <p>1 US Short ton = 2000 lbs. = 907 kg.</p> <p>1 pound (lb) = 16 ounces = 7000 grains = 0,454 kg.</p> <p>1 ounce (oz) = 0,0625 pound = 28,35 gr.</p> <p>1 grain = 64,8 m. gr. = 0,0023 ounce</p> <p>1 lb/ft = 1,488 kg/m</p> <p>1 metrik ton = 1000 kg = 0,984 long ton = 2205 lbs.</p> <p>1 kilogram = 1000 gram = 2.205 pounds</p> <p>1 gram = 1000 m. gr. = 0,03527 ounce = 15,43 grains</p> <p>1 kg/m = 0,672 lbs/ft</p> <p><u>SATUAN VOLUME:</u></p> <p>1 cu. yard = 27 cu. feet = 0,765 m³</p> <p>1 cu. foot = 1728 cu. inches = 28,32 liter</p> <p>1 cu. inch = 16,39 mm³</p> <p>1 Imp. gallon = 277,4 cu. inches = 4,55 liter</p> <p>1 US Gallon = 0,833 Imp. gallon = 3,785 liter = 231 cu. inches</p>
--	---

SATUAN VOLUME

1 US Barrel	= 42 US. gallon
	= 35 Imp. gallons
1 m ³	= 1000 liter
	= 1,308 cu. yards
	= 35,31 cu. feet
1 liter	= 1.000.000 cc.
	= 0,22 Imp. gallon
	0,2642 US gallon
	= 61,0 cu. Inches
1 cu. ft/min	= 1,699 m ³ /jam
1 m ³ /jam	= 0,589 cu. ft/min

KERAPATAN:

1 cu. ft/lb	= 0,0624 m ³ /kg
1 lb/cu. ft	= 16,02 kg/m ³
1 m ³ /kg	= 16,02 cu. ft/lb
1 kg/m ³	= 0,0624 lb/cu. ft
1 g/m ³	= 0,437 grain/cu. ft
	= 0,0584 grain per
	US gallon
1 g/liter	= 58,4 grain per
	US gallon

SATUAN TEKANAN:

1 atm. standar	= 101.325 pascal
	= 760 mm. Hg.
	= 14,696 p.s.i.
	= 1,033 kg/cm ²
	= 1013 milibar
1 atm. metrik	= 98.066,5 pascal
	= 1 kg/cm ²
	= 10 m. kolom air
	= 14,22 p.s.i.
1 bar	= 100.000 pascal
	= 1000 milibar
	= 750,1 mm. Hg.
	= 1,02 kg/cm ²
	= 14,50 p.s.i.

SATUAN TEKANAN

1 lb/ft.2	= 47,88 pascal
	= 4,88 kg/m ²
1 p.s.i.	= 6894 pascal
	= 2,036 inch. Hg.
	= 0,0703 kg/cm ²
	= 0,690 bar
1 m kolom air	= 9806 pascal
	= 0,1 kg/cm ²
1 m. Hg.	= 133,3 kilopascal
	= 1,360 kg/cm ²
	= 1333 milibar
1 kg/cm ²	= 98,066 kilopascal
	= 735,5 mm. Hg.
	= 0,981 bar
	= 14,22 p.s.i.

SATUAN PANAS DAN ENERGI:

1 B.T.U.	= 778 ft. lbs.
	= 107,6 kg.m
	= 0,252 Kkal.
1 BTU/lb.	= 0,556 Kkal/kg
1 BTU/cu. ft.	= 8,9 Kkal/m ³
1 BTU/hr.sq. ft. F/ft	= 1,488 Kkal/j.m ²
	°C/m
1 Kilokalori	= 3088 ft.lbs
	= 427 kg.m.
	= 3,968 BTU
	= 4,187 K.J.
1 Kilojoule	= 0,2388 Kkal.
	= 0,948 BTU
1 KW	= 738 ft. lbs/sec.
	= 102 kg.m/detik
	= 1,341 HP
	= 1,36 DK (metrik)

SATUAN PANAS DAN ENERGI

1 H.P.	= 33.000 ft.lbs/min.
	= 550 ft.lbs/sec
	= 76,04 kg.m/det.
	= 0,746 KW
	= 1,014 D.K. metrik
	1 D.K. metrik
1 D.K. metrik	= 32.550 ft.lbs/min
	= 542 ft.lbs/sec
	= 75 kg.m/detik
	= 0,735 KW
	= 0,986 H.P.
1 Kkal/kg	= 1,8 BTU/lb
	= 4,187 KJ/kg.
1 Kkal/m ³	= 0,1124 BTU/cu.ft
	= 4,187 KJ/m ³
1 Kkal/m ²	= 0,3687 BTU/sq.ft
	= 4,187 KJ/m ²
1 Kkal	= 427 kg.m
	= 4187 Newton.m
	= 4187 Joule
	= 4187 Watt.sec
	0,001163 KWH
	= 0,001582 DK.jam
1 N. .m	= 1 Joule
	= 1 Watt. sec
	= 0,0002388 Kkal
	0,10194 Kg.m
	0,000278 Wat. jam

SATUAN PANAS DAN ENERGI

WH	= 3412,14 BTU
	= 860 Kkal
	= 3.600.000 Joule
	= 1,36 D.K. jam
	= 3.600.000 Newton.m.
	= 3.600.000 Watt.sec
	= 367.000 kg.m
-	-
1Kg.m	= 0,002342 Kkal
	= 9,81 Newton.m.
	= 9,81 Joule
	= 9,81 Watt.sec
	= 0,002724 Watt.jam
	= 0,0000037 DK.jam
1 Watt. jam	= 0,8599 Kkal
	= 367 Kgm
	= 3600 Newton.m
	= 3600 Joule
	= 3600 Watt.sec
	= 0,001 KWH
	= 0,00136 DK.jam
1 DK.jam	= 632,1 Kkal
	= 270.000 Kg.m
	= 2.650.000 N.m
	= 2.650.000 Joule
	= 0,736 KWH

BAB I.

BEBERAPA PENGERTIAN POKOK

1. Satuan-satuan yang Digunakan dalam Ketel Uap

Pada saat sekarang ini, telah mulai digunakan satuan-satuan Systeme Internationale de Units atau S.I. sebagai pengganti satuan Metrik-teknik-praktis dalam teknik ketel uap.

Satuan-satuan: panjang (meter); luas (M^2); Volume (m^3) dan derajat panas ($^{\circ}C$ dan $^{\circ}K$) serta waktu (detik, menit, jam), digunakan baik dalam sistem S.I. maupun dalam sistem Metrik.

Tentang konversinya dapat dibaca dalam Tabel-tabel Konversi satuan terlampir.

Dalam hal satuan pengukuran panas, sebenarnya lebih tepat bila digunakan satuan Metrik yaitu **Kilokalori**, karena satuan Kilokalori ini merupakan satuan ukuran jumlah panas yang diperlukan oleh satu kilogram air untuk dinaikkan temperaturnya 1° Celcius; yaitu dari $14,5^{\circ}C$ menjadi $15,5^{\circ}C$.

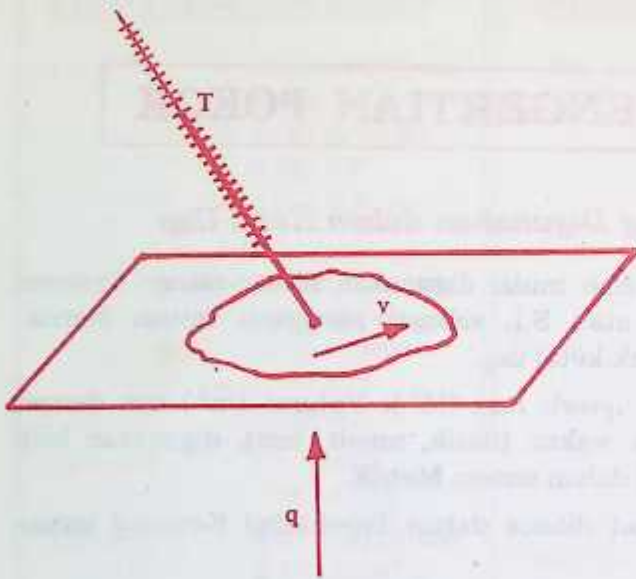
Sedangkan di dalam sistem S.I. satuan ukuran panas yang digunakan ialah: **Joule** atau **Kilojoule**; **Watt-detik** atau **Kilowatt-jam**, yang sama sekali **tidak ada sangkut-pautnya** dengan **satuan massa air** (dalam Newton) ataupun **satuan derajat panas** baik dalam $^{\circ}C$ ataupun dalam $^{\circ}K$. Panas yang dibutuhkan oleh satu Newton air untuk naik temperatur $1^{\circ}K$, bukanlah satu Kilojoule. Sehingga **sistem S.I. kurang tepat** digunakan dalam **ketel uap**.

2. Proses Pembentukan Uap

Bila di atas sekeping logam terdapat beberapa tetes air, dan kita perhatikan molekul-molekul air tersebut, temperatur air pada saat itu ialah T_0 $^{\circ}$ Kelvin. atau t_0 $^{\circ}$ Celcius. Molekul-molekul air tersebut bergerak bebas ke sana-ke mari dalam lingkungannya (dalam lingkungan air) dengan kecepatan gerak v_0 meter/detik.

Molekul-molekul tersebut dalam gerakannya ke sana-ke mari tidak akan dapat meninggalkan lingkungannya, yaitu lingkungan air karena adanya gaya tarik-menarik antara molekul-molekul air itu sendiri.

Apabila di bawah kepingan logam tersebut dipasang api (api dari sebatang lilin, korek api, dsb.), sedemikian sehingga api tersebut memanasi kepingan logam yang di atasnya terdapat beberapa tetes air, maka temperatur air tersebut akan naik menjadi T_1 Kelvin, dan ternyata kecepatan gerak dari molekul-molekul air tersebut akan bertambah menjadi v_1 meter/detik, namun belum mampu untuk melepaskan diri dari lingkungannya.



Apabila kemudian api yang dipasang di bawah kepingan logam tersebut ditambah besarnya (menjadi api dari dua batang lilin, dsb) maka temperatur air di atas kepingan logam tadi akan naik lagi menjadi T_2 °K; sedangkan ternyata pula bahwa kecepatan gerak dari molekul-molekul air akan bertambah menjadi v_2 m/detik, namun masih belum mampu untuk melepaskan diri dari lingkungannya.

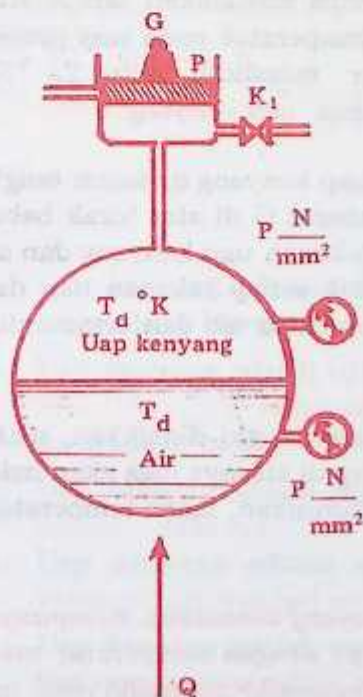
Dan bila api yang dipasang di bawah kepingan logam tersebut senantiasa ditambah besarnya, sedemikian sehingga temperatur air di atas kepingan logam tersebut mencapai T_d °K, sedangkan kecepatan gerak molekul-molekul air tersebut telah mencapai v_d m/detik, sehingga molekul-molekul air tersebut **mampu** untuk melepaskan diri dari lingkungannya, dan mampu untuk melepaskan diri dari gaya tarik-menarik antara molekul-molekul air tersebut. Molekul-molekul air yang melepaskan diri dari lingkungannya tersebut akan berubah menjadi molekul **uap** yang kecepatannya melebihi kecepatan gerak molekul-molekul air semula.

Proses yang demikian tadi disebut "**Proses Penguapan**". Molekul-molekul air berubah menjadi molekul **uap**, atau disebut juga bahwa air tersebut sedang "mendidih", karena permukaan air menjadi bergolak. Temperatur air pada saat itu mencapai "**temperatur mendidih**" yaitu T_d °Kelvin

Dan bila api masih saja ditambah besarnya, ternyata bahwa temperatur mendidih T_d °K tidak akan berubah atau tetap saja besarnya, selama tekanan yang ada di atasnya dipertahankan tetap saja besarnya.

3. Uap Kenyang dan Uap yang Dipanaskan Lanjut

Apabila proses pembuatan uap tersebut dilakukan dalam tempat atau tangki yang tertutup seperti gambar, yaitu mula-mula tangki diisi dengan air pada temperatur T_0 °K, kemudian tangki dipanasi.



Pemanasan dilakukan terus-menerus sedemikian sehingga temperatur air di dalam tangki akan naik terus-menerus dari T_0 °K dan mencapai T_d °K, maka akan terbentuk uap.

Untuk sementara kran K_1 dibiarkan terbuka, sehingga sebagian uap air yang terbentuk dibiarkan ke luar melalui kran K_1 untuk beberapa saat lamanya. Kemudian kran K_1 ditutup, sehingga tidak ada uap yang dapat keluar lagi.

Tekanan di dalam tangki diusahakan tetap besarnya dengan memberi pemberat tertentu (G kg), di atas torak yang bebas geseran P , sementara itu kran K_2 dibuka.

Apabila keadaan seimbang tercapai, yaitu permukaan air di dalam tangki untuk sementara tetap kedudukannya, maka hal ini berarti bahwa pada temperatur T_d °K tersebut ada sejumlah molekul-molekul air per satuan waktu (per detik) yang berubah menjadi molekul-molekul uap.

Namun, agar kedudukan permukaan air di dalam tangki tersebut tetap saja, maka tentulah harus ada sejumlah molekul-molekul uap yang sama banyaknya per satuan waktu (per detik) yang berubah menjadi molekul-molekul air.

Dengan demikian dapat dikatakan, bila keadaan seimbang tercapai, akan terdapat sama banyak jumlah molekul-molekul air yang berubah menjadi molekul-molekul uap, dengan molekul-molekul uap yang berubah menjadi molekul-molekul air, per satuan waktu tertentu.

Bila pada saat tertentu dilakukan pengukuran temperatur dan tekanan terhadap air maupun uap yang ada di atasnya, maka ternyata bahwa:

$$\text{Temperatur air} = \text{Temperatur uap} = T_d \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$\text{Tekanan air} = \text{Tekanan uap} = p \text{ Newton/m}^2$$

Ternyata bahwa selama tekanannya tetap, setiap pemberian panas hanya akan berakibat menguapkan airnya tanpa menaikkan temperatur mendidihnya $T_d \text{ } ^\circ\text{K}$. Untuk selanjutnya, temperatur pada saat proses penguapan berlangsung disebut temperatur mendidih yaitu $T_d \text{ } ^\circ\text{K}$. Uap yang dalam keadaan demikian tadi disebut *uap kenyang*.

Sekarang dicoba mengatur tekanan air dan uap kenyang di dalam tangki dengan jalan mengubah-ubah besarnya pemberat G di atas torak bebas geseran P. Dari berbagai-bagai pengaturan tekanan uap kenyang dan air di dalam tangki menunjukkan bahwa untuk setiap tekanan uap dan tekanan air tertentu di dalam tangki, temperatur air dan temperatur uap di atasnya juga tertentu pula.

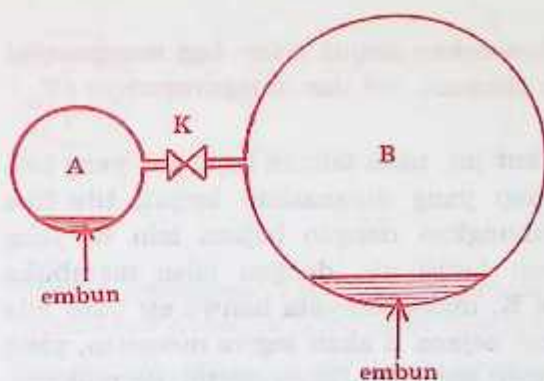
Bila tekanan air dan tekanan uap di dalam tangki dinaikkan, maka temperatur mendidih air dan temperatur uap di atasnya juga akan naik, dan sebaliknya bila tekanan air dan uap diturunkan, maka temperatur mendidihnya juga akan menurun.

Dengan demikian dapat dikatakan: *Uap kenyang senantiasa mempunyai pasangan-pasangan harga antara tekanan (p) dengan temperatur mendidihnya (T_d). Bila tekanan dinaikkan, temperatur mendidih akan naik dan sebaliknya, bila tekanan diturunkan, maka temperatur mendidihnya juga akan turun.*

Hubungan antara tekanan (p) dan temperatur mendidih (T_d) dapat dilihat dalam *Tabel 1* atau *Tabel Uap Kenyang* terlampir.

Lebih lanjut dapat dibuktikan, bila dalam suatu bejana tertutup terdapat uap kenyang, dan kemudian bejana berikut uap kenyang tersebut didinginkan, maka ternyata adak sebagian uap kenyang yang mengembun menjadi air.

Selain itu, bila di dalam sebuah ruang A terdapat uap kenyang, dan



kemudian uap kenyang tersebut dibiarkan mengembang atau melakukan ekspansi ke ruang B dengan membuka kran K, seperti dalam gambar, maka ternyata ada sejumlah uap kenyang yang mengembun menjadi air, karena tekanan di ruang A dan B menurun yang diakibatkan temperatur mendidih T_d akan menurun juga. Dengan demikian ciri-ciri uap kenyang adalah sebagai berikut:

- Uap kenyang adalah uap yang dalam *keadaan seimbang* dengan air yang ada di bawahnya.
- Uap kenyang adalah uap yang mempunyai *tekanan dan temperatur mendidih yang sama dengan tekanan dan temperatur mendidih* air yang ada di bawahnya.
- Uap kenyang adalah uap yang *mempunyai pasangan-pasangan harga antara tekanan (p) dan temperatur mendidihnya (T_d)*.
- Uap kenyang adalah uap yang apabila *didinginkan* akan segera *mengembun menjadi air*.
- Uap kenyang adalah uap yang bila *melakukan ekspansi* atau dibiarkan *mengembang akan mengembun menjadi air*.

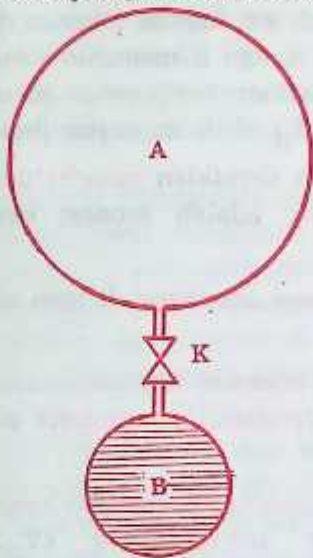
Bila uap kenyang yang diperoleh dengan cara tersebut, dibawa ke luar dari bejana tersebut dan di luar bejana melalui sebuah pipa atau alat yang disebut pemanas lanjut uap, uap kenyang tadi dipanaskan lebih lanjut hingga temperaturnya mencapai T_u °K, yang jauh lebih panas/ lebih tinggi daripada T_d °K, seperti terlihat dalam Gambar, sedangkan tekanannya diatur agar *tetap* yaitu sebesar p Newton/m², dengan jalan memberi pemberat G kg di atas torak yang bebas geseran P . Maka uap yang kita peroleh dengan cara tersebut dinamakan: *Uap yang dipanaskan lanjut* atau *Superheated Steam*, yang temperaturnya T_u °K jauh lebih *tinggi* daripada *temperatur mendidih atau temperatur uap kenyang* T_d atau T_k pada tekanan yang sama p Newton/m².

Dengan demikian untuk membuat uap yang dipanaskan lanjut dari uap kenyang, dibutuhkan sejumlah panas tertentu. Dan ternyata tempera-

tur uap yang dipanaskan lanjut T_u °K tersebut dapat dipilih atau ditentukan sekehendak kita, dapat berbeda-beda tingginya, dengan tekanan uap yang dipanaskan lanjut sebesar p Newton/m².

Dengan demikian: *Uap yang dipanaskan lanjut tidak lagi mempunyai pasangan-pasangan harga antara tekanan (p) dan temperaturnya (T_u).*

Selanjutnya dalam Gambar berikut ini, pada sebuah bejana A yang berisi uap yang dipanaskan lanjut, tiba-tiba dihubungkan dengan bejana lain B, yang penuh berisi air, dengan jalan membuka kran K, maka ternyata bahwa air yang ada dalam bejana B akan segera menguap, yang dengan demikian akan turun permukaannya. Hal ini berarti bahwa uap yang dipanaskan lanjut *tidak bisa dalam keadaan seimbang* dengan air.



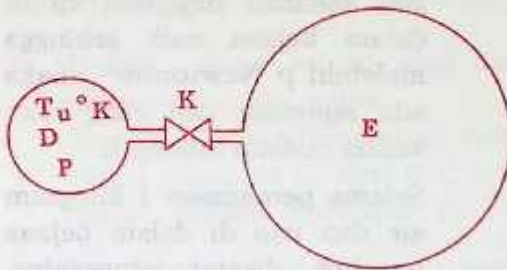
Bila kran K dibiarkan terbuka maka air di bejana B akan terus-menerus menguap, sampai seluruhnya menjadi uap atau temperatur uap akan terus menurun, hingga mencapai temperatur mendidih T_d °K pada tekanan p Newton/m². Uap yang dipanaskan lanjut tersebut akan berubah menjadi uap kenyang (saturated steam).

Selain itu, bila di dalam sebuah bejana tertutup C terdapat uap yang dipanaskan lanjut dengan temperatur uap T_u °K dan tekanan p Newton/m² tiba-tiba didinginkan, maka temperatur T_u °K akan *menurun*, sementara tekanan *tetap* dan ternyata di dasar bejana *tidak terbentuk* air.

Dengan demikian: *Uap yang dipanaskan lanjut bila didinginkan tidak akan mengembun.*

Bila pendinginan dilakukan terus-menerus, maka temperatur uap T_u °K akan menurun terus hingga mencapai *temperatur mendidih* atau *titik didih* T_d °K pada p Newton/m², yang berarti bahwa uap tersebut telah berubah menjadi uap kenyang.

Bila seperti terlihat pada Gambar, pada sebuah bejana D terdapat uap yang dipanaskan lanjut dengan temperatur T_u °K dan tekanan p Newton/m², dan uap yang dipanaskan lanjut tersebut dibiarkan mengembang atau ekspansi ke ruang E dengan tiba-tiba membuka kran K, ternyata bahwa *tidak ada uap yang mengembun*.



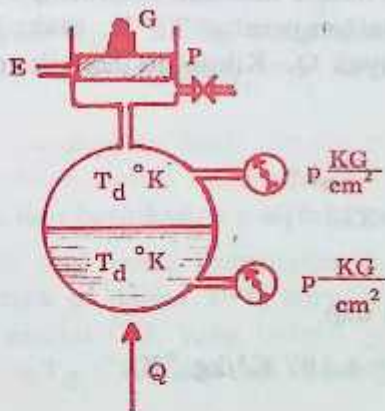
yang dipanaskan lanjut dengan temperatur T_u °K dan tekanan p Newton/m², dan uap yang dipanaskan lanjut tersebut dibiarkan mengembang atau ekspansi ke ruang E dengan tiba-tiba membuka kran K, ternyata bahwa *tidak ada uap yang mengembun*.

Dengan demikian: *Uap yang dipanaskan lanjut bila mengembang atau melakukan ekspansi tidak akan mengembun.*

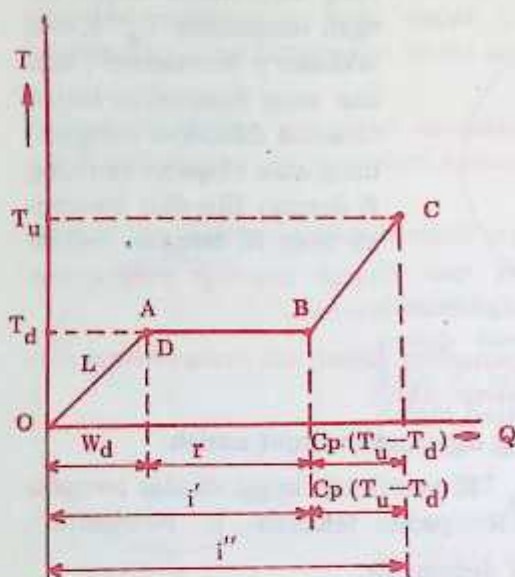
Dengan demikian ciri-ciri uap yang dipanaskan lanjut adalah:

- Uap yang temperaturnya T_u °K jauh lebih tinggi di atas *temperatur air mendidih* T_d °K pada tekanan p Newton/m².
- Uap yang *tidak bisa seimbang* dengan air.
- Uap yang *tidak mempunyai pasangan-pasangan harga* antara tekanan dan *temperaturnya* (T_u).
- Uap yang apabila *didinginkan tidak akan mengembun*.
- Uap yang bila *melakukan ekspansi tidak akan mengembun*.
- Tidak dapat membuat uap* yang dipanaskan lanjut dari uap ke-nyang selama uap tersebut masih bersinggungan dengan air yang ada di bawahnya.

4. *Kebutuhan Panas, Panas Penguapan dan Pengertian Mengenai Entalpi*



Dalam Gambar di sebelah, diperlihatkan sebuah bejana yang hanya terdapat 1 kilogram air dan uap saja (udara telah dikeluarkan dari bejana tersebut), dan kemudian bejana tersebut dipanasi, sedangkan tekanan air dan uap di dalam bejana tersebut diatur supaya tetap konstan sebesar p Newton/m², dengan mem-



beri pemberat G kg di atas torak P yang bebas geseran.

Bila tekanan uap dan air di dalam bejana naik sehingga melebihi p Newton/m², maka ada sejumlah uap yang akan keluar melalui lubang E .

Selama pemanasan 1 kilogram air dan uap di dalam bejana tersebut, dicatat temperaturnya (T); tekanan (p) dan jumlah panas yang telah diberikan (Q).

Pencatatan-pencatatan dilakukan mulai dari temperatur air dan uap masih 0°C atau 273°K , yang di dalam grafik T - Q dinyatakan dengan titik O , yang selanjutnya pencatatan-pencatatan direkam di dalam grafik T - Q tersebut untuk suatu tekanan tertentu misalnya 1 kg/cm^2

Jadi dimulai dari titik O dengan temperatur air dan uap masih 0°C atau 273°K . Pada saat itu harga $Q_0 = 0$ kilojoule/kg air dan uap. Tekanan p_1 kg/m² diatur dengan memberi pemberat G_1 kg di atas torak bebas geseran P .

Bila pemanasan dilakukan demikian, sehingga air dan uap kenyang (uapnya adalah uap kenyang karena dalam keadaan seimbang dan berdampingan dengan air), telah mencapai temperatur T_1 °K, maka jumlah panas yang dibutuhkan adalah sebanyak Q_1 Kilojoule per kilogram air dan uap yang ternyata:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \text{Panas Jenis air} \times (T_1 - T_0) = \\
 &= \text{Panas Jenis air} \times (T_1 - 273^\circ) = \\
 &= \text{Panas Jenis air} \times t_1 = \\
 &= W_1 \text{ Kilojoule/kg air dan uap.}
 \end{aligned}$$

$$\text{Panas Jenis air} = 4,187 \text{ KJ/kg. } ^\circ\text{K}$$

Persamaan tersebut merupakan persamaan linier pada T sehingga grafiknya akan berupa garis lurus mulai dari titik O ($T_0 = 273^\circ\text{K} = 0^\circ\text{C} =$ titik O) hingga K di mana $OK_1 = Q_1 = W_1$ Kilojoule/kg.

W_1 disebut *kalor zat air* atau *heat of liquid* atau *entalpi air* atau *vloeistof warmte*, yaitu:

Jumlah panas (dinyatakan dalam Kilojoule/kg) yang diperlukan oleh 1 kilogram air dari 0°C atau 273°K untuk dinaikkan temperaturnya hingga mencapai T_1 °K pada tekanan p_1 Newton/m².

Apabila kita ingin mengetahui jumlah panas yang diperlukan untuk membuat 1 kg air dari 0°C hingga *mendidih* pada T_{d_1} °K pada tekanan p_1 Newton/m² maka jumlahnya sebanyak:

$$\begin{aligned} Q_{d_1} &= \text{Panas Jenis air} \times (T_{d_1} - T_0) = \\ &= \text{Panas Jenis air} \times (T_{d_1} - 273^\circ) = \\ &= \text{Panas Jenis air} \times t_{d_1} = \\ &= W_{d_1} \text{ Kilojoule/kg} \end{aligned}$$

yang besarnya adalah *linier* di dalam grafik T - Q pada tekanan p_1 Newton/m², yang grafiknya berupa garis lurus dari O melalui K hingga A ; yaitu garis O - K - A , sehingga: $OA_1 = Q_{d_1} = W_{d_1}$ KJ/kg.

Bila sesudah mencapai temperatur T_{d_1} panas masih saja diberikan kepada bejana yang berisi 1 kg air dan uap tersebut, ternyata selama air tersebut *mendidih* pada tekanan p_1 N/m², maka temperaturnya *tetap saja* yaitu sebesar T_{d_1} °K dan bertekanan p_1 N/m², sehingga semua air berubah menjadi uap.

Jumlah panas yang dibutuhkan selama menguapkan 1 kg air pada *temperatur mendidihnya* T_{d_1} °K dan bertekanan p_1 N/m² adalah sebanyak Q_{R_1} KJ/kg, yang disebut *panas penguapan* yang besarnya = r_1 KJ/kg, sehingga $Q_{r_1} = r_1$ KJ/kg.

Panas penguapan ialah *jumlah panas* (dinyatakan dalam KJ/kg) yang dibutuhkan untuk menguapkan 1 kg air pada *temperatur mendidihnya* T_d °K dan bertekanan p N/m²; yaitu sebanyak r Kilojoule/kg.

Karena Q_R hanya merupakan fungsi yang konstan terhadap T maka grafiknya di dalam T - Q berupa garis lurus horizontal yang sejajar dengan sumbu OQ , yang berarti *selama mendidih temperaturnya adalah konstan* T_{d_1} °K yaitu dari A sampai di B .

Bila setelah semua air berubah menjadi uap di titik B, dan panas masih saja diberikan kepada bejana yang hanya tinggal berisi uap saja, maka uap dalam bejana tersebut akan naik temperaturnya dan uap kenyang tersebut berubah menjadi uap yang dipanaskan lanjut atau superheated steam.

Adapun jumlah panas (Q_u) yang dibutuhkan untuk mengubah 1 kg uap kenyang pada tekanan p_1 N/m² dan temperatur T_{d_1} °K menjadi uap yang dipanaskan lanjut pada tekanan p_1 N/m² dan bertemperatur T_{u_1} °K adalah sebanyak:

$$Q_{u_1} = 1 \times C_p \times (T_{u_1} - T_{d_1}) \text{ Kilojoule/kg}$$

C_p = Panas Jenis Uap pada tekanan konstan p_1 dinyatakan dalam KJ/kg °K.

T_{u_1} = Temperatur uap yang dipanaskan lanjut (°K)

T_{d_1} = Temperatur air mendidih (°K) pada tekanan p_1 N/m².

Untuk sementara harga C_p dianggap konstan, sehingga dengan demikian persamaan tersebut merupakan *Persamaan Linier* pada T sehingga grafiknya berupa garis lurus BC.

Dengan demikian seluruh jumlah panas untuk:

- a. Memanaskan 1 Kg air dari 0°C atau 273°K menjadi *mendidih* pada T_d °K dan tekanan p N/m² adalah sebesar W_d KJ/kg.

W_d disebut *Entalpi air mendidih* dinyatakan dalam KJ/kg, yaitu *banyaknya panas yang dibutuhkan oleh 1 kg air pada 0°C atau 273°K untuk dijadikan mendidih pada T_d °K dan tekanan p Newton/m²*

- b. Memanaskan 1 kg air dari 0°C atau 273°K menjadi *uap kenyang* pada T_d °K dan tekanan p N/m², adalah sebesar i'' KJ/kg.

menjadi: $i'' = W_d + r$

i'' disebut *entalpi uap kenyang* dinyatakan dalam KJ/kg, yaitu *banyaknya panas yang dibutuhkan oleh 1 kg air pada 0°C atau 273°K untuk diubah menjadi uap kenyang pada t_d °C atau T_d °K dan bertekanan p N/m².*

- c. Memanaskan 1 kg air dari 0°C atau 273°K menjadi uap yang dipanaskan lanjut pada temperatur $t_u^{\circ}\text{C}$ atau $T_u^{\circ}\text{K}$ dan bertekanan $p \text{ N/m}^2$ adalah sebesar i' KJ/kg, menjadi:

$$i' = i'' + C_p (T_u - T_d) = W_d + r + C_p (T_u - T_d)$$

- i' disebut *entalpi uap yang dipanaskan lanjut* dinyatakan di dalam Kilojoule/kg, yaitu: *banyaknya panas yang dibutuhkan untuk mengubah 1 kg air pada 0°C atau 273°K untuk menjadi uap yang dipanaskan lanjut pada $t_u^{\circ}\text{C}$ atau $T_u^{\circ}\text{K}$ dan bertekanan $p \text{ N/m}^2$.*

Bila kemudian tekanan di dalam bejana kita ukur *bukan* $p_1 \text{ N/m}^2$ melainkan $p_2 \text{ N/m}^2$, dengan jalan mengganti pemberat G_1 dengan pemberat G_2 , maka:

- a. Selama memanaskan 1 kg air dari 0°C atau 273°K sampai mendidih pada $T_{d_1}^{\circ}\text{K}$, akan mengikuti garis lurus O—L—D di dalam grafik T—Q dan panas yang dibutuhkan adalah sebesar W_{d_1} KJ/kg, yaitu *entalpi air mendidih* pada tekanan $p_1 \text{ N/m}^2$ yang dinyatakan dengan OD₁ pada grafik T—Q.
- b. Selama air *sedang mendidih*, temperaturnya sebesar $T_{d_2}^{\circ}\text{K}$ dan kebutuhan panasnya adalah sebesar r_2 KJ/kg, yang merupakan panas penguapan pada temperatur $T_{d_2}^{\circ}\text{K}$ dan bertekanan $p_2 \text{ N/m}^2$, yang dinyatakan dengan garis DE pada grafik T—Q.

Sedangkan mulai dari pemanasan 1 kg air dari 0°C atau 273°K untuk menjadi uap *kenyang* pada $T_{d_2}^{\circ}\text{K}$ dan tekanan $p_2 \text{ N/m}^2$, dibutuhkan panas sebanyak i''_2 KJ/kg, sehingga;

$$i''_2 = W_{d_2} + r_2 = \textit{entalpi uap kenyang} \text{ pada tekanan } p_2 \text{ N/m}^2 \text{ yang dinyatakan dengan garis OE}_1 \text{ dalam grafik T—Q.}$$

- c. Pemanasan 1 kg uap kenyang dari $T_{d_2}^{\circ}\text{K}$ menjadi uap yang dipanaskan lanjut pada $T_u^{\circ}\text{K}$ dan tekanan $p_2 \text{ N/m}^2$ memerlukan panas sebanyak:

$$Q_{u_2} = C_p \cdot (T_u - T_{d_2}) \text{ KJ/kg.}$$

Sedangkan mulai pemanasan 1 kg air dari 0°C untuk menjadi

uap yang dipanaskan lanjut pada T_{u_2} °K dan bertekanan p_2 Newton/m² dibutuhkan panas sebanyak:

$$i'_2 = i''_2 + C_p \cdot (T_{u_2} - T_{d_2}) = W_{d_2} + r_2 + C_p \cdot (T_{u_2} - T_{d_2})$$

yang disebut *entalpi uap yang dipanaskan lanjut* pada T_{u_2} °K dan tekanan p_2 N/m² yang di dalam grafik dinyatakan dengan O – L – D – E – F.

Demikian selanjutnya bila tekanan di dalam bejana diganti menjadi p_3 N/m² dengan mengganti pemberat G_2 menjadi G_3 di atas torak bebas geseran P. Ternyata untuk setiap tekanan tertentu ada seperangkat harga tertentu dari W_d (= entalpi air mendidih); r (= panas penguapan); i'' (= entalpi uap kenyang) dan i' (= entalpi uap yang dipanaskan lanjut).

Dari apa yang telah diuraikan mengenai *entalpi*, baik *entalpi air* pada temperatur t °C yaitu W_t ; ataupun *entalpi air mendidih* yaitu W_d ; *entalpi uap kenyang* yaitu i'' ; dan *entalpi uap yang dipanaskan lanjut* yaitu i' ; *tidak lagi dihitung berdasarkan panas jenis*, baik Panas Jenis Air atau Panas Jenis Uap (C_p) dan *panas penguapan* r ; karena ternyata bahwa *panas-panas jenis* atau *panas penguapan* tersebut *tidak konstan* untuk berbagai tekanan dan temperatur.

Dari berbagai-bagai percobaan yang dilakukan di berbagai laboratorium disusunlah: *Tabel Uap Kenyang* (= *Tabel 1*) dan *Tabel Uap yang Dipanaskan Lanjut* (= *Tabel 2*), seperti terlampir, dinyatakan harga-harga dari t_d ; W_d ; r ; i'' ; dan i' ; untuk berbagai tekanan dan temperatur uap.

5. Penggunaan Tabel Uap Kenyang dan Tabel Uap yang Dipanaskan Lanjut

Contoh 1 : Berapa jumlah panas yang dibutuhkan oleh 14 kg air dari temperatur 29°C untuk dipanasi menjadi 90°C?

Jawab : Dari tabel 1 tercatat untuk memanasi 1 kg air dari 0°C sampai 29°C diperlukan $W_{29,0^\circ C}$ atau sebanyak 121 KJ/kg, sedangkan untuk memanasi 1 kg air dari 0°C sampai 90°C diperlukan $W_{90^\circ C}$ atau sebanyak 377 KJ/kg.

Sehingga untuk memanasi 1 kg air dari 29°C menjadi 90°C diperlukan panas sebanyak:

$$q = \Delta W = (W_{90^{\circ}\text{C}} - W_{29^{\circ}\text{C}}) \text{ KJ/kg} =$$

$$= (377 - 121) \text{ KJ/kg}$$

Sehingga 14 kg air yang dipanasi dari 29°C menjadi 90°C membutuhkan panas sebanyak:

$$Q = 14 \text{ kg} \times (377 - 121) \text{ KJ/kg} = 3.584 \text{ Kilojoule.}$$

Sebenarnya, rumus umum yang tepat adalah:

$$Q = G \times \Delta \text{ entalpi}$$

Sehingga: $G =$ Berat air dalam kilogram

$$\text{entalpi} = \text{entalpi akhir} - \text{entalpi awal} =$$

$$W_{90^{\circ}\text{C}} - W_{29^{\circ}\text{C}}$$

TABEL 1: TABEL UAP KENYANG

- p = Tekanan di dalam Kilogram/cm².
 t_d = Temperatur air mendidih dalam °C.
 V_u = Volume Jenis Uap di dalam m³/kg.
 W_d = Entalpi air mendidih di dalam Kilojoule/kg.
 r = Panas penguapan di dalam Kilojoule/kg.
 i'' = Entalpi Uap Kenyang di dalam Kilojoule/kg.
 V_w = Volume Jenis Air dalam dm³/kg.

p	t_d	V_u	W_d	r	i''	V_w
0,01	7,0	129,2	29	2.484	2.513	
0,02	17,5	67,0	73	2.459	2.533	
0,03	24,1	45,7	101	2.444	2.545	
0,04	29,0	34,8	121	2.433	2.554	
0,05	32,9	28,2	138	2.423	2.561	
0,07	39,0	20,5	163	2.409	2.572	
0,1	45,8	14,7	192	2.392	2.584	
0,2	60,1	7,7	251	2.358	2.609	
0,3	69,1	5,2	289	2.335	2.624	
0,4	75,9	4,0	317	2.318	2.635	
0,5	81,4	3,2	340	2.305	2.645	
0,7	90,0	2,4	377	2.282	2.659	
1	99,6	1,69	417	2.257	2.674	1,044
2	120,2	0,89	505	2.200	2.705	1,061
3	133,5	0,61	561	2.162	2.723	1,074
4	143,6	0,46	604	2.132	2.737	1,084
5	151,8	0,37	640	2.107	2.747	1,093
7	165,0	0,27	697	2.065	2.762	1,108
10	179,9	0,19	762	2.015	2.777	1,128
15	198,3	0,13	844	1.948	2.792	1,154
20	212,4	0,099	908	1.893	2.801	1,177
25	223,9	0,080	961	1.843	2.804	1,197
30	233,8	0,067	1.008	1.798	2.806	1,217
35	242,5	0,057	1.049	1.756	2.805	1,235
40	250,3	0,050	1.087	1.715	2.802	1,252

p	t_d	V_u	W_d	r	i''	V_w
50	264,0	0,039	1.154	1.641	2.795	1,286
60	275,6	0,032	1.213	1.571	2.784	1,319
70	285,8	0,027	1.267	1.504	2.771	1,351
80	295,0	0,023	1.316	1.440	2.756	1,384
90	303,3	0,020	1.363	1.379	2.742	1,417
100	311,0	0,018	1.407	1.318	2.726	1,451
110	318,0	0,016	1.449	1.260	2.709	1,487
120	324,6	0,0143	1.490	1.197	2.687	1,525
130	330,8	0,0128	1.530	1.134	2.664	1,566
140	336,6	0,0115	1.570	1.067	2.637	1,610
150	342,1	0,0103	1.609	1.000	2.609	1,658
160	347,3	0,0093	1.649	932	2.581	1,713
170	352,3	0,0084	1.690	857	2.547	1,78
180	357,0	0,0075	1.733	778	2.511	1,85
190	361,4	0,0067	1.777	691	2.468	1,94
200	365,7	0,0059	1.827	590	2.417	2,06
210	369,8	0,0050	1.890	455	2.345	2,24
220	373,7	0,0039	2.010	208	2.218	2,64
221,3	374,2	0,0032	2.099	0	2.099	3,20

TABEL 2: TABEL UAP YANG DIPANASKAN LANJUT

ENTALPI UAP YANG DIPANASKAN LANJUT PADA BERBAGAI TEKINAN DAN TEMPERATUR DINYATAKAN DALAM KILOJoule/KILOGRAM

p	200°C	250 °C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
1	2.875	2.974	3.074	3.277	3.487	3.704	3.927	4.158
2	2.870	2.970	3.071	3.276	3.486	3.703	3.927	4.158
3	2.866	2.967	3.068	3.274	3.485	3.702	3.926	4.157
4	2.861	2.964	3.066	3.272	3.484	3.701	3.926	4.156
5	2.857	2.966	3.063	3.271	3.483	3.700	3.925	4.156
7	2.847	2.954	3.058	3.268	3.481	3.699	3.924	4.155
10	2.831	2.943	3.051	3.263	3.479	3.697	3.922	4.154
15	2.797	2.925	3.037	3.254	3.472	3.693	3.919	4.151
20	-	2.906	3.024	3.246	3.466	3.689	3.916	4.149
25	-	2.884	3.010	3.238	3.461	3.685	3.913	4.147
30	-	2.859	2.995	3.230	3.455	3.681	3.910	4.144
35	-	2.832	2.979	3.221	3.449	3.677	3.907	4.142
40	-	-	2.963	3.213	3.444	3.673	3.904	4.140
50	-	-	2.927	3.195	3.433	3.665	3.898	4.135
60	-	-	2.886	3.177	3.421	3.657	3.892	4.130
70	-	-	2.838	3.159	3.410	3.649	3.886	4.126
80	-	-	2.784	3.139	3.398	3.641	3.880	4.121
90	-	-	-	3.119	3.387	3.633	3.874	4.116
100	-	-	-	3.098	3.375	3.625	3.868	4.112
110	-	-	-	3.076	3.362	3.617	3.862	4.107
120	-	-	-	3.053	3.351	3.608	3.856	4.103
130	-	-	-	3.028	3.339	3.600	3.850	4.098
140	-	-	-	3.002	3.326	3.592	3.844	4.093
150	-	-	-	2.975	3.313	3.584	3.838	4.089
160	-	-	-	2.946	3.300	3.576	3.832	4.084
170	-	-	-	2.915	3.287	3.567	3.826	4.080
180	-	-	-	2.884	3.274	3.559	3.820	4.074
190	-	-	-	2.850	3.260	3.550	3.815	4.071
200	-	-	-	2.815	3.246	3.542	3.809	4.066
210	-	-	-	2.779	3.232	3.533	3.802	4.061
220	-	-	-	2.738	3.217	3.525	3.796	4.057

p	200°C	250°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
230	861	1.087	1.332	2.692	3.202	3.516	3.790	4.052
240	862	1.087	1.331	2.640	3.187	3.508	3.784	4.048
250	862	1.087	1.331	2.579	3.172	3.499	3.778	4.043
260	863	1.087	1.330	2.509	3.156	3.490	3.772	4.038
280	864	1.087	1.329	2.321	3.123	3.472	3.760	4.030
300	864	1.088	1.328	2.151	3.089	3.454	3.748	4.021
350	867	1.089	1.326	1.988	3.002	3.408	3.717	3.998
400	870	1.090	1.325	1.928	2.911	3.360	3.686	3.976
450	872	1.092	1.324	1.895	2.819	3.311	3.654	3.953
500	875	1.093	1.323	1.870	2.731	3.263	3.623	3.931

Contoh 2 : Berapa banyak panas yang akan dilepas oleh 24 kg air bertemperatur 76°C untuk didinginkan menjadi air bertemperatur 7°C?

Jawab : $Q = G \times \Delta \text{ entalpi} = G \times (W_{7^\circ\text{C}} - W_{76^\circ\text{C}})$

$G = 24 \text{ kg air}$

$W_{7^\circ\text{C}} = 29 \text{ KJ/kg}$ (Tabel 1)

$W_{76^\circ\text{C}} = 317 \text{ KJ/kg}$ (Tabel 1)

Sehingga:

$$Q = 24 \text{ kg} \times (29 - 317) \text{ KJ/kg} = -6.912 \text{ Kilojoule}$$

Tanda negatif (-) menunjukkan adanya sejumlah panas yang dilepaskan, sedangkan tanda positif (+) seperti contoh 1 menunjukkan kebutuhan akan panas.

Contoh 3 : Berapa banyak panas yang dibutuhkan untuk membuat 15 ton uap per jam yang dipanaskan lanjut pada 550°C bertekanan 80 bar dari air bertemperatur 24°C?

Jawab : $Q = G \times \Delta \text{ entalpi} = G \times (i'_{80 \text{ bar}; 550^\circ\text{C}} - W_{24^\circ\text{C}})$

$G = 15.000 \text{ kg/jam}$

$i'_{80 \text{ bar}; 550^\circ\text{C}} = (i'_{80 \text{ bar}; 500^\circ\text{C}}$

$+ i'_{80 \text{ bar}; 600^\circ\text{C}}) : 2$

$$= (3398 + 3641) : 2 =$$

$$= 3519,5 \text{ KJ/kg}$$

$$W_{24^\circ\text{C}} = 24 \times 4,187 = 100,5 \text{ KJ/kg}$$

Dengan demikian maka:

$$Q = 15.000 \text{ kg/jam} \times (3519,5 - 100,5) \text{ KJ/kg} =$$

$$= 51.285.000 \text{ Kilojoule per jam.}$$

Contoh 4 : Berapa banyak panas yang akan dilepaskan bila 137 kg uap kenyang pada tekanan 120 bar mengembun menjadi air pada temperatur $17,5^\circ\text{C}$?

Jawab : $Q = G \times \Delta \text{ entalpi} =$
 $= G \times (\text{entalpi akhir} - \text{entalpi awal}) =$
 $= G \times (W_{17,5^\circ\text{C}} - i''_{120 \text{ bar}})$

sehingga:

$$G = 137 \text{ kg air}$$

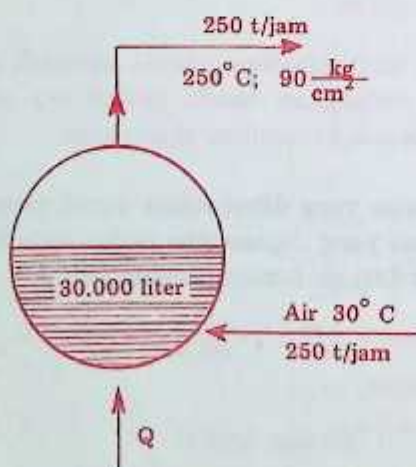
$$i''_{120 \text{ bar}} = 2687 \text{ KJ/kg (lihat Tabel 1)}$$

$$W_{17,5^\circ\text{C}} = 17,5 \times 4,187 \text{ KJ/kg} = 73,3 \text{ KJ/kg}$$

$$Q = 137 \text{ kg} \times (73 - 2687) \text{ KJ/kg} =$$

$$= - 358.118 \text{ Kilojoule}$$

Contoh 5 : Lihat gambar!



Berapa banyak panas yang dibutuhkan oleh sebuah ketel uap yang memproduksi 250 ton uap/jam bertemperatur 520°C dan bertekanan 90 bar, dari air yang bertemperatur 30°C ?

Berapa banyak kebutuhan bahan bakar bila menggunakan bahan bakar minyak dengan Nilai pembakaran terendah 41.000 KJ/kg.

Jawab : $p = 90$ bar dan $t = 520^\circ\text{C}$ sehingga uapnya adalah uap yang dipanaskan lanjut, sehingga menggunakan Tabel uap yang dipanaskan lanjut atau Tabel 2.

$i'_{90 \text{ bar}; 520^\circ\text{C}}$ di dalam Tabel 2 tidak tercantum. Yang tercantum di dalam Tabel 2 adalah $i'_{90 \text{ bar}; 500^\circ\text{C}}$ dan $i'_{90 \text{ bar}; 600^\circ\text{C}}$ sehingga $i'_{90 \text{ bar}; 520^\circ\text{C}}$ harus dicari dengan menggunakan cara *interpolasi* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} i'_{90 \text{ bar}; 520^\circ} &= [(520^\circ - 500^\circ) : (600^\circ - 500^\circ)] \times \\ &\times (i'_{90 \text{ bar}; 600^\circ\text{C}} - i'_{90 \text{ bar}; 500^\circ\text{C}}) + \\ &+ i'_{90 \text{ bar}; 500^\circ\text{C}} = \\ &= [20 : 100] \times (3633 - 3387) + 3387 \text{ KJ/kg} = \\ &= 3426,2 \text{ KJ/kg} \end{aligned}$$

$$W_{30^\circ\text{C}} = 30 \times 4,187 \text{ KJ/kg} = 125,6 \text{ KJ/kg}$$

$$G = 250 \text{ ton uap/jam} = 250.000 \text{ kg uap/jam}$$

$$Q = G \times \Delta \text{ entalpi} =$$

$$= G \times (i'_{90 \text{ bar}; 520^\circ\text{C}} - W_{30^\circ\text{C}})$$

$$= 250.000 \text{ kg/j} \times (3436,2 - 125,6) \text{ KJ/kg} =$$

$$= 827.650.000 \text{ KJ/jam}$$

Contoh 6 : Seperti halnya pada contoh 5; tiba-tiba air yang masuk diganti dengan air pengisian ketel yang bertemperatur 120°C . Isi air di dalam tangki ketel = 30.000 liter. Api yang memanasi ketel dibiarkan tetap saja besarnya. Apa yang terjadi 5 menit kemudian?

Jawab : Api yang digunakan untuk memanasi ketel masih tetap sebanyak $Q_5 = 827.650.000 \text{ KJ}^2 \text{ jam}$. Kebutuhan panas bila air pengisian ketel yang masuk 120°C adalah sebanyak = $G \times \Delta \text{ entalpi baru} =$

$$= 250.000 \text{ kg/j} \times (i'_{90 \text{ bar}; 520^\circ\text{C}} - W_{120^\circ\text{C}}) \text{ KJ/kg} =$$

$$= 250.000 \text{ kg/j} \times (3436,2 - 120 \times 4,187) \text{ KJ/kg} =$$

$$= 733.440.000 \text{ KJ/jam}$$

Sehingga terdapat kelebihan panas dalam 1 jam sebanyak =

$$\begin{aligned} &= \Delta Q_{1 \text{ jam}} = (827.650.000 - 733.440.000) \text{ KJ/j} = \\ &= 94.210.000 \text{ KJ/jam} \end{aligned}$$

Atau selama 5 menit kelebihan panasnya =

$$\begin{aligned} &= \Delta Q_{5 \text{ menit}} = (5 : 60) \times 94.210.000 \text{ KJ/jam} = \\ &= 7.850.833 \text{ KJ selama 5 menit.} \end{aligned}$$

Kelebihan panas sebanyak ini akan *diderita* oleh 30.000 liter air atau 30.000 kg air yang terdapat di dalam tangki sehingga entalpi airnya akan naik sebesar =

$$= 7.850.833 \text{ KJ} : 30.000 \text{ kg} = 261,7 \text{ KJ/kg}$$

Entalpi air mendidih pada 90 bar = $W_{90 \text{ bar}} = 1363$ KJ/kg. Dengan demikian entalpi air mendidih yang baru

$$= 1363 \text{ KJ/kg} + 261,7 \text{ KJ/kg} = 1624,7 \text{ KJ/kg};$$

Dari *Tabel Uap Keryang* atau Tabel 1, entalpi air mendidih sebesar 1624,7 KJ/kg tersebut, tekanannya adalah 154 kg/cm² (dengan menggunakan *Interpolasi*).

Dengan demikian selama *lima menit* tekanan di dalam ketel naik dari 90 kg/cm² hingga mencapai 154 kg/cm².

Apabila dinding drum ketel hanya mampu dibebani tekanan sebesar 25% lebih tinggi dari 90 kg/cm² (90 kg/cm² disebut tekanan nominal dari ketel tersebut pada contoh 5, maka dinding drum ketel hanya mampu dibebani hingga = $(90 + 0,25 \times 90) \text{ kg/cm}^2$ atau 112,5 kg/cm², maka tekanan sebesar 154 kg/cm² tersebut telah dapat menyebabkan ketel akan meledak.

Contoh 7 : Seperti pada contoh 5; tiba-tiba uap yang dialirkan ke luar hanya 225 ton/jam. Apa yang akan terjadi selama satu menit kemudian, apabila api masih tetap besarnya?

Jawab : Api yang diberikan semula . . . = 827.650.000 KJ/jam. Kebutuhan panas sekarang adalah = $G' \times \Delta$ entalpi. $G' = 225.000 \text{ kg/jam}$, dan Δ entalpi = $(3436,2 - 125,6) \text{ KJ/kg}$.

Sehingga kebutuhan panas sekarang hanya =

$$Q_7 = 225.000 \text{ KG/j} \times (3436,2 - 125,6) \text{ KJ/kg} =$$

$$= 744.885.000 \text{ KJ/jam.}$$

Dengan demikian akan terjadi kelebihan panas selama 1 jam sebanyak=

$$\Delta Q_{1 \text{ jam}} = (827.650.000 - 744.885.000) \text{ KJ/j} =$$

$$= 82.765.000 \text{ KJ/jam}$$

yang akan diderita oleh 30.000 kg air yang ada di dalam tangki ketel, sehingga entalpi air mendidihnya akan bertambah sebanyak:

$$\Delta W_{1 \text{ j}} = 82.765.000 \text{ KJ/j} : 30.000 \text{ KG} =$$

$$= 2758,83 \text{ KJ/kg. jam.}$$

Selama satu menit entalpi air mendidihnya akan bertambah sebanyak = $\Delta W_{1 \text{ menit}} = 2758,83 : 60 \text{ KJ/kg.}$
 = 46 KJ/kg selama satu menit.

Dengan demikian entalpi air mendidih yang baru menjadi = 1363 KJ/kg (entalpi air mendidih pada 90 bar) + 46 KJ/kg = 1409 KJ/kg.

Dalam *Tabel Uap Kenyang* atau Tabel 1, entalpi air mendidih sebesar 1409 KJ/kg tersebut dengan cara interpolasi tekanannya didapat 100 kg/cm² lebih sedikit, dan ketel belum meledak.

Bila ingin mengetahui sampai berapa lama ketel akan meledak, yaitu pada tekanan [90 kg/cm² + 25% × 90 kg/cm²] atau pada 112,5 KG/cm², entalpi air mendidihnya mencapai 1459,25 KJ/kg, maka bertambahnya entalpi air mendidih adalah = 1459,25 KJ/kg - 1363 KJ/kg = 96,25 KJ/kg.

Dengan demikian ketel akan meledak setelah =

$$= 96,25 \text{ KJ/kg} : 46 \text{ KJ/kg menit} = 2,092 \text{ menit} =$$

$$= 125,5 \text{ detik.}$$

Contoh 8 : Seperti pada contoh 5; tiba-tiba api padam dengan sendirinya. Apa yang akan terjadi ¼ menit atau 15 detik kemudian?

Jawab : Banyaknya panas semula = $Q_5 = 827.650.000 \text{ KJ/jam}$
 Api padam sendiri = $Q_8 = 0 \text{ KJ/jam}$

Kekurangan panas dalam 1 jam = $- 827.650.000 \text{ KJ/jam}$

Kekurangan panas selama $\frac{1}{4}$ menit sebanyak:

$$Q_{\frac{1}{4} \text{ menit}} = (\frac{1}{4} : 60) \times - 827.650.000 \text{ KJ/j} =$$

$$= - 3.448.542 \text{ KJ}/\frac{1}{4} \text{ menit}$$

Kekurangan panas ini diderita oleh air yang ada di dalam tangki ketel sebanyak 30.000 kg, sehingga entalpinya akan turun sebanyak = $- 3.448.542 \text{ KJ} : 30.000 \text{ kg} =$

$$W_{\frac{1}{4} \text{ menit}} = - 114,95 \text{ KJ/kg}$$

Sehingga entalpi air mendidih yang baru =

$$W'_d = 1363 \text{ KJ/kg} - 114,95 \text{ KJ/kg} = 1248,05 \text{ KJ/kg}$$

Dalam Tabel Uap Kenyang atau Tabel 1 dengan cara interpolasi didapat tekanannya sebesar = $66,5 \text{ kg/cm}^2$

Contoh 9 : Seperti pada contoh 5; tiba-tiba kran uap ditutup. Apa yang akan terjadi 10 detik kemudian, bila api masih tetap sama besarnya?

Jawab : Besarnya api semula = $827.650.000 \text{ KJ/jam}$
 Kebutuhan panas bila kran uap ditutup = 0 KJ/jam

Kelebihan panas 1 j = $827.650.000 \text{ KJ/jam}$

Kelebihan panas dalam 10 detik =

$$\Delta Q_{10 \text{ detik}} = (10 : 3600) \times 827.650.000 =$$

$$= 2.299.028 \text{ KJ}/10 \text{ detik}$$

Kelebihan panas ini diderita oleh 30.000 kg air yang ada di dalam ketel sehingga entalpinya akan naik sebanyak =

$$\Delta W_{10 \text{ detik}} = (2.299.028 : 30.000) \text{ KJ/kg} =$$

$$= 76,63 \text{ KJ/kg}$$

Dengan demikian entalpi air mendidih yang baru =

$$= 1363 \text{ KJ/kg} + 76,63 \text{ KJ/kg} = 1439,63 \text{ KJ/kg}$$

Yang dalam Tabel Uap Kenyang atau Tabel 1 dengan cara interpolasi didapat tekanannya = $107,5 \text{ kg/cm}^2$. Bila ingin diketahui sampai berapa lama ketel tersebut akan meledak pada $112,5 \text{ kg/cm}^2$ di mana entalpi air mendidihnya $W_d = 1459,25 \text{ KJ/kg}$, maka waktu yang diperlukan = $[(1459,29 - 1363) : 76,63] \times 10 \text{ detik} = 12,6 \text{ detik}$.

6. Perpindahan Panas Pada Ketel Uap

Panas yang dihasilkan karena pembakaran bahan bakar dan udara, yang berupa Api (yang menyala) dan Gas Asap (yang tidak menyala) dipindahkan kepada air, uap ataupun udara, melalui bidang yang dipanaskan atau Heating Surface, pada suatu instalasi ketel uap, dengan tiga cara:

- Dengan cara *Pancaran* atau *Radiasi*,
- Dengan cara *Aliran* atau *Konveksi*,
- Dengan cara *Perambatan* atau *Konduksi*.

a. Perpindahan panas secara Pancaran atau Radiasi

Pemindahan panas secara Pancaran atau Radiasi adalah perpindahan panas antara suatu benda ke-benda yang lain dengan jalan melalui *Gelombang-gelombang Elektro-Magnetis* tanpa tergantung kepada ada atau tidaknya Media atau Zat di antara benda yang menerima pancaran panas tersebut.

Pemindahan panas secara Pancaran dapat dibayangkan berlangsung melalui media berupa *Aether* yaitu suatu jenis materi bayangan tanpa bobot, yang mengisi seluruh sela-sela ruangan di antara molekul-molekul dari suatu zat tertentu, ataupun di dalam ruang hampa sekalipun.

Molekul-molekul api yang merupakan hasil pembakaran bahan bakar dan udara akan menyebabkan terjadinya gangguan keseimbangan elektro-magnetis terhadap Aether tersebut.

Sebagian dari panas atau energi yang timbul dari hasil pembakaran tersebut, diserahkan kepada Aether, dan yang akan menyerahkannya lebih lanjut melalui *Gelombang-gelombang Elektro-Magnetik* kepada benda

atau bidang yang akan dipanasi (dinding ketel, dinding tungku, lorong api, pipa-pipa ketel dan sebagainya).

Penyerahan panas dari api atau gas asap melalui aether kepada bidang yang akan dipanasi tersebut melalui gelombang-gelombang elektromagnetik yang lintasannya lurus seperti seperti halnya lintasan sinar.

Apabila lintasan penyerahan panas melalui gelombang-gelombang elektromagnetis dari aether tersebut tertutup atau terhalang oleh benda lain, maka bidang yang akan dipanasi tadi tidak akan menerima panas secara pancaran, atau terhalang penyerahan panas secara pancarannya.

Dengan demikian: bidang yang akan dipanasi hanya dapat menerima perpindahan panas secara pancaran bila bidang/benda tersebut dapat melihat api tersebut. Dan bila sesuatu benda/bidang terhalang *Penglihatannya* kepada api, maka bidang/benda tersebut tidak akan memperoleh panas secara pancaran.

Semua zat-zat yang memancarkan panasnya (molekul-molekul api atau gas asap), intensitas radiasi thermisnya atau *Kuat Pancaran Panasnya* tergantung dari temperatur zat yang memancarkan panas tersebut.

Bila pancaran panas menimpa sesuatu benda atau bidang, sebagian dari panas pancaran yang diterima benda tersebut, akan dipancarkan kembali (re-radiated) atau dipantulkan (reflected), dan sebagian yang lain dari panas pancaran tersebut akan diserapnya.

Adapun banyaknya panas yang diterima secara pancaran atau Q_p berdasarkan rumus dari Stephan-Boltzmann adalah sebesar:

$$Q_p = C_z \cdot F \cdot [(T_{\text{api}} : 100)^4 - (T_{\text{benda}} : 100)^4] \text{ KJ/Jam}$$

C_z konstanta pancaran dari Stephan-Boltzmann yang dinyatakan dalam Kilojoule/m² . jam . K⁴ atau dalam Watt/m² . °K⁴

Bila C_z dinyatakan dalam Kilojoule/m² . jam . °K⁴ maka Q_p dinyatakan dalam Kilojoule/jam.

Bila C_z dinyatakan dalam Watt/m² . °K⁴ maka harga Q_p dinyatakan dalam WATT.

Adapun besarnya C_z antara lain ditentukan oleh:

- keadaan permukaan bidang yang dipanasi, kasar, halus;
- bahan benda yang dipanasi: besi, tembaga, aluminium, dll.;
- warna bidang benda yang dipanasi: hitam, abu-abu, putih;
- dan lain-lain.

Harga-harga C_z :	$KJ/M^2 \cdot jam. ^\circ K^4$	$Watt/m^2 \cdot ^\circ K^4$
- benda hitam pekat absolut	20,726	5.757
- jelaga yang licin	18,004	5.000
- baja yang dipoles.	5,569	5.47
- baja berkarat.	18,423	5,117
- besi tuang berkarat.	16,748	4,652
- pasangan batu tahan api	19,260	5,350

F = luas bidang yang dipanasi, dalam m^2

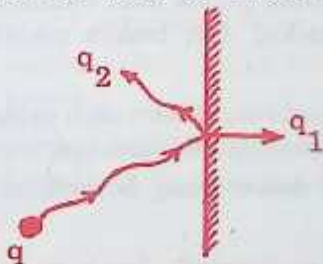
T = Temperatur dalam $^\circ$ Kelvin

Untuk perhitungan-perhitungan praktis lebih lanjut dalam teknik ketel uap, besarnya harga konstanta Stephan-Boltzmann

$$C_z = 16,75 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam.}^\circ K^4 = 4,65 \text{ Watt/m}^2 \cdot ^\circ K^4$$

b. Perpindahan panas secara Aliran atau Konveksi

Perpindahan panas secara Aliran atau Konveksi adalah perpindahan panas yang dilakukan oleh molekul-molekul suatu fluida (cair ataupun gas). Molekul-molekul fluida tersebut dalam gerakannya melayang-layang ke sana ke mari membawa sejumlah panas masing-masing



q Joule. Pada saat molekul fluida tersebut menyentuh dinding ketel maka panasnya dibagikan sebagian, yaitu q_1 Joule kepada dinding ketel, selebihnya yaitu $q_2 = q - q_1$ Joule dibawanya pergi.

Bila gerakan dari molekul-molekul yang melayang-layang ke sana ke mari tersebut disebabkan karena Perbedaan Temperatur di dalam fluida itu sendiri, maka perpindahan panasnya disebut Konveksi Bebas (*free convection*) atau Konveksi Alamiah (*natural convection*).

Bila gerakan molekul-molekul tersebut sebagai akibat dari Kekuatan Mekanis (karena dipompa atau karena dihembus dengan fan) maka perpindahan panasnya disebut Konveksi paksa (*forced convection*). Dalam gerakannya molekul-molekul api disebut tidak perlu melalui lintasan yang lurus untuk mencapai dinding ketel atau bidang yang dipanasi.

Jumlah panas yang diserahkan secara Konveksi = $Q_k =$

$$Q_k = \alpha \cdot F \cdot (T_{\text{api}} - T_{\text{dinding}}) \text{ KJ/jam}$$

α = Angka Peralihan Panas dari api ke-dinding ketel dinyatakan dalam Kilojoule/m² .jam.°K atau Watt/m² .°K.

Bila α dinyatakan dalam KJ/m² .jam.°K

Bila α dinyatakan dalam Watt/m² .°K maka Q_k dinyatakan dalam KJ/jam; sedangkan bila α dinyatakan dalam Watt/m² .°K, maka Q_k dinyatakan dalam Watt.

F = Luas bidang yang dipanasi dinyatakan dalam m²

T = Temperatur di dalam ° Kelvin.

c. Perpindahan panas secara Perambatan atau Konduksi

Perpindahan panas secara **perambatan** atau **konduksi** adalah perpindahan panas dari **satu bagian benda padat** ke bagian lain dari **benda padat yang sama**, atau dari **benda padat yang satu** ke **benda padat yang lain** karena terjadinya **persinggungan fisik** (kontak fisik atau menempel), tanpa terjadinya perpindahan molekul-molekul dari benda padat itu sendiri.

Di dalam dinding ketel tersebut, panas akan **dirambatkan** oleh molekul-molekul dinding ketel sebelah luar yang berbatasan dengan api, menuju ke molekul-molekul dinding ketel sebelah dalam yang berbatasan dengan air, uap ataupun udara.

Perambatan panas melalui benda padat **menempuh jarak yang terpendek**.

Jumlah panas yang di-rambatkan-kan = Q_R melalui dinding ketel adalah sebesar:

$$Q_R = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot (T_{d_1} - T_{d_2}) \text{ Kilojoule/jam}$$

λ = Angka perambatan panas di dalam dinding ketel dinyatakan dalam Kilojoule/m.jam. $^{\circ}$ K atau Watt/m. $^{\circ}$ K.

Bila λ dinyatakan dalam KJ/m.jam. $^{\circ}$ K maka Q_R dinyatakan dalam KJ/jam; tetapi bila λ dinyatakan di dalam Watt/m 2 K maka Q_R dinyatakan di dalam Watt.

s = tebal dinding ketel dinyatakan dalam meter.

F = luas dinding ketel yang merambatkan panas, dalam m 2

T_{d_1} = Temp. dinding ketel yang berbatasan dengan api.

T_{d_2} = Temp. dinding ketel yang berbatasan dengan air, uap atau udara.

Temperatur dinyatakan di dalam $^{\circ}$ Kelvin.

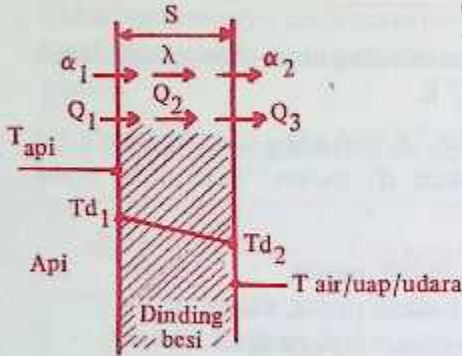
Untuk selanjutnya, panas yang dibawa merambat oleh dinding ketel tersebut akan diterima oleh molekul-molekul air, uap ataupun udara dengan cara konveksi pula, yaitu penyerahan sebagian panas dari molekul-molekul dinding ketel kepada molekul-molekul air, uap ataupun udara. Molekul-molekul air, uap ataupun udara tersebut dalam keadaan mengalir/bergerak, bukan dalam kondisi diam.

Dengan demikian penyerahan panas secara **Konveksi** dan **Konduksi** bersama-sama melalui proses-proses sebagai berikut:

- **Panas dialihkan dari fluida** (api atau gas asap) kepada **benda padat** (dinding ketel).
- **Panas dirambatkan** di dalam **benda padat** (dinding ketel) atau di dalam **benda padat berlapis-lapis** (jelaga — dinding ketel — kerak ketel)
- **Panas dialihkan dari benda padat** (dinding ketel atau kerak ketel) kepada **fluida** (air, uap ataupun udara).

PERPISAHAN PANAS MELALUI DINDING YANG BERSIH:

Di dalam gambar berikut ini, memisahkan api ada di sebelah kiri dari dinding ketel, sedangkan air uap ataupun udara, ada di sebelah kanan dari dinding ketel.



Bila: F = luas dinding ketel yang dilewati panas dinyatakan dalam m^2

s = tebal dinding dalam m

λ = Angka perambatan panas dalam $KJ/m.jam.^{\circ}K$

α_1 = Angka peralihan panas dari api ke dinding ketel, dinyatakan dalam $Kilojoule/m^2.jam.^{\circ}K$

α_2 = Angka peralihan panas dari dinding ketel kepada air, uap ataupun udara, dinyatakan dalam $KJ/m^2.jam.^{\circ}K$

Q_1 = Panas yang diserahkan oleh api kepada dinding ketel, yang besarnya adalah:

$$Q_1 = \alpha_1 . F . (T_{afi} - T_{d1}) \text{ Kilojoule/jam}$$

Q_2 = Panas yang dirambatkan di dalam dinding ketel, besarnya:

$$Q_2 = \frac{\lambda}{s} . F . (T_{d1} - T_{d2}) \text{ Kilojoule/jam}$$

Q_3 = Panas yang diserahkan oleh dinding ketel kepada air, uap atau udara, yang besarnya adalah:

$$Q_3 = \alpha_2 . F . (T_{d2} - T_{air/uap/udara}) \text{ Kilojoule/jam}$$

T_{d1} = Temperatur dinding ketel sebelah kiri dalam $^{\circ}K$ elvin.

T_{d2} = Temperatur dinding kanan dinyatakan dalam $^{\circ}K$ elvin.

Bila penyerahan panas dari api ke-air, uap atau udara melalui dinding ketel tersebut, keadaannya dalam Keadaan Seimbang (Steady State), maka berarti bahwa:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

Sebab jika tidak demikian, yaitu bahwa bila:

$$Q_1 \neq Q_2 \neq Q_3 \neq Q$$

maka berarti ada sejumlah panas yang tertinggal, sehingga temperatur dinding makin lama meningkat, yang berarti Keadaan Seimbang (Steady State) adalah belum tercapai.

Ketiga persamaan tersebut kita ubah menjadi:

$$Q_1 = \alpha_1 \cdot F \cdot (T_{\text{api}} - T_{d_1}) = Q \rightarrow T_{\text{api}} - T_{d_1} = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{Q}{F} \quad (1)$$

$$Q_2 = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot (T_{d_1} - T_{d_2}) = Q \rightarrow T_{d_1} - T_{d_2} = \frac{s}{\lambda} \cdot \frac{Q}{F} \quad (2)$$

$$Q_3 = \alpha_2 \cdot F \cdot (T_{d_2} - T_{\text{air}}) = Q \rightarrow T_{d_2} - T_{\text{air}} = \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{Q}{F} \quad (3)$$

$$\text{Penjumlahan (1) + (2) + (3) = } T_{\text{api}} - T_{\text{air}} = \frac{Q}{F} \times \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$$

Bila $\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$ diganti dengan $1/k_o$; maka persamaan tersebut berubah menjadi:

$$T_{\text{api}} - T_{\text{air}} = \frac{Q}{F} \times \frac{1}{k_o} \quad \text{atau} \quad \boxed{q = k_o \cdot F \cdot (T_{\text{api}} - T_{\text{air}})}$$

dengan harga k_o yang dicari dari

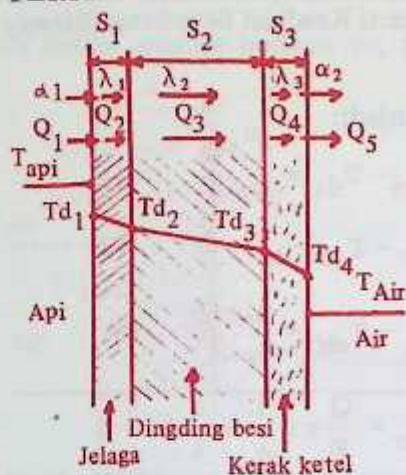
$$\boxed{\frac{1}{k_o} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

k_o = Angka perpindahan panas melalui dinding yang bersih dinyatakan di dalam Kilojoule/m² .°K/jam atau di dalam Watt/m² .°K.

Bila k_o dinyatakan di dalam Kilojoule/m² .jam .°K maka Q dinyatakan di dalam Kilojoule/jam; sedangkan bila k_o dinyatakan dalam Watt/m² .°K maka Q dinyatakan dalam Watt.

Dari rumus yang terakhir tadi, ternyata harga Q yang dihasilkan tanpa memperhatikan besarnya harga T_{d_1} ataupun T_{d_2}

PERPINDAHAN PANAS MELALUI DINDING YANG KOTOR:



Seperti terlihat pada gambar, panas dari api dipindahkan kepada air, uap ataupun udara melalui lapisan-lapisan sebagai berikut: Jelaga — dinding besi — kerak ketel.

Adapun taha-tahap perpindahan panasnya adalah sebagai berikut:

Q_1 = Panas yang diserahkan oleh api kepada jelaga.

$$Q_1 = \alpha_1 \cdot F. (T_{api} - T_{d1})$$

Q_2 = Panas yang dirambatkan di dalam jelaga.

$$Q_2 = \frac{\lambda_1}{s_1} \cdot F. (T_{d1} - T_{d2})$$

Q_3 = Panas yang dirambatkan di dalam dinding ketel.

$$Q_3 = \frac{\lambda}{s_2} \cdot F. (T_{d2} - T_{d3})$$

Q_4 = Panas yang dirambatkan di dalam kerak ketel.

$$Q_4 = \frac{\lambda_3}{s_3} \cdot F. (T_{d3} - T_{d4})$$

Q_5 = Panas yang diserahkan dari kerak ketel kepada air, uap ataupun udara.

$$Q_5 = \alpha_2 \cdot F. (T_{d4} - T_{air})$$

α_1 = Angka peralihan panas dari api ke jelaga, dinyatakan dalam Kilojoule/m² .jam.°K atau dalam Watt/m² .°K.

α_2 = Angka peralihan panas dari kerak ketel ke-air, uap atau udara, dalam KJ/m² .jam.°K atau dalam Watt/m² .°K

λ_1 = Angka perambatan panas di dalam jelaga, dalam KJ/m. j. °K atau di dalam Watt/m.°K

λ_2 = Angka perambatan panas di dalam dinding ketel, di dalam KJ/m.jam.°K atau Watt/m.°K

λ_3 = Angka perambatan panas di dalam kerak ketel, dinyatakan dalam KJ/m.jam. $^{\circ}$ K atau dalam Watt/m. $^{\circ}$ K

s_1 = Tebal lapisan jelaga dalam meter.

s_2 = Tebal lapisan dinding ketel dalam meter.

s_3 = Tebal lapisan kerak ketel dalam meter.

T_{d_1} = Temperatur jelaga sebelah kiri dalam $^{\circ}$ Kelvin

T_{d_2} = Temperatur jelaga sebelah dalam (kanan) dalam $^{\circ}$ Kelvin.
= Temperatur dinding besi sebelah kiri.

T_{d_3} = Temperatur dinding besi sebelah kanan dalam $^{\circ}$ Kelvin.
= Temperatur kerak ketel sebelah kiri.

T_{d_4} = Temperatur kerak ketel sebelah kanan dalam $^{\circ}$ Kelvin.

Q dinyatakan di dalam Kilojoule/jam atau Watt

Bila keadaan seimbang tercapai (*Steady state*) maka:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_5 = Q$$

sebab jika tidak demikian, maka berarti ada panas yang tertinggal, yang berarti di suatu tempat temperaturnya akan terus menerus meningkat.

Kelima buah persamaan tersebut dapat ditulis menjadi:

$$Q_1 = Q = \alpha_1 \cdot F \cdot (T_{api} - T_{d_1}) \longrightarrow T_{api} - T_{d_1} = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{Q}{F}$$

$$Q_2 = Q = \frac{\lambda_1}{s_1} \cdot F \cdot (T_{d_1} - T_{d_2}) \longrightarrow T_{d_1} - T_{d_2} = \frac{s_1}{\lambda_1} \cdot \frac{Q}{F}$$

$$Q_3 = Q = \frac{\lambda_2}{s_2} \cdot F \cdot (T_{d_2} - T_{d_3}) \longrightarrow T_{d_2} - T_{d_3} = \frac{s_2}{\lambda_2} \cdot \frac{Q}{F}$$

$$Q_4 = Q = \frac{\lambda_3}{s_3} \cdot F \cdot (T_{d_3} - T_{d_4}) \longrightarrow T_{d_3} - T_{d_4} = \frac{s_3}{\lambda_3} \cdot \frac{Q}{F}$$

$$Q_5 = Q = \alpha_2 \cdot F \cdot (T_{d_4} - T_{air}) \longrightarrow T_{d_4} - T_{air} = \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{Q}{F}$$

Dengan menjumlahkan kelima persamaan tersebut akan didapat hasil persamaan sebagai berikut:

$$T_{api} - T_{air} = \frac{Q}{F} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$$

Dengan mengganti seluruh faktor yang terdapat di dalam kurung dengan $1/k_k$

$$\frac{1}{k_k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}$$

k_k = Angka permindahan panas langsung dari api ke-air melalui dinding ketel yang kotor dinyatakan di dalam Kilojoule/m² .jam. °K atau di dalam Watt/m² . °K

maka persamaan tersebut menjadi:

$$T_{\text{api}} - T_{\text{air}} = \frac{Q}{F} \times \frac{1}{k_k} \text{ atau diubah menjadi:}$$

$$Q = k_k \cdot F \cdot (T_{\text{api}} - T_{\text{air}})$$

dengan Q dinyatakan di dalam KJ/jam atau Watt

Persamaan terakhir tadi menyatakan bahwa T_{air} ataupun T_{uap} tidak tergantung dari tingginya temperatur dinding besi, temperatur jelaga ataupun temperatur kerak ketel.

Contoh - 1:

Diketahui: $Q = 42.000 \text{ KJ/jam}$; $F = 1\text{m}^2$; $T_{\text{api}} = 1000^\circ \text{K}$;

$\alpha_1 = 90 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{j} \cdot ^\circ \text{K}$ (dari api ke dinding)

$\alpha_2 = 80 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{j} \cdot ^\circ \text{K}$ (dari api ke jelaga)

$\alpha_3 = 20.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{j} \cdot ^\circ \text{K}$ (dari dinding besi ke-air)

$\alpha_4 = 19.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{j} \cdot ^\circ \text{K}$ (dari kerak ketel ke air)

$\lambda_1 = 0,42 \text{ KJ/m} \cdot \text{j} \cdot ^\circ \text{K}$ (di dalam jelaga)

$\lambda_2 = 225 \text{ KJ/m} \cdot \text{j} \cdot ^\circ \text{K}$ (di dalam dinding besi)

$\lambda_3 = 8,0 \text{ KJ/m} \cdot \text{j} \cdot ^\circ \text{K}$ (di dalam kerak ketel)

$s_1 = 1,5 \text{ mm}$ (tebal jelaga)

$s_2 = 20 \text{ mm}$ (tebal pelat besi)

$s_3 = 1 \text{ mm}$ (tebal kerak ketel)

- Ditanyakan :
- Harga k_o untuk dinding yang bersih.
 - Harga k_k untuk dinding yang kotor.
 - Temperatur air bila dinding bersih.
 - Temperatur air bila dinding kotor.

Jawab : a. Bila dinding bersih:

$$\frac{1}{k_o} = \frac{1}{90} + \frac{0,02}{225} + \frac{1}{20.000} = 0,01125$$

$$k_o = 88,89 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$Q = k_o \cdot F \cdot (T_{\text{api}} - T_{\text{air}})$$

$$42.000 = 88,89 \times 1 \times (1000 - T_{\text{air}})$$

$$T_{\text{air}} = 1000 - \frac{42.000}{88,89} = 527,5^\circ\text{K} = 254,5^\circ\text{C}$$

b. Bila dinding kotor:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{80} + \frac{0,0015}{0,42} + \frac{0,02}{225} + \frac{0,001}{8} + \frac{1}{19.000}$$

$$= 0,01634$$

$$\text{sehingga } k_k = 1 : 0,01634 = 61.207 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{j} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$Q = k_k \cdot F \cdot (T_{\text{api}} - T_{\text{air}})$$

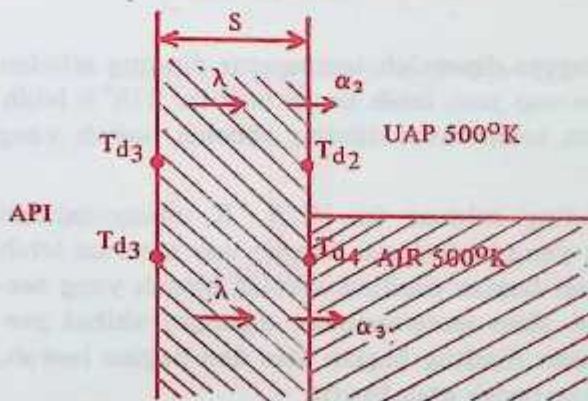
$$42.000 = 61,207 \times 1 \times (1000 - T'_{\text{air}})$$

$$T'_{\text{air}} = 1000 - \frac{42.000}{61,207} = 313,8^\circ\text{K} = 40,8^\circ\text{C}$$

Contoh 2 : Lihat gambar berikut!

Api di sebelah kiri dinding ketel.

Uap kenyang dan air di sebelah kanan dinding ketel.



$$T_{\text{uap}} = T_{\text{air}} = 500^\circ\text{K}$$

$$Q = 42.000 \text{ KJ/jam}$$

$$F = 1 \text{ m}^2$$

$$\alpha_2 = 150 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{j} \cdot ^\circ\text{K}$$

(dari dinding kepada uap).

$$\alpha_3 = 20.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{j} \cdot ^\circ\text{K}$$

(dari dinding kepada air).

$$\lambda = 225 \text{ KJ/m} \cdot \text{j} \cdot ^\circ\text{K}$$

dalam dinding besi.

$$s = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m}$$

Ditanyakan : T_{d_1} ; T_{d_2} ; T_{d_3} ; T_{d_4}

Jawab : a. Yang berbatasan dengan uap:

$$Q = \alpha_2 \cdot F \cdot (T_{d_2} - T_{uap})$$

$$42.000 = 150 \times 1 \times (T_{d_2} - 500)$$

$$T_{d_2} = 500 + \frac{42.000}{150 \times 1} = 780^\circ \text{K}$$

$$Q = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot (T_{d_1} - T_{d_2})$$

$$42.000 = \frac{225}{0,02} \times 1 \times (T_{d_1} - 780)$$

$$T_{d_1} = 783,7^\circ \text{K}$$

b. Yang berbatasan dengan air:

$$Q = \alpha_3 \cdot F \cdot (T_{d_4} - T_{air})$$

$$42.000 = 20.000 \times 1 \times (T_{d_4} - 500)$$

$$T_{d_4} = 500 + \frac{42.000}{20.000 \times 1} = 502,1^\circ \text{K}$$

$$Q = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot (T_{d_3} - T_{d_4})$$

$$42.000 = \frac{225}{0,02} \times 1 \times (T_{d_3} - 502,1)$$

$$T_{d_3} = 502,1 + \frac{42.000 \times 0,02}{225 \times 1} = 505,8^\circ \text{K}$$

Dari contoh 2 tersebut ternyata diperoleh temperatur dinding sebelah atas yang berbatasan dengan uap jauh lebih tinggi (sekitar 278°K lebih tinggi) dibandingkan dengan temperatur dinding sebelah bawah yang berbatasan dengan air.

Perbedaan temperatur dinding sebesar itu, 278°K , menyebabkan bagian dinding sebelah atas yang berbatasan dengan uap memuai lebih banyak dibandingkan dengan bagian dinding sebelah bawah yang berbatasan dengan air. Hal ini akan menyebabkan tegangan akibat perbedaan panas pada perbatasan dinding bagian atas dan bagian bawah, sehingga mudah menyebabkan pecah atau bocor.

Keadaan yang demikian ini dilarang berdasarkan **undang-undang mengenai keselamatan kerja** dalam hal penggunaan Ketel Uap.

Salah satu pasal dari Undang-undang Keselamatan Kerja mengenai penggunaan Ketel Uap menyebutkan bahwa:

"Permukaan air di dalam ketel uap harus terletak sekurang-kurangnya 100 mm **di atas** bagian dinding ketel yang tertinggi yang masih dicapai dan disinggung oleh api atau gas asap, untuk Ketel Uap yang **dipasang tetap di darat.**"

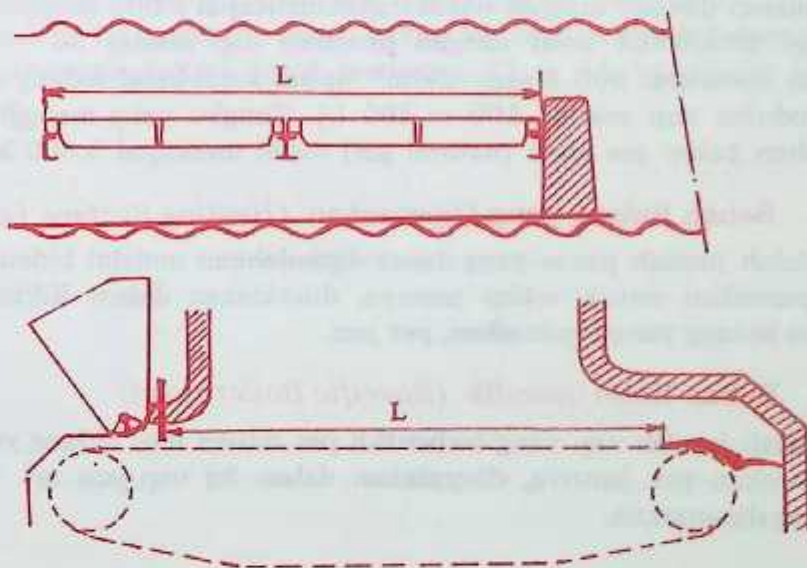
"Sedangkan untuk Ketel Uap yang dibawa-bawa bergerak, misalnya ketel lokomotif atau ketel uap untuk kapal laut, jarak minimal antara permukaan air terendah dengan bagian dinding ketel tertinggi yang masih disinggung oleh api/gas asap, adalah 250 mm."

7. *Beberapa Pengertian Istilah dalam Ketel Uap*

a. *Luas Bidang Rangka Bakar (LRB)*

Adalah luas efektif rangka bakar (bila ketel menggunakan rangka bakar) dinyatakan dalam m^2 , yang dapat digunakan untuk pembakaran bahan bakar yang ditaburkan di atasnya. Untuk rangka bakar tetap (*fixed grate*), dihitung mulai dari pemikul rangka bakar (*doodbed*) sampai jembatan api (*fire bridge*).

Sedangkan pada rangka bakar rantai (*chain grate*), dihitung mulai dari pintu sorong bahan bakar sampai penggaruk abu.



b. Beban Rangka Bakar (BRB)

Adalah jumlah bahan bakar yang dapat dibakar di atas rangka bakar, dinyatakan dalam kg bahan bakar/jam m^2 LRB.

Beban Rangka Bakar tergantung dari jumlah udara yang dapat dialirkan melalui setiap m^2 LRB, jadi tergantung dari tarikan cerobong alamiah atau stack draught, dan juga tergantung pula dari kecepatan pembakaran bahan bakar itu sendiri (batu bara gemuk lebih cepat terbakar dibandingkan dengan batu bara kurus), dan tergantung juga dari ruangan yang tersedia di atas rangka bakar.

BRB bervariasi antara 65 kg/jam m^2 LRB, yaitu bila pengopakan dilayani dengan tangan (*handstoke*) serta dengan dasar tarikan cerobong alamiah, hingga mencapai 200 kg/ m^2 jam yaitu bila menggunakan tarikan cerobong paksa (*forced draught*) dan menggunakan rangka bakar rantai.

c. Beban Tungku

Adalah jumlah panas yang terbentuk dari pembakaran bahan bakar per m^3 volume tungku, atau jumlah panas yang terbentuk per m^2 luas permukaan dinding tungku.

Untuk rangka bakar rantai dapat mencapai 1600 Megajoule per m^3 , untuk tungku-tungku yang menggunakan bahan bakar serbuk batu bara dapat mencapai 800 Megajoule/ m^3 . Sedangkan untuk pembakaran dengan minyak bakar dapat mencapai 2.000 Megajoule/ m^3 bagi ketel-ketel kecil dengan produksi uap sekitar 30 – 40 t/j dan mencapai 800 Megajoule/ m^3 untuk ketel-ketel sedang dengan produksi uap sekitar 100 – 400 t/j. Tungku yang menggunakan bahan bakar gas alam (natural gas) dapat mencapai 3.600 MJ/ m^3 .

d. Beban Bidang yang Dipanaskan (Heating Surface Load)

Adalah jumlah panas yang dapat dipindahkan melalui bidang yang dipanaskan untuk setiap jamnya, dinyatakan dalam KJ/ m^2 dari luas bidang yang dipanaskan, per jam.

e. Beban Ketel Spesifik (Specific Boiler Load)

Adalah jumlah uap yang terbentuk per satuan luas bidang yang dipanaskan per jamnya, dinyatakan dalam kg uap/jam m^2 bidang yang dipanaskan.

f. Beban Ketel Normal

Adalah beban ketel pada daya-guna (efisiensi) ketel uap mencapai maksimumnya dinyatakan dalam ton uap/jam.

g. Beban Ketel Kontinyu Maksimum

Adalah beban ketel untuk jangka waktu operasi yang lama dan kontinyu, tanpa menimbulkan kesukaran atau kerusakan yang berarti.

h. Beban Puncak Ketel Maksimum

Adalah beban ketel paling maksimal yang dapat dicapai.

i. Faktor Penguapan atau Evaporation Factor

Adalah jumlah uap yang terbentuk pada temperatur dan tekanan tertentu, dari hasil pembakaran 1 kg bahan bakar cair atau padat, atau 1 nm^3 (normal meter kubik, yaitu diukur pada 0°C dan tekanan 1 kg/cm^2) bahan bakar yang berupa gas, dinyatakan dalam uap/kg bahan bakar cair atau padat, atau dalam $\text{kg uap}/\text{nm}^3$ bahan bakar gas.

Uap yang dimaksud di sini adalah uap standard yaitu uap kenyang pada 100°C atau 373°K , yang dibuat dari air yang bertemperatur 0°C atau 273°K , yang tekanannya adalah 1 kg/cm^2 , yang memerlukan panas sebanyak 2675 Kilojoule/kg.

Bila bahan bakarnya batubara, maka faktor penguapannya mencapai 8 – 10 $\text{kg uap}/\text{kg}$ bahan bakar. Sedangkan untuk bahan bakar cair (minyak bakar) dapat mencapai 11 – 14 $\text{kg uap}/\text{kg}$ bahan bakar.

BAB II

BERBAGAI MACAM BAHAN BAKAR

8. Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan di dalam ketel uap pada umumnya diklasifikasikan sebagai berikut:

8.1. Bahan Bakar Padat:

- a. Kayu, sampah, ampas tebu, kulit kelapa, kulit biji teh, dan lain-lain.
- b. Macam-macam batu bara: turf atau peat atau lignite, batu bara coklat, steam coal, gas coal atau batu bara gemuk, cooking coal, second Admiralty coal (batu bara untuk menempa besi), first Admiralty coal (batu bara setengah kurus) atau house-hold coal, batu bara kurus, dan antrasit (*anthracite*).
- c. Macam-macam kokas: gas cokes, high furnace cokes, casting cokes.

8.2. Bahan Bakar Cair:

Berbagai jenis minyak bakar.

8.3. Bahan Bakar Gas:

Gas alam, gas bumi, gas rawa.

8.4. Bahan Bakar Nuklir

9. Bahan Bakar Padat

Bahan bakar padat yang terdapat di bumi kita ini berasal dari zat-zat organik. Bahan bakar padat mengandung unsur-unsur antara lain: zat arang atau Karbon (C), Hidrogen (H), zat asam atau Oksigen (O), zat lemas atau Nitrogen (N), Belerang (S), Abu dan Air, yang kesemuanya itu terikat dalam satu persenyawaan kimia.

REHENTAR BERBAGAI-MACAM BAHAN BAKAR PADAT DAN SIFAT-SIFATNYA

Bahan Bakar	% Volatile Matter	% (O + N)	% H	% H Dis-ponible	Sifat-sifat Bunga Api	Qterendah KJ/kg	Temperatur Penyulam
1. Kayu	n/d 70%	42-44	5,9-6,4	-	- - - -	18.642	4173-573 °K 200-300 °C
2. Turf (Peat)	70	30-40	5,0-7,0	-	Bunga api sangat panjang, kokas seperti arang kayu	19.579-22.610	493-573 °K 225-300 °C
3. Batubara Cokelat (Lignite)	55-70	15-30	4,5-7,0	-	Bunga api sangat panjang, kokas berbutir-butir	20.088-29.309	523-573 °K 250-400 °C
4. Steam Coal	Lebih dari 35	10-20	4,5-6,0	2,1-4,5	Bunga api sangat panjang, kokas seperti bubuk	27.215-33.496	573-823 °K 300-550 °C
5. Batubara Gemuk (Gas Coal)	25-35	5-10	4,5-6,0	3,5-5,3	Bunga api panjang, kokas berbutir-butir, padat	33.496-35.590	573-823 °K 300-550 °C
6. Cooking Coal	15-35	5-10	4,5-6,0	3,5-5,3	Bunga api panjang, kokas berbutir-butir, padat	33.496-35.590	573-823 °K 300-550 °C
7. Batubara tempo atau (Second Admiralty Coal)	14-18	3-6	4,5-5,5	3,9-5,0	Bunga api agak pendek, kokas agak menggumpal	35.171-36.008	573-823 °K 300-550 °C
8. Batubara Setengah Gemuk (= F = First Admiralty Coal)	11-14	2,5-5,5	4,0-6,0	3,6-4,5	Bunga api pendek, kokas seperti bubuk, sangat berbutir-butir	35.171-36.008	573-823 °K 300-550 °C
9. Household Coal, (Steam Coal)	10-15	2,5-5,5	4,0-6,0	3,5-4,5		35.171-36.008	573-823 °K 300-550 °C
10. Batubara Karas	8-12	2,5-5,5	4,0-4,5	3,0-4,0	Bunga api pendek sampai sangat pendek, berwarna biru, Kokas seperti bubuk	34.333-35.590	573-813 °K 300-550 °C
11. Anthracite	Kurang dari 10	2,0-4,5	2,0-4,0	1,5-3,5		34.752-35.171	573-823 °K 300-550 °C
12. Kokas: Gas Cokes High Furnace Cokes Cokes Casting	- - -	- - -	- - -	- - -	Bunga api sangat pendek ber- warna biru		450-600 °K 600-700 °C 675-900 °C

TABEL-11.1 MACAM-MACAM MINYAK BAKAR

	Minyak Bakar Encer	Jenis Minyak Bakar			
		A	B	C	D
Viskositas dalam Sec. Redwood I pada 100°F	30 – 45	300 – 500	800	3500	6500
Berat Jenis [kg/dm ³] pada 60/60°F	0,88	0,96	0,96	0,96	0,98
Titik nyala [°C] (Flaming Point)	90	95	95	95	100
Titik beku (Pourpoint)°F	- 2	6	6	6	36
Dapat dipompa pada [°C]		15	25	45	50
Dapat dikabutkan dengan tekanan pada [°C]		65 – 90	75 – 110	105 – 135	115 – 150
Kadar berat Karbon C [%]	85,7	85,8	85,7	85,4	85,6
Kadar Hidrogen H [%]	13,2	11,7	11,5	11,3	11,0
Kadar Belerang S [%]	0,7	2,1	2,4	2,9	3,0
U _{ov} [nm ³ /kg]	11,09	10,72	10,68	10,63	10,61
Kadar (CO ₂ + SO ₂) dalam berat [%]	15,4	15,9	15,9	16,0	16,1
Q _{Low} (Mega Joule/kg)	42,7	41,5	41,3	41,1	40,8

TABEL-12.B MACAM-MACAM GAS ALAM

	A	B	C	D	E	F
CH ₄ dalam vol [%]	88,5	88,5	87,7	91,4	85,1	81,9
C ₂ H ₆ dalam vol [%]	5,8	3,0	2,6	1,3	1,2	2,7
C ₃ H ₈ dalam vol [%]	2,2	0,7	0,8	0,2	0,3	0,4
C ₄ H ₁₀ dalam vol [%]	1,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,1
C ₅ H ₁₂ dan lebih	0,7	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
CO ₂ dalam vol [%]	0,5	0,2	2,5	3,2	4,0	0,8
N ₂ dalam vol [%]	1,1	7,0	5,7	3,6	8,8	14,0
O ₂ dalam vol [%]	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0
Kerapatan terhadap udara	0,67	0,62	0,635	0,62	0,65	0,64
Q _{High} [M.J/nm ³]	41,8	36,4	35,9	35,3	33,6	33,0
Q _{Low}	37,8	32,8	32,4	31,9	30,2	29,7
Wobbe-Index	51,1	46,2	45,1	44,7	41,6	40,8

Bila di dalam 1 kilogram bahan bakar yang terdiri dari C kg Karbon, H kilogram Hidrogin, O kg Oksigin, N kg Nitrogin, S kg Belerang, A kg Abu, W kg Arir, maka dapat dihitung nilai pembakaran atau *heating value* dari bahan bakar tersebut, yaitu jumlah panas yang dihasilkan dari pembakaran yang sempurna dari 1 kilogram bahan bakar yang dimaksud, berdasarkan rumus-rumus sebagai berikut:

$$Q_{\text{High}} = 33915 C + 144033 (H - 0/8) + 10468 S \text{ Kilojoule/kg.}$$

$$Q_{\text{Low}} = 33915 C + 121423 (H - 0/8) + 10468 S - 2512. (W + 9 \times 0/8)$$

Q_{High} = Nilai pembakaran tertinggi atau *highest heating value* yang dalam hal ini uap air yang terbentuk dari hasil pembakaran dicairkan dahulu, sehingga panas pengembunannya turut dihitung serta dinilai sebagai panas pembakaran yang terbentuk.

Q_{Low} = Nilai pembakaran terendah atau *lowest heating value*, uap air yang terbentuk dari hasil pembakaran tidak perlu dicairkan dahulu, sehingga panas pengembunannya tidak ikut serta untuk diperhitungkan sebagai panas pembakaran bahan bakar tersebut.

Di dalam Tabel dapat dilihat berbagai macam bahan bakar padat beserta beberapa sifat-sifatnya yang penting-penting. Di dalam Tabel tersebut, yang disebut dengan *Disponible Hydrogen* atau Hidrogen Bebas adalah kandungan Hidrogen di dalam bahan bakar, yang tidak terikat oleh Oksigen yang ada dalam bahan bakar tersebut.

Dari persamaan:

Sehingga : 1 kg Oksigen akan mengikat $4/32$ kg Hidrogen.
 Atau : O kg Oksigen akan mengikat $(4/32) \times O$ kg Hidrogen atau $O/8$ kg Hidrogen

Sehingga bila di dalam 1 kg bahan bakar terdapat H kg Hidrogen dan O kg Oksigen, maka jumlah Hidrogen yang terikat oleh Oksigen adalah sebanyak $O/8$ kg, sedangkan jumlah Hidrogen yang bebas atau *available hydrogen* adalah sebanyak $(H - O/8)$ kg.

Jumlah *Disponible Hydrogen* sangat berpengaruh terhadap harga dari Nilai Pembakaran atau *Heating Value*.

Contoh : Batu bara Bukit Asam, dengan komposisi 63,5% C; 5,8% H; 15,2% O; 0,5% S; 1% N; 9% Air; dan 5% Abu.

$$\begin{aligned} Q_{High} &= 33915 \times 0,635 + 144033 \times \\ &\quad \times (0,058 - \frac{0,152}{8}) + 10468 \times 0,005 = \\ &= 27205 \text{ Kilojoule/kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{Low} &= 33915 \times 0,635 + 121423 \times 0,058 - \frac{0,152}{8} + \\ &\quad + 10468 \times 0,005 - 2512 \times (0,09 + \frac{0,152}{8}) \\ &= 25668 \text{ Kilojoule/kg.} \end{aligned}$$

10. Sifat-sifat Bahan Bakar Padat yang Berupa Batu bara

10.1. Kandungan zat-zat yang mudah menguap atau Volatile Matter:

Di dalam bahan bakar padat, terkandung sejumlah zat-zat atau gas-gas yang mudah menguap, yang antara lain terdiri dari Hidrogen dan zat-zat air arang (CH_4 metan; C_2H_6 ethan; C_2H_2 acetylen; C_2H_4 aethylen; dan sebagainya).

Zat-zat atau gas-gas yang mudah menguap tersebut akan terbakar segera setelah bercampur dengan udara pembakar pada temperatur yang tinggi sekitar 1200°C atau 1473°K .

Yang dimaksud dengan kandungan zat-zat yang mudah menguap atau disingkat dengan kandungan zat-zat penguap atau Volatile Matter di dalam bahan bakar padat ialah prosentase atau berat dari zat-zat penguap, bila dilakukan distilasi kering terhadap bahan bakar tersebut, tanpa ada hubungan dengan udara, pada temperatur 950°C atau 1223°K , dikurangi dengan prosentase berat dari uap air yang turut serta menguap, sedangkan sisanya berupa kokas (*coke*).

1 kg bahan bakar padat = V kg zat-zat penguap + W kg uap air +
K kg kokas

10.2. Temperatur pencetusan atau flashing temperature:

Menyatakan temperatur pada saat panas reaksi yang dihasilkan sama dengan jumlah panas yang dibuang. Yaitu misalnya bahan bakar yang bersinggungan dengan udara panas yang melebihi atau sama dengan temperatur pencetusan dan sama sekali tidak ada panas yang dibuang, atau tidak ada pertukaran panas sama sekali, maka dalam keadaan demikian ini, bahan bakar tersebut dapat terbakar.

10.3. Temperatur Penyalaan atau Ignition Temperature:

Adalah temperatur pada saat bahan bakar padat atau cair akan terbakar, setelah menguapkan zat-zat penguapnya.

Pada umumnya temperatur penyalaan makin tinggi bila susunan bahan bakar makin sederhana. Gas-gas yang terbentuk setelah proses distilasi kering, gas-gas tersebut mengandung banyak Hidrogen dan bahkan bila gas-gas distilasi tersebut mengandung H_2 akan terbakar pada temperatur

yang tinggi, dan pembakaran akan berlangsung sempurna dan cepat bila terdapat cukup banyak udara yang tersedia untuk pembakaran.

Sebaliknya, untuk bahan bakar padat maupun cair, yang pada temperatur rendah telah mulai menguapkan zat-zat penguap, yang terdiri dari berbagai macam susunan uap ter, maka bahan bakar tersebut akan mempunyai temperatur penyalan yang rendah pula, tetapi sukar untuk mencapai pembakaran yang sempurna.

Untuk pembakaran bahan bakar yang berupa gas, maka hanya dibutuhkan sedikit energi untuk penyalannya. Hal ini disebabkan karena luas permukaan bidang molekul-molekul bahan bakar demikian merata untuk dapat bersinggungan dan dengan mudah pula bisa menerima panas dari udara pembakarnya.

Dengan jalan menghaluskan butiran-butiran batubara, atau dengan jalan mengabutkan untuk bahan bakar cair, maka permukaan bidang bahan bakar menjadi makin luas untuk dapat bersinggungan dengan udara pembakarnya. Bahan bakar berupa gas yang telah terbagi-bagi secara molekuler, maka permukaan bidang butiran-butiran bahan bakar adalah yang paling luas, sehingga hanya membutuhkan energi yang sedikit untuk penyalannya.

10.4. Kecepatan Pembakaran:

Jika batu bara dipanasi sampai 450°C atau 723°K , maka pertama-tama akan menguap semua kandungan uap airnya, disusul kemudian dengan penguapan dari zat-zat penguap. Penguapan uap air dan zat-zat penguap tersebut tergantung dari besar-kecilnya butiran-butiran bahan bakar, akan berlangsung kira-kira selama lima menit.

Adapun kecepatan pembakaran dari kokas yang tersisa, di samping tergantung dari besar-kecilnya butiran bahan bakarnya juga masih tergantung dari kadar kandungan zat-zat penguap dalam batu bara tersebut. Untuk perbandingan, prosentase kandungan zat-zat penguap berturut-turut: 10 — 14%; 20 — 30%; 40 — 50%; maka kecepatan pembakaran batu baranya berbanding seperti 2 : 3 : 5. Batubara kurus terbakar lebih perlahan, dan temperatur penyalannya lebih tinggi, dibandingkan dengan batu bara gemuk.

10.5. Ukuran-ukuran Butiran Batubara:

Ukuran-ukuran butiran batubara diklasifikasikan sebagai berikut:

- a. Bongkahan batubara : lebih besar dari 80 mm.
- b. Butiran I : antara 80 — 50 mm.
- c. Butiran II : antara 50 — 30 mm.
- d. Butiran III : antara 30 — 20 mm.
- e. Butiran IV : antara 20 — 10 mm.
- f. Butiran V : antara 10 — 5 mm.
- g. Batubara pasir : lebih kecil dari 5 mm.
- h. Serbuk batubara : lebih kecil dari 0,075 mm
(atau 75 mikron)

Makin kecil butirannya, makin cepat pembakarannya.

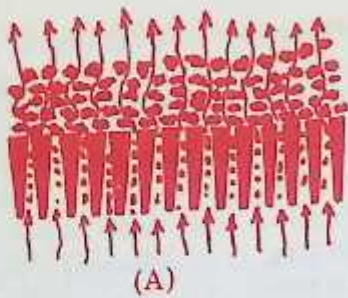
10.6. Kecenderungan untuk Menggumpal:

Yang dimaksud dengan kecenderungan untuk menggumpal dari sesuatu macam batubara, adalah sifat untuk melunak dan saling menggumpal antara butiran-butiran kokas yang tertinggal setelah berlangsungnya proses penguapan (penguapan air dan zat-zat penguap atau volatile matter, atau disebut juga proses distilasi).

Kecenderungan untuk menggumpal dari suatu macam batubara sangat perlu diketahui, terutama bila membakarnya di atas rangka bakar. Suatu macam batubara yang tidak cenderung menggumpal, butiran-butiran kokasnya akan tetap sendiri-sendiri dengan dimensi tertentu.

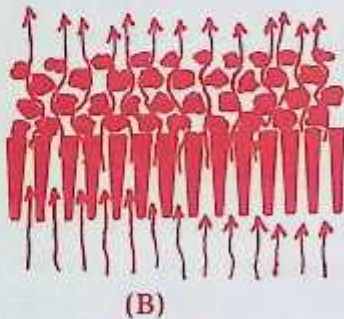
Batubara yang mempunyai kecenderungan yang besar untuk menggumpal, akan menyebabkan arus udara pembakar dari bawah melalui celah-celah rangka bakar (yang biasa disebut angin bawah atau udara primair) menjadi tersumbat, sehingga api mudah padam. Lihat Gambar.

Batubara yang kemampuan menggumpalnya sangat kecil atau batubara yang pada waktu terbakarnya pecah-pecah menjadi butiran yang kecil-kecil, butirannya akan mudah jatuh ke bawah melalui celah-celah rangka bakar, dan akan terbuang bersama-sama dengan abu, tanpa ada kesempatan untuk terbakar lebih lanjut. Atau jika butiran-butiran yang kecil ini ada di atas lapisan api, maka butiran-butiran ini akan terhembus terbang oleh gas asap dan terbawa melewati saluran-saluran gas asap dan bahkan dapat mencapai atau keluar dari cerobong asap.



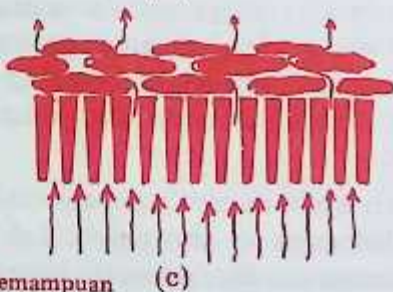
Batubara yang kemungkinan menggumpalnya kecil, atau pecah-pecah waktu terbakar, butiran yang kecil-kecil akan jatuh lewat celah-celah.

Udara primer bisa melewati celah-celah rangka bakar, butiran-butiran kokas akan jatuh ke bawah.



Batubara yang tidak menggumpal, tidak menyebabkan udara primer menjadi tersumbat jika melewati sela-sela di antaranya.

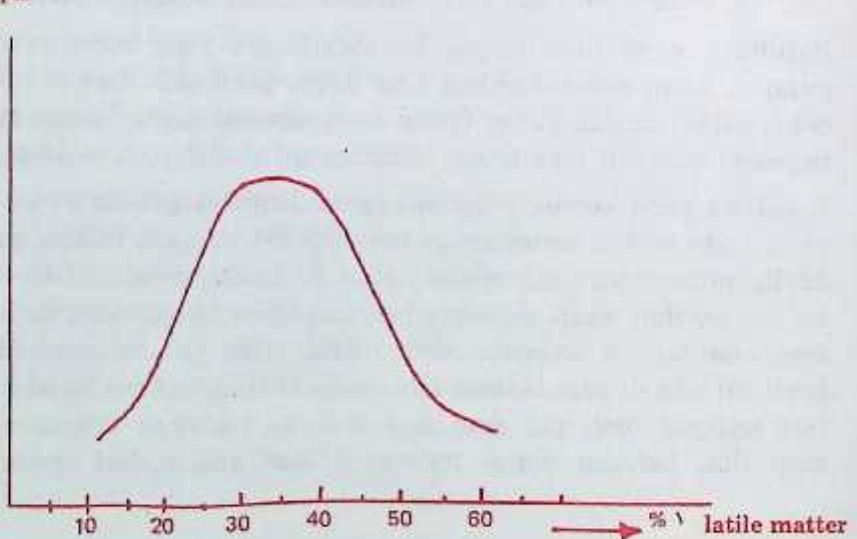
Udara primer bisa melewati celah-celah batang-batang rangka bakar.



Batubara yang mudah menggumpal menyebabkan udara primer menjadi tersumbat jika melewati di antara gumpalan-gumpalan batubara.

Udara primer tersumbat oleh batubara yang menggumpal.

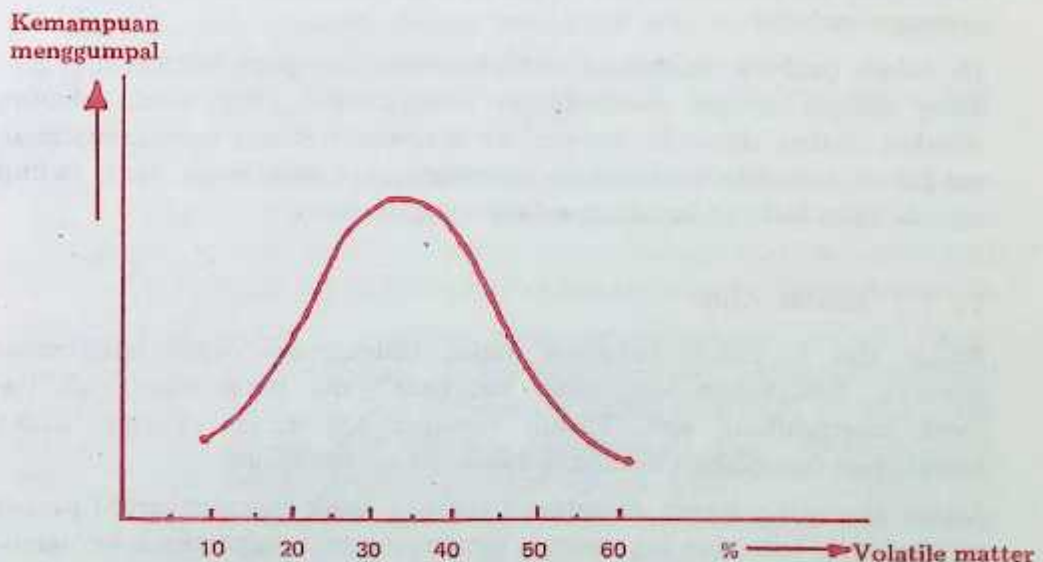
Kemampuan menggumpal



Untuk menghindari kesukaran-kesukaran tersebut, maka sering dilakukan orang mencampur batubara yang kecenderungannya menggumpal sangat besar (yang biasa disebut batubara gemuk) dengan batubara yang sangat kecil kemampuannya untuk menggumpal atau yang pecah-pecah pada waktu terbakar (yang biasa disebut batubara kurus).

Sekalipun demikian, harus dijaga bahwa pencampuran antara batubara gemuk dan batubara kurus harus bisa merata. Jika sampai terjadi pencampuran yang tidak merata atau kurang homogen, maka di beberapa tempat di atas permukaan rangka bakar akan terjadi atau terdapat bercak-bercak batubara yang menggumpal, yang menyebabkan tersumbatnya udara primer, dan ada beberapa lubang-lubang yang butiran-butiran batubaranya telah jatuh ke bawah lewat celah-celah rangka bakar, sehingga bentuknya bara api di atas rangka bakar menjadi bopeng-bopeng. Hal ini menyebabkan distribusi temperatur di atas rangka bakar menjadi tidak merata, sehingga **efisiensi pembakarannya** menjadi rendah.

Sering kali kemampuan menggumpalnya batubara dihubungkan dengan prosentase zat-zat penguap (*volatile matter*) yang dikandungnya, sekalipun tidaklah tepat demikian, dan bila digambarkan dengan grafik adalah seperti tersebut pada Gambar berikut ini.



Adapun proses menggumpal yang sebenarnya berlangsung sebagai berikut:

Bila batubara dipanasi sampai dengan $350^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$, maka mulailah batubara tersebut menjadi lunak. Keadaan menjadi lunak atau melunaknya batubara tersebut makin cepat bila derajat mengarangnya makin tinggi.

Jika proses melunaknya batubara telah dimulai, maka viskositas batubara tersebut akan menurun bila temperaturnya makin dinaikkan. Viskositas batubara tersebut makin turun sampai pada suatu batas minimum dan bertahan terus hingga temperaturnya mencapai titik tertentu, sedemikian sehingga batubara tersebut tiba-tiba menjadi keras kembali.

Penguraian batubara juga bermula pada temperatur yang kira-kira sama tinggi dengan temperatur melunaknya batubara. Sesudah gas-gas dan uap terurai dari batubara, maka viskositasnya naik dengan cepat dan batubara tersebut menjadi keras kembali.

Kecepatan pemanasan dari batubara berpengaruh terhadap kemampuan menggumpalnya batubara, yang juga mempengaruhi temperatur atau titik melunak dan temperatur atau titik penguraian gas-gas.

Batubara yang banyak mengandung gas-gas dan kecil kemampuan menggumpalnya, jika dipanaskan perlahan-lahan akan menyebabkan memperbesar kemampuan menggumpalnya. Di samping itu, batubara yang sedikit mengandung gas-gas dan kecil kemampuan menggumpalnya, bila dipanasi dengan cepat, dapat memperbesar kemampuan menggumpalnya.

Di dalam praktek dilakukan terhadap batubara yang banyak mengandung gas-gas dengan kemampuan menggumpal yang kecil, sebelum dibakar justru dibasahi dengan air terlebih dahulu, agar penguraian gas-gas diperlambat, sehingga memberikan kesempatan yang cukup agar butiran-butiran batubara saling menggumpal.

10.7. Kadar Abu:

Kadar abu di dalam batubara dapat diturunkan dengan jalan mencucinya. Bongkahan-bongkahan batubara yang besar-besar lebih banyak mengandung abu. Untuk memperkecil kadar abunya, maka bongkahan-bongkahan batubara diremukkan dan dicuci.

Kadar abu yang tinggi di dalam batubara tidak mempengaruhi proses pembakaran batubara itu sendiri, namun dapat memperbesar kerugian-

kerugian yang disebabkan terdapatnya sejumlah bahan bakar yang terbuang bersama-sama dengan abu, lagi pula sehabis pembakaran berlangsung, dapat menimbulkan kerak-kerak abu. Di samping itu kadar abu yang tinggi dalam batubara akan mempersukar penyalan batubara tersebut.

Yang lebih penting adalah justru kemungkinan mencairnya abu. Bila abu mencair pada temperatur pembakaran, dan merupakan lapisan cairan abu yang tipis di atas rangka bakar, maka lapisan cairan abu ini akan menutupi celah-celah rangka bakar yang akan dilalui oleh udara primer, sehingga penyaluran udara primer menjadi terganggu karenanya.

Di samping itu, bila abu cair tersebut kemudian menjadi padat, yang biasa disebut kerak abu, maka kerak abu tersebut akan sukar untuk dihilangkan dari rangka bakar atau dari dinding-dinding ketel tempat kerak abu tersebut melekat.

Kemungkinan mencairnya abu pertama-tama tergantung dari susunan abu itu sendiri. Untuk itu perlu diketahui indeks pencairan atau Melting Index dari batubara itu sendiri, yaitu perbandingan antara ($S_1O_2 + Al_2O_3$) dengan ($Fe_2O_3 + CaO + MgO$)

$$\text{Indeks Pencairan} = \frac{S_1O_2 + Al_2O_3}{Fe_2O_3 + CaO + MgO}$$

Malin tinggi harga indeks pencairan abu, makin tinggi pula temperatur melunaknya abu. Dengan indeks pencairan abu = 0 temperatur melunaknya abu sekitar $1000^\circ C$ atau $1273^\circ K$.

Sedangkan dengan indeks pencairan abu = 12, maka temperatur melunaknya abu sekitar $1400^\circ C$ atau $1673^\circ K$.

Dengan demikian harus diusahakan agar gas asap pada saat mulai memasuki daerah konveksi, dengan temperatur yang lebih rendah dari temperatur melunaknya abu tersebut, untuk menghindari terbentuknya "Bird Nest Forming" tersumbatnya saluran gas asap di daerah konveksi.

Abu sebelum mencair, mengalami proses-proses sebagai berikut: pertama-tama abu mulai melunak (*initial deformation*), kemudian menjadi makin lunak (*softening*) dan akhirnya mencair (*melting*). Sebagai contoh, abu yang berasal dari tambang batubara di negeri Belanda mempunyai initial deformation temperatur antara $1250^\circ C - 1270^\circ C$, kemudian softening temperature antara $1400^\circ C - 1410^\circ C$, dan melting temperature di atas $1400^\circ C$ pada tekanan 1 kg/cm^2 .

Abu yang mencair di atas 1500°C atau 1773°K tidak akan membawa kesukaran-kesukaran terhadap rangka bakar. Pada umumnya abu mencair di antara 1000°C – 1500°C . Abu dengan temperatur mencair yang rendah akan memperbesar kemampuan menggumpalnya batubara, karena abu cair tersebut akan mengikat butiran-butiran batubara tersebut.

10.8. Kadar Air:

Kadar air di dalam batubara menjadi bertambah pada saat proses pencucian batubara sehabis penambangannya. Bertambahnya kadar air di dalam batubara juga dapat disebabkan karena penimbunan batubara di udara terbuka, atau bila butiran-butiran batubaranya makin halus.

Jumlah kadar air dan abu di dalam batubara akan menurunkan Nilai Pembakaran (*Heating Value*) dari batubara tersebut.

10.9. Sifat Membara Sendiri dan Merusak Sendiri (*Broeien*):

Proses merusak dengan sendirinya, berlangsung karena batubara ditumpuk/ditimbun atau dionggokkan secara terbuka di udara bebas untuk jangka waktu yang cukup lama. Hal ini terjadi karena kandungan zat arang atau karbon (C) dan Hidrogen (H) menyusut, sedangkan zat asam (O) justru bertambah, yang disebabkan proses oksidasi secara perlahan-lahan antara udara bebas di sekitarnya dengan tumpukan/timbunan batubara tersebut, yang berlangsung dalam waktu yang cukup lama.

Nilai Pembakaran (*Heating value*) batubara dengan demikian menjadi menurun dan pengaruhnya besar terhadap kemampuan menggumpalnya batubara.

Proses dimulai dengan absorpsi Oksigen dari udara bebas oleh batubara, yang akan terjadi pada permukaan-permukaan dari butiran-butiran batubara. Lambat-laun berkat temperatur yang agak tinggi, Oksigen tersebut menjadi terikat secara kimiawi. Bila proses tersebut dibiarkan berlangsung terus, sedangkan proses tersebut akan menimbulkan panas, panas tersebut akan menyebabkan proses menjadi dipercepat, sehingga dapat menimbulkan proses lebih lanjut, yaitu proses **membara dengan sendirinya**.

Kecenderungan untuk merusak dengan sendirinya ataupun terbakar dengan sendirinya akan menurun, bila derajat **pengarangan** (*charring degree*) dari batubara makin tinggi. Pada kokas dan antrasit (*anthracite*),

tidak akan terjadi proses merusak dengan sendirinya ataupun terbakar dengan sendirinya. Pada umumnya batubara dengan kandungan Hidrogen yang rendah dan kandungan Oksigen yang tinggi, kecenderungan untuk merusak dengan sendirinya makin besar.

Untuk menghindari terjadinya proses merusak dengan sendirinya ataupun terbakar dengan sendirinya, maka timbunan batubara diusahakan agar tidak mendapatkan sesuatu pengaruh panas dari luar, yaitu diusahakan agar jangan bersinggungan dengan pipa-pipa yang panas (pipa air atau pipa uap yang panas), sekalipun pipa-pipa tersebut telah diisolasi terhadap panas, kolom-kolom baja yang ada hubungannya dengan panas, bahkan sinar matahari yang langsung, ataupun yang karena pantulan sesuatu bidang (atap, tembok, dan lain-lain), juga harus dihindarkan terjadinya.

Pada kapal-kapal, yang menggunakan bahan bakar batubara, maka agak sukar untuk menghindari pengaruh panas dari luar, lebih-lebih untuk daerah tropis. Sehingga terbakar dengan sendirinya pada batubara yang disimpan di kapal-kapal kadang-kadang dapat terjadi.

Di samping itu ada pengaruh-pengaruh luar lainnya yang dapat mempengaruhi proses merusak dengan sendirinya ataupun terbakar dengan sendirinya, antara lain: kandungan air, kandungan pyriet (F_eS), besarnya bongkahan-bongkahan batubara, kerapuhan batubara dan tingginya penimbunan batubara.

Kandungan air yang terdapat di dalam batubara, dapat membantu mendinginkan batubara pada saat kandungan air tersebut menguap, namun justru karena menguapnya kandungan air tersebut, batubara menjadi retak atau pecah-pecah, sehingga retakan-retakan pada butiran-butiran batubara tersebut akan merupakan bidang-singgung baru untuk penyerapan Oksigen dari udara bebas, yang dengan demikian akan memperbesar kecenderungan untuk merusak dengan sendirinya. Lagi-pula Oksigen mudah larut di dalam air yang terkandung di dalam batubara tersebut, sehingga juga berarti memperbesar kecenderungan untuk merusak dengan sendirinya.

Kandungan Pyrite (F_eS_2) di dalam batubara, sekalipun biasanya dalam jumlah yang sangat rendah, namun oksidasi dari Pyrite tersebut akan menyebabkan kenaikan temperatur, sehingga dapat memperbesar kecenderungan untuk merusak sendiri.

Besarnya bongkahan batubara mempengaruhi kecenderungan untuk merusak sendiri. Bongkahan batubara yang besar, bidang persinggungannya dengan udara tidaklah begitu luas, sehingga kurang kemungkinan

nya untuk merusak dengan sendirinya. Sebaliknya bongkahan batubara yang kecil, makin luas bidang persinggungannya dengan udara, sehingga memperbesar kecenderungan untuk merusak dengan sendirinya.

Bila batubara rapuh atau mudah retak-retak, maka retakan-retakan tersebut berarti memperluas bidang persinggungannya dengan udara, sehingga dengan demikian batubara yang rapuh akan memperbesar kecenderungannya untuk merusak dengan sendirinya.

Tinggi penimbunan batubara mempengaruhi langsung terhadap kecenderungan untuk merusak dengan sendirinya. Makin tinggi timbunan batubara, berarti makin jelek pertukaran panas dengan sekelilingnya, tetapi juga makin mengurangi pertukaran dengan udara sekelilingnya.

Batubara yang cenderung untuk merusak sendiri, tidak boleh ditimbun lebih dari 2,5 m sampai 3 m tingginya. Sedangkan batubara kurus dapat ditimbun tinggi-tinggi.

Batubara biasanya diangkut dengan menggunakan conveyor belt (ban berjalan) ke halaman penimbunan (coal-yard) untuk selanjutnya dengan bulldozer atau carryall diatur penimbunannya. Dalam hal ini, bongkahan-bongkahan batubara akan saling menekan atau saling memadatkan, karena bulldozer tersebut kadang-kadang lewat di atasnya pada waktu mengatur penimbunan batubara tersebut, sehingga lapisan luar timbunan batubara tersebut demikian padat dan keras, sehingga sirkulasi udaranya makin sukar.

Untuk mencegah meresapnya air ke dalam timbunan batubara, maka sering dilakukan orang dengan cara memerciki timbunan batubara dengan minyak, ataupun membuat saluran-saluran untuk membuang air bila turun hujan, di sekitar tempat-tempat penimbunan batubara.

Dengan cara-cara penimbunan yang baik, maka kadang-kadang dapat diusahakan timbunan batubara mencapai daya tahan sampai empat tahun tanpa proses merusak dengan sendirinya.

10.10. Kemungkinan Penggerusan Batubara atau Grindability:

Untuk pembakaran batubara serbuk, diperlukan waktu hanya beberapa detik. Untuk itu butiran-butiran batubara harus mempunyai bidang singgung yang cukup luas dengan udara pembakar, sehingga pada saat disemburkan ke dalam tungku harus dalam keadaan halus.

Agar penggunaan energi untuk penggilingan batubara dapat serendah mungkin, maka bila keadaan memungkinkan hendaknya dipilih batu-

bara dengan butiran-butiran halus, sampai dengan 5 mm. Dari batubara yang digiling, tidak boleh menyisakan sisa ayakan sebesar 15% pada ayakan dengan 6.400 buah mata ayak per cm^2 . Batubara yang lolos dari ayakan ini, besarnya serbuk adalah 0,075 mm.

Oleh karena itu, sebelum digiling dalam penggilingan batubara (*coal mill*), maka terlebih dahulu bongkahan-bongkahan batubara yang besar-besar diremukkan dahulu dalam pemecah batubara (*coal crusher*) hingga didapat butiran-butiran batubara sebesar maksimal 5 mm.

Kemungkinan penggerusan batubara atau grindability G yang berdasarkan metoda pengukuran dari **hardgrove** adalah sebesar $G = 6,93 W+13$ dengan W adalah massa dinyatakan dalam gram dari bubuk atau serbuk yang dapat melalui ayakan dengan 200 mata ayak per inch, setelah contoh (*sample*) batubara sebanyak 500 gram digiling sebanyak 60 putaran gilingan dari penggilingan standar (*standard mill*).

11. Bahan Bakar Cair:

Bahan bakar cair berasal dari minyak bumi. Minyak bumi didapat dari dalam tanah dengan jalan mengebornya di ladang-ladang minyak, dan memompanya sampai ke atas permukaan bumi, untuk selanjutnya diolah lebih lanjut menjadi berbagai jenis minyak bakar.

Minyak bumi (*crude oil*) yang berwarna coklat tua sampai kehitam-hitaman, terdiri dari campuran berbagai macam persenyawaan zat air arang (C dan H) yang terbagi menjadi jenis-jenis:

- a. Yang bersifat **Parafinis** (*Paraffinic base*), ialah persenyawaan zat air arang yang membentuk rantai yang panjang, atau sering disebut sebagai persenyawaan **Alifatis**, yang terdiri dari **Alkan** C_nH_{2n+2} atau **Alkin** C_nH_{2n}
- b. Yang bersifat **Naphtenis** (*Naphtenic base*), ialah persenyawaan zat air arang yang berbentuk **Siklis**, atau **Aromat** C_nH_{2n+6} atau **Cyclan** C_nH_{2n} ;

Minyak bumi (*crude oil*) hanya digunakan sebagai minyak bakar langsung di dalam ketel-ketel uap bila sedikit sekali mempunyai kandungan-kandungan persenyawaan zat air arang dengan titik atau temperatur mendidih yang rendah, sehingga tidak banyak manfaatnya untuk memisah-misahkannya. Keadaan yang demikian ini adalah keadaan yang khusus.

Umumnya dari minyak bumi (*crude oil*), dapat dipisah-pisahkan beberapa macam bahan bakar cair, antara lain berbagai jenis bensin, minyak tanah, kerosin, berbagai minyak solar serta berbagai jenis minyak bakar untuk ketel uap. Pemisahan-pemisahan menjadi beberapa jenis bahan bakar tersebut dilakukan dengan jalan distilasi bertingkat, melalui berbagai tingkatan temperatur.

Adapun berbagai jenis minyak bakar untuk ketel uap dengan data-datanya adalah seperti tersebut dalam Tabel-11.1.

Kandungan karbon (C) merupakan kandungan yang terbesar, lebih dari 85%. Sedangkan kandungan Hidrogen (H) sekitar 12-15%.

Yang disebut *Flaming point* dalam Tabel-11.1. tersebut, adalah temperatur terendah uap minyak bakar yang terbentuk, dapat dibakar.

Sedangkan yang disebut *Pour Point* dalam Tabel tersebut, ialah temperatur minyak bakar menjadi padat atau sebagian besar menjadi padat, sehingga minyak bakar tidak dapat dipompa.

12. Bahan Bakar Gas:

Di dalam tanah banyak terkandung: gas bumi (Petrol gas) atau sering pula disebut Gas alam, yang timbul pada saat proses pembentukan minyak bumi, gas tambang dan gas rawa (CH_4 atau metan).

Seperti halnya dengan minyak bumi, gas alam tersebut diperoleh dengan jalan pengeboran dari dalam tanah, baik di daratan maupun di lepas pantai terhadap lokasi-lokasi yang diduga terdapat kandungan gas alam.

Mengingat makin menyusutnya cadangan minyak bumi di dalam tanah, dewasa ini banyak dieksplorasi dan dimanfaatkan penggunaan gas bumi sebagai bahan bakar pengganti.

Penggunaan gas alam sebagai bahan bakar ketel uap, di samping sebagai bahan bakar pengganti (subtitut), membawa keuntungan-keuntungan sebagai berikut:

- a. Pada umumnya ketel uap yang menggunakan bahan bakar hanya gas alam saja akan lebih murah dibanding dengan ketel-ketel yang menggunakan bahan bakar minyak bakar atau bahan bakar padat lainnya. Hal ini disebabkan karena pembakaran gas alam tidak menghasilkan abu dan jelaga, sehingga kecepatan gas asap melalui celah-celah pipa dapat diperbesar, yang dengan demikian celah-celah antara pipa-pipa dapat dipersempit, dan dapat digunakan pipa-pipa dengan diameter yang lebih kecil. Karena kecepatan

gas asap lewat celah-celah pipa tersebut besar, maka perpindahan panas dari gas asap kepada air atau uap di dalam ketel juga akan menjadi besar, dengan demikian ukuran-ukuran atau dimensi ketel dapat lebih kecil, sehingga biaya Investasinya juga akan menjadi lebih murah.

- b. Peralatan pembakar untuk gas alam jauh lebih sederhana dibandingkan dengan peralatan pembakar dari minyak bakar ataupun bahan bakar padat lainnya, yang tidak memerlukan pengabut dan tidak memerlukan pemanasan, sehingga akan lebih ringan biaya Investasinya.
- c. Pembakaran dengan gas alam akan berlangsung lebih sempurna dibandingkan dengan minyak bakar ataupun bahan bakar padat lainnya. Pembakaran dengan gas alam tidak mengakibatkan polusi.
- d. Ketel uap yang menggunakan bahan bakar hanya gas alam saja akan lebih awet, karena gas alam tidak mengandung belerang (S) Natrium (Na) dan Vanadium (Va), serta tidak berjelaga, sehingga tidak membawa banyak kesukaran-kesukaran.
- e. Biaya operasi dan biaya perawatan (operation and maintenance cost) untuk ketel uap yang menggunakan bahan bakar gas alam, akan jauh lebih murah dibandingkan dengan ketel uap yang menggunakan bahan bakar minyak bakar, karena:
 - e.1. Harga gas alam rata-rata lebih murah dibanding dengan minyak bakar untuk jumlah panas yang sama yang dibangkitkan.
 - e.2. Beban tungku menjadi lebih tinggi, sehingga efisiensi ketel dapat lebih tinggi, dengan akibat penggunaan bahan menjadi lebih hemat.
 - e.3. Peralatan pembakar untuk gas alam jauh lebih sederhana, sehingga pelayanan dan perawatannya menjadi lebih sederhana dan murah.
 - e.4. Karena gas alam tidak mengandung belerang (S) maka temperatur cerobong dapat diturunkan lebih rendah daripada bila digunakan bahan bakar minyak bakar. Pada minyak bakar temperatur gas k luar dari cerobong asap tidak boleh lebih rendah dari 160°C , sedangkan bila menggunakan bahan bakar gas alam dapat mencapai 100°C , sehingga dengan demikian kerugian panas dicerobong menjadi berkurang karenanya, akibatnya efisiensi ketel makin tinggi, sehingga penggunaan bahan bakarnya bisa lebih hemat.

Tetapi di samping keuntungan-keuntungan tersebut yang didapat, di lain pihak penggunaan gas alam sebagai bahan bakar ketel uap mengandung keterbatasan-keterbatasan dan keberatan-keberatan sebagai berikut:

- f. Lokasi ketel uap harus di sekitar lokasi penambangan gas alam, atau setidaknya-tidaknya dalam jangkauan ekonomis transmisi pipa-pipa gas alam.
- g. Apabila di dalam jarak jangkauan ekonomis transmisi pipa-pipa sukar didapatkan air pengisian ketel yang baik kualitasnya atau/ dan sukar didapat air pendingin kondensor turbin yang baik sifat-sifatnya, maka dalam hal ini perlu tambahan biaya Investasi untuk pengolahan (*processing*) air pengisian ketel yang khusus untuk itu, serta peralatan-sirkulasi air pendingin kondensor yang mungkin berupa menara pendingin (*cooling tower*) yang cukup mahal.
- h. Diperlukan Investasi yang lebih besar untuk peralatan pengaturan dan instalasi pengamanannya, mengingat bahwa gas alam jauh lebih berbahaya dibanding dengan minyak bakar.

Terdapat berbagai macam susunan gas alam, tergantung gas alam tersebut dihasilkan. Pada Tabel-12.B. dapat dilihat susunan dari beberapa macam gas alam di antara sekian jenis gas alam, berikut sifat-sifatnya.

Di dalam Tabel 12-B. tersebut tertera apa yang dinamakan WOBBE INDEKS, yaitu:

$$\text{Wobbe Indeks} = \frac{\text{nilai pembakaran tertinggi}}{\sqrt{\text{kerapatannya}}} = \frac{Q_{\text{High}}}{\sqrt{p}}$$

WOBBE INDEKS ini mempengaruhi sifat-sifat pembakarannya atau *Burner*-nya, misalnya penyaluran panas ke-Pembakar (*Burner*), jumlah udara yang turut terisap dan terhembus bersama-sama gas alam yang ke luar dari mulut burner, dan sebagainya.

Gas alam disalurkan dari tempat penambangannya melalui jaringan pipa-pipa transmisi dengan tekanan sekitar 60 – 70 kg/cm², yang di dekat instalasi ketel uap perlu dibangun stasiun reduksi tekanan gas alam hingga 4 kg/cm² absolut.

Volume udara teoritis yang dibutuhkan sekitar $8,3 - 9,4 \text{ m}^3$ udara per m^3 gas alam, sehingga dengan angka kelebihan udara $m = 1$, maka gas asap yang terbentuk hanya bertambah dengan 1 m^3 dari jumlah kebutuhan udara teoritisnya.

Temperatur bunga api sangat tinggi, sekitar $1850^\circ - 1900^\circ \text{C}$ bila di dalam lingkungan udara, dan bila di dalam lingkungan zat asam dapat mencapai $2700^\circ - 2750^\circ \text{C}$. Adapun kecepatan pembakarannya maksimum = 30 cm/detik .

13. Bahan Bakar Nuklir atau Sumber Energi Nuklir:

Sejak selesai perang dunia ke-II, mulai dikembangkan penggunaan sumber energi panas yang lain, yang disebut energi atom. Sumber energi panas ini atau yang disebut energi nuklir, adalah proses terjadinya Pembelahan Inti (*Nuclear Fission*) dari atom dan menimbulkan panas.

Inti dari atom berat, terbelah menjadi inti-inti dari atom-atom yang lebih ringan, yang di dalam proses ini akan menimbulkan panas yang sangat tinggi.

Bahan pokok dari energi nuklir di antaranya adalah Uranium, yang merupakan salah satu unsur kimia yang berat dengan bilangan atom 92 dan mengandung sedikit radioaktif.

Secara kimiawi, Uranium merupakan logam yang sangat Reaktif dengan valensi 3 ; 4 dan 6 ; yang mencair pada temperatur 1132°C . Uranium alamiah merupakan campuran dari tiga buah Isotop yaitu Uranium-234 sebanyak 0,01%; Uranium-235 sebanyak 0,71%; dan Uranium-238 sebanyak 99,28%.

Uranium-234 (U-234) jumlahnya sedikit, lagi pula tidak berfungsi dalam reaksi nuklir. Uranium-235 (U-235) adalah **Isotop** yang dapat dibelah, sedangkan Uranium-238 (U-238) merupakan **Isotop** PEMBUAH dan PEMBIAK. Ketiga isotop Uranium alamiahtersebut adalah Radioaktif dan memancarkan sinar-sinar Alpha (α).

U-235 dapat dibelah sebagai akibat dari penyerapan sebuah NEUTRON pada intinya. Lihat Gambar.

U-235 dapat dibelah oleh **neutron-neutron** dari berbagai tingkat daya dan akan menimbulkan **reaksi inti** berantai sekalipun pembelahan dilakukan oleh neutron-neutron **lambat** atau **neutron berdaya rendah** (*slow neutrons or low energy neutrons*).

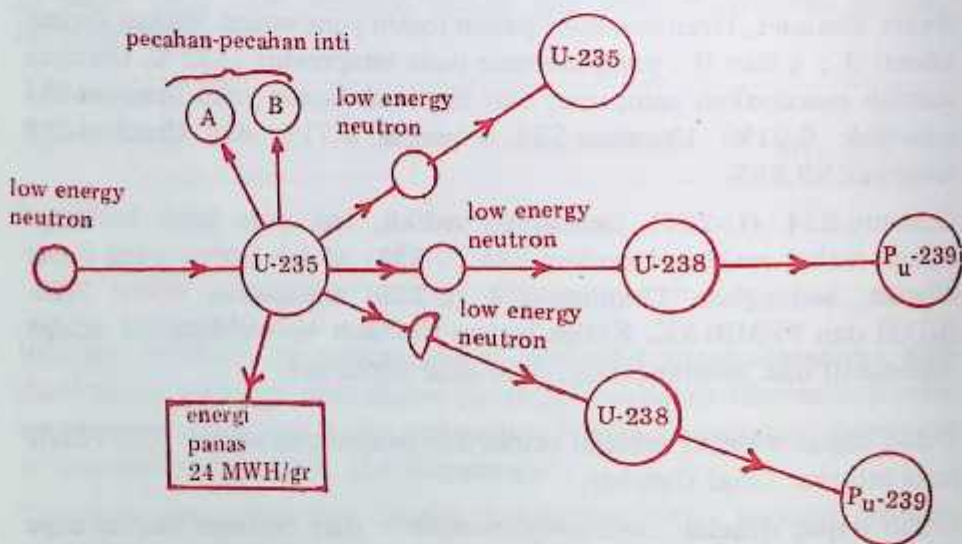
U-238 tidak mampu membangkitkan sendiri reaksi inti berantai, namun dapat dibelah oleh neutron-neutron berdaya tinggi. Inti U-238 setelah menyerap sebuah neutron dalam reaktor nuklir, akan berubah menjadi **Plutonium-239** (Pu-239), yang merupakan unsur baru yang isotopnya dapat dibelah.

Plutonium-239 mampu membangkitkan reaksi inti berantai, dan bila dibelah, per gram akan menghasilkan panas yang hampir sama dengan U-235.

Isotop-isotop Uranium dan Thorium, bila intinya disinari dengan sinar **gamma** (γ) dengan cukup, atau ditembaki oleh Deuteron, akan berlangsung reaksi pembelahan inti. Demikian pula halnya dengan U-238, yang inti-intinya akan terbelah dan berlangsung dengan hebatnya (*spontaneous fission*).

Sebuah Neutron berdaya rendah (*low energy neutron*) menembaki dan menembus inti U-235 serta rata-rata akan melepaskan sebanyak 2,5 neutron tambahan. Neutron-neutron yang terlepas tersebut akan mampu dan menimbulkan reaksi inti berikutnya, sehingga akan berlangsung reaksi inti yang terus-menerus dan berantai dan melepaskan sejumlah energi panas yang makin besar.

SKEMA REAKSI INTI BERANTAI



Reaksi Inti berantai Uranium-235 (U-235)

Suatu sistem yang terdiri dari bahan inti yang dapat terpecahkan akan menimbulkan reaksi inti yang berantai yang berlangsung dengan makin menghebat, bila masing-masing neutron yang dilepaskan akan menghasilkan lebih dari sebuah pemecahan inti berikutnya.

Syarat minimal dalam mempertahankan berlangsungnya reaksi inti berantai tersebut ialah bila setiap reaksi yang mengakibatkan pelepasan Sebuah Neutron menghasilkan sebuah pemecahan inti berikutnya.

Neutron-neutron yang terbentuk dari pemecahan sebuah inti mempunyai energi kinetis yang sangat besar dan disebut **Neutron cepat** (*Fast neutron*). Neutron-neutron semacam ini akan melepaskan energinya bila bertumbukan dengan medium atau moderator yang mengandung zat atau substansi yang ringan, misalnya: graphite, Beryllium (Be) atau Hidrogen berat.

Neutron-neutron yang diperlambat oleh **Moderator** disebut: **Neutron lambat** (*Slow neutron*) atau **Neutron thermis** (*thermal neutron*), yang energi kinetisnya sama dengan pada molekul-molekul dari gas Hidrogen.

Sekalipun neutron-neutron cepat dan neutron-neutron lambat dapat membangkitkan atau menginduksi pemecahan inti, tetapi neutron-neutron lambat hanya bisa melangsungkannya dengan isotop-isotop dari unsur yang berat, misalnya: U-233; U-235 dan Pu-239.

Neutron-neutron yang gagal membangkitkan pemecahan inti, yang disebabkan karena dua hal:

- yang pertama : mungkin karena neutron-neutron tersebut lepas meninggalkan sistem reaksi, dan
- yang kedua: bila terpakai untuk reaksi lainnya.

Dalam hal yang pertama dapat diatasi hingga sekecil mungkin dengan memperbesar sistem reaksi. Ukuran-ukuran kritis dari sebuah reaktor inti ialah bila dengan ukuran-ukuran yang lebih kecil akan menghentikan penyebaran reaksi berantai, akibat dari banyaknya neutron yang hilang lepas dari sistem reaksi. Ukuran-ukuran kritis reaktor inti tersebut tergantung dari jenisnya bahan inti yang dapat dipecahkan, atau fissile material dan jenisnya moderator.

Reaktor dengan teras Uranium (*Uranium core*) dan moderator graphite adalah ukuran-ukuran kritis yang terbesar, yang memerlukan sekurang-kurangnya 28 ton Uranium dan 500 ton graphite.

Reaktor dengan teras Uranium dan moderator Air Berat (H_2O_2) membutuhkan sekitar 3 ton Uranium dan 6,5 t Air Berat (H_2O_2).

Neutron-neutron Thermal atau Neutron Lambat (*Slow Neutrons*) diserap hampir seluruh isotop-isotop dalam suatu reaktor, dan menghasilkan isotop-isotop yang lebih berat serta memancarkan sinar-sinar γ (γ). Proses tersebut yang disebut penyerapan radiative (*Radiative capture*) akan mengurangi jumlah neutron-neutron yang tersedia untuk membangkitkan proses pemecahan inti, dan merupakan **reaksi penahan** (*competitive reaction*) yang paling penting.

Hal tersebut dapat terjadi karena ke-kurang-murnian-an dari sistem reaktor, atau kekurang-murnian dari moderator, bahkan kekurang-murnian dari bahan inti sendiri.

Sistem reaktor yang terbaik adalah kecenderungan untuk pengembangan penyerapan radiative (*radiative capture tendency*) yang paling minimal.

Reaksi inti berantai yang menyangkut neutron-neutron thermal (neutron lambat) atau neutron-neutron cepat dalam reaktor dapat dikendalikan, sekalipun kebanyakan neutron-neutron pembelahan atau neutron-neutron pemecahan inti akan dilepaskan hanya dalam waktu *se-per-trilyun* detik, namun sebagian kecil daripadanya lebih lambat terbentuknya.

Neutron-neutron yang terhambat terbentuknya (*Delayed neutrons*) ini dipancarkan oleh produk yang rusak dari sebagian reaksi pembelahan inti. Sehingga caranya dikendalikan oleh reaksi-reaksi pembelahan inti yang setengah hidup (*half lives*) yang bersangkutan, reaksi pemecahan inti yang setengah hidup ini berlangsung sekitar setengah detik hingga satu menit.

Dengan mengatur jumlah yang tepat dari neutron-neutron yang sesuai untuk penggunaan reaksi penahan (*competitive reaction*), maka reaksi inti berantai dapat dikendalikan berlangsungnya oleh neutron-neutron yang terhambat terbentuknya (*delayed neutrons*) tersebut dimuka. Dengan mengutamakan penggunaan neutron-neutron yang terhambat terbentuk tersebut, taraf peningkatan jumlah neutron-neutron dapat diatur disesuaikan dengan kebutuhan.

Di dalam reaktor, energi yang dihasilkan karena pembelahan inti, sebagian utama berupa energi kinetis dan sebagian lagi berupa energi radioaktif, dari produk-produk hasil pembelahan inti, dan sebagian lagi berupa radiasi sinar-sinar Gamma (γ) yang diperlukan dalam reaksi pemecahan inti.

Energi kinetis dari produk-produk hasil pemecahan inti bertumbukan

dengan atom-atom Uranium yang ada di sekitarnya. Sebagian kecil dari produk-produk hasil pemecahan inti hilang dari Teras Uranium (*Uranium Core*), yang makin bersifat radioaktif, selama reaksi inti berantai sedang berlangsung.

Sekalipun hanya sebagian kecil dari massa U-235 yang diubah menjadi panas, namun pemecahan inti dari 1 kg. U-235 akan menghasilkan 2778 Kilowatt. tahun energi atau sebanyak 24×10^6 KWH.

Karena kemungkinan untuk diubah menjadi bahan inti yang dapat dipecahkan, maka U-238 dikenal pula sebagai bahan pembuah inti. Dengan demikian Uranium merupakan salah satu bahan pokok untuk tenaga nuklir, karena mengandung DUA isotop utama: U-235 dan U-238.

U-235 merupakan satu-satunya bahan inti yang dapat dipecahkan yang terdapat di alam bebas, sedangkan U-238 merupakan bahan pembuah atau pembiak inti untuk menghasilkan Plutonium yang dapat dipecahkan yaitu Pu-239. Berhubung U-238 jumlahnya 140 kali dari jumlah U-235, maka U-238 merupakan sumber energi nuklir yang paling besar.

Unsur pembuah/pembiak inti lainnya ialah Thorium, yang dapat menghasilkan energi, namun memerlukan Uranium untuk mengubah atau mengkonversikan Thorium menjadi bahan inti yang dapat dibelah.

Uranium selalu didapatkan bersama-sama dengan Radium yang dalam jumlah yang lebih besar. Salah satu bahan tambang yang terpenting yang menghasilkan Uranium adalah Uraninite atau Oksida Uranium. Bahan tambang lain yang juga penting dan menghasilkan Uranium adalah: Coffonite atau Silikat Uranium Carnonite atau Vanadate-Uranium-Kalium, dan lain-lain.

Bahan tambang tersebut biasanya hanya merupakan bagian yang kecil dari bahan tambang lainnya, sehingga biji-biji Uranium yang ditambang tersebut hanya menghasilkan sejumlah Uranium dengan prosentase yang kecil sekali.

BAB III

PROSES PENGOPAKAN ATAU STOKE PROCESS

14. *Proses Pengopakan (= Proses Melayani Api = Stoke Process)*

Pembakaran:

Dalam ilmu kimia, yang dimaksudkan dengan pembakaran adalah *oksidasi*, yang berlangsung pada temperatur tertentu, dengan kecepatan reaksi yang tinggi dan menghasilkan panas.

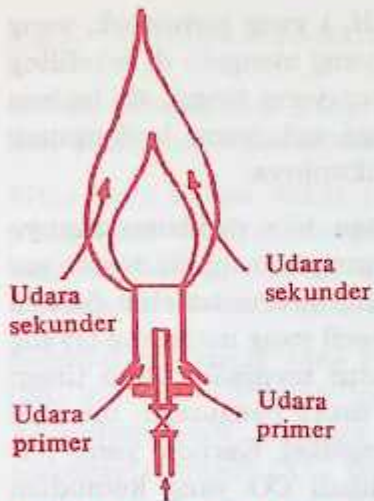
Proses pembakaran yang biasa kita sebut sehari-hari, adalah proses dari *gas air (water gas)*, yang terdiri dari CO dan H₂.

14.1. Pembakaran Bahan Bakar yang Berupa Gas

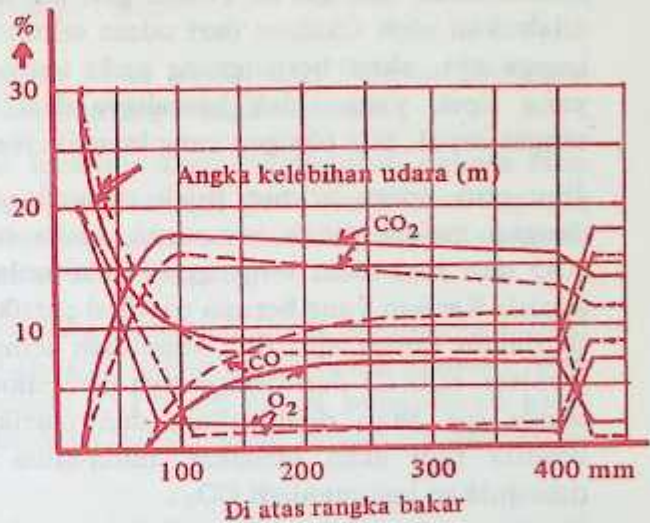
Pembakaran bahan bakar yang berupa gas, yang hampir keseluruhannya terdiri dari Karbon (C) dan Hidrogen (H), mula-mula berlangsung sebagai berikut: yang dimulai dengan menguraikan gas-gas hingga menghasilkan komponen-komponen dari gas air (CO dan H₂), bila kondisi Oksigen (O₂) mencukupinya. Hal ini dapat diikuti dengan mudah pada Pembakar Bunsen (*Bunsen Burner*) seperti terlihat pada Gambar.

Dengan penyetulan yang tepat pengaliran udara pembakar, maka gas yang ke luar dari Pembakar Bunsen (*Bunsen Burner*), akan menarik sejumlah udara primer tertentu, yang cukup untuk penguraian gas-gas menjadi CO dan H₂ (yang biasa disebut *gas air* atau *water gas*).

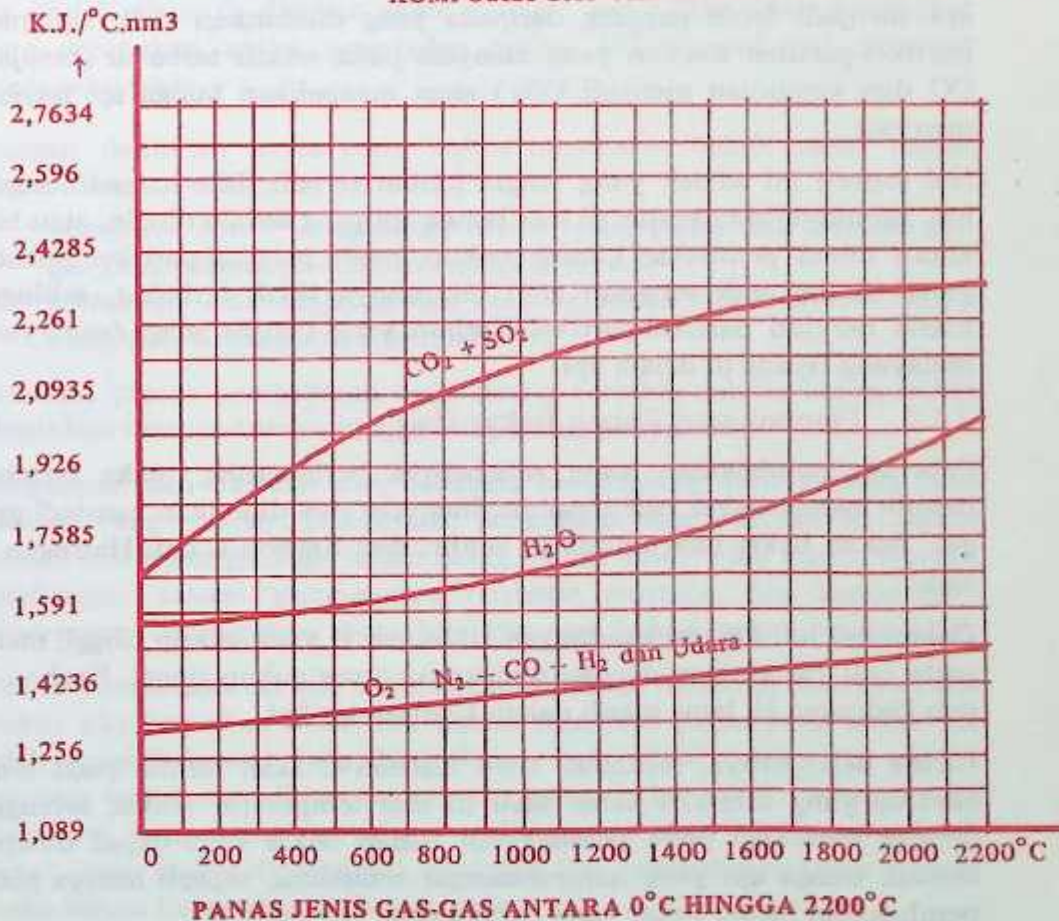
Penguraian gas-gas ini berlangsung di dalam kerucut bunga api yang paling dalam (= Kerucut I), pada temperatur yang lebih rendah daripada temperatur bila pembakaran telah berlangsung sepenuhnya.



**PEMBAKARAN BUNSEN
(BUNSEN BURNER)**



KOMPOSISI GAS-GAS DI ATAS RANGKA BAKAR



PANAS JENIS GAS-GAS ANTARA 0°C HINGGA 2200°C

Pembakaran dari gas air (water gas, CO dan H₂) yang terbentuk, yang dilakukan oleh Oksigen dari udara sekunder yang mengalir di sekeliling bunga api, akan berlangsung pada temperatur yang tinggi, di lapisan yang tipis, yang tidak bercahaya dari bunga api, yang berlangsung sangat cepat, bila oksigen yang tersedia mencukupinya.

Jika arus udara primer **tidak mencukupi** atau bila pencampurannya dengan gas-gas **tidak sempurna**, maka penguraian menjadi water gas (CO dan H₂) akan terganggu. Mula-mula yang terurai terlebih dahulu adalah Karbon yang berupa partikel-partikel kecil yang melayang-layang di dalam bunga api. Bila kemudian temperatur menjadi cukup tinggi (sekitar 800°C) dan oksigennya mencukupi, maka penguraian menjadi water gas akan dilanjutkan, dan partikel-partikel Karbon yang terbentuk tadi akan terbakar, mula-mula menjadi CO yang kemudian dilanjutkan lagi menjadi CO₂.

Karena penguraian menjadi water gas yang terganggu tadi, maka bunga api menjadi lebih panjang daripada yang disebutkan tadi, lagi pula partikel-partikel Karbon yang menyala pada waktu terbakar (menjadi CO dan kemudian menjadi CO₂) akan menjadikan bunga api terlihat menyala.

Hal seperti ini adalah yang sangat umum terjadi. Bila karena sesuatu hal, misalnya temperatur di luar bunga api yang terlalu dingin, atau bila aliran udara pembakar kurang cukup, maka partikel-partikel Karbon yang terurai tadi sebagian atau seluruhnya tidak terbakar, sehingga masih berujud partikel-partikel Karbon yang berupa jelaga (*soot*) yang melayang-layang di dalam api.

14.2. Pembakaran Bahan Bakar Cair

Sebelum pembakaran yang sebenarnya berlangsung, maka terlebih dahulu bahan bakar cair tersebut diuapkan dan diuraikan menjadi gas-gas. Bahan bakar cair umumnya terdiri dari Karbon C dan Hidrogen H saja.

Dalam hal ini, karena kandungan Hidrogen H yang cukup tinggi, maka pada saat penguraian dengan temperatur yang cukup tinggi, Karbon C dan Hidrogen H, lama masih dalam keadaan terikat.

Untuk selanjutnya, sejumlah kecil Karbon C akan terurai pada temperatur yang kira-kira sama atau di atas temperatur reaksi, sehingga dengan demikian pada pembakaran bahan bakar cair, dapat dicapai bentuk bunga api yang hampir-hampir sempurna, seperti halnya pada pembakaran bahan bakar yang berupa gas.

14.3. Pembakaran Bahan Bakar Padat

Bahan bakar padat yang sebagian besar terdiri dari Karbon Hidrogen dan Oksigen, pembakarannya berlangsung sebagai berikut:

Mula-mula bahan bakar padat tersebut akan membentuk gas-gas atau yang biasa disebut menge-gas (= *ontgassing*), pada waktu berlangsung destilasi kering, dan gas-gas tersebut akan terurai lebih lanjut menjadi CO dan H₂ (= *water gas*) dan akan terbakar.

Selanjutnya arang atau kokas yang tertinggal (yang semuanya terdiri dari Karbon C) akan menguap atau *sublimasi* terlebih dahulu, dan kemudian baru terbakar menjadi CO yang untuk selanjutnya akan terbakar menjadi CO₂ bila jumlah Oksigen yang tersedia mencukupinya.

Udara pembakar, yang diperlukan untuk "menge-gas"-kan atau *ontgassing* dari Karbon C, disebut *udara primair*, sedangkan udara pembakar yang digunakan untuk membakar gas-gas CO menjadi CO₂ disebut *udara sekundair*.

Dengan demikian maka pada waktu membakar bahan bakar padat, dapat dibagi menjadi **dua periode**, yaitu:

- menge-gas-kan (= *ontgassing*) bahan bakar padat tadi menjadi gas-gas yang bermacam-macam susunannya, dan
- membakar lebih lanjut gas-gas yang terbentuk tadi menjadi CO dan yang untuk selanjutnya menjadi CO₂.

Sebelum proses pembakaran berlangsung, terlebih dahulu bahan bakar dinaikkan temperaturnya hingga temperatur penyalaan.

Penguraian dan oksidasi dari batubara berlangsung dimulai pada temperatur yang rendah. Temperatur penguraian dan Oksidasi ini makin rendah bila umur geologis bahan bakar makin muda, atau makin banyak kandungan zat-zat penguapnya (*volatile matter*), dan kandungan-kandungan Oksigennya, serta bila susunan bahan bakar makin sulit.

Untuk penguraian zat-zat, dibutuhkan sejumlah panas. Sebaliknya pada waktu oksidasi akan terbentuk panas. Bilamana panas yang terbentuk telah melebihi panas yang dibutuhkan, baik untuk penguraian zat-zat maupun untuk menaikkan temperatur bahan bakar sekelilingnya hingga mencapai temperatur penyalaan, maka proses akan berlangsung lebih cepat (atau makin dipercepat), sehingga bila pembakaran telah terjadi, maka bahan bakar akan terbakar terus.

Pada waktu kita membakar kokas, maka hal tersebut sangat sukar untuk dicapai, sehingga api kokas sering-sering padam dengan sendirinya.

Proses penyalaan dapat diperhebat dengan jalan memanasi terlebih dahulu udara pembakar yang akan dipergunakan untuk membakarnya.

Bila di atas rangka bakar telah ada lapisan batubara yang membara, maka kita dapat menjaga terus berlangsungnya pembakaran dengan jalan menaburkan bahan bakar baru (batubara segar) di atasnya. Dengan demikian maka bahan bakar segar tersebut akan segera menge-gas dengan cepat pada temperatur yang tinggi, yang terdiri dari berbagai macam gas, dan segera menyala. Namun dalam hal ini, harus dijaga agar cukup aliran udara untuk membakarnya, dan ada kesempatan yang cukup untuk menyala, sehingga pembakaran dapat berlangsung dengan kecepatan pembakaran yang tinggi.

Kokas sangat lambat menge-gas, dan juga sedikit sekali kandungan zat penguapnya (*volatile matter*). Bila temperatur reaksi pembakaran tercapai, maka pada bidang permukaan kokas akan terbentuk lapisan yang banyak mengandung CO-nya. Dengan mengalirnya udara pembakar, maka lapisan yang banyak kandungan CO-nya tersebut akan terhembus pada jarak tertentu dari permukaan bidang kokas, dan terbakarlah lebih lanjut menjadi CO₂, sedangkan di permukaan bidang kokas akan segera terbentuk lapisan baru yang banyak kandungan CO-nya.

CO₂ yang terbentuk tadi bila bersinggungan dengan kokas (yang lain) lagi, pada temperatur yang tinggi, akan direduksir kembali menjadi CO:



Untuk proses ini diperlukan sejumlah panas.

Dengan demikian di dalam lapisan bahan bakar batubara akan terbentuk baik CO maupun CO₂. Pada setiap temperatur tertentu, terdapat perbandingan yang tertentu dari CO dan CO₂, misalnya pada temperatur di atas 1000°C akan terdapat 100% CO dan 0% CO₂.

Karena udara dan gas-gas yang terbentuk selalu dalam keadaan mengalir, maka dengan demikian keseimbangan tidak berlangsung lama, sehingga susunan gas-gas yang terurai dari lapisan batubara di atas rangka bakar, tergantung dari faktor-faktor seperti telah disebutkan, yaitu antara lain: temperatur yang tergantung dari berbagai keadaan, misalnya:

- a. Perbandingan luas permukaan butiran-butiran batubara dengan jumlah gas-gas dan udara.
- b. Kecepatan reaksi dari kokas.
- c. Kecepatan mengalir dan pusaran (*swirl*) di dalam saluran gas asap di celah-celah lapisan batubara, dan
- d. Tebal lapisan batubara.

Jika udara yang mengalir melalui lapisan batubara, dalam perjalanannya mempunyai kesempatan yang cukup untuk bersinggungan dengan bidang permukaan batubara, atau bila bidang persinggungannya dan reaktivitas dari kokas makin besar, lapisan batubaranya tebal, pusaranya makin baik, maka makin mendekati keseimbangan seperti yang telah disebutkan, sekalipun kecepatan udara yang melaluinya makin besar.

Dari berbagai-bagai percobaan ternyata bahwa susunan dari gas asap di atas lapisan batubara, sangat tergantung dari tebal lapisan batubaranya, dan dari jumlah udara yang mengalir melewatinya.

Dengan menambah jumlah udara yang mengalir melalui lapisan batubara, maka kecepatan mengegas akan bertambah, tetapi hal tersebut berarti juga akan mengganggu lapisan yang banyak mengandung CO di permukaan bidang kokas.

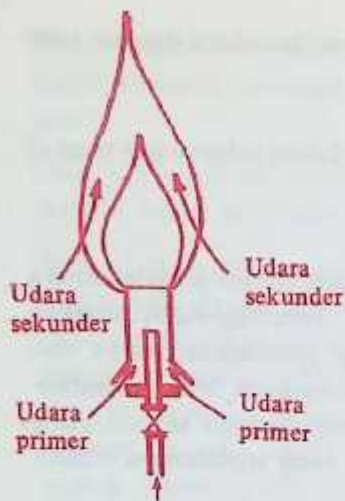
Berbagai-bagai percobaan menunjukkan bahwa pada beban yang tinggi, kadar CO pada jarak tertentu di atas rangka bakar akan menurun, namun jumlah CO-nya tidak begitu tergantung dari terlalu sedikitnya udara yang mengalir melewatinya, melainkan tergantung dari tebalnya lapisan batubara, dan jangan sampai tebalnya lapisan batubara tersebut kurang dari sesuatu ketebalan tertentu (= h minimum).

Berapa tebalnya lapisan batubara di atas rangka bakar yang seharusnya, adalah tergantung dari besarnya butiran-butiran batubara. Makin kecil butiran-butiran batubara, lapisan batubara makin tipis.

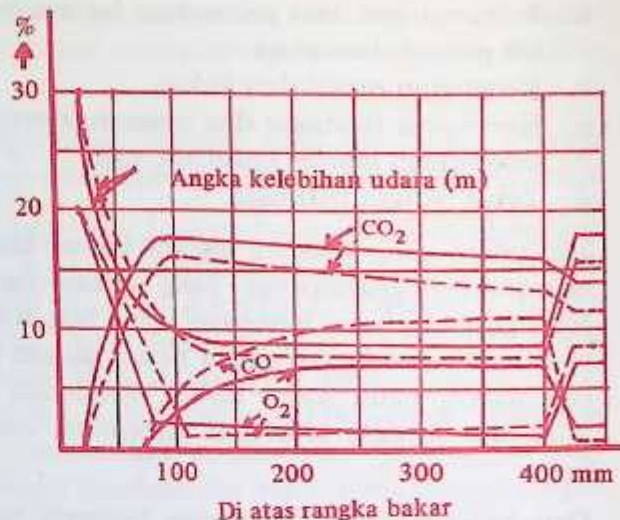
Pada lapisan yang tipis dari bahan bakar yang sedikit mengandung gas-gas, terdapat cukup O_2 di dalam gas asap di atasnya, yang mampu untuk membakar gas-gas yang dihasilkan dari destilasi kering bahan bakar.

Untuk lapisan yang tebal dari bahan bakar yang sejenis, masih dibutuhkan udara lagi, yang biasa disebut udara sekunder untuk menyempurnakan pembakaran.

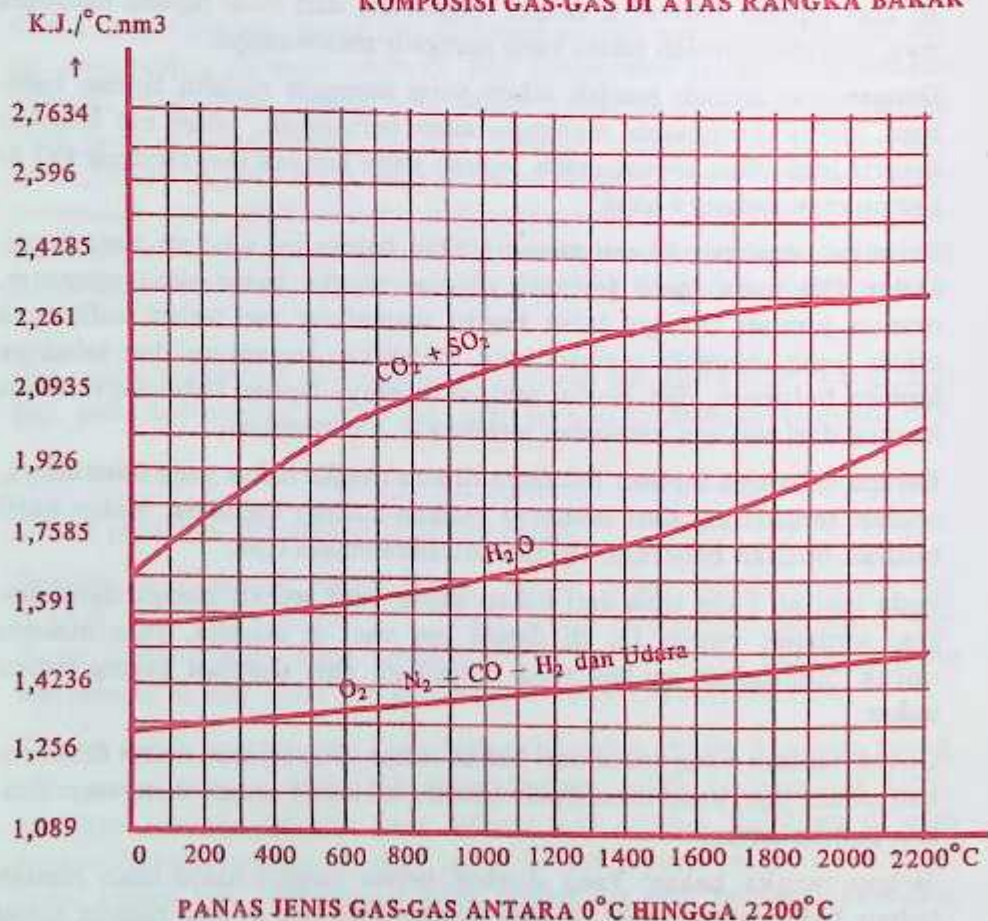
Beban rangka bakar: Yang disebut **beban rangka bakar** ialah jumlah bahan bakar yang dapat dibakar selama **satu jam** di atas rangka bakar dengan luas **satu meter persegi**.



**PEMBAKARAN BUNSEN
(BUNSEN BURNER)**



KOMPOSISI GAS-GAS DI ATAS RANGKA BAKAR



Beban rangka bakar dinyatakan dalam kg bahan bakar per jam per m^2 (= kg bahan bakar/jam. m^2). Beban rangka bakar diatur oleh pemasukan udara. Dengan kecepatan udara yang besar, pengegasan dari kokas makin cepat, sehingga dengan demikian proses pembakarannya juga dipercepat.

Dalam hal ini, besarnya butiran-butiran bahan bakar juga memegang peranan. Makin kecil butiran-butiran batubara, berarti makin luas bidang persinggungannya, sehingga kecepatan reaksi pembakaran makin diperbesar.

Untuk memperbesar beban rangka bakar, maka arus udara pembakar yang melewatinya juga harus diperbesar, sehingga merupakan angin bawah, yang bertekanan, dan dialirkan dari bawah rangka bakar, melewati celah-celah rangka bakar dan celah-celah di dalam lapisan bahan bakar yang ada di atasnya. Hal ini diperlukan, karena tekanan udara di dalam celah-celah rangka bakar dan celah-celah bahan bakar adalah sebanding dengan kuadrat dari kecepatan udara.

Jika jumlah udara yang dibutuhkan untuk pembakaran, diisap masuk berdasarkan tarikan cerobong alamiah saja, maka akan terjadi tekanan isap yang besar di dalam tungku dan saluran-saluran gas asap, sehingga dapat menimbulkan kebocoran-kebocoran udara dalam jumlah yang banyak yang masuk ke dalam tungku dan saluran-saluran gas asap.

Beban rangka bakar ada batasnya, yang membatasinya ialah bila kecepatan udara yang mengalir melalui lapisan bahan bakar tersebut terlalu besar, maka banyak butiran-butiran halus dari bahan bakar yang terhembus terbang dari lapisan bahan bakar tersebut.

Jika batubara yang ditaburkan di atas rangka bakar, dinaikkan temperaturnya, maka semua proses pengegasan dan pembentukan kokasnya menjadi dipercepat. Makin tinggi temperatur itu, yang segera akan mengegaskan bahan bakar, sehingga kadar kokas makin tinggi, akan menyebabkan susunan gas-gas yang menguap akan makin sederhana, dengan demikian pembakaran yang sempurna yang tanpa menimbulkan asap yang banyak, akan mudah tercapai.

Untuk itu maka udara pembakar yang diperlukan yang terlebih dulu dipanaskan, akan memberikan pengaruh yang besar terhadap pembakaran bahan bakar di atas rangka bakar.

Beberapa jenis batubara yang muda, dengan kandungan gas-gas yang tinggi, misalnya **steam coal**, yang terbakar dengan bunga api yang panjang, gas-gasnya akan terurai sejak temperaturnya masih rendah.

Bunga apinya menyala kurang tenang. Panas dari pembakaran gas-gas tidak begitu tinggi, sehingga bila api tersebut tiba-tiba bersinggungan dengan dinding ketel yang dingin, akan menimbulkan jelaga, sedangkan kokasnya yang terbentuk akan cepat mengegas.

Untuk jenis batubara berupa **gas coal** dan **cooking coal**, bunga apinya agak pendek, temperatur penguraian gas dan panas pembakaran dari gas-gasnya adalah lebih tinggi, susunan gas-gasnya lebih banyak mengandung zat air-arang, sehingga dengan kecepatan perubahan dari C ke CO yang terbatas, menyebabkan bunga api menyala lebih terang dibandingkan dengan jenis-jenis batubara muda lainnya, namun pembentukan jelaganya juga lebih banyak. Kokas yang terbentuk agak sukar terbakar.

Batubara-batubara yang umur geologisnya lebih tua, gas-gas yang terbentuk makin banyak mengandung CO dan H₂, sehingga panas pembakaran dari gas-gasnya menjadi lebih tinggi, sehingga kemungkinan terbentuknya jelaga menjadi berkurang. Hal ini tidak saja karena makin kurangnya butiran-butiran zat arang (karbon) yang melayang-layang di dalam api, tetapi juga berkat bagian-bagian dinding ketel yang dingin juga menjadi berkurang. Tetapi kokasnya kurang reaktif, sehingga untuk beban rangka bakar tertentu, dibutuhkan angin bawah (udara primer) dengan kecepatan yang cukup besar.

Antrasit (anthracite) terbakar dengan bunga api yang pendek berwarna biru dan kurang terang nyalanya. Beban rangka bakar diperbesar karena batubara antrasit ini akan pecah-pecah pada saat terbakar, sehingga bidang persinggungan bahan bakar dengan udara makin luas dengan sendirinya.

Khusus untuk **gas coal** dan batubara-batubara yang lebih muda lainnya, yang jika menaburkan batubara segar di atas bara api menyebabkan pengelasan yang cepat, maka banyak dibutuhkan udara. Mengalirkan udara banyak-banyak lewat lapisan bahan bakar sebagai angin bawah membawa konsekuensi tahanan geseran yang besar. Sehingga untuk jenis-jenis batubara muda ini perlu dialirkan udara sekunder langsung di atas rangka bakar.

Keadaan yang tidak menguntungkan ialah pada saat mengegas, dibutuhkan udara banyak-banyak, justru tahanan geser pada lapisan bahan bakar sedang besar-besarnya, sehingga aliran udaranya menjadi minimum, hal ini terutama terasa pada peralatan pembakar yang dilayani dengan tenaga manusia (manual hand stoker). Pada saat melemparkan bahan bakar segar di atas api, temperatur tungku akan menurun, yang

menyebabkan gas-gas yang terbentuk dari hasil pengegasan menjadi lebih bermacam-macam susunannya, sehingga pembakaran menjadi kurang sempurna, serta menimbulkan jelaga banyak-banyak.

Untuk memperkecil keadaan yang kurang menguntungkan tersebut tukang api harus menaburkan bahan bakar sedikit demi sedikit secara teratur di atas api, bukannya dengan cara sekali ditaburkan banyak-banyak, untuk berapa lama kemudian baru mengulangnya menaburkan banyak-banyak.

Sekalipun demikian, harus diusahakan, pada waktu melempar bahan bakar segar di atas api, pintu tungku api jangan lama-lama dibuka, karena akan menyebabkan udara dingin masuk ke dalam tungku dan menurunkan temperatur api, yang berakibat makin kurang sempurna pembakaran, dan menghasilkan banyak jelaga. Oleh karena itu, pada saat melempar bahan bakar segar di atas api harus dilakukan cepat-cepat.

Agar udara pembakaran terbagi rata pada semua lapisan bahan bakar di atas seluruh permukaan rangka bakar, maka tukang api harus mengusahakan agar permukaan api harus rata, jangan ada lubang-lubang di dalam bara api, yang bisa menyebabkan mengalirnya udara banyak-banyak lewat lubang tadi, sehingga temperatur api menjadi dingin.

Tebal lapisan bahan bakar di atas rangka bakar, tidak hanya ditentukan oleh besar/kecilnya butiran-butiran bahan bakar, tetapi juga oleh jenisnya bahan bakar.

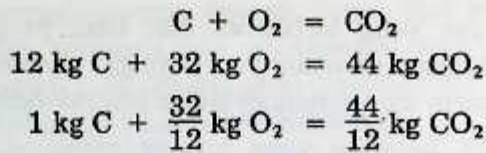
Bila terlalu tebal menaburkannya, bahan bakar di atas api akan menyebabkan pancaran panas dari bahan bakar yang sedang membara menjadi terganggu. Hal ini menyebabkan temperatur setempat terlalu tinggi, sehingga akan menyebabkan abu mencair, yang akan membeku lagi bila abu cair ini mulai turun ke celah-celah rangka bakar dan didinginkan oleh udara yang masuk.

Dengan demikian abu cair yang kemudian membeku di celah-celah rangka bakar tersebut akan mengganggu aliran udara primer melalui celah-celah rangka bakar tersebut. Di samping itu, temperatur setempat yang terlalu tinggi itu akan segera merusak batang-batang rangka bakar.

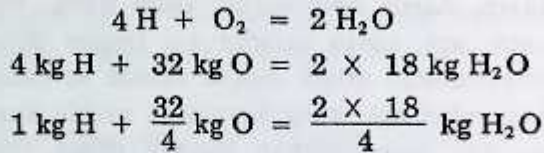
15. Jumlah Udara Pembakar

Jika susunan bahan bakar diketahui, maka dapat dihitung jumlah kebutuhan udara pembakar untuk pembakaran yang sempurna.

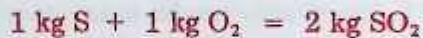
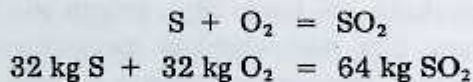
Karbon (C) terbakar sempurna menjadi CO_2 menurut persamaan



Hidrogen (H) terbakar menjadi H_2O menurut persamaan



Belerang (S) terbakar berdasarkan persamaan



Di samping itu, diketahui pula 1 kg udara mengandung 0,231 kg O_2 . Sehingga kebutuhan udara dapat diperhitungkan, dengan contoh sebagai berikut:

Diketahui: Batubara mengandung 7,5% air; 5,8% abu; 68,6% C; 4,5% H; 13,2% (O + N); 0,4% S; Nilai pembakaran terendah 26.596 KJ/kg.

Ditanyakan: Jumlah udara teoretis dinyatakan dalam kg dan nm^3 , yang dibutuhkan untuk membakar dengan sempurna 1 kg batubara tersebut.

Per 1 kg batubara mengandung 0,686 kg C; 0,045 kg H dan 0,004 S.

Jumlah oksigen yang dibutuhkan:

$$\begin{aligned} \text{O}_2 &= (0,686 \times 2,67 + 0,045 \times 8 + 0,004 \times 1) \text{ kg} \\ &= 2,194 \text{ kg O}_2 \end{aligned}$$

Dimisalkan kandungan N sebanyak 1% dan 12,2% oksigen, sehingga di dalam 1 kg bahan bakar terdapat 0,122 kg O_2 . Dengan demikian oksigen yang dibutuhkan hanya

$$2,194 \text{ kg} - 0,122 \text{ kg} = 2,07 \text{ kg}$$

Udara 1 kg mengandung 0,231 kg O_2 , sehingga udara teoretis yang dibutuhkan:

$$U_{og} = (2,07 : 0,231) \text{ kg udara/kg bahan bakar} \\ = 8,98 \text{ kg udara/kg bahan bakar}$$

U_{og} = Kebutuhan udara teoretis dinyatakan dalam kg udara/kg bahan bakar

Udara 1 nm^3 pada $0^\circ C$ beratnya 1,29 kg, sehingga

$$U_{ov} = 8,98 : 1,29 \text{ } nm^3 \text{ udara/kg bahan bakar} \\ = 6,96 \text{ } nm^3 \text{ udara/kg bahan bakar}$$

U_{ov} = kebutuhan udara teoretis dinyatakan dalam nm^3 udara/kg bahan bakar

Dari ilmu kimia diketahui bahwa 12 kg C; 4 kg H; 32 kg S; masing-masing memerlukan 1 kg.mol oksigen atau 22,4 nm^3 oksigen, sehingga dapat juga dihitung dengan cara:

$$O_2 = \left[\frac{0,686}{12} + \frac{0,045}{4} + \frac{0,004}{32} \right] \times 22,4 \text{ } nm^3 \text{ } O_2 \\ = 1,535 \text{ } nm^3 \text{ } O_2$$

Telah ada sebanyak 0,122 kg O_2 dalam 1 kg bahan bakar, atau sebanyak

$$0,122 \times (22,4 : 32) \text{ } nm^3 \text{ } O_2 = 0,085 \text{ } nm^3 \text{ } O_2$$

Sehingga O_2 yang dibutuhkan hanya

$$1,535 \text{ } nm^3 - 0,085 \text{ } nm^3 = 1,45 \text{ } nm^3 \text{ } O_2$$

Dengan demikian jumlah udara teoretis yang dibutuhkan adalah:

$$U_{ov} = \frac{100}{21} \times 1,45 \text{ } nm^3 = 6,95 \text{ } nm^3 \frac{\text{udara}}{\text{kg bahan bakar}}$$

Secara umum: 1 kg bahan bakar yang mengandung C kg karbon H kg hidrogen; O kg oksigen; N kg nitrogen; S kg belerang dan W kg air; kebutuhan udara teoretisnya:

$$U_{og} = \frac{100}{23,1} \times (2,67 C + 8 H - O + S) \text{ kg udara/kg bahan bakar}$$

$$U_{ov} = \frac{100}{29,8} \times (2,67 C + 8 H - O + S) \text{ nm}^3 \text{ udara/kg bh. bakar}$$

Bila terhadap bahan bakar tertentu hanya diberikan sejumlah udara teoretisnya (U_o) saja, maka pembakaran tidak akan menjadi sempurna, karena dengan udara teoretis (U_o) tersebut butiran-butiran bahan bakar tidak seluruhnya dikelilingi oleh udara yang cukup, sehingga harus diberikan udara pembakar yang lebih banyak dari udara teoretis yang menurut perhitungan, untuk mencegah penguraian kembali atau diasosiasi dari CO_2 dan H_2O yang terbentuk.

Kebutuhan udara melebihi kebutuhan udara teoretis (U_o) yang dibutuhkan itu disebut: kebutuhan udara yang sebenarnya (U), $U/U_o = m$; dan m disebut "koefisien kelebihan udara" atau sering disebut dengan "angka kelebihan udara"

$$m = U : U_o \quad \text{atau} \quad U = m \times U_o$$

16. Jumlah Gas Asap yang Terbentuk

Berat gas asap yang terbentuk dari hasil pembakaran 1 kg bahan bakar adalah sama dengan jumlah berat udara yang dibutuhkan ditambah dengan berat bahan bakar yang berubah menjadi gas asap kecuali abunya.

Jumlah berat gas asap teoretis (G_{og}) yang terbentuk adalah

$$G_{og} = U_{og} + (1 - A) \text{ kg gas asap/kg bahan bakar}$$

A = kandungan abu dalam bahan bakar dinyatakan dalam kg abu/kg bahan bakar

Jumlah berat gas asap yang sebenarnya (G_g) terbentuk adalah

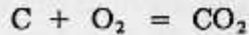
$$G_g = m \cdot U_{og} + (1 - A) \text{ kg gas asap/kg bahan bakar}$$

m = angka kelebihan udara.

Dari jumlah berat gas asap yang sebenarnya terbentuk, kita tidak bisa begitu saja mendapatkan angka untuk volume gas asap yang terbentuk, karena susunan gas asap itu sendiri bisa berbeda-beda, lagi pula Berat Jenis gas asap itu sendiri sangat berbeda-beda untuk berbagai-bagai keadaan.

Untuk menghitung volume gas asap yang terbentuk, maka lebih dulu dihitung jumlah hidrogen (H) yang bebas (= H disponible) maupun hidrogen yang terikat di dalam bahan bakar.

Pembakaran karbon C adalah sebagai berikut:

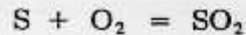


$$1 \text{ kg atom C} + 1 \text{ kg molekul } O_2 = 1 \text{ kg molekul } CO_2$$

$$1 \text{ kg atom C} + 22,4 \text{ nm}^3 O_2 = 22,4 \text{ nm}^3 CO_2$$

Jadi: Pembakaran karbon C menjadi CO_2 volume gas asap yang terbentuk dari padanya tetap sama volumenya dengan udara yang digunakan untuk membakarnya atau berarti volumenya tidak bertambah antara sebelum dan sesudah terjadinya pembakaran.

Pembakaran belerang S adalah sebagai berikut:

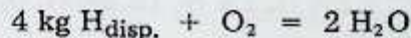


$$1 \text{ kg atom S} + 1 \text{ kg molekul } O_2 = 1 \text{ kg molekul } SO_2$$

$$1 \text{ kg atom S} + 22,4 \text{ nm}^3 O_2 = 22,4 \text{ nm}^3 SO_2$$

Jadi: Pembakaran belerang S menjadi SO_2 volume gas asap yang terbentuk masih tetap sama dengan volume udara yang digunakan untuk membakarnya, atau berarti volumenya tidak bertambah antara sebelum dan sesudah pembakaran.

Pembakaran hidrogen yang disponible:



$$4 \text{ kg } H_{\text{disp.}} + 1 \text{ kg molekul } O_2 = 2 \text{ kg molekul } H_2O$$

$$4 \text{ kg } H_{\text{disp.}} + 22,4 \text{ nm}^2 O_2 = 44,8 \text{ nm}^3 H_2O$$

4 kg $H_{\text{disp.}}$ sesudah pembakaran akan menyebabkan penambahan volume gas asap sebanyak = $44,8 \text{ nm}^3 - 22,4 \text{ nm}^3 = 22,4 \text{ nm}^3$.

Jadi: 1 kg $H_{\text{disp.}}$ akan menyebabkan bertambahnya volume gas asap sebanyak $5,6 \text{ nm}^3$.

Pembakaran hidrogen terikat:



$$2 \text{ kg } H_{\text{terikat}} + O_{\text{terikat}} = 1 \text{ kg molekul } H_2O = 22,4 \text{ nm}^3 H_2O$$

2 kg H terikat dengan O terikat yang ada di dalam bahan bakar tanpa diperlukan udara dari luar, sudah dapat menghasilkan $22,4 \text{ nm}^3$ gas asap.

Jadi: 1 kg H terikat dalam bahan bakar, akan menghasilkan $11,2 \text{ nm}^3$ gas asap.

Air yang terkandung di dalam bahan bakar:

18 kg air yang terkandung di dalam bahan bakar akan menghasilkan 1 kg molekul H_2O atau $22,4 \text{ nm}^3$ gas asap.

Jadi: 1 kg air yang terkandung di dalam bahan bakar akan menghasilkan $1,24 \text{ nm}^3$ gas asap.

Nitrogen yang terkandung di dalam bahan bakar:

28 kg nitrogen (N) yang terkandung di dalam bahan bakar akan menghasilkan 1 kg molekul gas asap atau $22,4 \text{ nm}^3$ gas asap.

Jadi: 1 kg nitrogen menghasilkan $0,8 \text{ nm}^3$ gas asap.

<p>1 kg C tidak menambah volume gas asap 1 kg S tidak menambah volume gas asap 1 kg H disponible menambah $5,6 \text{ nm}^3$ volume gas asap 1 kg H terikat menambah $11,2 \text{ nm}^3$ volume gas asap 1 kg air akan menambah $1,24 \text{ nm}^3$ volume gas asap 1 kg N akan menambah $0,8 \text{ nm}^3$ volume gas asap</p>

Diketahui: Bahan bakar 1 kg yang terdiri dari: 7,5% air; 5,8% abu; 68,6% C; 4,5% H; 1% N; 12,2% O; 0,4% S; dengan $Q_{\text{Low}} = 26.596 \text{ KJ/kg}$.

Ditanyakan: a. Berapa jumlah gas asap yang terbentuk, dinyatakan dalam berat.

b. Berapa volume gas asap yang terbentuk?

Jawab: a. Berat gas asap yang terbentuk:

$$\begin{aligned} & 1 \text{ kg bahan bakar yang berubah menjadi gas asap} \\ & = 1 \text{ kg} - \text{Jumlah Abu} = 1 \text{ kg} - 0,058 \text{ kg Abu} \\ & = 0,942 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Sehingga berat gas asap yang terbentuk

$$\begin{aligned} & = 0,942 \text{ kg} + 8,98 \text{ kg} \\ & = 9,922 \text{ kg gas asap/kg bahan bakar.} \end{aligned}$$

b. Jumlah volume gas asap yang terbentuk:

Kandungan H seluruhnya di dalam bahan bakar
= 0,045 kg H/kg bahan bakar.

Kandungan oksigen di dalam bahan bakar
= 0,122 kg oksigen/kg bahan bakar.

Jumlah H yang terikat
= (0,122 : 8) kg H terikat/kg bahan bakar
= 0,01525 kg H terikat/kg bahan bakar

Jumlah H disponible
= (0,045 - 0,01525) kg H disponible/kg bahan bakar
= 0,02975 kg H disponible/kg bahan bakar

Jumlah kandungan air di dalam bahan bakar
= 0,075 kg air/kg bahan bakar

Jumlah nitrogen = 0,01 kg nitrogen/kg bahan bakar

Sehingga gas asap yang terbentuk = Udara yang diperlukan ditambah dengan $(0,01525 \times 11,2 \text{ nm}^3 + 0,02975 \times 5,6 \text{ nm}^3 + 0,075 \times 1,24 \text{ nm}^3 + 0,01 \times 0,8 \text{ nm}^3)$, atau secara keseluruhannya akan menambah gas asap sebanyak = 0,44 nm^3 per kilogram bahan bakar.

Dengan demikian volume gas asap yang terbentuk = 6,96 $\text{nm}^3 + 0,44 \text{ nm}^3 = 7,4 \text{ nm}^3/\text{kg}$ bahan bakar.

Secara umum, jumlah volume gas asap teoretis yang terbentuk = $G_{ov} =$

$$G_{ov} = U_{ov} + 5,6 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 11,2 \times \frac{O}{8} + 1,24 W + 0,8 N$$

atau

$G_{ov} = U_{ov} + 5,6 \times \left(H + \frac{O}{8} \right) + 1,24 W + 0,8 N$	nm^3/kg bahan bakar
--	--

Dari kedua rumus tersebut, maka: $G_v = m \cdot U_{ov} + G_{ov} - U_{ov}$

Di samping rumus-rumus tersebut, Rosin memberikan rumus pengalamannya sebagai berikut:

Untuk bahan bakar padat, dengan Q_{Low} dalam KJ/kg:

$$U_{ov} = 241 \times 10^{-6} \times Q_{Low} + 0,5 \quad [\text{nm}^3 \text{ udara/kg bahan bakar}]$$

$$G_{ov} = 213 \times 10^{-6} \times Q_{Low} + 1,65 \quad [\text{nm}^3 \text{ gas/kg bahan bakar}]$$

Untuk bahan bakar cair:

$$U_{ov} = 210 \times 10^{-6} \times Q_{Low} + 1,65 \quad [\text{nm}^3 \text{ udara/kg bahan bakar}]$$

$$G_{ov} = 265 \times 10^{-6} \times Q_{Low} \quad [\text{nm}^3 \text{ gas/kg bahan bakar}]$$

Untuk bahan bakar gas dengan Q_{Low} sampai 16.748 KJ/nm^3 :

$$U_{ov} = 260 \times 10^{-6} \times Q_{Low} - 0,25 \quad [\text{nm}^3 \text{ udara/kg bahan bakar}]$$

$$G_{ov} = 272 \times 10^{-6} \times Q_{Low} + 0,25 \quad [\text{nm}^3 \text{ gas/kg bahan bakar}]$$

Untuk bahan bakar gas dengan Q_{Low} sampai $4,187 \text{ KJ/nm}^3$:

$$U_{ov} = 209 \times 10^{-6} \times Q_{Low} \quad [\text{nm}^3 \text{ udara/kg bahan bakar}]$$

$$G_{ov} = 173 \times 10^{-6} \times Q_{Low} + 1 \quad [\text{nm}^3 \text{ gas/kg bahan bakar}]$$

Dari contoh di muka, maka dengan Rumus Pengalaman dari Rosin:

$$U_{ov} = 241 \times 10^{-6} \times 26596 + 0,5 = 6,91 \text{ nm}^3 \text{ udara/kg bh. bakar}$$

$$G_{ov} = 213 \times 10^{-6} \times 26596 + 1,65 = 7,31 \text{ nm}^3 \text{ gas/kg bh. bakar}$$

Jumlah volume gas asap yang terbentuk dari perhitungan-perhitungan yang terdahulu, dengan $m = 1,4$ didapat:

$$\begin{aligned} G_v &= m \cdot U_{ov} + G_{ov} - U_{ov} = 1,4 \times 6,96 + 7,4 - 6,96 \\ &= 10,18 \text{ nm}^3 \text{ gas asap/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

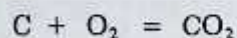
Dengan menggunakan Rumus Pengalaman dari Rosin:

$$G_v = 1,4 \times 6,91 + 7,31 - 6,91 = 10,074 \text{ nm}^3 \text{ gas/kg bahan bakar}$$

17. Pengukuran Volume Gas Asap

Unruk mengukur volume gas asap yang terbentuk, cukup dengan menentukan jumlah kandungan CO_2 dan SO_2 di dalam gas asap.

Dari persamaan:



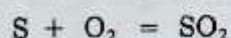
$$12 \text{ kg C} + 1 \text{ kg molekul O}_2 = 1 \text{ kg molekul CO}_2$$

$$12 \text{ kg C} + 22,4 \text{ nm}^3 \text{ O}_2 = 22,4 \text{ nm}^3 \text{ CO}_2$$

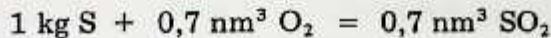
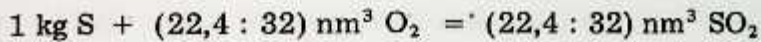
$$1 \text{ kg C} + (22,4 : 12) \text{ nm}^3 \text{ O}_2 = (22,4 : 12) \text{ nm}^3 \text{ CO}_2$$

$$1 \text{ kg C} + 1,867 \text{ nm}^3 \text{ O}_2 = 1,867 \text{ nm}^3 \text{ CO}_2$$

Selanjutnya dari persamaan:



$$32 \text{ kg S} + 1 \text{ kg molekul O}_2 = 1 \text{ kg molekul SO}_2$$



Untuk menentukan kandungan $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ di dalam gas asap, adalah dengan jalan melarutkan 100 cm^3 gas asap melalui larutan KOH , yang dilakukan di dalam alat orsat (orsat aparatus). Berkurangnya volume gas asap karena $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ yang larut di dalam larutan KOH pada aparat orsat tersebut menyatakan volume $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ di dalam gas asap kering, karena gas asap yang diperiksa dalam aparat orsat tersebut temperaturnya telah turun seperti temperatur udara luar, sehingga kandungan uap air di dalam gas asap telah diembunkan (telah mengembun).

Jumlah volume $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ dinyatakan dalam m^3/kg bahan bakar dapat dihitung dari susunan bahan bakar itu sendiri. Prosentase volume $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ dalam gas asap kering dapat diketahui dengan aparat orsat, sehingga gas asap kering yang terbentuk per kg bahan bakar dapat dihitung.

Karena kandungan Belerang S di dalam bahan bakar umumnya sangat rendah, maka sering kali hanya dinyatakan kandungan CO_2 di dalam gas asap, sekalipun yang diukur dalam orsat aparat adalah $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ bersama-sama.

CONTOH:

Diketahui: Batubara seperti di dalam contoh di muka, dengan kandungan: Air = 7,5%; Abu = 5,8%; C = 68,6%; H = 4,5%; (O + N) = 13,2%; S = 0,4%; dengan $Q_{\text{Low}} = 26.596 \text{ KJ/kg}$; $Q_{\text{High}} = 26596 + 2$

$$\begin{aligned} Q_{\text{High}} &= (26596 + 2512 \times (0,075 + 9 \times 9 \text{ H})) \\ &= 26596 + 2512 \times (0,075 + 9 \times 0,045) \\ &= 27.802 \text{ KJ/kg} \end{aligned}$$

Pembakaran batubara tersebut menghasilkan kandungan CO_2 sebanyak 11%;

Ditanyakan: Berapa nm^3 gas asap yang terbentuk per kg bahan bakar, jika semua C dan S terbakar?

Jawab: Karbon dan Belerang dalam bahan bakar menghasilkan sebanyak:

$$\begin{aligned} &= 1,867 \times 0,686 + 0,7 \times 0,004 \text{ nm}^3 (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) \\ &= 1,28 \text{ nm}^3 (\text{CO}_2 + \text{SO}_2) \end{aligned}$$

Jika ini merupakan 11% dari gas asap kering, maka volume gas asap kering

$$= 1,28 : 0,11 \text{ nm}^3 = 11,7 \text{ nm}^3 \text{ gas asap kering}$$

Hidrogen 0,045 kg menghasilkan = $0,045 \times 9$ kg uap air
= 0,405 kg uap air.

Sehingga per kg bahan bakar akan menghasilkan uap air keseluruhannya sebanyak = $0,405 \text{ kg} + 0,075 \text{ kg} = 0,48$ kg uap air/kg bahan bakar.

Berat 1 nm^3 uap air = $18 \text{ kg} : 22,4 = 0,804$ kg, sehingga volume uap air yang terbentuk per kg bahan bakar = $0,48 \text{ nm}^3 : 0,804 = 0,6 \text{ nm}^3$ uap air per kg bahan bakar.

Dengan demikian volume gas asap yang terbentuk keseluruhannya = $11,7 \text{ nm}^3 + 0,6 \text{ nm}^3 = 12,3 \text{ nm}^3$ per kg bahan bakar.

Dari $G_v = m \cdot U_{ov} + G_{ov} - U_{ov}$ dan dari contoh soal tersebut di dalam sub 16.b di muka:

$$12,3 = m \times 6,96 + 7,4 - 6,96$$

sehingga didapat harga $m = 1,71$.

Jika dengan cara demikian tadi, dapat ditentukan jumlah dan susunan gas asap, maka dari penurunan temperatur gas asap, dapat ditentukan: jumlah panas yang dilepaskannya, apabila diketahui pula Panas Jenisnya.

Panas Jenis untuk beberapa macam gas yang merupakan bagian-bagian dari gas asap adalah seperti tersebut dalam gambar.

18. Temperatur Pembakaran

Jika susunan dan jumlah gas asap diketahui, maka dapat pula dihitung temperatur pembakarannya, dengan catatan bila diketahui pula atau diasumsikan jumlah kehilangan panas dan jumlah panas yang dipancarkan langsung dari bunga api, gas-gas dan rangka bakar, ke bidang yang dipanaskan. Panas sisanya yang terbentuk digunakan untuk menaikkan temperatur gas asap.

CONTOH:

Ditanyakan: Temperatur di dalam tungku seperti dalam contoh soal tersebut di muka, bila diketahui: Kerugian di dalam

tungku 3%; sedangkan 30% dari panas yang terbentuk dipancarkan langsung ke bidang yang dipanaskan. Diketahui pula temperatur sekeliling bangunan ketel adalah 25°C.

Jawab: Setiap kg bahan bakar membentuk 11,7 nm³ gas asap kering, di antaranya 1,28 nm³ CO₂.

Susunan gas asap dengan demikian terdiri dari

$$(N_2 + O_2) = (11,7 - 1,28) \text{ nm}^3 = 10,42 \text{ nm}^3$$

Untuk sementara temperatur api dianggap 1000°C atau 1273°K, maka Panas Jenis rata-rata antara 0-1000°C, dari gambar grafik pada sub 17 di muka untuk:

$$\text{P.J. CO}_2 \text{ dan SO}_2 = 2,135 \text{ KJ/nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{P.J. O}_2 \text{ dan N}_2 = 1,382 \text{ KJ/nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{P.J. H}_2\text{O (uap)} = 1,675 \text{ KJ/nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

Sehingga untuk setiap °C atau °K, kenaikan temperatur gas asap, membutuhkan panas sebanyak

$$\begin{aligned} &= 2,135 \times 1,28 + 1,382 \times 10,42 + 1,675 \times 0,6 \\ &= 18,138 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \text{ bahan bakar} \end{aligned}$$

Setiap kg bahan bakar akan memberikan panas kepada gas asap sebanyak

$$\begin{aligned} &= (100\% - 3\%) \times (100\% - 30\%) \times 26596 \text{ KJ/kg} \\ &= 0,97 \times 0,7 \times 26.596 \text{ KJ/kg} \text{ bahan bakar} \\ &= 18.059 \text{ KJ/kg} \text{ bahan bakar} \end{aligned}$$

Bahan bakar dan udara masuk ke dalam tungku dengan temperatur 25°C atau 298°K. Kenaikan temperatur sebanyak

$$= 18.059 \text{ KJ/kg} : 18,138 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{K} = 996^\circ\text{K}$$

Sehingga temperatur di dalam tungku menjadi

$$= 298^\circ\text{K} + 996^\circ\text{K} = 1294^\circ\text{K} \text{ atau } 1021^\circ\text{C}$$

Bila dimisalkan udara pembakaran dipanasi terlebih dahulu di dalam pemanas udara sampai 125°C atau 398°K, maka Panas Jenisnya menurut Grafik pada sub 17 adalah sebesar 1,319 KJ/nm³·°K.

$$\begin{aligned} \text{Jumlah udara yang dibutuhkan} &= m \times U_{\text{ov}} = 1,71 \times 6,96 \text{ nm}^3/\text{kg} \\ &= 11,9 \text{ nm}^3/\text{kg} \text{ bahan bakar.} \end{aligned}$$

Sehingga jumlah panas yang terbawa oleh udara pembakar yang masuk ke dalam tungku

$$\begin{aligned} &= 1,319 \text{ KJ/nm}^3 \cdot ^\circ\text{K} \times 11,9 \text{ nm}^3/\text{kg bh. bakar} \times (T_{\text{ud. panas}} - T_o) \\ &= 1,319 \times 11,9 \times (398 - 298) \text{ KJ/kg bahan bakar} \\ &= 1.570 \text{ KJ/kg bahan bakar} \end{aligned}$$

Kenaikan temperatur di dalam tungku menjadi

$$\begin{aligned} &= (18.059 + 1.570) \text{ KJ/kg bh. bakar} : 18,138 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{K} \\ &= 1082^\circ\text{K} \end{aligned}$$

Sehingga temperatur di dalam tungku menjadi

$$= 1082^\circ\text{K} + 298^\circ\text{K} = 1380^\circ\text{K} \text{ atau } 1107^\circ\text{C}$$

Bila misalnya panas yang terbentuk di dalam tungku diberikan seluruhnya kepada gas asap, maka kenaikan temperaturnya

$$\begin{aligned} &= 26.596 \text{ KJ/kg bahan bakar} : 18,138 \text{ KJ/kg bahan bakar} \cdot ^\circ\text{K} \\ &= 1466,3^\circ\text{K} \end{aligned}$$

Kenaikan temperatur ini disebut kenaikan temperatur tungku adiabatik.

19. Prosentase CO_2 Maksimum

Karbon C di dalam bahan bakar, jika terbakar menjadi CO_2 , maka sejumlah volume Oksigen O_2 yang dibutuhkan untuk pembakaran akan membentuk sejumlah volume yang sama CO_2 .

Jika dimisalkan bahan bakar yang terdiri hanya dari Karbon C saja seluruhnya, dan jika keadaan memungkinkan, maka dengan semua Oksigen yang terdapat di dalam udara teoretis yang dibutuhkan akan membentuk CO_2 seluruhnya.

Karena udara mengandung 21% volume Oksigen, maka gas asap teoretisnya akan terdiri dari 79% N_2 dan 21% CO_2 yang dalam hal ini merupakan kandungan CO_2 maksimum teoretis. Sehingga dengan demikian untuk bahan bakar berupa Kokas (Cokes) akan menghasilkan CO_2 maksimum teoretis sebesar 21%.

Secara umum, untuk bahan bakar yang mengandung C % Karbon; S % Belerang; H % Hidrogen; N % Nitrogen dan W % Air, maka

$$\% \text{CO}_2 \text{ max} = \frac{1,87 \text{ C} + 0,7 \text{ S}}{0,0895 \text{ C} + 0,212 \times (\text{H} - \text{O}/8) + 0,0335 \text{ S} + 0,008 \text{ N}}$$

Selanjutnya dengan sedikit pendekatan, harga % CO₂ yang sebenarnya, yang didapat dari pengukuran terhadap gas asap, harganya adalah:

$$\boxed{\% \text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2 \text{ max}}{m}} \quad \text{atau} \quad \boxed{m = \frac{\text{CO}_2 \text{ max}}{\% \text{CO}_2}}$$

$$m = \frac{\text{Udara yang sebenarnya dibutuhkan}}{\text{Udara teoretis yang dibutuhkan}} = \frac{U}{U_0}$$

$m =$ Angka kelebihan udara = Excess air coefficient

BAB IV

PERALATAN PEMBAKAR

20. *Peralatan Pembakar untuk Bahan Bakar Padat*

Terkecuali batubara serbuk, bahan bakar padat pada umumnya dibakar di atas rangka bakar (*grate*), yang terletak di dalam tungku (*furnace*).

Sesuai dengan penempatannya, tungku pada ketel uap, dibeda-bedakan menjadi: Tungku **Depan**, Tungku **Dalam** dan Tungku **Bawah**.

a. **Tungku Depan**

Terletak sama sekali di bagian depan dari ketel uap. Lihat gambar.

Rangka bakarnya dikelilingi seluruhnya oleh dinding-dinding tembokan ketel dari batu tahan api, sehingga hanya sebagian kecil dari panas yang dipancarkan di dalam tungku (10%-15%) yang diterima oleh bidang yang dipanaskan (*Heating-Surface*).

Dengan demikian untuk bahan bakar dengan nilai pembakaran yang rendah dengan mudah bisa mencapai temperatur pembakarannya.

Dinding-dinding tembokan dari batu tahan api, bertindak sebagai penyimpan panas (*akumulator panas*) bagi bahan bakar segar yang baru saja dilemparkan ke dalam tungku. Pada umumnya, tungku depan cocok bagi bahan bakar yang mempunyai nilai pembakaran yang rendah.

Adapun keberatan-keberatannya ialah:

- banyak membutuhkan ruangan,
- banyak kerugian panas yang dipancarkan ke luar,
- pada setiap kali ketel dinyalakan (*firing*), setelah mengalami istirahat atau perbaikan-perbaikan, maka banyak sekali panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur tembokan-tembokan terlebih dahulu.

Bagi bahan bakar yang mempunyai nilai pembakaran yang tinggi, maka tungku depan sama sekali tidak cocok karena temperatur api yang tinggi yang dihasilkan akan lekas merusakkan tembokan-tembokan.

Dalam Gambar diperlihatkan tungku depan untuk membakar batubara coklat, bagian atas tungku berfungsi sebagai kamar pengering.

b. Tungku Dalam

Tungku dalam sama sekali dikelilingi oleh bidang yang dipanaskan (heating surface) dari ketel uap, sehingga penyerahan panas secara pancaran kepada bidang yang dipanaskan adalah sebesar 25%-50% dari seluruh jumlah panas yang terbentuk di dalam tungku.

Dengan demikian temperatur di dalam tungku menjadi rendah, sehingga tidak cocok untuk bahan bakar dengan nilai pembakaran yang rendah, dan tidak cocok untuk bahan bakar yang menghasilkan asap atau jelaga yang banyak. Kerugian panas karena pancaran panas oleh tungku ke luar sedikit sekali, lagi pula tungku dalam tidak banyak menyita ruangan.

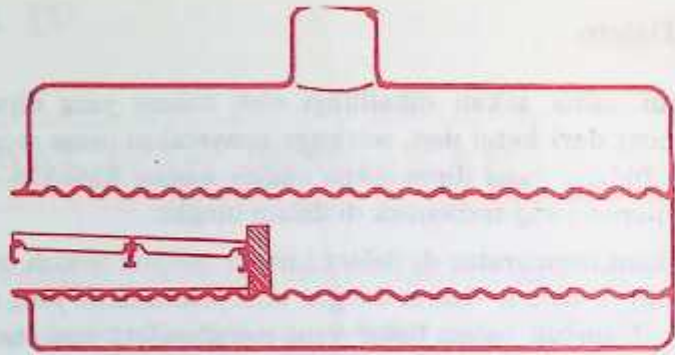
Kerugiannya ialah ukuran-ukuran tungku menjadi terbatas, tergantung dari dimensi ketel uapnya, atau tergantung dari besarnya silinder api, karena panjang rangka bakarnya tidak lebih dari 2 meter. Lihat gambar.

c. Tungku Bawah

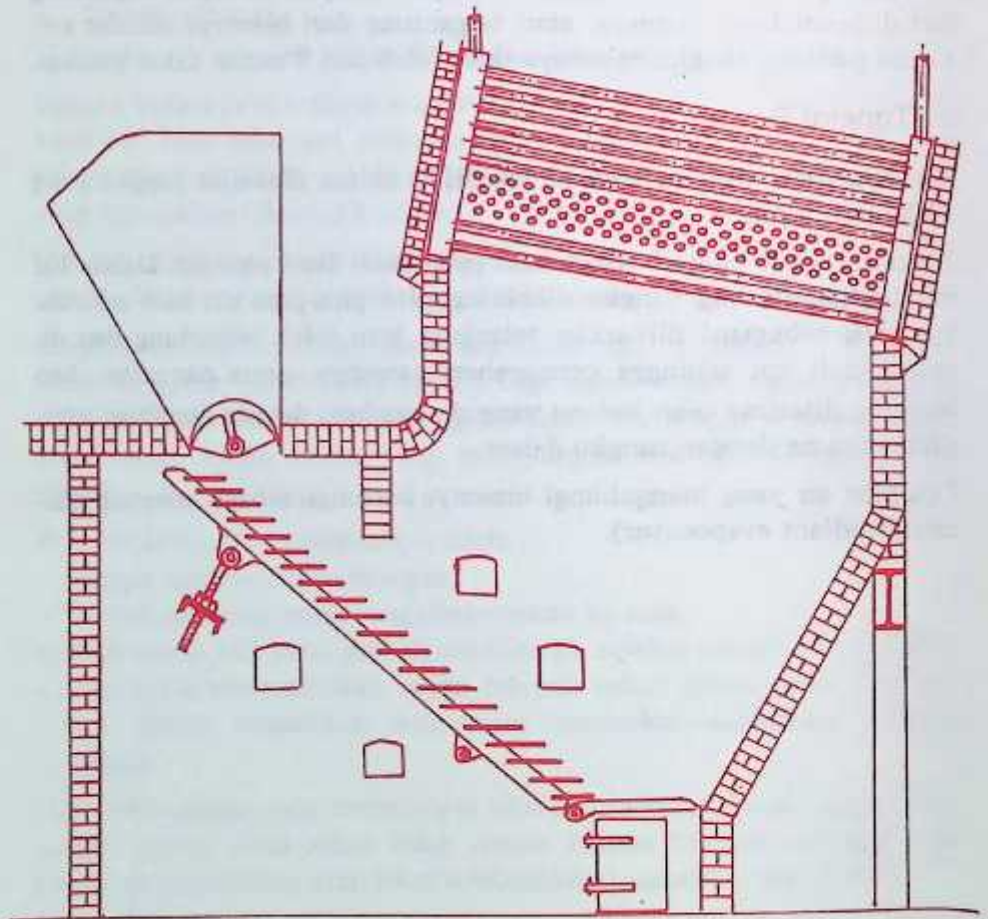
Sifat-sifat dari tungku bawah, seperti di antara sifat-sifat tungku yang telah disebutkan.

Tungku bawah banyak digunakan pada ketel-ketel pipa air. Dalam hal ini, dinding-dinding tungku dikelilingi oleh pipa-pipa air, baik seluruhnya atau sebagian, dibiarkan telanjang atau tidak terlindung dan dipanasi oleh api sehingga penyerahan panasnya secara pancaran akan langsung diterima oleh bidang yang dipanaskan, dengan demikian sifat-sifatnya sama dengan tungku dalam.

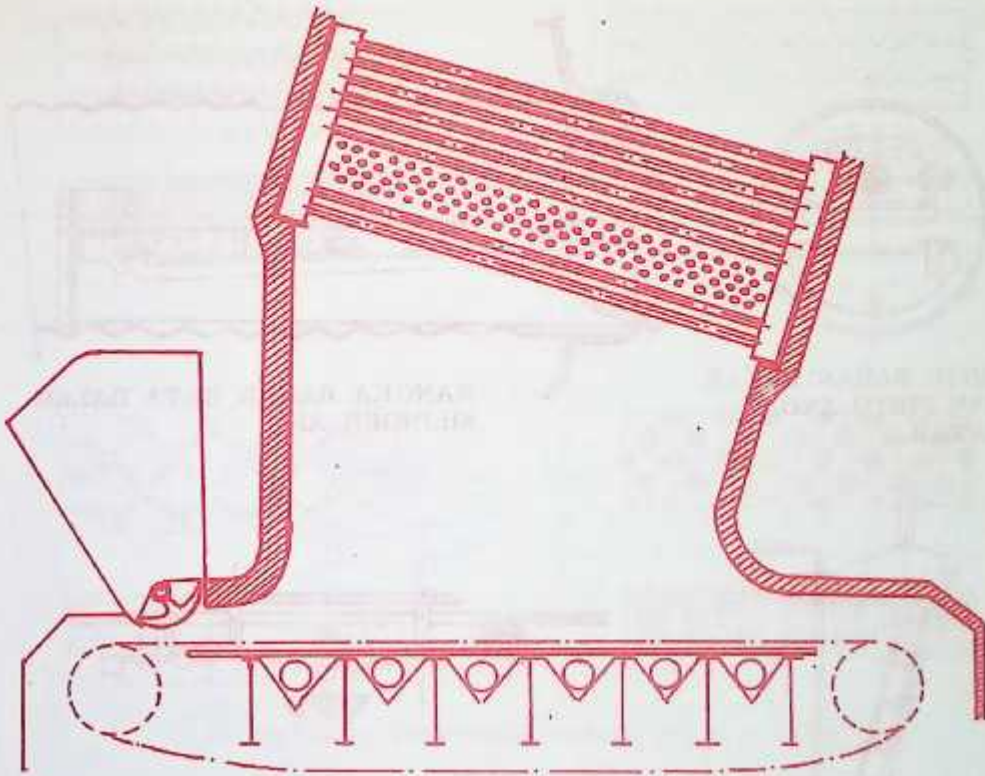
Pipa-pipa air yang mengelilingi biasanya berfungsi sebagai penguap pancaran (radiant evaporator).



TUNGKU DI DALAM



TUNGKU DI DEPAN



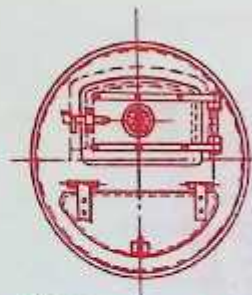
TUNGKU DI BAWAH

20.1. Peralatan Pengopak dengan Tangan (Handstoke Equipment)

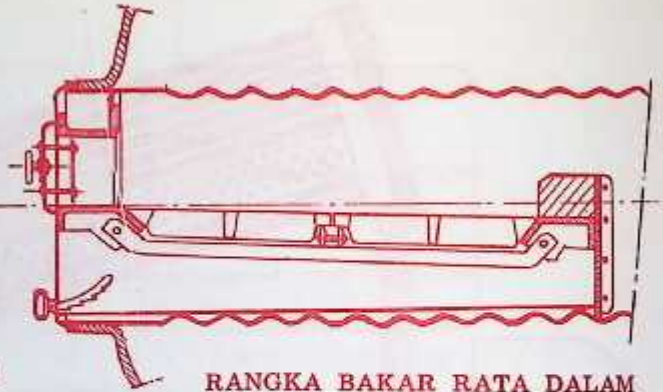
Rangka bakar yang paling sederhana ialah rangka bakar datar. Terdiri dari batang-batang rangka bakar, yang diletakkan saling berdampingan pada jarak-jarak tertentu, yang dipisahkan oleh nok-nok jarak, sehingga terbentuklah celah-celah di antara batang-batang rangka bakar tersebut. Lihat gambar.

Jumlah luas dari semua celah-celah antara batang-batang rangka bakar ini disebut: luas rangka bakar yang bebas.

Panjang batang-batang rangka bakar 0,7-1,0 meter yang sengaja dibuat pendek-pendek, agar pada waktu transportasi tidak banyak yang patah. Batang-batang rangka bakar diletakkan di atas pemikul rangka bakar (doodbed), pada pemikul-pemikul rangka bakar tersebut tidak terdapat celah-celah, sehingga udara tidak bisa mengalir melewatinya, yang dengan demikian di atas pemikul rangka bakar, bahan bakar akan sukar untuk terbakar.



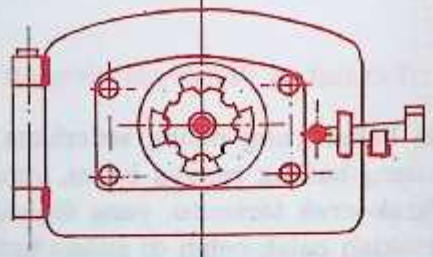
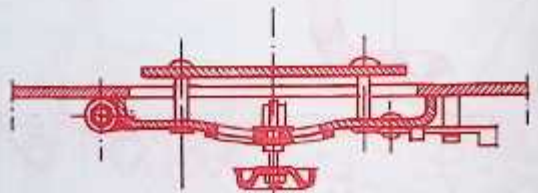
**PINTU BAHAN BAKAR
DAN PINTU ANGIN
BAWAH**



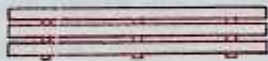
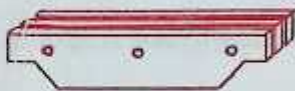
**RANGKA BAKAR RATA DALAM
SILINDER API**



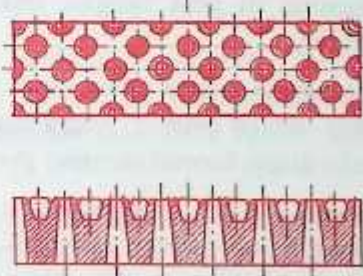
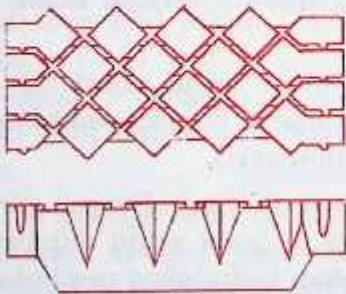
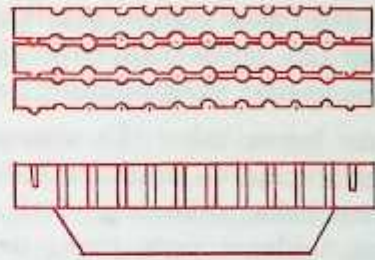
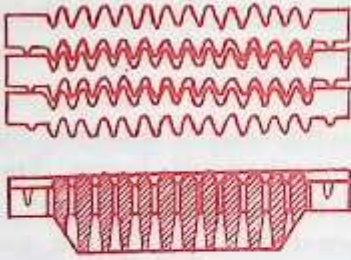
**PINTU BAHAN BAKAR
DENGAN ENGSEL
HORIZONTAL UNTUK
KAPAL LAUT**



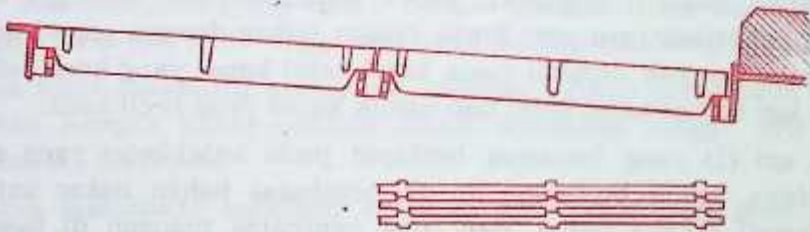
**PINTU BAHAN BAKAR DENGAN
ENGSEL YANG VERTIKAL**



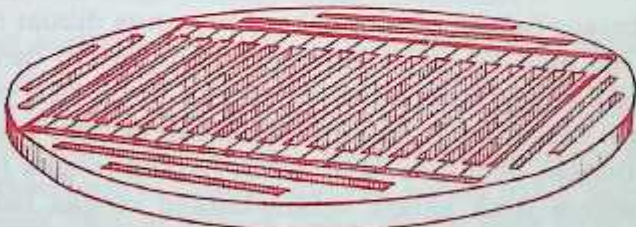
**BATANG-BATANG RANGKA BAKAR
TERBUAT DARI PELAT-PELAT**



Batang-batang rangka bakar berbagai bentuk dan tipe.



Batang-batang rangka bakar di atas penyangga dan pemikul rangka bakar



Rangka bakar datar untuk ketel-ketel tegak dan ketel Cochran.

Rangka bakar dengan pemikul batang rangka bakar (D), pintu bahan bakar (E), pintu angin bawah (G), dan jembatan api merupakan peralatan pembakar, yang dipasang pada tungku dalam.

Pintu bahan bakar (E) umumnya berengsel vertikal, namun ada pula yang berengsel horizontal dengan pemberat (bandul) lawan. Pintu bahan bakar dilindungi dari api oleh pelat pelindung (B). Roset (F) yang terdapat pada pintu bahan bakar merupakan celah-celah yang dapat ditutup atau dibuka, yang gunanya ialah bila setelah menambah dengan bahan bakar baru yang segar, maka celah-celah yang terdapat pada roset F dibuka lebar-lebar, untuk memasukkan udara pembakar langsung di atas rangka bakar, yang sering disebut sebagai udara sekunder.

Sedangkan udara pembakar yang melewati pintu angin bawah (G) disebut udara primer, yang banyaknya dapat diatur dengan pembukaan pintu angin bawah dengan grendel pengatur pintu (H).

Lubang untuk pengopakan berukuran $0,3 \times 0,4 \text{ m}^2$. Dengan pintu bahan bakar yang berengsel horizontal seluruh berat pintu diimbangi oleh bandul lawan (C), sehingga memungkinkan kedudukan pembukaan pintu, apakah akan dibuka penuh, ditutup, ataupun dibuka sebagian, dapat dipertahankan begitu.

Dengan mendorong pintu bahan bakar dengan sekop yang penuh dengan bahan bakar (batubara), pintu dapat dibuka, sehingga memudahkan pekerjaan juru api. Pintu bahan bakar dengan engsel horizontal dahulu banyak dipakai pada ketel-ketel kapal yang kecil, sekarang tidak lagi dibuat ketel-ketel uap untuk kapal yang kecil-kecil.

Jembatan api (I) yang biasanya terdapat pada ketel-ketel yang ada lorong apinya, selain berfungsi untuk pembatas bahan bakar untuk tidak melewati rangka bakar, dan juga pembatas ruangan di bawah rangka bakar dengan silinder api di belakang jembatan api, dan untuk penahan rangka bakar di sebelah dalam dari tungku. Juga berfungsi agar api dan udara dapat teraduk dengan sendirinya, sehingga temperaturnya dapat merata.

Bahan dari batang-batang rangka bakar umumnya dibuat dari besi tuang yang tidak ada atau kurang kandungan fosfor (P) dan belerang (S). Kadang-kadang dibuat batang-batang rangka bakar dari baja Mild Steel sehingga dapat dibuat lebih tipis dibandingkan dengan yang terbuat dari besi tuang. Dengan demikian celah-celah batang rangka bakar dapat diperluas, sekalipun jarak antara batang-batang rangka bakar itu sendiri justru makin dekat.

Biasanya batang-batang rangka bakar yang terbuat dari mild steel tersebut berupa rangkaian batang-batang rangka bakar, empat atau lima batang rangka bakar tersusun menjadi satu rangkaian. Lihat gambar.

Batang-batang rangka bakar yang terbuat dari mild steel kurang tahan terhadap api dibandingkan dengan yang terbuat dari besi tuang, karena pada rangka bakar datar, bahan bakar segar yang baru saja ditaburkan di atas bara api, dapat dengan mudah untuk terbakar, maka bahan bakar yang banyak mengandung abu serta besar kandungan airnya, dapat terbakar dengan memuaskannya di atas rangka bakar tersebut.

Tergantung dari jenis bahan bakarnya, Beban Rangka Bakar (BRB) dapat mencapai sekitar 80-120 kg bahan bakar per m^2 Luas Rangka Bakar (LRB) per jam, dengan tarikan cerobong alamiah (Natural Draught), sedangkan untuk kokas sekitar 60-70 kg bahan bakar/ m^2 LRB jam, dan untuk briket (briquette) sekitar 120-200 kg/ m^2 LRB jam.

Untuk memperbesar beban rangka bakar (BRB) maka pada umumnya diusahakan dengan jalan tarikan cerobong dengan paksa (Induced Draught) atau dengan angin bawah tekan (Forced Draught), dengan udara ditekan oleh Fan Tekan (Forced Draught Fan atau FDF) masuk di bagian rangka bakar.

Dengan tarikan cerobong paksa ataupun dengan angin bawah bertekanan, atau kedua-duanya, maka Beban Rangka Bakar dapat diperbesar hingga 30%-40% lebih tinggi dari pada tarikan cerobong alamiah.

Pada ketel lokomotif kereta api, dengan tarikan paksa pada cerobong, Beban Rangka Bakar bahkan dapat dinaikkan hingga 500 kg bahan bakar/ m^2 LRB jam.

Untuk membakar batubara berbutir halus (batubara pasir atau Fine Grained Coal), karena celah-celah di antara bahan bakar sendiri demikian sempit, sehingga tahanan gesekan terhadap aliran udara cukup besar maka selalu digunakan angin bawah bertekanan. Dengan cara ini, hampir semua batubara pasir, kecuali batubara kurus berbutir halus, dapat dibakar di atas rangka bakar datar (Flat Grate).

Batubara kurus berbutir halus bila dicampur dengan batubara gemuk berbutir halus yang mudah menggumpal, dengan perbandingan jumlah tertentu, dapat dibakar dengan memuaskannya di atas rangka bakar datar (Flat Grate). Karena pencampuran kedua jenis batubara tersebut, kemungkinan terhembusnya butiran-butiran bahan bakar dapat dikurangi dan tidak banyak butiran-butiran bahan bakar yang jatuh lewat celah-celah batang-batang rangka bakar, yang disebabkan adanya angin bawah

yang bertekanan, sedangkan penggumpalan batubara juga berkurang, sehingga tidak menghambat atau menyumbat aliran udara.

Selain itu, pencampuran kedua jenis batubara halus tersebut, dapat menurunkan temperatur penyalaan campuran bahan bakar tersebut, yang disebabkan banyaknya kandungan gas-gas penguap (Volatile matter) batubara yang mudah menggumpal tersebut.

Batubara yang besar daya menggumpalnya, bila tanpa dicampur dengan batubara jenis yang lain, akan menimbulkan kesukaran-kesukaran karena membentuk kokas dengan gumpalan atau bongkahan yang besar-besar, yang harus selalu dipecah-pecahkan dengan menggunakan peralatan pengopakan.

Lebar celah-celah antara batang-batang rangka bakar tergantung dari bahan bakar yang akan dibakar di atasnya. Untuk batubara pasir, lebar celah-celah jangan lebih dari 2-3 mm, agar tidak banyak butiran-butiran bahan bakar yang jatuh melewatinya.

Untuk butiran-butiran nomor IV dan V dari batubara yang tidak menggumpal, lebar celah-celah diambil 5-7 mm. Untuk butiran-butiran yang lebih kasar, dan untuk batubara yang mudah menggumpal dengan butiran-butiran yang lebih kecil, lebar celah-celah sekitar 7-10 mm.

Karena batang-batang rangka bakar tidak dapat dicor dengan tebal kurang dari 10 mm agar tidak mudah patah, maka untuk celah-celah batang rangka bakar yang sempit, Luas Rangka Bakar yang bebas hanya merupakan bagian kecil dari Luas Rangka Bakar keseluruhannya. Pada umumnya hal tersebut tidak menimbulkan kesukaran-kesukaran, karena kecepatan udara melalui celah-celah masih di bawah 2-4 m/detik, itu pun bila pengopakan dilakukan dengan baik.

Ada beberapa cara untuk mengusahakan agar Luas Rangka Bakar yang bebas dapat diperbesar, sedangkan celah-celah lebarnya adalah tertentu, dengan cara membuat batang-batang rangka bakar berkelak-kelok.

Karena kadang-kadang Luas Rangka Bakar yang bebas kurang mencukupi, maka sering kali diperlukan adanya udara sekunder untuk mencegah terbentuknya gas-gas yang belum sempat terbakar, yang kadang-kadang dapat menimbulkan terjadinya ledakan.

Batang-batang rangka bakar menerima panas pancaran dari api di atasnya, dan menerima perambatan panas karena bersinggungan dengan bahan bakar yang membara di atasnya.

Persinggungan panas ini menjadi lebih besar, bila terak (slag) menjadi cair. Lain dari pada itu, pada temperatur 950°C batang-batang rangka

bakar akan mudah berkarat (korosi) yang disebabkan adanya terak. Batang-batang rangka bakar memberikan panas ke sekelilingnya dengan cara pancaran, dan secara konveksi kepada udara yang melewati celah-celahnya, sehingga udara menjadi panas dan dengan demikian mempermudah pembakaran.

Penyerahan panas dari batang-batang rangka bakar kepada udara yang melaluinya akan makin baik bila luas bidang permukaan batang-batang rangka bakar yang dilewati oleh udara diperbesar dan bila kecepatan udara yang melewatinya makin tinggi.

Bila diperkirakan bahwa temperatur lapisan bahan bakar di atasnya demikian tinggi, yaitu untuk batubara kurus, panas yang terbentuk dalam lapisan bahan bakar tersebut lebih besar bila dibandingkan dengan batubara gemuk yang mengandung banyak gas-gas penguap (volatile matter). Pembakaran gas-gas penguap tersebut berlangsung di atas lapisan bahan bakar, maka sebaiknya dipilih batang-batang rangka bakar yang tipis, namun tinggi.

Batang-batang rangka bakar harus dapat dengan bebas memuai karena bukan saja pemuaian yang disebabkan tingginya temperatur, tetapi masih juga ditambah pemuaian yang disebabkan besi tuang yang dibiarkan lama berada pada temperatur yang tinggi akan mengakibatkan perpanjangan yang permanen.

Pengalaman-pengalaman menunjukkan bahwa pada beban rangka bakar yang tinggi, kira-kira sekitar 200 kg/m^2 LRB jam, dan bahkan dengan batubara yang mengandung banyak gas-gas penguap (volatile matter) yaitu sekitar 28% gas-gas penguap, temperatur batang-batang rangka bakar bagian atas dapat mencapai 950°C maka mulailah terjadi pengkaratan atau korosi pada batang-batang rangka bakar tersebut.

Dalam hal melayani api, harus diusahakan oleh juru api, agar rangka bakar masih selalu tertutup oleh lapisan bahan bakar yang tidak terlalu tebal. Lapisan bahan bakar ini jangan sampai habis terbakar, melainkan senantiasa pada waktu-waktu tertentu ditaburkan sejumlah bahan bakar segar di atasnya, dan jangan terlalu banyak (misalnya untuk batubara sekitar dua sekop per m^2 Luas Rangka Bakar). Sehingga tebal lapisan bahan bakar di atasnya senantiasa tetap tidak berubah.

Pintu bahan bakar jangan terlalu lama dibiarkan terbuka, lebih-lebih bila tarikan cerobong hanya alamiah, untuk menjaga agar jangan terlalu banyak udara dingin terhembus di atas api.

Bila pelayanan api kurang baik, maka dapat menurunkan kadar CO₂ sampai 5-15%, yang disebabkan karena gas-gas uraian bahan bakar tidak terbakar dengan sempurna.

20.2. Rangka Bakar Tangga

Dahulu rangka bakar tangga ini dibuat untuk pembakaran batubara coklat yang halus, penambahan bahan bakar secara otomatis berlangsung karena beratnya sendiri turun ke bawah.

Semula batang-batang rangka bakar tersusun dari pelat-pelat horizontal, panjang pelat 400-600 mm, lebar 90-150 mm, dan tebalnya 8-15 mm, yang disusun menyerupai anak tangga (trap).

Bahan bakar di atas rangka bakar mengikuti talud alamiah. Dengan demikian luas rangka bakar dapat dibuat sebesar-besarnya sesuai dengan yang dikehendaki, tanpa ada butiran-butiran bahan bakar yang jatuh melewati celah-celahnya. Biasanya lebar (tinggi) celah-celah sekitar 20-30 mm.

Begitu bahan bakar terbakar, maka dengan sendirinya ada sejumlah bahan bakar segar baru yang turun ke bawah, melapisi bara api. Jumlah bahan bakar segar baru yang turun ke bawah banyaknya diatur oleh pintu sorong bahan bakar, sedemikian sehingga lapisan bahan bakar tebalnya tetap terjaga.

Destilasi atau **pengegasan** bahan bakar berlangsung pada bagian atas rangka bakar, dan diatur sedemikian sehingga tebal lapisan bahan bakar di bagian atas rangka bakar lebih tebal dari pada tebal lapisan bahan bakar di bagian bawah.

Hal ini dilakukan dengan menyetel sudut kemiringan tangga di bagian atas **berbeda** dengan sudut kemiringan tangga di bagian bawah, sedemikian sehingga sudut kemiringan tangga di bagian atas lebih kecil dari sudut kemiringan talud alamiah bahan bakar.

Kemiringan tangga sangat tergantung dari: jenis bahan bakar, kandungan air, besarnya butiran bahan bakar, kandungan abu, daya menggumpal dan tarikan cerobong.

Dengan demikian sudut kemiringan yang tepat perlu dicari dengan jalan mencoba-coba, oleh karena itu umumnya rangka bakar tangga dapat disetel sudut kemiringannya.

Ternyata dari pengalaman-pengalaman menunjukkan bahwa rangka bakar tangga ini dapat digunakan dengan memuaskan untuk membakar bahan bakar berkualitas rendah lainnya, sekalipun dengan kandungan

air yang sangat tinggi, misalnya serutan kayu, kulit padi, ampas tebu, jerami, kulit-kulit kopi, dan bahan sampah pun dapat dibakarnya dengan baik.

Seperti terlihat dalam gambar, pada batang-batang rangka bakar terdapat bahan bakar yang membara yang bersinggungan dengan pelat batang rangka bakar yang cukup luas, sehingga mengakibatkan panas yang tinggi pada batang-batang rangka bakar. Dengan demikian rangka bakar tangga hanya cocok untuk bahan bakar berkualitas rendah dengan nilai pembakaran yang rendah pula.

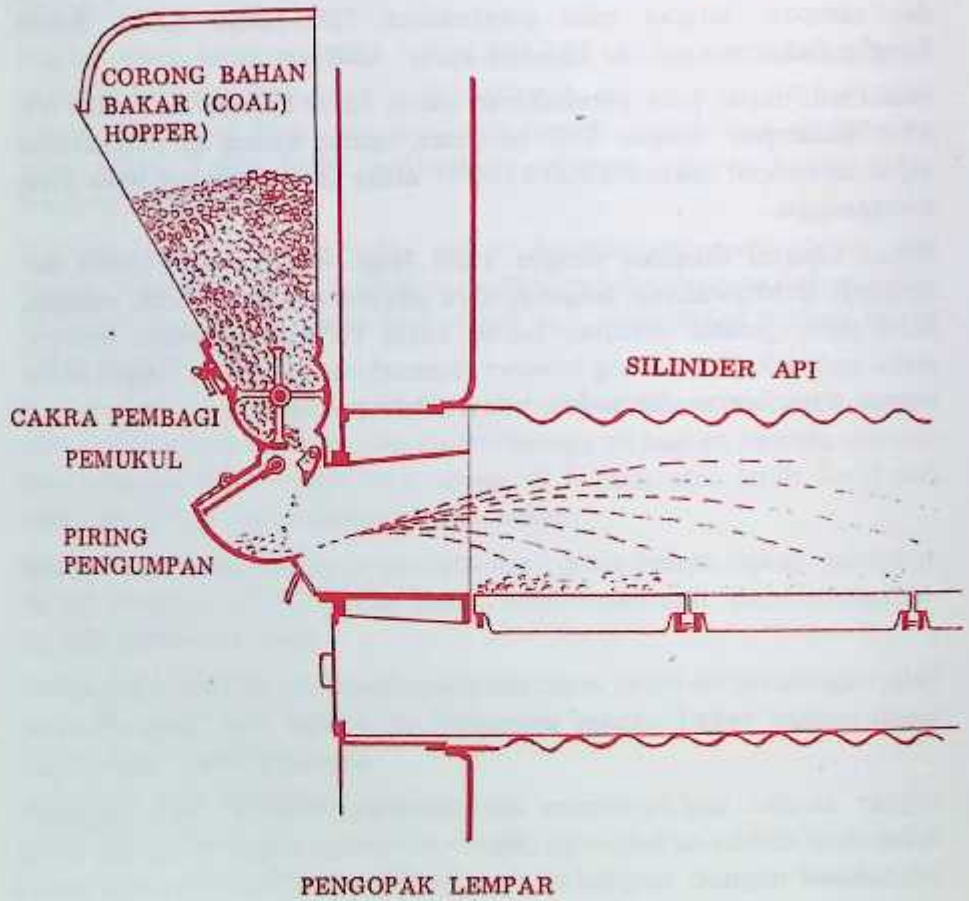
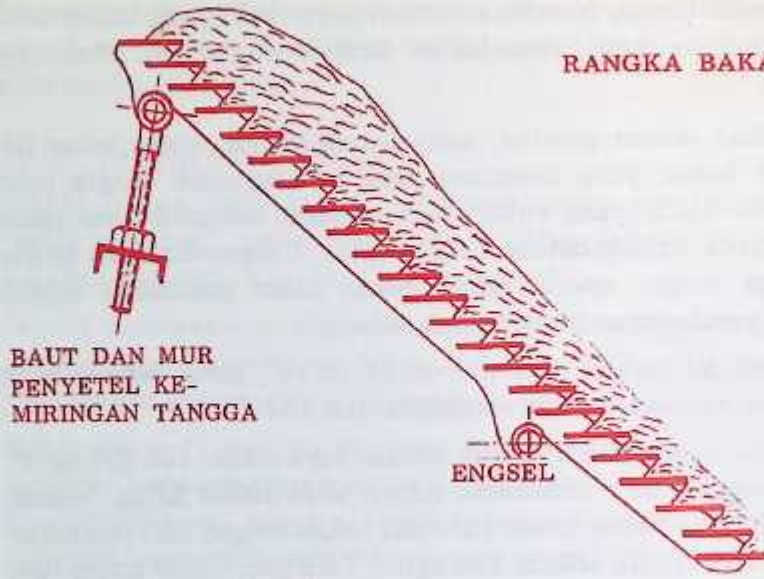
Sudut kemiringan untuk batubara coklat $32-35^\circ$, untuk serutan kayu $36-45^\circ$, untuk ampas tebu dan sampah sekitar $45-55^\circ$.

Beban Rangka Bakar (BRB) untuk serutan kayu sekitar $150-200 \text{ kg/m}^2$ LRB jam dengan nilai pembakaran sekitar $5024-10050 \text{ KJ/kg}$. Sedangkan Beban Rangka Bakar untuk batubara coklat dengan nilai pembakaran $10050-16750 \text{ KJ/kg}$ sekitar 150 kg/m^2 LRB jam. Untuk ampas tebu dan sampah dengan nilai pembakaran $7950-10050 \text{ KJ/kg}$, Beban Rangka Bakarnya sekitar $125-175 \text{ kg/m}^2$ LRB jam.

Selain itu, dapat pula pembakaran bahan bakar berkualitas rendah tersebut dicampur dengan 10% batubara, namun karena api pembakaran dapat mencapai sekitar $1200-1400^\circ\text{C}$, maka akan terbentuk terak yang mengganggu.

Beban tungku dibatasi sampai $1250 \text{ Mega Joule/m}^3\text{jam}$. Untuk mengurangi kekhawatiran terganggunya penyediaan ampas tebu, sampah, kulit padi, jerami ataupun bahan bakar berkualitas rendah lainnya, maka sering kali dipasang brander (burner) minyak di atas rangka bakar tangga, yang hanya digunakan bila keadaan memaksa.

RANGKA BAKAR TANGGA



20.3. Peralatan Pembakar Mekanis

Dalam hal ini pemasukan bahan bakar ke dalam tungku di atas rangka bakar datar (Flat grate), dilakukan secara mekanis, sehingga tidak perlu membuka dan menutup pintu bahan bakar. Terdapat beberapa macam peralatan pengopakan secara mekanis, di antaranya ialah:

a. Pengopak Lempar

Pada pengopak lempar, seperti halnya pengopakan dengan menggunakan tangan, maka bahan bakar berupa batubara segar ditaburkan di atas bara api, dengan jalan dilempar-lemparkan.

Pelemparan batubara segar dilakukan secara lebih teratur. Pada pelemparan tersebut ada kesempatan bagi butiran-butiran batubara tersebut untuk mengegas.

Dalam gambar terlihat adanya cakra pembagi K yang selalu memasukkan bahan bakar dengan jumlah tertentu melewati pengumpan M, di muka pelempar L. Oleh pelempar L inilah sejumlah batubara tertentu di piringan pengumpan, dilemparkan atau ditebarkan di atas rangka bakar.

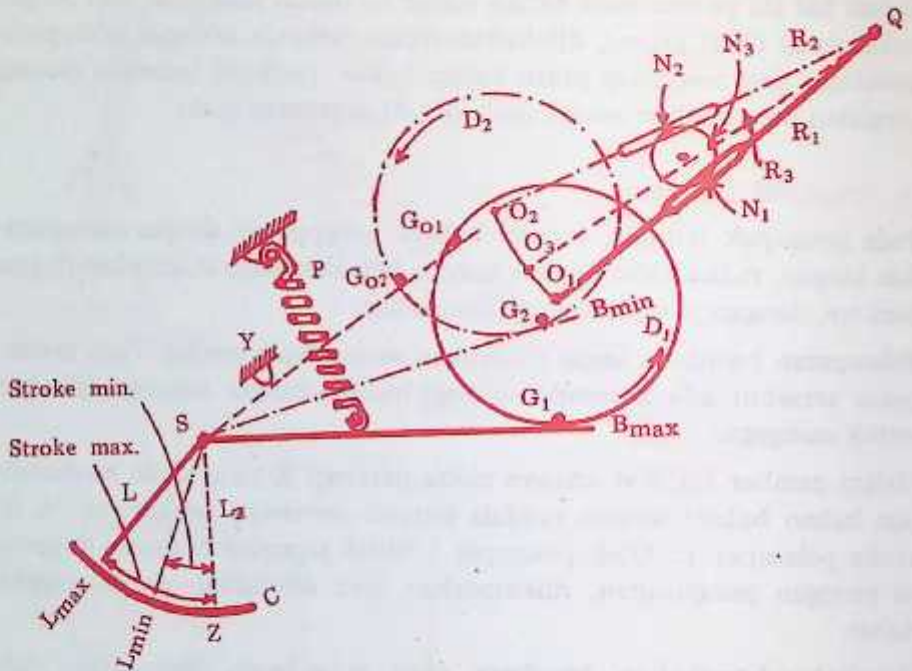
Bongkahan-bongkahan batubara yang besar-besar, dipecahkan oleh cakra pembagi terhadap tutup landasan pemecah E. Tutup landasan pemecah tersebut (E), dapat dibuka bila terdapat bongkahan-bongkahan yang tidak dapat dipecahkan ataupun bila ada potongan-potongan besi, baut, dan sebagainya, yang terselip di dalam bahan bakar, untuk mengeluarkannya.

Piringan pengumpan C merangkap sebagai pintu bahan bakar yang dapat dibuka dan terdapat gelas atau kaca pengintip F. Pintu C ini akan tertutup bila tutup landasan pemecah E ditutup. Dalam keadaan darurat dapat saja pintu atau piring pengumpan C tersebut dibuka, sehingga pengopakan dilayani dengan tangan.

Pada gambar diperlihatkan meknisme pelemparan. Pelempar L berengsel di S, dan di bagian luar terdapat pengungkit B. Pengungkit B ini oleh sebuah pena G yang terdapat pada roda D akan ditekan ke bawah sampai pena G ada pada kedudukan G_1 (kedudukan terbawah).

Bila kemudian pengungkit B (yang membawa pelempar L) terlepas dari pena G, maka pengungkit B akan ditarik dengan kuat oleh pegas tarik P, yang berarti pula pelempar L dipukulkan keras-keras kepada sejumlah batubara yang terdapat pada piringan pengumpan C.

GAMBAR SKEMA PERALATAN PENGATURAN JAUHNYA LEMPARAN PADA PENGOPAK LEMPAR



- C = Piringan pengumpan
 L = Pelempar; L_{max} = Kedudukan pelempar pada lemparan maksimum
 L_{min} = Kedudukan pelempar pada lemparan minimum
 L_z = Kedudukan akhir pelempar
 B = Pengungkit; B_{max} = Kedudukan pengungkit pada lemparan maksimum
 B_{min} = Kedudukan pengungkit pada lemparan minimum
 G = Pena; G_1 = Kedudukan pena pada lemparan maksimum
 G_2 = Kedudukan pena pada lemparan minimum
 G_3 = Kedudukan pena pada lemparan sebarang antara maks dan min
 D = Roda Pembawa Pena G; D_1 = Kedudukan roda pembawa pada lemparan maks
 D_2 = Kedudukan roda pembawa pada lemparan min
 P = Pegas tarik
 N = Pena eksentrik; N_1 = Kedudukan pena eksentrik pada lemparan maksimum
 N_2 = Kedudukan pena eksentrik pada lemparan minimum
 N_3 = Kedudukan pena eksentrik pada lemparan sebarang
 R = Batang pemegang poros O dari Roda D
 S = Engsel Pelempar dan Pengungkit
 Q = Engsel batang R Pemegang poros O dari Roda D
 Y = Pembatas Pukulan Pengungkit B

Pada kedudukan istirahat, pelempar L pada posisi L_2 , sedangkan pengungkit B pada posisi $S-G_{O2}-G_{O1}$. Jika roda D dengan poros O ada pada posisi D_1 dan O_1 yaitu pada posisi lemparan terjauh atau maksimum, maka bila roda D berputar (lihat arah putar roda D), maka pena G akan menekan pengungkit B ke bawah mulai dari posisi G_{O1} sampai dengan G_1 . Bila pena G telah meninggalkan G_1 , maka pengungkit B dari kedudukan B_{max} , dan pelempar L dari kedudukan L_{max} , akan lepas dan ditarik kuat-kuat oleh pegas tarik P dan pelempar L memukul dan melemparkan batubara yang ada di piringan pengumpan C dengan langkah pukul dari L_{max} ke L_2 ; yaitu merupakan lemparan yang terjauh (maksimum).

Titik tengah O dari roda D dipegang oleh batang pemegang R. Batang pemegang R posisinya diatur oleh pena eksentrik N, yang berputar pada roda N. Pada posisi pena eksentrik di N_1 , maka roda D_1 yang berpusat di O_1 dipegang oleh batang pemegang pada posisi R_1 .

Jadi pada posisi batang pemegang di R_1 akan menghasilkan lemparan L yang paling jauh.

Pada posisi pena eksentrik di N_2 , yaitu pada posisi pemegang di R_2 , maka titik tengah O dari roda D ada di O_2 dan pada posisi roda di D_2 . Pada posisi roda di D_2 ini, pena G dari roda D akan menekan batang pengungkit B ke bawah, mulai dari posisi G_{O2} sampai dengan G_2 . Bila pena G meninggalkan G_2 , pengungkit B pada posisi B_{min} dan pelempar L pada posisi L_{min} , akan lepas dan kena tarikan pegas P akan memukul dan melempar batubara yang ada di piringan pengumpan C dengan lemparan yang paling dekat atau minimum, dengan langkah pukul L_{min} ke L_2 .

Sedangkan bila pena eksentrik pada kedudukan sembarang di N_3 , maka kedudukan R di R_3 , dan kedudukan O di O_3 maka batang pengungkit akan terlepas dari pena G di G_3 sehingga lemparan pelempar L di antara batas lemparan maksimum dan lemparan minimum.

Putaran roda D sebanyak 24 kali putaran pena eksentrik N, sehingga ada 12 kali posisi N_3 antara N_1 dan N_2 , yang berarti ada 12 jarak lemparan yang berbeda-beda dari pelempar L, dari batas lemparan maksimum sampai lemparan minimum.

Pengopak lempar hanya digunakan untuk ketel yang kecil-kecil, karena terbatasnya jangkauan lemparan dari pelempar, yaitu maksimal 2,8 meter, yang merupakan panjang maksimum rangka bakar, dan lebar maksimum rangka bakar adalah 1,2 meter. Penggunaan daya listrik maksimal 0,25 kW.

Keuntungan penggunaan pengopak lempar ialah bahan bakar ditaburkan dengan merata di atas bara api, sehingga pengegasan bahan bakar berlangsung dengan merata.

Kadang-kadang kedudukan piringan pengumpan beserta pengopak lemparnya ditempatkan agak tinggi di atas rangka bakar, dengan maksud untuk memperjauh jangkauan pelemparan. Selain itu, ada pula yang mengkombinasikan antara pengopak lempar dengan rangka bakar rantai atau rangka bakar berjalan (*chain grate*, *travelling grate*) dengan maksud memperbesar Beban Rangka Bakar sampai dengan 300 kg bh. bakar/m². LRB.jam.

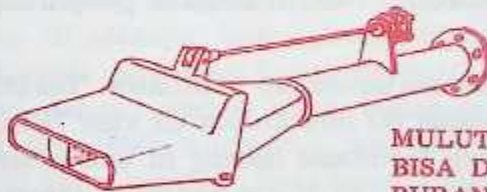
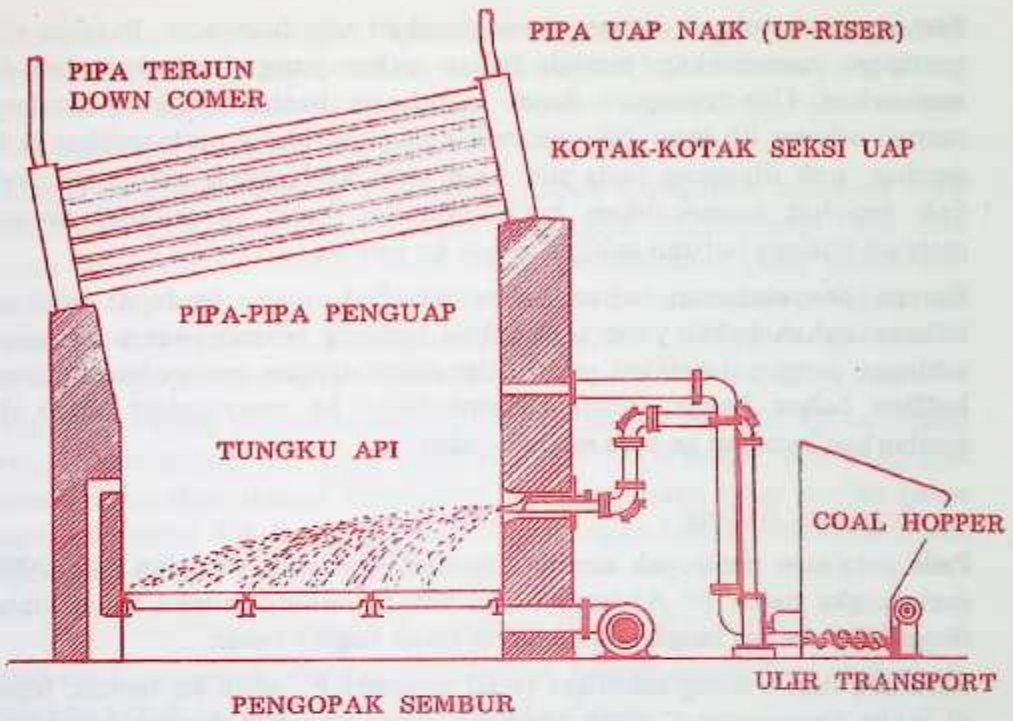
b. Pengopak Sembur Pneumatis

Pengopak sembur pneumatis digunakan untuk bahan bakar dengan butiran-butiran sampai dengan 6 mm. Bahan bakar batubara dengan butiran kurang dari 6 mm disemburkan ke atas rangka bakar dengan bantuan gas asap yang dihembuskan dengan menggunakan ventilator atau fan penghembus. Gas asap bekas ini selain berfungsi untuk menyemburkan bahan bakar di atas rangka bakar, juga untuk pengering dan menyalurkan bahan bakar ke mulut penyembur.

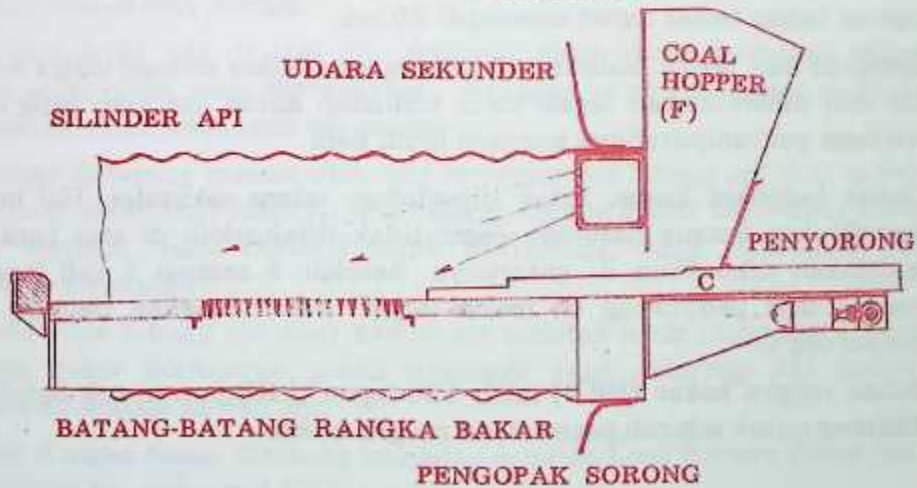
Karena panasnya gas asap, bahan bakar dikeringkan dan dipanaskan terlebih dahulu, sehingga butiran-butiran bahan bakar yang kecil-kecil, akan terbakar pada saat melayang-layang dari mulut penyembur sampai dengan permukaan rangka bakar. Jika temperatur gas asap terlalu tinggi, maka dicampur dengan udara luar.

Luas bebas rangka bakar berupa lubang-lubang dengan diameter 3 mm yang terdapat pada batang-batang rangka bakar. Lapisan bahan bakar yang menyala atau membara di atas rangka bakar tidak tebal, namun lapisan abu yang ada di atas rangka bakar yang justru tebal, kadang-kadang mencapai 25-30 mm. Abu tersebut harus sering-sering dibersihkan dengan menggunakan penggaruk, dari atas rangka bakar, sebab dapat menyumbat lubang celah-celah rangka bakar, sehingga menutup aliran udara pembakar.

Lebar semburan hanya mencapai 2 meter, namun dengan membuat beberapa penyembur di sekeliling dinding tungku, maka dapat dibuat rangka bakar yang lebih luas, Jauh semburan maksimum 3 meter, namun dengan membuat dua susun (atas dan bawah) penyembur, maka dapat dicapai jauh semburan hingga 5,50 meter, namun jarak ini terlalu jauh untuk menggaruk abunya.



MULUT PENGOPAK SEMBUR YANG BISA DIUBAH-UBAH SUDUT SEMBURANNYA



Penyaluran batubara dengan menggunakan ulir transport. Putaran ulir transport menentukan jumlah bahan bakar yang disalurkan dan disebarkan. Ulir transport dapat membawa butiran-butiran batubara sampai sebesar 35 mm. Adanya nok-nok pada ulir seperti terlihat pada gambar, nok dipasang pada ulir ke-4 atau ke-5, yang memungkinkan nok tersebut memecahkan butiran-butiran yang besar-besar sampai menjadi butiran-butiran sekitar 6 mm ke bawah.

Karena penyemburan bahan bakar tersebut, maka terdapat butiran-butiran bahan bakar yang terhembus terbang bersama-sama gas asap, sehingga dengan demikian perlu dilengkapi dengan penangkap butiran-butiran bahan bakar, untuk dikembalikan ke penyembur untuk disebarkan kembali ke atas rangka bakar.

c. Pengopak Sorong

Pada peralatan pengopak sorong, lihat gambar, ada sebagian luas (20%) dari rangka bakar (= A) terdiri dari batang-batang rangka bakar biasa, dengan luas bebas rangka bakar yang tidak begitu besar.

Batubara dari corong batubara (coal hopper) F, jatuh ke bawah, tepat di muka penyorong C yang bergerak maju-mundur dengan kecepatan 1 meter/menit. Jumlah batubara yang disorong masuk ke atas rangka bakar diatur oleh pintu sorong. Jumlah langkah penyorong per menit adalah tetap.

Udara dimasukkan dengan menggunakan ventilator. Tekanan udara di bawah rangka bakar mencapai 80 mm kolom air atau 784 Newton/m². Karena tiap kali penyorong membuat lubang di dalam api, maka terjadi pencampuran udara dan bahan bakar dengan baiknya, serta tebal lapisan bahan bakar dapat mencapai 20 cm.

Sebagian dari udara dialirkan di atas rangka bakar sebagai udara sekunder dan dihembuskan tegak lurus terhadap aliran gas asap yang naik, sehingga pencampurannya menjadi lebih baik.

Untuk batubara kurus, tidak diperlukan udara sekunder. Hal ini dimungkinkan karena batubara segar tidak ditaburkan di atas bara api, melainkan dikuakkan di antaranya. Setelah 5 sampai 7 kali langkah pendek dari penyorong C, maka terjadi sekali langkah panjang dari penyorong C.

Beban rangka bakar (BRB) ialah 120 kg/m².LRB.jam untuk batubara, dihitung untuk seluruh permukaan rangka bakar.

Batubara halus hanya dapat digunakan bila daya menggumpalnya cukup besar, sebab bila tidak demikian, maka banyak bahan bakar yang hilang terhembus. Bahan bakar yang dapat dibakar ialah bahan bakar dengan kandungan zat-zat penguapnya sekitar 14% atau lebih.

Dahulu pengopak sorong digunakan untuk mengopak batubara yang kandungan gasnya tinggi, sehingga dihasilkan pembakaran yang baik tanpa banyak menimbulkan asap. Hasil pembakaran yang paling memuaskan ialah bila digunakan bahan bakar yang mudah menggumpal dengan kandungan zat-zat penguap paling sedikit 17%, sedangkan butiran-butiran yang sesuai adalah butiran IV dan V (20-5 mm).

Pengopak sorong dibuat orang untuk kapasitas 100-1200 kg batubara/jam, dengan lorong api yang berdiameter 0,7-2,0 meter. Bila pengopak sorong digunakan dalam ketel-ketel pipa api, maka lebar rangka bakar dapat mencapai 1,4-4 meter, dan untuk rangka bakar yang lebih lebar, digunakan 2 buah penyorong paralel.

d. Pengopak Sorong dengan Pemasukan Bawah (Underfeed Stoker)

Mula-mula pengopak dengan pemasukan bawah (underfeed stoker) digunakan untuk ketel-ketel dengan tungku dalam.

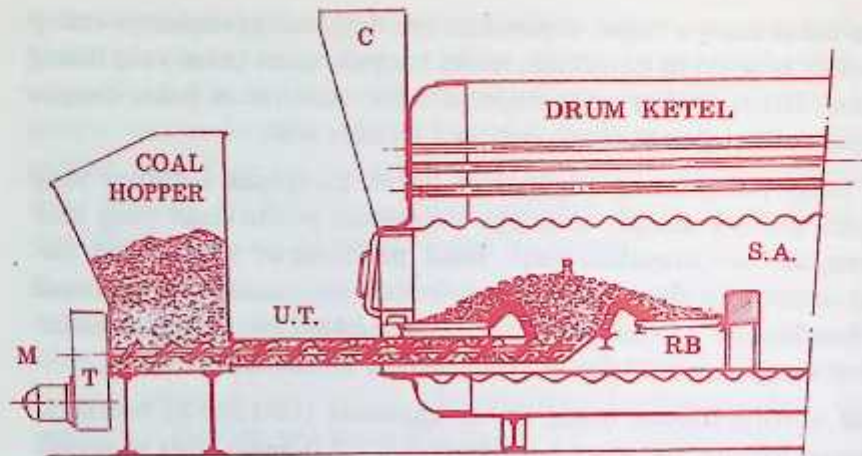
Ciri-ciri dari pengopak ini ialah bahan bakar segar dimasukkan dari bawah rangka bakar, di bawah bara api. Karena panasnya lapisan bara api yang ada di atasnya, bahan bakar dipanasi terlebih dahulu dan **mengegas**. Gas-gas dan udara harus melewati lapisan bara api, sehingga pencampuran dengan bahan bakar batubara menjadi lebih baik, dan pembakaran bisa lebih sempurna, dan menghasilkan bunga api pembakaran yang lebih pendek, serta membutuhkan udara sekunder yang ditekan masuk dari bawah.

Abu dan terak ada di atas api, sehingga tidak akan menutupi bahan bakar segar yang baru dimasukkan, sehingga pancaran panas yang diterimanya tidak terganggu karenanya.

Batubara didorong masuk oleh ulir transport ke lubang api atau kawah api, yang dikelilingi oleh batang-batang rangka bakar berbentuk blok-blok vertikal, yang berusuk-rusuk horizontal, yang memungkinkan udara melewatinya.

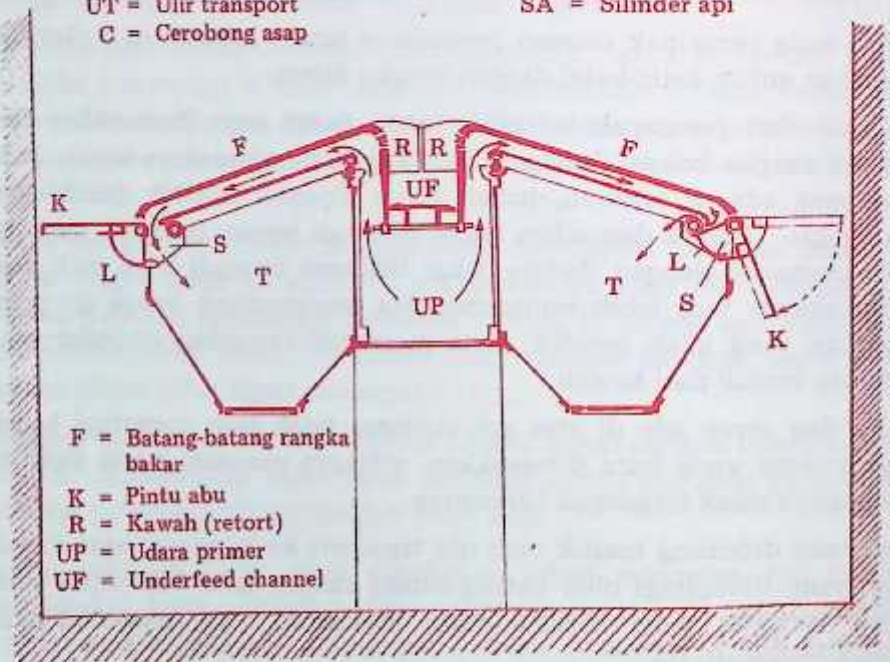
Karena bibir lubang api atau kawah api terletak lebih tinggi dari bidang rangka bakar sekitarnya, maka batubara akan membagi diri dengan merata ke sekitar kawah api.

Beban Rangka Bakar dihitung terhadap seluruh Luas Rangka Bakar adalah 100 kg bh. bakar/m².LRB per jam.



PENGOPAKAN DENGAN SEKRUP TRANSPORT (TRANSPORTING SCREW UNDERFEED STOKER)

- | | |
|------------------------------|--------------------|
| M = Motor penggerak | R = Kawah (retort) |
| T = Roda-roda gigi transmisi | RB = Rangka bakar |
| UT = Ulir transport | SA = Silinder api |
| C = Cerobong asap | |



- | |
|--------------------------------|
| F = Batang-batang rangka bakar |
| K = Pintu abu |
| R = Kawah (retort) |
| UP = Udara primer |
| UF = Underfeed channel |

PENGOPAKAN DARI BAWAH (TAYLOR UNDERFEED STOKER)

Terdapat pula ventilator untuk angin kawah. Prosentase CO₂ dapat mencapai angka yang tinggi sekitar 15-17%.

Mesin penggerak ulir mempunyai tiga tingkat kecepatan, sehingga pengopak dapat bekerja pada kapasitas 1/3 - 2/3 - 3/3. Selain itu, motor penggerak juga dapat dihentikan dan dijalankan secara otomatis, yang dikontrol oleh tekanan uap di dalam ketel.

Bila tekanan ketel melebihi dari yang ditentukan, motor penggerak akan berhenti dengan sendirinya, dan bila tekanan di dalam ketel mulai turun di bawah tekanan tertentu, motor penggerak akan jalan dengan sendirinya, yang dengan demikian menjaga tekanan ketel menjadi konstan. Untuk ketel-ketel yang hanya diambil manfaat panasnya uap saja, maka pengaturan otomatis dilakukan oleh thermostat untuk menjaga temperatur uap agar tetap konstan.

Umumnya pengopak dengan pemasukan dari bawah atau underfeed stoker, cocok untuk pemakaian batubara dengan butiran nomor IV dan V (20-5 mm), dengan jenis batubara yang mudah menggumpal serta dengan 14% atau lebih kandungan gas-gas penguap (volatile matter).

Untuk batubara yang sangat mudah menggumpal, maka kokas yang terbentuk harus selalu dipukul-pukul supaya pecah, yang dengan demikian pengopak menjadi tidak otomatis lagi.

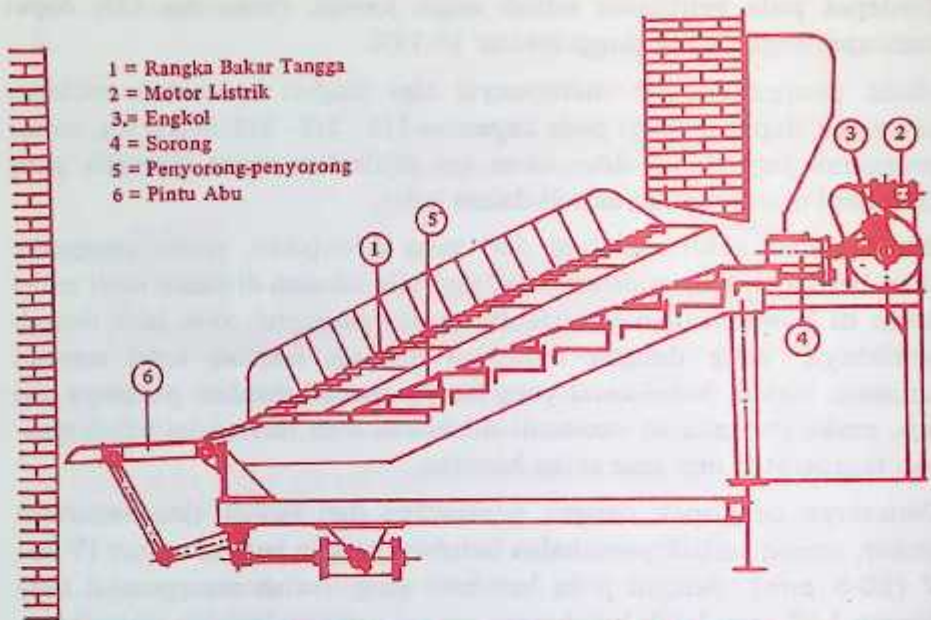
Pada underfeed stoker, batubara disorong dari bawah dengan penyorong E, lihat gambar. Jumlah langkah sorong untuk setiap 3 menit sampai 15 langkah sorong/menit. Tipe rangka bakar macam ini Luas Rangka Bakarnya sekitar 3-9 m².

Udara pembakar dimasukkan oleh ventilator ke ruang Q, yang akan mengalir sebagian melewati lubang-lubang R pada kawah lubang api. Klep K berfungsi untuk membuang abu dan terak.

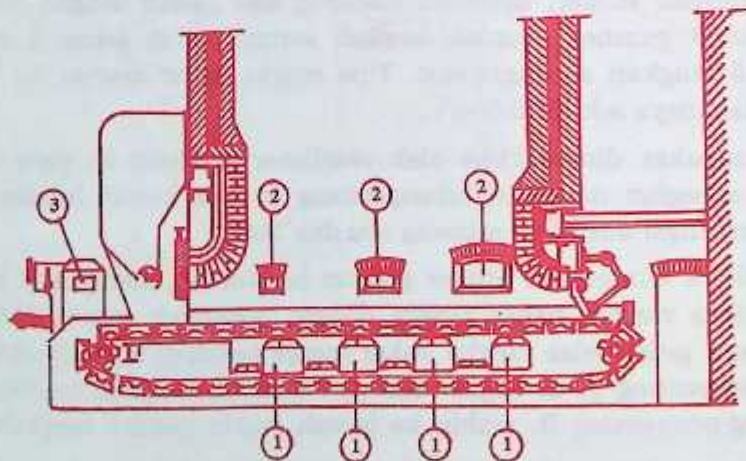
Pada Taylor's Underfeed Stoker gambar berikutnya, merupakan kombinasi antara rangka bakar tangga dengan pengopak sorong. Antara setiap susun pelat-pelat rangka bakar tangga terdapat selokan-selokan, dengan penyorong A di bagian atas dari selokan. Langkah sorong dan penyorong-penyorong B, makin ke bawah makin pendek langkahnya.

Batubara yang turun dari corong batubara (coal hopper) I, akan didorong masuk selokan oleh penyorong A, dan terus menyembul sampai melimpah dari selokan ke batang-batang rangka bakar tangga.

Tebal lapisan batubara dengan Taylor's Underfeed Stoker ini dapat mencapai 400-700 mm, sehingga dari bawah rangka bakar harus dihembuskan angin bawah yang bertekanan sampai 200 kolom air atau



RANGKA BAKAR TANGGA DENGAN PENGOPAKAN SORONG



RANGKA BAKAR RANTAI (CHAIN GRATE)

1960 Newton/m². Selain itu, harus dihembuskan pula udara sekunder di atas rangka bakar.

Rangka bakar macam ini, dapat mencapai Luas Rangka Bakar hingga 80 m², dengan Beban Rangka Bakar sebesar 300-350 kg bh. bakar/m². LRB.jam.

Karena jumlah bahan bakar yang terdapat di atas rangka bakar demikian banyak, yaitu karena tebalnya lapisan bahan bakar, maka bila untuk sementara tidak dimasukkan batubara ke dalamnya, misalnya untuk pemeriksaan sementara peralatan penyorong, maka rangka bakar masih dapat menghasilkan pembakaran bahan bakar dengan api yang cukup besar, tanpa menjadi padam atau berkurang apinya.

Sekalipun demikian, harus dijaga agar bara api tidak mencapai dasar rangka bakar tangga.

Taylor's Underfeed Stoker ini sangat cocok untuk batubara yang mudah menggumpal. Untuk batubara yang sedikit kandungan gas-gasnya, yang sukar untuk dinyalakan, penggunaan underfeed stoker kurang memuaskan.

Dengan batubara yang kandungan gas-gas penguapnya lebih dari 14% dan kandungan abu maksimum 20% serta kadar air 10-15%, dapat dibakar di atas underfeed stoker dengan memuaskan. Titik cair abu tidak boleh terlalu rendah, karena dapat menyebabkan tersumbatnya aliran udara disebabkan abu cair tersebut.

e. Rangka Bakar Rantai (Chain Grate, Travelling Grate)

Rangka bakar ini, lihat gambar, berfungsi sebagai ban berjalan untuk memasukkan bahan bakar ke dalam tungku, yang dalam hal ini adalah tungku bawah.

Bahan bakar yang biasanya batubara, turun ke bawah dari corong batubara (coal hopper) yang diterima oleh rangka bakar rantai di bagian depan dan terus dibawa masuk perlahan-lahan ke dalam tungku.

Tebal lapisan batubara diatur oleh pintu sorong yang ada di mulut tungku bawah. Namun banyaknya bahan bakar yang dibakar per m². LRB.jam ditentukan oleh kecepatan gerak rangka bakar rantai tersebut dan dari banyaknya udara pembakar yang disalurkan baik melewati celah-celah rangka bakar tersebut sebagai udara primer, maupun dari sebelah atas rangka bakar sebagai udara sekunder.

Dengan demikian tebal lapisan batubara adalah tetap, dan hanya diubah bila jenis batubara yang digunakan diganti. Sehingga pintu sorong

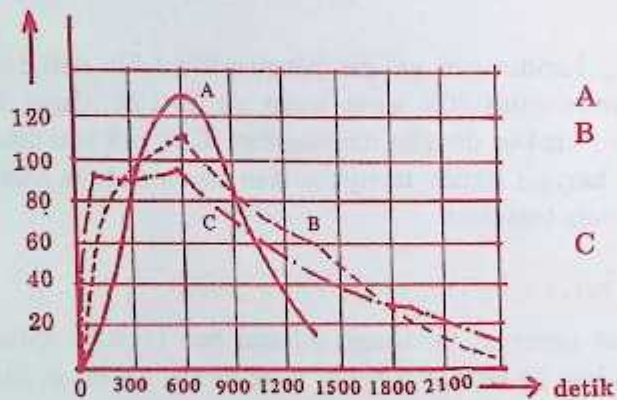
tersebut hanya distel bila batubara yang digunakan diganti dengan batubara jenis lainnya, serta bila besarnya butiran-butiran berbeda.

Pengeringan (destilasi) dan pemanasan awal, pengegasan dan pembakaran bahan bakar, serta pembentukan abu dan terak, akan berlangsung di bagian-bagian yang berurutan dari rangka bakar, dari depan ke belakang.

Pada ujung akhir dari rangka bakar, abu dan terak, jatuh ke sumuran abu, sehingga batang-batang rangka bakar menjadi bersih dan bebas dari abu dan terak, sehingga setelah kembali lagi ke depan, maka batang-batang rangka bakar tersebut langsung bersinggungan dengan batubara segar yang baru saja turun dari corong batubara.

Pada Gambar Grafik yang menyatakan hubungan antara jumlah udara yang dibutuhkan dengan waktu pembakaran (yang berarti sama dengan jarak tempuh rangka bakar dihitung dari mulut pintu sorong); untuk berbagai jenis bahan bakar, yaitu:

(nl/detik)



- A = Antrasit,
- B = Cooking coal atau admiralty coal atau steam coal,
- C = Gas coal.

Pada bagian depan dari rangka bakar, hanya sedikit dibutuhkan udara, karena bahan bakar hanya membutuhkan panas pancaran dari api di dalam tungku untuk destilasinya, sehingga bila udara pembakaran telah dipanaskan terlebih dahulu, akan membantu proses destilasi tersebut.

Batubara yang mengandung banyak gas akan lebih cepat mengegas dibandingkan dengan batubara kurus. Dengan demikian untuk pembakaran yang segera dari batubara gemuk, diperlukan lebih banyak udara pada awal perjalanan, dibandingkan dengan batubara kurus.

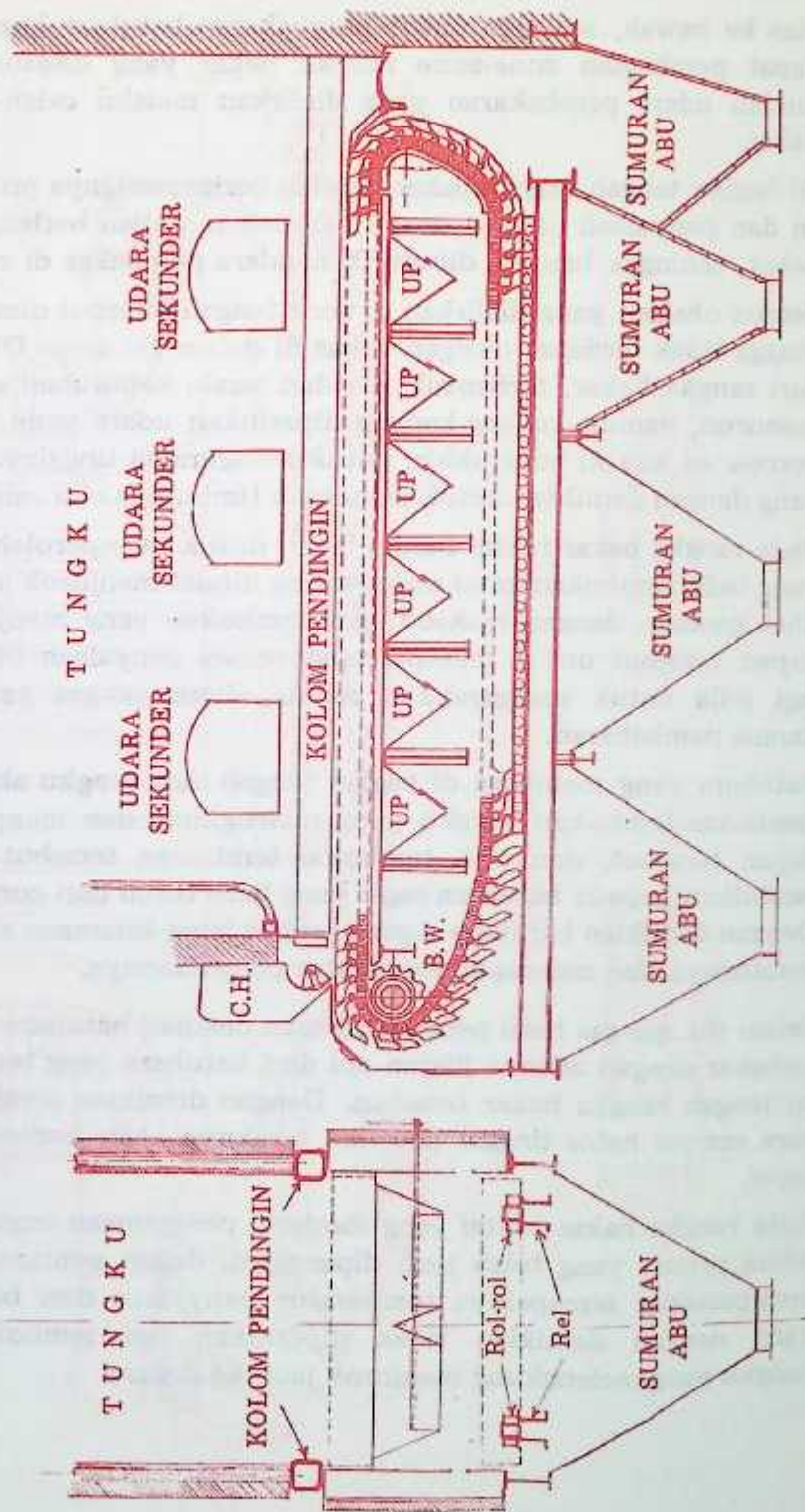
Untuk batubara kurus, aliran udara melalui celah-celah rangka bakar pada awal perjalanan justru akan menghambat penyalaan batubara dari

RANGKA BAKAR RANTAI (CHAIN GRATE)

C.H. = Coal Hopper

B.W. = Bull Wheel

U.P. = Kotak Udara Primer



atas ke bawah, sehingga untuk pembakaran batubara kurus, harus terdapat pembagian zone-zone rangka bakar yang disesuaikan dengan jumlah udara pembakaran yang dialirkan melalui celah-celah rangka bakar.

Di bagian tengah rangka bakar, setelah berlangsungnya proses pengegasan dan penyalaan (ignite), maka pembakaran akan berlangsung dengan hebat, sehingga banyak dibutuhkan udara pembakar di zone tersebut.

Semua oksigen yang dialirkan di zone tengah tersebut dimanfaatkan sehingga tidak terdapat oksigen bebas di dalam gas asap. Di bagian akhir dari rangka bakar, terbentuk abu dan terak, kebutuhan udaranya juga menurun, namun kadang-kadang diperlukan udara yang lebih banyak (excess of air) di zone akhir, untuk mengurangi tingginya temperatur, yang dengan demikian untuk mencegah timbulnya abu cair.

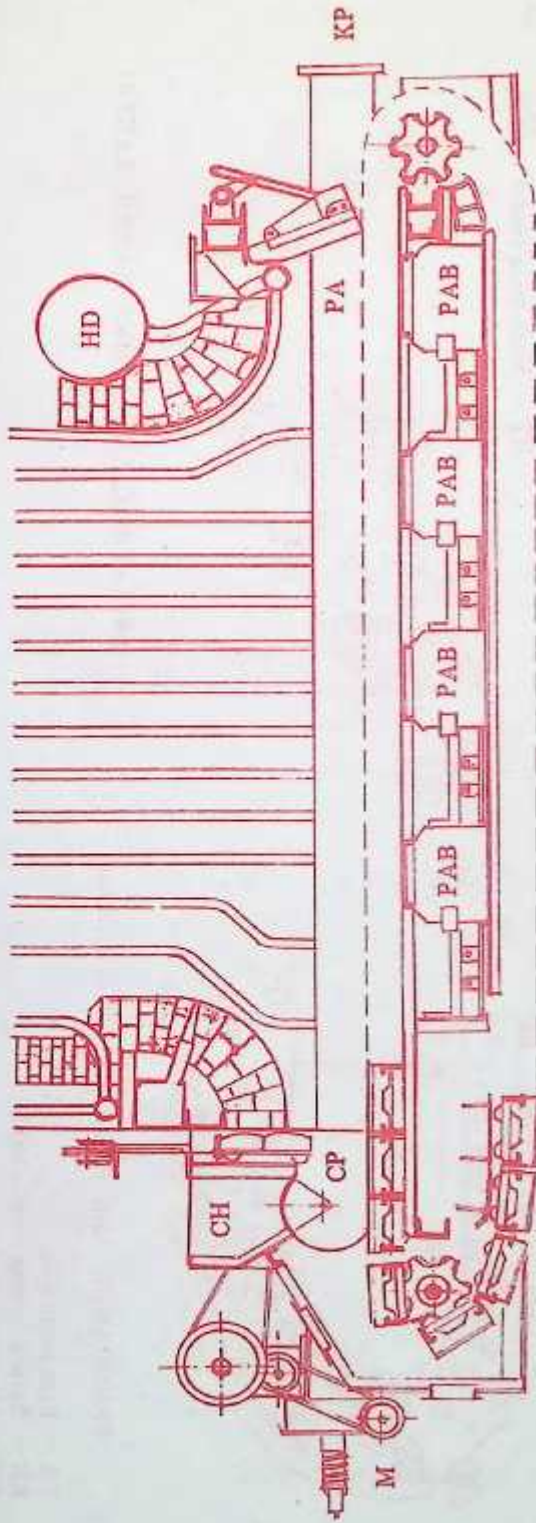
Pada rangka bakar rantai model lama, untuk memperoleh pembakaran yang baik, tembokan ketel sering-sering dibuat menjorok jauh ke depan, lihat gambar, dengan maksud agar tembokan yang menjorok jauh ke depan tersebut untuk mempercepat proses penyalaan batubara segar, lagi pula untuk mengarahkan semua aliran gas-gas yang terbentuk karena pembakaran.

Batubara yang membara di bagian tengah dari tungku akan menyinari tembokan-tembokan tungku yang melengkung dan menjorok jauh ke depan tersebut, dan oleh tembokan-tembokan tersebut sinar api dipantulkan kepada batubara segar yang baru turun dari corong batubara. Dengan demikian batubara segar tersebut lama-kelamaan akan naik temperaturnya, dan mencapai temperatur penyalanya.

Selain itu, gas-gas hasil penguapan atau destilasi batubara tersebut akan terbakar dengan adanya jilatan api dari batubara yang terbakar di bagian tengah rangka bakar tersebut. Dengan demikian pembakaran batubara sampai habis tinggal abu dan teraknya akan berlangsung dengan cepat.

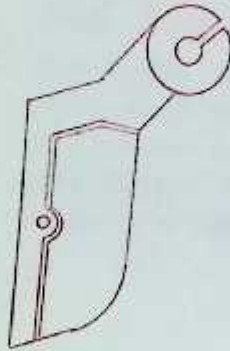
Pada rangka bakar rantai yang modern, penggunaan angin bawah atau udara primer yang telah jauh dipanasi di dalam pemanas udara, akan mempercepat tercapainya temperatur penyalaan dari batubara segar, yang dengan demikian tidak diperlukan lagi tembokan-tembokan tungku yang melengkung menjorok jauh ke depan.

PP



RANGKA BAKAR RANTAI

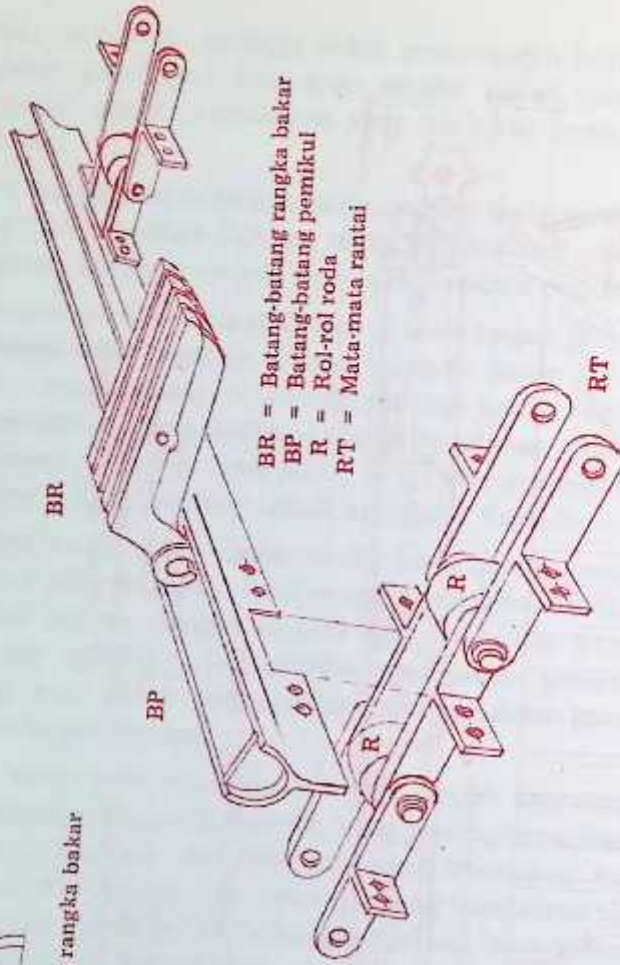
- PP = Pipa-pipa penguap
- HD = Header air bawah
- CP = Cakra penutup bahan bakar
- CH = Coal hopper
- PA = Penggaruk abu
- KP = Kolom pendingin
- PAB = Pintu angin bawah
- M = Motor listrik penggerak



Batang rangka bukar

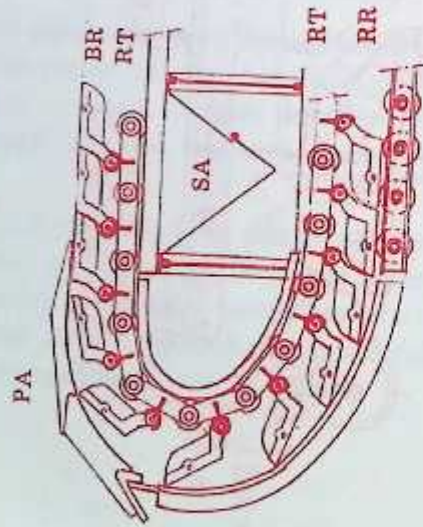


Batang rangka bakar



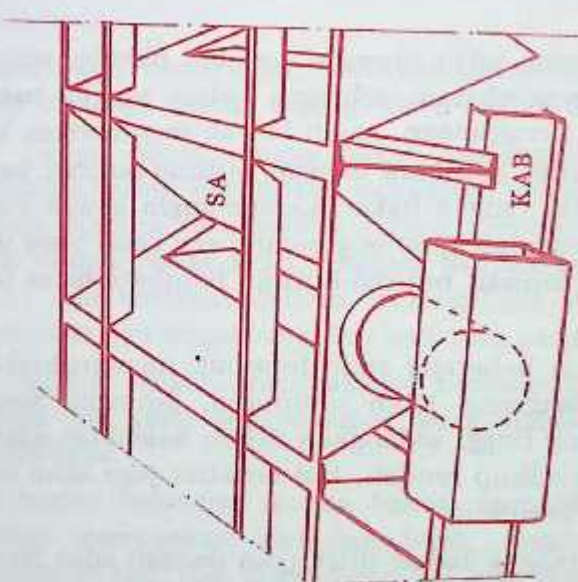
BR = Batang-batang rangka bakar
 BP = Batang-batang pemikul
 R = Rol-rol roda
 RT = Mata-mata rantai

BAGIAN-BAGIAN RANGKA BAKAR RANTAI



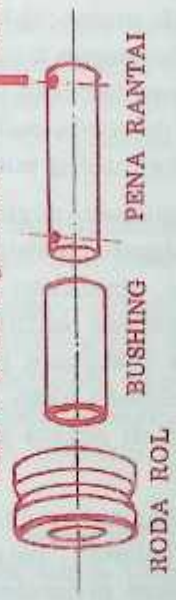
PENGARUK ABU PADA RANGKA BAKAR

PA = Pengaruh abu
 BR = Batang-batang rangka bakar
 RT = Mata-mata rantai
 SA = Sumuran abu
 RR = Rol-rol pemikul

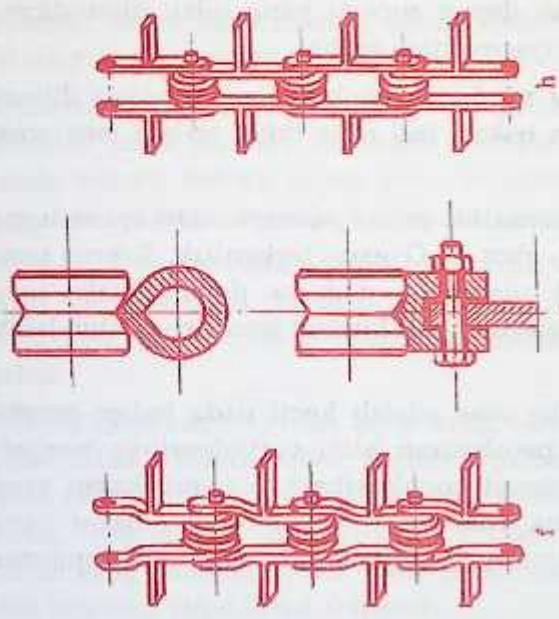


SUMURAN ABU DAN
KOTAK ANGIN BAWAH

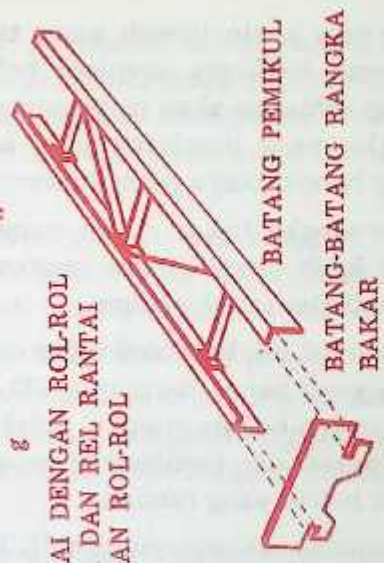
SA = Sumuran abu
KAB = Kotak angin bawah



BAGIAN-BAGIAN DARI ROL RODA



RANTAI DENGAN ROL-ROL
RODA DAN REL RANTAI
DENGAN ROL-ROL



BATANG PEMIKUL
BATANG-BATANG RANGKA
BAKAR
BATANG PEMIKUL DAN BATANG-BATANG
RANGKA BAKAR

Lagi pula angin bawah yang telah panas tersebut menyebabkan pembakaran batubara menjadi hebat, sehingga temperatur api demikian tinggi sehingga akan mempercepat kerusakan pada tembokan-tembokan tungku yang menjorok jauh ke depan seperti yang telah disebutkan, yang berarti biaya pemeliharannya menjadi mahal.

Pada rangka bakar rantai yang modern, lengkungan tembokan dibuat agak lebih tinggi di atas rangka bakar, lagi pula tidak terlalu menjorok jauh di atas rangka bakar.

Dalam hal ini, batubara segar menerima panas pancaran dari api atau gas asap yang panas, terutama CO_2 dan H_2O yang terbentuk. Karena tembokan-tembokan tungku tidak menjorok jauh ke depan, maka pencampuran atau pembauran gas-gas menjadi kurang sempurna, lebih-lebih pada beban yang rendah.

Kecepatan gas-gas yang naik ke atas adalah kecil pada beban rangka bakar yang rendah, sehingga pembauran atau turbulensinya menjadi berkurang, dengan demikian dapat mengakibatkan pembakaran yang kurang sempurna. Oleh karena itu, pada beban rangka bakar yang rendah, kemungkinan berlangsungnya pembakaran yang tidak sempurna menjadi lebih besar.

Untuk memecahkan masalah tersebut, maka rangka bakar dibagi menjadi beberapa zone, sedemikian sehingga aliran angin bawah yang telah dipanasi terlebih dahulu dialirkan ke masing-masing zone dengan jumlah yang berbeda-beda, disesuaikan dengan kebutuhan angin bawah untuk masing-masing zone.

Penggunaan angin bawah yang telah dipanasi terlebih dahulu, sangat membantu mempercepat pembakaran, sehingga beban rangka bakar dapat dinaikkan. Lagi pula penggunaan angin bawah memberikan kemungkinan untuk pembakaran batubara dengan butiran-butiran yang halus (batubara pasir) di atas rangka bakar, karena angin bawah yang bertekanan akan mampu mengatasi geseran-geseran yang besar yang terdapat di antara celah-celah lapisan butiran-butiran batubara halus tersebut.

Pembagian rangka bakar atas beberapa zone tersebut, memungkinkan pembakaran batubara berlangsung lebih sempurna, sehingga menghasilkan prosentase CO_2 yang tinggi sedangkan faktor kelebihan udaranya (excess air coefficient) cukup rendah. Hal tersebut juga akan mengurangi jumlah kerugian di cerobong.

Pembagian zone-zone dari rangka bakar dilakukan dengan jalan membagi-bagi bagian bawah dari rangka bakar menjadi beberapa kotak

udara. Tiap-tiap kotak udara tersebut mendapat aliran udara dari sebuah saluran udara, dan pemasukannya ke masing-masing kotak udara tersebut diatur oleh klep-klep atau tingkap-tingkap sedemikian sehingga tekanan udara pada masing-masing kotak udara tersebut semua konstan di seluruh zone rangka bakar.

Tekanan tersebut ditentukan oleh jumlah udara yang mengalir dan tahanan pada lapisan batubara. Tekanan udara yang besar bukannya selalu berarti bahwa udara yang mengalir adalah banyak, tetapi dapat juga karena tahanan pada lapisan batubara demikian besar.

Jumlah zone bervariasi antara 5 sampai 8 buah. Makin banyak jumlah zone pada sebuah rangka bakar makin baik pengaturan pembagian udaranya, yang dengan demikian makin baik sifat rangka bakar tersebut.

Namun demikian, jumlah zone yang banyak berarti mengurangi jumlah Luas Bebas Rangka-bakar, karena sekatan-sekatan antara masing-masing zone dalam arah melintang, berarti menutupi celah-celah bebas rangka bakar. Pembagian zone sampai 8 buah hanya terdapat pada rangka bakar yang panjang sekali, yang panjangnya 7 meter atau lebih. Panjang dari tiap-tiap zone 0,8-1,0 meter.

Sekalipun diusahakan dengan pembagian atas beberapa zone tersebut, jumlah udara yang lewat untuk masing-masing zone dapat diatur sesuai dengan kebutuhannya, namun sudah tentu susunan gas-gas hasil pembakaran di atas rangka bakar, untuk masing-masing zone sangat berbeda-beda.

Seperti telah diutarakan, bahwa untuk seluruh panjang rangka bakar terbagi atas tiga daerah utama, yaitu bagian depan, tengah dan belakang.

Di bagian depan rangka bakar, berlangsung pengeringan pengegasan (destilasi) serta permulaan penyalaan, yang hanya sedikit dibutuhkan udara. Karena baru sedikit terjadi pembakaran dan destilasi, maka di atas rangka bakar akan terdapat banyak kelebihan udara, kira-kira 5% CO₂, dan terdapat banyak pula gas-gas yang mudah terbakar, yang komposisinya tergantung dari batubara yang dibakar.

Di bagian tengah, pembakaran berlangsung dengan hebatnya, maka semua zat asam atau oksigen yang dialirkan bersama udara terpakai seluruhnya.

Di bagian belakang rangka bakar, pembakaran akhir berlangsung sehingga menyisakan abu dan terak, pembakaran berlangsung sangat lamban di sini, dan temperatur api juga rendah, sehingga di atas rangka bakar terdapat lagi jumlah udara yang berlebihan.

Dengan demikian di atas rangka bakar terdapat komposisi gas-gas yang berbeda-beda, yang mengalir ke atas, sehingga perlu dicampur-adukkan (mixing) dengan sebaik-baiknya.

Lagi pula ternyata bahwa pancaran bunga api yang terjadi karena butiran-butiran Karbon C yang menyala, cukup mampu untuk menyalakan batubara segar, maka sering kali pancaran bunga api tersebut dikombinasikan dengan pemantulan lengkungan tembokan tungku yang menjorok ke depan, untuk memperbesar kemampuan penyalaan batubara segar.

Lengkungan tembokan tungku yang menjorok ke depan tersebut, tidak perlu mempunyai temperatur yang tinggi, karena itu tembokan-tembokan tersebut dapat ditahan oleh pipa-pipa yang di dalamnya mengalir air ketel yang perlu dipanasi atau diuapkan. Sehingga dengan demikian sekaligus dapat membantu mendinginkan tembokan-tembokan yang menjorok tersebut agar tidak cepat rusak. Di lain pihak pipa-pipa air tersebut dapat merupakan bagian ketel yang berfungsi untuk menguapkan air, yang sering disebut sebagai pipa-pipa penguap tungku (Furnace evaporator's pipes).

Di dalam Gambar, dapat dilihat tembokan-tembokan tungku yang melengkung dan menjorok jauh ke depan, di atas rangka bakar, untuk pembakaran batubara antrasit (*anthrasite*).

Dalam hal ini dimaksudkan pula, agar pencampuran gas-gas (gas mixing) agak dialihkan ke depan, agar pancaran api lebih banyak mengenai batubara segar. Di samping itu, pancaran api kepada abu dan terak menjadi berkurang, sehingga mengurangi kesulitan-kesulitan karena terbentuknya abu cair.

Reaksi-reaksi pembakaran pada bunga api harus sudah berakhir sebelum memasuki daerah konveksi di dalam ketel uap.

Dengan demikian tungku dibuat tinggi. Kebanyakan ketel tinggi tungkunya sekitar 6-8 meter, sedangkan tinggi minimum tungku 3 meter.

Tungku yang tinggi, memberikan keuntungan yaitu butiran-butiran bahan bakar akan habis terbakar sebelum mencapai dinding pipa di bagian konveksi, yang karena pipa-pipa di bagian konveksi yang lebih dingin tersebut dapat mematikan butiran-butiran bahan bakar yang menyala.

Selain itu, dinding pipa-pipa di bagian konveksi yang agak dingin tersebut menyebabkan abu yang terbang bersama gas asap akan didingin-

kan hingga mencapai temperatur yang lebih rendah dari temperatur pelunakan abu, sehingga abu tersebut tidak melekat atau menempel pada pipa-pipa yang dapat menimbulkan penyumbatan (*bird nest forming*) pada celah-celah pipa.

Sekalipun tungku yang tinggi berarti memberikan kesempatan waktu yang cukup agar gas-gas tersebut saling mencampur, namun hal tersebut sebenarnya masih kurang waktunya, mengingat bahwa temperatur api atau gas asap yang tinggi menyebabkan viskositas gas menjadi demikian besar, sehingga sukar untuk saling mencampur.

Sebagai contoh dapat dikemukakan, bahwa viskositas gas asap pada 700°C lebih besar daripada viskositas kinematis minyak pelumas mesin pada temperatur 40°C .

Oleh karena itu pencampuran gas-gas dilakukan di bagian bawah tungku, sedikit di atas rangka bakar, aliran udara sekunder dihembuskan ke dalam tungku dari samping-menyinggung, tegak-lurus dengan aliran naik ke atas dari api.

Agar arus udara sekunder dapat mencapai inti api yang demikian kenyal, maka kecepatan arus udara masuk harus demikian tinggi, sehingga memerlukan ventilator-ventilator yang mampu menghasilkan tekanan yang tinggi, jauh melebihi tekanan angin bawah, yaitu sekitar 250 mm kolom air atau $0,0246\text{ kg/cm}^2$ melebihi tekanan udara di luar.

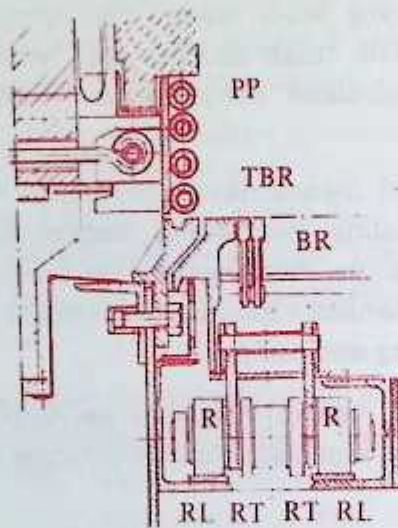
Kebutuhan udara sekunder sekitar 10% — 12% dari seluruh kebutuhan udara, sehingga udara primer sekitar 88% — 90% dari keseluruhannya.

Pada akhir perjalanan rangka bakar rantai, terdapat penggaruk abu (*as scraper*), Lihat Gambar.

Tebal batubara yang terbakar di atas rangka bakar, makin lama makin menipis. Bila lapisan batubara di atas awal rangka bakar terlalu tipis, maka memungkinkan padamnya api dengan sendirinya, karena panas yang terbentuk kurang mencukupi untuk menjaga temperatur bidang pancar rangka bakar tetap tinggi.

Lapisan bahan bakar pada akhir perjalanan makin banyak mengandung abu, sehingga nilai pembakarannya (*heating value*) makin menurun, sehingga api mudah padam di tempat tersebut. Dengan demikian bila di tempat tersebut tidak dibantu dengan pemanasan, maka pembakarannya pun akan berlangsung dengan kurang memuaskan, sehingga api akan padam, dan banyak bahan bakar yang akan terbang bersama abu di sumuran abu.

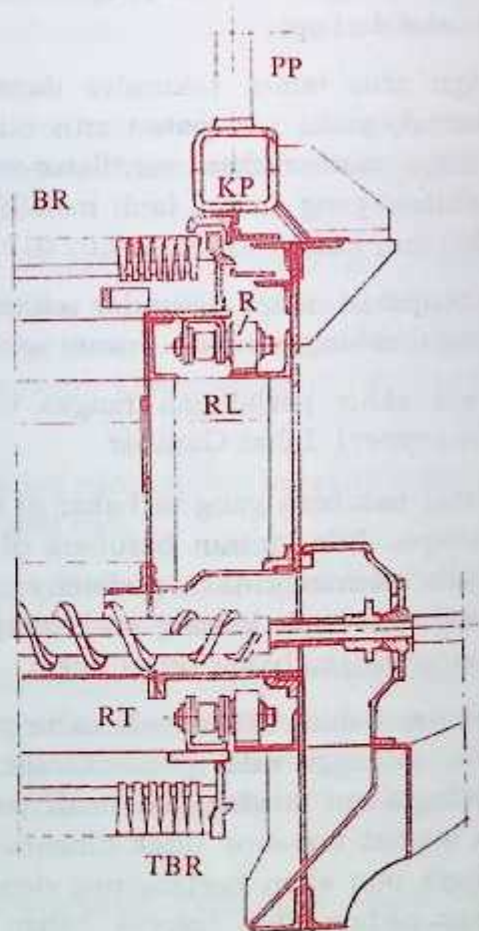
**PERAPATAN TEPIAN
RANGKA BAKAR**

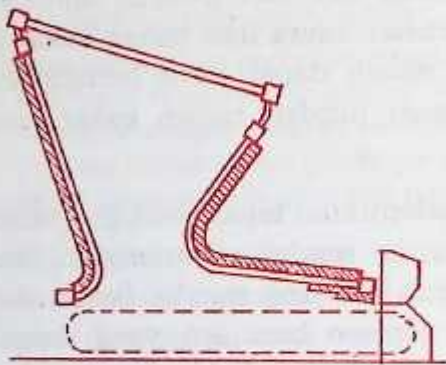


- PP = Pipa-pipa penguap
- TBR = Tepian Rangka Bakar
- BR = Batang-batang Rangka Bakar
- R = Roll-roll roda
- RL = Rel
- RT = Mata-mata rantai

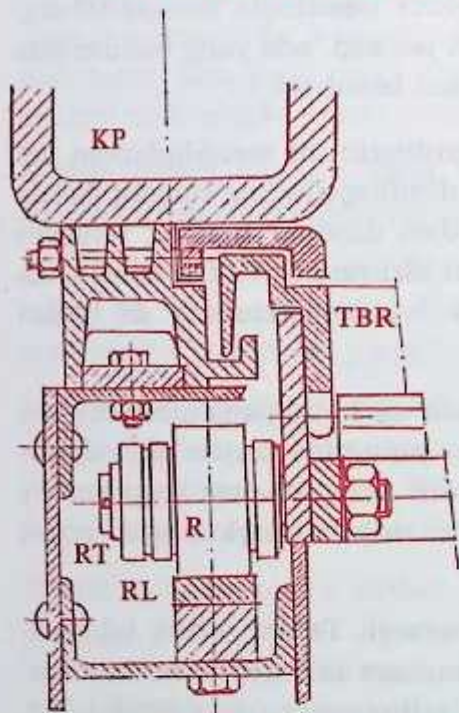
**PERAPATAN TEPIAN
RANGA BAKAR**

- PP = Pipa-pipa Penguap
- KP = Kolom Pendingin
- BR = Batang-batang rangka bakar
- R = Roll-roll roda
- RL = Rel
- UL = Ulir penggaruk abu
- RT = Mata-mata rantai
- TBR = Tepian batang-batang rangka bakar



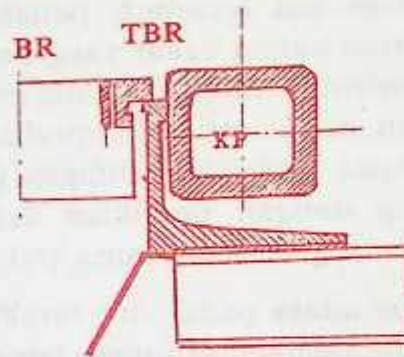


**TUNGU DENGAN TEMBOKAN
MENJOROK KE DALAM**



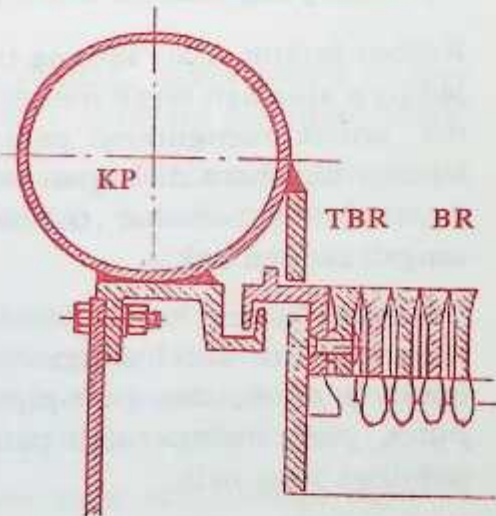
TEPIAN RANGKA BAKAR

- KP = Kolom Pendingin
- TBR = Tepian batang-batang rangka bakar
- BR = Batang-batang rangka bakar
- R = Roda roll
- RL = Rel
- RT = Mata-mata rantai



TEPIAN RANGKA BAKAR

- BR = Batang-batang rangka bakar
- TBR = Tepian batang-batang rangka bakar
- KP = Kolom Pendingin



TEPIAN RANGKA BAKAR

- KP = Kolom Pendingin
- TBR = Tepian batang-batang rangka bakar
- BR = Batang-batang rangka bakar

Dalam hal tersebut, penahan abu (*ash scraper*) akan berfungsi agar lapisan bahan bakar yang bercampur abu menjadi makin tebal di tempat tersebut, sehingga lubang celah-celah makin tertutup. Dengan demikian akan membantu memperbaiki pencampuran udara dan bahan bakar di tempat tersebut, sehingga pembakaran masih dapat terus berlangsung yang dengan demikian dapat mengurangi jumlah bahan bakar yang terbang bersama-sama abu.

Arus udara pada zone terakhir, diatur sedemikian tepat, sehingga bahan bakar yang terbang bersama abu dapat seminimal mungkin, dan sedapat mungkin diusahakan agar seluruh panjang rangka bakar, dari permulaan hingga akhir, tertutup oleh lapisan bara api, yang dengan demikian beban rata-rata rangka bakar makin bertambah.

Pada dasar dinding tungku, di samping kiri dan kanan rangka bakar, ke arah memanjangnya, terdapat kolom-kolom pendingin berupa tabung-tabung air, ada yang irisannya berbentuk persegi, ada yang bundar atau silindris, yang terletak sedikit di atas lapisan batubara.

Kolom-kolom atau tabung-tabung air pendingin ini menghindarkan terjadinya abu dan terak menggumpal pada dinding-dinding tungku. Selain itu, untuk mengurangi pancaran panas dari dinding tungku, sehingga lapisan batubara di bagian tepi kanan dan kiri rangka bakar, tidak lebih cepat habis terbakar dibanding dengan lapisan batubara di bagian tengah rangka bakar.

Di dalam lubang kolom pendingin, mengalir air ketel yang dihubungkan dengan drum ketel dengan menggunakan pipa-pipa terjun atau *down-comer's pipes*, dan pipa-pipa penguap naik atau *up-riser evaporator's pipes*, yang memperoleh panas dari api di dalam tungku, agar terjadi sirkulasi yang baik.

Dahulu kolom-kolom pendingin dibuat persegi. Tetapi untuk tekanan-tekanan tinggi di dalam ketel, bentuk semacam ini membawa kesukaran, karena untuk kolom yang persegi dindingnya perlu dibuat tebal, sehingga akan terdapat perbedaan temperatur yang menyolok antara permukaan dinding sebelah dalam dan luar, sehingga mudah menimbulkan kebocoran dan pecahnya kolom pendingin.

Untuk ketel-ketel tekanan tinggi, dengan demikian kolom-kolom pendingin dibuat berbentuk silindris.

Lihat Gambar.

Pada ketel La Mont, kolom-kolom pendingin digantikan oleh pipa-pipa air pendingin seperti terlihat pada Gambar.

Dengan usaha-usaha perbaikan tungku seperti yang telah disebutkan, yaitu:

- pembagian rangka bakar menjadi beberapa zone;
- dilengkapi dengan penahan abu (*Ash Scraper*);
- dipasang kolom-kolom pendingin sepanjang dasar tungku;
- dibuat lengkungan-lengkungan tembokan tungku.

maka praktis semua jenis batubara termasuk remukan kokas dan batubara kurus yang halus yang sukar dinyalakan, dan antrasit (*Anthracite*), dapat dibakar di atas rangka bakar ini dengan memuaskan, kecuali kokas dengan butiran-butiran yang agak besar, karena bidang permukaan yang bersinggungan dengan udara kurang begitu luas.

Demikian pula bahan bakar dengan kandungan abu yang tinggi, tidak akan menimbulkan kesulitan-kesulitan pada rangka bakar ini. Lapisan tipis terak abu yang cair, tidak pula mengganggu, seperti halnya yang dialami oleh rangka bakar jenis lainnya.

Namun dalam hal abu yang titik cairnya rendah, maka udara primer jangan terlalu tinggi temperatur pemanasannya di dalam pemanas udara.

Dalam hal batubara yang daya menggumpalnya luar biasa, maka rangka bakar ini baru mengalami kesukaran-kesukaran, karena batubara akan membentuk gumpalan yang besar-besar.

Untuk mengatasinya, diusahakan agar batubara jenis ini, dicampur dengan batubara yang tidak menggumpal, namun harus dijaga agar pencampurannya merata. Sebab bila tidak, maka lapisan bara api menjadi tidak sama tebalnya untuk seluruh permukaan rangka bakar.

Dalam hal ini, maka kedua jenis batubara yang sama sekali berbeda sifatnya yang akan dicampur, pencampurannya dilakukan dengan sistem *sandwich*, yaitu masing-masing jenis batubara yang berbeda sifatnya ditebarkan dalam dua lapisan dengan tebal tertentu. Lapisan batubara jenis yang satu dihamparkan di atas lapisan batubara jenis lainnya.

Lapisan jenis batubara yang lebih mudah terbakar dihamparkan di atas jenis batubara yang sukar terbakar. Dengan demikian lapisan butiran kokas ada di bawah lapisan batubara gemuk (*gas coal*) untuk mempermudah penyalaannya. Dengan demikian, maka konstruksi rangka bakar rantai untuk pembakaran batubara yang saling berbeda sifatnya tersebut, akan dilengkapi dengan corong batubara ganda.

Butiran-butiran batubara hendaknya jangan terlalu jauh berbeda ukurannya. Makin merata besarnya butiran-butiran batubara, makin baik efisiensi pembakaran di atas rangka bakar rantai ini. Misalnya untuk batubara halus hendaknya jangan sampai terdapat butiran-butiran yang lebih dari 6 mm besarnya.

Butiran-butiran batubara yang besar-besar, akan terbakar lebih lama dibandingkan dengan yang kecil-kecil ukurannya. Bila butiran-butiran bahan bakar sangat berbeda-beda ukurannya, serta tidak tercampur dengan merata, akan menimbulkan lubang-lubang pada lapisan bara api, sehingga menyebabkan udara pembakaran akan berkelebihan di daerah-daerah yang lapisan bara apinya tipis, sedangkan di lapisan bara api yang tebal, justru kurang mendapatkan udara, yang dengan demikian permukaan bara api di atas rangka bakar akan makin tidak merata.

Kotak-kotak udara (*Air Case*) yang terdapat melintang di bawah rangka bakar, tekanan udaranya hendaklah sama rata. Saluran-saluran udara di samping bawah rangka bakar dibuat sedemikian ukurannya, sehingga kecepatan udara kurang dari 10 m/detik.

Untuk rangka bakar yang lebar-lebar, maka saluran-saluran udara terdapat di kedua sisi di bawah rangka bakar, sehingga kotak-kotak udara memperoleh arus udara dari kedua saluran udara yang ada di kedua tepi masing-masing.

Diusahakan pula bahwa antara masing-masing zone tidak terjadi kebocoran-kebocoran udara dengan memasang perapat-perapat (*seal*), baik antara zone-zone tersebut, maupun di tepi-tepi pinggiran rangka bakar.

Pemanasan udara pembakar terlebih dahulu, akan mempercepat penyalaan batubara kurus yang halus.

Untuk batubara yang titik cair abunya tinggi, pemanasan udara pembakar terlebih dahulu di dalam pemanas udara, dapat mencapai 100°C . Biasanya udara pembakar dipanasi tidak lebih dari $150^{\circ} - 160^{\circ}\text{C}$.

Konstruksi rangka bakar rantai adalah sebagai berikut:

Pada poros bagian depan, terdapat roda-roda rantai (*bull-wheel, chain-wheel*), yang menggerakkan dua atau tiga buah rantai. Pada rantai ini dipasang melintang antara mata rantainya, penyangga batang-batang rangka bakar, batang-batang rangka bakar dapat berjungkit (*drop-link*) dan berengsel pada penyangga, sehingga penyangga batang-batang rangka bakar berfungsi sebagai engsel jungkit dari batang-batang rangka bakar.

Batang-batang jungkit rangka bakar (*drop link*) tersebut, pada waktu sudah tepat di bawah corong batubara (*coal hopper*) akan merupakan bidang yang rata, dan berjalan dari depan ke belakang, yang ditahan oleh penyangga. Pada akhir perjalanannya bila sudah sampai di bawah penahan abu (*Ash Scraper*), maka ia akan berjungkit pada engselnya dan pada waktu kembali dari belakang ke depan, akan tergantung pada engselnya, yaitu penyangga, sedemikian sehingga batang-batang rangka bakar tersebut bersih dari abu dan terak, setelah ada kesempatan untuk menjadi dingin, sebelum bertugas kembali membawa lapisan bara api di bagian atas rangka bakar.

Rantai yang dibebani penyangga dan batang-batang jungkit rangka bakar, mempunyai roda-roda atau roller, yang digunakan untuk berjalan di atas relnya.

Rel bertugas untuk menahan segala beban berat rantai, roller-roller, penyangga-penyangga dan batang-batang jungkit rangka bakar. Ada beberapa macam konstruksi roller dan rel.

Begitu pula ada beberapa macam batang-batang jungkit rangka bakar.

Untuk rangka bakar rantai yang lebarnya lebih dari 4 meter, maka terdapat tiga untai rantai dengan tiga buah roda penggerak rantai (*bull-wheel*). Lebar maksimal sebuah rangka bakar rantai ialah 7 meter. Bila dikehendaki Luas Rangka Bakar yang lebih besar, maka disusun dua buah rangka bakar rantai secara paralel, yang satu berdampingan dengan yang lainnya.

Untuk menggerakkan roda penggerak rantai (*bull-wheel*) antara motor listrik penggerak sampai ke poros bull-wheel dipasang roda-roda gigi transmisi, termasuk roda cacing (*spur-gear*) dan roda gigi cacing (*worm-gear*).

Kecepatan gerak seluruh rantai rangka bakar dapat diubah-ubah menjadi 5 sampai 10 kecepatan gerak yang berbeda-beda.

Kecepatan gerak rantai rangka bakar bila tanpa angin bawah ialah sekitar 100 mm/menit dalam keadaan normal serta 200 mm/menit pada beban maksimum. Sedangkan bila menggunakan angin bawah, kecepatan geraknya sekitar dua kalinya. Namun harus diperhitungkan adanya suatu kecepatan gerak khusus sebesar 600–800 mm/menit, dalam hal keadaan darurat, untuk membuang sisa bara api dalam sumuran abu, untuk mematikan api di atas rangka bakar.

Tebal lapisan batubara diatur oleh pintu sorong, sekitar 70–150 mm,

tergantung dari jenis batubara yang dibakar di atas rangka bakar, serta besarnya butiran-butiran bahan bakar. Makin tebal lapisan batubara, bila butiran-butirannya makin besar serta bila bahan bakar banyak mengandung gas-gas atau zat-zat penguap (*volatile matter*).

Beban Rangka Bakar yang dapat dicapai, tergantung dari jenis batubara. Beban Rangka Bakar yang terbesar yang dapat dicapai, ialah bila bahan bakar mengandung 12% — 14% zat-zat penguap (*volatile-matter*).

Beban Rangka Bakar dengan beban kontinu maksimum, bila nilai pembakaran bahan bakar 29.300 KJ/kg, untuk berbagai jenis batubara sebagai berikut:

— batubara kurus yang halus	:	160—190 kg/m ² .jam
— butiran-butiran batubara kurus	:	190 "
— butiran-butiran batubara gemuk	:	220 "
— batubara gemuk yang halus dicampur dengan gas-coal yang tidak menggumpal	:	190 "
— Gas coal yang menggumpalnya sedang-sedang saja	:	160 "

Untuk batubara dengan nilai pembakaran yang berlainan dengan apa yang telah disebutkan, maka Beban Rangka Bakar-nya diperhitungkan berbanding terbalik dengan nilai pembakarannya terhadap Beban Rangka Bakar seperti tertera sebelumnya.

Tekanan angin bawah biasanya 20—40 mm kolom air namun kadang-kadang ada yang mencapai 50 mm kolom air.

Luas Rangka Bakar diperhitungkan terhadap hasil perbanyakan antara panjang dan lebar rangka bakar. Sebagai lebar diambil jarak antara kedua tepi kolom pendingin, sedangkan untuk panjang dihitung mulai dari pintu sorong sampai ujung permulaan penahan abu (*Ash-Scraper*). Rangka bakar lebar maksimalnya 9 meter, panjang maksimal 7,3 meter.

Fleksibilitas rangka bakar rantai ialah demikian baiknya, yaitu dalam waktu singkat dapat dilakukan perubahan-perubahan beban ketel, sehingga ketel uap tidak memerlukan akumulator panas yang besar-besar.

f. Pembakaran Batubara Serbuk (*Pulverized Coal Firing*)

Pembakaran batubara serbuk, yaitu bahan bakar padat berupa batubara yang digiling halus dicampur dengan sebagian udara pembakar sebagai media transportasi, yang merupakan udara primer, dihembuskan ke dalam ruang bakar atau tungku.

Udara sekunder dan tersier secara terpisah dihembuskan pula ke dalam tungku.

Seperti halnya pada rangka bakar rantai, bahan bakar mengalami proses-proses: pengeringan dan pemanasan pendahuluan (*drying and preheating*), pengegasan (*degassing*) dan penyalaan (*ignition*) dan sesudahnya baru terjadi pembakaran (*combustion*) yang sebenarnya.

Pengeringan bahan bakar berlangsung sebelum serbuk batubara tersebut disemburkan ke dalam tungku atau ruang bakar, yang dilakukan oleh udara primer selama transportasi dari penggiling batubara (*coal mill*) sampai ke mulut pembakar (*burner-nozzle*). Karena butiran-butiran bahan bakar demikian halus, maka proses pengeringan menjadi demikian cepat.

Seluruh proses: Pengeringan — Pemanasan — Pengegasan — Penyalaan dan Pembakaran yang sebenarnya hendaknya telah dapat berakhir sebelum mencapai pemanas lanjut di langit-langit tungku, sehingga panjang bunga api mulai dari mulut pembakar (*burner nozzle*) sekitar 8–12 meter.

Terdapat perbedaan yang menyolok antara bunga api batubara serbuk dan bunga api yang dihasilkan dari pembakaran gas-gas. Nyala api dari gas-gas terbentuk karena pencampuran yang sangat cepat antara gas-gas dan udara pembakarannya, sedangkan bunga api batubara serbuk tidak demikian keadaannya.

Butiran batubara serbuk yang berbentuk bulat, membutuhkan sejumlah udara tertentu untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna, yang volumenya sebanyak 24 kali volume butiran serbuk batubara tersebut.

Panjangnya api batubara serbuk, menyebabkan diperlukan ruang pembakaran atau tungku yang besar pula, sebab harus dijaga agar bunga api tidak menyentuh tembokan di belakang tungku, yaitu yang membentuk saluran gas asap di daerah-daerah konveksi, antara lain di daerah pemanas lanjut konveksi (*convection superheater*), di daerah ekonomiser, dan di pemanas udara.

Bunga api serbuk batubara yang mengenai dinding-dinding tembokan ketel akan cepat merusakkannya, disebabkan tingginya temperatur dan termakan oleh abu dan abu-cairnya.

Selain itu, bersinggungannya bunga api serbuk batubara dengan pipa-pipa ketel sebelum proses pembakaran selesai berakhir, akan menimbulkan kesukaran-kesukaran yaitu abu cair yang melayang-layang terbawa oleh api yang menyentuh dinding pipa ketel akan langsung membeku dan menempel padanya.

Untuk menghindari keadaan tersebut, maka pada waktu api atau gas asap akan melewati celah-celah pipa ketel di bagian teratas dari tungku sebelum mencapai daerah konveksi, api atau gas asap tersebut telah diturunkan temperaturnya sedemikian sehingga sampai di bawah titik melunaknya abu, yaitu di bawah $1100-1250^{\circ}\text{C}$, tergantung dari jenisnya bahan bakar dan abunya.

Karena serbuk batubara demikian halusnnya, maka memungkinkan pencampuran dengan udara pembakarnya menjadi makin merata, oleh karena itu dapat menghasilkan pembakaran dengan kadar prosentase CO_2 mencapai angka yang tinggi, yang kadang-kadang dapat mencapai angka 16%. Namun pada umumnya cukup dicapai % CO_2 sekitar 13-14% saja, sebab untuk mencapai angka yang lebih tinggi, berarti memerlukan udara pembakaran yang banyak berlebihan, yang berarti memperbesar kerugian-kerugian ketel.

Panjangnya bunga api juga tergantung pula dari kecepatan hembus campuran batubara dan udara ke dalam tungku. Biasanya kecepatan hembus tersebut sekitar 15-20 meter/detik, yaitu kecepatan minimal untuk menjaga agar butiran-butiran batubara dapat melayang-layang di dalam tungku, dan untuk mencegah membaliknya arus api ke dalam saluran bahan bakar atau bahkan mungkin dapat mencapai bunker (tempat penyimpanan sementara serbuk batubara) ataupun dapat mencapai penggiling batubara (*coal mill*).

Yang dimaksudkan dengan beban tungku (*furnace load*) ialah jumlah panas atau jumlah energi per jam yang dihasilkan karena pembakaran bahan bakar di dalam tungku, ditambah dengan bertambahnya entalpi yang terbawa oleh udara pembakar yang dalam keadaan panas dimasukkan ke dalam tungku. Beban tungku (BT) dihitung dalam $\text{KJ}/\text{jam} \cdot \text{m}^3$ isi tungku.

$$\text{BT} = \frac{3600 \times Q_{\text{Low}}}{G_v \times t_b}$$

$\text{KJ}/\text{nm}^3 \cdot \text{jam}$

Q_{Low} = Nilai pembakaran terendah bahan bakar dinyatakan dalam KJ/kg bahan bakar.

G_v = Jumlah gas asap yang terbentuk dari pembakaran, dalam nm^3/kg bahan bakar.

t_b = Waktu yang diperlukan untuk pembakaran yang sempurna butiran serbuk batubara yang terbesar, dinyatakan dalam detik.

Dari rumus tersebut, untuk memperbesar Beban Tungku maka diusahakan agar t_b menjadi sekecil mungkin yaitu antara lain dengan jalan mengusahakan penyalaan butiran serbuk batubara secepat mungkin, sehingga untuk itu diperlukan pemberian panas secepatnya kepada butiran-butiran bahan bakar begitu disemburkan ke dalam tungku.

Untuk jenis batubara yang banyak mengandung gas-gas, maka penguraian gas-gas telah berlangsung pada temperatur yang agak rendah, sehingga pembakaran gas-gas tersebut akan membantu penyalaan butiran-butiran bahan bakar yang tersisa.

Untuk jenis batubara yang kurang mengandung gas-gas, maka penguraian gas-gas serta penyalaannya, berlangsung pada temperatur yang tinggi, sehingga lebih banyak diperlukan panas untuk butiran-butiran bahan bakar begitu ke luar dari mulut pembakar (*burner nozzle*).

Makin halus batubara digiling, makin luas bidang permukaannya, sehingga lebih banyak panas yang dapat diserap, oleh karena itu, makin halus butiran bahan bakar, akan makin mempercepat penyalaannya.

Bila digunakan batubara kurus, yang kurang mengandung gas-gas penguap, maka di daerah yang berdekatan dengan mulut pembakar (*burner nozzle*), harus dihindari terdapatnya bidang-bidang yang banyak menyerap panas, misalnya pipa-pipa penguap. Sebaiknya terdapat bidang-bidang yang dapat memantulkan panas, misalnya tembokan-tembokan pasangan batu tahan api, sehingga akan memantulkan panas yang diperolehnya dari api ke arah butiran-butiran serbuk batubara yang disemburkan ke dalam tungku.

Udara pembakar bertindak mendinginkan api, sehingga harus dipanaskan lebih dahulu, agar api tidak terlalu banyak diambil panasnya, sehingga penyalaan dapat dengan mudah berlangsung.

Selain itu, jumlah udara primer hendaklah dibatasi, jumlahnya hanya cukup untuk membakar gas-gas yang telah terbentuk terlebih dahulu pada proses pengegasan, sehingga temperatur api tidak banyak menurun karena udara yang berlebihan, yang untuk bahan bakar padat,

bila belum mencapai temperatur pembakarannya, belum dibutuhkan kelebihan udara tersebut.

Di Amerika, berdasarkan hal-hal tersebut dibuat konstruksi pembakar sedemikian rupa dengan udara primer selaku media untuk mentranspor bahan bakar, dipisahkan dari serbuk batubara dengan menggunakan siklon (*cyclone*) dan disalurkan melalui lubang khusus yang terdapat di dalam dinding tungku.

Dengan cara ini, beban ketel dapat dengan tiba-tiba diturunkan tanpa kesukaran-kesukaran dalam pembakaran, dengan demikian maka stabilitas penyalaan dapat lebih terjamin.

Setelah proses seperti tersebut, maka udara sekunder dan udara tersier dialirkan berangsur-angsur ke dalam tungku, sesuai dengan kebutuhan pembakaran yang sedang berlangsung, sehingga temperatur bunga apinya menjadi tinggi, dan dengan bunga api yang cukup panjang, yang dapat memberikan panasnya ke sekeliling secara pancaran sebanyak-banyaknya.

Pada waktu api atau gas asap mencapai daerah konveksi, temperaturnya sudah banyak menurun, dibandingkan bila semua udara pembakar dihembuskan sejak mulai permulaan bahan bakar ke luar dari mulut pembakaran.

Dengan cara tersebut dapat dicapai Beban Tungku yang 30% lebih besar, dengan angka kelebihan udara yang sama, serta temperatur gas asap yang sama pula, pada waktu gas asap memasuki daerah konveksi.

Sifat-sifat bidang luar butiran-butiran serbuk batubara juga berpengaruh terhadap penyerapan panas. Butiran-butiran batubara Antrasit (*Anthracite*) yang mengkilat, tidak cepat menyerap panas dibandingkan dengan butiran-butiran batubara yang berwarna gelap.

Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk penyampaian panas hingga ke inti butiran-butiran bahan bakar, ditentukan oleh daya hantar panas serta besarnya butiran-butiran, pada temperatur tertentu dari permukaan bidang butiran bahan bakar.

Temperatur udara primer dibatasi hingga temperatur tertentu untuk menghindari terjadinya pengegasan di saluran transportasi bahan bakar. Untuk batubara kurus, sejenis antrasit, merupakan bahaya yang paling kecil kemungkinannya, udara primer dapat dipanasi hingga $100^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$. Sedangkan untuk batubara gemuk (*Steam Coal* atau *Gas Coal*), hanya boleh sampai $80^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$ saja, dan pada batubara

coklat hanya diperbolehkan sampai 60°C saja. Tetapi temperatur udara sekunder dapat dipanasi sampai 400°C .

Karena baik udara primer maupun udara sekunder dan tersier sama-sama dipanaskan pada sebuah pemanas udara, maka biasanya dalam pemanas udara, udara dipanasi hingga temperatur akhir dari temperatur udara sekunder yang dibutuhkan ($= t_s$).

Sedangkan untuk mendapatkan udara primer yang bertemperatur jauh lebih rendah ($= t_p$) dari temperatur udara sekunder, ialah dengan mencampurkannya dengan udara luar yang bertemperatur t_o dengan perbandingan sedemikian sehingga:

$$U_p \times i_{ud.t_p}^{\circ\text{C}} = (U_p - U_{lu}) \times i_{ud.t_s}^{\circ\text{C}} + U_{lu} \times i_{ud.t_o}^{\circ\text{C}}$$

U_p = Jumlah Udara Primer dalam $\text{nm}^3/\text{kg.bh. bakar}$.

U_{lu} = Jumlah Udara luar dalam $\text{nm}^3/\text{kg bahan bakar}$.

$i_{ud.t_p}^{\circ\text{C}}$ = entalpi udara primer pada $t_p^{\circ\text{C}}$.

$i_{ud.t_s}^{\circ\text{C}}$ = entalpi udara sekunder pada $t_s^{\circ\text{C}}$.

$i_{ud.t_o}^{\circ\text{C}}$ = entalpi udara luar pada $t_o^{\circ\text{C}}$.

Entalpi udara dinyatakan dalam KJ/nm^3

Bila butiran-butiran bahan bakar telah menyala, maka pengegasan bagian kokasnya juga harus mengikutinya dengan cepat. Makin kecil butiran akan makin cepat proses tersebut berlangsung.

Demikian pula keadaan poreousitas (*poreosity*) bahan bakar akan membantu mempercepat pengegasan gas-gas. Makin poreous bahan bakar, berarti makin luas bidang persinggungannya dengan panas.

Dengan demikian butiran-butiran bahan bakar yang mudah saling menggumpal kurang banyak daya serap panasnya.

Yang lebih penting lagi ialah pencampuran udara dengan butiran-butiran bahan bakar hendaknya sebaik mungkin, dengan cara diusahakan agar kecepatan relatif udara dan gas-gas terhadap butiran-butiran bahan bakar lebih besar. Pada pembakaran dengan rangka bakar, hal ini terjadi dengan sendirinya, karena bahan bakar dalam posisi diam sedangkan udara dihembuskan melaluinya.

Pada pembakaran dengan serbuk batubara, kecepatan udara dan gas-gas terhadap kecepatan butiran-butiran bahan bakar yang melayang-layang di dalam tungku makin tidak banyak berbeda bila butiran-butiran bahan bakar makin halus. Oleh karena itu diusahakan agar konstruksi dan penempatan burners di dalam tungku serta metoda pengaliran udara, dibuat sedemikian sehingga menimbulkan arus turbulensi di dalam tungku.

Pada umumnya diisyaratkan mengenai besarnya butiran-butiran serbuk batubara yang mengandung 10% gas-gas penguap (*volatile matter*); sedikit-dikitnya 80% butiran-butiran berukuran kurang dari 75 mikron dan paling banyak 5% butiran-butiran yang berukuran lebih besar dari 200 mikron (= 0,2 mm).

Untuk batubara dengan 20% kandungan gas-gas penguap, paling sedikit 75% butiran-butiran berukuran kurang dari 75 mikron, dan paling banyak 1% butiran-butiran berukuran lebih dari 200 mikron.

Dari rumus untuk Beban Tungku seperti tersebut di muka, nyatalah bahwa Beban Tungku akan berkurang, bila volume gas asap yang terbentuk dari pembakaran 1 kg bahan bakar, bertambah.

Volume gas asap yang terbentuk sebenarnya akan bertambah bila kandungan CO₂ dalam gas asap berkurang, dan bila temperaturnya makin naik.

Bila pembakaran berlangsung dengan menghasilkan kandungan CO₂ tertentu dalam gas asap, maka volume gas asap dapat dikurangi dengan cara sebagai berikut: begitu pengegasan gas-gas penguap dan pembakar berlangsung dengan hebatnya, sejumlah besar panas yang dipancarkan ke bidang yang dipanaskan dari ketel uap, yang dengan demikian temperaturnya akan menurun.

Juga dengan cara pengaliran udara secara berangsur-angsur seperti telah disebutkan sebelumnya, maka volume gas asap yang terbentuk dapat dijaga serendah mungkin.

Pembakaran dengan serbuk batubara memberikan kemungkinan setiap batubara dengan sembarang kandungan gas-gas penguapnya, dibakar dengan memuaskan.

Untuk batubara yang kurang banyak kandungan gas-gasnya, diperlukan syarat-syarat sebagai berikut:

- butiran-butiran bahan bakar sehalus mungkin;
- adanya bidang-bidang pemantul pancaran panas di sekeliling mulut pembakar (*burner nozzle*);

- dihindari adanya arus pusar yang besar pada permulaan penyemburan bahan bakar ke dalam tungku;
- pemanasan udara sekunder dan tersier yang cukup tinggi;
- pengaliran masuk udara sekunder dan tersier secara berangsur-angsur.

Terdapat keberatan-keberatan untuk pembakaran dengan serbuk batubara, yaitu abu dalam keadaan sangat halus dan cair melayang-layang di dalam api, sehingga akan mengikis tembokan-tembokan batu tahan api dalam ketel, serta menimbulkan terbentuknya *Birdnesting* yang sangat mengganggu operasional ketel uap.

Birdnesting ialah suatu proses pengendapan abu cair atau abu yang lunak yang melayang-layang di dalam gas asap, yang akan membeku atau menjadi padat bila menyentuh pipa-pipa air yang dingin, di dalam ekonomiser. Abu cair yang membeku tersebut akan melekat pada dinding-dinding luar pipa-pipa air ekonomiser, dan makin lama akan bertambah tebal, sehingga lama-kelamaan akan membuntu atau menutup celah-celah antara pipa-pipa ekonomiser yang untuk lewat gas asap, sehingga aliran gas asap akan terhenti dan terganggu karenanya.

Sekalipun butiran-butiran abu cair yang melayang-layang di dalam api atau gas asap dapat diusahakan agar saling bertemu dan membentuk butiran-butiran abu cair yang besar-besar dan dapat perlahan-lahan dipisahkan dari api atau gas asap, dan diendapkan dalam sumuran abu, namun masih banyak abu yang terbawa serta oleh gas asap dan meninggalkan cerobong sehingga mengotori lingkungan sekitarnya.

Kadar abu yang tinggi dalam batubara menyebabkan biaya untuk menggilingnya relatif lebih tinggi dibandingkan dengan batubara dengan kadar abu yang rendah. Yang paling ekonomis dalam biaya penggilingan batubara, ialah bila batubara asalnya dengan butiran-butiran yang kecil, dan sedikit mungkin kandungan airnya, jadi dari batubara yang belum dicuci.

Namun untuk batubara asal yang dalam keadaan demikian tadi, terdapat kerugian yang lain, yaitu banyaknya batubara yang terbang selama dalam transportasi dari tempat penambangan hingga ke tempat lokasi ketel uap yang akan menggunakannya, dan keberatan-keberatan karena banyaknya kotoran-kotoran yang turut terhembus dan terbawa oleh gas asap.

Batubara dengan butiran-butiran yang lebih besar dari 30 mm, sebelum digiling harus diremukkan (*crushed*) terlebih dahulu. Pengeringan batubara dilakukan oleh udara selama perjalanan (transportasi) menuju penggilingan, untuk dipanaskan hingga sampai pada suatu temperatur yang tergantung dari kadar air di dalam batubara.

Diusahakan agar pada saluran pengeluaran dari penggilingan, temperaturnya tidak lebih dari $60^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$, untuk menjamin tidak terjadi peledakan yang disebabkan tercampurnya atau terdapatnya bahan-bahan yang mudah sekali menyala, misalnya: potongan-potongan kertas, kayu, atau lap pembersih (*cotton waste*), dan sebagainya. Sedangkan pada saluran pemasukan udara ke penggilingan, temperaturnya tidak boleh melampaui 350°C .

Dengan cara tersebut tadi, batubara yang kadar airnya hingga 15% dapat digiling dengan memuaskan. Kadar air yang tinggi dalam batubara mempersukar transportasinya menuju bunker batubara serbuk atau pembakar (*burner*).

Untuk batubara dengan kadar air di atas 10% dibutuhkan kapasitas pengeringan yang besar pada penggiling, dengan menempatkan pengering khusus pada penggiling tersebut. Dalam hal ini kandungan air di dalam batubara diuapkan dengan jalan mengalirkan gas asap pada batubara yang akan digiling, di dalam pengering khusus tersebut.

Pengeringan dan penggilingan batubara dapat dilakukan secara terpusat (*sentral*) untuk seluruh ketel pada suatu pembangkit uap dan listrik, yang disebut sistem terpusat (*Centralized System*) atau *Bunker System*.

Dan dapat pula dilakukan secara terpisah-pisah untuk setiap ketel, yang disebut Sistem Langsung (*Individual System, Direct System, Unit System*).

a. Sistem Penggilingan Terpusat (*Centralized or Bunker System*):

Pada sistem penggilingan terpusat, dibutuhkan ruangan khusus yang terpisah pada bangunan ketel uap, untuk menghindari terjadinya kebakaran (campuran udara dan serbuk batubara sangat mudah terbakar atau eksplosif), oleh karena itu harus disediakan dana investasi yang khusus untuk itu.

Diperlukan adanya bunker-bunker untuk penyimpanan batubara serbuk. Untuk batubara serbuk yang banyak mengandung gas-gas penguap, maka di dalam bunker-bunker batubara macam ini, serbuk batubaranya cenderung untuk merusak dengan sendirinya (*Broeien*).

Selain itu, diperlukan peralatan transport khusus untuk membawa serbuk batubara ke dan dari masing-masing bunker, sehingga memerlukan tambahan energi untuk keperluan ini. Bila masih terdapat kandungan air dalam serbuk batubara, atau karena kelembabannya maka hal tersebut menyebabkan butiran-butiran serbuk batubara saling menggumpal atau melekat.

Untuk mengatasi bahaya kebakaran atau keadaan merusak dengan sendirinya (*broeien*), maka di atas permukaan serbuk batubara di dalam bunker tersebut, dialirkan CO₂ dengan tekanan tertentu.

Keuntungan sistem bunker ini ialah:

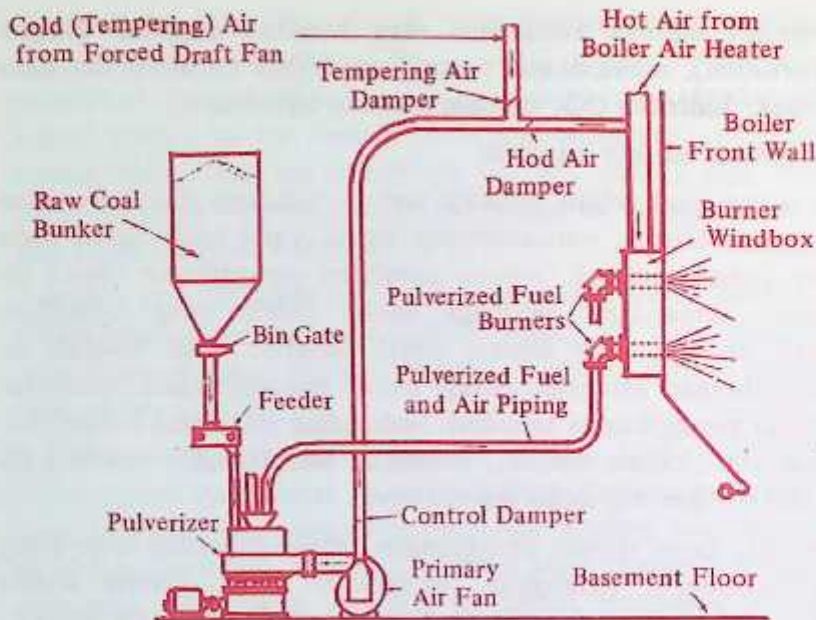
- a.1. Pada setiap saat selalu tersedia serbuk batubara dalam keadaan siap pakai. Untuk sentral-sentral listrik yang besar-besar, pada waktu beban puncak, semua peralatan penggilingan dapat dihentikan sementara, sehingga energi listrik yang dihasilkan (*output energy*) oleh sentral listrik tersebut tidak banyak dikurangi dengan sejumlah energi untuk menggerakkan peralatan-peralatan penggilingan tersebut. Sedangkan pada saat beban berkurang atau beban rendah, peralatan penggilingan tersebut dijalankan dengan kapasitas sepenuhnya.
- a.2. Selain itu, dapat dipilih penggilingan dengan kapasitas besar yang lebih ekonomis, sedangkan penggunaan udara primer selaku media transportasi dari bunker ke pembakar, hanya sedikit.
- a.3. Dalam hal terjadinya gangguan-gangguan pada penggilingan, maka tidak langsung terasa berpengaruh dalam hal supply bahan bakar di dalam burner.

b. Sistem Unit atau Sistem Langsung (*Unit System or Direct System*):

Sistem ini yang paling murah, sehingga banyak yang menggunakannya.

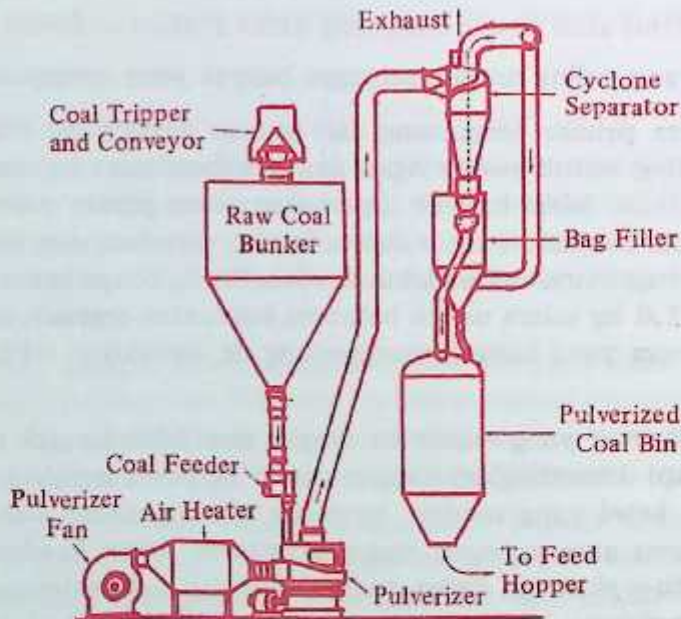
Jumlah udara primer tergantung dari jumlah udara yang dibutuhkan oleh penggiling untuk pengeringan dan penghembusan batubara, yang dengan demikian lebih banyak diperlukan udara primer dalam sistem unit ini, dibandingkan dengan sistem bunker tersebut, dan temperatur di saluran pengeluaran harus lebih rendah. Per kg bahan bakar dibutuhkan sekitar 1,6 kg udara untuk batubara kurus atau antrasit, sedangkan untuk batubara yang banyak mengandung air, diperlukan sekitar 2,5 kg udara.

Arus udara primer yang masuk ke tungku akan lebih banyak menyerap panas dari api dibandingkan dengan sistem berpusat tersebut, sehingga pada beban ketel yang rendah, terutama bila digunakan bahan bakar batubara kurus atau antrasit, maka penyalaan dalam keadaan rawan, yang sewaktu-waktu api dapat dengan tiba-tiba padam dengan sendirinya. Kemungkinan pengaturannya (*adjustability*) menjadi berkurang karenanya, sehingga kadar kandungan air dalam bahan bakar sangat besar pengaruhnya terhadap pengaturan pembakarannya.



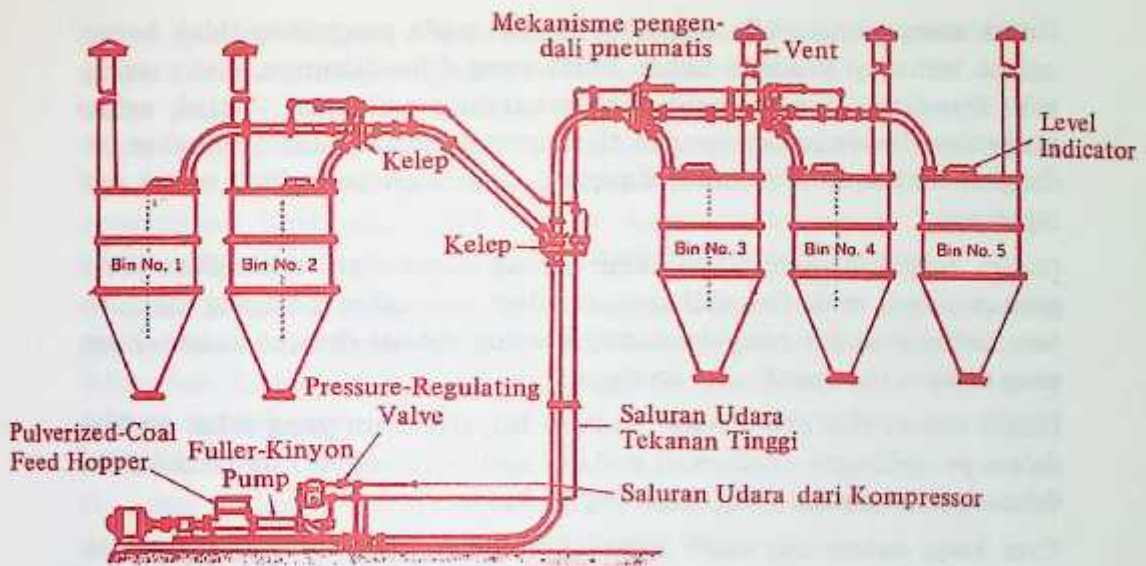
SISTIM PENGUMAPAN LANGSUNG UNTUK SERBUK BATUBARA

(Direct Firing System for pulverized coal firing)

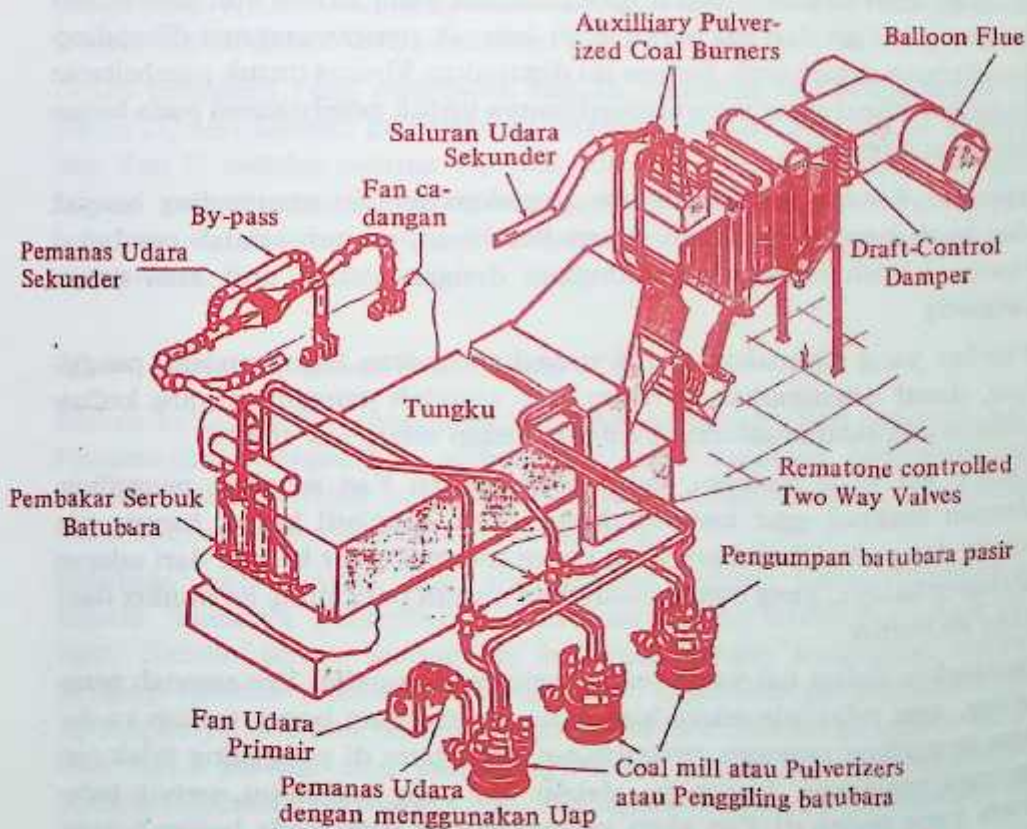


SISTIM BIN UNTUK PENGUMAPAN SERBUK BATUBARA

(Bin System)



CARA-CARA TRANSPORTASI SERBUK BATUBARA HINGGA MENCAPAI BIN



PERALATAN PEMBAKARAN DENGAN BATUBARA SERBUK

Untuk menjaga agar bila terjadi gangguan pada penggiling tidak berpengaruh terhadap keadaan beban ketel yang dihasilkannya, maka seringkali dilengkapi dengan penggiling-penggiling cadangan. Untuk setiap penggiling dihubungkan dengan tiga sampai empat buah pembakar, sedangkan untuk sebuah ketel dipasang tiga buah penggiling untuk melayaninya.

Sistem berpusat dengan demikian jarang digunakan, sedangkan penggunaan sistem unit, fleksibilitasnya dalam operasional kurang memuaskan. Sebagai usaha penyelesaiannya sering dibuat dengan suatu sistem yang disebut *Bin and Feeder System*

Dalam sistem *Bin and Feeder System* ini, batubara yang telah digiling dalam penggilingan disalurkan melalui siklon (*Cyclone*) dimasukkan ke dalam bunker antara yang tidak begitu besar.

Cara kerja sistem ini, sama secara keseluruhannya dengan sistem terpusat, yaitu terdapat bunker-bunker, pengumpan-pengumpan, siklon-siklon, dan fan-fan khusus, yang dalam hal biaya investasinya menjadikan lebih mahal, dibandingkan dengan yang sistem unit atau sistem langsung, selain dari itu harus lebih banyak pengawasannya dibandingkan dengan sistem unit. Sistem ini digunakan khusus untuk pembakaran batubara kurus yang memungkinkannya untuk pembakaran pada beban ketel yang rendah.

Bin and Feeder System ini menggunakan sebuah atau paling banyak dua buah penggiling untuk setiap ketel uap, namun jumlah pembakar (*burner*) lebih banyak dibandingkan dengan sistem unit atau sistem langsung.

Fan-fan yang digunakan untuk menghembuskan udara melalui penggiling, dapat ditempatkan sebelum atau sesudah penggiling, yang keduanya dan saluran-salurannya harus kedap udara (*air tight*).

Dalam hal yang pertama, yaitu penempatan Fan sebelum penggiling, dengan maksud agar instalasi ketel tidak menjadi kotor, karena ada udara dan serbuk batubara yang bocor menyemprot ke luar dari saluran transportasinya, yang menghubungkan antara penggiling ke bunker dan/atau ke burner.

Sedangkan dalam hal yang kedua, yaitu penempatan Fan sesudah penggiling, agar tidak ada udara luar yang dingin yang bocor terisap ke dalam penggiling sehingga pengeringan batu bara di penggiling tidak terganggu karenanya. Selain itu, dalam hal yang kedua ini, serbuk batubara yang melewati Fan akan menyebabkan erosi pada bagian-bagiannya.

Dalam gambar terlihat denah sistem unit atau Direct System dalam hal udara *diisap* melalui penggilingan oleh Fan. Udara diisap dari saluran udara panas (M) yang dicampur dengan udara luar yang dingin yang diisap dari saluran N sehingga pengaturan pencampurannya menjadikan udara primer yang hangat saja, yang sekedar diperlukan untuk pengeringan batubara, yang dengan demikian temperatur di saluran pengeluaran (*outlet port*) dari penggilingan tidak terlalu panas.

Di dalam Gambar yang lain, diperlihatkan denah sistem terpusat, yang sama denahnya dengan sistem antara (*bin and feeder system*). Udara ditekan dan dihembuskan melalui penggiling (B). Temperatur udara pada saluran pengeluaran (*outlet port*) dari penggiling, pengaturannya seperti tersebut tadi.

Di dalam siklon D, serbuk batubara dipisahkan dari udara. Serbuk batubara jatuh ke corong dan mencapai pompa transport L.

Pompa transport serbuk batubara L tersebut, membawa serbuk batubara ke bunker serbuk batubara F, dan dari situ dengan menggunakan pengumpan (*feeder*) G, dibawa ke saluran udara primer P dan terus disemburkan ke dalam tungku melalui pembakar (*burner*) H.

Udara transport yang membawa serbuk batubara dari penggiling B ke siklon D, dari saluran pengeluaran siklon D dibawa kembali ke saluran isap Fan C melalui saluran O, atau dibuang ke luar ke udara melalui lubang pengeluaran E, sebelumnya melalui penangkap debu serbuk batubara K, sisa-sisa serbuk batubara dipisahkan terakhir kalinya dengan udara.

20.4 Penggiling Batubara (*Coal Mill*):

Pilihan terhadap tipe penggiling batubara tergantung dari beberapa hal: Pertama-tama ditentukan antara lain dari cara-cara penghembusan butiran-butiran serbuk batubara yang telah dalam keadaan sedemikian halus dan mengeluarkannya dari penggiling.

Batubara pada waktu akan dan sedang digiling harus dikeringkan dahulu. Biasanya pengeringan dilakukan dengan hembusan udara hangat. Namun untuk menggiling batubara dengan kandungan zat-zat penguap (*volatile matter*) lebih dari 20%, digunakan gas asap untuk pengeringannya maupun untuk menghembus butiran-butiran serbuk batubara halus ke luar dari penggiling, untuk menghindarkan terjadinya bahaya peledakan (*explosion*) atau bahaya kebakaran, yang disebabkan adanya bunga api pada waktu menggilingnya.

Energi ataupun daya yang diperlukan untuk menggiling makin bertambah besar, bila butiran-butiran serbuk batubara yang dihasilkan penggiling makin halus, sehingga dalam hal ini perlu diperhitungkan segi ekonomisnya untuk membatasi sampai berapa halus butiran-butiran serbuk batubara yang dihasilkannya.

Selain itu, fan-fan yang digunakan untuk penghembusan butiran-butiran serbuk batu bara halus bertekanan sekitar 400 — 600 mm kolam air, yang juga memerlukan sejumlah energi.

Kekerasan batubara, kadar abu dan air dalam batubara, menentukan kehalusan penggilingan, sehingga dengan demikian juga menentukan kapasitas penggilingan.

Kekerasan batubara diukur dengan *grindability*-nya berdasarkan metoda *Hardgrove* sebagai berikut:

Batubara dengan 100% *Grindability*

ialah bila 50 gram batubara yang dikeringkan dengan udara, yang berukuran antara ayakan nomor 16 (= 1.190 mikron) sampai dengan ayakan nomor 30 (= 590 mikron) dan digiling dengan penggiling khusus yang digunakan di laboratorium tersebut, dan setelah 60 putaran gilingan, contoh batubara tersebut kemudian disaring dengan ayakan nomor 200 (= 74 mikron).

Bila jumlah butiran batubara yang lolos melalui ayakan nomor 200 (= 74 mikron) tersebut sebanyak 12,554 gram, maka batubara tersebut *Grindability*-nya 100%.

Secara umum dituliskan dalam rumus empiris sebagai berikut:

$$\text{GRINDABILITY} = 6,93 \times W + 13$$

Sehingga: W = berat butiran batubara yang lolos melalui ayakan nomor 200 (= 74 mikron) dinyatakan dalam gram.

Grindability yang tinggi menunjukkan batubara yang mudah digiling, sedangkan bila makin rendah harganya, maka batubaranya makin keras atau makin sukar digiling. Angka *grindability* berkisar antara 25% untuk Antrasit yang sangat keras, hingga 121% untuk batubara gemuk yang banyak kandungan gas-gas penguapnya (*volatile matter*).

Ada tiga jenis penggilingan, yaitu:

- a. Penggilingan silindris atau penggilingan teromol yang berputar perlahan-lahan.

- b. Penggilingan rol-rol atau bola-bola besi yang ditekankan kepada landasan berdasarkan Gaya Sentrifugal atau karena kekuatan pegas.
- c. Penggiling yang berdasarkan pukulan-pukulan batang-batang besi pemukul (*Hammer Mill*) yang cepat.

a. Penggilingan Silindris atau Penggilingan Tromol:

Penggilingan silindris yang berputar sekitar 20 – 30 putaran/menit, yang di dalamnya terdapat sejumlah bola-bola baja dengan diameter 50 – 80 mm, yang menggelinding di antara butiran-butiran batubara.



Gilingan batubara jenis silindris atau tromol

Di bagian dalam terdapat pelat-pelat landasan dari baja, yang disusun sedemikian, sehingga bila silinder atau tromol diputar, maka sejumlah isi tromol tersebut, yaitu butiran-butiran batubara dan bola-bola baja tersebut, akan terbawa dan terangkat sehingga akan jatuh pada pelat landasan berikutnya, yang dengan demikian bola-bola baja tersebut akan jatuh memukul

serta menggerus butiran-butiran batubara pada landasan. Demikian berlangsung terus-menerus dan butiran-butiran batubara makin lama makin halus.

Untuk batubara kurus atau Antrasit yang keras, penggiling jenis ini adalah yang paling sesuai. Daya yang diperlukan untuk memutarnya cukup tinggi, lagi pula tidak banyak perbedaan antara kebutuhan daya untuk beban yang rendah dibanding dengan kebutuhan daya untuk beban yang tinggi. Namun tingkat keausannya rendah.

Pelat-pelat landasan baja diperhitungkan untuk mencapai umur penggantian selama 40.000 jam, tetapi bola-bola baja lebih cepat ausnya, yang untuk itu harus sering-sering diganti dengan yang baru. Bila terdapat potongan-potongan besi yang terbawa serta oleh batubara pada saat pengisiannya, tidak akan menimbulkan kerusakan-kerusakan pada penggilingan.

Penggiling dibuat sampai dengan kapasitas 40 t/j. Dengan diameter sekitar 2,5 meter dengan panjang 12 meter. Pelayanannya sedemikian sederhana dan mudah. Kebutuhan daya sekitar 6 KW/ton batubara.

b. Penggilingan Rol-rol atau Bola-bola yang Ditekankan Kepada Landasan Berdasarkan Gaya Sentrifugal atau Tekanan Pegas:

Pada penggilingan yang didasarkan kepada Gaya Sentrifugal, maka bola-bola besi diputar dengan kecepatan tinggi sekeliling poros vertikal, atau rol-rol yang digantungkan pada engsel-engsel diputar dengan kecepatan tinggi sekitar 100 — 450 putaran/menit. Karena keausan bola-bola besi atau rol-rol, maka kehalusan butiran-butiran batubara yang dihasilkannya juga akan berkurang.

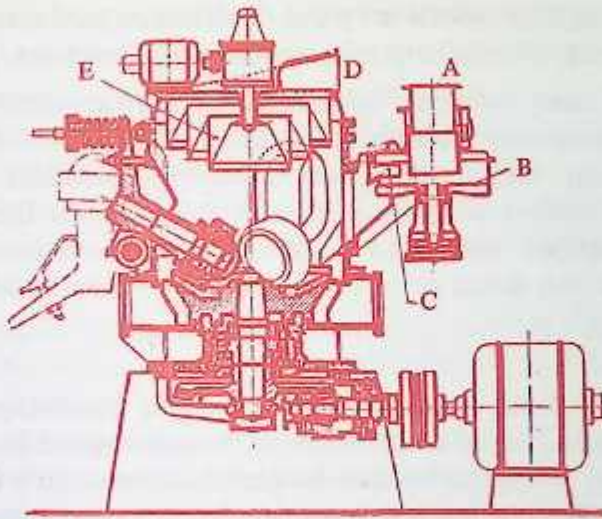
Penggilingan jenis ini memerlukan pengimbangan (*balancing*) yang baik dan memerlukan pemisah metal magnetis (*magnetic metal separator*) yang digunakan untuk memisahkan potongan-potongan besi atau logam lainnya dari batubara yang akan dimasukkan ke dalam penggiling, agar tidak merusakkan rol-rol dan landasannya, ataupun untuk menghindari terjadinya bunga api karena pergeseran antara potongan-potongan logam tersebut dengan rol-rol dan landasannya, sebab timbulnya bunga api di penggilingan akan menimbulkan bahaya kebakaran yang lebih besar artinya.

Kapasitas penggiling yang menggunakan bola-bola besi yang ditekan ke landasan, yang paling besar mencapai 50 t/jam, sedangkan untuk rol-rol yang tergantung pada engsel-engsel yang ditekan ke landasan hanya 15 ton/jam.

Penggilingan yang tekanan rol-rol penggilas pada landasannya didasarkan kepada tekanan pegas ialah jenis penggilingan *Raymond-Lopulco*. Lihat Gambar!

Batubara jatuh melalui tabung A pada sebuah meja putar B, sehingga jumlah batubara yang masuk ke penggilingan diatur oleh penggaruk C. Udara beserta serbuk batubara diisap melalui lubang pengeluaran D. Selain kecepatan udara penghembus yang menentukan kehalusan butiran-butiran serbuk batubara yang dapat dihembus serta pengaturannya dilakukan oleh ayakan putar E, yang berupa pelat-pelat berbentuk kerucut dengan mengatur putarannya.

Landasan berupa piringan landasan yang diputar oleh motor listrik. Sedangkan rol-rol ditekan kepada piringan landasan oleh pegas penekan P.



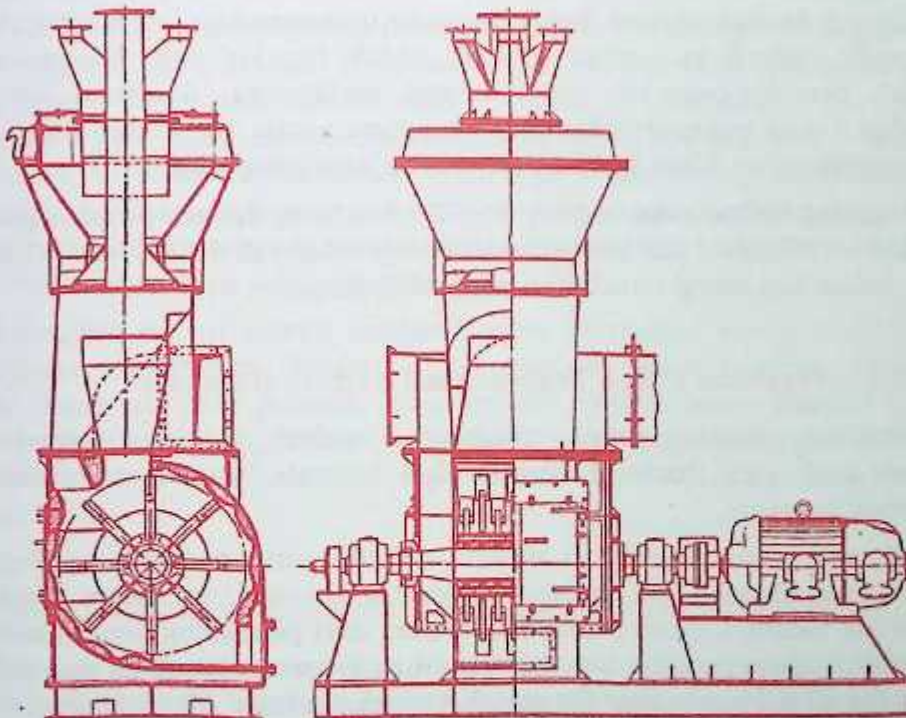
Penggilingan batubara dengan rol-rol = *Roller coal mill*

A = Batu bara masuk

D = Serbuk batu bara dan udara ke lua dari sini.

C & B = Pengaturan pemasukan,

E = Saringan berputar



Penggilingan batubara dengan pemukulan = *Slog mill*

Ada pula penggiling sejenis ini yang ditekankan landasan berupa bola-bola baja, yang prinsip-kerjanya menyerupai bantalan peluru aksial. Umur rol-rol atau bola-bola baja tersebut sekitar 4000 — 7000 jam, sedangkan landasannya sekitar 10.000 — 15.000 jam. Putaran poros piring landasan sekitar 100 putaran/menit. Sebelum batubara dimasukkan ke dalam penggiling ini, terlebih dahulu dibersihkan dari potongan-potongan besi atau logam lainnya, dengan menggunakan besi magnetik dan metal pemisah (*magnetic iron and metal separator*).

c. *Hammer Mill*

Lihat Gambar. Pada Hammer Mill, batubara dipukul-pukulkan oleh pemukul-pemukul kepada landasannya. Pemukul-pemukul berputar dengan cepatnya memukul butiran-butiran batubara yang jatuh dari atas dan dihempaskannya kepada landasan dan menjadi hancur. Hammer-mill ini digunakan untuk batubara yang tidak terlalu keras atau yang mudah hancur. Hammer mill tidak cocok untuk batubara kurus dan antrasit yang keras.

Pemukul-pemukul cepat aus, oleh karena itu sering pula diganti. Landasan-landasan berbentuk balok-balok baja yang berupa lengkungan, sehingga butiran-butiran batubara yang dihempaskan kepadanya akan hancur meletik memantul kembali untuk dipukul dan dihempaskan oleh pemukul-pemukul yang datang berikutnya, demikian sampai halus. Udara transport dihembuskan secara aksial dari kedua sisi ujung penggiling, dan diisap ke luar dari sebelah atas penggiling.

Penggiling berkapasitas sekitar 1 — 12 ton/jam, dengan putaran poros 1450 — 730 rpm, dan memerlukan energi sebanyak 16 KW/ton batubara, belum lagi energi untuk Fan penghembusnya.

20.5 Peralatan untuk Transportasi Serbuk Batubara:

Pemilihan peralatan untuk transportasi serbuk batubara tergantung dari jarak yang harus ditempuh dari seluruh instalasi pembakaran serbuk batubara.

Pada sistem unit atau direct system, serbuk batubara dari penggilingan langsung dihembuskan melalui pembakar (*burner*) ke dalam tungku. Serbuk batubara dibawa atau ditransport dari penggiling dengan menggunakan udara penghembus. Butiran-butiran serbuk batubara melayang-layang di saluran udara dengan kecepatan sekitar 15 — 20 m/detik. Tikungan-tikungan saluran udara harus cukup besar jari-jari tikungan-

nya, serta jangan sampai terdapat tonjolan-tonjolan berupa sambungan-sambungan las atau packing-packing saluran udara tersebut.

Pada sistem terpusat atau sistem antara (*bin and feeder system*), butiran-butiran serbuk batubara yang berhembus dari penggiling, dipisahkan dari udara pembawanya di dalam siklon (*cyclone*) berdasarkan gaya Sentrifugal. Serbuk batubaranya akan ditransport lebih jauh, sedangkan udara pembawanya diisap lagi oleh Fan untuk dihembuskan lagi ke dalam penggiling.

Untuk jarak-jarak transportasi yang lebih pendek, digunakan ulir transport (*transport screw*) untuk transportasi ke arah horizontal, dan untuk transportasi ke arah vertikal digunakan *Jacobs-Ladders*. Keseluruhan jarak tempuh harus kedap udara (*air tight*), untuk menghindari bahaya kebakaran. Untuk jarak tempuh yang lebih jauh dari 60 meter, metoda transportasi semacam ini akan mengalami kesukaran-kesukaran.

Untuk jarak tempuh yang jauh, digunakan reservoir-reservoir pembantu yang setelahnya diisi penuh kemudian dikosongkan dengan men-transport serbuk-serbuk batubara dengan udara tekan pada tekanan 7 kg/cm^2 .

Dalam Gambar diperlihatkan peralatan untuk transportasi serbuk batubara untuk jarak sekitar 1500 mm. Pada ujung akhir ulir transport terdapat lubang pemasukan udara dengan tekanan sekitar $1 - 2,5 \text{ kg/cm}^2$, yang akan membantu men-transport serbuk batubara. Dengan cara ini, batubara serbuk dapat dinaikkan hingga ketinggian 15 meter di atasnya, tanpa mengalami kesukaran-kesukaran. Peralatan transportasi batubara semacam ini berkapasitas sekitar $10 - 20 \text{ ton/jam}$ dengan membutuhkan daya sekitar 2 KWH/ton .

Di samping itu, di bawah bunker-bunker persediaan serbuk batubara, terdapat pengumpan (*feeder*) seperti tertera dalam Gambar, dengan ulir transport yang pendek, atau seperti tertera dalam Gambar berikutnya, yang menggunakan pengaduk, yang digerakkan oleh motor listrik, dengan membutuhkan daya sebesar $0,3 \text{ KWH/ton}$ serbuk batubara.

20.6. Pembakar Serbuk Batubara (*Pulverized Coal Burner*):

Pada asal mulanya, pembakar hanya berupa corong bundar, dengan campuran serbuk batubara dengan udara dihembuskan ke dalam tungku.

Pada perkembangan selanjutnya, mulut burner berubah menjadi lubang pipih berupa celah yang terletak di antara celah-celah pipa-pipa penguap.

Dengan bentuk mulut pembakar yang pipih ini, memberikan kemungkinan yang lebih besar tercampurnya udara sekunder yang panas dengan serbuk batubara beserta udara primer yang baru saja ke luar dari mulut burner.

Dewasa ini terdapat tiga macam pembakar (*burner*):

- a. Pembakar rata/pipih (= *Flat burner*).
- b. Pembakar pusar (*Swirl burner* atau *Vortex burner*).
- c. Pembakar sudut (*Corner burner*).

a. *Pembakar Rata atau Flat Burner:*

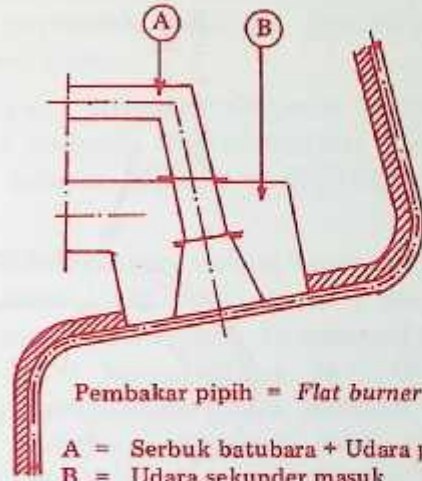
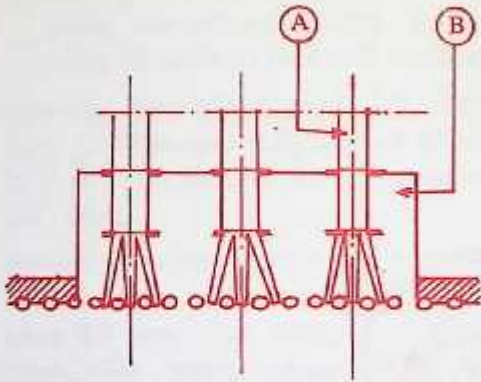
Pembakar tipe ini biasanya diarahkan ke bawah seperti terlihat dalam Gambar, sehingga bunga apinya berbentuk huruf U dari atas ke bawah dan ke atas lagi.

Udara primer hanya merupakan sebagian kecil dari seluruh kebutuhan udara yang dihembuskan bersama-sama dengan serbuk batubara melalui corong A. Udara sekunder masuk ke dalam tungku melalui saluran udara B. Udara tersier, untuk batubara kurus, baru dihembuskan ke dalam tungku melalui beberapa lubang di dinding tungku, sedemikian sehingga sesudah bunga api mencapai jarak tertentu jauhnya dari mulut burner, dan agar api menjadi teraduk-aduk, yang akan menyempurnakan pembakaran. Hembusan udara tersier hendaknya dapat diatur di setiap lubang pemasukannya di dalam tungku, untuk menghindari terbentuknya terak abu (abu cair yang kemudian membeku), dan untuk pengaturan angka kelebihan udara (*excess air coefficient*).

Pembakar pipih (*Flat burner*) ini, yang bunga apinya berbentuk huruf U, menghembuskan campuran serbuk batubara dan udara dengan kecepatan tinggi masuk ke dalam tungku, namun tidak banyak mengaduk-aduk api, sehingga pembakar pipih ini lebih cocok digunakan untuk penyalaan batubara kurus.

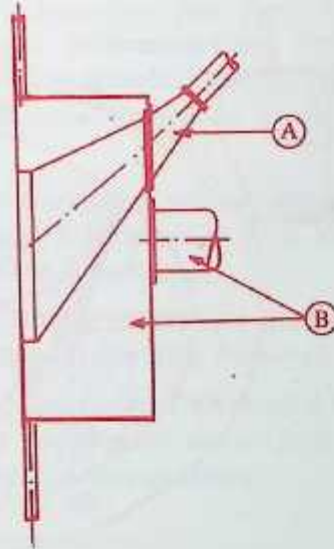
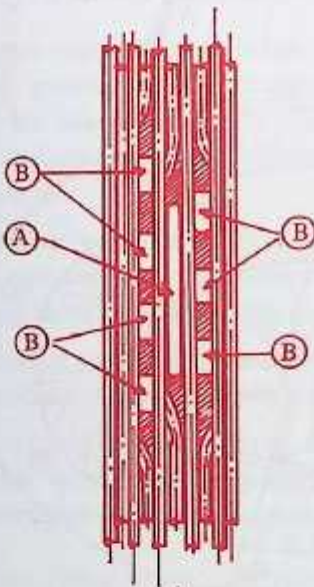
Dengan pembakar pipih semacam ini:

- beban tungku tidak bisa tinggi,
- butiran-butiran serbuk batubara yang tidak sempat terbakar persentasenya agak tinggi,
- butiran-butiran serbuk batubara yang agak kasar, akan terlempar ke sumuran abu di bawah, dan terbuang percuma pada saat berputar-baliknya bunga api ke atas,



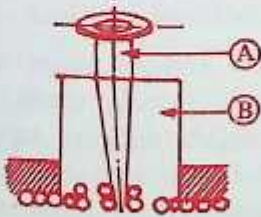
Pembakar pipih = *Flat burner*

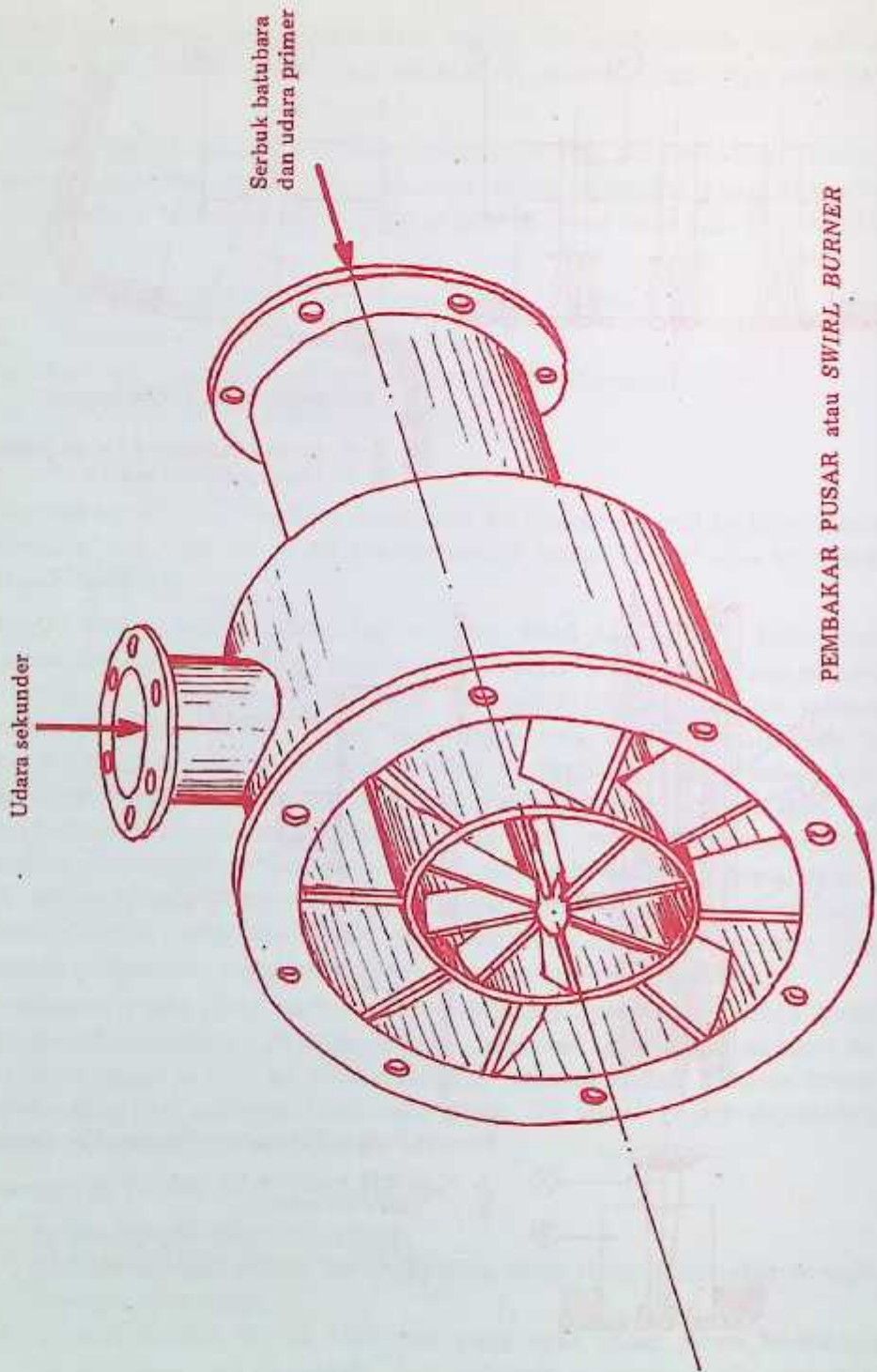
A = Serbuk batubara + Udara primer
 B = Udara sekunder masuk



Pembakar pipih Calumet = *Calumet Flat Burner*

A = Serbuk batubara + Udara Primer
 B = Udara sekunder





- ditambah lagi adanya sebagian dari butiran-butiran serbuk batubara yang menempuh jalan yang terpendek, sehingga pembakaran yang dihasilkan menjadi kurang sempurna.

Biasanya pembakar pipih ini digunakan untuk pembakaran batubara yang mempunyai kandungan gas-gas penguap (*volatile matter*) sebesar 10% — 12% dengan beban tungku sebesar 565,000 — 628.0000 KJ/nm³ jam.

Serbuk batubara dan udara primer dihembuskan melalui lubang mulut burner yang pipih panjang yang ditempatkan vertikal (A), dengan lebar 20 mm, dan tinggi atau panjangnya 1600 mm. Di samping dari celah-celah yang panjang ini, terdapat lubang-lubang penghembus udara sekunder (B). Lubang-lubang penghembus udara sekunder tersebut, tempatnya berselang-seling, sebelah-menyebelah celah pipih panjang penyemprotan serbuk batubara dan udara primer, dan berbentuk sudut yang berselang-seling pula, terhadap celah pipih panjang serbuk batubara dan udara primer tersebut.

Adapun maksudnya ialah untuk pencampuran yang merata antara udara pembakar sekunder dengan butiran-butiran serbuk batubara yang ke luar dari celah pipih panjang tersebut. Biasanya udara primer dan serbuk batubara dihembuskannya ke dalam tungku dengan arah ke bawah.

Pembakar yang sejenis dengan pembakar ini seperti tertera dalam gambar. Lubang saluran udara sekunder terletak di atas atau di bawah lubang saluran udara primer dan serbuk batubara.

Pembakar-pembakar tersebut dipasang di antara pipa-pipa penguap digunakan untuk pendinginan tungku (*intertube burners*).

Di samping udara primer dan sekunder, masih terdapat lubang-lubang saluran udara tersier yang dapat distel atau diatur jumlahnya, untuk penyempurnaan pembakaran secara keseluruhannya.

b. *Pembakar Pusar (Swirl or Vortex Burners):*

Salah satu dari tipe pembakar pusar ialah seperti terlihat pada Gambar. Pembakar pusar seperti terlihat pada gambar, merupakan pembakar bundar. Udara primer dan serbuk batubara dihembuskan melalui lubang pipa sebelah dalam (A). Pada mulut burner, terdapat daun sudu-sudu yang memilin ke kiri, sehingga serbuk batubara dan udara primer tersebut, menghembus ke dalam tungku dengan arah pusaran ke kiri.

Udara sekunder menghembus ke dalam tungku melalui lubang B dan melalui tabung sebelah luar. Di dalam tabung luar ini juga terdapat sudu-sudu di ujung akhir dekat mulut burner, yang memilin ke kanan, sehingga udara sekunder menghembus ke dalam tungku dengan arah pusaran ke kanan.

Pusaran udara primer ke kiri di sebelah dalam, dan pusaran udara sekunder ke kanan di sebelah luar, akan sangat membantu mengaduk api dengan merata pada saat ke luar dari mulut burner.

Pembakar tipe terakhir ini, juga memerlukan tambahan udara tersier, yang pemasukannya ke dalam tungku dapat diatur jumlahnya.

Dengan pembakar semacam terakhir ini, dapat dibakar serbuk batubara kurus dengan 10% kandungan gas-gas penguap dengan efisiensi pembakaran mencapai angka 88,8%.

Sebenarnya pembakar-pembakar pusat seperti tersebut, lebih cocok untuk pembakaran batubara yang banyak kandungan gas-gas penguapnya.

c. *Pembakar Sudut atau Corner Burner:*

Untuk ketel uap yang besar-besar, pembakar-pembakar ditempatkan pada setiap sudut dari tungku, dengan irisan tungku berupa bujur sangkar.

Arah hembusan pembakar-pembakar menyinggung suatu lingkaran khayal di tengah-tengah tungku. Dengan demikian aliran api atau gas asap berputar-putar di dalam tungku dan naik dengan perlahan-lahan ke atas.

Biasanya pembakar-pembakar tersebut arahnya dapat diubah-ubah, ke atas atau ke bawah (*tilting burners*), untuk maksud pengaturan beban ketel. Untuk beban ketel yang rendah, burner di arahkan ke atas, sehingga gas asap tidak terlalu banyak diambil panasnya, dan gas asap pada waktu mencapai daerah konveksi tidak terlalu rendah.

Pada beban ketel yang tinggi, pembakar diarahkan ke bawah, sehingga api yang besar itu, tidak cepat-cepat mencapai daerah konveksi. Sehingga temperatur api pada waktu mencapai daerah konveksi tidak terlalu tinggi, sehingga semua abu yang cair yang terbawa oleh api pada saat mencapai daerah konveksi, telah membeku dan tidak mengakibatkan kesukaran-kesukaran pada pipa-pipa di daerah konveksi karena pelekatan abu, yang sering disebut dengan *birdnesting*.

Pengaturan mengenai pengarahannya pembakaran *tilting burners* ini, dilakukan secara otomatis, disesuaikan dengan bebannya, serta tergantung

dari temperatur yang dihasilkan. Hal ini hanya sesuai untuk bahan bakar yang banyak mengandung gas-gas penguap.

Bila dipilih burner-burner yang kecil-kecil, tetapi jumlahnya banyak, akan menghasilkan bunga api yang pendek, dibandingkan bila dipilih burner yang besar-besar tetapi jumlahnya sedikit. Selain itu, pencampuran antara serbuk batubara dengan udara pembakar lebih merata, serta pengaturan beban ketel dapat dibantu dengan penyalaan atau pemadaman sebagian dari burner yang kecil-kecil tersebut.

Kemungkinan pengoperasian ketel pada beban yang rendah untuk jangka waktu yang cukup lama tergantung dari kadar kandungan gas-gas dari serbuk batubaranya.

Untuk batubara dengan 10% volatile matter, dapat dibebani pada 50% beban secara kontinu, sedangkan untuk bahan bakar dengan 20% zat-zat penguapnya, dapat dibebani sampai 40% beban ketel dengan memuaskan, bahkan butiran-butiran serbuk batubara yang makin halus dan tungku yang tidak banyak didinginkan, dapat dicapai beban kontinu sampai 30% dari beban nominalnya. Ditinjau dari sudut inilah, ternyata bahwa pembakaran dengan serbuk batubara kurang fleksible dibanding dengan rangka bakar rantai.

Untuk penyalaan pendahuluan (*initial firing*) serbuk batubara, terlebih dulu dinyalakan dengan membakar bahan bakar gas atau minyak bakar, melalui burner-burner yang disediakan khusus untuk *initial firing* atau untuk memancing pembakarannya. Pembakaran gas atau minyak bakar lebih dahulu tersebut, untuk memanasi tungku sampai mencapai temperatur penyalaan serbuk batubara yang datangnya kemudian.

Pada rangka bakar rantai yang modern, efisiensi pembakarannya dapat menyamai pembakaran dengan serbuk batubara, sedangkan pengaturan bebannya jauh lebih mudah, lagipula memungkinkan udara dipanasi sampai demikian tinggi, sehingga untuk ketel yang kecil-kecil, lebih sering digunakan rangka bakar rantai. Namun untuk ketel yang besar-besar, di atas 70 — 120 t/jam, lebih memuaskan bila menggunakan bahan bakar minyak bakar.

21. Pembakaran Dengan Minyak Bakar (Oil Burner):

Seperti halnya pembakaran dengan serbuk batubara, maka pembakaran dengan minyak bakar juga menghendaki butiran-butiran bahan bakar yang disemprotkan ke dalam tungku dalam keadaan yang sangat halus, agar dapat tercampur dengan merata dengan udara pembakarnya.

Minyak disemprotkan melalui pengabut minyak, yang juga disebut pembakar, dalam bentuk butiran-butiran minyak yang sangat halus menyerupai kabut minyak.

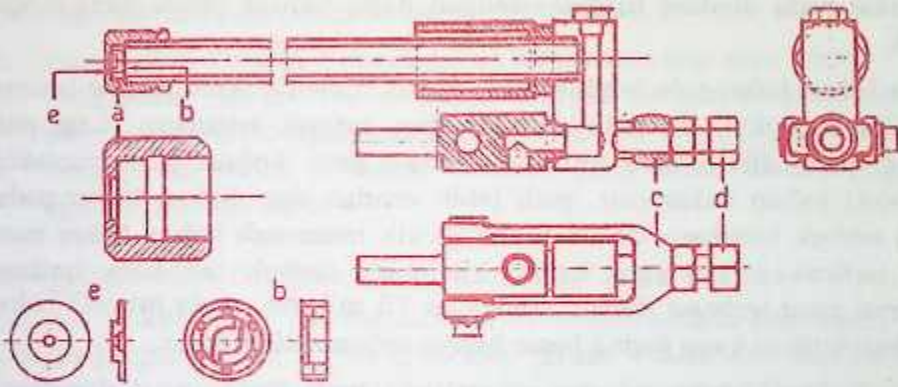
Seperti telah diuraikan dimuka, sebelum bahan bakar dapat dibakar, terlebih dahulu melalui proses-proses penguapan dan penguraian menjadi gas-gas selengkapnya agar tidak menghasilkan pembakaran yang banyak mengandung jelaga.

Untuk pemanasan pendahuluan, penguapan dan penguraian menjadi gas-gas, diperlukan sejumlah panas, yang diambil dari api yang terbentuk dari pembakaran sebelumnya. Untuk tidak terlalu banyak mengambil panas dari api, maka di sekitar mulut pembakar (burner), hendaknya terdapat tembokan-tembokan yang banyak memantulkan panas dari api, yang dengan demikian merupakan penyimpanan panas, yang terbuat dari batu tahan api.

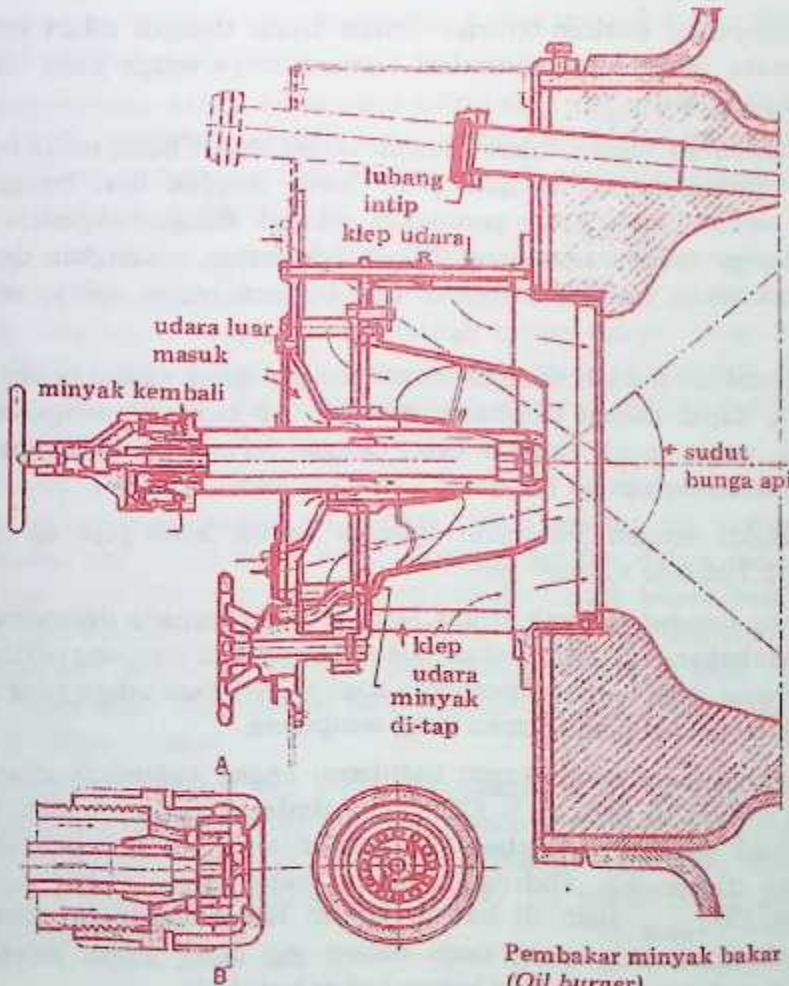
Pada waktu pembakaran dari setetes atau sebutir embun minyak bakar, pertama-tama menguap gas-gas atau zat-zat yang cepat menguap, kemudian diikuti oleh gas-gas atau zat-zat yang agak sukar menguapnya, dan kemudian diikuti lagi dengan penguraian gas-gas tersebut dan yang terakhir adalah kokas sisanya yang harus diuapkan pula.

Bila butiran minyak bakar tersebut menempel pada dinding tungku, maka setelah penguapan gas-gas, kokas yang tersisa tidak sempat lagi untuk menguap dan terbakar, maka kokas tersebut akan berubah menjadi kerak arang yang menempel pada dinding tungku, yang disebut dengan istilah pembentukan *coke-snest*.

Oleh karena itu, harus diusahakan agar bunga api berkesempatan untuk membakar seluruh butiran-butiran minyak bakar dengan sempurna terlebih dulu, sebelum menyentuh atau menyinggung dinding tungku. Apabila keadaan terakhir berlangsung, yaitu bunga api menyentuh dinding tungku sebelum pembakaran seluruh butiran bahan bakar berlangsung dengan sempurna, maka akan terbentuk lapisan kerak arang pada dinding tungku. Lapisan kerak arang tersebut mempunyai titik cair yang tinggi, dan merupakan lapisan lekat yang kenyal dan



a = Mur wartel; b = Plat puser; c = Plat pengabut



Pembakar minyak bakar
(Oil burner)

melekat pada dinding tungku, dengan daya hantar panas yang sangat jelek.

Pada bahan bakar cair, lebih mudah untuk mewujudkan butiran-butiran sehalus mungkin, dibandingkan dengan serbuk batubara. Lagi pula energi yang dibutuhkan untuk melawan gaya kohesi antar molekul-molekul bahan bakar cair, jauh lebih rendah dari bahan bakar padat atau serbuk batubara, dalam usaha untuk memecah bahan bakar menjadi butiran-butiran yang halus. Bila pada serbuk batubara, butiran-butiran yang terbesar dapat mencapai 75 mikron, pada minyak bakar butiran-butiran yang paling besar hanya sebesar 20 mikron.

Dengan demikian reaksi pembakarannya jauh lebih cepat dan tanpa menimbulkan jelaga arang, jika dapat diusahakan agar butiran-butiran bahan bakar tercampur dengan merata dengan udara pembakarannya.

Bila pencampuran butiran-butiran bahan bakar dengan udara kurang merata, maka tidak dapat dihindari terbentuknya jelaga yang berupa asap tebal pada api.

Bila pencampuran bahan bakar dengan udara dapat baik, maka bunga api yang dihasilkannya menjadi jauh lebih pendek dari bunga api batubara serbuk, yaitu pada pembakar minyak dengan kapasitas 100 kg/jam, bunga apinya sepanjang 2,0 – 2,5 meter, sedangkan dengan pembakar minyak yang berkapasitas 500 kg/jam, bunga apinya sekitar 4 meter.

Dengan demikian mudah dicapai beban tungku yang sangat besar, atau sebaliknya, dapat dibuat pembakar minyak (oil burners) dengan kapasitas kecil, yaitu untuk tungku ketel dengan lorong api atau pipa api, tanpa kesukaran apa pun.

Beban tungku dengan pembakar minyak untuk ketel pipa air dapat mencapai $2.720.000 \text{ KJ/nm}^3 \cdot \text{jam}$.

Pembakaran dengan minyak bakar jauh lebih sederhana dibandingkan dengan pembakaran dengan bahan bakar lainnya, di samping peralatannya sederhana, juga hanya diperlukan angka kelebihan udara yang kecil saja untuk mencapai pembakaran yang sempurna.

Seperti halnya pada pembakaran batubara, angka kelebihan udara diatur atau dikontrol dengan % CO_2 yang terdapat pada gas asap. Oleh karena secara teoretis prosentase CO_2 max ditentukan oleh banyaknya kandungan disponsible Hidrogen, maka pada bahan bakar minyak prosentase CO_2 max jauh di bawah bahan bakar batubara, sehingga untuk prosentase CO_2 yang sama dalam gas asap, angka kelebihan udaranya juga lebih rendah dari bahan bakar batubara.

Ada tiga macam cara pengabutan minyak bakar: .

- a. Pengabutan dengan menggunakan semprotan uap atau udara
- b. Pengabutan tekan, bahan bakar minyak dengan tekanan tertentu akan mengabut dengan sendirinya,
- c. Pengabutan putar (rotating burner), yang masih dibantu juga dengan hembusan udara.

a. Pengabutan Dengan Semprotan Uap Atau Udara:

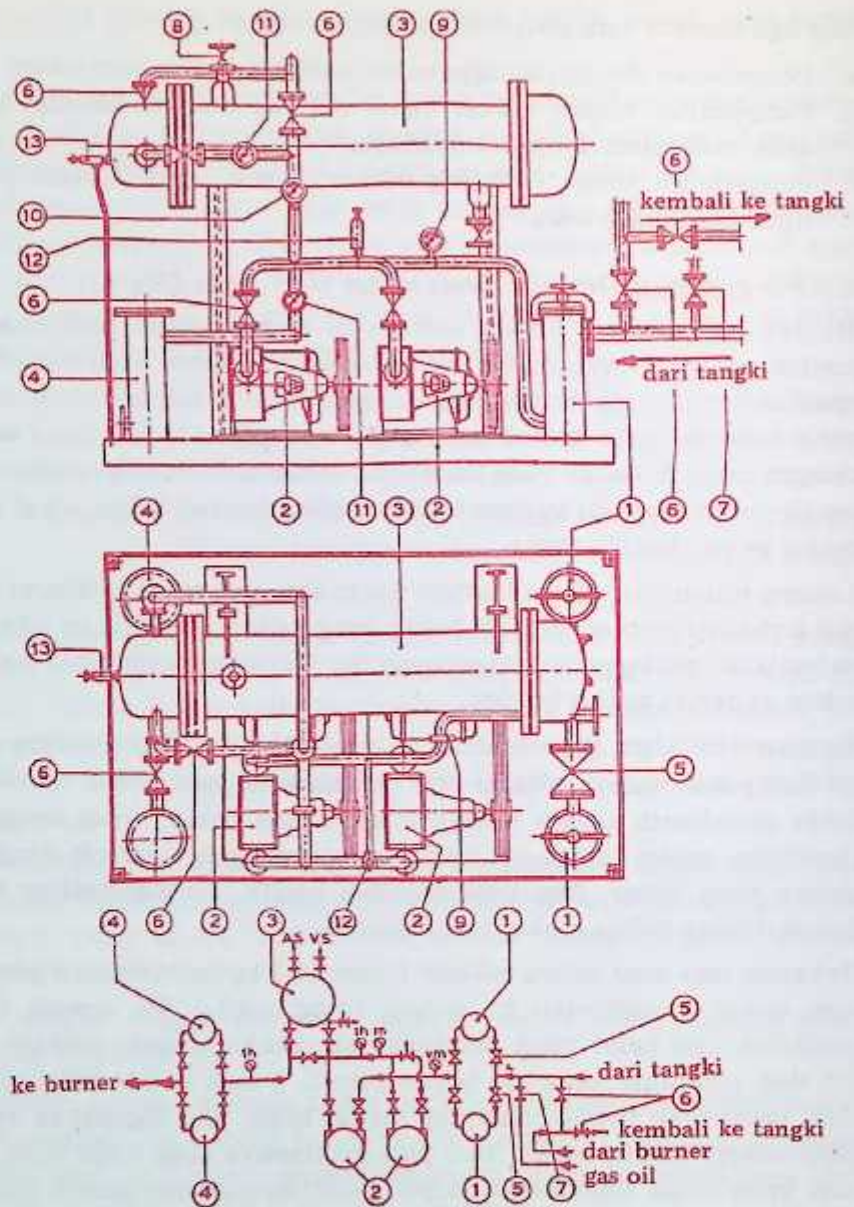
Minyak bakar lewat lubang saluran di tengah-tengah pembakar, yang jumlah pengalirannya diatur oleh klep jarum. Udara atau uap dialirkan melalui pipa yang konsentris dengan lubang saluran minyak bakar yang terletak pada mulut pembakar, terdapat lubang-lubang semprot, dengan minyak bakar yang baru saja ke luar dari lubang salurannya, dipecah-pecah menjadi butiran-butiran kabut minyak bakar, tepat dimuka mulut pembakar (*burner*).

Lubang-lubang untuk ke luarnya udara atau uap arahnya dibuat tangensial terhadap berkas minyak bakar yang ke luar dari lubang salurannya, sedemikian sehingga terjadi pusaran (*swirl*) campuran minyak bakar dan udara di depan mulut burner.

Dengan demikian, gaya sentrifugal yang timbul akibat terjadinya pusaran campuran minyak bakar dan udara di depan mulut burner akan lebih membantu dalam mengabutkan bahan bakar, yang dengan cara demikian, maka bunga api yang terjadi menjadi pendek dengan diameter yang besar, dan pencampuran antara butiran-butiran minyak bakar dengan udara makin baik hasilnya.

Tekanan uap atau udara sekitar 1 sampai 3 kg/cm². Namun pemakaian uap untuk pengabutan ini sangat tinggi sekitar 2% sampai 3% dari produksi uap ketel yang bersangkutan, bahkan dalam praktek sekitar 5% dari produksi uap pada beban penuh. Untuk beban ketel yang rendah, prosentase penggunaan uap makin tinggi. Bila digunakan uap yang dipanaskan lanjut, maka hasil pembakarannya akan lebih baik, karena uap yang telah dipanaskan lanjut tidak banyak mengambil panas dari api di dalam tungku.

Keberatannya ialah, uap yang digunakan untuk pengabutan jenis ini, tidak dapat dimanfaatkan lagi, sehingga untuk ketel uap yang penyediaan air-tawarnya terbatas, keadaan demikian tadi akan menimbulkan kesukaran-kesukaran dalam hal supply air tawar untuk suplesi pengisian air ketel.



INSTALASI UNTUK PENGABUTAN BAHAN BAKAR

- | | |
|----------------------------|---|
| 1 = Saringan isap | 8 = Keran uap |
| 2 = Pompa-pompa | 9 = Meteran vakum |
| 3 = Pemanasan awal | 10 = Manometer |
| 4 = Saringan tekan | 11 = Termometer |
| 5,6,7 = Keran-keran minyak | 12 = Overflow line dari saluran tekan ke saluran isap |
| 13 = Keran overflow | |

Dengan demikian, kebanyakan pembakar jenis ini tidak lagi menggunakan uap sebagai media pengabutannya, melainkan diganti dengan udara bertekanan, karena dengan melalui pembangkit listrik untuk keperluan membuat udara bertekanan, kebutuhan uapnya tidak begitu besar dibanding dengan bila uap tersebut langsung ke luar dari ketel uap digunakan untuk pengabutan minyak bakar.

b. Pengabutan Tekan:

Dalam hal ini, pengabutan minyak bakar dilakukan dengan cara menekan minyak bakar dengan tekanan sekitar 20 kg/cm^2 dan maksimum 25 kg/cm^2 , melalui lubang-lubang halus dalam pengabut.

Prinsipnya hampir sama seperti pada pengabutan dengan uap atau udara. Melalui lubang-lubang tangensial b, minyak bakar dipusar, sehingga ke luarnya dari mulut pembakar akan berupa kerucut kabut minyak bakar yang berpusar.

Biasanya sudut kerucut api akan membesar bila supply minyak bakar berkurang. Hal ini mengurangi fleksibilitas pengaturan pembakar bila plat puser tetap sama. Sering-sering dalam praktek dipasang pembakar cadangan dengan plat puser yang berlainan. Sehingga pengaturan beban dilakukan dengan mematikan pembakar dengan plat puser yang lama, dan diganti dengan pembakar dengan plat puser berikutnya. Penggantian pembakar-pembakar tersebut hanya membutuhkan waktu kurang dari 1 menit.

Kemudian dicari suatu konstruksi, tanpa mengganti-ganti pembakar dengan plat puser yang satu ke pembakar dengan plat puser yang lain, dicapai fleksibilitas pengaturannya sebesar mungkin. Yaitu dengan jalan jumlah supply minyak bakar ke pengabut dijaga tetap konstan, namun pengaturannya dilakukan dengan jalan minyak bakar yang berlebihan diatur sebagian disalurkan kembali ke tangki minyak bakar, atau ke saluran isap pompa minyak bakar.

Plat puser dibuat dari bahan yang sangat keras misalnya Wolfram-Carbida yang tahan aus serta panas.

c. Pengabutan Putar (Rotating Burners):

Minyak bakar dialirkan masuk ke suatu ruang. Di dalam ruang tersebut terdapat ujung poros yang berlubang, dan pada ujung poros yang lain terdapat mangkokan pengabutan (atomiser or spray cup). Poros berlubang beserta mangkokan pengabutan, diputar dengan kecepatan putar yang tinggi, sekitar 3450 putaran per menit, yang kadang-kadang mencapai 6000 putaran/menit.

Minyak bakar disemprotkan ke dinding mangkok pengabutan yang berputar tersebut, dan akan diputar di sekeliling dinding mangkok dan disemprotkan ke dalam tungku oleh udara penghembus.

Udara primer tersebut, yang banyaknya sekitar 20% dari jumlah udara sebenarnya yang dibutuhkan untuk pembakaran, dihembuskan oleh sebuah Fan yang porosnya menjadi satu dengan poros mangkokan, dengan tekanan sebesar 150 mm kolom air.

22. Pembakar Dengan Bahan Bakar Gas:

Pembakaran bahan bakar berupa gas, memberikan kemungkinan pencampuran bahan bakar dan udara dapat merata secara molekuler, sehingga dapat dicapai pembakaran yang sempurna, dengan angka kelebihan udara yang kecil.

Untuk gas-gas dengan nilai pembakaran (*heating value*) yang tinggi, digunakan pembakar-pembakar seperti halnya pembakar Bunsen (*Bunsen burners*). Untuk gas-gas dengan nilai pembakaran yang rendah, misalnya gas tanur tinggi (*blast furnace gasses*), maka di sekeliling burner berganti-ganti terdapat celah-celah gas dan udara. Lihat gambar.

Agar pencampuran bahan bakar gas dan udara dapat berlangsung dengan cepat, maka diusahakan arah celah-celah tersebut dibuat tangensial. Adapun kadar CO_2_{max} lebih tinggi, sedangkan untuk gas dapur kokas (*cokes oven gases*), kadar CO_2_{max} lebih rendah dari yang terdapat pada bahan bakar serbuk batubara.

23. Konstruksi Dinding Tungku:

Dahulu dinding tungku terbuat dari pasangan batu tahan api. Namun bahan tersebut sebenarnya tidak begitu tahan terhadap temperatur untuk beban tungku yang tinggi, lebih-lebih bila tungku tidak didinginkan. Lagi pula abu yang terbentuk karena pembakaran bahan bakar dan dalam keadaan cair akan merusakkan tembokan-tembokan yang terbuat dari pasangan batu tahan api, dengan membentuk persenyawaan dengan batu tahan api tersebut, dengan titik cair yang lebih rendah daripada titik cair batu tahan api, atau dikatakan bahwa tembokan batu tahan api termakan oleh abu.

Oleh karena itu, harus diusahakan agar temperatur tembokan tidak begitu tinggi, dan di bawah titik cair abu. Titik cair sekitar 1000°C dengan indeks pencairan atau melting indeks = 0 dan sekitar 1400°C untuk indeks pencairan = 12.

Dinding-dinding tungku harus dapat menyerap panas dari tungku, sedemikian sehingga gas asap pada saat meninggalkan tungku menuju daerah konveksi, temperaturnya telah menurun hingga di bawah temperatur pelem bekan abu, yaitu sekitar 100°C sampai 150°C di bawah titik cair abu, agar tidak menimbulkan kesukaran-kesukaran karena melekat dan membekunya abu cair pada dinding-dinding pipa yang disebut *Birdnesting*.

Angka perambatan panas λ batu tahan api sangat rendah, yang pada temperatur 1000°C sekitar $3,433 - 4,983 \text{ KJ/m.jam. }^{\circ}\text{C}$ atau sekitar $0,82 - 1,19 \text{ Kkal/m.jam.}^{\circ}\text{C.}$, sehingga dengan demikian untuk batu tahan api dengan dimensi yang biasa tidak akan banyak menyerap panas. Hanya bila tebal lapisan batu tahan api 20 mm, dinding batu tahan api tersebut baru dapat menyerap panas.

Karena itu dinding tungku konstruksinya bisa dipilih salah satu dari beberapa alternatif sebagai berikut:

- a. Dinding Bailey (*Bailey walling*)
- b. Dinding yang dilapisi oleh selapis pipa-pipa air yang telanjang atau terbuka.
- c. Dinding yang dilapisi oleh pipa-pipa air dengan sirip-sirip (*fin pipes*).
- d. Dinding yang dilapisi oleh pipa-pipa air yang berduri (*studtubes*) dan disemen dengan batu tahan api yaitu *chromerts*.

a. *Dinding Bailey atau Bailey Walling:*

Dinding Bailey terdiri dari pipa-pipa penguap (*evaporator's pipes*) yang terdiri vertikal pada jarak-jarak tertentu, melalui pipa-pipa penguap tersebut air ketel diubah menjadi uap. Pada pipa-pipa penguap tersebut dipasang blok-blok Bailey (*Bailey blocks*) yang diikat dengan baik pada pipa-pipa tersebut dengan menggunakan kelem-kelem atau baut-baut pengikat. Bailey Blocks tersebut terbuat dari besi tuang, yang kadang-kadang ada yang dilapis dengan batu tahan api yang tipis, dan menghadap ke arah api di dalam tungku.

Keuntungan dari penggunaan blok-blok Bailey tersebut ialah di suatu tempat atau lokasi pada dinding perlu banyak-banyak menyerap panas atau tidak, maka blok-blok Bailey tersebut dipasang merata ke seluruh permukaan dinding pada lokasi tersebut, atau sebagian-sebagian tidak dipasang blok-blok Bailey tersebut. Hal ini dimaksudkan, misalnya pada suatu lokasi dinding perlu diserap panas banyak-banyak untuk menghindari terbentuknya *birdnesting*, misalnya di daerah terakhir dari tungku dekat perbatasan daerah konveksi.

Atau sebaliknya, bila pada suatu lokasi dinding tidak perlu diserap panas misalnya di daerah yang dekat dengan burner, maka Bailey blocks tersebut tidak perlu dipasang.

Keberatan dalam penggunaan Bailey blocks, ialah bila bidang singgung pipa-pipa kurang baik, misalnya kurangkeras menyikatnya, maka penghantaran panasnya juga kurang baik pula, sehingga blok-blok tersebut akan mudah terbakar.

Pada ketel uap yang menggunakan rangka bakar rantai, Bailey blocks tersebut banyak digunakan pula. Bailey blocks yang dilapisi batu tahan api yang tipis, daya serap panasnya sekitar $167.500 - 293.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam}$. Sedangkan untuk Bailey blocks yang terbuat dari besi tuang saja, daya serap panasnya $565.000 - 691.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam}$.

Sebagai perbandingan daya serap panas untuk baris pertama dari berkas pipa-pipa penguap pada ketel seksi, ketel yarrow, ketel pipa terjal, ketel-D. Berkas pipa-pipa tersebut menerima panas baik secara pancaran maupun secara konveksi sebesar $620.000 - 921.000 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{jam}$.

b. Dinding Tungku Yang dilapisi Oleh Sebaris Pipa-pipa Air Yang Telanjang:

Dinding tungku yang dilapisi oleh sebaris pipa-pipa air penguap yang telanjang, dengan jarak tertentu antara masing-masing pipa-pipa penguap tersebut, dapat dilihat dalam Gambar.

Bila d adalah diameter pipa-pipa, dan s adalah jarak antara garis tengah pipa-pipa, maka Fraksi Pendinginannya atau Cooling Fraction ialah $d : s$; Fraksi Pendinginan $\psi = d : s$ tidak tergantung dari jarak antara pipa-pipa dengan tembokan-tembokan tungku. Jarak ini hanya berpengaruh terhadap distribusi temperatur pada seluruh tembokan.

Bila jarak antara garis tengah pipa-pipa s sama dengan d maka fraksi pendinginannya $\psi = 1$;

Keberatan terhadap konstruksi ini ialah fraksi pendinginannya tidak konstan pada dinding tembokan yang temperturnya lebih rendah dari titik cair abu, abu akan melekat di situ. Selama abu yang melekat pada tembokan tungku belum mencapai pipa-pipa air penguap tersebut, maka tidak akan berpengaruh terhadap harga fraksi pendinginannya.

Tetapi bila abu tersebut telah mencapai celah-celah di antara pipa-pipa tersebut, maka fraksi pendinginannya akan menurun, sehingga temperatur tungku akan naik, dan akan lebih memberikan kemungkinan terbentuknya birdnesting pada baris pipa-pipa pertama di daerah

konveksi. Selain itu, temperatur pemanas lanjut (superheater) akan naik pula.

Namun sebenarnya, keadaannya tidak terlalu demikian membahayakan, karena berlangsungnya keadaan yang secara otomatis sebagai berikut: Bila temperatur tungku makin naik, lapisan abu yang melekat pada dinding tembokan tungku justru akan mencair lagi sebagian, sehingga fraksi pendinginannya kembali membesar atau makin besar lagi. Dengan demikian keadaan tadi dapat berfungsi sebagai pembatas temperatur tungku (furnance temperatur levelling) pada berbagai beban.

c. Dinding Tungku Yang Dilapisi Pipa-pipa Air Yang Bersirip.

Dinding tungku yang dilapisi dengan pipa-pipa air bersirip, dengan sirip-sirip yang saling bertumpangan (*overlapping*), maka fraksi pendinginannya = 1. Pipa-pipa bersayap tersebut pada kedua belah sisi pipa dilas dengan pita baja yang lebarnya 25 mm, sepanjang pipa-pipa tersebut, yang merupakan sayap atau sirip dari pipa tersebut.

Antara sirip pipa yang satu dengan sirip pipa yang lain, saling menutup atau bertumpangan (*overlap*), sehingga pancaran panas api di dalam tungku tertahan oleh pipa-pipa air penguap tersebut dengan pita-pita bajanya sebagai penyerap panas, dan tidak langsung mengenai dinding tembokan tungku.

Lebar pita baja tidak lebih dari 25 mm, untuk memungkinkan menghindari pecah terbakarnya sirip-sirip baja tersebut. Fraksi pendinginannya dalam hal ini konstan = 1 sekalipun ada lapisan abu yang melekat.

Konstruksi dinding tungku yang dilapisi oleh pipa-pipa bersirip tersebut kemudian dikembangkan lebih jauh menjadi dinding tungku yang kedap udara atau kedap gas (*gas tight*), sehingga memungkinkan api di dalam tungku dibuat bertekanan tinggi, sekitar 3,5 — 6 kg/cm².

Sirip-sirip pipa penguap tersebut, disambung-sambung dilas antara yang satu dengan yang lainnya, sehingga menjadikan kedap udara atau kedap gas, yang disebut dinding membran (*membrane walling*), dan api di dalam tungku dibuat bertekanan sekitar 3,5 — 6 kg/cm². Dengan api yang bertekanan tinggi tersebut, maka kerapatan (ρ) dan kecepatan api atau gas asap tersebut menjadi besar, sehingga angka perpindahan panas dari api ke air di dalam pipa menjadi tinggi sekali sekitar 837.000 — 1.256.000 KJ/m².jam. Sedangkan beban tungku dengan mudah mencapai 33.500.000 KJ/m³.jam.

Dinding tungku yang serupa ini, yang berupa dinding membran (*membrane walling*) terdapat pada kabel jenis ketel uap dengan tungku ber-

tekanan (*pressurized furnace boiler*). Karena jumlah perpindahan panas yang tinggi tersebut, atau karena beban tungku sedemikian besarnya, maka dimensi ketel uap menjadi lebih ringkas (*compact design*).

Sehingga penggunaan dinding membran (*membrane walling*) untuk ketel-ketel yang tungkunya bertekanan tinggi makin banyak digunakan dewasa ini, karena penghematan dalam biaya material yang diperoleh dapat mengimbangi atau jauh mengimbangi kenaikan biaya di bidang perencanaan dan teknologi pembuatannya. Lebih-lebih dengan makin meningkatnya harga-harga logam dewasa ini.

d. *Dinding Tungku Yang Dilapisi Pipa-pipa Air Penguap Berduri (Stud Pipes).*

Pipa-pipa penguap sebagian atau seluruh permukaannya dilas dengan buhul-buhul atau duri-duri yang terbuat dari potongan-potongan besi atau baja, dengan diameter 10 mm dan panjangnya sekitar 15 mm, yang berfungsi untuk mengikat semen tahan api yang terbuat dari *Chrome-Ore* (Biji Chromom). Biji Chromom dilekatkan di antara pipa-pipa berduri tersebut dalam keadaan masih lunak, yang berfungsi sebagai pelapis pipa-pipa air tersebut.

Dalam hal ini dimaksudkan agar dinding tungku di daerah yang berpipa air dilapisi dengan biji Chromom tersebut tidak terlalu banyak menyerap panas, bahkan memantulkan panas dari api. Ini terdapat terutama di daerah sekitar pembakar, bila bahan bakar yang digunakan dalam ketel ialah serbuk batubara atau minyak bakar, atau di tembokan tungku dengan maksud untuk memantulkan pancaran panas dari api ke-rangka bakar. Lebih-lebih bila yang dibakar ialah jenis batubara yang sukar terbakar seperti batubra kurus.

Pada umumnya penyerapan panas oleh dinding tungku tidak boleh terlalu banyak berlebihan, hanya cukup untuk menjaga agar temperatur gas asap pada saat meninggalkan tungku tidak lebih dari 1050°C . Bila temperatur api terlalu banyak didinginkan, dapat mengganggu pembakaran, terutama bila yang digunakan serbuk batubara kurus.

Ada pula suatu cara untuk mengatasi kesukaran-kesukaran yang disebabkan rendahnya titik cair abu, kurang dari 1350°C , dan kadar abu yang tinggi, maka abu semacam itu dibuang masih dalam keadaan cair, yaitu di dalam tungku yang disebut *slag-tap-furnace*.

Dalam hal ini, tungku dibagi menjadi dua bagian. Pada bagian tungku yang pertama, pipa-pipa penguap dilapisi oleh bahan yang sangat tahan api (Biji Chromom atau *Chromore*) dimaksudkan untuk memper-

oleh temperatur api yang tinggi. Bagian pertama tungku semacam ini dipisahkan dari tungku bagian kedua dengan suatu tirai yang terdiri dari pipa-pipa penguap yang dilapisi dengan bahan yang sangat tahan api (Biji Chrom atau Chromore), antara pipa-pipa tersebut agak jarang jaraknya.

Di bagian pertama tungku tersebut, abu akan mencair dan di buang ke luar, yang dengan demikian abu yang terbang menjadi sedikit karenanya. Namun mengandung pula keberatan-keberatan yaitu bila beban rendah, abu cair yang terbentuk di situ akan membeku yang akan membawa kesukaran-kesukaran dalam pengoperasiannya.

Untuk mengatasi kesukaran-kesukaran semacam ini, di Amerika banyak dibuat tungku pusar (*cyclone furnace*) sebagai bagian dari tungku.

Bagian pertama tungku dibuat silindris. Dinding-dinding tungku terdiri dari pipa-pipa penguap berduri yang dilapisi dengan biji Chrom, yang membentuk setengah lingkaran, dengan di bagian bawah terdapat tabung pembagi (*header*) dari pipa-pipa yang membentuk dinding tungku pusar (*cyclone furnace*) tersebut.

Batubara bukan dalam keadaan serbuk dihembuskan ke dalam tungku, melainkan dalam bentuk butiran-butiran yang besarnya maksimum $\frac{1}{4}$ " atau 6 mm, yang disemprotkan ke dalam tungku pusar tersebut bersama-sama dengan udara primer secara tangensial, dengan kecepatan semprotan sebesar 100 — 150 meter/detik.

Bagian dalam dinding tungku pusar tersebut, selama ketel bekerja, akan selalu dilapisi oleh lapisan abu cair yang kenyal. Butiran-butiran batubara sebagian terbakar dalam keadaan terapung-apung di atas abu cair tersebut, sebagian lagi ada yang melekat pada permukaan terak dan terbakar sehingga habis.

Di samping udara primer, dihembuskan pula dengan arah tangensial ke dalam tungku pusar tersebut udara sekunder yang dipanaskan dengan temperatur yang tinggi serta dengan kecepatan hembusan yang besar pula, sedangkan udara tersier dihembuskan secara aksial ke dalam tungku pusar tersebut.

Tungku pusar (*Cyclone furnace*) beriemensi sekitar 2,40 meter diameternya, dengan panjang 3,35 meter. Sedangkan diameter lubang yang menuju tungku pusar ialah 1 meter, dengan beban tungku sebesar $6,28 \times 10^6$ KJ/m³.jam.

Tekanan di dalam tungku pusar sekitar 350 mm kolom air, dan di bagian kedua dari tungku sekitar 280 mm kolom air, sehingga tidak diperlukan Fan Tarik (*Induced draught fan*).

Sekitar 80% dari abu yang tertampung dalam keadaan cair, dan 10% abu dalam keadaan terurai, sedangkan selebihnya sekitar 10% yang terbang terhembus lewat cerobong asap.

Dibandingkan dengan penampungan abu padat pada pembakaran dengan serbuk batubara, maka dengan sistem penampungan abu padat hanya terkumpul sekitar 15% – 35% abu padat di sumuran abu (ash pit), sedangkan sisanya terhembus lewat cerobong.

Dengan sistem pembuangan abu cair dari dalam tungku seperti telah diuraikan, maka tugas alat penangkap debu setelah ke luar dari pemanas udara, atau sebelum ke luar dari cerobong asap, tidak begitu berat lagi. Dengan demikian orang bahkan berusaha untuk menampung abu dalam keadaan cair sebanyak-banyaknya di dalam sumuran abu, sehingga dengan demikian tidak perlu lagi dipasang penangkap debu sebelum ke luar dari cerobong asap.

Keuntungan lainnya dengan membuang abu dalam keadaan cair dari dalam tungku ialah pipa-pipa ketel tidak cepat menjadi kotor karena dilapisi oleh abu cair yang membeku. Dengan demikian jarak antara pipa-pipa bisa lebih berdekatan sehingga dimensi tungku atau ketel bisa lebih kecil sehingga ketel menjadi lebih murah investasinya.

Ketel dengan tungku pusat tersebut, tidak memerlukan penggiling batubara (coal mill), namun perlu peralatan untuk meremukkan batubara atau crusher. Fan-fan penghembus yang menghembuskan batubara pasir ke dalam tungku pusat diperlukan dengan tekanan yang cukup tinggi, sekitar 750 – 2000 mm kolom air, sehingga untuk Fan-fan tersebut diperlukan energi yang 25% lebih besar dari ketel dengan pembakaran serbuk batubara.

Ketel-ketel uap yang besar-besar, kadang-kadang terdapat 4 sampai 6 buah tungku pusat.

Adapun beban tungku untuk berbagai-bagai jenis pembakaran ialah sebagai berikut:

Jenis Pembakar	Beban Tungku Dinyatakan Dalam KJ/nm ³ .jam.
a. Underfeed Stoker besar	1.256.000 – 1.675.000
b. Rangka bakar rantai	837.500 – 1.256.000
c. Dengan Serbuk batubara	628.000 – 837.500
d. Dengan tungku pusat (Cyclone Furnace)	1.256.000
e. Dengan Minyak bakar	2.093.500

24. Reaktor Nuklir:

Reaktor pemecahan atau pembelahan inti ialah peralatan reaksi inti berantai yang berlangsung dengan terkendali.

Dalam kondisi operasi yang normal, suatu reaksi pembelahan inti hanya menghasilkan satu pemecahan inti saja pada proses pembelahan inti berikutnya sepanjang jalur reaksi inti berantai, atau dengan kata lain dinyatakan bahwa: Faktor Pergandaan (*multiplying factor*) reaksi inti ialah satu atau 100%.

Tipe reaktor yang paling umum dikenal ialah *Thermal Reactor* dengan reaksi inti berantai dilakukan oleh *Thermal Neutrons* atau neutron-neutron lambat. Thermal reactor diisi dengan isotop bahan inti yang dapat dibelah, yaitu Uranium-235, dengan moderator berupa graphite, sedangkan medium pendingin untuk mendinginkan teras reaktor (*reactor core*) ialah AIR.

Dalam reaktor tingkat sedang (*intermediate reactor*), reaksi inti berantai dilakukan oleh neutron-neutron dengan energi tingkat sedang. Reaktor tingkatan sedang tersebut diisi dengan bahan inti Uranium, dengan moderator Beryllium (B_e) dan medium pendingin berupa Natrium Cair.

Dalam reaktor cepat (*fast reactor*), reaksi inti berantai dilakukan oleh neutron-neutron cepat (*fast neutrons*), sehingga tidak digunakan moderator untuk memperlambat reaksi atau untuk mengurangi jumlahnya neutron-neutron yang terbentuk. Reaktor cepat diisi dengan salah satu dari kombinasi-kombinasi bahan inti yang dapat dibelah, bahan inti pembiak, medium pendingin dan bahan struktur (*structural material*) dalam teras reaktor (*reactor core*).

Pada pembelahan neutron cepat, dihasilkan energi, selain itu, pada waktu yang bersamaan dihasilkan banyak-banyak bahan inti yang dapat dibelah, lebih banyak dari yang dibutuhkannya. Oleh karena itu, reaktor semacam ini disebut: *reaktor pembiak cepat* atau *fast breeder reactor*.

Reaktor Thermal pada pokoknya terdiri dari rakitan (*assembly*) sejumlah susunan bahan inti yang dapat dibelah dan bahan moderator yang tidak dapat dibelah, yang tersusun dalam teras reaktor dan mampu untuk menjamin terselenggaranya reaksi inti berantai. Lihat Gambar-gambar.

Bejana logam baja yang merupakan rumah teras reaktor, dan mampu menahan tekanan yang tinggi. Di dalam teras reaktor, setiap atom Uranium yang dapat dibelah, rata-rata akan menghasilkan 2,5 neutron.

Salah satu dari neutron-neutron tersebut diserap oleh atom-atom lain yang dapat dibelah untuk melanjutkan proses pembelahan inti berantai berikutnya.

Untuk menyerap panas yang terbentuk dari reaksi pembelahan inti tersebut, digunakan bahan pendingin reaktor (*reactor coolant*). Selain medium pendingin, juga diperlukan sejumlah perlengkapan-perengkapan dan peralatan-peralatan untuk mengatur dan mengawali (*starting*) reaksi inti berantai tersebut, serta diperlukan pula peralatan-peralatan yang dapat menghentikan serta dapat menjaga agar reaksi inti berantai berlangsung pada taraf yang dikehendaki, yang disebut batang-batang pengendali (*control rods*).

Untuk melindungi para petugas operator terhadap radiasi sinar-sinar Gamma dan neutron-neutron yang dihasilkan oleh reaktor, digunakan bangunan pelindung yang kedap sinar tembus.

Dewasa ini terapat berbagai jenis bahan-bahan yang dapat digunakan sebagai: Medium Pendingin; Moderator; Elemen bahan inti; dan Sistem Pengendaliannya (*Control Systems*), sehingga terdapat sekian banyak jenis-jenis reaktor.

Dinding bejana reaktor (*reaktor vessel*) merupakan tangki baja yang berdinding tebal.

Bagian bawah bejana reaktor digunakan sebagai penahan teras reaktor, dan batang-batang pengendali (*control rods*) menyembul ke luar ke atas dari tutup bejana. Bejana reaktor berfungsi sebagai penyekat sebagian radiasi teras reaktor.

Sebagian besar dari reaktor inti menggunakan batang-batang inti padat, yang digunakan sebagai bahan inti yang dapat dibelah misalnya: Logam Uranium; Campuran aluminium-uranium (*U-Al-Alloy*); Butiran-butiran Oksida Uranium (*Uranium Oxyde Pellets*) atau karbida uranium yang ditanamkan atau dibenamkan di dalam graphite.

Setiap batang-batang elemen bahan inti, terbungkus dalam kotak logam atau tabung logam yang disebut pembungkus (*cladding*). Kulit atau Cladding tersebut mencegah menghilangkan produk-produk pembelahan inti (*fission products*) yang belum siap untuk menyerap neutron-neutron.

Ada reaktor inti yang menggunakan logam Uranium sebagai elemen bahan inti yang dilapisi oleh Aluminium dengan kemurnian yang tinggi. Sebagai pembungkus (*cladding*) digunakan Campuran Zirconium (*Zirconium Alloy*) yang tahan terhadap temperatur yang tinggi, dan dikelilingi oleh air pendingin yang bertekanan, serta dilengkapi dengan penyerap neutron bertaraf rendah.

Ada pula reaktor inti yang lain, yang menggunakan elemen bahan inti yang terbuat dari Uranium dan Dioksida Uranium yang dibungkus oleh Campuran Zirconium (*Zirconium Alloy Cladding*).

Ada pula reaktor yang menggunakan elemen bahan inti berupa butiran-butiran (*pellets*) Dioksida Uranium yang dibungkus dalam pipa-pipa baja tahan karat (*Stainless steel*) agar tahan temperatur yang lebih tinggi.

Baja tahan karat atau logam-logam yang tahan temperatur yang tinggi lainnya digunakan sebagai pembungkus (*cladding*) untuk reaktor-reaktor yang didinginkan oleh gas-gas pendingin. Sebagai elemen bahan inti digunakan Uranium yang dibenamkan dalam graphite dan sebagai pembungkusnya digunakan graphite (*graphite cladding*), dan sebagai media pendinginannya digunakan Natrium Cair. Reaktor semacam ini disebut reaktor dengan moderator Graphite.

Setelah Uranium-235 yang dapat dibelah yang terdapat di dalam Uranium alamiah terpakai habis di dalam reaktor, maka sebagai penggantinya digunakan Plutonium-239 (Pu-239) yang juga dapat dibelah yang terbentuk dari Uranium-238 yang terdapat di dalam Uranium alamiah.

Dengan demikian maka reaktor tersebut masih dapat tetap beroperasi, tanpa mengubah keseluruhannya dalam penggantian bahan-bahan inti. Agar ekonomis, maka produk-produk pembelahan inti harus dikeluarkan secara berkala dari reaktor, karena produk-produk pembelahan inti tersebut menyerap neutron-neutron, sehingga dengan demikian dapat mengurangi jumlah neutron-neutron, yang digunakan untuk menjaga kontinuitas reaksi inti berantai, serta memproduksi Plutonium.

Plutonium itu sendiri juga harus secara periodik dikeluarkan dari reaktor, karena Plutonium tersebut dapat dimurnikan, dan dapat digunakan sebagai bahan inti pembelahan pada reaktor yang lain.

Perlu ditambahkan di sini, bahwa bahan inti Uranium pada umumnya harus dikeluarkan dari reaktor dan diganti, sebelum semuanya habis terpakai, mengingat adanya kemungkinan merusaknya bahan-bahan inti, atau kehilangan daya untuk menjaga kontinuitas reaksi inti berantai tersebut.

Dengan demikian konsekuensinya ialah pengoperasian reaktor uranium harus didampingi dengan adanya suatu instalasi untuk pemrosesan ulang (*re-processing*) bahan inti di dekatnya.

Dalam instalasi proses ulang bahan inti tersebut, Uranium dan Pluto-

nium dimurnikan untuk menghasilkan bahan inti baru bagi reaktor tersebut. Instalasi tersebut juga harus dapat memproses produk-produk pembelahan inti menjadi berbagai-bagai isotop radioaktif, yang sangat berharga untuk berbagai keperluan.

Suatu masalah ialah menghilangnya bahan inti secara berangsur-angsur selama reaktor beroperasi. Masalah ini dapat diatasi dengan jalan penggunaan bahan inti yang berisikan bahan inti yang dapat dibelah, dan bahan inti pembiak.

Bahan inti pembiak: ialah bahan inti yang dapat diubah menjadi bahan inti yang dapat dibelah. Misalnya Thorium-232 ialah bahan inti pembiak yang dapat diubah menjadi U-233 yang dapat dibelah dan menyerap Neutron. Demikian juga U-238 merupakan bahan inti pembiak yang dapat diubah menjadi U-239 yang dapat dibelah, dengan cara transformasi yang sama.

Bila bahan inti pembiak (*Fertile material*) dan bahan inti yang dapat dibelah (*fissionable material*) dengan perbandingan tertentu digunakan dalam suatu reaktor, maka umur penggunaan bahan inti reaktor tersebut dapat diperpanjang.

Ada reaktor yang menggunakan campuran homogen antara Oksida Uranium-235 yang sangat dipersubur (*enriched*) serta Thorium, dan ditempatkan di dalam pipa-pipa baja tahan karat. Dengan Uranium yang dipersubur (*enriched*), sebagian dari U-238 diubah menjadi Pu-239, sehingga dengan demikian meningkatkan jumlah bahan inti yang dapat dibelah.

Suatu cara yang lain ialah dengan cara membuahi sejumlah kecil batang-batang elemen bahan inti yang dipersubur yang ada di antara matrix Uranium alamiah. Elemen-elemen inti pembuah harus sekali-sekali diganti dengan yang baru, karena melemahnya reaktivitasnya, tetapi Matriks Uranium Alamiah (*Natural Uranium Matrix*) masih dapat digunakan dan dibiarkan tetap ada di teras reaktor, untuk jangka waktu yang lama, dan masih dapat digunakan dengan efisiensi yang cukup tinggi.

Di dalam teras reaktor, moderator digunakan untuk memperlambat neutron-neutron terhadap energi pembelahannya semula. Hal tersebut dapat berlangsung karena neutron-neutron dengan energi yang lebih rendah, berkemungkinan lebih besar untuk diserap dalam bahan inti, untuk menghasilkan pembelahan-pembelahan inti lebih lanjut. Neutron-neutron yang diperlambat tersebut, diperlukan dalam reaksi inti berantai, sehingga dengan demikian moderator harus menyerap sedikit mungkin neutron-neutron tersebut.

Bila jumlah relatif bahan moderator bertambah, maka energi neutron-neutron akan menurun.

Unsur-unsur yang lebih berat dari karbon atau zat arang, merupakan moderator yang kurang baik, karena tidak cukup besar memperlambat neutron pada setiap benturan atau tumbukan. Jika salah satu dari unsur-unsur yang berat ini digunakan sebagai moderator, maka neutron-neutron akan diserap oleh moderator atau hilang pada bahan-bahan di sekitar yang mengelilinginya, sebelum cukup bertumbukan untuk mereduksi neutron cepat menjadi thermal neutron atau neutron lambat.

Kenyataan menunjukkan bahwa: Hidrogen, Deuterium atau Hidrogen berat, Beryllium, Karbon atau campuran-campurannya, merupakan jenis-jenis moderator yang jenisnya sangat terbatas. Dengan menggunakan moderator-moderator tersebut, perbandingan antara daya perlambatan neutron terhadap daya serap neutron harus sedemikian sehingga cukup banyak neutron-neutron yang mencapai energi thermal dan diserap pada bahan-bahan inti yang dapat dibelah, untuk mempertahankan kelangsungan reaksi inti berantai.

Panas yang ditimbulkan sebagai akibat dari reaksi inti berantai dipindahkan kepada media pendingin, yang di antara lain ialah: Air biasa, Air berat (H_2O_2), Logam Cair, Garam-garam cair, ataupun Gas.

Airbiasa (H_2O) yang disebut air ringan, digunakan sebagai media pendingin untuk reaktor-reaktor air bertekanan (*pressurized water reactor* = *P.W.R.*) atau untuk pendingin reaktor air mendidih (*boiling water Reactor* = *B.W.R.*)

Air berat (H_2O_2) digunakan sebagai media pendingin reaktor air berat (*heavy water reactor* = *H.W.R.*).

Logam-logam cair yang digunakan sebagai media pendingin reaktor antara lain ialah: Logam Natrium Cair, Campuran Kalium-Natrium (*Sodium-Potassium-Alloy*), Lithium dan Air Raksa (Hg). Ada reaktor yang menggunakan moderator graphite dengan pendingin Natrium Cair. Ada pula reaktor pembiak cepat (*fast breeder reactor*) yang didinginkan oleh Natrium Cair.

Garam cair digunakan pula sebagai pendingin reaktor dengan moderator Graphite. Pada suatu reaktor garam cair, bahan inti yang dapat dibelah (*fissile material*) dan bahan inti pembiak (*fertile material*) dalam bentuk garam fluoride yang dilarutkan dalam pendingin; sebagai pendingin digunakan campuran Fluorida Lithium Cair dan Fluorida Beryllium Cair. Cairan-cairan tersebut berfungsi baik sebagai bahan inti pembelah, maupun sebagai pendingin reaktor.

Gas Helium (He) dan Dioksida Karbon (CO_2) digunakan juga sebagai pendingin reaktor, yaitu pada reaktor dengan moderator Graphite.

Untuk pengendalian reaksi inti berantai, biasanya pada Teras Reaktor ditempatkan atau dipasang bahan-bahan yang dapat menyerap neutron-neutron dengan kapasitas serap yang besar. Cadmium merupakan bahan yang banyak menyerap neutron, dan Lembaran Cadmium banyak digunakan sebagai pengendali reaksi-reaksi inti berantai. Batang-batang Cadmium merupakan bahan pengendali yang khas dengan cara menyisipkannya atau mencabutnya dari teras reaktor, untuk mengatur taraf-taraf reaksi inti berantai di dalam teras reaktor tersebut.

Bila batang-batang Cadmium dalam posisi dimasukkan atau disisipkan dalam teras reaktor, maka rata-rata kurang dari sebuah neutron yang kembali dilepaskan untuk pembelahan inti berikutnya, sehingga reaksi inti berantai menjadi terhenti sama sekali.

Bila kemudian batang-batang Cadmium tersebut dicabut secara perlahan-lahan dari teras reaktor, maka mulailah reaksi inti berantai sedikit demi sedikit hingga sepenuhnya, tergantung yang dikehendaki, sesuai dengan dalamnya batang-batang Cadmium dicabut dari teras reaktor, sehingga terjadi keseimbangan faktor pergandaan (*multiplication factor*) sama dengan satu, yaitu untuk setiap kali pembelahan inti, hanya sebuah neutron yang dilepaskan untuk melanjutkan pembelahan inti berikutnya. Dalam keadaan demikian ini, Faktor Pergandaannya sama dengan satu, maka disebut reaktor mencapai kritisnya.

Dengan demikian, bila batang-batang Cadmium makin diangkat dari teras reaktor, reaksi inti berantai makin hebat, dalam hal ini faktor pergandaannya menjadi lebih dari satu, dan sebaliknya, makin dalam batang-batang cadmium disisipkan ke dalam teras reaktor, makin kurang hebat reaksi inti berantai dalam reaktor, karena pergandaannya menjadi kurang dari satu.

Bila karena sesuatu sebab, misalnya perubahan temperatur, berkurangnya bahan inti yang dapat dibelah, atau bertambahnya produk-produk pembelahan inti, ataupun reaktivitasnya berubah sehingga dengan demikian berubah pula faktor pergandaannya, maka batang-batang Cadmium pengendali dimasukkan atau diangkat sedikit dari teras reaktor, untuk mengkompensasi perubahan-perubahan tersebut serta menyesuaikan kembali.

Batang-batang pengatur atau pengendali, dapat pula dibuat dari baja boron (*boron steel alloy*) tanpa lapisan pembungkus (*unclad*) dalam

reaktor dengan moderator Graphite. Batang-batang baja (*Boron*) tersebut kadang-kadang diberi lapisan pembungkus bila dikhawatirkan terjadi korosi/karatan.

Batang-batang pengendali yang lain, terbuat dari Hafmium yang dapat menyerap neutron lambat (*Thermal neutron*) dengan baik. Ada pula digunakan bahan cair di dalam tabung-tabung sebagai pengendali, yang dalam hal ini cairan dalam tabung digunakan sebagai pengaturan reaksi inti berantai. Bahkan ada juga yang menggunakan teknik pengaturan berupa penyerap neutron yang dilarutkan dalam media pendingin, misalnya asam boor (*boric acid*) yang dilarutkan dalam air yang digunakan di dalam reaktor di bawah kritisnya, dalam hal penggantian bahan inti reaktor. Dalam hal tersebut, asam boor tadi akan dikeluarkan atau dipisahkan dari media pendingin, bila reaksi inti berantai mulai berlangsung di dalam reaktor.

Komponen lain yang penting pula di dalam instalasi tenaga nuklir ialah pembangkit uap (*steam generators*). Biasanya pada sebuah instalasi tenaga nuklir, terdapat dua buah pembangkit uap untuk sebuah reaktor nuklir, yang biasanya tipe *vertical shell and tube*. Media pendingin teras reaktor akan melalui lubang-lubang pipa tersebut. Pipa-pipa pembangkit uap dibuat dari besi-chroom-nikkel (*Cr-Ni-Iron Alloy*).

Media pendingin teras reaktor yang merupakan siklus primer (*primary loop*) instalasi tenaga nuklir, akan mengalir masuk di bagian atas pembangkit uap, dan melewati sebelah dalam pipa-pipa pembangkit uap menuju ke dasar pembangkit uap di bagian bawah. Media pendingin reaktor inti tersebut, menyerahkan panasnya melalui dinding pipa-pipa, kepada air yang ada di luar pipa-pipa tersebut, sehingga air yang ada di luar pipa-pipa tersebut, yang merupakan siklus sekunder (*secondary loop*), akan berubah menjadi uap.

Media pendingin setelah menyerahkan panasnya kepada air di siklus sekunder (*secondary loop*) tersebut, akan ke luar melalui bagian bawah pembangkit uap, dan dipompa masuk kembali ke dalam reaktor inti. Sehingga dengan demikian, siklus primer media pendingin reaktor akan melalui bagian-bagian instalasi tenaga nuklir berturut-turut sebagai berikut: dari Teras reaktor, media pendingin reaktor yang dalam keadaan yang sangat panas tersebut, akan dialirkan melalui puncak atas pembangkit uap dan turun ke bawah melalui sebelah dalam pipa-pipa yang terdapat di dalam pembangkit uap, untuk selanjutnya dari dasar pembangkit uap tersebut, dipompa dan dimasukkan kembali ke dalam reaktor untuk mendinginkan teras reaktor.

Pompa untuk mensirkulasikan media pendingin reaktor dalam siklus primer, ialah pompa sentrifugal, yang dapat mengatasi tahanan-tahanan (*resistance*) karena gesekan-gesekan media pendingin dengan daerah-daerah yang dilaluinya, yaitu teras reaktor, tabung-tabung dan pipa-pipa dalam pembangkit uap, dan lain-lainnya.

Dalam siklus primer pada reaktor air bertekanan (*pressurized water reactor = PWR*) dan reaktor air mendidih (*boiled water reactor = BWR*) terdapat pengatur tekanan yang disebut *pressurizer*.

Pressurizer atau pengatur tekanan, adalah alat yang digunakan untuk mempertahankan dan mengatur agar tekanan media pendingin reaktor selalu konstan, atau dalam batas-batas toleransi. Dalam pressurizer terdapat ruang uap dan sejumlah air di bawahnya, yang berfungsi sebagai reservoir media pendingin bila terjadi perubahan-perubahan kebutuhan media pendingin.

Di bagian dasar pressurizer terdapat saluran fluktuasi (*surge line penetration*), yang dihubungkan dengan pipa-pipa pendingin reaktor. Di bagian bawah pressurizer terdapat pemanas listrik yang dapat diganti-ganti, sedangkan di bagian atas terdapat lubang penyemprot air.

Pemanas listrik dan penyemprot air, berfungsi untuk menjaga agar tekanan dan temperatur media pendingin selalu sesuai dengan apa yang dikehendaki. Bila tekanan pendingin reaktor menurun, sebagian air di dalam pressurizer akan menguap dan akan menjaga mempertahankan tekanan menjadi tetap konstan.

Pemanas listrik berfungsi untuk mengatur agar tekanan dalam pressurizer menjadi normal lagi. Bila tekanan dalam sistem pendingin reaktor naik, maka karena adanya air yang disemprotkan, sebagian uap akan mengembun di saluran masuk yang berasal dari reaktor, sehingga akan mereduksir atau mengurangi tekanan.

Permukaan air di dalam pressurizer diatur secara otomatis oleh perubahan-perubahan jumlah air yang disalurkan atau dikeluarkan dari sistem pendingin reaktor, untuk itu dipasang alat penunjuk permukaan air jarak jauh (*remote level indicator*).

Siklus sekunder, yang merupakan siklus air-uap biasanya seperti halnya pada ketel-ketel uap yang lain. Air diuapkan dan dipanaskan lanjut dalam pembangkit uap (*steam generator*) oleh media pendingin reaktor (*reactor coolant*). Sehingga fungsi pembangkit uap dalam reaktor nuklir tepat sama dengan ketel uap biasa.

Uap yang dipanaskan lanjut dalam Siklus sekunder, digunakan untuk menggerakkan turbin uap, dan uap bekasnya didinginkan kembali di dalam kondensor, untuk selanjutnya digunakan kembali sebagai air pengisian pembangkit uap dalam reaktor nuklir.

Reaktor nuklir, pressurizer, pembangkit uap serta pompa sirkulasi pendingin reaktor (*reactor coolant circulating pumps*) ditempatkan di dalam suatu bangunan yang berdinding sangat tebal sebagai pelindung, agar kedap sinar tembus.

BAB V

PERHITUNGAN MENGENAI KEKUATAN DINDING KETEL

25. Perhitungan Tebalnya Dinding

a. Drum Ketel atau Tangki Ketel

Drum ketel atau tangki ketel, diperhitungkan terhadap dua kemungkinan pecah, yaitu:

- a.1 Kemungkinan belah.
- a.2 Kemungkinan putus.

Lihat Gambar

a.1 *Tebal Drum Dihitung Berdasarkan Kemungkinan Belah:*

D = Diameter dalam drum ketel dalam meter.

t = Tebal drum ketel dalam meter.

σ_t = Tegangan tarik yang sebenarnya di dalam dinding drum ketel dalam Newton/meter persegi.

$\bar{\sigma}_t$ = Tegangan tarik yang diizinkan (Newton/m²).

L = Panjang drum sebelah dalam (meter).

p = Tekanan di dalam drum ketel (Newton/m²).

Besarnya Gaya untuk membelah drum = P Newton =

$$P = L \times D \times p \text{ (Newton)}$$

Gaya sebesar P Newton tersebut ditahan oleh dinding drum ketel yang luas irisannya F (m²).

$$F = [2 \times L \times t + 2 \times t \times (D + 2.t)] \quad (\text{m}^2)$$
$$= (2.L.t + 2.t.D + 4.t^2) \quad (\text{m}^2)$$

dengan tegangan di dalam dinding drum sebesar N/m² sehingga:

$$P = L.D.p = F.\sigma_t = (2.L.t + 2.t.D + 4.t^2) . \sigma_t$$

Bila $4.t^2$ diabaikan, karena dianggap kecil terhadap $2.t.D$; maka didapat:

$$P = L.D.p = (2.L.t + 2.t.D) \times \sigma_t$$

atau
$$t = \frac{L \times D \times p}{2 \times \sigma_t \times (L + D)} \text{ (meter)}$$

Bila pembilang dan penyebut dibagi dengan L menjadi

$$t = \frac{D \times p}{2 \cdot \sigma_t \cdot (1 + D/L)} \quad (\text{meter})$$

Agar drum tidak belah, maka haruslah:

$$t_b \geq \frac{D \times p}{2 \cdot \sigma_t \cdot (1 + D/L)} \quad (\text{meter})$$

a.2 Drum Ketel Diperhitungkan Terhadap Kemungkinan Putus

Gaya yang akan memutuskan drum = K Newton =

$$K = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times p \quad (\text{Newton})$$

Gaya tersebut akan ditahan oleh dinding dengan luas

$$F = \frac{\pi}{4} \times (D + 2t)^2 - D^2 \quad (\text{m}^2)$$

$$= \frac{\pi}{4} \times (D^2 + 4 \cdot D \cdot t + 4 \cdot t^2) - D^2 \quad (\text{m}^2)$$

$$= \frac{\pi}{4} \times (4 \cdot D \cdot t + 4 \cdot t^2) \quad (\text{m}^2)$$

Bila harga $4 \cdot t^2$ diabaikan karena dianggap kecil terhadap $4 \cdot D \cdot t$, maka tegangan σ_t yang timbul

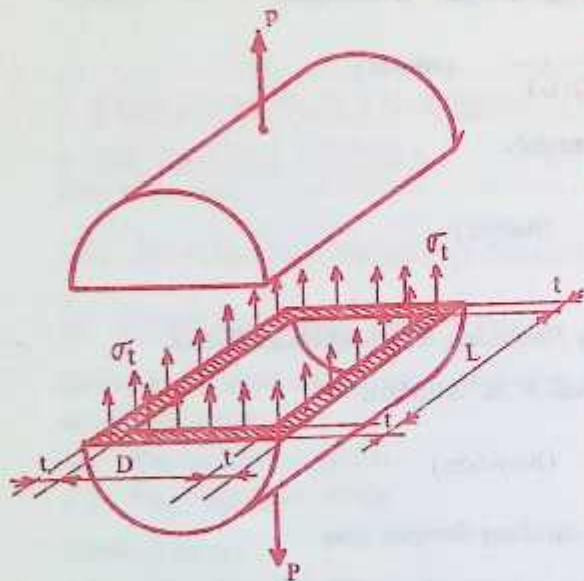
$$\sigma_t = \frac{K}{F} = \frac{\frac{\pi}{4} \times D^2 \times p}{\frac{\pi}{4} \times 4 \cdot D \cdot t}$$

$$\sigma_t = \frac{D \times p}{4 \cdot t} \quad (\text{Newton/m}^2)$$

atau
$$t = \frac{D \times p}{4 \times \sigma_t} \quad (\text{meter})$$

Agar drum tidak putus, maka:

$$t \geq \frac{D \times p}{4 \times \sigma_t} \quad (\text{meter})$$



p dalam [N/mm²]

D dalam [mm]

L dalam [mm]

R dalam [mm]

$\bar{\sigma}_t$ dalam [N/mm²]

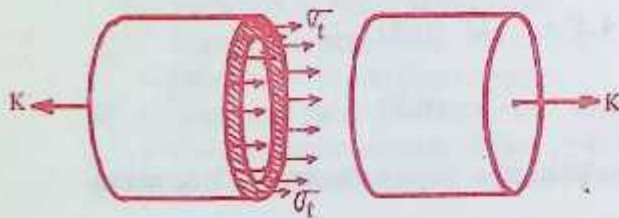
$$v = \frac{(s-d)}{d}$$

t dan t_u = tebal dinding [mm]

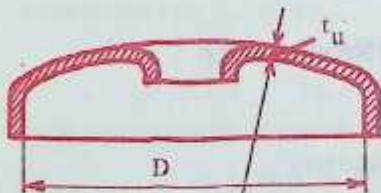
$k = 2,0$ untuk baja tuang

$k = 1,5$ untuk baja biasa

$$t_B = \frac{p \times D}{2 \cdot \bar{\sigma}_t \cdot (1 + D/L)} \text{ [mm]}$$



$$t_p = \frac{p \times D}{4 \cdot \bar{\sigma}_t} \text{ [mm]}$$



Untuk $R \geq 1,3 D$:

$$t_u = \frac{p \times R \times k}{2 \cdot \bar{\sigma}_t} \text{ [mm]}$$

Untuk R lebih kecil dari D :

$$t_u = \frac{p \cdot D \cdot k \cdot \beta}{4 \cdot \bar{\sigma}_t} \text{ [mm]}$$

menjadi: $\beta = 2,9$ bila $R = D$

$\beta = 2,0$ bila $R = 0,8 D$

Drum pecah karena belah dan karena putus

Karena untuk $D/L < 1$ maka berlaku

$$2 \times (1 + D/L) < 4 \quad \text{atau}$$

$$\frac{1}{2 \times (1 + D/L)} > \frac{1}{4} \quad \text{sehingga:}$$

$$\frac{D \times p}{2 \times (1 + D/L) \times \bar{\sigma}_t} > \frac{D \times p}{4 \cdot \bar{\sigma}_t} \quad \text{atau berarti:}$$

$$t_b > t_p$$

Jadi: Tebal drum bila dihitung berdasarkan kemungkinan belah ($= t_b$) adalah lebih besar atau lebih tebal dibanding dengan bila dihitung berdasarkan kemungkinan putus ($= t_p$).

Dengan demikian, untuk perhitungan-perhitungan tebal drum ketel, selanjutnya hanya dihitung terhadap kemungkinan belah karena lebih aman atau lebih tebal.

Adapun harga-harga $\bar{\sigma}_t$ tidak hanya tergantung terhadap macamnya bahan drum ketel, namun juga tergantung dari temperatur kerja dinding drum.

Selanjutnya harap lihat Tabel

Mengingat bahwa pada umumnya drum ketel banyak dilubangi, antara lain untuk sambungan pipa-pipa dan tabung-tabung, demikian pula pada ujung-ujung drum sering pula terdapat lubang orang atau *man-hole*, maka dengan demikian kekuatan dinding drum menjadi berkurang, sehingga dengan demikian digunakan rumus-rumus pengalaman untuk menentukan tebalnya dinding drum sebagai berikut:

D_i = Diameter sebelah dalam drum ketel dalam meter.

D_o = Diameter sebelah luar drum ketel dalam meter.

dengan $D_o \leq 1,2 D_i$

v = $(s - D) / s$ = Faktor pelemahan.

s = Jarak antara masing-masing garis tengah lubang pipa-pipa atau tabung-tabung dalam meter.

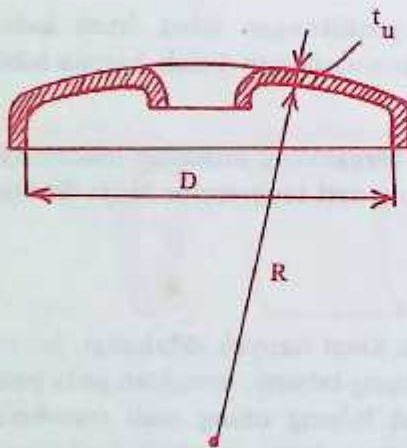
d = Diameter lubang pipa atau tabung dalam meter

- k = Faktor keamanan,
 untuk Baja tuang $k = 2,0$
 untuk Baja biasa $k = 1,5$
 j = Faktor Konversi, menjadi:
 $j = 100$ bila p dan $\bar{\sigma}_t$ dinyatakan dalam kg/mm^2
 $j = 1$ bila p dan $\bar{\sigma}_t$ dinyatakan dalam Newton/m^2

maka harga untuk t didapat sebagai berikut:

$$t = \frac{D_i \times p}{(2 \cdot j \cdot v \cdot \bar{\sigma}_t) / k - p} \quad (\text{meter})$$

a.3 Tebal ujung drum atau tebal front (= t_u):



Untuk $R \geq 1,3 D$ maka:

$$t_u = \frac{p \cdot R \cdot k}{2 \cdot j \cdot \bar{\sigma}_t} \quad (\text{meter})$$

Untuk $R \leq D$ maka:

$$t_u = \frac{p \cdot D \cdot k \cdot \beta}{4 \cdot j \cdot \bar{\sigma}_t} \quad (\text{meter})$$

bila: $\beta = 2,9$ dan $R = D$
 $\beta = 2,0$ dan $R = 0,8 D$

b. Tebal pipa-pipa penguap dan pipa-pipa pemanas lanjut:

Bila d_o = Diameter luar pipa, kurang dari 0,20 meter

$$t = \frac{d_o \times p}{(2 \cdot j \cdot v \cdot \bar{\sigma}_t) / k + p} \quad (\text{meter})$$

dengan $v \leq 0,9$
 $k = 1,5$

c.1 Header dengan irisan empat persegi panjang:

Lihat Gambar

$$t = \frac{1}{2} \cdot m \sqrt{\frac{pk}{j \cdot \bar{\sigma}_t} \times \sqrt{\frac{3 \times (1 - c^2/m^2)}{(1 + v/\cos \varphi)}}} \quad (\text{meter})$$

Dengan $v = (s - d)/s$

k untuk Baja tuang = 1,8

k untuk Baja biasa = 1,3 sampai 1,4

c.2 Header dengan irisan bundar dan bujur sangkar:

Lihat Gambar.

Bila ujungnya berlubang:

$$t_u = 0,45 \times \sqrt{\frac{p \cdot k}{j \cdot \bar{\sigma}_t} \times (d_h^2 + d_o^2)} \quad (\text{meter})$$

Bila ujung-ujungnya tidak berlubang:

$$t_u = 0,45 \times \sqrt{\frac{p \cdot d_h^2 \cdot k}{j \cdot \bar{\sigma}_t}} \quad (\text{meter})$$

d. Sambungan-sambungan keling pada drum ketel:

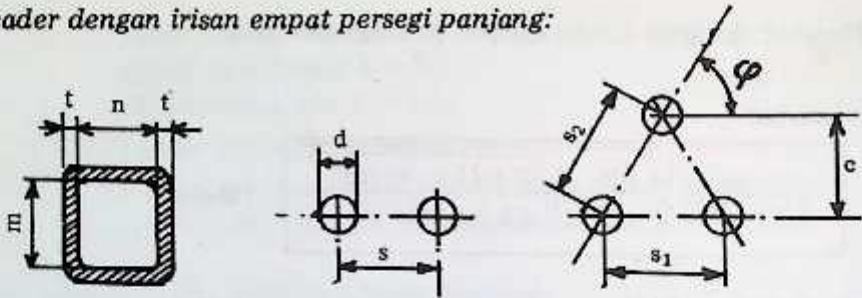
Lihat Gambar

Dalam merencanakan tebalnya dinding drum ketel, dari rumus-rumus perhitungan yang terdahulu, perlu diperhitungkan prosentase kekuatan dinding ϕ_1 seperti tersebut dalam tabel.

e. Sambungan-sambungan las pada ketel uap:

Lihat Gambar

Header dengan irisan empat persegi panjang:



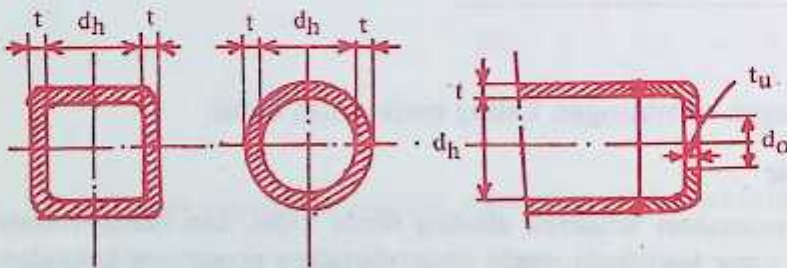
$$t = \frac{1}{2} m \sqrt{\frac{p \cdot k}{j \cdot \bar{\sigma}_t} \cdot \frac{3 \left(1 - \frac{c^2}{m^2}\right)}{\left(1 + \frac{v}{\cos \varphi}\right)}} \quad (\text{meter})$$

dengan: $v = \frac{s - d}{s}$

$k_{\text{baja tuang}} = 1,8$

$k_{\text{baja biasa}} = 1,3 - 1,4$

Header dengan irisan bundar dan empat persegi:



a. Bila ujungnya berlubang:

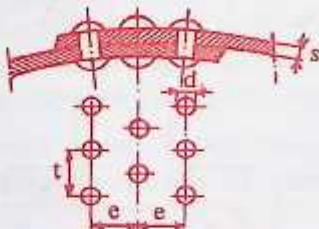
$$t = t_u = 0,45 \sqrt{\frac{p \cdot d_h^2 \cdot k}{j \cdot \bar{\sigma}_t} \cdot (d_h^2 + d_o^2)} \quad (\text{meter})$$

Tebal Header

b. Bila ujungnya tidak berlubang:

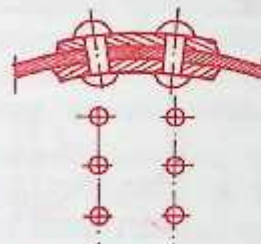
$$t = t_u = 0,45 \sqrt{\frac{p \cdot d_h^2 \cdot k}{j \cdot \bar{\sigma}_t}}$$

(meter)



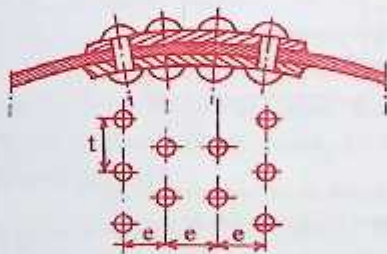
$$\begin{aligned} d &\geq \sqrt{505 - 4} \text{ [mm]} \\ t &\leq 3d + 22 \text{ [mm]} \\ e &= 0,5 t \text{ [mm]} \end{aligned}$$

Sambungan tumpang-tindih 3 baris



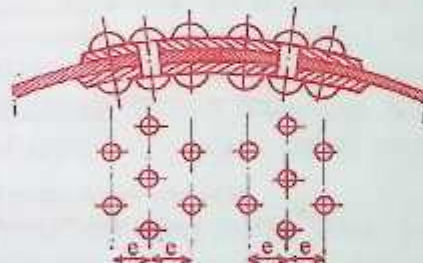
$$\begin{aligned} d &\geq \sqrt{505 - 5} \text{ [mm]} \\ d &\leq 2,6d + 10 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

Sambungan strip-ganda satu baris



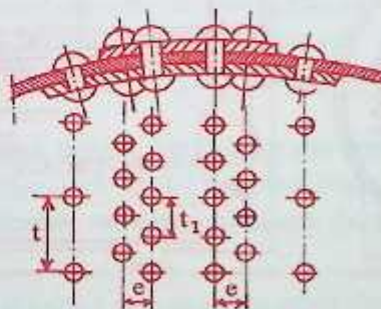
$$\begin{aligned} d &\geq \sqrt{505 - 6} \text{ [mm]} \\ t &\leq 3,5d + 15 \text{ [mm]} \\ e &= 0,5 t \text{ [mm]} \end{aligned}$$

Sambungan strip-ganda dua baris



$$\begin{aligned} d &\geq \sqrt{505 - 7} \text{ [mm]} \\ t &\leq 6d + 20 \text{ [mm]} \\ e &= \frac{3}{8} t \text{ [mm]} \end{aligned}$$

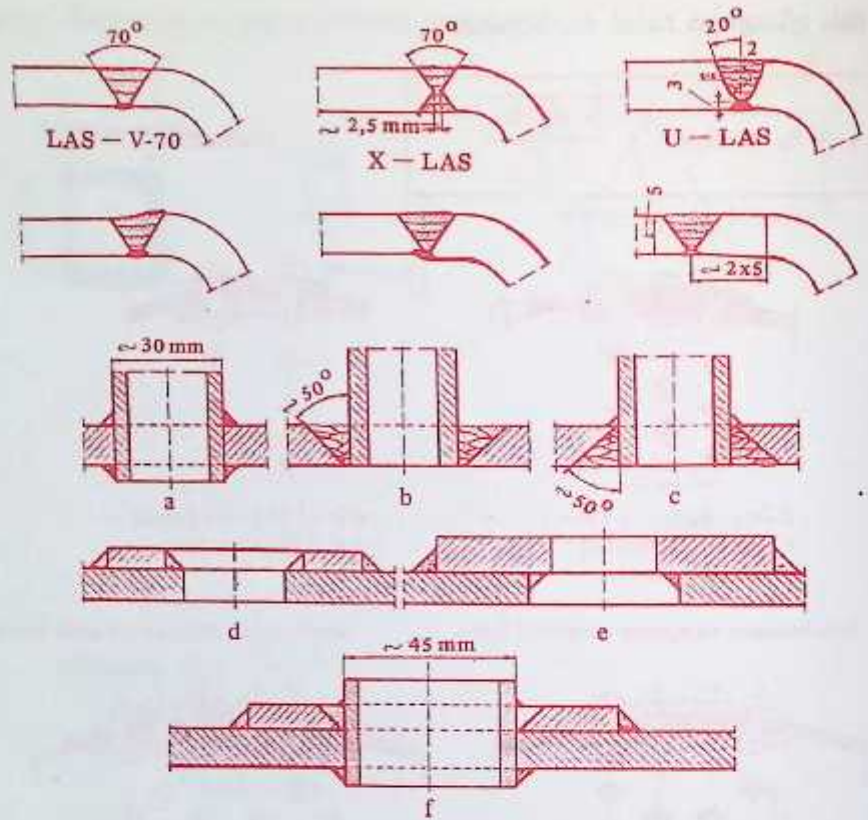
Sambungan strip ganda tiga baris



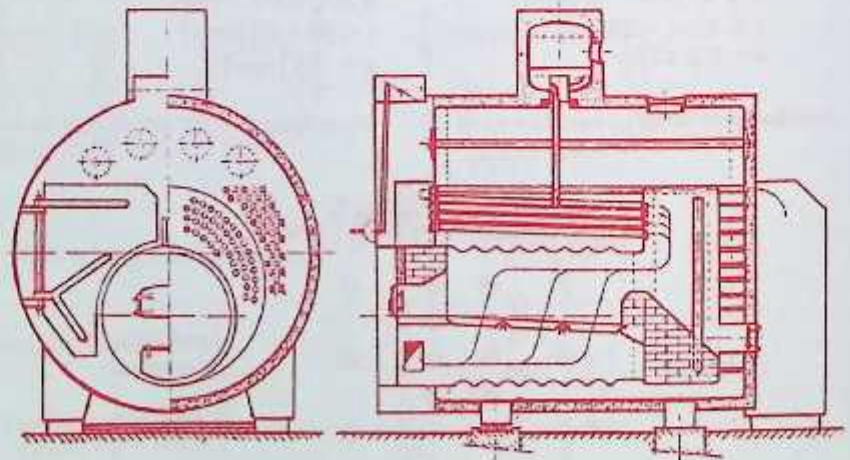
Sambungan keling

Sambungan strip ganda tidak penuh

$$\begin{aligned} d &\geq \sqrt{505 - 7} \text{ [mm]} \\ t &\leq 6d + 20 \text{ [mm]} \\ e &= 0,5 t \text{ [mm]} \end{aligned}$$



Beberapa sambungan las, antara front dengan drum dan antara pipa dengan dinding drum



Salah satu varian ketel pipa api

26. Proses Pembuatan Drum Ketel Dan Sambungan-sambungannya.

Drum-drum ketel (*Boiler Vessel*) untuk ketel uap yang bertekanan rendah, kurang dari 24 kg/cm^2 , dibuat dari pelat-pelat baja khusus untuk drum atau yang biasanya disebut dengan pelat baja ketel (*Boiler Steel Plate*). Plat baja tersebut dilengkungkan dengan menggunakan mesin pelengkung plat atau mesin pengerol pelat. Setelah plat-plat dirol, maka lengkungan-lengkungan plat tersebut disambung-sambung dengan menggunakan sambungan keling ataupun sambungan las. Untuk drum-drum ketel yang bertekanan menengah (sedang) dan yang bertekanan tinggi, di atas 40 kg/cm^2 , drum-drum ketel dibuat dengan cara dilindis atau di-canai (*Rolling Milled*) dengan menggunakan Mesin canai (*Rolling mill machine*) atau ditempa dengan menggunakan mesin tempa.

Plat-plat baja untuk ketel yang sambungannya dengan dikeling, plat-plat baja tersebut ditandai, kemudian dipotong atau digunting, kemudian diserut untuk menghilangkan luka-luka bekas sobekan atau guntingan di pinggiran-pinggiran, dan untuk memotong miring tepian plat. Pekerjaan ini dilakukan pada pabrik pembuat drum ketel. Setelah plat-plat baja tersebut disambung-sambung dengan hubungan keling, kemudian dirapatkan atau di-kook (*caulked*) dengan pahat perapat (*caulking chisel*).

Agar sambungan-sambungan plat yang tumpang-tindih tidak bocor dan agak rapi, pada pertemuan sambungan-sambungan plat yang melintang dan membujur, pada ujung sambungan-sambungannya, plat dilas. Lihat Gambar.

Pengeboran plat untuk lubang-lubang keling harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak terjadi retakan atau pecah-pecah pada tepi lubang.

Bila drum ketel, sambungan-sambungannya dilakukan dengan cara dilas, maka hanya boleh dilakukan dengan menggunakan las listrik atau dengan las gas air (*water gas welding*), dan samasekali tidak boleh menggunakan las autogen.

Pengelasan dengan cara las gas air (*water gas welding*), dilakukan dengan menggunakan brander gas air. Plat-plat pada tempat sambungan dipanasi, baik dari sebelah dalam, maupun dari sebelah luar, sepanjang kira-kira 40 cm.

Sesudah itu segera ditekan keras-keras atau di-press dengan menggunakan rol-rol penekan atau dipukul keras-keras dengan palu tempa. Se-

telah plat-plat tersebut disematkan atau saling *di-klem* tersebut sepanjang sambungan, maka baru dimulai pekerjaan menyambung dengan las gas air sepanjang sambungannya.

Setelah selesai penyambungannya dengan las tersebut secara keseluruhannya, maka seluruh drum ketel tersebut dipanaskan hingga temperatur pijar (*anealing temperatur*) untuk menghilangkan tegangan-tegangan yang biasa disebut dengan *tension free anealing process*.

Pengelasan drum ketel akan lebih baik di lakukan dengan menggunakan las listrik, serta hasilnya pun lebih memuaskan. Sambungan-sambungan las kemudian diperiksa dengan alat pemeriksa las *rontgen*.

Untuk ketel-ketel tekanan tinggi, drum-drum ketel dibuat tanpa sambungan las, melainkan dibuat dengan cara dicanai (*roller milled*) atau ditempa.

Bila pembuatan drum ketel dilakukan dengan cara dicanai pada mesin canai *rolling mill machine*, maka balok baja yang berlubang dicanai di antara roll-roll canai hingga mencapai diameter dan tebal drum ketel yang diinginkan. Lihat Gambar.

Keuntungan pembuatan drum dengan cara dicanai ialah drum ketel hasil canai tersebut tidak perlu dibubut lagi. Silinder sebagai hasil produk pencanaian tersebut dengan diameter dan tebal yang dikehendaki, pada kedua ujungnya harus dibuatkan ujung drum dengan cara ditempa atau di-press pada arah aksial dan radial. Lihat Gambar.

Pada penge-press-an dan penempaan ujung-ujung drum ketel tersebut masih ditinggalkan lubang yang terbuka pada ujung-ujung tersebut, yang nantinya digunakan sebagai lubang orang (*Man hole*)

Dengan cara dicanai, dapat dibuat drum ketel hingga mencapai panjang 18 meter dengan diameter luar 1800 meter dan tebal dinding drum 160 mm, sedangkan berat utuhnya sekitar 70 ton. Dewasa ini dibuat drum ketel yang dapat mencapai ukuran 32,5 meter panjangnya, serta berat drum ketel mencapai 382 ton, dengan cara dicanai.

BAB VI

BEBERAPA JENIS KETEL UAP

27. Klasifikasi Ketel Uap:

Ketel uap diklasifikasikan menjadi tiga golongan utama;

27.1. Ketel-ketel Lorong Api dan Ketel-ketel Pipa Api

Yaitu ketel-ketel api dan gas asap yang digunakan untuk memanasi air dan uap, akan melalui silinder api, lorong-lorong api dan pipa-pipa ataupun tabung-tabung api (*fire cylinder, fire duct, fire pipes and fire tubes*), yang di bagian luarnya terdapat air atau uap.

Jenis-ketel-ketel uap yang tergolong dalam ketel lorong api atau ketel pipa api adalah ketel-ketel uap kecil serta sederhana, yang hanya mampu memproduksi uap maksimum sebanyak 10 ton uap per jam, dengan tekanan maksimum 24 kg/cm². Jadi tergolong ketel-ketel untuk tekanan rendah.

Ketel-ketel ini merupakan awal dari pembuatan ketel-ketel selanjutnya. Ketel-ketel ini umumnya mempunyai isi air yang cukup besar, sehingga merupakan tangki, dan karena itu sering pula disebut ketel-ketel tangki.

Yang termasuk dalam golongan ini ialah ketel-ketel:

- a. Ketel Cornwall dan ketel Lancashire;
- b. Ketel Schots dan ketel Schots kembar;
- c. Ketel Kombinasi antara silinder api, lorong api dan pipa-pipa api, serta pipa uap, beserta beberapa variannya;
- d. Ketel Lokomotif dan Lokomobil;
- e. Ketel-ketel Tegak, ketel Cochran dan variannya.

Umumnya ketel-ketel tersebut masih dapat dilayani dengan tangan (*manual*). Secara detail akan dibicarakan kemudian.

27.2. Ketel-ketel Pipa Air yang Biasa:

Yaitu ketel-ketel air atau uap di dalam pipa-pipa atau tabung-tabung, yang dipanasi oleh api atau asap di bagian luarnya.

Ketel-ketel pipa air ini umumnya bertekanan sedang yaitu antara 45 kg/cm² sampai dengan 140 kg/cm², dengan produksi uap mencapai 1.000 ton uap setiap jamnya. Jenis-jenis ketel ini mempunyai efisiensi total yang lebih besar dari ketel-ketel pipa api. Peralatan-peralatan pada ketel ini umumnya sudah tidak lagi dilayani dengan tangan (manual).

Yang termasuk dalam golongan ketel-ketel pipa air biasa ialah:

- a. Ketel Seksi (*Section boiler*) dan beberapa variannya;
- b. Ketel Yarrow dan ketel-ketel berpipa terjal serta beberapa variannya;
- c. Ketel-D (*D-boiler*) atau ketel dengan Dua drum;
- d. Ketel Pancaran dan beberapa variannya.

27.3. Ketel-ketel Pipa Air dengan Perencanaan Khusus:

Ketel-ketel pipa air jenis ini direncanakan dengan berbagai maksud, antara lain:

- digunakan untuk tekanan-tekanan tinggi dan tekanan superkritis, melebihi 225 kg/cm²;
- untuk dapat menggunakan bahan bakar nuklir;
- untuk dapat menggunakan air dengan kualitas agak rendah;
- untuk memperbesar beban tungku ketel atau untuk memperbesar angka perpindahan panasnya;
- dan untuk maksud-maksud lainnya.

Yang termasuk dalam golongan ketel-ketel pipa air dengan perencanaan khusus ialah:

- a. Ketel Siklus Ganda atau *Binaire cycle boiler*, dengan variannya berupa ketel/reaktor nuklir;
- b. Ketel-ketel untuk tekanan superkritis, yaitu ketel Benson, ketel Sulzer dan ketel Universal pressure boiler;
- c. Ketel Loffler atau ketel siklus uap (*circulating steam boiler*) yang memungkinkan penggunaan air dengan kualitas agak rendah;
- d. Ketel Velox dan ketel-ketel dengan tungku bertekanan dengan maksud memperbesar beban tungku serta memperbesar angka perpindahan panasnya;
- e. Ketel Merkuri, yang menggunakan air raksa dan uapnya.

Ketel-ketel jenis ini didesain dengan maksud untuk penyempurnaan ketel-ketel pipa air yang telah ada sebelumnya atau ketel-ketel pipa air yang biasa.

28. *Ketel-ketel Pipa Api dan Ketel-ketel Lorong Api*

28.1. Ketel Cornwall dan Ketel Lancashire:

Lihat Gambar ketel Lancashire

Ketel semacam ini termasuk ketel yang sudah kuno, yang sekarang tidak ada lagi orang yang membuatnya.

Di dalam drum atau tangki ketel terdapat sebuah silinder api (pada ketel Cornwall) atau dengan dua atau tiga buah silinder api pada ketel Lancashire. Silinder api dengan diameter antara 0,7 – 0,9 meter.

Di dalam silinder api di bagian belakang, terdapat rangka bakar dengan lebar sekitar 0,65 – 0,85 meter, yang panjang maksimumnya dapat mencapai 2 meter, disebabkan terbatasnya jarak lempar bahan bakar di dalam silinder api yang sempit.

Mengenai rangka bakar ini, secara luas dibahas tersendiri dalam Bab Peralatan Teknik Membakar.

Api dan gas asap yang terbentuk dari hasil pembakaran bahan bakar dan udara di atas rangka bakar akan mengalir sepanjang silinder api dari belakang ke depan, dan memanasi air di sekeliling silinder api secara pancaran. Silinder api menjadi panas, lebih panas dari drum ketel, sehingga akan memuai lebih banyak dibandingkan pemuaian drum ketel. Untuk mengimbangi pemuaian tersebut, silinder api dibuat bergelombang sehingga mudah memegas bila memuai.

Api atau gas asap setelah meninggalkan silinder api di ujung depan mencapai Kotak api (*Fire box*) yang dinding-dinding temboknya membelokkan arah gas asap ke belakang melalui sebuah kolong api di sebelah bawah drum ketel.

Sampai di ujung belakang, aliran gas asap dibelokkan melalui selokan gas asap sedemikian sehingga aliran gas asap menyuruk di bawah drum ketel dari kolong api di bawah drum menuju ke sebelah kanan dan kiri drum ketel, dan mencapai lorong api di sebelah kiri dan kanan drum ketel.

Di dalam lorong api yang terdapat di sebelah kanan dan kiri dinding drum ketel, gas asap dialirkan ke arah depan lagi, dan pada ujung depan lorong api terdapat kotak asap (*Smoke box*) yang di tengahnya terdapat cerobong asap, yang gas asap dapat keluar melaluinya. Kadang-kadang pada cerobong asap ini dipasang Fan Isap (*Induced Draught Fan = IDF*)

untuk mengisap gas asap dan menghembuskannya keluar melalui cerobong asap.

Dengan demikian api dan gas asap akan memanasi bagian-bagian ketel uap dengan urutan sebagai berikut: mula-mula memanasi silinder api dari belakang ke depan, kemudian mencapai front depan drum ketel yang disebut kotak api (*Fire box*), selanjutnya memanasi dasar drum ketel sebelah bawah dari depan ke belakang, kemudian menyuruk melalui selokan gas asap dan mencapai lorong api di sebelah kanan dan kiri drum ketel serta memanasi dinding drum ketel sebelah kanan dan kiri dari belakang ke depan.

Selama perjalanannya, api atau gas asap tersebut temperaturnya makin menurun. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa temperatur air yang bersentuhan dengan dinding drum ketel sebelah bawah relatif lebih tinggi sedikit dibanding dengan temperatur air yang berbatasan dengan dinding ketel sebelah kanan dan kiri.

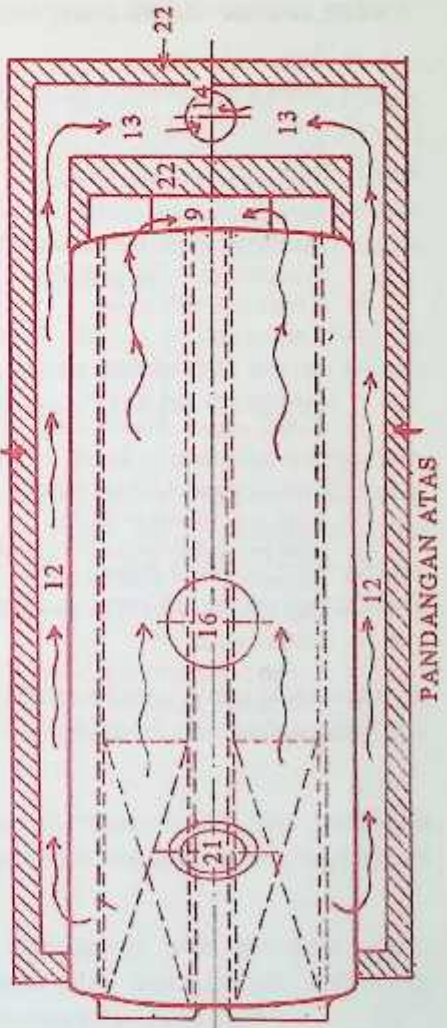
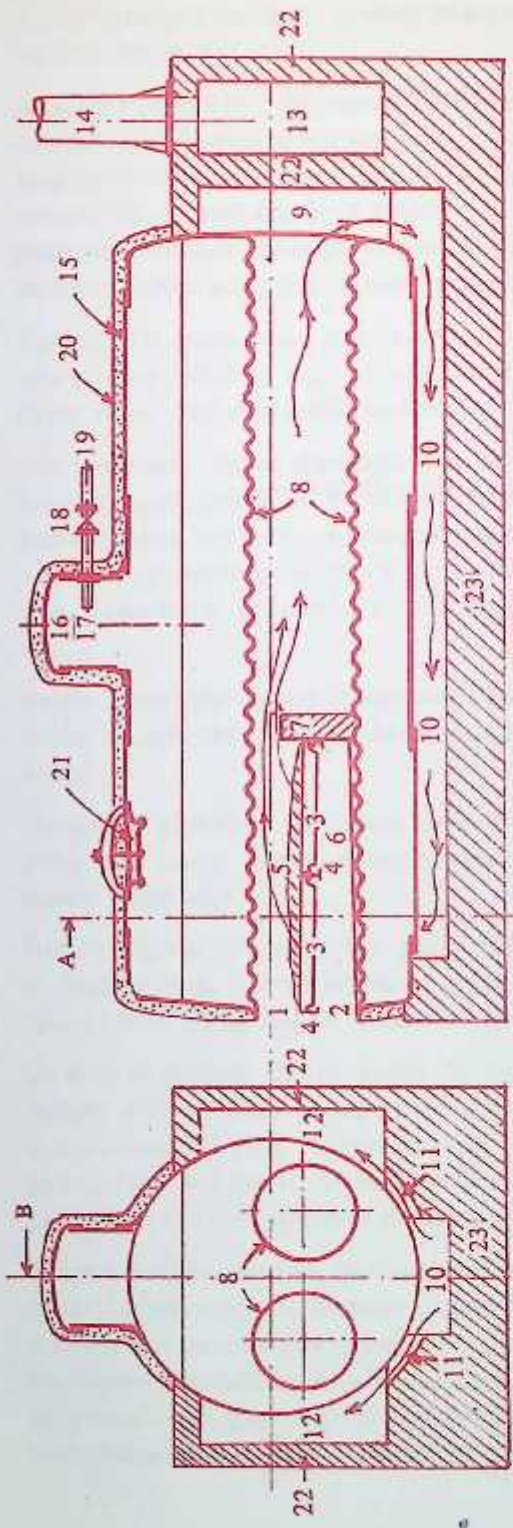
Karena air yang panas relatif lebih ringan dibanding dengan air yang agak dingin, maka air yang panas akan naik ke atas ke permukaan, sedangkan yang dingin akan turun ke bawah. Dengan demikian terjadi aliran sirkulasi pada air di dalam drum ketel tersebut. Aliran sirkulasi air sedemikian ini disebut sirkulasi air alamiah (*natural circulation*), yang menyebabkan temperatur air akan merata di seluruh drum ketel.

Pada ketel Cornwall penempatan silinder api yang hanya sebuah itu, ditempatkan eksentris tidak sepanjang garis tengah drum ketel, dengan maksud agar sirkulasi air dapat berlangsung secara alamiah dengan lebih memuaskan.

Dari dinding silinder api dan dinding ketel, naiklah gelembung-gelembung uap. Gelembung-gelembung uap tadi hanya timbul ketika dinding-dinding kena panas. Gelembung-gelembung uap air ini membawa air yang melayang-layang di ruang uap yang berupa embun-embun halus.

Makin besar ruang uap ini, makin banyak kesempatan bagi embun tadi untuk mengendap, hal ini disebabkan kecepatan uap amat kecil. Mudah dimengerti bahwa gelembung uap terbentuk dengan segera gelembung uap tersebut naik ke atas, dan tempatnya digantikan oleh air sejuk, dengan demikian temperatur dinding menjadi tidak terlalu panas.

Bila sirkulasi air di dalam ketel kurang baik, maka dapat menimbulkan keadaan temperatur air tidak merata di seluruh ketel uap, yang dengan demikian temperatur dinding ketel juga menjadi tidak merata, yang



KETEL LANCASHIRE

KETERANGAN GAMBAR KETEL LANCASHIRE:

- 1 = Pintu bahan bakar.
- 2 = Pintu angin bawah = Pintu udara sekunder.
- 3 = Batang-batang rangka bakar.
- 4 = Penyangga batang-batang rangka bakar.
- 5 = Lapisan bahan bakar padat.
- 6 = Sumuran abu = *Ash pit*.
- 7 = Jembatan api = *Fire bridge*.
- 8 = Silinder api = *Fire cilinder*.
- 9 = Kotak api = *Fire box*.
- 10 = Kolong api.
- 11 = Saluran atau selokan api.
- 12 = Lorong api kiri/kanan.
- 13 = Kotak asap = *Smoke box*.
- 14 = Cerobong asap = *Stack = Chimney*.
- 15 = Tangki ketel = Drum ketel = *Boiler vessel = Boiler drum*.
- 16 = Dom uap = *Steam dome*.
- 17 = Pipa pengambilan uap kenyang.
- 18 = Keran uap = *Steam valve*.
- 19 = Uap kenyang menuju ke pemakaian.
- 20 = Isolasi panas.
- 21 = Lubang orang = *Man hole*.
- 22 = Tembakan ketel.
- 23 = Fondasi ketel.

dapat mengakibatkan tegangan-tegangan yang tidak merata pula di seluruh drum ketel.

Keadaan demikian ini, membuat tegangan-tegangan dinding ketel tidak merata, yang akan mempercepat kerusakan ketel, disebabkan terjadinya tegangan-tegangan tambahan sebagai akibat pemuaian yang tidak merata di seluruh dinding ketel. Bila keadaan demikian itu terjadi, maka perlu diusahakan adanya aliran buatan (*forced circulation*) dengan jalan memompakan air yang panas ke daerah yang dingin.

Karena itu pada saat memasang api ketel (*initial firing*), air harus dipompakan keliling atau disirkulasikan, yaitu diisap dari bagian bawah drum ketel dan dimasukkan kembali di bagian atas dari ketel uap.

Air pengisian ketel dipompakan ke dalam ketel uap melalui pipa berkerat gergaji, sehingga air masuk merata ke seluruh permukaan. Kadang-kadang pipa berkerat ditempatkan di ruang uap, jadi di atas permukaan air, kadang-kadang di bawah permukaan air, dekat dengan permukaannya. Pada ketel Lancashire pengisian air dilakukan di bawah permukaan air.

Salah satu sifat yang baik dari ketel Lancashire ialah kemungkinan orang untuk masuk ke dalamnya guna menghilangkan kerak-kerak batu ketel.

Mengenai sirkulasi di dalam ketel, akan dibahas secara luas pada bab yang lain yang secara khusus membicarakan mengenai sirkulasi air di dalam ketel uap.

Bagian-bagian drum ketel yang tidak disinggung oleh gas asap, yaitu di bagian atas, diberi lapisan isolasi panas yang terbuat dari woll terak (*glass wool*) yang angka perambatan panasnya (λ) rendah.

Di tengah-tengah drum ketel di bagian atas terdapat sebuah dom uap (*steam dome*) atau kubah uap, dengan seluruh uap yang terbentuk dikumpulkan di situ. Corong pipa tempat untuk pengambilan uap ke-nyang juga terdapat di dalam dom uap tersebut. Hampir semua jenis ketel pipa api mempunyai dom uap.

Selama perjalanannya, gas asap setelah ke luar dari silinder api dan mencapai kotak asap di bagian depan serta mencapai lorong-lorong api di sebelah kanan dan kiri drum ketel, sebagian dari gas asap tersebut hanya memanas tembokan-tembokan ketel saja, sehingga tidak ada penyerahan panas oleh gas asap di daerah ini kepada air atau uap. Hal tersebut merupakan salah satu keberatan dari ketel ini. Lagipula panas dari api

atau gas asap yang terus-menerus diterima oleh dinding tembokan-tembokan tersebut akan menyebabkan tembokan-tembokan tersebut lekas runtuh, sehingga memerlukan biaya untuk mereparasinya.

28.2. Ketel Schots dan Ketel Schots Kembar

Jenis ketel yang dibicarakan berikut ini direncanakan agar api atau gas asap selalu bersinggungan dengan dinding-dinding yang berbatasan dengan air atau uap. Lihat Gambar.

Ketel ini, seperti halnya pada ketel Lancashire, mempunyai dua atau tiga buah silinder api, namun silinder-silinder api tersebut bermuara pada kotak api (*flame case*). Kotak api tersebut seluruhnya terendam di dalam air yang ada di dalam drum ketel.

Api dan gas asap mengalir dari rangka bakar yang terdapat di dalam silinder api, melalui silinder-silinder api sampai ke kotak api, dan dari kotak api melalui pipa-pipa api dan mencapai cerobong asap dan ke luar melaluinya.

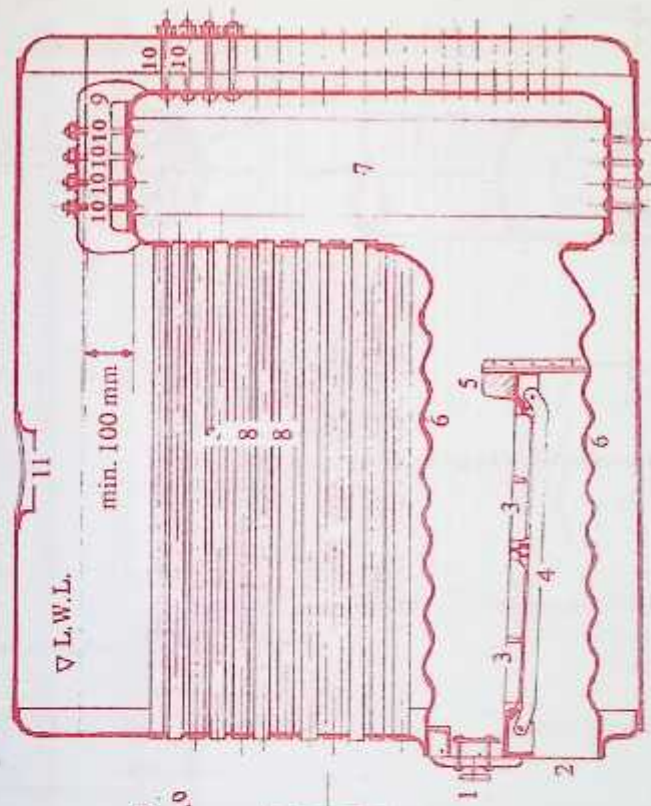
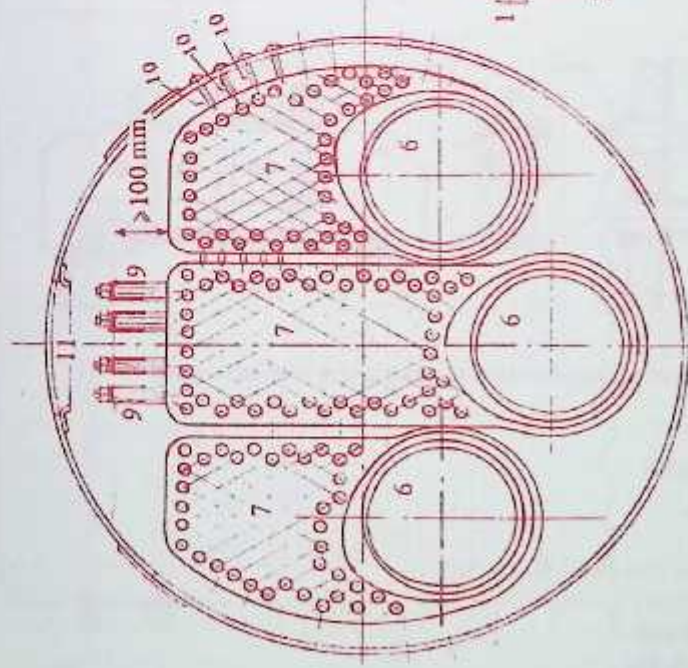
Nampak perbedaannya dengan ketel Cornwall atau ketel Lancashire, bahwa drum ketel atau tangki ketel tidak terlalu panjang, serta adanya perbedaan bahwa tidak ada tembokan-tembokan ketel, kecuali beberapa batu tahan api penunjang rangka bakar.

Perbedaan memuai antara silinder api dan pipa-pipa api tidak terlalu besar, yang antara lain disebabkan pendeknya ketel. Bila masih terdapat perbedaan pemuaian antara silinder api dan pipa-pipa api, maka hal ini diatasi dengan membuat silinder api bergelombang yang dengan demikian mudah memegas, dan mencegah melengkungnya front yang datar dari kotak api dan front belakang tangki ketel. Dengan demikian ketel ini tidak mudah bocor akibat pemuaian.

Pipa-pipa api dipasang pada lubang-lubang yang terdapat pada front belakang drum ketel, dan pada front kotak api dengan cara dilindis atau dirol. Lihat Gambar Alat untuk mengerol/melindis pipa.

Bila ada pipa api yang bocor pada tempat pelindisannya, dapat diperbaiki dengan melindis kembali pipa yang bocor tersebut. Ulangan pelindisan hanya dapat dilakukan beberapa kali saja, sesudah itu pipa menjadi mat terlindis, dan lindisan berikutnya tidak ada faedahnya lagi, sehingga pipa harus diganti.

Front-front dari drum ketel, baik yang di depan maupun yang di belakang, merupakan bidang datar yang luas. Front-front datar semacam

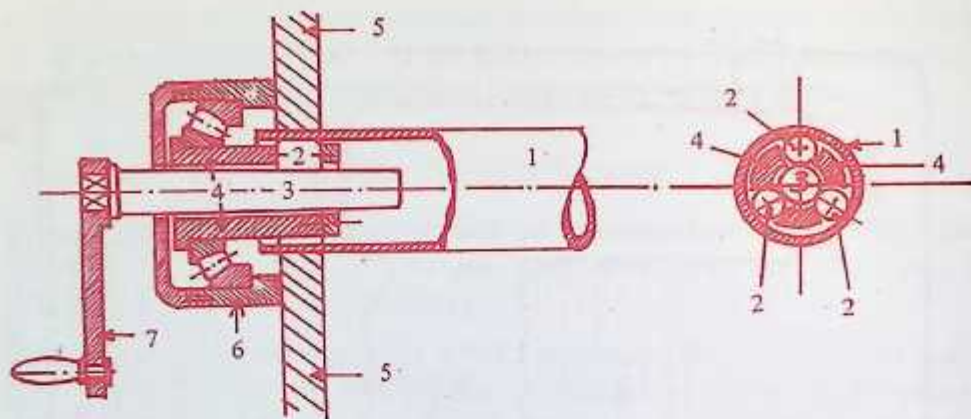


KETEL SCHOTS

KETERANGAN:

- 1 = Pintu bahan bakar
- 2 = Pintu angin bawah
- 3 = Batang-batang rangka bakar.
- 4 = Penyangga batang rangka bakar
- 5 = Jembatan api

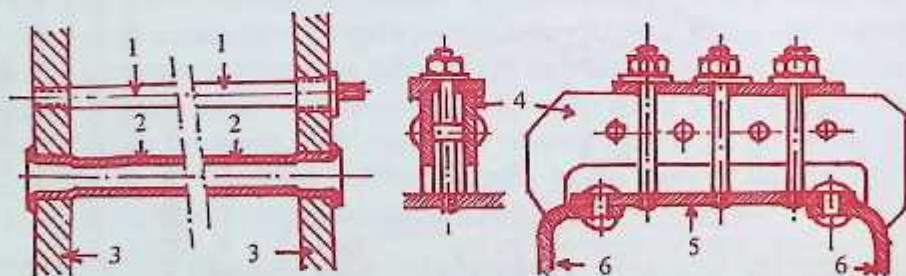
- 6 = Silinder api
- 7 = Kotak api (Flame case)
- 8 = Pipa-pipa api (Fire pipes)
- 9 = Jembatan penunjang
- 10 = Baut-baut dan mur-mur penunjang
- 11 = Lubang orang (man hole)



Cara mengerol pipa pada dinding drum.

KETERANGAN GAMBAR:

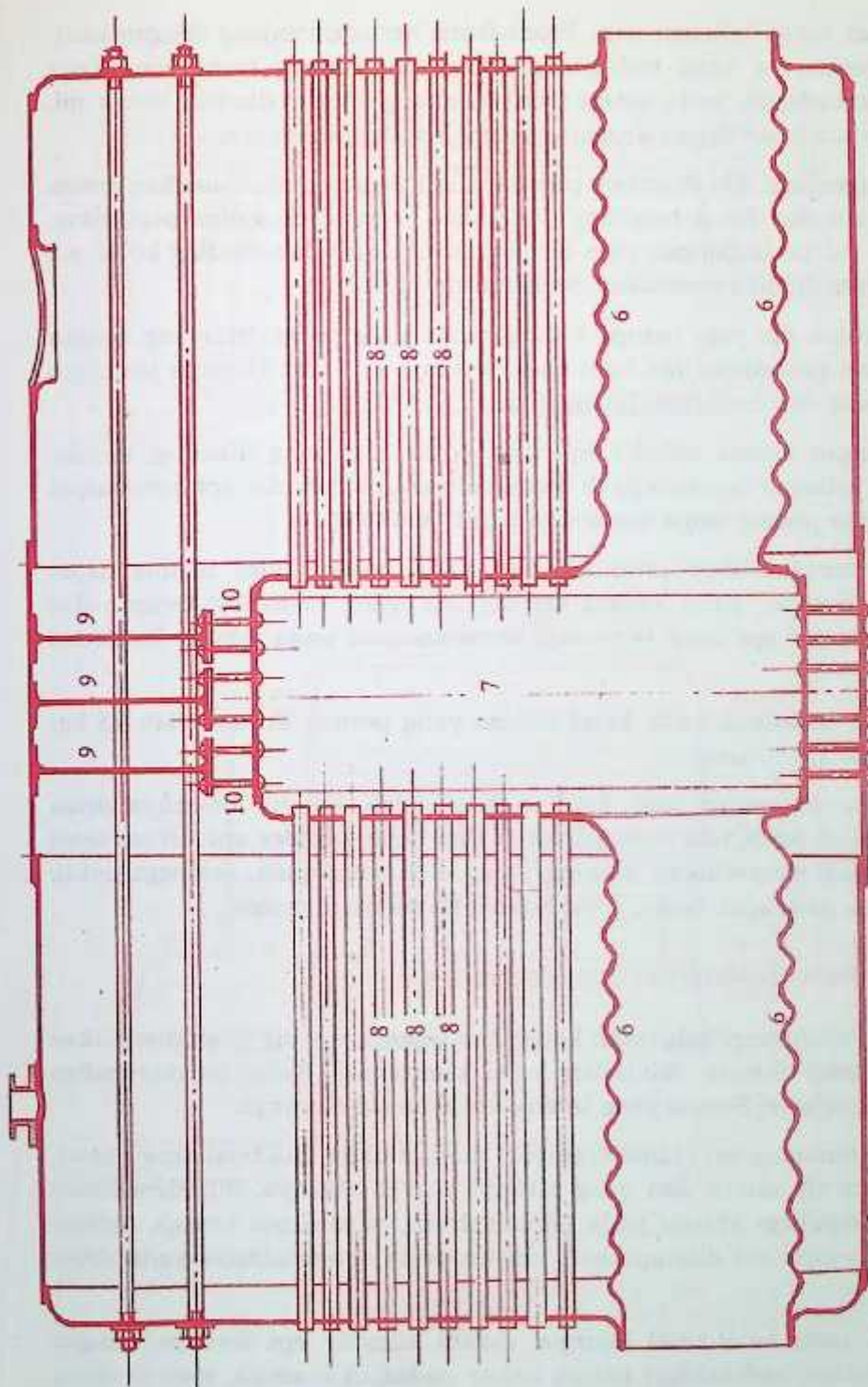
- 1 = Pipa
- 2 = Rol-rol Pelindis
- 3 = Batang konus dengan kekonusan 1 : 100
- 4 = Sangkar rol-rol pelindis
- 5 = Dinding drum ketel
- 6 = Rumah
- 7 = Engkol untuk mengerol pipa



Baut-baut penunjang, Jembatan penunjang dan mur-nya

KETERANGAN GAMBAR:

- 1 = Baut Penunjang
- 2 = Pipa Penunjang
- 3 = Pelat Drum ketel dan Pelat Kotak api
- 4 = Jembatan Penunjang
- 5 = Atap dari Kotak api
- 6 = Pelat-pelat Kotak api



Ketel Schots Kembar

KETERANGAN GAMBAR:

- 6 = Silinder api
- 7 = Kotak api
- 8 = Pipa-pipa api
- 9 = Pelat penunjang
- 10 = Batang-batang penunjang

ini tidak tahan tekanan uap. Front-front harus ditunjang dengan baut-baut penunjang yang terbentang antara dua bidang front yang datar yang berhadapan, yaitu antara front belakang dengan dinding kotak api, atau antara front depan dengan dinding kotak api lainnya.

Kadang-kadang ada di antara pipa-pipa api yang menghubungkan antara kotak api dan front belakang digunakan sebagai pipa-pipa penunjang. Dalam hal ini hubungan pipa dengan front datar dan dinding kotak api bukannya dilindis melainkan dengan hubungan ulir.

Atap kotak api juga berupa bidang datar yang perlu ditunjang dengan jembatan penunjang dan baut-baut penunjang. Lihat Gambar jembatan penunjang dan baut-baut penunjang.

Sambungan antara silinder api dan kotak api yang dikeling, kepala-kepala kelingan hendaknya di daerah aliran api. Silinder api harus dapat dibongkar-pasang tanpa membuka front belakang.

Untuk menghasilkan produksi uap yang besar, ketel Schots dapat dibuat kembar, yang kadang-kadang ada yang membuat dengan dua buah silinder api yang bermuara bersama-sama pada sebuah kotak api saja.

Tekanan maksimal pada ketel Schots yang pernah dibuat ialah 18 kg/cm² atau 1,8 N/mm².

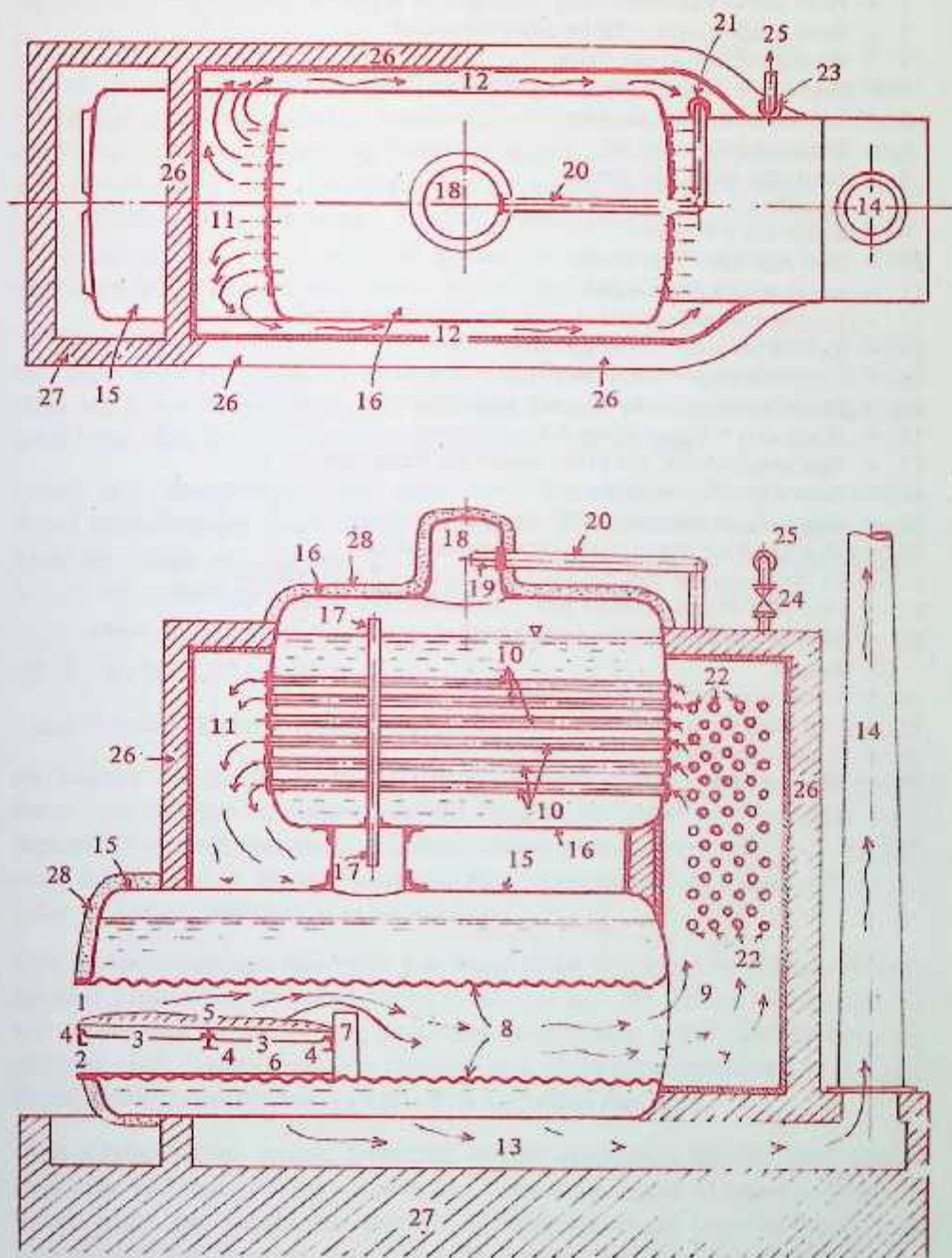
Keberatan-keberatan dari ketel Schots ialah karena besarnya drum ketel, lebih-lebih bila menggunakan tiga buah silinder api. Drum ketel yang besar memerlukan dinding yang lebih tebal pula, sehingga untuk kapasitas yang agak besar, ketel Schots ini menjadi mahal.

28.3. Ketel Kombinasi dan Variannya

Untuk mengurangi keberatan-keberatan semacam yang telah disebutkan untuk ketel Schots, dibuatlah ketel kombinasi. Ketel ini merupakan modifikasi ketel Schots yang telah diuraikan sebelumnya.

Ketel Kombinasi ini (Lihat Gambar) memerlukan dua buah drum ketel, yang satu di bawah dan yang satunya lagi di atasnya. Silinder-silinder api ditempatkan khusus pada sebuah drum yaitu drum bawah, sedangkan pipa-pipa api ditempatkan khusus pada drum lainnya yaitu drum atas.

Seperti pada ketel-ketel lainnya, dalam silinder api terdapat rangka bakar untuk meletakkan bahan bakar padat di atasnya, atau di ujung



GAMBAR KETEL KOMBINASI

KETERANGAN GAMBAR KETEL KOMBINASI:

- 1 = Pintu bahan bakar
- 2 = Pintu angin bawah = Pintu udara sekunder
- 3 = Batang-batang rangka bakar
- 4 = Penyangga batang-batang rangka bakar
- 5 = Lapisan bahan bakar padat
- 6 = Sumuran abu = *Ash pit*
- 7 = Jembatan api = *Fire bridge*
- 8 = Silinder api = *Fire cilinder*
- 9 = Kotak api = *Fire box*
- 10 = Pipa-pipa api = *Fire pipes*
- 11 = Kotak asap = *Smoke box*
- 12 = Lorong gas asap sebelah kanan dan kiri drum ketel
- 13 = Kolong gas asap = *Flue gas canal*
- 14 = Cerobong asap = *Stack = Chimney*
- 15 = Drum bawah = *Lower drum = Lower vessel*
- 16 = Drum atas = *Upper drum = Upper vessel*
- 17 = Pipa penghubung uap drum bawah ke drum atas
- 18 = Dom uap = *Steam dome*
- 19 = Pipa pengambilan uap kenyang dari dom uap
- 20 = Pipa uap kenyang menuju Pemanas lanjut uap
- 21 = Tabung pembagi uap kenyang = *Saturated Steam Header*
- 22 = Pipa-pipa Pemanas lanjut uap = *Superheater's pipes*
- 23 = Tabung pengumpul uap yang dipanaskan lanjut = *Superheated Steam Header*
- 24 = Keran uap utama = *Main Steam Valve*
- 25 = Uap yang dipanaskan lanjut menuju ke pemakaian
- 26 = Tembakan ketel
- 27 = Fondasi ketel

silinder api tersebut dapat ditempatkan pembakar atau burner, bila bahan yang digunakan minyak bakar atau gas alam.

Untuk menghubungkan api atau gas asap dari silinder api di drum bawah dengan pipa-pipa api di drum atas, di bagian depan terdapat kotak api yang terbuat dari tembokan-tembokan batu tahan api. Dalam kotak api ini dapat dipasang Pemanas lanjut uap atau *Superheater*, ataupun pemanas air awal (*water pre-heater* atau *ekonomiser*) seperti halnya pada ketel-ketel yang besar. Sehingga dengan demikian terdapat kombinasi antara pipa-pipa api dan pipa-pipa air atau pipa-pipa uap. Yang demikian ini menyebabkan ketel ini disebut ketel kombinasi.

Adapun uraian penjelasan mengenai peralatan-peralatan drum khusus, dan pipa-pipa api pada drum khusus lainnya, maka drum-drum tersebut akan lebih kecil diameternya, sehingga dengan demikian drum juga bisa lebih tipis, dan harganya pun menjadi jauh berkurang.

Selain itu, keuntungan lain dari ketel Kombinasi ialah kemungkinan dapat dipasangnya *Superheater* ataupun *Ekonomiser*, sedangkan pada ketel pipa-pipa api lainnya paling banyak hanya dapat dipasang *Superheater* saja, yaitu pada ketel Lokomotip, yang akan dibicarakan.

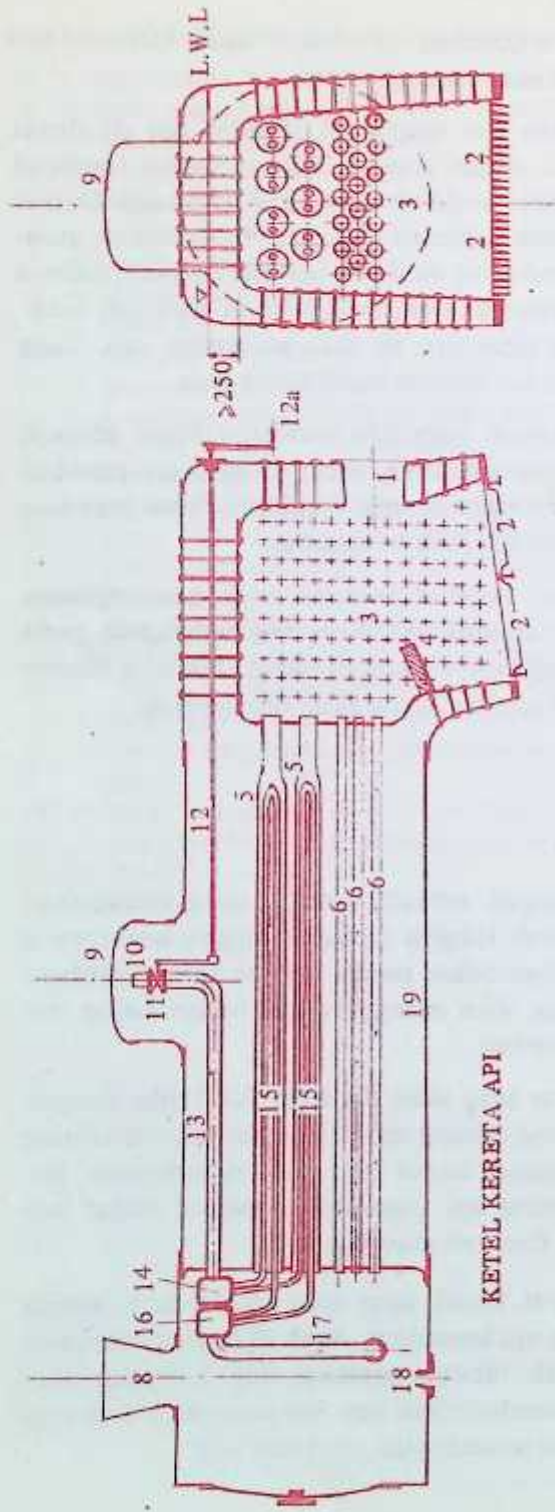
28.4. Ketel Lokomotip

Lihat Gambar Ketel Lokomotip

Di bagian belakang ketel terdapat sebuah tungku yang merupakan kotak api dengan di bagian bawah tungku terdapat rangka bakar yang digunakan untuk membakar bahan bakar padat, berupa kayu, batubara atau bahan bakar padat lainnya. Jika menggunakan bahan bakar minyak, dipasang pembakar atau *burner*.

Dari tungku api ini, api atau gas asap akan dialirkan ke depan dengan melalui pipa-pipa api atau tabung-tabung api. Di dalam tabung-tabung api ditempatkan pipa-pipa pemanas lanjut uap atau *superheater*, tergantung dari besar-kecilnya tabung api, pipa-pipa pemanas lanjut uap dapat ditebuk-tekukkan: sekali, dua kali atau tiga kali.

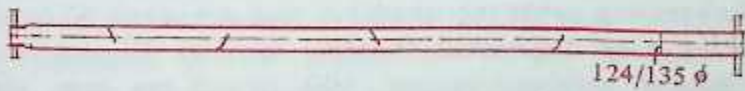
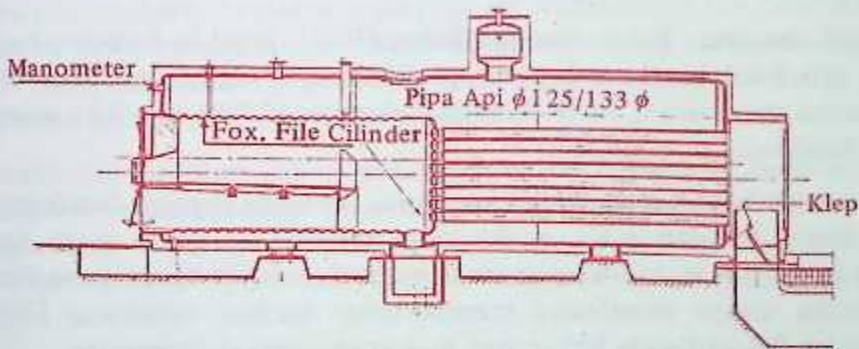
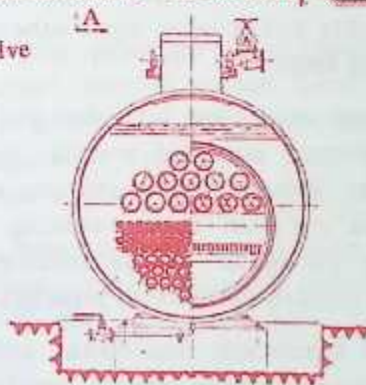
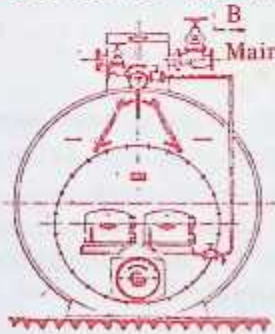
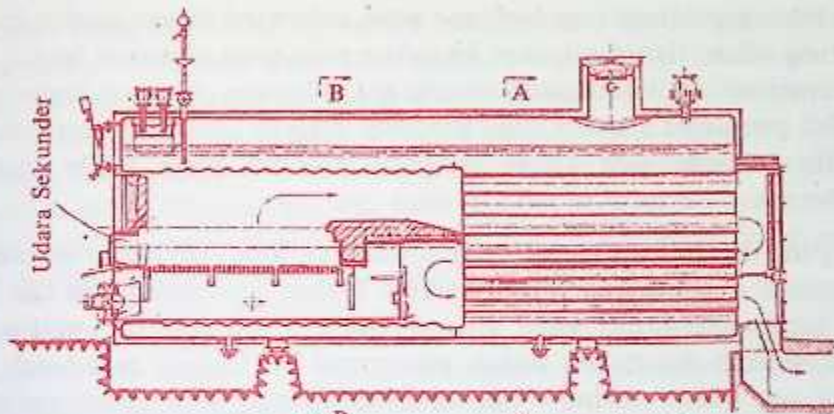
Pada ujung depan ketel, terdapat kotak asap atau smoke box, semua pipa-pipa api dan tabung-tabung api bermuara. Agak di bagian atas pada kotak asap ini, terdapat sebuah tabung pembagi uap kenyang atau *saturated steam header*, yang mendapatkan uap kenyang dari dom uap atau *steam-dome*, dengan melalui sebuah pipa penyalur uap.



KETEL KERETA API

KETERANGAN:

- | | | | |
|------|-------------------------------|-------|--|
| 1 = | Pintu bahan bakar | 11 = | Keran uap utama (Main steam valve) |
| 2 = | Batang-batang rangka bakar | 12 = | Batang pengatur pengambilan uap |
| 3 = | Kotak api | 12a = | Tuas (handle) pengatur |
| 4 = | Jembatan api | 13 = | Pipa uap kembang menuju superheater |
| 5 = | Tabung-tabung api (Fire tube) | 14 = | Header (pembagi) uap kembang |
| 6 = | Pipa-pipa api (Fire pipes) | 15 = | Pipa-pipa superheater (pemanas lanjut) |
| 7 = | Kotak asap (Smoke box) | 16 = | Header (pengumpul) uap dipanaskan. |
| 8 = | Cerobong asap | 17 = | Pipa uap yang dipanaskan - lanjut |
| 9 = | Dom uap (Steam dome) | 18 = | Penghembus |
| 10 = | Pengambilan uap | 19 = | Tangki ketel (Boiler vessel) |



Ketel Lokomobil yang dipasang tetap di darat

Dari tabung pembagi uap kenyang atau *saturated steam header* ini, uap kenyang dibagi dan disalurkan ke dalam pipa-pipa pemanas lanjut, yang ditempatkan di dalam tabung-tabung api, sehingga pemanas lanjut memperoleh panasnya dari api atau gas asap dengan cara pancaran ataupun sebagian dengan cara konveksi, yaitu tempat yang lebih jauh dari tungku api.

Uap yang dipanaskan lanjut yang dihasilkan ketel ini, akan melakukan ekspansi di dalam mesin uap torak atau turbin uap, dan mesin uap torak atau turbin uap inilah yang menggerakkan roda-roda lokomotif. Uap bekas, setelah digunakan untuk menggerakkan mesin uap torak atau turbin uap, akan menuju corong penghembus. Gas asap yang terdapat pada kotak asap akan dihembus ke luar oleh uap bekas melalui cerobong asap.

Hembusan uap bekas terhadap gas asap di kotak asap akan membantu memperlancar arus api melalui pipa-pipa api dan tabung-tabung api untuk ke luar melalui cerobong asap. Kelancaran arus api di dalam pipa-pipa api dan tabung-tabung api akan memperbesar angka penyerahan panas dari api ke dinding pipa api ataupun tabung api. Hal ini berbeda dengan ketel-ketel pipa api lainnya.

Bantuan hembusan uap bekas terhadap gas asap di kotak asap akan berarti memperbesar tarikan cerobongnya atau *stackdraught*. Sehingga dengan demikian dapat dibakar bahan bakar yang lebih banyak di atas rangka bakar atau di dalam tungku, kira-kira sebanyak **dua kali** dibandingkan ketel-ketel pipa api lainnya.

Dengan demikian Beban Rangka Bakar (BRB) ketel Lokomotif hampir dua kali BRB ketel-ketel pipa api lainnya. Dengan demikian untuk kapasitas yang sama, Luas Rangka Bakarnya (LRB) kira-kira setengah dari ketel-ketel pipa api lain.

Pintu angin bawah menghadap ke depan, sehingga dengan demikian bila lokomotif berjalan maju, maka akan terjadi hembusan angin bawah yang makin besar, bila kecepatan lokomotif makin besar, yang dengan demikian makin membantu memperbesar tarikan cerobong. Dengan demikian Beban Rangka Bakar juga makin meningkat karenanya.

Ketel Lokomotif dapat menghasilkan uap sebanyak 63 kg uap per m² luas bidang yang dipanaskan (*heating surface*). Di atas rangka bakar dapat dibakar batubara sampai 500 kg/m² per jam, atau sekitar 12.500.000 KJ/m².jam luas rangka bakar (LRB) untuk jenis batubara yang baik.

Keadaan yang demikian ini sangat membantu fleksibilitas operasional penggunaan ketel uap pada lokomotif, yaitu makin bertambah beban ketel lokomotif, justru makin bertambah besar Beban Rangka Bakarnya. Atau dengan kata lain: Beban Rangka Besar sebanding atau seimbang dengan beban lokomotif atau dengan kecepatannya. Dengan demikian ketel lokomotif pada berbagai beban atau kecepatan dengan sangat mudah dapat menyesuaikannya. Tidak ada ketel yang sedemikian fleksibel seperti ketel lokomotif ini.

Besar dan panjangnya ketel lokomotif harus disesuaikan dengan ketentuan *profil bebas* jalan kereta api yang telah ditentukan oleh pihak PJKA atau oleh Departemen Perhubungan.

Kotak api atau tungku berdinding datar, sehingga perlu diberi penguat agar tidak melengkung kena tekanan uap di dalam ketel. Penguat-penguat berupa jembatan-jembatan penunjang dan baut-baut penunjang, ataupun baut-baut jarak. Pipa-pipa api dapat pula digunakan sebagai pipa-pipa penunjang. Pipa-pipa api bergaris tengah 45 mm.

Pada ujung paling depan, yaitu di sebelah depan kotak asap, terdapat pintu yang dapat dibuka-buka, dengan maksud untuk membersihkan pipa-pipa api atau tabung-tabung api dari kotoran-kotoran hasil pembakaran yang berupa abu.

Ke dalam pipa-pipa api dimasukkan batang yang mudah dilengkungkan, dan dengan menggunakan hembusan uap, segala kotoran dihembus ke luar. Jika pembersihan dengan cara tersebut kurang memuaskan hasilnya, ke dalam pipa-pipa api dimasukkan bor pipa. Bor-bor pipa ini akan menghilangkan kotoran-kotoran yang mengerak. Bor-bor pipa tidak lain berupa pegas-pegas spiral yang digulung tirus, yang dapat pas betul masuk di lubang-lubang pipa.

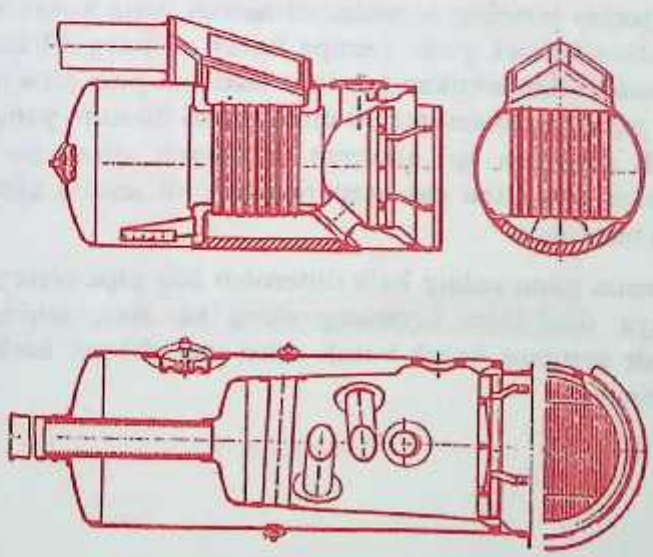
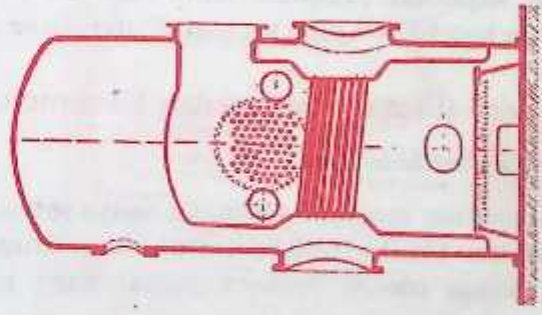
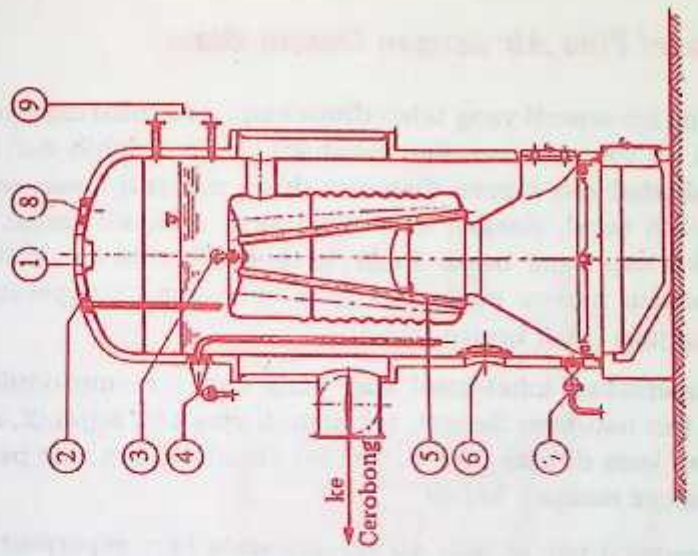
Gas-gas dari destilasi bahan bakar, harus sudah terbakar habis sebelum memasuki lubang-lubang pipa api atau tabung api, agar tidak terjadi pengerakan aspal pada pipa-pipa. Dengan demikian batubara yang menyala dengan nyala api yang panjang tidak dapat digunakan pada ketel lokomotif.

Sirkulasi air di dalam drum ketel berlangsung dengan cukup memuaskan. Tekanan maksimal ketel lokomotif di Indonesia hanya sampai 12 km/cm², sedangkan di luar negeri bisa sampai 22 kg/cm². Untuk pengopakan yang dilayani dengan tangan, LRB maksimum ialah 4 m².

28.5. Ketel-ketel Tegak dan Ketel Cochran

Untuk jumlah produksi uap yang kecil-kecil, sekitar 0,2 sampai 1,0 ton uap per jam, digunakan ketel uap yang paling sederhana yaitu ketel tegak dan ketel Cochran. Ketel uap ini umumnya digunakan untuk melayani mesin-mesin pengangkat atau mesin-mesin pemancang tiang pancang, dan dapat dipindah-pindahkan. Lihat Gambar-gambar ketel tegak.

Efisiensi ketel ini rendah, tetapi harganya pun murah. Tekanan di dalam tangki ketel tidak lebih dari 8 kg/cm².



Ketel-ketel Tegak dan ketel Cochran

29. Ketel-ketel Pipa Air dengan Desain Biasa

Ketel-ketel pipa api seperti yang telah diuraikan, produksi uapnya tidak akan melebihi 10 ton uap/jam, dan tekanannya tidak lebih dari 22 kg/cm². Hal ini disebabkan karena diameter drum menjadi besar, sehingga drum harus lebih tebal, dengan sendirinya akan menjadi sangat mahal untuk produksi uap yang besar. Pada ketel-ketel pipa api, elastisitas terhadap pemuaian karena panas cukup memuaskan. Temperatur uap yang dihasilkan juga tidak begitu tinggi.

Dewasa ini diperlukan ketel-ketel uap yang dapat memproduksi uap di atas 1.000 ton uap/jam, dengan tekanan di atas 100 kg/cm², dengan temperatur uap jauh di atas 500° C. Hal ini dimaksudkan agar pemakaian bahan bakarnya menjadi hemat.

Untuk memproduksi uap di atas 40 kg/cm² serta bertemperatur di atas 500° C dengan kapasitas produksi lebih dari 15 ton uap/jam, hanya dapat digunakan ketel-ketel pipa air atau *Water Tube Boiler*.

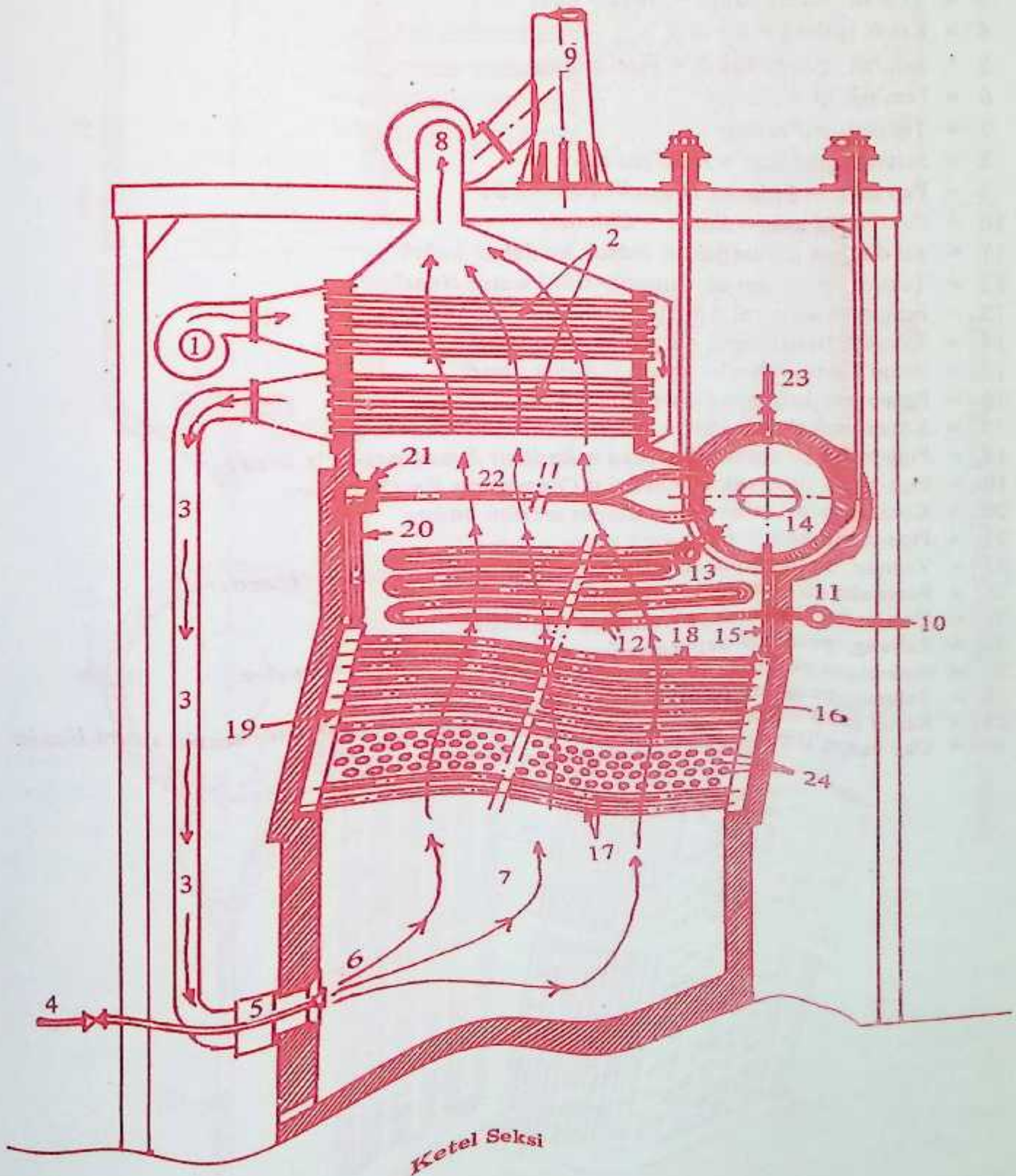
29.1. Ketel Seksi (Section Boiler) dan Variannya

Lihat Gambar-gambar ketel seksi

Dalam gambar-gambar tersebut terlihat adanya sebuah drum ketel yang berdiameter sekitar 1200—1600 mm. Dari dasar drum ketel ini terdapat pipa-pipa air terjun (*down comer's pipes*) yang berdiameter sekitar 100 mm.

Pipa-pipa air terjun tersebut berakhir di bawah pada kotak-kotak seksi air (*water section boxes*), yaitu berupa kotak air yang dibuat berkelok-kelok, yang pada setiap lekukan tersebut terdapat pipa-pipa penguap air (*evaporator's pipes*) berdiameter 60 mm sampai 80 mm, yang ditempatkan di daerah pancaran api ataupun di daerah aliran gas asap atau daerah konveksi. Api atau gas asap mengalir di antara pipa-pipa dan menyerahkan panasnya.

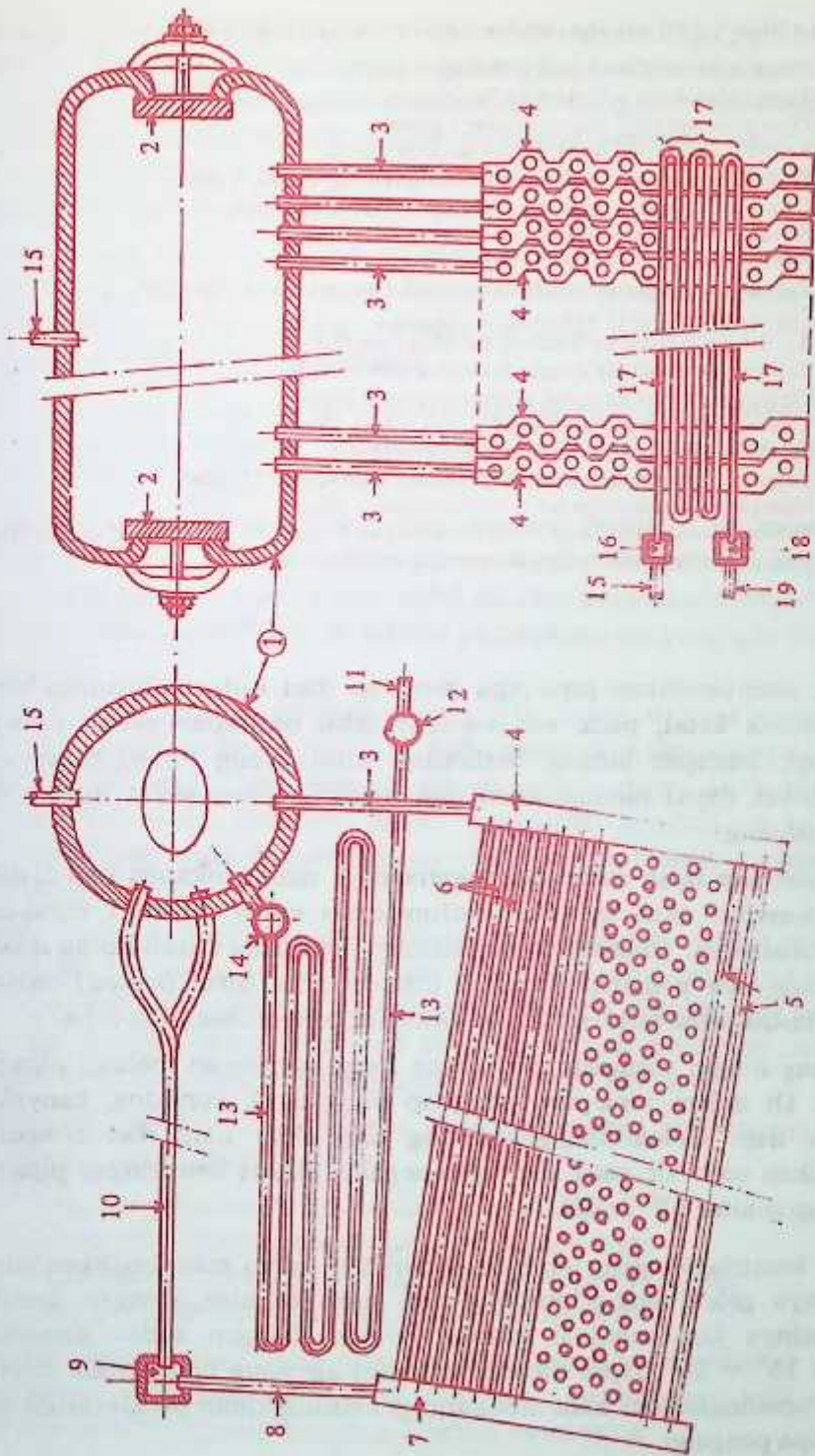
Penyerahan panas yang paling baik diperoleh bila pipa-pipa penguap air penempatannya dilakukan berselang-seling ke atas, sehingga kotak-kotak seksi air maupun kotak-kotak seksi uap dibuat berkelok-kelok menyesuaikan.



Ketel Seksi

KETERANGAN GAMBAR KETEL SEKSI:

- 1 = Fan tekan = *Forched Draught Fan = FDP*
- 2 = Pemanas udara = *Air Pre-heater*
- 3 = Saluran udara panas = *Hot air duct*
- 4 = Kotak udara = *Air box*
- 5 = Saluran bahan bakar = *Fuel supply*
- 6 = Pembakar = *Burner*
- 7 = Tungku = *Furnace*
- 8 = Saluran gas asap = *Flue gas duct*
- 9 = Fan isap = *Induced Draught Fan = FDF*
- 10 = Cerobong asap = *Stack = Chimney*
- 11 = Air dingin dipompakan masuk ke dalam ketel
- 12 = Tabung pembagi air dingin = *Cold water Header*
- 13 = Pemanas air awal = *Water pre-heater = Ekonomiser*
- 14 = Tabung pengumpul air panas = *Hot water Header*
- 15 = Drum ketel = *Boiler drum = Boiler vessel*
- 16 = Pipa-pipa terjun = *Downcomer's pipes*
- 17 = Kotak-kotak seksi air = *Water section boxes*
- 18 = Pipa-pipa penguap pancaran = *Radiant Evaporator's pipes*
- 19 = Pipa-pipa penguak konveksi = *Convection Eva's pipes*
- 20 = Kotak-kotak seksi uap = *Steam section boxes*
- 21 = Pipa-pipa naik = *Up-riser's pipes*
- 22 = Tabung pengumpul uap kenyang = *Saturated steam Header*
- 24 = Pemisah air = *Water separator*
- 25 = Uap kenyang menuju pemanas lanjut uap
- 26 = Tabung pembagi uap kenyang = *Saturated steam Header*
- 27 = Pipa-pipa pemanas lanjut uap = *Steam Superheater*
- 28 = Tabung pengumpul uap yang dipanaskan lanjut = *Superheated steam Header*
- 29 = Keran uap utama = *Main steam valve = Throttle valve*
- 30 = Uap yang dipanaskan lanjut menuju ke pemakaian



GAMBAR DETAIL BAGIAN-BAGIAN KETEL SEKSI

KETERANGAN DETAIL BAGIAN—BAGIAN KETEL SEKSI:

- 1 = Drum ketel = Biler vessel = Boiler drum
- 2 = Tutup Man-hole = Tutup Lubang orang.
- 3 = Pipa-pipa terjun = Down-comer's pipes
- 4 = Kotak-kotak seksi air = Water section boxes
- 5 = Pipa-pipa penguap pancaran = Radiant Evaporator's pipes
- 6 = Pipa-pipa penguap konveksi = Convection Eva pipes
- 7 = Kotak-kotak seksi uap = Steam section boxes
- 8 = Pipa-pipa naik = Up-riser's pipes
- 9 = Tabung pengumpul uap kenyang = Saturated Steam Header
- 10 = Pipa-pipa penyalur uap.
- 11 = Air dingin masuk ke-Tabung pembagi air dingin
- 12 = Tabung pembagi air dingin = Cold water Header
- 13 = Pipa-pipa pemas air awal = Economiser's pipes
- 14 = Tabung pengumpul air panas = Hot water Header
- 15 = Pipa uap kenyang menuju pemanas lanjut
- 16 = Tabung pembagi uap kenyang = Saturated steam Header
- 17 = Pipa-pipa pemanas lanjut = Superheater's pipes
- 18 = Tabung pengumpul uap yang dipanaskan lanjut = Superheated stema Header
- 19 = Uap yang dipanaskan lanjut menuju ke-pemakaian

Untuk membersihkan pipa-pipa penguap dari kotoran-kotoran berupa kerak-kerak ketel, pada kotak-kotak seksi di depan setiap pipa-pipa penguap, terdapat lubang berbentuk ellips yang diberi tutup ellips pula untuk dapat memasukkan dan mengeluarkan lewat lubang ellips yang panjang.

Bila ketel uap telah mencapai tekanannya, maka tekanan uap di dalam ketel tersebut akan menekan tutup-tutup ellips tersebut rapat-rapat pada lubangnya. Melalui lubang-lubang ellips pada kotak-kotak seksi ini pula pipa-pipa penguap tersebut dilindis atau dirol (*rolled*) terhadap kotak-kotak seksi tersebut. Lihat Gambar pengerolan pipa-pipa.

Air yang dingin mengalir dari drum ketel ke bawah melalui pipa-pipa terjun. Di dalam pipa-pipa penguap yang agak condong, banyak dibentuk uap. Gelembung-gelembung uap akan naik dan tempatnya digantikan oleh air yang datang mengalir. Sudut kemiringan pipa-pipa penguap sekitar $15^{\circ} - 20^{\circ}$.

Sudut kemiringan yang lebih kecil dari 20° akan menyebabkan kurang lancarnya gelembung-gelembung uap naik ke atas, dengan demikian sirkulasinya juga menjadi kurang lancar. Dengan sudut kemiringan sekitar $15^{\circ} - 20^{\circ}$ dapat dicapai sirkulasi air yang baik sekali, sehingga tidak memungkinkan atau mengurangi kemungkinan pecah-terbakarnya pipa-pipa penguap.

Di dalam pipa-pipa penguap air inilah air diuapkan. Pipa-pipa penguap bermuara pada kotak-kotak seksi uap kenyang (*saturated steam section boxes*) yang bentuknya tepat sama simetri dengan kotak-kotak seksi air. Uap yang terbentuk di dalam pipa-pipa penguap, akan menuju ke kotak-kotak seksi uap kenyang, dan dari sini uap tersebut akan naik melalui pipa-pipa uap naik (*steam up-riser's pipes*).

Pipa-pipa uap naik bermuara di bagian atas pada sebuah pengumpul uap kenyang (*saturated steam header*) yang irisannya berupa bujur sangkar, bundar atau empat persegi panjang, dengan sisi terpendek atau jari-jari sekitar 300 — 400 mm.

Pada header uap kenyang ini, semua uap kenyang yang terbentuk dari dalam pipa-pipa penguap, kotak-kotak seksi uap dan pipa-pipa naik (*up-riser*) akan terkumpul pada header uap kenyang ini.

Dari header uap kenyang ini, uap dan air dialirkan ke drum ketel melalui pipa-pipa penyalur. Pipa-pipa penyalur secara berselang-seling, ada yang bermuara pada drum ketel di atas permukaan air, ada yang bermuara pada drum ketel di bawah permukaan air yang ada di dalam drum.

Pipa-pipa penyalur yang bermuara pada drum di atas permukaan air ialah pipa-pipa penyalur uap. Sedangkan pipa-pipa penyalur yang bermuara di bawah permukaan air di dalam drum ialah pipa-pipa penyalur air, yang berfungsi untuk pengaliran kembali air ke dalam drum ketel, sehingga temperatur dan tekanannya hampir merata di seluruh ketel.

Setiap pipa air terjun akan bermuara pada sebuah kotak seksi air. Dan antara sepasang kotak seksi air dan kotak seksi uap yang bentuknya sama dan simetri tersebut terdapat beberapa pipa-pipa air penguap. Dan dari setiap kotak seksi uap terdapat sebuah pipa uap naik atau *up-riser* yang menghubungkannya ke-header uap kenyang.

Dengan demikian **satu seksi ketel** yang merupakan **satu set seksi** (satu perangkat seksi), terdiri dari:

- sebuah pipa air terjun (*down comer's pipe*),
- sepasang kotak seksi air dan kotak seksi uap,
- sejumlah pipa-pipa penguap air (*evaporator's pipes*),
- dan sebuah pipa uap naik *steam up-riser pipe*)

Sehingga dengan demikian satu set seksi tersebut merupakan sebuah ketel mini, yang masing-masing terpisah antara yang satu dengan yang lain, sehingga ketel tersebut disebut ketel seksi.

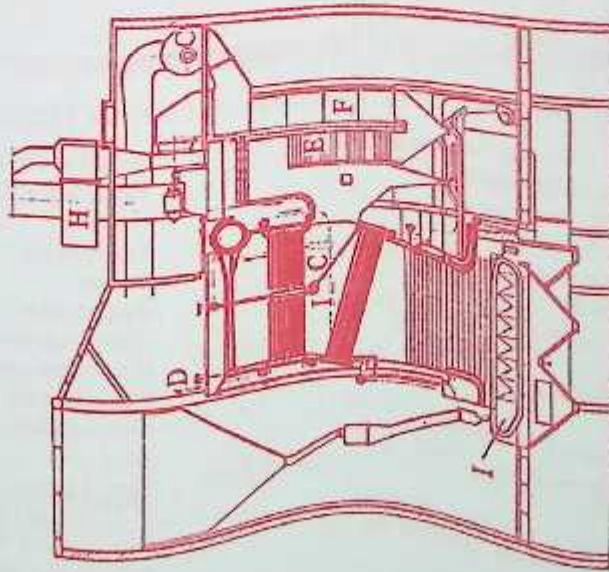
Karena letak drum digantung pada kerangka bangunan ketel dan letak header uap kenyang juga digantung pula pada kerangka bangunan ketel, sedangkan satu set seksi tersebut setengahnya tergantung pada drum dengan menggunakan pipa-pipa *terjun*, dan setengahnya yang lain tergantung pada header uap kenyang dengan menggunakan pipa-pipa naik, maka satu set seksi tersebut akan dapat memuai dengan bebas bila kena panas, tanpa ada pengaruhnya antara satu set seksi yang satu dengan satu set seksi lainnya.

Makin ke bawah letak pipa-pipa penguap air, makin lebih banyak memuai, namun karena pemuaiannya sebanding atau proporsional dengan letaknya, maka tidak akan menimbulkan kesukaran-kesukaran.

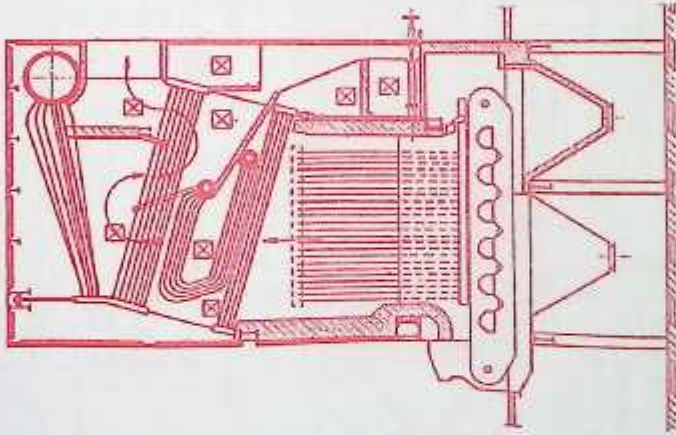
Api atau gas asap setelah memanasi pipa-pipa penguap air, akan mencapai dan memanasi pipa-pipa pemanas lanjut uap atau superheater, pemanas air awal atau ekonomiser, dan pemanas udara atau air-pre-heater, sebelumnya meninggalkan cerobong asap.

Lihat Gambar-gambar ketel seksi. Di antara ketel-ketel Seksi tersebut ada ketel Seksi yang pada tungku di bawahnya dikelilingi dengan pipa-pipa penguap pancaran, seperti halnya pada ketel Pancaran yang akan dibahas kemudian. Ketel-ketel tersebut merupakan kombinasi antara ketel Seksi dan ketel Pancaran.

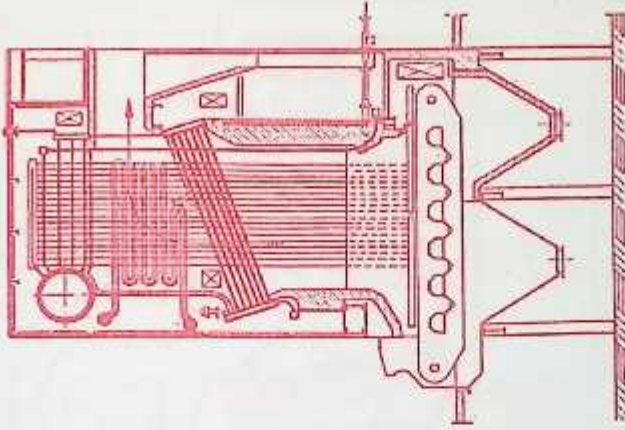
BEBERAPA VARIANT KETEL SEKSI



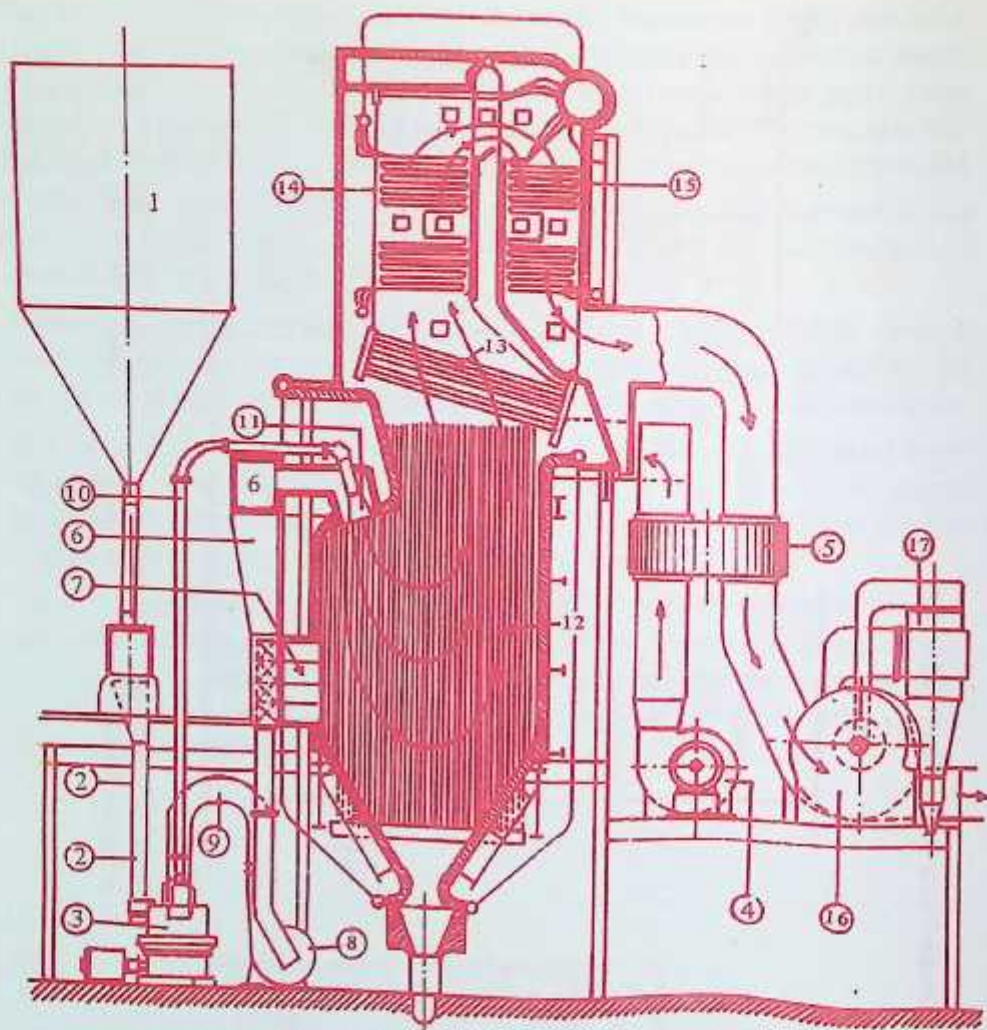
Ketel Seksi untuk tekanan tinggi



Ketel Seksi dengan Pemanas Lanjut di antara berkes-berkes pipa penguap

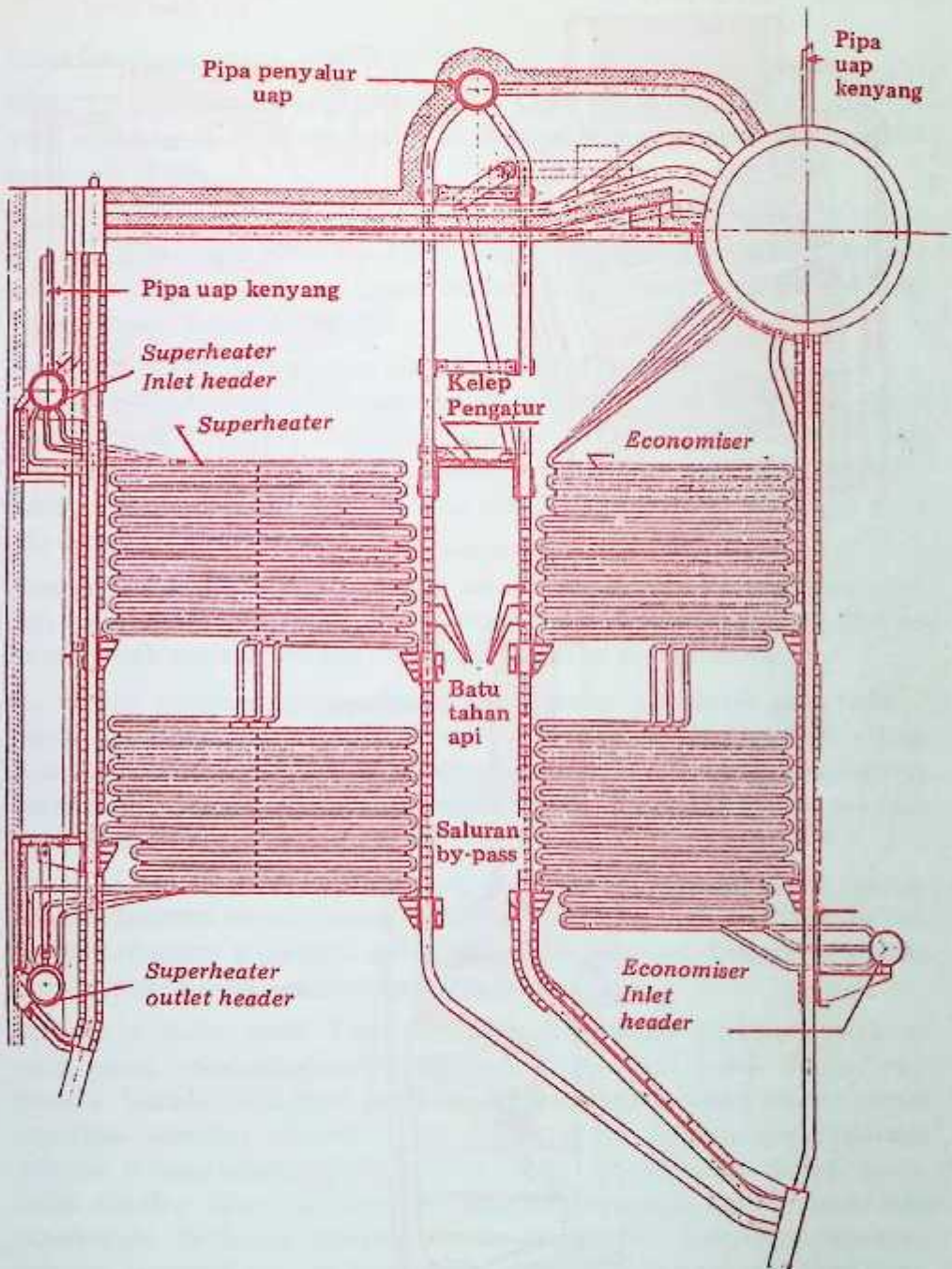


Ketel Seksi dengan pipa terjun yang di luar aliran api

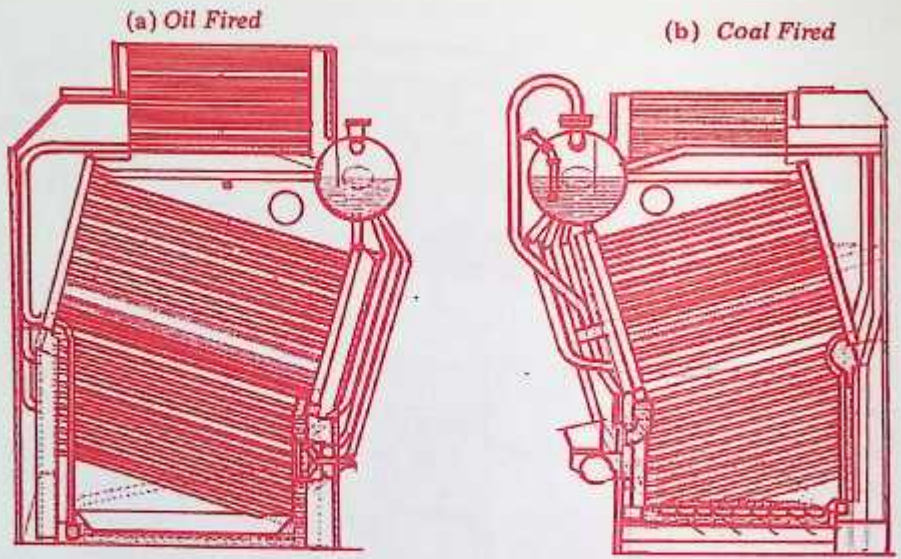


KETEL SERI = KETEL PANCARAN DAN KETEL SEKSI

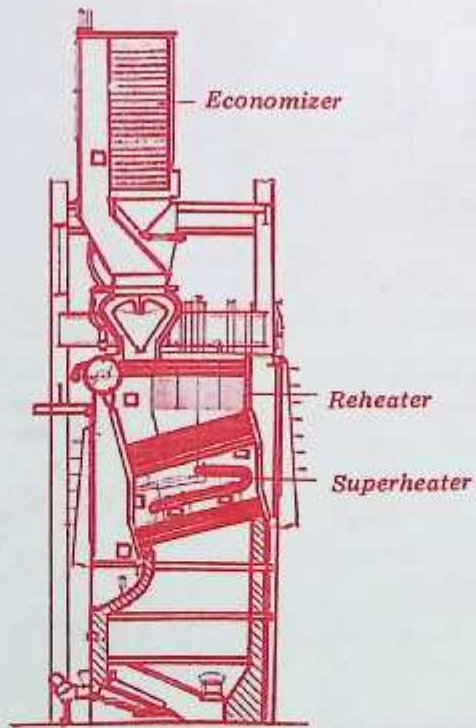
- | | | | |
|-----|--|------|---|
| 1 = | Coal Bin = Bin batubara pasir | 10 = | Saluran transportasi serbuk batubara dari Coal mill ke burner |
| 2 = | Saluran batubara pasir | 11 = | Pembakar = Pulverized coal burner |
| 3 = | Penggiling batubara = Coal Mill | 12 = | Evaporator Pancaran = Radiat Evaporator |
| 4 = | Fan Tekan = Forced Draught Fan = F.D.F. | 13 = | Pipa-pipa penguap ketel Seksi |
| 5 = | Pemanas Udara = Air Pre-Heater | 14 = | Superheater |
| 6 = | Saluran Udara panas = Hot Air Duct | 15 = | Ekonomiser = Pemanas air awal |
| 7 = | Saluran Udara Sekunder | 16 = | Fan Isap = Induced Draught Fan = I.D.F. |
| 8 = | Fan Penghembus udara primair | 17 = | Pengumpul Debu type Siklon = Cyclone Dust Collector |
| 9 = | Saluran udara primair sebagai media transportasi serbuk batubara | | |



Penempatan dan pemasangan pemanas lanjut uap dan ekonomiser pada ketel seri (Ketel pancaran dan ketel seksi).



Ketel seksi dengan bahan bakar minyak dan bahan bakar batubara



Ketel seksi dengan rangka bakar tangga

29.2. Ketel Yarrow:

Lihat Gambar-gambar ketel Yarrow:

Ketel YARROW banyak digunakan di kapal-kapal laut, namun ada juga yang dipasang di darat sebagai ketel pembangkit uap untuk pembangkitan tenaga listrik.

Pada ketel Yarrow terdapat sebuah drum utama ketel yang dipasang di atas. Dari drum utama sebelah atas ini dihubungkan oleh pipa-pipa penguap dengan dua buah drum bawah, dengan sudut kemiringan pipa-pipa penguap air lebih dari 20°

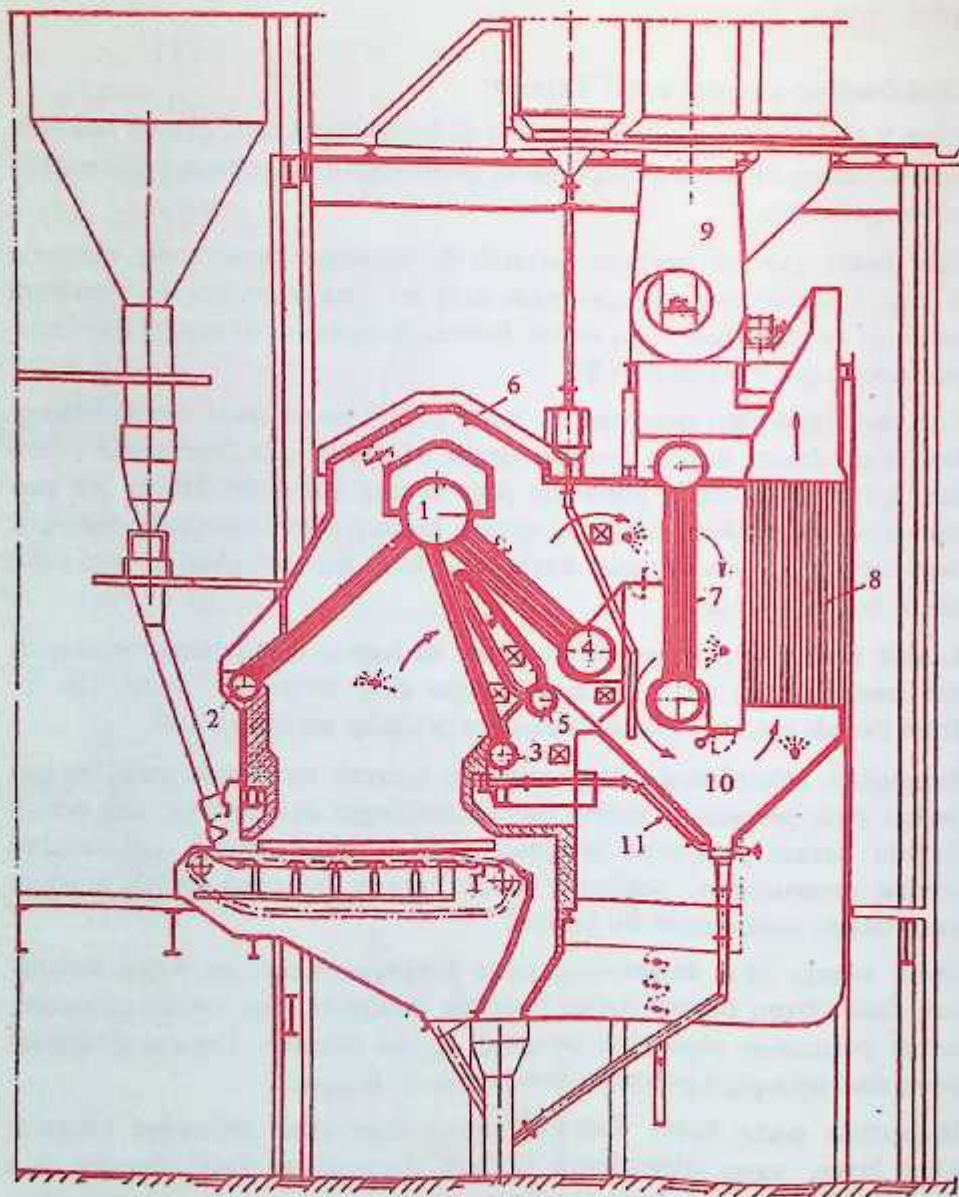
Dua baris pipa-pipa penguap air yang paling bawah yang menghubungkan drum-drum bawah dengan drum utama di atas, menerima panas dari api selain secara konveksi juga secara pancaran. Makin ke atas pipa-pipa penguap air tersebut, makin kurang menerima panas, sehingga baris-baris pipa sebelah atas kurang memuai dibandingkan dengan yang ada di bagian bawah.

Karena berkas pipa-pipa penguap air di bagian atas kurang mendapatkan panas, maka air yang agak dingin akan turun dari drum atas ke drum bawah melalui berkas pipa-pipa penguap air bagian atas.

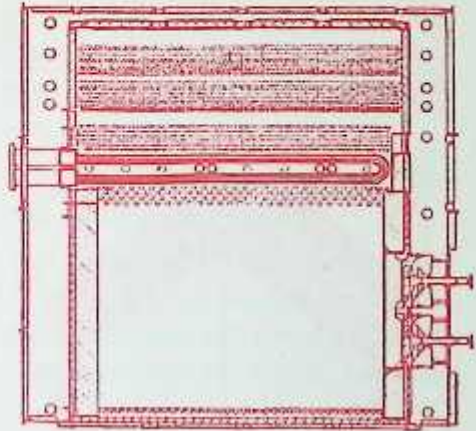
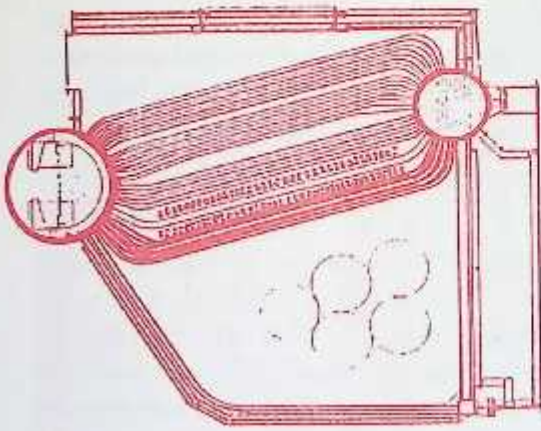
Sedangkan gelembung-gelembung uap banyak terbentuk pada berkas-berkas pipa penguap sebelah bawah, sehingga sirkulasinya baik sekali. Namun berkas pipa-pipa penguap yang di tengah-tengah, sirkulasinya kurang memuaskan. Sehingga ketel Yarrow ini tidak untuk tekanan yang tinggi, maksimum 80 kg/cm^2

Drum utama atas tergantung pada kerangka bangunan ketel, sedangkan drum-drum bawah dapat bergeser menjauhi, dan sedikit memutar, untuk pemuaian pipa-pipa penguap. Lihat Gambar. Dengan demikian pemuaian pipa-pipa penguap menjadi lebih leluasa.

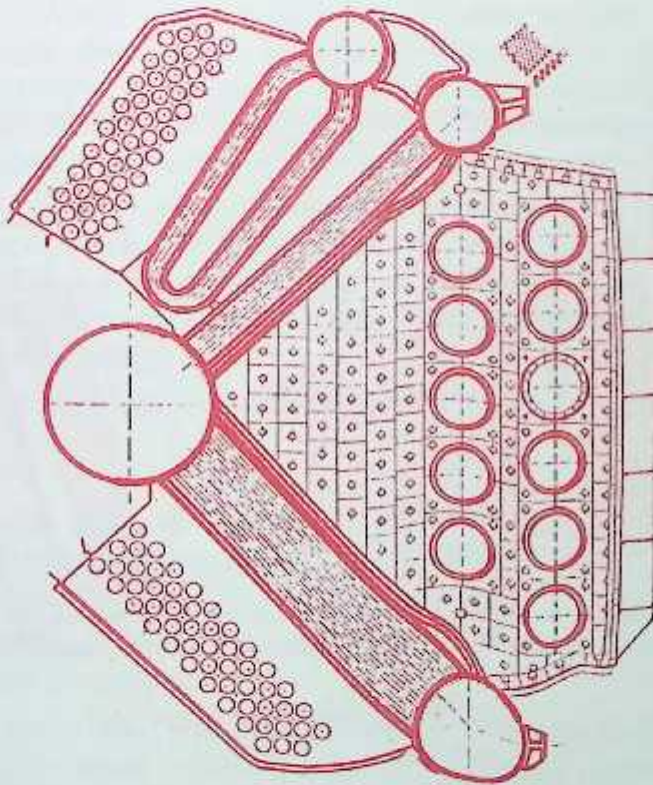
Mula-mula pada ketel Yarrow hanya digunakan pipa-pipa penguap yang lurus, yang disambung dengan drum-drum ketel dengan cara dilindis. Karena pipa-pipa penguap tersebut lurus, maka lubang untuk pipa-pipa tersebut diborkan ke dalam drum dengan posisi miring. Adanya lubang-lubang pipa miring yang diborkan ke dalam drum, maka dinding drum di tempat tersebut menjadi kurang kuat atau diperlemah. Sehingga dinding drum di tempat masuknya pipa-pipa penguap tersebut dibuat lebih tebal dibanding tempat lain yang tidak ada lubang-lubang untuk pipa-pipa tersebut.



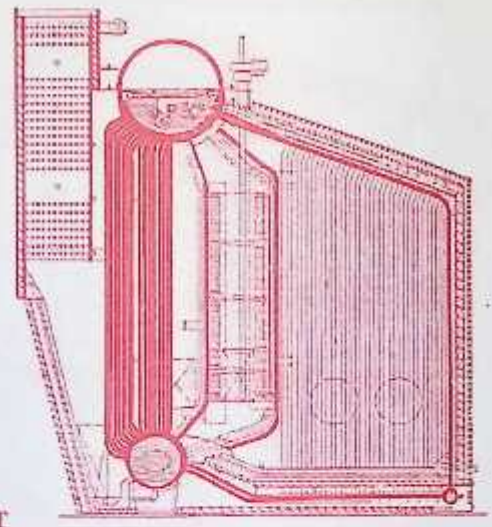
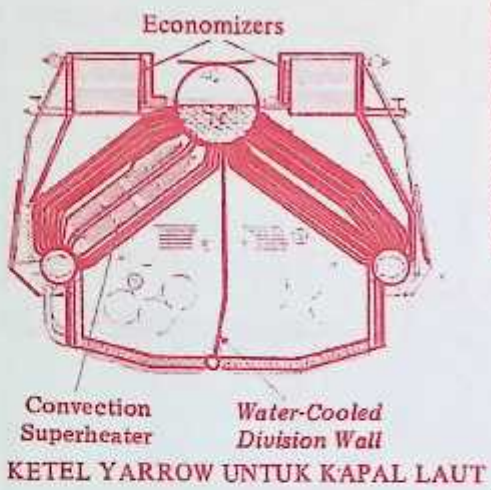
- 1 = Drum utama
- 2,3,4 = Drum-drum bawah
- 5 = Pemanas lanjut = *Superheater*
- 6 = Saluran by-pass untuk gas asap guna pengaturan suhu
- 7 = Ekonomiser
- 8 = Pemanas udara pipa
- 9 = Fan Tarik (*Induced Draught Fan = I.D.F.*)
- 10 = Ash pit = Sumuran abu .
- 11 = Tabung untuk pengaliran kembali bahan bakar yang tak terbakar



Ketel dua drum untuk Kapal laut

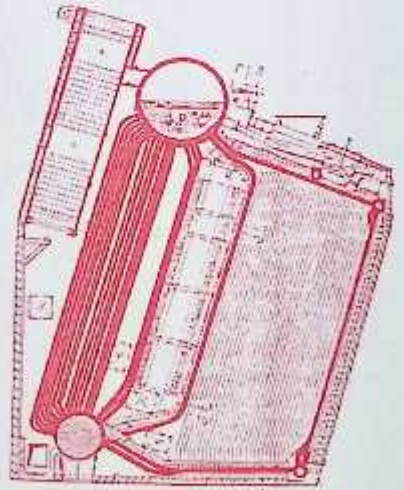
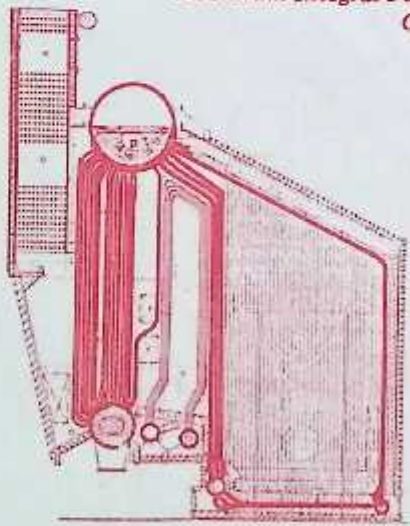


Ketel Yarrow untuk Kapal laut



Two-drum Integral-Furnace marine boiler

*Two-drum Integral-Furnace boiler, merchant type
Oil fired*



Ketel-D digunakan di kapal laut

Pipa-pipa pemanas lanjut uap (*superheater's pipes*) biasanya ditempatkan di antara pipa-pipa penguap. Pipa-pipa pemanas lanjut tersebut arah membujurnya ada yang sama arah dengan arah membujurnya pipa-pipa penguap. Namun ada pula yang pipa-pipa pemanas lanjutnya melintang terhadap arah membujur pipa-pipa penguap.

Ketel-ketel Yarrow dengan pipa-pipa penguap yang lurus yang diborakan miring terhadap dinding drum, kurang disukai dewasa ini.

Gas asap setelah melewati berkas pipa-pipa penguap dengan temperatur yang cukup tinggi sekitar $500^{\circ} - 700^{\circ}\text{C}$, akan mencapai pipa-pipa ekonomiser. Di dalam pipa-pipa ekonomiser inilah air pengisian ketel dipanasi terlebih dahulu agar tidak membahayakan drum ketel di tempat masuknya air pengisian tersebut.

Ketel Yarrow banyak pula digunakan pada kapal laut sebagai pembangkit uap untuk menggerakkan turbin-turbin uap sebagai penggerak utamanya.

Ada pula ketel Yarrow yang tungku ketelnya terbagi menjadi dua bagian yang dibatasi oleh sebaris pipa-pipa berduri yang dilapisi dengan biji-biji Chrom (*Chrom ore*). Pada setiap belahan tungku terdapat beberapa pembakar atau burner. Pipa-pipa pemanas lanjut uap (*superheater*) hanya terdapat di antara salah satu berkas pipa-pipa penguap. Dengan demikian pengaturan temperatur uap yang dihasilkan, dilakukan dengan mengatur masing-masing burner pada setiap belahan tungku.

Karena ada ketel Yarrow pipa-pipa penguap bermuara pada drum atas di bagian dinding drum di bawah permukaan air, maka dengan demikian uap air yang terbentuk terpaksa melalui air di dalam drum, sehingga untuk memisahkan uap dari air diperlukan alat pemisah air yang dipasang di dalam drum atas.

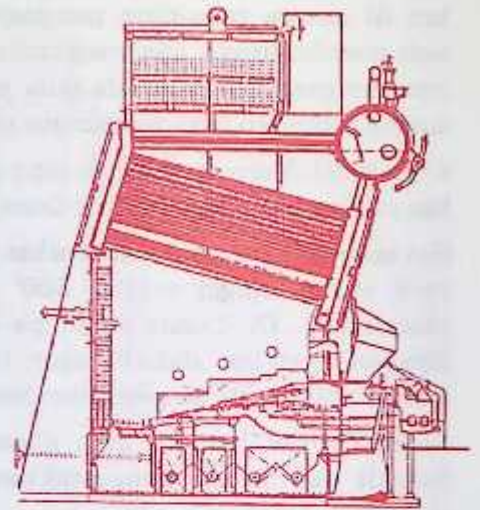
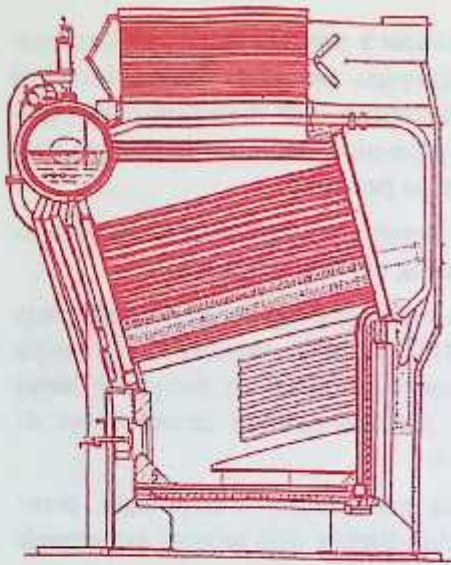
Ketel Yarrow dibuat dengan kapasitas antara 30 — 80 t/jam.

29.3. Ketel-ketel Berpipa Terjal

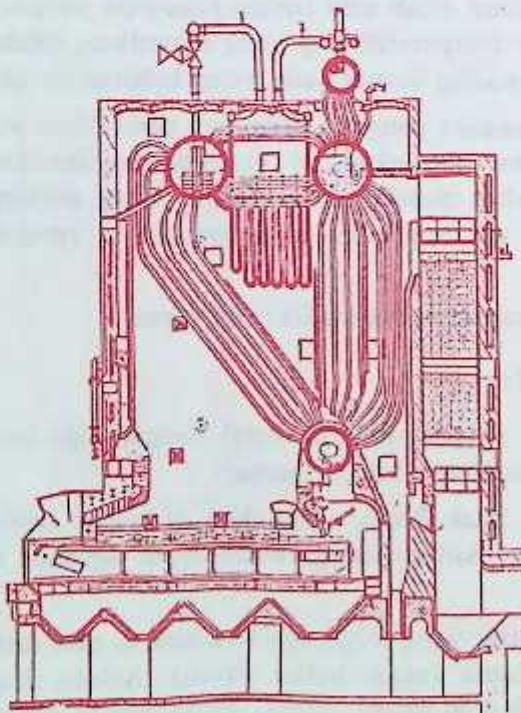
Ketel-ketel berpipa terjal di antaranya ialah ketel dengan tiga buah drum dari Steinmuller-Gummersbach. Lihat Gambar.

Di bagian atas terdapat dua buah drum, sedangkan di bagian bawah hanya terdapat sebuah drum. Antara ketiga buah drum tersebut dihubungkan dengan pipa-pipa.

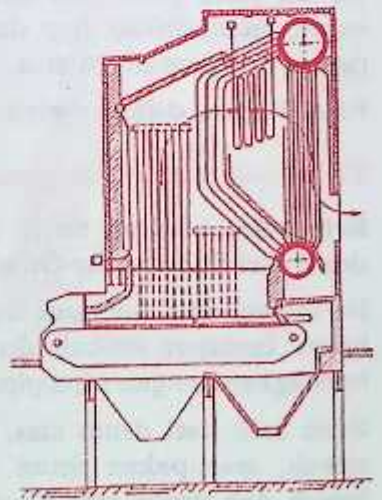
Salah satu dari drum atas, yaitu yang lokasinya kira-kira di atas drum bawah, merupakan drum utama (*main boiler drum*). Antara drum bawah dan drum atas yang bukan drum utama, dihubungkan dengan



Variasi Ketel-ketel Seksi



Ketel Berpipa Terjal.



pipa-pipa penguap yang membentuk sudut miring yang cukup terjal terhadap tungku api, dengan maksud untuk menerima panas sebanyak mungkin secara pancaran dari api di atas rangka bakar.

Baris-baris pertama dan kedua dari pipa-pipa penguap ini merupakan berkas-berkas pipa penguap pancaran, yang menerima panas dari api di dalam tungku di atas rangka bakar, tidak saja secara konveksi, melainkan juga menerima panas yang terbanyak secara pancaran.

Antara drum utama dan drum bawah dihubungkan di bagian depan dari aliran konveksi gas asap, dengan seberkas pipa-pipa penguap, sedangkan di bagian belakang di daerah aliran konveksi gas asap, dihubungkan dengan seberkas pipa-pipa air yang berfungsi sebagai pipa-pipa terjun atau down-comer. Sehingga sirkulasi air dan uap pada ketiga buah drum tersebut menjadi lebih sempurna.

Permukaan dinding tungku, yang berhadapan dengan pipa-pipa yang dipasang terjal di atas tungku, dilapisi dengan pipa-pipa penguap pancaran. Di bagian bawah bermuara pada sebuah tabung pembagi air (*water header*). Sedangkan di bagian atas pipa-pipa penguap pancaran ini bermuara pada drum atas yang bukan drum utama.

Di bagian dasar drum bawah, air yang agak dingin di sini perlu dipompakan ke-tabung pembagi air (*water header*) pipa-pipa penguap bermuara, agar sirkulasi air menjadi makin sempurna di seluruh bagian ketel uap.

Di atas drum utama tersebut terdapat pula sebuah drum kecil yang fungsinya sebagai pengumpul uap kenyang yang sudah dipisahkan dari bintik-bintik air. Antara drum kecil yang ada di atas drum utama, dengan drum utama, dihubungkan pipa-pipa uap.

Antara kedua drum atas dihubungkan dengan pipa-pipa, pipa-pipa yang menghubungkan bagian bawah dari drum-drum atas tersebut merupakan pipa-pipa penghubung air antara kedua drum atas tersebut. Sedangkan pipa-pipa yang menghubungkan bagian atas dari drum-drum atas merupakan pipa-pipa penghubung uap antara kedua drum atas tersebut.

Pipa-pipa pemanas lanjut ditempatkan tergantung di daerah aliran pertama konveksi gas asap, setelah gas asap melewati berkas-berkas pipa-pipa penguap yang terjal tersebut. Di daerah terakhir aliran konveksi, setelah gas asap melewati pipa-pipa terjun (*down-comer's pipes*) yang menghubungkan drum utama dengan drum bawah, temperatur gas asap masih cukup tinggi dan dimanfaatkan untuk memanasi air terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam drum-drum tersebut pada sebuah alat pemanas air awal yang disebut ekonomiser, yang akan dibahas lebih mendalam di kemudian.

Baik pada ketel Yarrow maupun pada ketel Steinmuller-Gummersbach, terdapat keberatan-keberatan karena banyaknya drum-drum ketel yang digunakan. Untuk tekanan uap yang tinggi, drum-drum ketel tersebut harganya menjadi makin mahal karena proses pembuatannya juga makin sulit. Sehingga dibuat modifikasi dari ketel-ketel tersebut, menjadi ketel-ketel variannya dengan jumlah drumnya menjadi berkurang, seperti terlihat pada Gambar.

29.4. Ketel-ketel Pancaran

Lihat Gambar-gambar ketel pancaran.

Pipa-pipa penguap ketel pancaran ini, keseluruhannya menerima panas secara pancaran dari api di dalam tungku, sehingga pipa-pipa penguap ketel pancaran ini merupakan dinding tungku keseluruhannya.

Dengan demikian, dinding tungku di sebelah dalam akan dilapisi dengan pipa-pipa penguap yang berdiri vertikal. Ada pun jarak antara pipa-pipa penguap tersebut ($= s$) dari besarnya fraksi pendinginan yang disesuaikan dengan bahan bakar yang digunakan di dalam tungku. Mengenai konstruksi dinding tungku telah diuraikan.

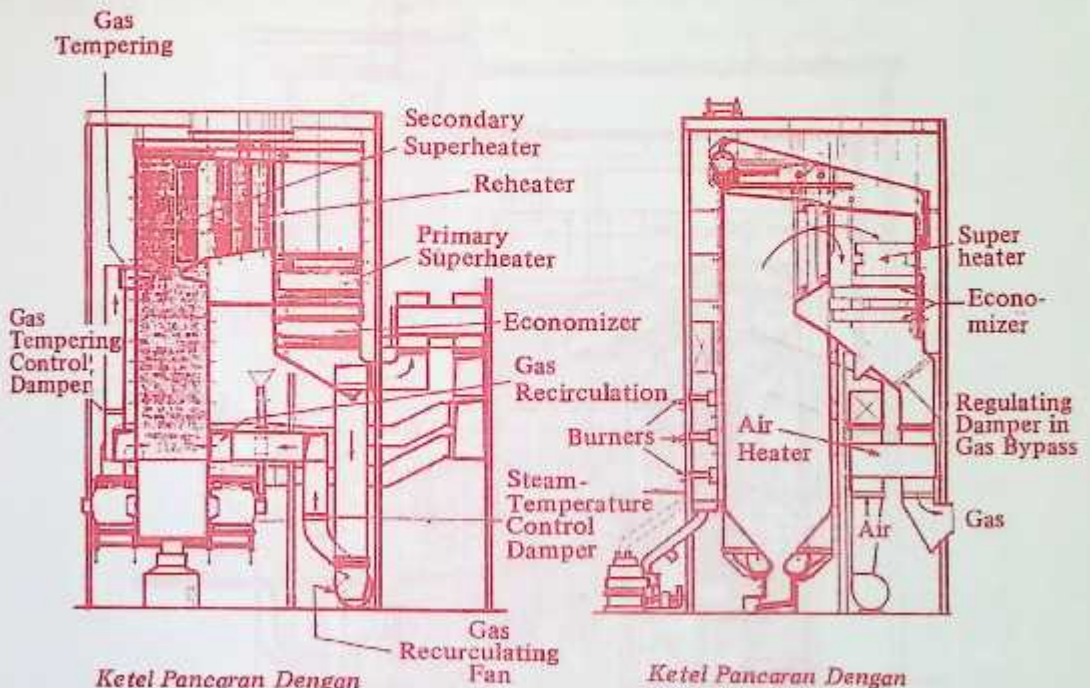
Panas yang diserahkan secara pancaran kepada pipa-pipa penguap dan kepada pipa-pipa pemanas lanjut pancaran sekitar 40% — 70% dari seluruh jumlah panas yang terbentuk di dalam tungku.

Pada ketel Seksi, ketel Yarrow dan ketel-ketel berpipa terjal lainnya, terdapat keberatan yaitu dengan terbentuknya *Nest forming*, yaitu melekat dan membekunya abu cair pada pipa-pipa di daerah konveksi. Lihat uraian sebelumnya mengenai terbentuknya *Nest forming*.

Ketel pancaran dimaksudkan untuk mengatasi keberatan tersebut, yaitu dengan mengusahakan agar panas yang terbentuk di dalam tungku sebanyak-banyaknya diserap di daerah pancaran. Dengan demikian temperatur api atau gas asap pada saat meninggalkan daerah pancaran temperaturnya telah diturunkan sedemikian sehingga ada di bawah titik cair abu, yang dengan demikian abu cair yang terbawa oleh api telah menjadi padat sehingga tidak membentuk *Nest forming* di daerah konveksi.

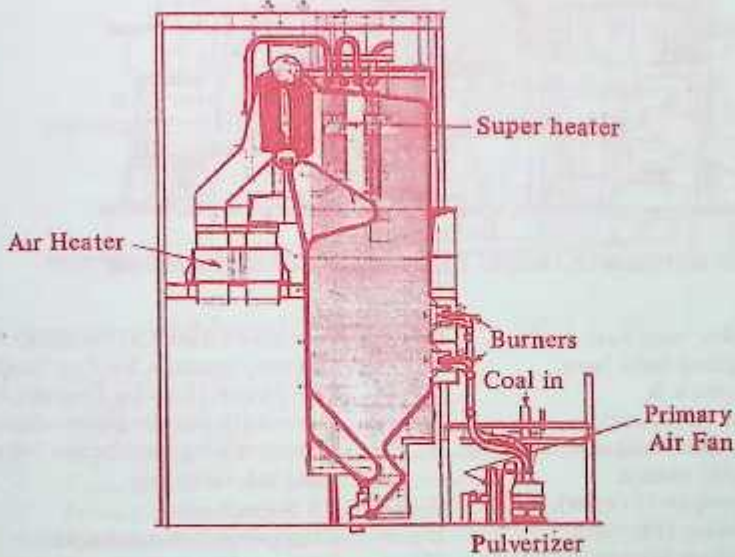
Lagi pula umumnya ketel pancaran ini hanya mempunyai sebuah drum ketel, sehingga investasinya tidak terlalu banyak dibebani oleh harga drum-drum ketel yang mahal.

Di bagian dasar tungku terdapat tabung-tabung pembagi air atau *Water Headers*, tempat asal water header yang bermula dari pipa-pipa penguap.

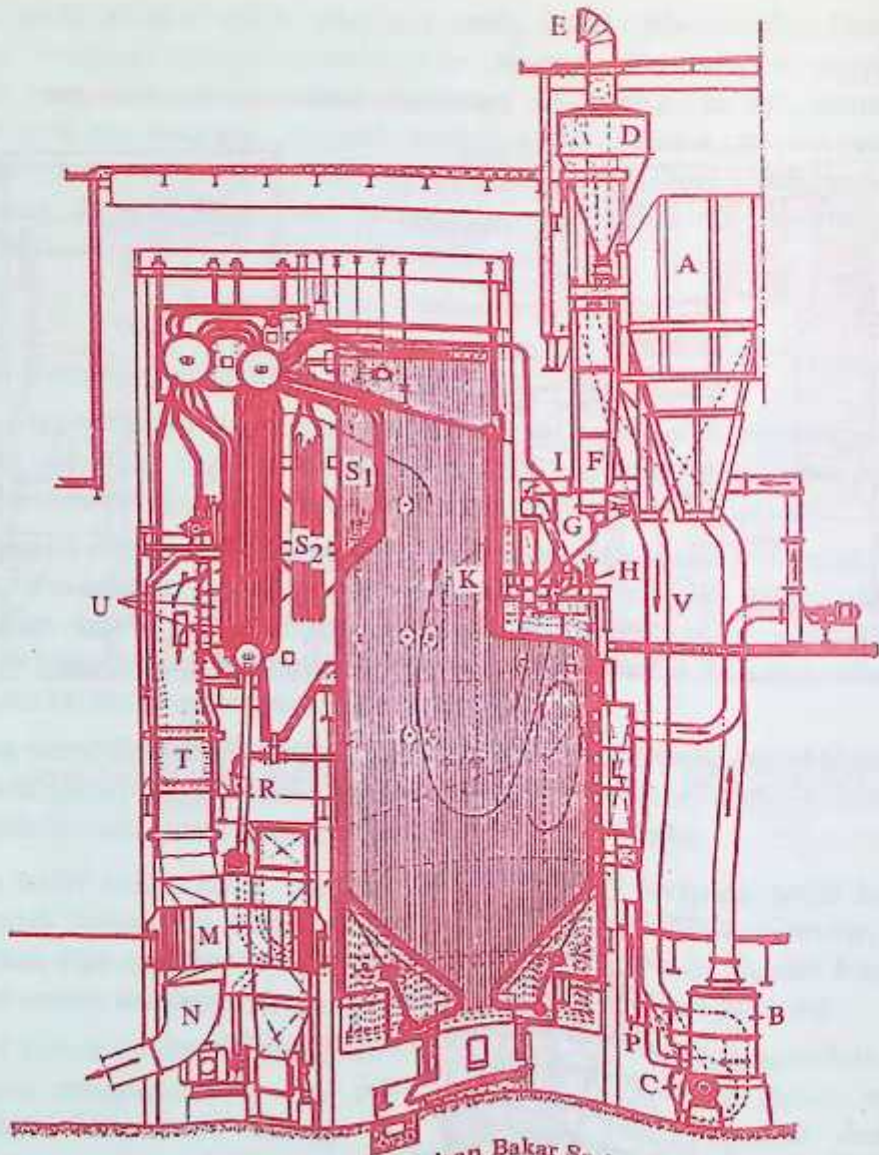


Ketel Pancaran Dengan Tungku Siklon

Ketel Pancaran Dengan Bahan Bakar Serbuk Batu Bara

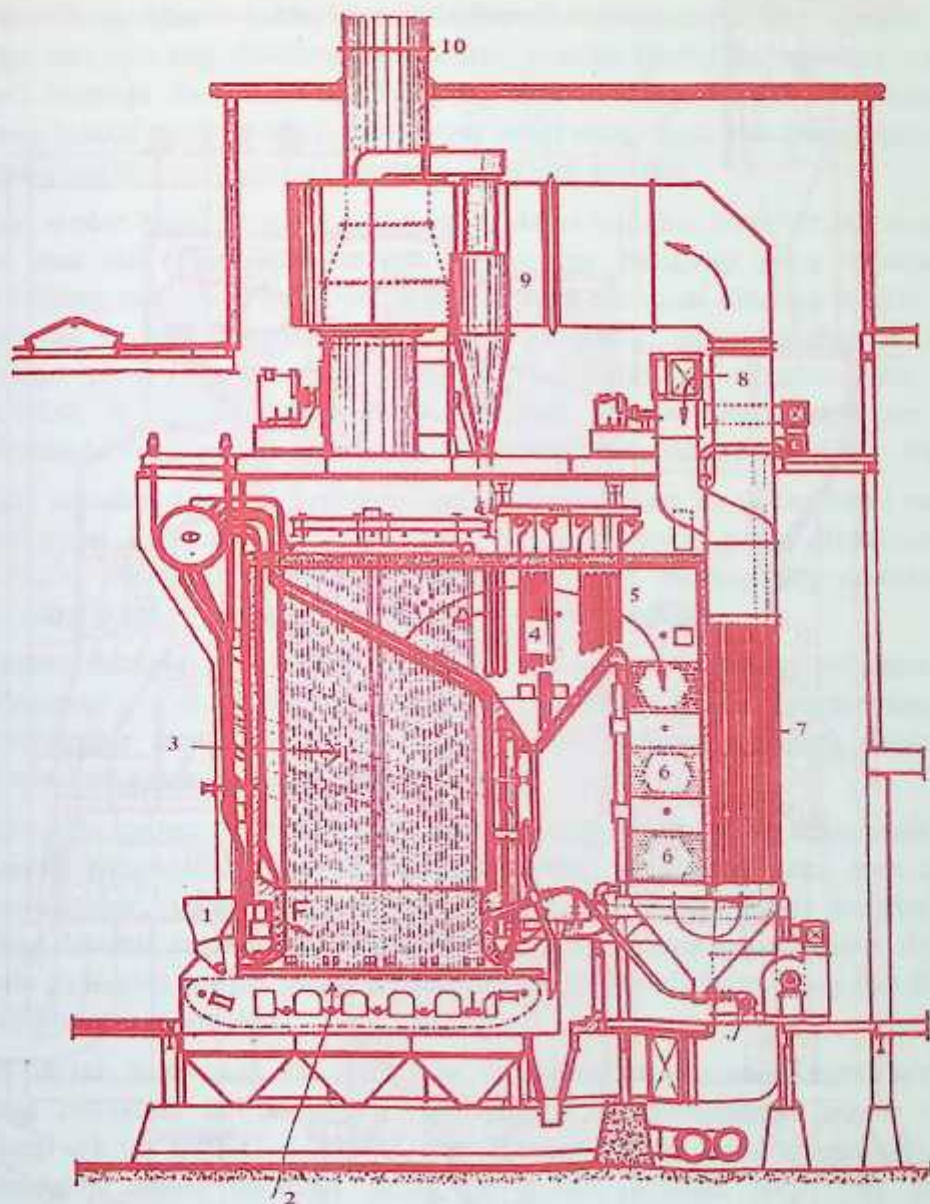


Ketel Pancaran Dengan Bahan Bakar Serbuk Batu Bara



Ketel Pancaran Dengan Bahan Bakar Serbuk Batu Bara

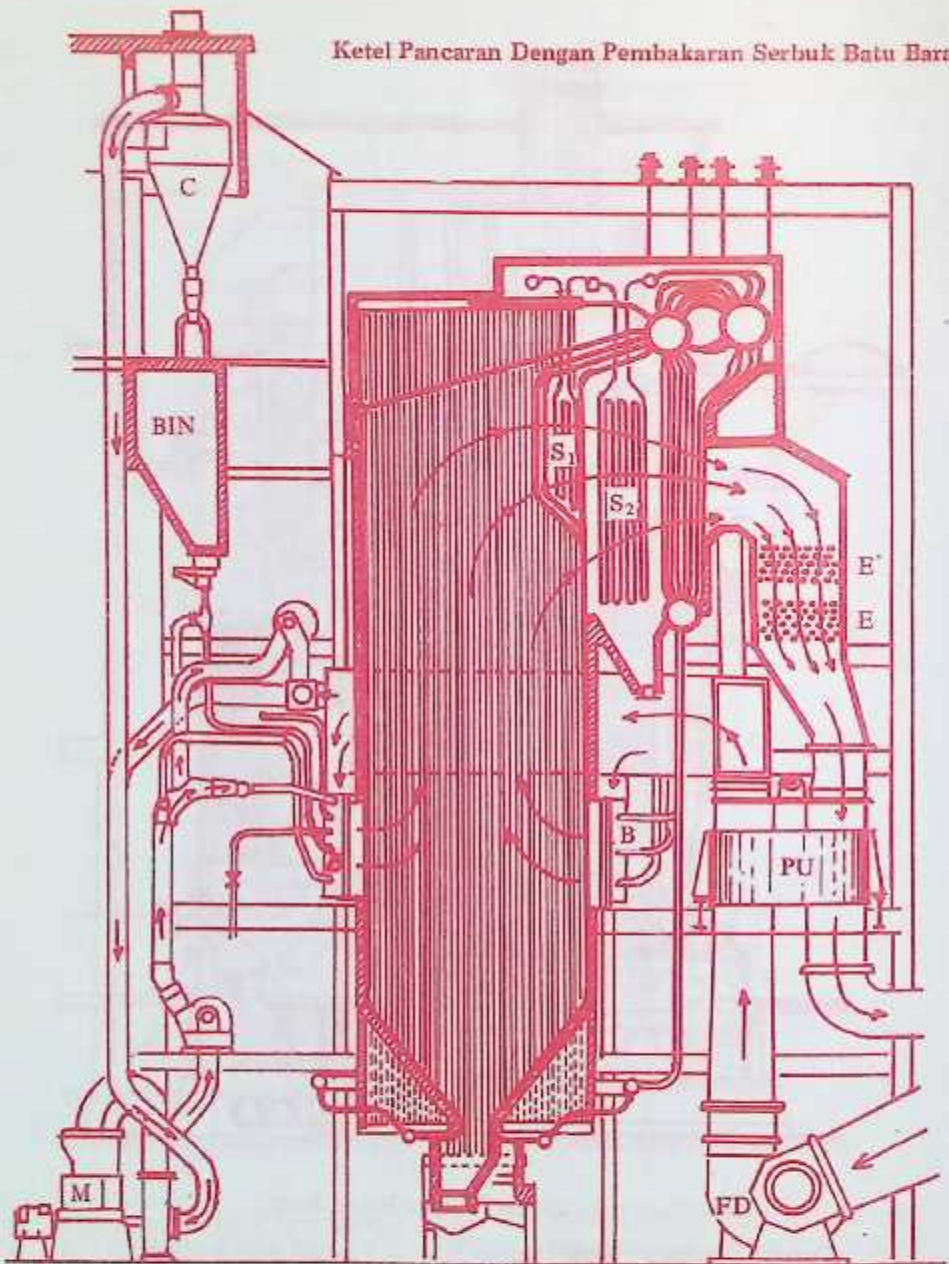
- | | | | |
|-----|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| A = | Bunker batu bara pasir. | M = | Pemanas udara LJUNGSTROM. |
| B = | Penggiling batu bara. | N = | Gas asap menuju ke Fan Tarik. |
| C = | Fan untuk B. | O = | Fan Tekan (Forced Draught Fan). |
| D = | Siklon (Cyclone). | P = | Fan untuk pendinginan udara primeir. |
| E = | Hubungan dengan udara luar. | R = | Fan untuk pengembalian bahan bakar yang tak terbakar. |
| F = | Bunker antara. | S ₁ dan S ₂ = | Superheater. |
| G = | Pengumpan (Feeder). | U = | Klep pengatur suhu uap. |
| H = | Pembakar (Burner). | V = | Saluran dari D ke C. |
| I = | Fan udara primeir. | | |
| K = | Udara sekunder pada burner. | | |
| L = | Udara tersier dari M. | | |



Ketel Pancaran dengan Rangka Bakar Rantai

- 1 = Corong batubara = Coal Hopper
- 2 = Rangka bakar rantai = Chain Grate
- 3 = Tungku Penguap = Furnace Evaporator
- 4 = Superheater II = Pemanas Lanjut II
- 5 = Superheater I = Pemanas Lanjut I
- 6 = Pemanas Air Awal = Ekonomiser
- 7 = Pemanas Udara = Air Pre-Heater
- 8 = Fan Tekan = Forced Draught Fan = F.D.F.
- 9 = Pengumpul Debu = Dust Collector
- 10 = Cerobong asap

Ketel Pancaran Dengan Pembakaran Serbuk Batu Bara.



- C = Pemisah Serbuk dengan sistim SIKLON
- M = Penggiling batubara pasir = Coal Mill
- B = Burner = Pembakar
- S₁ = Superheater I
- S₂ = Superheater II
- E = Pemanas Air Awal = Ekonomiser
- PU = Pemanas Udara = Air Pre-Heater
- FD = Fan Tekan = Forced Draught Fan (F.D.F.)

Dari drum utama ketel (main boiler-drum) dihubungkan dengan pipa-pipa terjun yang ditempatkan di luar tungku (jadi tidak disinggung oleh api) menuju ke-water header yang ada di dasar tungku. Sehingga air yang relatif agak dingin, dari drum ketel akan turun ke bawah melewati pipa-pipa terjun tersebut menuju ke-water header.

Dari water headers yang terletak di dasar tungku tersebut, air mengalir ke atas dan diuapkan melalui pipa-pipa penguap yang dipasang di sekeliling tungku. Pipa-pipa penguap yang melapisi dinding tungku yang terletak di bawah drum ketel, akan langsung bermuara di-drum ketel. Tetapi pipa-pipa penguap yang melapisi dinding tungku yang *tidak* terletak di bawah drum ketel, terlebih dahulu akan bermuara pada tabung-tabung pengumpul uap kenyang atau saturated steam header.

Dari saturated steam headers ini, uap dialirkan ke-drum ketel melalui pipa-pipa khusus untuk penyalur uap kenyang yang dihasilkannya. Dengan demikian seluruh pembentukan uap berlangsung di sekeliling dinding tungku yang terdiri dari pipa-pipa penguap.

Karena tembakan-tembakan dinding tungku terlindung sebagian atau seluruhnya oleh pipa-pipa penguap pancaran, maka dengan demikian temperatur tembakan juga tidak terlalu tinggi, sehingga tembakan-tembakan akan menjadi lebih awet.

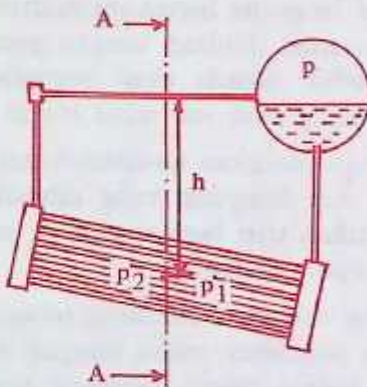
Pipa-pipa pemanas lanjut uap kadang-kadang ada yang ditempatkan di daerah pancaran, yang disebut pemanas lanjut pancaran atau radian superheater, yang ada kalanya merupakan langit-langit tungku atau yang disebut superheater langit-langit atau ceiling superheater, dan ada pula pemanas lanjut yang ditempatkan di daerah konveksi yang disebut superheater konveksi.

Di daerah konveksi, gas asap setelah memanasi pemanas lanjut konveksi atau pemanas lanjut ular.g (reheater), temperturnya masih cukup tinggi sekitar $500^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$, dan dimanfaatkan untuk memanaskan air pengisian ketel terlebih dulu, di dalam sebuah alat yang disebut pemanas air awal atau ekonomiser. Pemanasan air di dalam pemanas air awal atau ekonomiser dilakukan hingga temperatur air mendekati temperatur mendidihnya $t_d^{\circ}\text{C}$, yaitu sekitar 50°C hingga 75°C di bawah temperatur mendidih air di dalam drum ketel.

Setelah memanasi air di dalam ekonomiser, gas asap yang masih bertemperatur sekitar $300^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$ tersebut sekali lagi dimanfaatkan untuk memanasi udara yang digunakan untuk pembakaran, di dalam sebuah alat yang disebut pemanas udara atau *Air-Preheater*. Udara pembakar di dalam pemanas udara dipanasi hingga temperatur sekitar $120^{\circ}\text{C} - 320^{\circ}\text{C}$, tergantung besar-kecilnya ketel uap.

Mengenai bagian-bagian ketel yang berupa pemanas lanjut uap (*superheater*), pemanas ulang (*reheater*), ekonomiser dan pemanas udara (*air preheater*) akan dibicarakan tersendiri di dalam Bab yang lain.

Dalam hal ketel-ketel pipa air yang telah dibahas, sirkulasi air dan uap di dalamnya berlangsung secara alamiah sehingga sirkulasinya disebut sirkulasi alamiah atau *natural circulation*.



Di dalam Gambar di samping, pipa-pipa ketel di bagian sebelah kanan dari irisan A—A berisi air, sedangkan pipa-pipa ketel di bagian sebelah kiri irisan A—A berisi campuran air dan uap. Di samping itu temperatur air di dalam pipa-pipa ketel sebelah kanan irisan A—A lebih rendah dibandingkan dengan temperatur air dan uap di sebelah kiri irisan A—A.

Tekanan air di dalam pipa-pipa sebelah kanan irisan A—A sebesar

$$p_1 = p + h \times B.J._{air}$$

Tekanan campuran air dan uap di dalam pipa-pipa sebelah kiri irisan A—A sebesar

$$p_2 = p + h \times B.J._{air + uap}$$

Karena di sebelah kiri irisan A—A temperaturnya lebih panas, maka di bagian sebelah kiri irisan A—A tersebut terbentuk gelembung-gelembung uap, sehingga di sebelah kiri irisan A—A terdapat campuran air dan uap, yang Berat Jenis campuran air dan uap tersebut LEBIH KECIL dibandingkan dengan Berat Jenis air di sebelah kanan irisan A—A.

Dengan demikian selisih tekanan (Δp) antara tekanan di sebelah kanan dan tekanan di sebelah kiri irisan A—A sebesar

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (p + h \times B.J._{air}) - (p + h \times B.J._{air + uap})$$

$$\Delta p = h \times (B.J._{air} - B.J._{air} + uap)$$

Dari persamaan tersebut maka Δp akan makin besar bila:

- Makin tinggi h , atau:
- Makin besar selisih $B.J._{air} - B.J._{air} + uap$.

Apabila tekanan di dalam ketel (p) makin besar, maka $B.J._{air} + uap$ akan bertambah besar pula, sehingga: $(B.J._{air} - B.J._{air} + uap)$ akan menjadi makin kecil.

Dengan demikian gaya untuk mendorong air untuk bersirkulasi menjadi berkurang. Keadaan demikian ini menyebabkan pipa-pipa menjadi kurang didinginkan sehingga pipa-pipa akan mudah pecah terbakar. Pada tekanan kritis sekitar 225 kg/cm^2 atau $22,5 \text{ N/mm}^2$, aliran air akan terhenti samasekali, bahkan pada tekanan ketel sebesar 200 kg/cm^2 juga sudah sukar terjadi sirkulasi alamiah.

Dengan demikian pada ketel-ketel tekanan tinggi, sirkulasi alamiah sangat sukar berlangsung, dengan demikian menimbulkan persoalan khusus untuk ketel-ketel tekanan tinggi, yang harus dicari usaha-usaha untuk mengatasinya.

Ketel-ketel yang bertekanan tinggi, di atas 120 kg/cm^2 , menghendaki konstruksi yang berlainan dengan ketel-ketel tekanan rendah seperti yang telah dibicarakan. Sirkulasi air dan uap untuk ketel-ketel tekanan tinggi dilaksanakan dengan menggunakan pompa-pompa air sirkulasi.

Pompa-pompa sirkulasi air, yang digunakan untuk memompakan air agar dapat bersirkulasi dengan baik di dalam ketel tekanan tinggi, setidak-tidaknya harus mampu membangkitkan selisih beda tekanan $h.(B.J._{air} - B.J._{air} + uap)$ yang cukup besar, lagi pula perlu diperhitungkan pula adanya tahanan-tahanannya terhadap air dalam gerakannya melalui pipa-pipa. Tahanan-tahanannya tersebut makin besar, bila kecepatan air melalui pipa-pipa juga bertambah, atau jika diameter pipa-pipa dibuat lebih kecil.

Kalau tahanan pengaliran air melalui pipa-pipa terlampau besar, maka tidak akan ada air yang mengalir sendiri atau secara alamiah. Jadi pada ketel-ketel pipa air yang sirkulasi airnya alamiah harus dibuat dengan pipa-pipa yang agak besar-besar dan tidak terlampau panjang.

Untuk ketel-ketel Seksi, garis tengah pipa-pipa penguap yang condong sekitar 100 mm , sedangkan untuk ketel-ketel yang berpipa terjal garis tengahnya sekitar 60 mm .

Jika untuk sirkulasi air di dalam ketel digunakan pompa sirkulasi air, maka pompa sirkulasi tersebut dapat mengalahkan tahanan pengaliran air di dalam pipa-pipa sehingga kecepatan air mengalir di dalam pipa-pipa dapat diperbesar, dan dapat dipakai pipa-pipa yang lebih sempit diameternya serta dapat lebih panjang.

Pada ketel-ketel yang menggunakan sirkulasi air paksa atau disebut *Forced Circulation*, dapat digunakan pipa-pipa dengan garis tengah hingga sekecil 12 — 30 mm, sedangkan panjang pipa-pipanya dapat mencapai 2.800 meter.

Sebaliknya, ketel-ketel uap yang menggunakan pompa sirkulasi paksa, keberatannya ialah: bila karena sesuatu sebab pompa sirkulasi terhenti, maka seluruh pipa-pipa akan terbakar karena sirkulasinya terhenti. Dalam hal ini karena isi air atau Volume air di dalam ketel relatif lebih sedikit dibandingkan dengan produksi uap ketel yang bersangkutan.

Oleh karena itu perubahan-perubahan tekanan di dalam ketel akan cepat sekali berlangsungnya, bila tidak dengan segera diimbangi dengan perubahan-perubahan atau pengurangan-pengurangan panas yang sesuai dengan jumlah uap yang dialirkan ke luar. Ketel-ketel semacam ini harus mempunyai pengaturan api yang otomatis, yang dapat bekerja sempurna pada setiap perubahan-perubahan beban ketel.

Pipa-pipa dengan diameter yang kecil serta panjang, sukar sekali dibersihkan dari bagian dalam, sehingga bila sedikit saja mengandung garam-garam pada air pengisiannya, maka pipa-pipa tersebut akan mudah terbakar. Dengan demikian konstruksi ketel dengan diameter yang kecil-kecil dan panjang, yang menggunakan pompa sirkulasi air tidak bisa digunakan untuk ketel-ketel yang kecil. Jadi ketel-ketel yang besar umumnya menggunakan pompa-pompa sirkulasi.

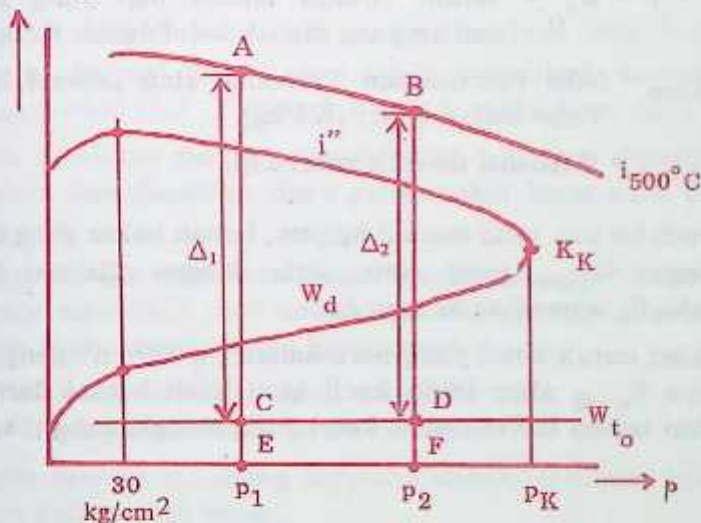
Perlu dibedakan antara pompa-pompa sirkulasi atau pompa edar (*circulating pump*) dengan pompa langsung (*passing through pump*). Pompa edar atau pompa sirkulasi air, digunakan untuk mengedarkan air beberapa kali melalui ketel. Sementara itu air akan menguap. Sedangkan pompa langsung atau *passing through pump*, digunakan untuk memompakan air masuk ke dalam ketel, dan dalam sekali edar, akan keluar dari ketel dalam bentuk uap yang dipanaskan lanjut. Ketel Benson dan Ketel Sulzer yang akan dibicarakan kemudian, termasuk yang menggunakan pompa langsung.

30. Ketel-ketel Pipa Air Dengan Perencanaan Khusus.

Dalam gambar Grafik yang menggambarkan hubungan antara Entalpi dan tekanan, baik untuk air mendidih, uap kenyang maupun uap yang dipanaskan lanjut, grafik tersebut dibuat berdasarkan harga-harga yang terdapat pada tabel uap kenyang yaitu untuk garis w_d ataupun i'' dan harga-harga i pada tabel uap yang dipanaskan lanjut pada berbagai temperatur uap.

Dalam Gambar grafik tersebut, terlihat harga-harga entalpi uap yang dipanaskan lanjut i' pada berbagai tekanan dan temperatur uap. Untuk temperatur uap yang sama, misalkan pada 500°C , maka pada tekanan $p_1 \text{ kg/cm}^2$, harga entalpi uap i'_{500° ; $p_1 = AE \text{ KJ/kg}$ sedangkan pada tekanan $p_2 \text{ kg/cm}^2$ (p_2 lebih besar dari pada p_1) harga entalpinya ialah i'_{500° ; $p_2 = BF \text{ KJ/kg}$.

Entalpi KJ/kg



Grafik entalpi – Tekanan

- Keterangan:
- i = Entalpi uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari ketel
 - i'' = Entalpi uap kenyang
 - w_d = Entalpi air mendidih
 - w_{t_o} = Entalpi air masuk ketel
 - $\Delta = i' - w_{t_o}$ = Selisih entalpi antara uap ke luar dari ketel dan air masuk ketel.

Dari Gambar Grafik tersebut, AE lebih besar dari BF, jadi i'_{500° ; p_1 ; akan lebih besar pula dari i'_{500° ; p_2 ; Bila dimisalkan air masuk ekono-

miser pada temperatur yang sama yaitu t_o °C dengan entalpi air W_{t_o} KJ/kg, maka untuk kedua buah ketel yang tekanan uapnya berbeda, yaitu p_1 dan p_2 . P_2 menjadi lebih besar dari p_1 , dan dengan temperatur uap yang ke luar sama tinggi, misalkan 500°C, sedangkan air yang masuk ke-ekonomiser sama pula tingginya, maka selisih entalpi antara uap yang ke luar ketel dengan air yang masuk ke-ekonomiser akan berlainan, yaitu Δ_2 pada tekanan p_2 lebih kecil dari Δ_1 pada p_1 , BD menjadi kecil daripada AC.

Penggunaan bahan bakar B_e didapatkan dari rumus:

$$B_e = \frac{S \times \Delta}{Q_{Low} \times \eta_{ketel}}$$

sehingga: S = Jumlah uap yang diproduksi ketel (kg/jam)

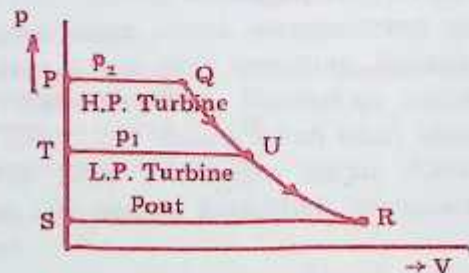
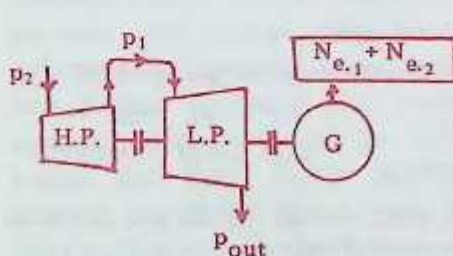
$\Delta = i' - W_{t_o}$ = Selisih entalpi antara uap yang ke luar dan air yang masuk ketel dalam KJ/kg.

Q_{Low} = Nilai Pembakaran Terendah atau Lowest Heating Value bahan bakar (KJ/kg)

η_{ketel} = Efisiensi thermis ketel uap.

Untuk memproduksi uap yang sama S kg/jam, bahan bakar yang digunakan sama dengan Q_{Low} yang sama, serta dengan efisiensi thermis yang sama, maka B_e sebanding dengan Δ .

Dengan demikian untuk ketel yang bertekanan p_2 kg/cm² penggunaan bahan bakarnya B_{e-2} akan lebih kecil atau lebih hemat dari B_{e-1} yaitu pemakaian bahan bakar untuk ketel yang bertekanan p_1 kg/cm².



Selain itu, untuk setiap kilogram uap yang masuk ke turbin uap, makin tinggi tekanan uapnya, akan menghasilkan daya turbin yang makin besar. Lihat Gambar.

Di dalam gambar dinyatakan bahwa uap yang masuk ke-turbin uap tekanan tinggi (H.P. Turbine) dengan tekanan p_2 kg/cm² dan melakukan ekspansi akan menghasilkan daya sebesar $N_{e,2}$ yang di dalam diagramm $p - V$ dinyatakan dengan Luas $P-Q-U-T-P$; sedangkan uap yang ke luar dari H.P. Turbine dengan tekanan p_1 kg/cm² yang masuk ke-Turbin tekanan rendah atau L.P. Turbine, akan menghasilkan daya sebesar $N_{e,1}$, yang dinyatakan oleh Luas $T-U-R-S-T$ dalam diagram $p-V$.

Sehingga bila 1 kilogram uap yang dihasilkan ketel bertekanan tinggi p_2 dan melakukan ekspansi pada Turbin tekanan tinggi (H.P. Turbine) dan pada Turbin tekanan rendah (L.P. Turbine) serta dengan tekanan ke luar sebesar p_{out} akan menghasilkan daya sebesar $\Sigma N_{e,1} + N_{e,2}$.

Sedangkan bila 1 KG. UAP yang dihasilkan oleh ketel bertekanan rendah p_1 kg/cm² yang hanya dapat melakukan ekspansi pada Turbin tekanan rendah (L.P. Turbine), hanya menghasilkan daya sebesar $N_{e,1}$.

Dengan demikian makin tinggi tekanan uap yang dihasilkan oleh ketel uap, akan menghasilkan daya yang makin besar yang dihasilkan oleh Turbin uap.

Sehingga dengan demikian secara keseluruhannya: makin besar tekanan uap yang dihasilkan oleh ketel uap, untuk setiap kilogram uap yang dihasilkan akan mendapatkan keuntungan ganda:

- a. Pemakaian bahan bakar makin hemat.
- b. Daya yang dihasilkan makin besar.

Sehingga dewasa ini orang berusaha untuk membuat ketel uap dengan tekanan yang makin besar.

Sekalipun demikian, untuk membuat ketel bertekanan tinggi banyak kesukaran-kesukaran yang harus diatasi, antara lain seperti yang telah diuraikan. Untuk sirkulasi air dan uap di dalam ketel, memerlukan usaha-usaha tersendiri dengan sistem sirkulasi paksa dengan menggunakan pompa edar atau pompa sirkulasi paksa. Di samping itu diperlukan peralatan-peralatan pengaturan ketel yang makin rumit dan canggih.

30.1. Ketel Siklus Ganda (Binaire Cycle Boiler) Atau Ketel Schmidt-Hartmann.

Lihat Gambar Ketel Siklus Ganda.

Terdapat DUA SIKLUS air dan uap pada ketel ini, yaitu:

a. Siklus Primer:

Pada siklus primer mengalir atau beredar **air murni absolut** pada tekanan tinggi sekitar $170\text{--}190\text{ kg/cm}^2$ atau $17\text{--}19\text{ N/mm}^2$. **Air murni absolut** tersebut hanya mengandung H_2O murni, tanpa mengandung gas-gas yang dapat larut di dalam air, termasuk Oksigen. Sehingga air murni absolut tersebut **Bebas Oksigen** apalagi garam-garam, sehingga dengan demikian air murni absolut tersebut tidak akan menimbulkan karat karena oksidasi terhadap dinding ketel.

Air murni absolut didapat dengan cara destilasi bertingkat dari air murni teknis. Untuk setiap tingkat proses destilasi, senantiasa dihilangkan gas-gas yang terdapat di dalamnya termasuk Oksigen, dengan cara menghisapnya dengan pompa vakum.

Dengan demikian air murni absolut tersebut telah benar-benar bebas dari garam-garam, serta gas-gas termasuk Oksigen, yang dengan demikian **tidak akan menyebabkan** terjadinya oksidasi dinding-dinding pipa oleh Oksigen, yang dengan demikian **tidak akan terjadi** pembentukan kerak ketel yang dapat menyumbat pada pipa-pipa oleh garam-garam.

Dengan demikian untuk pipa-pipa penguap yang digunakan pada dinding-dinding tungku, dapat menggunakan pipa-pipa dengan diameter yang kecil-kecil sampai $20/30\text{ mm}$ tanpa menimbulkan kesukaran-kesukaran yang berarti. Dengan menggunakan pipa-pipa penguap yang kecil-kecil tersebut, disamping harganya bisa jauh lebih murah, maka air atau uap yang mengalir di dalamnya, dapat menyebabkan terjadinya aliran yang turbulenta, ditambah lagi tekanan uap yang tinggi pada siklus primer tersebut, menyebabkan koefisien atau angka perpindahan panas dari api ke air ataupun uap menjadi berlipat besarnya, sehingga dengan demikian ukuran-ukuran Luas Bidang yang dipanaskan (L.B.P.) atau Heating Surface dari Penguap (Evaporator) akan makin kecil, yang dengan demikian harga tungku penguapnya menjadi MURAH.

Angka perpindahan panas dari api ke-air di dalam pipa-pipa penguap dapat mencapai $12.500\text{--}14.600\text{ KJ/m}^2\text{ .jam.}^\circ\text{C}$;

Keterangan Pada Gambar Skema Ketel Siklus Ganda

A. SIKLUS BAHAN BAKAR DAN UDARA SERTA GAS ASAP:

A. Siklus Bahan Bakar dan Udara Serta Gas Asap:

- 1 = Fan Tekan = Forced Draught Fan = F.D.F.
- 2 = Pemanas Udara = Air Heater.
- 3 = Saluran Udara panas = Hot Air Duct.
- 4 = Saluran Bahan Bakar = Fuel Supply.
- 5 = Kotak Udara Panas = Hot Air Box
- 6 = Pembakar = Burner.
- 7 = Tungku = Furnace.
- 8 = Saluran Gas asap = Flue Gas Duct.
- 9 = Pengumpul Debu = Dust Collector = Praecipitator.
- 10 = Fan Isap = Induced Draught Fan - I.D.F.
- 11 = Cerobong Asap = Stack

B. Siklus Primer (Air Murni Absolut):

Tekanan p = 160 — 180 bar.

- 12 = Tangki air murni absolut
- 13 = Pompa iar suplesi
- 14 = Pompa air sirkulasi = Water circulating pump
- 15 = Header Air Bawah = Bottom Water Header
- 16 = Pipa-pipa penguap air murni absolut ; d = 25 — 40 mm
- 17 = Drum air siklus primer
- 18 = Uap kenyang menuju ke Serpentine
- 19 = Serpentine.
- 20 = Embun uap atau air kembali ke-pompa sirkulasi
- 21 = Pipa-pipa Terjun = Down-comers pipes

C. Siklus Sekunder (Air Murni Secara Teknis):

Tekanan p = 60 — 120 bar.

- 22 = Tangki air atau sumber air.
- 23 = Pompa air pengisian = Feed Water Pump = F.W.P.
- 24 = Air bertekanan menuju ke-Ekonomiser
- 25 = Ekonomiser
- 26 = Saluran air sungai menuju drum penguap
- 27 = Drum Penguap = Evaporator's drum
- 28 = Uap kenyang menuju Pemanas Lanjut Uap
- 29 = Pemanas Lanjut Uap = Superheater
- 30 = Uap yang dipanaskan lanjut menuju Turbin Uap.
- 31 = Keran Uap Utama = Main Steam Valve
- 32 = Turbin Tekanan Tinggi = High Pressure Turbine
- 33 = Turbin Tekanan Rendah = Low Pressure Turbine
- 34 = Generator Listrik
- 35 = Uap dari Turbin Tekanan Tinggi menuju Reheater
- 36 = Pemanas Uap Ulang = Steam Reheater
- 37 = Uap yang dipanaskan lanjut dari Reheater menuju Turbin Uap Tekanan Rendah
- 38 = Uap bekas menuju Kondensor
- 39 = Kondensor
- 40 = Air pendingin Kondensor
- 41 = Pompa Air kondensat.

Uap yang terbentuk pada pipa-pipa penguap dari siklus primer tersebut berkumpul di drum siklus primer, dan untuk selanjutnya disalurkan menuju serpentine, yaitu uap siklus primer tersebut menguapkan air dari siklus sekunder pada drum penguap.

Uap siklus primer yang melalui serpentine, setelah menguapkan air dari siklus sekunder di dalam drum penguap, akan mengembun menjadi air dan kembali ke drum pada siklus primer. Air yang agak dingin pada drum siklus primer akan turun ke bawah melalui pipa turun atau down-comer's pipe, menuju header air dingin yang terdapat di dasar tungku.

Untuk selanjutnya air dari header air dingin tersebut, menuju pipa-pipa penguap yang terdapat di sekeliling tungku. Uap yang terbentuk menuju ke-drum pada siklus primer, selanjutnya menuju ke serpentine kembali, untuk menguapkan air dari siklus sekunder. Demikian berlangsung terus-menerus.

b. Siklus Sekunder

Air murni teknis, yaitu air yang dimurnikan secara kimiawi yang masih mengandung gas-gas serta Oksigen, dipompa masuk ke dalam ekonomiser pada tekanan sekitar $60 - 120 \text{ kg/cm}^2$ atau $6 - 12 \text{ N/mm}^2$.

Air siklus sekunder tersebut setelah dipanaskan di dalam ekonomiser dan bertemperatur hingga sekitar $180^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}$ masuk ke dalam drum penguap. Air tersebut diuapkan oleh uap kenyang dari siklus primer yang melalui serpentine yang terdapat di dalam drum penguap.

Di dalam drum penguap tersebut terjadi pertukaran panas antara uap kenyang siklus primer dengan air siklus sekunder. Uap dari siklus primer mengembun menjadi air kembali, sedangkan air dari siklus sekunder akan menjadi uap. Uap dan air siklus primer tidak tercampur dengan air dan uap dari siklus sekunder, karena uap dan air dari siklus primer melalui sebelah dalam pipa-pipa serpentine, sedangkan air dan uap dari siklus ada di luar disekeliling pipa-pipa serpentine, di dalam drum penguap.

Uap kenyang dari siklus sekunder selanjutnya menuju pemanas lanjut uap (superheater) yang ada di saluran api atau gas asap, untuk dipanaskan lanjut sebelum digunakan untuk ekspansi di dalam turbin uap untuk menghasilkan daya.

Garam-garam yang larut di dalam air pada siklus sekunder ini akan membentuk kerak-kerak ketel di dalam drum penguap dan akan melapisi dinding drum penguap dari sebelah dalam, yang akan makin menambah daya isolasi drum penguap, sehingga makin sedikit panas yang terpancarkan dari drum penguap ke udara luar.

Perbedaan tekanan antara siklus primer dan siklus sekunder cukup besar sekitar $40 - 80 \text{ kg/cm}^2$ atau $4 - 8 \text{ N/mm}^2$, sehingga tekanan pada siklus primer jauh lebih tinggi dari tekanan pada siklus sekunder, dan merupakan salah satu keberatan dari ketel siklus ganda ini.

Namun demikian, ketel siklus ganda ini sangat elastis dan sangat cepat membentuk uap dihitung mulai sejak ketel dinyalakan (*initial firing*).

Ketel ini merupakan dasar dari perencanaan Ketel Nuklir atau reaktor nuklir yang untuk siklus primer dipanasi dengan menggunakan reaksi inti berantai, dari bahan Uranium atau sejenisnya. Mengenai Reaksi inti telah dibicarakan pada Bab IV. 24.

30.2. Reaktor Nuklir Untuk Pembangkitan Tenaga Listrik:

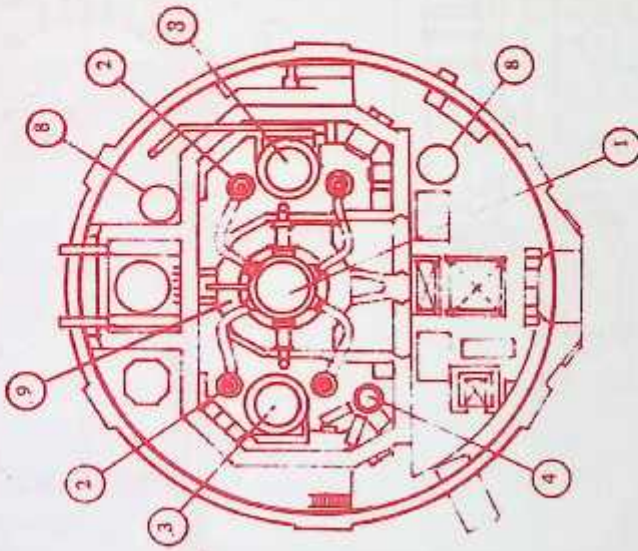
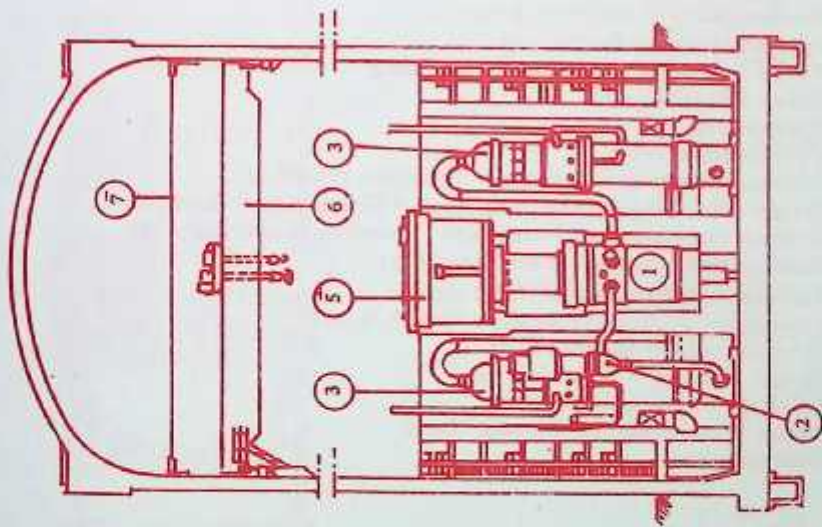
Reaktor nuklir adalah alat yang di dalamnya berlangsung reaksi pembelahan inti berantai, yang dapat dikendalikan sesuai dengan tingkat-tingkat kebutuhan yang dikehendaki.

Di dalamnya terdapat:

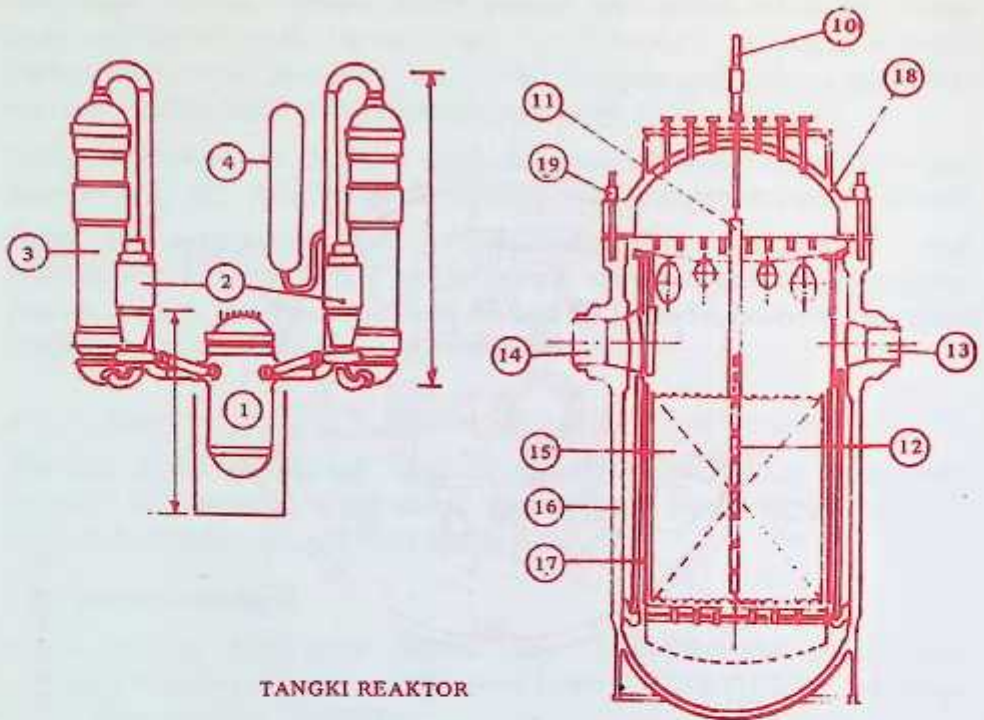
- a. Bahan ini yang dapat dibelah atau Fissile Material atau *Fissile fuel*, misalnya Uranium-235 atau Uranium-238 (U-238) ataupun Plutonium-239 (Pu-239).
- b. Sistem pengendalian atau controlling system, untuk dapat memulai, mengendalikan serta mengatur dan menghentikan reaksi pembelahan inti berantai.
- c. Pendingin Reaktor atau Reactor coolant untuk mengalirkan ke keluar panas reaksi pembelahan inti yang terbentuk di dalam reaktor.
- d. Peralatan atau bahan-bahan lain untuk menunjang reaksi pembelahan inti berantai, antara lain: bahan-bahan dan peralatan-peralatan pelindung terhadap radiasi radioaktif.
- e. Pada thermal reactor diperlukan pula moderator untuk memperlambat terbentuknya neutron aktif atau untuk menyerap neutron-neutron aktif.

Ada beberapa macam tipe reaktor yang disesuaikan dengan tujuannya antara lain:

- a. Reaktor Nuklir yang digunakan untuk pembangkitan uap untuk kebutuhan-kebutuhan:
 - membangkitkan tenaga listrik



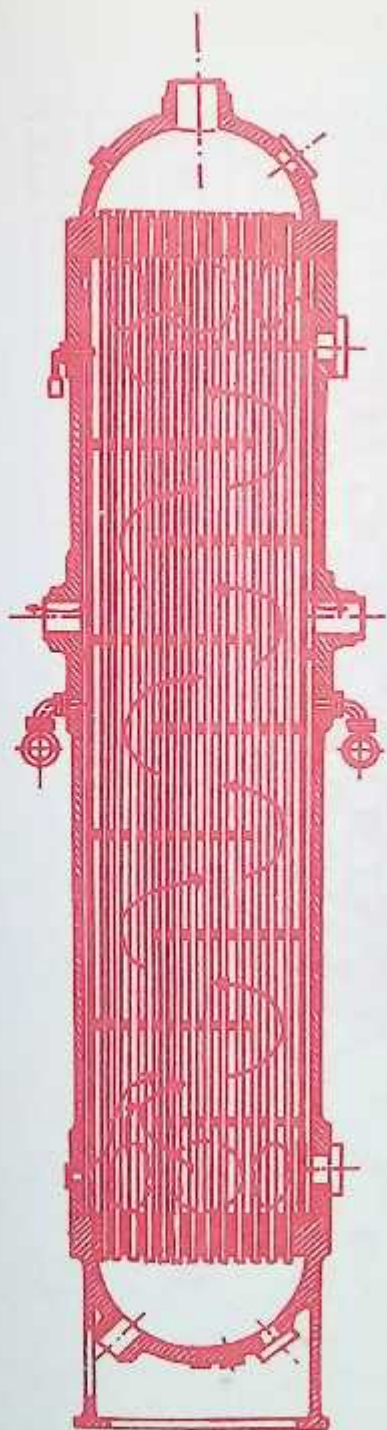
INSTALASI REAKTOR NUKLIR



TANGKI REAKTOR

KETERANGAN GAMBAR

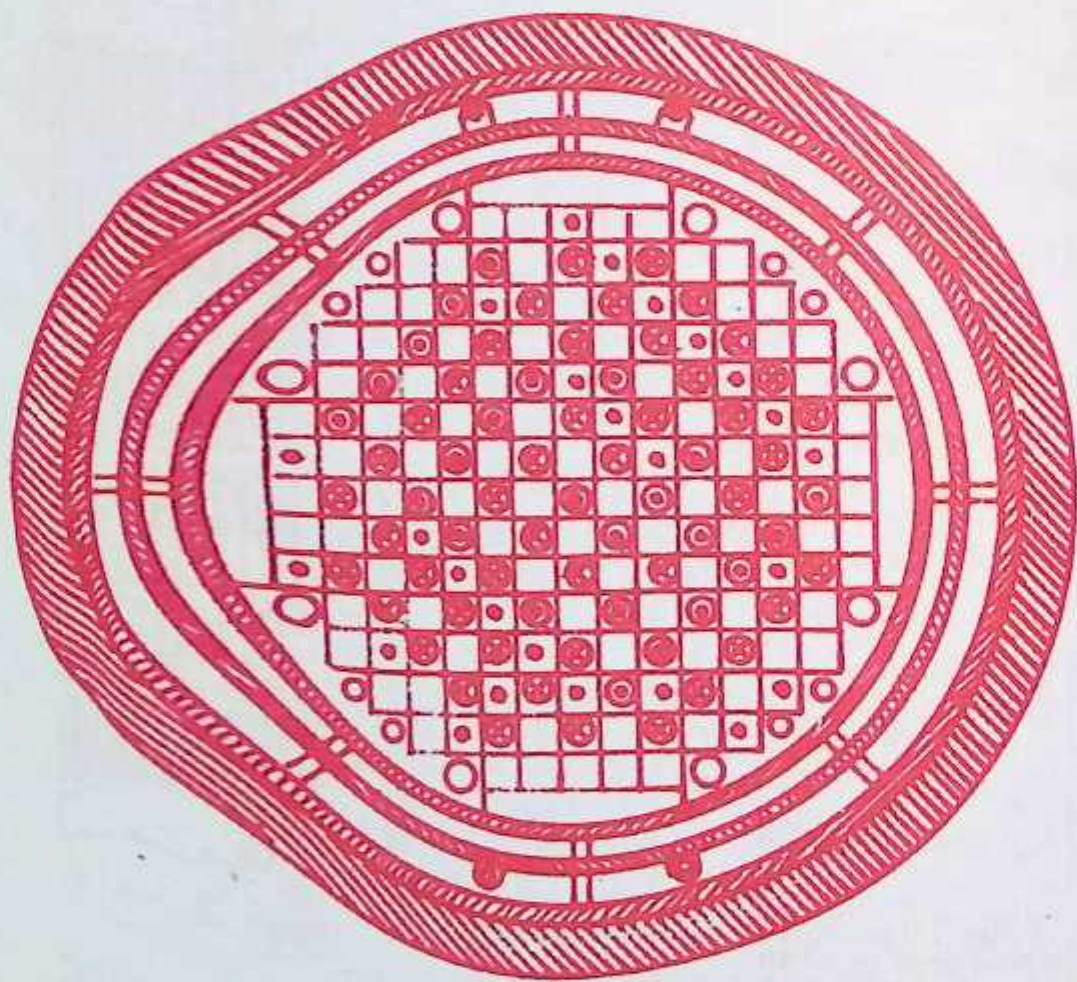
- 1 = Tangki Reaktor = Reactor Vessel.
- 2 = Pompa pendingin reaktor = Reactor coolant pump
- 3 = Pembangkit Uap = Steam Generator
- 4 = Pengatur tekanan=Pressurizer
- 5 = Tutup pelindung = Removable shielding
- 6 = Keran = Polar Crane
- 7 = Spray headers
- 8 = Core flooding tank
- 9 = Lapisan pelindung dari beton = Concrete shielding
- 10 = Penggerak batang-batang Pengendali = Control Rod Drive.
- 11 = Rakitan batang-batang Pengendali = Control Rod Assembly
- 12 = Rakitan bahan bakar = Fuel Assembly
- 13 = Saluran masuk (4 buah) = Inlet Nozzle
- 14 = Saluran pengeluaran (2 buah) = Outlet Nozzle
- 15 = Teras Reaktor = Reactor Core
- 16 = Tangki Reaktor = Reactor Vessel
- 17 = Selubung Teras = Core Barrel
- 18 = Tutup tangki reaktor = Closure Head.
- 19 = Baut pengikat.



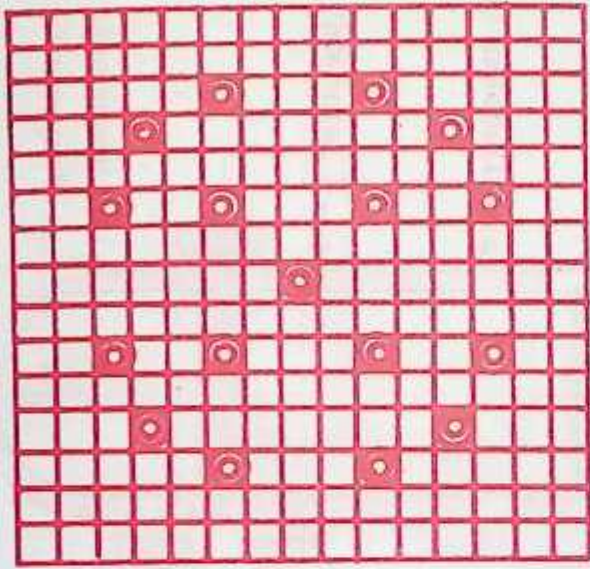
STEAM GENERATOR



FUEL ASSEMBLY



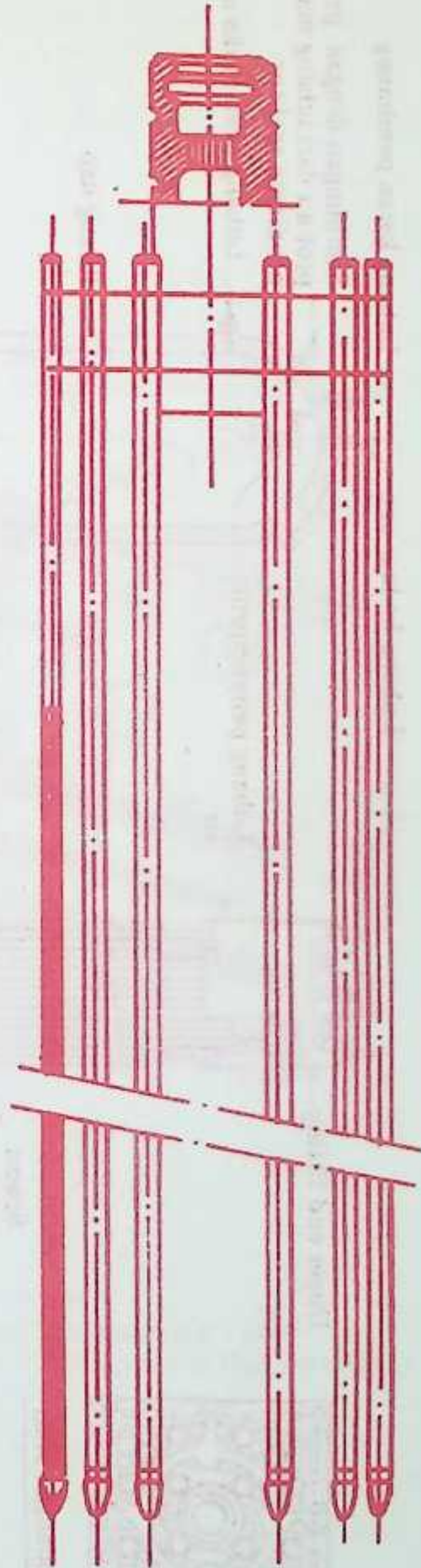
TERAS REAKTOR DI DALAM TANGKI REAKTOR

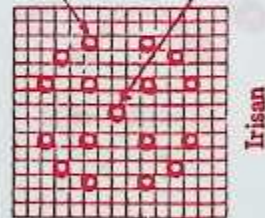
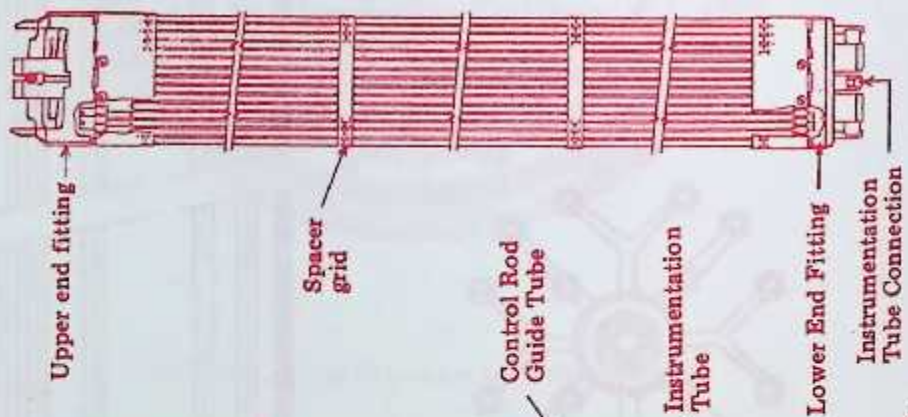
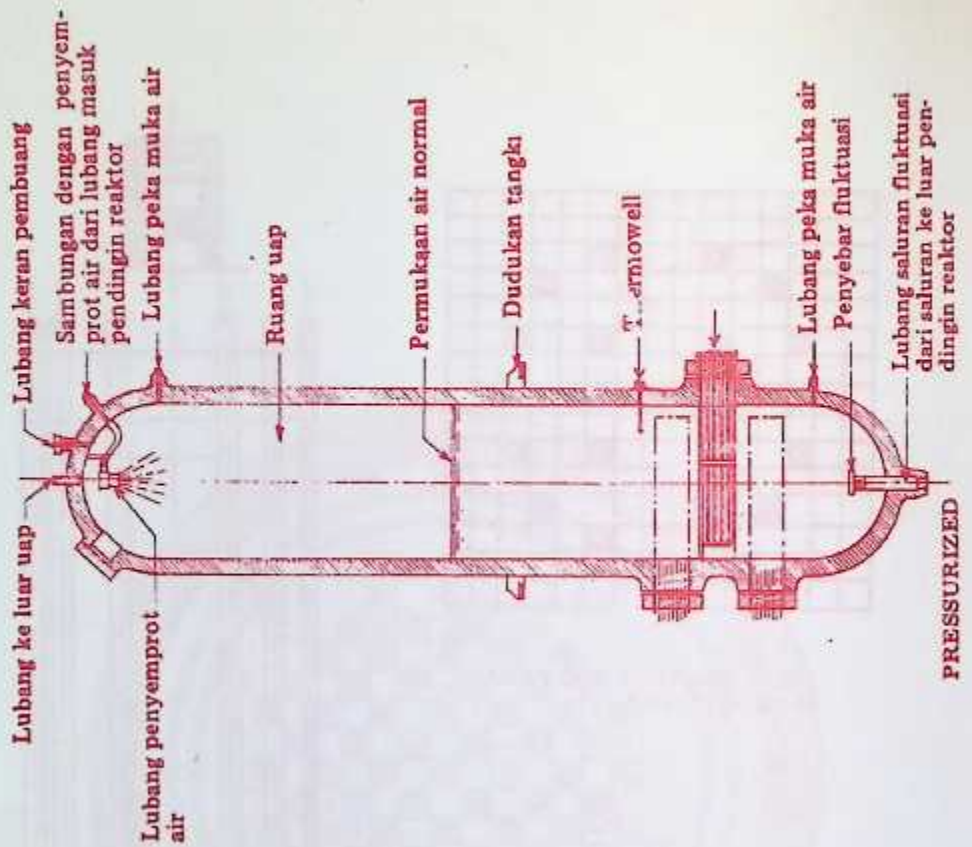


POSISI CONTROL ROD PADA
FUEL ASSEMBLY

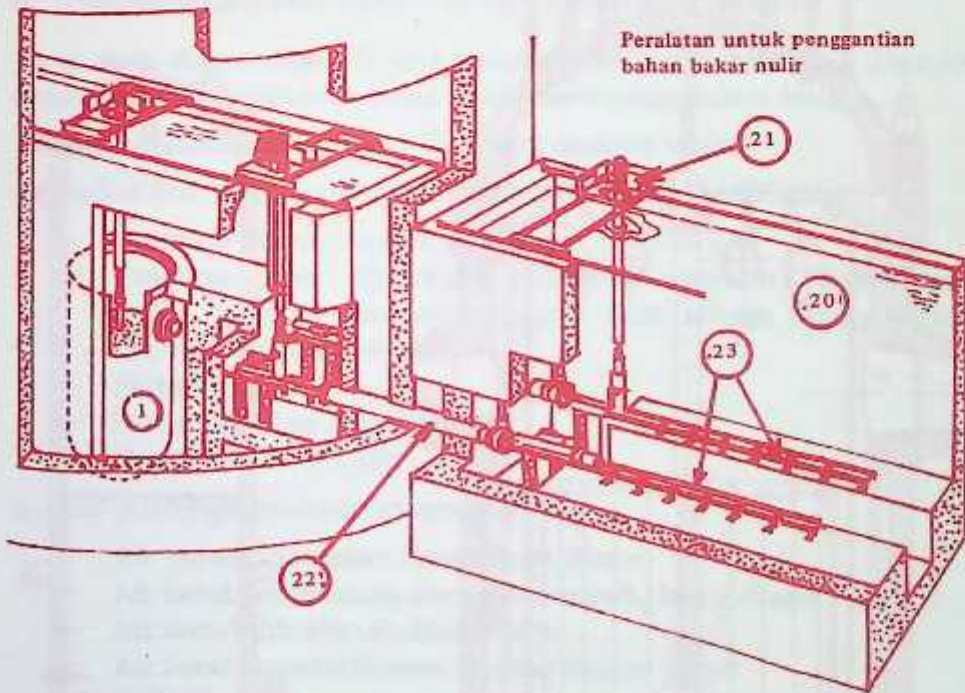


CONTROL ROD



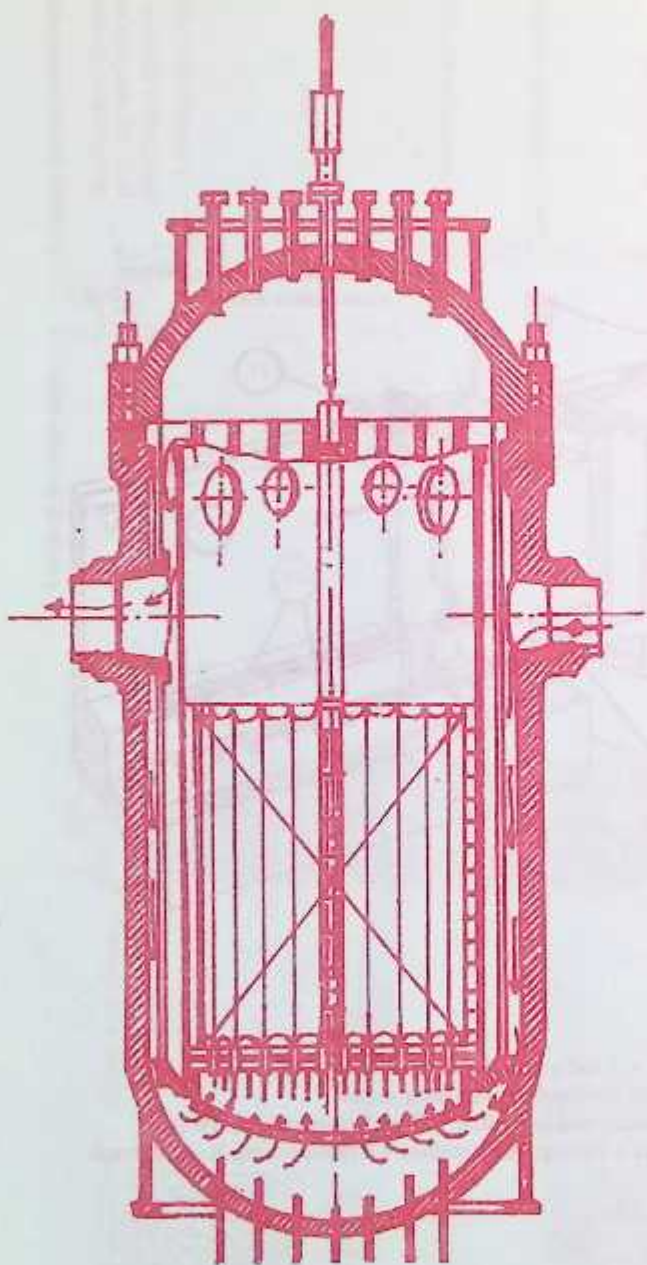


FUEL ASSEMBLY

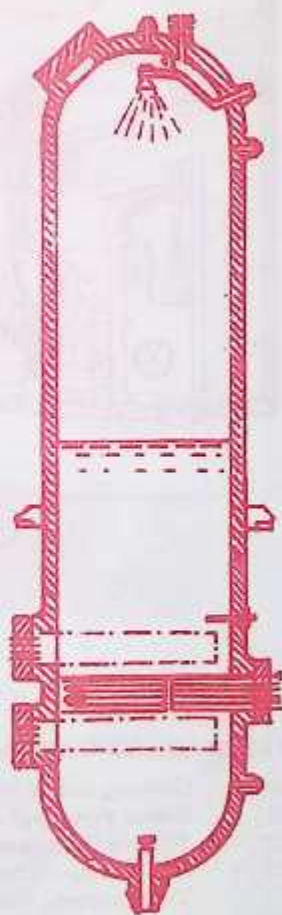


KETERANGAN GAMBAR

- 20 = Gudang bahan bakar = Fuel storage pond.
- 21 = Keran pengangkat dan pemindah = Lifting crane
- 22 = Tabung Transport bahan bakar nuklir = Fuel Transporting Tube
- 23 = Rail transport melalui Tabung transportasi = Transporting Rail through Transporting Tube.



TANGKI REAKTOR



PRESSURIZER

- propulsi kapal laut
 - supply uap untuk proses industri
- b. Reaktor Nuklir memproduksi Plutonium atau Radioisotop-radioisotop.
- c. Reaktor Nuklir untuk memproduksi neutron-neutron yang digunakan untuk penelitian dan pengujian.
- d. Perkembangan eksperimental dari Reaktor itu sendiri.

Yang akan dibicarakan di sini hanya: Reaktor Nuklir yang digunakan untuk pembangkitan uap, yang telah disebutkan dalam butir a.

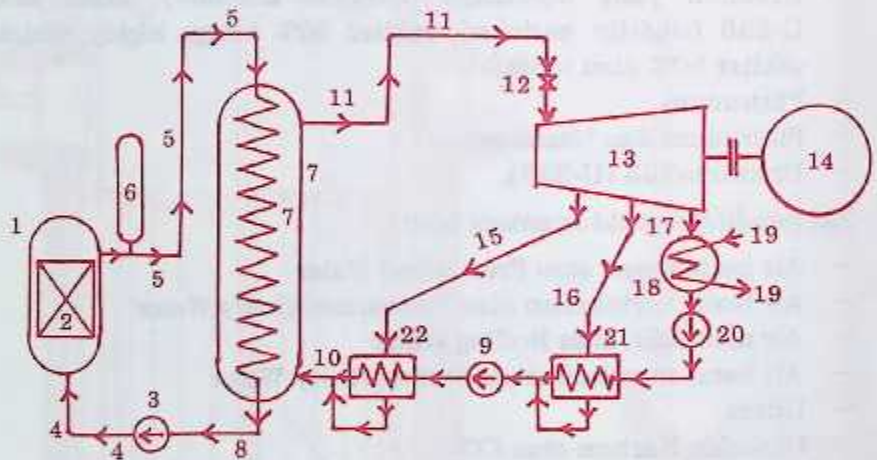
Komponen-komponen utama di dalam reaktor ialah:

- a. Bahan inti yang dapat dibelah atau FISSILE MATERIAL.
- Uranium alami, yang mengandung 0,7% U-235
 - Uranium yang diperkaya (*enriched uranium*) dalam isotop U-235 (slightly enriched, sekitar 50% hingga highly enriched sekitar 90% atau lebih).
 - Plutonium
 - Plutonium dan Uranium
 - Uranium-233 (U-233).
- b. Zat pendingin reaktor antara lain:
- Air bertekanan atau Pressurized Water
 - Air berat bertekanan atau Pressurized Heavy Water
 - Air mendidih atau Boiling Water
 - Air berat mendidih atau Boiling Heavy Water
 - Udara
 - Dioksida Karbon atau CO₂
 - Uap air
 - Helium
 - Natrium
 - Cairan Organik
 - Garam cair
- c. Moderator:
- Air
 - Air berat
 - Graphite
 - Cairan Organik
 - Beryllium atau B_e
 - Oksida Beryllium

Adapun jenis-jenis Reaktor yang digunakan untuk pembangkitan uap yaitu:

a. *Reaktor Air Bertekanan Atau Pressurized Water Reactor*

Reaktor Air Bertekanan atau Pressurized Water Reactor atau P.W.R. yaitu reaktor yang didinginkan oleh Air bertekanan tinggi. Entalpi air yang ke luar dari reaktor masih lebih rendah dari entalpi air pada temperatur mendidih. Air panas pada 315°C yang bertekanan tinggi 160 kg/cm^2 atau 16 N/mm^2 , merupakan siklus primer, yang berfungsi baik sebagai MEDIA PENDINGIN reaktor maupun sebagai Moderator sekaligus, masuk ke-*Steam Generator* yang berupa pemindah panas atau Heat Exchanger yang memindahkan panasnya ke-air atau uap yang bertekanan rendah yang merupakan siklus-siklus sekunder. Lihat Gambar Skema.



Gambar Skema: *Reaktor Air Bertekanan atau Pressurized Water Reactor (P.W.R.)*

Keterangan gambar:

- 1 = Tangki Reaktor = *Reactor Vessel*.
- 2 = Teras Reaktor = *Reactor Core*.
- 3 = Pompa Sirkulasi Pendingin Reaktor = *Reactor Coolant Circulating Pump*.
- 4 = Air Bertekanan Tinggi untuk Pendinginan Teras Reaktor.
- 5 = Air Bertekanan Tinggi yang panas ke luar dari Teras Reaktor.
- 6 = Pengatur Tekanan Air Pendingin Reaktor = *Pressurized*.
- 7 = Pembangkit Uap = *Steam Generator*.
- 8 = Air Bertekanan Tinggi yang dingin ke luar dari *Steam Generator*
- 9 = Pompa Air Pengisian = *Feed Water Pump*.

- 10 = Air Bertekanan Rendah sebagai Siklus Sekunder masuk ke Steam Generator.
- 11 = Uap Bertekanan Rendah ke luar dari Steam Generator menuju ke = Turbin Uap
- 12 = Keran Uap Utama = Main Steam Valve = *Throttle Valve*.
- 13 = Turbin Uap
- 14 = Generator Listrik atau Propeller untuk propulsi kapal laut
- 15 = Sadapan Uap Pertama menuju Heat Exchanger ke dua.
- 16 = Sadapan Uap ke dua menuju Heat Exchanger pertama.
- 17 = Uap bekas menuju ke kondensor
- 18 = Kondensor = *Condenser*.
- 19 = Air Pendingin Kondensor
- 20 = Pompa Air Kondensat.
- 21 = Heat Exchanger pertama
- 22 = Heat Exchanger ke dua;

Pada reaktor yang didinginkan gas atau *gas cooled reactor* (G.C.R.) sebagai siklus primer digunakan dioksida karbon (CO_2)

Pada reaktor air berat atau *heavy water reactor* (H.W.R.) sebagai siklus primer digunakan Air Berat (H_2O_2).

Reaksi inti berantai di dalam Teras Reaktor akan menghasilkan energi yang panas yang sangat besar. Panas tersebut diserap oleh Air bertekanan Tinggi sebagai Siklus Primer. Selanjutnya energi panas tersebut dipindahkan kepada Air atau Uap yang Bertekanan Rendah sebagai Siklus Sekunder pada Pembangkit Uap atau Steam Generator. Steam Generator tersebut merupakan Vertical Tube and Shell Heat Exchanger.

Air Bertekanan Rendah sebagai Siklus Sekunder, diuapkan di dalam Steam Generator, dan uap yang dihasilkan oleh Steam Generator digunakan untuk memutar Turbin Uap sebagai penggerak Generator Listrik atau Propeller untuk propulsi Kapal Laut.

Ada sebagian uap yang disadap dari Turbin Uap untuk memanasi air di dalam Heat Exchanger ke dua, dan ada pula yang sebagian lagi disadap pada sisi tekanan rendah dari Turbin Uap yang digunakan untuk memanaskan air di dalam Heat Exchanger pertama.

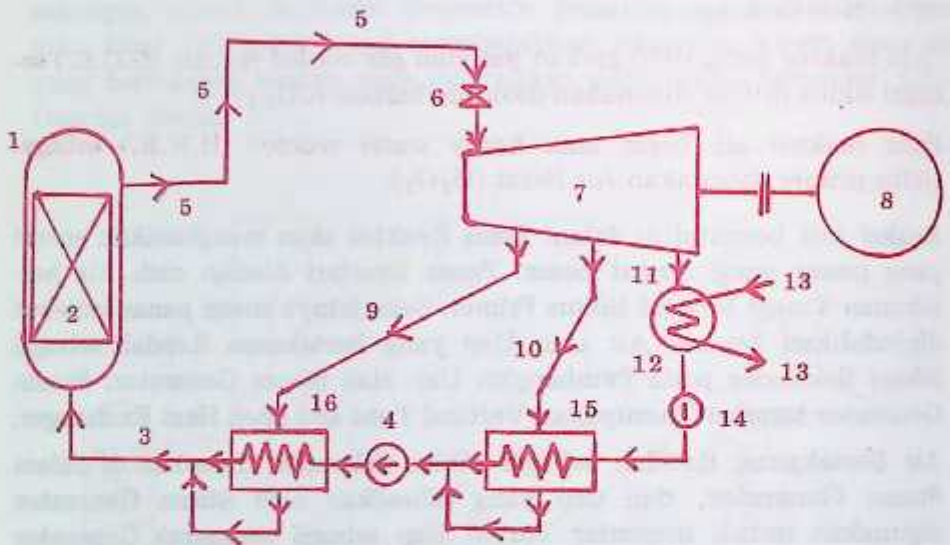
Uap bekas setelah digunakan untuk menggerakkan Turbin Uap diembunkan di dalam Kodensor dan dipompa kembali oleh Pompa Kondensat dan Pompa Air Pengisian (*Feed Water Pump* atau F.W.P.) untuk dimasukkan kembali ke Steam Generator.

Sirkulasi Air Bertekanan Tinggi dari Siklus Primer, melalui Teras Reaktor dan Steam Generator dilakukan oleh Pompa Sirkulasi Pendingin Reaktor (*Reactor Coolant Circulating Pumps*), yang memompakan Air Bertekanan Tinggi dalam jumlah yang sangat banyak.

b. *Reaktor Air Mendidih = Boiled Water Reactor = B.W.R.*

Di dalam Reaktor Air Mendidih, Air sebagai media pendingin reaktor yang bertekanan 70 kg/cm^2 atau 7 N/mm^2 menyerap energi panas dari reaksi inti berantai pada Teras Reaktor hingga mendidih, dan uap kenyang yang dihasilkan bertemperatur 285°C digunakan langsung untuk memutar Turbin Uap untuk membangkitkan listrik atau untuk propulsi kapal laut, tanpa menggunakan Steam Generator.

Dengan demikian reaktor ini hanya mempunyai satu siklus saja. Lihat Gambar.



Gambar skema: *Reaktor Air Mendidih = Boiled Water Reactor (B.W.R.)*

Keterangan Gambar:

- 1 = Tangki Reaktor = *Reactor Vessel*.
- 2 = Teras Reaktor = *Reactor Core*.
- 3 = Air Pendingin Reaktor = *Reactor Coolant Water*
- 4 = Pompa Sirkulasi Pendingin Reaktor = *Reactor Coolant Circulating Pump*.
- 5 = Uap kenyang bertemperatur 285°C menuju Turbin Uap.
- 6 = Keran Uap Utama = *Main Steam Valve = Throttle Valve*.
- 7 = Turbin Uap
- 8 = Generator Listrik atau Propeller untuk propulsi kapal.
- 9 = Sadapan Uap pertama dari Turbin untuk memanasi Heat Exchanger ke dua.
- 10 = Sadapan Uap ke dua untuk memanasi Heat Exchanger pertama
- 11 = Uap bekas menuju Kondensor.
- 12 = Kondensor = *Condensor*.
- 13 = Air Pendingin Kondensor
- 14 = Pompa Air Kodensat.
- 15 = Heat Exchanger pertama
- 16 = Heat Exchanger ke dua

c. *Reaktor yang didinginkan gas atau gas cooled reactor (G.C.R.)*

Di samping kedua jenis reaktor tersebut, ada pula reaktor yang didinginkan oleh gas, dalam hal ini sebagai media pendingin reaktor digunakan gas CO_2 atau dioksida Karbon, dengan menggunakan Moderator Graphite.

Gas CO_2 setelah melalui teras reaktor, yang dalam keadaan sangat panas pada 540°C merupakan Siklus Primer, akan menguapkan Air dari Siklus Sekunder pada Steam Generator.

Uap yang ke luar dari Steam Generator tersebut digunakan untuk memutar Turbin Uap sebagai penggerak Generator Listrik atau untuk propulsi kapal laut. Lihat gambar.

Konstruksi Reaktor yang didinginkan gas atau *Gas Colled Reactor* (G.C.R.) mirip sekali dengan Reaktor Air Bertekanan atau Pressurized Water Reactor (P.W.R.). Perbedaannya terletak pada siklus primer yang digunakan, yaitu pada Gas Cooled REactor untuk Siklus Primer digunakan gas CO_2

d. *Reaktor Air Berat atau Heavy Water Reactor (H.W.R.)*

Konstruksi maupun prinsip kerjanya mirip dengan Reaktor Air Bertekanan (Pressurized Water Reactor = P.W.R.). Hanya bedanya terletak pada SIKLUS PRIMER digunakan zat pendingin reaktor berupa Air Berat atau Heavy Water (H_2O_2). Air Berat tersebut di dalam Steam Generator menguapkan Air dari Siklus Sekunder. Bahan untuk reaksi inti berantai di dalam Teras Reaktor ialah Uranium Alami.

e. *Reaktor Pembiak atau Breeder Reactor (B.R.)*

Di dalam reaktor-reaktor yang diisi dengan bahan reaksi inti berantai yang konvensional, isotop U-235 memegang peranan yang sangat penting. Sedangkan U-238 tidak mempunyai peranan yang berarti di dalam reaksi inti berantai.

U-235 dapat terbelah setelah bereaksi dengan Neutron apa pun, baik neutron cepat maupun neutron lambat. Lain halnya dengan U-238, yang hanya dapat terbelah oleh Neutron-neutron berdaya tinggi. Susahnya di dalam Uranium Alami hanya mengandung 0,714% Uranium-235, sedangkan kandungan Uranium-238 sebanyak 99,28%.

Sebagai konsekuensinya U-238 harus dibiakan menjadi bahan reaksi inti berantai yang berguna atau Useful Fuel, dengan cara inti U-238

ditembaki oleh sebuah Neutron untuk dapat diubah sementara menjadi isotop U-239 yang selanjutnya dengan sinar BETHA (β) diubah menjadi Plutonium-239.

Plutonium-239 (Pu-239) seperti halnya Uranium-235 mudah dibelah setelah bereaksi dengan Neutron berenergi rendah. Oleh karena U-238 dapat diubah menjadi bahan reaksi inti yang dapat dibelah, maka U-238 disebut bahan inti yang subur atau **fertile material**.

Jenis bahan inti subur atau fertile material lainnya ialah Thorium-232 (Th-232) yang dapat diubah menjadi Protactium-233 (Pa-233) yang selanjutnya diubah lagi menjadi Uranium-233, Uranium-233 adalah fissile material.

Neutron-neutron aktif yang terbentuk dari Reaksi inti berrantai dari pembelahan sebuah inti Uranium-235, kemungkinan-kemungkinannya ialah sebagai berikut:

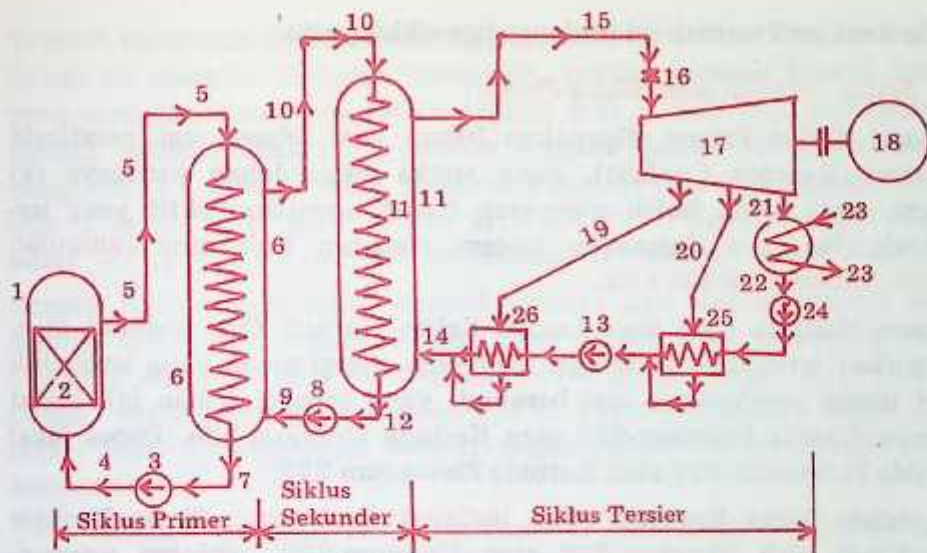
- (i) Terserap oleh sebuah inti U-235, yang akan mengakibatkan reaksi-reaksi pembelahan inti berikutnya.
- (ii) Terserap oleh sebuah inti U-235, yang tidak akan mengakibatkan pembelahan-pembelahan inti berikutnya.
- (iii) Terserap oleh bahan-bahan lain di dalam Teras Reaktor.
- (iv) Hilang dari Teras Reaktor.
- (v) Terserap oleh bahan inti yang subur atau fertile material yang seluruhnya terdiri dari U-238.

Setiap pembelahan sebuah inti U-235 oleh sebuah neutron energi rendah atau Thermal Neutron, akan menghasilkan rata-rata 2,5 neutron aktif baru, atau tepatnya rata-rata menghasilkan 2,43 buah neutron aktif baru.

Jika sebuah neutron aktif di antaranya, diserap untuk melanjutkan reaksi pembelahan inti berantai seperti disebutkan pada butir (i) maka akan tersisa 1,43 neutron aktif baru.

Bila kurang dari 0,43 buah neutron aktif baru hilang dalam proses seperti disebutkan pada butir (ii); (iii); dan (iv); maka lebih dari sebuah atom Bahan Inti yang subur (Fertile Material) akan menghasilkan sebuah bahan inti yang dapat dibelah atau Fissile Material. Kondisi seperti inilah yang diperlukan dalam **reaktor pembiak atau breeder reactor**. Reaktor pembiak semacam ini **tidak menggunakan moderator**.

Reaktor pembiak yang umum digunakan ialah reaktor pembiak yang didinginkan dengan **logam cair** atau (*Liquid metal cooled fast breeder reactor*) (L.M.F.B.R.). Lihat Gambar Skema.



Gambar Skema: Reaktor Pembias atau Breeder Reaktor (B.R.).

Keterangan Gambar:

- 1 = Tangki Reaktor = *Reactor Vessel*.
- 2 = Teras Reaktor = *Reactor Core*.
- 3 = Pompa Sirkulasi Pendingin Reaktor = *Reactor Coolant Circ. Pump*.
- 4 = Logam Cair sebagai Siklus Primer (Kalium-Natrium-Cair).
- 5 = Logam Cair sangat panas ke luar dari Teras Reaktor.
- 6 = Heat Exchanger antara Logam Cair Siklus Primer dengan Logam Cair Siklus Sekunder.
- 7 = Logam Cair dingin Siklus Primer menuju Reaktor
- 8 = Pompa Sirkulasi Logam Cair Siklus Sekunder
- 9 = Logam Cair Siklus Sekunder masuk ke Heat Exchanger.
- 10 = Logam Cair panas Siklus Sekunder menuju Steam Generator.
- 11 = Steam Generator dari Siklus Tersier.
- 12 = Logam Cair Siklus Sekunder kembali ke-Heat Exchanger.
- 13 = Pompa Air Pengisian = *Feed Water Pump = F.W.P.*
- 14 = Air dari Siklus Tersier masuk ke Steam Generator.
- 15 = Uap yang dipanaskan lanjut menuju Turbin Uap.
- 16 = Keran Uap Utama = *Main Steam Valve = Throttle Valve*.
- 17 = Turbin Uap.
- 18 = Generator Listrik atau Propeller untuk propulsi kapal.
- 19 = Sadapan Uap pertama masuk ke-Heat Exchange ke-dua.
- 20 = Sadapan Uap ke-dua masuk ke-Heat Exchanger pertama.
- 21 = Uap bekas masuk ke-Kondensor
- 22 = Kondensor = *Condensator*.
- 23 = Air pendingin kondensor.
- 24 = Pompa Air Kondensat = *Condensate Water Pump*.
- 25 = Heat Exchanger pertama.
- 26 = Heat Exchanger ke-dua.

Siklus Primer : Logam Cair yaitu Kalium-Natrium Cair.

Siklus Sekunder : Logam Cair yaitu Kalium-Natrium Cair

Siklus Tersier : Air dan Uap.

Pada Reaktor Pembiak ini terdapat tiga siklus yaitu:

a. Siklus Pertama atau Siklus Primer:

Sebagai Siklus Primer digunakan logam cair sebagai zat pendingin reaktor (Reactor Coolant), yang angka perpindahan panasnya (k) tinggi, serta tidak boleh menyerap Neutron-neutron aktif yang terbentuk. Biasanya digunakan Logam Natrium Cair atau campuran logam Kalium-Natrium Cair.

Logam Natrium Cair atau Logam Kalium-Natrium Cair tersebut mendinginkan teras reaktor dengan menyerap energi panas yang terbentuk dari reaksi pembelahan inti berantai, yang sebagai bahan inti reaksi berupa Oksida Uranium-235 atau Karbida Uranium-235. Dapat juga: Oksida Plutonium-239 atau Karbida Plutonium-239.

Di dalam Teras Reaktor tidak terdapat moderator. Teras Reaktor dikelilingi oleh Thorium-232 atau Uranium-238, sehingga neutron-neutron aktif yang hilang akan terserap untuk membiakannya menjadi Uranium-233 atau Plutonium-239 (Pu-239).

Ada pula yang menggunakan Air raksa (Hg) atau Merkuri sebagai Siklus Primer untuk mendinginkan Teras Reaktor yang di dalamnya berisi bahan inti Plutonium (Pu).

Siklus Primer ini berfungsi untuk memindahkan panas yang diserap dari Teras Reaktor kepada Siklus Sekunder yang berlangsung di dalam Intermediate Heat Exchanger.

b. Siklus Sekunder:

Yang digunakan sebagai Siklus Sekunder juga Logam Natrium Cair atau Campuran Logam Kalium-Natrium Cair, yang menyerap panas dari Siklus Primer di dalam Intermediate Heat Exchanger.

Untuk selanjutnya, Logam Cair Siklus Sekunder ini menyerahkan panasnya kepada Air dan Uap dari Siklus Sekunder di dalam Generator.

c. Siklus Tersier:

Sebagai Siklus Tersier digunakan Air dan Uap, yang menyerap panas dari Siklus Sekunder di dalam Steam Generator. Uap yang terbentuk dari Steam generator digunakan untuk memutar Turbin Uap yang menggerakkan Generator Listrik atau Propeller untuk propulsi kapal laut.

Konstruksi Bangunan Reaktor dan Instalasinya:

Lihat Gambar Bangunan Reaktor Nuklir:

Terlihat bangunan beton bertulang pra-tekan berbentuk silinder dengan kubah di atasnya. Sebagai gambaran, untuk instalasi tenaga nuklir yang menghasilkan daya listrik sekitar 800 — 900 MW, mempunyai ukuran sebagai berikut: Diameter sebelah dalam 40 meter, tinggi bangunan 70 meter, tebal dinding yang vertikal 1,20 meter, tebal atap 1 meter tebal lantai beton 2,75 meter. Di dalam bangunan tersebut terdapat Reaktor Air Bertekanan (*Pressurized Water Reactor*).

Tangki Reaktor (*Reactor Vessel*) terbuat dari *Low-alloy steel* yang dilapisi di sebelah dalam dengan Baja tahan karat (*Stainless-steel*). Tekanan Air di dalamnya mencapai 176 kg/cm^2 atau $17,6 \text{ N/mm}^2$, dengan temperatur air mencapai 340°C . Diameter sebelah dalam 4,30 meter dan tebalnya 0,20 meter, tingginya 11 meter dengan berat kosong 415 ton.

Teras Reaktor (*Reactor Core*) berdiameter 3,25 meter dengan panjang bahan reaksi inti (*Fuel length*) 3,60 meter. Teras Reaktor terdiri dari sekitar 180 buah Rakitan Bahan reaksi inti (*Fuel Assembly*) yang di dalamnya terdapat batang-batang pengendali (*control rod*).

Sekali mengisi bahan reaksi inti berantai sebanyak 95 ton Oksida Uranium. Panas yang terbentuk sekitar $9,25 \times 10^9 \text{ KJ/jam}$. Panas ini dipindahkan oleh Media Pendingin Reaktor berupa Air Bertekanan sebanyak 60.000 ton/jam. Pada saat air masuk ke-tangki reaktor ber-temperatur 290°C dan keluar pada temperatur 320°C hingga 330°C . Kecepatan air melalui teras reaktor sekitar 5 meter/detik.

Setiap rakitan bahan reaksi inti berantai (*Fuel Assembly*) terdiri dari 210 batangan bahan reaksi inti, yang tersusun dari butiran-butiran Oksidasi Uranium berupa pellet yang terdapat di dalam pipa-pipa pembungkus (*Cladding Material*) yang terbuat dari campuran Zirconium. Diameter luar pipa-pipa pembungkus 11 milimeter, tebal pipa 0,7 milimeter. Pellet-pellet bahan reaksi inti diameternya berukuran 9,4 milimeter dan panjangnya 18 milimeter. Sela-sela antara pipa pembungkus dan pellet-pellet bahan reaksi inti, diisi dengan gas Helium yang bertekanan 25 kg/cm^2 atau $2,5 \text{ N/mm}^2$.

Di dalam sejumlah Rakitan bahan reaksi inti (*Fuel Assembly*) pada Teras Reaktor, terdapat Rakitan Batang-batang Pengendali (*Control Rod Assembly*). Rakitan batang-batang pengendali (*Control Rod Assembly*) terdiri dari 16 batang pengendali (*control rod*) yang terikat pada rumahnya yang terbuat dari Baja tahan karat (*Stainless-steel*). Batang-batang pengendali terbuat dari Cadmium-Indium-Perak yang terbungkus di dalam pipa-pipa Baja tahan karat berukuran diameter

luar 12 milimeter, dan tebalnya 0,5 mm. Ujung-ujung batang pengendali juga dilapisi dengan pelindung yang terbuat dari Baja tahan karat. Rakitan batang-batang pengendali tersebut dapat dimasukkan (diturunkan) ke dalam teras reaktor dan dapat diangkat atau dicabut dari teras reaktor dengan menggunakan motor listrik.

Pembangkit Uap atau Steam Generator berbentuk Vertical Tube and Shell Heat Exchanger, medium pendingin teras reaktor (*Reactor Coolant*) sebagai Siklus Primer lewat di dalam pipa-pipa vertikal dari atas ke bawah, sedangkan Air dan Uap dari Siklus Sekunder lewat di sekeliling luar pipa-pipa dari bawah ke atas. Di bagian bawah Siklus Sekunder yang masuk ke-*Steam Generator* masih berupa Air, sedang ke luar di bagian atas *Steam Generator* telah berupa uap yang dipanaskan lanjut pada 315°C , lebih tinggi dari temperatur uap kenyang pada tekanan kerja.

Bahan pipa-pipa terbuat dari Baja Chrom-Nikkel. Untuk sebuah reaktor terdapat Dua buah *Steam Generator* yang bekerja paralel, dengan dimensi: tinggi 23 meter, diameter 4,5 meter.

Untuk masing-masing Siklus Primer yang melalui masing-masing *Steam Generator* terdapat Dua buah pompa sentrifugal satu tingkat (*One Stage Centrifugal Pump*), yang dengan demikian secara keseluruhannya terdapat Empat buah pompa sentrifugal, yang keseluruhannya menghasilkan aliran media pendingin reaktor sebanyak 60.000 ton/jam dengan tekanan masuk sebesar 150 kg/cm^2 atau 15 N/mm^2 dengan tinggi kenaikan sebesar 117 meter atau sekitar 12 kg/cm^2 ($1,2\text{ N/mm}^2$).

Pressurizer atau Pengatur tekanan air pada Siklus Primer digunakan untuk mengatur tekanan Air pendingin reaktor agar tekanannya tetap konstan. Bila tekanan air pendingin reaktor menurun, maka ada seberkas elemen pemanas listrik yang secara otomatis akan menyala, dan akan menambah tekanan pada Siklus Primer.

30.3. Ketel-ketel Untuk Tekanan Superkritis

Seperti telah diuraikan, dewasa ini ada kecenderungan untuk membuat ketel yang tekanannya makin lama makin besar, karena dengan membuat ketel yang tekanannya besar, akan didapat keuntungan ganda sebagai berikut:

- a. Penggunaan bahan bakarnya akan makin hemat
- b. Daya yang dihasilkan per Kilogram Uap makin besar.

Dari kedua alasan tersebut inilah, maka dibuat ketel-ketel yang ber-

tekanan tinggi bahkan melampaui **tekanan kritis** uap, yaitu di daerah tekanan **uap superkritis**.

Sekalipun demikian untuk membuat ketel-ketel bertekanan tinggi didapat kesukaran-kesukaran khusus di antaranya:

- a. Drum ketel untuk tekanan yang tinggi menjadi mahal karena harus dibuat tebal agar dapat tahan pada tekanan tinggi, sehingga pelaksanaan-pelaksanaannya juga akan makin susah dan mahal.
- b. Pada tekanan uap yang tinggi, lebih-lebih pada tekanan uap di daerah Superkritis, hampir-hampir **tidak bisa dibedakan** lagi antara uap dan air, sehingga sirkulasi air dan uap di dalam ketel tidak mungkin lagi berlangsung secara alamiah, melainkan harus menggunakan Sirkulasi **Paksa** (*Forced Circulation*) dengan menggunakan Pompa Sirkulasi khusus.

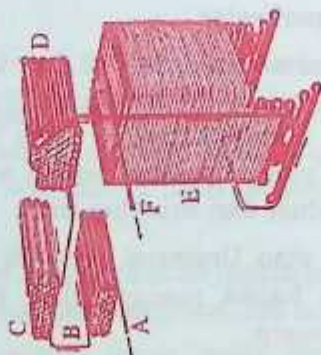
Dengan demikian pada ketel-ketel untuk tekanan superkritis tidak lagi dijumpai adanya drum ketel yang dimaksudkan untuk memisahkan antara air dan uap, karena di daerah tekanan superkritis tidak dapat lagi dibedakan antara uap dan air, baik dalam hal: Berat Jenis, Volume Jenis, maupun Entalpinya. Hanya dapat dijumpai adanya header-header untuk memparalelkan pipa-pipa.

Ada Dua jenis ketel yang dapat digunakan untuk tekanan superkritis, yaitu:

- a. **Ketel Benson** atau yang pada dewasa ini sering disebut dengan *Universal Pressure Boiler*, yang hanya mempunyai header-header dan pipa-pipa saja.
- b. **Ketel Sulzer** yang berupa pipa-pipa yang disambung-sambung menjadi satu, mulai dari Ekonomiser, Penguap atau Evaporator dan Superheater, yang panjang pipa keseluruhannya dapat mencapai 2800 meter hingga 4000 meter, mulai sejak masuk ke-ekonomiser hingga ke luar dari superheater.

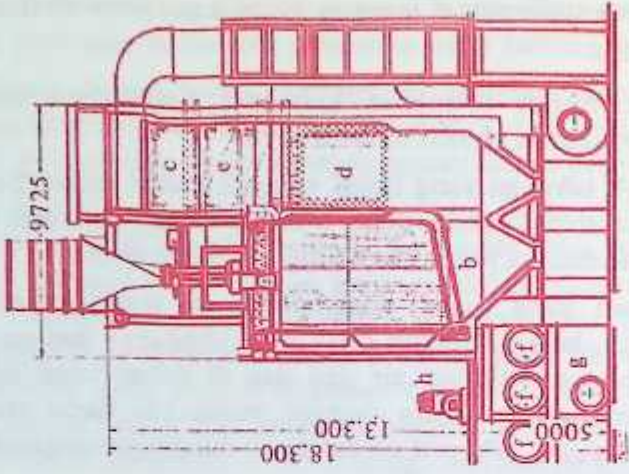
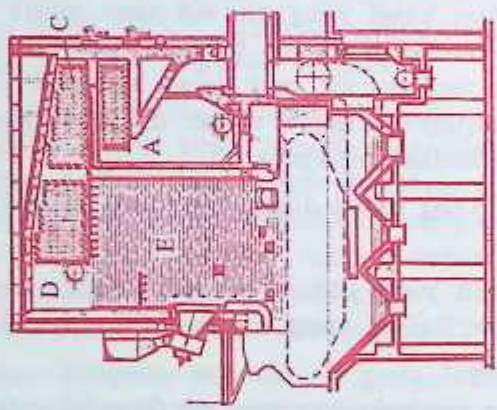
Sampai dengan kapasitas produksi 15 ton uap/jam cukup menggunakan sebuah pipa saja yang berukuran diameter 70 mm, yang disambung-sambung. Untuk kapasitas yang besar-besar digunakan beberapa buah pipa yang dipasang paralel sejak mulai masuk ke-ekonomiser hingga keluar dari superheater.

Baik pada ketel Benson atau *Universal Pressure Boiler*, maupun pada Ketel Sulzer, semuanya hanya **menggunakan Pompa** langsung atau *One through feed water pump*.



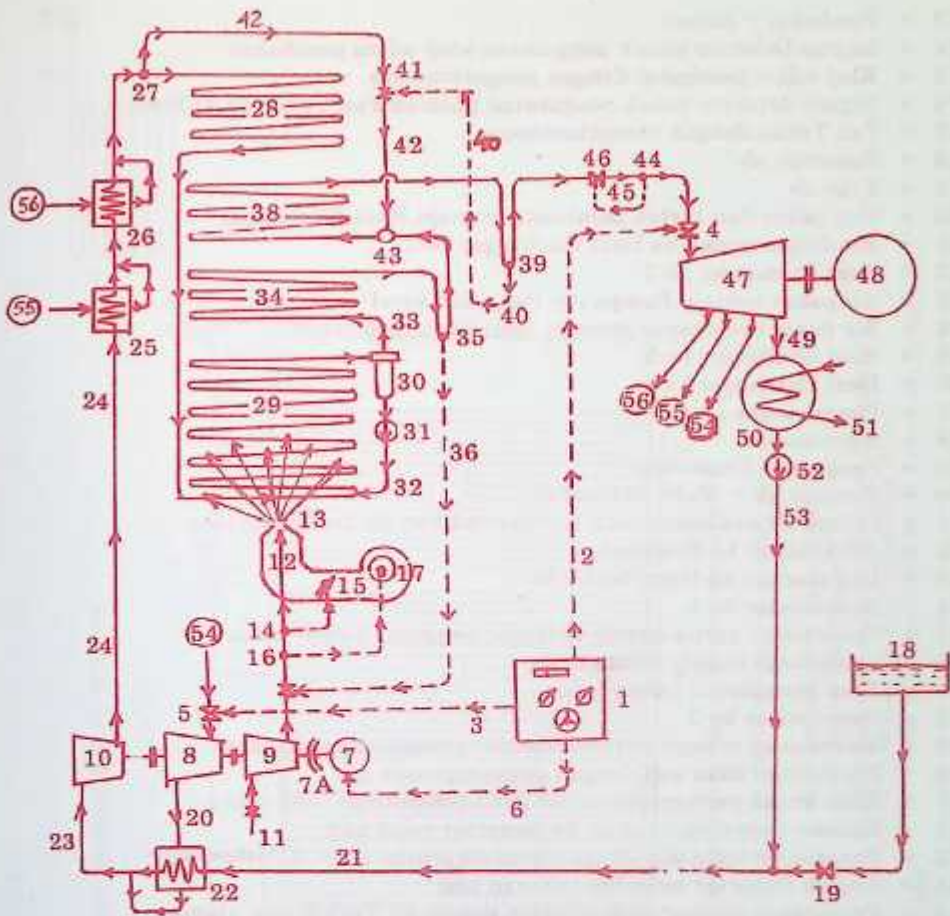
KETEL SULZER DAN SKEMANYA

- A = Air masuk ke ekonomiser
- B&C = Ekonomiser
- D = Awal dari penguapan
- E = Penguap (Evaporator) Panca an
- F = Uap yang dipanaskan lanjut, ke luar



KETEL LOFFLER

- = Pemanas lanjut pancaran
 - = Rangka-tangka pendingin
 - = Pembakar serbuk batu bara (*pulverized coal burner*)
 - = Pemanas lanjut konveksi
 - = Ekonomiser
 - = *Evaporator drums*
 - = Pengendap lumpur
 - = Pompa sirkulasi
- a =
 - b =
 - c =
 - d =
 - e =
 - f =
 - g =
 - h =

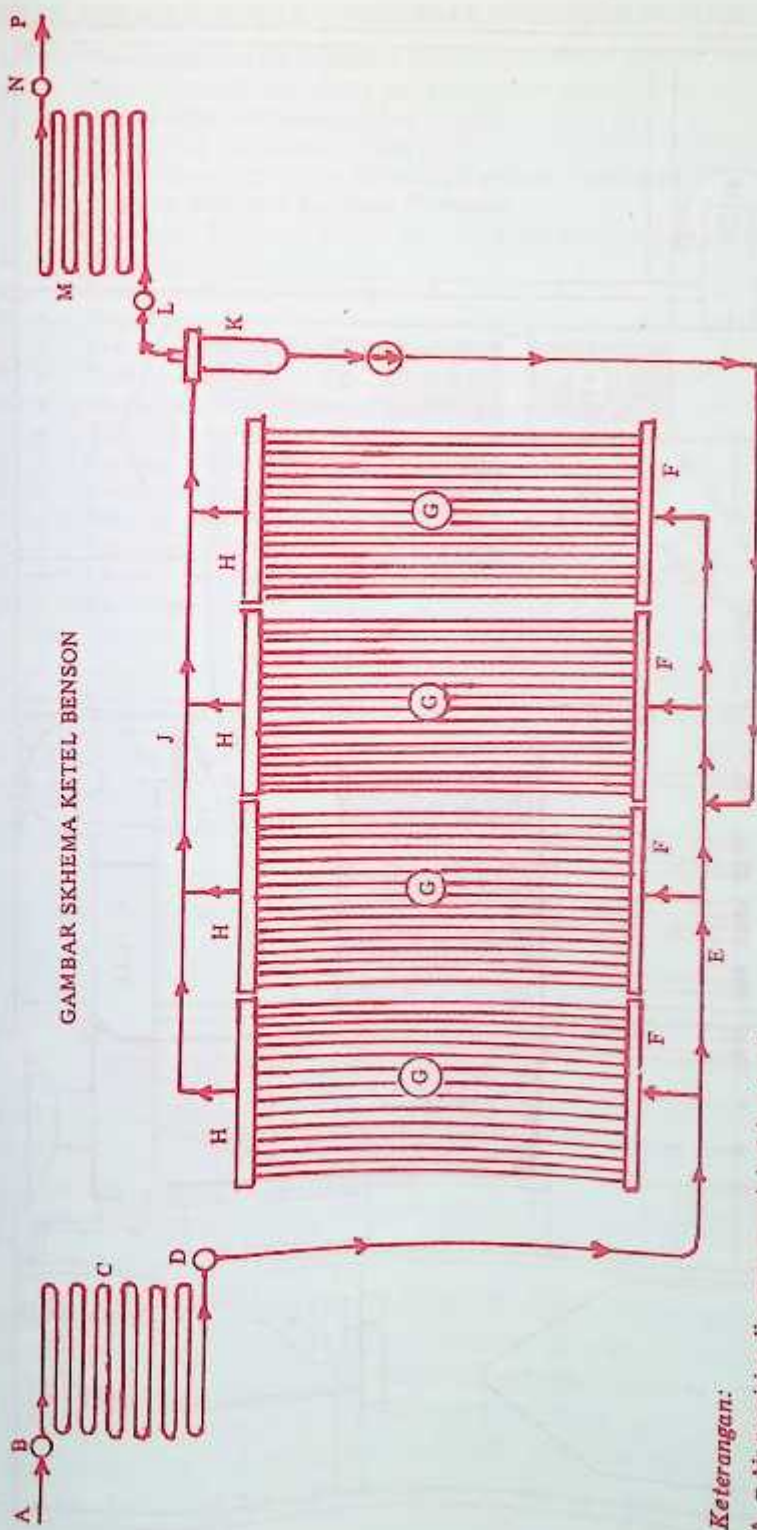


Gambar Skema Pengaturan Ketel Sulzer dan Ketel Benson

KETERANGAN PENGATURAN KETEL BENSON DAN KETEL SULZER

- 1 = Papan pengaturan = *Control Board*
- 2 = Pengaturan untuk beban Ketel/Turbin
- 3 = Pengaturan untuk pembukaan uap ke turbin pembantu
- 4 = Keran Uap Utama = *Main Steam Valve*
- 5 = Keran Uap turbin pembantu
- 6 = Pengaturan untuk motor Start
- 7 = Motor listrik untuk starting
- 7.A = Kopling
- 8 = Turbin Uap Pembantu, untuk menggerakkan pompa bahan bakar dan Pompa air pengisian
- 9 = Pompa bahan bakar
- 10 = Pompa air pengisian ketel = *Feed Water Pump = F.W.P.*
- 11 = Saluran bahan bakar = *Fuel Supply Line*
- 12 = Saluran bahan bakar masuk ke Pembakar atau Burner

- 13 = Pembakar = Burner
- 14 = Impuls Detector untuk pengaturan klep udara pembakar
- 15 = Klep udara pembakar dengan pengaturannya
- 16 = Impuls detector untuk pengaturan putaran Fan Tekan (F.D.F.)
- 17 = Fan Tekan dengan pengaturannya
- 18 = Reservoir air
- 19 = Kran air
- 20 = Uap bekas dari turbin pembantu menuju Heat Exchanger
- 21 = Air dingin masuk ke Heat Exchanger ke-1
- 22 = Heat Exchanger ke-1
- 23 = Air panas menuju Pompa Air Pengisian ketel
- 24 = Air panas bertekanan menuju Heat Exchanger ke-2
- 25 = Heat Exchanger ke-2
- 26 = Heat Exchanger ke-3
- 27 = Pencabangan air
- 28 = Ekonomiser
- 29 = Penguap = *Evaporator*
- 30 = Pemisah air = *Water Separator*
- 31 = Pompa air sirkulasi untuk mengembalikan air ke *Evaporator*
- 32 = Air kembali ke *Evaporator*
- 33 = Uap menuju ke Superheater ke-1
- 34 = Superheater ke-1
- 35 = Thermostat untuk impuls detector pengatur bahan bakar
- 36 = Pengaturan supply bahan bakar
- 37 = Kran pengaturan bahan bakar
- 38 = Superheater ke-2
- 39 = Thermostat sebagai impuls detector pengaturan suhu uap
- 40 = Pengaturan suhu uap dengan penyemprotan air
- 41 = Kran untuk penyemprotan air guna pengaturan suhu uap
- 42 = Saluran penyemprotan air ke pengatur suhu uap
- 43 = Pengaturan suhu uap dengan penyemprotan air = *Attemperator*
- 44 = Impuls Detector terhadap tekanan uap
- 45 = Pengaturan tekanan uap sebelum masuk ke Turbin uap utama
- 46 = Kran uap pengaturan tekanan uap sebelum masuk Turbin Uap
- 47 = Turbin Uap utama
- 48 = Generator listrik
- 49 = Uap bekas menuju Kondensor
- 50 = Kondensor
- 51 = Air pendingin Kondensor
- 52 = Pompa kondensat
- 53 = Air kembali ke ketel
- 54 = Sadapan uap ke-3
- 55 = Sadapan uap ke-2
- 56 = Sadapan uap ke-1

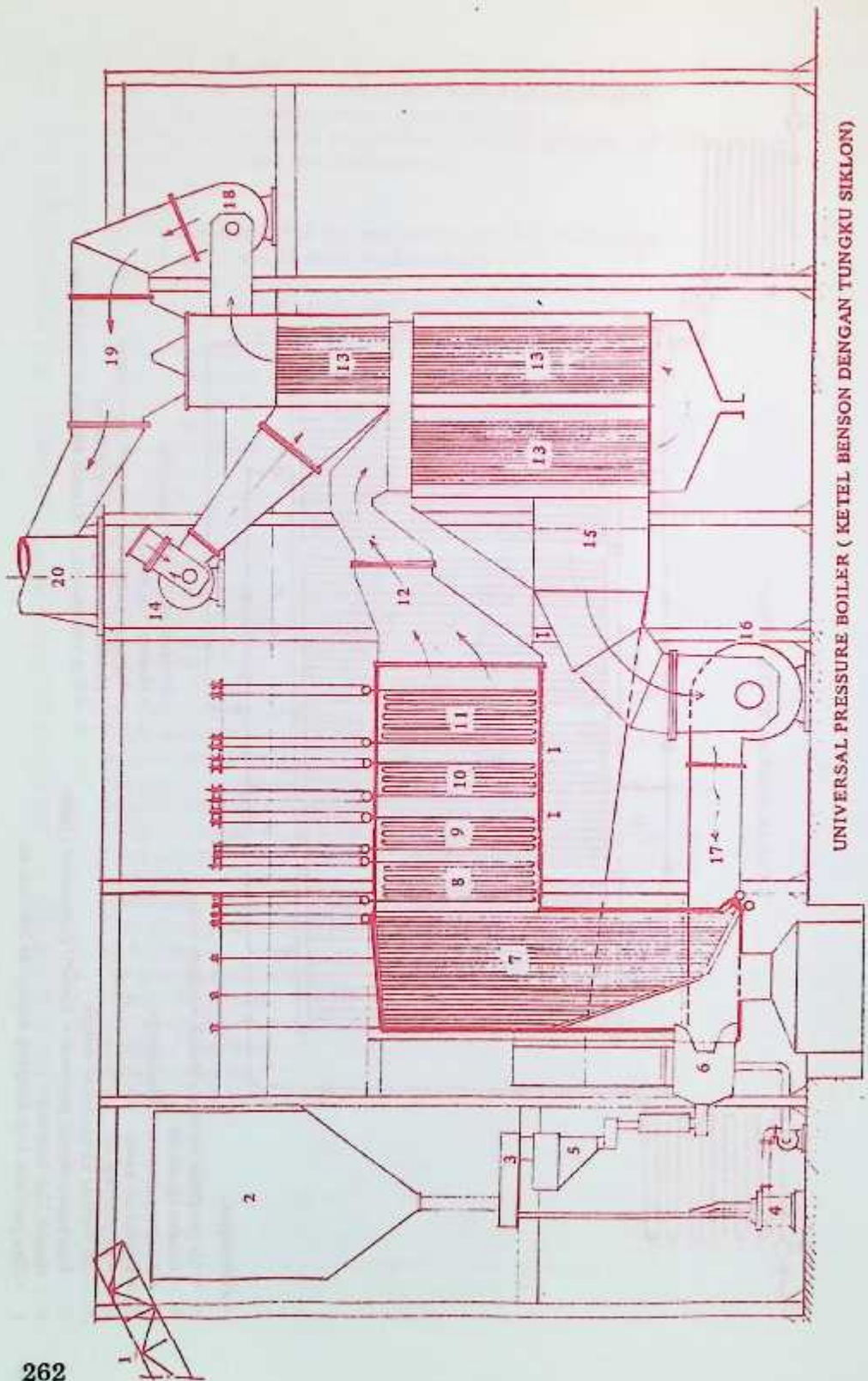


GAMBAR SKHEMA KETEL BENSON

Keterangan:

- A = Air pengisian dipompa masuk kedalam ketel
- B = Header air dingin
- C = Pemanas air awal = Ekonomiser
- D = Header air panas
- E = Pipa pembagi air
- F = Air menuju ke header air bawah
- G = Pipe-pipa penguap pancaran = Radiant Evaporator's pipes
- H = Header Uap konyang
- J = Pipa penyalur Uap Konyang menuju ke Pemisah air

- K = Pemisah air = Water Separator
- L = Header Uap Konyang
- M = Pemanas Lanjut Uap = Steam Superheater
- N = Header uap yang dipanaskan lanjut
- P = Uap yang dipanaskan lanjut menuju ke-Turbin uap.



UNIVERSAL PRESSURE BOILER (KETEL BENSON DENGAN TUNGKU SIKLON)

KETERANGAN GAMBAR UNIVERSAL PRESSURE BOILER :

- 1 = Conveyor untuk batubara pasir
- 2 = Bunker untuk batubara pasir
- 3 = Fuller-Kinyon transporting pump
- 4 = Penggiling batubara = Coal mill
- 5 = Pulverized coal bin = Bin untuk serbuk batubara
- 6 = Tungku Siklon = Cyclone Furnace
- 7 = Pipa-pipa Penguap Pancaran = Radiant Evaporator's pipes
- 8 = Superheater II
- 9 = Pemanas Ulang = Reheater
- 10 = Superheater I
- 11 = Pemanas air awal = Ekonomiser
- 12 = Saluran gas asap = Flue gas duct
- 13 = Pemanas udara pipa = Pipes Air Pre-heater
- 14 = Fan Tekan = Forced Draught Fan = F.D.F.
- 15 = Saluran Udara panas = Hot air duct
- 16 = Fan penghembus udara primair
- 17 = Saluran udara penghembus
- 18 = Fan Isap = Induced Draught Fan = I.D.F.
- 19 = Pengumpul Debu = Dust Collector
- 20 = Cerobong asap.

Sekalipun ketel-ketel untuk tekanan superkritis menghasilkan uap bertekanan sangat tinggi, ada yang mencapai 600 kg/cm^2 atau 60 N/mm^2 , namun dalam penggunaannya masuk ke-Turbin uap sering-sering hanya pada tekanan di bawah tekanan kritisnya, sehingga memerlukan Klep Reduksi untuk menurunkan tekanan uap dari tekanan superkritis hingga tekanan yang dikehendaki untuk masuk turbin uap. Namun ada pula yang langsung dari tekanan superkritis masuk ke dalam turbin uap tekanan superkritis juga.

Kesukaran pertama yang dihadapi oleh ketel-ketel tekanan superkritis ialah karena air yang dipompa masuk ke dalam ketel ialah air yang dimurnikan secara kimiawi atau dimurnikan secara teknis, maka berarti masih mengandung garam-garam yang tidak berbahaya yang larut di dalamnya. Garam-garam yang larut di dalam air pengisian tersebut, pada saat air menguap di dalam ketel, garamnya akan tertinggal pada pipa-pipa.

Karena air dipompakan masuk secara terus-menerus ke dalam ketel uap, maka garam-garam yang tertinggal pun akan terus-menerus terbentuk dan tertinggal di dalam pipa-pipa. Bila garam-garam tersebut terus-menerus tertinggal dan tertumpuk pada suatu tempat di pipa-pipa penguap, sehingga konsentrasi garam akan bertambah pekat, maka garam-garam tersebut akan menjadi kerak di tempat tersebut, dan akan melekat serta membuntu lubang pipa-pipa, sehingga pipa-pipa akan mudah pecah terbakar.

Untuk mengatasinya, maka kecepatan air dan uap melalui pipa-pipa penguap diusahakan agar cukup tinggi sekitar 20 — 50 meter/detik, sehingga kerak-kerak garam yang terbentuk dapat terhembus turut serta dan dipisahkan di dalam salah satu alat yang disebut *pemisah garam* merangkap sebagai *pemisah air*.

Butiran-butiran kerak garam dihembuskan secara *Tangensial* di dalam pemisah garam atau pemisah air, sehingga butiran-butiran kerak garam tersebut dihempaskan ke dinding pemisah garam sebagai akibat gaya sentrifugal yang bekerja pada butiran-butiran garam tersebut, dan terpisah dari uap.

Bila beban ketel tiba-tiba naik, sedangkan api yang bertambah besar untuk sementara belum dapat mengimbangi perubahan pada temperatur tungku, maka karena uap yang diambil dari ketel bertambah banyak, kecepatan air dan uap melewati pipa-pipa juga menjadi makin besar, akibatnya pembentukan kerak-kerak garam baru berlangsung setelah melewati pemisah garam atau pemisah air tersebut, sehingga

pada superheater akan terbentuk kerak-kerak garam, dan pipa-pipa superheater akan menjadi pecah/bocor karenanya.

Sebaliknya bila beban ketel tiba-tiba menurun, sedangkan api yang sudah mulai berkurang, belum terasa mengimbangi pada penurunan temperatur tungku, maka karena uap yang diambil dari dalam ketel berkurang jumlahnya, kecepatan air dan uap melewati pipa-pipa menjadi menurun, sehingga pembentukan kerak-kerak garam akan berlangsung jauh sebelum mencapai pemisah garam atau pemisah air. Dengan demikian pada pipa-pipa penguap akan terbentuk kerak-kerak garam yang melekat padanya, yang akan menyebabkan pecah/bocornya pipa-pipa penguap.

Kesukaran kedua yang dijumpai pada ketel-ketel untuk tekanan superkritis, ialah cara pengaturannya, yaitu pada setiap perubahan beban ketel harus segera diikuti dengan perubahan dalam pemakaian bahan bakar, dan dalam perubahan dalam hal penggunaan udara pembakar yang masuk ke dalam tungku. Di samping perubahan-perubahan tersebut harus serempak dan berimbang, perlu pula disesuaikan dengan perubahan-perubahan tekanan dan temperatur uap yang terjadi. Sehingga dengan demikian untuk ketel-ketel tekanan superkritis diperlukan peralatan pengaturan yang peka (*sensitive*) dan canggih (*sophisticated*).

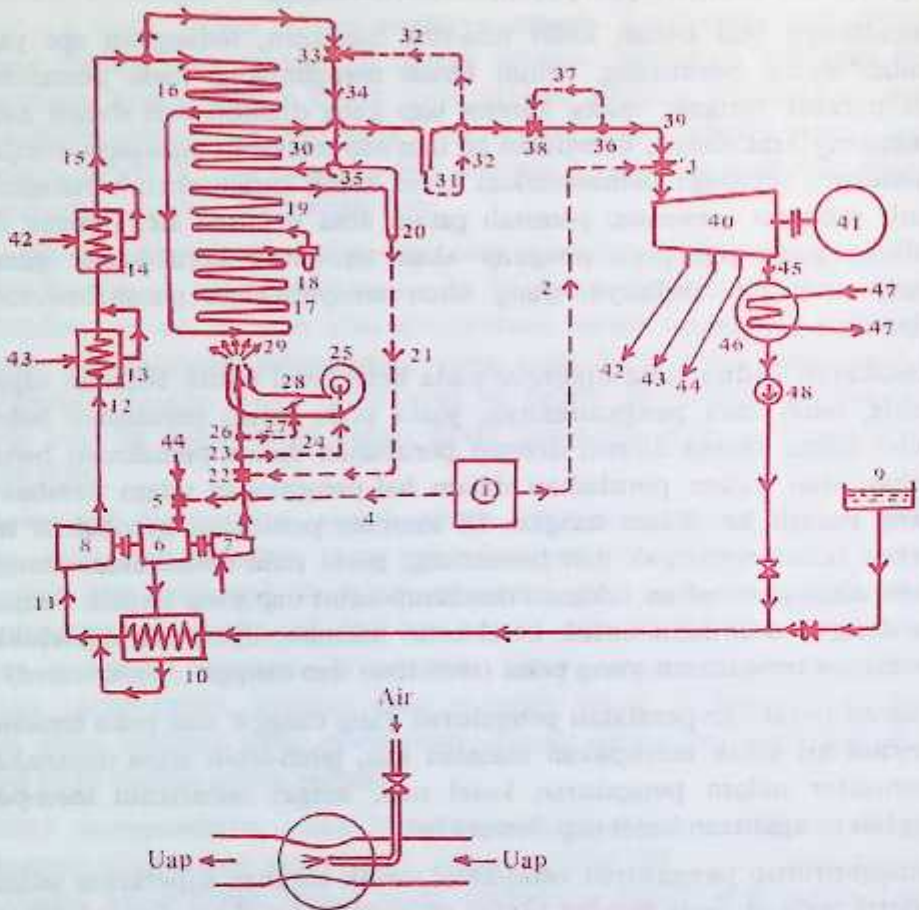
Namun peralatan-peralatan pengaturan yang canggih dan peka tersebut dewasa ini tidak merupakan masalah lagi, lebih-lebih sejak digunakan komputer dalam pengaturan ketel uap, sangat membantu mempermudah pengaturan ketel uap dewasa ini.

Prinsip-prinsip pengaturan ketel-ketel untuk tekanan superkritis adalah seperti terlihat pada **gambar skema pengaturan ketel-ketel untuk tekanan superkritis**. Lihat Gambar Skema.

Pengaturan beban ketel dilakukan dengan cara membuka atau menutup keran uap utama (3) (*Main Steam Valve* atau *Throttle valve*) dengan pengaturan jarak jauh (2) yang dilakukan dari meja kontrol (1) (*Control Desk*) yang ada di ruang kontrol (*Control room*). Serempak dengan itu, keran uap (5) yang masuk ke turbin uap pembantu juga terbuka atau tertutup yang dikendalikan dari jarak jauh (4) dari meja kontrol (1).

Perubahan membukanya keran uap (5) yang masuk ke Turbin uap pembantu menyebabkan perubahan kecepatan pada poros turbin uap yang menggerakkan pompa bahan bakar (7) dan pompa air pengisian ketel (8) (*Feed Water Pump = FWP*). Dengan demikian secara serempak akan terjadi perubahan banyaknya bahan bakar yang masuk ke Burner (29) dan banyaknya air pengisian yang masuk ke ekonomiser (11); (12) dan (15).

Gambar Skema Pengaturan Ketel Benson dan Ketel Sulzer



KETERANGAN GAMBAR:

- 1 = Papan Pengendali = (Control Desk.)
- 2 = Pengaturan jarak jauh untuk pembukaan Kran Utama yang masuk ke Turbin Uap.
- 3 = Kran Uap Utama = Main Steam Valve = Throttle Valve.
- 4 = Pengaturan jarak jauh untuk pembukaan kran uap yang masuk ke Turbin Pembantu (Auxilliary Turbine)
- 5 = Kran Uap yang masuk ke Turbin Pembantu (Auxilliary Turbin)
- 6 = Turbin Pembantu = Auxilliary Turbine untuk menggerakkan Pompa Bahan Bakar (7) dan Pompa Air pengisian ketel (8).
- 7 = Pompa bahan bakar = Fuel pump.
- 8 = Pompa air pengisian ketel = Boiler Feed Water Pump = BFWP.
- 9 = Tangki air persediaan = Reservoir.
- 10 = Heat Exchanger-I

- 11 = Air panas masuk ke pompa air pengisian ketel.
- 12 = Air panas menuju ke Heat Exchanger-II
- 13 = *Heat Exchanger-II*
- 14 = *Heat Exchanger-III*
- 15 = Air panas menuju ke Ekonomiser.
- 16 = Ekonomiser
- 17 = Penguap = *Evaporator*.
- 18 = Pemisah garam dan pemisah air.
- 19 = Superheater -I
- 20 = Thermostat atau Thermocouple sebagai peraba perubahan temperatur atau *Temperatur impuls detector*
- 21 = Alir pengaturan arus bahan bakar = *Fuel flow control line*.
- 22 = Kran bahan bakar.
- 23 = Membrane valve sebagai peraba perubahan arus bahan bakar = *Fuel flow impuls detector*.
- 24 = Air pengaturan putaran Fan Tekan.
- 25 = Motor Fan Tekan.
- 26 = Membrane valve sebagai peraba perubahan arus bahan bakar = *Fuel flow impuls detector*.
- 27 = Alir pengaturan arus udara pembakar.
- 28 = Klep pengatur jumlah arus udara pembakar.
- 29 = Pembakar = *Burner*.
- 30 = Superheater-II
- 31 = Thermostat atau Thermocouple sebagai peraba perubahan temperatur uap = *Temperature impuls detector*.
- 32 = Alir penyemprotan air.
- 33 = Kran air untuk penyemprotan air.
- 34 = Air penyemprot untuk mengatur suhu uap.
- 35 = Pengatur suhu uap = *Steam attemperator*.
- 36 = Membrane valve sebagai peraba perubahan tekanan uap = *Steam Pressure impuls detector*.
- 37 = Alir pengatur tekanan uap.
- 38 = Kran pengaturan tekanan uap.
- 39 = Uap menuju ke Turbin Uap.
- 40 = Turbin uap.
- 41 = Generator listrik atau propeller untuk propulsi kapal.
- 42 = Sadapan uap pertama yang menuju *Heat Exchanger-III*
- 43 = Sadapan uap kedua yang menuju *Heat Exchanger-II*
- 44 = Sadapan uap ketiga yang menuju ke Turbin Pembantu dan *Heat Exchanger I*.
- 45 = Uap bekas masuk ke *Kondensor*.
- 46 = Kondensor
- 47 = Air pendingin kondensor.
- 48 = Pompa air Kondensat.

Perubahan banyaknya arus bahan bakar yang masuk ke burner dideteksi oleh *Fuel flow impuls detector* (23) untuk pengaturan (24) kecepatan putar Motor Fan Tekan (25). Demikian pula arus bahan bakar masih dideteksi oleh *Fuel flow impuls detector* (26) untuk pengaturan (27) pembukaan klep udara (28) agar jumlah udara yang masuk ke burner senantiasa berimbang dengan jumlah bahan bakar yang masuk ke burner pada setiap perubahan beban ketel. Dengan demikian perbandingan jumlah udara terhadap jumlah bahan bakar senantiasa konstan pada berbagai perubahan beban ketel.

Temperatur uap setelah ke luar dari *Superheater I* mungkin saja naik atau turun pada saat terjadinya perubahan beban yang terasa oleh Thermostat (20). Thermostat (20) yang mendeteksi perubahan-perubahan temperatur uap digunakan untuk kontrol terhadap pengaturan (21) aliran bahan bakar dengan mengurangi atau menambah pembukaan keran bahan bakar (22).

Pengaturan suhu uap yang sebenarnya dilakukan sebagai berikut: Perubahan temperatur uap pada setiap perubahan beban ketel akan terasa atau dideteksi oleh Thermostat (31) yang akan mengatur (32) pembukaan keran air (33) untuk menyemprotkan air pada pengatur suhu uap (35). Banyak sedikitnya air yang disemprotkan pada aliran uap di dalam pengatur suhu uap (35) yang akan mengatur suhu uap yang ke luar dari ketel sebelum masuk ke Turbin uap, sehingga temperaturnya tetap konstan $T^{\circ}K$.

Tekanan uap yang mungkin berubah pada saat terjadi perubahan beban akan teraba atau dideteksi oleh membrane manometer (36) dan setelah diperbesar daya pengaturannya akan mengatur (37) pembukaan keran uap (38). Dengan demikian uap sebelum masuk ke Turbin uap tekanannya senantiasa konstan $p^* N/mm^2$.

30.4. Ketel Loffler atau Steam Circulating Boiler

Di dalam ketel ini hanya bersirkulasi uap saja. Penguapan berlangsung pada drum penguap yang ditempatkan di luar ketel atau di luar aliran api/gas asap.

Lihat Gambar **Skema Ketel Loffler**

Di dalam ketel, uap sejumlah S_c ton/jam dipanaskan lanjut dengan jalan mensirkulasikannya pada Superheater konveksi (17) dan Superheater pancaran (18) dan terkumpul di dalam header uap yang dipanaskan lanjut (19). Dari Header uap yang dipanaskan lanjut (19) tersebut, uap

menuju (20) ke pembagi uap (21) yang dibagi: Sebagian (23) sebanyak St ton/jam menuju ke Turbin uap (25) untuk memutar Generator listrik (26), dan sebagian lagi (22) sebanyak (Sc-St) tpn/jam menuju drum penguap (14).

Air sebanyak Gw ton/jam dari Reservoir (9) atau air dari kondensor (31) dipompa masuk oleh pompa air pengisian (11) menuju ke Ekonomiser (12). Air yang telah panas, yang ke luar (13) dari Ekonomiser, masuk ke Drum penguap (14). Air yang masuk (13) sebanyak Gw ton/jam ke dalam drum penguap (14) diuapkan oleh yang dipanaskan lanjut (22) yang datang dari Pembagi uap (21).

Uap kenyang yang terbentuk (15) sebanyak Sc/jam disirkulasikan oleh pompa sirkulasi uap (16) menuju ke Superheater Konveksi (17) dan Superheater Pancaran (18) menjadi uap yang dipanaskan lanjut yang terkumpul di Header uap yang dipanaskan (19). Demikian selanjutnya.

KETERANGAN GAMBAR SKEMA KETEL LOFFLER:

- 1 = Fan Tekan = *Forced Draught Fan* = FDP.
- 2 = Pemanas udara = *Air Pre-heater*.
- 3 = Saluran udara panas = *Hot Air duct*.
- 4 = Pembakar = *Burner*.
- 5 = Supply bahan bakar.
- 6 = Tungku.
- 7 = Fan Isap = *Induced Draught Fan* = IDF.
- 8 = Cerobong asap.
- 9 = *Reservoir air* = Tangki air reserve.
- 10 = Keran air.
- 11 = Pompa Air Pengisian Ketel = *Boiler Feed Water Pump* = BFWP.
- 12 = Ekonomiser.
- 13 = Air panas masuk ke Drum Penguap sebanyak Gw ton/jam.
- 14 = Drum Penguap = *Evaporating Drum*.
- 15 = Uap kenyang sebanyak Sc ton/jam menuju Superheater.
- 16 = Pompa sirkulasi uap = *Steam Circulating pump*.
- 17 = Superheated Konveksi.
- 18 = Superheated Pancaran.
- 19 = Header Uap yang dipanaskan lanjut.
- 20 = Uap yang dipanaskan lanjut sebanyak Sc ton/jam menuju ke Pembagi uap.
- 21 = Pembagi uap.
- 22 = Uap yang dipanaskan lanjut sebanyak (Sc - St) menuju ke Drum Penguap.
- 23 = Uap yang dipanaskan lanjut sebanyak St ton/jam menuju Turbin.
- 24 = Keran Uap utama = *Main Steam Valve* = *Throttle Valve*.
- 25 = Turbin Uap.
- 26 = Generator listrik atau Propeller untuk propulsi kapal.
- 27 = Uap bekas menuju ke Kondensor.
- 28 = Kondensor.
- 29 = Air pendingin kondensor.
- 30 = Pompa air kondensat.
- 31 = Air dari Kondensor kembali ke Ekonomiser.
- 32 = Lumpur menuju ke Pengendap lumpur.
- 33 = Pengendap Lumpur.
- 34 = Pompa pengembalian air ke Drum Penguap.
- 35 = Air kembali ke Drum Penguap.
- 36 = Keran Pembuang Lumpur.

Persamaan Panas pada Drum Penguap:

$$\begin{aligned}
 & \text{Panas yang masuk} = \text{Panas yang ke luar} \\
 & (Sc - St) \times i + Gw \times W = Sc \times i'' \\
 Gw = St \rightarrow & (Sc - St) \times i' + St \times W = Sc \times i'' \\
 & (Sc \times i' - Sc \times i'') = St \times i' - St \times W \\
 & (Sc \times (i' - i'')) = St \times (i' - W)
 \end{aligned}$$

$$\frac{Sc}{St} = \frac{i' - W}{i' - i''}$$

atau

$$\frac{St}{Sc} = \frac{i' - i''}{i' - W}$$

Uap yang masuk dan ke luar dari Turbin uap sebanyak St ton/jam, sedangkan air yang masuk ke Ekonomiser terus menuju Drum penguap sebanyak Gw ton/jam yang sama banyak dengan St ton/jam, atau $Gw = St$.

Uap yang dipanaskan lanjut yang masuk ke Drum penguap sebanyak $(Sc - St)$ ton/jam dengan entalpi uap yang dipanaskan lanjut sebesar i' KJ/kg. Air yang masuk ke Drum penguap sebanyak Gw ton/jam atau St ton/jam dengan entalpi W KJ/kg. Uap kenyang yang ke luar dari Drum penguap sebanyak Sc t/j, dengan entalpi uap kenyang i'' KJ/kg.

Dengan demikian terdapat persamaan panas pada Drum penguap.

$$\begin{aligned}
 & \text{Panas yang masuk} = \text{Panas yang ke luar} \\
 & (Sc - St) \times i' + Gw \times W = Sc \times i'' \\
 Gw = St \rightarrow & (Sc - St) \times i + St \times W = Sc \times i'' \\
 & Sc \times i' - Sc \times i'' = St \times i' - St \times W \\
 & Sc \times (i' - i'') = St \times (i' - W)
 \end{aligned}$$

$$\frac{Sc}{St} = \frac{i' - W}{i' - i''}$$

atau

$$\frac{St}{Sc} = \frac{i' - i''}{i' - W}$$

Karena drum penguap ditempatkan di luar ketel atau di luar aliran api/gas asap, maka garam-garam yang tidak berbahaya ataupun lumpur yang larut di dalam air pengisian akan tertinggal di dalam drum penguap, dan makin lama makin banyak, dan dapat dibuang atau diendapkan di dalam pengendap lumpur (33), yang dalam waktu-waktu tertentu garam-garam dan lumpur tersebut dibuang lewat kran pembuang lumpur (36).

Dengan demikian air yang kurang bersih pun atau yang agak keruh masih dapat digunakan dalam ketel ini tanpa menimbulkan kesukaran yang berarti, karena kerak ketel yang terbentuk pada dinding drum penguap tidak membahayakan ketel bahkan justru akan menambah daya isolasi panas terhadap drum penguap, sehingga kerugian pancaran panas oleh drum penguap dapat diperkecil/dikurangi. Sehingga dengan demikian ketel ini dapat menggunakan air pengisian yang persyaratannya kurang begitu ketat atau agak ringan.

Salah satu keberatan dari Ketel Loffler ini ialah uap yang bersirkulasi di dalam ketel Sc sekitar tiga kali jumlah uap yang dibutuhkan untuk menggerakkan Turbin (St), yaitu kira-kira $Sc = 3 \times St$.

Sehingga ukuran-ukuran dan jumlah pipa-pipa Superheater harus besar-besar, sehingga ketel ini menjadi mahal karenanya. Namun demikian ketel ini sangat fleksibel, baik pada beban rendah maupun pada beban tinggi, efisiensi thermisnya tidak banyak berbeda, dibandingkan dengan ketel-ketel yang lain.

Ketel Loffler digunakan untuk tekanan di atas 130 kg/cm^2 atau 13 N/mm^2 dan temperatur uap di atas 520°C .

30.5. Ketel Velox Dengan Tungku Bertekanan Tinggi

Ketel Velox ini tungku apinya diberi bertekanan sekitar 3,5 hingga 6 kg/cm^2 atau 0,35 hingga $0,6 \text{ N/mm}^2$ tekanan melebihi tekanan udara di luar.

Api di dalam tungku dengan tekanan melebihi tekanan udara di luar yang demikian besar, kerapatan apinya (ρ) menjadi demikian besar pula sehingga angka perpindahan panas (k) secara konveksi menjadi demikian besar pula.

Demikian pula karena kecepatan api dan gas asap, baik di dalam tungku maupun di daerah konveksi demikian besar, sekitar 200 meter/detik di dalam tungku, dan 100 meter/detik saat ke luar dari superheater, maka makin memperbesar harga angka perpindahan panasnya (k) dari api kepada air atau uap di balik dinding pipa-pipa.

Angka penyerahan panas di daerah pancaran dapat mencapai sekitar $840.000 - 1.250.000 \text{ KJ/m}^2.\text{jam}.\text{}^\circ\text{C}$ dari bidang yang dipanaskan, yang berarti sekitar 420 hingga 620 kali lebih besar dibandingkan dengan ketel-ketel yang lain.

Mendapatkan tekanan tungku yang demikian besar, sekitar 3,5 hingga 6 kg/cm² atau 0,35 hingga 0,6 N/mm² tekanan melebihi tekanan udara di luar, adalah dengan jalan mengkompresikan udara luar yang dibutuhkan untuk pembakaran dengan menggunakan sebuah kompresor udara yang besar.

Lokasi	Kecepatan gas asap m/detik	Ketel dengan Tungku yang bertekanan 1,2 – 1,8 kg/cm ² overpressure k (KJ/m ² .j. ^o C)	Ketel Velox dengan tungku Tungku bertekanan tinggi 3,5 – 6 kg/cm ² overpressure k (KJ/m ² .j. ^o C)
Dalam Tungku	160 – 220	12.000 – 14.000	840.000 – 1.250.000
di Sup. I/ Sup. Rad	150 – 220	1.000 – 1.400	80.000 – 100.000
di Sup. II/ Sup. Konv. Reheater	100 – 180	650 – 1.100	55.000 – 78.000
Pada EKO · II	80 – 160	7.500 – 12.000	150.000 – 250.000

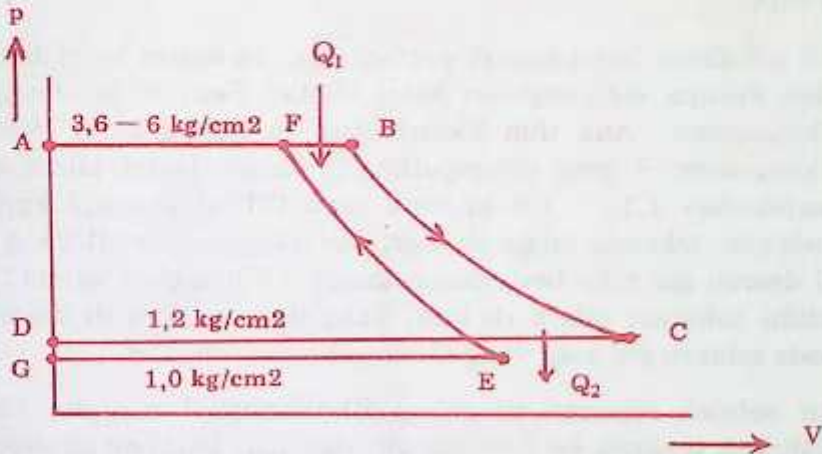
Pada waktu *Start-firing* yaitu saat menyalakan ketel untuk pertama kali, kompresor udara tersebut digerakkan oleh motor listrik untuk strat yang melalui sebuah kopleng elektro-magnetik, memutar kompresor tersebut.

Udara tidak perlu dipanaskan dalam pemanas udara, karena dengan di-kompresikan di dalam kompresor, temperaturnya akan naik sendiri dan dapat mencapai sekitar 200°C hingga 300°C.

Setelah api di dalam tungku menyala, karena telah diberikan supply bahan bakar, maka kecepatan api atau gas asap menjadi bertambah, menjadi sedemikian besar hingga dapat mencapai 220 meter/detik, bahkan kadang-kadang lebih, sehingga setelah ke luar dari daerah konveksi, yaitu setelah digunakan untuk memanaskan Superheater I, Superheater II dan reaheater kecepatannya masih dapat mencapai 160 m/det. atau lebih, dan tekanannya masih sekitar 3,4 hingga 5,8 kg/cm² atau 0,34 hingga 0,58 N/mm², sehingga mampu untuk menggerakkan Turbin Gas.

Turbin gas ini kemampuannya demikian besar dan dapat digunakan untuk menggerakkan secara langsung Kompresor udara. Bila Turbin

gas telah mampu sendiri untuk menggerakkan Kompresor udara, maka kopling elektro-magnetik dilepas, sehingga motor listrik untuk start-up dapat dimatikan.



Gambar diagram $p - V$ teoretis Gas Turbin/Kompresor

A-B-C-D-A = Kerja yang dilakukan oleh Turbin Gas

E-F-A-G-E = Kerja yang dibutuhkan oleh Kompresor udara

Luas A-B-C-D-A sama atau lebih besar dari luar E-F-A-G-E

Karena perpindahan panas dari api ke Air atau Uap di balik dinding pipa-pipa sedemikian besar, maka dengan sendirinya untuk produksi uap tertentu, S ton/jam, Luas Bidang yang di-Panaskan (LBP) atau Heating Surface menjadi kecil sekali, akibatnya ukuran-ukuran atau dimensi ketel menjadi demikian kecil.

Sehingga untuk sebuah ketel Velox dengan kapasitas 50 ton/jam hanya membutuhkan luas lantai tindak lebih dari 6 m x 7,5 m dan tinggi keseluruhannya tidak lebih dari 9,5 meter. Lihat Gambar Ketel Velox.

Ketel Velox dibuat untuk kapasitas antara 30 hingga 100 ton uap/jam, dengan tekanan uap sekitar 40 hingga 75 kg/cm² atau 4,0 hingga 7,5 N/mm², dengan temperatur uap mencapai 530°C. Efisiensi Thermisnya demikian tinggi, di atas 90%. Beban ketel dapat demikian tinggi hingga mencapai 640 kg uap per jam per m² Luas Bidang yang dipanaskan.

Karena tungku bertekanan tinggi sampai mencapai Turbin Gas, maka dinding-dinding tungku/ketel hingga masuk ke Turbin Gas harus **kedap udara** agar api tidak menyembur ke luar yang dapat membahayakan sekitarnya.

Dengan demikian di samping pipa-pipa antara yang satu dengan yang lain harus kedap udara dengan cara mengelasnya dengan pelat-pelat penghubung atau sayap-sayap di antara pipa-pipa. Dinding pipa-pipa bersayap semacam ini yang disebut Dinding Membran atau *Membrane Walling*.

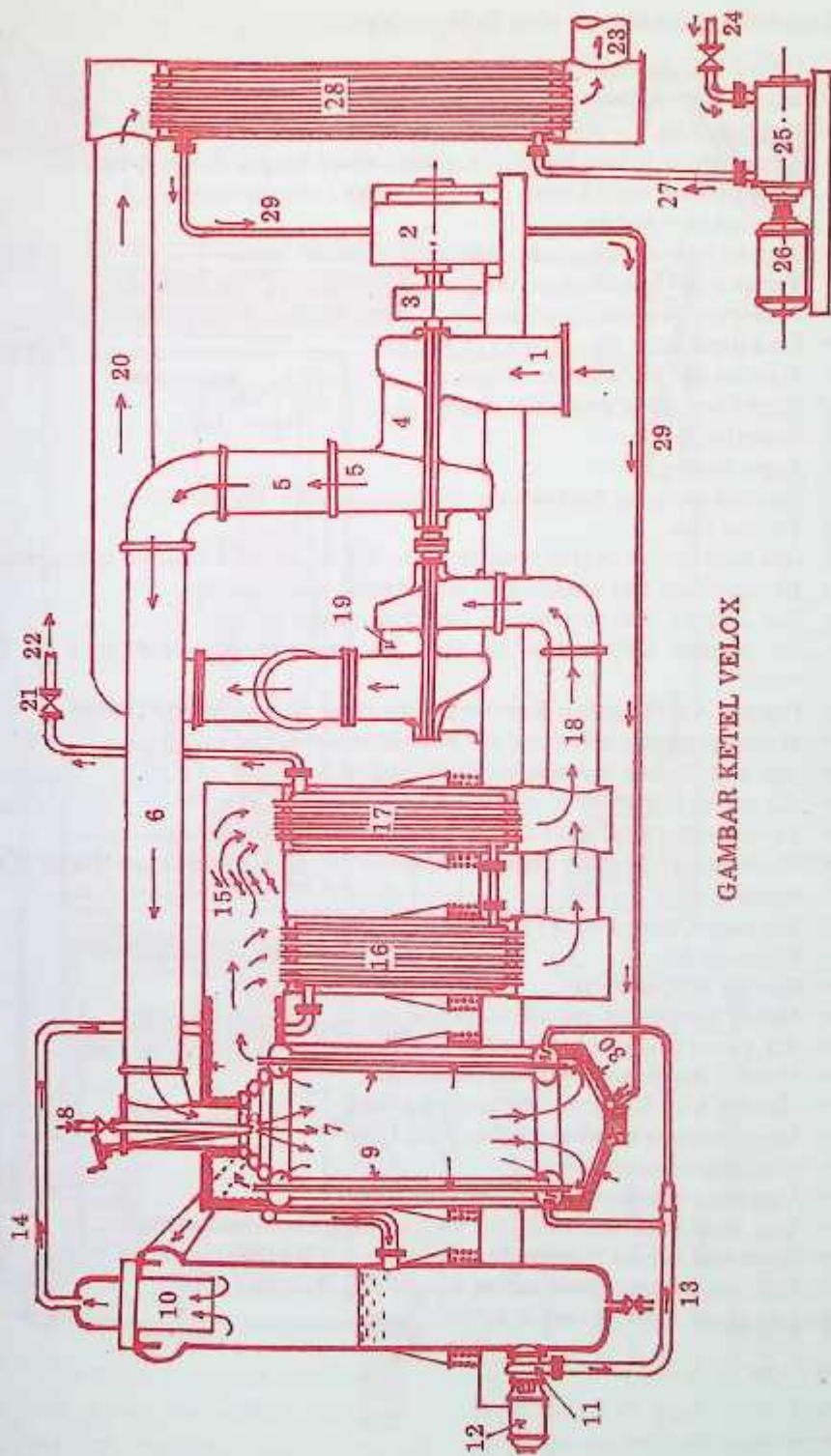
Air pengisian ketel masuk pertama kali ke dalam ketel dengan dipompa oleh Pompa air pengisian ketel (*Boiler Feed Water Pump*) masuk ke Ekonomiser. Ada dua Ekonomiser di dalam ketel Velox ini, yaitu Ekonomiser—I yang ditempatkan di dalam daerah aliran gas asap yang bertekanan 1,1 – 1,2 kg/cm² atau 0,1 hingga 0,2 kg/cm² tekanan melebihi tekanan udara di luar, dan Ekonomiser—II yang ditempatkan di daerah gas asap bertekanan tinggi 3,5 hingga 6 kg/cm² tekanan melebihi tekanan udara di luar, yang ditempatkan di dasar tungku dan pada saluran gas asap yang menuju ke Superheater.

Air setelah dipanasi di dalam Ekonomiser-I maupun Ekonomiser-II, dialirkan menuju ke Pemisah air, dan dari Pemisah air dipompa dengan pompa sirkulasi, masuk ke Header air bawah yang berupa tabung berbentuk torus yang ada di dasar tungku. Di bagian atas dari tungku terdapat pula Header Uap kenyang yang berupa tabung berbentuk torus juga. Antara kedua Header, Header air di bawah, dan Header uap kenyang, yang sama-sama berupa tabung berbentuk torus, dihubungkan dengan pipa-pipa penguap air, yang di dalamnya terdapat pipa-pipa api. Sehingga pipa-pipa api dan pipa-pipa penguap air tersebut saling konsentrasi letaknya, yang satu di dalam yang lain.

Pipa-pipa api yang terletak di dalam pipa-pipa penguap air tersebut menembus torus bawah dan torus atas. Sedangkan pipa-pipa penguap air hanya bermuara pada kedua header yang berbentuk torus tersebut.

Bahan bakar dan udara panas yang bertekanan tinggi sekitar 3,5 hingga 6 kg/cm² overpressure tersebut dihembuskan lewat Pembakar atau Burner yang ada di puncak tungku ke bawah, dan memanasi atau menguapkan air yang ada di dalam pipa-pipa penguap dari sebelah luar dinding pipa-pipa penguap yang terletak di dalam tungku. Setelah api mencapai dasar tungku maka api tersebut memasuki pipa-pipa api yang terletak di dalam pipa-pipa penguap air, sehingga api memanasi atau menguap lewat dinding-dinding pipa-pipa api.

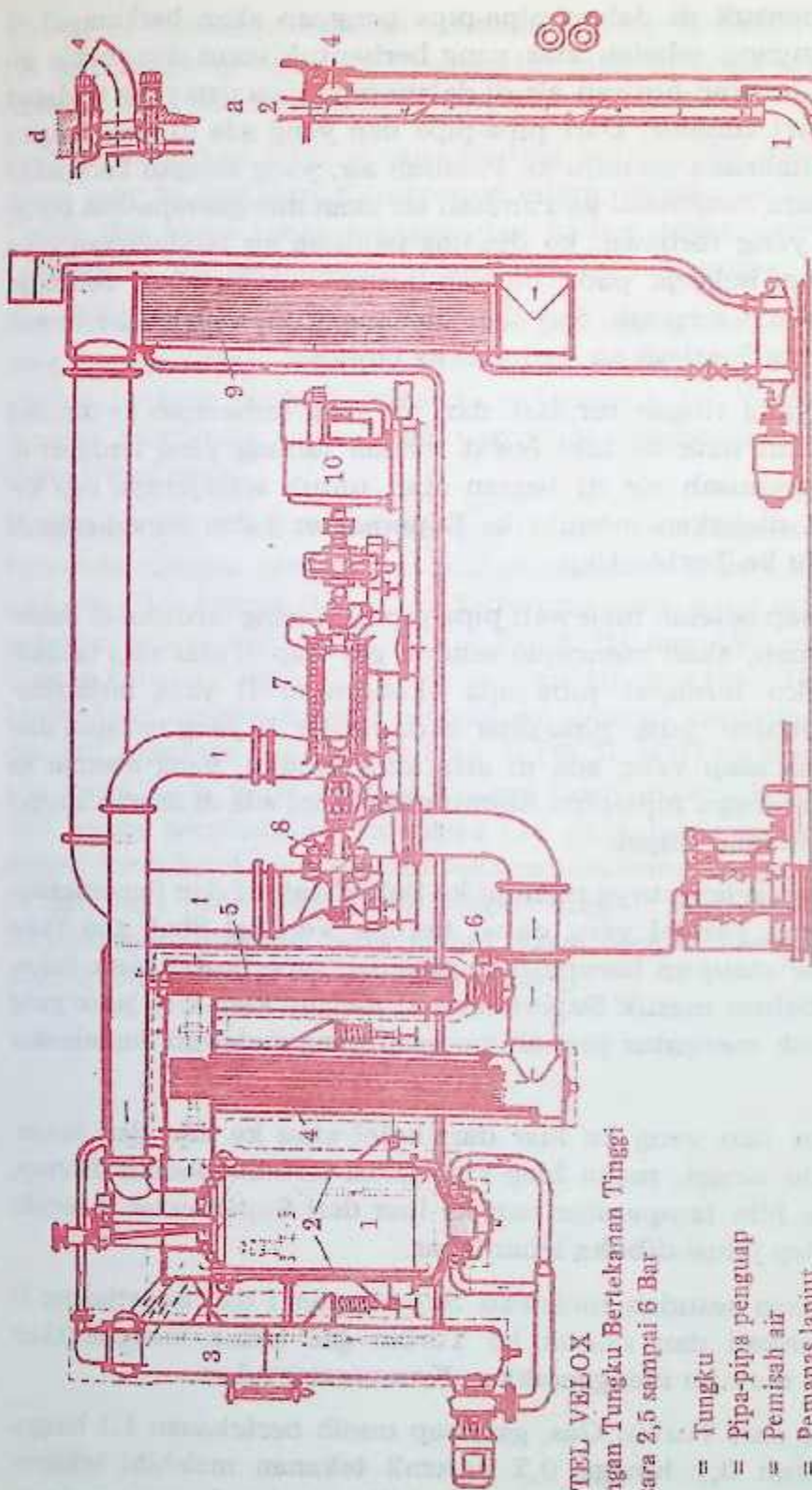
Dengan demikian air atau uap di dalam pipa-pipa penguap dari sebelah luar dipanasi oleh api yang ada di dalam tungku, sedangkan di sebelah dalam dipanasi oleh api yang lewat dalam pipa-pipa api.



GAMBAR KETEL VELOX

KETERANGAN GAMBAR KETEL VELOX:

- 1 = Udara luar masuk ke Kompresor Udara.
- 2 = Motor Listrik untuk Start-Up.
- 3 = Kopling Elektro-magnetik.
- 4 = Kompresor Udara mengkompresi udara hingga 3,5 – 6 kg/cm².
- 5 = Udara panas bertekanan 3,5 – 6 kg/cm² overpressure.
- 6 = Pembakar = *Burner*.
- 7 = Supply bahan bakar, gas alam atau minyak bakar.
- 8 = Tungku api bertekanan tinggi, 3,5 – 6 kg/cm² overpressure.
- 9 = Pipa-pipa penguap pancaran = *Radian Evaporator's pipes*.
- 10 = Pipa-pipa api = *Fire pipes*.
- 11 = Saluran gas bertekanan tinggi 3,5 – 6 kg/cm² overpressure.
- 12 = Klep-klep jalusi pengatur temperatur uap.
- 13 = Superheater I.
- 14 = Superheater II.
- 15 = Saluran gas asap bertekanan tinggi masuk ke Turbin Gas.
- 16 = Turbin Gas.
- 17 = Gas asap bekas bertekanan rendah, 0,1 hingga 0,2 kg/cm² overpressure.
- 18 = Ekonomiser I di daerah Gas asap bertekanan rendah.
- 19 = Gas asap ke luar menuju ke Cerobong asap.
- 20 = Air dingin dari Tangki air atau Reservoir masuk ke Pompa Air Pengisian ketel.
- 21 = Pompa Air Pengisian Ketel = *Boiler Feed Water Pump = BFWP*.
- 22 = Motor penggerak Pompa Air pengisian ketel.
- 23 = Air bertekanan menuju ke Ekonomiser I.
- 24 = Air panas bertekanan menuju ke Ekonomiser II.
- 25 = Ekonomiser II di daerah Api/gas asap bertekanan tinggi.
- 26 = Ekonomiser II yang terletak di aliran gas asap bertekanan tinggi, di atas atap tungku.
- 27 = Air panas masuk ke Pemisah Air.
- 28 = Pemisah Air.
- 29 = Pompa Sirkulasi Air.
- 29A = Motor penggerak pompa sirkulasi air.
- 30 = Air panas menuju ke Header Air Bawah.
- 31 = Header Air Bawah berbentuk torus.
- 32 = Header Uap Kenyang berbentuk torus.
- 33 = Uap kenyang menuju ke Pemisah Uap.
- 34 = Pemisah Air dari Uap.
- 35 = Uap kenyang menuju ke Superheater I.
- 36 = Uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari Superheater II.
- 37 = Kran uap utama = *Main Steam Valve = Throttle Valve*.
- 38 = Uap yang dipanaskan lanjut menuju ke Turbin Uap.
- 39 = Landasan Ketel Velox = *Boiler Frame*.



KETEL VELOX

Dengan Tungku Bertekanan Tinggi
Antara 2,5 sampai 6 Bar

- 1 = Tungku
- 2 = Pipa-pipa penguap
- 3 = Pemisah air
- 4 = Pemanas lajujut
- 5 = Penguap untuk pengaturan suhu uap
- 6 = Kran pengatur 5
- 7 = Kompresor
- 8 = Turbin gas
- 9 = Ekonomiser
- 10 = Motor listrik untuk start

- 1 = Gas asap masuk
- 2 = Gas asap keluar
- 3 = Air masuk
- 4 = Air dan uap ke luar

PIPA PENGUAP
Pada Ketel Velox

Uap yang terbentuk di dalam pipa-pipa penguap akan berkumpul di header uap kenyang sebelah atas yang berbentuk torus dan makin dikeringkan dari butiran-butiran air di dalam pipa-pipa uap yang terdapat sebagai atap dari tungku. Dari pipa-pipa uap yang ada di atap tungku tersebut, uap dialirkan menuju ke Pemisah air, yang dengan kecepatan uap masuk secara *tangensial* ke Pemisah air akan menghempaskan butiran-butiran air yang terbawa, ke dinding pemisah air berdasarkan gaya sentrifugal yang bekerja pada butiran-butiran air tersebut. Sehingga butiran-butiran air terpisah dari uap dan mengalir meleleh ke bawah sepanjang dinding Pemisah air dari atas ke bawah.

Uap kenyang yang ringan terpisah dari air yang terhempas ke dinding pemisah air, akan naik ke atas lewat sebuah tabung yang terdapat di tengah-tengah pemisah air di bagian atas, untuk selanjutnya uap kenyang tersebut dialirkan menuju ke Superheater I dan Superheater II sebelum menuju ke Turbin Uap.

Api atau gas asap setelah melewati pipa-pipa api yang terdapat di dalam pipa-pipa penguap, akan mencapai saluran gas asap di atas atap tungku. Di dasar tungku terdapat pipa-pipa ekonomiser II yang melingkarlingkar dan terdapat pula pipa-pipa ekonomiser II yang melapisi dinding saluran gas asap yang ada di atas atap tungku, yang menuju ke Superheater. Sehingga pipa-pipa Ekonomiser II ini ada di daerah api/gas asap yang bertekanan tinggi.

Api atau gas asap selanjutnya menuju ke Superheater I dan Superheater II yang dipasang paralel yang dapat berupa Vertikal Shell and Tube Heat Exchanger ataupun berupa pipa-pipa uap superheater biasa. Saluran gas asap sebelum masuk Superheater II melalui klep-klep jalusi yang digunakan untuk mengatur jumlah gas asap yang melewati Superheater II.

Bila temperatur uap yang ke luar dari ketel atau ke luar dari Superheater II terlalu tinggi, maka klep-klep jalusi tersebut sedikit ditutup, dan sebaliknya bila temperatur uap ke luar dari Superheater II terlalu rendah, klep-klep jalusi dibuka lebar-lebar.

Api atau gas asap sesudah melewati Superheater I dan Superheater II berkumpul kembali dan masuk ke Turbin gas untuk menggerakkan Turbin gas agar mampu menggerakkan Kompresor udara.

Setelah ke luar dari Turbin Gas, gas asap masih bertekanan 1,1 hingga 1,2 kg/cm², atau 0,1 hingga 0,2 kg/cm² tekanan melebihi tekanan udara di luar (*overpressure*), akan melalui Ekonomiser I yang memanaskan

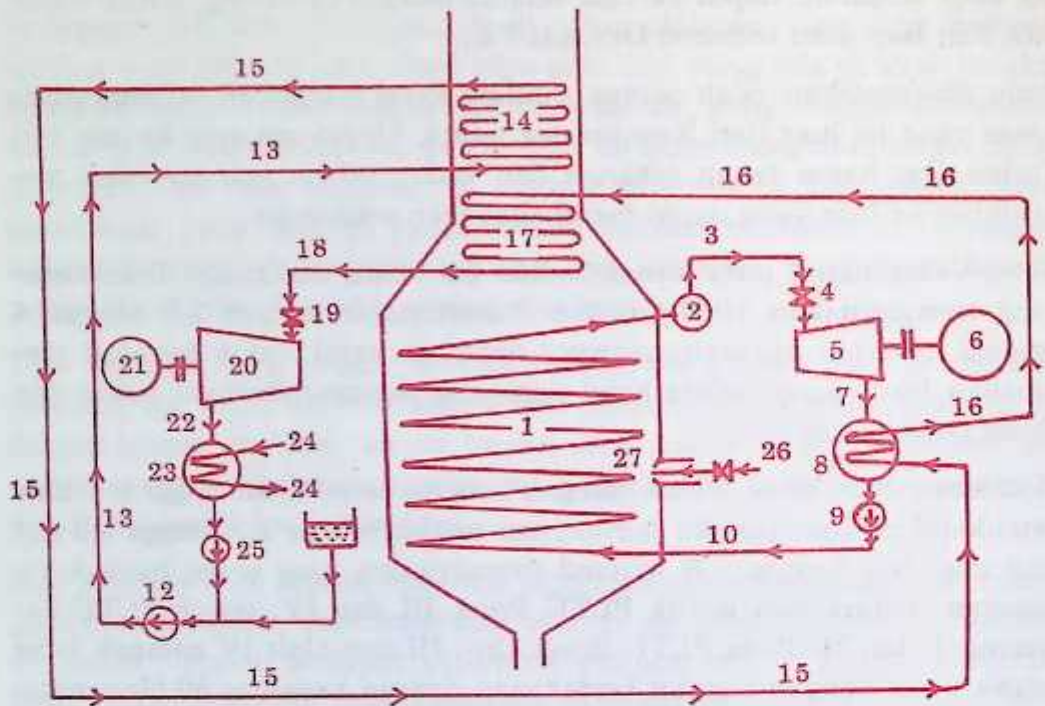
kan air di dalamnya. Setelah memanaskan air di dalam Ekonomiser I, gas asap langsung dapat ke luar sendiri melalui cerobong, tanpa diisap oleh Fan Isap atau Induced Draught Fan.

Perlu diperhatikan ialah semua dinding ketel mulai dari saluran udara panas yang ke luar dari Kompresor udara, hingga gas asap ke luar dari Turbin Gas harus tahan tekanan dan kedap udara, agar api tidak menyembur ke luar yang dapat membahayakan sekitarnya.

Ketel Velox dapat pula menggunakan gas buang dari mesin diesel besar yang menggunakan High-pressure Supercharger sampai 2,5 hingga 4 kg/cm² tekanan superchargernya. Sehingga ketel Velox tersebut merupakan kombinasi antara ketel uap yang menggunakan gas bekas dan Mesin Diesel besar.

Modifikasi dari ketel Velox dengan tungku bertekanan tinggi ini ialah ketel-ketel dengan tungku bertekanan rendah sekitar 1,2 hingga 1,8 kg/cm² atau 0,2 hingga 0,8 kg/cm² overpressure, yang mulai banyak digunakan, antara lain untuk PLTU Priok III dan IV; untuk PLTU Semarang I dan II. Pada PLTU Priok Unit III dan Unit IV nampak jelas bahwa ketel dengan tungku bertekanan dengan kapasitas 50 Megawatt, dua kali kapasitas Unit I atau Unit II (@ 25 MW) ukuran-ukurannya justru lebih kecil. Hal ini seperti telah dikemukakan, disebabkan oleh angka perpindahan panasnya (k) yang berlipat ganda dibanding dengan ketel-ketel yang tungku tekanannya sama dengan tekanan udara di luar. Juga pada ketel-ketel dengan tungku bertekanan agak rendah ini dinding-dindingnya harus kedap udara dengan menggunakan sistem dinding membran atau *membrane walling*.

30.6 Ketel Air Raksa atau Ketel Merkuri



Gambar Skema Ketel Air Raksa atau Ketel Merkuri

KETERANGAN GAMBAR SKEMA:

- 1 = Pipa-pipa penguap Air Raksa = *Mercury Evaporator*
- 2 = Drum Merkuri = *Mercury drum*
- 3 = Uap merkuri menuju Turbin Merkuri
- 4 = Throttle Valve untuk uap Merkuri
- 5 = Turbin Air Raksa = *Mercury Turbine*
- 6 = Generator Listrik
- 7 = Uap Merkuri bekas menuju Kondensor Merkuri atau Drum Penguap untuk air
- 8 = Kondensor Merkuri atau Drum Penguap Air
- 9 = Pompa Kondensat Merkuri
- 10 = Merkuri Cair menuju ke Penguap Merkuri
- 11 = Reservoir air = Tangki air
- 12 = Pompa Air pengisian
- 13 = Air dingin menuju Ekonomiser
- 14 = Ekonomiser
- 15 = Air panas menuju ke Drum Penguap atau Mercury Condenser
- 16 = Uap kenyang menuju ke Superheater
- 17 = Superheater
- 18 = Uap yang dipanaskan lanjut menuju ke Turbin Uap
- 19 = Throttle Valve untuk uap

- 20 = Turbin Uap
- 21 = Generator Listrik
- 22 = Uap bekas menuju ke Kondensor
- 23 = Kondensor
- 24 = Air pendingin kondensor
- 25 = Pompa air kondensat
- 26 = Supply bahan bakar
- 27 = Pembakar = *Burner*

Lihat Gambar Skema Ketel Air/Ketel Merkuri

Di sekeliling tungku terdapat pipa-pipa penguap air raksa, air raksa diuapkan pada tekanan sekitar 7 sampai 10 kg/cm² atau 0,7 hingga 1,0 N/mm² pada temperatur antara 440° C hingga 525° C.

Uap air raksa (uap Merkuri) yang ke luar dari drum air raksa akan memutarakan Turbin Air Raksa (Merkuri Turbin) untuk menggerakkan Generator Listrik yang menghasilkan daya sekitar 10.000 hingga 15.000 KW. Uap Merkuri bekas, yang ke luar dari Turbin Merkuri masuk ke kondensor Merkuri, tempat air dipompakan masuk ke dalam kondensor Merkuri tersebut.

Uap Merkuri akan mengembun menjadi Merkuri Cair, sedangkan air yang dipompakan masuk sebagai pendingin kondensor Merkuri, akan menguap menjadi uap kenyang yang menuju ke Superheater untuk dipanaskan lanjut. Superheater uap dipasang di daerah aliran gas asap. Uap yang ke luar dari Superheater berupa uap yang dipanaskan lanjut sebanyak sekitar 60 hingga 147 ton/jam, pada temperatur uap 360° C hingga 440° C dan dengan tekanan antara 19 kg/cm² hingga 41 kg/cm², yang menggerakkan Turbin Uap yang menghasilkan tenaga listrik dari Generator listrik yang digerakkannya sebesar 10.000 hingga 25.000 Kw. Sehingga daya total yang dihasilkan oleh kombinasi Turbin Merkuri dan Turbin Uap seluruhnya sekitar 20.000 hingga 40.000 KW.

BAB VII

BAGIAN-BAGIAN KETEL UAP

31. Pemanas Lanjut Uap atau Steam Superheater

Pemanas Lanjut Uap atau Superheater (Super = lebih, Heater = pemanas, Superheater = Pemanas Lebih lanjut) ialah alat untuk memanaskan Uap kenyang menjadi Uap yang dipanaskan lanjut.

Uap yang dipanaskan lanjut bila digunakan untuk melakukan kerja dengan jalan ekspansi di dalam turbin atau mesin uap tidak akan (segera) mengembun, sehingga mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya yang disebabkan terjadinya pukulan balik atau *Back Stroke* yang diakibatkan mengembunnya uap belum pada waktunya sehingga menimbulkan vakum di tempat yang tidak semestinya di daerah ekspansi.

Kemungkinan terjadinya **pukulan balik** atau **back stroke** di tempat yang belum semestinya tersebut lebih mudah terjadi bila yang digunakan ialah **Uap Kenyang** sebagai penggerak mesin uap ataupun turbin uap.

Ada beberapa macam pemanas lanjut yang kita kenal:

Dilihat dari lokasi penempatannya dibagi menjadi:

a. *Superheater konveksi*

Yang dilihat dari arus gas asap dan uap yang mengalir melewatinya, Superheater Konveksi dapat dibagi menjadi:

- a.1 Superheater Konveksi **arus searah**;
- a.2 Superheater Konveksi **arus berlawanan**;
- a.3 Superheater Konveksi **arus kombinasi**.

b. *Superheater Pancaran atau Radiant Superheater.*

c. *Superheater Kombinasi = Superheater + Superheater Pancaran.*

31.1. Superheater Konveksi

Superheater konveksi menerima panas secara **konveksi** dari api atau gas asap.

Panas yang diterima secara konveksi dari gas asap sebanyak

$$Q_k = G_{\text{gas}} \times P.J._{\text{gas}} \times (t_{\text{gas masuk}} - t_{\text{gas ke luar}}) \text{ [KJ/j]}$$

$$G_{\text{gas}} = \text{Jumlah gas asap yang lewat} \text{ [Kg/jam]}$$

$$P.J._{\text{gas}} = \text{Panas Jenis gas asap} \text{ [Kj/kg.}^\circ\text{C]}$$

$$t = \text{temperatur dalam } [^\circ\text{C}]$$

Panas jenis gas asap dalam hal ini harganya **konstan**.

Δt = temperatur gas masuk - temperatur gas ke luar = perbedaan temperatur antara gas asap saat masuk ke superheater konveksi dan saat ke luar dari superheater konveksi.

Δt ini harganya relatif konstan, apakah api di dalam tungku membesar ataupun berkurang.

Jumlah gas asap yang lewat (G_{gas}), tergantung dari jumlah bahan bakar yang dibakar (B_e). Makin banyak jumlah gas asap (G_{gas}) yang terbentuk dan melewati superheater konveksi tersebut, dan sebaliknya, makin berkurang bahan bakar yang dibakar (B_e) makin berkurang pula jumlah gas asap (G_{gas}) yang terbentuk.

Di samping itu, jumlah bahan bakar yang dibakar (B_e) **sebanding** dengan jumlah uap yang diproduksi oleh sebuah ketel (S). Makin banyak uap yang diproduksi (S), makin besar pula penggunaan bahan bakar (B_e) dan sebaliknya, makin berkurang produksi uap (S), makin berkurang pula penggunaan bahan bakarnya (B_e).

Karena G_{gas} sebanding dengan B_e dan B_e sebanding pula dengan S, maka G_{gas} sebanding pula dengan S.

Dengan demikian jumlah gas asap yang melewati superheater konveksi (G_{gas}) senantiasa sebanding dengan jumlah produksi uap (S).

Adapun panas yang diserap oleh uap sebanyak:

$$Q_s = S \times P.J._{\text{uap}} \times (t_{\text{uap keluar}} - t_{\text{uap kembang}})$$

$$S = \text{jumlah uap yang diproduksi oleh ketel} \text{ [kg/jam]}$$

$$P.J._{\text{uap}} = \text{Panas Jenis uap dalam [KJ/kg.}^\circ\text{C]}, \text{ yang dalam hal ini harganya konstan}$$

$$t_{\text{uap kembang}} = \text{temperatur uap kembang masuk ke superheater dalam } [^\circ\text{C}]. \text{ Untuk ketel dengan tekanan uap tertentu, temperatur uap kembangnya tertentu pula dan konstan.}$$

Dengan asumsi: tidak terjadi kehilangan panas, maka:

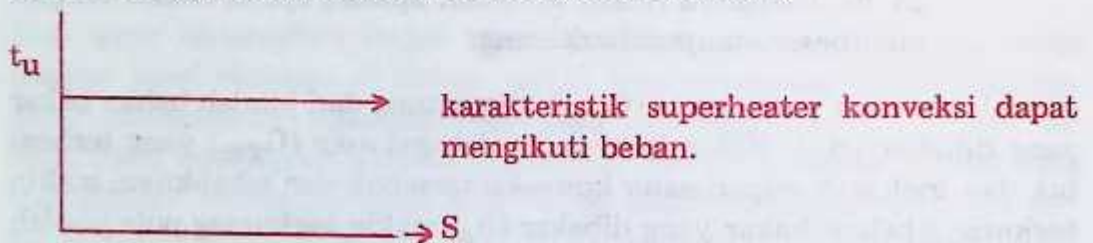
Panas yang diterima dari api = Panas yang diserap oleh uap

$$Q_k = Q_s$$

atau:

$$G_{\text{gas}} \times \underbrace{P.J.\text{gas} \times (t_{\text{g masuk}} - t_{\text{g keluar}})}_{\text{konstan}} = S \times \underbrace{P.J.\text{uap}}_{\text{konstan}} \times \underbrace{(t_u - t_k)}_{\text{konstan}}$$

Karena G_{gas} senantiasa sebanding dengan S , maka dari persamaan tersebut, t_{uap} yang ke luar dari superheater akan senantiasa konstan pada berbagai-bagai harga S maupun G_{gas} . Sehingga dengan demikian karakteristik atau sifat-sifat superheater konveksi ialah: temperatur uap yang dihasilkan (t_u) senantiasa dapat mengikuti beban (S).



Namun demikian karena superheater konveksi ditempatkan di daerah konveksi yang dalam hal ini temperatur gas asap di daerah tersebut lebih rendah dari temperatur gas asap di daerah pancaran, maka temperatur uap yang dihasilkan (t_u) oleh superheater konveksi tidak bisa tinggi.

Superheater Konveksi Arus Searah:

Uap kembang

masuk

t_k

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

$t_{\text{gas masuk}}$

Uap yang dipanaskan lanjut ke luar

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

t_u

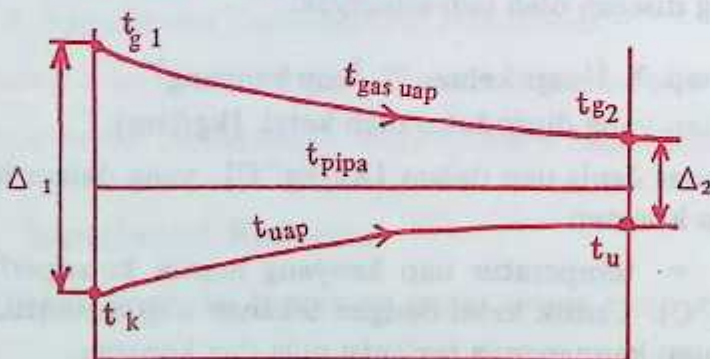
t_u

t_u

t_u

t_u

t_u



Lihat gambar.

Lokasi uap kenyang masuk ke dalam superheater di tempat yang sama dengan lokasi gas asap masuk melewati superheater. Di samping itu lokasi uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari superheater di tempat yang sama dengan lokasi gas asap ke luar dari superheater.

Selisih temperatur antara gas asap masuk ke superheater dengan temperatur uap kenyang masuk ke superheater ialah:

$$\Delta_1 = t_{gas-1} - t_k$$

Selisih temperatur antara gas ke luar dari superheater dengan temperatur uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari superheater ialah:

$$\Delta_2 = t_{gas-2} - t_u$$

Sedangkan selisih antara temperatur gas asap rata-rata pada superheater dengan temperatur uap rata-rata di dalam superheater ialah:

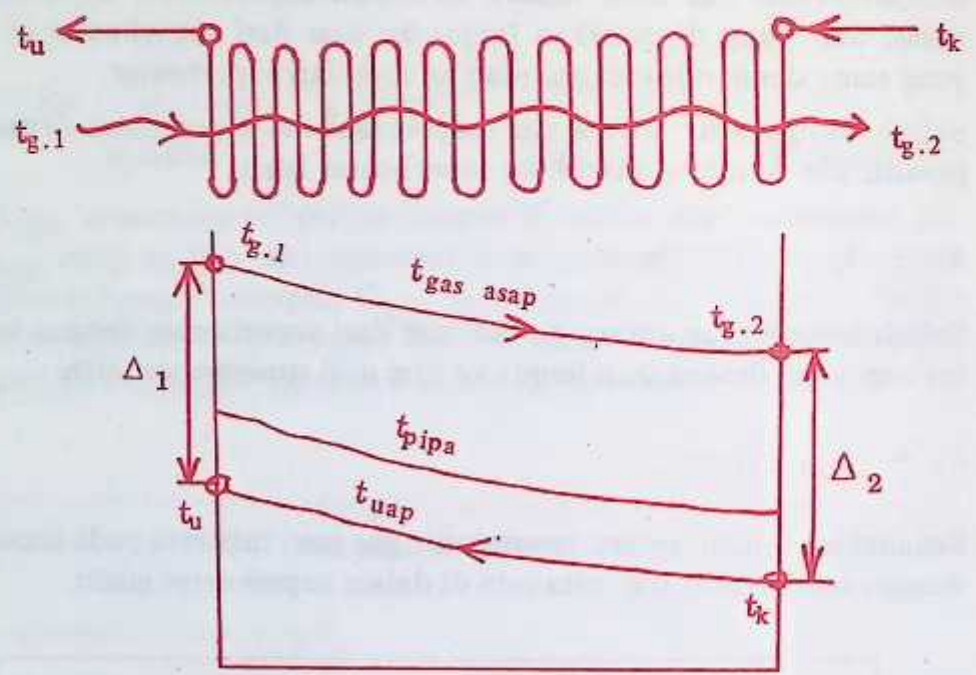
$$\Delta t = t_{gas \text{ rata-rata}} - t_{uap \text{ rata-rata}} = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln(\Delta_1 / \Delta_2)}$$

Adapun temperatur pipa superheater, baik pada ujung masuk ke superheater dan pada ujung ke luar dari superheater menunjukkan harga yang konstan ($t_{p-1} = t_{p-2}$), dengan demikian dapat dipastikan bahwa superheater arus searah ini akan awet, tidak cepat rusak/pecah, karena tidak terjadi adanya tegangan-tegangan di dalam pipa-pipa superheater yang disebabkan perbedaan temperatur di dalam pipa-pipa tersebut.

Superheater Arus Berlawanan:

Uap yang dipanaskan lanjut ke luar

Uap kenyang masuk



Lihat gambar.

Pada superheater ini, tempat gas asap masuk ke superheater di situ pula tempat uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari superheater. Sebaliknya, di tempat gas asap ke luar dari superheater, di situ pula tempat uap kenyang masuk ke superheater.

Selisih antara temperatur gas asap masuk ke superheater dengan temperatur uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari superheater ialah:

$$\Delta_1 = t_{g.1} - t_u$$

Selisih antara temperatur gas asap ke luar dari superheater dengan temperatur uap kenyang masuk ke superheater ialah:

$$\Delta_2 = t_{g.2} - t_k$$

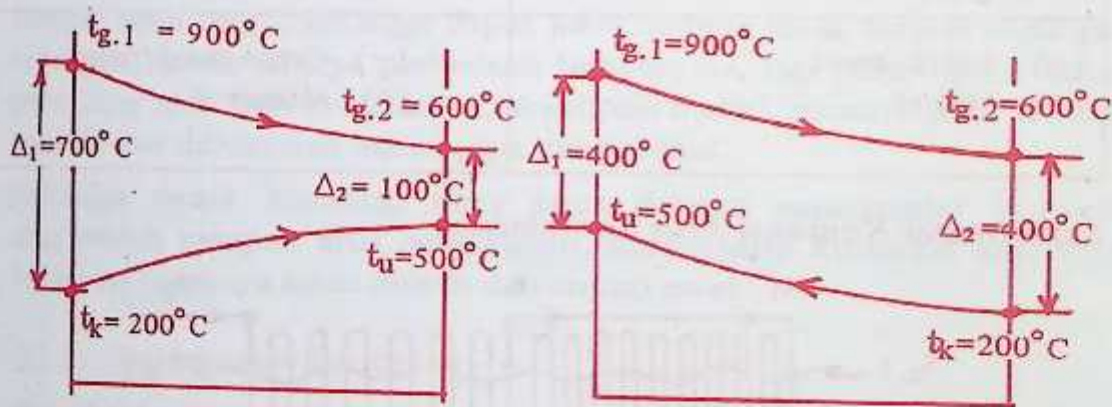
Sedangkan selisih antara temperatur rata-rata gas asap dengan temperatur rata-rata uap di dalam superheater ialah:

$$\Delta t = t_{\text{gas rata-rata}} - t_{\text{uap rata-rata}} = \Delta_1 = \Delta_2$$

Adapun temperatur pipa-pipa tidaklah sama pada setiap tempat. Di tempat uap kenyang masuk dan gas asap ke luar, temperatur pipa masih rendah. Sedangkan di tempat gas asap masuk dan uap yang dipanaskan lanjut ke luar, temperatur pipa di situ cukup tinggi, sehingga ada perbedaan temperatur pipa di setiap tempat secara gradual.

Karena temperatur pipa di setiap tempat berbeda-beda, maka mengakibatkan timbulnya tegangan-tegangan di dalam pipa. Dengan demikian maka pipa-pipa superheater jenis ini akan cepat rusak/pecah, dan superheater menjadi tidak awet.

Sebagai perbandingan antara superheater konveksi arus searah dan superheater konveksi arus berlawanan dengan kapasitas yang sama yaitu uap yang diproduksi (S) yang sama, temperatur gas asap memasuki superheater yang sama misalnya 900°C , temperatur gas asap ke luar dari superheater sama pula misalnya 600°C , dan juga temperatur uap kenyang yang masuk juga sama misalnya $t_k = 200^{\circ}\text{C}$ dan temperatur uap yang dipanaskan lanjut ke luar dari superheater sama pula, misalnya $t_u = 500^{\circ}\text{C}$, maka:



Untuk Superheater konveksi arus searah:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln(\Delta_1/\Delta_2)} = \frac{700^{\circ} - 100^{\circ}}{\ln(700/100)} = 308.339^{\circ}\text{C}$$

$$Q = k \cdot F_1 \cdot \Delta t_1 \rightarrow F_1 \times \Delta t_1 = Q / k$$

Untuk Superheater konveksi arus berlawanan:

$$t_2 = \Delta_1 = \Delta_2 = 900^\circ - 500^\circ = 600^\circ - 200^\circ = 400^\circ \text{C}$$

$$Q = k \cdot F_2 \cdot \Delta t_2 \rightarrow F_2 \times \Delta t_2 = Q / k$$

Untuk Q dan k yang sama:

$$F_1 \times \Delta t_1 = F_2 \times \Delta t_2 = Q/k$$

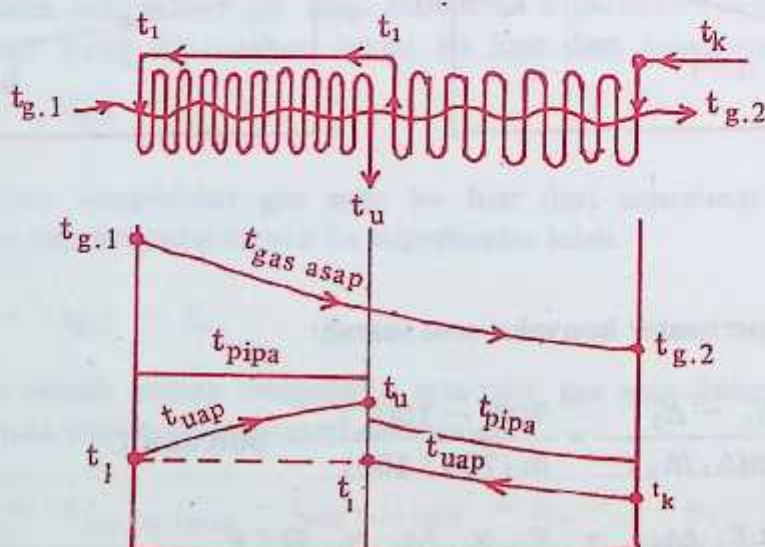
$$F_1 = (\Delta t_2 / \Delta t_1) \times F_2 = (400^\circ / 300,339) \times F_2 =$$

$$F_1 = 1,2973 \times F_2$$

Dengan demikian Luas Bidang yang Dipanaskan (*Heating Surface*) untuk superheater konveksi arus searah adalah 29,73% lebih luas dibandingkan dengan Luas Bidang yang Dipanaskan Superheater konveksi arus berlawanan. Oleh karena itu, untuk kapasitas yang sama (Q KJ/jam) harga superheater konveksi arus searah adalah 29,73% lebih mahal daripada superheater konveksi arus berlawanan.

Superheater Konveksi Arus Searah	Superheater Konveksi Arus Berlawanan
(+) Lebih awet (-) Mahal	(-) Cepat rusak/pecah (+) Murah

Superheater Konveksi Arus Kombinasi:



Lihat gambar.

Pada superheater konveksi arus kombinasi, uap kenyang dengan temperatur t_k masuk ke superheater di tempat gas asap ke luar dari superheater dengan temperatur gas asap $t_{g.2}$ sampai di tengah-tengah superheater temperatur uap mencapai t_1 , dan dibawa langsung ke tempat gas asap masuk ke superheater dengan temperatur $t_{g.1}$ dan uap dialirkan kembali hingga ke tengah-tengah superheater, dan di tengah-tengah superheater tersebut uap yang dipanaskan lanjut dialirkan ke luar dari superheater dengan temperatur t_u . Dengan demikian aliran uap terhadap aliran gas asap mula-mula searah, kemudian menjadi berlawanan arah.

Di daerah yang berlawanan arah, temperatur pipa berbeda-beda di setiap tempat, namun karena temperatur gas asap, temperatur pipa, dan temperatur uap di tempat tersebut tidak tinggi (agak rendah) maka pipa-pipa tidak begitu cepat rusak/pecah. Andaikata rusak pun karena pipa-pipa di daerah temperatur yang agak rendah ini dapat dibuat dari bahan yang agak kurang baik kualitasnya namun murah, maka biaya penggantian pipa-pipa juga tidaklah begitu mahal.

Sebaliknya, di daerah uap dan gas asap-searah, temperatur pipa di setiap tempat sama tinggi, sehingga dapat awet, karena tidak terjadi tegangan-tegangan karena adanya perbedaan temperatur, lagi pula dipilih bahan pipa yang agak baik kualitasnya, sekalipun mahal, namun tidak seluruh superheater dibuat dari bahan pipa yang mahal.

Sehingga untuk kapasitas yang sama dengan superheater konveksi arus searah maupun arus berlawanan, superheater konveksi arus kombinasi ini harganya agak murah dan cukup awet.

31.2. Superheater Pancaran

Superheater pancaran menerima panas dari api secara pancaran. Panas yang diterima dari api secara pancaran sebanyak:

$$Q_p = C \times F \times [(0,01 \times T_{api})^4 - (0,01 \times T_{pipa\ sup.})^4] \text{ [KJ/j.]}$$

$$c = \text{Konstanta dari Stephan-Boltzmann [KJ/m}^2 \cdot \text{j.}(\text{ }^\circ\text{K})^4 \text{]}$$

$$F = \text{Luas bidang superheater yang dipanaskan [m}^2 \text{]}$$

$$T_{api} = \text{Temperatur api di dalam tungku [}^\circ\text{K] yang harganya senantiasa konstan tidak tergantung dari besar-kecilnya api di dalam tungku.}$$

Temperatur api hanya tergantung dari jenis bahan bakar yang dibakar dan temperatur udara pembakaran yang dimasukkan ke dalam tungku.

$T_{\text{pipa-pipa sup.}}$ = Temperatur pipa-pipa superheater dalam [$^{\circ}\text{K}$] yang harganya relatif konstan, tidak tergantung dari besar-kecilnya api.

Dengan demikian harga Q_p tersebut di atas senantiasa konstan.

Panas yang diserap oleh uap di dalam superheater pancaran:

$$Q_s = S \times P.J_{\text{uap}} \times (t_{\text{uap ke luar}} - t_{\text{uap kenyang}})$$

Lihat pula keterangan sebelumnya, pada superheater konveksi.

Bila tidak ada kerugian panas, maka:

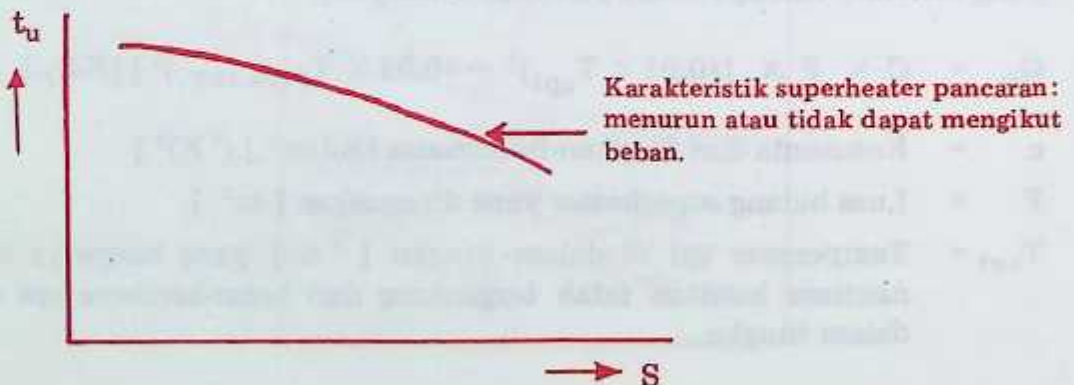
Panas yang diterima dari api = Panas yang diserap oleh uap.

$$Q_p = Q_s$$

$$\underbrace{c.F. [(0,01 T_{\text{api}})^4 - (0,01 T_{\text{pipa sup}})^4]}_{\text{Konstan}} = S \times \underbrace{P.J_{\text{uap}}}_{\text{Konstan}} \times \underbrace{(t_u - t_k)}_{\text{Konstan}}$$

Pada ruas kiri persamaan tersebut, harganya **relatif konstan**. Sehingga agar ruas kanan juga **senantiasa konstan** seperti ruas kiri, maka bila produksi uap (S) bertambah, harga temperatur uap yang dihasilkan (t_u) harus berkurang, sebaliknya bila produksi uap (S) berkurang, maka temperatur uap (t_u) harus bertambah.

Sehingga harga temperatur uap akan **menurun** bila produksi uap atau beban ketel bertambah. Atau dengan kata lain: Karakteristik atau sifat-sifat superheater pancaran ialah menurun atau **tidak dapat mengikuti beban**.



Namun demikian, karena penempatan superheater pancaran di daerah pancaran, temperatur api yang paling tinggi di dalam ketel, maka memungkinkan temperatur uap (t_u) yang dihasilkan dapat mencapai harga yang tinggi.

Superheater Konveksi	Superheater Pancaran
(+) Dapat mengikuti beban	(-) Tidak dapat mengikuti beban atau menurun
(-) Temperatur uap rendah	(+) Temperatur uap tinggi

31.3. Superheater Kombinasi

Superheater kombinasi merupakan kombinasi antara superheater konveksi dan superheater pancaran.

Superheater kombinasi = Superheater konveksi + Superheater pancaran

Karena superheater kombinasi merupakan kombinasi antara superheater konveksi dan superheater pancaran, maka karakteristik atau sifat-sifat yang kurang baik dari superheater konveksi dan superheater pancaran dapat dieliminasi, sehingga yang tersisa ialah karakteristik yang baik dari kedua superheater tersebut:

- (+) Dapat mengikuti beban
- (+) Temperatur uap dapat tinggi
- (-) Harganya mahal

Kekurangannya ialah harganya yang mahal merupakan harga superheater konveksi ditambah harga superheater pancaran.

32. Ekonomiser

Gas asap setelah meninggalkan superheater konveksi ataupun pemanas lanjut ulang atau *Steam Reheater*, temperaturnya masih cukup tinggi sekitar 500°C hingga 800°C , sehingga akan merupakan kerugian panas yang besar bila gas asap tersebut langsung dibuang lewat cerobong.

Gas asap yang masih panas ini dapat dimanfaatkan untuk memanasi air terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam drum ketel, sehingga

air telah dalam keadaan panas, sekitar 30°C sampai 50°C di bawah temperatur mendidihnya.

Air yang telah dalam keadaan panas pada saat masuk ke dalam drum ketel membawa keuntungan karena di tempat air masuk ke dalam drum, dinding ketel **tidak mengerut** sehingga drum ketel dapat **lebih awet** dengan demikian biaya perawatan atau **biaya maintenance-nya** menjadi **lebih murah**. Lain halnya bila air dalam keadaan dingin masuk ke dalam drum tersebut, dinding drum akan mengerut dan mudah pecah atau bocor, sehingga biaya perawatannya mahal.

Keuntungan kedua ialah dengan memanfaatkan gas asap yang masih mempunyai temperatur yang tinggi tersebut untuk memanasi air sebelum masuk ke dalam drum ketel, berarti akan memperbesar efisiensi dari ketel uap, karena dapat memperkecil kerugian panas yang diterima oleh ketel.

Keuntungan berikutnya ialah dengan air yang telah dalam keadaan panas masuk ke dalam drum ketel tersebut, untuk menguapkannya di dalam tungku hanya sedikit saja dibutuhkan panas, sehingga dengan demikian untuk menguapkan air di dalam tungku hanya dibutuhkan sedikit bahan bakar, sehingga pemakaian bahan bakarnya lebih hemat, atau dengan kata lain: **biaya operasinya** menjadi **lebih ekonomis**.

Keuntungan keempat ialah, bila air telah dalam keadaan panas memasuki drum ketel, maka untuk menguapkannya hanya dibutuhkan panas yang sedikit di dalam penguap, sehingga Luas Bidang yang Dipanaskan atau Heating Surface dari Penguap atau Evaporator menjadi lebih sedikit, akibatnya ukuran-ukuran tungku menjadi lebih kecil, oleh karena itu harga tungku menjadi lebih murah atau secara keseluruhannya harga ketel atau harga investasinya menjadi lebih murah, sekalipun harus dipasang alat untuk memanaskan air terlebih dahulu sebelum masuk drum ketel.

Dengan demikian dengan memasang alat untuk memanaskan air terlebih dahulu sebelum masuk ke dalam drum ketel, yang disebut pemanas air awal (*Water pre-heater*) akan didapat keuntungan-keuntungan sebagai berikut:

- a. Biaya perawatan (*Maintenance Cost*) menjadi lebih murah.
- b. Efisiensi Thermis dapat diperbesar.
- c. Biaya operasi menjadi lebih hemat atau lebih ekonomis.
- d. Harga investasi ketel menjadi lebih murah.

Dari alasan-alasan tersebut, maka alat untuk pemanas air awal sering

disebut *ekonomiser*. Pada ketel yang besar-besar dan modern, ekonomiser ini sangat memegang peranan.

Dilihat dari arus air dan gas asap, ekonomiser dibagi:

- a. Ekonomiser arus Searah
- b. Ekonomiser arus Berlawanan Arah
- c. Ekonomiser arus Kombinasi.

Seperti halnya pada superheater konveksi arus searah yang telah dibicarakan, pada ekonomiser arus searah:

$$\Delta t = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln [\Delta_1 / \Delta_2]}$$

Δt = Selisih antara temperatur gas asap rata-rata dengan temperatur dengan temperatur air rata-rata.

Δ_1 = Selisih antara temperatur gas asap masuk ke ekonomiser dengan temperatur air masuk ekonomiser.

Δ_2 = Selisih antara temperatur air gas asap ke luar dari ekonomiser dengan temperatur air ke luar dari ekonomiser.

Pada ekonomiser arus berlawanan arah seperti halnya pada superheater konveksi arus berlawanan arah yang telah dibicarakan:

$$\Delta t = \Delta_1 = \Delta_2$$

dengan:

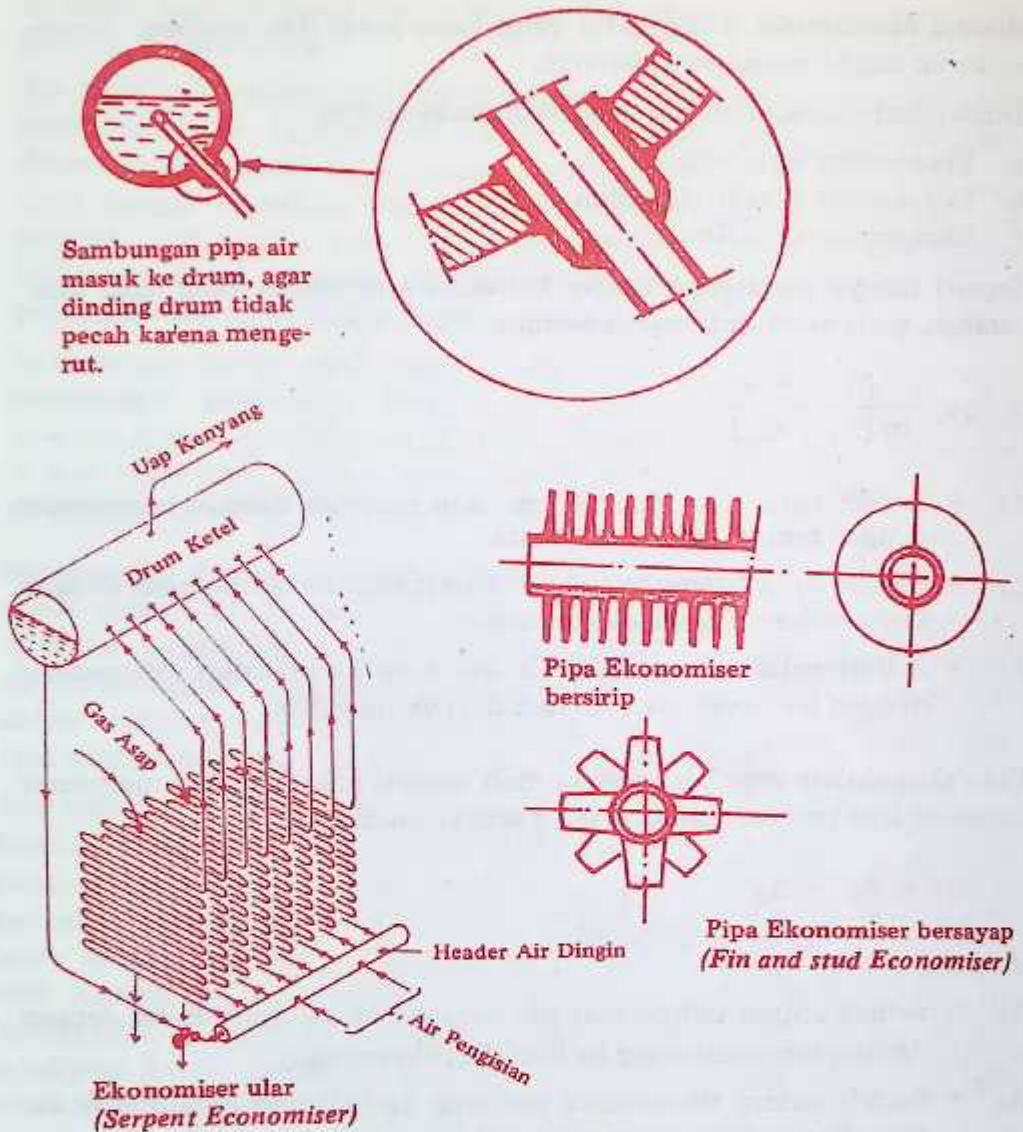
Δ_1 = Selisih antara temperatur gas asap masuk ke ekonomiser dengan dengan temperatur air ke luar dari ekonomiser.

Δ_2 = Selisih antara temperatur gas asap ke luar dari ekonomiser dengan temperatur air masuk ke ekonomiser.

Δt = Selisih antara temperatur gas asap rata-rata dengan temperatur air rata-rata di dalam ekonomiser.

Jika dilihat dari bentuknya, ada ekonomiser yang berbentuk ular yang disebut ekonomiser ular atau serpent economiser. Ada pula pipa-pipa ekonomiser yang diberi berusuk-rusuk dengan maksud untuk memperluas bidang persinggungan antara gas asap dengan dinding pipa yang telah diperluas oleh rusuk-rusuk. Ada pula untuk memperluas bidang singgung dengan gas asap dengan mengelaskan potongan-potongan pelat

Sambungan pipa air masuk ke drum, agar dinding drum tidak pecah karena mengembang.



baja pada pipa-pipa sehingga pipa-pipa tersebut bersayap, yang disebut *Fin and stud economiser*.

Ekonomiser ular terbuat dari pipa-pipa baja, yang ditekuk-tekuk dan menyerupai ular. Karena bidang persinggungan dengan gas asap tidak diperluas, maka memerlukan pipa yang panjang, namun pembuatannya mudah. Pada ekonomiser berusuk dan ekonomiser bersayap, maka luas bidang persinggungan diperluas dengan rusuk-rusuk atau sayap-sayap, sehingga untuk kapasitas yang sama, panjang pipa-pipanya dapat lebih pendek dibandingkan dengan ekonomiser ular.

33. Pemanas Udara Atau Air-Preheater

Gas asap setelah ke luar dari memanasi ekonomiser masih bertemperatur sekitar 400°C hingga 700°C sehingga sayang bila dibuang langsung lewat cerobong, karena panas yang terkandung di dalam gas asap tersebut masih dapat dimanfaatkan lagi untuk memanaskan udara sebelum dimasukkan ke dalam tungku, sehingga efisiensi thermis ketel uap dapat dinaikkan lagi.

Memanaskan udara pembakaran sebelum dimasukkan ke dalam tungku berarti mengurangi kebutuhan panas untuk menaikkan temperatur udara di dalam tungku, sehingga api di dalam tungku tidak banyak mengalami penurunan temperatur, sehingga mengurangi kemungkinan api di dalam tungku tiba-tiba padam sendiri. Api yang tiba-tiba padam sendiri, dapat menyebabkan peledakan tungku, bila tiba-tiba alat penyundut api dipasang/dinyalakan, karena di dalam tungku terdapat sejumlah uap bahan bakar dan udara yang telah siap untuk terbakar. Kelalaian operator menyalakan alat penyundut api bila api di dalam tungku padam sendiri, dapat menyebabkan peledakan tungku yang dapat menimbulkan kerugian besar.

Bila api di dalam tungku padam sendiri, maka gas-gas berikut campuran uap bahan bakar dan udara yang terdapat di dalam tungku diisap ke luar dengan menggunakan Fan isap (*Induced draught fan* atau IDF) bila tersedia Fan isap, dan bila tidak tersedia Fan isap, dihembus dengan menggunakan Fan Penghembus atau Fan Tekan (*Forced Draught Fan* atau FDF), agar tidak tersisa lagi campuran uap bahan bakar dan udara di dalam tungku, dan baru dapat dimulai lagi prosedur penyalaan tungku dari awal.

Dengan demikian bila api di dalam tungku padam sendiri, maka ada sejumlah kerugian bahan bakar yang dibuang, lagi pula operasi ketel menjadi terganggu. Hal ini tidak dikehendaki. Oleh karena itu diusahakan untuk memanaskan udara pembakar terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam tungku.

Manfaat lain dengan memanaskan udara pembakar terlebih dahulu sebelum masuk ke dalam tungku, ialah udara yang telah dalam keadaan panas masuk ke dalam tungku, membantu untuk mempercepat peng-uapan air yang terkandung di dalam bahan bakar (khususnya bahan bakar padat) sehingga akan mempercepat berlangsungnya pembakaran bahan bakar di dalam tungku, yang dengan demikian untuk kapasitas tungku yang sama, yaitu untuk jumlah bahan bakar yang dibakar sama,

tungku yang menggunakan udara panas ukuran-ukurannya menjadi lebih kecil sehingga dapat lebih murah investasinya.

Ada tiga macam Pemanas Udara atau *Air-Preheater*:

- a. Pemanas udara pipa
- b. Pemanas udara pelat
- c. Pemanas udara regenerasi atau Pemanas udara Ljungström

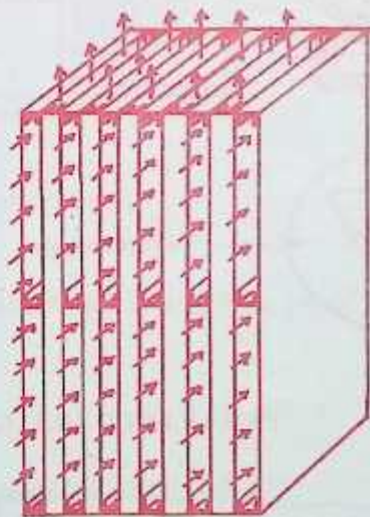
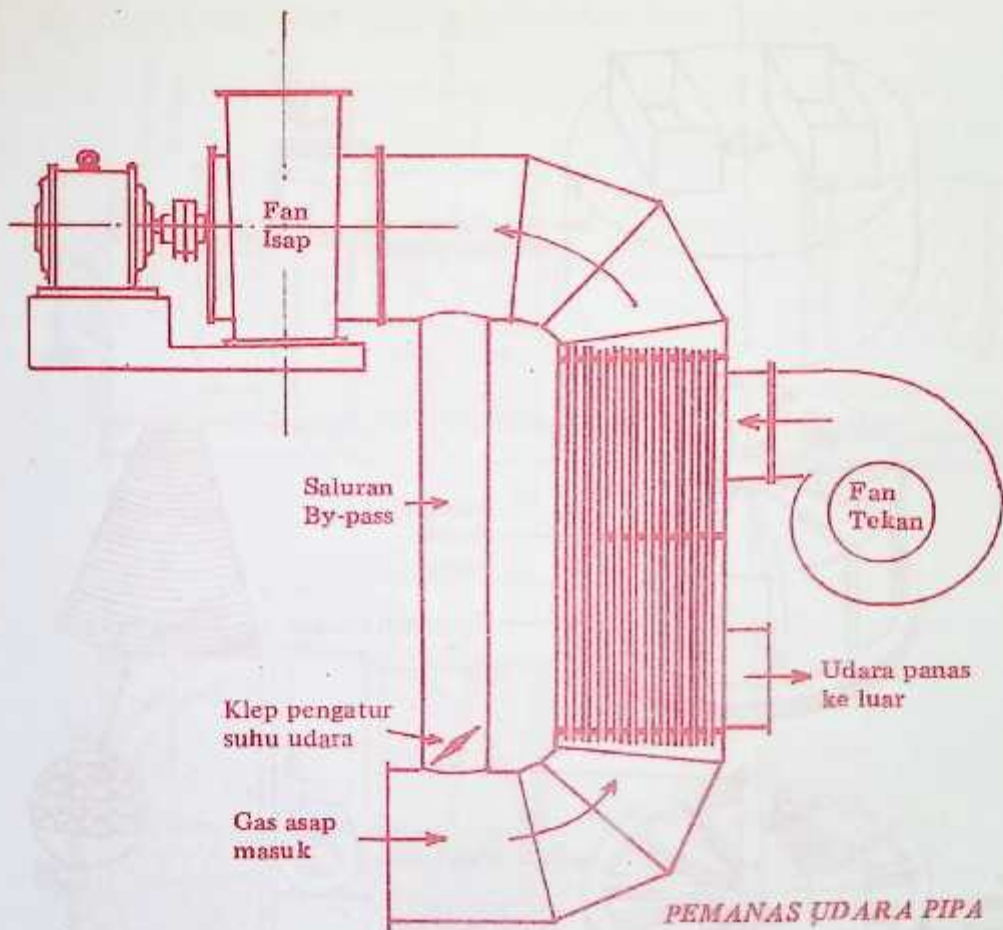
Lihat Gambar.

Pada Pemanas udara pipa, gas asap dialirkan melalui pipa-pipa, sedangkan udara dialirkan di sekeliling luar pipa-pipa, sehingga terjadi pertukaran panas antara gas asap dengan udara melewati dinding-dinding pipa. Ada pula udara yang melewati pipa-pipa sebelah dalam, sedangkan gas asap melewati sekeliling luar pipa-pipa. Diameter luar pipa-pipa sekitar 20 mm hingga 25 mm, tergantung besar-kecilnya pemanas udara atau besar-kecilnya ketel uap.

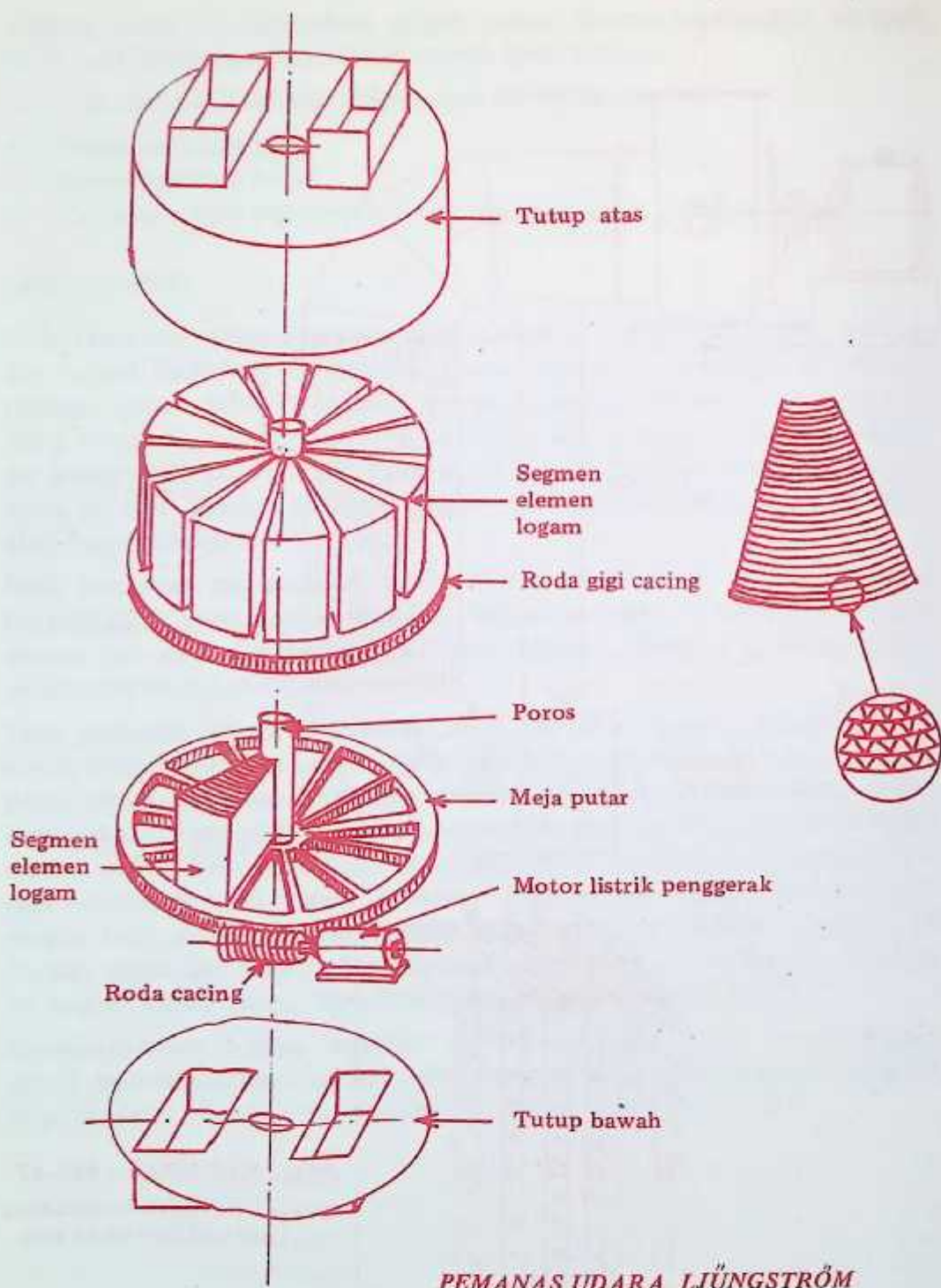
Pada pemanas udara pelat, udara dialirkan di antara pelat-pelat yang berganti-ganti atau berselang-seling dengan gas asap. Sehingga pertukaran antara gas asap dengan udara yang dipanasi melalui dinding-dinding pelat yang membatasinya.

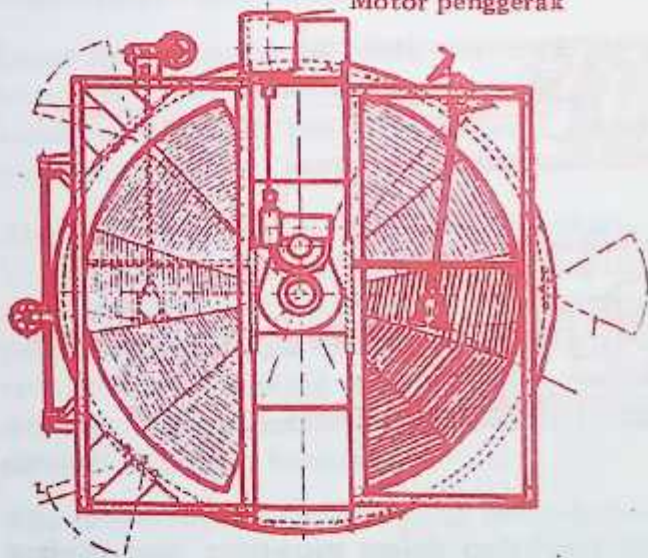
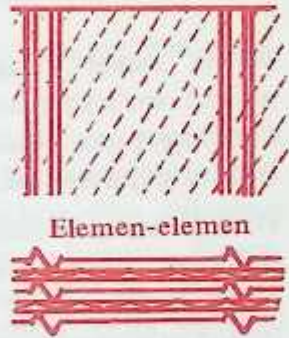
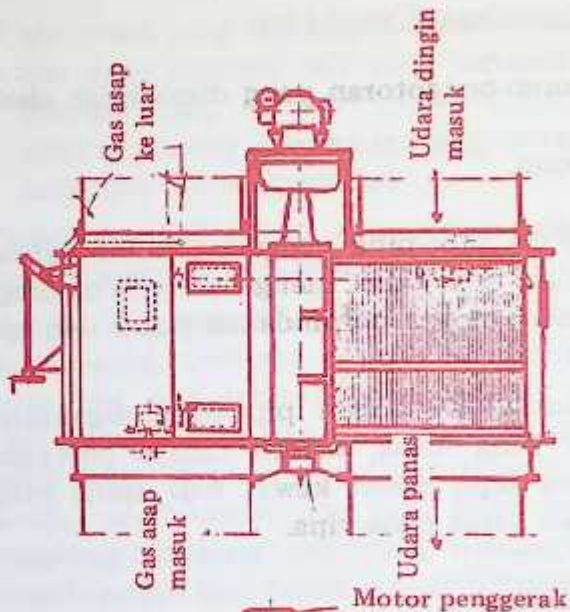
Pada pemanas udara Regenerasi atau pemanas udara Ljungström terdapat elemen-elemen logam yang untuk sementara waktu ditempatkan pada aliran gas asap, sehingga untuk sementara waktu elemen logam tersebut dipanasi oleh gas asap, kemudian dipindahkan di daerah aliran udara untuk beberapa saat, sehingga udara sempat mengambil panas dari elemen-elemen logam tersebut. Bila elemen logam tersebut telah dingin lagi, maka elemen-elemen logam tersebut dibawa kembali ke daerah aliran gas asap untuk dipanasi, bila telah panas dibawa kembali ke daerah aliran udara. Demikian dilakukan terus-menerus.

Elemen-elemen logam tersebut dari pelat-pelat, yang bergelombang untuk membuat jarak antara pelat yang satu dengan yang lain, di antara pelat-pelat tersebut dapat dilewati oleh gas asap atau udara.



PEMANAS UDARA PELAT
 Udara dari depan ke belakang.
 Gas asap dari bawah ke atas.





PEMANAS UDARA REGENERASI atau PEMANAS UDARA LJÜNGSTRÖM

PERPUSTAKAAN D III F. TEKNIK

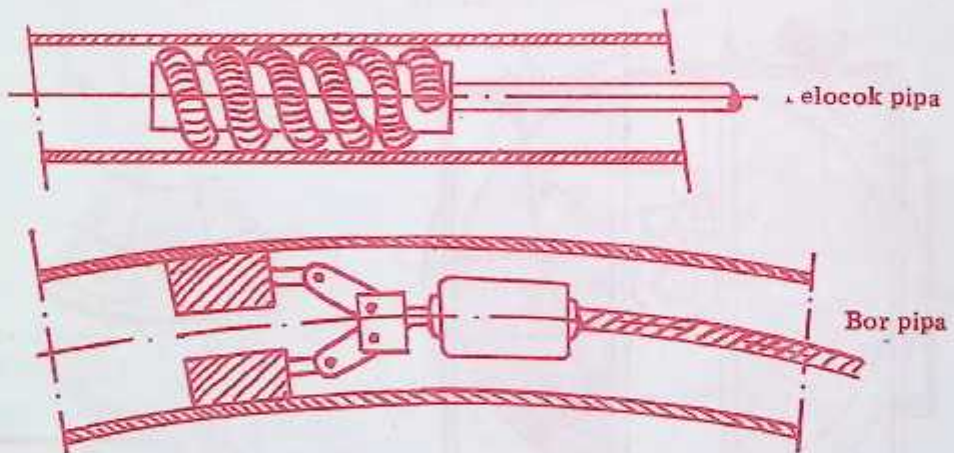
34. Peralatan Untuk Pembersihan Ketel Uap

Pada ketel uap terjadi pengotoran-pengotoran yang disebabkan oleh:

- kerak ketel pada aliran air;
- abu pada aliran api atau gas asap.

Kerak ketel yang terbentuk pada pipa-pipa penguap, untuk waktu-waktu tertentu harus dibersihkan, agar tidak mengerak pada dinding-dinding pipa sehingga dapat mengganggu perpindahan panas dari api di luar pipa kepada air yang ada di dalam pipa.

Untuk membersihkan kerak ketel dari dalam pipa-pipa, digunakan pelocok pipa untuk pipa-pipa yang lurus, seperti halnya pipa-pipa pada ketel seksi. Ujung pelocok pipa diberi kawat baja spiral yang dapat mengorek endapan-endapan kerak pada pipa.



Untuk membersihkan kerak ketel dari dalam pipa-pipa yang panjang serta melengkung digunakan "BOR" pipa. Bor pipa yang dimaksud berupa motor listrik yang pada porosnya terdapat tiga buah engsel-engsel yang masing-masing engsel tersebut memegang sebuah poros. Pada poros tersebut terdapat roda bergerigi yang dapat berputar. Roda bergerigi tersebut yang akan mengikis lapisan kerak dari dalam pipa. Kabel motor listrik diberi pelindung yang agak kaku namun fleksibel, sehingga dapat dimasukkan ke dalam pipa-pipa yang melengkung sekalipun.

Abu yang terbentuk di dalam ketel dari hasil pembakaran bahan bakar padat, dapat dibagi menjadi:

- abu padat yang terkumpul dalam sumuran-sumuran abu;
- abu yang menjadi cair yang terbawa melayang-layang di dalam api atau gas asap;
- abu padat yang terbawa terbang bersama api atau gas asap yang padat mencapai daerah konveksi.

Untuk menghilangkan abu padat yang terdapat pada sumuran abu, dapat digunakan cara-cara sebagai berikut:

Dengan membuka klep abu yang terdapat di dasar sumuran abu pada waktu-waktu tertentu sehingga abu tumpah di atas ban berjalan atau konveyor, dan dengan menggunakan konveyor tersebut abu dibuang dari sumuran abu dan diterima oleh alat-alat transport, berupa dump-truck atau lori-lori yang untuk selanjutnya ditransport ke tempat-tempat pembuangan abu yang telah tersedia, atau dapat pula berupa tongkang-tongkang abu yang nantinya ditarik oleh kapal tunda ke tengah-tengah laut dalam, untuk dibuang.

Dapat pula dibuang langsung dari sumuran abu ke-selokan pembuang, tempat abu dari sumuran abu langsung jatuh ke selokan pembuang abu, kemudian abu dialirkan bersama-sama aliran cair pembuang ke tempat pembuang abu.

Abu cair memberikan kesukaran-kesukaran pada ketel uap bilamana butiran-butiran abu cair yang melayang-layang di dalam api atau gas asap, tiba-tiba menyentuh dinding pipa-pipa penguap atau superheater yang temperaturnya relatif lebih dingin, maka butiran-butiran abu tersebut akan langsung membeku dan melekat pada pipa-pipa tersebut, sehingga mengakibatkan perpindahan panas dari api ke air atau uap menjadi terganggu karenanya.

Abu mempunyai titik cair yang berbeda-beda antara yang satu dengan yang lainnya. Titik cair abu dibedakan sebagai berikut: abu yang titik cairnya kurang dari 1100°C ; abu yang titik cairnya antara 1100°C hingga 1250°C ; dan abu yang titik cairnya lebih dari 1250°C . Cara-cara penanggulangan abu cair berbeda-beda tergantung dari titik cair abu tersebut.

Abu yang titik cairnya rendah, kurang dari 1100°C , ditanggulangi dengan cara membuat konstruksi dinding tungku sedemikian, sehingga jarak antara pipa-pipa penguap sedemikian jaraknya sehingga dinding tungku tidak banyak menyerap panas dari api di dalam tungku dan temperaturnya dapat dipertahankan tetap tinggi, sehingga butiran-butiran abu cair yang menyentuh dinding tungku atau pipa penguap, masih

tetap dalam keadaan cair, dan meleleh sepanjang dinding tungku ke bawah dan mencapai sumuran abu, yang nantinya dibuang bersama-sama abu padat yang terkumpul, di sumuran abu.

Konstruksi dinding tungku diusahakan agar jarak pipa-pipa dibuat jarang sedemikian sehingga tidak banyak menyerap panas, bahkan memantulkan sebagian panas ke dalam tungku, fraksi pendinginannya kurang dari 100%.

$$\text{Fraksi pendinginan} = [1 - (s - d)/s] \times 100\%$$

s = jarak antara garis tengah pipa-pipa penguap

d = diameter pipa-pipa penguap.

Untuk abu yang titik cairnya sedang, 1100°C hingga 1250°C, pencegahannya dilakukan dengan cara menempatkan pembakar-pembakar atau burner di sudut-sudut tungku dengan arah hembusan api saling tangensial, sehingga api di dalam tungku membentuk pusaran api yang dengan perlahan-lahan naik ke atas.

Butiran-butiran abu cari akan melayang-layang di dalam api perlahan-lahan dan berpusar di dalam tungku, sehingga berkesempatan untuk saling bertemu dan membentuk butiran-butiran abu cair yang makin membesar, sehingga menjadi berat dan jatuh ke bawah ke dalam sumuran abu, dan dibuang bersama-sama abu padat yang terkumpul di sumuran abu, tanpa berkesempatan menyentuh dinding tungku penguap.

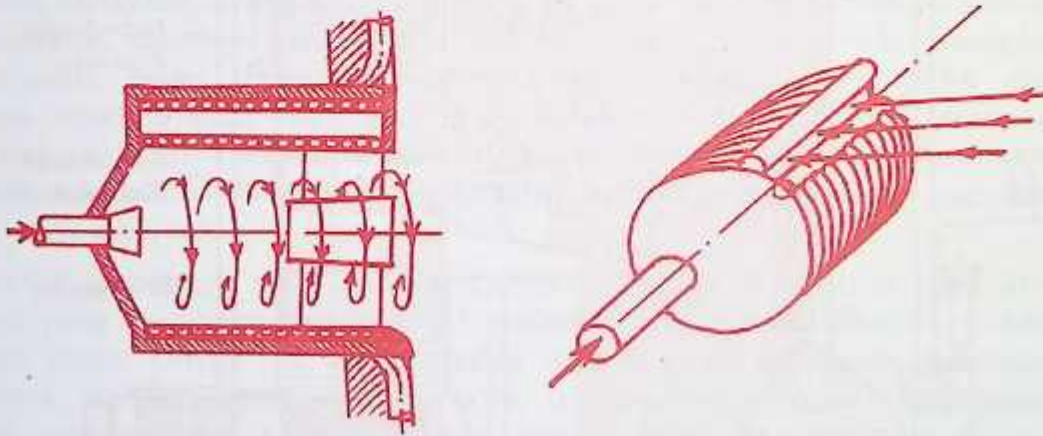
Untuk abu yang titik cairnya tinggi, lebih dari 1250°C, maka temperatur tungku dibuat sedemikian rendah, kurang dari 1250°C sehingga butiran-butiran abu senantiasa dalam keadaan padat, tanpa berkesempatan menjadi cair. Sehingga bahaya melekatnya abu pada dinding pipa-pipa penguap dapat dihindari.

Cara untuk mengusahakan agar temperatur tungku tetap rendah ialah dengan cara membuat dinding tungku dengan fraksi pendinginannya sebesar mungkin, yaitu dengan membuat jarak antara pipa-pipa penguap menjadi sedemikian dekat, atau saling bersinggung, $s = d$, sehingga fraksi pendinginannya menjadi 100%.

Di Amerika, cara penanggulangan abu cair, dilakukan dengan membuat Tungku Pusar atau Cyclon Furnace, yang merupakan tungku tambahan di bagian bawah tungku. Tungku pusar ini, bagian luarnya terdiri dari pipa-pipa penguap, yang merupakan sebagian dari tungku penguap keseluruhannya. Beberapa pipa-pipa penguap yang berasal dari sebuah

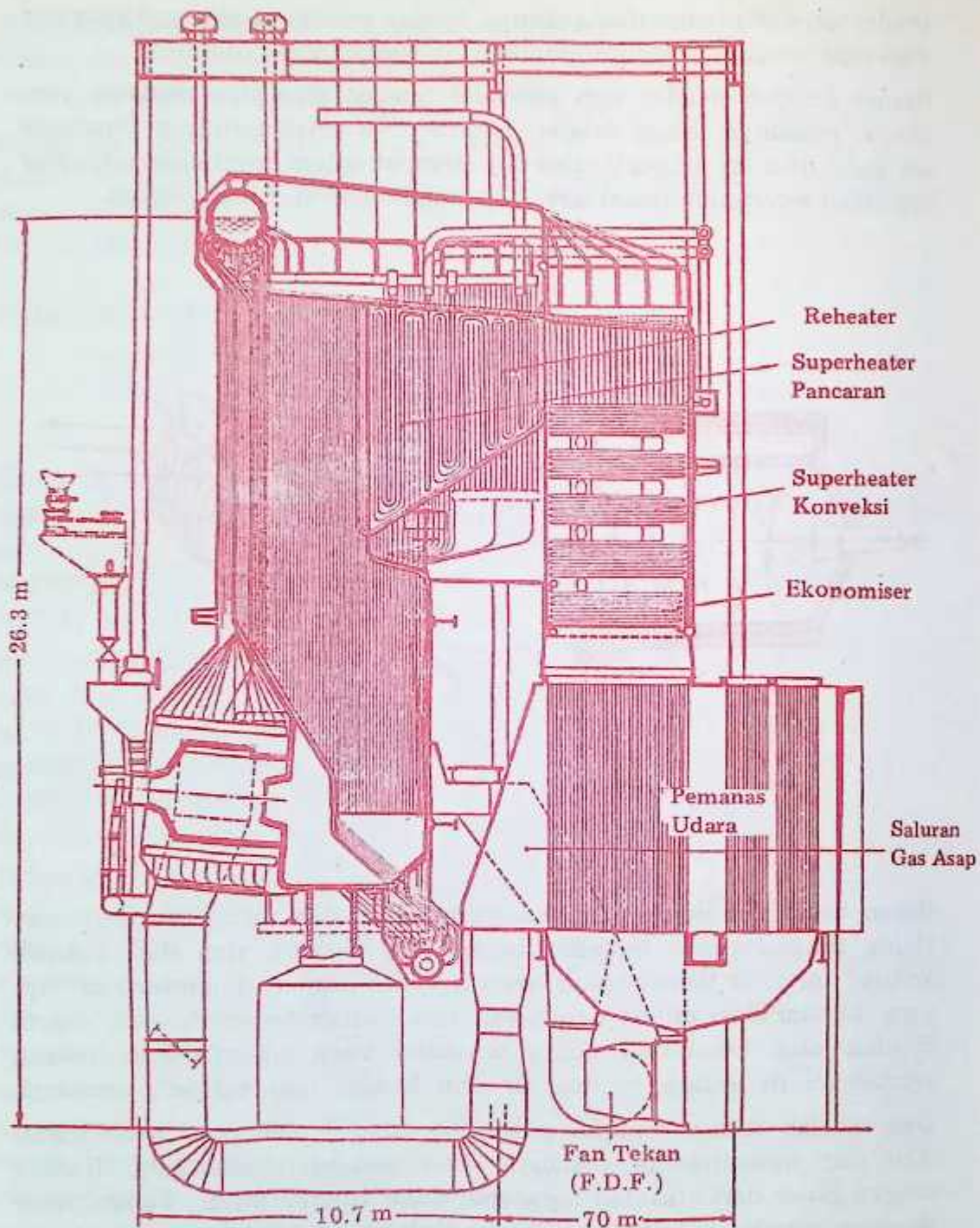
header air, dan menghubungkannya dengan sebuah header uap kenyang. Pipa-pipa penguap tersebut membentuk tungku yang silindris.

Header air dan header uap kenyang tempat pipa-pipa penguap bermuara, posisinya saling sejajar, membentuk celah terhadap pipa-pipa api yang disusun silindris tersebut, tempat udara pembakar sekunder ditiupkan secara tangensial terhadap tungku siklon. Lihat gambar.



Bahan bakar dan udara primer, dihembuskan dari ujung tungku pusat. Ujung tungku pusat tersebut berbentuk kerucut, dan dari puncak kerucut tersebut bahan bakar beserta udara primer, dihembuskan. Api yang ke luar dari mulut pembakar atau burner tersebut, akan segera di-pusar oleh hembusan udara sekunder yang dihembuskan melalui celah-celah di antara header air dan header uap kenyang tersebut.

Dari sebelah dalam, tungku pusat ini dilapisi oleh plat tahan karat. Abu cair dihempaskan padanya, dan meleleh disekeliling dinding tungku pusat dari atas dan mencapai dasar tungku pusat. Tungku pusat dipasang mendatar, sedikit miring ke arah tengah-tengah tungku utama, sehingga abu cair yang terkumpul di dasar tungku pusat tersebut akan mengalir dan tumpah ke dasar tungku utama, sehingga abu cair tersebut dapat dibuang bersama-sama abu padat yang terkumpul di dasar tungku utama.



Ketel Pancaran dengan Pembakar Siklon (*Cyclone Burner*)

Dengan menggunakan tungku pusat semacam ini, segala macam abu, yang telah dibicarakan, dengan berbagai-bagai titik cair abu, dapat ditanggulangi, tanpa mengganggu pipa-pipa penguap di tungku utama. Tungku pusat atau tungku siklon tersebut, merupakan sebagian, sekitar 5% hingga 10% dari tungku utama. Keberatan dalam hal penggunaan tungku siklon tersebut ialah karena harga tungku siklon tersebut yang cukup mahal.

Kesukaran yang lain yang disebabkan oleh abu cair, ialah terbentuknya yang disebut Bird-Nesting atau Bird Nest Forming, yaitu abu cair yang melayang-layang di dalam api atau gas asap, bila mencapai daerah konveksi, misalnya mencapai pipa-pipa superheater konveksi ataupun pemanas lanjut ulang (Reheater) ataupun ekonomiser, maka abu cair tersebut akan membeku dan melekat pada pipa-pipa tersebut, yang makin lama makin tebal, sehingga akan membantu aliran gas asap melewati celah-celah pipa-pipa tersebut, sehingga ketel akan berhenti bekerja sama sekali.

Untuk mengganti pipa-pipa yang celah-celahnya tersumbat oleh abu cair yang membeku dan melekat padanya, dibutuhkan banyak waktu dan biaya. Untuk itu terbentuknya Bird Nesting di daerah konveksi harus dicegah, yaitu dengan jalan mengusahakan agar temperatur api atau gas asap pada saat memasuki daerah konveksi telah cukup banyak didinginkan, sehingga temperaturnya berada di bawah titik cair abu. Dengan demikian abu pada saat mencapai daerah konveksi telah dalam keadaan padat dan tidak akan mengganggu lagi dengan membentuk Bird Nesting. Adapun caranya ialah dengan memasang sebagian dari pipa-pipa ekonomiser baik di atap tungku di sela-sela pipa-pipa superheater pancaran, atau membentuk tirai pipa-pipa sebelum gas asap memasuki daerah konveksi.

Abu padat yang dibawa terbang bersama-sama api atau gas asap, dan melayang-layang dalam gas asap, akan mencapai daerah konveksi. Bila abu padat yang melayang-layang pada gas asap, yang sering kita sebut sebagai Abu Terbang, hinggap pada pipa-pipa superheater konveksi, reheater ataupun ekonomiser, sekalipun gangguannya tidak seberat Bird Nesting, namun masih merupakan gangguan pada pipa-pipa tersebut, karena akan mengotori saluran gas asap. Debu-debu terbang tersebut dapat dibersihkan dengan cara menghembusnya, baik dengan menggunakan uap bekas ataupun dengan udara bertekanan.

Salah satu alat yang digunakan untuk menghembus abu terbang yang hinggap pada pipa-pipa di daerah konveksi tersebut ialah penghembus debu Dimond Shootblower. Lihat gambar.

Cara kerja Diamond Shootblower tersebut ialah sebagai berikut: Bila tombol atau switch (2) ditekan, maka aliran listrik akan mengalir lewat tombol tersebut, hingga mencapai Commutator-switch (3), yang diteruskan ke terminal F, hingga mencapai terminal F pada motor listrik. Setelah aliran listrik melalui terminal F dan melewati motor listrik, maka menuju aliran listrik yang kembali ke (1). Maka motor listrik akan berputar dan menggerakkan roda-roda gigi (7) dan (8). Bila aliran listrik yang dari tombol (2) melalui commutator switch dalam posisi menghubungkan terminal R hingga mencapai terminal R pada motor listrik, maka putaran motor listrik akan berubah terbalik.

Pada roda gigi (8) terdapat spie (10) yang terletak pada alur spie atau parit spie, yang terdapat pada batang berulir (9) yang ulirnya berbentuk segi-empat atau trapesium. Bila roda gigi (8) berputar, maka batang berulir tersebut akan terbawa berputar. Karena terdapat bushing (11) yang berulir segi-empat atau trapesium, yang dipasang pada rumah (29) dari shootblower, maka bila batang berulir (9) tersebut berputar, maka di samping ia berputar, batang berulir tersebut akan maju ke kiri, bila aliran listrik melalui terminal F. Bila aliran listrik melalui terminal R, maka batang berulir tersebut akan mundur ke kanan. Jadi batang berulir (9) tersebut dapat maju (bila aliran listrik melalui terminal F) dan dapat pula mundur (bila aliran listrik melalui terminal R).

Bila batang berulir tersebut berputar sambil maju ke kiri, maka nok (14) atau cam akan mencapai roller (21) dan mengangkatnya ke atas. Sebelum roller terangkat ke atas, uap masuk ke ruang uap bawah (16) melalui saluran masuk uap (15). Antara ruang uap bawah (16) dan ruang uap atas (17) dibatasi oleh mangkok (18) yang berlubang halus. Mangkok berlubang halus (18) tersebut memungkinkan uap dari ruang uap bawah (16) bocor melalui lubang halus tersebut hingga mencapai ruang uap atas (17). Mangkokan (18) senantiasa ditekan ke bawah oleh pegas (20), sehingga keran uap utama (19) tertutup rapat-rapat padaudukannya.

Bila roller (21) terangkat oleh nok (14), maka tuas (22) akan mendorong keran uap pelepas (23) atau relief valve (23) ke kiri, sehingga akan membuka hubungan antara ruang uap atas (17) dengan ruang pelepas uap (25) sehingga uap akan ke luar melewati saluran pelepas (26) ke ruang uap antara (27), dan dari ruang uap antara (27) tersebut uap mengalir ke luar ke mulut penghembus (13) melalui lubang halus (28).

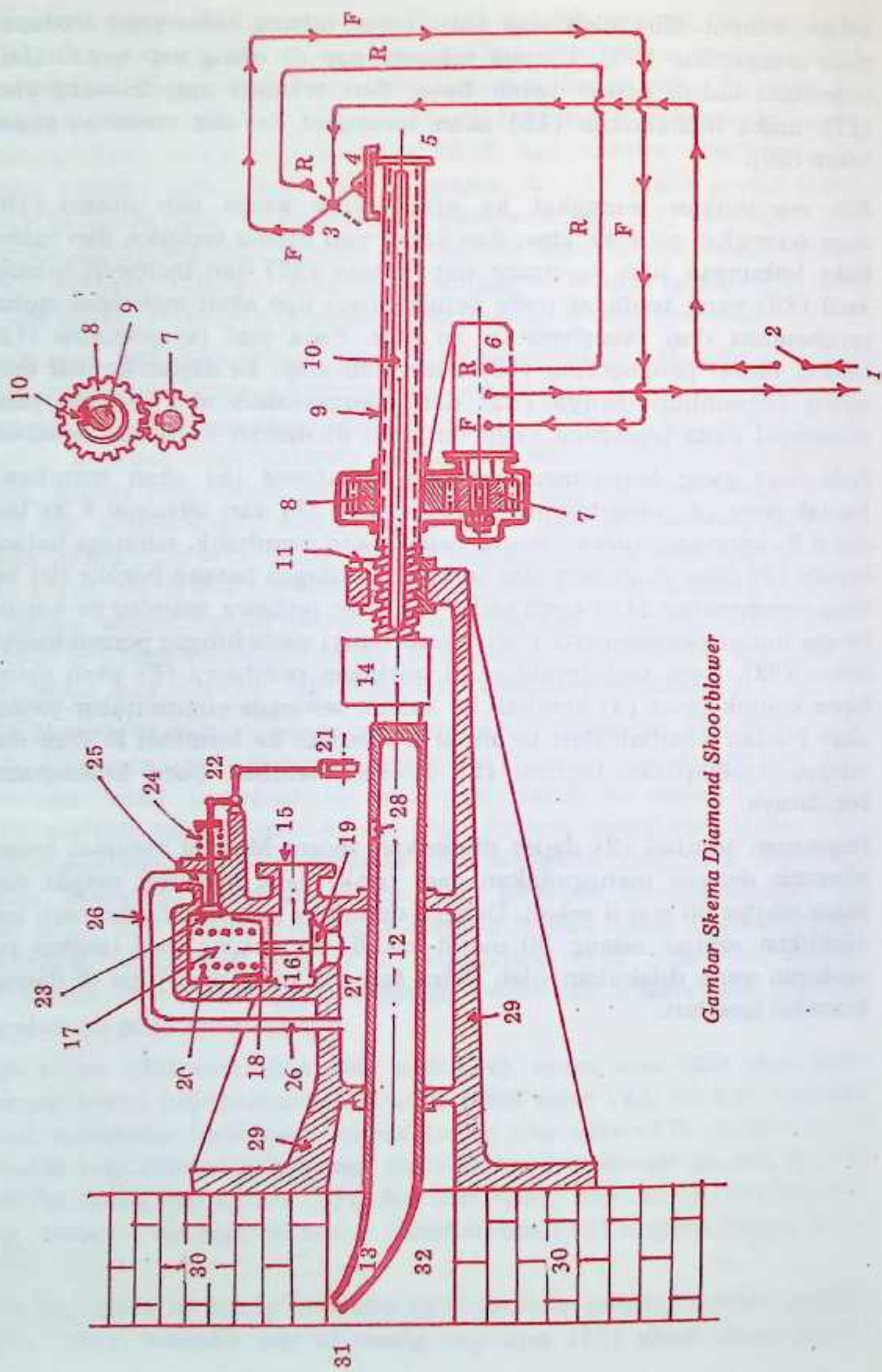
Bila uap yang di ruang uap atas (17) ke luar melalui saluran pelepas (26), maka tekanan uap di ruang uap atas (17) akan menurun, se-

belum sempat diisi oleh uap baru lewat lubang halus yang terdapat pada mangkokan (18). Karena tekanan uap di ruang uap bawah (16) sementara untuk sesaat Lebih Besar dari tekanan uap di ruang atas (17), maka mangkokan (18) akan terangkat ke atas melawan pegas tekan (20).

Bila mangkokan terangkat ke atas, maka keran uap utama (19) akan terangkat pula ke atas, dan keran uap utama terbuka, dan membuka hubungan uap ke ruang uap antara (27) dan melewati lubang kecil (28) yang terdapat pada penghembus uap akan mencapai mulut penghembus dan menghembus ke luar. Pada saat penghembus (12) beserta mulut penghembus (13) telah jauh maju ke depan ke luar dari sarang persembunyiannya (32) dan menghembus abu terbang yang menempel pada pipa-pipa yang terdapat di daerah konveksi tersebut.

Pada saat yang bersamaan, piringan pembawa (5) akan membawa kontak geser (4) yang memindahkan switch (3) dari terminal F ke terminal R, sehingga putaran motor listrik akan membalik, sehingga batang berulir (9) juga akan berputar terbalik, sehingga batang berulir (9) beserta penghembus (12) serta nok (14) akan terbawa mundur ke kanan, hingga mulut penghembus (13) tersembunyi pada lubang persembunyiannya (32). Pada saat terakhir ini, piringan pembawa (5) akan membawa kontak geser (4) kembali ke kanan, sehingga commutator switch akan pindah kembali dari terminal R kembali ke terminal F. Dan menunggu kesempatan tombol (2) ditekan kembali pada kesempatan berikutnya.

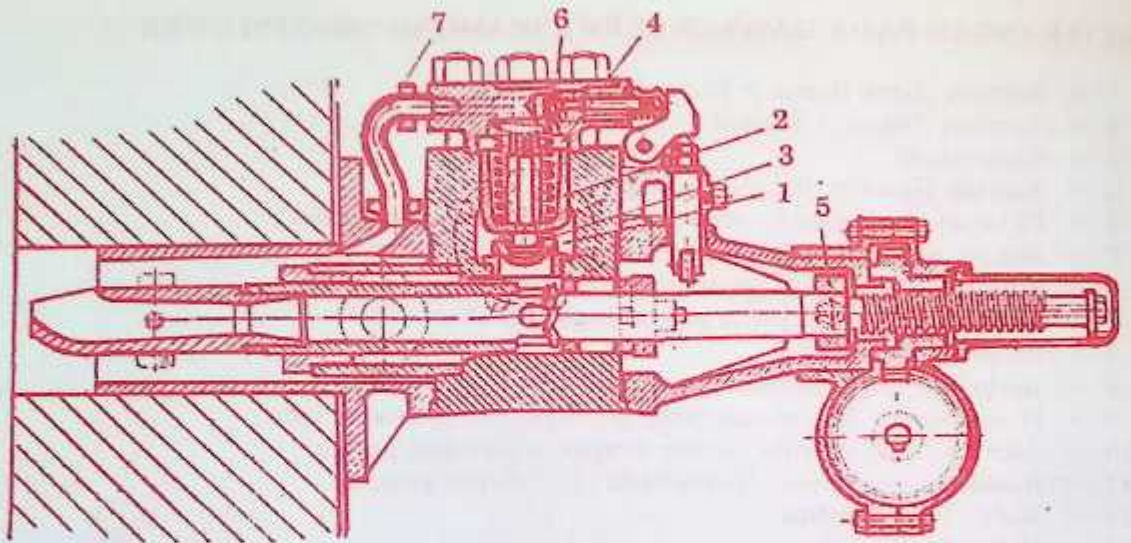
Penekanan tombol (2) dapat dilakukan secara Manual maupun secara otomatis dengan menggunakan cam (nok) yang berputar sangat perlahan sekitar 30 menit sekali. Dengan demikian penghembusan oleh uap dilakukan sekitar selang 30 menit sekali, tergantung dari tingkat pengotoran yang dilakukan oleh debu terbang pada pipa-pipa di daerah konveksi tersebut.



Gambar Skema Diamond Shootblower

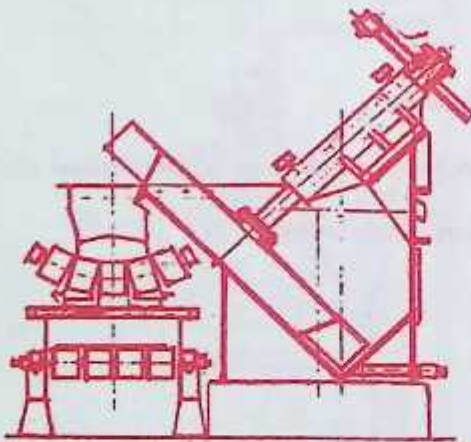
KETERANGAN PADA GAMBAR SKEMA DIAMOND SHOOTBLOWER

- 1 = Saluran aliran listrik = *Electric Power Supply*
- 2 = Tombol Tekan = *Switch*
- 3 = Komutator
- 4 = Kontak Geser = *Sliding Contact*
- 5 = Piringan pembawa kontak geser = *Sliding Contact Cam*
- F = Supply aliran listrik untuk gerakan Maju (= *Forward*)
- R = Supply aliran listrik untuk gerakan Mundur (= *Reverse*)
- 6 = Motor listrik yang putarannya dapat dibalik
- 7 = Roda gigi penggerak
- 8 = Roda gigi yang mempunyai spie
- 9 = Poros berulir Trapesium/persegi empat yang beralur spie
- 10 = Alur spie pada poros berulir Trapesium/empat persegi
- 11 = Bushing yang berulir Trapesium atau empat persegi
- 12 = Badan Penghembus
- 13 = Mulut Penghembus
- 14 = Nok = *Cam*
- 15 = Saluran Masuk uap bekas
- 16 = Ruang Uap Bawah
- 17 = Ruang Uap Atas
- 18 = Mangkuk (Cup) yang ada lubangnya halus
- 19 = Kran Uap Utama
- 20 = Pegas Tekan untuk menekan Mangkuk yang berlubang halus
- 21 = Roller
- 22 = Tuas = *Rocker arm*
- 23 = Kran Uap Pelepas = *Relief Valve*
- 24 = Pegas Tekan yang menjaga agar *Relief Valve* senantiasa tertutup
- 25 = Saluran Pelepas = *Relief Line*
- 26 = Saluran Pelepas = *Relief Line*
- 27 = Ruang Uap antara
- 28 = Lubang pada badan penghembus
- 29 = Rumah Penghembus = *Shoot-blower Housing*
- 30 = Tembakan ketel
- 31 = Saluran Gas asap, dengan bagian-bagian ketel yang akan dibersihkan abu terbangnya dengan cara ditiup
- 32 = Lubang sembunyi shootblower pada tembakan ketel

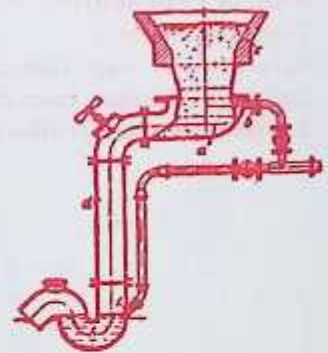


PENYEMPROT DEBU (DUST SHOOT BLOWER)

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 1 = Ruang uap utama | 5 = Nok |
| 2 = Mangkuk berlubang halus | 6 = Kran pelepas (relief valve) |
| 3 = Katup utama | 7 = Saluran pelepas (relief pipe) |
| 4 = Ruang antara | |



Transportasi Abu dengan Conveyor



Transportasi Abu dengan Hidrolis

35. Penangkap Debu atau *Dust Collector* atau *Praecipitator*

Gas asap sebelum dibuang ke luar melalui cerobong asap harus dibersihkan dahulu dari debu atau abu terbang, yang turut terbawa oleh gas asap, agar tidak menimbulkan pengotoran atau polusi terhadap lingkungan sekitarnya.

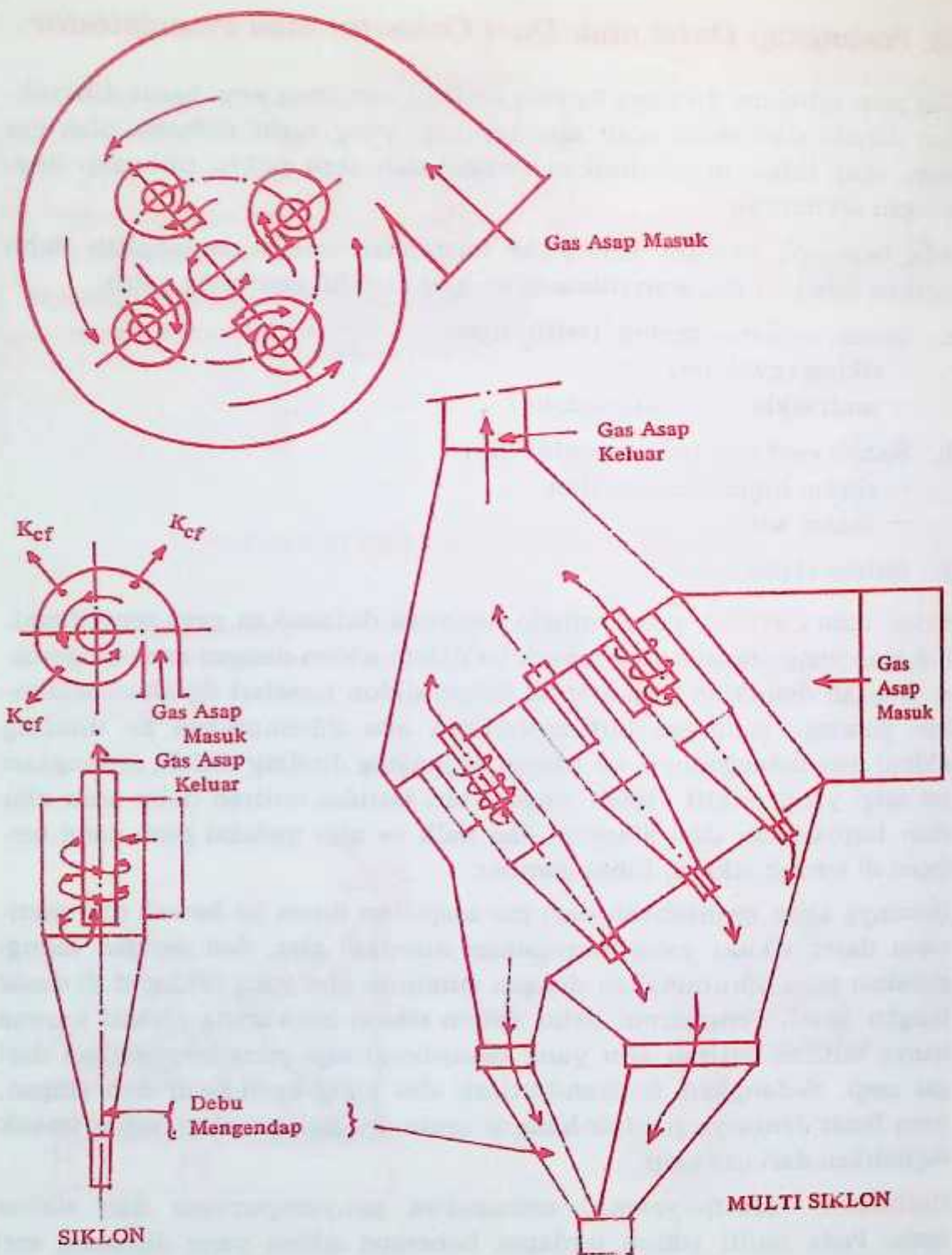
Ada beberapa macam alat yang digunakan untuk menangkap debu terbang sebelum gas asap dibuang ke luar melalui cerobong yaitu:

- a. Sistem mekanis kering, terdiri dari:
 - siklon (*cyclone*) dan
 - multisiklon (*multi-cyclone*)
- b. Sistem mekanis basah, terdiri dari:
 - sistem hujan buatan, dan
 - sistem adhesi.
- c. Sistem elektro-statis.

Siklon atau **Cyclone** yang prinsip kerjanya didasarkan gaya sentrifugal. Gas asap yang masih kotor masuk ke dalam siklon dengan arah tangensial. Dengan demikian gasp asap di dalam siklon tersebut dipaksa melakukan pusaran, sehingga butiran-butiran abu dihempaskan ke dinding siklon, dan menggelincir ke bawah sepanjang dinding siklon, sedangkan gas asap yang relatif lebih ringan dari butiran-butiran debu atau abu akan terpisahkan dari abunya, dan naik ke atas melalui pipa yang terdapat di tengah siklon. Lihat gambar.

Debunya akan terpisahkan dari gas asap dan turun ke bawah dan mencapai dasar siklon yang merupakan sumuran abu, dan dengan menggunakan pipa dihubungkan dengan sumuran abu yang terdapat di dasar tungku ketel. Pengumpul debu sistem siklon ini kurang efektif karena hanya butiran-butiran abu yang berat-berat saja yang terpisahkan dari gas asap. Sedangkan butiran-butiran abu yang kecil-kecil dan ringan, yang Berat Jenisnya hampir-hampir sama dengan gas asap, sukar untuk dipisahkan dari gas asap.

Multisiklon (*Multi-cyclone*) merupakan penyempurnaan dari siklon biasa. Pada multi siklon terdapat beberapa siklon yang dipasang seri atau bertingkat, sehingga setelah gas asap masuk dengan arah Tangensial ke dalam rumah utama siklon yang besar, butiran-butiran abu kasar terpisahkan dari gas asap, maka gas asap yang masih mengandung butiran-butiran yang sedang besarnya, dan sedang pula Berat Jenisnya, dimasukkan secara tangensial pada siklon-siklon kecil yang terdapat di dalam siklon induk (siklon besar, yang merupakan "rumah"



K_{cf} = Gaya Sentrifugal

GAMBAR : SIKLON DAN MULTI - SIKLON

dari siklon-siklon kecil tersebut). Butiran-butiran abu yang sedang besarnya dan sedang Berat Jenisnya akan terpisahkan dari gas asap pada siklon-siklon kecil tingkat kedua tersebut. Sedangkan butiran-butiran abu yang halus serta ringan, masih dapat lolos dari multi siklon tersebut.

Dengan demikian multi siklon itu pun masih belum efektif sepenuhnya, karena masih terdapat butiran-butiran abu yang halus serta ringan yang masih dapat lolos ke luar bersama gas asap meninggalkan cerobong. Namun demikian, baik siklon maupun multi siklon tersebut harganya murah. Sehingga untuk intalasi ketel yang dibangun di luar kota, jauh dari daerah pemukiman, penggunaan siklon dan multi siklon tersebut sudah cukup memadai.

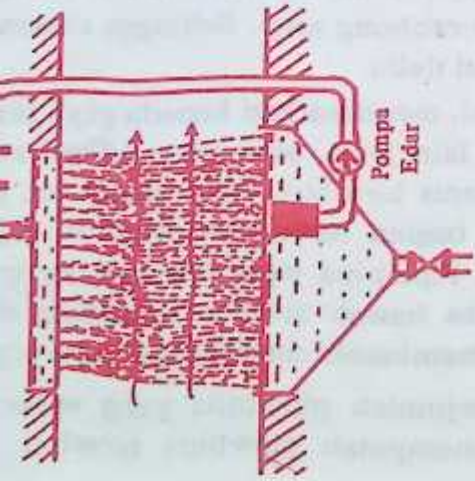
Pengumpul debu dengan sistem Hujan Buatan, tempat gas asap yang kotor dialirkan melalui tirai hujan buatan, sehingga butiran-butiran abu yang kebetulan dijatuhi butiran-butiran air hujan buatan tersebut akan terpisahkan dari gas asap, dan terbawa oleh butiran-butiran air hujan buatan tersebut ke kolam yang terdapat di dasar pengumpul debu tersebut.

Pengumpul debu sistem hujan buatan tersebut, juga masih dianggap kurang efektif karena hanya butiran-butiran abu yang kebetulan tepat satu garis dengan jatuhnya butiran air hujan buatan saja yang dapat terbawa oleh air hujan buatan tersebut dan terpisahkan dari gas asap. Butiran-butiran abu yang secara kebetulan tidak tepat dalam satu garis dengan jatuhnya butiran air hujan buatan, justru akan terdorong menjauhi butiran air hujan buatan yang sedang jatuh turun ke bawah.

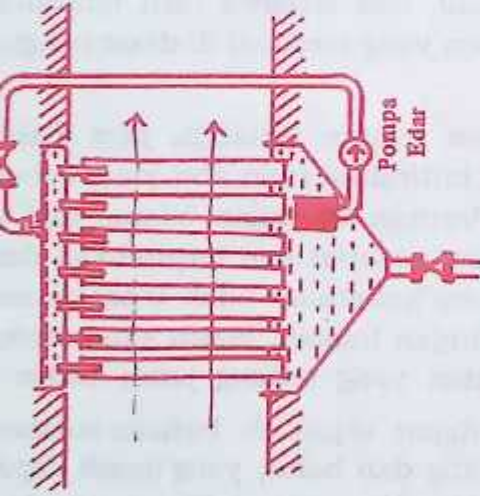
Dengan demikian masih terdapat sejumlah butiran-butiran abu baik yang kasar maupun yang sedang dan halus, yang masih dapat lolos dari jatuhnya butiran-butiran air hujan buatan tersebut, dan ke luar bersama-sama gas asap meninggalkan cerobong asap. Sehingga sistem ini kurang disukai sebagai alat pengumpul debu.

Pengumpul debu sistem Adhesi, mendasarkan kepada gaya tarik-menarik antara molekul-molekul dari lain jenis, atau gaya Adhesi antara molekul-molekul yang berlainan jenis tersebut. Pada sistem ini, air dituangkan pada pipa-pipa yang di bagian bawahnya dibuntu, dan tertanam pada kolam dasar di bawah. Pipa-pipa yang dituangi air ini bila telah penuh airnya akan tumpah ke bawah meleleh sepanjang dinding luar pipa-pipa tersebut, sehingga membasahi dinding luar pipa-pipa tersebut.

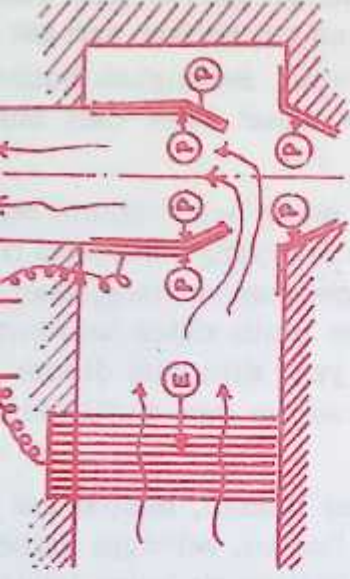
Gas asap dilewatkan pada sejumlah pipa-pipa yang senantiasa basah dindingnya tersebut, dan penempatan pipa-pipa tersebut dibuat ber-



B. SISTIM HUJAN BUATAN



C. SISTIM ADHESI



E = Elektroda-elektroda bermuatan Negatif
 P = Pelat-pelat pelapis bermuatan Positif

D. SISTIM ELEKTRO - STATIS

selang-seling, sehingga aliran gas asap akan senantiasa menumbuk dinding pipa-pipa yang selalu basah tersebut. Gaya Adhesi antara molekul-molekul abu dan molekul-molekul air yang membasahi dinding pipa-pipa tersebut, akan menarik serta memisahkan butiran-butiran abu, baik yang kasar, sedang maupun halus butiran-butirannya, dan membawanya serta sepanjang dinding pipa-pipa sebelah luar ke bawah, dan mencapai kolam pengumpul yang terdapat di dasar pengumpul debu tersebut.

Dengan cara ini, maka semua butiran-butiran abu akan terperangkap oleh dinding pipa-pipa yang selalu basah tanpa terkecuali. Dengan demikian cara kerja pengumpul debu sistem adhesi ini sangat efektif. Lebih-lebih bila yang digunakan sebagai media adhesi tersebut ialah minyak pelumas bekas, maka daya adhesinya sangat kuat. Namun minyak pelumas bekas dapat membahayakan bila digunakan untuk pengumpul debu sistem adhesi ini, karena mudah menimbulkan bahaya kebakaran. Oleh karena itu, penggunaan minyak pelumas bekas dalam pengumpul debu sistem adhesi ini sedapat mungkin dihindari.

Pada pengumpul debu sistem elektro-statis, maka gas asap yang kotor dilewatkan pada kamar yang berisi tirai-tirai elektroda, yang terbuat dari tembaga, atau kuningan, ataupun arang. Elektroda-elektroda ini diberi aliran listrik arus searah dengan muatan minus. Dengan demikian setiap butiran-butiran debu dalam gas asap akan diberi muatan negatif dengan tegangan tinggi sekitar 30.000 sampai 50.000 Volt.

Gas asap yang mengandung butiran-butiran debu yang bermuatan negatif tersebut dialirkan melalui dasar cerobong yang dilapisi dengan pelat-pelat pelapis dari pelat kuningan atau pelat tembaga yang diberi muatan positif. Antara batang-batang elektroda yang bermuatan negatif dan pelat-pelat pelapis yang bermuatan positif tersebut tegangannya mencapai 30.000 hingga 50.000 Volt.

Butiran-butiran debu yang bermuatan negatif tersebut pada saat mencapai dasar cerobong yang dilapisi pelat-pelat yang bermuatan positif akan tertarik oleh pelat-pelat bermuatan positif tersebut, dan begitu menyentuh pelat tersebut akan melepaskan muatannya menjadi netral kembali, dan jatuh ke sumuran abu yang terdapat di dasar cerobong tersebut.

Karena semua butiran-butiran debu pada saat melewati batang-batang elektroda bermuatan negatif akan dimuati dengan muatan negatif, maka dengan demikian semua butiran-butiran debu, baik yang kasar, sedang, maupun halus, akan terpisahkan dari gas asap di dasar ce-

robong oleh pelat-pelat bermuatan positif tersebut. Dengan demikian pembersihan debunya dapat efektif.

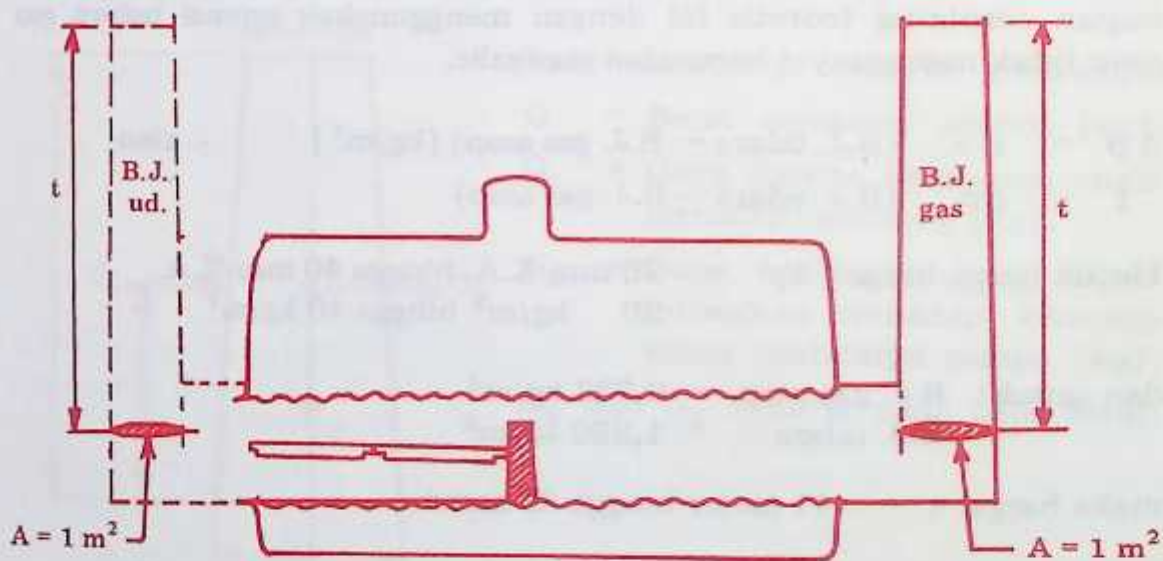
Pengumpul debu jenis elektro-statis ini banyak digunakan dalam ketel uap. Penggunaan energi listriknya juga rendah, sekitar 3 hingga 5 kilowatt saja. Keberatannya ialah harus dipunyai penggubah arus listrik, dari arus bolak-balik menjadi arus searah dengan tegangan yang tinggi pula. Sehingga memerlukan biaya investasi khusus untuk melayaninya.

BAB VIII

CEROBONG DAN VENTILATOR

36. Cerobong

Cerobong digunakan untuk mengalirkan gas asap ke luar dari ketel uap dengan kecepatan tertentu, dan digunakan untuk mengatasi geseran-geseran yang terjadi terhadap aliran gas asap, mulai dari rangka bakar atau pembakar (burner), hingga ke luar dari cerobong. Dengan kata lain: untuk menimbulkan isapan cerobong atau *Stack Draught*. Di samping itu, digunakan untuk membuang gas asap setinggi mungkin sehingga tidak mengganggu lingkungan sekitarnya.



Timbulnya isapan cerobong disebabkan karena perbedaan Berat Jenis, antara Berat Jenis Udara (B.J. udara) dengan Berat Jenis Gas asap (B.J. gas asap pada temperatur gas asap $t_g^{\circ}C$)

Bila tinggi cerobong dimisalkan t meter, dan luas irisan cerobong $A = 1 \text{ m}^2$, maka berat suatu kolom udara bayangan dengan luas irisan $A = 1 \text{ m}^2$ dan tinggi t meter, ialah:

$$G_{\text{udara}} = 1 [\text{m}^2] \times t [\text{m}] \times \text{B.J. udara} [\text{kg/m}^3]$$

Berat kolom gas asap dengan luas irisan kolom yang sama dan tinggi kolom yang sama pula ialah:

$$G_{\text{gas asap}} = 1 \text{ [m}^2\text{]} \times t \text{ [m]} \times \text{B.J. gas asap [kg/m}^3\text{]}$$

Bila di dasar kolom terdapat tekanan sebesar p [kg/m²] maka selisih berat udara dikurangi berat gas asap sebanyak:

$$\begin{aligned} &= (p \times 1 + t \times \text{B.J. udara} \times 1) - (p \times 1 + t \times \text{B.J. gas} \times 1) = \\ &= t \times (\text{B.J. udara} - \text{B.J. gas asap}) \text{ [kg]} \end{aligned}$$

karena irisan kolom luasnya 1 [m²] maka perbedaan tekanan di dasar kolom menjadi sebesar:

$$\Delta p = t \times (\text{B.J. udara} - \text{B.J. gas asap}) \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

Perbedaan tekanan ini disebut Isapan Cerobong Teoretis atau H_{teoretis} , isapan cerobong teoretis ini dengan menggunakan asumsi bahwa gas asap tidak mempunyai kecepatan mengalir.

$$\begin{aligned} \Delta p &= t \times (\text{B.J. udara} - \text{B.J. gas asap}) \text{ [kg/m}^2\text{]} && \text{atau} \\ t &= \Delta p : (\text{B.J. udara} - \text{B.J. gas asap}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk harga-harga } \Delta p &= 20 \text{ mm.K.A. hingga } 40 \text{ mm K.A.} \\ &= 20 \text{ kg/m}^2 \text{ hingga } 40 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{dan untuk: B.J. gas asap} &= 0,733 \text{ kg/m}^3 \\ \text{B.J. udara} &= 1,220 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

maka harga $t = 41$ meter hingga 82 meter.

Bila gas asap mulai mengalir dengan kecepatan v_g m/detik maka isapan cerobong teoretis tersebut harus dikurangi dengan isapan cerobong dinamis atau H_{dinamis} yang disebabkan timbulnya kecepatan gas asap tersebut. Di samping itu masih dikurangi lagi dengan H_{geseran} yang digunakan untuk mengatasi tahanan geseran terhadap aliran gas asap yang terdapat di sepanjang saluran gas asap tersebut.

Besarnya isapan cerobong dinamis atau H_{dinamis} sebesar =

$$= (v_{\text{gas}}^2 / 2.g) \times \text{B.J. gas asap [mm. K A]}$$

- bila: v_{angin} = kecepatan angin dalam [meter/detik]
 g = percepatan gravitasi bumi = 9,81 [m/det.2]
 $B.J.\text{udara}$ = 1,22 [kg/m³]
 t = tinggi cerobong dalam [m]
 D = diameter pada dasar cerobong dalam [m]
 d = diameter puncak cerobong dalam [m]

Gaya horizontal yang diperhitungkan terhadap kemungkinan timbulnya gempa:

$$G_g = 0,1 G \text{ [kg]}$$

Agar cerobong tidak roboh terguling pada titik A maka:

$$(G_a + G_g) \times s = G \times D/2$$

Diameter cerobong diperhitungkan dengan mengingat kecepatan gas asap yang diizinkan melewati cerobong, yaitu:

- V_{gas} = 4 hingga 8 meter/detik bila isapan cerobong berlangsung secara alamiah.
 = 15 hingga 20 meter/detik bila isapan cerobong berlangsung secara paksa atau Forced Draught.

37. Ventilator

Bila isapan cerobong hanya didasarkan kepada isapan cerobong alamiah saja, maka cerobong harus dibuat tinggi sekali. Lagi pula pada saat mulai menyalakan api di dalam tungku atau initial firing, akan didapat kesukaran, yaitu sepanjang saluran gas asap temperaturnya masih rendah pada saat itu, sehingga perbedaan antara Berat Jenis udara luar dengan Berat Jenis gas asap belum begitu besar, atau bahkan praktis masih belum ada perbedaan Berat Jenis, sehingga isapan cerobong juga masih rendah, hampir-hampir nol.

Dengan demikian sukar dibangkitkan isapan cerobong yang besar pada saat ketel mulai dinyalakan, yang dengan demikian menyebabkan proses initial firing menjadi sangat lamban.

Untuk memperbesar harga lapisan cerobong efektif H_e maka digunakan ventilator-ventilator atau Fan, untuk menciptakan isapan cerobong paksa, sehingga harga Isapan Cerobon teoretis H_{teoretis} dapat diperbesar.

CONTOH:

Diharapkan ketel menghasilkan H_{efektif} 20 mm.K.A.

Kecepatan gas asap rata-rata lewat cerobong $v_{\text{gas}} = 20$ m/detik.

Berat Jenis gas asap $0,733$ [kg/m^3].

berat Jenis udara = $1,22$ [kg/m^3].

Tinggi cerobong = 50 meter.

$H_{\text{geseran}} = 20$ mm.K.A. (dimisalkan); maka:

$H_{\text{dinamis}} = [20^2 : (2 \times 9,81)] \times 0,733 = 14,94$ mm.K.A. =
15 mm.K.A.

Dengan $t = 50$ meter, maka $\Delta p = 50 \times (1,22 - 0,733)$ mm.K.A.
= 24,35 mm.K.A.

$H_{\text{teoretis}} = H_e + H_{\text{dinamis}} + H_{\text{geseran}}$
= $(20 + 15 + 20)$ mm.K.A. = 55 mm. Kolom Air.

$H_{\text{teoretis}} = \Delta p + \Delta p_{\text{ventilator}} = 55$ mm. Kolom Air.

$\Delta p_{\text{ventilator}} = (55 - 24,35)$ mm. Kolom Air
= 30,65 mm Kolom Air.

Daya Fan didapat dari rumus:

$$\text{Daya Fan} = \frac{G_v \times \Delta p_{\text{ventilator}}}{\eta_{\text{Fan}} \times 102} \quad [\text{KW}]$$

$G_v =$ Jumlah gas asap yang lewat (m^3 /detik)

$\eta_{\text{Fan}} =$ Efisiensi Fan, dimisalkan = 0,75

Untuk sebuah ketel uap yang menghasilkan $S = 100$ ton/jam pada tekanan $80 \text{ kg}/\text{cm}^2$ dan 540°C dengan entalpi uap $i' = 3495 \text{ KJ}/\text{kg}$, dengan air masuk ketel bertemperatur 120°C dan entalpinya $w_{120^\circ} = 502 \text{ KJ}/\text{kg}$, akan membutuhkan panas:

$Q = 100.000 \text{ kg}/\text{j} \times (3495 - 502) \text{ KJ}/\text{kg} = 299.300.000 \text{ KJ}/\text{jam}$.

Bila ketel dengan efisiensi 0,80 dan menggunakan bahan bakar minyak bakar dengan nilai pembakaran terendah $Q_{\text{Low}} = 40.000 \text{ KJ}/\text{kg}$, maka jumlah bahan bakar yang dibutuhkan =

$B_e = Q : (\eta \times Q_{\text{Low}}) =$

$B_e = 299.300.000 \text{ KJ}/\text{jam} : (0,80 \times 40.000) \text{ KJ}/\text{kg} =$

$B_e = 9353 \text{ kg}/\text{jam}$

Dengan asumsi gas asap yang terbentuk $G_v = 14,56 \text{ nm}^3/\text{kg}$, maka:

$$\begin{aligned} G_{v \text{ total}} &= 9353 \text{ kg/j} \times 14,56 \text{ nm}^3/\text{kg} \text{ bahan bakar} \\ &= 136.180 \text{ nm}^3/\text{jam} = 37,83 \text{ m}^3/\text{detik} \end{aligned}$$

$$\text{Daya Fan} = 37,83 \text{ m}^3/\text{detik} \times 30,65 \text{ kg/m}^2 : (0,75 \times 102 \text{ kgm/detik KW}) = 15,16 \text{ KW.}$$

Dengan demikian diperlukan Daya Fan sebesar 15,16 KW untuk menciptakan isapan cerobong paksa agar menghasilkan isapan cerobong efektif $H_e = 20 \text{ mm Kolom Air}$.

Dari contoh perhitungan tersebut ternyata bahwa makin tinggi cerobong t makin besar pula Δp ; yang dengan demikian $\Delta p_{\text{ventilator}}$ menjadi berkurang untuk isapan cerobong efektif H_e yang sama. Dengan demikian berarti makin berkurang pula besarnya Daya Fan yang diperlukan, atau Fan-nya makin kecil.

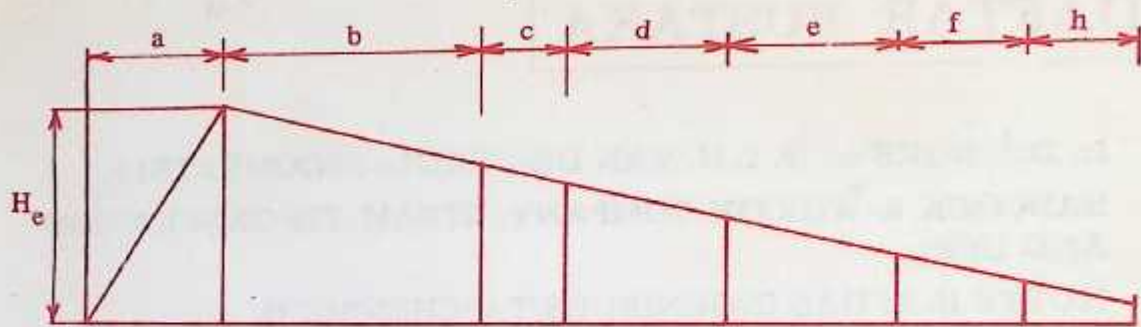
Oleh karena itu Daya Fan berbanding terbalik dengan tinggi cerobong. Fan atau ventilator dapat dipasang sebelum tungku, yang disebut Fan Tekan atau *Forced Draught Fan (F.D.F.)* atau sebelum ke luar dari cerobong, yang disebut Fan Isap atau *Induced Draught Fan (I.D.F.)*, atau dapat pula dipasang dua-duanya; baik F.D.F. maupun I.D.F. bersama-sama.

Daya Fan seperti yang telah dihitung, dapat berupa F.D.F. saja, atau dapat berupa I.D.F. saja, ataupun F.D.F. bersamaan dengan I.D.F. yang daya totalnya diperlukan seperti yang telah dihitung.

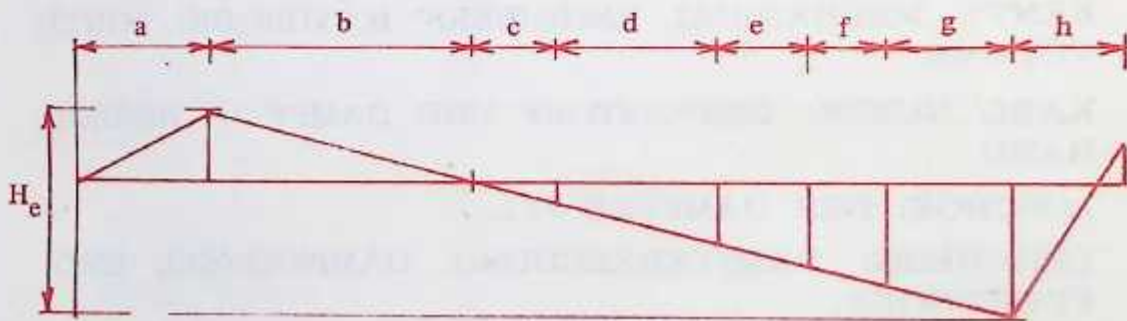
Jika hanya menggunakan F.D.F. saja, maka tungkunya bertekanan melebihi dari tekanan udara di luar, yang disebut Tungku Bertekanan atau *Pressurized Furnace*, sedangkan bila hanya menggunakan I.D.F. saja, maka tungkunya bertekanan lebih rendah dari tekanan udara di luar atau disebut dengan *Underpressure Furnace*. Dan bila dipasang baik F.D.F. maupun I.D.F. bersamaan sedemikian sehingga tekanan di dalam tungku sama dengan tekanan udara di luar disebut Tungku dengan *Balanced Draught*.

Keterangan gambar:

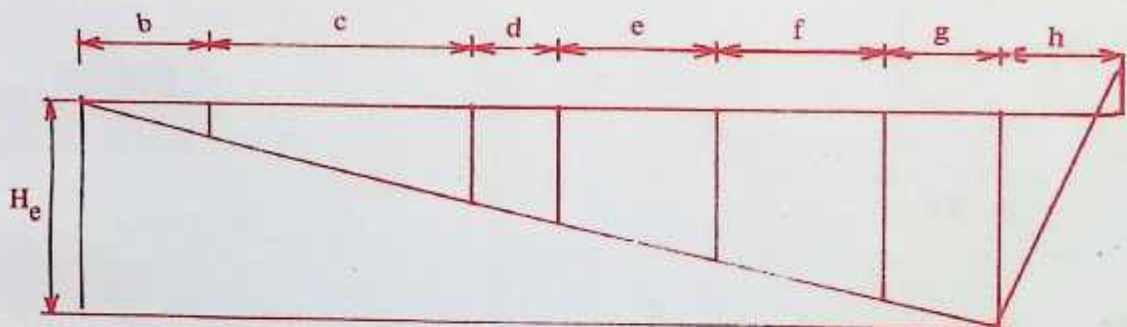
- a = di Fan Tekan (F.D.F.)
- b = di dalam tungku
- c = di dalam Superheater Pancaran
- d = di Superheater Konveksi dan Reheater
- e = di dalam Ekonomiser
- f. = di dalam Pemanas Udara
- g = di dalam Fan Isap (I.D.F.)
- h = di dalam cerobong asap



SISTEM PRESSURIZED FURNACE



SISTEM BALANCED DRAUGHT



SISTEM UNDERPRESSURE FURNACE

Keterangan:

- a = di Fan Tekan (F.D.F.)
- b = di dalam Tungku
- c = pada Superheater Pancaran
- d = pada Superheater Konveksi dan Reheater
- e = di dalam Ekonomiser
- f = di dalam Pemanas Udara
- g = pada Fan Isal (I.D.F.)
- h = di dalam Cerobong Asap