



PENERBIT ANDI

Robert J. Kodoatie

Tata Ruang Air Tanah



PERPUSTAKAAN SV - UNDIP

TATA RUANG AIR TANAH

PERPUSTAKAAN SV - UNDIP	
No. Inv.	:
No. Klasifikasi	:
Tgl.	:
Sumber	:

TATA RUANG AIR TANAH

Robert J. Kodoatie

Penerbit ANDI Yogyakarta

Tata Ruang Air Tanah

Oleh: Robert J. Kodoatie

Hak Cipta © 2012 pada Penulis

Desain Cover : Bowo

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

Penerbit: C.V ANDI OFFSET (Penerbit ANDI)

Jl. Beo 38-40, Telp. (0274) 561881 (Hunting), Fax. (0274) 588282 Yogyakarta 55281

Percetakan: ANDI OFFSET

Jl. Beo 38-40, Telp. (0274) 561881 (Hunting), Fax. (0274) 588282 Yogyakarta 55281

Perpustakaan Nasional: Katalog dalam Terbitan (KDT)

Kodoatie, Robert J.

Tata Ruang Air Tanah / Robert J. Kodoatie;

– Ed. I. – Yogyakarta: ANDI,

21 20 19 18 17 16 15 14 13 12

xxviii + 512 hlm.; 19 x 23 Cm.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

ISBN: 978 – 979 – 29 – 3250 – 8

I. Judul

1. Water Supply

DDC'21 : 628.1

*Kepada Sang Maha Esa & Maha Penyayang
Doa syukur dan terima kasih hamba haturkan
atas Segala Anugerah, Rahmat dan BimbinganNya
sehingga tersusun untaian kata-kata
yang semoga berguna bagi sesama.*

Kehidupan adalah Anugerah Tuhan. Air merupakan material yang membuat kehidupan terjadi di bumi. Mempertahankan keberadaan air secara berkelanjutan maka kita juga mempertahankan kehidupan yang berarti pula kita mempertahankan Anugerah Tuhan.

*Teruntuk
Woro, Prima dan Wisnu atas kebahagiaan, dukungan, kesabaran dan pengertiannya
Ibunda atas doa dan restunya.*

KATA PENGANTAR

Menurut Keputusan Presiden No. 26 Tahun 2011 Tentang Penetapan Cekungan Air Tanah (CAT), wilayah daratan Indonesia dibagi menjadi daerah CAT dan Bukan (Non) CAT atau CAT Tidak Potensial. Luas wilayah daratan Indonesia adalah 1,922,600 km² (100%), luas CAT adalah 907,615 km² (atau 47,2% luas daratan) sedangkan luas Non-CAT adalah 1,014,985 km² (atau 52,8% luas daratan).

CAT atau cekungan air tanah merupakan terjemahan dari *groundwater basin*. Daerah CAT berarti di daerah tersebut ada *groundwater* dan *soil water* sedangkan di daerah Non-CAT berarti di daerah tersebut tidak ada *groundwater* dan hanya ada *soil water*. Di dalam Bahasa Indonesia *groundwater* dan *soil water* diterjemahkan sama-sama dengan air tanah. Padahal *groundwater* dan *soil water* mempunyai substansi yang sama sekaligus berbeda. Substansi yang sama adalah baik *groundwater* maupun *soil water* ada di bawah muka bumi. Substansi yang berbeda adalah wilayah *groundwater* merupakan cekungan air tanah (*groundwater basin*) yang terbagi dalam air tanah bebas yaitu air tanah yang berada atau di dalam akuifer bebas (*unconfined aquifer*) dan air tanah tertekan yaitu air tanah yang berada atau di dalam akuifer tertekan (*confined aquifer*). Sedangkan *soil water* adalah air di dekat permukaan tanah atau di daerah *vadoze zone* atau *soil zone* (umumnya) tempat akar tanaman mencari dan mendapatkan air.

Dari ketentuan dalam KepPres No. 26 Tahun 2011 setiap cekungan air tanah selalu ada *unconfined aquifer* namun belum tentu ada *confined aquifer*. Kapasitas *unconfined aquifer* selalu lebih besar dibandingkan dengan kapasitas *confined aquifer*. Dalam kehidupan sehari-hari sering ada istilah air tanah dangkal yaitu air yang ada pada sumur-sumur penduduk dan air tanah dalam. Biasanya air tanah dalam diambil dengan menggunakan pompa. Ada juga istilah air artesis yang diambil dari sumber yang lebih dalam yaitu pada *confined aquifer*. Sering air tersebut bisa keluar sendiri dari sumur pompa karena mempunyai tekanan *piezometric* yang lebih tinggi dari muka sumur.

Selain dikaitkan dengan keberadaan air, daerah CAT dan daerah Non-CAT mempunyai karakter yang berbeda dari sisi geologi, keberadaan dan gerakan air baik di bawah muka bumi maupun di atas muka bumi sehingga mempengaruhi morfologi *fluvial* di bagian atasnya baik di daerah aliran sungai (DAS) maupun di sistem jaringan sungai. Akuifer dengan aliran air tanah melalui ruang antar butir/partikel tanah umumnya merupakan akuifer yang terletak di daerah aluvial. Di daerah ini materialnya berupa tanah (*soil*) atau endapan (*sediments*) yang lepas (*loose*), belum termampatkan (*uncosolidated*), tak melekat (*not cemented*) bersama menjadi batuan padat, tererosi, tersimpan dan terbentuk (*reshaped*) oleh air dalam suatu bentuk/kondisi (*form*) bukan bentukan laut (*non marine setting*). Dominan CAT terletak di daerah aluvial. Sungai yang melalui daerah aluvial disebut sungai aluvial dan merupakan sungai dengan sifat aliran dalam regim (*regime flow*). Pengertian sungai dengan *regime flow* adalah sungai yang berusaha atau berubah dalam upaya mencapai keseimbangan antara degradasi dan aggradasi sedimen. CAT dan sistem fluvial di daerah ini akan saling mempengaruhi dalam proses pencapaian keseimbangan alam. Namun ada juga CAT yang tidak terletak di daerah aluvial.

Sedangkan sungai di daerah Non-CAT terletak di daerah non-aluvial dan merupakan sungai bukan regim aliran (*non-regime flow*). Karakter sungai ini dipengaruhi oleh batuan dasar sungai (*river bed rock*). Sungai di daerah Non-CAT sering mengalami perubahan penampang dan arah alirannya. Daerah aliran sungai (DAS) atau tata guna lahan di daerah Non-CAT dipengaruhi banyak faktor, diantaranya: geologi, geomorfik DAS, iklim, hidrologi, binatang, manusia serta sejarah terbentuknya DAS dan sistem sungainya. Gerakan tanah atau pergeseran tanah di muka bumi terjadi disebabkan oleh faktor-faktor tersebut. Dengan kata lain gerakan tanah pada tata guna lahan (*land-use*) DAS di daerah Non-CAT (umumnya dan sering) terjadi akibat faktor-faktor tersebut. Hal tersebut akan menimbulkan bencana dan persoalan bila dilakukan pembangunan daerah tersebut. Fakta bencana besar dan persoalan yang telah terjadi adalah bencana-bencana Wasior (Papua), Leuser (Sumatra), longsor di Banjarnegara dan Purworejo (Jawa), persoalan gerakan tanah dalam pembangunan Jalan Tol Semarang Solo di daerah Susukan dan Penggaron (Ungaran) dan amblesnya beberapa bangunan pada Proyek Hambalang. Bencana-bencana besar dan persoalan-persoalan tersebut terletak di daerah Non-CAT.

Daerah aliran dan sistem jaringan sungai (*fluvial system*) Pulau Sumatra dan Pulau Jawa umumnya mempunyai karakter yang dipengaruhi oleh kondisi aluvial dan non-aluvial. Pulau-pulau lainnya mempunyai karakter yang spesifik baik di daerah CAT maupun daerah Non-CAT.

Di Indonesia ada dua musim: musim hujan dan musim kemarau. Untuk analisis keberadaan air dilakukan kajian *peak flow*/aliran puncak dan *low flow*/aliran rendah. *Peak flow* pada waktu musim hujan dikaji dengan lebih menekankan pada kelebihan air yang bisa menjadi bencana banjir. Artinya, *peak flow* dilakukan untuk pengelolaan banjir/*flood management*. Untuk ketersediaan air, kajian *peak flow* lebih ditekankan dalam upaya menampung air hujan sebanyak-banyaknya sebagai cadangan air di musim kemarau. *Low flow* lebih dominan untuk kajian ketersediaan air pada waktu musim kemarau. Aliran sungai yang tetap mengalir pada musim kemarau adalah berasal dari aliran antara (*interflow*) dan aliran air tanah (*groundwater flow*) yang dikenal dengan nama aliran dasar (*base flow*) yang menembus permukaan tanah melalui regim sungai sebagai *discharge* air tanah. Pada musim kemarau andalan utama kebutuhan air diperoleh dari air tanah (*groundwater*). Pada musim ini aliran dasar (*base flow*) di daerah CAT dan aliran antara (*interflow*) yang berasal dari air tanah (baik *groundwater* maupun *soil water*) mengisi sungai-sungai sehingga aliran sungai masih ada. Air tanah sebagai *base flow* berkontribusi keseimbangan air sebesar 10 – 30 % curah hujan. Di daerah Non-CAT hanya *interflow* yang menjadi andalan. Implikasinya daerah CAT mempunyai ketersediaan air yang lebih besar dibandingkan dengan daerah Non-CAT. Dengan kata lain daerah CAT maupun daerah Non-CAT mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap aliran puncak dan aliran rendah tersebut.

Buku ini mengulas dan menguraikan tata ruang air tanah baik di daerah CAT maupun Non-CAT. Uraian ini dimulai dari penjelasan tentang bumi, dilanjutkan dengan uraian air tanah, Hukum Darcy dan sifat-sifat tanah. Air tanah yang mengalir melalui media *porous* dijelaskan dalam Bab Hidraulika Air Tanah. Selanjutnya diuraikan tentang ruang air tanah baik di CAT maupun Non-CAT. Kondisi ruang air tanah tersebut memberi pengaruh yang signifikan terhadap rencana tata ruang wilayah (RTRW) dan Pengelolaan Sumber Daya Air. Manajemen air tanah terpadu dan manajemen air tanah berdasarkan PP

No. 43 Tahun 2008 diuraikan. Akhir dari bab dalam buku ini adalah tentang penataan ruang air tanah, harmoni dan integrasi.

Dominan isi buku ini adalah tentang kuantitas air tanah. Sedangkan kualitas air tanah tidak dijelaskan karena terkait dengan kimia air tanah yang merupakan materi yang cukup luas dan banyak terkait dengan air tanah (*soil water* dan *groundwater*), batuan dan geologi.

Akhirnya disadari tiada gading yang tak retak, sehingga dalam penulisan buku ini masih banyak kesalahan dan kekurangan yang terjadi. Saran dan masukan sangat diharapkan dan penulis berasa agar buku ini dapat bermanfaat.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
BAB 1. BUMI (EARTH)	1
1.1 UMUM	1
1.2 KERAK BUMI (<i>EARTH CRUST</i>)	3
1.3 FORMASI BATUAN PEMBAWA AIR.....	5
1.3.1 <i>Batuan Beku</i>	9
1.3.1.1 Batuan Vulkanik (Batuan Beku Ekstrusif)	9
1.3.1.2 Batuan Plutonik (Batuan Beku Intrusif).....	10
1.3.2 <i>Batuan Sedimen</i>	10
1.3.2.1 Batuan Pasir	11
1.3.2.2 Batuan gamping	12
1.3.3 <i>Batuan Malihan (Metamorf)</i>	14
1.4 LITOLOGI, STRATIGRAFI DAN GEOLOGI STRUKTUR	15
1.5 ATMOSPHERE, HYDROSPHERE, BIOSPHERE DAN LITHOSPHERE	16
1.6 REGOLITH.....	22
1.7 TANAH (<i>SOIL</i>)	26
1.7.1 <i>Horizon Tanah (Soil Horizon)</i>	27
1.7.2 <i>Ukuran Dan Organisasi Partikel Tanah</i>	31
BAB 2. AIR TANAH	35
2.1 AIR DAN KEHIDUPAN	35
2.2 SUMBER DAYA AIR.....	39
2.3 FENOMENA AIR TANAH (<i>GROUNDWATER DAN SOIL WATER</i>)	40
2.4 PENGERTIAN <i>GROUNDWATER DAN SOIL WATER</i>	43
2.5 KOMPOSISI, PERAN DAN KONTRIBUSI AIR TANAH.....	45
2.6 SIKLUS HIDROLOGI	50
2.6.1 <i>Siklus hidrologi Daerah CAT</i>	52
2.6.2 <i>Siklus hidrologi Daerah Bukan (Non) CAT</i>	56
2.6.3 <i>Siklus Hidrologi Daerah Non-CAT dan CAT</i>	61
2.7 KOMPONEN SIKLUS HIDROLOGI AIR TANAH	65
2.7.1 <i>Aliran Dasar (Baseflow)</i>	66

2.7.2	Return Flow	67
2.7.3	Throughflow dan Interflow (Aliran Antara)	68
2.7.4	Infiltrasi dan Perkolasi.....	70
2.7.5	Stemflow (Aliran Batang/Gagang).....	72
2.7.6	Interception dan Throughfall	75
2.7.7	Aliran Kapiler.....	76
2.7.8	Aliran Permukaan (Run-Off).....	77
2.7.9	Litter Flow	79
2.8	MATA AIR	79
2.8.1	Pengertian Mata Air.....	79
2.8.2	Klasifikasi Mata Air	81
2.8.3	Koreksi UU No. 7 Tahun 2004 Untuk Kata Mata Air	86
2.9	KESEIMBANGAN GLOBAL AIR DALAM SIKLUS HIDROLOGI.....	89
BAB 3. HUKUM DARCY DAN SIFAT-SIFAT TANAH		95
3.1	ASUMSI DUPUIT-FORCHHEIMER	97
3.2	VALIDITAS HUKUM DARCY.....	98
3.3	POTENSI FLUIDA	99
3.3.1	Piezometer	101
3.3.2	Muka Air Tanah dan Permukaan Potensiometris	103
3.3.3	Potensi Fluida Untuk Air Tanah, Aliran Pada Saluran Terbuka dan Pipa	104
3.4	KONDUKTIVITAS HIDRAULIK DAN PERMEABILITAS.....	106
3.4.1	Konduktivitas Hidraulik K	107
3.4.2	Permeabilitas k.....	108
3.4.3	Nilai K dan k	109
3.5	PARAMETER ALIRAN AIR TANAH.....	110
3.5.1	Tampungan Spesifik (Specific Storage) S_o	110
3.5.2	Storativitas (S).....	112
3.5.3	Transmisifitas (T).....	112
3.5.4	Difusifitas (D).....	112
3.6	TEKSTUR TANAH.....	112
3.7	GRADASI DAN SORTIR.....	117
3.8	KARAKTER FISIK TANAH.....	119
3.8.1	Porositas dan Rasio Void.....	121
3.8.2	Specific Yield (Sy).....	122
3.8.3	Specific Retention (S_R)	124
3.8.4	Porositas, Specific Retention dan Specific Yield	125
3.8.5	Safe Yield dan Sustained Yield.....	127
3.8.6	Kadar Air (Water Content) θ	128
3.8.7	Kadar Air Gravimetri (Gravimetry Water Content)	128

3.8.8	<i>Derajat Saturasi</i>	128
3.9	TANAH BERBUTIR HALUS (LEMPUNG DAN LANAU)	129
3.9.1	<i>Batas-Batas Atterberg</i>	129
3.9.2	<i>Lempung (Clay)</i>	130
3.10	KOMPRESIBILITAS DAN TEGANGAN EFEKTIF	134
3.11	HETEROGENITAS DAN ANISOTROPY	137
BAB 4.	HIDRAULIKA AIR TANAH	141
4.1	ACUAN REFERENSI	141
4.2	PERSAMAAN UNTUK ALIRAN FLUIDA	143
4.3	ASUMSI DAN BATASAN	147
4.4	PERSAMAAN DASAR ALIRAN AIR TANAH	148
4.4.1	<i>Persamaan Dasar Aliran Air pada Unconfined Aquifer</i>	148
4.4.2	<i>Persamaan Dasar Aliran Air pada Confined Aquifer</i>	151
4.4.3	<i>Persamaan Laplace</i>	152
4.4.4	<i>Sifat-sifat Umum Persamaan Aliran Air tanah</i>	153
4.5	ALIRAN TUNAK	154
4.5.1	<i>Unconfined Aquifer</i>	155
4.5.1.1	<i>Aliran Air Melalui Akuifer Persegi Panjang</i>	155
4.5.1.2	<i>Aliran Air Melalui Akuifer Persegi Panjang dengan Recharge</i>	156
4.5.1.3	<i>Aliran Radial dengan Recharge</i>	156
4.5.2	<i>Confined Aquifer</i>	157
4.5.2.1	<i>Aliran Air tanah yang melalui Akuifer Persegi Panjang</i>	157
4.5.2.2	<i>Aliran Radial</i>	158
4.5.2.3	<i>Aliran Radial dengan Sumur diberi Saringan Pasir Kasar</i>	159
4.5.3	<i>Semi Confined Aquifer (Leaky Aquifer)</i>	159
4.5.3.1	<i>Aliran Air tanah yang melalui Akuifer Persegi Panjang</i>	160
4.5.3.2	<i>Gabungan Semi Confined dan Confined Aquifer</i>	161
4.5.3.3	<i>Aliran Radial</i>	162
4.6	ALIRAN TIDAK TUNAK	165
4.6.1	<i>Aliran Radial Pada Confined Aquifer</i>	166
4.6.2	<i>Aliran Radial Pada Semi Confined Aquifer</i>	168
4.6.3	<i>Aliran Radial Pada Unconfined Aquifer</i>	173
4.6.3.1	<i>Dengan Penundaan</i>	174
4.6.3.2	<i>Tanpa Penundaan</i>	177
4.7	BERLAKU HANYA PADA DAERAH CAT	177
BAB 5.	RUANG AIR TANAH	181
5.1	DEFINISI DAN KRITERIA CAT DAN NON-CAT	181
5.2	SEBARAN CAT DAN NON-CAT DI INDONESIA	190
5.3	CAT	200
5.3.1	<i>Sebaran CAT di Indonesia</i>	201

5.3.2	Contoh Detail Peta CAT Suatu Lokasi	203
5.3.3	Potongan Melintang CAT dan Baseflow.....	205
5.4	KOMPONEN CAT	208
5.4.1	Akuifer Bebas (<i>Unconfined Aquifer</i>)	209
5.4.2	Akuifer Tertekan (<i>Confined Aquifer</i>)	214
5.4.3	<i>Semi Confined (Leaky) Aquifer</i>	215
5.5	PENGELOMPOKAN AKUIFER INDONESIA.....	217
5.6	BATAS CEKUNGAN AIR TANAH.....	222
5.7	PENENTUAN BATAS, PENAMAAN DAN PENETAPAN CEKUNGAN AIR TANAH	226
5.7.1	Penentuan Batas Cekungan Air tanah	226
5.7.1.1	Batas Lateral	226
5.7.1.2	Batas Vertikal	228
5.7.2	Penamaan Cekungan Air tanah	229
5.7.3	Penetapan Cekungan Air Tanah.....	230
5.8	DAERAH IMBUHAN DAN DAERAH LEPASAN AIR TANAH	231
5.8.1	Penentuan Daerah Imbuhan dan Daerah Lepas Air Tanah.....	234
5.8.2	Penyebaran Daerah Imbuhan dan Daerah Lepas	239
5.9	PENGISIAN AIR TANAH.....	244
5.9.1	Pengisian Air Tanah Alami di <i>Recharge Area</i> dan <i>Discharge Area</i>	244
5.9.2	Pengisian Air Tanah Buatan (<i>Artificial Groundwater Recharge</i>).....	246
5.10	PELEPASAN AIR TANAH (<i>GROUNDWATER DISCHARGE</i>).....	253
5.10.1	Pelepasan ke Sungai.....	253
5.10.2	Pelepasan ke Mata Air	253
5.10.3	Kawasan Lindung dan Kawasan Budi Daya	254
5.11	NON-CAT	257
5.11.1	Umum.....	257
5.11.2	Karakteristik dan Keberadaan Air Daerah Non-CAT	261
5.12	KEBERADAAN CAT, NON-CAT DAN BENCANA YANG SUDAH TERJADI	272
BAB 6. MANAJEMEN AIR TANAH TERPADU.....		279
6.1	UMUM	279
6.1.1	Permasalahan dalam Pengelolaan Air Tanah.....	280
6.1.2	Tantangan dalam Pelaksanaan Pengelolaan Air Tanah	281
6.2	KONSEPSI MANAJEMEN AIR TANAH (<i>GROUNDWATER DAN SOIL WATER MANAGEMENT</i>)	282
6.2.1	Manajemen Sumber Daya Air Berdasarkan <i>GWP</i>	282
6.2.2	Manajemen Sumber Daya Air Berdasarkan <i>UU SDA No.7 Tahun 2004</i>	283
6.2.3	Manajemen Air Tanah berdasarkan <i>PP No. 43 Tahun 2008</i>	287
6.2.4	Manajemen Air Tanah Terpadu	288
6.3	KILASAN MANAJEMEN AIR TANAH.....	289
6.3.1	Kritisnya Persediaan Air Tanah	289
6.3.2	Hal-Hal Substansi yang Menyebabkan Air Tanah perlu Dikelola	291

6.3.3	<i>Saling Ketergantungan Manajemen dengan Banyak Hal</i>	292
6.3.4	<i>Prinsip Dublin Dan Aplikasinya Sebagai Pemecahan Masalah Air Tanah</i>	293
6.4	<i>ENABLING ENVIRONMENT</i>	294
6.4.1	<i>Kebijakan</i>	294
6.4.1.1	Asas Manajemen Air Tanah	295
6.4.1.2	Visi dan Misi Pengelolaan Air Tanah	296
6.4.1.3	Penyiapan Kebijakan Pengelolaan Air Tanah	297
6.4.1.4	Kebijakan-Kebijakan yang Terkait dengan Air Tanah	298
6.4.2	<i>Kerangka Kerja Legislatif</i>	299
6.4.2.1	Sejarah Pengaturan Air Tanah di Indonesia	301
6.4.2.2	Pengaturan Air Tanah di Indonesia pada Masa Otonomi Daerah	303
6.4.2.3	Peraturan Pemerintah tentang Air Tanah	304
6.4.2.4	Peraturan Kualitas dan Kuantitas Air Tanah.....	307
6.4.2.5	Sanksi Administratif dan Penegakan Hukum	307
6.4.3	<i>Pembiayaan/Finansial</i>	308
6.4.3.1	Sumber Dana	312
6.4.3.2	Kebijakan-Kebijakan Investasi	313
6.4.3.3	Pengembalian Biaya dan Kebijakan-Kebijakan Denda	315
6.4.3.4	Penilaian Investasi.....	316
6.5	<i>PERAN-PERAN INSTITUSI</i>	316
6.5.1	<i>Kerangka Kerja Organisasi</i>	318
6.5.1.1	Dewan Sumber Daya Air	319
6.5.1.2	Organisasi Wilayah Sungai	320
6.5.1.3	Badan Pengatur.....	321
6.5.1.4	Penyedia Pelayanan	321
6.5.2	<i>Peran Publik dan Swasta</i>	322
6.5.2.1	Institusi Masyarakat Umum dan Organisasi Komunitas.....	322
6.5.2.2	Peran Sektor Swasta	322
6.5.2.3	Wewenang Lokal.....	324
6.5.3	<i>Institutional Capacity Building</i>	325
6.5.3.1	Peran Serta dan Pemberdayaan Masyarakat.....	325
6.5.3.2	Alih Ilmu Pengetahuan	327
6.5.3.3	Kapasitas Pengaturan.....	328
6.6	<i>INSTRUMEN-INSTRUMEN MANAJEMEN</i>	328
6.6.1	<i>Analisis Penilaian Air Tanah</i>	329
6.6.1.1	Analisis Penilaian Air Tanah	330
6.6.1.2	Permodelan dalam Pengelolaan Air Tanah	330
6.6.1.3	Indikator Pengelolaan Air Tanah	332
6.6.2	<i>Perancangan dan Perencanaan Manajemen Air Tanah</i>	333
6.6.2.1	Konservasi	335
6.6.2.2	Pendayagunaan Air Tanah	335
6.6.2.3	Pengendalian Daya Rusak Air Tanah	335
6.6.2.4	Perencanaan	336
6.6.2.5	Pelaksanaan	336

6.6.2.6 Pemantauan Pelaksanaan Pengelolaan Air Tanah	337
6.6.3 Pengelolaan Kebutuhan	337
6.6.3.1 Efisiensi Pemakaian.....	338
6.6.3.2 Daur Ulang dan Penggunaan Kembali.....	338
6.6.3.3 Efisiensi Suplai Air	339
6.6.4 Instrumen Perubahan Sosial	339
6.6.4.1 Pendidikan dalam Pengelolaan Air.....	339
6.6.4.2 Komunikasi dengan Para Pihak	341
6.6.4.3 Kampanye Air dan Peningkatan Kepedulian	342
6.6.4.4 Perluasan Partisipasi dalam Pengelolaan Air Tanah.....	343
6.6.5 Resolusi konflik.....	344
6.6.5.1 Alat Pengelolaan Konflik	344
6.6.5.2 Proses Partisipasi dan Laju Konflik	345
6.6.5.3 Pembagian Perencanaan Visi.....	346
6.6.5.4 Kesepahaman dan Kesepakatan	347
6.6.6 Instrumen Pengatur	348
6.6.6.1 Pengaturan Kualitas Air Tanah.....	349
6.6.6.2 Pengaturan Kuantitas Air	349
6.6.6.3 Pengaturan untuk Pelayanan Air	350
6.6.6.4 Pengendalian Perencanaan Tata Guna Lahan dan Perlindungan Alam.....	350
6.6.7 Instrumen Ekonomi	351
6.6.7.1 Tarif Air dan Pelayanan Air.....	351
6.6.7.2 Denda Polusi	351
6.6.7.3 Pengusahaan Air dan Izin Perdagangan	352
6.6.7.4 Subsidi dan Insentif.....	354
6.6.8 Pengalihan dan Pengelolaan Data dan Informasi.....	354
BAB 7. MANAJEMEN AIR TANAH BERDASARKAN PP AIR TANAH.....	359
7.1 CAT DAN NON-CAT.....	359
7.2 LANDASAN PENGELOLAAN AIR TANAH	365
7.2.1 Kebijakan pengelolaan air tanah	365
7.2.2 CAT	367
7.2.3 Strategi pengelolaan air tanah	369
7.3 TATA CARA PENGELOLAAN AIR TANAH	371
7.4 PERENCANAAN.....	372
7.4.1 Inventarisasi Air Tanah	374
7.4.2 Data Yang Diperoleh	375
7.4.3 Zona Konservasi Air Tanah.....	378
7.4.4 Rancangan Rencana Pengelolaan Air Tanah	379
7.5 PELAKSANAAN.....	380
7.6 KONSERVASI AIR TANAH	381
7.6.1 Metode Konservasi Air Tanah	381
7.6.1.1 Konservasi secara Agronomis	382

7.6.1.2	Konservasi secara Mekanis	387
7.6.1.3	Konservasi secara Kimiawi	400
7.6.2	Upaya Konservasi Air Tanah	402
7.6.2.1	Penentuan Zona Konservasi Air Tanah.....	402
7.6.2.2	Perlindungan dan Pelestarian Air Tanah.....	405
7.6.2.3	Pengawetan Air Tanah	405
7.6.2.4	Pengelolaan Kualitas dan Pengendalian Pencemaran Air Tanah	409
7.6.2.5	Kendala yang Dihadapi dalam Upaya Konservasi Air Tanah	410
7.6.2.6	Peran Pemerintah Daerah dalam Upaya Konservasi Air Tanah.....	411
7.7	PENDAYAGUNAAN AIR TANAH.....	411
7.7.1	<i>Penatagunaan.....</i>	<i>412</i>
7.7.2	<i>Penyediaan.....</i>	<i>413</i>
7.7.3	<i>Penggunaan</i>	<i>415</i>
7.7.3.1	Penggunaan Air Yang Saling Menunjang (<i>Conjunctive Use</i>).....	415
7.7.3.2	Hak Guna Pakai Air Tanah	418
7.7.4	<i>Pengembangan</i>	<i>419</i>
7.7.4.1	Survei Hidrogeologi.....	420
7.7.4.2	Eksplorasi Air Tanah.....	421
7.7.4.3	Pengeboran dan Penggalian	421
7.7.4.4	Pembangunan Kelengkapan Sarana Pemanfaatan Air Tanah	422
7.7.5	<i>Pengusahaan.....</i>	<i>423</i>
7.8	PENGENDALIAN DAYA RUSAK AIR TANAH	424
7.9	SISTEM INFORMASI AIR TANAH	425
7.9.1	<i>Pengambilan dan Pengumpulan Data</i>	<i>426</i>
7.9.2	<i>Penyimpanan dan Pengolahan Data.....</i>	<i>426</i>
7.9.3	<i>Pembaharuan Data</i>	<i>427</i>
7.9.4	<i>Penerbitan serta Penyebarluasan Data dan Informasi</i>	<i>427</i>
7.10	PEMANTAUAN PELAKSANAAN PENGELOLAAN AIR TANAH	428
7.10.1	<i>Penentuan Debit Aliran Air Tanah.....</i>	<i>430</i>
7.10.2	<i>Pemantauan Jumlah Pengambilan dan Pemanfaatan Air Tanah</i>	<i>431</i>
7.10.3	<i>Pemantauan Kedudukan Muka Air Tanah</i>	<i>432</i>
7.10.4	<i>Pemantauan Kuantitas Air Tanah</i>	<i>436</i>
7.10.4.1	Teknis Pelaksanaan	436
7.10.4.2	Tingkat Kerusakan Kuantitas Air tanah	436
7.10.5	<i>Pemantauan Kualitas Air Tanah</i>	<i>438</i>
7.10.5.1	Perubahan Kualitas Air Tanah	438
7.10.5.2	Pelaksanaan Pemantauan Kualitas Air Tanah	439
7.10.6	<i>6 Pemantauan Dampak Lingkungan Keberadaan Air Tanah</i>	<i>440</i>
7.10.7	<i>Pemantauan Amblesan Tanah</i>	<i>440</i>
7.11	EVALUASI	441
7.12	PERIZINAN PENGAMBILAN AIR TANAH	442
7.12.1	<i>Tata Cara Perolehan Izin</i>	<i>442</i>

7.12.2	Jangka Waktu Izin	445
7.12.3	Hak dan Kewajiban Pemegang Izin	445
7.13	PEMBERDAYAAN, PENGENDALIAN DAN PENGAWASAN	445
7.13.1	Pemberdayaan	446
7.13.2	Pengendalian	446
7.13.3	Pengawasan	446
BAB 8.	PENATAAN RUANG AIR TANAH	449
8.1	TATA RUANG AIR TANAH	449
8.2	PENYELENGGARAAN PENATAAN RUANG AIR TANAH	452
8.3	PELAKSANAAN PENATAAN RUANG AIR TANAH	455
8.4	HARMONI PENGERTIAN, ISTILAH DAN DEFINISI	457
8.4.1	Umum	457
8.4.2	Perbedaan Pengertian dan Penggunaan Kata "Strategi" Menurut PP No. 42 Tahun 2008 dan PP No. 43 Tahun 2008	461
8.5	WILAYAH SUNGAI (WS) DAN CEKUNGAN AIR TANAH (CAT)	465
8.5.1	Aspek Legal	465
8.5.2	Aspek Teknis	467
8.6	HARMONI SUMBER DAYA AIR, TATA RUANG AIR TANAH DAN PENATAAN RUANG	474
8.6.1	Perbedaan Substansi Sumber Daya Air, Air Tanah Dan Penataan Ruang	474
8.6.2	Substansi Perlunya Harmoni Dan Integrasi	477
8.6.3	Nilai Air Di Dunia	484
8.7	HARMONI DAN INTEGRASI AIR PERMUKAAN DAN AIR TANAH	486
8.8	HARMONI BATAS ADMINISTRASI DAN BATAS TEKNIS	489
	DAFTAR PUSTAKA	495
	TENTANG PENULIS	511

DAFTAR TABEL

Tabel 1-1.	Lapisan bumi (http://id.wikipedia.org/wiki/Bumi).....	2
Tabel 1-2.	Simbol dan karakteristik tanah secara horizontal (Singer and Munns, 1987).....	28
Tabel 1-3.	Simbol dan karakteristik tanah secara horizontal (http://www.enchantedlearning.com/geology/soil/).....	29
Tabel 2-1.	Komposisi air tanah dan yang lain di dunia (UNESCO, 1978 dalam Chow dkk., 1988).....	45
Tabel 2-2.	Komponen Siklus Hidrologi	65
Tabel 2-3.	Uraian dan Notasi komponen siklus hidrologi.....	66
Tabel 2-4.	Tampungungan dalam siklus hidrologi.....	66
Tabel 2-5.	Potensi base flow di pulau-pulau besar (KepPres No. 26 Tahun 2011; Pusat Lingkungan Geologi, 2009; Kodoatie & Sjarief, 2010)	67
Tabel 2-6.	Kenaikan kapiler untuk beberapa jenis tanah (Todd & Mays, 2005)	77
Tabel 2-7.	Keseimbangan tahunan global (Chow et al., 1988).....	89
Tabel 2-8.	Keseimbangan tahunan global dari berbagai sumber dengan satuan hujan di darat = 100.....	90
Tabel 3-1.	Jangkauan Nilai Konduktivitas Hidraulik K & Permeabilitas k (Freeze & Cherry, 1979) ..	109
Tabel 3-2.	Faktor Konversi Untuk Satuan Nilai K & k (Freeze & Cherry, 1979)	109
Tabel 3-3.	Klasifikasi tanah berdasarkan diameter (Julien, 1995).....	113
Tabel 3-4.	Klasifikasi tanah (Canadian Geotechnical Society, 1992)	114
Tabel 3-5.	Klasifikasi tanah berdasarkan diameter butiran (mm) (beberapa sumber dalam Nakazawa dan Sosro Darsono, 1984)	115
Tabel 3-6.	Nilai rata-rata Specific Yield (Fetter, 1994)	123
Tabel 3-7.	Harga porositas, specific yield, dan specific retention (Meinzer, 1923).....	125
Tabel 3-8.	Perbedaan struktur tanah pada kondisi dispersed dan kondisi flocculated (Kodoatie, 1996).....	131
Tabel 3-9.	Karakteristik mineral-mineral lempung (Hunt, 1984)	132
Tabel 3-10.	Klasifikasi Mineral Lempung (Morin & Tudor, 1975).....	133
Tabel 3-11.	Jangkauan (Range) nilai α untuk berbagai jenis tanah dan batuan (Domenico & Miffin, 1965 dan Johnson dkk., 1968)	136
Tabel 4-1.	Asumsi aliran pada beberapa kondisi (Kupper, 1990).....	147
Tabel 4-2.	Modifikasi Fungsi Bessel.....	163
Tabel 4-3.	Well function untuk akuifer dengan rembesan (Leaky aquifer).....	170
Tabel 5-1.	Kriteria CAT (PP No. 43 Tahun 2008).....	181
Tabel 5-2.	Kriteria daerah CAT dan Non-CAT	184
Tabel 5-3.	Detail Kriteria Tabel 5-2.....	184
Tabel 5-4.	Luas pulau, jumlah CAT, Luas CAT dan Non-CAT dan % luas nya tiap pulau (KepPres No. 26 Tahun 2011 Tentang CAT; Pusat Lingkungan Geologi, 2009)	199
Tabel 5-5.	Potensi air tanah pada CAT di Indonesia (KepPres No. 26 Tahun 2011 Tentang Cekungan Air Tanah)	200

Tabel 5-6.	Potensi air tanah pada CAT di Indonesia per pulau (KepPres No. 26 Tahun 2011)	201
Tabel 6-1.	Bab dan Pasal dalam PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah.....	305
Tabel 6-2.	Kewenangan pengelolaan air tanah	317
Tabel 6-3.	Faktor-faktor utama dalam meraih sukses.....	341
Tabel 6-4.	Herarki instrumen pengatur (Kodoatie dan Sjarief, 2007)	348
Tabel 6-5.	Bobot komponen sumber daya alam	353
Tabel 6-6.	Bobot komponen harga dasar air	354
Tabel 6-7.	Bobot komponen kompensasi.....	354
Tabel 7-1.	Garis besar PP No. 43 Tahun 2008	360
Tabel 7-2.	Penggunaan dan jenis tanaman penutup tanah yang banyak dijumpai (Seta, 1991)	383
Tabel 7-3.	Hubungan antara kecuraman lereng dengan lebar terras, dan luas areal yang dapat ditanami pada terras bangku dengan jarak vertikal 1 m (Constantinesco, 1987 dalam Suripin, 2002).	391
Tabel 7-4.	Volume sumur resapan pada tanah dengan permeabilitas rendah.....	396
Tabel 7-5.	Jarak minimum sumur resapan dengan bangunan lainnya.....	397
Tabel 7-6.	Macam-macam bahan pemantap tanah yang banyak digunakan untuk memperbaiki struktur tanah (Gabriels et al., 1977)	401
Tabel 7-7.	Waktu infiltrasi rata-rata untuk berbagai kondisi tanah, asumsi daerah tangkapan hujan dengan volume 1m^3 (Morris & Johnson, 1967; Freeze & Cherry, 1979)*	407
Tabel 7-8.	Variasi slope (S) dan faktor penutup lahan (n) terhadap kebutuhan lahan untuk daerah resapan air seluas 1m^2 , untuk contoh jenis tanah pasir (lihat Gambar 7-19)	408
Tabel 8-1.	Urutan kegiatan berdasar UU.....	458
Tabel 8-2.	Substansi sumber daya air, air tanah dan penataan ruang (Kodoatie & Sjarief, 2010; UU No. 7 Tahun 2004; UU No. 26 Tahun 2007; PP No. 43 Tahun 2008; http://en.wikipedia.org/wiki/Indonesia)	475
Tabel 8-3.	Substansi perlunya harmonisasi.....	479

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1-1.	Diameter dan jari-jari bumi	1
Gambar 1-2.	Unsur unsur kimia bumi (dalam %)	2
Gambar 1-3.	Lapisan bumi (Bonewits, 2008; http://wiki.answers.com/Q/What_is_the_depth_of_the_lithosphere ; http://www.cliffshade.com/colorado/images/earth_anatomy.gif ; http://www.enchantedlearning.com/subjects/astronomy/planets/earth/Inside.shtml)	3
Gambar 1-4.	Ilustrasi kerak bumi, kerak samudra dan batasan wilayah pesisir (http://www.answers.com/topic/continental-crust ; Pernetta & Milliman, 1995 dalam Anggoro, 2008)	4
Gambar 1-5.	Perjalanan air tanah dari hulu (gunung) ke hilir (laut) (Chebotarev, 1955)	5
Gambar 1-6.	Perubahan umum dalam arah aliran air tanah	7
Gambar 1-7.	Sistem aliran air tanah (Toth, 1963)	7
Gambar 1-8.	Contoh Sistem aliran air tanah lokal dan antara di Jawa Tengah.....	8
Gambar 1-9.	Pertumbuhan Tipologi Karst (Goodman, 1993).....	13
Gambar 1-10.	Ilustrasi ruang bumi.....	17
Gambar 1-11.	Keempat sphere dalam suatu lokasi lokal	17
Gambar 1-12.	Susunan lapisan atmosfer (Thomspson & Turk, 1993; http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_atmosphere , 2009)	20
Gambar 1-13.	Konsentrasi Ozon di Atmosfer	21
Gambar 1-14.	Beberapa contoh regolith yang ter-expose atau nampak di muka bumi	25
Gambar 1-15.	Ilustrasi tanah (soil)	27
Gambar 1-16.	Sketsa dan contoh pembagian lapisan tanah secara horizontal (Singer and Munns, 1987)	28
Gambar 1-17.	Proses pembentukan tanah dari batuan (Taylor, 2005; Kodoatie, 2009a &b).....	31
Gambar 1-18.	Ilustrasi ukuran dan organisasi partikel tanah (Singer & Munns, 1987).....	32
Gambar 1-19.	Segitiga tekstur tanah.....	34
Gambar 2-1.	Spiral proses umur bumi dan keberadaan air salah satu intepretasi evolusi manusia (Thompson & Turk, 1993; Mayr, 2010)	37
Gambar 2-2.	Tingkatan (stage) kehidupan, ketersediaan dan kebutuhan air (Kodoatie, 2011; Birdie & Birdie, 2002; Karanth, 1987; Meinzer, 1923)	38
Gambar 2-3.	Sumber daya air dan komponennya	39
Gambar 2-4.	Formasi air di bawah muka tanah (Davis & DeWiest, 1966; Driscoll, 1987; Skipp, 1994; Tot, 1990; Kodoatie, 1996; Todd & May, 2005)	41
Gambar 2-5.	Formasi air di bawah permukaan tanah daerah Non-CAT dan perbedaan daerah CAT dan daerah Non-CAT	43
Gambar 2-6.	Total air di dunia dan kontribusi air tanah tawar	46
Gambar 2-7.	Komposisi air tawar (%) di luar es di kutub	46
Gambar 2-8.	Total air tawar di luar es di Kutub (Utara dan Selatan) dan di luar es lainnya	47

Gambar 2-9.	Komposisi air tawar (%) di luar air tanah tawar (groundwater) dan di luar danau	48
Gambar 2-10.	Diagram siklus hidrologi dari sisi besaran relatif dan respon kecepatan (Solomon & Cordery, 1984 dalam Maidment, 1993)	49
Gambar 2-11.	Perbandingan debit aliran yang ke laut (Chow dkk., 1988)	50
Gambar 2-12.	Ilustrasi sederhana proses perjalanan air (siklus hidrologi)	51
Gambar 2-13.	Siklus Hidrologi Tertutup di daerah Cekungan Air Tanah	56
Gambar 2-14.	Siklus Hidrologi Tertutup di daerah Non-CAT	61
Gambar 2-15.	Sketsa aliran air dari daerah Non-CAT ke daerah CAT	62
Gambar 2-16.	Sketsa aliran air di hulu CAT dan di hilir Non-CAT	63
Gambar 2-17.	Gambaran daerah CAT dan Non-CAT (KepPres No. 26 Tahun 2011)	64
Gambar 2-18.	Daerah Non-CAT dan CAT untuk Sungai Luk Ulo Jawa Tengah	65
Gambar 2-19.	Contoh produk base flow pada sungai di musim kemarau	67
Gambar 2-20.	Contoh fenomena return flow	68
Gambar 2-21.	Ilustrasi throughflow dan interflow daerah CAT dan Non-CAT	69
Gambar 2-22.	Grafik kumulatif infiltrasi	71
Gambar 2-23.	Contoh infiltrasi dan perkolasi	72
Gambar 2-24.	Contoh stemflow (aliran batang/gagang tanaman)	73
Gambar 2-25.	Ilustrasi jenis pohon	74
Gambar 2-26.	Ilustrasi tanah sekitar batang tanaman yang lebih berair karena ada stemflow	75
Gambar 2-27.	Intersepsi hujan oleh tanaman	76
Gambar 2-28.	Contoh air permukaan dan aliran permukaan	77
Gambar 2-29.	Contoh litter zone	79
Gambar 2-30.	Contoh pancaran dari spring	80
Gambar 2-31.	Contoh mata air (spring)	81
Gambar 2-32.	Gambaran tentang mata air yang terjadi dari berbagai kondisi (Davis dan De Wiest, 1966)	83
Gambar 2-33.	Jenis-Jenis mata air (Bear, 1979)	85
Gambar 2-34.	Skema siklus hidrologi global untuk hujan di darat dengan satuan relatif = 100 (Chow et al., 1988)	89
Gambar 2-35.	Keseimbangan air dunia mm per tahun (Leeden et al., 1991)	91
Gambar 2-36.	Pemakaian air di Amerika Serikat (Ward & Trimble, 2004)	94
Gambar 3-1.	Alat Percobaan Hukum Darcy	95
Gambar 3-2.	Konsep makroskopik dan mikroskopik aliran air tanah (Freeze & Cherry, 1979)	96
Gambar 3-3.	Penjelasan mengenai asumsi Dupuit-Forch Heimer (Kodoatie, 1996)	98
Gambar 3-4.	Visualisasi potensi fluida (Kodoatie, 1996)	100
Gambar 3-5.	Ilustrasi alat piezometer di lapangan	101
Gambar 3-6.	Pemasangan beberapa piezometer di lapangan	103
Gambar 3-7.	Potentiometric surface dari sebuah confined aquifer (Todd, 1959)	104
Gambar 3-8.	Potongan memanjang aliran pada saluran terbuka, dalam pipa, air tanah dan total energinya (Kodoatie, 1996)	105

Gambar 3-9.	Skematis pengertian tampungan spesifik So.....	111
Gambar 3-10.	Ilustrasi kurva diameter butiran seragam dan beragam	117
Gambar 3-11.	Kondisi material tanah berdasarkan ukuran butirannya (Kodoatie, 1996)	117
Gambar 3-12.	Contoh celah (interstices) batuan dan relasi batuan dengan tekstur porositas (Meinzer, 1927a and b)	118
Gambar 3-13.	Arah aliran air tanah (makro) dan gerakan nyata dari molekul air	119
Gambar 3-14.	Kondisi suatu tanah (Terzaghi, 1925; Bowles, 1988).....	120
Gambar 3-15.	Skematis pengertian Specific Yield Sy	122
Gambar 3-16.	Specific Yield dilihat dari kadar air	123
Gambar 3-17.	Ilustrasi pot bunga yang berisi tanah (soil) mengandung lempung dan pot bunga yang berisi pasir.....	126
Gambar 3-18.	Ilustrasi tanah dari keadaan basah ke keadaan kering (Wesley, 1973).....	129
Gambar 3-19.	Tipe struktur tanah (Bouwer, 1978)	130
Gambar 3-20.	Tegangan total, tegangan efektif dan tegangan pori pada kondisi equilibrium.....	136
Gambar 3-21.	Tiga macam lapisan heterogen (Kodoatie, 1996).....	138
Gambar 3-22.	Lapisan isotropis dan anisotropis (Freeze & Cherry, 1979; Kodoatie, 1996).....	138
Gambar 3-23.	Empat kombinasi dari heterogenity dan anisotropy	139
Gambar 4-1.	Analisis suatu masalah dengan Kerangka Lagrangian	142
Gambar 4-2.	Sistem koordinat cartesian dan silinder	143
Gambar 4-3.	Control volume Method	143
Gambar 4-4.	Ilustrasi fluida Newtonian dan Non-Newtonian (Douglas dkk., 1988)	145
Gambar 4-5.	Ilustrasi transport massa air pada sistem Koordinat Cartesian	148
Gambar 4-6.	Suatu control volume sistem unconfined aquifer	149
Gambar 4-7.	Suatu control volume sistem confined aquifer (Kodoatie, 1996).....	152
Gambar 4-8.	Ilustrasi superposisi persamaan aliran air tanah.....	154
Gambar 4-9.	Aliran air tanah pada unconfined aquifer persegi panjang	155
Gambar 4-10.	Aliran air di akuifer persegi panjang dengan recharge.....	156
Gambar 4-11.	Aliran radial di sekitar sumur pada unconfined aquifer	157
Gambar 4-12.	Aliran air tanah pada confined aquifer persegi panjang	158
Gambar 4-13.	Aliran radial pada confined aquifer	158
Gambar 4-14.	Aliran radial dengan sumur yang diberi saringan kasar pada confined aquifer	159
Gambar 4-15.	Aliran air tanah pada leaky aquifer di bawah suatu waduk	160
Gambar 4-16.	Aliran air tanah pada semi confined dan confined aquifer	161
Gambar 4-17.	Aliran radial pada semi confined aquifer	162
Gambar 4-18.	Aliran radial pada beberapa lapisan semi confined aquifer	165
Gambar 4-19.	Aliran radial tak tunak pada confined aquifer	167
Gambar 4-20.	Grafik hubungan $W(u)$ dan u pada confined aquifer.....	168
Gambar 4-21.	Grafik hubungan $W(u)$ dan $1/u$ pada confined aquifer	168
Gambar 4-22.	Aliran radial tak tunak pada semi-confined aquifer	169
Gambar 4-23.	Kurva tipe aliran tidak tunak pada akuifer dengan rembesan (Walton, 1960)	172

Gambar 4-24.	Aliran radial ke sumur pemompaan pada unconfined aquifer.....	173
Gambar 4-25.	Sketsa tiga segmen hubungan t-s dengan penundaan.....	175
Gambar 4-26.	Kurva $W(u_A, u_B, \eta)$ versus $1/u_A$ dan $1/u_B$ pada unconfined aquifer (Neuman, 1975a).....	176
Gambar 4-27.	Detail Gambar 4-24 dilihat secara regional dari suatu sistem aquifer bebas.....	178
Gambar 4-28.	Contoh aliran air tanah secara hidraulik hanya berlaku di daerah CAT (yang berwarna).....	179
Gambar 4-29.	Contoh Pulau Tarakan yang berupa daerah yang bisa meresapkan air ke dalam tanah tapi bukan daerah CAT.....	180
Gambar 5-1.	Ilustrasi Kriteria a. untuk CAT, keterangan Nomor sesuai Nomor dalam Tabel 5-1.....	182
Gambar 5-2.	Ilustrasi Kriteria b. untuk CAT, keterangan Nomor sesuai Nomor dalam Tabel 5-1.....	182
Gambar 5-3.	Ilustrasi Kriteria c. untuk CAT, keterangan Nomor sesuai Nomor dalam Tabel 5-1.....	183
Gambar 5-4.	Contoh lapisan batuan.....	186
Gambar 5-5.	Dokumentasi contoh patahan (fault).....	187
Gambar 5-6.	Contoh patahan di jalan raya Manyaran Semarang.....	189
Gambar 5-7.	Contoh lipatan dan jungkit (Katili & Soetadi, 1971; Kodoatie, 2010b).....	190
Gambar 5-8.	CAT (warna putih) dan Non-CAT (tak berwarna).....	191
Gambar 5-9.	CAT (warna) dan Non-CAT (tak berwarna) di beberapa pulau.....	198
Gambar 5-10.	Luas pulau, % Luas CAT dan Non-CAT terhadap luas pulau.....	200
Gambar 5-11.	Luas pulau (ribu km ²) dan % luas CAT terhadap luas pulau.....	202
Gambar 5-12.	Potensi air tanah pada CAT akuifer bebas dan tertekan per Pulau (KepPres No. 26 Tahun 2011).....	203
Gambar 5-13.	Cekungan Air Tanah di Sulawesi Tenggara (RaKepPres No. 26 Tahun 2011).....	205
Gambar 5-14.	Potongan CAT: akuifer tertekan dan akuifer bebas (Kodoatie, 2009d).....	206
Gambar 5-15.	CAT sebagai baseflow dan keberadaan Non-CAT (Balai WS Sumatra VI Jambi, 2009; Kodoatie, 2009e; Kodoatie & Sjarief, 2010; KepPres No. 26 Tahun 2011).....	206
Gambar 5-16.	Pengisian sungai oleh air tanah (soil water dan groundwater) (Kodoatie, 2009c).....	207
Gambar 5-17.	Potongan irisan bumi CAT.....	209
Gambar 5-18.	Ilustrasi valley aquifer di daerah humid dan arid (Freeze & Cherry, 1979; Kodoatie 1996).....	211
Gambar 5-19.	Sketsa suatu perched aquifer (Kodoatie 1996).....	211
Gambar 5-20.	Salah satu proses terjadinya CAT.....	212
Gambar 5-21.	Sketsa suatu alluvial aquifer dengan sungai di atasnya (Freeze & Cherry, 1979; Kodoatie 1996).....	213
Gambar 5-22.	Braided rivers dan meandering rivers pada alluvial aquifer (Freeze and Cherry, 1979; Toth, 1990; Kodoatie, 1996).....	214
Gambar 5-23.	Ilustrasi definisi sistem akuifer (Bouwer, 1978; Freeze dan Cherry, 1979; Toth, 1990; Kodoatie, 1996).....	216
Gambar 5-24.	Contoh Peta Hidrogeologi Indonesia: Lembar IX Yogyakarta (Djaeni, 1982).....	221
Gambar 5-25.	Batas ketinggian yang diketahui (Toth, 1990 dan Kupper, 1990).....	222
Gambar 5-26.	Kuantitatif Batas Muka Air (Toth, 1990 dan Kupper, 1990).....	223

Gambar 5-27.	Batas CAT (Danaryanto dkk., 2005)	225
Gambar 5-28.	Contoh Cekungan Air Tanah Lintas Kabupaten/Kota, dan lintas Provinsi (Kepmen ESDM No. 716.k/48/MEM/2003)	230
Gambar 5-29.	Sketsa kondisi bawah tanah CAT Bogor dan CAT Jakarta (Soekardi, 1982).....	233
Gambar 5-30.	Penampang Melintang CAT Jakarta (Soekardi, 1982)	233
Gambar 5-31.	Kedalaman air tanah di daerah imbuan semakin dalam seiring dengan semakin dalamnya sumur (kedalaman sumur semula a dan kemudian b dan sebaliknya di daerah lepasan kedalaman air tanah semakin dangkal seiring dengan semakin dalamnya sumur (kedalaman sumur semula c dan kemudian d (Danaryanto dkk., 2008)	237
Gambar 5-32.	CAT Jakarta dan CAT lain disekitarnya dan perkembangan kota (KepPres No. 26 Tahun 2011; Kep. Men. Energi & Sumber Daya Mineral No. 716 Tahun 2003)	242
Gambar 5-33.	Di Daerah imbuan CAT Jakarta banyak lokasi dengan nama depan situ dan daerah lepasan banyak lokasi dengan nama depan rawa	243
Gambar 5-34.	Proses pengisian daerah imbuan dan daerah lepasan (Kodoatie, 2009e dan Danaryanto dkk., 2008a)	245
Gambar 5-35.	Daerah CAT	246
Gambar 5-36.	Pergerakan penambahan lajur jenuh	249
Gambar 5-37.	Profil gundukan air tanah di bawah kolam tampungan	250
Gambar 5-38.	Pengaruh pengimbuhan air tanah pada muka air tanah di akuifer (a) Kenaikan muka air tanah pada kolam resapan, (b) Kenaikan muka air tanah pada sumur resapan (Deutsch, 1963)	251
Gambar 5-39.	Rencana diagram pengimbuhan air tanah buatan, pengambilan air dan sistem distribusi di Bunter Sandstone (ANon, 1981)	252
Gambar 5-40.	Diagram mekanisme pengimbuhan-peluahan (Oakes, 1976; Reeves, 1978)	254
Gambar 5-41.	Daerah imbuan dan daerah lepasan air tanah serta batasnya (imajiner)	255
Gambar 5-42.	Contoh Peta CAT Lintas Provinsi, daerah lepasan dan daerah imbuan.....	256
Gambar 5-43.	Sketsa sederhana potongan Non-CAT (Kodoatie, 2009d)	257
Gambar 5-44.	Proses aliran air di daerah Non-CAT (Kodoatie, 2009e)	258
Gambar 5-45.	Dokumentasi Daerah-Daerah Non-CAT (Kodoatie 2009a & f)	260
Gambar 5-46.	Perbedaan kedalaman root zone dan jenis tanaman.....	260
Gambar 5-47.	Contoh kesuburan daerah Non-CAT yang belum dan sudah terganggu	262
Gambar 5-48.	Perubahan kondisi daerah Non-CAT yang sudah terkupas tanah dan humusnya	264
Gambar 5-49.	Laju pertumbuhan rata-rata tahunan penambangan batubara dari Tahun 1990 sampai Tahun 2000 (World Coal Institute, 2002).....	265
Gambar 5-50.	Penampang muka bumi di salah satu wilayah Kalimantan yang menunjukkan dua wajah yang berbeda	266
Gambar 5-51.	Daerah CAT dan Non-CAT, Daerah Patahan dan Daerah Rawan Kekeringan Prov Jateng dan rupa bumi Non-CAT.....	268
Gambar 5-52.	Daerah Non-CAT umumnya mengandung tambang dan patahan	269

Gambar 5-53.	Perubahan beberapa sungai di Indonesia (Google Earth, April 2012)	272
Gambar 5-54.	Perbedaan daerah CAT dan Non CAT	273
Gambar 5-55.	Potensi CAT dan potensi tinggi CAT	274
Gambar 5-56.	Penambangan berwawasan lingkungan.....	275
Gambar 5-57.	Jalan raya Dandeles dan jalan kereta api Jakarta-Surabaya di daerah CAT	277
Gambar 6-1.	Segitiga keseimbangan sosial, ekonomi dan ekosistem untuk PSDA Terpadu dan Berkelanjutan (GWP, 2001 dalam Kodoatie dan Sjarief, 2004).....	283
Gambar 6-2.	Aspek pengelolaan sumber daya air terpadu (Kodoatie dan Sjarief, 2005 dengan modifikasi)	285
Gambar 6-3.	Ilustrasi DAS, CAT, Non-CAT, Wilayah Sungai dan Wilayah Administratif Kabupaten/Kota (Balai BWS Kalimantan III Provinsi Kalimantan Timur, 2012; Kodoatie dan Sjarief, 2005)	286
Gambar 6-4.	Pengelolaan air tanah menurut PP No. 43 Tahun 2008	287
Gambar 6-5.	Manajemen air tanah terpadu	288
Gambar 6-6.	Persoalan, Solusi Penataan Ruang, Pengelolaan SD Air Dan Tata Ruang Air Tanah.....	290
Gambar 6-7.	Wujud penataan ruang.....	292
Gambar 6-8.	Integrasi pengelolaan sumber daya air	295
Gambar 6-9.	Gambaran pengertian visi dan misi (Kodoatie dan Sjarief, 2005)	296
Gambar 6-10.	Kerangka legislatif UU SDA, PP PSDA, PP Air Tanah dan PP Air Permukaan	300
Gambar 6-11.	Diagram penetapan cekungan air tanah	306
Gambar 6-12.	Sketsa diagram waktu dan biaya dari ide sampai terwujud pembangunannya serta pengoperasiannya sampai umur proyek (Kuiper, 1971; Kodoatie dan Sjarief, 2005)	311
Gambar 6-13.	Alur proses pembangunan (Kuiper, 1971 dan 1989; Kodoatie, 1995.....	312
Gambar 6-14.	Lima belas (15) elemen model kerangka kerja untuk tindakan terorganisasi (Grigg, 1996).....	318
Gambar 6-15.	Hak guna air (UU No. 7 Tahun 2004).....	323
Gambar 6-16.	Alur sistem pendukung keputusan (Grigg, 1988 & 1996).....	332
Gambar 6-17.	Proses pembangunan dari perencanaan, pelaksanaan sampai pada operasional dan pemeliharannya (Grigg, 1996 dengan elaborasi disesuaikan dengan PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008)	334
Gambar 6-18.	Tingkatan partisipasi dan penurunan laju konflik	346
Gambar 6-19.	Perhitungan pajak air tanah	353
Gambar 7-1.	Ruang darat yang diatur (CAT, 47%) dan yang tidak diatur (Non-CAT, 53%) oleh PP No. 43 Tahun 2008	359
Gambar 7-2.	Diagram ringkasan PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah	363
Gambar 7-3.	Manajemen air tanah berdasarkan PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah	365
Gambar 7-4.	Pihak-pihak yang menetapkan pengelolaan air tanah dan tujuan kebijakan pengelolaan air tanah.....	366
Gambar 7-5.	Kriteria dan tata cara penetapan cekungan air tanah.....	368
Gambar 7-6.	Strategi pengelolaan air tanah	371

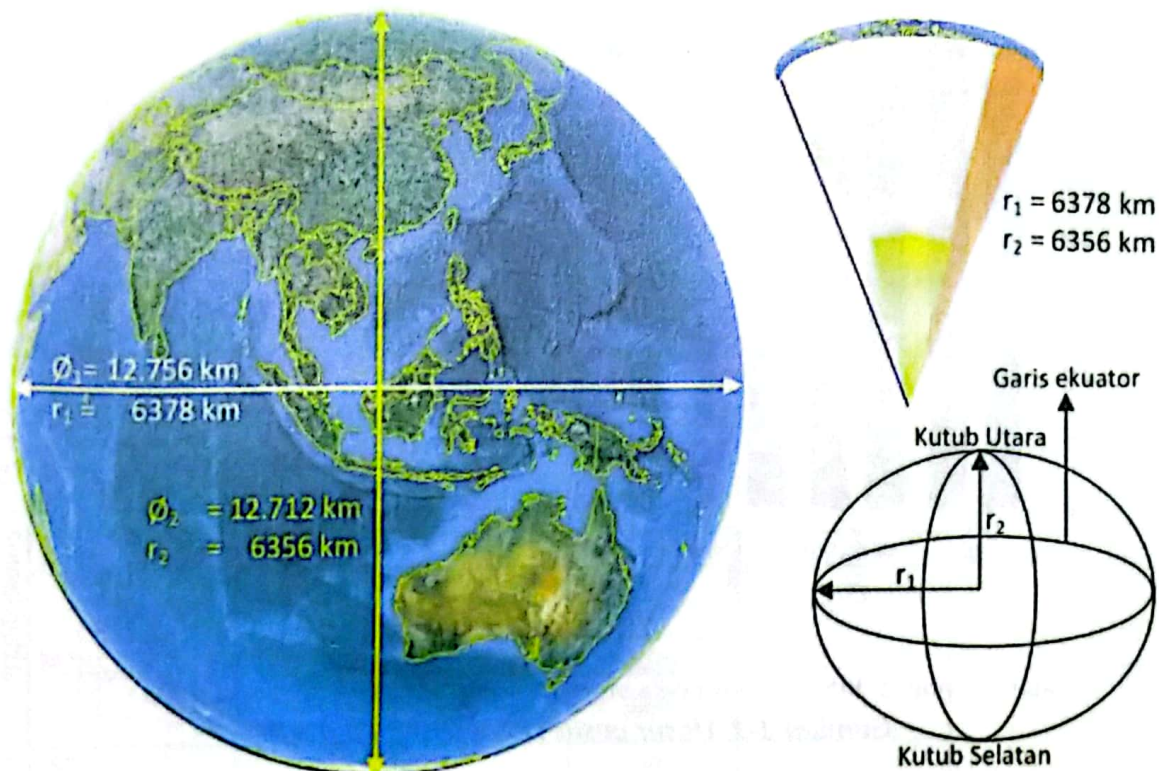
Gambar 7-7.	Diagram alir tata cara pengelolaan air tanah	372
Gambar 7-8.	Kegiatan perencanaan pengelolaan air tanah	373
Gambar 7-9.	Tahapan dan waktu rencana pengelolaan air tanah	379
Gambar 7-10.	Diagram alir pelaksanaan pengelolaan air tanah	380
Gambar 7-11.	Penanaman dalam strip (a) menurut garis kontur (contour strip cropping), (b) lapangan (field strip cropping), dan (c) strip berpenyangga (buffer strip cropping) (Suripin, 2002)	385
Gambar 7-12.	Sketsa penampang Guludan dan Guludan bersaluran (Suripin, 2002).....	389
Gambar 7-13.	Sketsa terras pengelak (a) dan terras retensi (b) dan (c) contoh dokumentasi	391
Gambar 7-14.	Sketsa terras bangku berlereng ke dalam (atas), dan terras bangku datar (bawah) (Suripin, 2002).	392
Gambar 7-15.	Sketsa tata letak saluran pembuang air dalam sistem konservasi tanah dan air (Morgan, 1988).....	393
Gambar 7-16.	Debit resapan pada sumur dengan berbagai kondisi (Bouilliot, 1976 dalam Sunjoto, 1988)	395
Gambar 7-17.	Tata letak sumur resapan (atas) dan konstruksinya (bawah) untuk resapan air hujan rumah tinggal (dalam Suripin, 2002)	397
Gambar 7-18.	Konstruksi kolam resapan dipadukan dengan pertamanan (Suripin, 2002)	398
Gambar 7-19.	Ilustrasi sederhana hubungan antara infiltrasi air tanah pada vadose zone dan luas lahan konservasi yang dibutuhkan (Keller, 1979; Thomson and Turk, 1993; Beven, 2003; Rushton, 2003; dengan modifikasi)	407
Gambar 7-20.	Diagram penatagunaan air tanah.....	412
Gambar 7-21.	Inter-relasi antara air tanah, aliran sungai, hujan, dan pengambilan air tanah	417
Gambar 7-22.	(a) Konstruksi sumur pantau muka air tanah, (b) Detail pipa sumur pantau (sumber: foto survei 20 September 2007)	430
Gambar 7-23.	Alat perekaman muka air tanah otomatis (AWLR).....	433
Gambar 7-24.	Penampang sumur bor pantau.....	434
Gambar 7-25.	Alat perekaman muka air tanah manual (Hidrometer)	435
Gambar 7-26.	Contoh hasil penggambaran Hidrograf dari AWLR	435
Gambar 7-27.	Perubahan muka air tanah pada akuifer tidak tertekan	437
Gambar 7-28.	Perubahan muka air tanah pada akuifer tertekan yang positif.....	437
Gambar 7-29.	Perubahan muka air tanah pada akuifer tertekan yang negatif.....	438
Gambar 7-30.	Siklus evaluasi (http://www.ifad.org/hfs/tools/hfs/bsfpub/bsf_7.pdf)	441
Gambar 7-31.	Diagram tata cara perizinan pengelolaan air tanah	444
Gambar 7-32.	Mekanisme penyampaian laporan penyelenggaraan penggunaan air tanah	446
Gambar 7-33.	Diagram Kegiatan Pengawasan	447
Gambar 8-1.	Keterkaitan antar ruang dalam pengelolaan sumber daya air (Kodoatie & Sjarief, 2010 yang dilebaorasi)	452
Gambar 8-2.	Penataan ruang air tanah	453

Gambar 8-3.	Penyelenggaraan Penataan Ruang Air Tanah dan Substansi-Substansi Penting Yang Terkait (UU No. 26 Tahun 2007; PP No. 43 Tahun 2008)	454
Gambar 8-4.	Pelaksanaan Penataan Ruang Air Tanah	457
Gambar 8-5.	Pengertian dan definisi pengelolaan berdasarkan peraturan perundang-undangan	461
Gambar 8-6.	Perbedaan pengertian dan penggunaan kata "strategi"	462
Gambar 8-7.	Pengertian "strategi" menurut PP No. 42 Tahun 2008 dan PP No. 43 Tahun 2008	464
Gambar 8-8.	Sumber daya air, komponennya, Wilayah Sungai (WS), Daerah Aliran Sungai (DAS), Cekungan Air Tanah (CAT) dan Non-CAT.....	466
Gambar 8-9.	Curah hujan tahunan (mm), potensi air tanah tahunan sebagai base flow (mm) dan persen potensi air tanah terhadap curah hujan.....	467
Gambar 8-10.	Skema ideal pembagian WS, DAS, CAT dan Non-CAT yang sesuai peraturan	468
Gambar 8-11.	CAT A mengisi DAS-DAS 1 s/d 4 dalam WS I dan DAS-DAS 6 s/d 8 dalam WS II.....	469
Gambar 8-12.	WS dan CAT yang sesuai ketentuan peraturan → 2 CAT dalam WS Kapuas di Kalimantan Barat (Dit Bina PSDA, 2011).....	470
Gambar 8-13.	WS dan CAT yang tidak sesuai dengan ketentuan peraturan dan dengan ilustrasi pada Gambar 8-8→ ada tujuh buah WS, yaitu: 1. WS Banyuasin, 2. WS Batang hari, 3. WS Reth, 4. Batanghari, 5. WS Indragiri, 6. WS Siak dan 7. WS Rokan ada dalam satu CAT yaitu CAT Jambi-Dumai	471
Gambar 8-14.	WS dan CAT di Jawa yang tak sesuai peraturan	473
Gambar 8-15.	Hubungan sosial, ekonomi dan ekologi (GWP, 2001; Godschalk, 2004).....	478
Gambar 8-16.	Kerangka konseptual perencanaan tata-guna lahan (Berke dkk., 2006).....	478
Gambar 8-17.	Kebutuhan pengelolaan terpadu untuk pencapaian keseimbangan fungsi dan peran air (GWP, 2001; Kodoatie & Sjarief, 2005 & 2010).....	481
Gambar 8-18.	Kesamaan dasar dalam pengelolaan sumber daya air, air tanah dan penataan ruang (Kodoatie dan Sjarief, 2007 & 2010)	482
Gambar 8-19.	Harmoni Pengelolaan SD Air, Tata Ruang Air tanah dan Penataan Ruang (UU No. 26 Tahun 2007; UU No. 7 Tahun 2004 dengan modifikasi oleh Kodoatie & Syarief, 2007; Kodoatie, 2008)	483
Gambar 8-20.	Nilai air di dunia (National Geography, 2008)	486
Gambar 8-21.	Tinggi curah hujan di tiap pulau (mm/tahun) (Ditjen Pengairan, 1986; Mock,1973; JICA, 1992)	487
Gambar 8-22.	Perbandingan air permukaan, air mantap, air tanah dengan curah hujan setiap pulau (Kodoatie & Sjarief, 2010)	488
Gambar 8-23.	Peta administrasi kabupaten di Provinsi Jambi (BPS Provinsi Jambi, 2007).....	490
Gambar 8-24.	Contoh Batas Teknis dan Administrasi	493

BAB 1. BUMI (EARTH)

1.1 Umum

Bumi adalah planet ketiga dari delapan planet dalam Tata Surya dengan matahari sebagai pusatnya. Usianya mencapai $\pm 4,6$ miliar tahun. Bumi tidak berbentuk bulat penuh karena diameter bumi di katulistiwa (garis ekuator) adalah 12.756 km namun diameter antara Kutub Utara dan Kutub Selatan adalah 12.712 m dengan selisih sebesar 44 km dibandingkan diameter di ekuator (<http://id.wikipedia.org/wiki/Bumi>; Farndon, 2005). Diameter bumi ditunjukkan dalam Gambar 1-1.



Catatan: r = jari-jari bumi, r_1 jari-jari horizontal (Timur – Barat sejajar garis ekuator) dan r_2 jari-jari bumi Utara – Selatan (Kutub Utara dan Kutub Selatan)

Gambar 1-1. Diameter dan jari-jari bumi

Bumi hampir sebagian besar tersusun dari batuan. Secara keseluruhan bumi dibagi menjadi 3 lapisan, yaitu (Thompson & Turk, 1993; Taylor, 2005; Riley, 2005; Malam, 2005; Bowler, 2003; Levin, 1985):

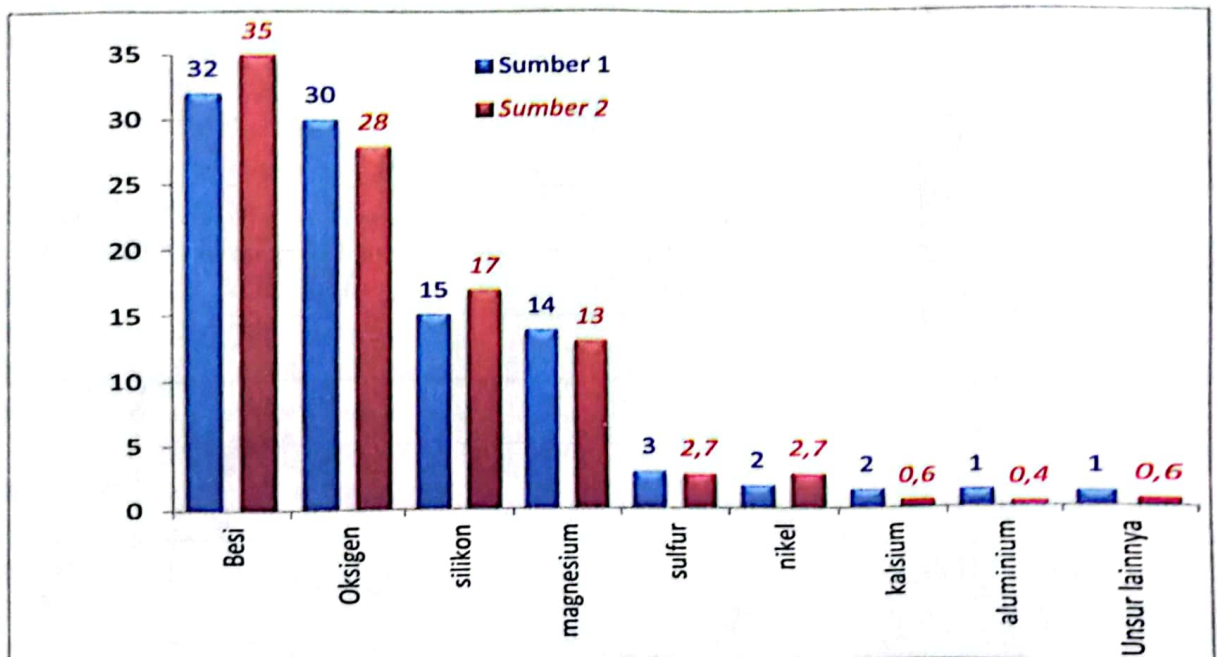
- Kerak bumi terdiri atas:
 - Kerak benua: tebal 20-70 km, berat jenis (*density*) $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$.
 - Kerak lautan: tebal 5-8 km, berat jenis (*density*) $\rho = 2900 \text{ kg/m}^3$.

- Mantel (mantel atas tebal ± 2900 km dan mantel bawah ± 2200 km), berat jenis (*density*) $\rho = 4500$ kg/m^3 .
- Inti bumi tebal ± 1200 km, berat jenis (*density*) $\rho = 10700$ kg/m^3

Berat jenis (*density*) ρ bumi = 5500 kg/m^3

Unsur-unsur kimia utama adalah: besi, oksigen, silikon dan magnesium. Unsur-unsur kimia lainnya adalah: nikel, belerang, kalsium, aluminium dan lainnya. Kerak bumi yang berbatu dan tipis dibandingkan dengan keseluruhan bumi utamanya merupakan gabungan dari oksigen dan silikon yang dikenal dengan sebagai silikat.

Komposisi unsur-unsur kimia tersebut ditunjukkan dalam Gambar 1-2.



Catatan: Sumber 1: <http://id.wikipedia.org/wiki/Bumi>, Sumber 2: Farndon, 2005

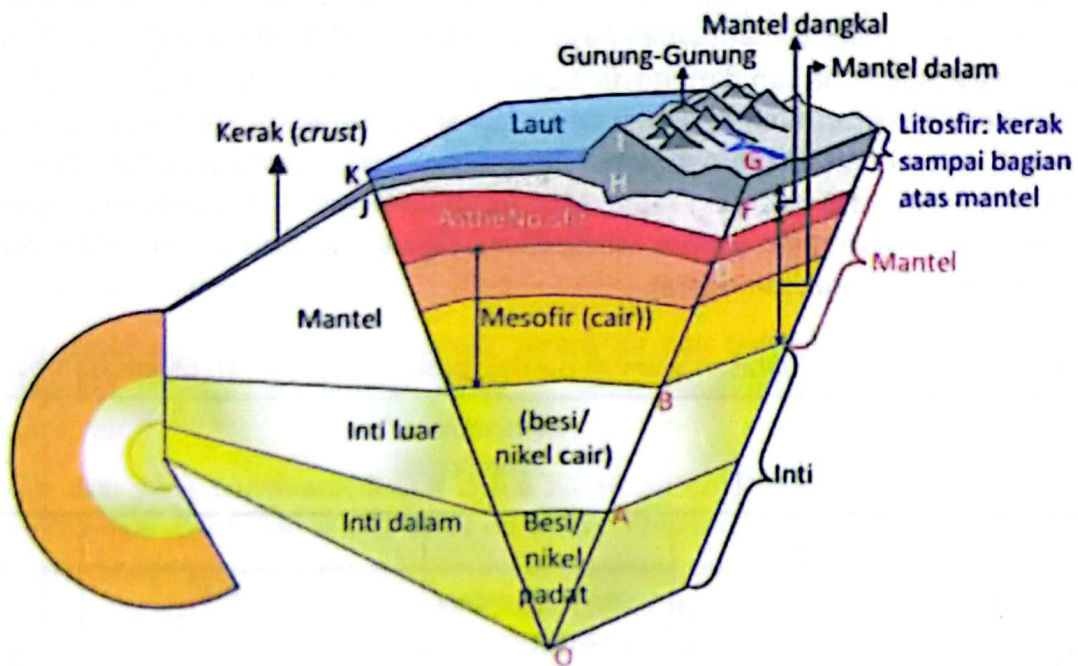
Gambar 1-2. Unsur unsur kimia bumi (dalam %)

Bumi dapat dibagi berdasarkan komposisi jenis material dan atau sifat material seperti ditunjukkan dalam Tabel 1-1.

Tabel 1-1. Lapisan bumi (<http://id.wikipedia.org/wiki/Bumi>)

Menurut sifat mekanik (sifat material)	Tebal (km)	Menurut komposisi (jenis material)	Kedalaman dari muka bumi (km)
1. Litosfir	70	1. Kerak bumi benua	70
		2. Kerak bumi samudra	7
2. Astenosfir	600	3. Mantel bumi atas	660
3. Mesosfir	3075	4. Mantel bumi bawah	2990
4. Inti bagian luar (cair)	2160	5. Inti bagian luar (cair)	5150
5. Inti bagian dalam (padat)	1220	6. Inti bagian dalam (padat)	6370

Lapisan bumi ditunjukkan dalam Gambar 1-3.



a. Lapisan bumi

No.	Notasi	Jarak (km)			Uraian			Ket	Suhu °C
1	O – A	1278	1300	1228	inti dalam	Inti	Besi/nikel padat	4800 – 7200	
2	A – B	2200	1900	2260	inti luar				Besi/nikel cair
3	B – C	3478	2475	—	mesofir	Mantel	Mantel bawah	870 – 3700	
4	C – D				asthenosfir		Mantel dangkal		agak cair
5	D – E								300
6	E – F				kerak bumi (crust)		Kerak benua		
7	F – G	30	100	padat					
8	H – I					5- 10		Kerak samudra	padat
9	J – K	5- 10							

b. detail Gambar a

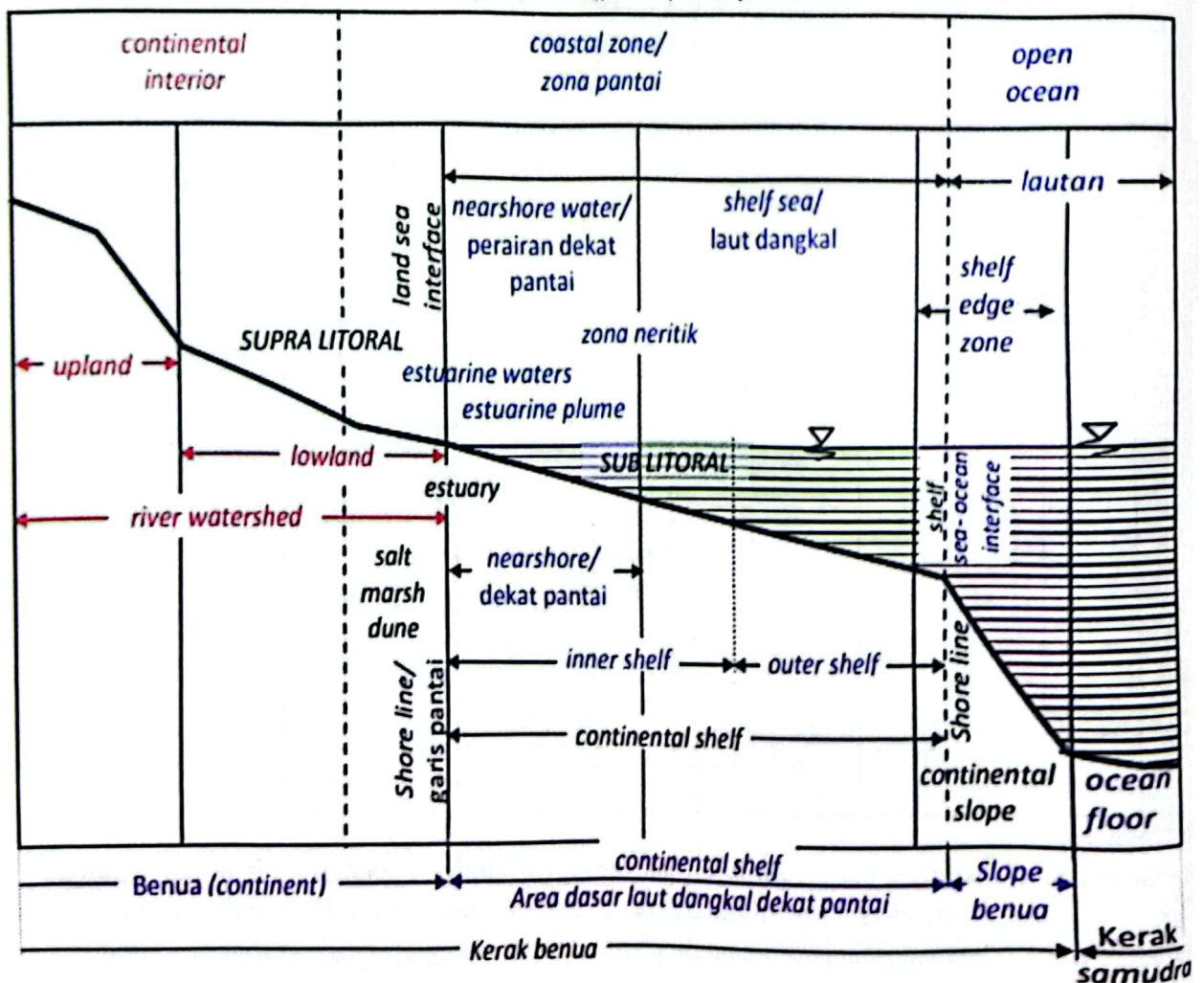
Gambar 1-3. Lapisan bumi (Bonewits, 2008; http://wiki.answers.com/Q/What_is_the_depth_of_the_lithosphere; http://www.cliffshade.com/colorado/images/earth_anatomy.gif; <http://www.enchantedlearning.com/subjects/astronomy/planets/earth/Inside.shtml>)

1.2 Kerak Bumi (Earth Crust)

Kerak bumi (crust) adalah lapisan terluar bumi yang terbagi menjadi dua kategori, yaitu kerak samudra dan kerak benua.

- Kerak benua merupakan bagian dari litosfir bumi di benua dan merupakan kerak (*crust*) dari lapisan batuan beku, batuan sedimen dan batuan metamorf. Batuan penyusun kerak benua yang utama adalah granit, yang tidak sepadat batuan *basalt*. Ketebalan kerak benua sekitar 20-70 km.
- Kerak samudera adalah bagian dari litosfir bumi yang permukaannya berada di cekungan samudera. Kerak samudera tersusun oleh batuan mafic atau sima. Kerak ini lebih tipis dibandingkan dengan kerak benua, dengan ketebalan 5-10 kilometer, tetapi massa jenisnya lebih besar, memiliki massa jenis rata-rata sekitar 3.3 gram/cm^3 atau 3300 kg/m^3 . Penyusun kerak samudra yang utama adalah batuan *basalt*, *diabase* dan *gabbro*. (http://en.wikipedia.org/wiki/Crust_%28geology%29; http://id.wikipedia.org/wiki/Kerak_samudera).

Anatomi kerak bumi dan batasan wilayah pantai (pesisir) ditunjukkan dalam Gambar 1-4.



Gambar 1-4. Ilustrasi kerak bumi, kerak samudra dan batasan wilayah pesisir
(<http://www.answers.com/topic/continental-crust>;
Pernetta & Milliman, 1995 dalam Anggoro, 2008)

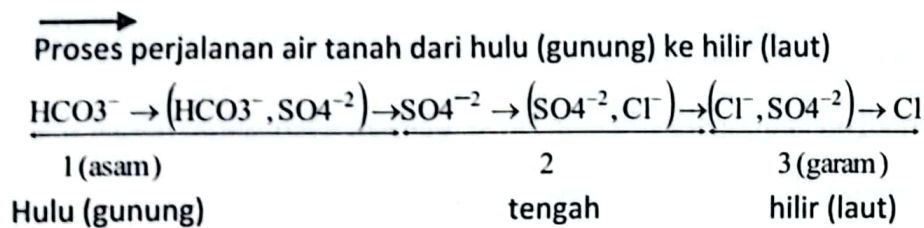
1.3 Formasi Batuan Pembawa Air

Batuan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sumber daya air, baik dari sisi sumber air, daya air maupun keberadaan air.

Terhadap air permukaan batuan memberikan pengaruh antara lain terhadap sistem fluvial yaitu sistem DAS dan jaringan sungainya. Pengaruhnya diantaranya adalah adanya perubahan morfologi sungai yaitu terjadinya *meander* atau *braided*, perubahan kemiringan, perubahan bentuk DAS baik dalam skala waktu (*time*) maupun skala ruang (*space*). Gerakan-gerakan tektonik dan deformasi batuan juga berkontribusi perubahan sungai.

Pada bagian dasar *groundwater* ada kontak antara air dan batuan yang memberikan pengaruh kimiawi terhadap air. Sehingga kandungan kimia air yang mengalir akan mengalami evolusi sesuai dengan lokasi aliran air.

Terhadap air asin yang bermuara di laut maka aliran air tanah merupakan agen atau perantara geologi yang memberikan pengaruh secara terus menerus terhadap lingkungan di sekelilingnya di dalam bumi (Toth, 1984). Chebotarev (1955) menyimpulkan bahwa selama proses perjalanannya aliran air tanah cenderung mengubah secara perlahan komposisi kimia air yang ada dari hulu ke hilir dan mengarah pada komposisi kimia air laut. Unsur-unsur kimia yang larut dalam air tanah berjalan dan berevolusi lewat jalan aliran air tanah. Ia menyelidiki bahwa evolusi ini diikuti oleh perubahan regional dari species *anion* yang dominan seperti terlukis pada diagram dalam Gambar 1-5.



Gambar 1-5. Perjalanan air tanah dari hulu (gunung) ke hilir (laut) (Chebotarev, 1955)

Di dalam kehidupan sehari-hari ada istilah umum asam di gunung dan garam di laut yang mengikuti proses perjalanan air tanah tersebut.

Selama proses tersebut dapat dilihat bahwa umur air semakin tua mendekati ke arah hilir. Dalam melihat diagram diatas harus berdasarkan skala dan penentuan suatu kondisi spesifik geologi. Pengertian skala ini menyangkut skala dimensi ruang dan dimensi waktu. Dalam skala dimensi ruang, daerah aliran yang berdasar diagram Chebotarev ini dapat diuraikan dalam tiga daerah utama yang berkaitan dengan kedalaman (Domenico, 1972) serta hubungan antara kimia air tanah dan sistem aliran regim hidrolik (Toth, 1990) seperti berikut ini:

1. Daerah atas (hulu)

Kondisi: pembilasan air tanah yang aktif dari air hujan melalui batuan yang mudah merembeskan air. Tekanan dan temperatur naik sesuai arah aliran. Daerah ini umumnya terjadi di daerah pegunungan dan sering disebut daerah tangkapan (*recharge area*).

Proses yang terjadi meliputi: disolusi, hidrasi, oksidasi, *attack by acids*, pertukaran dasar.

Unsur-unsur dominan: TDS rendah, Ca, Mg, HCO₃, CO₃ dan SO₄. Unsur-unsur ini mudah sekali bertambah. Batuannya ada bermacam-macam.

2. Daerah tengah

Kondisi: sirkulasi dan pembilasan air yang lebih rendah dari daerah atas. Tekanan mendekati hidrostatik dan temperaturnya cenderung konstan. Biasanya daerah ini merupakan daerah dataran agak tinggi, sedang sampai rendah.

Proses yang terjadi meliputi: disolusi, pengendapan kimia, pengurangan sulfat, pertukaran dasar.

Unsur-unsur dominan: nilai TDS lebih kecil dari daerah atas, perbedaan nilai TDS antara suatu daerah dengan daerah lain cukup tinggi. Unsur dominan Na, Ca, Mg, HCO₃, CO₃ dan SO₄ dan Cl.

3. Daerah bawah

Kondisi: kebalikan dari daerah atas, mempunyai sifat-sifat: aliran air yang lebih lembam (*sluggish*), larutan mineral cukup banyak karena pembilasan air rendah. Daerah ini terjadi di pantai, sering disebut daerah buangan (*discharge area*).

Proses yang terjadi meliputi: pengendapan kimia, pengurangan sulfat, filtrasi selaput.

Unsur-unsur dominan: TDS tinggi, Na, SO₄ dan Cl.

Dari ketiga daerah ini dapat digambarkan secara umum hubungan antara perubahan dengan arah aliran seperti terlihat pada Gambar 1-6.

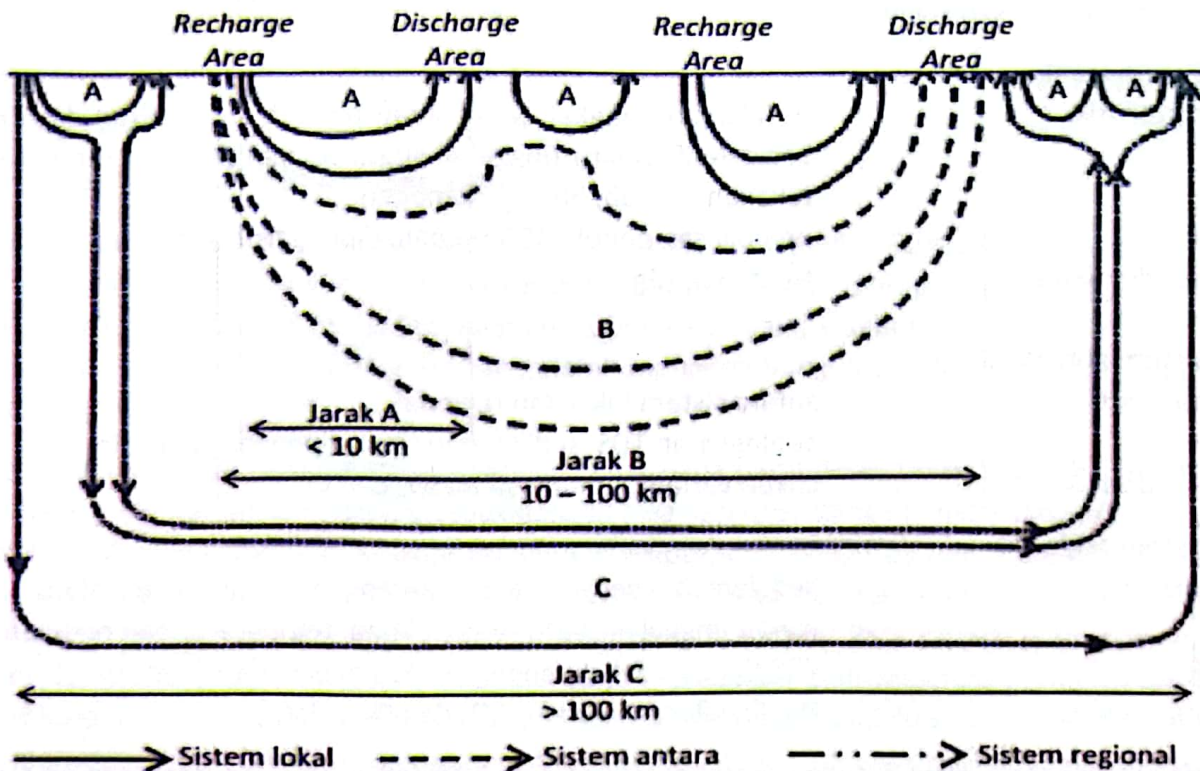
Ketiga daerah ini tidak mempunyai hubungan langsung dengan jarak dan waktu walaupun polanya mengikuti diagram Chebotarev di atas. Hal ini dapat dibuktikan bahwa untuk suatu daerah tangkapan (*sedimentary basin*) kadang air tanah di daerah atas berumur tahunan sampai puluhan tahun sedangkan daerah tangkapan lainnya bisa berumur ratusan sampai ribuan tahun. Air garam di daerah bawah bisa berumur sangat tua namun variasinya bisa ribuan sampai jutaan tahun.

Dikaitkan dengan hal tersebut di atas, Toth (1963) lebih menegaskan hubungan kimia air tanah dengan jenis sistem aliran, yaitu aliran air tanah dapat dibagi menjadi tiga sistem: sistem lokal, sistem antara dan sistem regional. Gambar 1-7 menunjukkan sistem aliran air tanah menurut Toth.

perbandingan cation dan anion		Hulu/ daerah atas
$\frac{SO_4}{Cl}$: turun (↓) - SO_4 berkurang larutan Cl bertambah	<p>arah aliran air tanah</p>
TDS	: naik (↑)	
$\frac{SO_4}{HCO_3}$: naik (↑) - hilangnya unsur CO_2	
$\frac{Ca}{Na}$: turun (↓) - Na dan Ca bertambah karena hilangnya CO_2 - terjadi pertukaran dari Ca ke Na	
$\frac{Ca}{Mg}$: turun (↓) - Na dan Ca bertambah - terjadi pertukaran dari Ca ke Na - $MgSO_4$ lebih banyak dibanding $CaSO_4$	
		Hilir/ daerah bawah

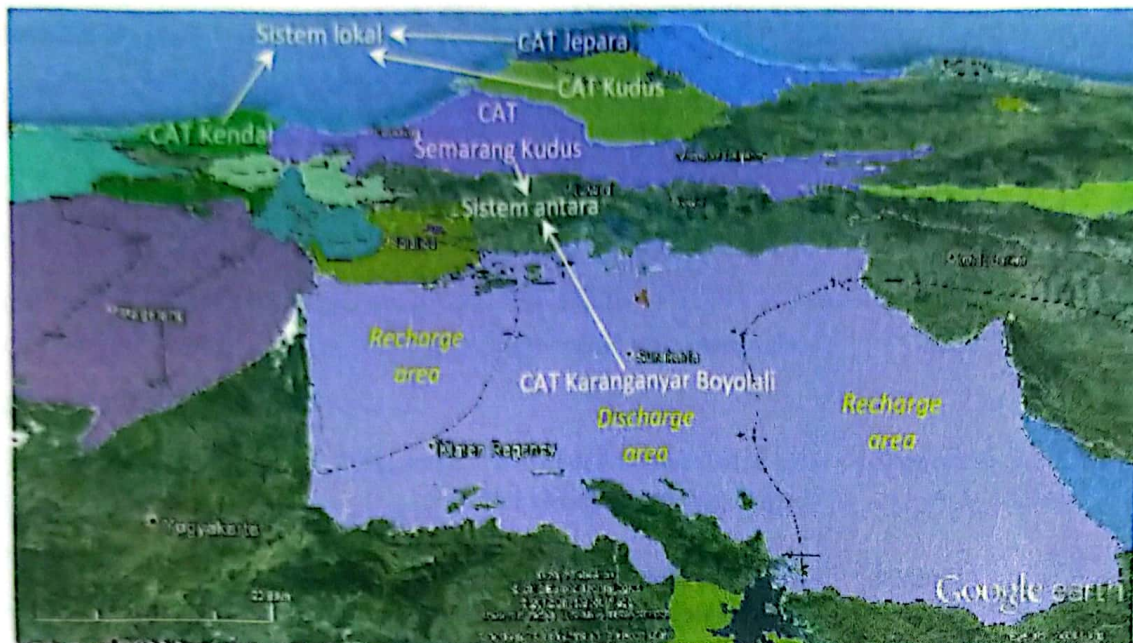
TDS = total dissolved solids (total larutan benda padat)

Gambar 1-6. Perubahan umum dalam arah aliran air tanah



Gambar 1-7. Sistem aliran air tanah (Toth, 1963)

Contoh sistem aliran air tanah ditunjukkan dalam Gambar 1-8.



Gambar 1-8. Contoh Sistem aliran air tanah lokal dan antara di Jawa Tengah

Tiga jenis sistem aliran air tanah seperti ditunjukkan pada Gambar 1-7, masing-masing mempunyai sifat dan karakteristik sebagai berikut:

1. Sistem lokal:

- Karakteristik : kedalaman dangkal, jarak aliran pendek, arah aliran dan besarnya bervariasi, waktu tinggal di suatu tempat pendek, temperatur dan tekanan rendah, litologi homogen.
- Efek : pembilasan penuh, TDS rendah, dipengaruhi oleh musim
- Unsur dominan : HCO_3 , Ca, Mg

2. Sistem antara:

- Karakteristik : antara sistem lokal dan regional.
- Efek : peningkatan TDS, sedikit atau tidak dipengaruhi musim
- Unsur dominan : cukup variatif, umumnya NaSO_4 dan Cl

3. Sistem regional:

- Karakteristik : kedalaman besar, jarak aliran panjang, laju aliran tunak, waktu tinggal di suatu tempat lama, temperatur dan tekanan tinggi
- Efek : TDS tinggi, tidak dipengaruhi oleh musim dan iklim.
- Unsur dominan : Na, Cl, hilangnya unsur CO_2 dan O_2 (relatif)

Terhadap air tanah, sikap batuan sangat mempengaruhi keberadaan dan ketersediaan air tanah. Air tanah terdapat di banyak tipe formasi geologi lulus air yang dapat bertindak sebagai lapisan pembawa air atau lebih dikenal dengan nama akuifer.

Dapat disimpulkan ada interaksi timbal balik yang penting antara air dan batuan, artinya keduanya akan saling mempengaruhi dari sisi keberadaan masing-masing dalam skala waktu dan ruang (*interdependency*).

Pada prinsipnya batuan dibagi dalam tiga jenis, yaitu: batuan beku, batuan sedimen dan batuan malihan (metamorf). Keterkaitan jenis batuan dengan air diuraikan berikut ini.

1.3.1 Batuan Beku

Batuan beku (*igneous rock*) terbentuk dari hasil pembekuan magma yang berbentuk cair dan panas. Magma tersebut mendingin dan mengeras di dalam atau di atas permukaan bumi (Bishop et al., 2007). Proses pembentukan batuan beku dapat dibedakan menjadi dua cara, ialah secara intrusif dan ekstrusif. Batuan beku yang terbentuk dari hasil pembekuan cairan magma yang terjadi jauh di bawah permukaan tanah (di dalam tanah) disebut batuan beku intrusif (batuan plutonik) contoh granit, diorit, dan gabro, sedangkan batuan beku yang terbentuk dari hasil pembekuan cairan magma yang terjadi di permukaan tanah disebut batuan beku ekstrusif contoh lava *basalt*, andesit, dan riolit (Goodman, 1993). Batuan beku yang terbentuk di luar kulit bumi melalui kegiatan vulkanik disebut batuan vulkanik, sedangkan yang terbentuk di dalam kulit bumi disebut batuan plutonik.

Dalam bentuk pejal, formasi batuan ini relatif kedap atau tidak lulus air dan oleh sebab itu tidak dapat menyimpan dan melalukan air, sehingga disebut sebagai akuifug atau perkebal (*aquifuge*). Namun apabila formasi batuan ini mempunyai banyak rongga, celahan, dan rekahan akibat proses pembentukan dan akibat gaya geologi, maka formasi batuan ini dapat bertindak sebagai formasi batuan pembawa air atau akuifer.

1.3.1.1 Batuan Vulkanik (Batuan Beku Ekstrusif)

Lava *basalt* merupakan salah satu dari batuan vulkanik, kurang lebih 70% permukaan bumi (Taylor, 2005). Bukaan lava *basalt* biasanya berupa rekahan. Batuan dengan pori-pori yang tinggi merupakan hasil dari pengembangan bukaan gelembung-gelembung gas yang disebut lava dingin. Akuifer *basalt* mengandung air pada rekahan antara bukaan gelembung-gelembung gas pada lapisan atas atau bawah akuifer tersebut (Johnson, 1974).

Pada batuan vulkanik lava mendingin dengan cepat pada permukaan tanah yang akan membentuk lubang-lubang pada batuan dan lazim disebut dengan lava vesikuler dengan kristal yang kecil karena tak ada waktu untuk kristal tumbuh. Lubang tersebut merupakan pori-pori batuan. Porositas *basalt* yang terbentuk dari magma dengan kandungan gas rendah, umumnya berkisar antara 1% - 12% (Schoeller, 1962). Porositas batuan vulkanik tanpa rekahan mencapai lebih dari 85% seperti pada batuan apung (Davis dan De Wiest, 1966). Pada permeabilitas yang disebabkan oleh rekahan, porositas lokal dapat meningkat karena pelapukan. Semakin tua umur batuan vulkanik permeabilitas dan porositas cenderung semakin menurun secara perlahan terhadap waktu geologi. Penurunan permeabilitas dan porositas ini terjadi karena pemadatan dan karena pori-pori terisi dengan mineral-mineral sekunder.

Pada erupsi vulkanik lava akan mengalir turun dari puncak gunung ke lembah, sehingga lembah ini akan tertimbun lava vesikuler yang akan menjadi akuifer. Sungai yang terbendung oleh lava akan menjadi danau yang terisi lava, lempung, dan debu vulkanik (Davis dan De Wiest, 1966).

1.3.1.2 Batuan Plutonik (Batuan Beku Intrusif)

Batuan plutonik, seperti granit, gabro, dan diorit memiliki ukuran kristal yang kasar karena magma memerlukan waktu yang cukup lama untuk menjadi dingin pada kedalaman tertentu sehingga ada waktu untuk kristal tumbuh. Batuan beku yang membentuk retas (*dyke*) dan retas-lempang (*sill*) seringkali disebut batuan hipabisal. Batuan itu mendingin lebih cepat daripada plutonik karena terdapat di rongga-rongga kecil yang lebih dekat ke permukaan bumi. Hal ini membuat batuan hipabisal, seperti kuarsa porfiri dan diabas, memiliki kristal dengan ukuran yang lebih halus (Taylor, 2005).

Batuan beku plutonik mempunyai porositas kurang dari 3% dan sebagian besar kurang dari 1% (Davis dan De Wiest, 1966). Porositas dan permeabilitas yang besar terbentuk melalui rekahan dan perubahan batuan karena pelapukan. Permeabilitas sebagai akibat rekahan pada umumnya terjadi sekitar 10 m dan dalam beberapa kasus tertentu mencapai beberapa ratus meter dari muka tanah. Rekahan ini disebabkan karena perubahan tektonik yang terjadi selama beberapa episode pada sejarah geologi batuan. Luas bukaan rekahan umumnya kurang dari 1 mm. Perbedaan permeabilitas antara massa batuan dengan luas rekahan adalah puluhan milimeter.

Menurut Tolman (1937) dan Davis (1969), pada beberapa penyebaran batuan bisa terjadi peningkatan bukaan rekahan yang signifikan. Air yang masuk ke dalam rekahan batuan, membawa larutan silika. Tidak seperti batuan karbonat, larutan silika mempunyai residu yang tidak dapat teruraikan yang cenderung menyumbat pada rekahan.

Air tanah terdapat pada rekahan batuan yang terletak berdekatan dengan patahan dan sepanjang bukaan lipatan yang luas. Batuan itu sendiri umumnya tidak tembus air kecuali pada zona yang dipengaruhi oleh pelapukan. Sumber air kadang-kadang diperoleh dari hasil lapukan zona kedap air pada batuan induk (Clark, 1985; Jones, 1985; Goodman, 1993). Lokasi sumber air tanah dapat diketahui dengan interpretasi foto udara pada permukaan rekahan yang umumnya akan ditunjukkan dengan kelurusan (Hazell et al., 1988; Goodman, 1993).

Pada kenyataannya beberapa sumur pada sebagian kawasan rekahan dapat menghasilkan lebih dari 50 gpm (*gallon per minute*) atau 273 m³/hr atau 3,16 liter/dtk yang ditunjukkan dengan tingginya keberadaan zona lulus air (Davis & De Wiest, 1966).

Studi geofisika dapat digunakan untuk menentukan aspek geologi yang tersembunyi, meskipun lokasi air tanah dapat ditemukan langsung. Metode seismik dan geolistrik lebih banyak digunakan daripada metode magnetik pada area metamorf dan batuan beku plutonik.

1.3.2 Batuan Sedimen

Batuan sedimen merupakan material hasil rombakan dari batuan beku, batuan metamorf, dan batuan sedimen lain yang dibawa oleh aliran sungai kemudian diendapkan di tempat lain baik di darat

maupun di laut, contoh batuan pasir dan batuan lempung. Endapan tersebut terkumpul di suatu tempat di mana saja dan mengalami proses pemadatan, konsolidasi, dan sementasi, yang akhirnya akan mengeras yang kemudian disebut dengan batuan sedimen (Goodman, 1993). Kebanyakan batuan sedimen terbentuk dari pecahan-pecahan batu yang tersusun menjadi lapisan-lapisan lalu mengeras dan membentuk batuan baru. Beberapa batuan sedimen terbentuk dari bahan organik atau mineral yang larut dalam air sebagai hasil proses kegiatan makhluk hidup, contohnya batu gamping yang merupakan hasil kegiatan terumbu karang di laut.

Menurut Verhoef (1994), batuan sedimen pada umumnya berupa butir-butir tersendiri mulai dari berukuran sangat halus hingga sangat kasar, seringkali terekat satu sama lain oleh massa antara (matriks), pasir lepas (tidak merekat), begitu juga butir yang mengendap dalam air (*sub aquatic*), atau di udara (*eolian*), karena biasanya butir-butir tersebut tidak berlapis.

Porositas batuan sedimen mengalami penurunan selama proses konsolidasi dan partikel-partikelnya menjadi semakin rapat. Sedangkan tekanan semakin bertambah selama proses konsolidasi (Bell, 2007).

Batuan sedimen merupakan kumpulan-kumpulan partikel dengan beberapa karakteristik tergantung letak partikel-partikelnya. Susunan partikel-partikel batuan sedimen tergantung konsep pemadatannya, yang mengacu pada besarnya kerapatan partikel (Bell, 2007).

Batuan sedimen yang mempunyai permeabilitas tinggi karena butiran penyusunnya seragam dengan ukuran butir kasar dan berupa sedimen lepas dapat bertindak sebagai akuifer yang baik. Sebaliknya yang mempunyai ukuran butir halus sehingga pori-pori batuan sangat kecil, seperti lempung, bertindak sebagai lapisan perkedap atau akuiklude (*aquiclude*), meskipun jenuh air tetapi relatif kedap air yang tidak dapat melepaskan airnya. Di antara keduanya, ada jenis batuan sedimen, yang bertindak sebagai lapisan perlambat atau akuitar (*aquitard*), bersifat jenuh air namun hanya sedikit lulus air, sehingga tidak dapat melepaskannya dalam jumlah berarti.

1.3.2.1 Batuan Pasir

Batuan pasir terbentuk dari material yang berukuran pasir yang diameternya mencapai 0,06-2 mm (Goodman, 1993). Batuan pasir merupakan sedimen lepas dari butir mineral dan pecahan batuan. Butir itu biasanya tersusun dari kuarsa (Bell, 2007). Ada berbagai macam batuan pasir yang warna dan teksturnya berasal dari bahan pengikat material itu. Batuan pasir dapat terbentuk hampir di semua tempat, tetapi lebih sering terletak di dasar laut, dasar sungai, dan gurun.

Sekitar 25% dari batuan sedimen adalah batuan pasir. Lingkungan pengendapan batuan pasir antara lain daerah banjir, sepanjang garis pantai, delta, aeolian. Distribusi permeabilitas batuan pasir dapat diperoleh pada endapan yang terbentuk (Freeze dan Cherry, 1979).

Pada proses pengendapan, partikel-partikel halus pada sedimen cenderung mengisi ruang antar butir yang seragam. Ruangan yang berisi material halus dapat mengurangi porositas sedimen, sehingga dapat menurunkan kapasitas simpanan. Presipitasi kimia juga dapat menurunkan porositas. Penyebaran perkolasi yang melewati pasir sering membawa silika dan larutan kalsium yang signifikan dari lapisan di atasnya. Intrusi magma yang cukup panas dapat melarutkan sebagian butiran pasir, yang menyebabkan

lapisan di atasnya tertekan dan mengisi ruang-ruang pori. Formasi batuan pasir merupakan batuan yang penting untuk tampungan air tanah yang luas, sehingga merupakan akuifer yang baik.

Porositas batuan pasir dipengaruhi ukuran butir, bentuk butir, dan tempat terbentuknya sedimen (Fetter, 1994). Pasir tak tahan terhadap pelapukan mempunyai porositas antara 30-50% (Freeze dan Cherry, 1979). Menurut Davis dan De Wiest (1966) porositas batuan pasir berkisar kurang dari 5% dan paling tinggi sekitar 30%. Sebagian besar lubang-lubang pori berfungsi untuk menentukan jenis butiran-butiran, pemadatan dan derajat kepadatan. Porositas batuan pasir biasanya lebih rendah karena adanya kepadatan dan material semen di antara butiran. Pada kondisi ekstrim porositas kurang dari 1% dan keterhantaran (konduktivitas) hidraulik batuan mendekati kurang lebih 10^{-10} m/dt. Sebagian besar material penyemenan adalah kuarsa, kalsit, dan mineral lempung. Porositas pemadatan dengan batuan pasir dengan lempung cenderung menjadi sangat tinggi karena lempung sendiri mempunyai porositas yang tinggi. Pemadatan sangat penting pada kedalaman yang besar di mana suhu dan tekanan besar.

Menurut Davis dan De Wiest (1969) bahwa prosentase stratifikasi untuk skala kecil batuan pasir memungkinkan permeabilitas cenderung menjadi anisotropik yang seragam. Pasir dengan butir sedang mempunyai permeabilitas antara 1000 dan 30.000 *millidarcys*, tetapi pada umumnya permeabilitas kaitan batuan pasir butir sedang 1-500 *millidarcys* ($1 \text{ millidarcys} \cong 10^{-11} \text{ cm}^2$). Efek yang menyolok dari stratifikasi permeabilitas adalah bahwa permeabilitas vertikal batuan pasir efektif lebih rendah pada zona di mana permeabilitas horisontal sangat tinggi. Pada dasarnya permeabilitas menurut Piersol (1940) merupakan rata-rata dari permeabilitas vertikal dan horisontal. Permeabilitas yang besar cenderung terjadi pada arah horisontal. Pada lapisan batuan pasir dan kerikil merupakan akuifer penting yang bisa menghasilkan air dalam jumlah yang besar, sebagian besar merupakan rembesan dari aliran aluvial pada mulut lembah (Todd, 1959 & 1980). Pengertian permeabilitas ini berbeda dengan permeabilitas dalam mekanika tanah karena merujuk hanya pada sifat-sifat batuan yang menunjukkan berapa besar luas area batuan yang dilalui oleh fluida, sedangkan pengertian permeabilitas dalam ilmu mekanika tanah adalah identik dengan konduktivitas hidraulik dalam ilmu hidrogeologi (Kodoatie, 1996).

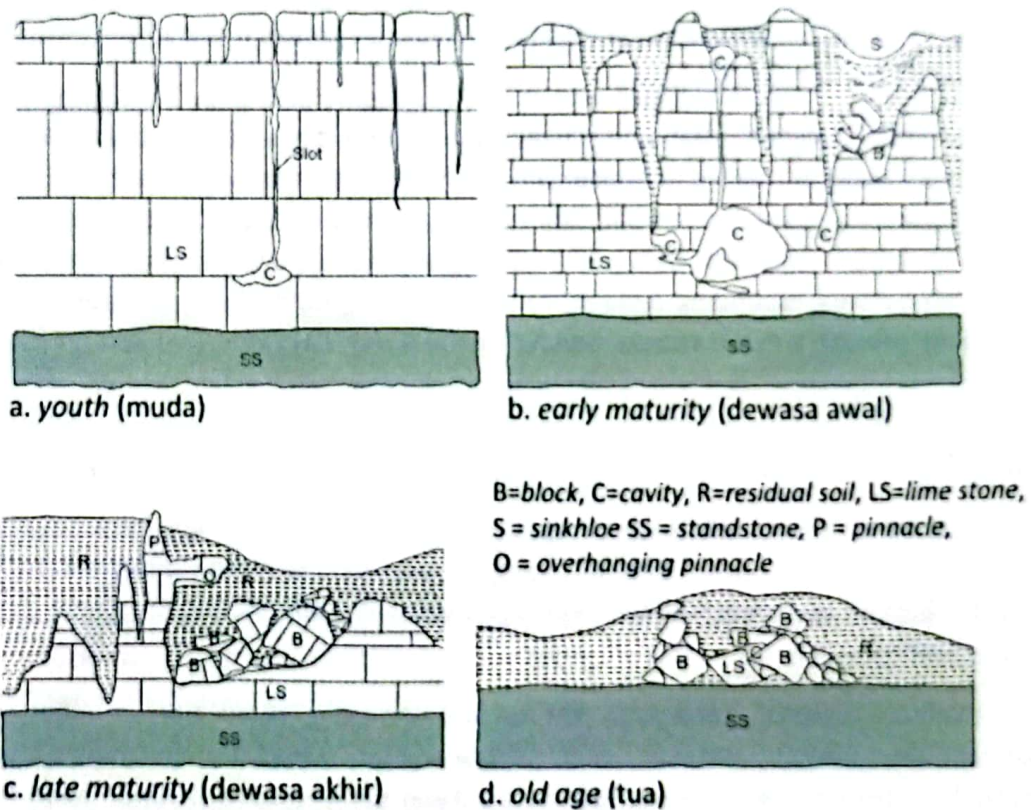
Batuan pasir yang mengalami pemadatan kuat dengan porositas dan permeabilitas yang rendah dapat menghasilkan air bila dibuat sumur di sepanjang zona rekahan. Sebagian besar area ini dikembangkan sebagai sumber air tanah di sepanjang zona rekahan sampai pada zona lipatan. Sumber air tanah yang baik akan ditemukan pada lembah yang luas dan pada dataran tinggi dibanding puncak bukit dan lereng lembah (Davis dan De Wiest, 1966).

1.3.2.2 Batuan gamping

Topografi gamping (*karst*) adalah bentuk bentang alam tiga dimensional yang terbentuk akibat proses pelarutan lapisan batuan dasar, khususnya batuan karbonat seperti batuan gamping, kalsit atau dolomit. Air yang meresap melalui rekahan dan kekar pada batuan gamping, kemudian melarutkannya. Secara perlahan, rekahan itu menjadi semakin besar dan membentuk gua. Salah satu karakteristik dari kawasan batuan gamping adalah dapat menjadi kawasan yang partikel-partikelnya mudah pecah dan terjadi penurunan atau amblesan tanah karena erosi tanah (Back et al., 1992).

Pertumbuhan tipologi karst terbagi atas masa muda, dewasa, dan tua. Pada masa muda, karst tidak begitu luas, dan drainase permukaan masih Normal, kecuali pada aliran buangan yang hilang di bawah tanah dan mata air yang alirannya bertemu di permukaan. Pada masa dewasa karst ditandai dengan adanya sumuran dan terpisahnya sistem larian air tanah. Pada masa tua, karst mengalami peningkatan yang cepat dengan ditandai adanya endapan lempung yang mengandung kalsit dan dolomit (Goodman, 1993). Pertumbuhan tipologi tersebut dapat dilihat pada Gambar 1-9. Bagian dari formasi gua pada atau di atas muka air menunjukkan larian permukaan yang terhubung pada sistem yang menerus dengan aliran gua.

Beberapa lokasi di Indonesia yang mempunyai kawasan karst yang berkembang antara lain: Gunung Kidul di P. Jawa, P. Madura, P. Bali, Maros di P. Sulawesi, bagian Kepala Burung P. Papua, serta pulau-pulau lainnya di perairan Indonesia Bagian Timur. Pertumbuhan tipologi Karst ditunjukkan dalam Gambar 1-9.



Gambar 1-9. Pertumbuhan Tipologi Karst (Goodman, 1993)

Batuan karbonat terdapat pada batuan gamping dan dolomit yang terdiri dari mineral kalsit dan dolomit, dan sedikit lempung. Perubahan bentuk mineral disebabkan adanya peningkatan porositas dan permeabilitas. Hal ini disebabkan karena molekul-molekul dolomit menempati sekitar kurang dari 13%

dari kalsit. Permeabilitas pada lapisan batuan gamping tua utuh dan dolomit biasanya tidak lebih dari 10^{-7} m/det pada suhu permukaan (Freeze & Cherry, 1979).

Batuan gamping umumnya memiliki sifat kerapatan, porositas, dan permeabilitas yang tinggi tergantung waktu derajat konsolidasi dan perkembangan lajur permeabilitasnya setelah mengendap. Proses karstifikasi yang dikendalikan oleh rekahan, membentuk jaringan sungai bawah tanah. Akuifer yang terbentuk oleh proses tektonik dan pelarutan merupakan suatu akuifer produktif di kawasan karst. Aliran air tanah dalam sistem akuifer karst mengalir pada jaringan rekahan. Mata air dengan debit besar umumnya juga ditemukan pada batuan gamping (Todd, 1959).

Lapisan batuan karbonat mempunyai permeabilitas sekunder sebagai hasil dari pecahan atau bukaan lubang rekahan dan pelarutan lahan. Hal ini disebabkan karena adanya perubahan tegangan dari penyebaran kalsit atau dolomit karena adanya sirkulasi air tanah. Lipatan vertikal yang melebar karena pelarutan yang dekat dengan permukaan cenderung terisi oleh lempung dari lapisan tanah di atasnya. Bukaan horisontal cenderung berkembang lebih baik dekat patahan, sehingga patahan vertikal pada permukaan sebaiknya digunakan sebagai lokasi pengeboran untuk mencari lokasi sumur dengan debit air besar (Davis dan De Wiest, 1966).

Batuan karbonat dengan rekahan vertikal dan bidang bukaan horisontal biasanya mempunyai kemungkinan lebih tinggi untuk menemukan bukaan horisontal daripada rekahan vertikal. Pada batuan gamping, lokasi sumur pada dasar lembah lebih baik daripada di daerah lereng lembah. Tampungan air pada perbatasan antara alluvium dan muka air dapat memberikan keuntungan. Sumur dibor pada daerah atas lebih berhasil dibanding pengeboran pada lereng bukit. Bukaan rekahan dan larutan sangat banyak sepanjang puncak antiklin sampai palung sinklinal dan daerah sayap lipatan (Davis dan De Wiest, 1966).

1.3.3 Batuan Malihan (*Metamorf*)

Apabila batuan terkena oleh tekanan atau panas yang hebat, atau keduanya, batuan itu akan berubah menjadi batuan baru. Batuan yang telah berubah ini dinamakan batuan malihan (*metamorfosis*). Batuan metamorf dibagi mejadi dua yaitu, batuan malihan regional dan batuan malihan kontak (Taylor, 2005).

Batuan malihan regional, terbentuk ketika dua lempeng bumi bertumbukan dan membentuk gunung, batuan akan hancur, tertekan, serta terbakar oleh panas dan tekanan dari dalam bumi. Hal tersebut terjadi mencakup daerah yang luas dan batuan yang terbentuk dinamakan malihan regional. Batuan malihan regional umumnya mempunyai tampakan bergaris karena kristal penyusunnya berjajar di arah yang sama. Malihan regional akan mengubah serpih menjadi batuan sabak (*slate*), batuan sabak dan serpih menjadi sekis (*schist*), serta mengubah ketiganya menjadi genes (*gneiss*) (Taylor, 2005).

Batuan malihan kontak, ini terbentuk ketika batuan mengalami kontak (bersentuhan) dengan magma panas, batuan tersebut akan terpanggang oleh panas dan berubah menjadi batuan baru. Semakin dekat batuan tersebut ke magma dan semakin besar jumlah magmanya, maka makin besar kemungkinan batuan itu berubah. Proses malihan kontak mengubah batuan gamping menjadi marmer,

batuan pasir menjadi kuarsit, serta mengubah *mudstone* (batu dari tanah liat hitam) menjadi *hornfel* (Taylor, 2005).

Batuan metamorf merupakan tipe batuan yang mempunyai porositas batuan yang sangat rendah karena adanya saling kunci antar kristal penyusun batuan (Davis, 1969). Dua proses geologi yaitu pelapukan kimiawi (menjadi dekomposisi) dan pelapukan mekanis (menjadi rekahan) dapat meningkatkan porositas batuan. Batuan pada kedalaman tertentu dapat retak karena ditekan oleh beban berat lapisan batuan yang terletak di atasnya. Gaya tektonik dapat menyebabkan lipatan dan patahan. Rekahan dapat meningkatkan porositas batuan sekitar 2%-5% (Davis, 1969; Brace dkk., 1966). Batuan metamorf yang terpengaruh pelapukan mempunyai porositas sekitar 30%-60% (Stewart, 1964).

Batuan metamorf seperti halnya batuan beku, dalam bentuk pejal relatif tidak lulus air. Namun dengan adanya sistem rekahan batuan ini dapat bertindak sebagai akuifer, meski umumnya hanya dapat melepaskan airnya dalam jumlah yang tidak berarti. Rekahan ini baru bisa menjadi bersifat akuifer jika rekahan saling berhubungan dan ada sumber air. Pada batuan ini hanya dapat dikembangkan sumur dengan debit kecil (Todd, 1959).

Pada batuan ini jumlah air yang bisa dihasilkan dari sumur berkisar antara 1-50 gpm (5,5-275 m³/hr atau 0,064 – 3,16 liter/dtk). Pada beberapa kasus, jumlah air yang dihasilkan bisa lebih sedikit, sehingga pemompaan dapat dilakukan berkali-kali. Meskipun demikian volume tersebut mencukupi untuk kebutuhan domestik (Driscoll, 1987).

1.4 Litologi, Stratigrafi dan Geologi Struktur

1. Litologi/Lithology

Lithology adalah ilmu yang mempelajari karakteristik batuan; kata lithos dari Bahasa Yunani (Greek) berarti batu (New Webster Dictionary, 1997). Beberapa definisi lain, diantaranya:

- Studi mengenai karakter fisik atau formasi batuan meliputi warna, komposisi dan tekstur terutama pada tingkat makroskopik (*gross*).
- Cabang ilmu geologi yang mempelajari asal dan formasi batuan serta klasifikasi dan mineral komposisi (Collins English Dictionary, 2003; The American Heritage, 2005; <http://www.thefreedictionary.com/lithology>).

Selanjutnya dijelaskan litologi (macam-macam kulit bumi) merupakan susunan fisik dari simpanan geologi. Susunan ini termasuk komposisi mineral, ukuran butiran dan kumpulan butiran (*grain packing*) yang terbentuk dari sedimentasi atau batuan yang menampilkan sistem geologi.

2. Stratigrafi

Studi tentang lapisan batuan (*rock strata*) terutama tentang distribusi, deposisi, korelasi dan umur batuan sedimen dan batuan beku (<http://en.wikipedia.org/wiki/Stratigraphy>).

Stratigrafi menjelaskan hubungan geometris dan umur antara macam-macam lensa, dasar dan formasi dalam geologi sistem dari asal terjadinya sedimentasi. Stratigrafi juga mempelajari lapisan-lapisan dan pelapisan batuan. Utamanya stratigrafi dipakai untuk kajian dan studi tentang pengendapan dan lapisan batuan vulkanik. Stratigrafi mencakup dua bidang: untuk batuan disebut dengan *lithostratigraphy* dan untuk biologi disebut *biologic stratigraphy* atau *biostratigraphy* (Freeze dan Cheery, 1979; <http://en.wikipedia.org/wiki/Consolidation>).

Pada simpanan yang belum terkonsolidasi (*unconsolidated deposits*) litologi dan stratigrafi merupakan pengendali yang paling penting dan berpengaruh terhadap sumber daya air baik air permukaan dan air tanah (Freeze dan Cheery, 1979; Schumm et al., 2000; Schumm, 2005).

3. Geologi Struktur

Geologi struktur adalah studi tentang unit-unit batuan tiga dimensi yang berhubungan dengan sejarah deformasinya (http://en.wikipedia.org/wiki/Structural_geology).

Bentuk struktur seperti: pecahan/belahan (*cleavages*), retakan (*fractures*), lipatan (*folds*), patahan (*faults*) dan jungkit (*tilt*) merupakan sifat-sifat geometrik dari sistem geologi yang dihasilkan oleh perubahan bentuk (*deformation*) akibat adanya proses penyimpanan (*deposition*) dan proses kristalisasi (*crystallization*) dari batuan.

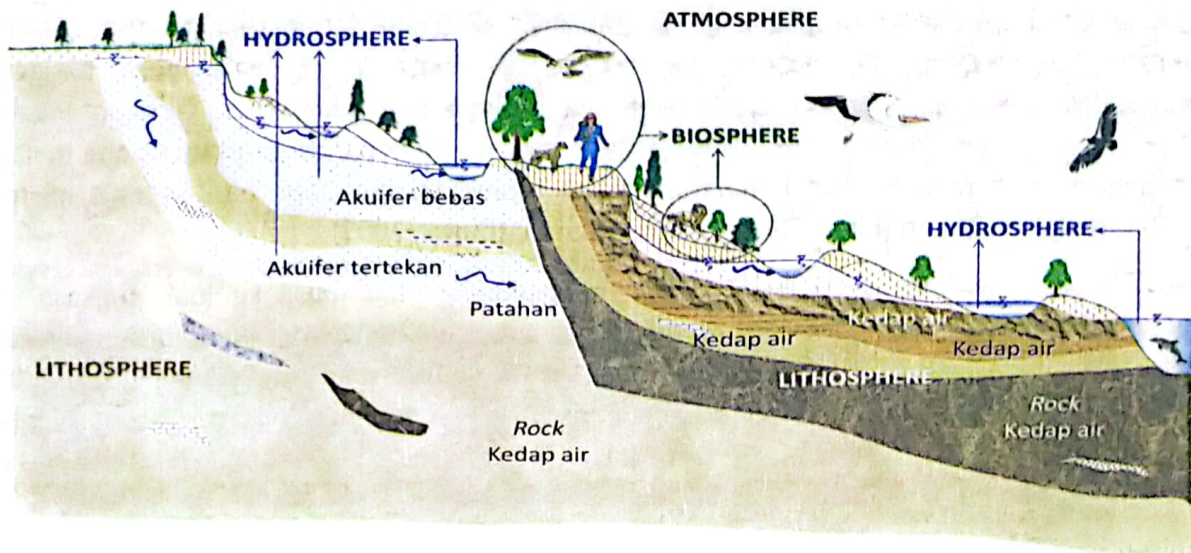
Bentuk-bentuk tersebut merupakan salah satu pengontrol batas hidrogeologis air tanah. Dengan kata lain bentuk struktur geologi merupakan salah satu batas hidrologis atau batas fisik pengelolaan air tanah untuk daerah CAT.

1.5 Atmosphere, Hydrosphere, Biosphere dan Lithosphere

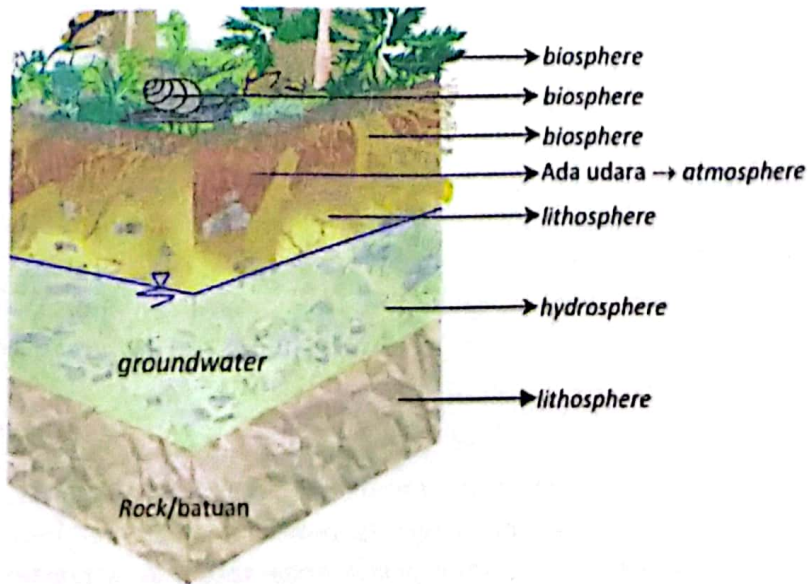
Sphere adalah kata dalam bahasa Inggris yang berarti bulatan, bola, bidang, atau lingkungan (<http://id.wikipedia.org/wiki/Sphere>). Bumi yang bulat juga dapat disebut bulatan bumi (*earth sphere*). Semua hal di bumi dapat dibagi menjadi 4 subsistem utama, yaitu: udara (*air*), air (*water* → *hydro*) dan benda hidup (*living things* atau *bio*), tanah (*ground* atau *land*). Bila dihubungkan dengan pengertian *sphere* maka keempat sub-sistem ini dapat disebut:

- *Atmosphere* atau atmosfer untuk udara (*air*)
- *Hydrosphere* atau hidrosfer untuk air (*water* atau *hydro*)
- *Biosphere* atau biosfer untuk benda hidup (*bio*)
- *Lithosphere* atau litosfer untuk tanah (*ground* atau *litho*)

Keempat *sphere* tersebut dilustrasikan dalam Gambar 1-10. Sering terjadi ke empat *sphere* tersebut bisa berada pada satu lokasi. Sebagai contoh seperti terlihat dalam Gambar 1-11 pada suatu lokasi tanah (*soil*), dipermukaannya maupun di bawah muka tanah bisa ada tumbuhan dan binatang (*biosphere*). Di atas muka tanah ada sungai, danau, waduk dan di dalam tanah ada air tanah atau *groundwater* atau *soil water* (*hydrosphere*). Di bawah muka tanah ada *soil* dan *ground* serta mineral yang merupakan bagian dari *lithosphere*. Ada udara pada kantung udara di antara butiran tanah dalam *vadoz zone* (*atmosphere*).



Gambar 1-10. Ilustrasi ruang bumi



Gambar 1-11. Keempat sphere dalam suatu lokasi lokal

1. Atmosphere (atmosfir)

Bumi terbungkus oleh selimut udara biasa dikenal sebagai atmosfer. Atmosfer merupakan lapisan pembatas antara bumi dengan ruang angkasa, tebalnya ± 700 km dari permukaan bumi. Atmosfer tersusun atas 20% oksigen, 78% nitrogen, dan gas-gas lain sebesar 2%. Sebagian besar oksigen yang terkandung dalam atmosfer berasal dari pelepasan oksigen dari tumbuhan. Oksigen inilah yang menyokong kehidupan makhluk hidup. Atmosfer berfungsi menjaga panas, terutama pada malam hari ketika sebagian bumi membelakangi matahari. Akan tetapi, selama siang hari selimut ini menjadi pelindung dari sinar matahari (Riley, 2005; Oliver, 2005; Matthews, 2005).

Atmosfer tetap melekat pada bumi, tidak mengambang atau lepas ke luar angkasa, hal ini disebabkan karena kekuatan gravitasi yang menarik gas-gas atmosfer ke arah bumi dan mencegah agar gas-gas tersebut tidak lepas ke luar angkasa (Matthews, 2005). Atmosfer bumi dibagi ke dalam lapisan-lapisan menurut suhunya, meskipun tidak ada batas-batas zat yang memisahkan masing-masing lapisan. Bumi adalah satu-satunya planet dalam Sistem Tata Surya yang mempunyai air dalam jumlah besar, baik di dalam atmosfer maupun di atas atau di bawah permukaannya.

Lapisan-lapisan penyusun atmosfer bumi antara lain (Watt dan Wilson, 2004; http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_atmosphere, 2009; Riley, 2005; Oliver, 2005; Malam, 2005; Nicholson, 2005;):

a. Troposfer

Troposfer adalah lapisan atmosfer yang terbentang mulai dari permukaan tanah sampai sekitar 10 kilometer ke atas. Sebagian besar cuaca terjadi di troposfer. Troposfer mempunyai ketinggian yang berbeda-beda antara 10 km (6 mil) dan 20 km (12 mil). Semakin naik ketinggian troposfer, suhu udaranya akan semakin dingin kira-kira -50°C (-58°F), tetapi semakin mendekati permukaan udara, suhunya semakin memanas. Karena hal inilah, sebagian besar awan terbentuk di lapisan ini yang disebut awan cumulus. Awan-awan dengan bagian atas yang datar menunjukkan tempat troposfer bertemu dengan lapisan udara berikutnya, yaitu stratosfer dan disebut awan stratocumulus. Pesawat terbang umumnya terbang di sini.

b. Stratosfer

Puncak stratosfer kira-kira 50 km (31 mil) dari permukaan tanah. Gas ozon di dalam stratosfer membentuk lapisan yang terpisah. Lapisan ini menyerap beberapa sinar matahari yang berbahaya, sehingga memanaskan lapisan tersebut. Suhu yang paling tinggi terdapat di puncak lapisan ini, kira-kira 0°C (32°F), semakin ke bawah, yaitu semakin menuju lapisan troposfer di bawahnya, suhu semakin dingin. Pesawat jet terbang di lapisan ini, karena udaranya tenang.

c. Mesosfer

Mesosfer mencapai ketinggian kira-kira 80 km (50 mil). Puncak pada lapisan ini paling dingin, yaitu kira-kira -100°C (-148°F), tetapi semakin ke bawah suhunya semakin panas karena lapisan stratosfer di bawahnya lebih panas.

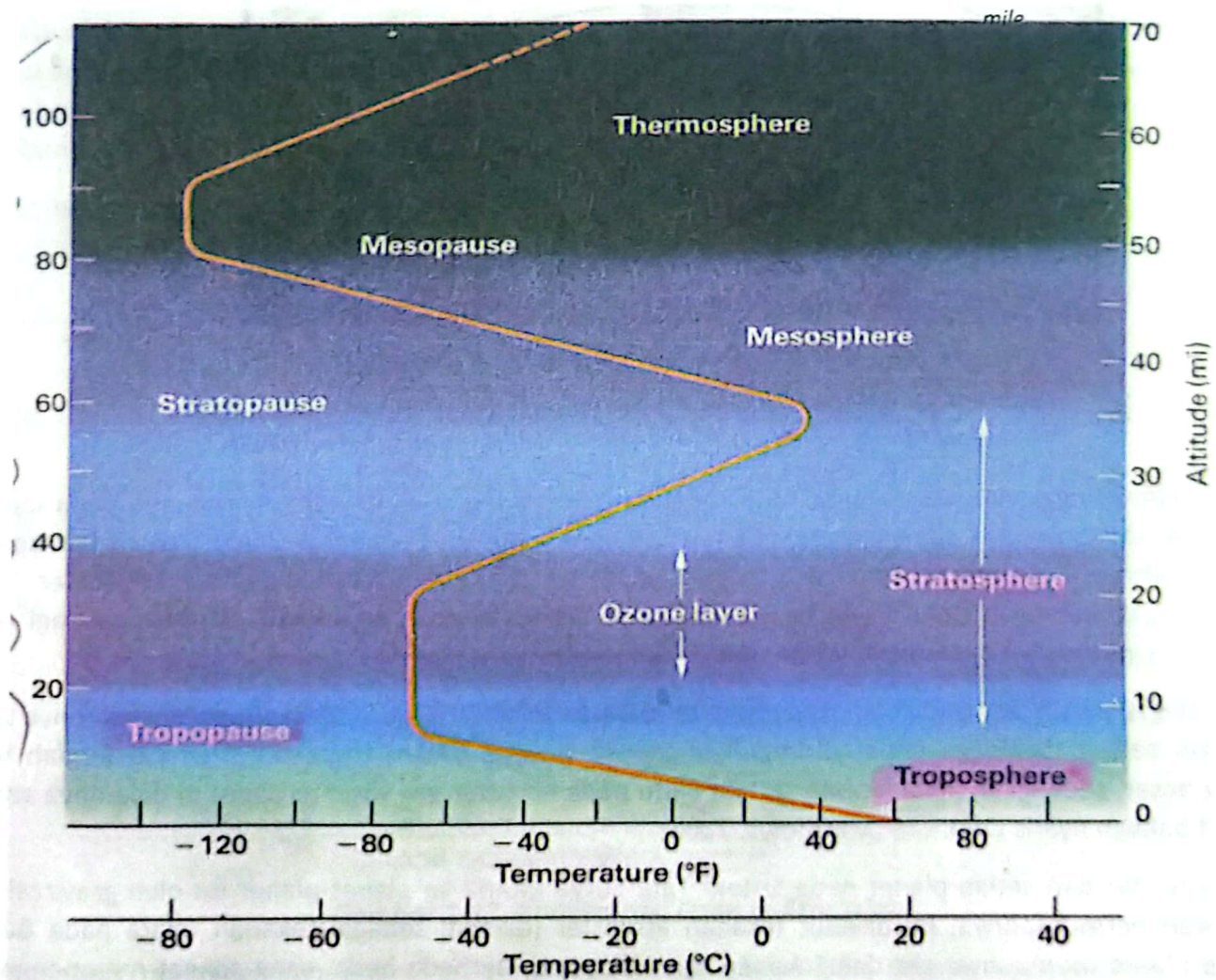
d. Termosfer

Termosfer mengandung gas-gas yang menyerap beberapa radiasi matahari yang berbahaya, sehingga memanaskan lapisan ini. Suhu di puncak pada ketinggian kira-kira 450 km (280 mil) dari permukaan tanah, mungkin setinggi 2000°C (3632°F). Semakin ke bawah suhunya semakin berkurang.

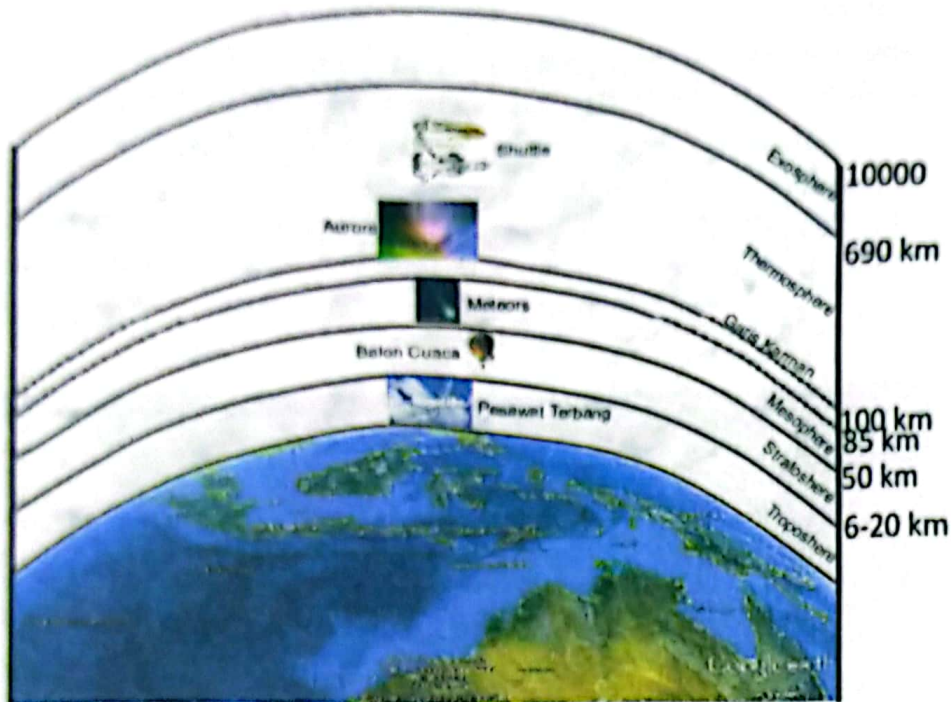
e. Eksosfer

Udara di dalam eksosfer sangat tipis karena udara itu mengandung sangat sedikit gas. Puncak dari lapisan ini kira-kira 900 km (560 mil) dari permukaan tanah. Beberapa satelit cuaca yang mengorbit kutub didapati pada lapisan ini.

Ilustrasi lapisan-lapisan atmosfer ditunjukkan dalam Gambar 1-12.



a. Lapisan atmosfer dan pengurangan/peningkatan suhu



b. Lapisan atmosfer dan keadaan di dalamnya

Gambar 1-12. Susunan lapisan atmosfer (Thomspson & Turk, 1993; http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_atmosphere, 2009)

Semakin tinggi atmosfer belum tentu menyebabkan semakin dingin suhunya, hanya pada lapisan troposfer saja yang jika semakin tinggi semakin dingin suhunya. Sedangkan pada lapisan lain seiring bertambahnya ketinggian memiliki perilaku yang berbeda yaitu pada lapisan stratosfer suhu menghangat, kemudian mendingin lagi pada lapisan mesosfer, dan kemudian menghangat lagi pada lapisan termosfer dan eksosfer (lihat Gambar 1-12a).

Gas-gas dalam atmosfer semakin tinggi tempatnya maka gas yang terkandung di dalamnya akan semakin sedikit. Sehingga dapat disimpulkan bahwa gas-gas dalam troposfer memiliki jumlah yang paling besar, sedangkan pada lapisan terluar yaitu pada eksosfer gas yang terdapat di dalamnya sangat sedikit bahkan nyaris tidak ada (Matthews, 2005).

Atmosfer dari setiap planet pada Sistem Tata Surya ditarik ke planet-planet itu oleh gravitasi dan menekan permukaannya. Ini disebut tekanan atmosfer (dikenal sebagai tekanan udara pada Bumi). Setiap planet mempunyai gas dan tekanan atmosfer yang berbeda-beda, yang sangat mempengaruhi cuaca di setiap planet (Watt dan Wilson, 2004).

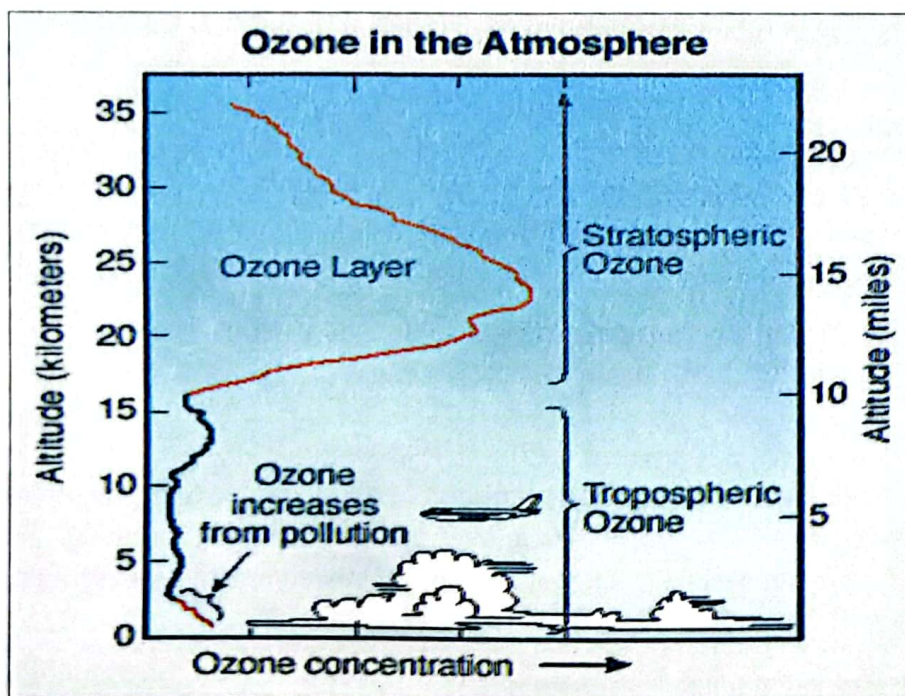
Tekanan atmosfer terjadi karena udara memiliki berat dan udara tersebut menekan bumi beserta isinya. Sehingga semakin banyak udara di atas maka semakin kuat pula tekanan atmosfernya demikian

pula sebaliknya. Contoh jika seseorang berada di tempat yang semakin tinggi maka semakin sedikit udara yang ada di atasnya maka semakin rendah pula tekanannya.

Dalam atmosfer terdapat lapisan yang melindungi bumi yang disebut lapisan ozon. Yang dimaksud dengan lapisan ozon adalah lapisan penghalang yang melindungi bumi dari benda-benda asing di luar angkasa, dan juga sebagai pelindung bumi dari panas matahari, serta melindungi bumi dari sinar ultraviolet yang berbahaya bagi makhluk hidup. Tanpa lapisan ozon ini semua makhluk hidup akan terbunuh karena sinar ultraviolet. Ozon terletak pada lapisan stratosfer yaitu sekitar 15-30 km dari permukaan bumi. Lapisan ozon ini tersusun dari selapis tipis gas ozon (O₃) yang merupakan salah satu tipe oksigen (Matthews, 2005)

Lapisan ozon rusak akibat zat-zat kimiawi yang disebut CFC (*chloro fluoro carbon*) yang biasanya digunakan dalam aerosol (kaleng semprot), lemari es, dan sejumlah bahan pembungkus. Sejah ini tidak ada lubang sungguhan di lapisan ozon, akan tetapi lapisan ozon sebagian telah menipis hingga kini telah banyak negara yang menghentikan penggunaan CFC, hal ini bertujuan untuk melindungi ozon agar tidak berlubang (Matthews, 2005).

Konsentrasi ozon di atmosfer ditunjukkan dalam Gambar 1-13.



Gambar 1-13. Konsentrasi Ozon di Atmosfer

Matahari memancarkan energi dalam bentuk sinar panas dan cahaya yang disebut radiasi. Banyaknya energi panas dan cahaya yang mencapai planet-planet dalam Tata Surya tergantung pada jarak planet-planet tersebut dari matahari (Watt dan Wilson, 2004).

Udara tidak bisa berhenti bergerak. Partikel-partikel yang sangat kecil di udara yang disebut molekul selalu bertabrakan satu sama lain. Semakin sering molekul tersebut bertabrakan, tekanan udara

semakin besar. Biasanya, tabrakan tersebut lebih sering terjadi di lapisan troposfer yang lebih rendah karena tarikan gravitasi membuat molekul tersebut jatuh ke permukaan Bumi. Semakin tinggi kamu berada di suatu tempat, maka tekanan udaranya semakin rendah, dan oksigen di udara semakin sedikit (Oliver, 2005).

Panas menyebabkan udara bergerak. Ketika panas dari matahari memanasi molekul-molekul di udara, molekul tersebut bergerak lebih cepat dan lebih banyak menyebar. Ini mengakibatkan udara lebih ringan sehingga udara naik ke atas, dan menciptakan tekanan rendah. Sewaktu udara naik lebih tinggi, udara mendingin. Molekul-molekul tersebut bergerak lambat dan menjadi lebih berat lagi sehingga turun kembali ke Bumi (Oliver, 2005).

2. Hydrosphere

Hydrosphere dari bahasa Yunani/Greek *hydro* yang berarti air dan *sphaira* → *sphere* yang berarti ruang. Dalam geografi fisik *hydrosphere* menguraikan kombinasi massa air yang ditemukan di atas dan di bawah muka bumi. Dengan kata lain *hydrosphere* terdiri atas: laut, sungai, danau, uap air, es, air permukaan, air biologi, air tanah.

Secara global *hydrosphere* juga dapat dikatakan berupa siklus hidrologi tertutup. Gambaran *hydrosphere* ini yang juga berupa siklus hidrologi dapat dilihat dalam Sub-Bab 2.6.

3. Biosphere

Biosphere adalah terdiri atas ruang semua organik hidup. Tumbuhan (flora) dan binatang atau satwa (fauna) dan bahkan organik bersel satu adalah bagian dari *biosphere*. Umumnya bagian dari *biosphere* (kehidupan) di bumi ini terletak 3 meter di bawah muka tanah sampai 30 meter di atas muka tanah dan sampai pada ketinggian 200 meter di laut dan samudra (<http://en.wikipedia.org/wiki/Biosphere>).

Biosfir juga dapat disebutkan merupakan jumlah global dari semua ekosistem dan merupakan zona kehidupan di bumi yang tertutup dan sistem regulasi mandiri.

4. Litosfir

Litosfir adalah bagian padat (kulit padat) dari bumi paling luar. Terdiri atas kerak dan bagian atas mantel bumi (lihat Gambar 1-3). Litosfir dibagi-bagi menjadi lempeng-lempeng tektonik. Kedalaman (ketebalan litosfir) bisa mulai dari 6 km sampai 200 km. Di bawah litosfir ada asthenosfir. Ada dua jenis litosfir:

- Litosfir lautan yang terkait dengan kerak samudra (5 – 100 km).
- Litosfir benua yang terkait dengan kerak benua (20 – 200 km).

1.6 Regolith

Kata *regolith* berasal dari kombinasi 2 kata Yunani (Greek): *rhegos* yang berarti selimut (*blanket*) dan *lithos* yang berarti batuan (*rock*). Sehingga secara harfiah dapat diartikan *regolith* adalah selimut batuan (material yang menyelimuti batuan).

Beberapa definisi tentang *regolith*:

- Oleh Merrill (1897) pertama kali *regolith* didefinisikan dalam tulisannya: Dalam tempat *cover* (selimut) ini dibuat oleh materi yang berasal dari pelapukan batuan, atau tumbuhan. Yang lainnya *regolith* merupakan fragmen dan kira-kira materi pembusukan oleh angin, air atau es dari sumber yang lain. *Regolith* merupakan material yang belum terkonsolidasi tidak peduli apa alamnya atau asalnya (<http://en.wikipedia.org/wiki/Regolith>; Merrill, 1897).
- *Regolith* adalah suatu lapisan material yang lepas/*loose*, heterogen yang menutupi batuan padat/*solid rocks*, yang meliputi debu, tanah/*soil* dan pecahan batuan/*broken rocks* (<http://en.wikipedia.org/wiki/Soil>; <http://en.wikipedia.org/wiki/Regolith>).
- *Regolith* adalah selimut dari partikel2 batuan yang lepas dan *non-cemented* yang terbaring di atas batuan dasar (Flint and Skinner, 1977).
- Semua material antara lapisan dasar batuan segar dan muka tanah termasuk lapisan dasar batuan yang melapuk, simpanan dan tanah (<http://www.landforms.eu/orkney/regolith.htm>).

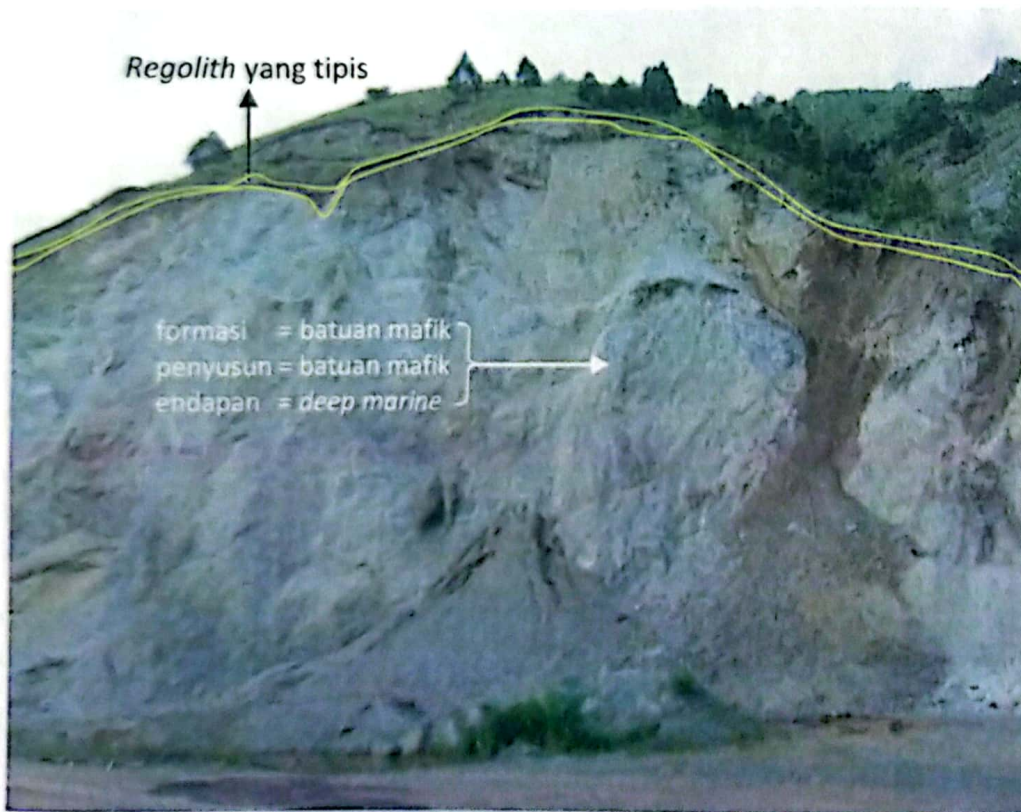
Contoh *regolith* ditunjukkan dalam Gambar 1-14.



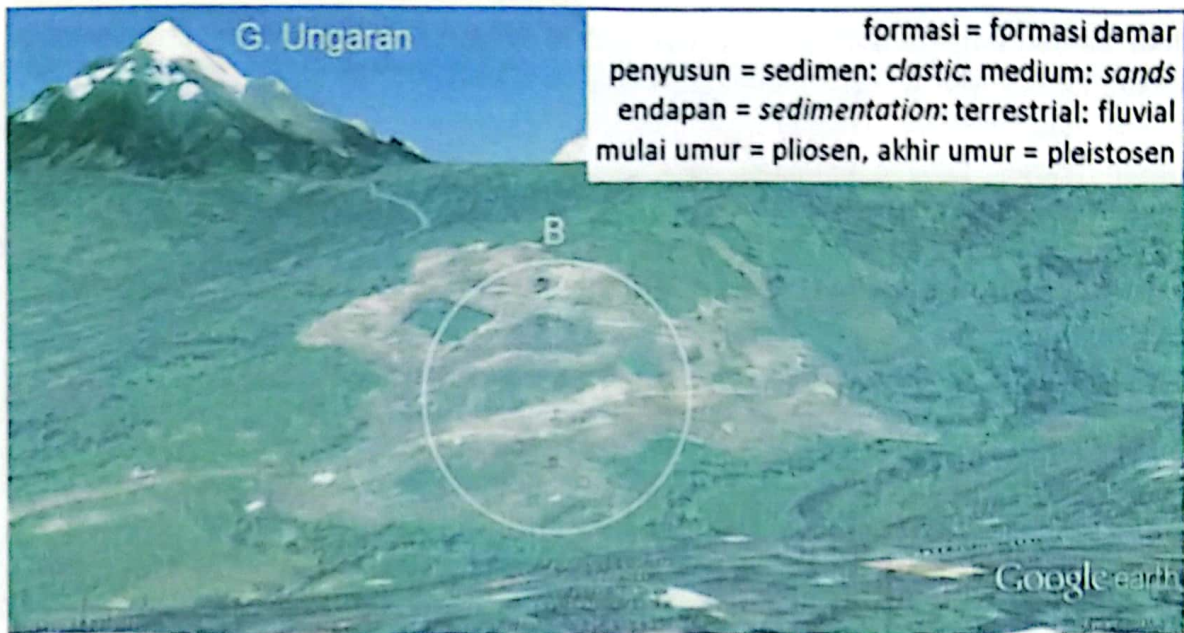
a. Contoh *regolith* yang muncul/nampak atau ter-expose di Jayapura



b. daerah *regolith* yang bisa terlihat (nampak) di Sentani



c. Detail A Gambar b



formasi = formasi damar
penyusun = sedimen: *clastic*: medium: *sands*
endapan = *sedimentation*: terrestrial: fluvial
mulai umur = pliosen, akhir umur = pleistosen

d. *Regolith* di Desa Meteseh, Kec. Tembalang Semarang



formasi = formasi damar
penyusun = *sediment*: *clastic*: medium: *sands*
endapan = *sedimentation*: terrestrial: fluvial
mulai umur = pliosen akhir umur = pleistosen

e. Detail B Gambar d

Gambar 1-14. Beberapa contoh *regolith* yang ter-expose atau nampak di muka bumi (Pusat Lingkungan Geologi, 2007)

Selimum batuan bumi (*regolith*) terdiri atas sub-divisi dan komponen-komponen sebagai berikut (Ollier & Pain, 1996; Taylor & Eggleton, 2001; Scott & Pain, 2009):

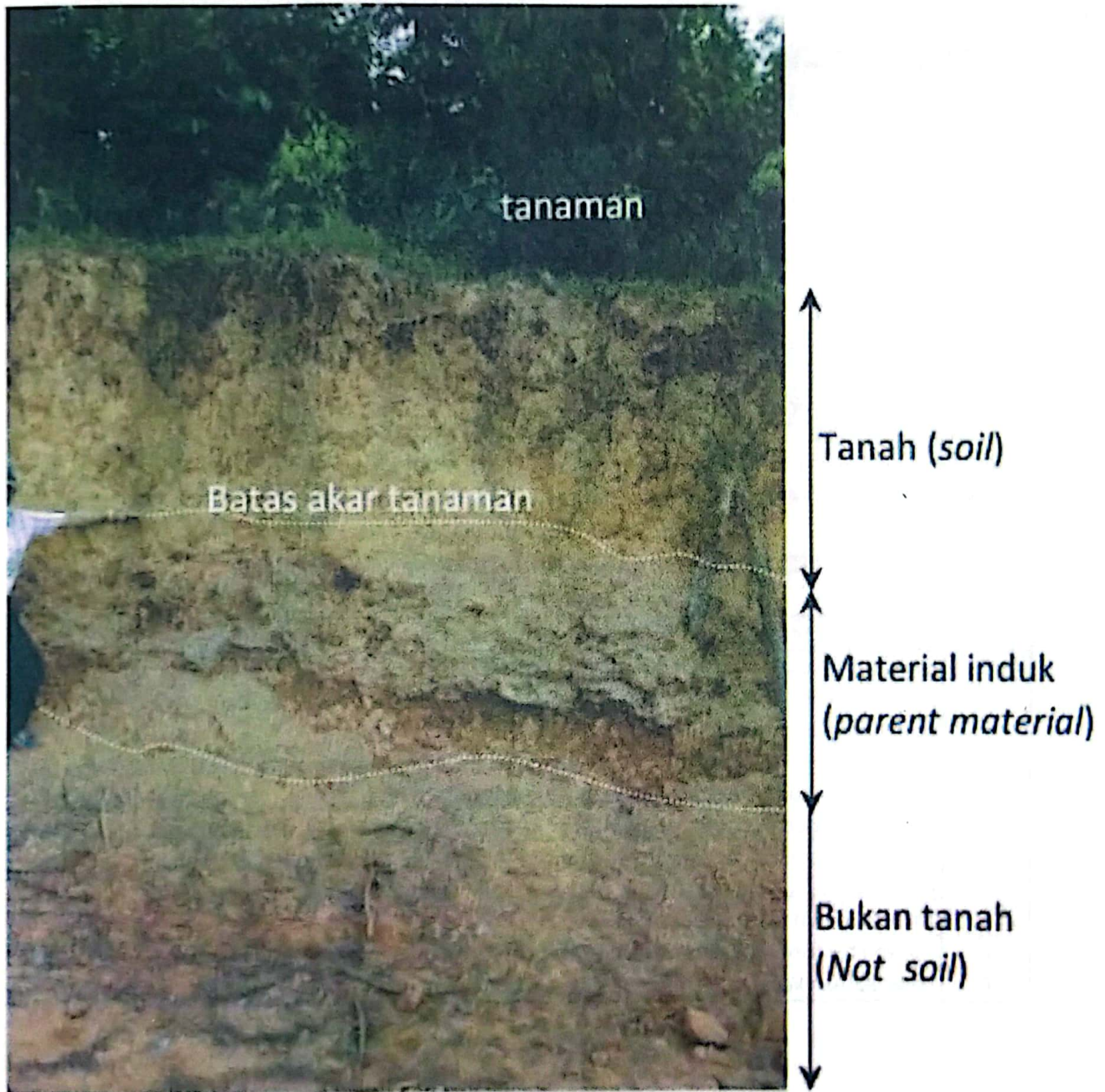
- Tanah (*soil* atau *pedolith*). Tanah sangat penting untuk eksistensi macam-macam organik. Tanah merupakan tempat dimana tanaman tumbuh dan insektisida dan binatang tinggal didalamnya (<http://www.universetoday.com/59106/regolith/>)
- *Alluvium* dan selimum atau penutup yang lain meliputi penutup yang tertransportasi oleh: angin (*aeolian*), es (*glacial*), laut (*marine*), dan proses-proses aliran gravitasi.
- *Saprolite* dibagi menjadi 3:
 - *Saprolite* bagian atas: batuan dasar yang teroksidasi (*completely oxidised bedrock*)
 - *Saprolite* bagian bawah: batuan yang tereduksi secara kimia dan sebagian oleh pelapukan (*chemically reduced partially weathered rocks*)
 - *saprock*: dasar batuan terfraksi (retak-retak) dengan pelapukan terbatas pada retak pinggir/batas (*fractured bedrock with weathering restricted to fracture margins*).
- Abu vulkanik dan lahar (*lavas*)
- *Duricrust*
- Air tanah (*groundwater*)
- Air asin (*water-deposited salts*).
- Biota dan komponen-komponen terurai dari biota.

1.7 Tanah (*Soil*)

Tanah (*soil*) merupakan lapisan tipis dan material bebas yang menutupi batu-batuan di muka bumi. Tanah (*soil*) juga merupakan badan alam (*natural body*) terdiri dari beberapa lapisan (*soil horizons*) dari unsur pokok mineral dengan kedalaman bervariasi yang berbeda dengan material induknya dalam morfologi, fisik, kimia dan karakteristik mineralogi (Birkeland, 1999; Taylor, 2005). Contoh ilustrasi tanah ditunjukkan dalam Gambar 1-15.

Dengan kata lain tanah (*soil*) merupakan kedalaman *regolith* yang mempengaruhi dan sudah dipengaruhi oleh akar tanaman.

Tanah (*soil*) terdiri atas partikel-partikel dari pembusukan organik (tumbuhan dan binatang), hancurnya batuan atau dari hancurnya material induk (*parent material*) dan telah diubah oleh proses-proses kimia dan mekanika (fisika) seperti pelapukan (*weathering*) ataupun erosi (pengikisan). Hal yang sangat penting adalah proses penghancuran dan pembusukan tersebut mempunyai skala waktu ribuan tahun. Dengan kata lain apabila suatu daerah pucuk tanah (*top soil*) dihilangkan, dibuang atau dipindahkan ke tempat lain maka yang ada dan tersisa adalah material induknya. Pada kondisi ini maka tumbuhan (*flora*) tak bisa tumbuh dan binatang (*fauna*) juga akan sangat berkurang.

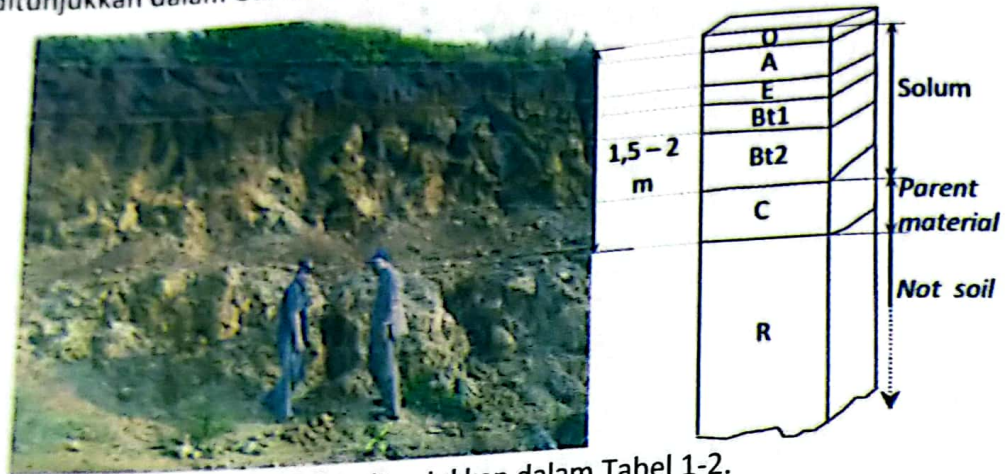


Gambar 1-15. Ilustrasi tanah (soil)

1.7.1 Horizon Tanah (Soil Horizon)

Tanah atau *soil* tidak seragam dengan kedalamannya tapi terdiri atas lapisan-lapisan yang disebut horison-horison yang diidentifikasi dengan kode huruf dan Nomor (Singer and Munns, 1987). Kode

horison-horison induk adalah horison-horison O, A, E, B, C dan R. Pembagian lapisan tanah secara horizontal ditunjukkan dalam Gambar 1-16.



Keterangan huruf dalam gambar tersebut ditunjukkan dalam Tabel 1-2.

Gambar 1-16. Sketsa dan contoh pembagian lapisan tanah secara horizontal (Singer and Munns, 1987)

Tabel 1-2. Simbol dan karakteristik tanah secara horizontal (Singer and Munns, 1987)

Simbol	Karakteristik atau sifat horison (<i>horizon property or characteristic</i>)
O	Lapisan permukaan dominasi material organik.
A	Horizon mineral terbentuk pada permukaan atau di bawah O dan berisi akumulasi pembusukan bahan organik.
E	Horizon mineral yang fitur utamanya adalah hilangnya lempung silikat (Si), besi (Fe), atau aluminium (Al) yang meninggalkan konsentrasi dari partikel-partikel resisten pasir dan lanau. Huruf E singkatan dari <i>eluvial</i> → penghanyutan
B	Horizon terbentuk di bawah horizon A, E atau O dan didominasi dengan kemusnahan/kehilangan struktur batuan asli dan akumulasi dari lempung silikat, Fe, Al karbonat humus, gipsum atau Si
C	Horizon tak termasuk dasar batuan keras dan sedikit dipengaruhi kejadian tanah
R	Dasar batuan keras seperti <i>basalt</i> , granit atau batuan pasir

Uraian simbol dari sumber atau referensi yang lain ditunjukkan dalam Tabel 1-3.

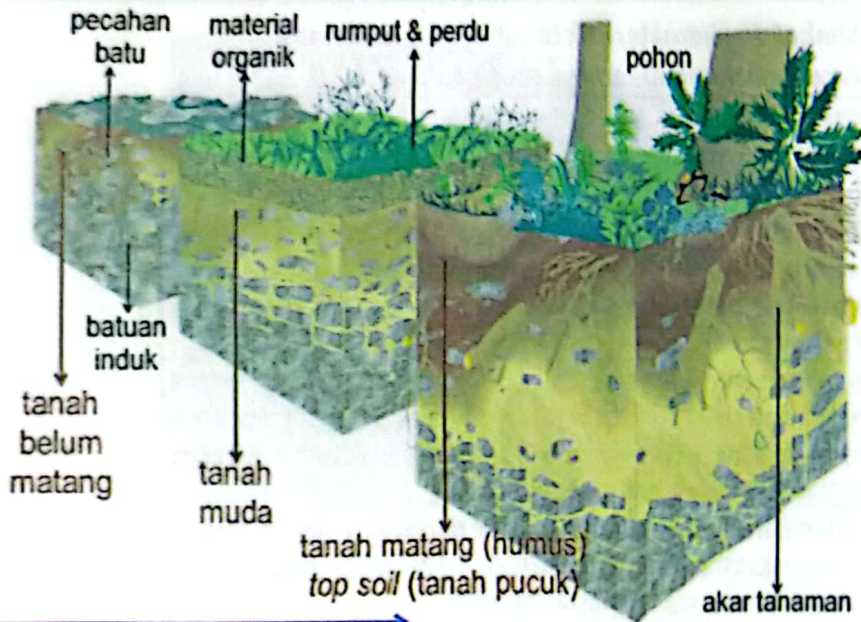
Tabel 1-3 Simbol dan karakteristik tanah secara horizontal
(<http://www.enchantedlearning.com/geology/soil/>)

Symbol	Karakteristik atau sifat horizon
O	Bagian atas, lapisan organik tanah terbuat utamanya sampah daun dan humus (pembusukan bahan organik).
A	Lapisan yang disebut pucuk tanah terletak di bawah O dan di atas E. Benih tanaman berkecambah dan akar tanaman tumbuh di lapisan ini. Horison ini terbuat dari pembusukan bahan organik bercampur dengan partikel mineral. Warna lapisan ini gelap (<i>darked color</i>).
E	Lapisan penghanyutan (<i>eluviation layer</i>) dan pencucian air berwarna terang (<i>light color</i>) terletak di bawah A dan di atas B. Horison E terbuat utamanya pasir dan lanau dan terjadi kehilangan mineralnya dan lempung pada saat air menetes melalui tanah dalam proses <i>eluviation</i> (penghanyutan)
B	Horison B disebut sub-tanah (<i>sub-soil</i>) dan terletak di bawah E dan di atas C. Lapisan ini berisi lempung, simpanan mineral (Fe, AlO, dan CaCO ₃) yang diterima dari lapisan di atasnya saat air yang termineral menetes.
C	Lapisan ini juga disebut <i>regolith</i> , terletak di bawah B dan di atas R. Lapisan ini berisi pecahan dasar batuan tipis dan sedikit material organik. Akar tanaman tidak menekan ke dalam lapisan ini.
R	Lapisan ini merupakan lapisan batuan yang belum melapuk (<i>unweathered rock</i>) dan terletak di bawah C.

Saat tanah (*soil*) mulai terbentuk dengan proses waktu ribuan tahun dari material induknya, air mulai dapat meresap kedalamnya. Dengan adanya tanah yang mengandung zat organik dan air, tumbuhan mulai tumbuh. Pelapukan terus berlangsung dan tahap berikutnya adalah terbentuknya tanah muda dengan lebih banyak tumbuhan & zat organik yang membusuk. Air semakin banyak dapat meresap. Pada proses akhir, mineral & zat organik bercampur membentuk tanah matang (Taylor, 2005).

Gambaran proses pembentukan tanah ditunjukkan dalam Gambar 1-17.

- Mineral & zat organik bercampur membentuk tanah matang banyak lapisan
- Dalam tanah matang, cacing & tikus mondok membuat ruang udara & air



a. Proses pembentukan tanah dari batuan butuh waktu ribuan tahun



Proses pelapukan dan hancurnya batuan (material induk) masih terus berlangsung untuk jadi tanah (*soil*) matang lama (ratusan hingga ribuan tahun). Tanaman belum bisa tumbuh karena *soil* belum terbentuk. Untuk menjadi humus maka setidaknya-tidaknya harus ada: material organik, mineral, tanah (*soil*) dan air.

Rock atau batuan di salah satu wilayah Batam → granit

b. Proses pembentukan tanah (Kodoatie, 2009a)



c. Tanah sudah matang dan tumbuhan sudah ada (Kodoatie, 2009b)

Gambar 1-17. Proses pembentukan tanah dari batuan
(Taylor, 2005; Kodoatie, 2009a & b)

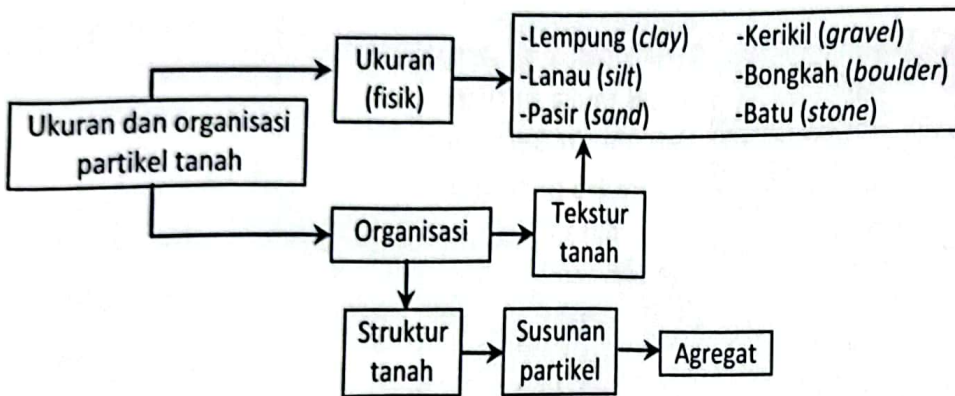
Sebagai catatan: tanah matang (humus) secara alami akan tererosi karena kondisi morfologi DAS dan faktor-faktor alam penyebab erosi. Di dalam tanah, pada proses erosi air merupakan media pelarut (*solvent*).

Bila tanah matang (*top soil*/tanah pucuk) ini digali untuk kepentingan penambangan maka yang tertinggal adalah batuan (*rock*) dimana tanaman tak bisa tumbuh, menjadikan daerah tersebut tandus. Oleh karena itu perlu dilakukan konservasi tanah baik di lahan garapan (*cultivated land*) maupun di lahan hutan (DAS, 2000).

1.7.2 Ukuran Dan Organisasi Partikel Tanah

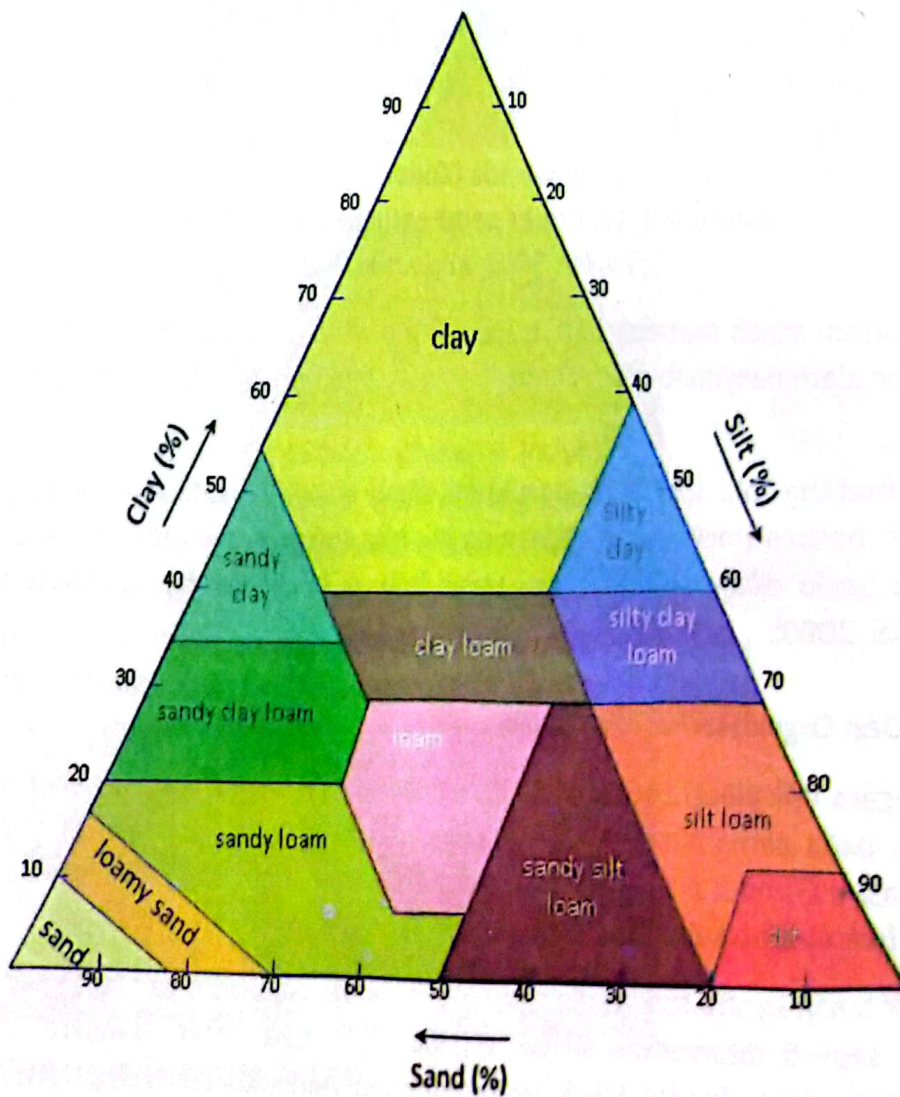
Ukuran secara fisik dibagi berdasar diameter dan merujuk pada tekstur tanah, sedangkan struktur tanah merujuk pada penyusunan partikel. Secara sederhana ukuran dan organisasi partikel tanah diilustrasikan dalam Gambar 1-18. Tekstur tanah merupakan jangkauan terdefinisi dari distribusi ukuran partikel secara fisik dengan kebutuhan dan sifat similar.

Tiga tekstur tanah secara fisik terdiri atas: pasir (*sand*), lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) digambarkan secara segitiga seperti ditunjukkan dalam Gambar 1-19 baik untuk standard USDA (United State Department of Agriculture dan UK-ADAS (United Kingdom Agricultural Development Advisory Service).

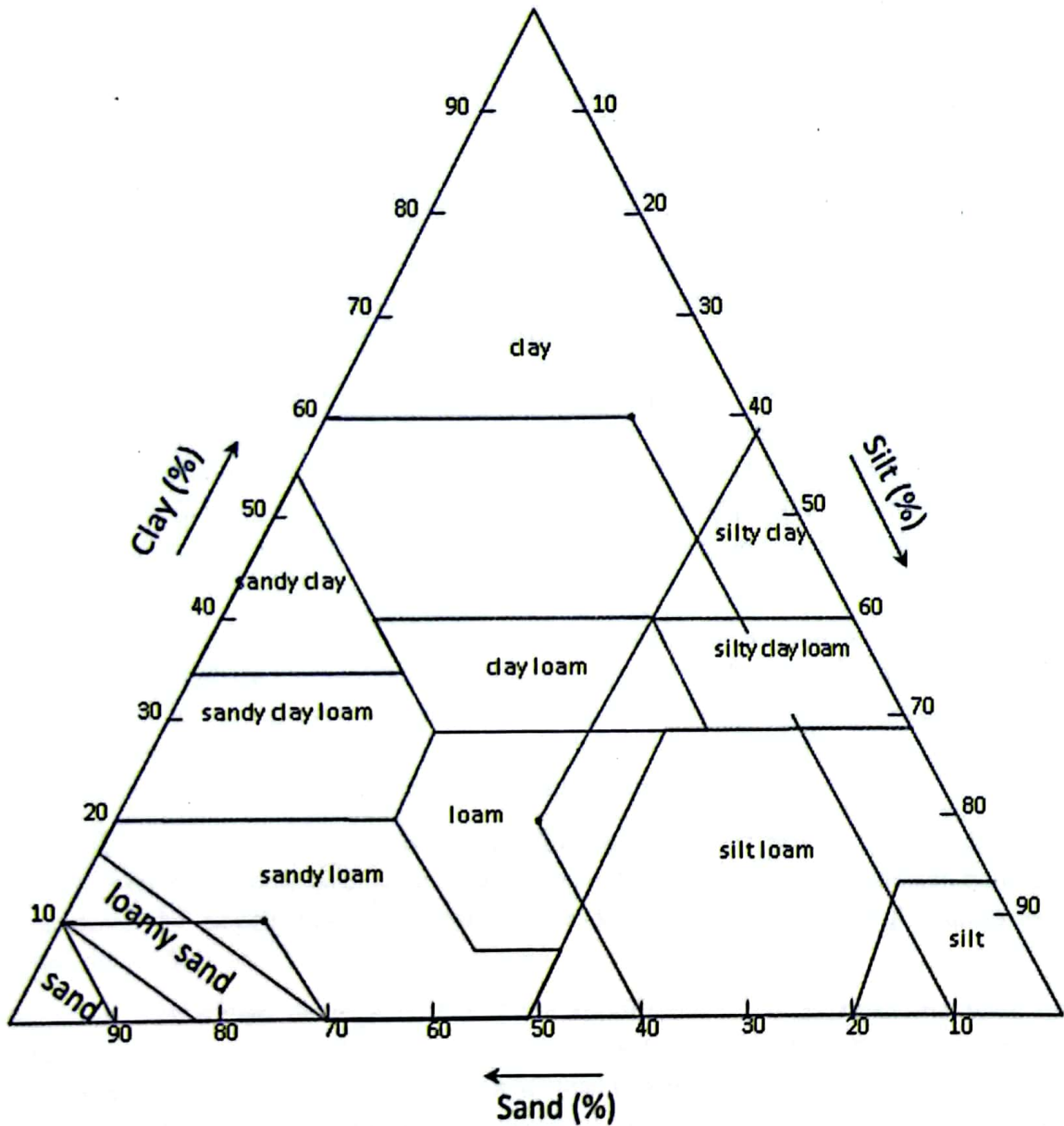


Catatan: Agregat tanah adalah kumpulan atau item tanah yang terkumpul bersama membentuk kuantitas total tanah (<http://en.wikipedia.org/wiki/Aggregate>)

Gambar 1-18. Ilustrasi ukuran dan organisasi partikel tanah (Singer & Munns, 1987)



a. Standard USDA



b. Standard UK-ADAS

Gambar 1-19. Segitiga tekstur tanah

BAB 2. AIR TANAH

2.1 Air dan Kehidupan

Air adalah zat atau material atau unsur penting bagi semua bentuk kehidupan yang diketahui sampai saat ini di bumi, tetapi tidak di planet lain dalam Sistem Tata Surya dan menutupi hampir 71% permukaan bumi (<http://id.wikipedia.org/wiki/Air>, 2009; Matthews, 2005). Ujudnya bisa berupa cairan, es (padat) dan uap/gas. Dengan kata lain karena adanya air, maka bumi merupakan satu-satunya planet dalam Tata Surya yang memiliki kehidupan (Parker, 2007).

Manusia dan semua makhluk hidup lainnya membutuhkan air. Air merupakan material yang membuat kehidupan terjadi di bumi. Menurut dokter dan ahli kesehatan, manusia wajib minum air putih minimal 2 liter (atau 8 gelas) per hari dan maksimum 7% kali berat badan. Tumbuhan (flora) dan binatang (fauna) juga mutlak membutuhkan air. Tanpa air keduanya akan mati. Sehingga dapat dikatakan air merupakan salah satu sumber kehidupan. Dengan kata lain air merupakan zat yg paling esensial dibutuhkan oleh makhluk hidup.

Kurang lebih 67% atau dua pertiga dari berat tubuh manusia adalah air. Dua pertiga (2/3) dari air ini terdapat dalam sel-sel tubuh dan sepertiga (1/3) terdapat dalam rongga-rongga yang memisahkan sel-sel tersebut. Oleh karena itu, seluruh kegiatan sel seyogyanya dalam lingkungan yang cair. Secara implisit dapat dikatakan bahwa manusia adalah air yang hidup (Hutapea, 2005). Juga dapat dikatakan bahwa air adalah Karunia Tuhan Yang Maha Esa (Kodoatie & Sjarief, 2010).

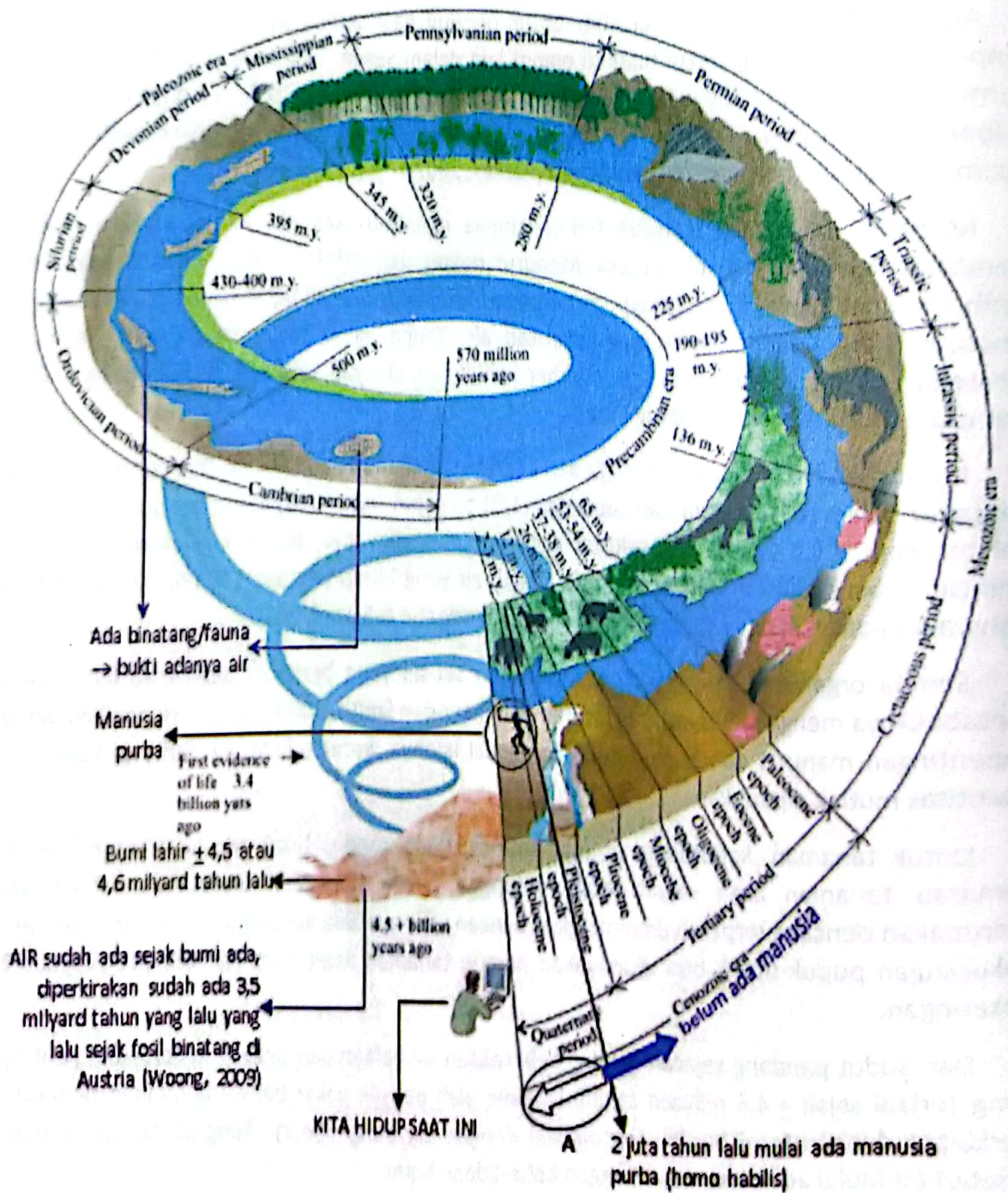
Semua organisme yang hidup tersusun dari sel-sel yang berisi air sedikitnya 60% dan aktivitas metabolisme mengambil tempat di larutan air (Enger dan Smith, 2000). Dapat disimpulkan bahwa untuk kepentingan manusia dan kepentingan komersial lainnya, ketersediaan air dari segi kualitas maupun kuantitas mutlak diperlukan.

Untuk tanaman, kebutuhan air juga mutlak. Pada kondisi tidak ada air terutama pada musim kemarau tanaman akan segera mati. Sehingga dalam pertanian disebutkan bahwa kekeringan merupakan bencana terparah dibandingkan bencana lainnya. Bila kebanjiran, tanaman masih bisa hidup, kekurangan pupuk masih bisa diupayakan namun tanaman akan mati saat tak ada air pada bencana kekeringan.

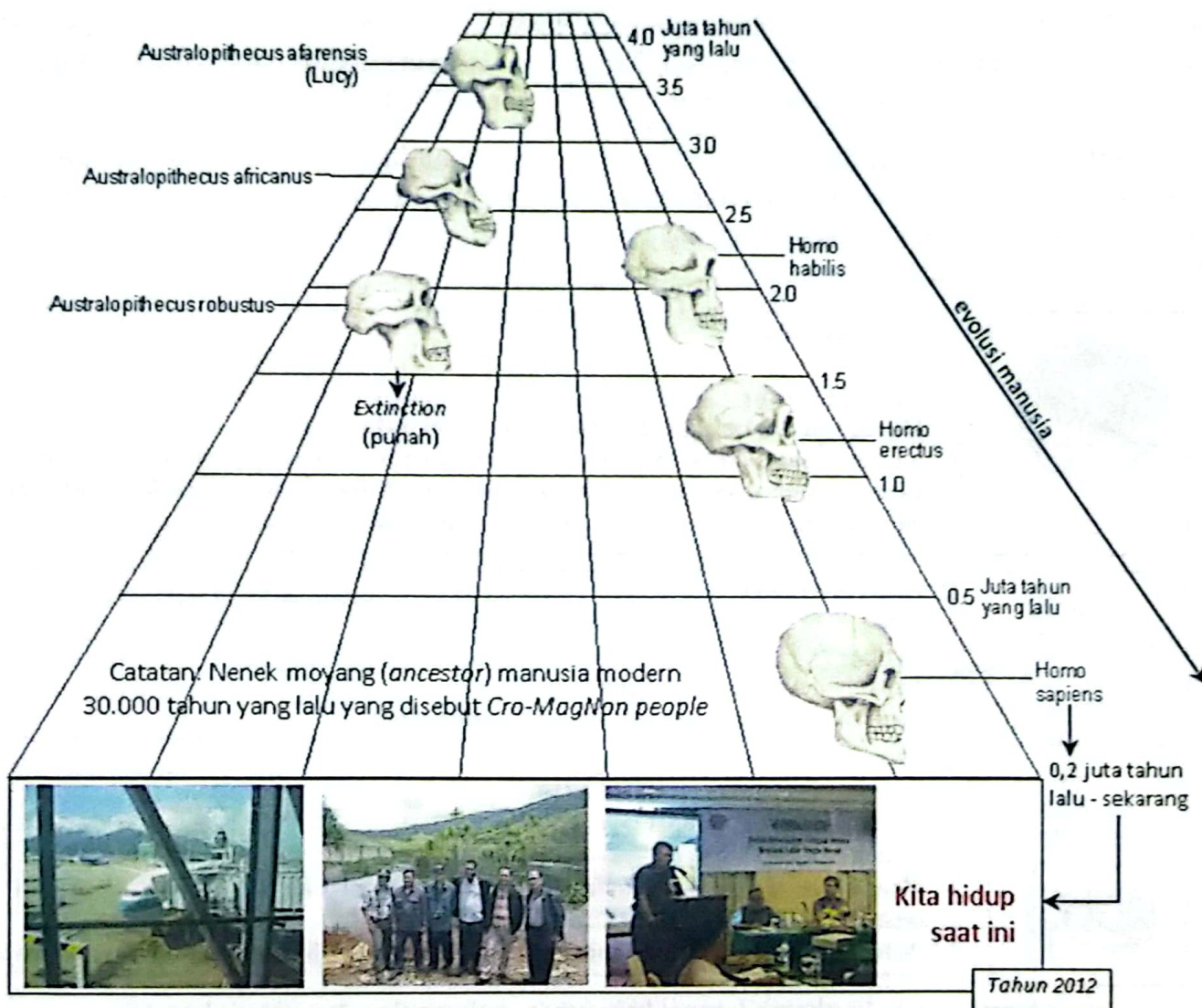
Dari sudut pandang sejarah geologi keberadaan air bersamaan dengan keberadaan (lahirnya) bumi yang terjadi sejak $\pm 4,6$ milyar tahun. Diyakini oleh banyak pakar bahwa bumi lahir berdasarkan dan berkaitan dengan teori besar yang dikenal dengan *Big Bang Theory*. Yang paling utama materi yang disebut air mulai ada bersamaan dengan keberadaan bumi.

Seperti ditunjukkan dalam Gambar 2-1, bumi terdiri atas air dan daratan (*continent*) dan kondisi yang dapat mendukung adanya kehidupan. Air sudah ada sejak bumi ada, diperkirakan sudah ada 3,5

milyard tahun yang lalu sejak fosil binatang ditemukan di Austria. Namun manusia belum ada, Keberadaan manusia (homo) mulai dari manusia purba hingga manusia modern saat ini secara skala waktu geologi adalah masih sangat muda yaitu baru ada ± 2 juta tahun yang lalu (Woong, 2009; Thompson & Turk, 1993; <http://www.sciencedaily.com/releases/2001/01/010111073459.htm>; http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Geological_time_spiral.png; <http://www.extreme science.com/earth.htm>).



a. Spiral proses umur bumi dan keberadaan air



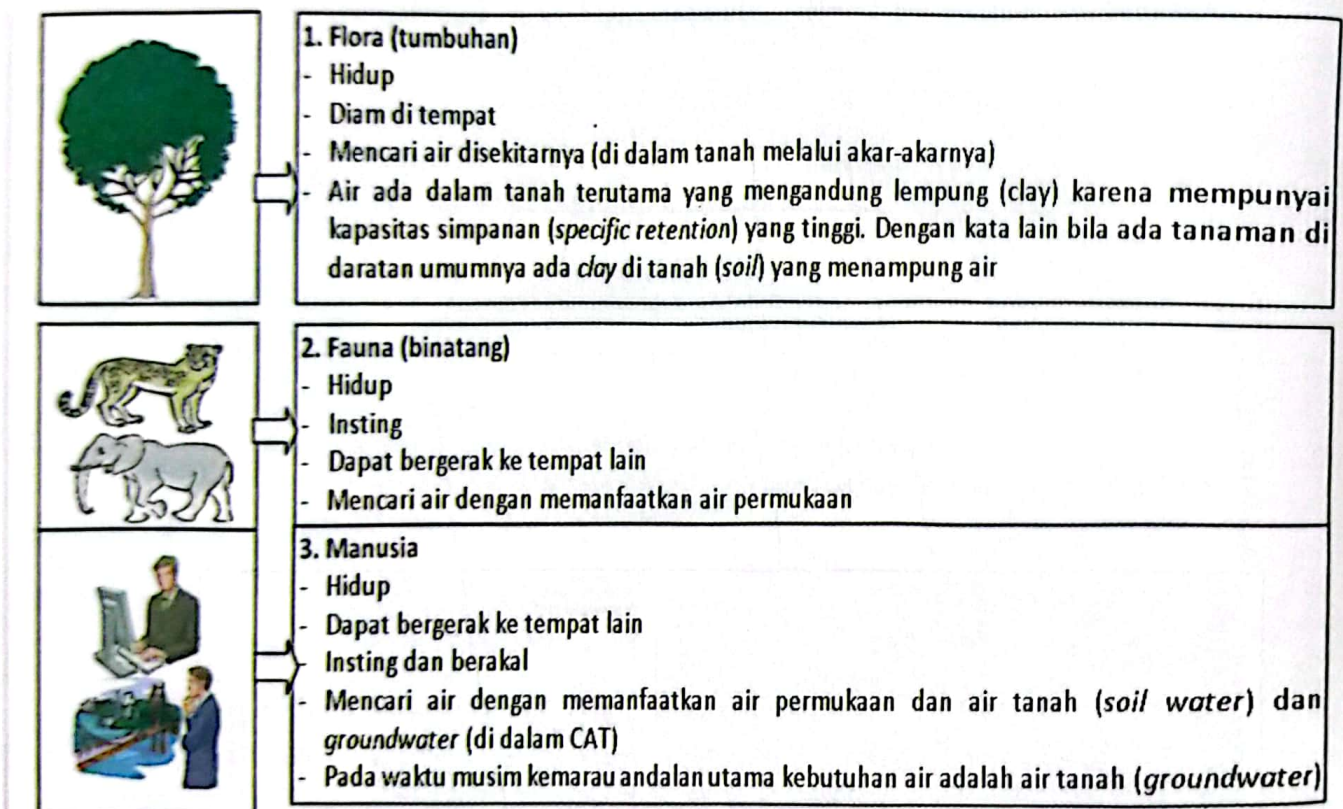
b. Detail A dari Gambar a: salah satu intepretasi evolusi manusia

Gambar 2-1. Spiral proses umur bumi dan keberadaan air salah satu intepretasi evolusi manusia (Thompson & Turk, 1993; Mayr, 2010)

Dari data geologi yang ada keberadaan cekungan air tanah (CAT) umumnya terjadi pada jaman kuartar/*quaternary period* yang terdiri atas Pleistocene Epoch dan Holocene Epoch (lihat Gambar 2-1a). Ada beberapa CAT di Indonesia yang terjadi pada sebelum zaman kuartar tersebut. Pada zaman ini dan zaman sebelumnya diyakini manusia belum ada. Proses kejadian manusia hingga seperti saat kita hidup ini mengalami suatu evolusi mulai dari Homo Habilis lalu Homo Erectus dan menjadi Homo Sapiens seperti kita saat ini seperti ditunjukkan dalam

Gambar 2-1b. Waktu dari Homo Habilis sampai pada Homo Sapiens adalah 2 juta tahun yang lalu. Homo Sapiens dimulai pada 0,5 juta tahun yang lalu. Dari uraian tersebut dapat terlihat bahwa CAT lebih dulu ada sebelum manusia ada seperti ditunjukkan dalam Gambar 2-1 a dan b.

Seperti sudah diuraikan dalam Bab 1 dan awal Sub-Bab ini bahwa manusia dan semua makhluk hidup lainnya (flora dan fauna) membutuhkan air. Air merupakan material yang membuat kehidupan terjadi di bumi. Bila diperhatikan dengan seksama maka ada tingkatan kehidupan dari Flora, Fauna dan Manusia seperti ditunjukkan dalam Gambar 2-2.



Gambar 2-2. Tingkatan (stage) kehidupan, ketersediaan dan kebutuhan air
(Kodoatie, 2011; Birdie & Birdie, 2002; Karanth, 1987; Meinzer, 1923)

Air juga merupakan bagian penting dari sumber daya alam yang mempunyai karakteristik unik dibandingkan dengan sumber daya lainnya. Air bersifat sumber daya yang terbarukan dan dinamis. Artinya sumber utama air yang berupa hujan akan selalu datang sesuai dengan waktu atau musimnya sepanjang tahun.

Namun pada kondisi tertentu air bisa bersifat tak terbarukan, misalnya pada kondisi geologi tertentu di mana proses perjalanan air tanah membutuhkan waktu ribuan tahun, sehingga bilamana pengambilan air tanah secara berlebihan, air akan habis.

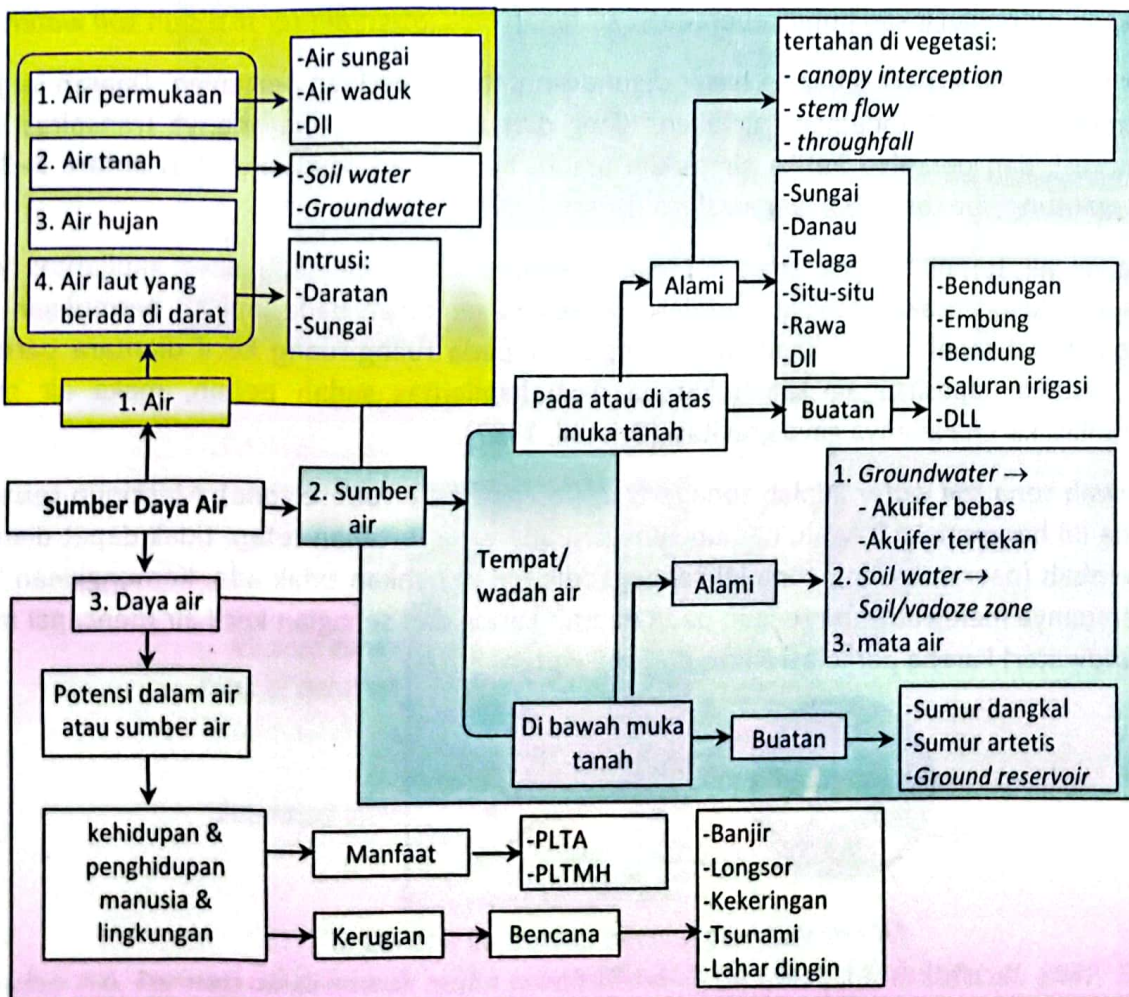
Oleh karena itu, tidak berlebihan bila dikatakan oleh Pindar "*Water is the best of all things*". Kehidupan adalah Anugerah Tuhan, adanya kehidupan adalah karena adanya air. Mempertahankan keberadaan air secara berkelanjutan maka kita juga mempertahankan kehidupan yang berarti pula kita mempertahankan Anugerah Tuhan (Kodoatie dan Sjarief, 2010).

2.2 Sumber Daya Air

Dalam UU No. 7 Tahun 2004 Tentang Sumber Daya Air beberapa hal didefinisikan sebagai berikut:

- Sumber daya air adalah air, sumber air, dan daya air yang terkandung di dalamnya.
- Air adalah semua air yang terdapat pada, di atas ataupun di bawah permukaan tanah, termasuk dalam pengertian ini air permukaan, air tanah, air hujan, dan air laut yang berada di darat.
- Air permukaan adalah semua air yang terdapat pada permukaan tanah.
- Air tanah adalah air yang terdapat dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan tanah.
- Sumber air adalah tempat atau wadah air alami dan/atau buatan yang terdapat pada, di atas, ataupun di bawah permukaan tanah.
- Daya air adalah potensi yang terkandung dalam air dan/atau pada sumber air yang dapat memberikan manfaat atau pun kerugian bagi kehidupan dan penghidupan manusia serta lingkungannya.

Secara skematis uraian tersebut ditunjukkan dalam Gambar 2-3.



Gambar 2-3. Sumber daya air dan komponennya

Air tanah dan air permukaan merupakan sumber air yang mempunyai ketergantungan satu sama lain. Banyak sungai di permukaan tanah yang sebagian besar alirannya berasal dari air tanah, sebaliknya aliran air tanah merupakan sumber utama untuk imbuhan air tanah. Pembentukannya mengikuti siklus peredaran air di bumi yang disebut daur atau siklus hidrologi, yakni proses alamiah yang berlangsung pada air di alam, yang mengalami perpindahan tempat secara berurutan dan terus menerus.

2.3 Fenomena Air Tanah (*Groundwater* dan *Soil Water*)

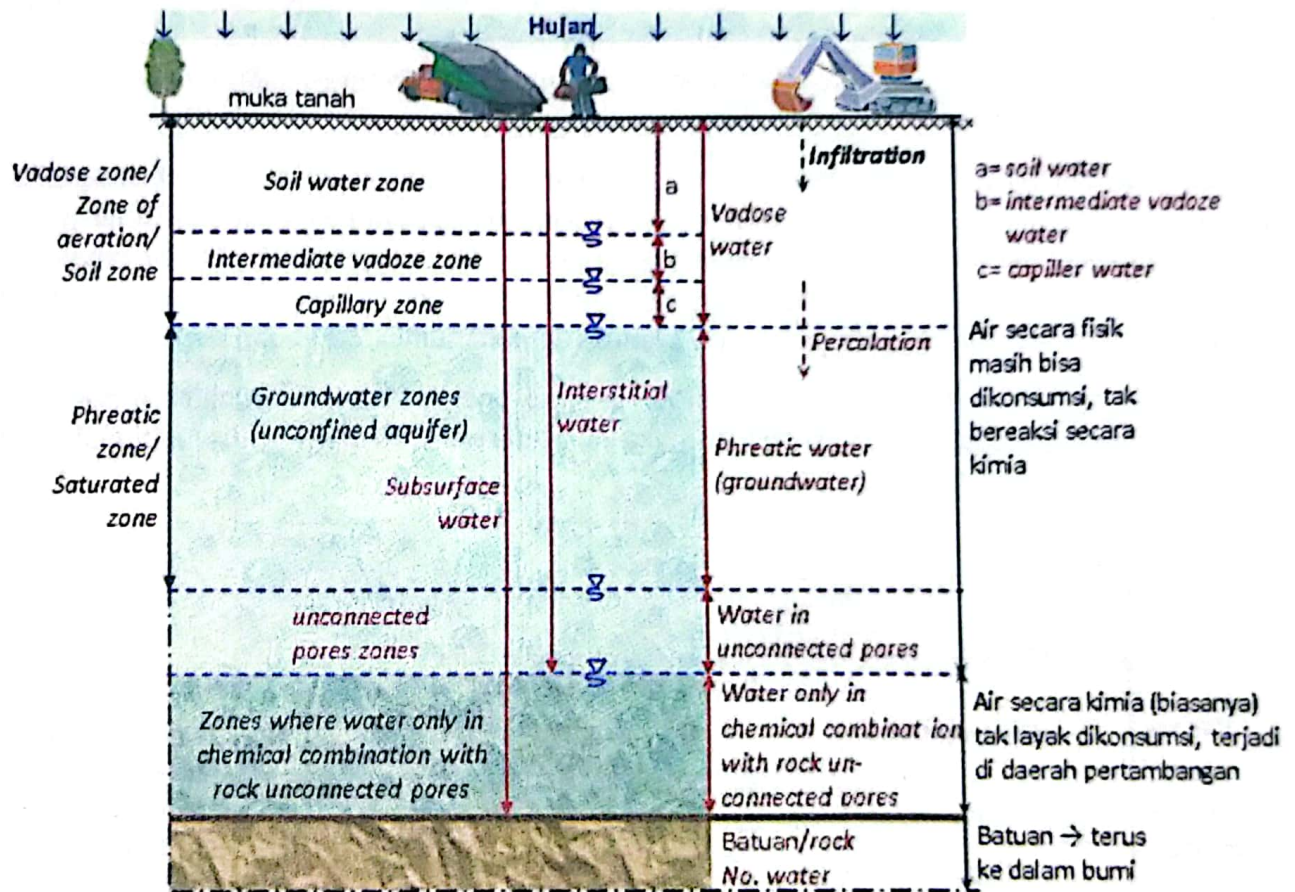
Dalam Bahasa Inggris ada istilah *groundwater* dan *soil water* yang terjemahan keduanya dalam Bahasa Indonesia adalah air tanah. Pengertian *groundwater* dan *soil water* diuraikan sebagai berikut.

Menurut Driscoll (1987), secara umum fenomena keberadaan air tanah dibagi dalam dua tipe, yaitu air pada *vadose zone* dan air pada *phreatic zone*. Pada *vadose zone*, dibagi menjadi tiga tipe air: air tanah (*soil water*), *intermediate vadose water*, dan air kapiler. Pada *phreatic zone* atau *saturated zone* (zona jenuh air) terdapat air tanah (*groundwater*). Pembagian zona ini dapat dilihat pada Gambar 2-4 yang menunjukkan potongan irisan bumi keberadaan air tanah baik *groundwater* maupun *soil water*.

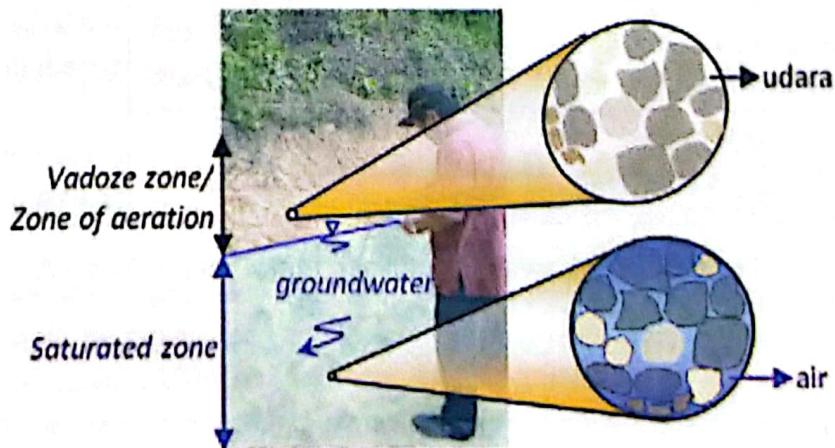
Daerah air tanah (*soil water*) sebagian besar digunakan untuk keperluan pertanian. Daerah ini juga merupakan sumber air untuk tanaman. Air akan hilang dari zona ini karena adanya transpirasi dari tanaman, evaporasi, dan perkolasi ketika air terlalu jenuh. Kedalaman zona air tanah antara 3–30 ft (0,91–9,1m) tergantung tipe tanah dan vegetasinya (Driscoll, 1987).

Pada zona ini air terjadi karena adanya gerakan antar molekul-molekul, daya kapilaritas yang melawan gaya gravitasi. Gerakan molekul cenderung mengisi air tanah pada lapisan permukaan dari masing-masing partikel tanah. Daya kapilaritas mengisi air pada ruang-ruang kecil diantara partikel-partikel tanah. Ketika kapasitas air tanah karena daya kapilaritas sudah penuh, maka air mulai mengalami perkolasi karena adanya gaya gravitasi (Driscoll, 1987).

Zona di bawah zona *soil water* adalah zona tengah (*intermediate vadose zone*). Meskipun sebagian besar pada zona ini bergerak ke bawah, namun sebagian ada yang tertahan tetapi tidak dapat diambil. Pada daerah lembah (daerah basah), zona ini sangat sedikit atau bahkan tidak ada. Kemungkinan kecil air mengalir semuanya melewati zona tengah pada daerah kering dan sebagian kecil air mencapai muka air tanah (*groundwater*) karena perkolasi aliran dari *soil water*.



a. Formasi air bawah permukaan daerah CAT



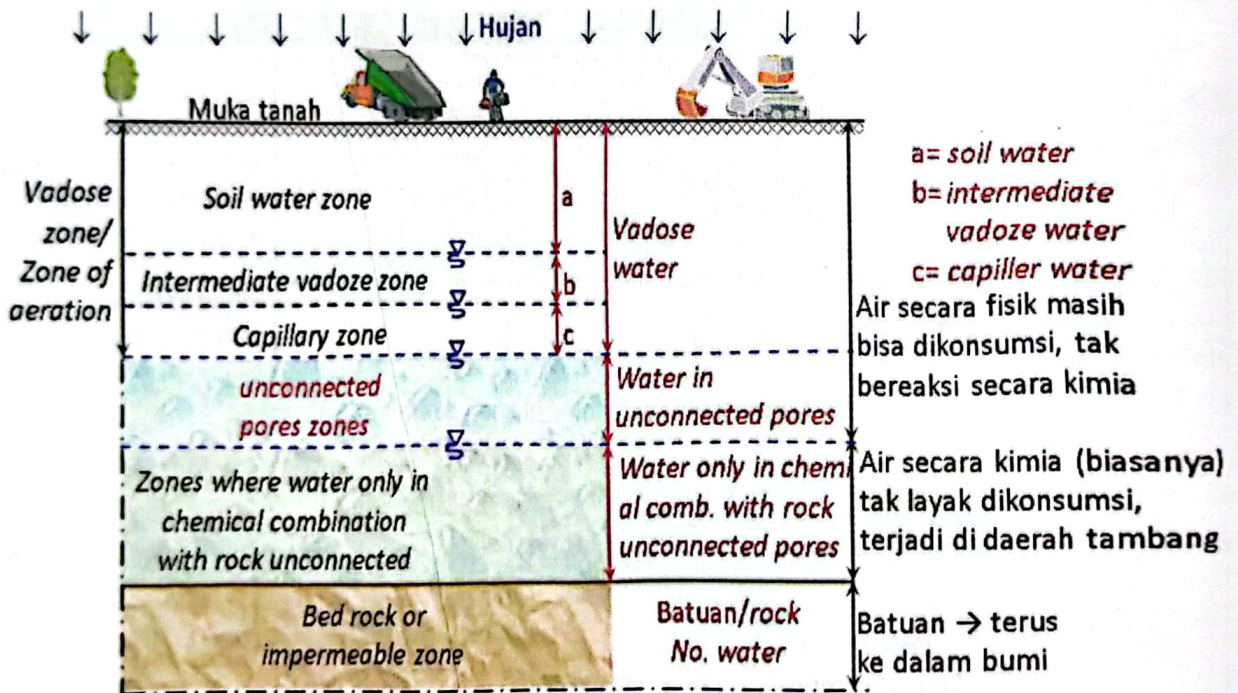
b. Contoh air bawah permukaan daerah CAT

Gambar 2-4. Formasi air di bawah muka tanah (Davis & DeWiest, 1966; Driscoll, 1987; Skipp, 1994; Tot, 1990; Kodoatie, 1996; Todd & May, 2005)

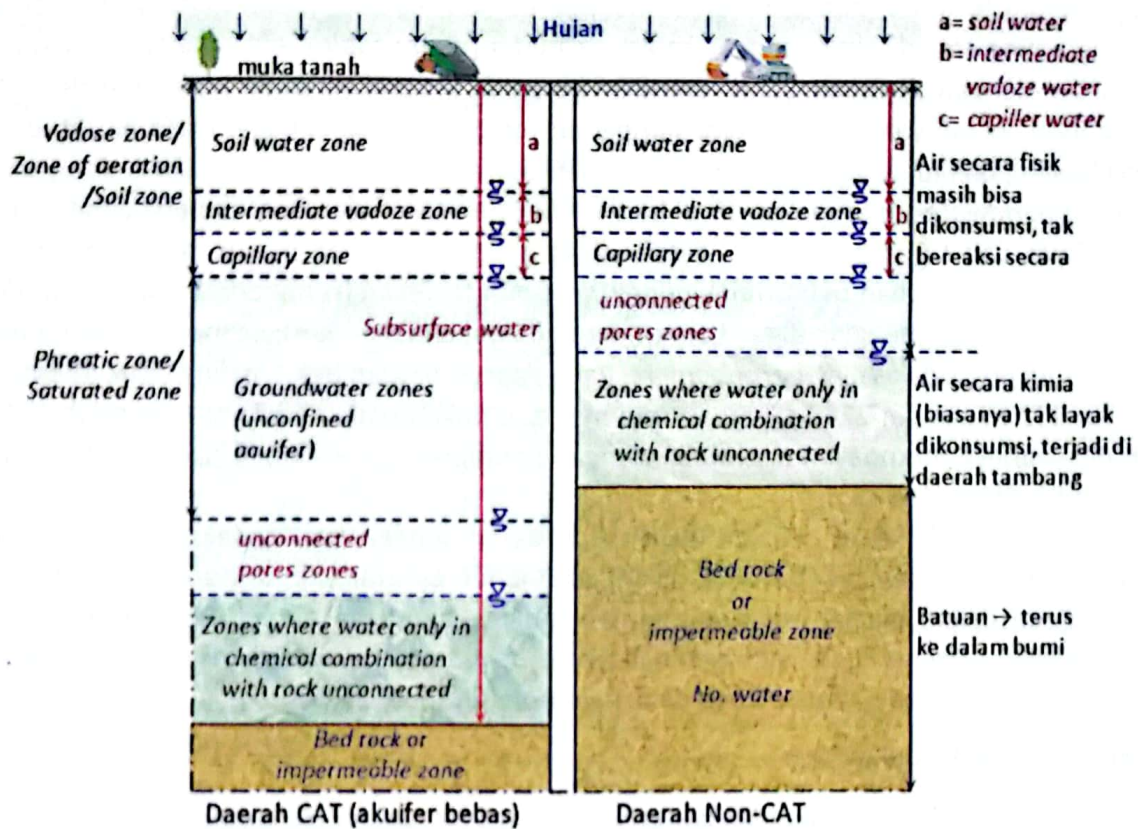
Pipa kapiler berada pada bagian bawah zona tengah, di mana air tanah naik ke atas karena gaya kapiler. Besarnya pipa kapiler tergantung dari rata-rata ukuran butiran material dari zona ini. Kapilaritas tidak efektif pada sedimen kasar, tetapi air dapat naik sampai 3 m. Sedimen halus mengalami kejenuhan sampai pada zona kapiler dan gaya fisik cairan sama dengan muka air di bawahnya (Driscoll, 1987).

Muka air tanah (*water table*) merupakan pemisah antara zona air tanah atau *phreatic water* dengan pipa kapiler. Muka air tanah (*water table*) secara teoritis merupakan perkiraan elevasi air permukaan pada sumur yang hanya merembes pada jarak yang pendek ke zona jenuh air. Jika air tanah mengalir horisontal, elevasi muka air pada sumur sangat berhubungan dengan muka air tanah. Dengan adanya sumur akan mengubah bentuk aliran dan elevasi muka air pada sumur (Davis dan De Wiest, 1966).

Ilustrasi formasi air di bawah permukaan tanah untuk daerah Non-CAT ditunjukkan dalam Gambar 2-5a. Sedangkan perbedaan kondisi bawah muka bumi daerah CAT dan Non-CAT ditunjukkan dalam Gambar 2-5b.



a. Formasi air di bawah permukaan tanah daerah Non-CAT



b. Perbedaan daerah CAT (akuifer tertekan) dan Non-CAT

Gambar 2-5. Formasi air di bawah permukaan tanah daerah Non-CAT dan perbedaan daerah CAT dan daerah Non-CAT

2.4 Pengertian Groundwater dan Soil Water

A. Pengertian air tanah (groundwater) adalah sebagai berikut:

1. Air tanah adalah air yang terdapat dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan tanah (UU No. 7 Tahun 1994 tentang Sumber Daya Air). Air tanah adalah air yang terdapat dalam lapisan tanah atau bebatuan di bawah permukaan tanah (http://id.wikipedia.org/wiki/Air_tanah)
2. Air tanah adalah sejumlah air di bawah permukaan bumi yang dapat dikumpulkan dengan sumur-sumur, terowongan atau sistem drainase atau dengan pemompaan. Dapat juga disebut aliran yang secara alami mengalir ke permukaan tanah melalui pancaran atau rembesan (Bouwer, 1978; Freeze dan Cherry, 1979; Kodoatie, 1996).
3. Air tanah adalah air yang menempati rongga-rongga dalam lapisan geologi. Lapisan tanah yang terletak di bawah permukaan tanah dinamakan daerah jenuh (*saturated zone*) (Soemarto, 1989).
4. Air yang berada pada zona jenuh adalah bagian dari keseluruhan air sub permukaan yang biasa disebut air tanah (*groundwater*). Air bawah tanah (*underground water* dan *sub terranean water*) adalah istilah lain yang digunakan untuk air yang berada pada zona jenuh, namun istilah yang lazim digunakan adalah air tanah (Johnson, 1972).

5. Pada kedalaman tertentu, pori-pori tanah maupun batuan menjadi jenuh (*saturated*) oleh air. Zona jenuh yang paling atas disebut dengan muka air tanah (*water table*). Air yang tersimpan pada zona jenuh disebut dengan air tanah, yang kemudian bergerak sebagai aliran air tanah melalui batuan dan lapisan-lapisan tanah yang ada di bumi sampai air tersebut keluar sebagai mata air, atau rembesan masuk ke kolam, danau, sungai dan laut (Fetter, 1994).
6. Air tanah (*groundwater*) merupakan air di bawah muka air tanah dan berada pada zona jenuh air dan menurut Davis dan De Wiest (1966), didefinisikan sebagai air yang masuk secara bebas ke dalam sumur, baik dalam keadaan bebas (*unconfined*) maupun tertekan (*confined*). Bagian bawah dari zona air tanah hampir tidak mungkin digambarkan. Air pada bukaan ini tidak bisa mengalir ke sumur karena masing-masing pori tidak saling berhubungan. Pada daerah batuan beku, paling tidak ditemukan pada kedalaman 152 m sampai 274 m, batuan sedimen ditemukan pada kedalaman mendekati 15.900 m. Daerah dibawahnya merupakan daerah air dengan kombinasi secara kimia pada batuan dan mineral (Driscoll, 1987; Skipp, 1994).
7. Aliran air tanah didefinisikan sebagai bagian dari aliran sungai yang sudah meresap (infiltrasi) ke dalam tanah (*ground*) dan sudah masuk dalam zona jenuh air atau *phreatic zone* dan sudah dialirkan (*discharged*) ke dalam sungai (*stream channel*) melalui pancaran air (*springs*) atau rembesan air (*seepage water*). Dalam ilmu hidrogeologi aliran tersebut diekspresikan dan dianalisis dengan persamaan aliran air tanah/*groundwater flow equation* (Chorley, 1978).

B. Pengertian air tanah (*soil water*)

Dalam Gambar 2-4 dan Gambar 2-5 dapat dilihat letak air tanah (*soil water*) yaitu pada bagian atas *vadoze zone* setelah *intermediate vadoze zone*. Pengertian atau definisi yang lain adalah air dalam sabuk *soil water (in the belt of soil water)*. Dikenal juga sebagai *rhizic water* atau *soil moisture*. *Soil water* juga disebutkan merupakan air yang terdapat pada tanah alami (*naturally occurring soil*) (<http://www.answers.com/topic/soil-water>; http://www.ehow.com/list_6533262_different-types-soil-water.html#ix1YxEHUGfK).

Soil water disebut juga sebagai air tanah yaitu yang cukup dekat pada permukaan sehingga tersedia bagi akar tumbuhan (<http://bahasa.cs.ui.ac.id/kbbi/kbbi.php?keyword=air&varbidang=all&vardialek=all&varragam=all&varkelas=all&submit=kamus>).

Dari Gambar 2-4 dan Gambar 2-5 dapat disimpulkan bahwa *soil water* adalah air pada tanah di atas *groundwater* untuk daerah yang memiliki CAT dan air pada tanah di atas batuan yang bukan CAT (Non-CAT). *Soil water* yang mengalir ini merupakan *throughflow* atau aliran horisontal air di *soil zone/vadose zone*. Pada tempat dimana aliran ini masuk ke sungai aliran *soil water* tersebut dinamakan *interflow* atau aliran antara. *Interflow* terdapat pada daerah CAT maupun pada daerah Non-CAT.

Terjemahan dalam Bahasa Indonesia untuk *groundwater* dan *soil water* adalah sama yaitu keduanya diterjemahkan sebagai air tanah. Hal ini yang menyebabkan istilah air tanah menjadi kurang tegas (rancu) apakah Bahasa Inggrisnya *groundwater* ataupun *soil water*. Sering ada pemakaian yang berbeda kata-kata *ground* dan *soil*. Ada istilah dalam keilmuan untuk *soil mechanics* namun bukan *ground*

mechanics. Kata-kata tersebut diterjemahkan dalam Bahasa Indonesia sebagai mekanika tanah. Ada juga istilah *ground reservoir* tapi bukan *soil reservoir* yang diterjemahkan sebagai tampungan dalam tanah.

2.5 Komposisi, Peran dan Kontribusi Air Tanah

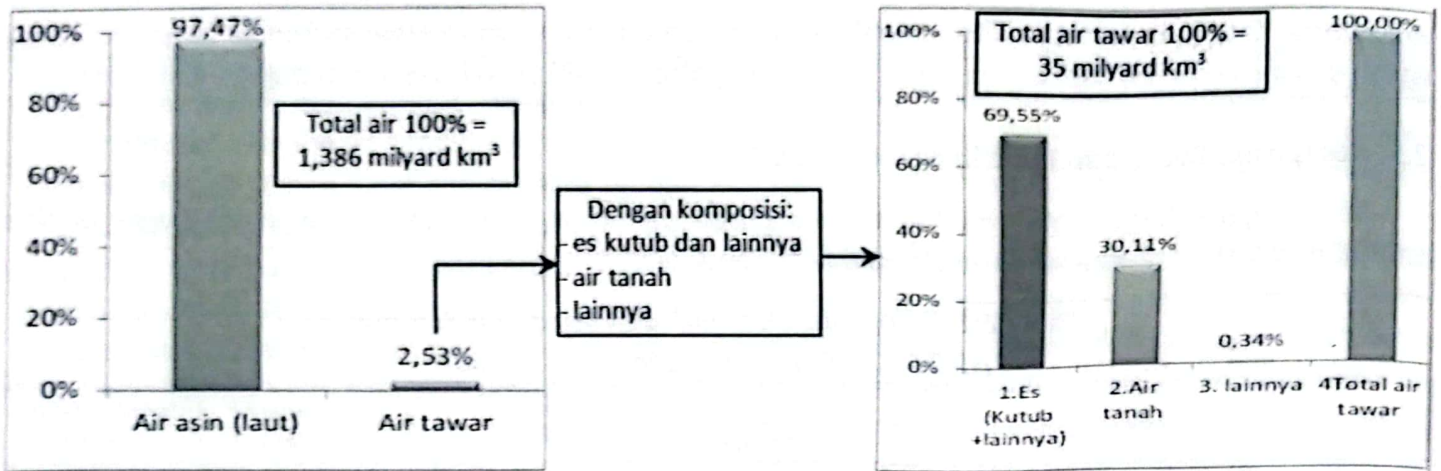
Secara garis besar total volume air yang ada yaitu air asin dan air tawar di dunia adalah 1.385.984.610 km³. Detail air ditunjukkan dalam Tabel 2-1.

**Tabel 2-1. Komposisi air tanah dan yang lain di dunia
(UNESCO, 1978 dalam Chow dkk., 1988)**

No.	Jenis air dan tempat	Area (10 ⁶ km ²)	Volume (10 ³ km ³)	% thd. total air yang ada	% thd. total air tawar
1.	<i>Laut (asin)</i>	361,3	1.338.000,00	96,5379	
2.	Air tanah (<i>groundwater</i>):				
	a. Tawar	134,8	10.530,00	0,7597	30,061
	b. Asin	134,8	12.870,00	0,9286	
3.	Air di tanah dangkal (<i>Soil Moisture</i>)	82,0	16,50	0,0012	0,047
4.	Es di Kutub	16,0	24.023,50	1,7333	68,581
5.	Es lainnya dan salju	0,3	340,60	0,0066	0,972
6.	Danau				
	a. Tawar	1,2	91,00	0,0066	0,260
	b. Asin	0,8	85,40	0,0062	
7.	Rawa /payau (bisa tawar bisa asin)	2,7	11,47	0,0008	0,033
8.	Air di Sungai	148,8	2,12	0,0002	0,006
9.	Air biologi (tanaman)	510,0	1,12	0,0001	0,003
10.	Air di udara	510,0	12,90	0,0009	0,037
	Total Air Yang Ada	510,0	1.385.984,61	100	
	Total Air Tawar	148,8	35.029,21	2,5274	100

Catatan: yang tertulis miring (*italic*) adalah air asin

Perlu diketahui bahwa walau air sudah ada semenjak kelahiran bumi namun jumlah air tawar sebagai sumber kehidupan jauh lebih sedikit dibandingkan air asin. Secara skematis komposisinya air dan peran air tanah tawar ditunjukkan dalam Gambar 2-6 (UNESCO, 1978 dalam Chow dkk., 1988).



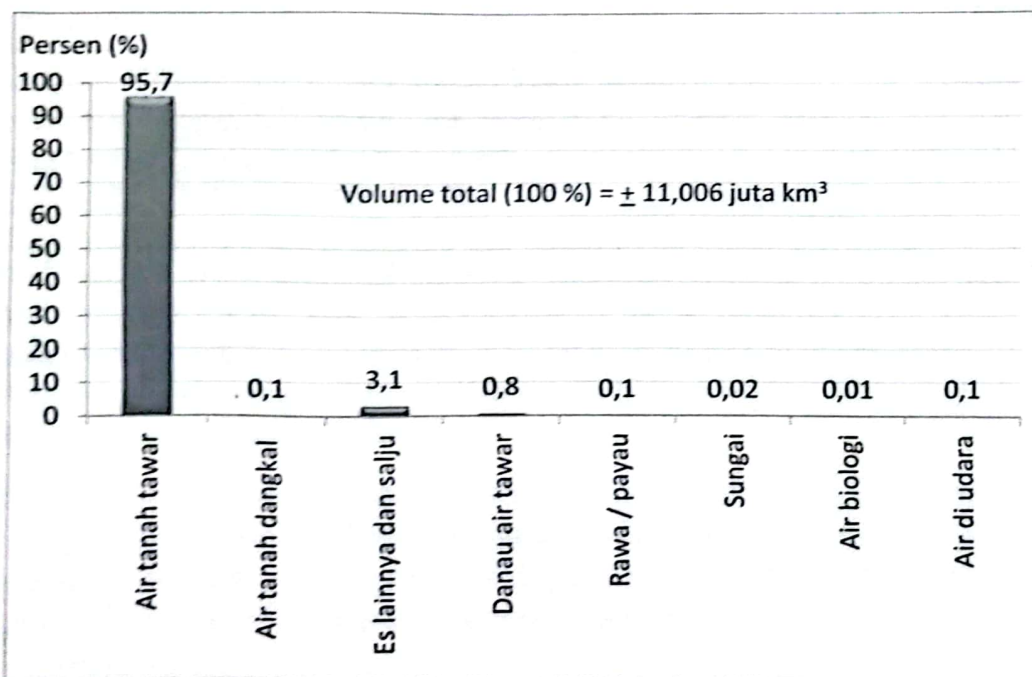
a. Total air di dunia

b. Total air tawar di dunia

Catatan: lainnya = 0,34% terdiri atas: danau 0,26%, rawa/payau 0,033%, sungai 0,006%, air vegetasi 0,003% dan air di udara 0,037%

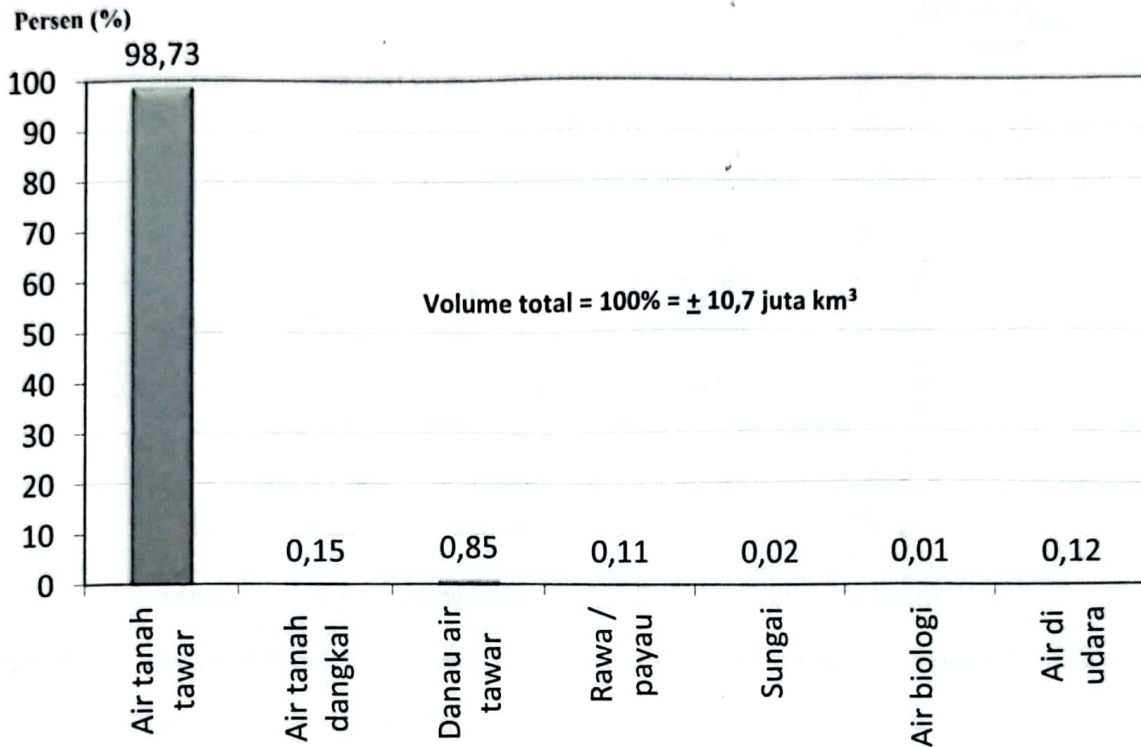
Gambar 2-6. Total air di dunia dan kontribusi air tanah tawar

Total air tawar yang ada di luar es di Kutub ditunjukkan dalam Gambar 2-7. Bila es di Kutub dan es lainnya dikeluarkan (tidak dimasukkan) maka perincian air tawar di dunia ditunjukkan dalam Gambar 2-8.



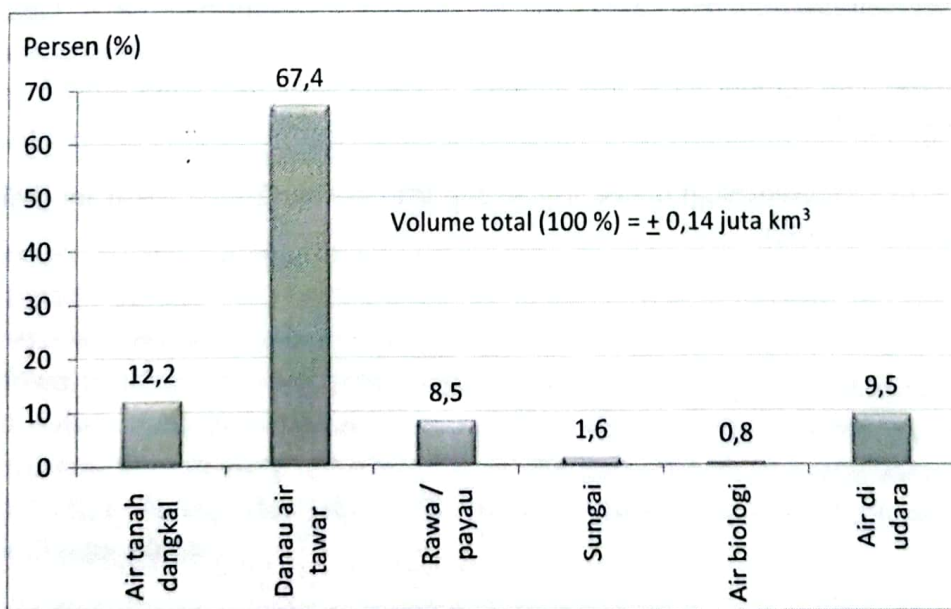
Catatan: air tanah tawar adalah groundwater dan air tanah dangkal adalah soil water

Gambar 2-7. Komposisi air tawar (%) di luar es di kutub

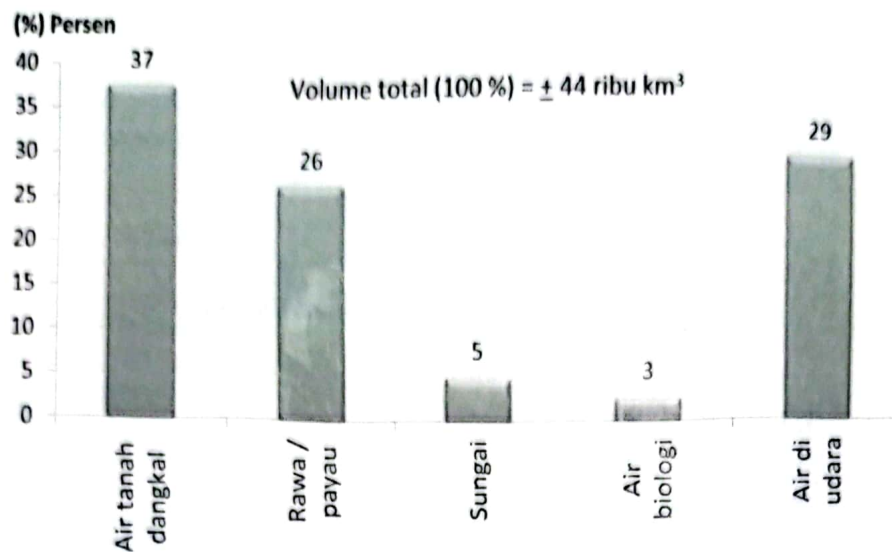


Gambar 2-8. Total air tawar di luar es di Kutub (Utara dan Selatan) dan di luar es lainnya

Komposisi air tawar di luar air tanah tawar (*groundwater*) ditunjukkan dalam Gambar 2-9a. Bilamana air tawar di danau dikeluarkan maka komposisi air tawar ditunjukkan dalam Gambar 2-9b.



a. Komposisi air tawar (%) di luar air tanah tawar (*groundwater*)

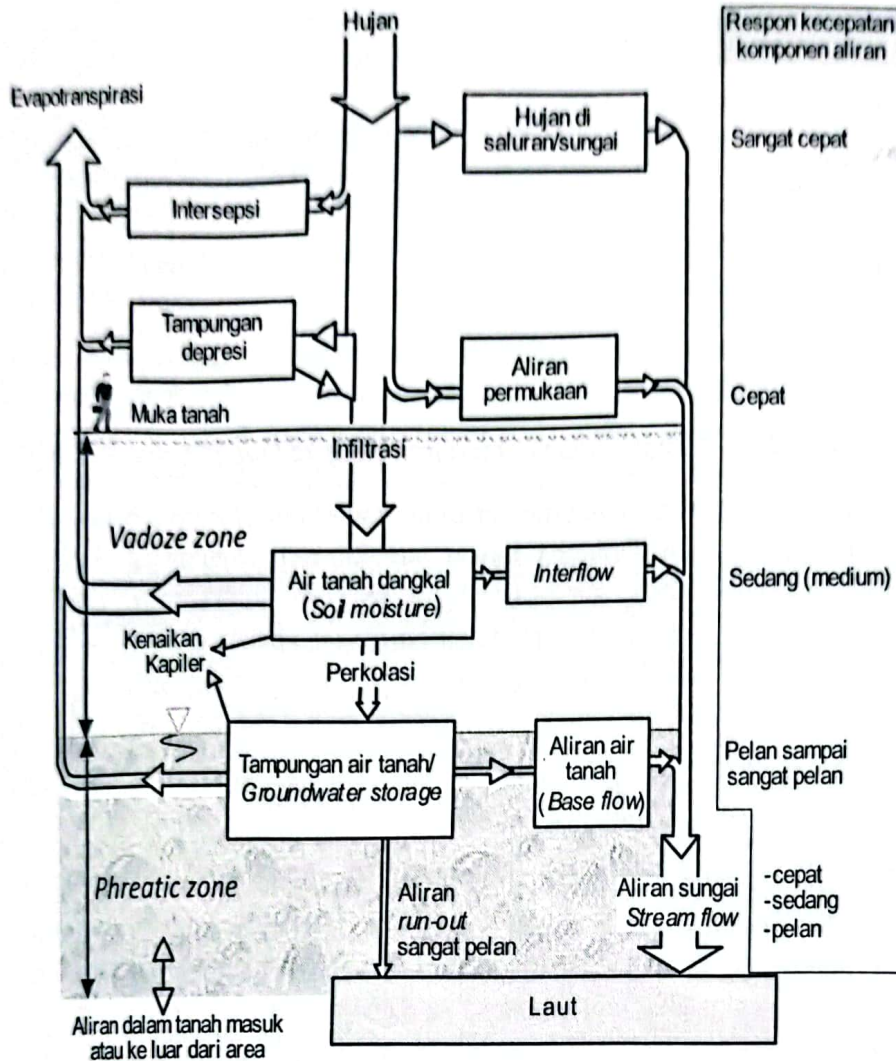


b. Komposisi air tawar (%) di luar *groundwater* dan di luar danau

Gambar 2-9. Komposisi air tawar (%) di luar air tanah tawar (*groundwater*) dan di luar danau

Dari Gambar 2-6 sampai Gambar 2-9 dapat diketahui bahwa secara volume atau kapasitas atau tampungan maka peran *groundwater* menjadi sangat penting. Volumennya adalah sebesar 95,7% terhadap total air tawar yang ada di luar es di kutub. Volume air tanah dangkal (*soil water*) dibandingkan dengan volume air di sungai jauh lebih besar yaitu hampir 7½ kalinya. Aliran air tanah tawar atau *groundwater flow* terhadap sungai memberi peran sebagai aliran dasar (*baseflow*). Umumnya bila tidak terganggu aliran dasar ini akan kontinyu dan tetap sepanjang tahun. Aliran dasar atau *base flow* juga sering disebut sebagai *drought flow* (aliran musim kemarau). Hal ini nampak di lapangan pada waktu musim kemarau sungai masih mengalir dengan kontinyu dan tetap. Sehingga dengan kata lain *groundwater* merupakan sumber air utama sepanjang tahun terutama pada musim kemarau, ketika air permukaan mengering (misal sungai tidak ada airnya, waduk dan situ menyusut drastis).

Secara diagram siklus hidrologi diilustrasikan seperti Gambar 2-10 berikut ini (Solomon & Cordery, 1984 dalam Maidment, 1993).

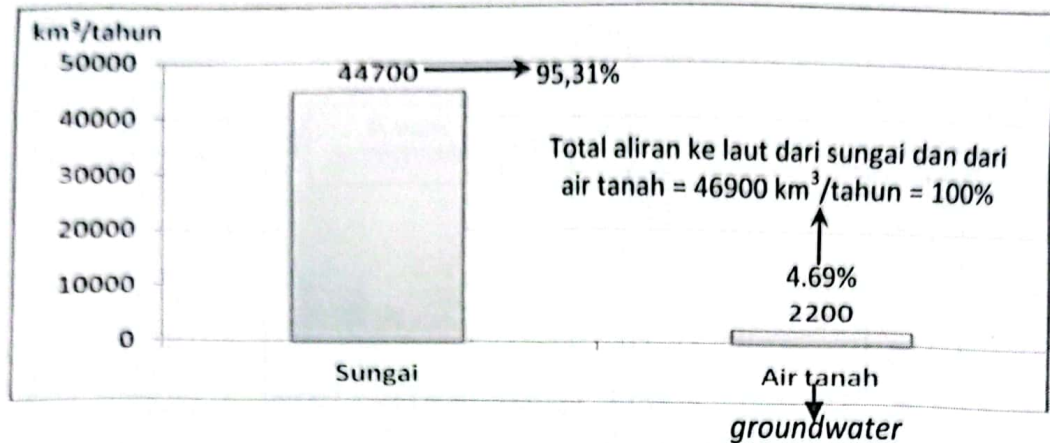


Catatan: Lebar anak panah menunjukkan besaran relatif rata-rata air yang lewat dalam siklus hidrologi.

Gambar 2-10. Diagram siklus hidrologi dari sisi besaran relatif dan respon kecepatan (Solomon & Cordery, 1984 dalam Maidment, 1993)

Seperti ditunjukkan dalam Gambar 2-10, mulai dari hujan yang turun (*precipitation*) ketika mendekati muka tanah, jumlah air terdistribusi menjadi intersepsi, hujan di saluran (*channel precipitation*), *depression storage*, *surface run-off*, dan terinfiltrasi ke dalam tanah. Dari distribusi tersebut terlihat bahwa besaran air yang terinfiltrasi adalah yang paling besar dibandingkan dengan yang lainnya. Dilihat dalam skala global tidak termasuk es di kutub, secara volume *groundwater zone* (*phreatic zone*) merupakan daerah yang terbesar yaitu 95,7% dari seluruh air tawar yang ada, *soil zone* (*vadoze zone*) hanya 0,1%, es lainnya dan salju 3,1%, danau air tawar 0,8%, rawa 0,1%, sungai 0,02%, air biologi 0,01% dan air di udara 0,1%.

Namun bila dilihat dari alirannya maka air tanah hanya berkontribusi mendekati 5% dibandingkan dengan air sungai yang lebih dari 95%. Hal tersebut ditunjukkan dalam Gambar 2-11.



Gambar 2-11. Perbandingan debit aliran yang ke laut (Chow dkk., 1988)

Dapat disimpulkan bahwa secara volume, air tanah tawar terbesar yaitu hampir 98,73 % (diluar es di kutub dan es lainnya) namun alirannya sangat lambat, yaitu volume air tanah tiap tahun yang mengalir (4,69%) jauh lebih kecil dari aliran air sungai (95,31%). Kondisi spesial tersebut secara global bisa dijadikan referensi untuk kajian air tanah dan air permukaan dalam skala regional yang lebih detail.

2.6 Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi menjelaskan perjalanan air secara terus menerus, kontinyu, seimbang di darat baik di atas muka tanah dan di dalam tanah, di laut dan di udara.

Di darat: di muka tanah secara gravitasi air mengalir dari tempat yang tinggi (gunung, pegunungan, dataran tinggi) ke tempat yang rendah (dataran rendah, daerah pantai) dan bermuara ke wadah air (laut, danau), air meresap ke dalam tanah (infiltrasi) dan mengalir juga secara gravitasi dari dalam tanah dengan elevasi yang lebih tinggi ke lebih rendah. Air yang meresap ini selanjutnya mengalir di daerah *vadoze zone* (*soil zone*) sebagai *soil water flow* dan juga mengalir di *phreatic zone* (*groundwater zone* atau *saturated zone*) sebagai *groundwater flow*.

Di Indonesia air tanah mengalir di daerah CAT sebagai *soil water* dan *groundwater* dan di daerah Non-CAT hanya *soil water* karena tak ada *groundwater*. Detail CAT dan Non-CAT diuraikan dalam Bab 5.

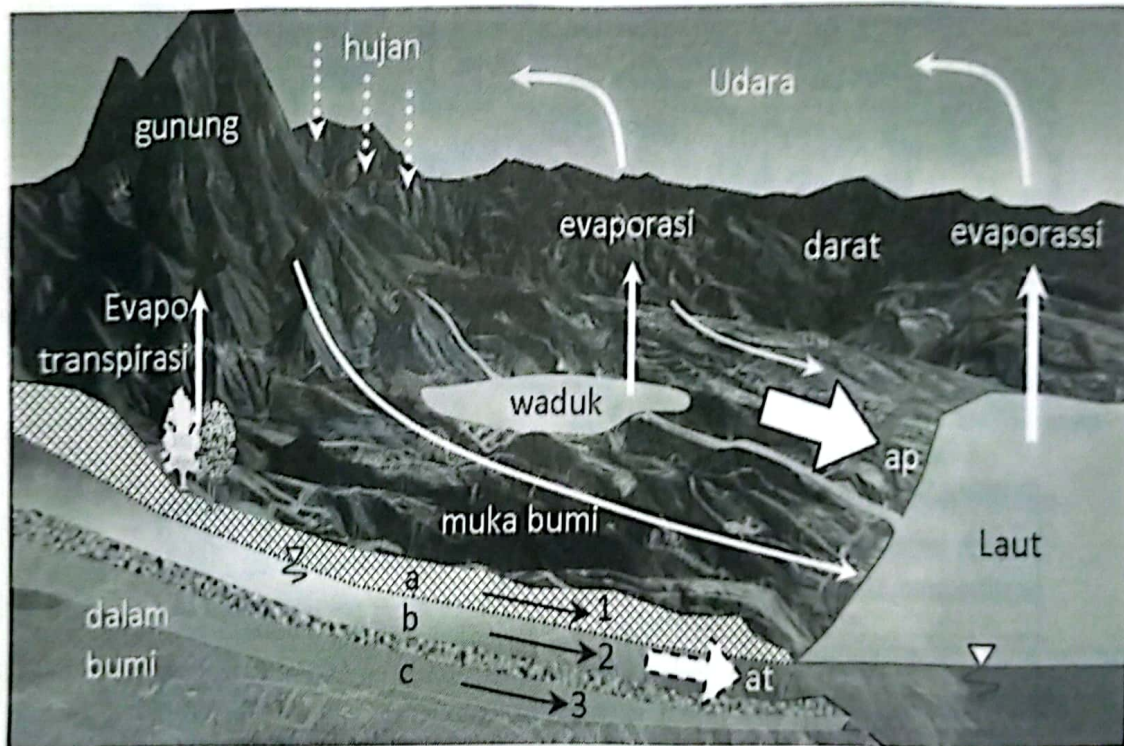
Di daerah CAT air mengalir di dalam tanah baik di tanah dangkal (*soil water zone*) maupun di tanah dibawahnya (*groundwater zone*). Di *groundwater zone* air mengalir pada akuifer baik akuifer bebas (*unconfined aquifer*) maupun akuifer tertekan (*confined aquifer*). Di daerah *discharge area* dari *unconfined aquifer* yaitu tempat air tanah keluar atau daerah lepasan air tanah dalam satu sistem pembentukan air tanah pada kondisi tertentu bisa menyatu dengan *soil zone*. Dengan kata lain pada kondisi topografi tertentu *soil water* (di tanah dangkal) menyatu dengan *groundwater*.

Groundwater zone ini disebut sebagai cekungan air tanah (CAT). Air juga mengalir di daerah Non-CAT baik di dalam tanah maupun di permukaan tanah. Di dalam tanah daerah Non-CAT air mengalir hanya di daerah *soil water zone* karena tidak ada *groundwater zone*. Di permukaan tanah daerah CAT

maupun Non-CAT air mengalir sebagai aliran permukaan (*run-off*) di daerah aliran sungai dan di sistem sungainya.

Di laut air tawar menjadi air asin. Karena panas matahari air baik di muka tanah maupun di laut akan merubah menjadi uap/gas disebut dengan proses penguapan atau *evaporasi*. Air juga diserap tanaman untuk hidup (proses *transpirasi*) dan dari tanaman karena panas matahari akan berevaporasi. Keseluruhan proses perjalanan air masuk ke dalam tanaman, di dalam tanaman dan keluar dari tanaman disebut *evapotranspirasi*.

Seluruh proses perjalanan air ini secara terus menerus, kontinyu, seimbang dan secara global dikenal dengan istilah siklus hidrologi tertutup (*closed system diagram of the global hydrological cycle*). Bilamana siklus hidrologi ini dilihat pada suatu lokasi dan situasi tertentu maka siklus hidrologi ini disebut dengan siklus hidrologi terbuka (Kodoatie & Sjarief, 2008 & 2010). Gambar siklus hidrologi ini ditunjukkan dalam Gambar 2-12.



Catatan: ap = air permukaan (total), at = air tanah (total)
 a = soil zone, b = unconfined aquifer, c = confined aquifer
 1 = interflow, 2 = groundwater (baseflow) in unconfined aquifer,
 3 = groundwater flow in confined aquifer

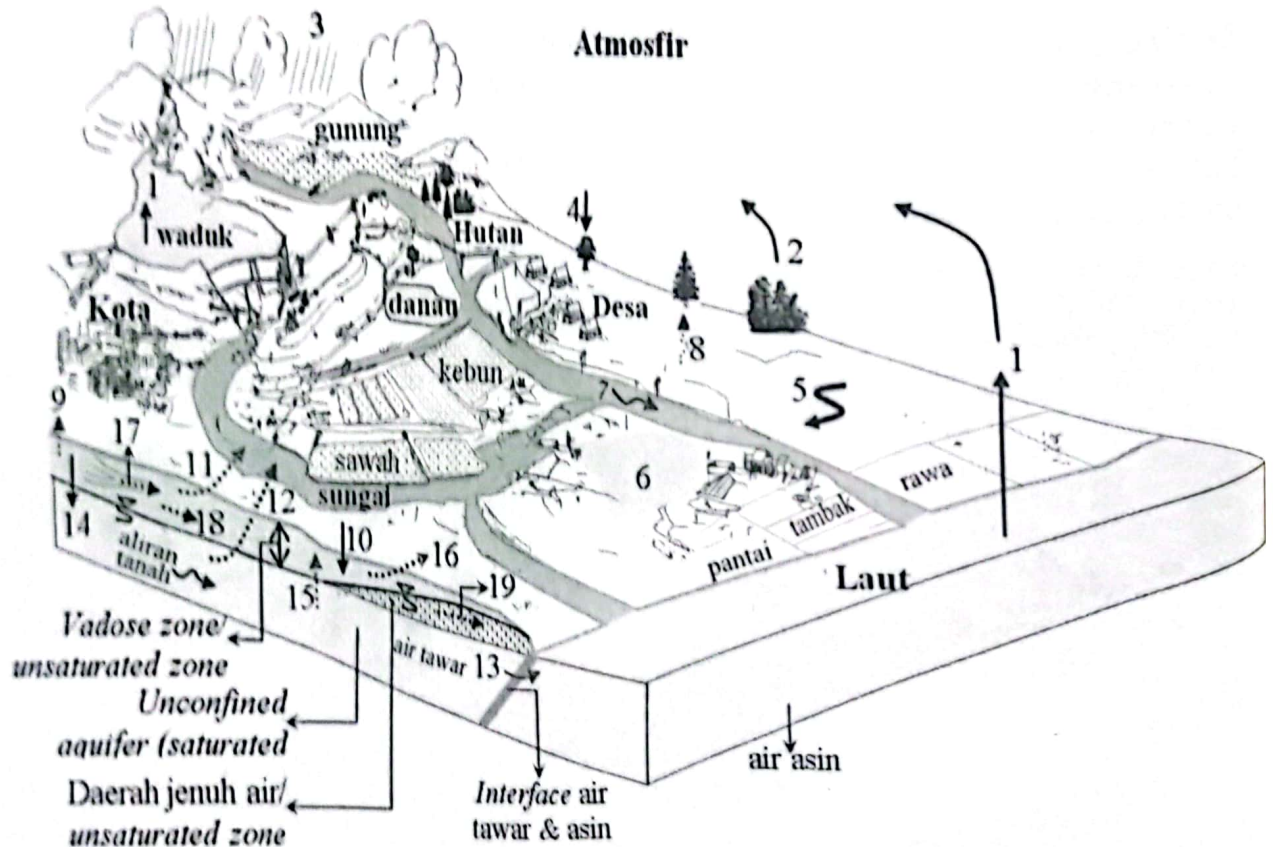
Gambar 2-12. Ilustrasi sederhana proses perjalanan air (siklus hidrologi)

Ruang darat di Indonesia tidak seluruhnya mempunyai CAT. Penyebarannya adalah 47% CAT dan 53% Bukan (Non) CAT atau CAT tidak potensial. CAT dan Non-CAT diuraikan dalam Bab 5.

Karena ada daerah CAT dan Non-CAT maka berikut ini ditunjukkan dan diuraikan siklus hidrologi untuk kondisi ke dua daerah tersebut.

2.6.1 Siklus hidrologi Daerah CAT

Siklus hidrologi daerah CAT ditunjukkan dalam Gambar 2-13 (Chorley, 1978; Toth, 1990; Chow dkk 1988; Maidment, 1993; Grigg, 1996; Mays, 2001; Viessman & Lewis, 2003; Kodoatie & Sjarief, 2007 dan 2010; Kodoatie dkk., 2008; dengan modifikasi).

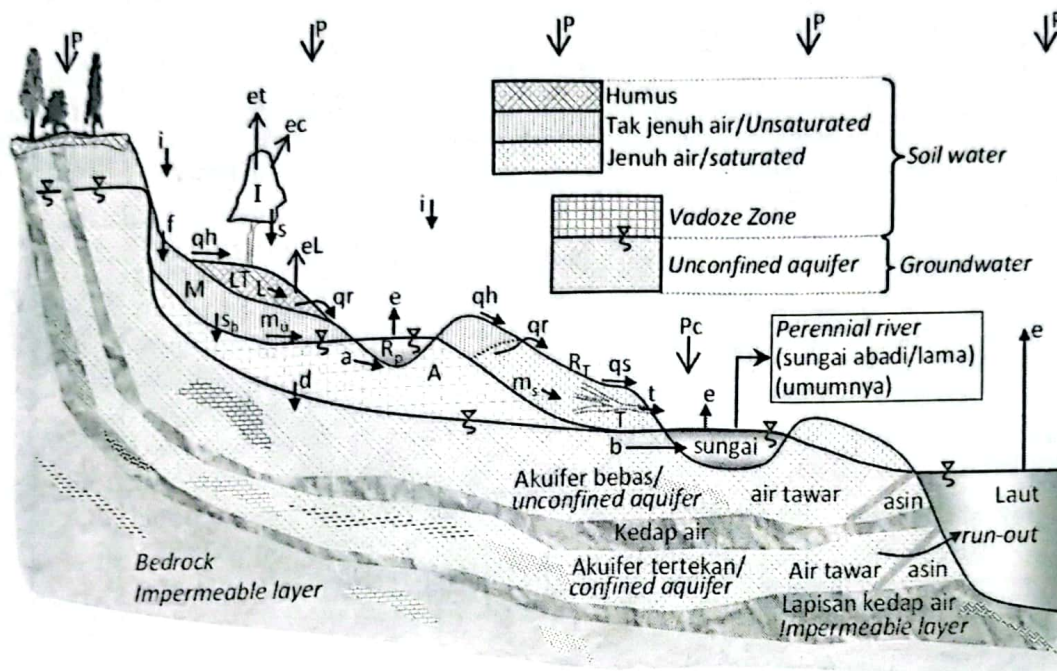


Keterangan angka dalam gambar:

No.	Uraian
1.	Penguapan (evaporasi)
2.	Evapotranspirasi (evaporasi tanaman + transpirasi tanaman)
3.	Hujan (air atau salju)
4.	Air mengalir lewat batang tanaman (<i>stem flow</i>) atau jatuh langsung dari tanaman (<i>through flow</i>). Air yang tertinggal di atau jatuh dari daun (<i>drip flow</i>)
5.	Aliran di muka tanah (<i>over land flow</i>) atau aliran permukaan/ <i>run-off</i>
6.	Banjir atau genangan
7.	Aliran jaringan sungai (<i>river flow</i>)
8.	Transpirasi (air diambil melalui akar tanaman)
9.	Kenaikan kapiler dari <i>soil water/vadoze zone</i>
10.	Infiltrasi dari muka tanah ke dalam tanah (<i>soil water</i>)
11.	Aliran antara (<i>interflow</i>) dari <i>soilwater</i> ke jaringan sungai
12.	Aliran dasar (<i>baseflow</i>) dari <i>groundwater</i> ke jaringan sungai

13.	Aliran ruNout (dari groundwater langsung ke laut)
14.	Perkolasi (dari soil water ke groundwater)
15.	Kenaikan kapiler dari groundwater ke soil water
16.	Return flow (dari soil water/vadoze zone ke permukaan tanah)
17.	Aliran pipa (pipe flow) dalam tanah
18.	Unsaturated Throughflow
19.	Saturated flow

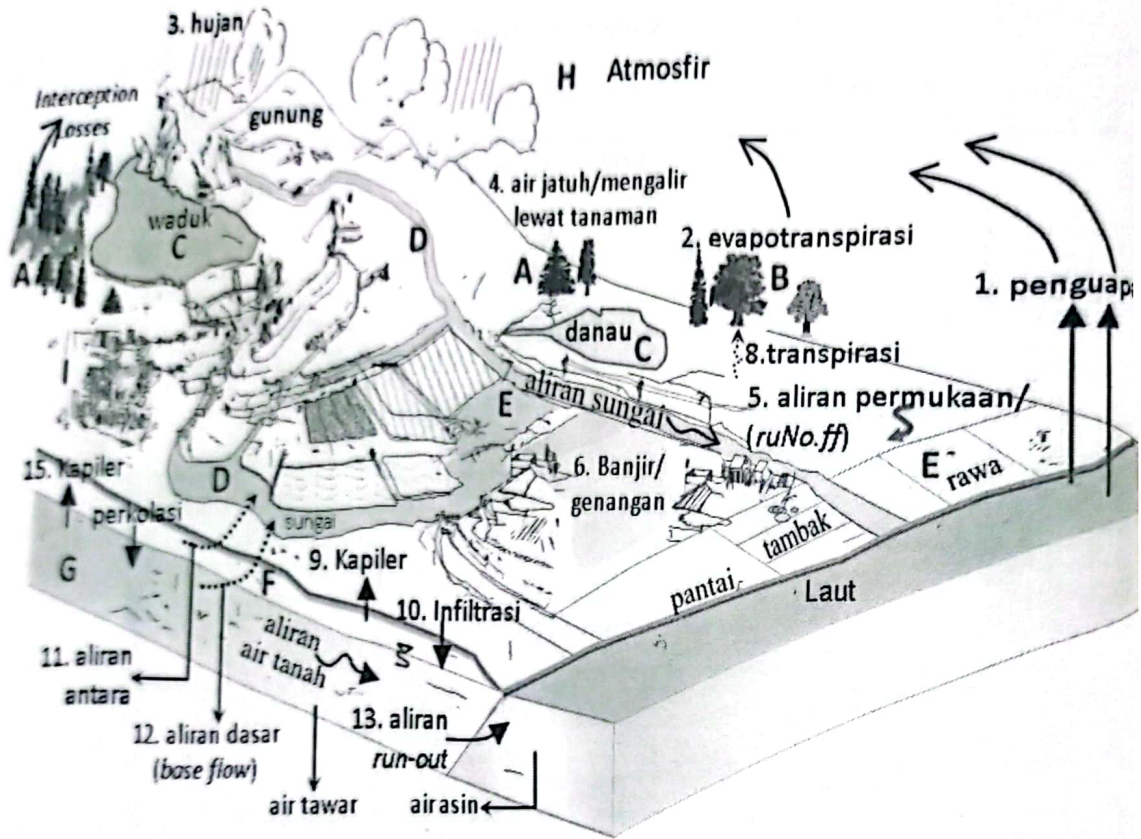
a. Siklus Hidrologi Daerah CAT



Keterangan huruf (Notasi) dalam gambar:

No.	Deskripsi	Notasi	No.	Deskripsi	Notasi
1	Hujan	P	15	Horton overland flow	q_h
2	Hujan di saluran/sungai	P_c	16	Saturated overland flow	q_s
3	Intensitas hujan	i	17	Return flow	q_r
4	Evapotranspirasi	e_t	18	Aliran pipa (pipe flow)	t
5	Kehilangan intersepsi kanopi	e_c	19	Simpanan pipa	T
6	Simpanan kanopi & intersepsi	l	20	Unsaturated throughflow	m_u
7	Stemflow dan drip flow	s	21	Saturated throughflow	m_s
8	Aliran di sampah (litter flow)	L	22	Soill-moisture storage	M
9	Kehilangan intersepsi sampah	E_l	23	Seepage into bedrock	S_b
10	Simpanan sampah	L_T	24	Interflow in bedrock/alluvial	a
11	Evaporasi	e	25	Aeration zone storage	A
12	Depression storage	R_p	26	Deep seepage(percolation)	d
13	Detention storage	R_T	27	Baseflow	b
14	Infiltrasi	f	28	Groundwater storage	B

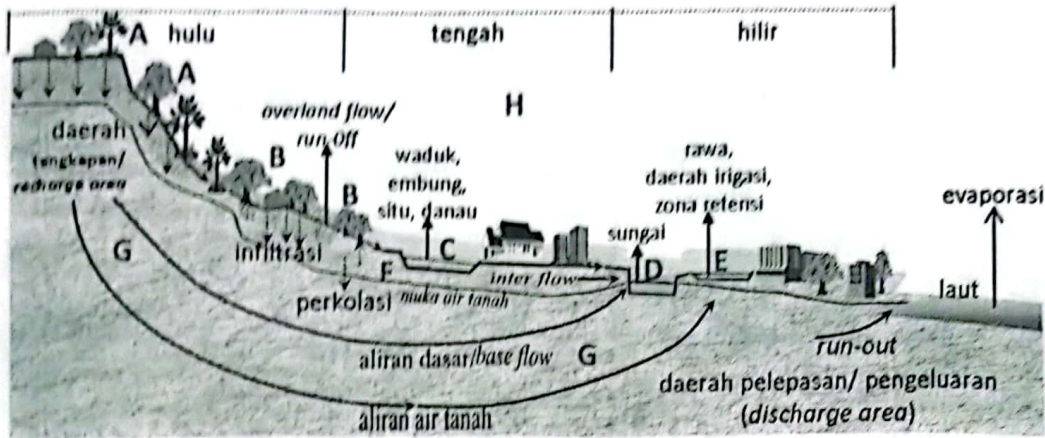
b. Detail sketsa penampang irisan bumi Daerah CAT



Keterangan huruf besar:

Huruf	Uraian
A	Tampungan intersepsi/interception storage
B	Tampungan di tanaman/storage in plants
C	Tampungan di atas permukaan tanah (surface storage – on soil)
D	Tampungan jar. sungai/channel storage
E	Tampungan di atas permukaan tanah (surface storage – on soils) misal rawa
F	Tampungan di zona tak jenuh/vadose zone storage di atas muka air tanah sampai permukaan tanah
G	Tampungan air tanah/groundwater storage
H	Tampungan di atmosfer
I	Tampungan di gudang-gudang air minum kemasan, gedung-gedung, dll

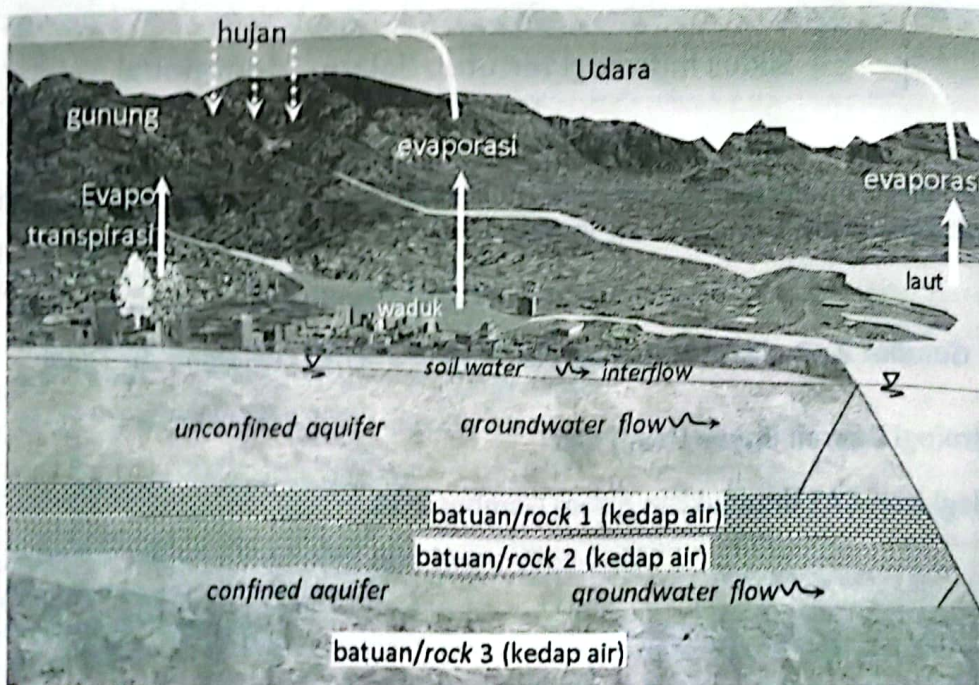
c. Denah tampungan dalam siklus hidrologi Daerah CAT



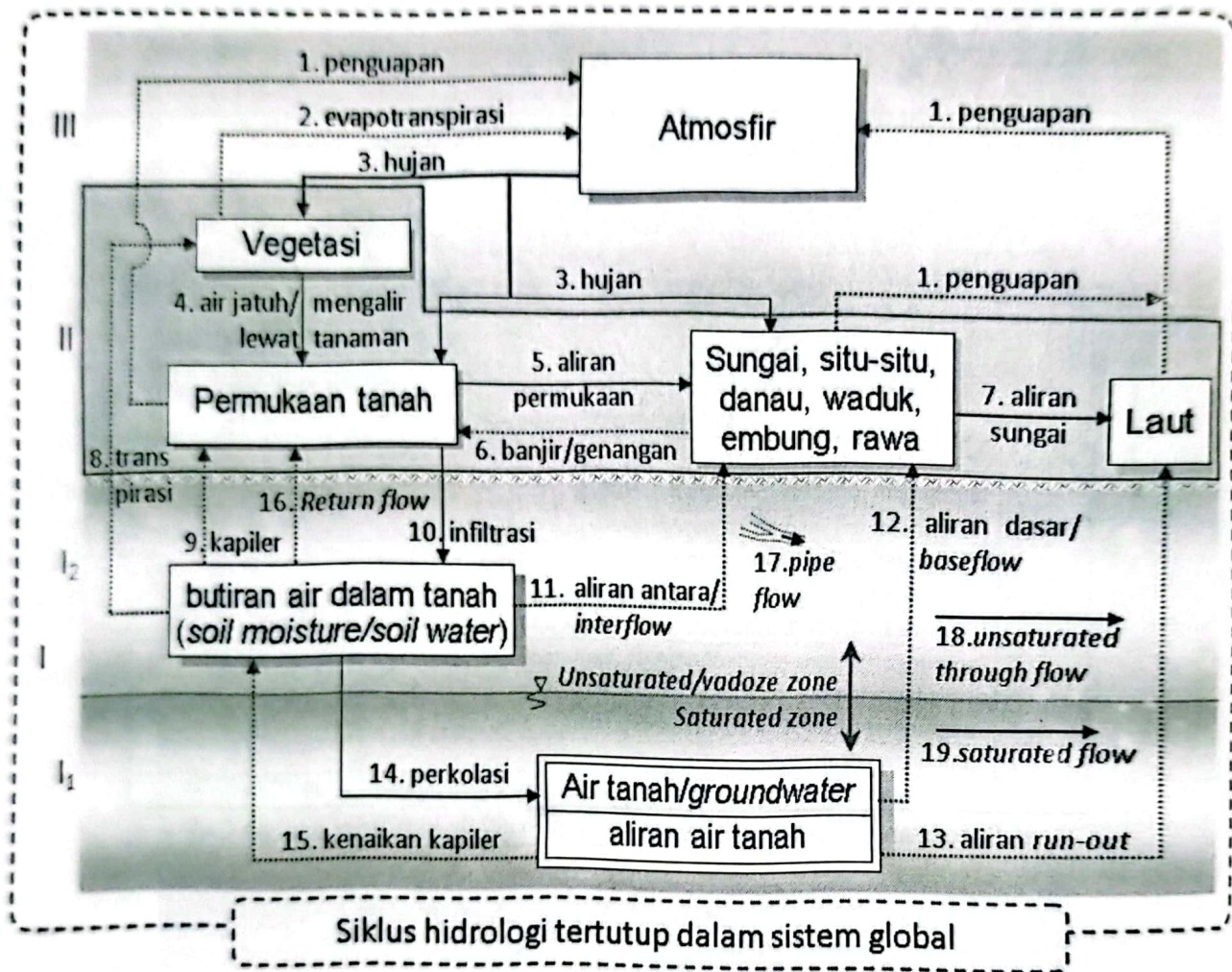
Keterangan huruf besar:

Huruf	Uraian
A	Tampungan intersepsi/ <i>interception storage</i>
B	Tampungan di tanaman/ <i>storage in plants</i>
C	Tampungan di atas permukaan tanah (<i>surface storage – on soil</i>)
D	Tampungan jar. sungai/ <i>channel storage</i>
E	Tampungan di atas permukaan tanah (<i>surface storage – on soils</i>) misal rawa
F	Tampungan di zona tak jenuh/ <i>vadose zone storage</i> di atas muka air tanah sampai permukaan tanah
G	Tampungan air tanah/ <i>groundwater storage</i>
H	Tampungan di atmosfer
I	Tampungan di gudang-gudang air minum kemasan, gedung-gedung, dll

d. Potongan irisan bumi tampungan dalam siklus hidrologi daerah CAT



e. Sketsa penampang irisan bumi *unconfined aquifer* dan *confined aquifer*



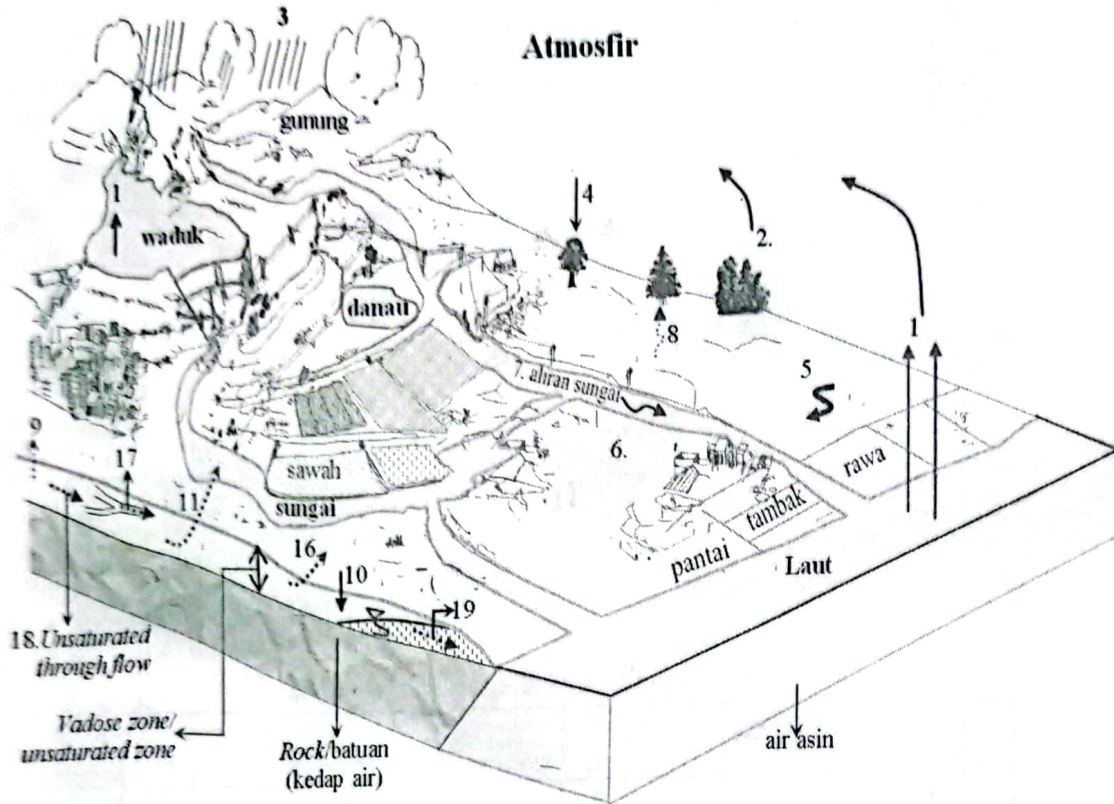
eterangan: I dalam tanah, I₁ saturated zone/phreatic (zona jenuh air), I₂ unsaturated zone atau vadoze zone/aeration zone, II di atas tanah, III di udara

f. Diagram Siklus Hidrologi Daerah CAT

Gambar 2-13. Siklus Hidrologi Tertutup di daerah Cekungan Air Tanah

2.6.2 Siklus hidrologi Daerah Bukan (Non) CAT

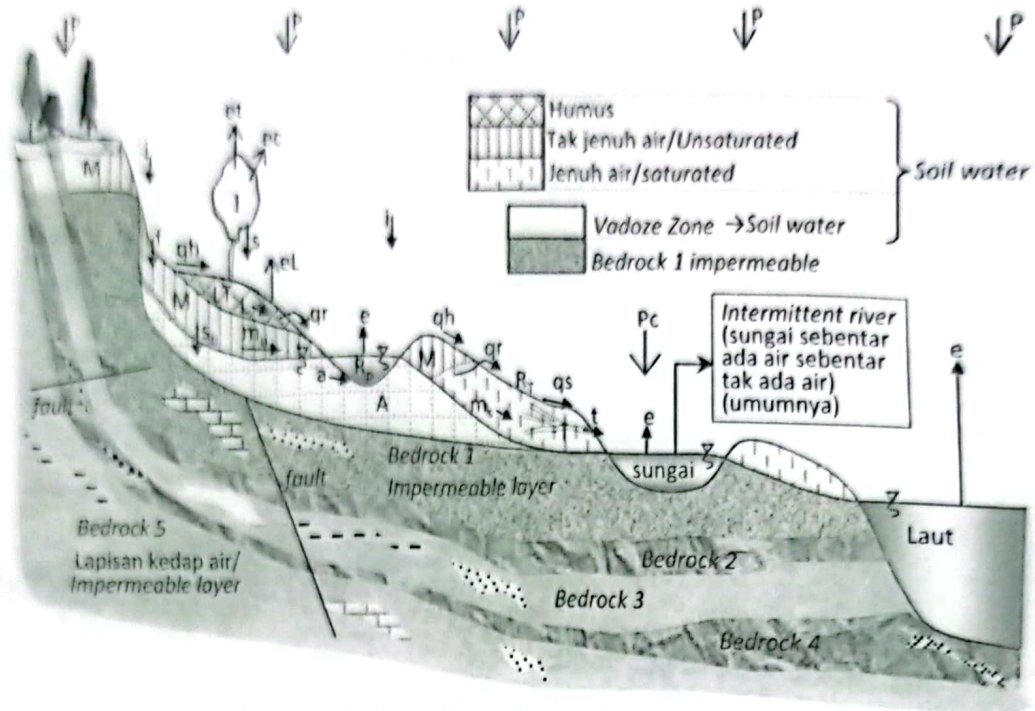
Siklus hidrologi Non-CAT ditunjukkan dalam Gambar 2-14.



Keterangan angka dalam gambar:

No.	Uraian
1.	Penguapan (evaporasi)
2.	Evapotranspirasi (evaporasi tanaman + transpirasi tanaman)
3.	Hujan (air atau salju)
4.	Air mengalir lewat batang tanaman (<i>stem flow</i>) atau jatuh langsung dari tanaman (<i>through flow</i>). Air yang tertinggal di atau jatuh dari daun (<i>drip flow</i>)
5.	Aliran di muka tanah (<i>over land flow</i>) atau aliran permukaan/ <i>run-off</i>
6.	Banjir atau genangan
7.	Aliran jaringan sungai (<i>river flow</i>)
8.	Transpirasi (air diambil melalui akar tanaman)
9.	Kenaikan kapiler dari <i>soil water/vadoze zone</i>
10.	Infiltrasi dari muka tanah ke dalam tanah (<i>soil water</i>)
11.	Aliran antara (<i>interflow</i>) dari <i>soilwater</i> ke jaringan sungai
12.	Tak ada aliran dasar (<i>No baseflow</i>)
13.	} tak ada untuk daerah Non-CAT
14.	
15.	
16.	<i>Return flow</i> (dari <i>soil water/vadoze zone</i> ke permukaan tanah)
17.	Aliran pipa (<i>pipe flow</i>) dalam tanah
18.	<i>Unsaturated Throughflow</i>
19.	<i>Saturated flow</i>

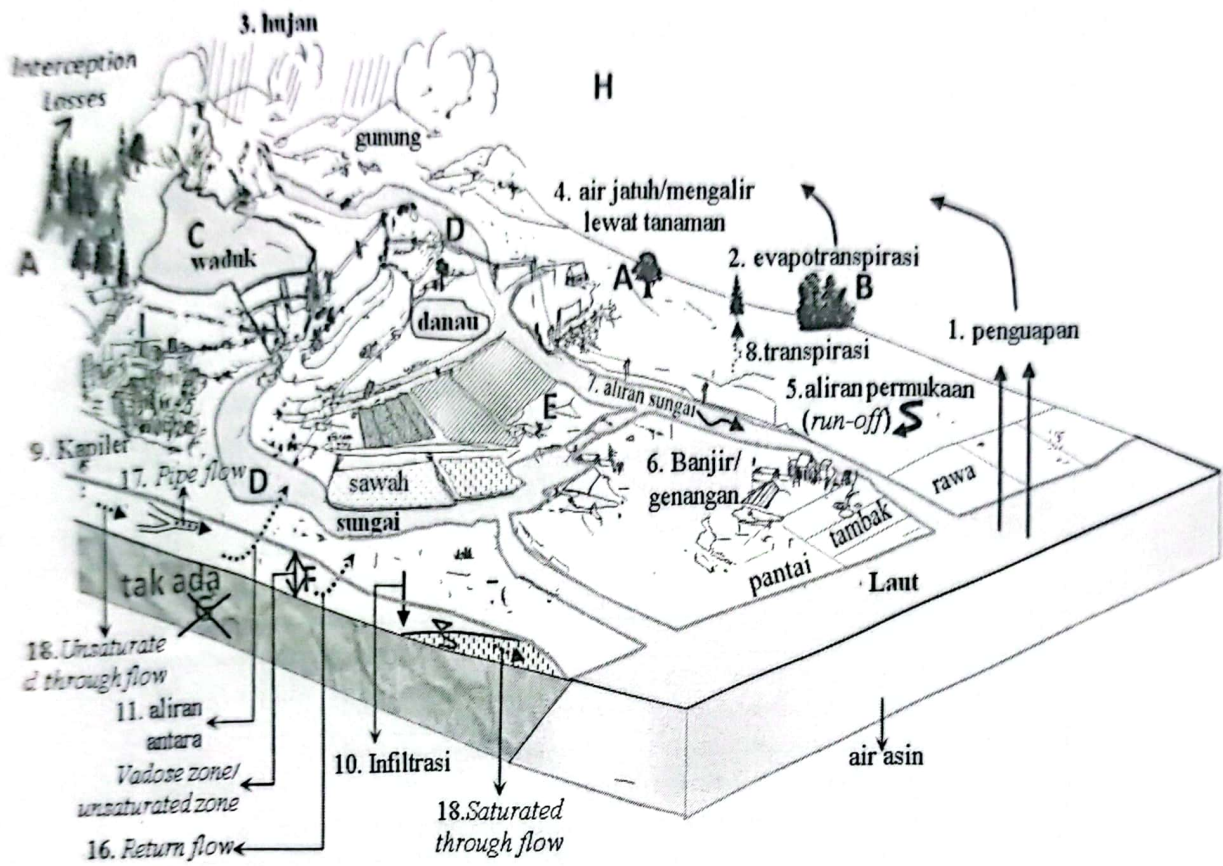
a. Siklus Hidrologi Daerah Bukan (Non) CAT



Keterangan huruf (Notasi) dalam gambar:

No.	Deskripsi	Notasi	No.	Deskripsi	Notasi
1	Hujan	P	15	Horton overland flow	q_h
2	Hujan di saluran/sungai	P_c	16	Saturated overland flow	q_s
3	Intensitas hujan	i	17	Return flow	q_r
4	Evapotranspirasi	e_t	18	Aliran pipa (pipe flow)	t
5	Kehilangan intersepsi kanopi	e_c	19	Simpanan pipa	T
6	Simpanan kanopi & intersepsi	I	20	Unsaturated throughflow	m_u
7	Stemflow dan drip flow	s	21	Saturated throughflow	m_s
8	Aliran di sampah (litter flow)	L	22	Soil-moisture storage	M
9	Kehilangan intersepsi sampah	E_l	23	Seepage into bedrock	S_b
10	Simpanan sampah	L_t	24	Interflow in bedrock/alluvial	a
11	Evaporasi	e	25	Aeration zone storage	A
12	Depression storage	R_p	26	} tak ada untuk daerah Non-CAT	
13	Detention storage	R_t	27		
14	Infiltrasi	f	28		

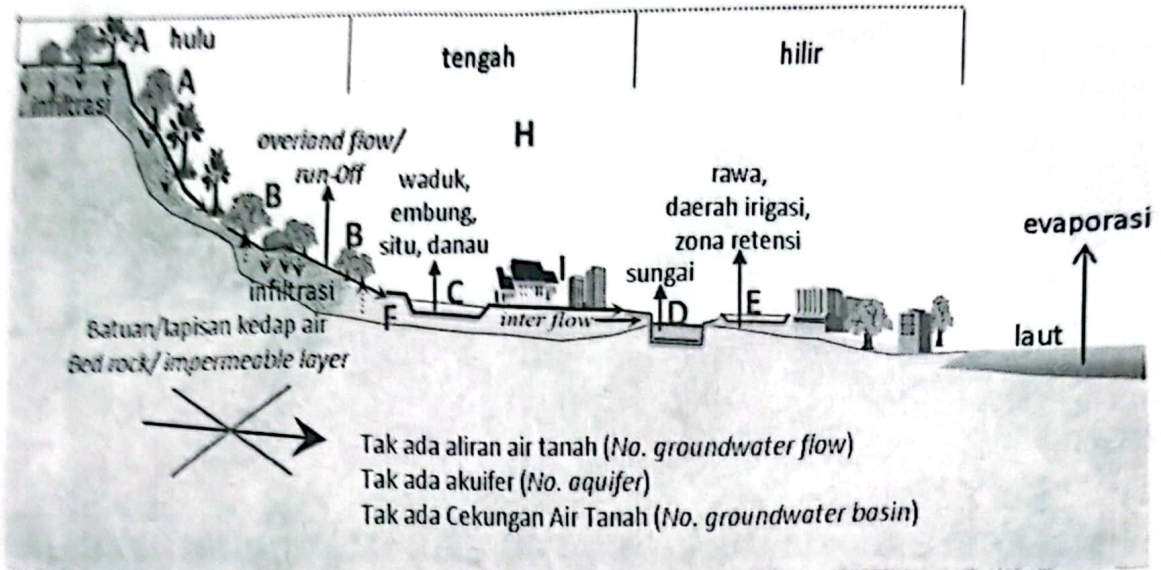
b. Detail sketsa penampang irisan bumi Daerah Non-CAT



Keterangan huruf besar:

Huruf	Uraian
A	Tampungan intersepsi/interception storage
B	Tampungan di tanaman/storage in plants
C	Tampungan di atas permukaan tanah (surface storage – on soil)
D	Tampungan jar. sungai/channel storage
E	Tampungan di atas permukaan tanah (surface storage – on soils) misal rawa
F	Tampungan di zona tak jenuh/vadose zone storage di atas muka air tanah sampai permukaan tanah
G	Tampungan air tanah/groundwater storage → tak ada
H	Tampungan di atmosfer
I	Tampungan di gudang-gudang air minum kemasan, gedung-gedung, dll

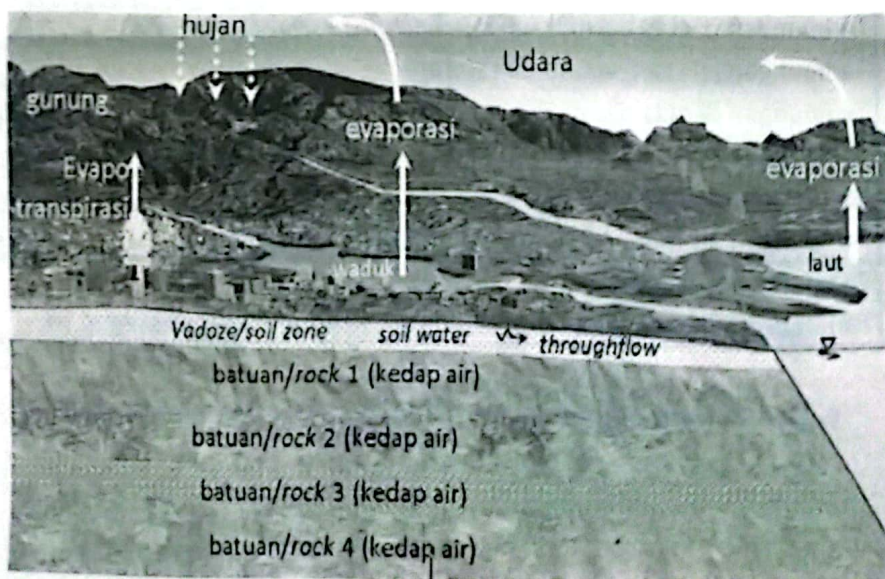
c. Denah tampungan dalam siklus hidrologi Daerah Non-CAT



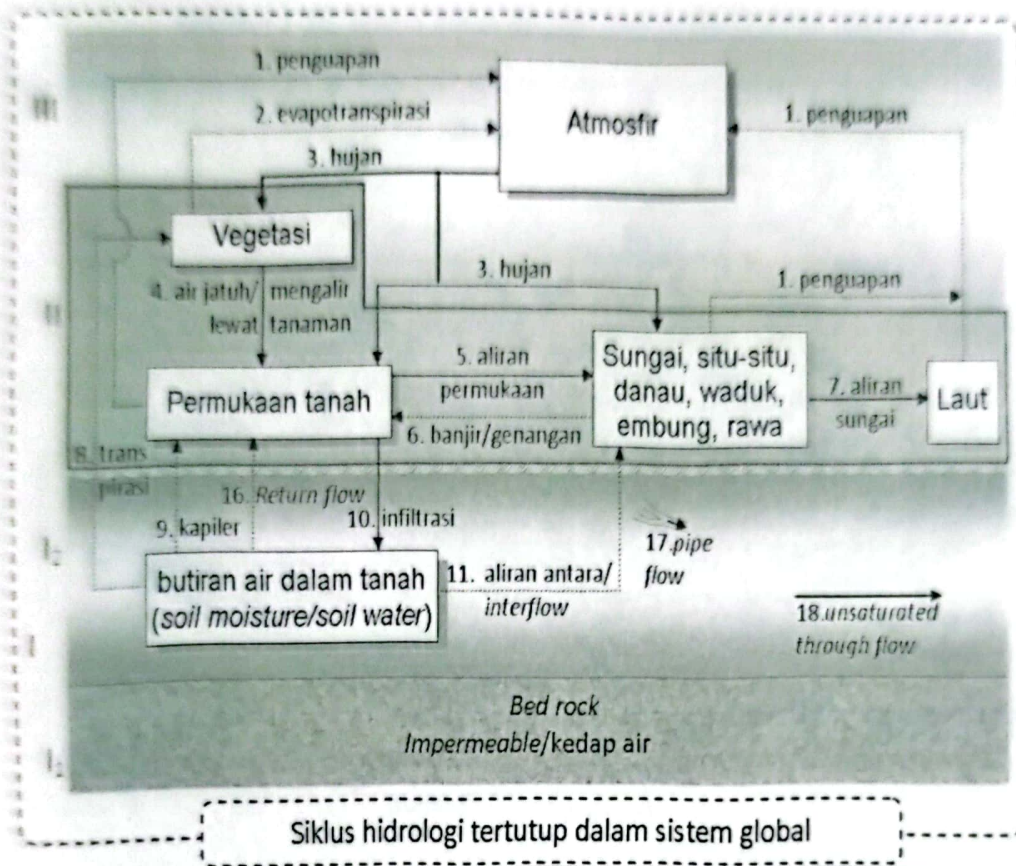
Keterangan huruf besar:

Huruf	Uraian
A	Tampungan intersepsi/interception storage
B	Tampungan di tanaman/storage in plants
C	Tampungan di atas permukaan tanah (surface storage – on soil)
D	Tampungan jar. sungai/channel storage
E	Tampungan di atas permukaan tanah (surface storage – on soils) misal rawa
F	Tampungan di zona tak jenuh/vadose zone storage di atas muka air tanah sampai permukaan tanah
G	Tampungan air tanah/groundwater storage
H	Tampungan di atmosfer
I	Tampungan di gudang-gudang air minum kemasan, gedung-gedung, dll

d. Potongan irisan bumi tampungan dalam siklus hidrologi daerah Non-CAT



e. Sketsa penampang irisan bumi Daerah Non-CAT



Keterangan: I dalam tanah, I₁ Bedrock (impermeable/kedap air), I₂ unsaturated zone atau vadoze zone/aeration zone, II di atas tanah, III di udara

f. Diagram Siklus Hidrologi Daerah Non-CAT

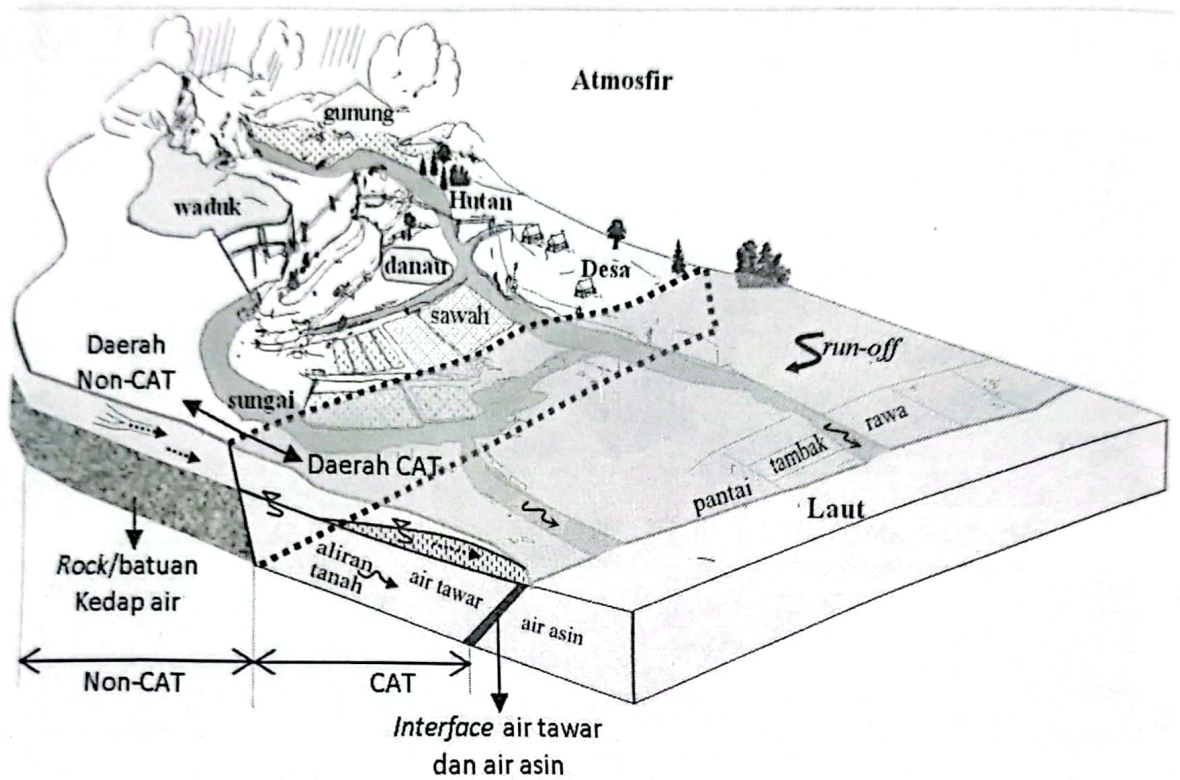
Gambar 2-14. Siklus Hidrologi Tertutup di daerah Non-CAT

2.6.3 Siklus Hidrologi Daerah Non-CAT dan CAT

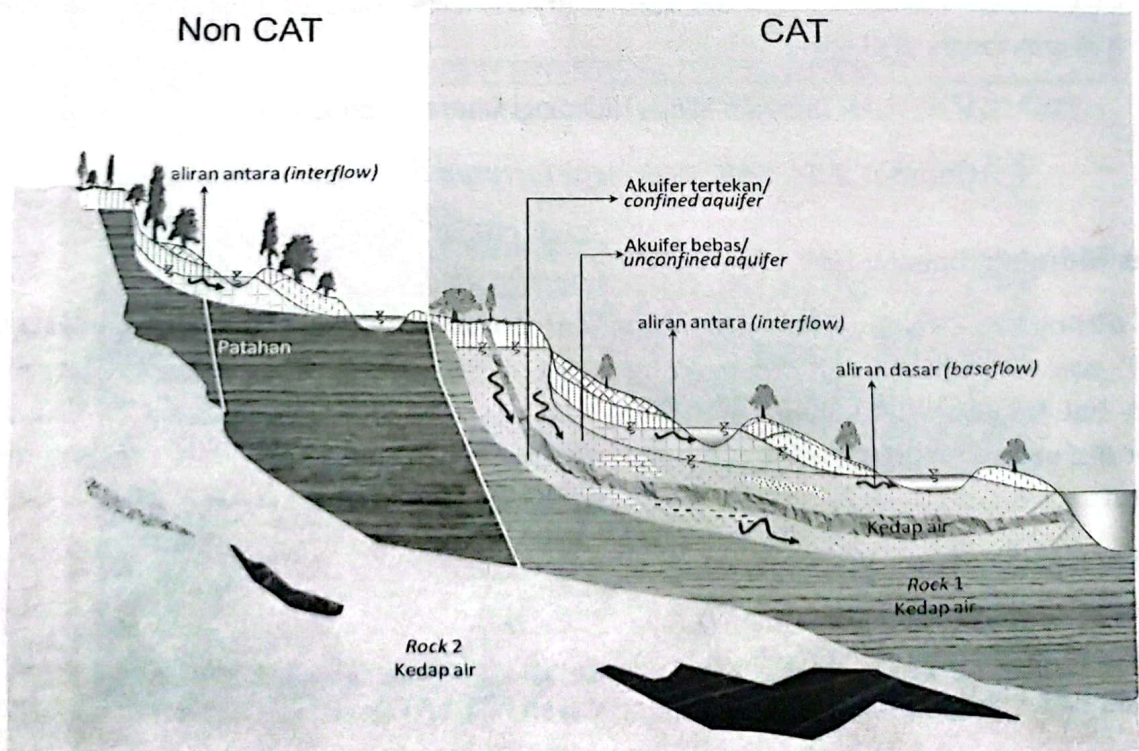
Seperti ditunjukkan dalam Error! Reference source not found., ruang darat Indonesia terdiri atas daerah CAT dan daerah Non-CAT dengan proporsi 47% daerah CAT dan 53% daerah Non-CAT. Berdasarkan hal tersebut siklus hidrologi dilihat dari sisi keberadaan CAT dan Non-CAT akan terdiri berbagai kondisi variasi CAT dan Non-CAT. Beberapa kondisi siklus hidrologi suatu DAS bisa terjadi sesuai uraian berikut:

- Daerah hulu Non-CAT dan daerah hilir CAT.
- Daerah hulu CAT dan daerah hilir Non-CAT.
- Daerah hulu Non-CAT, daerah tengah CAT dan Daerah hilir Non-CAT.
- Daerah hulu CAT, daerah tengah Non-CAT dan Daerah hilir CAT.

Ilustrasi kondisi tersebut ditunjukkan dalam Gambar 2-15.



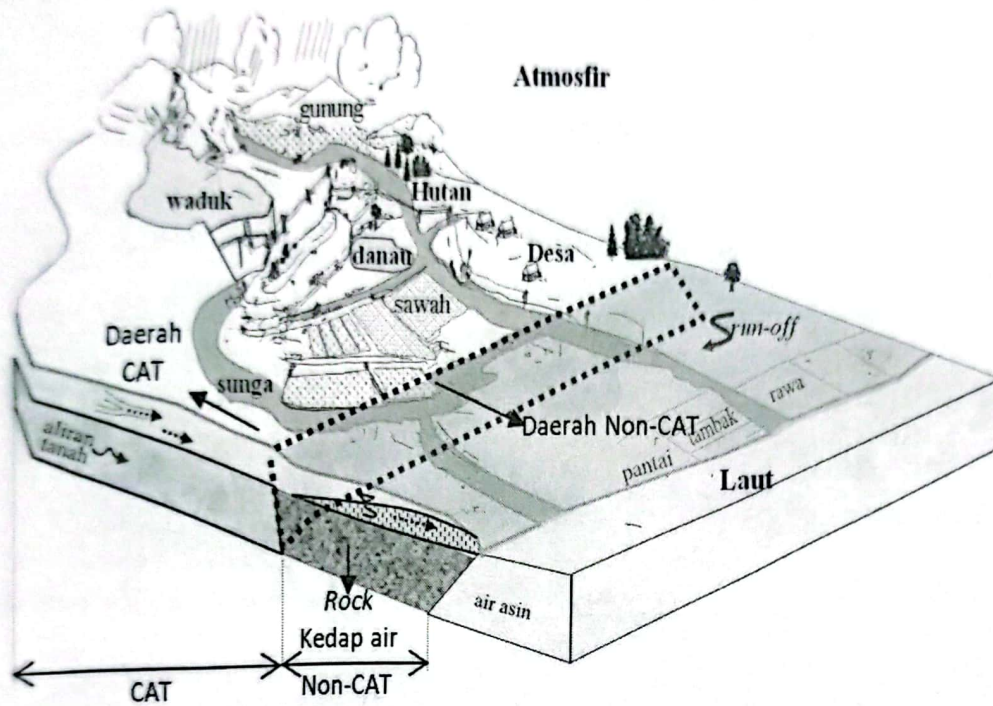
a. Sketsa denah aliran air di hulu Non-CAT dan di hilir CAT



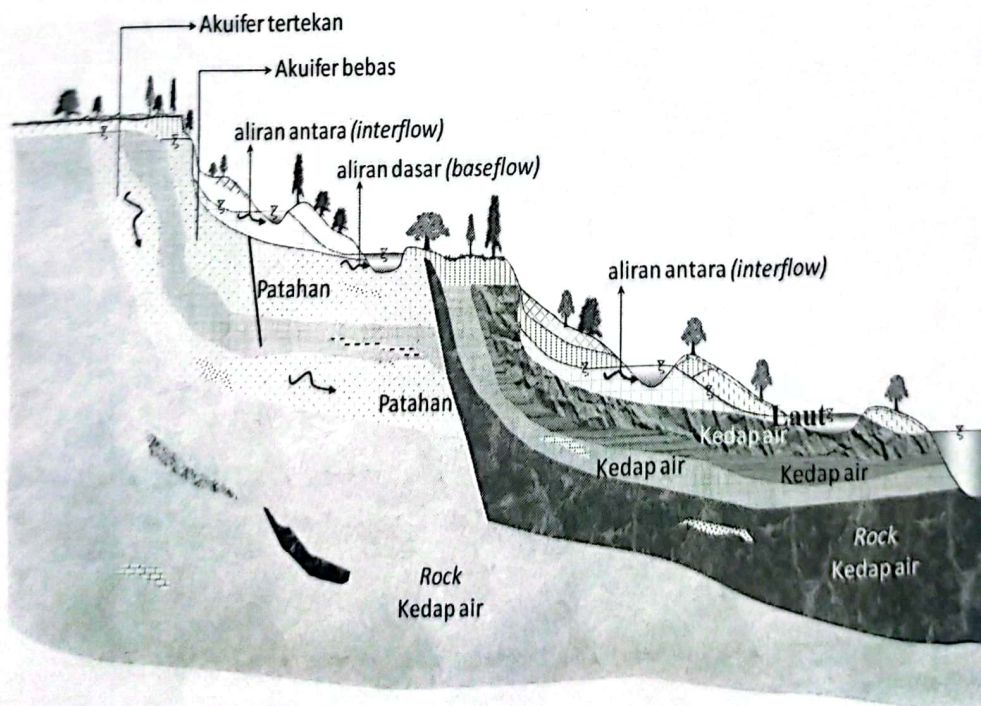
b. Sketsa penampang irisan bumi aliran air di hulu Non-CAT dan di hilir CAT

Gambar 2-15. Sketsa aliran air dari daerah Non-CAT ke daerah CAT

Aliran air dari daerah CAT ke Non-CAT diilustrasikan dalam Gambar 2-16.



a. Sketsa denah aliran air di hulu CAT dan di hilir Non-CAT

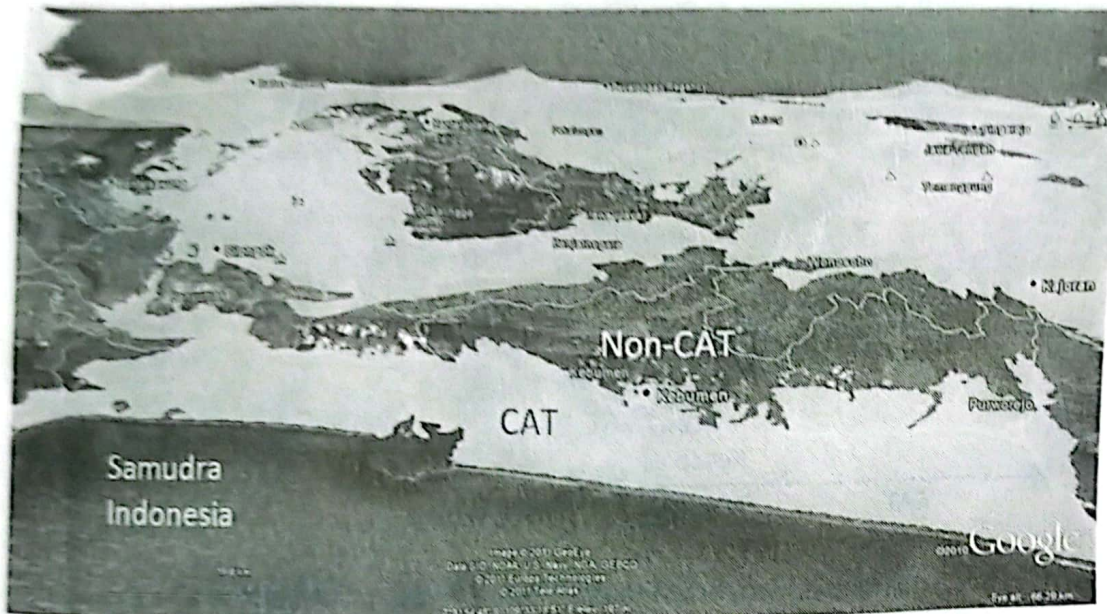


b. Sketsa penampang irisan bumi aliran air di hulu CAT dan di hilir Non-CAT

Gambar 2-16. Sketsa aliran air di hulu CAT dan di hilir Non-CAT

Dengan pertimbangan penyederhanaan penggambaran agar tidak begitu kompleks maka Gambar 2-15 dan Gambar 2-16 tidak dibuat detail. Komponen siklus hidrologi dalam Gambar 2-15 dan Gambar 2-16 dapat dilihat pada gambar-gambar siklus hidrologi baik di daerah CAT (Sub-Bab 2.6.1) dan di daerah Non-CAT (Sub-Bab 2.6.2).

Ilustrasi variasi daerah CAT dan Non-CAT di suatu wilayah ditunjukkan dalam Gambar 2-17.

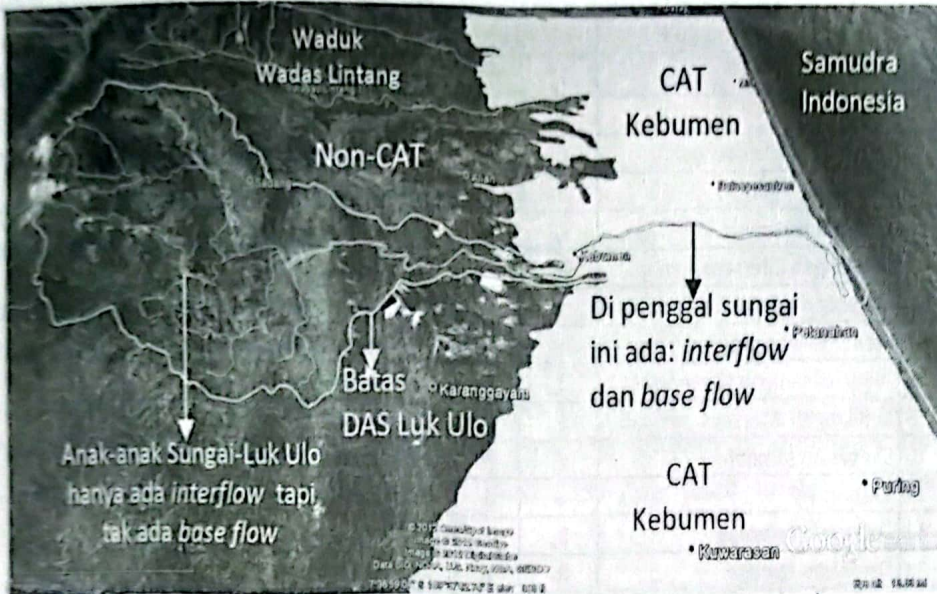


a. Daerah CAT dan Non-CAT untuk sebagian wilayah Jawa Tengah



b. Contoh Daerah Non-CAT dan CAT di daerah Kebumen Jawa Tengah

Gambar 2-17. Gambaran daerah CAT dan Non-CAT (KepPres No. 26 Tahun 2011)
 Contoh Non-CAT dan CAT untuk Sungai Luk Ulo Kebumen ditunjukkan dalam Gambar 2-18.



Gambar 2-18. Daerah Non-CAT dan CAT untuk Sungai Luk Ulo Jawa Tengah

2.7 Komponen Siklus Hidrologi Air Tanah

Komponen siklus hidrologi dapat dilihat dalam Tabel 2-2 sampai Tabel 2-4.

Tabel 2-2. Komponen Siklus Hidrologi

No.	Komponen
1.	Penguapan (evaporasi)
2.	Evapotranspirasi (evaporasi tanaman + transpirasi tanaman)
3.	Hujan (air atau salju)
4.	Air mengalir lewat batang tanaman (<i>stem flow</i>) atau jatuh langsung dari tanaman (<i>through flow</i>). Air yang tertinggal di atau jatuh dari daun (<i>drip flow</i>)
5.	Aliran di muka tanah (<i>over land flow</i>) atau aliran permukaan/ <i>run-off</i>
6.	Banjir atau genangan
7.	Aliran jaringan sungai (<i>river flow</i>)
8.	Transpirasi (air diambil melalui akar tanaman)
9.	Kenaikan kapiler dari <i>soil water/vadoze zone</i>
10.	Infiltrasi dari muka tanah ke dalam tanah (<i>soil water</i>)
11.	Aliran antara (<i>interflow</i>) dari <i>soilwater</i> ke jaringan sungai
12.	Aliran dasar (<i>baseflow</i>) dari <i>groundwater</i> ke jaringan sungai
13.	Aliran <i>runout</i> (dari <i>groundwater</i> langsung ke laut)
14.	Perkolasi (dari <i>soil water</i> ke <i>groundwater</i>)
15.	Kenaikan kapiler dari <i>groundwater</i> ke <i>soil water</i>
16.	<i>Return flow</i> (dari <i>soil water/vadoze zone</i> ke permukaan tanah)
17.	Aliran pipa (<i>pipe flow</i>) dalam tanah
18.	<i>Unsaturated Throughflow</i>
19.	<i>Saturated flow</i>

Tabel 2-3. Uraian dan Notasi komponen siklus hidrologi

No.	Deskripsi	Notasi		No.	Deskripsi	Notasi	
		1*	2*			1*	2*
1	Hujan	P	3	15	Horton Overland Flow	q_h	5a
2	Hujan di saluran/sungai	P_c	3	16	Saturated Overland Flow	q_s	5b
3	Intensitas hujan	i	3	17	Return Flow	q_r	16
4	Evapotranspirasi	e_t	2	18	Aliran pipa (<i>pipe flow</i>)	t	17
5	Kehilangan intersepsi kanopi	e_c	2	19	Simpanan pipa	T	
6	Simpanan kanopi & intersepsi	I	A	20	Unsaturated Throughflow	m_u	18
7	Stemflow dan drip flow	s	4	21	Saturated Throughflow	m_s	19
8	Aliran di sampah (<i>litter flow</i>)	L	5	22	Soill-Moisture Storage	M	F
9	Kehilangan intersepsi sampah	E_l	5	23	Seepage into bedrock	s_b	14
10	Simpanan sampah	L_T	5	24	Interflow in Bedrock	a	11
11	Evaporasi	e	1	25	Aeration Zone Storage	A	
12	Depression storage	R_p	F	26	Deep Seepage	d	14
13	Detention storage	R_T	F	27	Baseflow	b	12
14	Infiltrasi	f	10	28	Groundwater Storage	B	G

1* dan 2* lihat Gambar 2-13 dan Gambar 2-14

Tabel 2-4. Tampungan dalam siklus hidrologi

Huruf	Uraian
A	Tampungan intersepsi/ <i>interception storage</i>
B	Tampungan di tanaman/ <i>storage in plants</i>
C	Tampungan di atas permukaan tanah (<i>surface storage – on soil</i>)
D	Tampungan jar. sungai/ <i>channel storage</i>
E	Tampungan di atas permukaan tanah (<i>surface storage – on soils</i>) misal rawa
F	Tampungan di zona tak jenuh/ <i>vadose zone storage</i> di atas muka air tanah sampai permukaan tanah
G	Tampungan air tanah/ <i>groundwater storage</i>
H	Tampungan di atmosfer
I	Tampungan di gudang-gudang air minum kemasan, gedung-gedung, dll

Beberapa komponen dalam tabel-tabel tersebut dijelaskan sebagai berikut.

2.7.1 Aliran Dasar (*Baseflow*)

Aliran dasar (*base flow*) adalah bagian dari aliran air tanah (*groundwater flow*) baik dari akuifer bebas (*unconfined aquifer*) maupun akuifer tertekan (*confined aquifer*) yang mengalir ke sungai. Beberapa istilah atau penyebutan lain diantaranya adalah (Kendall & McDonnel, 1998):

- Aliran sungai musim kemarau (*drought flow*). Hal ini nampak pada musim kemarau, dengan adanya sungai yang masih ada alirannya karena disuplai oleh air tanah (*groundwater*) dalam bentuk *base flow*.
- Aliran rendah (*low flow*).
- Aliran air rendah (*low water flow*).
- Debit aliran rendah (*low flow discharge*).
- Aliran permukaan (*run-off*) berkelanjutan (*sustained*).
- Aliran permukaan musim sedang/secukupnya (*fair weather run-off*).

Dengan adanya sebaran air tanah di Indonesia maka secara umum dapat diketahui potensi *base flow* tiap pulau besar di seluruh Indonesia. Hal tersebut ditunjukkan dalam Tabel 2-5.

Tabel 2-5 adalah gambaran umum aliran dasar untuk seluruh Indonesia. Sangat direkomendasikan untuk penelitian yang lebih detail untuk lokasi atau kawasan tertentu di Indonesia sehingga bisa dihasilkan potensi aliran dasar yang lebih teliti. Contoh *base flow* pada sungai ditunjukkan dalam Gambar 2-19.

Tabel 2-5. Potensi base flow di pulau-pulau besar (KepPres No. 26 Tahun 2011; Pusat Lingkungan Geologi, 2009; Kodoatie & Sjarief, 2010)

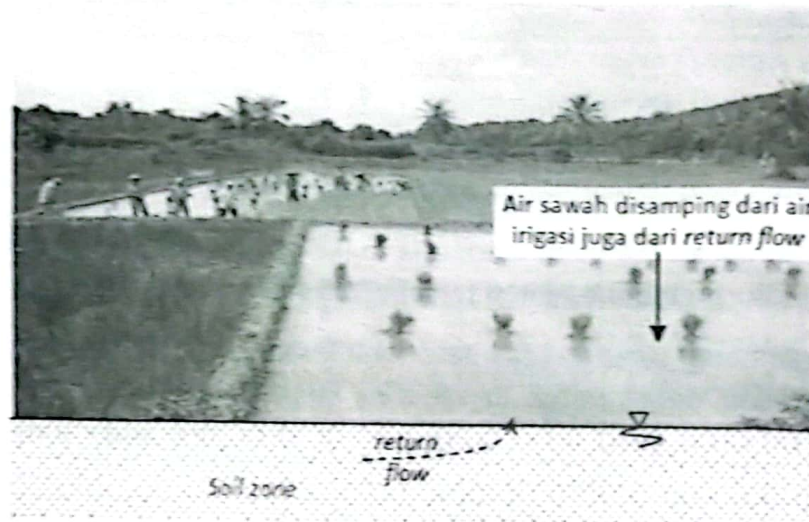
No.	Pulau	Potensi air tanah (juta m ³ /tahun)	Tinggi potensi air tanah (mm/tahun)	Curah hujan mm/tahun	% Potensi <i>base flow</i> terhadap hujan
1	Sumatra	130079	477	2820	17%
2	Jawa	40898	504	2680	19%
3	Kalimantan	69065	381	2990	13%
4	Sulawesi	20244	536	2340	23%
5	Bali	1598	365	2120	17%
6	NTB	2015	213	1410	15%
7	NTT	8429	264	1200	22%
8	Kep Maluku	13174	510	2370	22%
9	Papua	231622	881	3190	28%



a. Contoh produk *base flow* pada sungai kecil b. Contoh produk *base flow* pada sungai besar
Gambar 2-19. Contoh produk base flow pada sungai di musim kemarau

2.7.2 Return Flow

Return flow adalah aliran dari zona soil water ke muka tanah (lihat Gambar 2-13 dan Gambar 2-14). Contoh aliran ini ditunjukkan dalam Gambar 2-20.



Gambar 2-20. Contoh fenomena return flow

2.7.3 Throughflow dan Interflow (Aliran Antara)

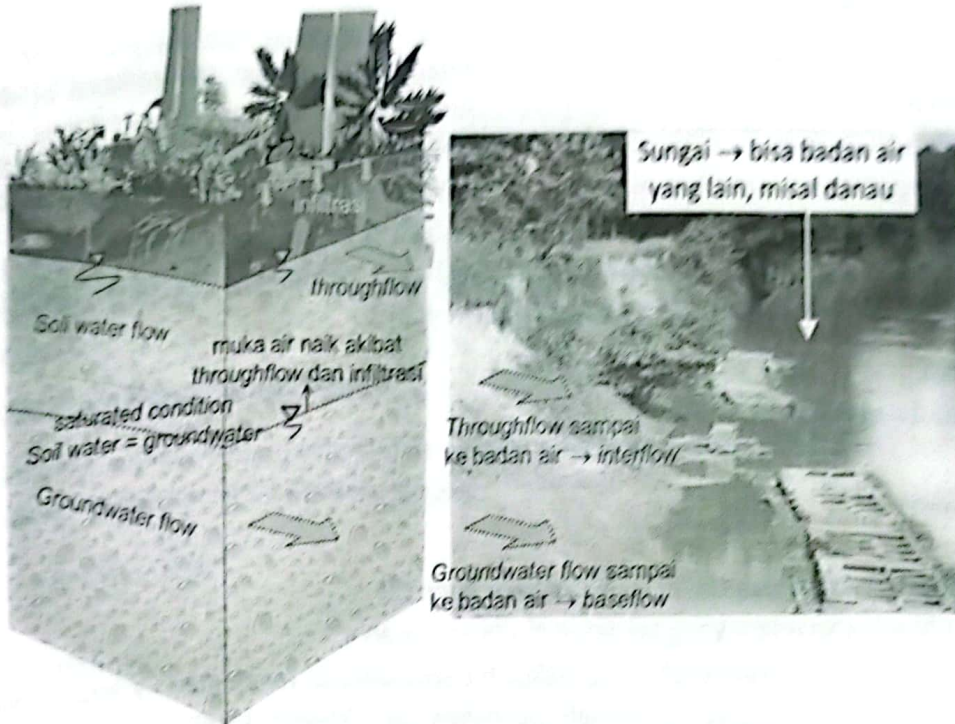
Throughflow adalah aliran horisontal air di soil zone/vadose zone. Aliran ini harus melalui atau muncul di tanah (*land*) sebelum masuk pada suatu badan air (sungai, danau, *pond*). Setelah air permukaan berinfiltrasi ke dalam tanah (*soil*), air akan bergerak ke bawah karena gravitasi. Karena semakin dalam tanah menjadi semakin padat (*compact*) dan kurang *permeable* maka air akan mulai bergerak menyamping. Gerakan lateral di dalam tanah ini dinamakan *through-flow* (<http://en.wikipedia.org/wiki/Throughflow>; Pidwirny, 2000).

Pada kondisi tanah dibawahnya jenuh air maka *throughflow* terjadi dan air selanjutnya akan mengalir di bawah muka tanah sampai mencapai suatu badan air (<http://en.wikipedia.org/wiki/Throughflow>).

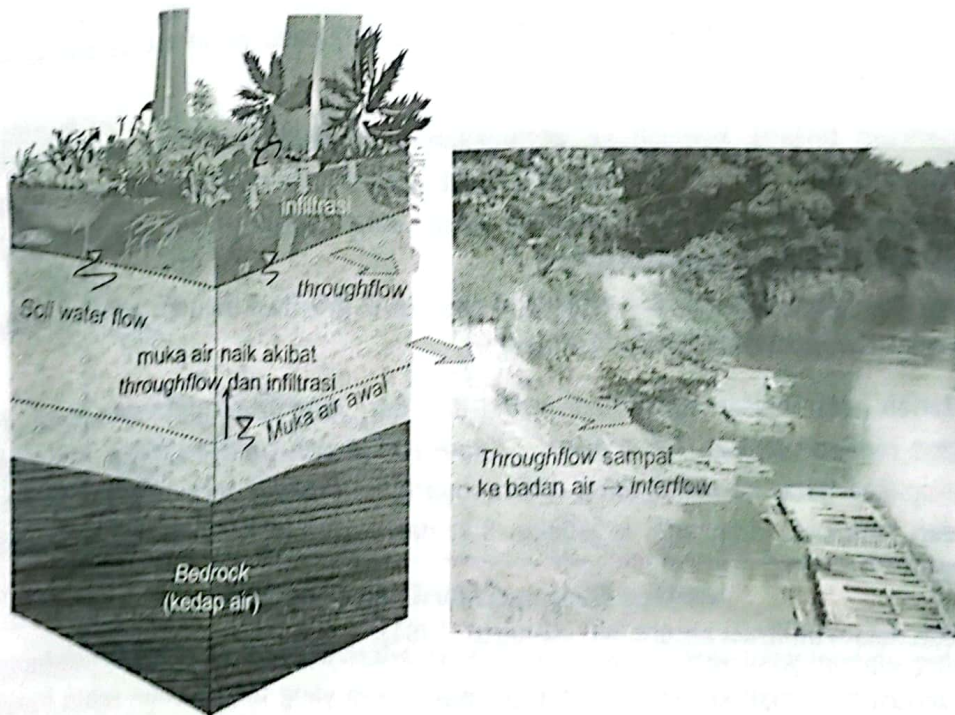
Interflow (aliran antara) adalah gerakan air menyamping di dalam tanah yang terjadi pada bagian atas dari daerah jenuh air yang langsung masuk ke sungai atau badan air pada suatu titik yang lebih rendah daripada titik mulai terjadinya aliran antara. Aliran ini dapat dideskripsikan sebagai aliran agak dalam (*semi deep*) dan terletak di atas region aliran dasar (*baseflow*).

Umumnya aliran antara (*interflow*) lebih cepat dibandingkan aliran dasar (*baseflow*) namun lebih lambat dibandingkan dengan *throughflow* atau v (kecepatan) $throughflow > v interflow > v groundwater flow$ (Solomon & Cordery, 1984; <http://www.answers.com/topic/interflow>; <http://en.wikipedia.org/wiki/Interflow>).

Ilustrasi *throughflow* dan *interflow* ditunjukkan dalam Gambar 2-21.



a. Ilustrasi throughflow dan interflow daerah CAT



b. Ilustrasi throughflow dan interflow daerah Non-CAT

Gambar 2-21. Ilustrasi throughflow dan interflow daerah CAT dan Non-CAT

2.7.4 Infiltrasi dan Perkolasi

Infiltrasi adalah meresapnya air permukaan ke dalam tanah. Kecepatan infiltrasi yang tinggi terjadi pada waktu permulaan hujan karena tanah (soil) belum jenuh air (*saturated*), terutama setelah musim kemarau yang panjang. Penutup lahan (*land coverage*) yang berupa vegetasi akan menghambat aliran permukaan sehingga memungkinkan air untuk berinfiltrasi dan juga sistem akar tanaman membuat air lebih mudah meresap ke dalam tanah. Kecepatan infiltrasi cenderung menurun secara eksponensial (Horton, 1933) pada saat hujan meningkat, yaitu bila hujan melebihi kapasitas infiltrasinya. Kecepatan infiltrasi yang terjadi dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu:

- jenis tanaman
- kondisi permukaan tanah
- temperatur
- intensitas hujan
- kualitas air
- volume tampungan di bawah tanah (*soil storage capacity*)
- kelembaban tanah dan udara yang terdapat di dalam tanah
- sifat-sifat fisik tanah/struktur tanah yang meliputi permeabilitas tanah atau *hydraulic conductivity* dan porositas tanah (yang terpenting adalah porositas Non-kapiler karena infiltrasi cenderung naik sebanding dengan porositasnya).

Pada proses terjadinya infiltrasi menurut Johnson (1972) pada dasarnya terdapat tiga hal yang terjadi pada air, yaitu:

- air yang meresap tertarik kembali ke permukaan oleh gaya kapilaritas pori tanah kemudian mengalami penguapan,
- air yang meresap dihisap oleh akar tanaman dalam tanah untuk proses pertumbuhan kemudian menguap ke atmosfer akibat evapotranspirasi,
- air yang meresap dalam dan cukup, mengalami gaya tarik gravitasi menuju *zone of saturation* yang kemudian mengisi *groundwater reservoirs (aquifer)*.

Zona air tanah pada lapisan *subsurface* terdiri dari *zone of aeration* dan *zone of saturation*. *Zone of aeration* meliputi lapisan *soil moisture*, *intermediate* dan *capillary fringe*, sedangkan *zone of saturation* merupakan batas air tanah yang sebenarnya (lihat Gambar 1-1). *Capillary fringe* untuk jenis tanah lanau dan lempung mencapai ketebalan 8 ft dan untuk jenis kerikil sekitar 1 inchi tebalnya (Johnson, 1972).

Istilah-istilah dalam infiltrasi antara lain (Sriharto, 1981):

- Kapasitas infiltrasi (f) adalah kecepatan infiltrasi maksimum yang terjadi pada suatu kondisi tertentu tergantung dari sifat permukaan tanah.
- Kecepatan infiltrasi nyata (*actual infiltration rate*/ f_i) = kapasitas infiltrasi (f) jika nilai persediaan (*supply rate*) intensitas curah hujan – retensi $\geq f$.
- Perkolasi adalah aliran air gravitasi di dalam tanah.

- Intersepsi adalah bagian dari presipitasi yang membasahi dan melekat pada tanaman sampai dikembalikan ke atmosfer melalui evaporasi.

Pengukuran Infiltrasi dapat menggunakan beberapa metode. Metode yang biasa digunakan untuk menentukan kapasitas infiltrasi adalah:

- *Infiltrometer* dengan permukaan air tetap (*flooding devices*)
- *Infiltrometer* dengan siraman buatan (*artificial sprinkling*)
- Analisis hidrograf

Perhitungan Infiltrasi dengan Metode Horton

Metode ini tidak menganalisis secara fisik bagaimana infiltrasi itu terjadi, bentuk kurva tergantung pada sifat tanahnya (tanah kering → infiltrasi besar).

$$f = \bar{K} + (f_0 - \bar{K})e^{-kt}$$

di mana:

f = kapasitas infiltrasi

k = konstanta

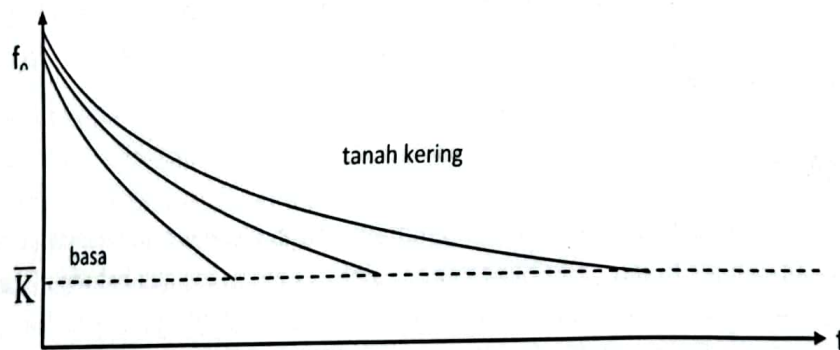
\bar{K} = permeabilitas/*hydraulic conductivity*

f_0 = kapasitas infiltrasi awal

t = waktu

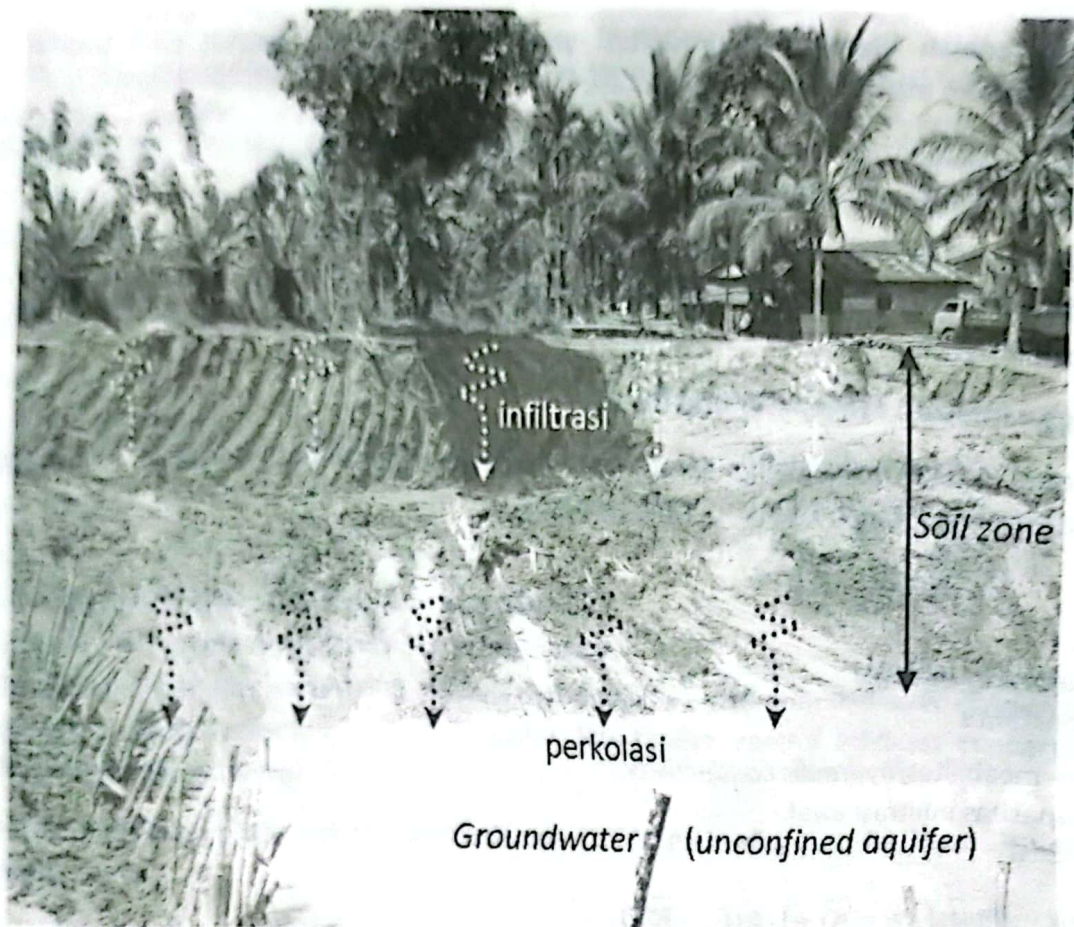
Kumulatif infiltrasi $w = \bar{K}t + 1/k(f_0 - \bar{K})(1 - e^{-kt})$

Secara grafis kumulatif infiltrasi ditunjukkan dalam Gambar 2-22.



Gambar 2-22. Grafik kumulatif infiltrasi

Perkolasi adalah kejadian air dari *soil moisture* di daerah *vadose zone* yang mengisi *groundwater*.



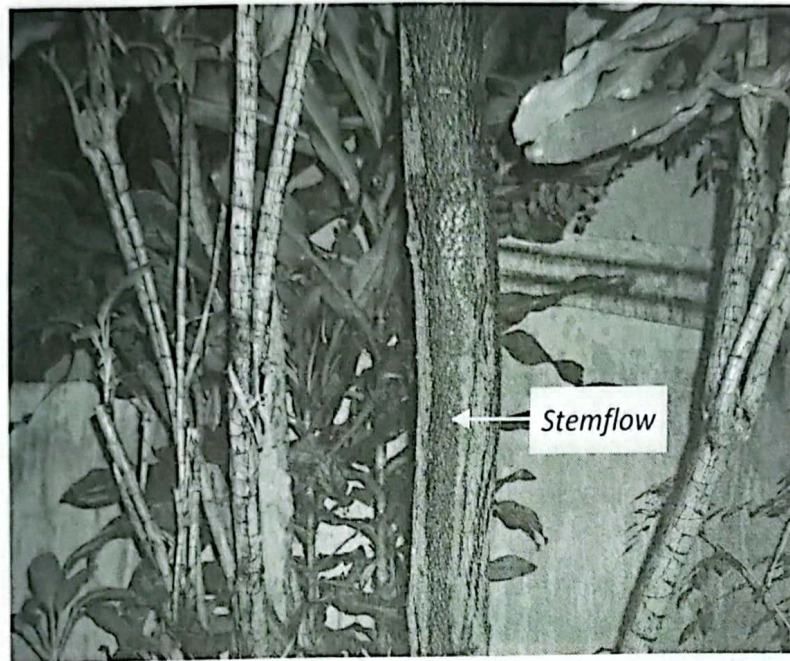
Gambar 2-23. Contoh infiltrasi dan perkolasi

Dari Gambar 2-23 dapat dilihat bahwa infiltrasi terjadi di soil zone (*vadoze zone*) baik untuk daerah CAT maupun Non-CAT. Sedangkan perkolasi hanya terjadi pada daerah CAT karena daerah ini memiliki groundwater zone (*phreatic zone*).

2.7.5 Stemflow (Aliran Batang/Gagang)

Stemflow adalah aliran air hujan yang melalui batang, dahan, cabang atau gagang tanaman. Dengan kata lain *stemflow* adalah air hujan yang diintersepsi oleh tanaman melalui batang, dahan, cabang atau gagang tanaman sebelum air hujan menyentuh muka tanah sebagai yang menjadi *run-off* (<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8k.html>).

Ilustrasi *stemflow* ditunjukkan dalam Gambar 2-24.



Gambar 2-24. Contoh stemflow (aliran batang/gagang tanaman)

Semakin lebat pohon atau vegetasi maka semakin besar *stemflow* dan *interception* yang terjadi. Semakin banyak daun, cabang dan gagang suatu pohon maka semakin besar *interception* dan *stemflow*. Jenis pohon yang dinamakan *deciduous trees*, yaitu jenis pohon yang pada waktu dewasa daunnya akan berguguran menghasilkan *stemflow* yang lebih besar dibandingkan pohon dengan pohon yang tinggi menjulang seperti pohon pinus (dikenal dengan jenis pohon *coniferous trees*). Ilustrasi jenis pohon ditunjukkan dalam Gambar 2-25.

Pohon Beringin (Gambar 2-25a) menghasilkan *interception* dan *stemflow* yang lebih besar dibandingkan pohon yang menjulang tinggi (Gambar 2-25b) dan Pohon Pinus (Gambar 2-25c) → *Interception* dan *Stemflow* Gambar 2-25a > Gambar 2-25b dan Gambar 2-25c. Untuk *interception* dan *stemflow* Gambar 2-25b dan Gambar 2-25c harus dikaji detail, karena pohon pada Gambar 2-25b tinggi → sehingga waktu air merambat lebih lama dibanding pohon pada Gambar 2-25c berarti *stemflow* besar, namun pohon pada Gambar 2-25c lebih lebar (sehingga *interception* lebih besar) dan bisa menampung lebih banyak walau waktu rambat air lebih pendek.



a. Pohon Beringin



b. Pohon menjulang tinggi

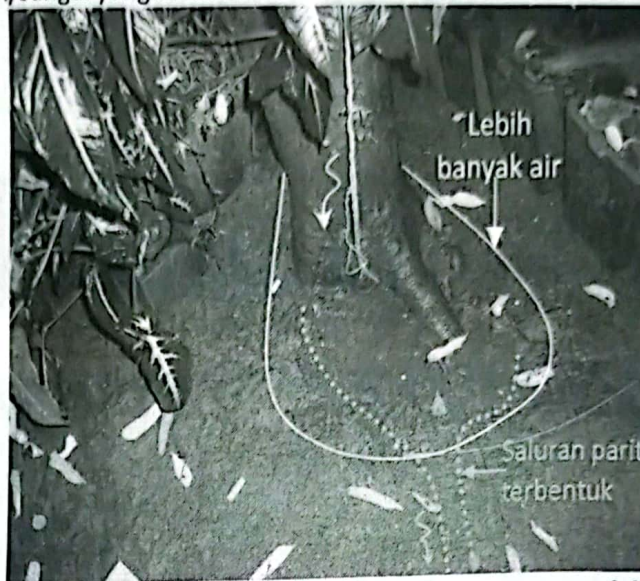


c. Pohon Pinus

Gambar 2-25. Ilustrasi jenis pohon

Bilamana pohon cukup lebar, lebat, banyak dahan dan cabangnya maka proses *stemflow* akan berkontribusi air di tanah sekeliling batang pohon yang lebih besar dibandingkan daerah sekitarnya seperti ditunjukkan dalam Gambar 2-26. Walaupun secara volume tidak signifikan namun genangan air di sekitar batang pohon akan membentuk saluran parit (*gully*) yang bila suatu wilayah mempunyai

perbedaan topografi yang besar akan menimbulkan erosi dan sedimen yang terbawa di saluran parit tersebut menuju saluran/sungai yang lebih besar.



Gambar 2-26. Ilustrasi tanah sekitar batang tanaman yang lebih berair karena ada stemflow

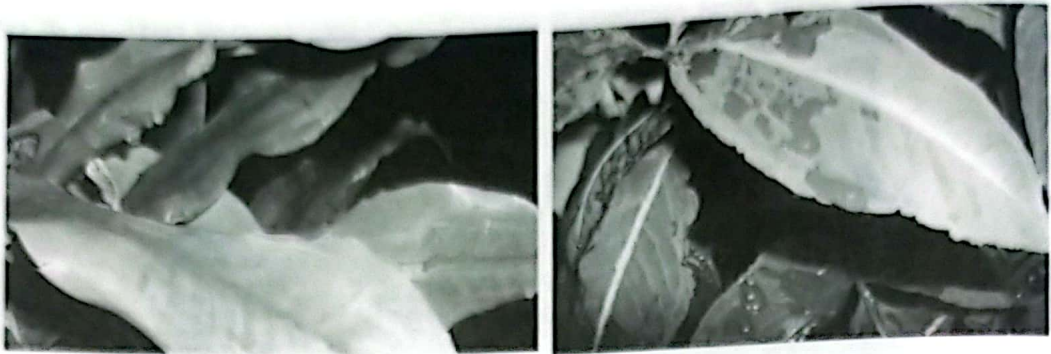
2.7.6 Interception dan Throughfall

Interception (intersepsi) air merupakan proses tertahannya air hujan oleh tanaman, bangunan maupun permukaan lain yang kemudian didistribusikan ke tanah. Intersepsi oleh tanaman bisa terjadi pada daun, dahan dan lapisan sampah (*litter floor*) atau lapisan tanaman (*forest/vegetation floor*). Intersepsi akan menghambat aliran permukaan (*run-off*) sehingga bisa mengurangi banjir di hilir daerah aliran sungai (http://en.wikipedia.org/wiki/Interception_%28water%29).

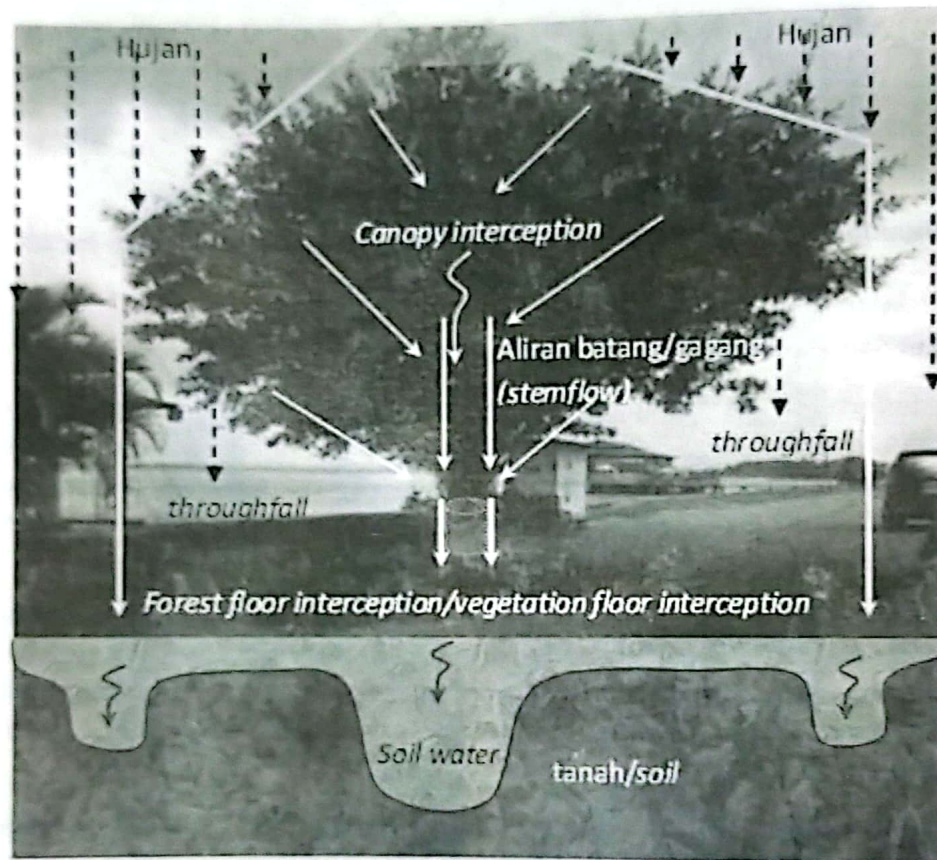
Intersepsi secara teknis yang terkait dengan siklus hidrologi dapat didefinisikan sebagai penangkapan hujan oleh kanopi tanaman dan mengembalikan air hujan ke udara dalam bentuk evaporasi atau sublimasi. Jumlah air yang terintersepsi tergantung dari jenis daun, bentuk dan model kanopi, kecepatan angin, radiasi matahari, temperatur dan kelembaban udara (<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8k.html>).

Throughfall adalah proses yang menjelaskan bagaimana pohon yang rimbun menahan air hujan tidak langsung jatuh ke muka tanah. Tetesan air *throughfall* mempunyai kekuatan erosi yang lebih besar dibandingkan dengan tetesan hujan namun ini tergantung dari tinggi pohon, kelembatan daun dan ranting. Bilamana kanopi pohon mempunyai ketinggian ± 8 meter sehingga kecepatan jatuh air dari tanaman > dari kecepatan terminal yang diijinkan maka kekuatan erosi meningkat (<http://en.wikipedia.org/wiki/Throughfall>). Semakin lebat pohon dengan daun rimbun yang lebar semakin besar laju *throughfall*.

Ilustrasi intersepsi dan *throughfall* ditunjukkan dalam Gambar 2-27.



a. Intersepsi oleh daun



b. proses intersepsi pada tanaman

Gambar 2-27. Intersepsi hujan oleh tanaman

2.7.7 Aliran Kapiler

Dalam hidrologi, kapiler menjelaskan penarikan molekul air ke partikel tanah. Air dalam tanah mengalir dari aliran air tanah karena mempunyai daya kapiler untuk menaikkan air ke *vadose zone*

menjadi butiran air tanah (*soil moisture*), demikian juga butiran air tanah ini naik secara kapiler ke permukaan tanah (http://en.wikipedia.org/wiki/Capillary_action; Chow dkk., 1988).

Di daerah CAT seperti terlihat dalam Gambar 2-13a dan f dapat dilihat Angka 9 menunjukkan kenaikan kapiler dari *vadoze zone* ke muka tanah dan Angka 15 menunjukkan kenaikan kapiler dari *groundwater zone (phreatic zone)* ke *vadoze zone*. Sedangkan di daerah Non-CAT seperti terlihat dalam Gambar 2-14a dan f hanya ada Angka 9 yaitu menunjukkan kenaikan kapiler dari *vadoze zone* ke muka tanah karena tidak ada *groundwater*.

Jangkauan kenaikan kapiler dan kenaikan kapiler nyata untuk berbagai jenis tanah (*soil*) ditunjukkan dalam Tabel 2-6.

Tabel 2-6. Kenaikan kapiler untuk beberapa jenis tanah (Todd & Mays, 2005)

No.	Jenis Tanah	Deskripsi	Jangkauan Diameter (mm)		Jangkauan kenaikan kapiler (cm)		Kenaikan kapiler nyata (cm)
1	Kerikil/ <i>Gravel</i>	Sangat Halus	4	2	3,75	1,5	2,5
2	Pasir/ <i>Sand</i>	Sangat Kasar	2	1	7,5	3,75	6,5
3	Pasir	Kasar	1	0,5	15	7,5	13,5
4	Pasir	Medium	0,5	0,25	37,5	15	24,6
5	Pasir	Halus	0,25	0,125	75	37,5	42,8
6	Pasir	Sangat Halus	0,125	0,062	150	75	105,5
7	Lanau/ <i>Silt</i>	Kasar	0,062	0,031	375	150	200

2.7.8 Aliran Permukaan (*Run-Off*)

Air permukaan adalah semua air yang terdapat pada permukaan tanah (UU No. 7 Tahun 2004). Air permukaan yang mengalir disebut aliran permukaan atau *run-off*. Contoh air permukaan dan aliran permukaan (*run-off*) ditunjukkan dalam Gambar 2-28.



a. Air permukaan

b. Aliran permukaan (*run-off*)

Gambar 2-28. Contoh air permukaan dan aliran permukaan

Bagian yang penting dari *surface run off* yang erat kaitannya dengan rancang bangunan pengendali *surface run off* adalah besarnya debit puncak (*peak flow*) dan waktu tercapainya debit puncak, volume, dan penyebaran *surface run off*.

Run-off berlangsung ketika jumlah curah hujan melampaui laju infiltrasi air ke dalam tanah. Setelah laju infiltrasi terpenuhi air mulai mengisi cekungan-cekungan pada permukaan tanah, setelah cekungan-cekungan di atas tanah terisi semua maka air dapat mengalir dengan bebas di atas permukaan tanah.

Air permukaan yang mengalir bebas dalam jumlah banyak dapat mengakibatkan banjir, sehingga timbul beberapa pertanyaan yang terkait dengan pengendalian aliran permukaan (Wilson, 1974):

1. Berapa sering terjadinya banjir?
2. Sampai berapa besar dan seberapa ketinggiannya?
3. Berapa seringnya terjadi kekeringan?
4. Berapa lama kekeringan akan terus terjadi?

Pertanyaan-pertanyaan tersebut di atas dapat dijawab dengan penentuan frekuensi dan durasi debit untuk pengamatan dalam waktu yang lama. Estimasi juga terdiri dari bermacam-macam kemungkinan.

Kemudian muncul grup pertanyaan kedua yang berhubungan dengan kurva frekuensi air limpasan dan lama waktu, seperti berikut (Wilson, 1974):

1. Bagaimana cara volume debit dapat dikurangi?
2. Bagaimana cara membandingkan biaya untuk mengendalikan banjir dengan kerugian yang terjadi jika tidak ada upaya apapun?
3. Berapa besar nilai banjir yang ditampung untuk musim kemarau nanti?

Air hujan yang jatuh ke bumi akan sampai ke saluran/sungai melalui jalurnya masing-masing, yaitu (Ward and Trimble, 2004):

- limpasan permukaan (*surface run off*) → cepat
- aliran antara (*interflow/subsurface run off*) → lambat
- aliran air tanah (*groundwater flow*) → lebih lambat

Untuk menyederhanakan permasalahan, maka diasumsikan bahwa aliran total hanya dibagi menjadi 2 bagian yaitu (Ward and Trimble, 2004):

- limpasan langsung (*direct run off*), yang terdiri dari limpasan permukaan dan *interflow*.
- aliran dasar (*base flow*), yang berasal air tanah (*groundwater*)

Sifat aliran sungai yang sangat penting dalam analisis hidrologi adalah debit sungai dan hidrograf (Ward and Trimble, 2004):

1. Hidrograf adalah hubungan antara unsur-unsur aliran (tinggi, debit) dengan waktu (*stage hidrograf, discharge hidrograf*).
2. Aliran dasar (*base flow*) adalah debit minimum yang masih ada karena adanya aliran keluar (*out flow*) dari akuifer.
3. Kurva massa (*mass curve*) adalah penyajian secara grafis aliran kumulatif sebagai fungsi waktu
4. Waktu konsentrasi (*time of concentration*) adalah waktu yang diperlukan oleh air untuk mengalir dari titik yang terjauh suatu DAS sampai ke stasiun pengukuran.

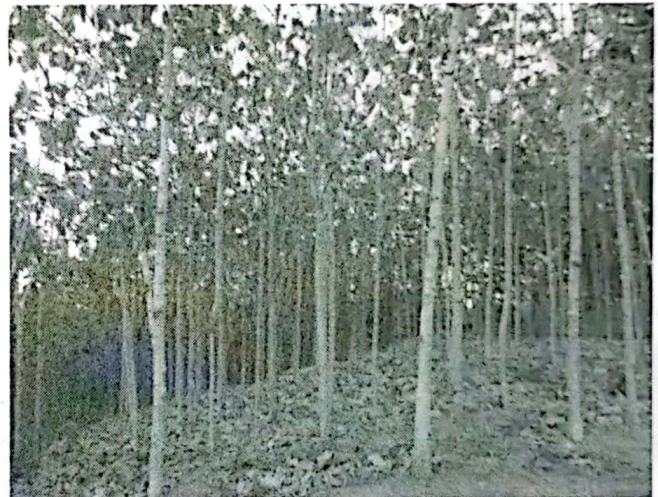
5. Waktu dasar (*time base* - TB) adalah waktu yang diukur dari saat hidrograf mulai naik sampai waktu di mana komponen limpasan langsung menjadi nol.
6. Waktu naik (*time peak* - TP) adalah waktu yang diukur dari saat hidrograf mulai naik sampai terjadinya debit puncak.
7. Curah hujan efektif (mangkus) adalah curah hujan yang menyebabkan limpasan hujan bruto dikurangi jumlah kehilangan air akibat intersepsi, *stemflow*, *litter flow*, infiltrasi, penguapan dan tampungan cekungan. Besar kehilangan air ini dipengaruhi oleh beberapa macam faktor seperti jenis dan kerapatan tanaman (*vegetal cover*), jenis tanah, keadaan permukaan tanah dan sebagainya.

2.7.9 Litter Flow

Sampah dari tumbuhan/pohon baik daun maupun dahan akan berkumpul di atas tanah sekitar pohon tersebut. Sampah ini akan menghambat *run-off*. Aliran di lahan sampah ini disebut aliran sampah (*litter flow*). Lahan dengan pohon/tanaman yang lebat akan menghasilkan sampah yang banyak sehingga *litter flow* akan lambat sehingga lahan ini bisa sebagai penghambat *run-off* dan akan lebih baik dibandingkan tanaman yang jarang. Lahan sampah (*litter zone flow*) ini akan juga berfungsi sebagai lahan untuk air berinfiltrasi ke dalam tanah. Contoh lahan sampah ditunjukkan dalam Gambar 2-29.



a. Contoh 1: *litter zone*



b. Contoh 2: *litter zone*

Gambar 2-29. Contoh *litter zone*

2.8 Mata air

2.8.1 Pengertian Mata Air

Dalam ilmu hidrogeologi mata air merupakan titik atau kadang-kadang suatu areal kecil tempat air tanah muncul atau dilepaskan dari suatu akuifer.

Dalam Ilmu Hidrogeologi mata air merupakan bagian dari air tanah. Mata air adalah suatu titik atau kadang-kadang suatu areal kecil tempat air tanah muncul dari suatu akuifer (atau pelepasan air dari akuifer) ke permukaan tanah (Bear, 1979).

Beberapa permukaan buangan alami yang cukup luas yang mengalirkan ke anak sungai kecil juga bisa disebut mata air. Mata air juga merupakan buangan dari samudra, danau, dan sungai (Davis dan De Wiest, 1966).

Contoh mata air ditunjukkan dalam Gambar 2-30 dan Gambar 2-31.



Gambar 2-30. Contoh pancaran dari spring



a. Contoh aliran *spring* yang dikumpulkan dalam pipa



b. Contoh air tanah dari spring yang keluar

Gambar 2-31. Contoh mata air (spring)

2.8.2 Klasifikasi Mata Air

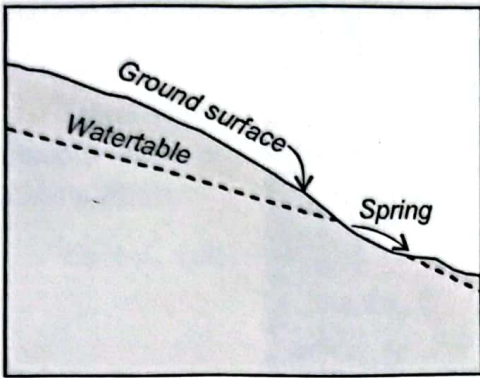
Mata air dapat diklasifikasikan dengan banyak jalan. Klasifikasi bisa berdasarkan besaran debit, jenis akuifer, karakteristik kimia dan temperatur air tanah, arah migrasi air tanah, topografi dan kondisi geologi (Davis dan De Wiest, 1966).

Prinsip dasar yang menentukan debit mata air adalah permeabilitas akuifer, daerah tangkapan ke akuifer, dan jumlah tangkapan. Tingkat permeabilitas yang tinggi memberikan volume air yang besar menjadi terpusat pada daerah yang kecil. Pada mata air, beberapa akuifer mempunyai debit yang agak besar, tetapi permeabilitasnya terlalu rendah sehingga tekanan air ke permukaan yang luas lebih kuat. Sebagai contoh, tepi sungai dengan sistem aliran segaris dengan rembesan kecil dan mata air dengan daerah buangan dari agregat adalah sekitar $100 \text{ ft}^3/\text{sec}$ ($2,83 \text{ m}^3/\text{detik}$). Mata air yang lebih luas tidak dapat lebih dari 1 galon/menit atau $0,23 \text{ m}^3/\text{detik}$ (Davis dan De Wiest, 1966).

Menurut Davis dan De Wiest (1966), area saluran air mata air berkisar antara kurang dari 1000 feet^2 (93 m^2) dengan luasan infiltrasi lebih dari 1000 mil^2 ($2,59 \text{ juta m}^2$) pada daerah kering. Jumlah air yang masuk tanah sebagai isian sama dengan 10 feet/tahun ($3,048 \text{ m/tahun}$ atau 3048 mm/tahun) pada daerah dengan curah hujan tinggi dan lapisan batuan sangat permeabel. Batuan tak tembus air atau daerah kering biasanya mempunyai infiltrasi $\pm 0,1 \text{ inchi/tahun}$ atau $2,54 \text{ mm/tahun}$.

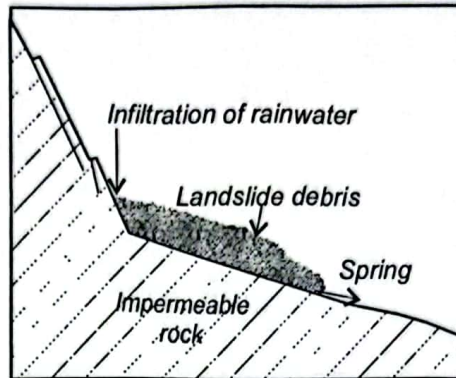
Fluktuasi harian debit mata air kecil biasanya disebabkan karena penggunaan air untuk vegetasi. Mata air akan mengalir dengan kuat antara tengah malam dan pagi hari, tetapi bisa kering selama sehabian. Debit mata air ini akan kembali tetap selama musim dingin ketika transpirasi akan berhenti.

Beberapa tipe dari air tanah ditunjukkan dalam Gambar 2-32.



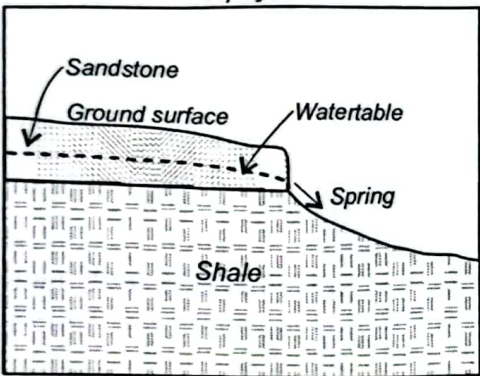
(a)

Depresi permukaan yang bertemu muka air tanah *perched aquifer*



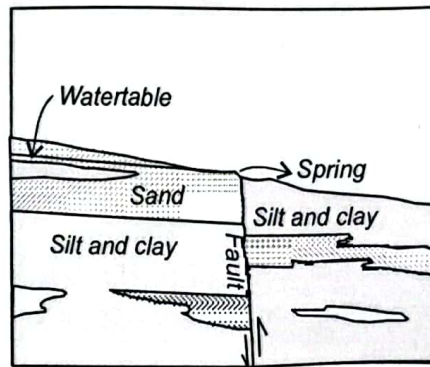
(b)

Infiltrasi air hujan ke dalam lapisan kasar & bidang luncur yang permeabel *perched aquifer*



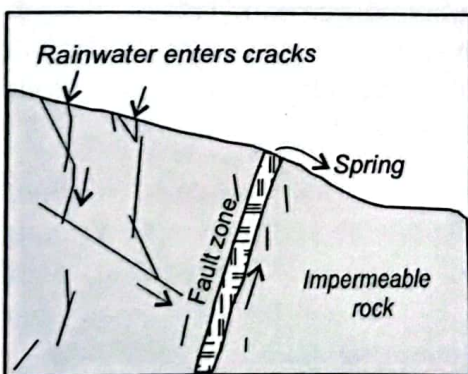
(c)

Batu pasir permeabel menutup lapisan impermeabel



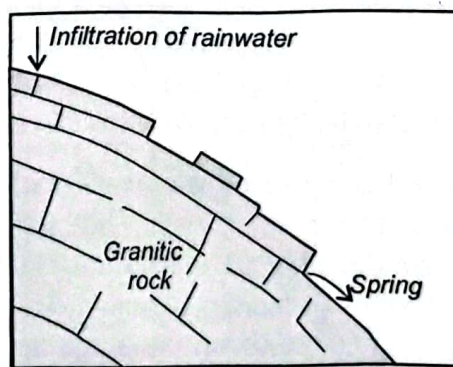
(d)

Patahan lapisan impermeabel berlawanan dengan lapisan permeabel pada alluvial



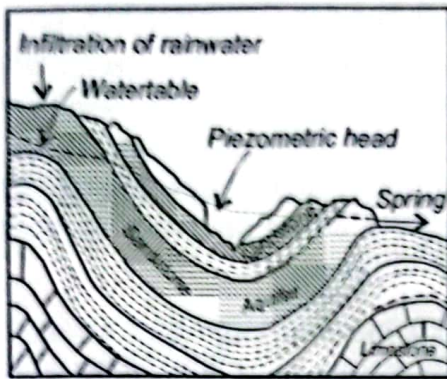
(e)

Patahan pada zona patahan terbuka dalam batuan rapuh



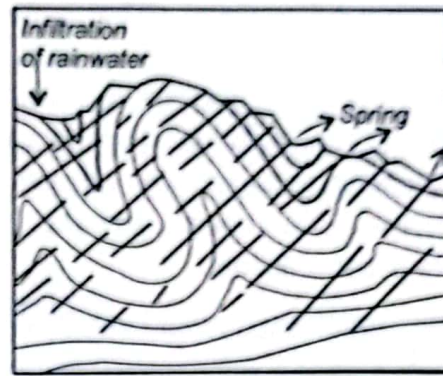
(f)

Lapisan struktur pada batuan



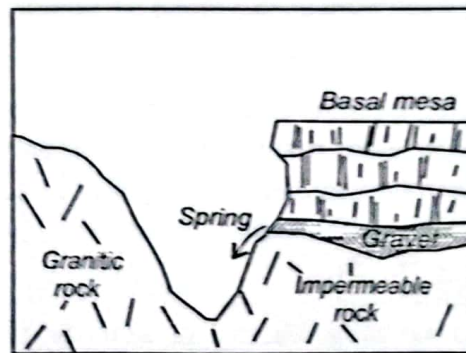
(g)

Singkapan akuifer artesis



(h)

Lipatan dominan dalam satu arah



(i)

Singkapan kerikil permeabel dan penutup basal batuan granit impermeabel

Gambar 2-32. Gambaran tentang mata air yang terjadi dari berbagai kondisi (Davis dan De Wiest, 1966)

Jika material geologi homogen secara sempurna, debit muka tanah secara langsung akan menjadi rembesan yang menyebar relatif ke area yang lebih luas. Topografi ini memungkinkan permukaan tanah akan memotong muka air tanah dan aliran permukaan. Tipe rembesan ditemukan pada area bukit pasir, simpanan, daerah batu pasir, dan jenis batuan homogen dan sedimen lepas. Sketsa mata air ini dapat dilihat pada Gambar 2-32a.

Permeabilitas secara vertikal atau horisontal biasanya disebabkan oleh lokasi mata air (Davis dan De Wiest, 1966). Mata air musiman umumnya berhubungan dengan perubahan permeabilitas pada lapisan cuaca. *Slidrock deposits, soil horizons*, tanah longsor membantu menemukan tempat aliran mata air, dapat di lihat pada Gambar 2-32b. Hubungan antara variasi vertikal dari permeabilitas dengan lapisan batuan sedimen disebabkan oleh luas, ketetapan, mata air, dapat dilihat pada Gambar 2-32c.

Perubahan struktur batuan disebabkan oleh gerakan bumi yang menghasilkan perubahan pada permeabilitas dan tempat mata air. Jika patahan memotong batuan belum terkonsolidasi, daerah patahan biasanya berkurang permeabilitasnya dibanding lapisan batuan sekelilingnya. Mata air yang

timbul dari daerah patahan dapat dilihat pada Gambar 2-32d dan Gambar 2-32e. Pengelupasan kulit pada lipatan batuan granit dapat dilihat pada Gambar 2-32f. Gerakan bumi juga disebabkan karena kemiringan dan lipatan yang membawa lapisan permeabel dan tidak permeabel ke permukaan. Dua jenis mata air yang biasanya dihubungkan dengan lipatan, dapat dilihat pada Gambar 2-32g dan Gambar 2-32h. Kemurnian mata air dari batuan vulkanik atau batu kerikil yang dihubungkan dengan aliran dapat dilihat pada Gambar 2-32i. Tanggul, ambang, lapisan *tuff* dan *buried soil* biasanya mengontrol lokasi mata air pada simpanan vulkanik.

Dalam Fetter (1994) disebutkan beberapa jenis *spring*, meliputi: *depression spring*, *contact spring*, *fault spring*, *sinkhole spring*, *joint spring*, dan *karst spring*. Kesemuanya ini merupakan kemunculan air tanah ke atas permukaan dari berbagai akuifer.

Depression spring terbentuk ketika muka air tanah mencapai permukaan (Bryan, 1919). Perubahan topografi menimbulkan gelombang pada konfigurasi muka air tanah. Sistem aliran lokal yang terbentuk pada mata air ini berada di zona buangan lokal.

Contact springs merupakan mata air dimana batuan permeabel menutup batuan-batuan yang lebih rendah permeabilitasnya (Bryan, 1919). Garis mata air sering ditandai dengan singgungan litologi, antara muka air tanah dan muka air pada *perched aquifers*. Hal ini tidak berlaku untuk lapisan di bawah lapisan impermeabel, hanya perbedaan konduktivitas hidrolis yang cukup besar untuk menghalangi aliran air yang bergerak menuju ke lapisan atas.

Fault springs merupakan mata air yang dibatasi gerakan air tanah akibat patahan batuan yang impermeabel dengan gaya air pada akuifer ke buangan.

Sinkhole springs dapat ditemukan dimana kawah yang terhubung ke terowongan yang timbul ke permukaan. Di beberapa area, *run-off* dapat membawa sebagian atau keseluruhan sebagai aliran bawah tanah. Masing-masing aliran menyebar ke dalam pori-pori dan retakan pada batuan atau aliran air dalam kawah.

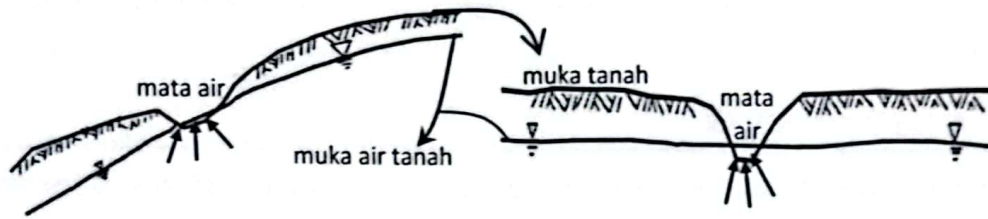
Joints springs bisa terjadi karena adanya lipatan atau patahan pada *zone* permeabel di batuan permeabel rendah. Air bergerak melewati batuan, dan mata air dapat terbentuk dimana patahan-patahan bertemu pada permukaan tanah dengan elevasi rendah.

Karst springs merupakan mata air yang timbul dan jatuh menjadi variasi *run-off* pada *sinkhole* (Brook, 1977). Mata air dalam batuan kapur dapat dihubungkan dengan depresi topografi disebabkan oleh *collapsed cavern (sinkhole)* pada elevasi yang lebih tinggi.

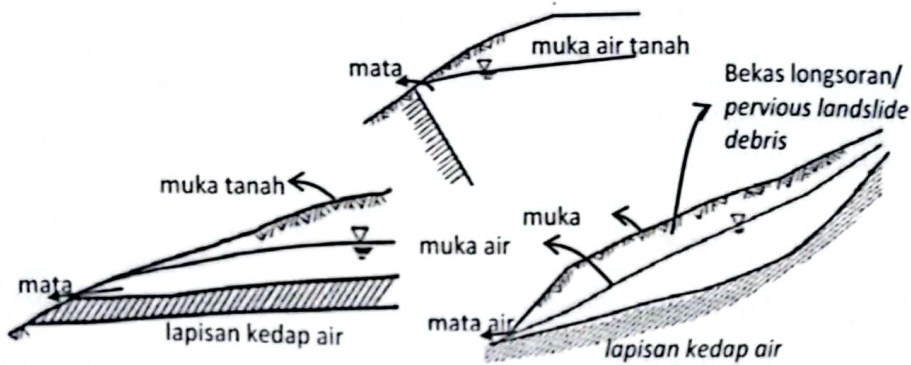
Mata air juga dapat diklasifikasikan berdasarkan mode/cara kejadian (fenomena)-nya, bisa juga dari media geologi di mana air lewat (Kashef, 1986).

Mata air menurut Bear (1979) ada empat jenis yaitu: mata air depresi (*depression springs*), *perched springs*, mata air dalam rekahan (*springs in cracked, impermeable rock*), dan mata air dari *confined aquifer*. Hal tersebut ditunjukkan dalam Gambar 2-33.

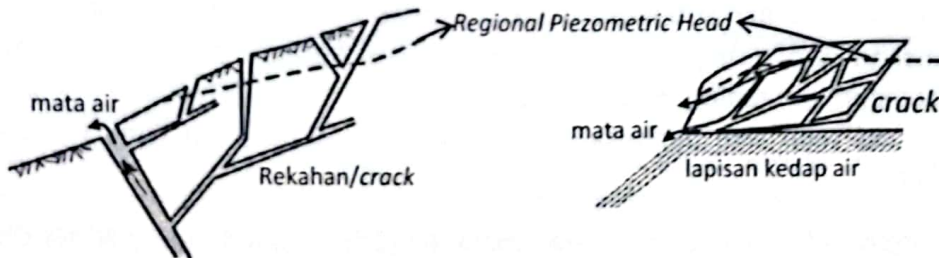
Mata air depresi (*depression springs*) merupakan mata air yang terjadi ketika tinggi air bertemu dengan muka air tanah, mata air ini dapat dilihat pada Gambar 2-33a. *Perched springs* merupakan mata air yang terjadi ketika lapisan kedap air di bawah *phreatic aquifer* bertemu dengan muka air tanah, mata air ini dapat dilihat pada Gambar 2-33b. Mata air dalam rekahan (*springs in cracked, impermeable rock*) dapat dilihat pada Gambar 2-33c. Mata air dari *confined aquifer* dapat dilihat pada Gambar 2-33d.



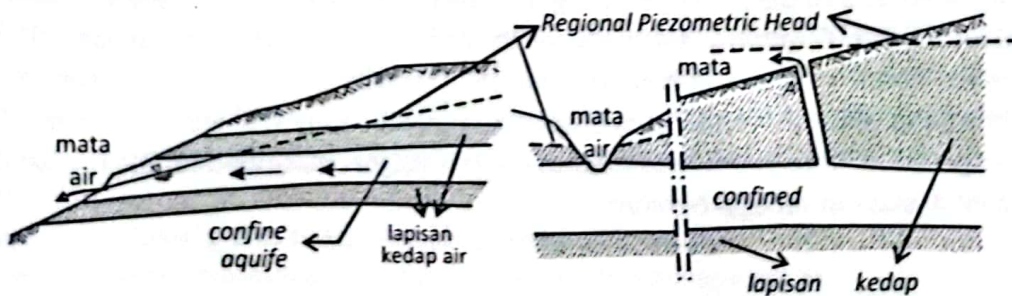
a. mata air depresi (*depression springs*)



b. *perched springs*



c. mata air dalam rekahan (*springs in cracked, impermeable rock*)



d. mata air dari *confined aquifer*

Gambar 2-33. Jenis-Jenis mata air (Bear, 1979)

2.8.3 Koreksi UU No. 7 Tahun 2004 Untuk Kata Mata Air

Dalam UU No. 7 Tahun 2004 ada hal yang perlu dikoreksi terkait dengan kata *spring*. Deskripsi alasan koreksi adalah sebagai berikut:

- UU No. 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air menyatakan bahwa mata air termasuk sumber air permukaan. Pernyataan tersebut tertulis dalam UU No. 7 Tahun 2004 Pasal 35 dan penjelasannya seperti berikut:

Isi Pasal 35 UU No. 7 Tahun 2004

Pengembangan sumber daya air sebagaimana dimaksud dalam Pasal 34 Ayat (1) meliputi:

a. air permukaan pada sungai, danau, rawa, dan sumber air permukaan lainnya;

→ Penjelasan Pasal 35 Huruf a.

Yang dimaksud dengan sumber air permukaan lainnya, antara lain, situ, embung, ranu, waduk, telaga, dan mata air (*spring water*).

- b. air tanah pada cekungan air tanah;
c. air hujan
d. air laut yang berada di darat.

Kesimpulan uraian tersebut adalah bahwa air tanah masuk kategori air permukaan.

- Uraian Sub-Bab 2.8.1 dan Sub-Bab 2.8.2 menyatakan bahwa kata *spring* diterjemahkan dalam Bahasa Indonesia adalah mata air. Dalam Penjelasan Pasal 35 huruf a mata air adalah *spring water*. Mengacu pada Uraian Sub-Bab 2.8.1 dan Sub-Bab 2.8.2 maka *spring water* berarti air mata air.
- Mata air terjemahan dari *spring* menurut uraian Uraian Sub-Bab 2.8.1 dan Sub-Bab 2.8.2 adalah masuk dalam kategori air tanah, padahal dalam UU No. 7 Tahun 2004 mata air merupakan air permukaan. Dari sisi teori dan perundangan untuk mata air ada hal yang tidak konsisten untuk substansi mata air.
- Dalam Kamus Inggris Indonesia *spring* adalah mata air (Echols dan Shadily, 2002) dan dalam Kamus Lengkap Indonesia Inggris mata air adalah *spring* (Stevens and Tellings, 2004).
- Dikaitkan dengan Peraturan perundangan yang lain maka ada pernyataan yang bertentangan dengan mata air. Dalam UU No. 7 Tahun 2004 mata air termasuk sumber air permukaan. PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah merupakan turunan UU No. 7 Tahun 2004 dan PP 26 Tahun 2008 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional merupakan turunan dari UU No. 26 Tahun 2008 Tentang Penataan Ruang. Kedua PP tersebut jelas memasukkan kategori mata air sebagai bagian dari air tanah. Uraian kedua PP dijelaskan sebagai berikut:

Isi Pasal 51 PP 26 Tahun 2008

Kawasan lindung nasional terdiri atas:

→ Penjelasan Pasal 51

Kawasan lindung dapat diterapkan untuk mengatasi dan mengantisipasi ancaman kerusakan lingkungan saat ini dan pada masa yang akan datang akibat kurangnya kemampuan perlindungan wilayah yang ada.

Penetapan suatu kawasan berfungsi lindung wajib memperhatikan penguasaan, pemilikan, penggunaan, dan pemanfaatan tanah (P4T) yang ada sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan di bidang pertanahan.

- a. kawasan yang memberikan perlindungan terhadap kawasan bawahannya;
- b. kawasan perlindungan setempat;
- c. kawasan suaka alam, pelestarian alam, dan cagar budaya;
- d. kawasan rawan bencana alam;
- e. kawasan lindung geologi
- f. kawasan lindung lainnya.

Isi Ayat (5) Pasal 52 PP 26 Tahun 2008

(5) Kawasan lindung geologi terdiri atas:

- a. kawasan cagar alam geologi;
- b. kawasan rawan bencana alam geologi
- c. kawasan yang memberikan perlindungan terhadap air tanah.

Isi Ayat (3) Pasal 53 PP 26 Tahun 2008

(3) Kawasan yang memberikan perlindungan terhadap air tanah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 52 ayat (5) huruf c terdiri atas:

- a. kawasan imbuhan air tanah; dan

Yang dimaksud dengan "kawasan imbuhan air tanah" adalah wilayah resapan air yang mampu menambah air tanah secara alamiah pada cekungan air tanah.

- b. sempadan mata air.

Isi Pasal 39 PP 43 Tahun 2007

- (1) Perlindungan dan pelestarian air tanah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35 ayat (3) huruf a ditujukan untuk melindungi, melestarikan kondisi dan lingkungan serta fungsi air tanah.
- (2) Untuk melindungi dan melestarikan air tanah sebagaimana dimaksud pada ayat (1) Menteri, Gubernur, atau Bupati/Walikota sesuai kewenangannya menetapkan kawasan lindung air tanah.
- (3) Pelaksanaan perlindungan dan pelestarian air tanah sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dilakukan dengan:
 - a. menjaga daya dukung dan fungsi daerah imbuhan air tanah;

Termasuk daerah imbuhan air tanah adalah daerah imbuhan mata air.
 - b. menjaga daya dukung akuifer; dan/atau

Daya dukung akuifer terhadap suatu kegiatan antara lain untuk pertambangan dan energi serta konstruksi sipil bawah permukaan tanah ditunjukkan dari hasil analisis mengenai dampak lingkungan, baik upaya pengelolaan lingkungan (UKL) dan upaya pemantauan lingkungan (UPL) maupun analisis mengenai dampak lingkungan (Amdal).

c. memulihkan kondisi dan lingkungan air tanah pada zona kritis dan zona rusak.

Isi Ayat (1) Pasal 40 PP 43 Tahun 2008

(1) Untuk menjaga daya dukung dan fungsi daerah imbuhan air tanah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 39 ayat (3) huruf a dilakukan dengan cara:

- a. mempertahankan kemampuan imbuhan air tanah;
Imbuhan air tanah dapat dipertahankan, baik secara alami maupun dengan buatan manusia.
- b. melarang melakukan kegiatan pengeboran, penggalian atau kegiatan lain dalam radius 200 (dua ratus) meter dari lokasi pemunculan mata air; dan
Pelarangan pengeboran, penggalian atau kegiatan lain pada areal radius 200 (dua ratus) meter dari lokasi pemunculan mata air dimaksudkan untuk mengamankan aliran air tanah pada sistem akuifer yang mengisi atau dapat mempengaruhi pemunculan mata air. Yang termasuk "kegiatan lain", antara lain, penambangan batuan.

Oleh karena itu ada dua usulan koreksi untuk UU No. 7 Tahun 2004, yaitu:

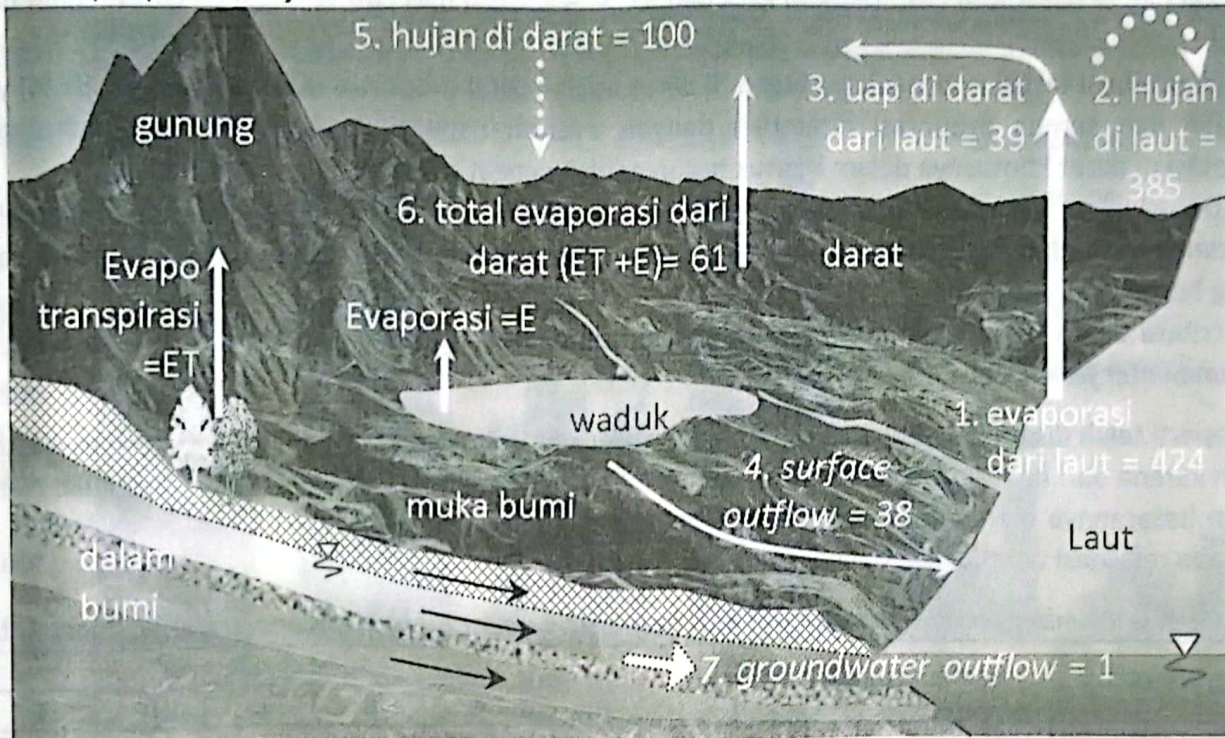
- Koreksi 1 yang perlu dilakukan adalah menghilangkan kata *water* pada Penjelasan Huruf a Pasal 35:
Tertulis:
Yang dimaksud dengan sumber air permukaan lainnya, antara lain, situ, embung, ranu, waduk, telaga, dan mata air (*spring water*).
Usulan koreksi:
Yang dimaksud dengan sumber air permukaan lainnya, antara lain, situ, embung, ranu, waduk, telaga, dan mata air (*spring*).
- Koreksi 2 adalah mengubah kategori mata air sebagai air permukaan menjadi kategori mata air sebagai air tanah agar kriteria dan pengertian mata air dalam UU No. 7 Tahun 2004 bisa sesuai dengan teori keilmuan yang ada dan tidak bertentangan dengan substansi mata air dalam PP 26 Tahun 2008 Tentang RTRWN dan PP 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah.

Alasan (*reason*) dan dasar pengkoreksian UU No. 7 Tahun 2004 adalah karena UU No. 7 Tahun 2004 adalah produk hukum normatif paling tinggi kedua setelah UUD 1945 dan Ketetapan (Tap) MPR. PP adalah produk hukum turunan kedua setelah UU. Untuk Indonesia UU dan PP akan diacu sebagai dasar peaturan-peraturan di bawahnya (misal KepPres, PerPres, KepMen, dan PerMen untuk tingkat Pemerintah, Peraturan Daerah dan Keputusan atau Peraturan Gub/Bupati/Walikota untuk Pemerintah Provinsi dan Pemerintah Kabupaten/Kota).

Apabila tidak dikoreksi dipastikan akan menimbulkan persoalan cacat hukum untuk peraturan di bawahnya.

2.9 Keseimbangan Global Air Dalam Siklus Hidrologi

Secara global siklus hidrologi mempunyai keseimbangan relatif yang total jumlah besaran airnya adalah tetap seperti ditunjukkan dalam Gambar 2-34 dan Tabel 2-7.



Gambar 2-34. Skema siklus hidrologi global untuk hujan di darat dengan satuan relatif = 100 (Chow et al., 1988)

Tabel 2-7. Keseimbangan tahunan global (Chow et al., 1988)

No.	Uraian	ribu km ³ per tahun	Hujan 100%	Evaporasi laut 100%
1	Total evaporasi dari laut	505	424	100
2	Hujan di laut	459	385	91
3	Uap di darat dari laut (advection horizontal uap air)	46,5	39	9
4	Surface outflow ke laut	45,3	38	9
5	Hujan di darat	119	100	24
6	Total evaporasi dari darat	73	61	14
7	Groundwater outflow	1,2	1	0,2

Dari Gambar 2-34 dan Tabel 2-7 dapat dilihat keseimbangan siklus hidrologi dalam bentuk angka seperti berikut:

- Hujan di darat (100) = total evaporasi darat (61) + surface outflow (38) + groundwater outflow (1) atau $100 = 61 + 38 + 1$.
- Hujan di darat (100) = total evaporasi dari darat (61) + uap di darat dari laut (39) atau $100 = 61 + 39$.
- Uap air di darat dari laut (39) = surface outflow (38) + groundwater outflow (1) atau $39 = 38 + 1$.
- Evaporasi dari laut (424) = hujan di laut (385) + uap di darat dari laut (39) atau $424 = 385 + 39$.

- Total evaporasi = semua evaporasi darat (dari waduk, sungai, situ-situ) + total evapotranspirasi dari tanaman atau vegetasi.
- Evaporasi dari laut yang besarnya adalah 505 ribu km³ per tahun, hanya 9% yang kembali ke darat berupa uap di darat dari laut. Dengan kata lain 91 % evaporasi dari laut kembali ke laut melalui hujan di laut.
- Pengkontribusi terbesar banyaknya hujan di darat adalah total evaporasi di darat (sebesar 61 %) yaitu jumlah dari semua evaporasi ditambah dengan evapotranspirasi. Dengan kata lain keberadaan vegetasi di darat khususnya dalam bentuk hutan adalah sangat penting.
- Kontribusi aliran permukaan (*surface outflow*) untuk daerah CAT adalah 38% ditambah dengan aliran air tanah (*groundwater outflow*) 1%. Angka 38% ini termasuk air dalam tanah di daerah *vadoze zone* yang berupa *soil water*.
- Kontribusi aliran permukaan (*surface outflow*) untuk daerah Non-CAT adalah 39% karena tidak ada *groundwater flow*.

Seperti telah disebutkan bahwa keseimbangan siklus hidrologi global itu relatif. Pengertian relatif ini adalah karena dari beberapa referensi angka-angka dalam Gambar 2-34 dan Tabel 2-7 berbeda. Namun kisaran besarnya mempunyai orde yang sama. Keseimbangan tahunan dari Chow et al. (1988) dan beberapa referensi ditunjukkan dalam Tabel 2-8.

Tabel 2-8. Keseimbangan tahunan global dari berbagai sumber dengan satuan hujan di darat = 100

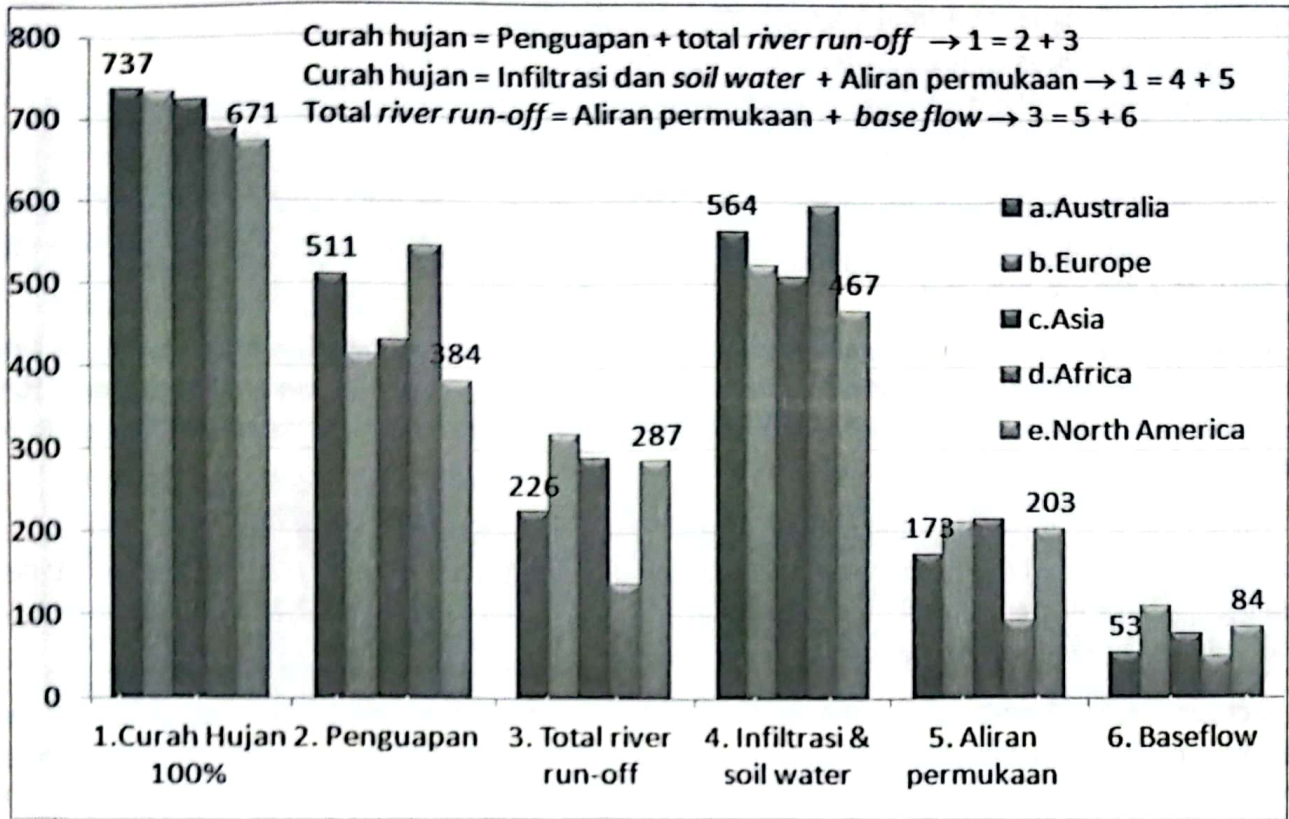
No.	Uraian	Sumber referensi*				
		A	B	C	D	E
1	Total evaporasi dari laut	424	365	421	350	383
2	Hujan di laut	385	335	379	310	347
3	Uap di darat dari laut (<i>advection horizontal uap air</i>)	39	30	43	40	36
4	<i>Surface outflow</i> ke laut	38	30	43	38,5	36
5	Hujan di darat (<i>precipitation on land</i>)	100	100	100	100	100
6	Total Evaporasi darat	61	70	57	60	64
7	<i>Groundwater outflow</i>	1	-	1	1,5	-

*Catatan: Sumber (referensi) → A = Chow et al. (1988), B = More (1976), C = Thompson & Turk (1993), D = Flint & Skinner (1977), dan E = Baumgartner & Reichel (1975)

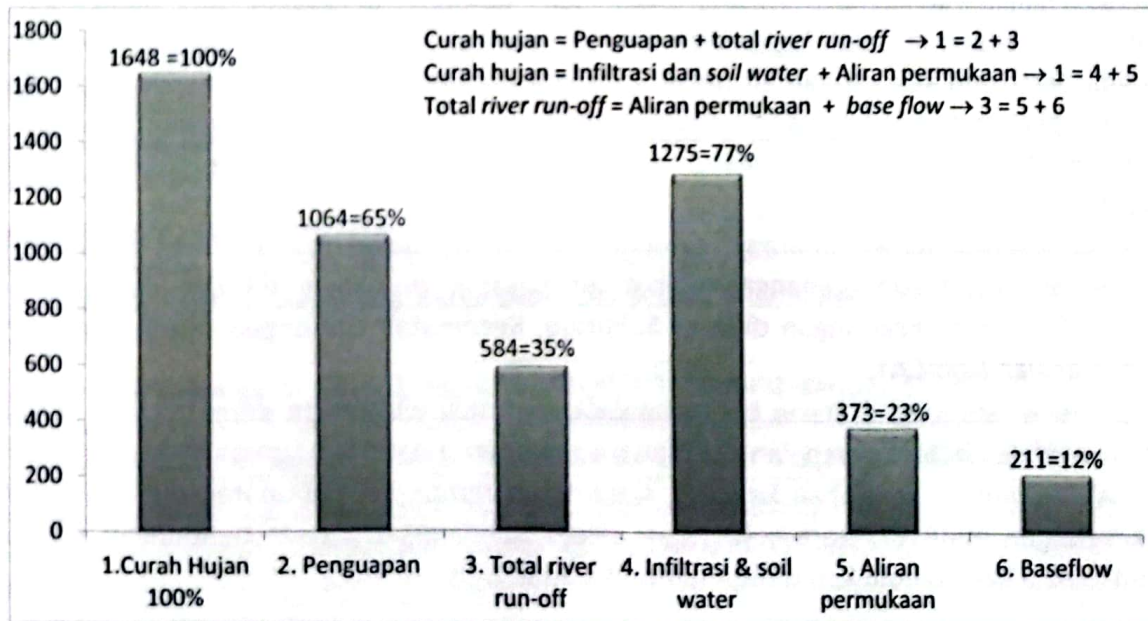
Dari Tabel 2-8 dapat dilihat bahwa kisaran total evaporasi dari darat adalah antara 57 sampai 70 untuk satuan unit hujan 100. Dengan kata lain kontribusi paling besar pembentuk hujan di darat adalah daratan itu sendiri. Di darat yang bisa memberikan evaporasi terbesar adalah evapotranspirasi (dari tanaman). Sedangkan evaporasi dari permukaan air pada wadah air alami atau buatan (danau atau waduk) lebih kecil dibandingkan evapotranspirasi. Dengan kata lain *land cover* berupa vegetasi merupakan komponen utama pembentuk hujan di darat yang menghasilkan air tawar. Vegetasi yang paling baik adalah hutan.

Kesimpulannya adalah bahwa menjaga kelestarian hutan berarti menjaga keberadaan hujan sebagai sumber air tawar yang menjadi salah satu sumber utama kehidupan.

Keseimbangan air dunia per tahun tiap benua ditunjukkan dalam Gambar 2-35.



a. Keseimbangan air dunia per tahun tiap benua (mm/tahun)



b. Keseimbangan air dunia per tahun Benua Amerika Selatan (mm/tahun)

Gambar 2-35. Keseimbangan air dunia mm per tahun (Leeden et al., 1991)

Dari Gambar 2-35 dapat dilihat bahwa:

- Curah hujan = Penguapan + total *river run-off* → 1 = 2 + 3
- Curah hujan = Infiltrasi dan *soil water* + Aliran permukaan → 1 = 4 + 5
- Total *river run-off* = Aliran permukaan + *base flow* → 3 = 5 + 6
- Infiltrasi & *soil water* = Penguapan + *base flow* → 4 = 2 + 6

Dari uraian ini dapat disebutkan bahwa pernyataan “infiltrasi dan *soil water* = penguapan ditambah *baseflow*” adalah menunjukkan bahwa air yang masuk ke dalam tanah secara implisit diasumsikan selalu ada *soil water* dan *groundwater*.

Untuk Indonesia pernyataan tersebut tidak selalu benar karena berdasarkan KepPres No. 26 Tahun 2011 disebutkan bahwa luas daratan Indonesia (= 100%) terbagi atas 47% cekungan air tanah (CAT), yang terdiri atas akuifer bebas (*unconfined aquifer*) dan akuifer tertekan (*confined aquifer*), serta 53% Non-CAT.

Uraian dalam sub-bab sebelumnya secara jelas menyatakan bahwa *baseflow* berasal dari *groundwater* (atau dari CAT) sedangkan *throughflow* dan *interflow* berasal dari *soil water* yang terletak pada *vadoze zone* di atas *phreatic zone* atau di atas *groundwater zone*. Bila tak ada CAT (atau Non-CAT) berarti tak ada *groundwater zone* namun hanya *vadoze zone*.

Dengan adanya pembagian ruang darat yang terdiri atas daerah CAT dan Non-CAT maka perlu dilakukan penelitian lebih detail penentuan CAT dan Non-CAT untuk suatu lokasi (lokal) dengan pernyataan tersebut dapat merupakan hipotesis. Untuk hal ini dapat dilihat Kota Jakarta, Kota Semarang, Pulau Bali, Kabupaten Blora dan Kabupaten Cilacap dengan hipotesis sebagai berikut:

- Untuk Kota Jakarta yang seluruhnya merupakan CAT hipotesis persoalan yang terjadi setiap tahun lebih dominan kepada masalah banjir dibandingkan dengan persoalan kekeringan. Bilamana saat ini Jakarta ada persoalan kekurangan air bersih (*drought problem*) maka hipotesisnya dapat disebutkan bahwa peningkatan penduduk Jakarta sudah terlalu besar dan padat yang melampaui daya dukung lingkungannya dan ini jelas mempengaruhi suplai air ke dalam tanah serta kebutuhan air yang terus meningkat.
- Demikian pula untuk Kota Semarang, sampai saat ini persoalan mendasarnya (hipotesis) adalah mengatasi banjir dan rob (genangan akibat air pasang) di bagian hilirnya daripada persoalan kekeringan. Ada berita kekeringan di Desa Sukorejo, Kecamatan Gunungpati yang lebih dari separo wilayahnya adalah Non-CAT.
- Untuk daerah wisata Kuta di Pulau Bali yang didatangi oleh wisatawan domestik dan seluruh dunia hipotesisnya adalah bahwa persoalan air tidak menjadi berita dominan karena daerah Kuta Bali adalah daerah CAT. Namun di Kelurahan Pendem, Kecamatan Jembrana, Kabupaten Jembrana pernah ada berita kekeringan atau terancam kekeringan akibat pendangkalan pada bendungan irigasi. Seperti diketahui bahwa bagian hulu Kabupaten Jembrana adalah Non-CAT.

- Untuk Kabupaten Blora dan Kabupaten Cilacap yang sebagian besar wilayahnya Non-CAT, persoalan yang dominan di daerah ini adalah kekeringan yang terjadi setiap tahun terutama di musim kemarau. Berikut ini penggalan berita yang diambil dari mass media cetak.

Penggalan berita Suara Merdeka

KEKERINGAN, ESDM BLORA TERUS CARI SUMBER AIR

Seakan sudah lazim, di saat musim kemarau, sebagian besar warga Blora kekurangan air bersih. Untuk mengatasinya, Pemprov Jateng maupun Pemkab Blora serta sejumlah instansi dan perusahaan memberikan bantuan air bersih kepada warga. Bantuan itu pun rutin disalurkan setiap tahun saat musim kemarau.

Nah, Dinas Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) Blora tak tinggal diam melihat rutinitas warga yang mengalami kesulitan mendapatkan air bersih saat kemarau. Pencarian sumber-sumber air yang debitnya tinggi digalakkan dinas yang kini dipimpin Setyo Edi tersebut.

Salah satunya dengan menggandeng sejumlah pihak yang paham betul dengan kondisi geografi maupun geologi Blora. Misalnya kalangan perguruan tinggi. Mereka diminta melakukan penelitian dan hasil penelitian itu dijadikan salah satu pijakan untuk mendapatkan sumber air.

"Sebenarnya tidak sulit menemukan sumber air, namun yang debitnya tinggi itu yang sudah didapat. Karena itu perlu penelitian ilmiah oleh para ahli. Kami terus upayakan itu," ujar Setyo Edi, Sabtu 21 April (Suara Merdeka 21 April 2012, 14:28 wib).

Penggalan berita Kompas

151 DESA TERANCAM KEKERINGAN

KEBUMEN, KOMPAS - Sebanyak 151 desa di Kabupaten Kebumen dan Cilacap, Jawa Tengah, terancam kekeringan memasuki puncak musim kemarau pertengahan tahun ini. Menurunnya curah hujan di wilayah tersebut selama sebulan terakhir mengancam sumber-sumber air bersih di permukiman.

Di Kabupaten Kebumen kekeringan mengancam 77 desa di 16 kecamatan. Sementara di Cilacap kekeringan mengancam 74 desa di 24 kecamatan.

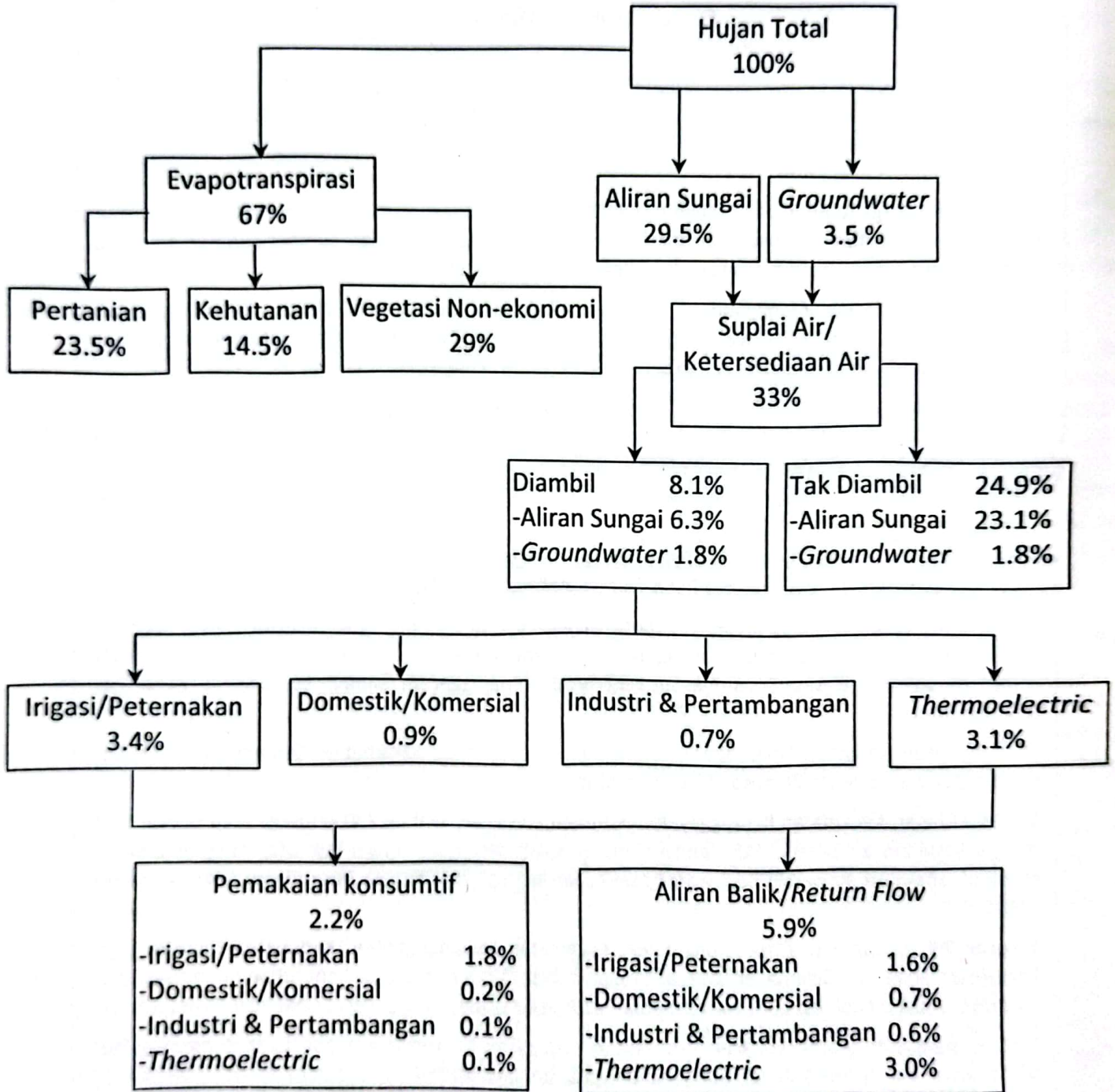
Di Desa Clapar, Kecamatan Karanggayam, Kebumen, misalnya, saat ini 230 keluarga atau sekitar 700 warga kesulitan air bersih. "Air Sungai Gebang, salah satu hulu Sungai Luk Ulo, yang selama ini menjadi alternatif air bersih bagi warga pun cepat kering," kata Kepala Desa Clapar Sukirno, Senin (20/6).

Sekitar 700 keluarga di Desa Ujungmanik, Kecamatan Sawungnganten, Kabupaten Cilacap, juga terancam krisis air. Selama ini warga mengandalkan air hujan untuk kebutuhan memasak dan minum. Untuk mandi dan cuci, warga memanfaatkan air sumur yang payau akibat intrusi air laut.

Untuk membantu warganya, baik Pemerintah Kabupaten Kebumen maupun Cilacap menyiapkan bantuan air bersih. Pemkab Kebumen menganggarkan dana Rp 154 juta untuk bantuan air bersih.

(Kompas, Selasa, 21 Juni 2011, 03:52 WIB)

Berikut ini ditunjukkan penggunaan air di US yang dapat dipakai sebagai salah satu referensi untuk penelitian penggunaan air di Indonesia. Dari 100% curah hujan yang menjadi evapotranspirasi sebesar 67%, menjadi aliran sungai 29,5% dan menjadi air tanah (*groundwater*) 3,5%. Detail uraian tersebut dan penggunaannya ditunjukkan dalam Gambar 2-36.

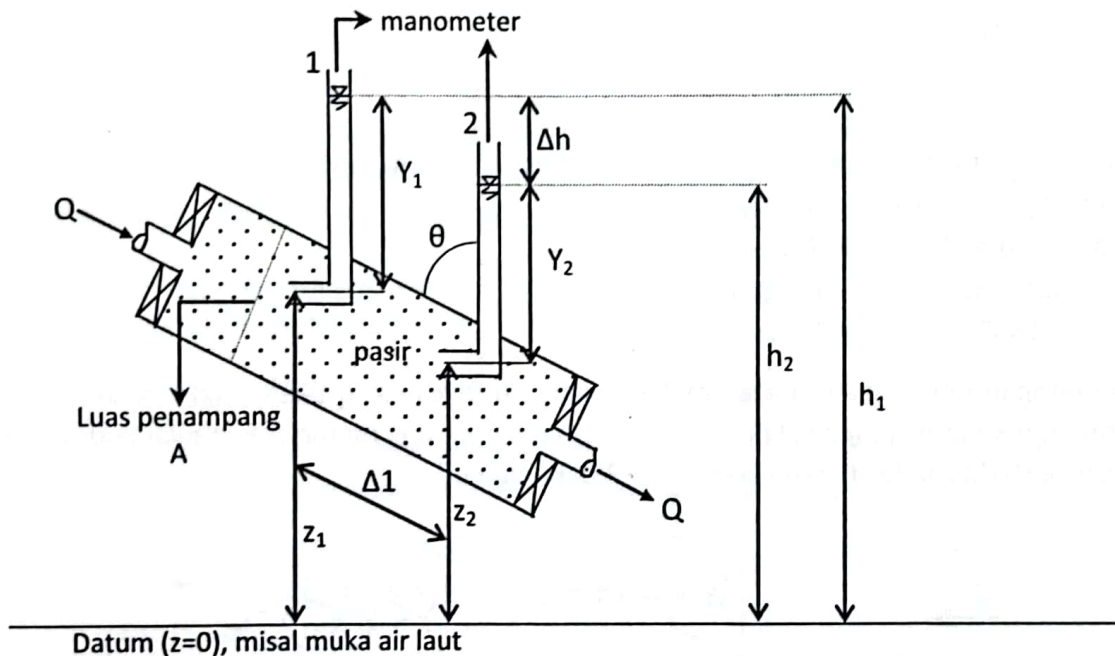


Gambar 2-36. Pemakaian air di Amerika Serikat (Ward & Trimble, 2004)

BAB 3. HUKUM DARCY DAN SIFAT-SIFAT TANAH

Henry Darcy, seorang pakar hidraulik dari Perancis, pada Tahun 1856 mempublikasikan hasil percobaannya di laboratorium tentang aliran air melalui pasir. Hasil analisis percobaan ini dapat dijadikan sebagai hukum empiris yang dikenal dengan nama Hukum Darcy. Penemuan Hukum Darcy sekaligus dapat dianggap sebagai kelahiran dari ilmu hidrologi aliran air tanah (hidrogeologi) secara kuantitatif.

Eksperimennya diilustrasikan seperti pada Gambar 3-1.



Gambar 3-1. Alat Percobaan Hukum Darcy

Diketahui bahwa:

$$q = \frac{Q}{A} \text{ satuannya} \Rightarrow \frac{\left[\frac{L^3}{T} \right]}{\left[L^2 \right]} = \left[\frac{L}{T} \right] = \text{satuan debit (unit discharge)}$$

Sering pula didefinisikan sebagai debit spesifik (*specific discharge*)

dimana:

- Q = debit aliran
- A = luas potongan
- L = satuan panjang
- T = satuan waktu

q (*flux*) dapat disebut juga laju aliran dibagi luas potongan melintang dan mempunyai dimensi sama dengan kecepatan. Oleh karena itu kadang-kadang dikenal sebagai Kecepatan Darcy atau *Darcy flux*. Dari hasil percobaan Darcy seperti ditunjukkan di Gambar 3-1 disebutkan bahwa (Kodoatie, 1996; Toth, 1990):

$$q \propto h_2 - h_1 = \Delta h \quad \text{dan} \quad q \text{ juga } \propto \frac{l}{l_2 - l_1} = \frac{1}{\Delta l}$$

sehingga dapat ditulis:

$$q = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} = -K \frac{dh}{dl} = -Ki$$

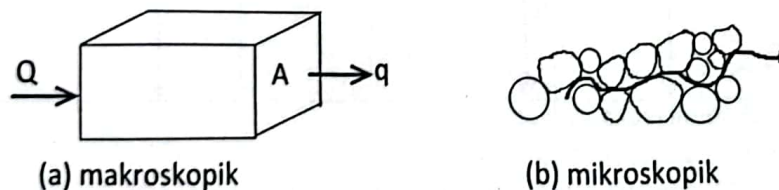
3-1

dimana:

- K adalah Konduktivitas Hidraulik (*Hydraulic Conductivity*) yang mempunyai satuan L/T
- H disebut ketinggian hidraulik (*hydraulic head*)
- dh/dl disebut gradien hidraulik (*Non dimensional*)

Dalam hal ini: $\Delta h = h_2 - h_1 = -$ (negatif) dan
 $\Delta l = l_2 - l_1 = +$ (positif)

Sehingga dengan persamaan di atas maka hasilnya untuk nilai q akan selalu positif. Pada kondisi aliran yang menuju ke atas q juga selalu positif. Persamaan di atas menjelaskan nilai laju aliran (q) yang makroskopik seperti ditunjukkan pada Gambar 3-2 di bawah ini.



Gambar 3-2. Konsep makroskopik dan mikroskopik aliran air tanah (Freeze & Cherry, 1979)

Dalam Gambar 3-2 menunjukkan konsep makroskopik dan mikroskopik dari aliran air tanah. Gambar 3-2.a merupakan konsep makroskopik aliran air tanah yang menunjukkan bagaimana q dicari/diukur secara mudah yaitu Q/A . Sedangkan Gambar 3-2.b merupakan konsep mikroskopik aliran air tanah. Dalam konsep mikroskopik, aliran dari partikel air secara individual mengalir di antara sela-sela butiran tanah atau pasir (perkolasi). Aliran dari partikel ini merupakan keadaan nyata di dalam tanah namun tidak mungkin untuk diukur (Freeze dan Cherry, 1979).

Dalam mengaplikasikan Hukum Darcy untuk analisis aliran air tanah dilakukan suatu pendekatan dengan asumsi bahwa suatu fragmen butiran-butiran tanah (pasir, lanau atau lempung) yang membentuk media porous digantikan dengan suatu kontinum di mana dapat didefinisikan menjadi parameter-parameter makroskopik seperti konduktivitas hidraulik, porositas dll. Perlu dipahami juga bahwa aliran air di dalam tanah mengikuti prinsip-prinsip dasar hidraulika yang bersifat laminar yaitu antara lain: alirannya bergerak dengan kecepatan sangat kecil dan angka Reynolds yang kecil pula.

Selanjutnya besarnya debit adalah:

$$Q = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} A = -KiA \tag{3-2}$$

3.1 Asumsi Dupuit-Forchheimer

Asumsi ini menyebutkan:

1. Aliran arah horizontal

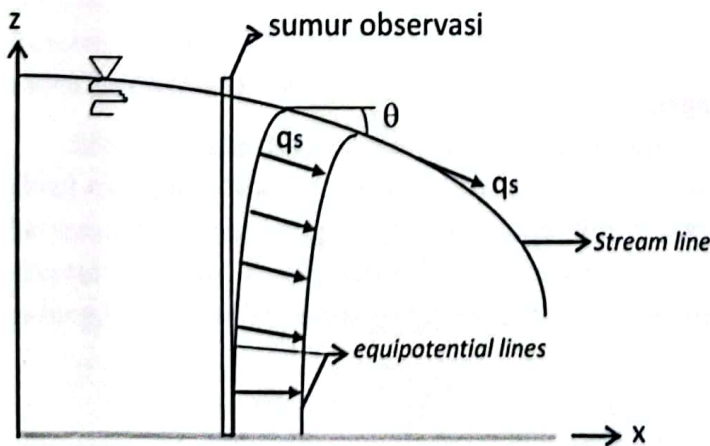
Menurut Dupuit (1863) hampir setiap aliran air tanah, kemiringan dari muka air tanahnya adalah sangat kecil (biasanya 1/1000). Dalam kondisi tunak (*steady*) dalam bidang dua dimensi vertikal (*xz plane*) seperti ditunjukkan dalam Gambar 3-3.a muka air tanah adalah merupakan garis aliran (*stream line*). Untuk setiap titik dari garis aliran ini berlaku Hukum Darcy yaitu: $q_s = -K dz/ds = -K \sin \theta$

Karena pada muka air tanah tekanannya adalah = 0 (*atmospheric*) dan ketinggiannya = *z*, maka Dupuit mengusulkan untuk menggantikan

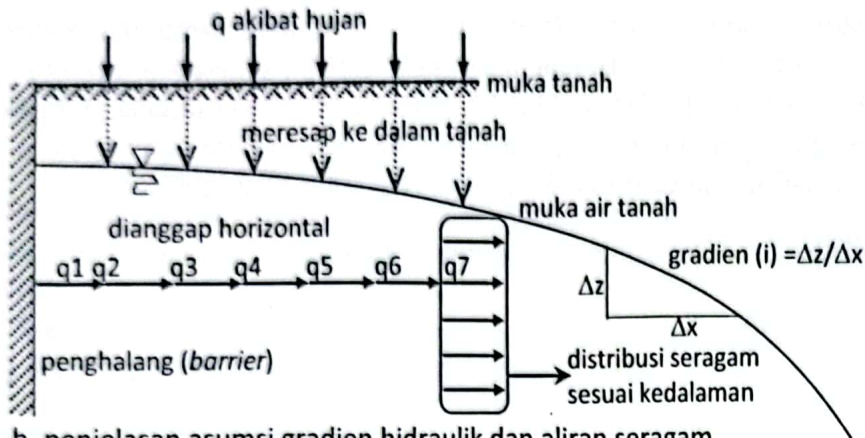
$$\sin \theta \text{ dengan } \tan \theta = dh/dx$$

Hal ini berarti *equipotential surfaces* adalah vertikal atau *h* tidak lagi fungsi (*x,z*) namun *h* hanya merupakan fungsi (*x*) saja. Sehingga aliran air tanah horisontal (lihat Gambar 3-3):

- 2. Gradien hidraulik sama dengan kemiringan permukaan bebas atau muka air tanah
- 3. Aliran terdistribusi secara seragam dengan ketinggian hidraulik



a. penjelasan asumsi aliran horisontal



b. penjelasan asumsi gradien hidrolik dan aliran seragam

Gambar 3-3. Penjelasan mengenai asumsi Dupuit-Forch Heimer (Kodoatie, 1996)

3.2 Validitas Hukum Darcy

Persamaan Darcys mempunyai keterbatasan dalam pemakaian, yaitu terbatas pada aliran yang bersifat laminar. Semakin tinggi kecepatan v_p maka penyimpangan hubungan linier dari Hukum Darcy akan semakin tampak.

Untuk membedakan sifat aliran, laminar atau turbulen digunakan Bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds didefinisikan sebagai:

$$R_e = \frac{qd}{\nu}$$

3-3

dimana

R_e = Bilangan Reynolds (Non dimensional)

q = debit spesifik (m/det)

d = diameter efektif (m)

ν = viskositas atau kekentalan kinematik (m^2/det)

di mana kekentalan kinematik didefinisikan sebagai:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

di mana:

μ = kekentalan dinamik dengan satuan kg/m.det

ρ = kerapatan air dengan satuan kg/m^3

Untuk air, perubahan kekentalan kinematik terhadap temperatur dapat diperkirakan dengan persamaan berikut ini.

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \left[1.14 - 0.031(T^\circ - 15) + 0.00068(T^\circ - 15)^2 \right] 10^{-6}$$

Kerapatan air juga mengalami perubahan dengan perubahan temperatur. Dari suhu 0°C sampai 10°C besarnya $\rho_{\text{air}} = 1000 \text{ kg/m}^3$. Kenaikan temperatur menyebabkan turunnya harga kerapatan air. Untuk temperatur 15°C naik menjadi 100°C, kerapatan air turun dari 999 kg/m^3 menjadi 958 kg/m^3 .

Klasifikasi aliran berdasarkan Bilangan Reynolds dapat dibedakan menjadi tiga kategori seperti berikut ini (French, 1985):

- $R_e < 500$ aliran laminer
- $500 < R_e < 12,500$ aliran transisi
- $R_e > 12,500$ aliran turbulen

Validitas Hukum Darcy dapat dijelaskan seperti berikut ini (Kodoatie, 1996):

- semua arah
- arah q ataupun Q selalu positif
- tanda $-$ (min) menunjukkan arah aliran yang berlawanan dengan gradien (i)
- menunjukkan hukum linier yang mana q proportional dengan $i \rightarrow q \propto i$
- untuk *saturated flow* maupun *unsaturated flow*
- untuk *homogeneous* dan *heterogeneous*
- aliran tunak dan tak tunak (*steady* dan *unsteady flow*)
- berlaku untuk Angka Reynolds antara 1- 10

3.3 Potensi Fluida

Aliran dalam tanah merupakan suatu proses mekanis. Energi mekanis ini terdiri dari energi potensi, energi kinetik dan energi elastis. Jumlah energi-energi ini untuk satu satuan masa fluida disebut potensi fluida. Dengan adanya potensi fluida ini maka partikel air akan bergerak (dalam bentuk aliran) dari suatu tempat ke tempat lainnya sesuai dengan berapa besar potensi fluida yang ada pada partikel tersebut. Potensi fluida Φ (*fluid potential*) didefinisikan sebagai besarnya energi mekanik dibagi dengan satuan masa fluida (Kodoatie, 1996).

Seperti sudah disebutkan sebelumnya bahwa hampir selalu aliran air di dalam tanah (*groundwater flow*) mengikuti azas-azas hidraulika aliran laminer di mana salah satu cirinya aliran ini mengalir dengan kecepatan v yang sangat kecil sehingga dapat dikatakan $v \rightarrow 0$. Di samping hal tersebut air dapat dikatakan tidak termampatkan (*incompressible*) atau dapat dikatakan kerapatannya (ρ) konstan sehingga persamaan untuk potensi fluida di dalam air tanah dapat ditulis menjadi (Kodoatie, 1996):

$$\phi = gz + \frac{P - P_0}{\rho} \tag{3-4}$$

dengan dimensi:

$$\phi = \left[\frac{L}{T^2} L \right] + \left[\frac{ML/T^2}{L^2} \right] = \left[\frac{L^2}{T^2} \right]$$

dimana:

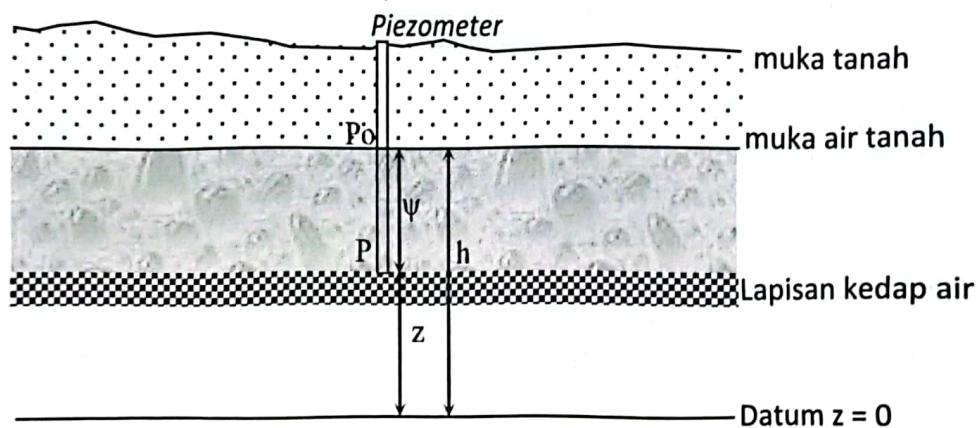
M = satuan massa

L = satuan panjang

T = satuan waktu

Dari penjabaran di atas maka dimensi dari potensi fluida adalah kuadrat satuan panjang dibagi dengan kuadrat satuan waktu.

Bila digambarkan dalam bentuk visual seperti Gambar 3-4 di bawah ini:



Gambar 3-4. Visualisasi potensi fluida (Kodoatie, 1996)

Dengan alat *piezometer* besarnya potensi fluida di suatu tempat dapat dicari seperti ditunjukkan Gambar 3-4. Dari gambar tersebut terlihat bahwa besar tekanan:

$$P = \rho g \psi + P_0$$

$$= \rho g (h-z) + P_0$$

Jadi besar potensi fluida:

$$\phi = gz + \frac{P - P_0}{\rho} = gh$$

3-5

dimana parameter-parameternya ialah:

h = ketinggian total hidraulik (*total hydraulic head*)

ψ = tekanan (pressure head), yaitu tinggi muka air di tabung *piezometer*

z = *elevation head*

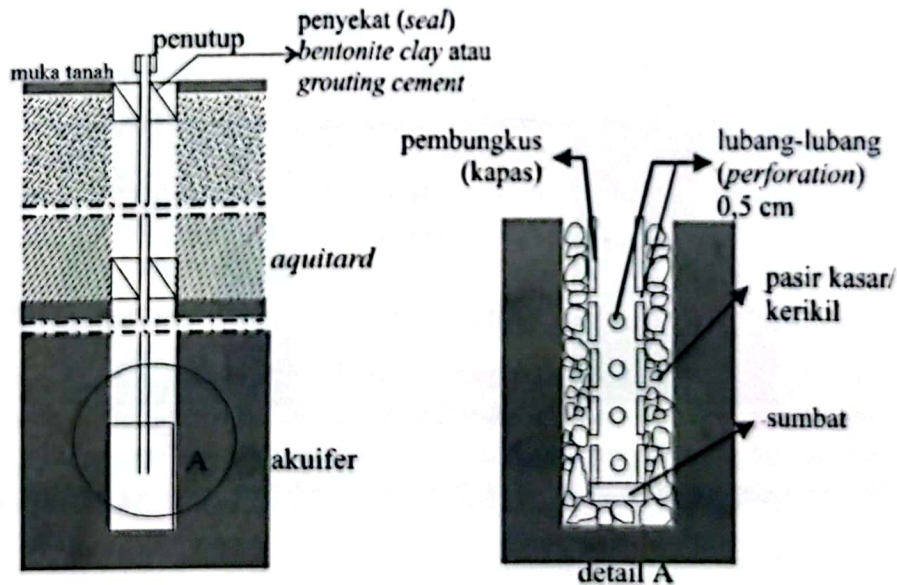
$P = \rho g \psi$ = tekanan fluida (*fluid pressure*)

P_0 = tekanan atmosfer

Dari persamaan ini dapat dilihat bahwa air di dalam tanah mengalir dan bergerak dari energi yang lebih besar menuju ke energi yang lebih kecil.

3.3.1 Piezometer

Untuk mengukur elevasi muka air atau ketinggian hidraulik aliran air digunakan tabung atau pipa, di laboratorium alat ini dinamakan *manometer* dan di lapangan disebut *piezometer* (Freeze & Cherry, 1979). Alat ini merupakan sebuah tabung vertikal dengan kedua ujungnya terbuka yang ditempatkan/disisipkan ke dalam sebuah lubang yang telah dibor sampai kedalaman tertentu yang akan diukur. Titik yang diukur terletak di dasar alat ini. Pada ujung bagian bawahnya dipasang saringan yang berlubang sepanjang 0,5 m sampai 1 m yang dibungkus dengan kapas atau bahan kain dan pada ujung bagian horisontalnya disumbat. Hal ini dimaksudkan hanya air tanah saja yang dapat masuk ke tabung, sedangkan material halus tanah (*fine granular material*) terhalang oleh bungkus kapas dan sumbatan tersebut. Di sekitar saringan umumnya diisi kerikil atau pasir kasar sehingga air tanah secara bebas dapat masuk ke dalam tabung ini. Di atas saringan bisa diisi material lainnya namun pada daerah *aquitard* lebih baik diisi material penyekat (*seal*), umumnya *bentonite clay* atau semen (*cement grouting*), untuk mencegah masuknya air dari lapisan *aquitard* tersebut (lihat Gambar 3-5) (Freeze & Cheery, 1979; Kodoatie, 1996).



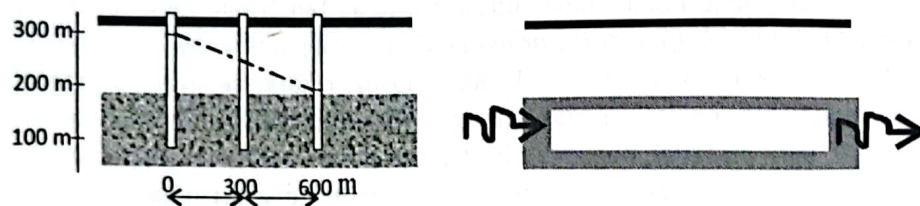
Gambar 3-5. Ilustrasi alat piezometer di lapangan (Kodoatie, 1996; Kruseman & De Ridder, 1983)

Menurut pengalaman Kruseman dan de Ridder (1989) jenis pasir lempung sangat halus adalah penyekat yang sama baiknya dengan penyekat dari bentonite. Hasilnya hanya memberikan kesalahan kurang dari 0,03 m, bahkan untuk beda ketinggian hidraulik antara akuifer lebih dari 30 m. Sesudah alat tersebut terpasang direkomendasikan untuk memompa air dari dalam tabung tersebut beberapa saat

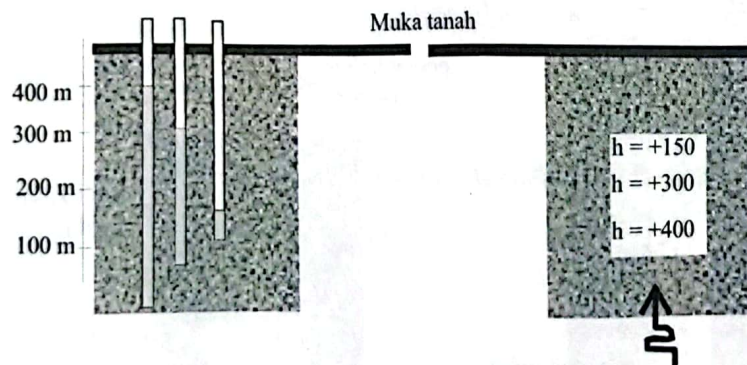
untuk membuang partikel tanah (lempung, lanau atau pasir) yang masuk ke tabung pada waktu pemasangan (Gambar 3-5).

Sering di suatu tempat dipasang alat lebih dari satu karena kondisi sistem geologi tertentu. Gambar 3-6 menunjukkan contoh hal tersebut.

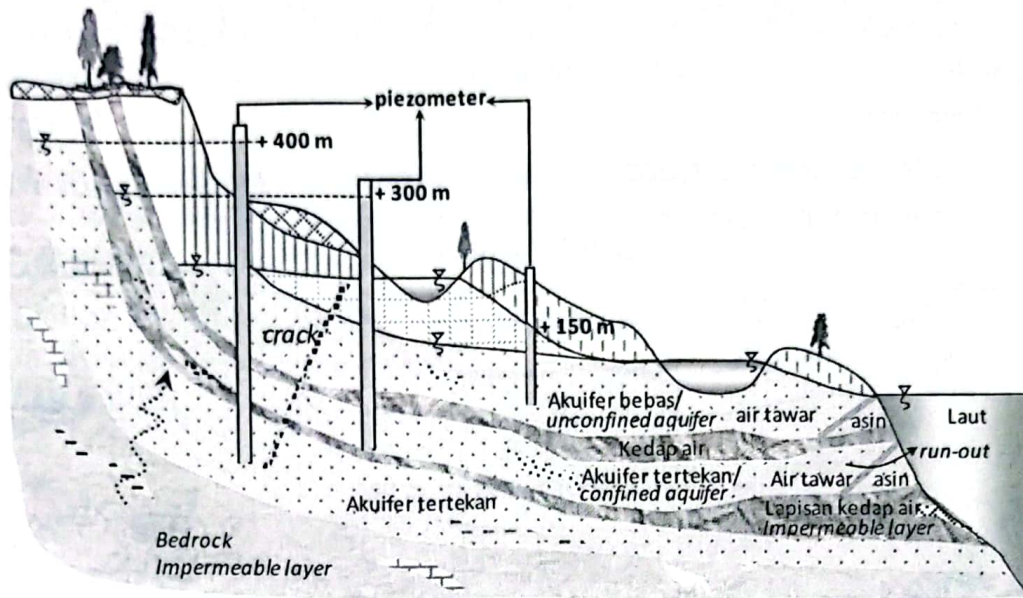
Pada Gambar 3-6a beberapa alat ini dipasang dengan jarak tertentu, karena aliran airnya bergerak dari kiri ke kanan (relatif horisontal). Dari tiga alat *piezometer* yang dipasang dengan jarak masing-masing 300 m, ketinggian hidraulik dari kiri ke kanan adalah berturut-turut +300m, +250m dan +200m. Sedangkan, Gambar 3-6b beberapa alat dipasang dengan jarak horisontalnya yang relatif sangat dekat, namun dengan kedalaman yang berbeda, karena aliran air tanahnya bergerak dari bawah ke atas (relatif vertikal). Contoh untuk aliran ini ditunjukkan dalam Gambar 3-6c.



a. air mengalir dari elevasi +300 m ke daerah +200m, dengan jarak 600 m



b. air mengalir dari bawah ke atas dari elevasi +400m ke elevasi +150m



c. Contoh Gambar b: aliran mengalir dari bawah ke atas melalui celah (*crack*)
Gambar 3-6. Pemasangan beberapa piezometer di lapangan

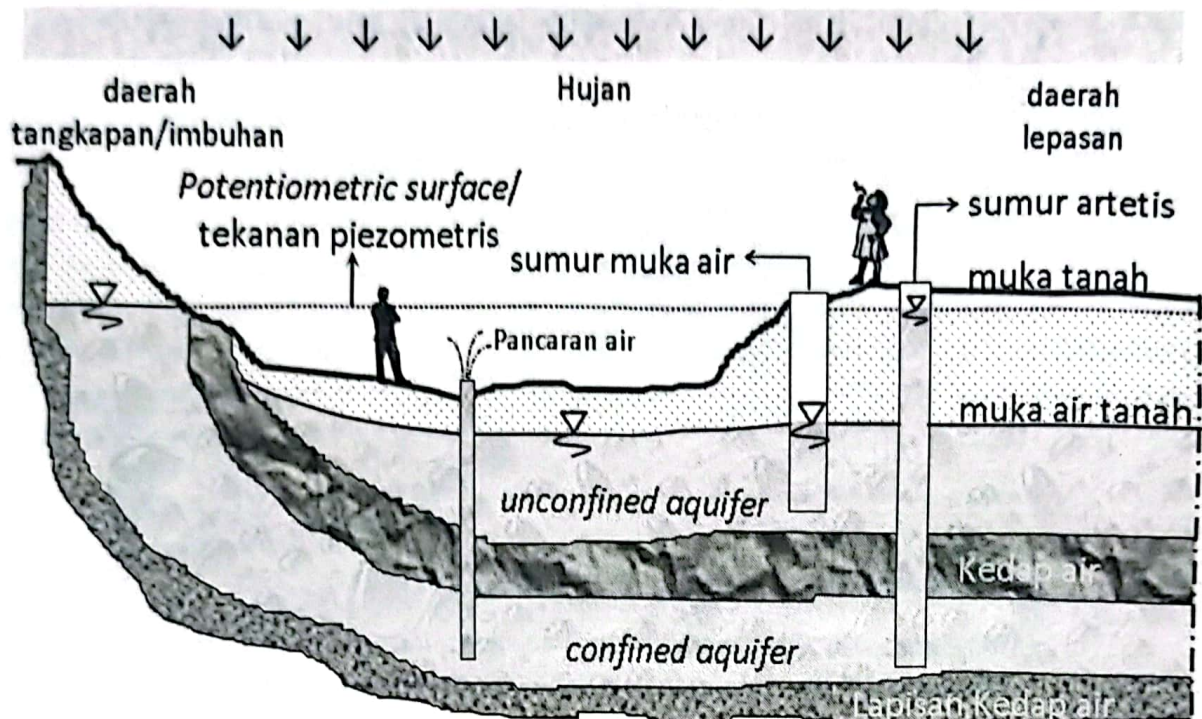
Hal ini dapat dilakukan juga pada suatu daerah di mana sistem geologinya terdiri dari beberapa lapisan akuifer yang masing-masing dibatasi oleh *aquiclude* atau *aquitard*. Dari uraian tersebut timbul pertanyaan: Dengan jumlah berapa alat itu harus dipasang pada suatu daerah? Jawabannya adalah sebanyak mungkin, karena dengan banyaknya alat dipasang maka ada dua cara untuk analisis sifat-sifat hidraulik yaitu: dengan cara analisis hubungan antara waktu-*drawdown* dan cara analisis hubungan antara jarak-*drawdown*. Pengertian *drawdown* adalah turunnya muka air tanah. Namun harus dipertimbangkan pula aspek ekonomis terhadap kuantitas pemasangan alat ini (Kodoatie, 1996).

3.3.2 Muka Air Tanah dan Permukaan Potensiometris

Pada Gambar 3-7 ditunjukkan contoh untuk *unconfined aquifer* di mana ketinggian hidrauliknya merupakan muka air tanah. Muka air tanah ini didefinisikan sebagai permukaan di mana tekanan fluidanya dalam pori-pori dari sebuah media porous adalah sama dengan tekanan atmosfer. Tinggi muka air tanah ini sama dengan tinggi muka air pada suatu sumur, ataupun tinggi muka air dalam alat *piezometer*.

Untuk *confined aquifer* maka ketinggian hidrauliknya tidak lagi berupa muka air namun merupakan garis yang disebut sebagai *potentiometric surface* atau disebut pula permukaan piezometris. Garis ini merupakan garis imajiner bertepatan dengan ketinggian tekanan hidrostatik dari air dalam *confined aquifer*. Pada Gambar 3-7 ditunjukkan contoh garis tersebut.

Pada daerah di mana garis *potentiometric*nya lebih tinggi dari muka tanah maka bila di daerah tersebut dibuat sumur atau dibor akan terjadi pancaran air (*spring*) dari sumur/lubang bor tersebut, hal ini karena pancaran air itu akan berusaha mencapai ketinggian garis tersebut.



Gambar 3-7. Potentiometric surface dari sebuah confined aquifer (Todd, 1959)

Bila merujuk pada tekanan atmosfer sebagai dasar referensi tekanan maka P_0 besarnya adalah sama dengan tekanan atmosfer (atau dapat dikatakan = 0) sehingga Persamaan 3-5 berubah menjadi:

$$\phi = gz + \frac{P}{\rho} = gh \quad 3-6$$

dimana: $h = z + \frac{P}{\rho g}$

3.3.3 Potensi Fluida Untuk Air Tanah, Aliran Pada Saluran Terbuka dan Pipa

Potensi fluida (total ketinggian hidraulik) untuk: aliran air tanah, aliran pada saluran terbuka dan aliran dalam pipa diraikan berikut ini. Untuk saluran terbuka maka dalam kondisi tunak potensi fluida adalah kumulatif dari pengaruh energi/kerja kinetis (*net influx of momentum*), energi elastis (dari kedalaman air yang memberikan tekanan hidrostatis) dan energi potensi (dari pengaruh ketinggian/elevasi dan gravitasi).

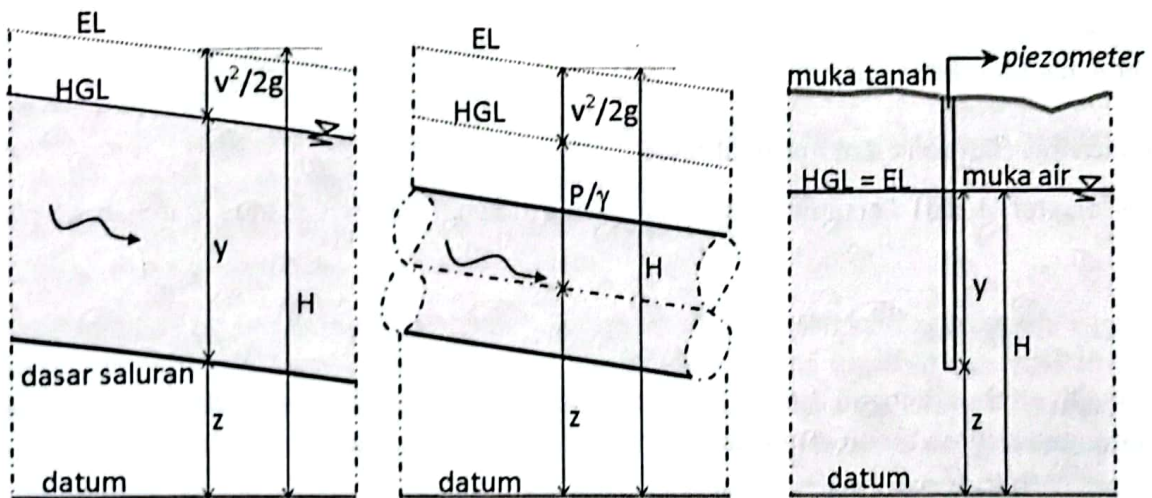
Sedangkan untuk aliran dalam pipa merupakan kumulatif dari energi/kerja kinetis (*net influx of momentum*), energi elastis (tekanan) dan energi potensi (dari pengaruh ketinggian/elevasi dan gravitasi).

Untuk aliran pada saluran terbuka yang dipakai adalah kedalaman air y sedangkan untuk aliran pada pipa yang dipakai adalah P/γ .

Pada aliran air tanah (*groundwater flow*), garis ketinggian hidrauliknya tergantung jenis akuifernya. Untuk *unconfined aquifer* dipakai kedalaman air y di dalam *piezometer* dan untuk *confined aquifer* dipakai P/γ .

Dalam satuan unit meter/detik, kecepatan aliran air tanah sangat kecil yaitu besaran orde $v = 10^{-9}$ m/detik sampai 10^{-6} m/detik, sehingga komponen $v^2/2g$ dapat diabaikan sehingga dapat dikatakan bahwa besarnya garis energi EL adalah sama dengan besarnya *hydraulic grade line* (HGL).

Dalam Gambar 3-8 ditunjukkan besarnya total ketinggian hidraulik untuk aliran pada saluran terbuka, aliran dalam pipa dan aliran air tanah.



a. Aliran pada saluran terbuka b. Aliran dalam pipa c. Aliran air tanah (*unconfined aquifer*)

Gambar 3-8. Potongan memanjang aliran pada saluran terbuka, dalam pipa, air tanah dan total energinya (Kodoatie, 1996)

Dari Gambar 3-8 dapat dilihat bahwa total energi masing-masing aliran dapat ditulis:

1. aliran pada saluran terbuka: $H = \frac{v^2}{2g} + y + z$

2. aliran pada pipa: $H = \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + z$

3. aliran air tanah \rightarrow kecepatan aliran sangat kecil $\cong 0$ maka $\frac{v^2}{2g} \cong 0$, sehingga:

a. untuk *unconfined aquifer* $H = y + z$

b. untuk *confined aquifer* $H = \frac{P}{\gamma} + z$

di mana:

EL = Energy Line (Garis Energi) (m)

HGL = *Hydraulic Grade Line* (Garis Ketinggian hidrolis) (m)

H = Total energi (m)

y = kedalaman air (m)

g = gravitasi (m/detik²)

v = kecepatan rata-rata aliran (m/det)

P = tekanan air pada suatu titik (Newton/m² = (kg m/detik²)/m²)

γ = berat jenis air (*specific weight*) = ρg (kg/m³ m/detik²)

ρ = kerapatan massa (*mass density*) = kg/m³

P/ γ = Tekanan piezometris atau *potentiometric surface* (m)

z = ketinggian dasar saluran terbuka, ketinggian titik berat pipa dan ketinggian dasar *piezometer* (aliran air tanah) terhadap suatu datum (m)

piezometer = alat ukur ketinggian air tanah

3.4 Konduktivitas Hidraulik dan Permeabilitas

Seperti diketahui dari Persamaan 3-1 yaitu yang dikenal dengan rumus Darcy besarnya *specific discharge*:

$$q = -K \frac{dh}{dl}$$

Di mana K disebut dengan istilah konduktivitas hidraulik. Di samping hal tersebut besarnya q sebanding dengan butiran tanah rata-rata d, atau ditulis (Freeze & Cherry, 1979):

$$q \propto d^2$$

besarnya q juga sebanding dengan berat jenis fluida, atau ditulis

$$q \propto \gamma = \rho g$$

q berbanding terbalik dengan viskositas dinamik dari fluida, atau ditulis

$$q \propto 1/\mu$$

Sehingga besarnya *specific discharge* dapat ditulis:

$$q = -\frac{cd^2 \rho g}{\mu} \frac{dh}{dl}$$

Di mana c adalah konstanta tak berdimensi untuk membuat bentuk proporsional (\propto) menjadi sama dengan (=). Sehingga besarnya konduktivitas hidraulik adalah:

$$K = \frac{cd^2 \rho g}{\mu} = \frac{k \rho g}{\mu}$$

3-7

dimana:

k = cd^2 merupakan *specific permeability* dengan dimensi adalah m²

μ = centipoise = 10^{-3} Pascal.detik = 10^{-3} Newton/m² detik

1 Newton = 1 kg m/detik²

ρ = kg/m³

$g = m/detik^2$
 $K = m/detik$

3.4.1 Konduktivitas Hidraulik K

Menurut para ahli tanah sudah diketahui bahwa konduktivitas hidraulik K terkait erat dengan distribusi ukuran butir tanah dan porositas. Nilai konduktivitas hidraulik untuk pasir kasar dan seragam dapat dipakai rumus Hazen (1911) yang tertulis:

$$K = cd_{10}^2 \tag{3-8}$$

Dimana:

K = Konduktivitas hidraulik dalam cm/detik

d_{10} = ukuran butiran efektif (mm)

c = konstanta (1/cm detik) dengan harga 40 – 150. Untuk berbagai jenis pasir nilai C adalah:

- 40 - 80 pasir sangat halus sampai pasir halus gradasi buruk
- 80 - 120 pasir medium sampai pasir kasar gradasi buruk
- 120-150 pasir kasar gradasi baik

Persamaan utama aliran air tanah berdasarkan Hukum Darcy. Salah satu asas utama aliran air tanah melalui media porous ialah alirannya bersifat laminar di mana angka Reynoldnya adalah kecil yaitu 1 sampai 10 dan unsur viskositas berperan. Bila lebih besar dari angka 10 maka Persamaan 3-1 tidak berlaku lagi. Di dalam besaran konduktivitas, hidraulik K berbanding terbalik dengan viskositas dinamik fluida. Semakin besar viskositasnya, fluida menjadi semakin kental namun K menjadi lebih kecil.

Pada Persamaan 3-8 harga konduktivitas hidraulik diperoleh dari persamaan yang mengandung diameter butiran, kerapatan air dan viskositas yang sama dengan Persamaan 3-7.

Persamaan 3-8 berlaku untuk jenis tanah yang seragam, bilamana tanahnya tidak seragam d harus digantikan dengan d_m yaitu rata-rata butiran dari tanah yang diselidiki. Sedangkan c merupakan koefisien yang tergantung dari bentuk dan pengepakan (*packing*) dari butiran tanah.

Persamaan lainnya untuk penentuan konduktivitas hidraulik adalah persamaan Kozeny-Carman (1937) yang mengandung unsur diameter butiran dan porositas persamaannya adalah:

$$K = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \left(\frac{d_m^2}{180} \right) \tag{3-9}$$

dimana:

ρ = kerapatan air (kg/m^3)

μ = viskositas air (Pascal.detik)

n = porositas (%)

d_m = rata-rata ukuran butiran (mm)

Dalam hal ini konduktivitas hidraulik K merujuk pada sifat-sifat fluida dan batuan, atau dengan kata lain K merupakan fungsi dari sifat fluida dan tanah, dinyatakan dalam bentuk matematis $K = f$ (fluida dan sifat-sifat tanah). Perlu dijelaskan bahwa pengertian K yang di dalam buku ini disebut konduktivitas hidraulik adalah sama dengan pengertian K pada disiplin ilmu mekanika tanah yang mengistilahkan K dengan nama koefisien permeabilitas (Toth, 1990; Freeze & Cherry, 1979).

3.4.2 Permeabilitas k

Parameter permeabilitas k (dikenal juga dengan istilah *the specific or intrinsic permeability*) merujuk hanya pada sifat-sifat batuan dan merupakan parameter yang menunjukkan berapa besar luas area batuan yang dilalui oleh fluida. Parameter ini umumnya dipakai untuk kepentingan geologi perminyakan karena keberadaan gas, minyak dan air di dalam sistem aliran yang berdimensi *multiphase* membuat parameter fluida bebas konduksi (hantaran) lebih atraktif (Toth, 1990; Kodoatle, 1996).

Dari Persamaan 3-7 dapat dilihat bahwa dimensi dari k adalah L^2 , dan ini bisa cm^2 atau m^2 . Karena bila dipakai dimensi cm^2 atau m^2 , nilai k adalah sangat kecil maka umumnya dalam geologi perminyakan memakai satuan *Darcy* yang didefinisikan sebagai permeabilitas yang akan menghasilkan debit spesifik sebesar satu cm/detik untuk suatu fluida dengan viskositas satu *centipoise* dengan gradient hidraulik yang membuat terminologi $\rho g dh/dl$ sama dengan satu atm/cm (Freeze & Cherry, 1979). Definisi ini dapat ditulis (Todd, 1959):

$$k = \frac{Q}{A} \frac{\mu}{dp/dx}$$

3-10

$$\text{Satuannya dapat ditulis } k = \frac{\text{cm}^3 \text{ centipoise}}{\text{dtk cm}^2} \frac{1}{\text{Atm/cm}} = \text{Darcy}$$

dimana:

- 1 Atm = $1.013 \cdot 10^5$ Pascal
- 1 Centipoise = 10^{-3} Pascal.detik = 10^{-3} Newton/ m^2 detik
- 1 Newton = $1 \text{ kg m}/\text{detik}^2$

$$\text{Sehingga: } 1 \text{ Darcy} \cong 0.987 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2$$

3.4.3 Nilai K dan k

Satuan yang dipakai bila dengan internasional standar (*Standard International Sistem* atau SI unit) umumnya:

- untuk K = meter/detik = meter/hari atau centimeter/detik
- untuk k = m^2 atau cm^2

Tabel 3-1 merupakan tabel untuk mengetahui nilai konduktivitas hidraulik dan permeabilitas untuk bermacam-macam jenis tanah dan batuan.

Tabel 3-1. Jangkauan Nilai Konduktivitas Hidraulik K & Permeabilitas k (Freeze & Cherry, 1979)

Rocks	unconsolidated deposits	Hydraulic Conductivity			Permeability	
		K	K	K	k	k
		m/det	cm/det	gal/day/ft ²	darcy	cm ²
Karst lime stone permeable basalt fractured igneous metamorphic rock Limestone & dolomit Batua pasir (sandstone) unfractured metamorphic igneous rock Shale	unweathered marine clay Glacial till lanau, loess pasir lanau pasir Kerikil	1	10 ²		10 ⁵	10 ⁻³
		10 ⁻¹	10	10 ⁶	10 ⁴	10 ⁻⁴
		10 ⁻²	1	10 ⁵	10 ³	10 ⁻⁵
		10 ⁻³	10 ⁻¹	10 ⁴	10 ²	10 ⁻⁶
		10 ⁻⁴	10 ⁻²	10 ³	10	10 ⁻⁷
		10 ⁻⁵	10 ⁻³	10 ²	1	10 ⁻⁸
		10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10	10 ⁻¹	10 ⁻⁹
		10 ⁻⁷	10 ⁻⁵	1	10 ⁻²	10 ⁻¹⁰
		10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻¹	10 ⁻³	10 ⁻¹¹
		10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	10 ⁻²	10 ⁻⁴	10 ⁻¹²
		10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁸	10 ⁻³	10 ⁻⁵	10 ⁻¹³
		10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻¹⁴
		10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁵	10 ⁻⁷	10 ⁻¹⁵
		10 ⁻¹³	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	10 ⁻¹⁶
10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹²	10 ⁻⁷	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁷		

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai k dan K mempunyai beda jangkauan (range) yang cukup besar, misal untuk jenis tanah pasir nilai k berkisar dari 10⁻¹ sampai dengan 10⁻³ Darcy sedangkan nilai K berkisar antara 10⁻⁴ sampai 1 cm/detik. Tabel 3-2 adalah faktor konversi untuk satuan nilai K & k.

Tabel 3-2. Faktor Konversi Untuk Satuan Nilai K & k (Freeze & Cherry, 1979)

	Permeability k*			Konduktivitas Hidraulik K		
	cm ²	ft ²	Darcy	m/det	ft/det	gal/day/ft ²
cm ²	1	1.08*10 ⁻³	1.01*10 ⁸	9.80*10 ²	3.22*10 ³	1.85*10 ⁹
ft ²	9.29*10 ²	1	9.42*10 ¹⁰	9.11*10 ⁵	2.99*10 ⁶	1.71*10 ¹²
Darcy	9.87*10 ⁻⁹	1.06*10 ⁻¹¹	1	9.66*10 ⁻⁶	3.17*10 ⁻⁵	1.82*10
m/det	1.02*10 ⁻³	1.10*10 ⁻⁶	1.04*10 ⁵	1	3.28	2.12*10 ⁶
ft/s	3.11*10 ⁻⁴	3.35*10 ⁻⁷	3.15*10 ⁴	3.05*10 ⁻¹	1	6.46*10 ⁵
gal/day/ft ²	5.42*10 ⁻¹⁰	5.83*10 ⁻¹³	5.49*10 ⁻²	4.72*10 ⁻⁷	1.55*10 ⁻⁶	1

* Untuk mendapatkan k dalam cm² diubah k dalam ft², kalikan k dalam cm² dengan 1.08*10⁻³

3.5 Parameter Aliran Air Tanah

Menurut Freeze & Cherry (1979) dan Toth (1990) ada enam parameter sifat-sifat fisik dasar yang harus diketahui dalam menguraikan dan menjelaskan aliran tanah secara hidraulik. Parameter tersebut dapat dikategorikan menjadi dua kelompok yaitu:

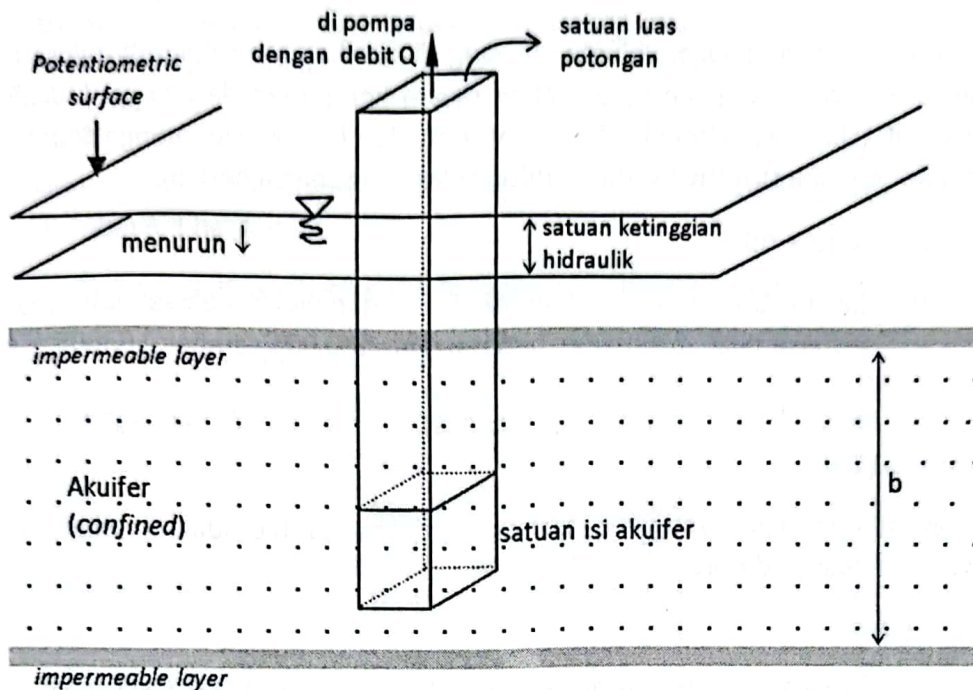
- 3 parameter untuk air: kerapatan air (ρ), viskositas dinamik air (μ), dan kompresibilitas (β)
- 3 parameter untuk media porous: permeabilitas (k), kompresibilitas (α), dan porositas (n)

Parameter-parameter yang lainnya tentang sifat-sifat hidraulik aliran air tanah diuraikan dan dijabarkan dari enam parameter ini. Parameter-parameter tersebut ialah:

- Tampungang Spesifik S_o (*Specific Storage*)
- Transmisivitas T (*Transmissivity*)
- Storativitas S (*Storativity*)
- *Specific Yield* S_y

3.5.1 Tampungang Spesifik (Specific Storage) S_o

Meurut Freeze & Cherry, 1979 definisi Tampungang Spesifik S_o (Specific Storage) ialah isi (volume) air yang keluar dari tampungang oleh satuan isi akuifer akibat satu unit penurunan dari ketinggian hidraulik (hydraulic head). Dalam hal ini diasumsikan akuifer merupakan suatu tampungang yang elatis. Bila tidak ada pemadatan (compaction) akuifer maka penambahan isi air akan menyebabkan aliran air masuk ke akuifer. Secara skematis deskripsi tentang S_o dapat dilihat pada Gambar 3-9.



Gambar 3-9. Skematis pengertian tampungan spesifik S_o (Ferris et al., 1962; Freeze & Cherry, 1979; dalam Kodoatie, 1996)

Dari Gambar 3-9 dapat dilihat bahwa tampungan spesifik S_o merupakan kumulatif dari perubahan isi air akibat kompresibilitas dari akuifer (α) dan kompresibilitas akibat dari air itu sendiri (β). Dengan adanya pemompaan sebesar Q terhadap isi air akuifer maka akan mengurangi pori dari butiran tanah di dalam akuifer dan hal ini akan menurunkan *potentiometric surface* yaitu tingginya kemampuan air di dalam akuifer yang terletak di luar batas akuifer karena akuifernya merupakan lapisan yang dibatasi oleh dua permukaan (*layer*) yang *impermeable*.

Pada kondisi ini akuifer (diasumsikan) elastis sehingga adanya pemompaan akan memadatkan akuifer itu (*aquifer compaction*). Air yang dihasilkan dari hasil pemadatan ini diformulasikan sebagai tampungan spesifik, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$S_o = \rho g (\alpha + n\beta)$$

3-11

Dimensi dari S_o adalah L^{-1} dengan jangkauan nilai 10^{-3} sampai 10^{-5} m

Dimana:

ρ = kerapatan air (kg/m^3)

g = gravitasi ($m/detik^2$)

α = kompresibilitas akuifer ($m^2/Newton$ atau $Pascal^{-1}$)

n = porositas

β = kompresibilitas air (m^2/N atau $Pascal^{-1}$)

3.5.2 Storativitas (S)

Storativitas didefinisikan sebagai volume air yang dilepaskan atau diambil dalam tampungan tiap unit permukaan area *aquifer* tiap unit perubahan dalam komponen dari tinggi hidrolik sampai pada permukaan tersebut (U.S. Department of The Interior, 1977). Dengan mengalikan Persamaan 3-11 dengan tebal akuifer b maka storativitas dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$S = \rho gb (\alpha + n\beta) \quad 3-12$$

Storativitas merupakan angka tak berdimensi. Dengan melihat bahwa umumnya tebal akuifer antara 5 sampai 100 m maka nilai storativitas berkisar antara 0,005 sampai 0,00005 (Freeze & Cherry, 1979).

3.5.3 Transmisifitas (T)

Transmisifitas didefinisikan sebagai besarnya konduktivitas hidraulik K dikalikan dengan tebal akuifer h , sehingga rumusnya ditulis:

$$T = K.h \quad 3-13$$

Dimensi dari T adalah L^2/T . Bila untuk pasir $K = 10^{-3}$ m/detik dengan tebal akuifer 50 m maka besarnya $T = 0,05$ m²/detik.

3.5.4 Difusifitas (D)

Difusifitas adalah rasio transmisifitas terhadap tampungan dalam kondisi aliran sementara (U.S. Department of The Interior, 1977). Formula untuk difusifitas (*diffusivity*) D adalah:

$$D = \frac{T}{S} = \frac{K}{S_0} \quad 3-14$$

Transmisifitas T dan storativitas S khususnya dipakai untuk analisis aliran air tanah dua dimensi pada *confined aquifer*. Bila persoalan air tanah lebih dominan dalam bentuk tiga dimensi maka disarankan untuk memakai hidraulik konduktivitas K , tampungan spesifik S_0 atau pemakaian parameter porositas n , permeabilitas k dan kompresibilitas akuifer α (Freeze & Cherry, 1979).

3.6 Tekstur Tanah

Beberapa hal yang penting tentang tanah yang terkait dengan aliran air tanah antara lain (Toth, 1990; Kodoatie, 1996):

1. klasifikasi tanah
2. kerapatan relatif
3. ukuran butiran
4. koefisien keseragaman
5. koefisien gradasi.

Tiga hal yang tersebut terakhir biasanya dipakai untuk menentukan pembagian butir tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir), karena sifat-sifat tanah tersebut tergantung dari ukuran butirannya. Sedangkan

sifat-sifat tanah berbutir halus (lanau dan terutama lempung) tidak ditentukan dari ukuran butirannya namun oleh batas-batas plastisitasnya.

1. Klasifikasi tanah

Klasifikasi tanah berdasar diameter butiran juga dapat dilihat berdasarkan kelipatan diameter butirannya seperti Tabel 3-3 berikut ini.

Tabel 3-3. Klasifikasi tanah berdasarkan diameter (Julien, 1995)

No.	Jenis Tanah	Deskripsi	Jangkauan Diameter*	
			mm	mm
1	Bongkahan (<i>Boulder</i>)	Sangat besar	4096	2048
		Besar	2048	1024
		Medium	1024	512
		Kecil	512	256
2	Batu (<i>Cobble</i>)	Besar	256	128
		Kecil	128	64
3	Kerikil (<i>Gravel</i>)	Sangat Kasar	64	32
		Kasar	32	16
		Medium	16	8
		Halus	8	4
		Sangat Halus	4	2
4	Pasir (<i>Sand</i>)	Sangat Kasar	2,000	1,000
		Kasar	1,000	0,500
		Medium	0,500	0,250
		Halus	0,250	0,125
		Sangat Halus	0,125	0,062
5	Lanau (<i>Silt</i>)	Kasar	0,062	0,031
		Medium	0,031	0,016
		Halus	0,016	0,008
		Sangat Halus	0,008	0,004
6	Lempung (<i>Clay</i>)	Kasar	0,0040	0,002
		Medium	0,0020	0,001
		Halus	0,0010	0,0005
		Sangat Halus	0,00050	0,00025

Catatan: *Jangkauan diameter merupakan kelipatan 2

Klasifikasi tanah tergantung pada persentase jumlah kerikil, pasir, lanau, dan lempung. Secara sederhana tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan ukuran diameter butirannya seperti ditunjukkan dalam Tabel 3-4.

Tabel 3-4. Klasifikasi tanah (Canadian Geotechnical Society, 1992)

No.	Jenis Tanah	Ukuran butiran (mm)	
1.	Lempung (<i>clay</i>) → <0.002 mm (< 2 μm)	<0.002	
2.	Lanau (<i>silt</i>) → 0.002 - 0.060		
	- halus (<i>fine</i>)	0.002	0.006
	- medium	0.006	0.020
	- kasar (<i>coarse</i>)	0.020	0.060
3.	Pasir (<i>sand</i>) → 0.060 - 2.000		
	- halus (<i>fine</i>)	0.060	0.200
	- medium	0.200	0.600
	- kasar (<i>coarse</i>)	0.600	2.000
4.	Kerikil (<i>gravel</i>) → 2 - 60		
	- halus (<i>fine</i>)	2	6
	- medium	6	20
	- kasar (<i>coarse</i>)	20	60
5.	Batuan (<i>cobbles</i>) → 60 - 200	60	200
6.	Bongkahan (<i>boulders</i>) → > 200	> 200	> 200

Dari beberapa sumber klasifikasi tanah dapat dilihat dalam Tabel 3-5.

Tabel 3-5. Klasifikasi tanah berdasarkan diameter butiran (mm) (beberapa sumber dalam Nakazawa dan Sosro Darsono, 1984)

Bureau of Soils USDA-1896	Lempung		Lanau	Pasir			Kerikil						
				vf	f	m	c						
			0,005	0,050	0,250		2,000						
ASTM D422-39	Koloid	Lempung	Lanau	Pasir									
					f	c							
JIS A 1204-50	Koloid	Lempung	Lanau	Halus		Kasar							
					Pasir								
			0,005	0,050	0,250		2,000						
MIT-31	Lempung	Lanau			Pasir								
		f	m	c	f	m	c						
DIN 4022-55	Lempung	Lanau			Pasir			Kerikil		Batu besar			
		f	m	g	f	m	g	f	m	g			
BS 1377-61	Lempung	Lanau			Pasir			Kerikil		Batu besar			
		f	m	c	f	m	c	f	m	c			
			0,002	0,020	0,060	0,200	0,600	2,000	6,000	20,000	60,000	76,200	203,000
American Society for Engineering Education-47	Tanah lempung		Lanau		Pasir		Kerikil						
			f	c	f	m	c	f	m	c			
			0,020	0,074	0,250	0,590	2,000	76,200					
AASHO-49	Lanau lempung		Pasir			Kerikil							
			f	c									
Klasifikasi yang dipersatukan-53	Lempung	Lanau	Pasir			Kerikil		Batu besar	Batu bulat				
			f	m	c	f	c						
English-57	Lempung	Lanau	Pasir			Kerikil		Batu besar	Batu bulat				
			f	m	c	f	c						
			0,074	0,210	0,420	0,590	2,000	2,410	4,760	76,200	203,000		
ASTM D422-61T	Koloid	Lempung	Lanau	Pasir			Kerikil		Batu besar	Batu bulat			
					f	m	c	f	c				
			0,005	0,074	0,420	2,000	4,760	76,200	305,000				
JIS A 1201 percobaan & rencana perbaikan-60	Koloid	Lempung	Lanau	Halus		Kasar	Kerikil						
					Pasir								
Pedoman pekerjaan tanah jalan-67	Koloid	Lempung	Lanau	Halus		Kasar	Kerikil						
					sdg								
			0,005	0,074	0,210	0,420	0,590	2,000	75,000				

Batas pembagian yang terpenting dari diameter butir
 0,074 mm 0,420 mm 4,76 mm
 ayakan 200 ayakan 40 ayakan 4

Klasifikasi tanah berdasarkan pada diameter butir (satuan: mm).
 (Vf: sangat halus; f: halus; m: sedang; c: kasar; g: besar)

2. Kerapatan Relatif

Kerapatan relatif/*relative density* (D_r) adalah kerapatan butiran tanah relatif terhadap kepadatan maksimum dan minimum hasil test laboratorium (Lindeburg, 1999). Kerapatan relatif menunjukkan derajat kerapatan dari tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) dan didefinisikan sebagai:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} 100\% \quad 3-11$$

dimana:

- e = angka pori dari contoh tanah yang bersangkutan
- e_{\max} = angka pori terbesar yang bisa dicapai di lab. dengan contoh tanah tersebut (angka pori dalam keadaan paling tidak padat)
- e_{\min} = angka pori terkecil yang bisa dicapai di lab. dengan contoh tanah tersebut (angka pori tanah dalam keadaan paling padat)

Istilah kerapatan ada tiga (Wesley, 1973):

- Lepas (*loose*) $D_r = 0 - 0,33$
- Sedang (*medium*) $D_r = 0,33 - 0,67$
- Padat (*dense*) $D_r = 0,67 - 1$

Angka kerapatan ini penting karena mempengaruhi kekuatan geser dan kompresibilitas dari tanah berbutir kasar tersebut. Di samping itu, menurut Wesley (1973) pada pasir dengan nilai kerapatan relatif yang rendah akan menyebabkan pasir mengalami proses *liquefaction* (proses menjadi cair) bila terkena getaran akibat mesin atau gempa bumi.

3. Ukuran Butiran

a. Ukuran Butiran Efektif d_{10} (*Effective Grain Size*)

Menunjukkan ukuran butiran di mana 10 % dari berat material yang ada lebih kecil daripada ukuran butiran tersebut. Ukuran butiran ini biasanya dipakai sebagai standar untuk kepentingan yang terkait dengan mekanika tanah dan aliran air tanah. Ukuran butiran efektif d_{10} dapat dipakai untuk menghitung konduktivitas hidraulik K .

b. Ukuran Butiran Rata-rata d_{50}

Menunjukkan ukuran butiran di mana 50 % dari berat material yang ada lebih kecil daripada ukuran butiran tersebut.

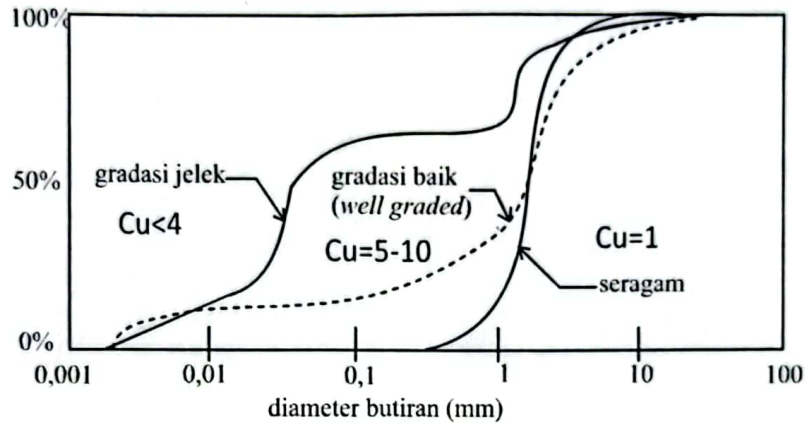
4. Koefisien Keseragaman

Suatu angka yang menunjukkan keseragaman suatu material tanah dilihat dari ukuran butirannya di mana hal ini dapat diformulasikan sebagai C_u (*Hazen uniformity coefficient*):

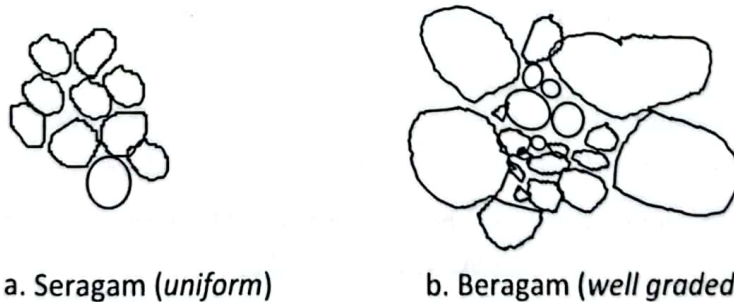
$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad 3-16$$

Dikatakan: seragam (*uniform*) bila nilai $C_u = 1$, tersebar dengan baik (*well graded*) bila nilai $C_u = 5-10$, dan dikatakan bergradasi jelek (*poorly graded*) bila nilai $C_u < 4$.

Secara skematis pengertian tentang nilai-nilai C_u di atas diilustrasikan dalam Gambar 3-10 dan Gambar 3-11.



Gambar 3-10. Ilustrasi kurva diameter butiran seragam dan beragam (Kodoatie, 1996)



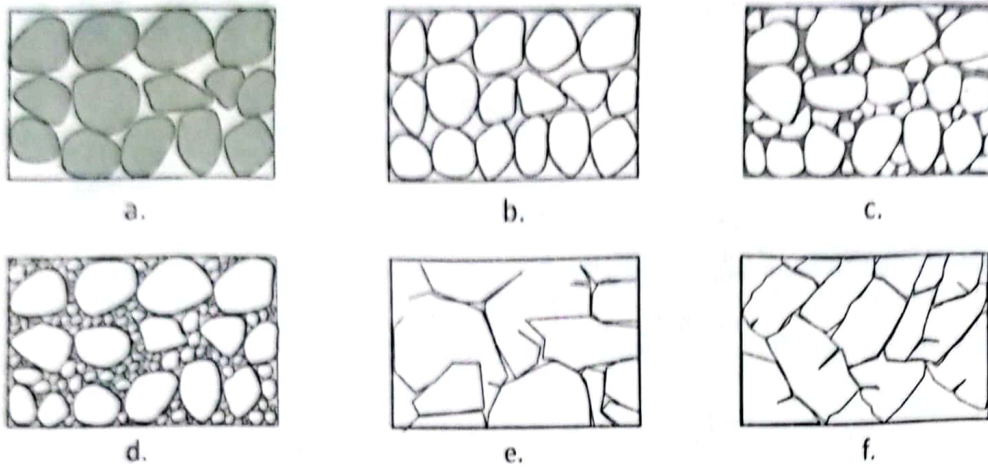
Gambar 3-11. Kondisi material tanah berdasarkan ukuran butirannya (Kodoatie, 1996)

3.7 Gradasi dan Sortir

Umumnya kondisi material tanah untuk berbagai keperluan (pondasi, pemadatan dll.) dipakai kondisi material beragam (*well graded*) seperti ditunjukkan dalam Gambar 3-12. Hal ini disebabkan pada kondisi beragam, pori-pori dari material di antara butirannya dapat diisi dengan ukuran butiran yang lebih kecil. Pada kondisi seperti ini maka pengaruh kadar air terhadap pemadatan akan lebih kecil dibandingkan dengan kondisi material yang seragam. Atau dengan kata lain semakin besar distribusi keseragamannya maka ruang antara butiran (*void space*) akan semakin kecil. Tekstur tanah juga berpengaruh terhadap besaran konduktivitas hidraulik.

Untuk aliran air tanah yang dipakai bukan gradasi namun adalah sortir. Hal ini karena lebih mengarah atau dominan pada air tanah yang bisa lewat atau mengalir diantara material simpanan sedimen (endapan) di suatu lokasi.

Semakin seragam diameter butirannya maka dikatakan sortir baik (*well sorted*) karena ada celah-celah diantara butiran tanah di mana air bisa lewat. Contoh celah batuan dan relasi batuan dengan tekstur porositas ditunjukkan dalam Gambar 3-12.

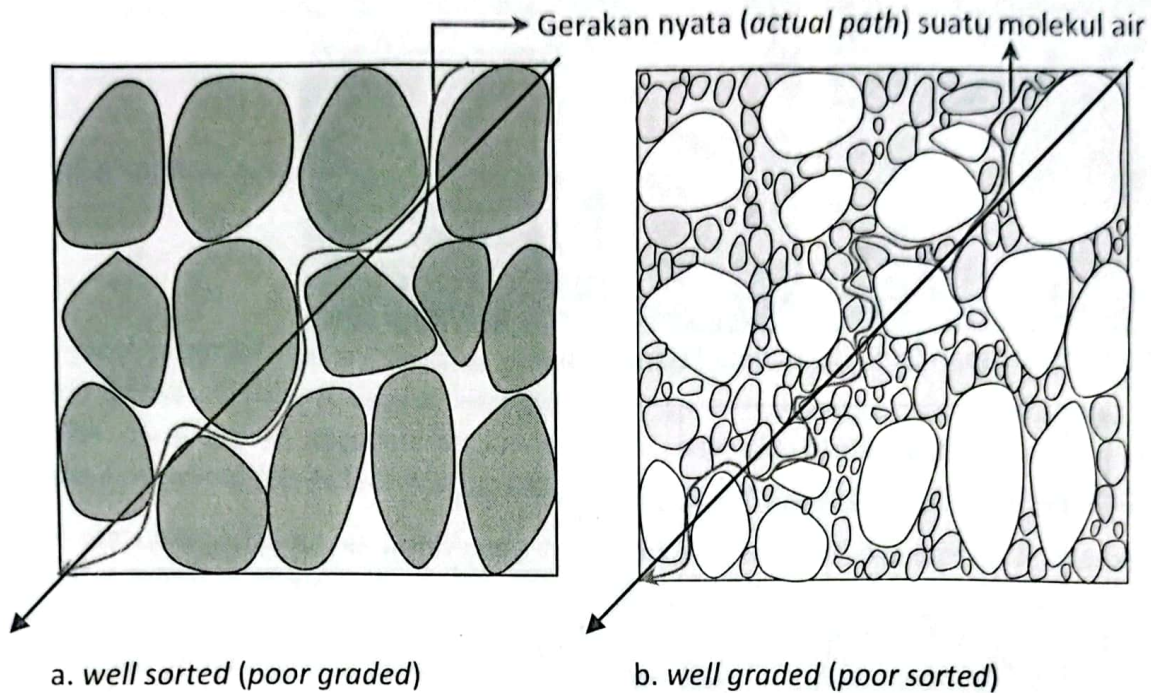


Keterangan gambar:

- a. *well sorted sedimentary deposit with high porosity* (baik untuk menyimpan air)
- b. *well sorted sedimentary deposit consisting of pebbles that are themselves porous*
- c. *well sorted sedimentary deposit whose porosity has been diminished by the deposition of mineral matter in the interstices*
- d. *poorly sorted sedimentary deposit with low porosity*
- e. *rock rendered porous by solution*
- f. *rock rendered porous by fracturing*

Gambar 3-12. Contoh celah (interstices) batuan dan relasi batuan dengan tekstur porositas (Meinzer, 1927a and b)

Perbedaan gerakan air (*groundwater*) untuk kondisi sortir baik dan jelek serta kondisi gradasi baik dan jelek ditunjukkan dalam Gambar 3-13.



Gambar 3-13. Arah aliran air tanah (makro) dan gerakan nyata dari molekul air

Gambar 3-13a adalah penting untuk air tanah (*groundwater*) terkait dengan kapasitas tampung dan gerakan airnya yang besar maka disebut tanah kondisi *well sorted* dengan porositas besar. Sedangkan Gambar 3-13b terhadap air tanah tidak bagus karena tidak dapat tampung dan gerakan air lebih kecil dibanding Gambar 3-13a. Namun untuk kepentingan kestabilan tanah kondisi tanah Gambar 3-13b lebih baik karena tanah lebih stabil.

5. Koefisien gradasi

Nilai distribusi butiran yang lain disebut koefisien gradasi (*coefficient of gradation*) atau koefisien kelengkungan (*coefficient of curvature*) (Linderburg, 1999). Koefisien kelengkungan (C_c) menggunakan diameter 30 % dan 60 % dari butiran sebagai D_{30} dan D_{60} . Didefinisikan sebagai:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

3-17

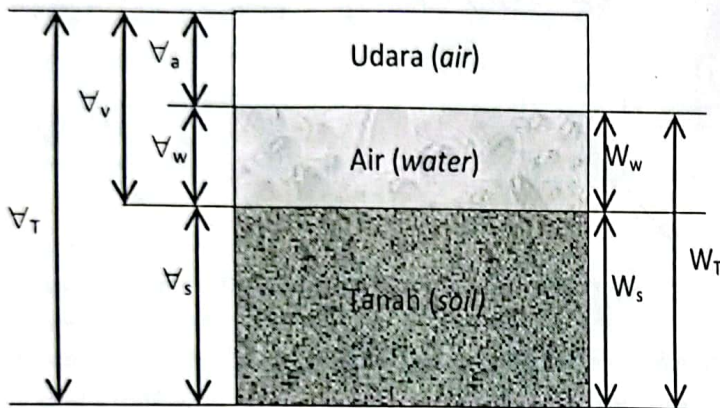
3.8 Karakter Fisik Tanah

Kondisi suatu tanah ditunjukkan dalam Gambar 3-14.



a. Contoh dokumentasi tanah (soil)

b. detail Gambar a



<p>a = air (udara) w = water/air s = soil (dry)/tanah (kering) v = void ∇ = volume T = total</p>	<p>∇_T = vol. Total ∇_v = vol. void ∇_a = vol. udara ∇_w = vol. water ∇_s = vol. Solid</p>	<p>W_w = berat air W_s = berat solid W_T = berat total</p>
---	--	---

b. Skematis kondisi (tersortir) material tanah (soil) secara mekanis

Gambar 3-14. Kondisi suatu tanah (Terzaghi, 1925; Bowles, 1988)

Berdasarkan Gambar 3-14 beberapa karakter fisik tanah diuraikan, diantaranya (Terzaghi, 1925; Bowles, 1988):

- Porositas
- Rasio void
- *Specific yield*
- *Specific retention*
- Kadar air
- Kadar air gravimetri
- Derajat saturasi

3.8.1 Porositas dan Rasio Void

Porositas didefinisikan sebagai perbandingan isi ruang antara butiran (*voids*) dibagi total isi suatu material tanah.

Dari Gambar 3-14 definisi ini dapat diformulasikan seperti berikut ini:

$$n = \frac{V_v}{V_T} = 1 - \frac{V_s}{V_T} \quad 3-18$$

Ada dua jenis porositas yaitu porositas primer dan sekunder. Porositas primer merupakan angka porositas pada proses sebelum batuan menjadi sedimentasi sedangkan yang sekunder merupakan angka porositas pada proses sesudah batuan menjadi sedimentasi bisa berupa larutan (*dissolution*) ataupun fraktur/*fracturing* (Davis & DeWiest, 1966; Freeze & Cherry, 1976; Todd & Mays, 2005).

Porositas merupakan angka tak berdimensi biasanya diwujudkan dalam bentuk %. Umumnya untuk tanah normal n berkisar antara 25 % sampai 75 % sedangkan untuk batuan yang terkonsolidasi (*consolidated rock*) berkisar antara 0 % sampai 10 %. Melihat dari diameter butiran material dapat disimpulkan bahwa untuk material dengan diameter kecil memiliki porositas besar. Hal ini dapat dilihat dengan besarnya porositas untuk jenis tanah di bawah ini (Kodoatie, 1996):

- kerikil —→ porositas n berkisar antara 25 - 40 %
- pasir —→ porositas n berkisar antara 25 - 50 %
- lanau —→ porositas n berkisar antara 35 - 50 %
- lempung —→ porositas n berkisar antara 40 - 75 %

Di samping itu dapat dikatakan pula untuk tanah berbutir halus mempunyai porositas yang lebih besar dibandingkan dengan tanah berbutir kasar. Untuk jenis material seragam porositas lebih besar dibandingkan dengan material beragam (*well graded material*).

Berdasarkan nilai porositas mungkin akan disimpulkan bahwa material dengan diameter lebih halus akan mengalirkan air yang lebih banyak dibandingkan dengan material berdiameter lebih besar. Hal ini tak selamanya benar karena untuk material halus maka secara fisik ada dua gaya molekul yang berpengaruh yaitu gaya adhesi (gaya untuk tarik menarik dua molekul dengan zat yang berbeda) dan gaya kohesi (gaya tarik menarik molekul antara dua zat yang sama).

Akibat adanya dua gaya tersebut maka air yang tersimpan dalam suatu akuifer berupa suatu lembaran sangat tipis (*film*) mempunyai mempunyai dua sifat atau karakter berbeda yang bekerja secara bersama-sama yaitu:

- Air yang dapat mengalir secara gravitasi yang disebut dengan *specific yield* (lihat uraian dalam Sub-Bab 3.8.2). Sering disebut juga dengan porositas efektif.
- Air yang tertahan (*retained*) pada suatu material akuifer berupa *film* atau material akuifer mempunyai bukaan yang sangat kecil. Kondisi tertahannya air tersebut disebut sebagai *specific retention* (lihat uraian dalam Sub-Bab 3.8.3).

Porositas memberikan distribusi yang penting untuk menentukan nilai konduktivitas hidraulik K . Umumnya, tanah dengan porositas n besar juga mempunyai nilai K yang besar. Namun hal ini tidak berlaku basis regional jenis/ragam batuan dan tanah, misalnya; lempung dengan nilai porositas yang lebih besar dari pasir namun mempunyai nilai K yang lebih kecil.

Void Ratio dapat didefinisikan sebagai perbandingan isi ruang antar butiran tanah (V_v) terhadap isi butiran tanah (V_s) (lihat Gambar 3-14). Bila dirumuskan dapat ditulis:

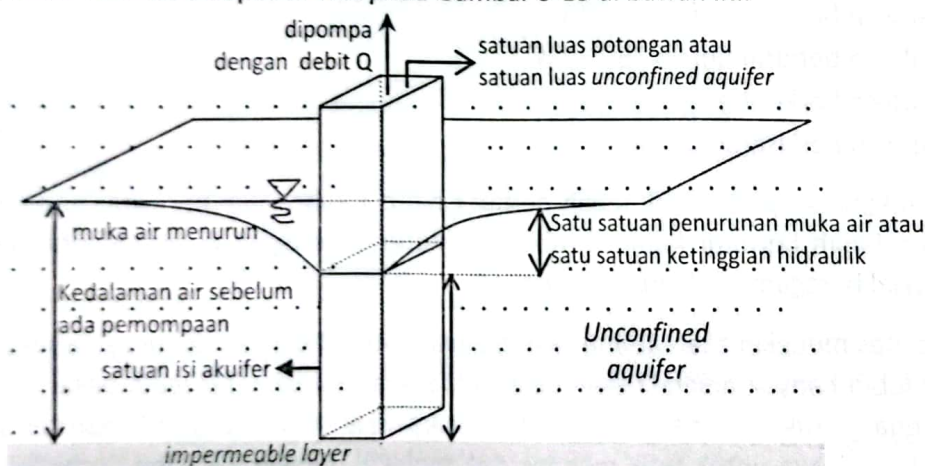
$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1-n}$$

3-19

3.8.2 Specific Yield (S_y)

Parameter tumpangan spesifik S_o digunakan untuk akuifer yang dibatasi oleh dua lapisan kedap air seperti yang terjadi pada *confined aquifer*. Pada kondisi dimana lapisan kedap airnya hanya satu yaitu pada *unconfined aquifer*, parameter tumpangan dikenal dengan sebutan *specific yield* (S_y). Definisinya ialah isi (*volume*) air yang keluar dari tumpangan (satuan isi akuifer) oleh satuan luas dari *unconfined aquifer* akibat satu unit penurunan dari muka air (*water table*). Atau rasio volume air yang keluar secara gravitasi dengan volume total tanah.

Secara skematis dapat dilihat pada Gambar 3-15 di bawah ini.

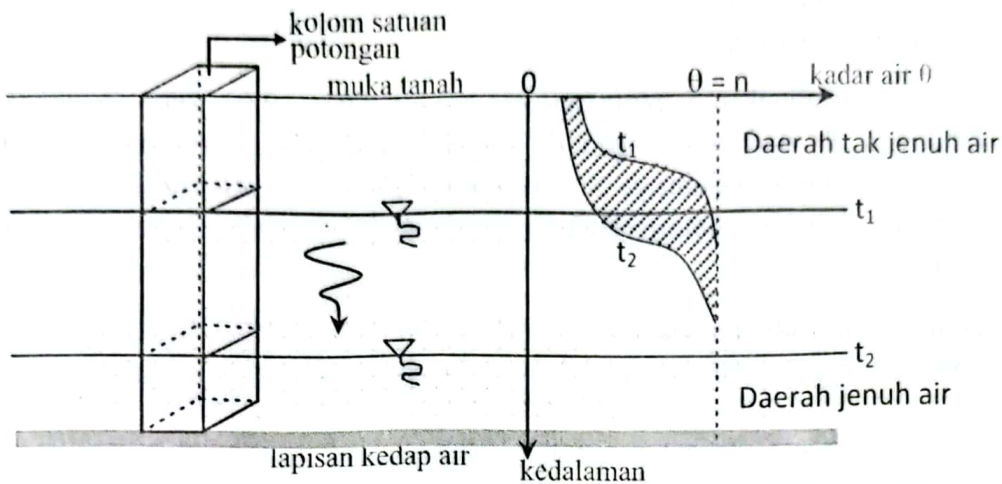


Gambar 3-15. Skematis pengertian Specific Yield S_y
(Ferris et al., 1962; Freeze & Cherry, 1979; Kodoatie, 1996; Birdie & Birdie, 2002)

Pengertian *Specific Yield* dapat juga dijelaskan berikut ini. Pada *unconfined aquifer*, muka air tanah berfungsi sebagai batas daerah jenuh air dan daerah tak jenuh air. Di daerah tak jenuh air, kadar air (θ) merupakan perbandingan isi air dengan total isi material tanah dan selalu lebih kecil dari porositas n ($\theta < n$). Pada muka air tanah dan di daerah jenuh air besarnya $\theta = n$.

Gambar 3-16 menunjukkan letak muka air tanah dari waktu t_1 sampai t_2 serta profil hubungan kadar air dan kedalaman di daerah tak jenuh air pada waktu t_1 dan t_2 . Daerah yang diarsir menunjukkan

jumlah volume air dikeluarkan dari simpanan dalam kolom satuan potongan. Bilamana turunnya muka air merupakan satuan penurunan maka daerah yang diarsir juga disebut *specific yield*.



Gambar 3-16. *Specific Yield* dilihat dari kadar air (Freeze & Cherry, 1979; Kodoatie, 1996)

Specific yield merupakan kapasitas jenuh batuan untuk membuang air dengan gaya gravitasi (Karanth, 1987).

Menurut Johnson (1967) nilai *specific yield* tergantung dari jenis tanah. Nilai rata-rata *specific yield* untuk masing-masing jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 3-6.

Tabel 3-6. Nilai rata-rata *Specific Yield* (Fetter, 1994)

No.	Material	<i>Specific Yield</i>		
		Maximum	Minimum	Rata-rata
1	Clay (lempung)	5	0	2
2	Sandy clay (lempung kepasiran)	12	3	7
3	Silt (lanau)	19	3	18
4	Fine sand (pasir halus)	28	10	21
5	Medium sand (pasir sedang)	32	15	26
6	Coarse sand (pasir kasar)	35	20	27
7	Gravelly sand (pasir berkerikil)	35	20	25
8	Fine gravel (kerikil halus)	35	21	25
9	Medium gravel (kerikil sedang)	26	13	23
10	Coarse gravel (kerikil kasar)	26	12	22

Semua air dalam batuan jenuh tidak dapat diambil dalam waktu satu kali. Pada titik awal pengambilan, sebagian besar akan melebar membentuk celah yang lebih lebar. Ini berlangsung cepat tetapi akan melambat secara perlahan, sehingga *specific yield* meningkat terhadap waktu (Meinzer, 1923). Jumlah air yang dapat diambil dari batuan atau tanah tergantung pada suhu, kandungan kimia dalam air yang berpengaruh pada viskositas, tegangan permukaan, *specific gravity* (Meinzer, 1923).

Nilai S_y jauh lebih besar dibandingkan S yaitu berkisar antara 0,01-0,03. Nilai S_y yang besar menunjukkan bahwa keluarnya air dari tampungan di *unconfined aquifer* merupakan *dewatering*

langsung dari pori-pori tanah sedangkan keluarnya air dari tampungan di *confined aquifer* merupakan efek sekunder dari ekspansi air dan pemadatan akuifer yang disebabkan adanya perubahan tekanan fluida ($\rho g \Psi'$) (Freeze dan Cherry, 1979). Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa *unconfined aquifer* lebih efisien sebagai sumber air dibandingkan dengan *confined aquifer*. Untuk nilai debit yang sama hanya dibutuhkan ketinggian hidraulik yang lebih kecil.

Nilai S_y jauh lebih besar dibandingkan S yaitu berkisar antara 0,01 – 0,03. Nilai S_y yang besar menunjukkan bahwa keluarnya air dari tampungan di *unconfined aquifer* merupakan *dewatering* langsung dari pori-pori tanah sedangkan keluarnya air dari tampungan di *confined aquifer* merupakan efek sekunder dari ekspansi air dan pemadatan akuifer yang disebabkan adanya perubahan tekanan fluida ($\rho g \Psi'$) (Freeze & Cherry, 1979).

Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa *unconfined aquifer* lebih efisien sebagai sumber air dibandingkan dengan *confined aquifer*. Untuk nilai debit yang sama hanya dibutuhkan ketinggian hidraulik yang lebih kecil.

3.8.3 Specific Retention (S_R)

Specific retention merupakan kapasitas jenuh batuan untuk menahan air setelah drainase, di mana volume air tertahan merupakan persentase dari total volume batuan. Jumlah air yang akan dibuang dari batuan tergantung pada durasi drainase, temperatur, kandungan kimia, dan sifat fisik batuan (Karanth, 1987).

Menurut Meinzer (1923), *specific retention* suatu batuan atau tanah adalah perbandingan antara volume air yang terkandung dalam batuan yang tidak dapat mengalir secara gravitasi dengan volume total batuan. Atau rasio volume tertahan yang tidak dapat mengalir secara gravitasi dengan volume total tanah (Birdie & Birdie, 2002).

Specific retention dapat ditentukan di laboratorium dengan menyediakan kolom jenuh dari tanah untuk membuang di bawah gravitasi untuk periode yang cukup lama sampai drainase tidak terjadi lagi, sehingga dapat ditentukan volume sisa dan hubungannya dengan volume total tanah (Karanth, 1987).

Dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S_R = \frac{100V_c}{V}$$

3-20

dimana:

S_R = *specific retention*, dalam persen

V_c = volume air yang terkandung karena gravitasi (m^3)

V = volume total batuan (m^3)

Selain cara di atas, dapat juga dilakukan dengan menggunakan alat *centrifuges*. Sampel jenuh air dan subyek diputar selama satu jam dengan putaran rata-rata mencapai 1000 kali dari gaya gravitasi. Presentasi volume merupakan hasil perkalian antara kandungan sisa, kandungan yang ada di alat

contrifuge (moisture equivalent), berat kering material dan dibagi oleh berat air yang terkandung, dapat dirumuskan sebagai berikut (Karanth, 1987):

$$S_r = M_e N_e \frac{\rho_d}{\rho_w} \tag{3-21}$$

dimana:

- S_r = *specific retention*, dalam persen volume
- M_e = *moisture equivalent*, dalam persen berat
- N_e = ratio S_r/M_e (*specific retention/moisture equivalent*)
- ρ_d = *dry density* (kg/m^3)
- ρ_w = *density of water* (kg/m^3)

3.8.4 Porositas, Specific Retention dan Specific Yield

Dari uraian-uraian dalam Sub-Bab 3.8.1, Sub-Bab 3.8.2 dan Sub-bab 3.8.3 maka dapat disimpulkan bahwa porositas batuan merupakan penjumlahan antara *specific yield* dan *specific retention* seperti ditunjukkan dalam Tabel 3-7.

Tabel 3-7. Harga porositas, specific yield, dan specific retention (Meinzer, 1923)

No.	Material	Porositas 1 = 2 + 3	<i>Specific yield</i> 1	<i>Specific retention</i> 2
1	Tanah (<i>soil</i>)	55	40	15
2	Lempung (<i>clay</i>)	50	2	48
3	Pasir (<i>sand</i>)	25	22	3
4	Kerikil (<i>gravel</i>)	20	19	1
5	Batu gamping	20	18	2
6	Batu pasir (semi padu)	11	6	5
7	Granit	0,1	0,09	0,01
8	Basalt (muda)	11	8	3

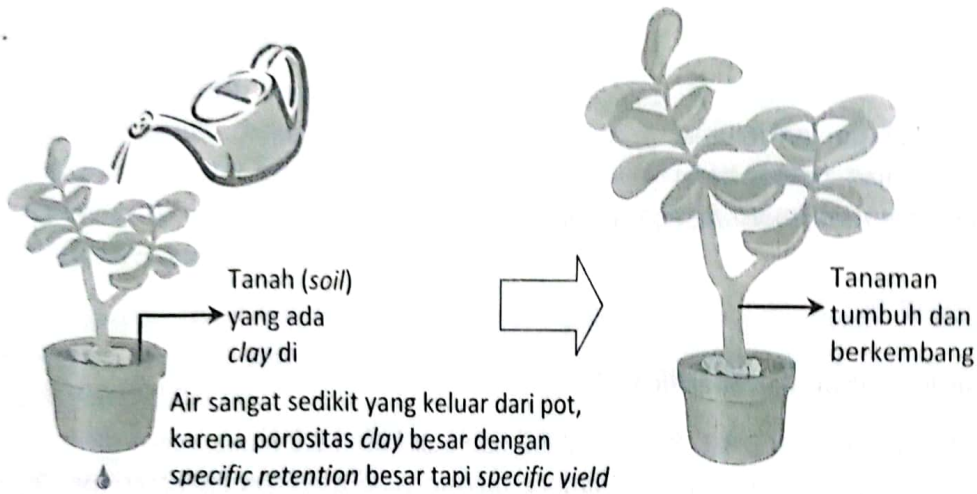
Semua air dalam batuan jenuh tidak dapat diambil dalam waktu satu kali. Pada titik awal pengambilan, sebagian besar akan melebar membentuk celah yang lebih lebar. Ini berlangsung cepat tetapi akan melambat secara perlahan, sehingga *specific yield* meningkat terhadap waktu (Meinzer, 1923). Jumlah air yang dapat diambil dari batuan atau tanah tergantung pada suhu, kandungan kimia dalam air yang berpengaruh pada viskositas, tegangan permukaan, dan *specific gravity* (Meinzer, 1923).

Dari Tabel 3-7 dapat dilihat material dengan diameter yang lebih halus (misal lempung) mempunyai porositas besar namun sekaligus juga mempunyai *specific retention* yang besar dan *specific yield* yang kecil. Sebaliknya material dengan diameter yang lebih besar mempunyai porositas kecil namun sekaligus juga mempunyai *specific retention* yang kecil dan *specific yield* yang besar.

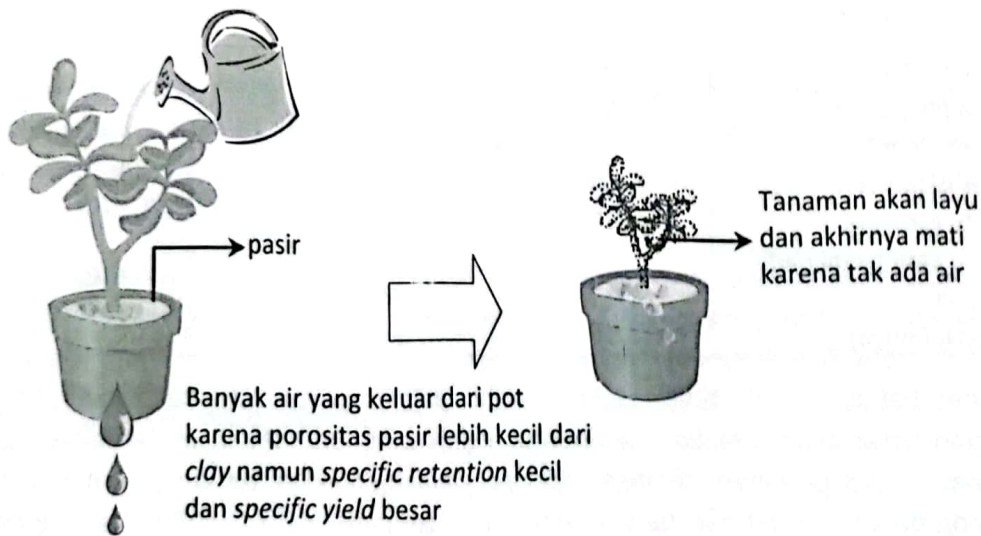
Sebagai contoh: lempung mempunyai porositas 50 dan lebih besar dari pasir, namun *specific retention*nya adalah 48 (tertahan) dan *specific yield*nya atau terbuang (*drained*) secara gravitasi hanya 2. Berarti material lempung ini mempunyai banyak air. Sedangkan pasir dengan porositasnya 25 lebih kecil

dari porositas lempung, namun *specific retention*nya hanya 3 (tertahan) dan *specific yield*nya atau yang terbuang secara gravitasi 22. Berarti material pasir ini hanya mengandung air sangat sedikit.

Salah satu contoh di lapangan adalah pot bunga yang diilustrasikan dalam Gambar 3-17.



- a. Pot bunga berisi tanah yang ada lempungnya (*clay*) disirami, air akan tertahan di dalam pot, bila ada yang mengalir dari bawah pot jumlahnya sangat sedikit. Karena bisa menyerap air maka tanaman akan tumbuh dan berkembang.



- b. Pot bunga yang berisi pasir disirami, air akan mengalir dari bawah pot dengan volume yang banyak, dan air yang tertinggal dalam pot sangat sedikit. Tumbuhan kekurangan air → tanaman akan layu dan akhirnya mati.

Gambar 3-17. Ilustrasi pot bunga yang berisi tanah (soil) mengandung lempung dan pot bunga yang berisi pasir

Gambar 3-17a menunjukkan bahwa air tertahan di dalam pot berisi tanah yang ada lempungnya, karena ada *specific retention* yang besar maka banyak air tertahan dan tidak keluar secara gravitasi. Sedangkan Gambar 3-17b air banyak yang keluar secara gravitasi dan hanya sedikit sekali air yang

tertinggal dalam pot berisi pasir. Akibatnya tanaman akan layu dan akhirnya mati karena tak ada air (lihat Tabel 3-7 untuk nilai porositas, *specific yield* dan *specific retention*).

Dari uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa material yang sangat halus seperti lempung walau mempunyai porositas air lebih besar daripada material yang lebih kasar (pasir) namun mempunyai *specific retention* besar (menahan air) dengan *specific yield* (mengalirkan secara gravitasi) kecil yang tak dapat membatasi kemampuan lempung tersebut untuk memenuhi air pada suatu wadah air dalam tanah (misal sumur).

Perlu juga dipahami perbedaan antara porositas dan permeabilitas (konduktivitas hidraulik) yang keduanya telah diuraikan berturut-turut dalam Sub-Bab 3.4 untuk konduktivitas hidraulik dan Sub-Bab 3.8.1 untuk porositas.

3.8.5 *Safe Yield* dan *Sustained Yield*

Yield Capacity adalah kemampuan maksimum dalam memberikan sejumlah air suatu akuifer atau cekungan. Dengan mengetahui nilai *yield capacity* maka jumlah sumber air tanah yang secara pasti diambil dalam jumlah tertentu secara kuantitatif dapat dihitung (*Safe Yield*).

Salah satu cara menganalisis kemampuan sumber air tanah di suatu akuifer adalah tes pemompaan. Berdasarkan prinsip-prinsip *Porous Media Hydraulic* serta sifat-sifat fisik dari kondisi tanah maka aliran, kapasitas, dan kemampuan air tanah pada formasi geologi suatu akuifer dapat diketahui dan dianalisis kuantitasnya.

Safe yield (serahan aman atau disebut juga serahan ajek (*perennial yield*)) dapat didefinisikan sebagai nilai yang menunjukkan jumlah air yang dapat diambil secara terus menerus atau konstan untuk kebutuhan manusia, tanpa merusak kuantitas dan kualitas air tanah yang asli atau menciptakan suatu akibat yang tidak diinginkan seperti kerusakan lingkungan. Kerugian atau dampak buruk dari pengembangan air tanah ini antara lain seperti intrusi air laut, amblesan tanah, dll. *Safe yield* sering juga didefinisikan sebagai jumlah maksimum dari air yang dapat diambil secara menerus dari CAT tanpa dampak yang merugikan. Serahan aman ditentukan untuk sebuah tatanan kondisi spesifik suatu pengoperasian pengambilan air tanah. Beberapa perubahan kondisi spesifik tertentu seperti perubahan kondisi ekonomi, tata guna lahan, atau pemasukan suplai air yang baru, memerlukan perhitungan yang tepat (ASCE, 1987).

Safe yield adalah sejumlah air tanah yang dapat dipompa secara terus menerus tanpa membahayakan atau mengakibatkan terjadinya penurunan tampungan pada akuifer dengan mempertimbangkan beberapa hal, antara lain: perkembangan ekonomi air tanah itu sendiri, perlindungan terhadap kualitas air tanah, hukum, dan pengawasan terhadap degradasi lingkungan (ASCE, 1987; Fetter, 1994; Lee, 1915; Meinzer, 1923; Conkling, 1946; Banks, 1953).

Maximum safe yield adalah jumlah maksimal dari air yang tersedia terus menerus dalam waktu yang lama. Pada analisis akhir, serahan aman maksimum tergantung pada nilai air secara ekonomis (termasuk legalitas dan politik) yang tersedia dan dapat digunakan. Oleh karena itu hal ini tidak pasti,

karena dengan adanya tampungan akuifer yang memadai dan biaya yang cukup, pembangunan dan pengelolaan pengambilan air menjadi bagian dari manajemen air tanah.

Istilah *sustained yield* banyak digunakan oleh Thomas (1957) ketika melakukan penelitian pada akuifer dan sumur. Akuifer biasanya merupakan dasar dari dataran banjir dari sungai besar dan mempunyai kontak hidrolik dengan air pada sungai. *Sustained yield* adalah nilai minimum dari pemompaan berkelanjutan untuk seluruh kondisi pelepasan dari sungai (termasuk temperatur) oleh sumur khusus yang berada pada akuifer alluvial.

Sustained yield bukan jumlah yang tepat, hal ini dapat diubah oleh kebijakan manajemen air tanah, jika hasil dari konstruksi dan operasi sumur injeksi tidak ada. Sumur tambahan dapat dibangun/dibuat dan dioperasikan, pengurangan evapotranspirasi, dan *yield* pada sistem (dengan mengasumsikan permeabilitas dan area dasar sungai tidak membatasi pengisian alami) dapat ditingkatkan, walaupun perkembangannya kecil, lebih mahal (Canover, 1954).

3.8.6 Kadar Air (Water Content) θ

Kadar Air didefinisikan sebagai perbandingan isi air dengan total isi material tanah. Formulasnya:

$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \times 100\% \quad 3-22$$

3.8.7 Kadar Air Gravimetri (Gravimetry Water Content)

Kadar air gravimetri didefinisikan sebagai perbandingan berat air dengan total berat material tanah. Formulasnya:

$$w_g = \frac{W_w}{W_T} \quad 3-23$$

3.8.8 Derajat Saturasi

Derajat saturasi didefinisikan sebagai perbandingan air dengan isi ruang antar butiran material (*voids*). Formulasnya:

$$s = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w / V_T}{V_v / V_T} = \frac{\theta}{n} \quad 3-24$$

Nilai s maksimal = 1. Dari Persamaan 3-24 dapat dikatakan:

- Bila $s = 1$ atau $\theta = n$, maka tanah dikatakan jenuh air (*saturated*).
- Kadar air lebih kecil atau sama dengan porositas $\rightarrow \theta \leq n$

3.9 Tanah Berbutir Halus (Lempung dan Lanau)

Seperti telah diuraikan sebelumnya untuk tanah berbutir halus dengan diameter butiran < 0,075 mm, sifat-sifat tanahnya tidak lagi tergantung dari ukuran butirnya. Karena untuk tanah lempung dan lanau, komposisi zat mineral yang terkandung didalamnya lebih menunjukkan sifat-sifat dari material tanah tersebut. Untuk mengetahui sifat-sifat material tanah tersebut tidak lagi berdasarkan *grain size analysis*, namun dengan cara penentuan batas-batas plastisitasnya.

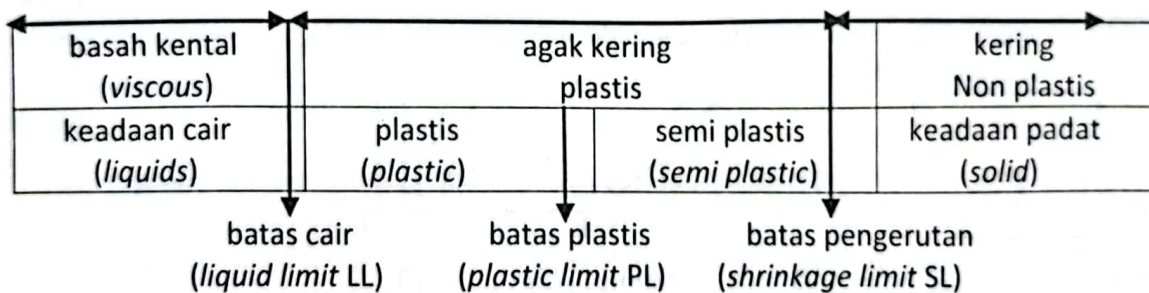
3.9.1 Batas-Batas Atterberg

Di dalam laboratorium analisis untuk tanah berbutir halus dikenal dengan percobaan Batas-Batas Atterberg. Prinsip dari percobaan ini ialah mengetahui proses pengeringan tanah berbutir halus dari keadaan batas sampai ke keadaan kering. Proses dibagi menjadi empat keadaan: cair, plastis, semi plastis dan padat. Gambar 3-18 menunjukkan proses tersebut (Wesley, 1973).

Batas pengerutan SL (*shrinkage limit*) adalah batas kadar air di mana tidak ada lagi pengurangan volume untuk proses pengeringan selanjutnya. Indek plastis PI diformulasikan sebagai berikut:

$$PI = LL - PL$$

3-25



Gambar 3-18. Ilustrasi tanah dari keadaan basah ke keadaan kering (Wesley, 1973)

Indek cair LI diformulasikan sebagai berikut:

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL} = \frac{w - PL}{PI}$$

3-26

di mana: w = kadar air normal

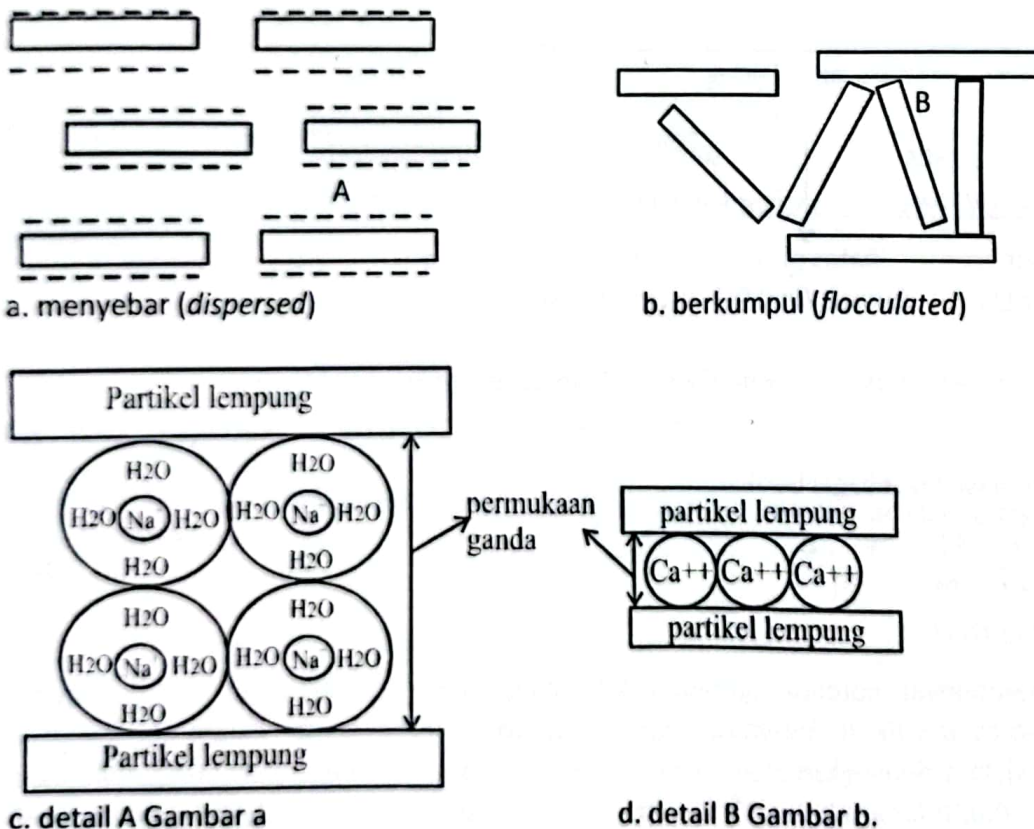
Indeks plastis mempunyai korelasi terhadap kekuatan, deformasi properti, dan sensitivitas (Lindeburg, 1999). Indeks plastik IP umumnya dipakai untuk korelasi faktor dalam menentukan parameter sudut geser dalam. Sedangkan indeks cair LI berkisar antara 0 sampai 1 yang mengindikasikan kadar air berada pada kondisi antara batas plastik dan batas cair. Bila indeks mendekati 0 maka tanah dapat dikatakan tanah keras, dan bila mendekati 1 maka tanah dikatakan lembek. Bilamana LI > 1, ada kemungkinan tanah menjadi cair pada kondisi gumpalan (*shock*) yaitu kondisi kadar air yang lebih besar

dari pada batas cair LL. Di lapangan hal ini tampak nyata pada waktu diadakan pemancangan tiang atau lewatnya suatu benda (kendaraan) yang berat di atas tanah tersebut.

Batas cair dan batas plastis tidak dapat langsung memberikan angka-angka yang digunakan dalam perhitungan desain. Hasilnya hanya memberikan gambaran umum tentang sifat-sifat tanah. Bila LL besar maka nilai kompresibilitasnya tinggi sehingga kekuatan daya dukungnya rendah. Untuk kepentingan analisis aliran air tanah dapat dipakai sebagai masukan dalam perhitungan konduktivitas hidraulik ataupun storativitas suatu akuifer.

3.9.2 Lempung (Clay)

Bilamana suatu material tanah didominasi oleh lempung, maka struktur dari tanah itu menjadi masalah yang penting (Baver et al., 1972). Lempung adalah komposisi dari partikel mineral *elongate* berdimensi koloid, yang umumnya ukurannya kurang dari 2 μ (Gillott, 1968). Struktur ini tergantung dari penyusunan partikel-partikel lempung. Berdasarkan jenis ion yang terserap ke lempung tersebut, partikel-partikel dapat menyebar (*dispersed*) secara individual atau dapat menyatu (*flocculated*) membentuk kumpulan-kumpulan partikel lempung dan satuan-satuan struktur (*soil aggregates*) yang berukuran kurang lebih beberapa milimeter (Gambar 3-19).



Gambar 3-19. Tipe struktur tanah (Bouwer, 1978)

Lempung dikatakan menyebar atau menyatu tergantung dari bagaimana jauhnya partikel-partikel lempung secara individual terpisah satu sama lainnya oleh ketebalan dari kation yang terserap mengelilingi setiap partikel lempung (Olphen, 1963).

Perbedaan struktur tanah pada kondisi *dispersed* dan *flocculated* dapat diuraikan dalam Tabel 3-8 berikut ini:

Tabel 3-8. Perbedaan struktur tanah pada kondisi *dispersed* dan kondisi *flocculated* (Kodoatie, 1996)

<i>Dispersed</i>	<i>Flocculated</i>
1. kurang <i>permeable</i>	1. lebih <i>permeable</i>
2. lebih termampatkan	2. kurang termampatkan
3. struktur jelek	3. struktur bagus; tanah dengan tekstur kasar (<i>coarse</i>)
4. ada kecenderungan menutup	4. lebih mudah pecah (<i>friable</i>) mudah remuk menjadi bubuk
5. lengket dan tak berbentuk	5. sebagai pelindung/penutup partikel lempung yang lebih baik
6. menjadi keras selama pengeringan	

Untuk air asin dengan salinitas rendah kondisi *dispersed* baik karena dapat sebagai penguat ion. Namun bila kadar salinitas tinggi maka lebih baik kondisi *flocculated*. Pada lempung yang berkondisi menyebar (*dispersed*) dapat dirubah menjadi kondisi berkumpul (*flocculated*) yaitu dengan merubah kation Na^+ menjadi Ca^{++} atau Mg^{++} . Hal ini dapat dilakukan dengan memberikan larutan garam Ca ke tanah.

Lempung dengan kondisi *flocculated* adalah baik untuk pertanian sehingga air irigasi tidak boleh mengandung unsur Na^+ karena akan menyebabkan lempung menjadi *dispersed* dan struktur tanah menjadi jelek. Salah satu contoh seperti dikemukakan dalam *Groundwater Newsletter* (1974) adalah kerusakan berpuluh-puluh hektar tanah pertanian (*the destruction of acres of prime farm land*) di suatu daerah di Kanada.

Sebuah kereta api tergelincir dan menyebabkan tumpahnya suatu unsur kimia asam ke daerah pertanian tersebut. Sebagai penetral diberikan *sodium carbonat* dan *sodium hydrochloride* untuk meningkatkan pH dari tanah. Sebagai penetral *sodium* tersebut berfungsi dengan baik, namun tanah yang tadinya berisi lempung berkondisikan *flocculated* menjadi lempung kondisi *dispersed* akibat banyaknya kation Na^+ sehingga struktur tanah menjadi jelek untuk pertanian.

Tanah yang dipenuhi oleh air asin, lempungnya dapat mempunyai kondisi *dispersed* ataupun *flocculated* tergantung besarnya kadar garam di dalam air asin tersebut (Bouwer, 1978). Pada tanah dengan air asin ($NaCl$) yang tinggi, lempung masih dapat berkondisi *flocculated* karena besarnya $NaCl$ ini memberikan distribusi terhadap tingginya kekuatan ion dari tanah tersebut yang menekan permukaan ganda antar partikel lempung sehingga partikel-partikel lempung masih dapat saling berdekatan. Gaya tarik Van der Waals lebih dominan dan partikel-partikel lempung masih menyatu/berkumpul (*flocculated*). Terjadinya perubahan tanah tersebut ke bentuk *dispersed* yaitu bilamana ada air tawar yang cukup besar (dari hujan) yang menggenangi tanah tersebut sehingga menyebabkan berkurangnya

air asin atau kadar NaClnya menurun. Bila hal ini terjadi unsur kapur atau CaCl harus ditambahkan pada tanah tersebut untuk memperkecil kerusakan tanah.

Bilamana kation yang ada di permukaan ganda itu didominasi dengan Na⁺ maka antar partikel lempung tidak dapat saling berdekatan karena partikel Na⁺ dikelilingi oleh molekul air (partikel Na⁺ ini mengalami proses hidrasi) sehingga terjadi proses penyebaran/ *dispersed condition*. Proses ini sudah akan terjadi bila kation yang terserap di dalam permukaan ganda berisi 10 sampai 20 % partikel Na⁺ (lihat Gambar 3-19c). Gaya listrik (gaya tolak) dalam kondisi ini melebihi gaya Van der Waals (gaya tarik). Sebaliknya bilamana permukaan ganda pada lempung dipenuhi atau didominasi partikel Ca⁺⁺, maka antar partikel lempung akan saling berdekatan karena partikel Ca⁺⁺ (kation) akan menarik partikel lempung (ion) sehingga terjadi proses pengumpulan (*flocculated condition*).

Beberapa karakteristik mineral lempung ditunjukkan dalam Tabel 3-9 dan Tabel 3-10.

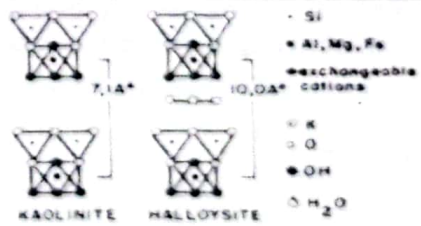
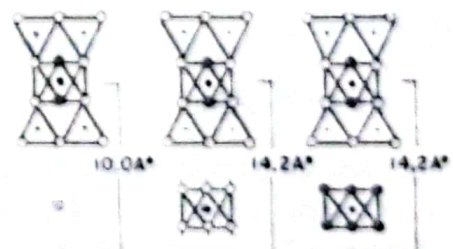
Tabel 3-9. Karakteristik mineral-mineral lempung (Hunt, 1984)

No.	Mineral	Asal	Aktivitas	Partikel
1	Kaolinite	Pelapukan kimia dari Feldspar, Penguraian akhir dari <i>micas</i> dan <i>pyroxenes</i> pada lembab iklim atau kondisi <i>well drained</i> . Unsur utama pada tanah lempung di daerah lembab-sedang dan lembab-tropis.	Rendah. Relatif stabil material di dalam keberadaan air.	<i>Platy</i> tapi tidak halus
2	Halloysite*	Mirip dengan kaolinite, tapi berasal dari feldspars dan mica. (Terutama batuan <i>sialic</i>)	Rendah, kecuali properti dengan perubahan yang radikal karena pengeringan yang intensif. Proses tidak <i>reversible</i> .	<i>Rodlike</i> unit yang memanjang atau silinder yang berlubang.
3	Illite	Unsur utamanya beberapa <i>clay shales</i> , sering dengan montmorillonite.	Intermediate antara kaolinite dengan montmorillonite.	Lapisan-lapisan tipis
4	Montmorillonite (smectile)	Pelapukan kimia dari olivine (<i>mafic rocks</i>). Pelapukan sebagian dari <i>micas</i> dan <i>pyroxene</i> pada curah hujan rendah atau lingkungan dengan drainase yang jelek. Unsur utamanya marine dan lempung <i>shales</i> . Perubahan batuan ketika terjadi geser karena patahan. Debu vulkanik.	Kembang susut yang besar dan merupakan mineral lempung paling menimbulkan masalah pada lereng dan bawah pondasi. Digunakan sebagai agen impermeabel.	Pada mikroskop elektron terlihat seperti masa potongan daun selada yang halus.

*Pada test pemadatan *halloysites*. Kepadatan tertinggi (maksimal) didapat pada material kering udara dan kemudian dibawa kembali pada kadar air yang diperlukan, lalu dengan material pada kadar air alami baik salah satunya basah atau kering pada kadar air yang dibutuhkan (Gibbs et al., 1960). Maka dari itu, ketika *halloysites* digunakan sebagai material tanggul, prosedur tes harus diduplikasi dengan prosedur penempatan di lapangan.

Tabel 3-10. Klasifikasi Mineral Lempung (Morin & Tudor, 1975)

No.	Layers	Expansion	Group	Species
	1	2	3	4
1	Two-Sheet	Non-Swelling	Kaolinite	Kaolinite
				Dickite
				Nacrite
		Non-Swelling & Swelling	Halloysite	Halloysite
				Metahalloysite
				Montmorillonite
Swelling	Montmorillonite (Smectite)	Beidellite		
		Nontronite		
2	Three-Sheet (2:1)	Non-Swelling	Illite (Hydromica)	Illite-Varieties
		Swelling		Vermiculite
3	Three-Sheet + One-Sheet (2:2)	Non-Swelling	14a-Chlorite (Normal Chlorite)	Chlorite-Varieties

No.	Species	Crystallochemical Formula	Structure (Schematic)
	4	5	6
1	Kaolinite Dickite Nacrite	$Al_4(OH)_8[Si_4O_{10}]$	
	Halloysite	$Al_4(OH)_8[Si_4O_{10}](H_2O)_4$	
	Metahalloysite	$Al_4(OH)_8[Si_4O_{10}](H_2O)_2$	
	Montmorillonite	$\{(Al_{2-x}Mg_x)(OH)_2[Si_4O_{10}]\}^x NO_x \cdot nH_2O$	
	Beidellite	$\{(Al_2(OH)_2[Al,Si]_4O_{10})\}^x NO_x \cdot nH_2O$	
	Nontronite	$\{(Fe_{2-x}Mg_x)(OH)_2[Si_4O_{10}]\}^x NO_x \cdot nH_2O$	
	2	Illite-Varieties	$(K,H_3O)Al_2(H_2O,OH)_2[AlSi_3O_{10}]$
Vermiculite		$(Mg,Fe)_3(OH)_2[AlSi_3O_{10}]Mg(H_2O)_4$	
3	Chlorite-Varieties	$(Al,Mg,Fe)_3(OH)_2[AlSi_4O_{10}]Mg_3(OH)_6$	

3.10 Kompresibilitas dan Tegangan Efektif

Di dalam analisis aliran tanah ada dua koefisien kompresibilitas yang mempunyai peranan penting yaitu (Toth, 1990; Kodoatie, 1996):

- kompresibilitas dari air dengan notasi β
- kompresibilitas dari akuifer dengan notasi α

Untuk disiplin ilmu lain seperti aliran dalam saluran terbuka atau aliran dalam pipa umumnya nilai kompresibilitas air (β) dianggap sangat kecil sekali atau mendekati angka nol sehingga untuk analisis alirannya air dianggap *incompressible* (tidak termampatkan). Demikian pula untuk disiplin ilmu hidrogeologi untuk pola alirannya diasumsikan aliran tidak termampatkan sehingga dalam menguraikan persamaan alirannya kerapatan dari air (*density*) ρ konstan. Nilai β menjadi cukup penting pada *confined aquifer* karena dalam hal kapasitas kuantitas air yang ada dalam akuifer ini, orde besaran angkanya yang cukup besar. Sehingga untuk menentukan berapa kapasitas tampungan dari akuifer ini, pengaruh kompresibilitas air menentukan. Uraian berikut ini akan memperjelas peranan kompresibilitas air.

Seperti uraian di awal Sub-bab ini, maka kompresibilitas terdefiniskan sebagai perubahan di dalam regangan (*strain*) atau deformasi dibagi dengan perubahan di dalam tegangan (*stress*) atau dapat ditulis sebagai berikut:

$$\text{kompresibilitas} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma} \quad 3-27$$

Kompresibilitas air terdefiniskan sebagai perubahan relatif dari isi (*volume*) air dibagi dengan perubahan tekanan atau dapat ditulis sebagai berikut (Freeze & Cherry, 1979):

$$\beta = \frac{dV_w / V_w}{dp} \quad 3-28$$

dimana:

- V_w adalah volume air
- P adalah tekanan
- Besarnya $\beta = 4,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$

Untuk suatu masa air yang diketahui Persamaan 3-12 dapat ditulis dalam bentuk:

$$\beta = \frac{d\rho / \rho}{dp} \quad 3-29$$

dimana: ρ adalah nilai kerapatan air (*density*)

Bila Persamaan 3-13 diintegrasikan maka akan menghasilkan persamaan yang dikenal dengan sebutan *the equation of state for water* yaitu:

$$\rho = \rho_0 \exp.[\beta(P-P_0)] \quad 3-30$$

dimana: ρ_0 adalah *density* air pada tekanan datum P_0

Bila P_0 merupakan tekanan atmosfer dan merupakan referensi untuk besaran tekanan maka $P_0 = 0$, Persamaan 3-14 dapat ditulis:

$$\rho = \rho_0 e^{\beta P} \quad 3-31$$

Dari persamaan ini dapat dilihat bahwa bila air dianggap fluida yang tidak termampatkan (*incompressible fluid*) $\rho = \rho_0 = \text{konstan}$, karena $\beta = 0$.

Menurut Toth (1990), pada aliran air tanah yang melalui suatu media porous ada tiga mekanisme penting dimana pengurangan volume dapat dilakukan yang berkaitan dengan kompresibilitas yaitu:

- Bila volume air berubah akibat termampatkannya air maka pori-pori di dalam tanah juga mengalami perubahan, bisa termampatkan (*compression*) atau berkembang (*dillution*).
- Termampatkannya partikel tanah (*grains*) secara individu.
- Penyusunan kembali (*rearrangement*) dari partikel tanah mendekati suatu bentuk konfigurasi yang pasti dan penuh.

Untuk mekanisme yang pertama dipengaruhi dan dikendalikan oleh kompresibilitas air β . Pada kondisi yang nyata di lapangan, mekanisme yang kedua dapat diabaikan dan hal ini cukup logis karena partikel tanah secara individu adalah tidak termampatkan. Dengan merefleksikan pada mekanisme yang ketiga maka akan didefinisikan suatu terminologi kompresibilitas dari akuifer.

Selanjutnya persamaan kompresibilitas dari akuifer dapat ditulis atau terdefiniskan sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{dV_T/V_T}{d\sigma_e} \quad 3-32$$

di mana

- V_T adalah volume total dari suatu masa tanah yang merupakan kumulatif dari volume tanah V_s ditambah volume air V_w
- σ_e adalah tegangan efektif

Secara individual partikel/butiran tanah dapat dimampatkan (*compressible grain*), namun dalam suatu massa tanah hal ini dapat diabaikan atau $dV_s = 0$, sehingga Persamaan 3-32 berubah menjadi:

$$\alpha = \frac{dV_w/V_w}{d\sigma_e} \quad 3-33$$

Nilai untuk berbagai jenis tanah dan batuan ditunjukkan Tabel 3-11.

Tabel 3-11. Jangkauan (Range) nilai α untuk berbagai jenis tanah dan batuan (Domenico & Miffin, 1965 dan Johnson dkk., 1968)

Jenis Tanah	Kompresibilitas (α) m ² /N atau Pascal ⁻¹	Batuan (rock)	Kompresibilitas (α) m ² /N atau Pascal ⁻¹
- Lempung (clay)	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁸	- Jointed	10 ⁻⁸ – 10 ⁻¹⁰
- Pasir (sand)	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁹	- Sound	10 ⁻⁹ – 10 ⁻¹¹
- Kerikil (gravel)	10 ⁻⁸ – 10 ⁻¹⁰		

Nilai kompresibilitas dari air β mempunyai orde besaran yang sama (*the same of order magnitude*) dengan batuan *sound* yaitu $4,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$.

Seperti diketahui di dalam ilmu mekanika tanah dikenal istilah tegangan total, tegangan efektif dan tegangan pori. Pada suatu bentuk kondisi tanah yang jenuh air (*saturated*) dalam kondisi yang ideal besarnya tegangan total σ_T merupakan kumulatif dari besarnya tegangan efektif σ_e dengan tegangan pori p (Terzaghi, 1925) atau dapat ditulis:

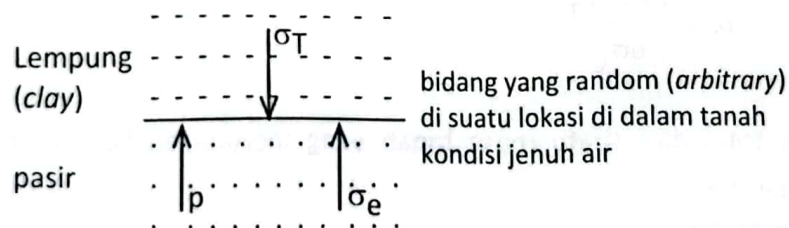
$$\sigma_T = \sigma_e + p$$

3-34

Tegangan efektif merupakan tegangan/tekanan (*pressure*) antara dua partikel tanah yang berdekatan. Menurut Terzaghi (1925), tegangan efektif adalah tegangan yang secara efektif memindahkan tanah atau menyebabkan perpindahan tanah (*soil displacement*). Tegangan ini merepresentasikan tegangan rata-rata yang dimiliki (yang ada) pada rangka tanah (*soil skeleton*).

Tegangan/tekanan pori (*pour pressure*) merupakan tekanan yang terbentuk akibat aliran air tanah yang mengisi pori-pori di antara partikel tanah.

Secara skematis Persamaan 3-34 dapat diilustrasikan seperti Gambar 3-20 di bawah ini:



Gambar 3-20. Tegangan total, tegangan efektif dan tegangan pori pada kondisi equilibrium dan strata permeable yang ideal

Dapat disimpulkan bahwa perubahan tegangan efektif atau perubahan tegangan pori akan mengakibatkan perubahan ketinggian hidraulik (*hydraulic head*), atau dengan kata lain ada hubungan antara tegangan pori dengan ketinggian hidraulik. Contoh riil di lapangan dapat dilihat adanya bangunan di suatu tempat yang menyebabkan tegangan efektif berkurang sehingga tegangan pori akan bertambah yang menyebabkan pula peningkatan ketinggian hidraulik dan mengakibatkan terjadinya kenaikan muka air tanah di bawah bangunan tersebut.

Di daerah pantai berdasarkan prinsip di atas ada kecenderungan muka air tanahnya naik mendekati permukaan tanah, apabila di daerah tersebut dibangun bangunan-bangunan dengan beban yang berat (misalnya, bangunan bertingkat banyak). Karena adanya tambahan bangunan-bangunan ini akan memperkecil tegangan efektif tanah yang mengakibatkan tegangan pori meningkat (Kodoatie, 1996).

3.11 Heterogenitas dan Anisotropy

Berdasarkan nilai konduktivitas hidraulik K maka formasi/struktur geologi dapat dibedakan menjadi beberapa macam. Hal ini karena besarnya harga K dapat bervariasi terhadap ruang (*space*) maupun terhadap arahnya. Bila variasinya terhadap ruang maka nilai K dapat dibagi menjadi dua yaitu: *homogeneity* dan *heterogeneity*. Dikatakan suatu formasi struktur batuan homogen bila besarnya K tidak tergantung dari posisi di dalam suatu formasi geologi dan heterogen bila sebaliknya. Bila formasi geologi dibuat sistem koordinatnya maka (Freeze & Cherry, 1979):

- Bila $K(x,y,z) = k$, di mana k adalah konstan maka formasinya disebut homogen
- Bila $K(x,y,z) \neq k$, maka formasinya disebut heterogen. Pada formasi geologi ada banyak konfigurasi yang heterogen tapi prinsipnya dapat dibagi tiga macam yaitu:

a. lapisan heterogen (*stratifikasi*)

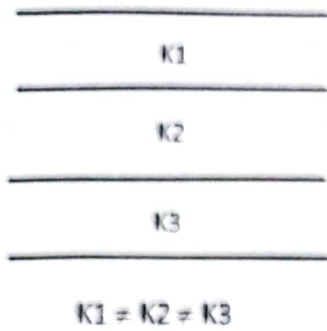
Bila suatu formasi geologi lapisannya terdapat nilai K yang berbeda-beda. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3-21a. Sebagai contoh dapat ditemukan pada formasi geologi yang terbentuk akibat sedimen batuan dan simpanan marina. Atau lapisan yang terdiri dari batuan dan lempung.

b. lapisan heterogen yang tidak kontinyu

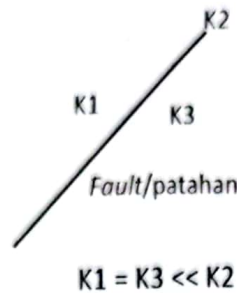
Hal ini dapat terjadi pada suatu formasi geologi yang terputus; misalnya akibat adanya sesar (*fault*) atau terjadi pada bentuk stratigrafi yang perbedaannya sangat menyolok. Gambar 3-21b menunjukkan contoh lapisan heterogen akibat adanya *fault* (sesar).

c. kecenderungan heterogen

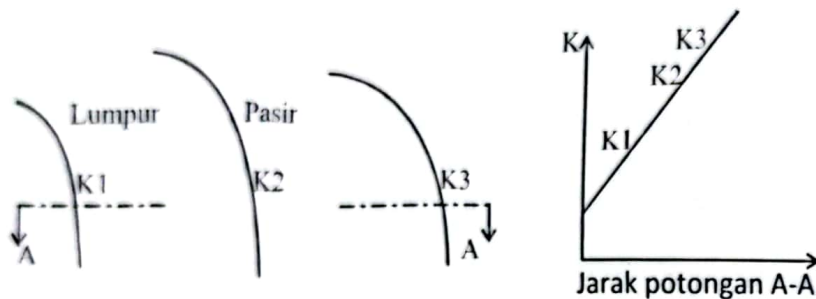
Kecenderungan terjadinya perubahan nilai K di setiap macam formasi geologi adalah umum. Perubahan nilai K umumnya secara bertahap. Hal ini biasanya terjadi pada proses sedimentasi yang membentuk delta, akuifer *alluvial* atau dataran *glacial outwash*. Gambar 3-21c menunjukkan contoh lapisan ini.



(a) stratifikasi (pelapisan)



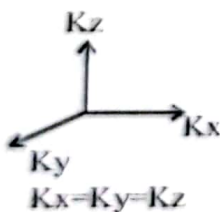
(b) heterogen diskontinyu (karena patahan)



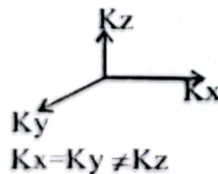
(c) kecenderungan heterogen

Gambar 3-21. Tiga macam lapisan heterogen (Kodoatie, 1996)

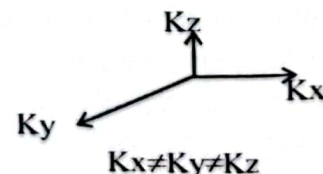
Bila nilai K suatu lapisan formasi geologi tidak tergantung arahnya maka dikatakan lapisan isotropis namun bila nilainya tergantung dari arahnya maka dikatakan tidak isotropis (anisotropis). Jenis-jenis lapisan isotropis dan anisotropis ditunjukkan pada Gambar 3-22. Pada Gambar 3-22a disebut isotropis karena besarnya nilai K ke seluruh arah sama, sedangkan Gambar 3-22b menunjukkan lapisan isotropis transversal karena untuk arah x dan y besarnya sama namun ke arah z berbeda. Gambar 3-22c memperlihatkan kondisi lapisan yang tidak isotropis karena besarnya K untuk arah x, y dan z berbeda.



(a) isotropis



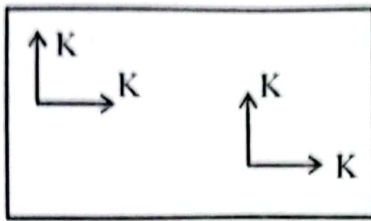
(b) transversal isotropis



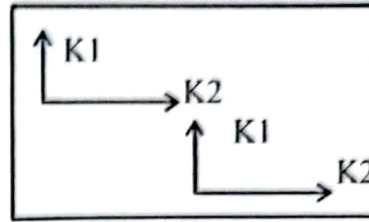
(c) anisotropis triaxial

Gambar 3-22. Lapisan isotropis dan anisotropis (Freeze & Cherry, 1979; Kodoatie, 1996)

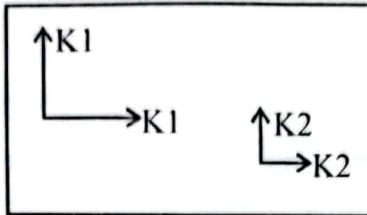
Kombinasi lapisan isotropis dan heterogen diilustrasikan pada Gambar 3-23.



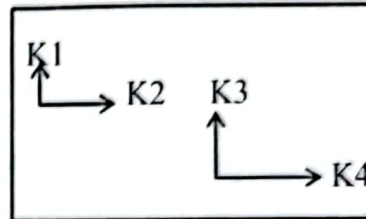
(a) homogeneous, isotropic



(b) homogeneous, anisotropic



(c) heterogeneous, isotropic



(d) heterogeneous, anisotropic

**Gambar 3-23. Empat kombinasi dari heterogenity dan anisotropy
(Freeze & Cherry, 1979; Kodoatie, 1996)**

BAB 4. HIDRAULIKA AIR TANAH

4.1 Acuan Referensi

Pada prinsipnya rekayasa sipil (*civil engineering*) adalah ilmu yang berhubungan dengan perencanaan, pelaksanaan, operasi dan pemeliharaan suatu infrastruktur baik alam maupun buatan manusia.

Secara umum dapat dikatakan bahwa rekayasa sipil adalah aplikasi dan interaksi prinsip-prinsip fisik dan pengetahuan. Dari sudut pengetahuan aplikasi dan interaksi tersebut diwujudkan dalam bentuk matematis melalui proses sejarah (http://en.wikipedia.org/wiki/Civil_engineering).

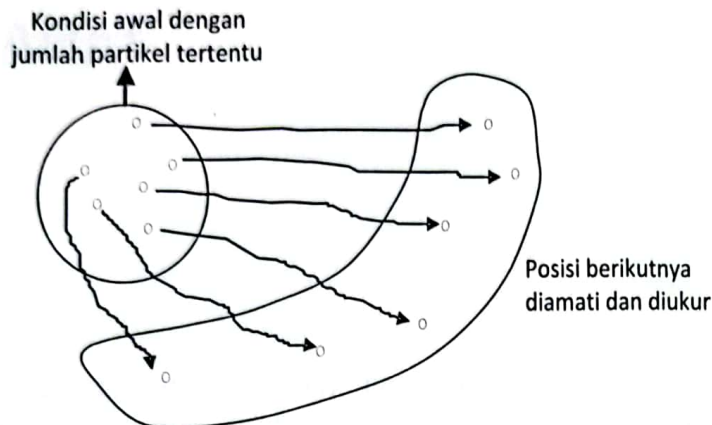
Prinsip fisik yang terjadi adalah permasalahan di lapangan yang harus dicari solusinya secara kuantitatif. Dengan kata lain bagaimana permasalahan di lapangan diformulasikan dalam bentuk kuantitatif dan solusinya juga dalam bentuk kuantitatif. Formulasi permasalahan di lapangan adalah (Kodoatie, 1996):

- Membuat kejadian fisik/lapangan dalam bentuk matematis umumnya persamaan dasar dalam bentuk diferensial karena berlaku dari hal yang kecil yang dikembangkan (dari suatu titik).
- Penjabaran persamaan-persamaan dasar.

Untuk melakukan kedua hal di atas diperlukan suatu kerangka batas. Kerangka batas ini bisa dengan Cara Lagrangian atau Cara Eulerian. Perbedaan kedua kerangka batas ini diuraikan sebagai berikut:

Cara Lagrangian

- Kajiannya dimulai dari kondisi awal dengan jumlah tertentu dari partikel suatu material yang ditinjau. Artinya kondisi awal merupakan harga-harga yang sudah diketahui seperti ditunjukkan pada Gambar 4-1.



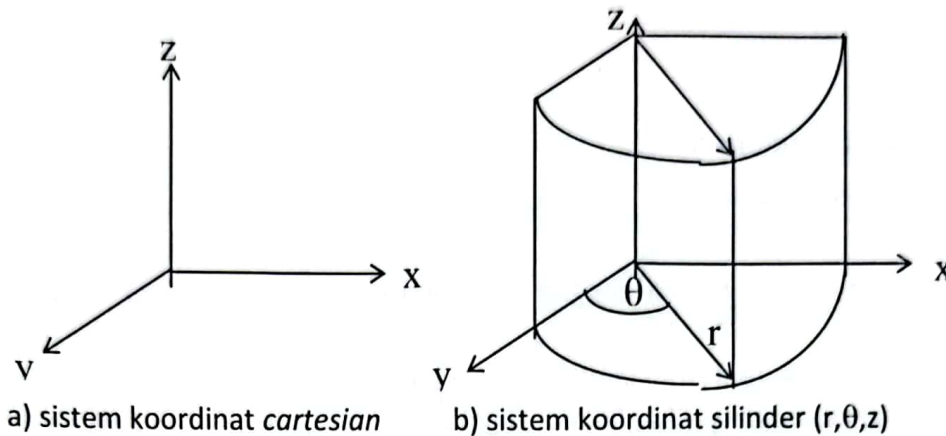
Gambar 4-1. Analisis suatu masalah dengan Kerangka Lagrangian

- Mengikuti material: setiap partikel mempunyai posisi koordinat $\bar{X}_m(t_n, x_n, y_n, z_n)$, di mana m merujuk pada suatu partikel dan n merujuk lokasi partikel pada waktu t_n .
- Sebagai contoh pada kondisi awal t_0 salah satu partikel terletak pada lokasi $\bar{X}_a(t_0, x_0, y_0, z_0)$
- Penyelidikan dan analisisnya dengan cara pengamatan kedudukan material dari awal (*initial*) sampai posisi berikutnya.
- Untuk persoalan-persoalan fluida maka secara matematis hal ini menjadi sangat sulit, sehingga cara ini hampir tidak pernah dipakai.

Cara Eulerian

- mengikuti ruang yaitu dengan cara mengamati apa yang terjadi pada suatu titik tertentu dalam suatu dimensi ruang
- mengukur dan menganalisis besarnya suatu persoalan misal konsentrasi kontaminasi C yang terjadi $\rightarrow C(x, y, z, t)$ pada setiap titik
- cara ini hampir selalu (*predominant*) dipakai untuk masalah fluida
- untuk cara ini diperlukan suatu sistem koordinat, bisa memakai sistem koordinat *cartesian* (x, y, z) ataupun sistem koordinat silinder.

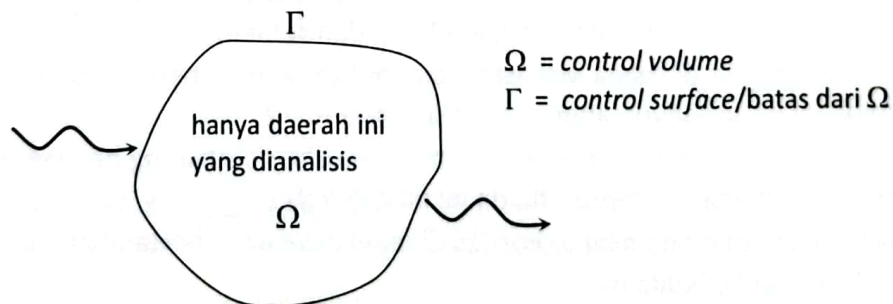
Sistem koordinat ini ditunjukkan dalam Gambar 4-2.



Gambar 4-2. Sistem koordinat cartesian dan silinder

Untuk kontrol dipakai Metode *Control Volume* yaitu memilih suatu ruang untuk tiga dimensi (atau bidang bila tinjauannya dua dimensi) sebagai pembatas.

Memilih suatu volume Ω dari ruang sebagai pembatas pembahasan. Artinya semua analisis ini dilakukan dalam ruang *control volume* tersebut yang dibatasi oleh batas permukaan Γ . Dalam hal ini dipakai Kerangka Kerja Eulerian (*Eulerian Frame Work* atau Metode Eulerian). Metode merujuk pada deskripsi tentang kecepatan, tekanan dan karakteristik variabel lainnya pada titik tertentu atau pada suatu potongan fluida (Lamb, 1945; Binder, 1949). Dari mana datang dan kemana perginya aliran tidak perlu diketahui atau dengan kata lain di luar volume yang ditinjau tidak diperdulikan. Uraian ini diilustrasikan dalam Gambar 4-3.



Gambar 4-3. Control volume Method

4.2 Persamaan Untuk Aliran Fluida

Air adalah masuk kategori aliran fluida Newtonian. Pengertian aliran fluida Newtonian ialah bilamana tegangan geser sebanding dengan regangan geser. Dapat juga dikatakan tegangan geser proporsional dengan gradient kecepatan atau tegangan geser adalah linear dengan gradient kecepatan. Persamaannya dapat ditulis:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

4-1

dimana:

τ = tegangan geser

u = kecepatan aliran ke arah sumbu x

y = sumbu y

μ = viskositas dinamik

Fluida Non-Newtonian dapat terjadi dengan beberapa cara. Yang biasanya terjadi ialah (Panton, 1984):

- Tegangan geser merupakan fungsi *Non-linier* dengan regangan.
- Tambahan tegangan viskos normal dihasilkan oleh geseran.
- Fluida adalah elastis.

Beberapa fluida Non-Newtonian diklasifikasikan berikut ini (Douglas dkk., 1988):

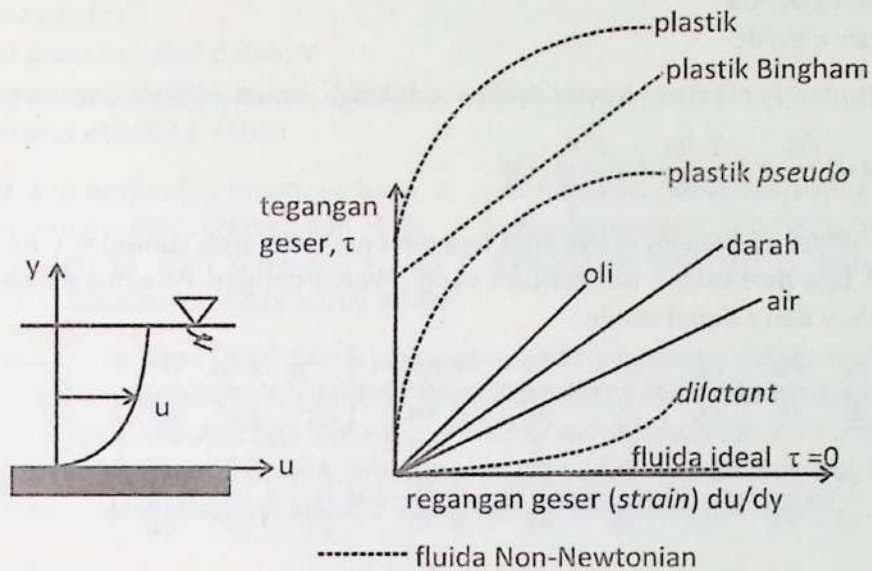
- Plastik: plastik tidak bisa dikatakan merupakan fluida sebelum tegangan gesernya mencapai suatu nilai minimum tertentu. Setelah itu tegangan gesernya akan meningkat bersamaan dengan regangannya menurut persamaan berikut ini:

$$\tau = A + B \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad 4-2$$

di mana: A, B dan n adalah konstanta. Bila $n = 1$ material dikenal dengan sebutan plastik Bingham (misalnya: endapan buangan limbah).

- Plastik *psuedo*: yaitu fluida di mana viskositas dinamikanya akan berkurang bila tegangan gesernya naik contoh fluida ini, misal: larutan koloid, susu, lempung dan semen.
- Bahan *dilatant* yaitu fluida di mana viskositas dinamikanya akan bertambah bila tegangan gesernya naik contoh fluida ini pasir hanyut/apung (*quicksand*).
- Bahan *thixotropic* fluida di mana viskositas dinamikanya akan berkurang dengan waktu bilamana gaya geser diaplikasikan ke fluida ini, contoh fluida ini adalah *jelly*.
- Bahan *rheopectic* fluida di mana nilai viskositas dinamikanya akan bertambah dengan waktu bilamana gaya geser diaplikasikan ke fluida ini.
- Bahan *viscoelastic* fluida yang akan berperilaku serupa dengan fluida Newtonian pada kondisi waktu yang bervariasi namun bila tegangan gesernya berubah tiba-tiba fluida ini akan berperilaku plastis.

Keenam klasifikasi ini merupakan fluida-fluida yang nyata di lapangan. Menurut Douglas dkk. (1988), dalam analisis persoalan di dalam mekanika fluida maka fluida yang ideal (fluida yang dianggap tidak mempunyai viskositas) harus dipertimbangkan. Solusi teoritis yang didapat untuk fluida tersebut sering memberikan pengetahuan dan wawasan yang baik dalam persoalan itu dan bilamana perlu kondisi nyata di lapangan dikaitkan dengan penyelidikan di laboratorium. Gambar 4-4 memberikan ilustrasi tentang jenis fluida tersebut di atas.



Gambar 4-4. Ilustrasi fluida Newtonian dan Non-Newtonian (Douglas dkk., 1988)

Secara umum di dalam Mekanika Fluida dan Termodinamika, masalah aliran untuk aliran Newtonian melibatkan 6 variabel (6 anu), yaitu (Kupper, 1990; Kodoatie, 1996):

- Kerapatan (*density*) : ρ → 1 variabel
- Tekanan : P → 1 variabel
- Suhu/temperatur : T → 1 variabel
- Kecepatan : $u, v, \text{ dan } w$ → 3 variabel
- Jumlah → 6 variabel

Dalam menyelesaikan 6 variabel di atas dibutuhkan juga 6 persamaan seperti berikut ini:

Hukum kekekalan massa yang menghasilkan persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 4-3$$

(Persamaan kontinuitas 3 dimensi dalam bentuk tensor)

Hukum kekekalan momentum (dari Hukum Newton)

$$\sum \bar{F} = \frac{dm \cdot \bar{v}}{dt} \quad \text{atau sering ditulis} \quad F = m \cdot a.$$

dimana:

- \bar{v} = kecepatan
- F adalah gaya
- m adalah massa suatu benda
- a adalah percepatan = dv/dt

Dari hukum ini timbul Persamaan Navier-Stokes untuk tiga dimensi dalam bentuk tensor:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j^2} + g_i$$

Pada dasarnya rumus ini berlaku untuk arah tiga dimensi yaitu arah sumbu x, y dan z. Sehingga dari rumus ini dihasilkan tiga persamaan momentum yang dikenal dengan Persamaan Navier-Stokes, yang dengan arah sumbu x, y dan z dapat ditulis:

$$a_x = \frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_*}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad 4-4a$$

$$a_y = \frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_*}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad 4-4b$$

$$a_z = \frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_*}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad 4-4c$$

Dimana

- a adalah percepatan $\rightarrow a_x, a_y, a_z$ percepatan-percepatan arah x, y dan z
- u, v, w adalah kecepatan-kecepatan arah x, y dan z
- $p_* = P/\gamma + z$
- P adalah tekanan
- γ adalah berat jenis
- z adalah ketinggian terhadap datum

Hukum kekekalan energi (dari hukum pertama Termodinamika)

Equation of state untuk fluida:

Untuk cairan:

$$\rho = \rho_0 e^{\beta(P-P_0)} \quad \text{atau} \quad \frac{d\rho}{\rho} = \beta dp \quad 4-5$$

Untuk gas:

$$pV = nRT \quad 4-6$$

dimana:

- ρ adalah kerapatan air (kg/m^3)

- ρ_o adalah kerapatan air pada tekanan datum P_o (kg/m^3)
- β adalah kompresibilitas air (m^2/Newton)
- P adalah tekanan (N/m^2)
- V adalah Volume gas (m^3)
- n adalah jumlah gram molekul dalam V
- R adalah konstanta gas ($\text{Newton m/kg } ^\circ\text{Kelvin}$)
- T adalah temperatur absolut ($^\circ\text{Kelvin}$)

Variabel yang ada berjumlah enam, yaitu: ρ , P , T , u , v dan w . Persamaan yang ada juga ada enam yaitu: persamaan kontinuitas (Persamaan 4-3), 3 buah persamaan momentum yaitu persamaan-persamaan momentum ke arah sumbu x , y dan z (Persamaan 4-4a s/d c), persamaan dari hukum kekekalan energi dan *Equation of state* untuk fluida.

Sehingga dengan 6 variabel (anu) dan 6 persamaan pada prinsipnya secara matematis dapat dicari solusinya. Namun adalah sangat sulit (bahkan tidak mungkin) untuk memecahkan persoalan di atas dalam bentuk kondisi ideal (bentuk tiga dimensi), sehingga persoalan aliran air tanah (umumnya) dapat disederhanakan menjadi 2 dimensi atau 1 dimensi, dengan melakukan asumsi dan batasan-batasan dll. Akhirnya dengan cara matematis persoalan itu dapat dipecahkan (atau ada solusi).

4.3 Asumsi dan Batasan

Karena pada aliran air tanah temperatur T dianggap, konstan atau tidak bervariasi (asumsi aliran isothermal) maka persamaan dari hukum kekekalan energi tidak dipakai. Asumsi yang lainnya ditabulasi seperti tabel berikut ini.

Tabel 4-1. Asumsi aliran pada beberapa kondisi (Kupper, 1990)

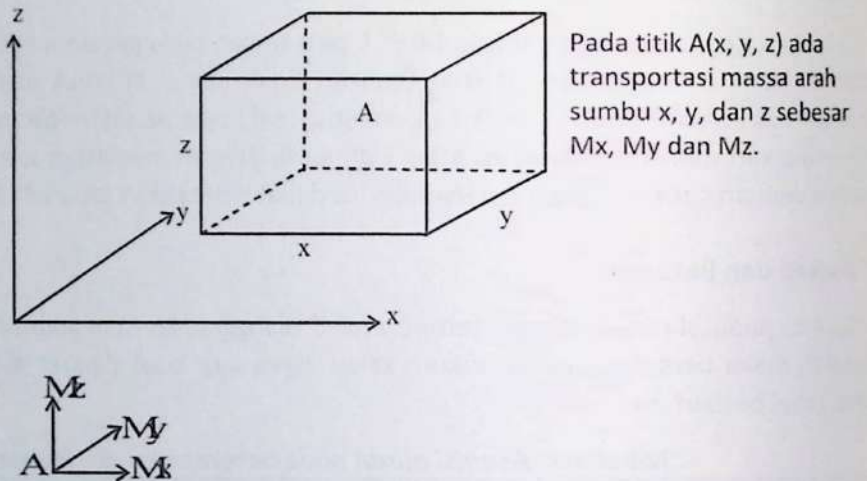
No.	<i>Unconfined</i>	No.	Konsolidasi	No.	<i>Confined (Umum)</i>
1	Air tidak termampatkan (ρ air = konstan)	1	Air tidak termampatkan (ρ air = konstan)	1	Air termampatkan (ρ air tidak konstan)
2	Butiran tanah tidak termampatkan	2	Butiran tanah tidak termampatkan	2	Butiran tanah termampatkan
3	Tanah tidak termampatkan	3	Tanah tidak termampatkan	3	Tanah termampatkan
4	Hukum Darcy berlaku	4	Hukum Darcy diabaikan. Aliran air dari celah-celah butiran.	4	Hukum Darcy berlaku
5	Aliran horizontal	5	K konstan karena deformasi kecil	5	K konstan
6	Ketinggian hidraulik (<i>total head</i>) besarnya sama untuk arah vertikal	6	Tanah dianggap elastis	6	Tanah dianggap elastis
7	Persamaan Kontinuitas (Lihat Asumsi Dupuit-Forch Heimer)			7	Persamaan kontinuitas untuk air dan padat
8	Arah sumbu x dan y				

4.4 Persamaan Dasar Aliran Air Tanah

Secara lebih spesifik persamaan dasarnya dapat dibagi menjadi dua, yaitu: persamaan dasar untuk aliran air dalam tanah pada *unconfined aquifer* dan persamaan dasar untuk aliran air dalam tanah pada *confined aquifer*.

4.4.1 Persamaan Dasar Aliran Air pada *Unconfined Aquifer*

Dalam menentukan persamaan dasar maka dibuat suatu kondisi aliran pada suatu pendekatan dengan *control volume* di mana hanya kejadian yang ada di dalamnya yang diperhatikan. Kondisi aliran ini ditunjukkan pada Gambar 4-5.



Gambar 4-5. Ilustrasi transport massa air pada sistem Koordinat Cartesian

Dari Gambar 4-5, pada komponen arah sumbu x, bila M_x adalah transportasi massa (*flux of mass* atau disebut juga *momentum*) yang melalui sumbu x maka besarnya M_x adalah:

$$M_x = \Delta y \Delta z \rho u$$

dimana:

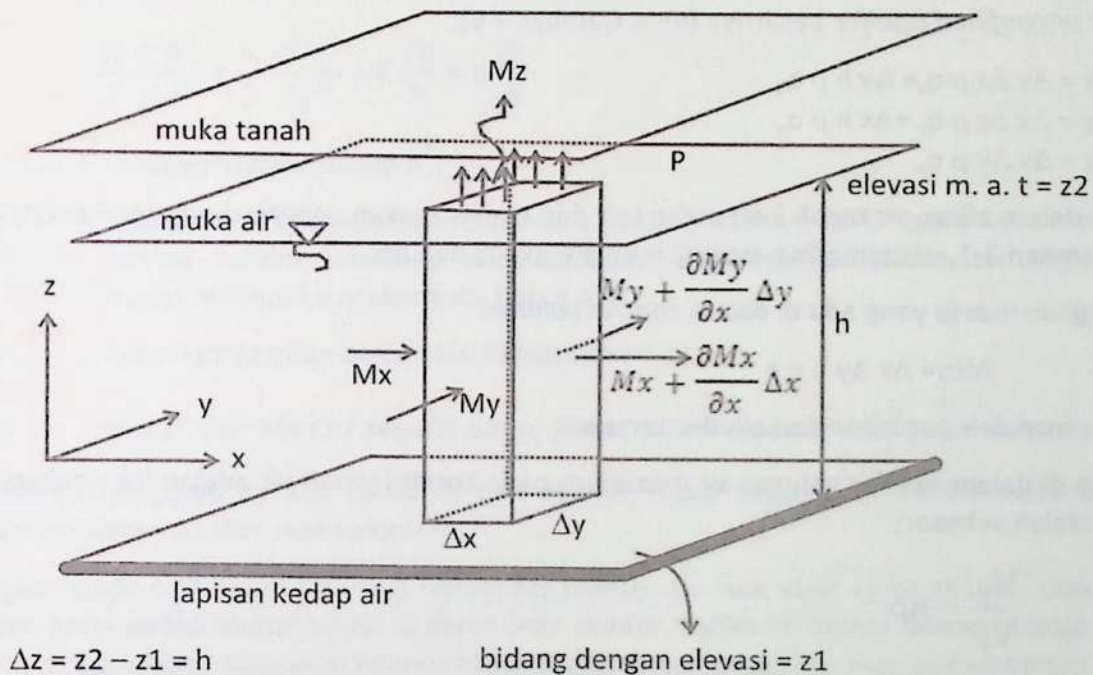
- u adalah kecepatan ke arah sumbu x
- Δy , Δz adalah luas bidang
- ρ adalah kerapatan air (*density*)

Maka berdasarkan hukum kekekalan massa persamaan di atas harus sama dengan bertambah/berkurangnya massa di dalam *control volume* sehingga didapat persamaan:

$$-\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \right] = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad 4-7$$

Persamaan ini merupakan persamaan konservasi massa tiga dimensi untuk fluida yang termampatkan (*compressible*).

Dengan prinsip di atas kondisi aktual aliran di dalam tanah akan dicari persamaannya. Gambar 4-5 di atas bila diaplikasikan pada aliran di dalam tanah diterjemahkan menjadi seperti pada Gambar 4-6, dimana gambar ini menunjukkan suatu *control volume* pada *unconfined aquifer* dalam bentuk tiga dimensi (arah sumbu x, y dan z). Karena untuk *unconfined aquifer* pada lapisan bawahnya merupakan lapisan kedap air, maka untuk arah sumbu z hanya ada satu jalan untuk keluar/masuk aliran yaitu pada bagian atasnya saja. Sedangkan untuk arah sumbu x dan y aliran bisa melalui dua jalan.



Gambar 4-6. Suatu control volume sistem unconfined aquifer

Dengan prinsip hukum kekekalan massa dapat disebutkan laju bersih transport massa adalah sama dengan bertambah/berkurangnya massa dalam *control volume*.

Laju bersih transport massa adalah $M_{keluar} - M_{masuk}$. Bertambah/berkurangnya massa dalam *control volume* = ΔS .

$$\begin{array}{l}
 M_{\text{keluar}}: \left\{ \begin{array}{l} \text{Arahx} = Mx + \frac{\partial Mx}{\partial x} \Delta x \\ \text{Arahy} = My + \frac{\partial My}{\partial y} \Delta y \\ \text{Arahz} = Mz \end{array} \right. \\
 M_{\text{masuk}}: \left\{ \begin{array}{l} \text{Arahx} = Mx \\ \text{Arahy} = My \\ \text{Arahz} = 0 \rightarrow \text{lapisannya kedap air} \end{array} \right.
 \end{array}$$

Untuk *unconfined aquifer* besarnya (lihat Gambar 4-6):

$$Mx = \Delta y \Delta z \rho q_x = \Delta y h \rho q_x$$

$$My = \Delta x \Delta z \rho q_y = \Delta x h \rho q_y$$

$$Mz = \Delta x \Delta y \rho q_z$$

di mana di dalam aliran air tanah kecepatan u , v dan w merupakan *specific discharge* seperti ditunjukkan pada Persamaan 3-1, yaitu masing-masing menjadi q_x , q_y dan q_z .

Sedangkan massa yang ada di dalam *control volume*:

$$M_{cv} = \Delta x \Delta y h n \rho$$

Di mana : n adalah porositas dari akuifer tersebut

Karena di dalam akuifer volume air maximum pada kondisi jenuh air adalah V_v , sehingga massa air yang ada adalah sebesar:

$$\frac{V_v}{V_T} = n\rho$$

(untuk penjelasan porositas n lihat Persamaan 3-18).

Dengan prinsip hukum kekekalan massa maka persamaan umum untuk aliran air tanah pada *unconfined aquifer* dapat ditulis:

$$-\left[\frac{\partial Mx}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial My}{\partial y} \Delta y + Mz \right] = \frac{\partial M_{cv}}{\partial t} \quad 4-8$$

Bila kondisi geologi adalah *homogen isotropy* maka $K_x = K_y = K_z = K$ dan kerapatan air (*density*) ρ konstan karena air dianggap tidak termampatkan serta $\partial z = h$ maka persamaan di atas berubah menjadi:

$$K \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} h + K \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} h + K \frac{\partial h}{h} = n \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4-9$$

Menurut Persamaan 3-13 besarnya Transmisivitas $T = K \cdot h$

Menurut Kupper (1990), bila kondisi variasi ketinggian (*head*) dalam hubungannya dengan *total head* adalah kecil atau $\Delta h/h < 10\%$, maka Persamaan 4-9 berubah menjadi:

$$T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + T \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K \frac{\partial h}{h} = n \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4-10$$

Persamaan 4-10 adalah linear dalam h

Bila variasi ketinggian (*head*) dalam hubungannya dengan *total head* adalah besar atau $\Delta h/h > 10\%$, Persamaan 4-9 berubah menjadi:

$$\frac{K}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{K}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} + K \frac{\partial h}{h} = n \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4-11$$

Persamaan 4-11 adalah linear dalam h^2 .

Persamaan 4-10 dan 4-11 merupakan persamaan dasar aliran air tanah pada *unconfined aquifer* dengan batasan bahwa kondisi *unsteady* dan *homogen isotropy*. Penjelasan tentang pengertian *homogen isotropy* dapat melihat ke uraian Sub- bab 3.11.

Penjelasan variabel ketiga pada bagian kiri Persamaan 4-11:

Nilai $K \frac{\partial h}{h}$ didapat dari kondisi seperti ditunjukkan dalam Gambar 4-6, yaitu dari nilai transport massa M_z yang mengarah ke luar (atau \uparrow) dari akuifer (pada kondisi riil hal ini sama dengan bila dilakukan pemompaan air dari suatu akuifer).

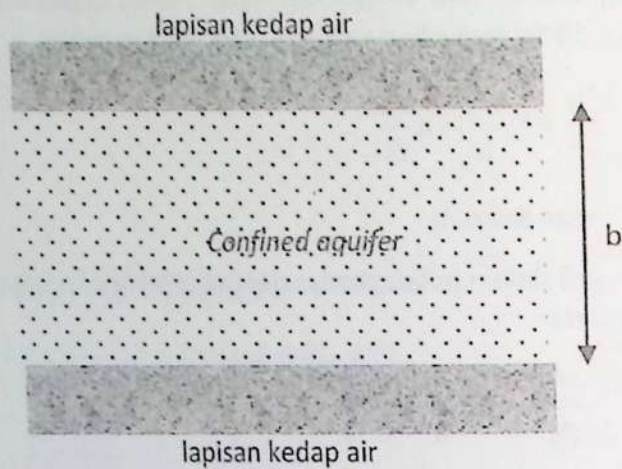
Sedangkan pada suatu saat bisa saja terjadi M_z menuju (masuk atau \downarrow) ke akuifer. Contoh konkrit hal ini adalah pada waktu terjadi hujan di daerah atas akuifer. Hujan ini menimbulkan resapan (infiltrasi) ke akuifer, sehingga dapat dikatakan adanya hujan memberikan pengisian atau penambahan volume air ke akuifer. Nilai M_z pada Persamaan 4-8 harus negatif (-).

Dari uraian ini dapat disimpulkan bahwa:

- Bila dilakukan pemompaan maka dianggap merupakan *discharge* dengan nilai M_z positif, Persamaan 4-10 dan 4-11 dapat langsung dipakai.
- Bila ada hujan yang menimbulkan infiltrasi ke akuifer maka hal ini merupakan *recharge* sehingga nilai M_z negatif, oleh karena itu nilai $K \frac{\partial h}{h}$ pada Persamaan 4-10 dan 4-11 perlu disesuaikan.

4.4.2 Persamaan Dasar Aliran Air pada *Confined Aquifer*

Diketahui suatu lapisan geologi dengan kondisi kedap air di bagian atas dan bawahnya. Pada kondisi ini maka disebut juga suatu *confined aquifer* dan hal ini ditunjukkan seperti pada Gambar 4-7. Untuk akuifer ini transport massa ke arah z tidak ada karena lapisan atas dan bawahnya kedap air.



Gambar 4-7. Suatu control volume sistem confined aquifer (Kodoatie, 1996)

Hanya ke arah x dan y saja yang mempengaruhi keseimbangan sesuai dengan hukum kekekalan massa. Sedangkan kapasitas massa di dalam *control volume* dipengaruhi oleh besarnya *specific storage* S_o . Penjelasan tentang *specific storage* S_o ini dapat dilihat pada Persamaan 3-11.

Dengan prinsip perhitungan seperti yang ditunjukkan di Sub-Bab 4.4.1 maka persamaan dasar aliran air pada *confined aquifer* dapat ditulis:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_o \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4-12$$

Pada kondisi untuk *confined aquifer* yang horizontal dan *homogen isotropy* ($K_x=K_y=K$) dengan tebal b , storativitas $S = S_o \times b$ dan transmisivitas $T = K \times b$ Persamaan 4-12 berubah menjadi:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4-13$$

4.4.3 Persamaan Laplace

Perbandingan Persamaan 4-11 ini untuk *unconfined aquifer* dan Persamaan 4-13 untuk *confined aquifer* diuraikan. Bilamana pada Persamaan 4-11 tidak ada aliran arah z baik itu yang masuk ataupun yang keluar atau nilai $K \frac{\partial h}{\partial z} = 0$ maka Persamaan 4-11 dapat ditulis menjadi:

$$T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + T \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = n \frac{\partial h}{\partial t}$$

atau:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{n}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4-14$$

Perbedaan Persamaan 4-13 dan Persamaan 4-14 adalah hanya pada parameter S (storativitas) dan n (porositas). Bila struktur geologi untuk *confined aquifer*, dapat disimpulkan bahwa akibat adanya dua lapisan kedap air sebagai pembatas akuifer atas dan bawah (lihat Gambar 4-7), maka untuk akuifer ini yang menyeimbangkan laju bersih transport massa (yang masuk dan keluar) ada *control volume* akuifer itu adalah storativitas (S) yang merupakan kumulatif dari perubahan isi air akibat kompresibilitas dari akuifer (α) dan kompresibilitas dari air di dalam akuifer (β) tersebut. Sedangkan untuk *unconfined aquifer* yang menyeimbangkan laju bersih transport massa adalah kadar air dalam akuifer tersebut dalam kondisi jenuh (*saturated*) atau disebut juga porositas (n) dari akuifer tersebut. Bilamana kondisi aliran baik itu pada *unconfined* maupun *confined aquifer* dalam kondisi tunak (*steady*) atau $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ maka kedua persamaan tersebut menjadi:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad 4-15$$

Persamaan ini dikenal pula dengan nama Persamaan Laplace untuk dua dimensi. Persamaan ini merupakan persamaan dasar aliran air tanah pada kondisi tunak untuk aliran fluida yang tidak termampatkan (*incompressible flow*) di dalam formasi geologi tanah yang *homogen isotropis*.

4.4.4 Sifat-sifat Umum Persamaan Aliran Air tanah

Secara umum persamaan aliran air tanah merupakan persamaan difusi yang dapat ditulis secara umum seperti berikut ini:

$$\text{div}(K \text{ grad } h) = S_0 \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4-16$$

Persamaan ini untuk *confined aquifer*. Untuk kondisi *unconfined aquifer* maka S_0 diganti dengan n .

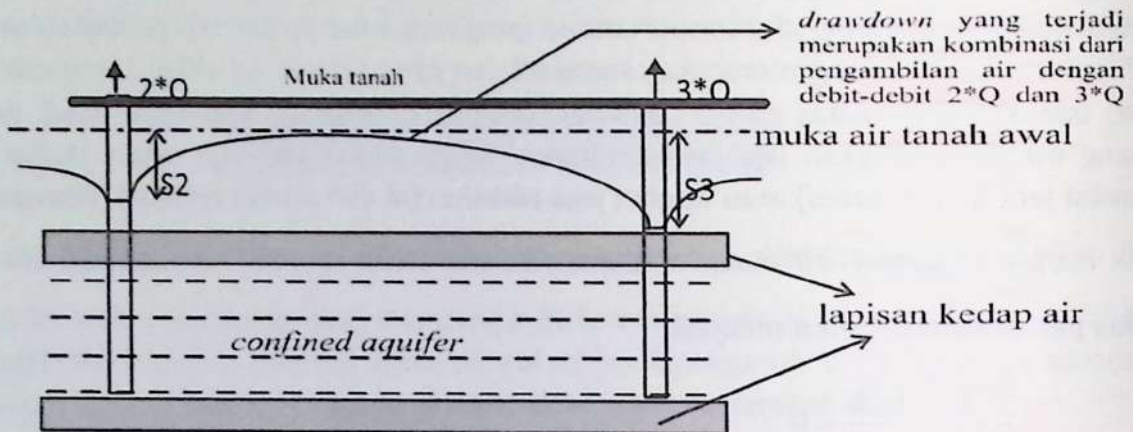
Persamaan aliran air tanah merupakan persamaan difusi baik untuk akuifer yang *confined* maupun yang *unconfined* dengan sifat-sifat berikut ini (Kupper, 1990):

1. Satu solusi untuk satu perangkat kondisi batas
2. Pada suatu permasalahan aliran air tanah bila sudah diketahui kondisi batasnya maka solusi dari persamaan yang dipakai hanya ada satu.
3. Berlaku pemakaian prinsip superposisi.

Karena persamaan tersebut linear di dalam h , maka bila (h_1) dan (h_2) adalah 2 solusi untuk setiap α dan β perkalian h_1 dan h_2 sehingga menjadi ($\alpha h_1 + \beta h_2$) juga merupakan suatu solusi. Atau dengan

kata lain berlaku pula linier kombinasi dengan bentuk superposisi. Uraian hal ini dapat diilustrasikan dalam Gambar 4-8.

Dari Gambar 4-8 dapat dilihat bahwa dengan pengambilan air dari dua tempat yang berbeda pada suatu *confined aquifer* dengan debit pengambilan yang berbeda maka *drawdown* yang terjadi merupakan superposisi dari *drawdown* s_2 dan s_3 . Dalam hal ini terjadi superposisi (kombinasi) dalam ruang, dengan melihat Persamaan 4-16 pada bagian kanannya, maka berlaku pula superposisi dalam waktu.



Gambar 4-8. Ilustrasi superposisi persamaan aliran air tanah

4. Anisotropy (berarti $K_x \neq K_y \neq K_z \neq K$): pada kondisi tidak isotropis persamaan ini berlaku. Cara penyelesaiannya, yaitu dengan mencari sistem isotropis ekuivalen dengan merentangkan sistem koordinat anisotropis menjadi bentuk isotropis. Semua data yang ada baik itu debit, transmisivitas dll., disesuaikan dengan kondisi koordinat yang baru berdasarkan nilai hidraulik konduktivitasnya.

4.5 Aliran Tunak

Persamaan umum untuk aliran air tanah dapat dibagi menjadi dua, yaitu untuk persamaan aliran air tanah pada *unconfined aquifer* dan pada *confined aquifer*. Persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{K}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{K}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} + K \frac{\partial h}{h} = n \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4-17$$

Pada *unconfined aquifer* di mana persamaan ini linier dalam h^2 .

Pada *confined aquifer* dimana persamaan ini linier dalam h .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_o \frac{\partial h}{\partial t} \quad 4-18$$

Pada kasus-kasus aktual di lapangan umumnya yang terjadi adalah dengan penyederhanaan persamaan-persamaan di atas. Hal ini dimungkinkan karena pada hakekatnya penyelesaian dalam bentuk dua dimensi atau tiga dimensi akan menjadi sulit, karena di samping perhitungannya lebih rumit

diperlukan pula data lapangan yang memadai. Padahal pada kasus tertentu, dengan mengamati situasi dan kondisi lapangan, dapat disederhanakan menjadi (misalnya) aliran satu dimensi berdasarkan arah aliran yang dominan. Hasil perhitungannya dengan membandingkan terhadap kondisi lapangan masih dapat diterima dan cukup akurat untuk aplikasi di lapangan.

Penyederhanaan yang lainnya dapat dilakukan dengan menganggap bahwa kondisi formasi geologinya adalah:

- homogen dan isotropis
- akuifer dapat dianggap mempunyai ketebalan yang seragam. Untuk hal ini kadang-kadang tidak tepat, sehingga direkomendasikan untuk secara lebih detail melihat kondisi lapangan sehingga dapat diputuskan apakah asumsi ini sudah tepat.

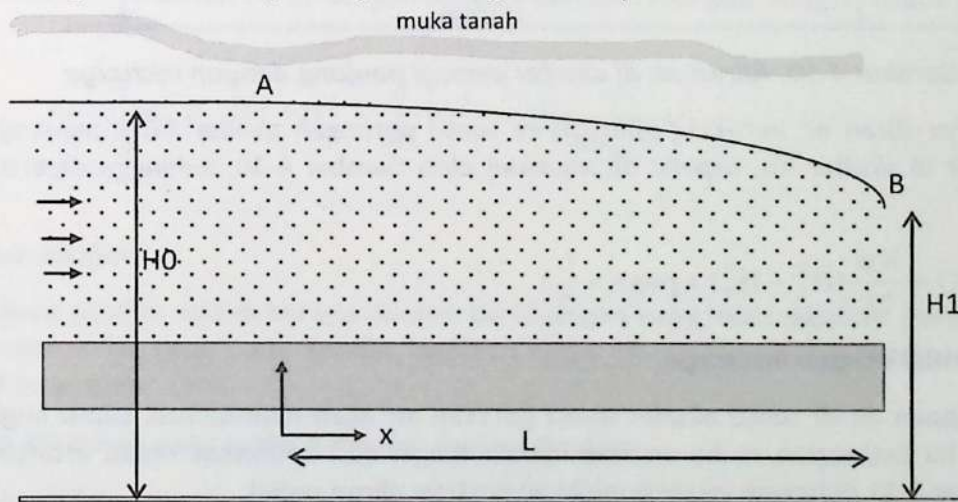
Penyelesaian persamaan aliran air tanah untuk beberapa kondisi yang ada di lapangan dijelaskan berikut ini.

4.5.1 Unconfined Aquifer

Di daerah formasi geologi yang mempunyai material *alluvial deposit*, umumnya banyak dijumpai jenis akuifer ini. Beberapa analisis perhitungan ditunjukkan pada beberapa sub-bab berikut ini.

4.5.1.1 Aliran Air Melalui Akuifer Persegi Panjang

Pada suatu potongan *unconfined aquifer* berbentuk persegi panjang dengan panjang L akan dicari persamaan untuk garis muka airnya dengan detail gambar seperti di bawah ini.



Gambar 4-9. Aliran air tanah pada unconfined aquifer persegi panjang

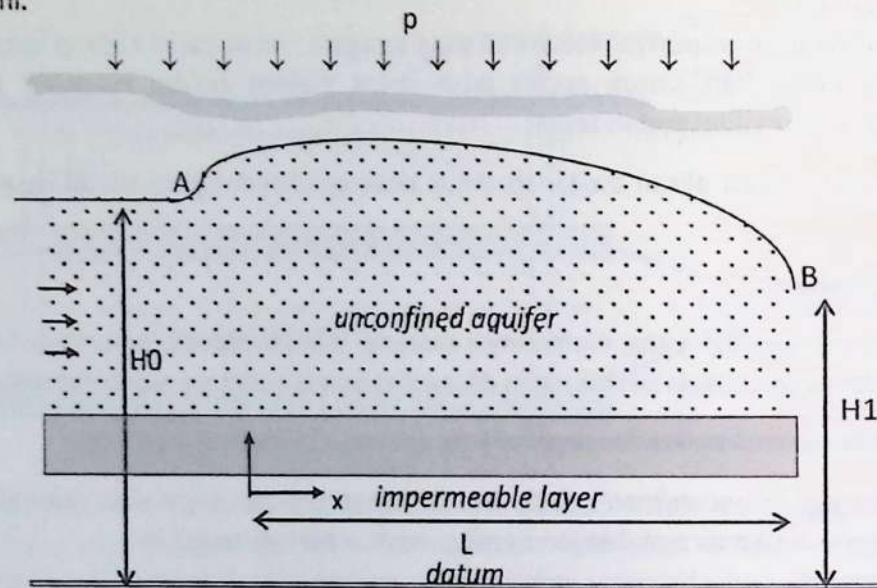
Persamaan dasar untuk aliran air tanah pada *unconfined aquifer* adalah Persamaan 4-17. karena akuifer tidak bervariasi, maka kapasitas (*storage*) akuifer selalu penuh dan aliran tunak/*steady* maka unsur pada bagian kanan Persamaan 4-17 = 0. Karena arah aliran hanya ke sumbu x sehingga sumbu $y = 0$ dan tidak ada tambahan aliran (*recharge*), maka diperoleh besarnya debit pada akuifer ini ialah:

$$Q = wK \frac{H_1^2 - H_0^2}{2L}$$

4-19

4.5.1.2 Aliran Air Melalui Akuifer Persegi Panjang dengan Recharge

Sering pada *unconfined aquifer* terdapat tambahan aliran di atasnya (dari hujan misalnya) yang mengalir secara vertikal ke dalam akuifer ini secara infiltrasi. Hal ini seperti ditunjukkan pada Gambar 4-10 di bawah ini.



Gambar 4-10. Aliran air di akuifer persegi panjang dengan recharge

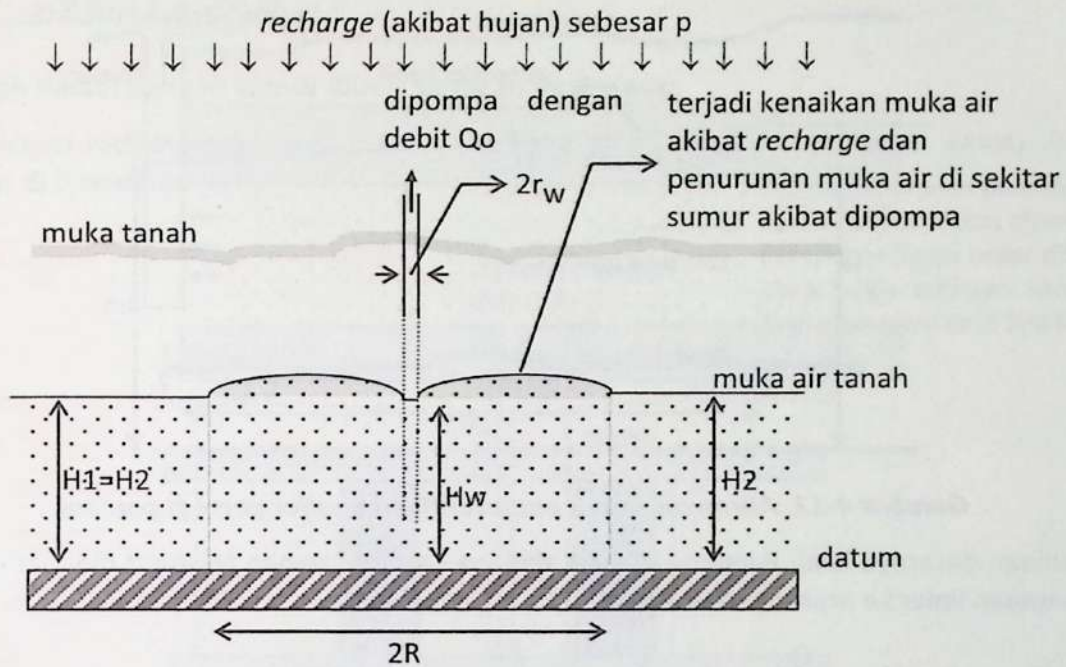
Dengan adanya aliran air vertikal (*infiltrasi*) ke suatu potongan akuifer AB sepanjang L maka ada kenaikan muka air di akuifer itu, seperti ditunjukkan oleh Gambar 4-10, sehingga diperoleh besarnya debit adalah:

$$Q = \frac{Kw}{2L} (H_1^2 - H_0^2) + pw \left(x - \frac{L}{2} \right)$$

4-20

4.5.1.3 Aliran Radial dengan Recharge

Pada pemompaan air di suatu akuifer maka gerakan air akan membentuk suatu lingkaran (*radial flow*). Dalam hal ini ketinggian muka air merupakan fungsi dari koordinat radial artinya dx berubah menjadi dr . Gambar 4-11 di bawah ini menunjukkan ilustrasi aliran radial.



Gambar 4-11. Aliran radial di sekitar sumur pada unconfined aquifer

Penyederhanaan Persamaan 4-17 dengan fungsi x berubah menjadi fungsi r maka didapat besarnya debit:

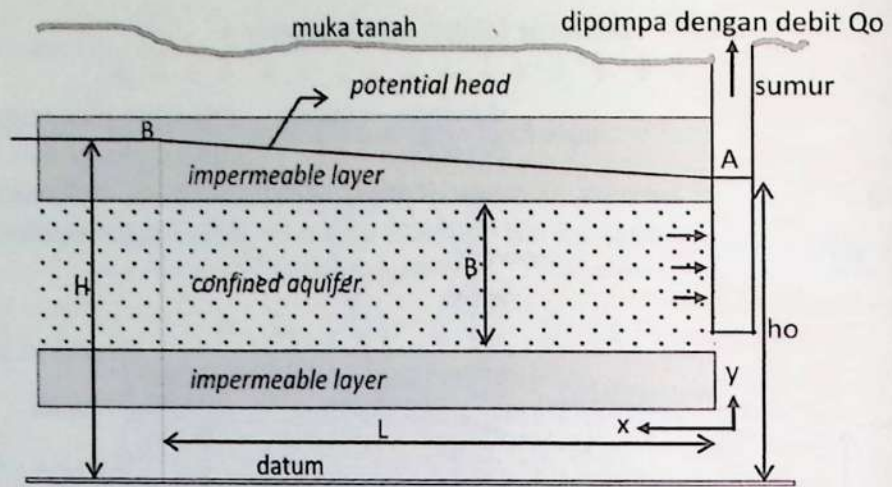
$$Q_0 = \left[\pi r_w^2 p - H^2 + H_w^2 - \frac{p}{2K} (R^2 - r_w^2) \right] \frac{\pi K}{\ln(r_w/R)} \quad 4-21$$

4.5.2 Confined Aquifer

Pada *confined aquifer* ada beberapa contoh perhitungan yang akan dibahas. Persamaan dasarnya adalah Persamaan 4-18 yang pada kondisi tertentu dapat disederhanakan seperti beberapa contoh perhitungan di bawah ini.

4.5.2.1 Aliran Air tanah yang melalui Akuifer Persegi Panjang

Pada suatu *confined aquifer* dengan bentuk persegi panjang dilakukan pemompaan sebesar Q yang sesuai dengan debit aliran pada akuifer tersebut. Sketsa potongan akuifer seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 4-12. Aliran air tanah pada confined aquifer persegi panjang

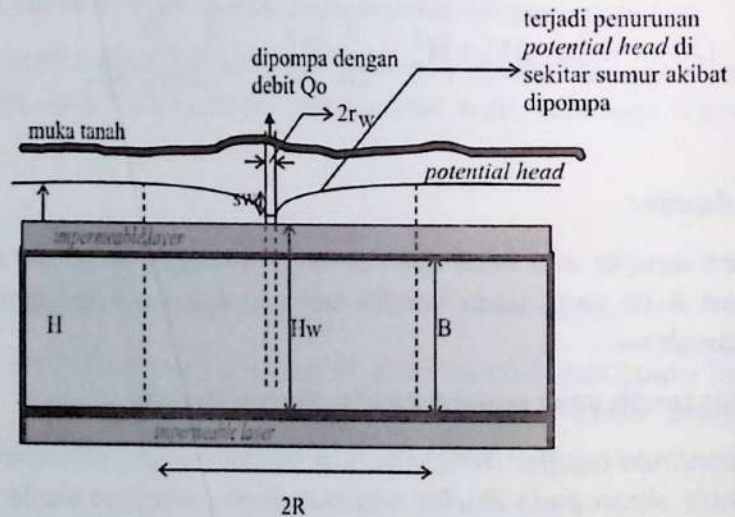
Persamaan dasarnya ialah Persamaan 4-18, dimana dari persamaan tersebut didapat nilai h seperti pada persamaan linier ke arah x di bawah ini:

$$h = H - \frac{Q_0}{B * W * K} [L - x]$$

4-22

4.5.2.2 Aliran Radial

Pada suatu *confined aquifer* dilakukan pemompaan seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 4-13. Aliran radial pada confined aquifer

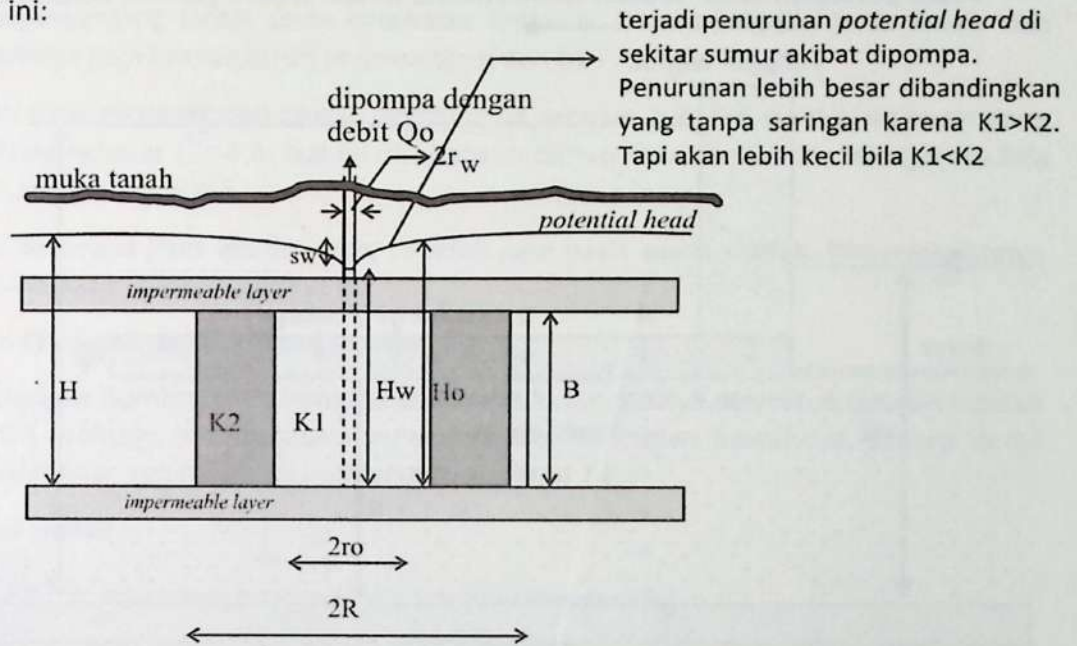
Dari Gambar 4-13, Persamaan 4-18 dapat disederhanakan menjadi:

$$h = H + \frac{Q_0}{2\pi KB} \ln\left(\frac{r}{R}\right)$$

4-23

4.5.2.3 Aliran Radial dengan Sumur diberi Saringan Pasir Kasar

Kondisi aliran radial dengan sumur yang dikelilingi oleh saringan kasar (pasir kasar) ditunjukkan dalam gambar di bawah ini:



terjadi penurunan *potential head* di sekitar sumur akibat dipompa. Penurunan lebih besar dibandingkan yang tanpa saringan karena $K_1 > K_2$. Tapi akan lebih kecil bila $K_1 < K_2$

Gambar 4-14. Aliran radial dengan sumur yang diberi saringan kasar pada confined aquifer

Pada kondisi ini maka seperti tampak pada Gambar 4-14, adanya saringan kasar di sekitar sumur pemompaan secara implisit berarti aliran yang melalui akuifer mempunyai dua harga K yang berbeda yaitu K_2 dan K_1 . Perbedaan ini mengakibatkan adanya perbedaan *specific discharge* (q) yang berbeda pula.

Berdasarkan Persamaan 4-18 dan Gambar 4-14, ketinggian muka air pada sumur H_w dapat dicari dengan memasukkan $r = r_w$ dan disubstitusikan, sehingga H_w besarnya adalah:

$$H_w = H + \frac{Q_0}{2\pi K_1 B} \ln\left(\frac{r_w}{r_o}\right) + \frac{Q_0}{2\pi K_2 B} \ln\left(\frac{r_o}{R}\right)$$

4-24

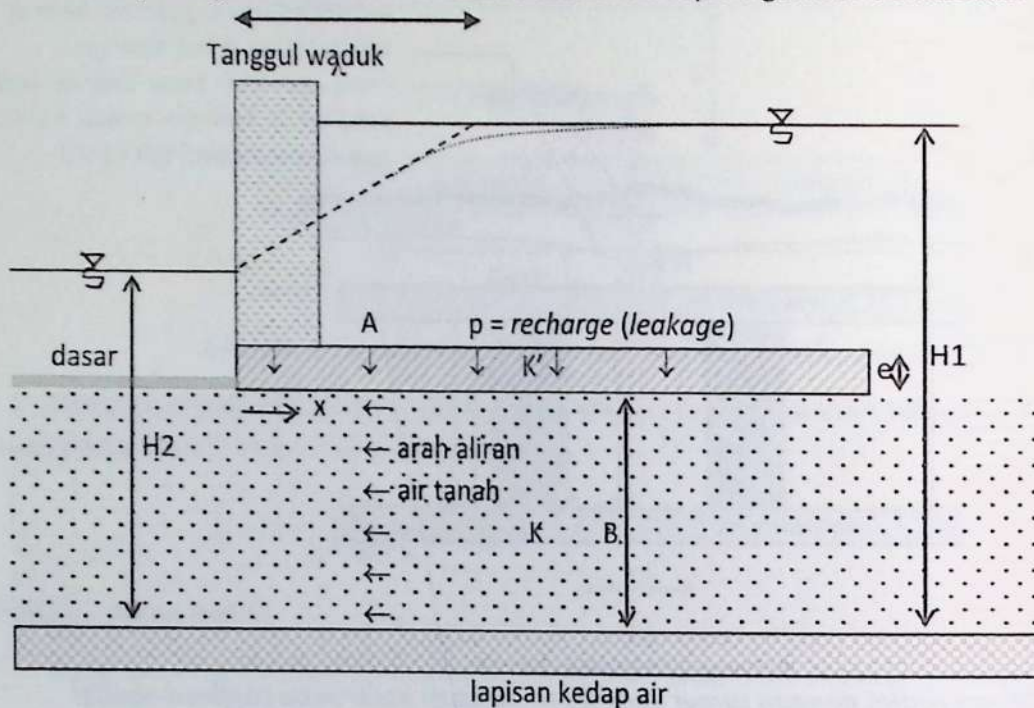
4.5.3 Semi Confined Aquifer (Leaky Aquifer)

Pada praktek di lapangan di bawah bangunan besar (misalnya seperti waduk) perlu dicek dan dianalisis adanya aliran air tanah di bawahnya. Dalam hal ini bila aliran yang terjadi cukup besar sehingga cukup mempengaruhi kapasitas dari waduk itu maka dapat dilakukan upaya-upaya untuk mengurangi ataupun memperkecil laju aliran tersebut. Di sini gabungan analisis perhitungan untuk jenis

akuifer yang ada akan memberikan kontribusi kapasitas debit dari aliran air tanah tersebut. Untuk aliran pada *semi-confined aquifer* dan gabungan dengan akuifer lainnya (*confined* ataupun *unconfined*) akan ditunjukkan uraian perhitungannya pada beberapa contoh berikut ini.

4.5.3.1 Aliran Air tanah yang melalui Akuifer Persegi Panjang

Suatu potongan dasar sebuah waduk diilustrasikan seperti gambar berikut ini:



Gambar 4-15. Aliran air tanah pada leaky aquifer di bawah suatu waduk

Persamaan umum untuk kondisi ini

$$\frac{d}{dx} \left[K \frac{dh}{dx} \right] = -p$$

catatan untuk *recharge* p : bila alirannya pada *confined aquifer* maka alirannya berdimensi per satuan isi, namun bila terjadi pada *unconfined aquifer* maka berdimensi per satuan luas. Sehingga besarnya *specific discharge* q_x adalah:

$$q_x = -K \left(\frac{H_1 - H_2}{\lambda} \right) e^{\left(\frac{-x}{\lambda} \right)} \quad 4-25$$

Pada $x = 0 \rightarrow q_x = q_{\max}$, besarnya debit adalah maximum sehingga dapat ditulis:

$$Q_{(x=0)} = -K \left(\frac{H_1 - H_2}{\lambda} \right) A \quad 4-26$$

dimana: $A = \text{luas} = B w$

$w = \text{satuan lebar waduk} (\perp \text{ dengan bidang aliran})$

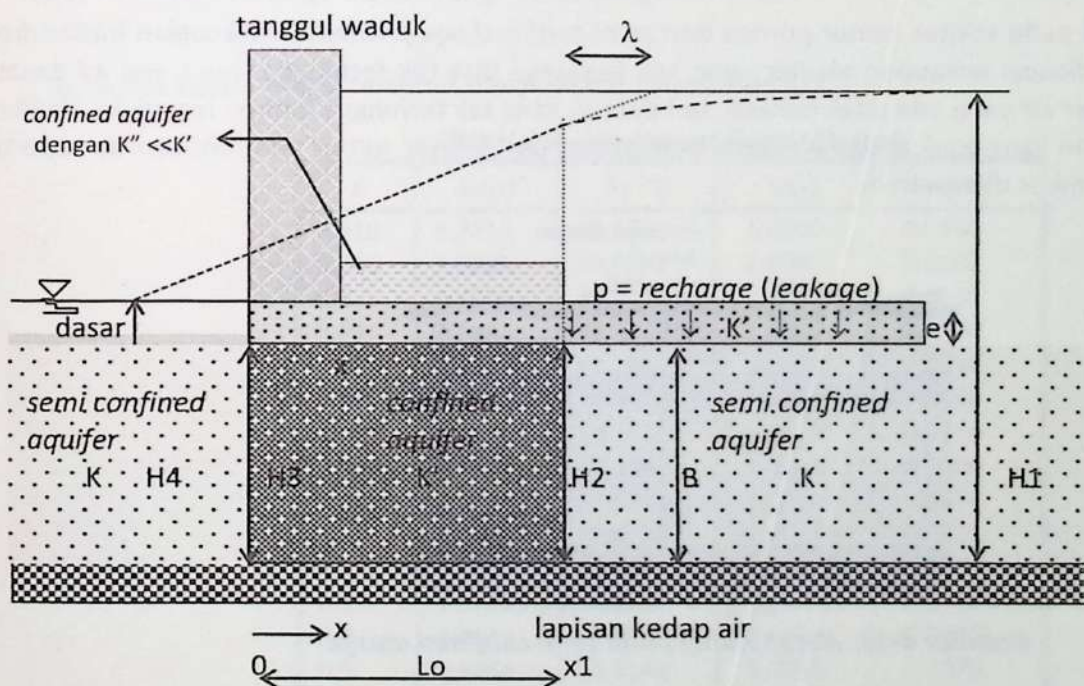
Mengacu pada Persamaan 4-25 dapat dilihat bahwa untuk $x = \infty$, besarnya q_x adalah minimum. Dari persamaan ini dapat dicari panjang lantai hulu waduk dalam upaya perlindungan kebocoran/resapan di daerah tersebut. Yaitu dengan upaya memperkecil harga K' yang tergantung dari jenis material dan memperpanjang lantai serta ketebalan lantai e . Di samping itu jenis tanah dan ketebalan akuifer dibawahnya juga berpengaruh (parameter K dan B).

Bila diinginkan aliran yang mengalir dari bawah bendung q_x sebesar 2 % dari q_{max} , maka panjang lantai waduk dapat dihitung sebesar $L = 4 \lambda$. Hal ini disebabkan $q_x = q_{\text{max}} \cdot \exp(-x/\lambda)$. Selanjutnya bila diinginkan q_x sebesar 1 % maka $L = 4,605 \lambda$.

Bagaimana bila ada beberapa jenis akuifer yang terletak juga pada suatu waduk. Penyelesaiannya dapat dilihat seperti contoh pada sub-bab berikut ini.

4.5.3.2 Gabungan Semi Confined dan Confined Aquifer

Suatu waduk sama dengan Gambar 4-15, hanya saja pada hulu tanggulnya diperkuat dengan lapisan yang kedap air ($K'' \ll K'$) sehingga membentuk *confined aquifer* di bagian bawahnya. Secara detail potongan waduk ini diilustrasikan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 4-16. Aliran air tanah pada semi confined dan confined aquifer

Dengan adanya lapisan kedap air tersebut maka faktor resapan λ dari aliran di waduk ke dalam tanah di bawahnya menjadi lebih kecil dibandingkan dengan tanpa adanya lapisan tersebut (bandingkan λ di Gambar 4-15 dan Gambar 4-16 baik dari segi tempatnya maupun panjangnya).

Berdasarkan hukum kontinuitas debit di ketiga lokasi besarnya sama, sehingga dalam ketiga an tersebut dengan tiga persamaan tersebut dapat dicari besarnya, yaitu masing-masing:

$$H_2 = H_1 - \lambda \left(\frac{H_1 - H_4}{2\lambda + L_0} \right) \quad 4-27$$

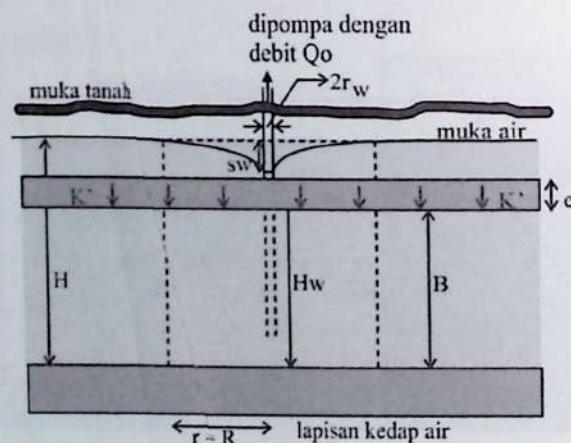
$$H_3 = H_4 + \lambda \left(\frac{H_1 - H_4}{2\lambda + L_0} \right) \quad 4-28$$

$$Q = K.A \left(\frac{H_1 - H_4}{2\lambda + L_0} \right) \quad 4-29$$

Persamaan 4-29 adalah besarnya total debit rembesan dari air di waduk pada lokasi $x = 0$.

4.5.3.3 Aliran Radial

Aliran ini terjadi pada sekitar sumur pompa dari *semi confined aquifer*. Dalam persoalan ini kondisi tunak masih dapat dicapai walaupun akuifer yang ada besarnya bisa tak terhingga ($r=\infty$). Hal ini dapat terjadi karena sumber air yang ada tidak berasal dari daerah yang tak terhingga namun masuk ke akuifer karena adanya lapisan yang agak kedap air (*semi permeable*) dari sekitar sumur pemompaan itu seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 4-17. Aliran radial pada semi confined aquifer

Persamaan umumnya dapat ditulis:

$$K \frac{d^2h}{dr^2} + p = 0$$

di mana p merupakan resapan (*recharge*) di atasnya yang besarnya:

$$p = \frac{K'(H-h)}{B.e}$$

Solusi untuk persoalan di atas adalah:

$$\frac{d^2s}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{ds}{dx} - s = 0 \tag{4-30}$$

Persamaan 4-30 dikenal dengan nama Persamaan Bessel. Solusi umum untuk persamaan ini adalah:

$$s = C_1 I_0(x) + C_2 K_0(x) \tag{4-31}$$

di mana:

- $I_0(x)$ = modifikasi fungsi Bessel yang pertama dengan orde nol
- $K_0(x)$ = modifikasi fungsi Bessel yang kedua dengan orde nol
- C_1 dan C_2 adalah konstanta.

Besarnya kedua fungsi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4-2.

Tabel 4-2. Modifikasi Fungsi Bessel

X	$K_0(x)$	$K_1(x)$	$I_0(x)$	$I_1(x)$
0.010	4.7212	99.9739	1.0000	0.0050
0.020	4.0285	49.9547	1.0001	0.0100
0.030	3.6235	33.2715	1.0002	0.0150
0.040	3.3365	24.9233	1.0004	0.0200
0.050	3.1142	19.9097	1.0006	0.0250
0.060	2.9329	16.5637	1.0009	0.0300
0.070	2.7798	14.1710	1.0012	0.0350
0.080	2.6475	12.3742	1.0016	0.0400
0.090	2.5310	10.9749	1.0020	0.0451
0.1	2.4271	9.8538	1.0025	0.0501
0.2	1.7527	4.7760	1.0100	0.1005
0.3	1.3725	3.0560	1.0226	0.1517
0.4	1.1145	2.1843	1.0404	0.2040
0.5	0.9244	1.6564	1.0635	0.2579
0.6	0.7775	1.0283	1.0921	0.3137
0.7	0.6605	1.0503	1.1263	0.3719
0.8	0.5663	0.8618	1.1665	0.4327
0.9	0.4867	0.7165	1.2130	0.4971

1.0	0.4210	0.6019	1.2661	0.5652
1.5	0.2138	0.2774	1.6467	0.9817
2.0	0.1139	0.1399	2.2796	1.5906
2.5	0.0624	0.0739	3.2898	3.5167
3.0	0.0347	0.0402	4.8808	3.9534
3.5	0.0196	0.0222	7.3782	6.2058
4.0	0.0112	0.0125	11.3019	9.7595
4.5	0.0064	0.0071	17.4812	15.3892
5.0	0.0037	0.0040	27.2399	24.3356

catatan: $x = r/\lambda$.

Beberapa permasalahan yang ada di lapangan dijelaskan pada uraian berikut ini yaitu:

- Akuifer dengan kondisi tak hingga (*infinite aquifer*)
- Akuifer dengan kondisi hingga (*finite aquifer*)
- Akuifer dengan beberapa lapisan

1. Akuifer dengan kondisi tak hingga (*infinite aquifer*)

Pada kasus akuifer dengan kondisi tak hingga (*infinite aquifer*) akan dicari besarnya *drawdown* s yang terjadi di sekitar sumur pemompaan.

Persamaan s maka didapat:

$$s = \frac{Q_o}{2\pi KB} \frac{\lambda}{r_w} \frac{K_0(r/\lambda)}{K_1(r_w/\lambda)} \quad 4-32$$

2. Akuifer dengan kondisi hingga (*finite aquifer*)

Pada kasus *leaky aquifer* dengan kondisi hingga (*finite aquifer*) akan dicari besarnya *drawdown* s yang terjadi. Dari pendekatan didapat persamaan:

$$s = H - h = \frac{Q_w}{2\pi KB} \left\{ K_0(x) - I_0(x) \frac{K_0(R/\lambda)}{I_0(R/\lambda)} \right\} \quad 4-33$$

dimana:

$I_0(R/\lambda)$ = modifikasi fungsi Bessel yang pertama dengan orde nol dengan jarak R terhadap sumur pemompaan

$K_0(R/\lambda)$ = modifikasi fungsi Bessel yang kedua dengan orde nol dengan jarak R terhadap sumur pemompaan

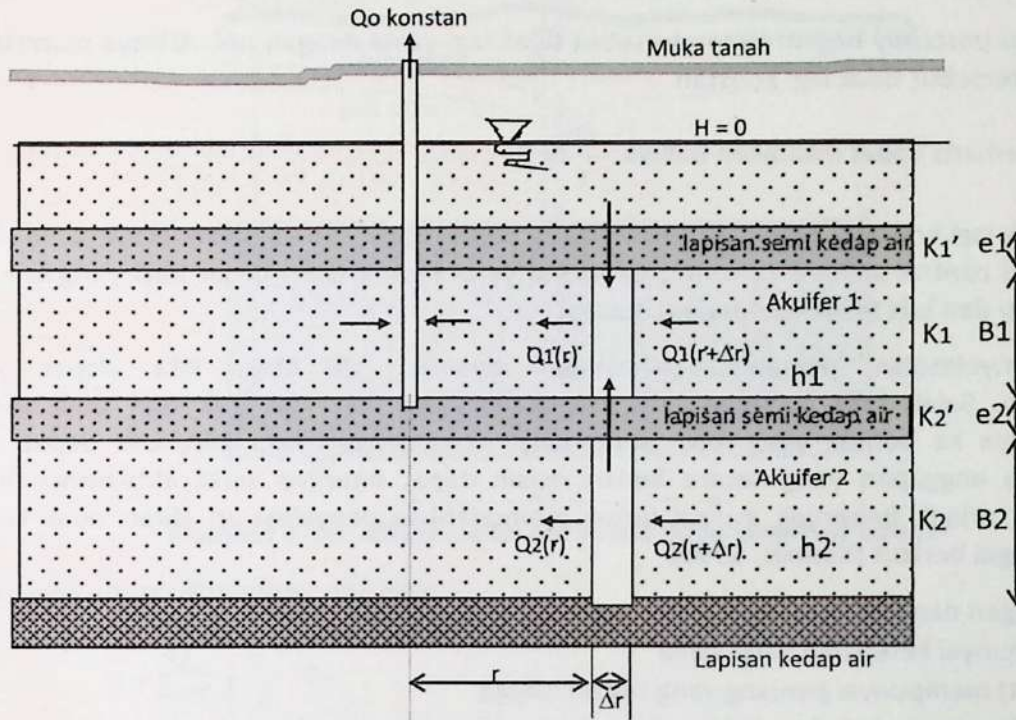
$I_0(x)$ = modifikasi fungsi Bessel yang pertama dengan orde nol

$K_0(x)$ = modifikasi fungsi Bessel yang kedua dengan orde nol

$x = (r/\lambda)$

3. Akuifer Dengan Beberapa Lapisan

Pada suatu lapisan geologi terdapat beberapa jenis akuifer dengan kondisi ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 4-18. Aliran radial pada beberapa lapisan semi confined aquifer

Dengan melihat Gambar 4-18 maka diketahui bahwa besarnya debit pada masing-masing akuifer dapat ditulis:

$$Q_1 = 2\pi K_1 B_1 \frac{\partial h_1}{\partial r} \quad \text{dan} \quad Q_2 = 2\pi K_2 B_2 \frac{\partial h_2}{\partial r} \tag{4-34}$$

4.6 Aliran Tidak Tunak

Persamaan umum aliran air tanah adalah:

$$\frac{K}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{K}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} + K \frac{\partial h}{\partial h} = n \frac{\partial h}{\partial t} \tag{4-35}$$

unconfined aquifer di mana persamaan ini linier dalam h^2

$$\frac{K}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{K}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} + K \frac{\partial h}{h} = n \frac{\partial h}{\partial t}$$

4-36

confined aquifer dimana persamaan ini linier dalam h .

Pada kondisi *unsteady* bagian kanan tersebut tidak lagi sama dengan nol. Artinya material di dalam *control volume* tersebut tidak lagi konstan.

Secara matematis dapat dikatakan bahwa: $\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0$

Atau h tidak lagi konstan. Sehingga dalam hal ini apa yang masuk ke dalam tidak sama dengan apa yang keluar dari *control volume* tersebut. Bilamana yang masuk lebih besar dari yang keluar berarti terjadi akumulasi dan bila lebih kecil terjadi deplesi.

Dalam penyelesaian persamaan-persamaan tersebut di atas, kita dapat melakukan penyederhanaan. Salah satu caranya yaitu mengkondisikan sifat-sifat fisik dari pola aliran dalam kerangka geologis ke bentuk yang lebih sederhana. Atau dengan kata lain, kita dapat melakukan permisalan atau anggapan yang secara ilmiah masih dapat diterima serta aktualisasi di lapangan (dominan) bisa terjadi. Beberapa asumsi untuk memudahkan penyelesaian aliran tidak tunak dapat disebutkan sebagai berikut (Kupper, 1990):

- Akuifer homogen dan isotropis
- Akuifer mempunyai ketebalan yang sama
- Akuifer (dapat) mempunyai panjang yang tak terhingga
- Aproksimasi dua dimensi. Dalam hal ini aliran dapat diasumsikan horizontal
- Sumur pemompaan dipenetrasi dan secara utuh (komplit) ke akuifer
- Pemompaan air dilakukan dengan debit yang konstan
- Isi air di dalam sumur pemompaan dapat diabaikan

Dalam kaitan dengan pemompaan permukaan, piezometris mendekati horizontal walaupun akuifer mempunyai kemiringan tertentu (tidak horizontal) dan dalam kondisi *steady*. Dalam hal ini perhitungannya dapat dipakai *drawdown* (s).

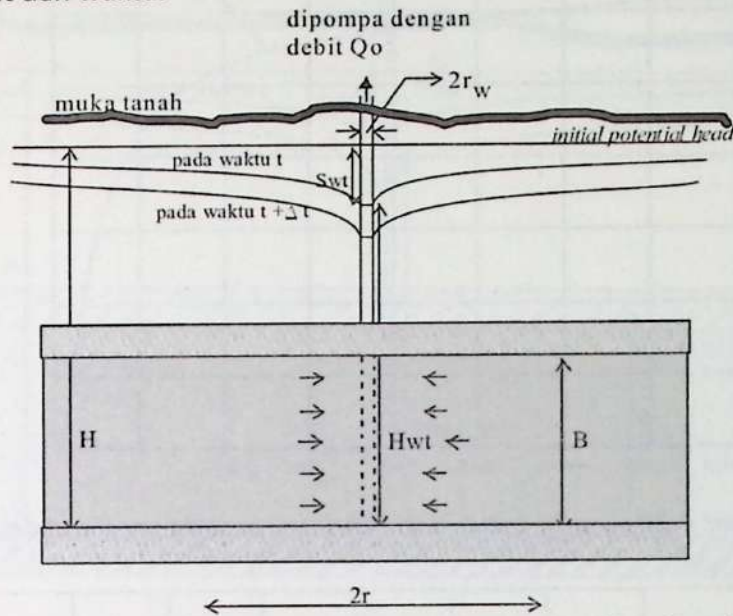
Sebagai contoh aliran tidak tunak, berikut ini diberikan beberapa cara penyelesaian sederhana aliran tidak tunak dengan kondisi tertentu antara lain:

4.6.1 Aliran Radial Pada Confined Aquifer

Suatu pemompaan pada suatu *confined aquifer* ditunjukkan seperti Gambar 4-19. Dalam pemompaan ini ketinggian hidrolik tergantung dari waktu. Untuk penyelesaian persoalan di atas, di samping asumsi yang disebutkan dalam Sub-bab 4.3 ada asumsi lainnya yaitu:

- Air (dianggap secara mendadak) dapat keluar dari akuifer
- Tidak ada *recharge*

- Storitivitas yang dihasilkan dari sifat-sifat elastis baik dari air itu sendiri serta matrik akuifer dianggap konstan dalam tempat dan waktu.



Gambar 4-19. Aliran radial tak tunak pada confined aquifer

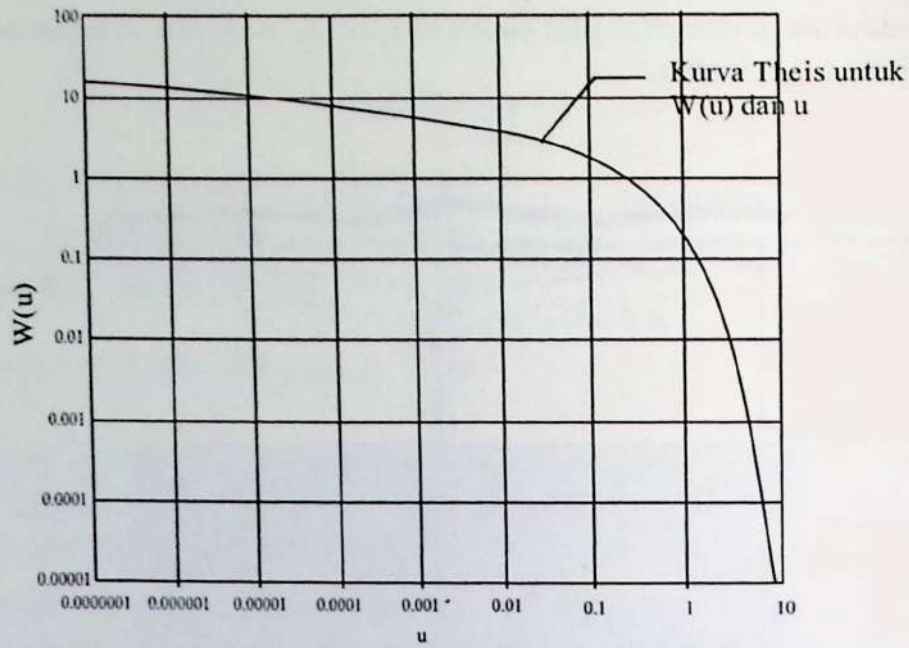
Persamaan umum drawdown s adalah:

$$s = \frac{Q_0}{4\pi T} \int_0^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

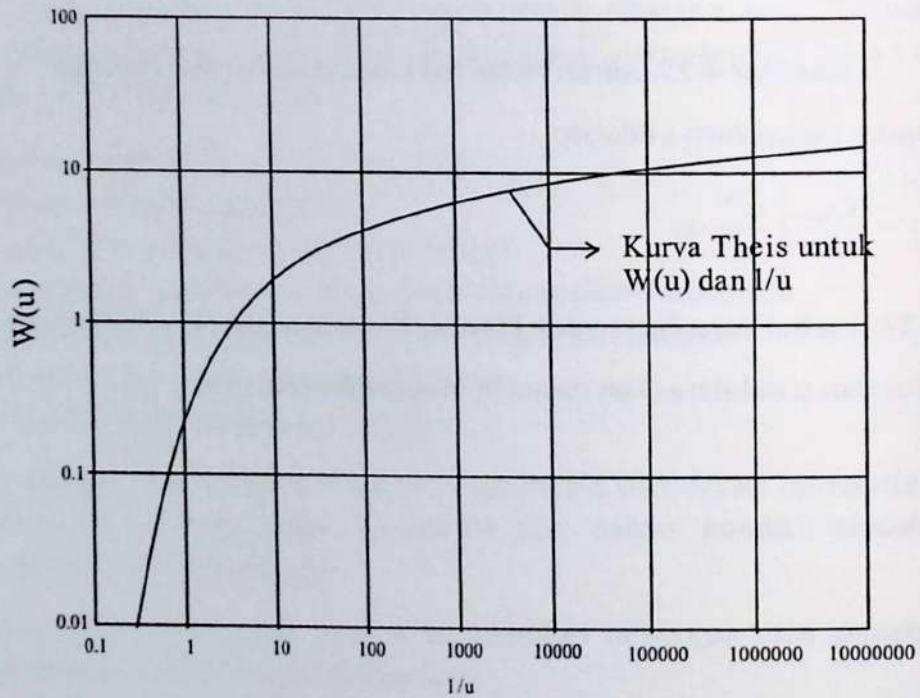
4-37

Persamaan 4-37 disebut juga Persamaan Theis karena ditemukan oleh ahli itu pada Tahun 1935.

Hubungan $W(u)$ dan u diilustrasikan dalam bentuk grafik berikut ini.



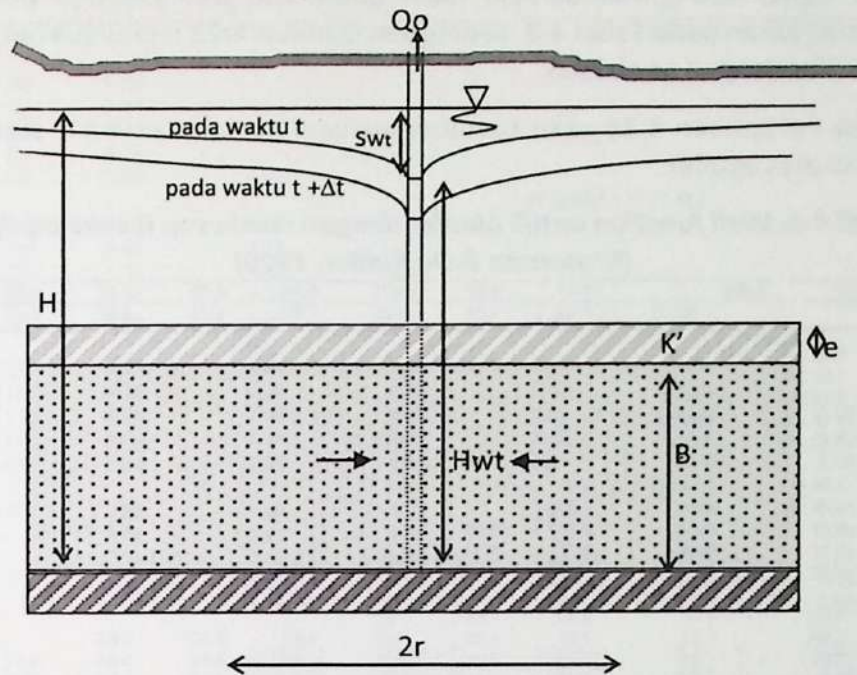
Gambar 4-20. Grafik hubungan $W(u)$ dan u pada confined aquifer



Gambar 4-21. Grafik hubungan $W(u)$ dan $1/u$ pada confined aquifer

4.6.2 Aliran Radial Pada Semi Confined Aquifer

Suatu semi confined aquifer seperti ditunjukkan dalam gambar berikut ini:



Gambar 4-22. Aliran radial tak tunak pada semi-confined aquifer

Persoalannya sama dengan persoalan di Sub-Bab 4.6.1, hanya saja pada lapisan di atas akuifer merupakan lapisan semi kedap air yang memungkinkan adanya rembesan air dari atasnya dengan ketebalan e dan Konduktivitas Hidrauliknya sebesar K' .

Penyelesaian matematis aliran air tanah pada akuifer ini selain berdasarkan asumsi No. 1 s/d 8 Tabel 4-1 seperti yang tersebut di Sub-bab 4.3, masih ada asumsi yang lainnya yaitu:

- Air (dianggap secara mendadak) dapat keluar dari akuifer
Ketinggian hidraulis dari *unconfined aquifer* tidak dipengaruhi oleh pemompaan yang dilakukan pada *semi-confined aquifer*. Artinya muka air di *unconfined aquifer* akan selalu tetap (H pada Gambar 4-22 konstan)
- Rembesan mengikuti Hukum Darcy
- Tidak ada penundaan (*delay*)

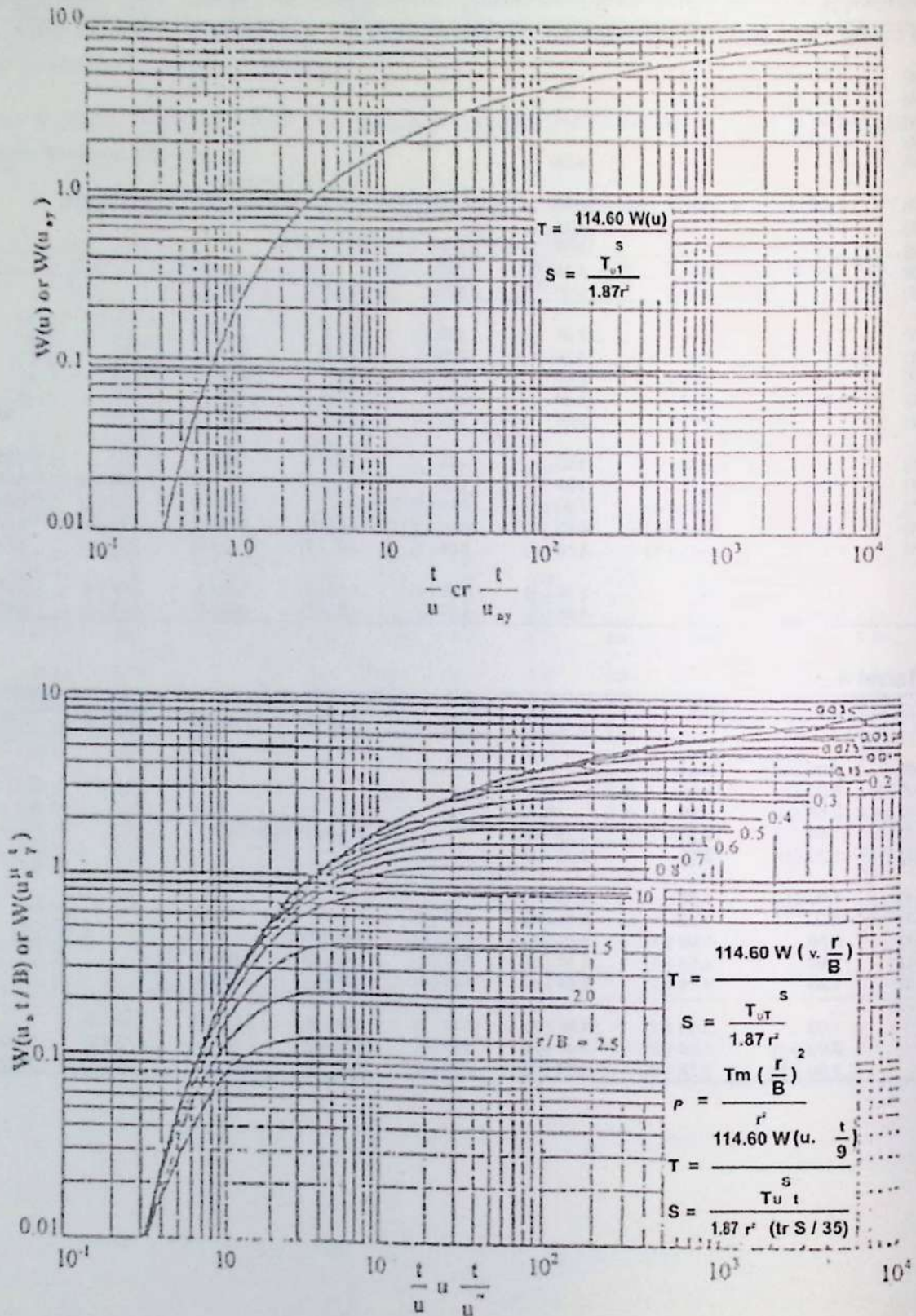
Untuk *aquifer* yang sangat besar dengan rembesan sebanding dengan *drawdown*, Hantush dan Jacob (1955) memberikan solusi:

$$s = \frac{Q_0}{4\pi T} \int_u^\infty \exp\left(-y - \frac{r^2}{4\lambda^2 y}\right) \frac{dy}{y} = \frac{Q_0}{4\pi T} W(u, r/\lambda) \tag{4-38}$$

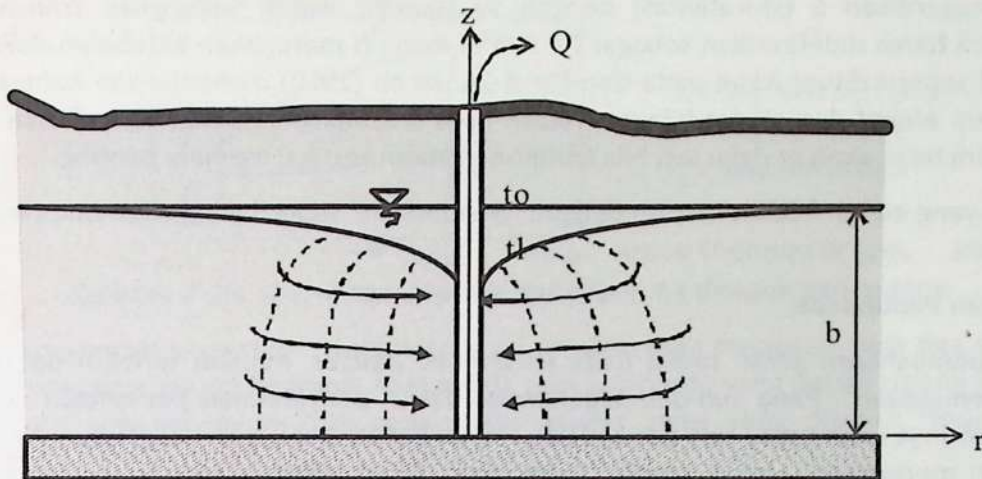
u	l/u	r/L = 0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8
0		∞	4.85	3.50	2.74	2.23	1.55	1.13
1 (-4)	1.00 (4)	8.63						
2 (-4)	5.00 (3)	7.94						
4 (-4)	2.50 (3)	7.25						
6 (-4)	1.66 (3)	6.84						
8 (-4)	1.25 (3)	6.55	4.84					
$W(u,r/L) = W(0,r/L)$								
1 (-3)	1.00 (3)	6.33	4.83					
2 (-3)	5.00 (2)	5.64	4.71					
4 (-3)	2.50 (2)	4.95	4.42	3.48				
6 (-3)	1.66 (2)	4.54	4.18	3.43				
8 (-3)	1.25 (2)	4.26	3.98	3.36	2.73			
1 (-2)	1.00 (2)	4.04	3.81	3.29	2.71	2.22		
2 (-2)	5.00 (1)	3.35	3.24	2.95	2.57	2.18		
4 (-2)	2.50 (1)	2.68	2.63	2.48	2.27	2.02	1.52	
6 (-2)	1.66 (1)	2.29	2.26	2.17	2.02	1.84	1.46	1.11
8 (-2)	1.25 (1)	2.03	2.00	1.93	1.83	1.69	1.39	1.08
1 (-1)	1.00 (1)	1.82	1.80	1.75	1.67	1.56	1.31	1.05
2 (-1)	5.00	1.22	1.21	1.19	1.16	1.11	6.96 (-1)	8.58 (-1)
4 (-1)	2.50	7.02 (-1)	7.00 (-1)	6.93 (-1)	6.81 (-1)	6.65 (-1)	6.21 (-1)	5.65 (-1)
6 (-1)	1.66	4.54 (-1)	4.53 (-1)	4.50 (-1)	4.44 (-1)	4.36 (-1)	4.15 (-1)	3.87 (-1)
8 (-1)	1.25	3.11 (-1)	3.10 (-1)	3.08 (-1)	3.05 (-1)	3.01 (-1)	2.89 (-1)	2.73 (-1)
1	1.00		2.19 (-1)	2.18 (-1)	2.16 (-1)	2.14 (-1)	2.07 (-1)	1.97 (-1)
2	5.00 (-1)		4.88 (-2)	4.87 (-2)	4.85 (-2)	4.82 (-2)	4.73 (-2)	4.60 (-2)

Lanjutan Tabel 4-3:

u	l/u	r/L = 0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
0		∞	8.42 (-1)	2.28 (-1)	6.95 (-2)	2.23 (-2)	7.40 (-3)	2.50 (-3)
1 (-2)	1.00 (2)	4.04						
2 (-2)	5.00 (1)	3.35						
4 (-2)	2.50 (1)	2.68						
6 (-2)	1.66 (1)	2.29	8.39 (-1)					
8 (-2)	1.25 (1)	2.03	8.32 (-1)					
$W(u,r/L) = W(0,r/L)$								
1 (-1)	1.00 (1)	1.82	8.19 (-1)					
2 (-1)	5.00	1.22	7.15 (-1)	2.27 (-1)				
4 (-1)	2.50	7.02 (-1)	5.02 (-1)	2.10 (-1)	6.91 (-2)			
6 (-1)	1.66	4.54 (-1)	3.54 (-1)	1.77 (-1)	6.64 (-2)	2.22 (-2)		
8 (-1)	1.25	3.11 (-1)	2.54 (-1)	1.44 (-1)	6.07 (-2)	2.18 (-2)		
1	1.00	2.19 (-1)	1.85 (-1)	1.14 (-1)	5.34 (-2)	2.07 (-2)	7.30 (-3)	
2	5.00 (-1)	4.89 (-2)	4.44 (-2)	3.35 (-2)	2.10 (-2)	1.12 (-2)	5.10 (-3)	2.10 (-3)
4	2.50 (-1)	3.78 (-3)	3.60 (-3)	3.10 (-3)	2.40 (-3)	1.60 (-3)	1.00 (-3)	6.00 (-4)



Gambar 4-23. Kurva tipe aliran tidak tunak pada akuifer dengan rembesan (Walton, 1960)

4.6.3 Aliran Radial Pada *Unconfined Aquifer*Gambar 4-24. Aliran radial ke sumur pemompaan pada *unconfined aquifer*

Pemompaan pada *confined aquifer* menyebabkan terjadinya penurunan *potentiometric surface*. Air yang didapat dari pemompaan ini disebabkan oleh dua mekanisme, yaitu: ekspansi air di dalam akuifer karena adanya penurunan tekanan pori dan pemadatan dari akuifer akibat kenaikan tekanan efektif meningkat. Pada kondisi ini tidak ada pengurangan air (*dewatering*) dari sistem geologi akuifer ini. Sistem aliran di dalam akuifer selama proses pemompaan arahnya horisontal dan menuju ke sumur pemompaan (lihat Gambar 4-19) artinya tidak ada aliran vertikal.

Bila kita melakukan pemompaan pada suatu *unconfined aquifer* maka akan terjadi penurunan muka air tanah di sekitar pemompaan dan ada komponen aliran yang vertikal (Gambar 4-24). Air yang didapat dari pemompaan ini berasal dari dua mekanisme yaitu penghantaran tertekan dan pengurangan air dari akuifer tersebut.

Menurut Freeze dan Cherry (1979), ada tiga pendekatan untuk memperkirakan dan mengamati penurunan muka air tanah ini dalam skala ruang dan waktu, yaitu:

1. Analisis yang melihat bahwa muka air tanah merupakan batas daerah jenuh air dan daerah tak jenuh air. Penurunan muka air tanah diikuti oleh perubahan kadar air di daerah tak jenuh air di atas muka air tanah tersebut. Hal ini ditunjukkan dalam **Error! Reference source not found.**

Secara teoritis analisis ini lebih lengkap dibandingkan dengan dengan dua pendekatan lainnya karena melibatkan parameter-parameter baik di daerah jenuh air maupun daerah tak jenuh air. Beberapa model matematis telah dibuat (Taylor dan Luthin, 1969; Cooley, 1971; Brutsaert dkk., 1971).

Kesimpulan umum dari studi-studi model di atas adalah bahwa letak muka air tanah selama pemompaan tidak dipengaruhi seluruhnya oleh kondisi di daerah tak jenuh air. Karena hasil yang didapat hanya memberikan distribusi keuntungan yang tidak begitu besar, untuk praktisnya serta sifat-sifat tanah tak jenuh air sangat sulit diamati dan diukur di lapangan maka analisis ini jarang dipakai.

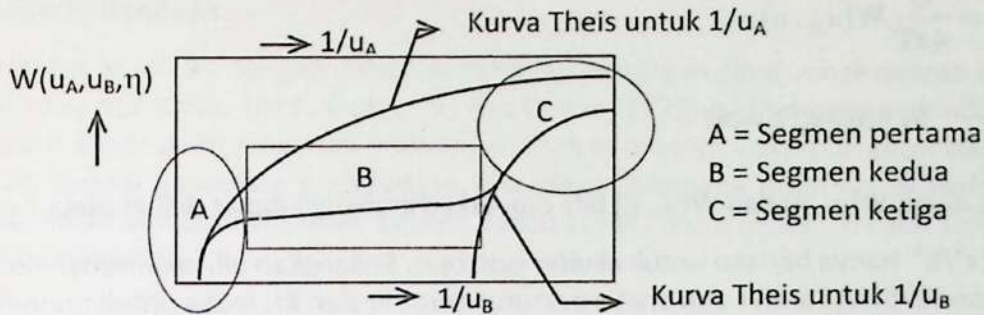
2. Pendekatan kedua adalah dengan penggunaan persamaan yang sama untuk *confined aquifer*, namun dengan menggantikan S (storativitas) dengan S_y (*specific yield*). Sedangkan transmisivitas pada persamaan ini harus didefinisikan sebagai $T = K \cdot b$ di mana b merupakan ketebalan daerah jenuh air kondisi awal seperti ditunjukkan pada Gambar 4-24. Jacob (1950) menunjukkan bahwa hasil analisis ini akan cukup efektif dan akurat bila *drawdown* kecil dibandingkan dengan ketebalan daerah jenuh air (b). Cara ini tidak akan berlaku lagi bila komponen aliran vertikal menjadi penting.
3. Pendekatan yang ketiga adalah konsep dengan "penundaan" seperti yang akan diuraikan dalam Sub bab berikut ini.

4.6.3.1 Dengan Penundaan

Sebelum pembahasan aliran radial pada *unconfined aquifer*, marilah terlebih dahulu kita bahas pengertian "penundaan". Pada sub-bab sebelumnya dalam penyelesaian persamaan aliran air tanah salah satu asumsinya ialah tanpa ada penundaan. Hal ini berarti bahwa air yang keluar dari simpanan di dalam akuifer merupakan reaksi segera (*response*) akibat adanya penurunan muka air karena pemompaan. Untuk *unconfined aquifer* kadang-kadang hal ini tidak benar.

Sebagai contoh: tingkat penurunan muka air tanah mungkin akan lebih cepat dibandingkan dengan tingkat pengeluaran air pori dan hal ini tergantung dari jenis tanahnya. Ada air pori yang lambat mengisi bagian yang kosong akibat penurunan muka air karena porositas tanahnya kecil. Sebaliknya tanah dengan porositas yang besar, air pori akan segera mengisi bagian yang kosong begitu penurunan muka air terjadi. Laju air pori dalam pengisian bagian yang kosong juga diakibatkan oleh laju udara yang mengisi bagian di atas muka air. Bilamana di daerah ini udara tidak dapat mengisi bagian yang kosong karena terhalang oleh lapisan tanah basah di atasnya, maka akan timbul tekanan udara negatif yang menyebabkan penundaan air pori sebagai reaksi terjadinya penurunan muka air tanah (Kodoatie, 1996).

Pendekatan penyelesaian aliran air tanah ini pertama kali dilakukan oleh Boulton (1954, 1955 dan 1963). Boulton menyimpulkan bahwa *drawdown* yang terjadi pada pengamatan di dalam alat *piezometer* yang berada di dekat sumur pemompaan pada *unconfined aquifer* dapat dibagi menjadi tiga segmen. Tiga segmen ini dinyatakan dalam kurva hubungan antara waktu dan *drawdown* pada kondisi muka air tanah selama proses pemompaan. Yang pertama, pada awal pemompaan suatu *unconfined aquifer* dalam jangka waktu yang relatif singkat akan bereaksi seperti pemompaan pada *confined aquifer*. Ini berarti bahwa air yang didapat dari pemompaan berasal dari ekspansi air di dalam akuifer karena adanya penurunan tekanan pori serta pemadatan dari akuifer akibat kenaikan tekanan efektif meningkat. Segmen kedua, efek dari drainase secara gravitasi mulai sehingga ada pengurangan kemiringan (*slope*) kurva waktu dan *drawdown* relatif terhadap kurva Theis (lihat Gambar 4-20). Air yang masuk ke sumur oleh pemompaan sehingga menimbulkan pengurangan air di akuifer yang menyebabkan turunnya muka air tanah adalah lebih besar dibandingkan dengan air yang dihasilkan akibat adanya penurunan *potentiometric surface*. Selama proses pemompaan berlangsung pada segmen ini kurva waktu dan *drawdown* relatif datar. Pada segmen ketiga, kembali kurva tersebut menyesuaikan lagi dengan kurva Theis, namun dengan mengganti S dengan S_y . Secara skematis tiga segmen diilustrasikan seperti gambar berikut ini.



Gambar 4-25. Sketsa tiga segmen hubungan t - s dengan penundaan

Boulton mengembangkan solusi matematis semi-empirik yang mengikuti pola tiga segmen di atas. Secara praktis solusinya sangat berguna, namun ada satu konstanta yang masih kurang jelas definisinya dikaitkan dengan kejadian/gejala fisik pada suatu akuifer yaitu yang disebut "indeks penundaan empiris".

Neuman (1972) memperbaiki solusi Boulton ini, yaitu dengan meniadakan definisi konstanta-konstanta yang empiris. Neuman melihat adanya komponen aliran vertikal sehingga *drawdown* yang dicari merupakan fungsi dari radius r serta sumbu vertikal z seperti ditunjukkan dalam Gambar 4-24. Namun menurut Neuman solusi umum bisa hanya merupakan fungsi r saja bilamana dipakai *drawdown* rata-rata. Persamaan solusi analitisnya dapat dinyatakan dalam bentuk yang sederhana seperti berikut ini:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \eta) \tag{4-39}$$

fungsi sumur pemopaaan untuk *unconfined aauifer*

dimana: $\eta = r^2/b^2$ (nilai η dapat dilihat pada Gambar 4-26)

$T = Kb$, dengan b = tebal akuifer kondisi awal

Persamaan 4-39 juga mengikuti pola tiga segmen seperti yang telah diuraikan di atas, yaitu:

- segmen pertama:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, \eta) \tag{4-40}$$

dimana: $u_A = \frac{r^2 S}{4Tt}$ S = storativitas dan t = waktu

- segmen kedua:

memakai Persamaan 4-31 dengan melihat harga η

- segmen ketiga

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_B, \eta)$$

4-41

dimana $u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt}$ $S_y = \text{specific yield}$

Besarnya $W(u_A, u_B, \eta)$, $W(u_A, \eta)$ dan $W(u_B, \eta)$ bila dibuatkan grafiknya dapat dilihat pada Gambar 4-26.

Parameter $\eta = r^2/b^2$ hanya berlaku untuk akuifer isotropis. Sedangkan bila akuifernya tidak isotropis dengan nilai-nilai konduktivitas arah r dan arah z berturut-turut K_r dan K_z , maka untuk memakai Gambar 4-26 harga parameter η harus disesuaikan dulu seperti berikut ini:

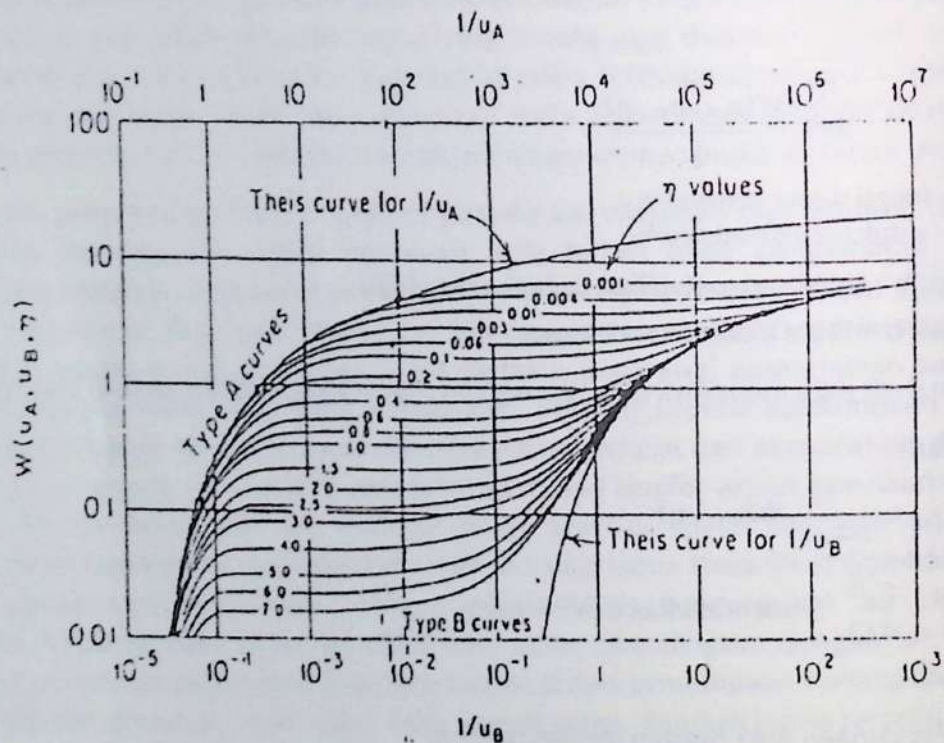
$$\eta = \frac{r^2 K_z}{b^2 K_r}$$

4-42

Transmisivitas T didefinisikan sebagai $T = Kr.b$

Persamaan-persamaan 4-39, 4-40 dan 4-41 hanya berlaku bila $S_y \geq S$ dan $s \ll b$.

Perkiraan *drawdown* rata-rata untuk setiap jarak radial r dari sumur pemompaan untuk setiap waktu t dapat diperoleh dari Persamaan-persamaan 4-40, 4-41, dan 4-42 dengan harga-harga Q, S, S_y , K_z , K_r dan b yang diketahui.



Gambar 4-26. Kurva $W(u_A, u_B, \eta)$ versus $1/u_A$ dan $1/u_B$ pada unconfined aquifer (Neuman, 1975a)

4.6.3.2 Tanpa Penundaan

Di daerah tak jenuh air dengan sistem penundaan pengaruh aliran air di daerah tak jenuh air dapat diabaikan (Cooley dan Case, 1973; Kroszynski dan Dagan, 1975) namun pengaruh udara yang masuk ke daerah tersebut dapat mempengaruhi *drawdown*. Oleh karena itu walaupun ketebalan akuifer dianggap seragam akan terjadi kesalahan perhitungan *drawdown* bilamana besarnya *drawdown* adalah cukup besar dibandingkan dengan ketebalan akuifer. Jacob (1944) memberikan koreksi untuk menyelesaikan persoalan tersebut yaitu:

$$s' = s - s^2/b \tag{4-43}$$

dimana: s' = *drawdown* yang telah dikoreksi
 s = *drawdown* yang diamati
 b = ketebalan awal

Setelah koreksi dilakukan maka perhitungan *drawdown* selanjutnya dapat dianggap untuk *confined aquifer*. Persamaan untuk akuifer ini dapat dipakai tapi dengan mengganti S dengan S_y . Kasus tanpa penundaan ini dapat dikategorikan dalam segmen ketiga dan dapat dipakai dengan koreksi berikut ini:

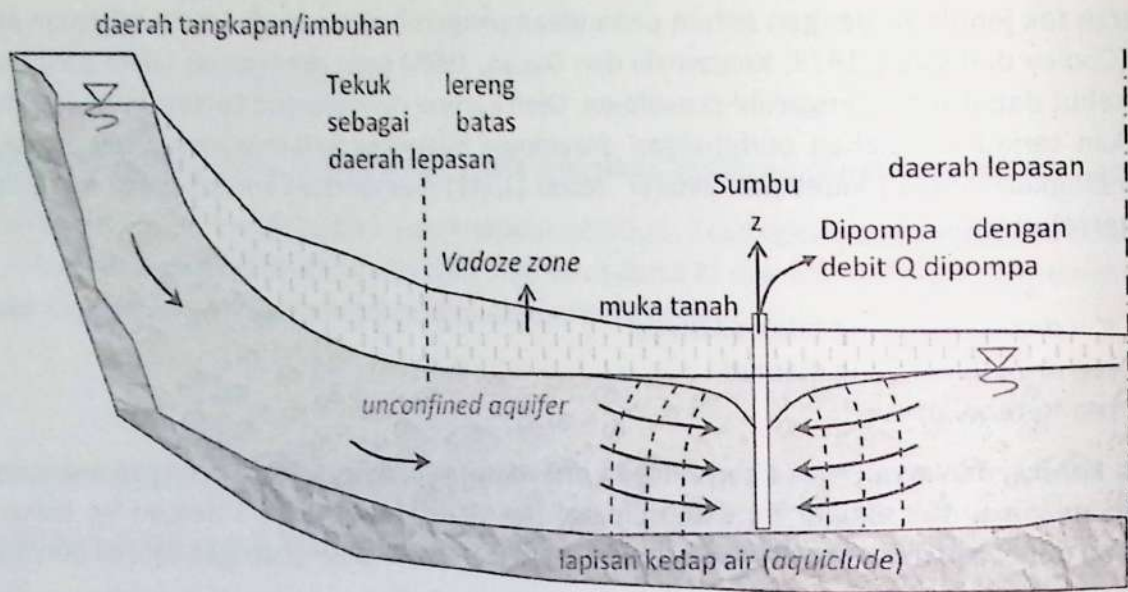
$$s' = \frac{Q}{4\pi T} W(u_B, \eta) \tag{4-44}$$

dimana $u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt}$ dan $S_y = \text{specific yield}$

4.7 Berlaku Hanya pada Daerah CAT

Uraian dalam Bab ini adalah tentang aliran air secara hidraulik pada akuifer baik akuifer tertekan (*confined aquifer*) maupun akuifer bebas (*unconfined aquifer*). Dengan kata lain uraian tersebut hanya berlaku di untuk air tanah (*groundwater*) di daerah CAT.

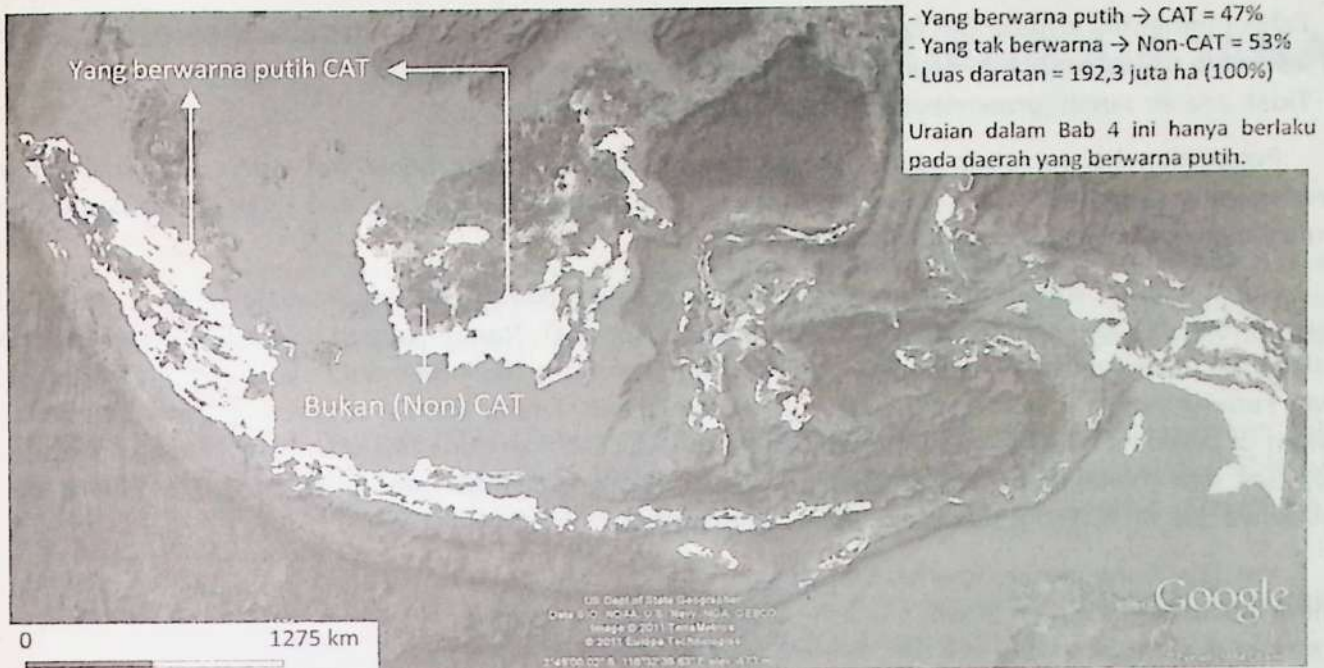
Sebagai contoh Gambar 4-24 merupakan bagian dari suatu sistem *unconfined aquifer* dalam suatu CAT yang bila digambarkan secara regional seperti ditunjukkan dalam Gambar 4-27.



Gambar 4-27. Detail Gambar 4-24 dilihat secara regional dari suatu sistem akuifer bebas

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa ruang darat Indonesia terbagi atas daerah CAT dan daerah Non-CAT dengan perbandingan 47% CAT dan 53% Non-CAT. Karena dalam CAT ada akuifer maka uraian tentang aliran air tanah (*groundwater flow*) pada akuifer bebas dan pada akuifer tertekan hanya berlaku sebesar 47% ruang darat Indonesia yang mempunyai CAT.

Untuk daerah Non-CAT yaitu seluas 53% dari ruang data Indonesia hanya ada aliran di daerah *vadoze zone* yang berupa *soil water flow* yang dikenal dengan *throughflow* dan atau *interflow*. Contoh daerah aliran air tanah (*groundwater flow*) secara hidraulik sesuai dengan uraian dalam Bab ini ditunjukkan dalam Gambar 4-28.



a. CAT (warna putih) dan Non-CAT (tak berwarna)



b. Yang berwarna adalah CAT

Gambar 4-28. Contoh aliran air tanah secara hidraulik hanya berlaku di daerah CAT (yang berwarna)

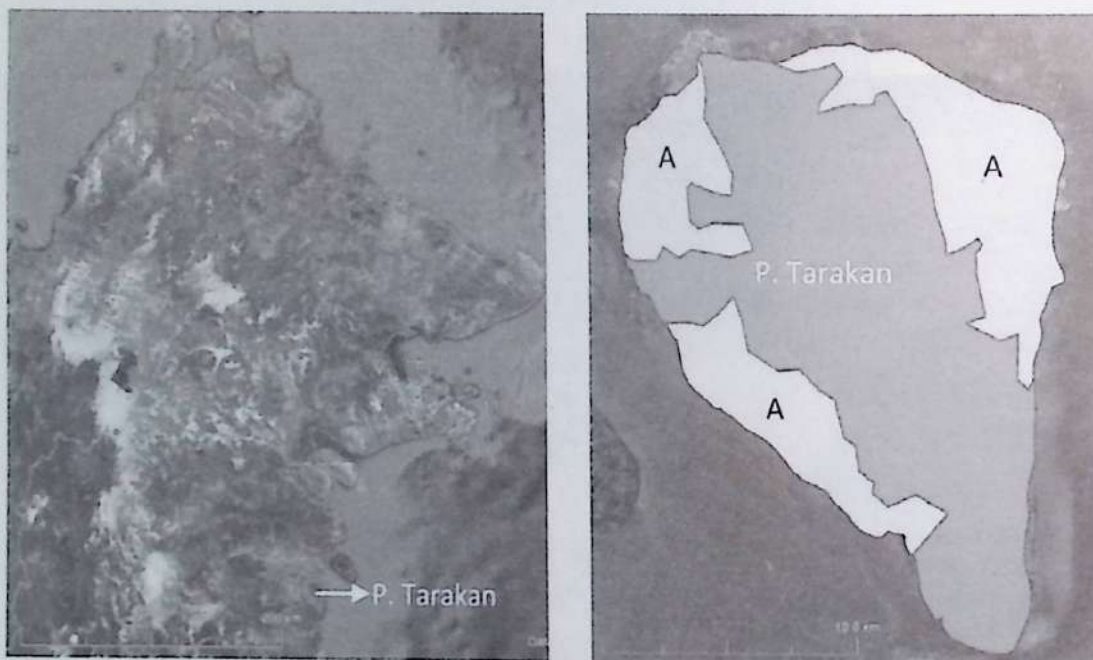
Untuk daerah Non-CAT ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, yaitu:

- Tidak memenuhi kriteria CAT berdasar PP No. 43 Tahun 2008, seperti: tidak ada batas hidrogeologis, tidak ada daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah, tidak ada akuifer
- Tidak ada air tanah (*groundwater*) namun hanya ada *soil water*.

Pengertian hal tersebut adalah bahwa daerah Non-CAT yang berisi *soil water* bisa mempunyai wadah yang cukup bervariasi. Ada daerah wadah *soil water*nya tidak luas dan tidak dalam namun ada pula yang sebaliknya yaitu wadah luas dan dalam.

Untuk contoh wadah *soil water* yang luas dan dalam pada pulau besar adalah Kalimantan. Pada bagian tengah Pulau Kalimantan merupakan daerah Non-CAT. Namun karena usia pulau tersebut sudah relatif tua maka wadah air tanah berupa *soil water* (atau yang tidak memenuhi kriteria CAT) adalah luas dan kedalamannya bisa mencapai 30 m ke dalam tanah. Untuk kondisi seperti ini maka pengolahan lahan di pulau ini harus ekstra hati-hati terutama bila dilakukan penambangan yang biasanya menggali *top soil* dan menambang di batuan bawahnya. Takkala penambangan selesai, *top soil* hilang maka biasanya daerah tersebut tidak akan ada tumbuhan lagi.

Hal lain yang perlu diperhatikan adalah ada daerah Non-CAT yang berupa wadah yang bisa meresapkan air ke dalam tanah. Jadi artinya ada air yang langsung berinfiltrasi namun tidak disebut CAT karena tak mempunyai kriteria CAT. Sebagai contoh adalah di Pulau Tarakan seperti



a. Pulau Tarakan

b. Detail pulau

Gambar 4-29. Contoh Pulau Tarakan yang berupa daerah yang bisa meresapkan air ke dalam tanah tapi bukan daerah CAT

Kondisi geologi di daerah A Pulau Tarakan (Gambar 4-29b) adalah merupakan formasi endapan aluvium, penyusun *sediment clastic alluvium* dengan umur batuan merupakan kuarter Holosen (Puslitbang Geologi,). Kondisi ini menyebabkan air dapat meresap ke daerah aluvial muda tersebut.

BAB 5. RUANG AIR TANAH

5.1 Definisi Dan Kriteria CAT dan Non-CAT

Dalam UU Sumber Daya Air daerah aliran air tanah disebut Cekungan Air Tanah (CAT) atau *groundwater basin*. Definisi CAT adalah suatu wilayah yang dibatasi oleh batas hidrogeologis, tempat semua kejadian hidrogeologis seperti proses pengimbuhan, pengaliran, dan pelepasan air tanah berlangsung.

Ayat (2) dan Ayat (3) Pasal 12 UU No. 7 Tahun 2004 Tentang Sumber Daya Air menyatakan bahwa Pengelolaan air tanah didasarkan pada CAT dan ketentuan mengenai pengelolaannya diatur lebih lanjut dengan peraturan pemerintah (PP). Peraturan Pemerintah untuk air tanah sudah terbit yaitu PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah.

Sehingga dapat dikatakan bahwa CAT adalah batas teknis Pengelolaan Sumber Daya Air untuk air tanah. *Basin* dalam Bahasa Indonesia berarti cekungan (Echols & Shadily, 2002a).

Kriteria CAT berdasar PP No. 43 Tahun 2008 adalah sebagai berikut:

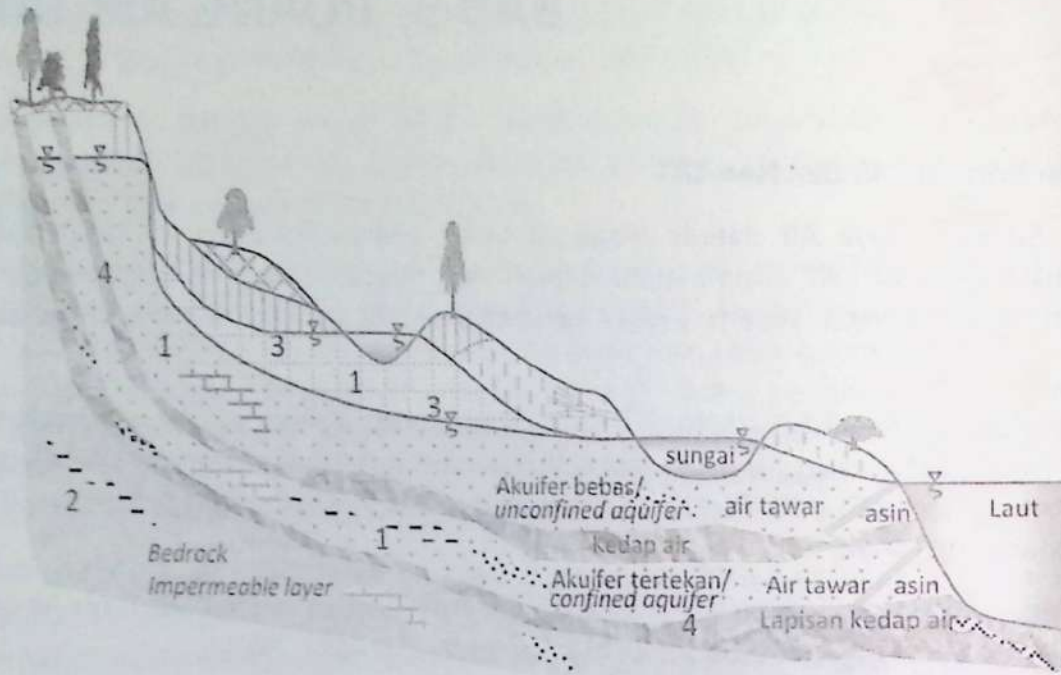
- a. Mempunyai batas hidrogeologis yang dikontrol oleh kondisi geologis dan/atau kondisi hidraulik air tanah. Batas hidrogeologis adalah batas fisik wilayah pengelolaan air tanah. Batas hidrogeologis dapat berupa batas antara batuan lulus dan tidak lulus air, batas pemisah air tanah, dan batas yang terbentuk oleh struktur geologi yang meliputi, antara lain, kemiringan lapisan batuan, patahan dan lipatan.
- b. Mempunyai daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah dalam satu sistem pembentukan air tanah. Daerah imbuhan air tanah merupakan kawasan lindung air tanah, di daerah tersebut air tanah tidak untuk didayagunakan, sedangkan daerah lepasan air tanah secara umum dapat didayagunakan, dapat dikatakan sebagai kawasan budi daya air tanah.
- c. Memiliki satu kesatuan sistem akuifer: yaitu kesatuan susunan akuifer, termasuk lapisan batuan kedap air yang berada di dalamnya. Akuifer dapat berada pada kondisi tidak tertekan atau bebas (*unconfined*) dan/atau tertekan (*confined*).

Kriteria CAT dapat dibuat daftar (*list*) dan ditunjukkan dalam Tabel 5-1.

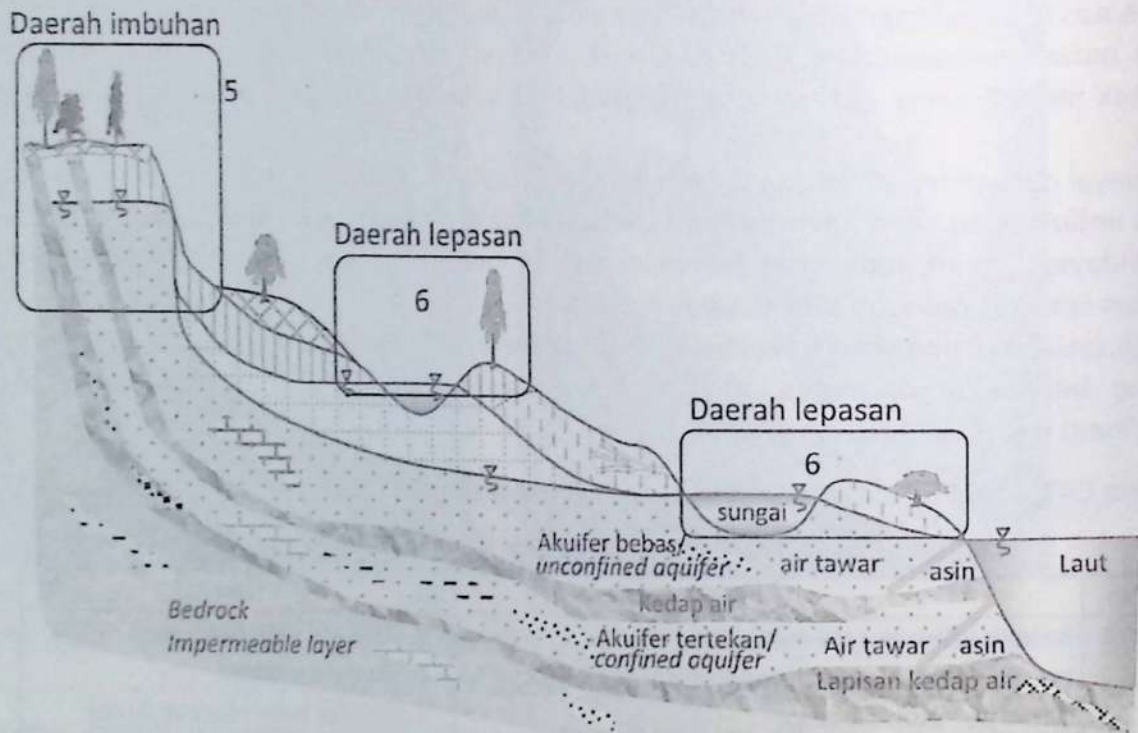
Tabel 5-1. Kriteria CAT (PP No. 43 Tahun 2008)

No.	Uraian	No.	Uraian
1.	Batuan lulus air (<i>permeable</i>)	5.	Daerah imbuhan
2.	Batuan tidak lulus air (<i>impermeable</i>)	6.	Daerah lepasan
3.	Batas pemisah air tanah	7.	Akuifer bebas (<i>unconfined</i>)
4.	Batas oleh struktur geologi: kemiringan lapisan batuan, patahan dan lipatan.	8.	Akuifer tertekan (<i>confined</i>)

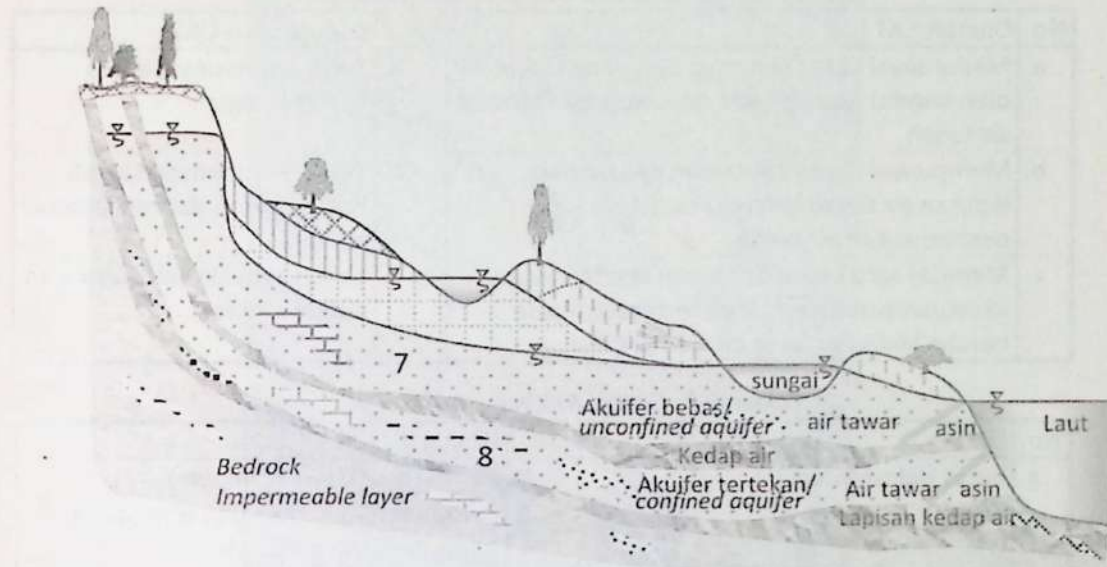
Ilustrasi kriteria CAT dalam Tabel 5-1 ditunjukkan dalam Gambar 5-1, Gambar 5-2 dan Gambar 5-3.



Gambar 5-1. Ilustrasi Kriteria a. untuk CAT, keterangan Nomor sesuai Nomor dalam Tabel 5-1



Gambar 5-2. Ilustrasi Kriteria b. untuk CAT, keterangan Nomor sesuai Nomor dalam Tabel 5-1



Gambar 5-3. Ilustrasi Kriteria c. untuk CAT, keterangan Nomor sesuai Nomor dalam Tabel 5-1

Menurut KepPres No. 26 Tahun 2011 Tentang Cekungan Air Tanah, CAT di Indonesia terdiri atas akuifer bebas (*unconfined aquifer*) dan akuifer tertekan (*confined aquifer*). Akuifer bebas merupakan akuifer jenuh air (*saturated*). Lapisan pembatasnya, yang merupakan *aquitard*, hanya pada bagian bawahnya dan tidak ada pembatas *aquitard* di lapisan atasnya, batas di lapisan atas berupa muka air tanah. Dengan kata lain merupakan akuifer yang mempunyai muka air tanah (Kodoatie, 1996). Sedangkan akuifer tertekan merupakan akuifer jenuh air yang dibatasi oleh lapisan atas dan lapisan bawah yang kedap air (*aquiclude*) dan tekanan airnya lebih besar dari tekanan atmosfer. Pada lapisan pembatasnya tidak ada air yang mengalir (*no flux*) (Kodoatie, 1996). Menurut Bear (1979), akuifer tertekan adalah akuifer yang batas lapisan atas dan lapisan bawah adalah formasi tidak tembus air, muka air akan muncul di atas formasi tertekan bawah. Akuifer ini bisa ada atau tidak pada bawah permukaan tanah.

Mengacu pada kriteria CAT dalam PP No. 43 Tahun 2008, maka kriteria Bukan CAT (Non-CAT) atau CAT tidak potensial adalah sebagai berikut:

1. Tidak mempunyai batas hidrogeologis yang dikontrol oleh kondisi geologis dan/atau kondisi hidrolik air tanah.
2. Tidak mempunyai daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah dalam satu sistem pembentukan air tanah.
3. Tidak memiliki satu kesatuan sistem akuifer.

Gabungan kriteria CAT dan Non-CAT ditunjukkan dalam Tabel 5-2 dan Tabel 5-3.

Tabel 5-2. Kriteria daerah CAT dan Non-CAT

No.	Daerah CAT	No.	Daerah Non-CAT
a.	Mempunyai batas hidrogeologis yang dikontrol oleh kondisi geologis dan/atau kondisi hidraulik air tanah	a.	Tidak mempunyai batas hidrogeologis
b.	Mempunyai daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah dalam satu sistem pembentukan air tanah	b.	Tidak mempunyai daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah
c.	Memiliki satu kesatuan sistem akuifer: yaitu kesatuan susunan akuifer, termasuk lapisan batuan kedap air yang berada di dalamnya	c.	Tidak memiliki satu kesatuan sistem akuifer

Tabel 5-3. Detail Kriteria Tabel 5-2

No.	Uraian	No.	Uraian
a.	Batas hidrogeologis	1.	Batuan lulus air (<i>permeable</i>)
		2.	Batuan tidak lulus air (<i>impermeable</i>)
		3.	Batas pemisah air tanah
		4.	Batas oleh struktur geologi: kemiringan lapisan batuan, patahan dan lipatan.
b.	Mempunyai daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah	5.	Daerah imbuhan
		6.	Daerah lepasan
c.	Memiliki satu kesatuan sistem akuifer	7.	Akuifer bebas (<i>unconfined</i>)
		8.	Akuifer tertekan (<i>confined</i>)

Contoh kemiringan lapisan batuan, patahan dan lipatan seperti dalam Tabel 5-2 dapat dilihat dalam Gambar 5-4, Gambar 5-5, Gambar 5-6 dan Gambar 5-7.



a. Contoh 1 lapisan batuan sebagai salah satu batas hidrogeologis

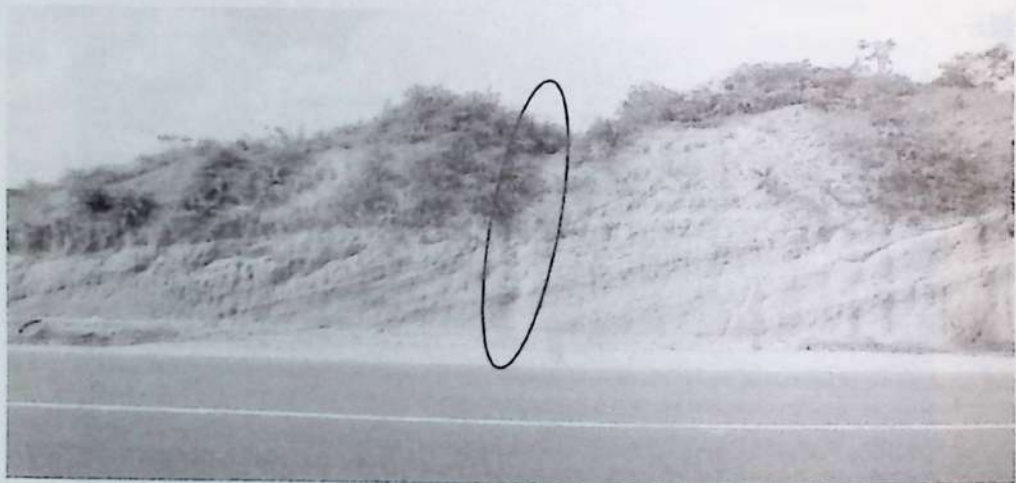


b. Contoh 2 lapisan batuan sebagai salah satu batas hidrogeologis



c. Contoh 3 lapisan batuan yang sudah mengalami pelapukan (*weathering*)

Gambar 5-4. Contoh lapisan batuan



a. Contoh patahan (minor)



b. Contoh patahan sebagai salah satu batas hidrogeologis



c. Detail Gambar b. dokumentasi patahan

Gambar 5-5. Dokumentasi contoh patahan (fault)



a. Contoh patahan di jalan di salah satu wilayah Kota Semarang



b. Contoh patahan jalan yang terus terjadi dan nampak walau jalan diperbaiki berkali-kali

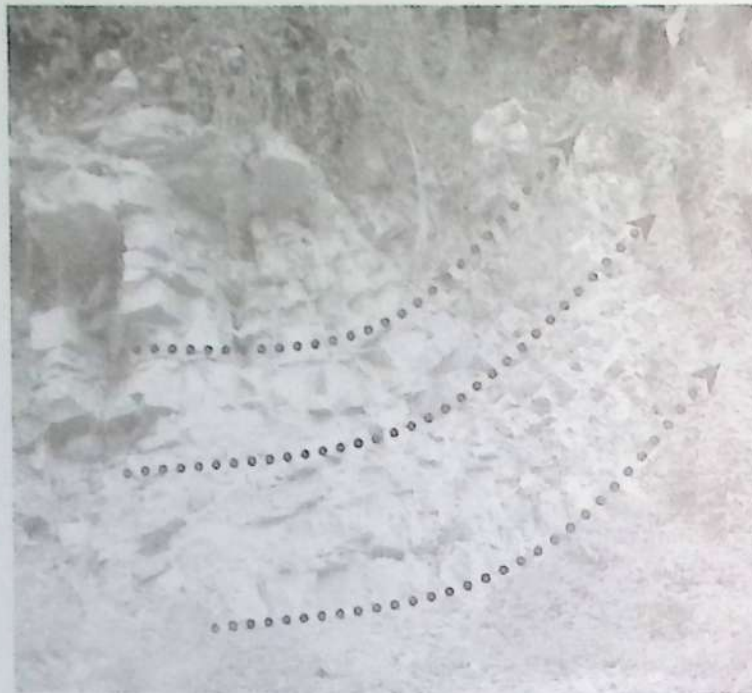


c. Letak patahan dari Gambar a dan b

Gambar 5-6. Contoh patahan di jalan raya Manyaran Semarang



a. Lipatan (*fold*), jungkit (*tilt*) dan karang/*coral* terangkat di Indonesia (Katili & Soetadi, 1971)



b. Contoh lipatan lokal (Kodoatie, 2010b)

Gambar 5-7. Contoh lipatan dan jungkit (Katili & Soetadi, 1971; Kodoatie, 2010b)

5.2 Sebaran CAT dan Non-CAT di Indonesia

Ruang air tanah di Indonesia identik dengan ruang darat Indonesia. Secara prinsip ruang air tanah di Indonesia (atau ruang darat) dibagi menjadi CAT dan Bukan CAT (Non-CAT) atau CAT tidak potensial (KepPres No. 26 Tahun 2011).

Gambaran CAT dan Non-CAT di Indonesia ditunjukkan dalam Gambar 5-8.



Gambar 5-8. CAT (warna putih) dan Non-CAT (tak berwarna)

Luas CAT dan Non-CAT adalah sebagai berikut (KepPres No. 26 Tahun 2011):

- Luas CAT : 907,615 km² (atau 47,2% luas daratan)
- Luas Non-CAT : 1,014,985 km² (atau 52,8% luas daratan)
- Luas daratan : 1,922,600 km² (100%)

Ruang darat Indonesia identik dengan seluruh pulau-pulau di Indonesia baik besar maupun kecil dan merupakan negara kepulauan (*archipelago islands*) yang terluas di dunia dengan jumlah pulau 17508. Lima (5) pulau besar dengan luas > 100000 km² adalah Kalimantan, Sumatra, Papua, Sulawesi dan Jawa; 26 pulau mempunyai luas < 100000 km² namun > 2000 km². Sisanya 17477 (99,82% dari seluruh pulau) adalah pulau-pulau kecil dengan luas < 2000 km². Lima pulau besar bila dilihat lebih detail juga mempunyai karakter yang berbeda. Sumatra, dan Jawa dilalui oleh gunung berapi namun Kalimantan dan Papua tidak memiliki gunung berapi sedangkan Sulawesi hanya ada gunung berapi di Provinsi Sulawesi Utara. Berdasar luas pulau, luas CAT, luas Non-CAT serta keberadaan gunung berapi maka dapat dikatakan masing-masing pulau mempunyai karakteristik yang unik baik dari sisi air tanah maupun dari sisi sumber daya airnya. Oleh karena itu perlu dikaji lebih detail kondisi pulau-pulau tersebut di atas.

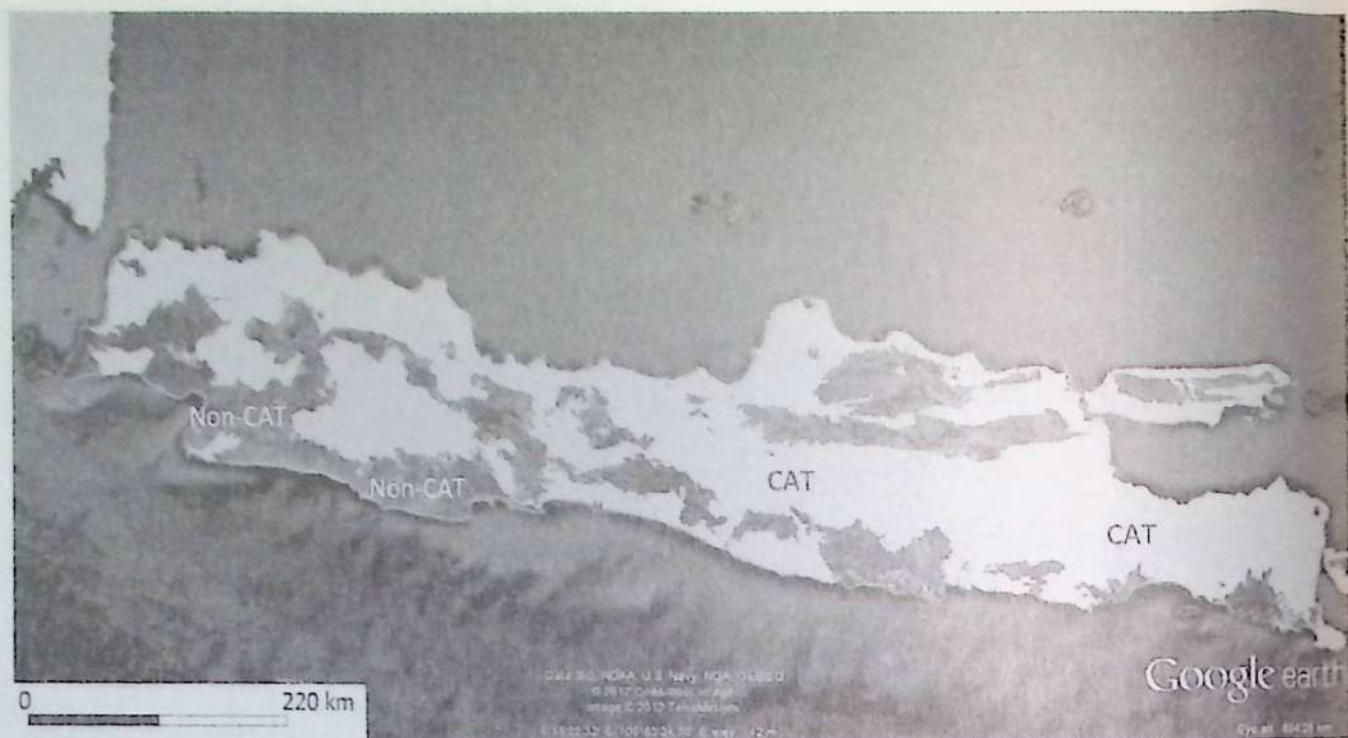
Ilustrasi CAT dan Non-CAT di beberapa pulau ditunjukkan dalam Gambar 5-9 a s/d i. Luas pulau, jumlah CAT, Luas CAT dan Non-CAT dan % luasnya tiap pulau ditunjukkan dalam Tabel 5-4. Ilustrasi luas pulau, % Luas CAT dan Non-CAT terhadap luas pulau Gambar 5-10.



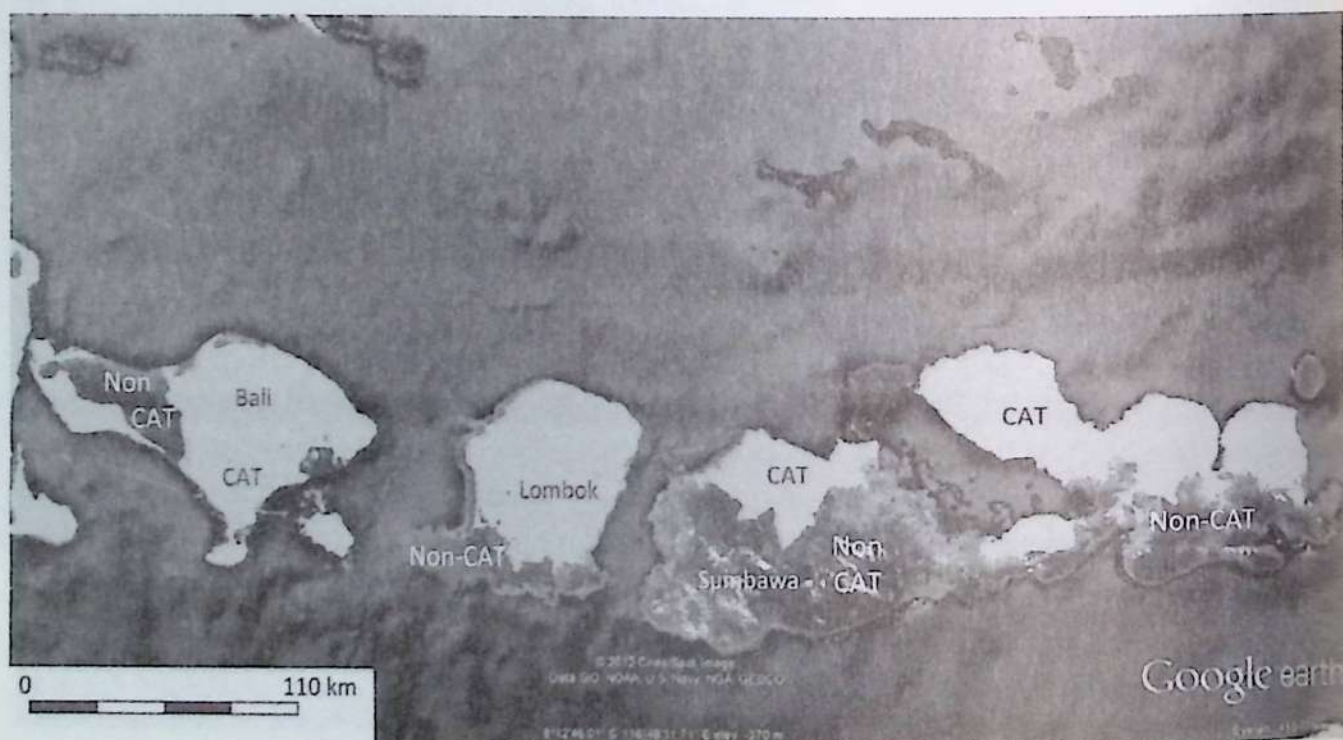
a. CAT dan Non-CAT Sumatra



b. CAT dan Non-CAT di Kalimantan



c. CAT dan Non-CAT di Jawa



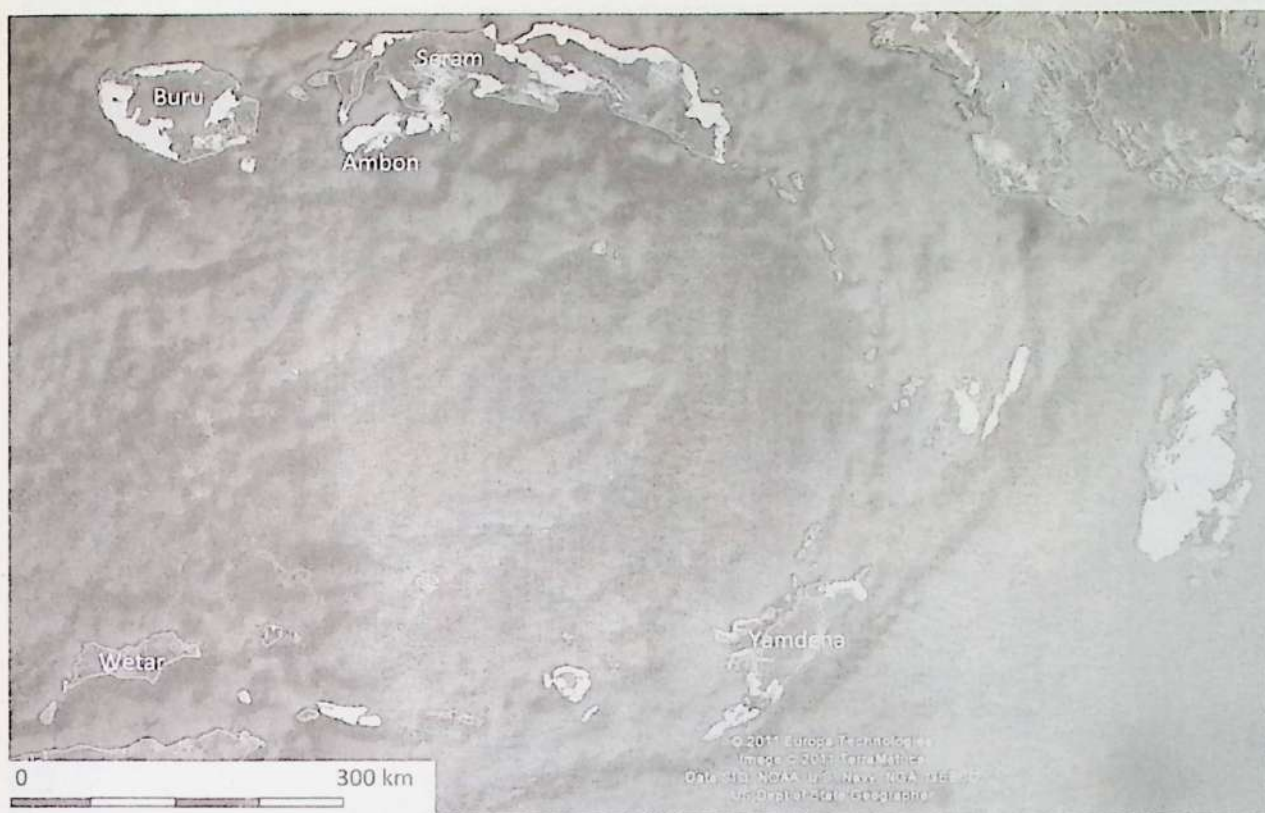
d. CAT dan Non-CAT di Bali dan NTB



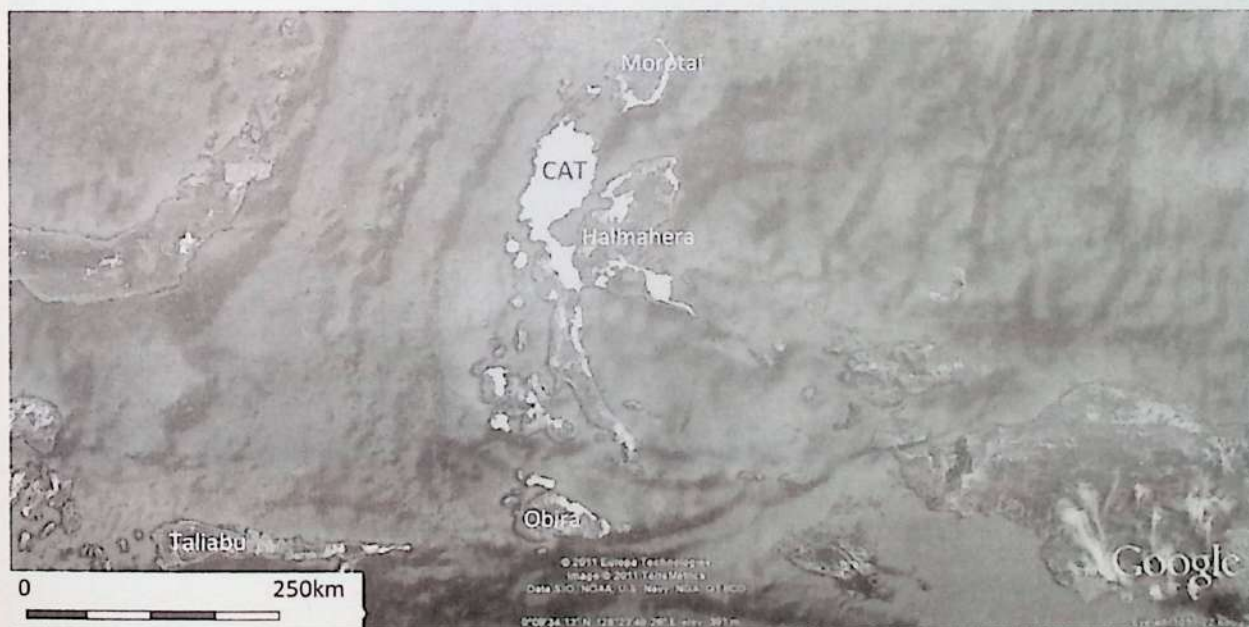
e. CAT dan Non-CAT di NTT



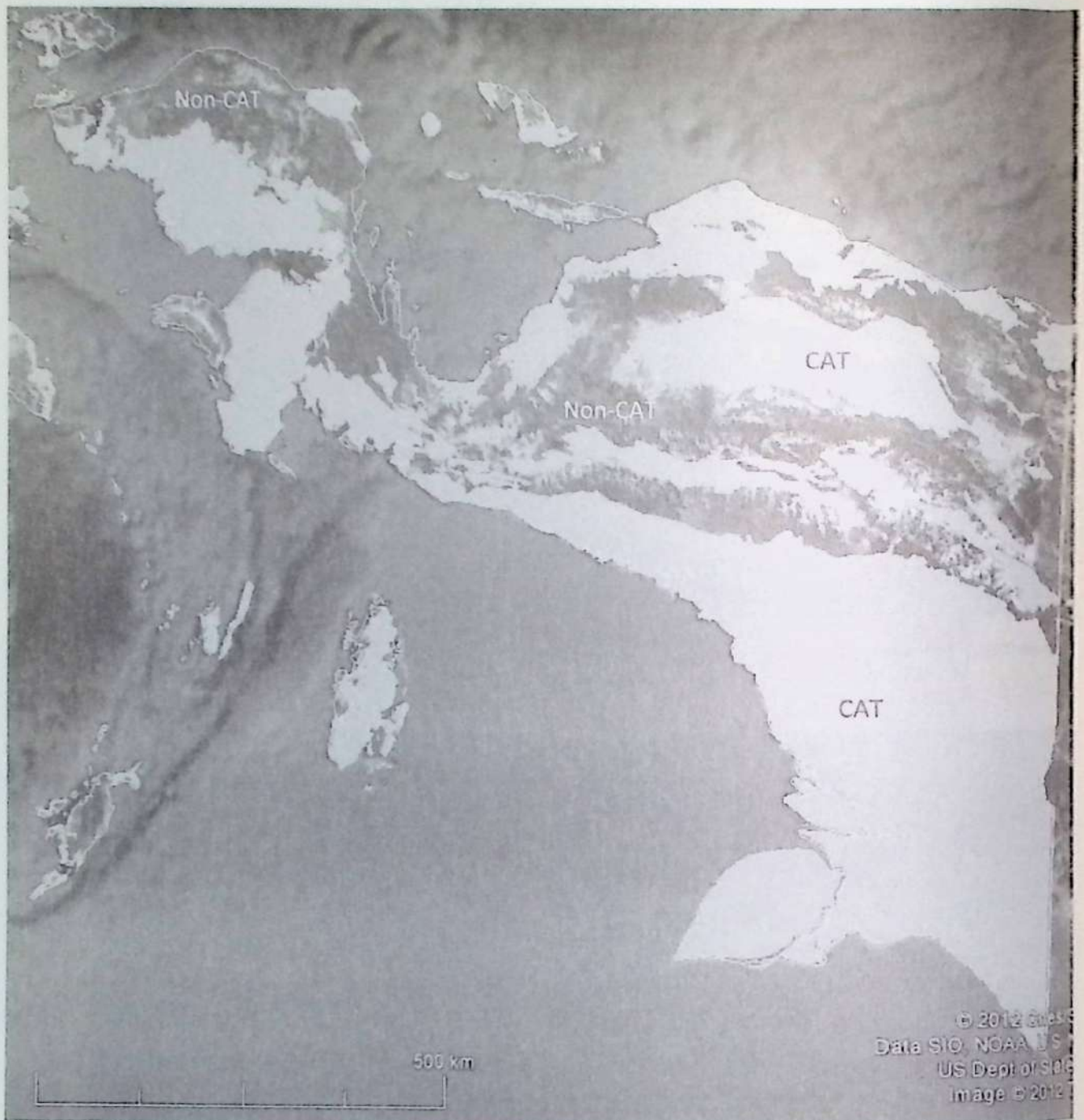
f. CAT dan Non-CAT di Sulawesi



g. CAT dan Non-CAT di Prov. Maluku



h. CAT dan Non-CAT di Prov. Maluku Utara

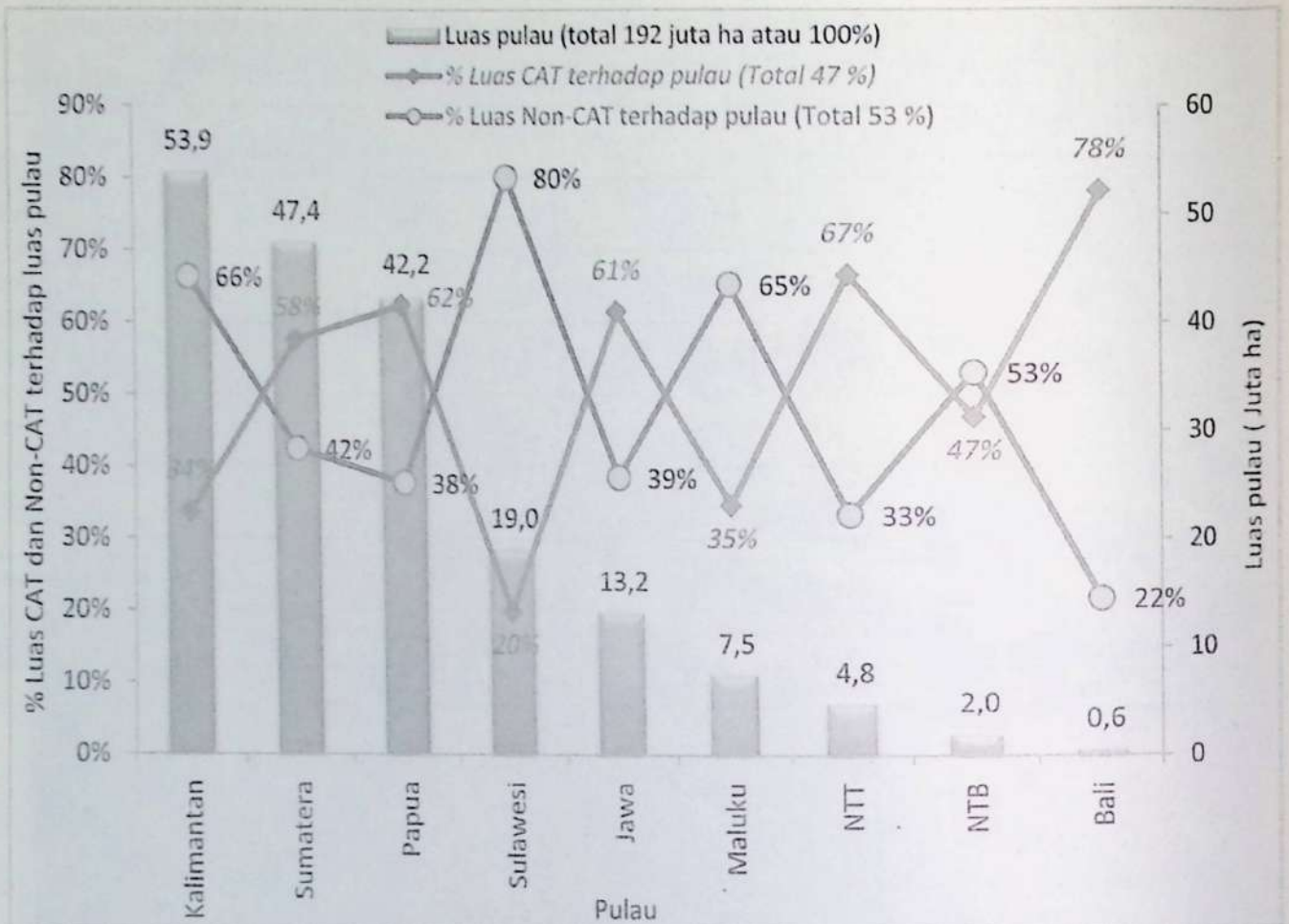


i. CAT dan Non-CAT di Pulau Papua

Gambar 5-9. CAT (warna) dan Non-CAT (tak berwarna) di beberapa pulau

Tabel 5-4. Luas pulau, jumlah CAT, Luas CAT dan Non-CAT dan % luas nya tiap pulau (KepPres No. 26 Tahun 2011 Tentang CAT; Pusat Lingkungan Geologi, 2009)

No.	Nama Pulau	Luas Juta Ha	CAT Jumlah	Luas CAT Juta Ha	% CAT thd Luas pulau	Luas Non- CAT Juta Ha	% Non-CAT thd Luas Pulau
		1	2	3	4 = 3/1	8	9 = 8/1
1	Kalimantan	53,9	22	18,1	34%	35,8	66%
2	Sumatera	47,4	65	27,3	58%	20,1	42%
3	Papua	42,2	40	26,3	62%	15,9	38%
4	Sulawesi	19,0	91	3,8	20%	15,2	80%
5	Jawa	13,2	80	8,1	61%	5,1	39%
6	Maluku	7,5	68	2,6	35%	4,9	65%
7	NTT	4,8	38	3,2	67%	1,6	33%
8	NTB	2,0	9	0,9	47%	1,1	53%
9	Bali	0,6	8	0,4	78%	0,1	22%
10	Total Pulau-Pulau Besar	190,5	421	90,8	47%	99,8	-
11	Pulau-Pulau Lainnya	1,7	-	-	0%	1,7	Untuk pulau-pulau kecil hampir semua Non-CAT
12	Total Pulau=Daratan	192,3	Total Luas Non-CAT Juta Ha			101,5	53%
13	Jumlah Pulau	17.508	ada yang mengatakan jumlahnya tidak sebesar ini				



Gambar 5-10. Luas pulau, % Luas CAT dan Non-CAT terhadap luas pulau

5.3 CAT

Penentuan CAT bukan didasarkan pada batas administrasi melainkan pada batas hidrogeologis, oleh karena itu banyak CAT yang keberadaannya melintasi dua wilayah administrasi, bahkan bisa lebih. Maka dari itu CAT terdiri atas CAT Lintas Negara, CAT Lintas Provinsi, CAT Lintas Kab/Kota atau CAT dalam Provinsi dan CAT Dalam Kab/Kota seperti ditunjukkan dalam Tabel 5-5.

Tabel 5-5. Potensi air tanah pada CAT di Indonesia
(KepPres No. 26 Tahun 2011 Tentang Cekungan Air Tanah)

No.	CAT	Jumlah	Luas (km ²)	Potensi air tanah pada Akuifer (juta m ³ /tahun)	
				Bebas	Tertekan
1	Lintas Negara	4	147.405	126.171	5.252
2	Lintas Provinsi	36	324.302	134.413	4.107
3	Lintas Kab/Kota	176	349.673	196.815	9.769
4	Dalam Kab/Kota	205	86.235	38.818	1.779
	Total	421	907,615	496,217	20,907

CAT tersebar di seluruh Indonesia dengan total besarnya potensi masing-masing adalah (KepPres No. 26 Tahun 2011):

- Potensi akuifer bebas : 496,217 juta m³/tahun 96 %
- Potensi akuifer tertekan : 20,906 juta m³/tahun 4 %
- Potensi Total : 517,123 juta m³/tahun 100 %

5.3.1 Sebaran CAT di Indonesia

Jumlah cekungan air tanah di Indonesia sebanyak 421 CAT, terutama tersebar di pulau-pulau besar dengan total potensi air tanah dalam akuifer bebas dan akuifer tertekan diperkirakan mencapai 517 milyar m³/tahun. Sebanyak 80 cekungan air tanah diantaranya terdapat di P.Jawa dan P.Madura dengan potensi air tanah sekitar 41 milyar m³/tahun (KepPres No. 26 Tahun 2011).

Jumlah hamparan CAT terbanyak adalah dalam kabupaten/kota yaitu 205 buah. Kemudian berturut-turut lintas kabupaten/kota 176, lintas provinsi 36 dan lintas negara 4.

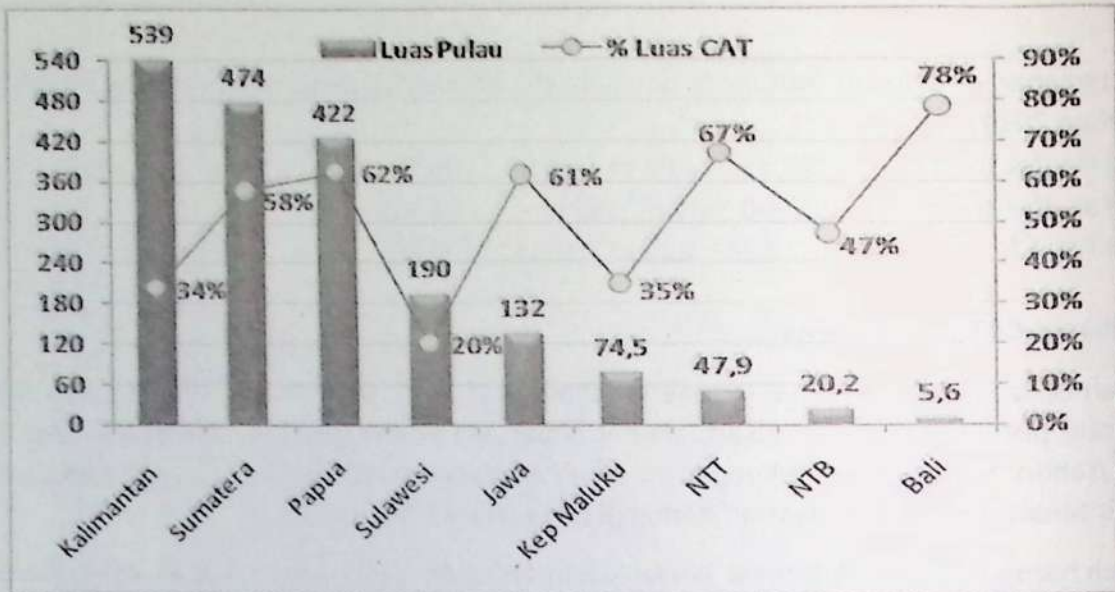
Menurut KepPres No. 26 Tahun 2011, CAT di Indonesia secara umum terdiri atas akuifer bebas (*unconfined aquifer*) dan akuifer tertekan (*confined aquifer*).

Potensi air tanah pada CAT Lintas Negara, Lintas Provinsi, Lintas Kab/Kota dan Dalam Kab/Kota ditunjukkan dalam Tabel 5-5. Luas, potensi CAT dan perbandingan luasnya terhadap pulau di beberapa pulau ditunjukkan dalam Tabel 5-6 dan Gambar 5-10.

Tabel 5-6. Potensi air tanah pada CAT di Indonesia per pulau (KepPres No. 26 Tahun 2011)

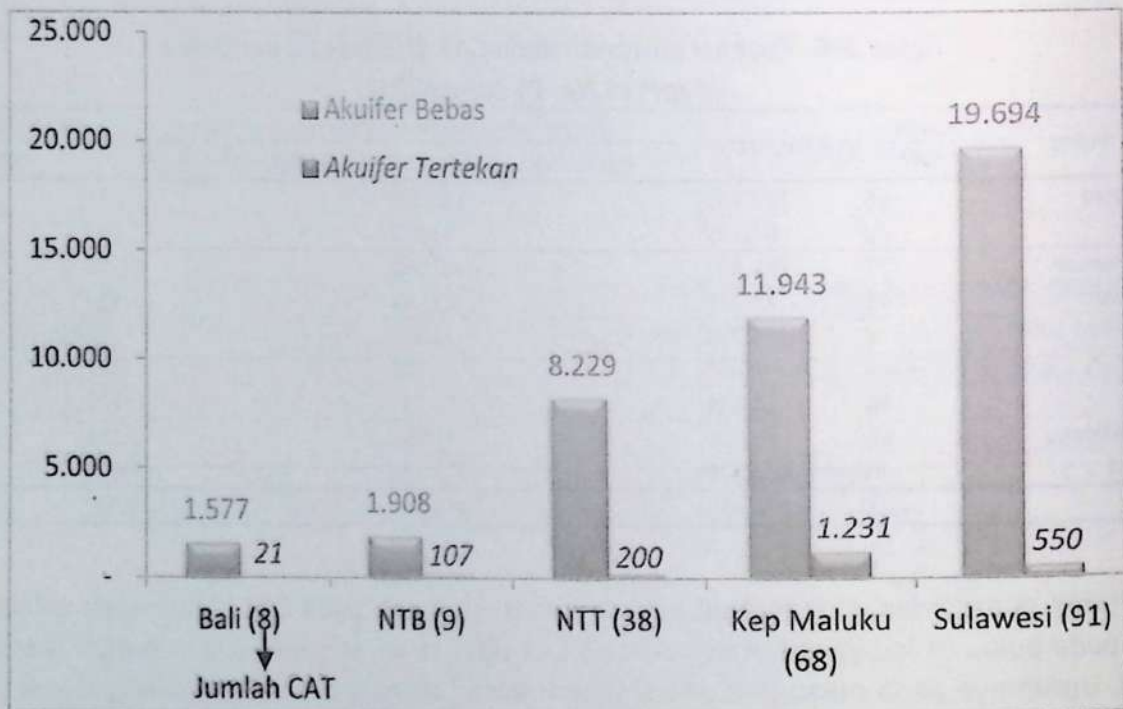
No.	Pulau	Jumlah CAT	Luas km ²	Potensi air tanah pada akuifer(juta m ³ /tahun)		% tertekan thd bebas
				bebas (<i>unconfined</i>)	tertekan (<i>confined</i>)	
1	Sumatra	65	272.843	123.528	6.551	5,3%
2	Jawa	80	81.147	38.851	2.047	5,3%
3	Kalimantan	22	181.362	67.963	1.102	1,6%
4	Sulawesi	91	37.778	19.694	550	2,8%
5	Bali	8	4.381	1.577	21	1,3%
6	NTB	9	9.475	1.908	107	5,6%
7	NTT	38	31.929	8.229	200	2,4%
8	Kep Maluku	68	25.830	11.943	1.231	10,3%
9	Papua	40	262.870	222.524	9.098	4,1%
	Total	421	907.615	496.217	20.907	4,2%

Dari tabel di atas dapat di ketahui bahwa potensi air tanah pada CAT di Indonesia paling banyak terdapat pada pulau-pulau yang besar. Luas tiap CAT tidak sama, tergantung dari kondisi hidrogeologis setempat. Umumnya pada pulau-pulau kecil seperti Nusa Tenggara dan Maluku dijumpai luas CAT yang cukup sempit, sedangkan di Kalimantan, Papua dan Sumatera banyak dijumpai CAT yang memiliki luas dan potensi yang besar.

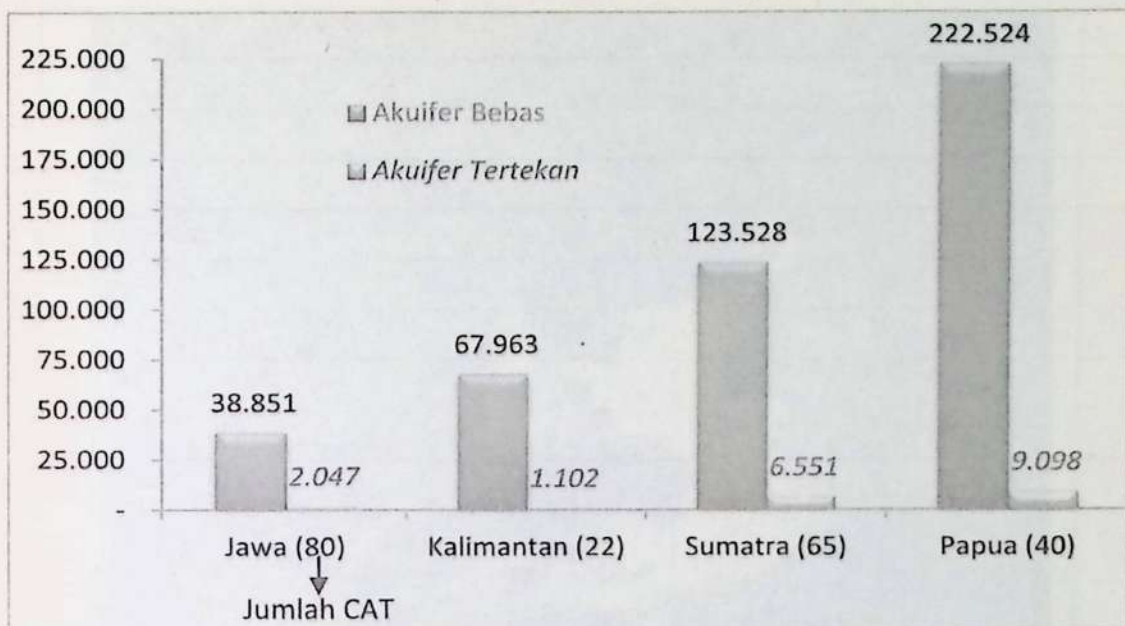


Gambar 5-11. Luas pulau (ribu km²) dan % luas CAT terhadap luas pulau

Di Pulau Maluku, Jawa dan Sulawesi, mempunyai jumlah CAT yang cukup banyak, namun luas dan potensi air tanahnya tidak begitu besar jika dibandingkan dengan Pulau Papua dan Kalimantan. Walaupun jumlahnya lebih sedikit, namun CAT-nya lebih luas dan potensi air tanahnya lebih besar. Perbandingan jumlah CAT pada tiap pulau dan potensi air tanah yang dimilikinya dapat dilihat pada Gambar 5-12.



a. Potensi CAT di bawah (<) 25000 juta km³/tahun dan jumlah CAT



b. Potensi CAT di atas (>) 25000 juta km³/tahun dan jumlah CAT

Gambar 5-12. Potensi air tanah pada CAT akuifer bebas dan tertekan per Pulau (KepPres No. 26 Tahun 2011)

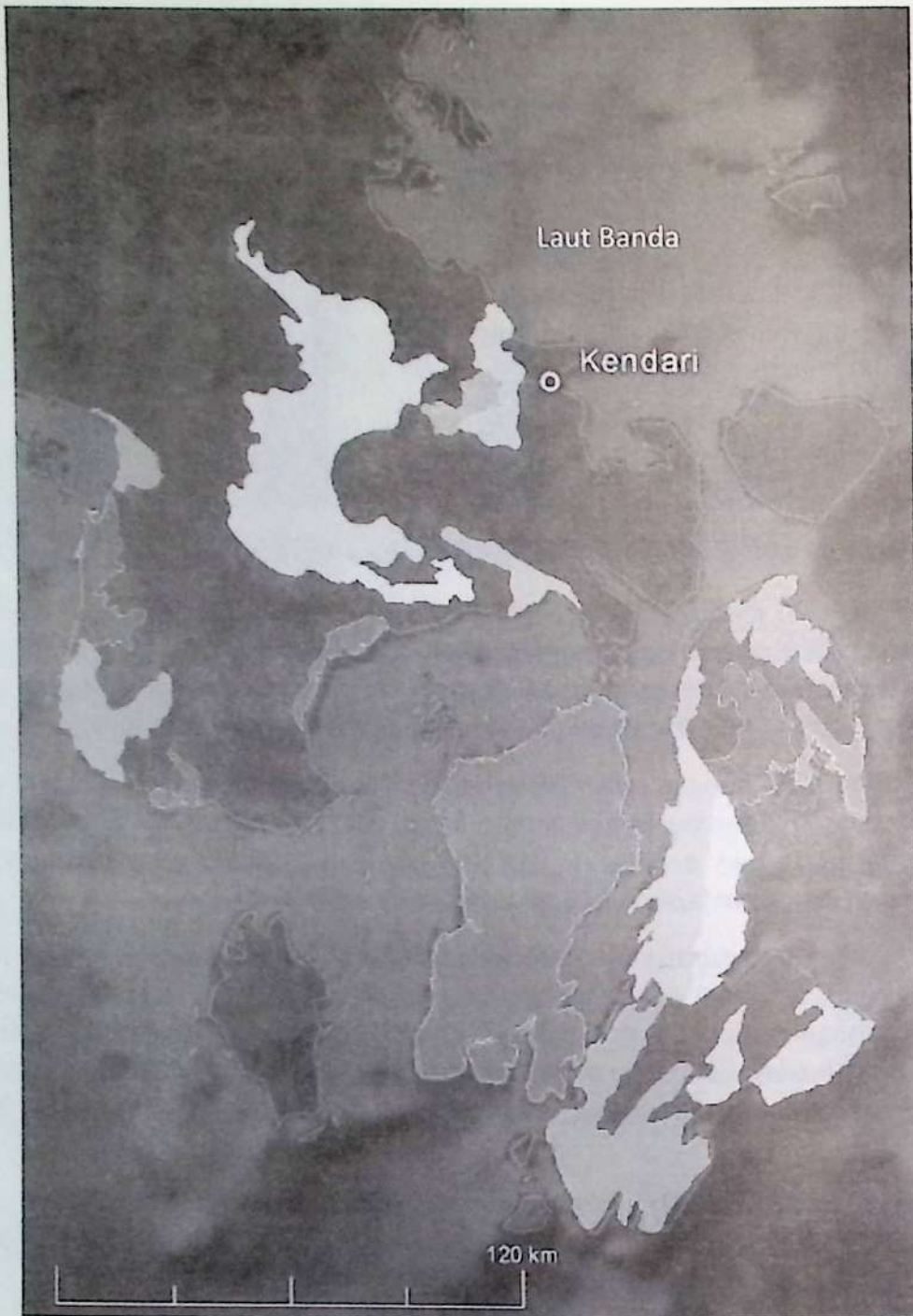
CAT berada di daratan dengan pelamparan dapat sampai di bawah dasar laut. Akuifer dan akuitard memanjang secara vertikal dan horizontal dengan batas tertentu. Batas vertikal suatu akuifer ditentukan oleh kondisi *stratigraphy* dan *geohistoric* lapisan, sedangkan batas horizontal dikontrol berdasarkan *sedimentary* dan *geostructural* lapisan-lapisan tersebut.

Karena unit/bagian hidrostratigrafi dikendalikan oleh kondisi geologi, maka sangat penting untuk mengidentifikasi unit-unit untuk setiap lapisan. Secara hidrogeologi, unit terbesar dengan suatu batas tertentu disebut sebagai cekungan air tanah (*groundwater basin*), yang menunjukkan suatu cekungan deposit (*sedimentary basin*). Cekungan deposit adalah suatu daerah di mana pengendapan telah terjadi secara terus menerus untuk suatu periode waktu tertentu, dan terbentuk dari akumulasi lapisan-lapisan yang tebal.

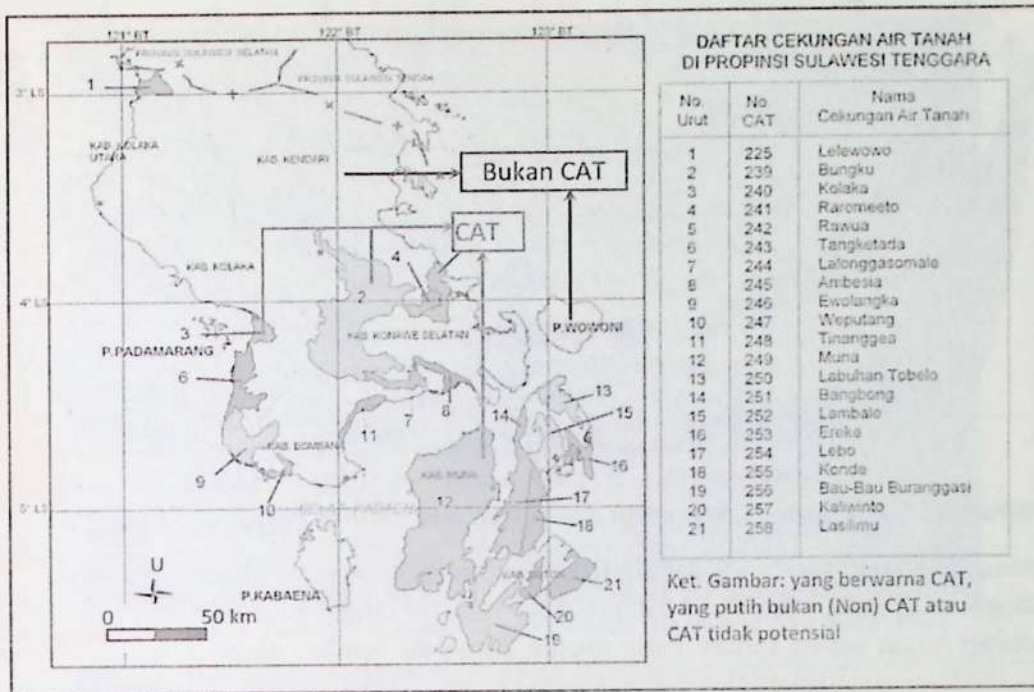
Untuk endapan aluvial maka *sedimentary basin* merupakan sumber yang paling besar dari air tanah. Cekungan sedimen Indonesia telah dipetakan dan untuk seluruh Indonesia sampai saat ini telah dipetakan 128 cekungan sedimen (Badan Geologi, 2009; Shibasaki, 1995).

5.3.2 Contoh Detail Peta CAT Suatu Lokasi

Contoh peta CAT di suatu lokasi ditunjukkan dalam Gambar 5-13.



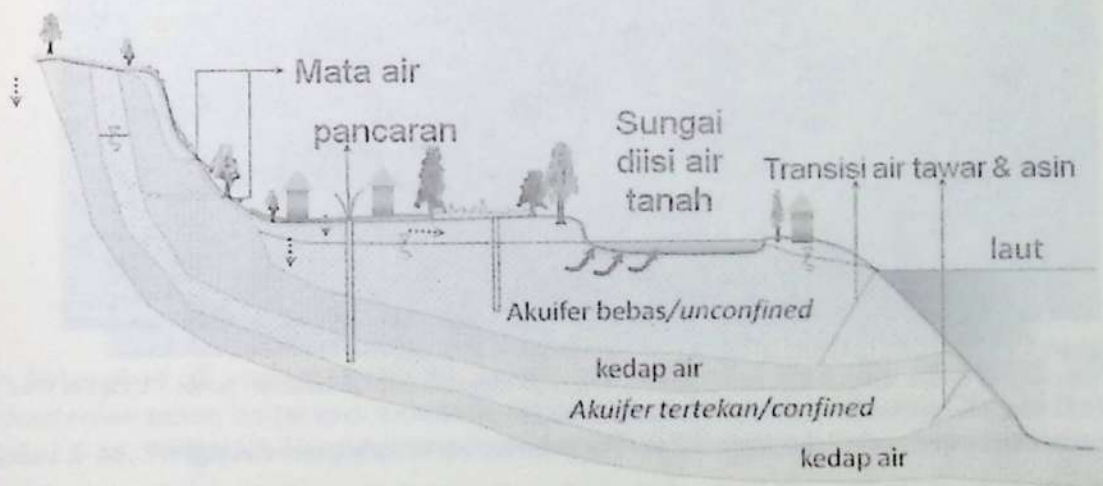
a. Contoh CAT di Provinsi Sulawesi Tenggara



b. Detail CAT di Provinsi Sulawesi Tenggara
Gambar 5-13. Cekungan Air Tanah di Sulawesi Tenggara (RaKepPres No. 26 Tahun 2011)

5.3.3 Potongan Melintang CAT dan Baseflow

Potongan melintang daerah CAT yang terdiri atas akuifer bebas dan akuifer tertekan ditunjukkan dalam Gambar 5-14.



a. Contoh potongan CAT terdiri atas akuifer tertekan dan bebas

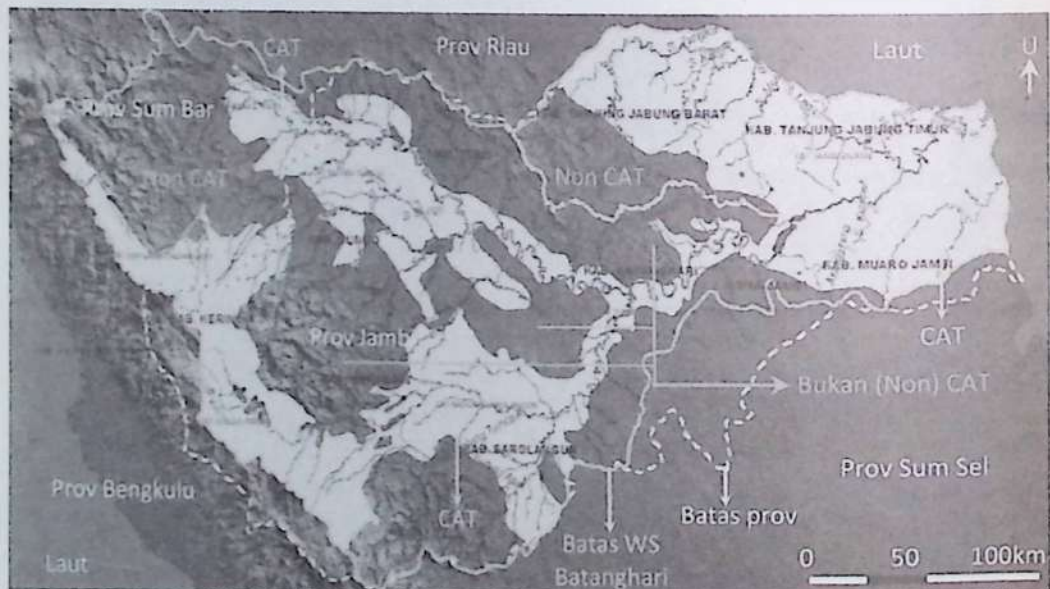


b. Contoh daerah CAT dan proses pengisian air tanah

Gambar 5-14. Potongan CAT: akuifer tertekan dan akuifer bebas (Kodoatie, 2009d)

Dalam siklus hidrologi aliran air tanah (*groundwater*) mengisi sistem fluvial (DAS dan jaringan sungainya) sebagai *base flow*. Peran CAT sebagai *base flow* ini sangat penting karena dapat menampung hingga 30 % curah hujan setiap tahun. Pada musim kemarau sumber aliran sungai bisa hampir 100 % dari CAT.

Contoh pengisian air tanah ke sungai ditunjukkan dalam Gambar 5-15 dan Gambar 5-16.

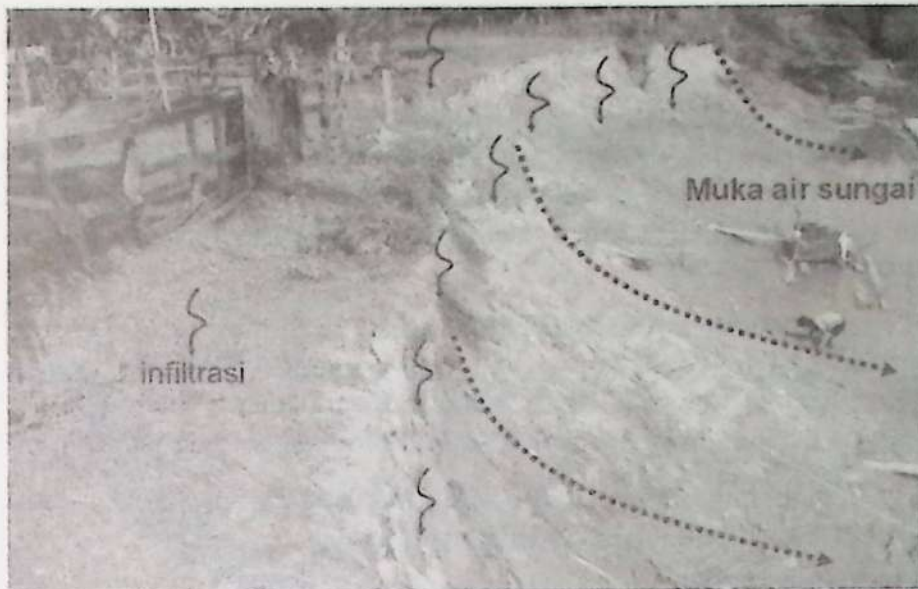


Luas WS Batanghari = ± 53000 km², Luas CAT dalam WS = ± 27400 km² = 49 % WS

Tinggi air rata-rata akuifer bebas Jambi = 0,58 m = 580 mm, Tinggi air rata-rata akuifer tertekan Jambi = 0,013 m = 13 mm, Total tinggi akuifer = 593 mm, bila curah hujan = 2000 mm maka 30 % menjadi air CAT

Pada musim kemarau air tanah berperan sebagai *base flow* ditambah *interflow* yang mengisi S. Batanghari

Gambar 5-15. CAT sebagai baseflow dan keberadaan Non-CAT (Balai WS Sumatra VI Jambi, 2009; Kodoatie, 2009e; Kodoatie & Sjarief, 2010; KepPres No. 26 Tahun 2011)



a. Air tanah mengisi sungai dalam bentuk *interflow* dan *base-flow*



Pada musim kemarau sumber air Sungai Batanghari berasal dari *base-flow* dan *interflow*

b. Sungai Batanghari di musim kemarau: aliran berasal dari *soil water* berbentuk *interflow* dan *groundwater*/air tanah berbentuk *base flow* dengan tinggi air tanah = 593 mm (20 – 25 % curah hujan)
Gambar 5-16. Pengisian sungai oleh air tanah (*soil water* dan *groundwater*) (Kodoatie, 2009c)

5.4 Komponen CAT

Beberapa komponen CAT meliputi: akuifer (*aquifer*), akuiklud (*aquiclude*) dan akuitar (*aquitard*).

1. Akuifer (*aquifer*)

Akuifer merupakan tempat penyimpanan air tanah. Akuifer dapat dibedakan menjadi dua, yaitu akuifer bebas dan tertekan. Pada dasarnya, yang membedakan antara air tanah bebas dan air tanah tertekan adalah variasi konduktivitas hidraulik material geologinya (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 40, 1987).

Definisi akuifer ialah suatu lapisan, formasi, atau kelompok formasi satuan geologi yang *permeable* baik yang terkonsolidasi (lempung, misalnya) maupun yang tidak terkonsolidasi (pasir) dengan kondisi jenuh air dan mempunyai suatu besaran konduktivitas hidraulik (K) sehingga dapat membawa air (atau air dapat diambil) dalam jumlah (kuantitas) yang ekonomis (Kodoatie, 1996).

Akuifer menurut Freeze dan Chery (1979) adalah lapisan geologi yang permeabel yang dapat membawa air dalam jumlah besar di bawah gradien hidraulik.

2. Akuiklud (*aquiclude*)

Definisinya ialah suatu lapisan-lapisan, formasi, atau kelompok formasi satuan geologi yang *impermeable* dengan nilai konduktivitas hidraulik yang sangat kecil sehingga tidak memungkinkan air melewatinya. Dapat dikatakan juga merupakan lapisan pembatas atas dan bawah suatu *confined aquifer* (Kodoatie, 1996).

Aquiclude adalah formasi yang mungkin mengandung air (kadang-kadang dalam jumlah yang besar), tetapi tidak bisa mengalirkan air dalam jumlah yang signifikan di bawah kondisi biasa (Bear, 1979). Menurut Danaryanto dkk. (2005), *aquiclude* atau lapisan batuan kedap air adalah suatu lapisan jenuh air yang mengandung air tetapi tidak mampu melepaskannya dalam jumlah yang berarti.

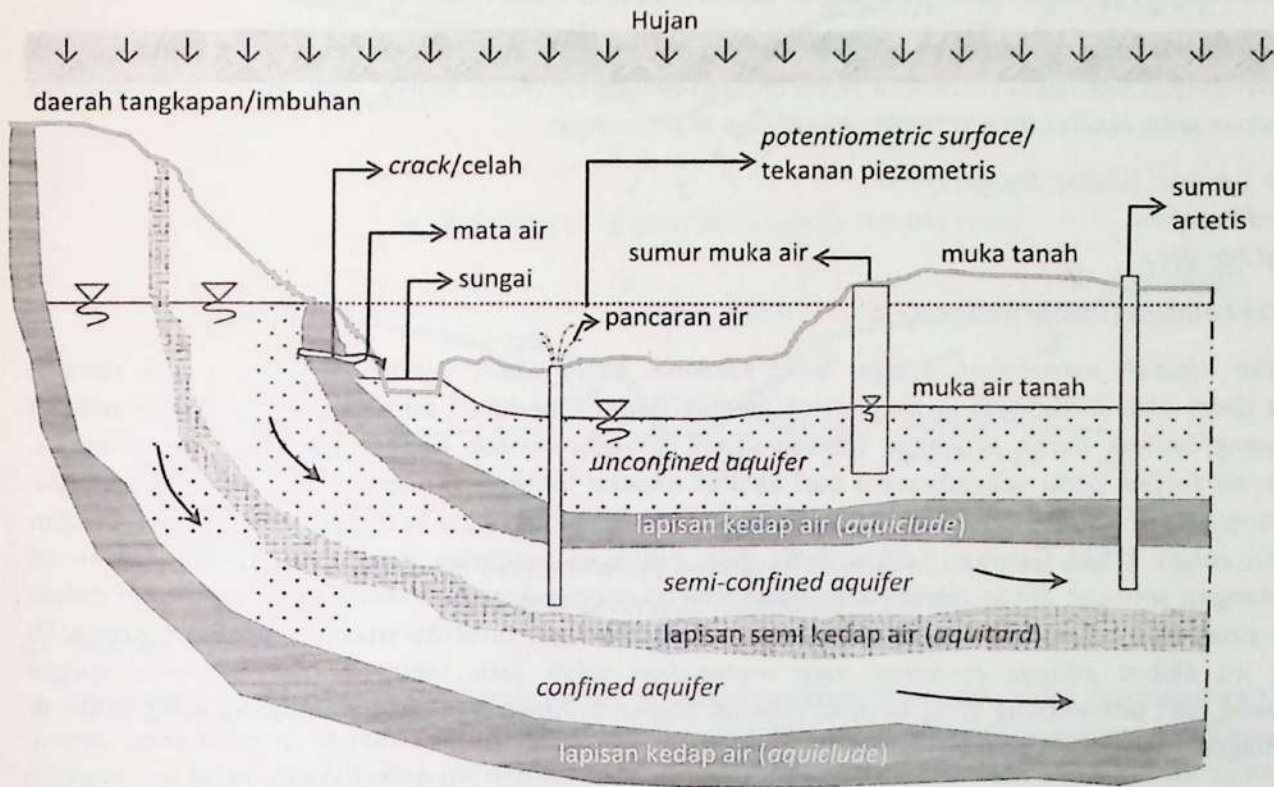
3. Akuitar (*aquitard*)

Definisinya ialah suatu lapisan-lapisan, formasi, atau kelompok formasi satuan geologi yang permeabel dengan nilai konduktivitas hidraulik yang kecil namun masih memungkinkan air melewati lapisan ini walaupun dengan gerakan yang lambat. Dapat dikatakan juga merupakan lapisan pembatas atas dan bawah suatu *semi confined aquifer* (Kodoatie, 1996).

Aquitard atau lapisan batuan lambat air adalah suatu lapisan batuan yang sedikit lulus air dan tidak mampu melepaskan air dalam arah mendatar, tetapi mampu melepaskan air cukup berarti ke arah vertikal, misalnya lempung pasiran (Danaryanto dkk., 2005).

Menurut Bear (1979), *Aquitard* adalah formasi geologi semi tembus air yang dapat mengalirkan air dengan rata-rata yang sangat rendah ke akuifer, meskipun pada area yang lebih luas dapat meloloskan air dalam jumlah yang besar diantara batas akuifer yang terpisah satu sama lain.

Contoh akuifer (*aquifer*), akuiklud (*aquiclude*) dan akuitar (*aquitard*) ditunjukkan dalam Gambar 5-17.



Gambar 5-17. Potongan irisan bumi CAT

5.4.1 Akuifer Bebas (*Unconfined Aquifer*)

Merupakan akuifer jenuh air (*saturated*). Lapisan pembatasnya, yang merupakan *aquitard*, hanya pada bagian bawahnya dan tidak ada pembatas *aquitard* di lapisan atasnya, batas di lapisan atas berupa muka air tanah. Dengan kata lain merupakan akuifer yang mempunyai muka air tanah (Kodoatie, 1996).

Muka air tanah pada akuifer tidak tertekan bersifat bebas untuk naik turun tergantung pada musim. Air tanah yang terdapat pada akuifer ini disebut sebagai air tanah bebas.

Akuifer semi tak tertekan (*semi unconfined aquifer*) adalah akuifer jenuh air (*saturated*) yang dibatasi hanya lapisan bawahnya yang merupakan *aquitard*. Pada bagian atasnya ada lapisan pembatas yang mempunyai konduktivitas hidraulik lebih kecil daripada konduktivitas hidraulik dari akuifer. Akuifer ini juga mempunyai muka air tanah yang terletak pada lapisan pembatas tersebut.

Unconfined Aquifer, terjadi ketika muka air tanah bertemu pada bagian yang rendah, air akan mengalir ke samping, kolam, rawa, danau pinggir laut, dan rembesan air di atas mata air. Pada *unconfined aquifer*, air tanah muncul di bawah dan di atas muka laut (Kashef, 1986).

Unconfined aquifer merupakan akuifer dengan hanya satu lapisan pembatas yang kedap air (di bagian bawahnya). Ketinggian hidrolik sama dengan ketinggian muka airnya. Dari sistem terbentuknya dan lokasinya jenis akuifer ini ada beberapa macam diantaranya:

1. Akuifer Lembah (*Valley Aquifers*)
2. *Perched Aquifers*
3. *Alluvial Aquifers*

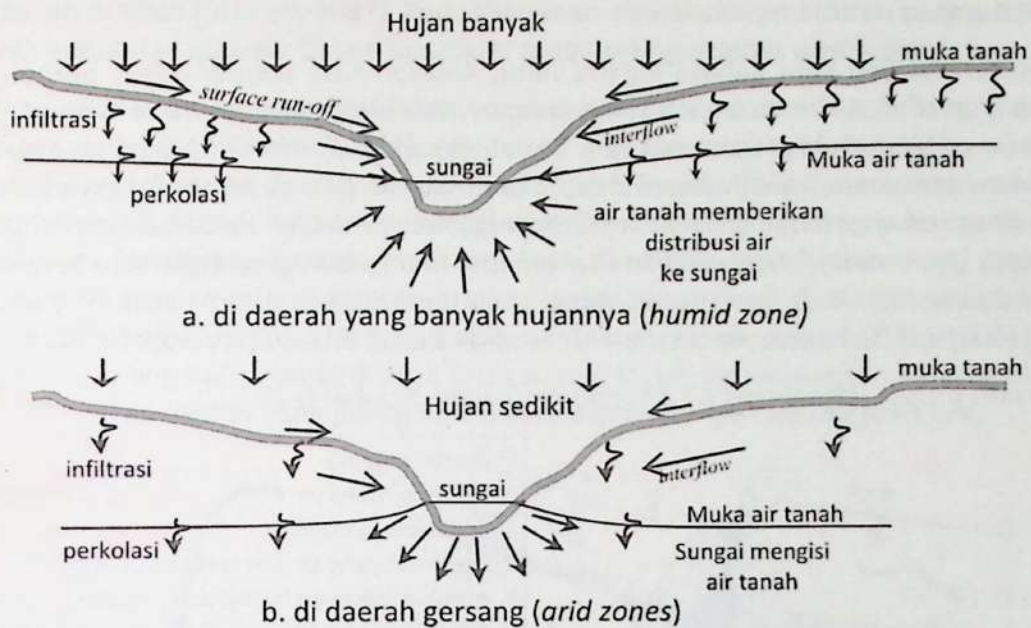
1. Akuifer Lembah (*Valley Aquifers*)

Akuifer lembah merupakan akuifer yang terdapat pada suatu lembah dengan sungai sebagai batasnya (*inlet* atau *outletnya*). Jenis-jenis akuifer ini dapat dibedakan berdasarkan lokasinya yaitu di daerah yang banyak curah hujannya (*humid zone*), sebagai contoh akuifer yang ada di Indonesia. Pengisian air terjadi pada seluruh areal dari akuifer melalui infiltrasi. Pengisian air (*recharge*) sungai-sungai yang ada di akuifer ini melalui daerah-daerah yang mempunyai ketinggian yang sama dengan ketinggian sungai (lihat Gambar 5-18a). Pada ilmu hidrologi pengisian yang menimbulkan aliran ini dikenal dengan sebutan aliran dasar (*base flow*). Hal ini merupakan indikator bahwa walaupun dalam keadaan tidak ada hujan (musim kemarau), pada sungai-sungai tertentu masih ada aliran airnya. Di samping itu akibat adanya *recharge* juga merupakan salah satu faktor penyebab suatu sungai berkembang dari penampang yang kecil di sebelah bagian hulunya menjadi penampang yang besar di sebelah bagian hilirnya (mendekati laut).

Daerah dengan curah hujan sedikit (*arid zone*), kurang dari 500 mm per tahun, dan lebih kecil dari penguapan/evapotransportasi fenomenanya merupakan kebalikan dari daerah *humid*. Karena pengisian (infiltrasi) ke akuifer tidak ada akibat sedikitnya curah hujan, maka pengisian adalah dari sungai ke akuifer. Pada umumnya aliran pada akuifer adalah pada arah yang sama dengan aliran sungai. Masalah yang terjadi pada umumnya adalah:

- permeabilitas besar dari sungai terutama di bagian dasarnya, semakin besar permeabilitasnya aliran sungai semakin kecil karena aliran akan meresap ke dalam tanah.
- pada daerah rendah timbul masalah salinitas yang cukup besar, karena aliran air tanah (Chebotarev, 1955 dan Toth, 1963) mengubah komposisi kimia makin ke hilir mendekati unsur kimia air laut (misalnya NaCl).

Secara skematis akuifer ini diilustrasikan seperti Gambar 5-18.

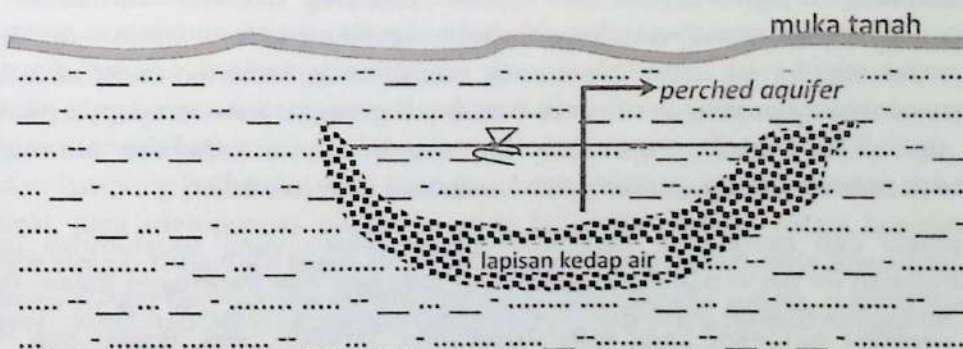


Gambar 5-18. Ilustrasi valley aquifer di daerah humid dan arid (Freeze & Cherry, 1979; Kodoatie 1996)

2. Perched Aquifers

Perched aquifer biasanya terletak bebas di suatu struktur tanah dan tidak berhubungan dengan sungai, serta terletak di atas suatu lapisan formasi geologi kedap air. Kadang-kadang bilamana lapisan dibawahnya tidak murni kedap air namun berupa aquitard bisa memberikan distribusi air pada akuifer dibawahnya. Kapasitasnya tergantung dari pengisian air dari sekitarnya dan juga luasnya lapisan geologi yang kedap air itu. Gambar 5-19 menunjukkan contoh salah satu bentuk akuifer ini.

Perched aquifer merupakan akuifer di mana aliran air lateral di atas lapisan permeabel sampai pada tepi muka air atau terbentuk mata air. Akuifer ini terletak di atas lapisan tanah jenuh air. Perched aquifer biasanya tidak begitu luas, suplai air hanya cukup untuk keperluan rumah tangga (Fetter, 1994).

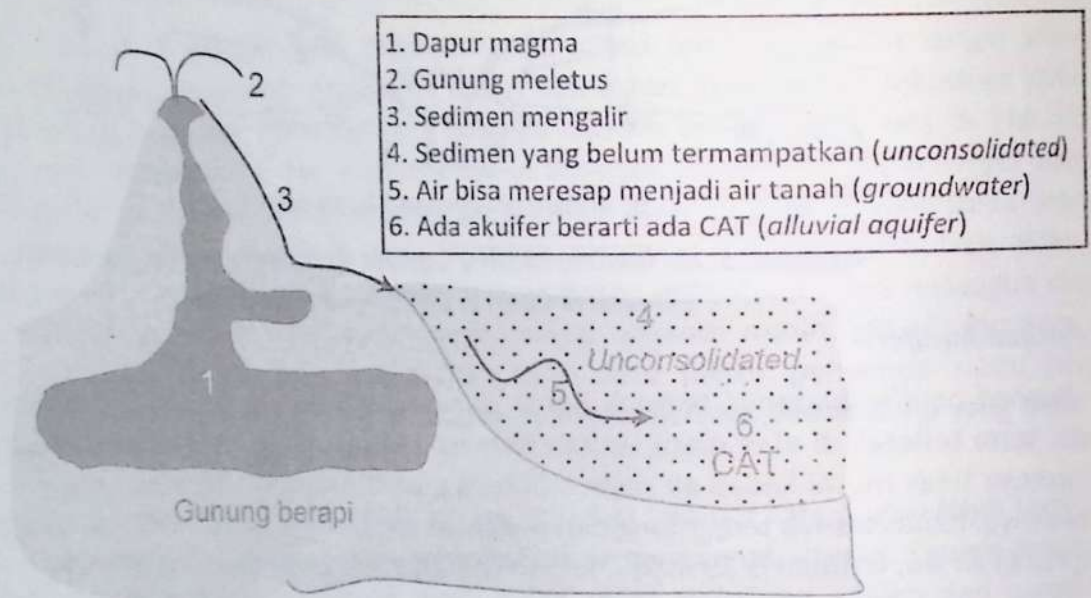


Gambar 5-19. Sketsa suatu perched aquifer (Kodoatie 1996)

3. Alluvial Aquifers

Alluvial berasal dari kata Bahasa Inggris yaitu, *Alluvial*. Kata *alluvial* dapat berfungsi sebagai kata benda atau kata sifat. Bila kata benda sama dengan *alluvium* (Webster's New World Dictionary, 1983). *Alluvium* berasal dari Bahasa Latin *alluvius* adalah tanah (*soil*) atau endapan (*sediments*) yang lepas (*loose*), belum termampatkan (*unconsolidated*), tak melekat (*not cemented*) bersama menjadi batuan padat, tererosi, tersimpan dan terbentuk (*reshaped*) oleh air dalam suatu bentuk/kondisi (*form*) bukan bentukan laut (*Non marine setting*). Material pembentuknya beragam mulai dari lempung (*clay*), lanau (*silt*), pasir dan kerikil. Pada kondisi tersimpan atau terendapkan dalam suatu unit litologis atau atau terlitifikasi (*lithified*) maka disebut simpanan/endapan aluvial (<http://en.wikipedia.org/wiki/Alluvium>).

Salah satu proses terjadinya CAT ditunjukkan dalam Gambar 5-20.



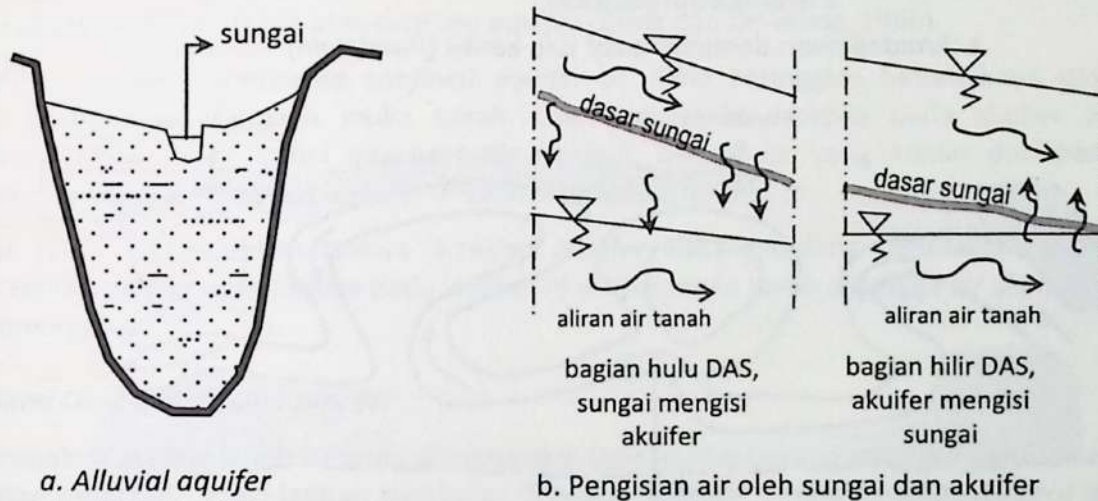
Gambar 5-20. Salah satu proses terjadinya CAT

Sungai merupakan tampungan air tanah yang terdiri dari endapan aluvial. *Alluvial deposits* merupakan material yang terjadi akibat proses fisik di sepanjang daerah aliran sungai atau daerah genangan (*flood plains*). Perubahan muka sungai yang signifikan karena kerja yang konstan untuk mencapai kondisi seimbang. Semua sungai cenderung mengalami perubahan muka air dasar sepanjang sistem drainase daerah hulu dan hilir, perubahan penampang sungai karena adanya penyempitan dan pelebaran, serta perluasan lembah. Perubahan ini terjadi karena kepekaan aliran sungai untuk mengubah banyaknya sedimen, debit, gradien, dan kecepatan (Driscoll, 1987).

Pergeseran sungai dan perubahan kecepatan penyimpanan yang sebelumnya pernah terjadi mengakibatkan simpanan ini berisi material tanah yang beragam dan heterogen dalam distribusi sifat-sifat hidrauliknya. Simpanan daerah genangan (*flood plains*) biasanya terdiri dari lanau, kerikil, atau pasir dan tipe-tipe endapan aluvial yang lain. Simpanan daerah genangan (*flood plains*) biasanya bergradasi halus, bulat, di mana porositasnya baik tetapi konduktivitas hidroliknya sangat bervariasi tergantung

pada rata-rata ukuran butiran (Driscoll, 1987). Pada simpanan aluvial ukuran butiran sangat tidak teratur dan derajat ukuran kebulatan butiran. Dalam klasifikasi tanah sering disebut *well graded*.

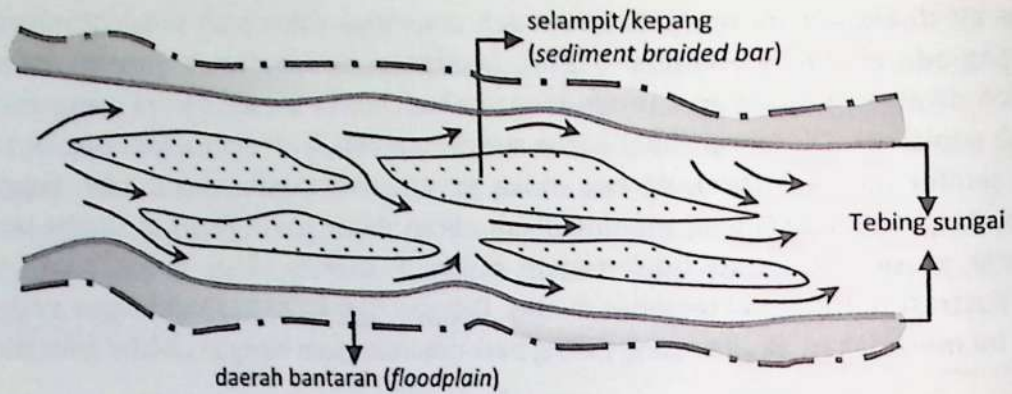
Kapasitas air di akuifer ini menjadi besar dan umumnya volume air tanah seimbang (*equilibrium*) dengan air yang ada di sungai (Gambar 5-21a). Akuifer ini membantu pengaturan regim aliran sungai. Sehingga boleh dikatakan di setiap daerah dengan akuifer jenis ini, akuifer ini merupakan sumber yang penting untuk suplai air. Di daerah hulu aliran sungai umumnya air sungai meresap ke tanah (*infiltrasi*) dan mengisi akuifer ini (*recharge*), karena muka air tanah di akuifer relatif lebih tinggi dibandingkan dengan dasar sungai. Pengisian ini menimbulkan aliran dasar (*base flow*) di sungai sepanjang tahun, walaupun pada musim kemarau tidak terjadi hujan di daerah aliran sungai (DAS). Gambar 5-21b memberikan ilustrasi tentang hal tersebut di atas. Ditinjau dari kuantitas kandungan air yang dimilikinya, maka akuifer ini merupakan akuifer yang paling baik dibandingkan dengan akuifer jenis lain.



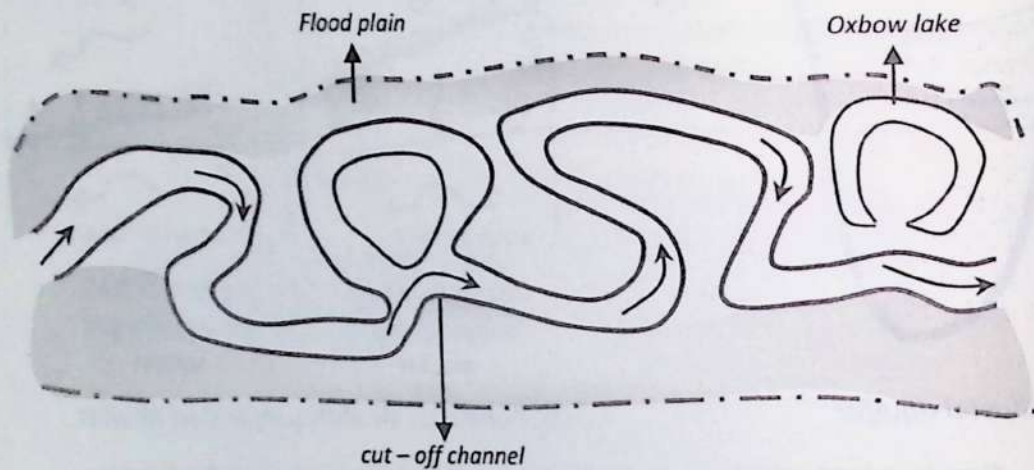
Gambar 5-21. Sketsa suatu alluvial aquifer dengan sungai di atasnya (Freeze & Cherry, 1979; Kodoatie 1996)

Berdasarkan terbentuknya sedimen, menurut Freeze dan Cherry (1979), ada dua jenis sungai, yaitu: sungai-sungai berbentuk selampit (*braided rivers*) dan sungai-sungai bermeander. Sungai-sungai berbentuk selampit umumnya terjadi di bagian hulu daerah pengaliran sungai, di mana sedimen yang terbawa aliran air berupa butiran pasir kasar dan kerikil serta kecepatan arusnya tinggi karena kemiringan dasar sungainya yang curam (Gambar 5-22a). Pergeseran posisi saluran dan perubahan kecepatan sungai mengakibatkan simpanan material dasar sungai (*bed load*) berupa pasir dan kerikil dengan lanau dan lempung berlekuk-lekuk (Gambar 5-22b), yang biasanya terletak di bagian hilir daerah pengaliran sungai, juga mempunyai simpanan pasir halus dan kerikil, tetapi kuantitasnya jauh lebih sedikit. Pada tipe sungai-sungai ini kandungan sedimennya didominasi oleh lanau dan lempung. Ketika kumpulan sedimen sungai bermeander dekat atau pada titik ambang sungai, meander akan mengalirkan ke arah lateral dan daerah hilir, material bergradasi halus akan menutup sedimen kasar pada titik ambang sungai. Kemiringan dasarnya relatif datar dengan kecepatan yang lebih lambat dibandingkan

dengan sungai-sungai berselampit. Kadang-kadang karena lambatnya kecepatan di suatu tempat aliran sungai terjadi perpotongan sungai (*cut-off channel*).



a. *braided river*: dominasi pasir dan kerikil (*floodplain*)



b. *meandering river*: dominasi sedimen lanau dan lempung

Gambar 5-22. Braided rivers dan meandering rivers pada alluvial aquifer (Freeze and Cherry, 1979; Toth, 1990; Kodoatie, 1996)

Namun terdapat pula akuifer yang jenuh air (*saturated*) dimana lapisan bawahnya merupakan *aquitard*. Sedangkan pada bagian atasnya ada lapisan pembatas yang mempunyai konduktivitas hidraulik lebih kecil daripada konduktivitas hidraulik dari akuifer, dan muka air tanah akuifer terletak pada lapisan pembatas tersebut. Akuifer seperti ini disebut sebagai *semi unconfined aquifer* (Kodoatie, 1996).

5.4.2 Akuifer Tertekan (*Confined Aquifer*)

Merupakan akuifer jenuh air yang dibatasi oleh *aquiclude* pada lapisan atas dan bawahnya dan tekanan airnya lebih besar daripada tekanan atmosfer. Pada lapisan pembatasnya tidak ada air yang mengalir (*no flux*) (Kodoatie, 1996). Contoh akuifer ditunjukkan dalam Gambar 5-17.

Confined Aquifer adalah akuifer yang batas lapisan atas dan lapisan bawah adalah formasi tidak tembus air, muka air akan muncul di atas formasi tertekan bawah. Akuifer ini bisa ada atau tidak pada permukaan bawah (Bear, 1979). Akuifer tertekan terisi penuh oleh air tanah dan tidak mempunyai muka air tanah yang bersifat bebas, sehingga pengeboran yang menembus akuifer ini akan menyebabkan naiknya muka air tanah di dalam sumur bor yang melebihi kedudukan semula, dilihat pada alat *piezometer* maka disebut sebagai muka pisometrik (*piezometric level*) dan bila dilihat dalam ilustrasi akuifer disebut *potentiometric surface*.

Kedudukan muka pisometrik ini dapat berada di atas permukaan tanah setempat (*artesis positif*), yang menghasilkan air tanah yang mengalir sendiri (*artesis flowing*), sedangkan jika kenaikan muka airnya masih berada di bawah permukaan tanah setempat disebut artesis negatif.

Untuk kondisi diantara kondisi di atas sering disebut dengan *semi-confined*. Air tanah tertekan disebut juga sebagai air artesis atau *artesian aquifer* (Davis dan De Wiest, 1966).

Artesian Aquifer merupakan *confined aquifer* di mana ketinggian hidrauliknya (*potentiometric surface*) lebih tinggi daripada muka tanah. Oleh karena itu apabila pada akuifer ini dilakukan pengeboran maka akan timbul pancaran air (*spring*), karena air yang keluar dari pengeboran ini berusaha mencapai ketinggian hidraulik tersebut (Kodoatie, 1996).

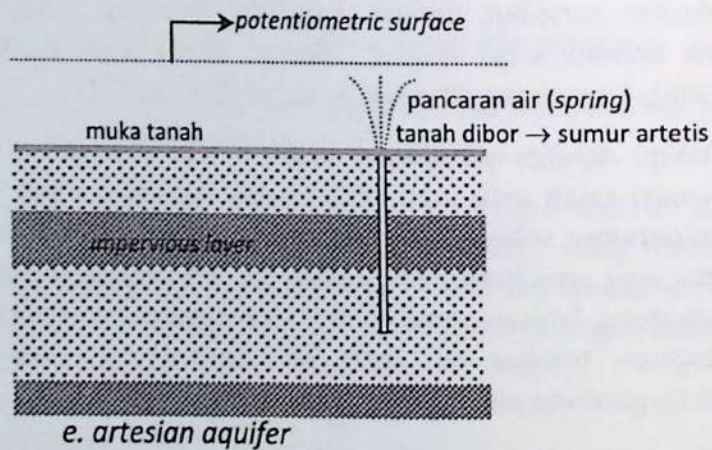
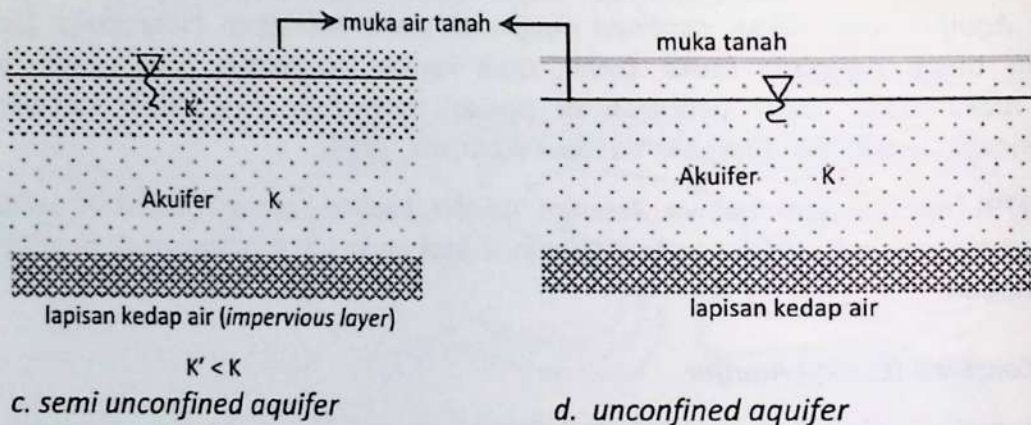
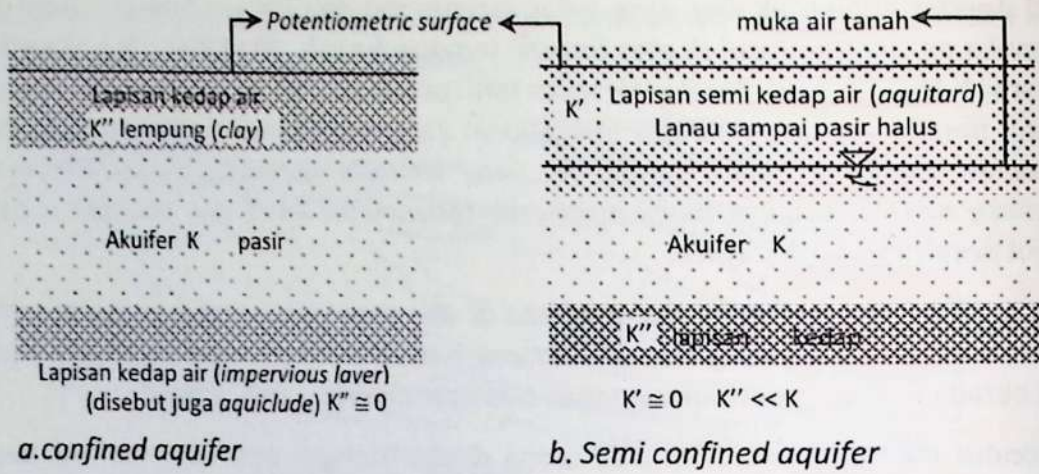
Bear (1979) menyatakan bahwa *Artesian Aquifer* kadang-kadang digunakan sebagai *confined aquifer*. Elevasi *piezometric surface* pada akuifer ini di atas muka tanah sehingga air akan mengalir bebas tanpa pemompaan.

5.4.3 *Semi Confined (Leaky) Aquifer*

Merupakan akuifer jenuh air yang dibatasi oleh lapisan atas berupa *aquitard* dan lapisan bawahnya merupakan *aquiclude*. Pada lapisan pembatas di bagian atasnya karena bersifat *aquitard* masih ada air yang mengalir ke akuifer tersebut (*influx*) walaupun hidraulik konduktivitasnya jauh lebih kecil dibandingkan hidraulik konduktivitas akuifer. Tekanan airnya pada akuifer lebih besar dari tekanan atmosfer (Kodoatie, 1996). Contohnya ditunjukkan dalam Gambar 5-17.

Semi Confined (leaky) Aquifer merupakan *confined* atau *unconfined* yang dapat meloloskan dan memperoleh air melewati salah satu atau kedua batas formasinya baik batas atas maupun bawah. Meskipun formasi semipervious sebagai batasnya mempunyai daya tahan yang tinggi terhadap aliran air yang melewatinya sepanjang area horisontal. Jumlah dan arah kebocoran dikarenakan perbedaan tinggi *piezometrik* yang memotong lapisan semipervious. Sehingga dapat dikatakan lapisan batas atas dan bawah merupakan lapisan tembus air, salah satu semipervious, atau lapisan pervious dengan permeabilitas berbeda tergantung pada akuifer (Bear, 1979).

Jenis-jenis akuifer secara sederhana diilustrasikan dalam Gambar 5-23 berikut ini.



Keterangan: K, K' dan K'' adalah konduktivitas hidraulik dari akuifer

Gambar 5-23. Ilustrasi definisi sistem akuifer (Bouwer, 1978; Freeze dan Cherry, 1979; Toth, 1990; Kodoatie, 1996)

5.5 Pengelompokan Akuifer Indonesia

Batuan beku (*igneous rock*) dan batuan metamorf yang terekspose pada atau dekat dengan muka bumi berada dalam kondisi fisik dan kondisi kimia yang tidak stabil. Dalam waktu geologi batuan-batuan tersebut berubah (*break down* atau *destruct*) menjadi komponen-komponen yang lebih halus. Perubahan batuan (*rock destruction*), redistribusi dan penyimpanan (*deposition*) partikel-partikel batuan mempunyai peran yang penting dalam pembentukan atau pembuatan jenis/tipe sistem akuifer (Driscoll, 1987).

Pada prinsipnya ada 5 tipe akuifer, yaitu (Driscoll, 1987):

- Akuifer aluvial
- *Glacial Aquifer*
- *Sedimentary Aquifer*
- *Igneous Aquifer*
- *Metamorphic Aquifer*

Tiga dari lima tipe akuifer tersebut dihasilkan dari perubahan, redistribusi dan penyimpanan partikel batuan tersebut.

Seperti sudah disebutkan di dalam tanah ada material padat (tanah), air dan udara seperti diuraikan dalam Sub-Bab 3-7 dan Sub-Bab 3-8. Dasar pengelompokan akuifer di Indonesia adalah terdapatnya air tanah dan produktivitas akuifer. Direktorat Geologi Tata Lingkungan Dep. Pertambangan dan Energi (1982) telah menerbitkan peta hidrogeologi Indonesia dengan sebaran akuifer berdasarkan pengelompokan tersebut yang dibagi menjadi 4 akuifer, yaitu:

1. Kelompok 1: Akuifer dengan aliran melalui ruang antar butir.
2. Kelompok 2: Akuifer dengan aliran melalui celahan dan ruang antar butir.
3. Kelompok 3: Akuifer dengan aliran melalui celahan, rekahan dan saluran.
4. Kelompok 4: Akuifer bercelah atau sarang produktif kecil dan daerah air tanah langka.

Berdasarkan produktivitas akuifer maka setiap kelompok akuifer tersebut dibedakan lagi sebagai berikut:

1. Kelompok 1: Akuifer dengan aliran melalui ruang antar butir
 - 1a. Akuifer dengan produktif sangat tinggi dengan penyebaran luas
 - 1b. Akuifer produktif tinggi dengan penyebaran luas
 - 1c. Akuifer produktif sedang dengan penyebaran luas
 - 1d. Setempat akuifer berproduksi sedang
2. Kelompok 2: Akuifer dengan aliran melalui celahan dan ruang antar butir
 - 2a. Akuifer produktif tinggi dengan penyebaran luas
 - 2b. Akuifer produktif sedang, dengan penyebaran luas
 - 2c. Setempat, akuifer produktif

3. Kelompok 3: Akuifer dengan aliran melalui celahan, rekahan dan saluran
 - 3a. Akuifer berproduksi tinggi
 - 3b. Akuifer produktif sedang
4. Kelompok 4: Akuifer bercelah atau sarang dengan produktif rendah dan daerah air tanah langka
 - 4a. Akuifer produktif kecil
 - 4b. Daerah air tanah langka

Kelompok 1: Akuifer dengan aliran melalui ruang antar butir

Material penyusun kelompok akuifer ini berupa hasil rombakan batuan yang berasal dari daerah pegunungan dan kemudian diendapkan di daerah dataran, umumnya bersifat lepas tidak kompak disebut sebagai aluvium, memiliki ukuran butir lempung, lanau, pasir, kerikil, kerakal, bahkan bongkahan. Karena belum padu pada umumnya aluvium mempunyai porositas dan permeabilitas sedang hingga tinggi. Pada umumnya material hasil rombakan tersebut diendapkan di daerah dataran, berdasarkan lokasi pengendapannya dikenal sebagai aluvium dataran pantai, aluvium dataran sungai, aluvium endapan rawa, dan aluvium endapan danau.

Keterdapatan air tanah pada batuan lepas umumnya menempati dataran pantai, cekungan antar gunung, maupun lembah-lembah sungai dengan luas sebaran bervariasi antara suatu jalur sempit di pantai hingga ratusan kilometer persegi, yang ditemui di Jawa, Sumatera, Kalimantan, dan Papua. Air tanah pada batuan lepas yang tersebar di dataran pantai serta cekungan antar gunung mempunyai potensi yang tinggi. Sebagai contoh akuifer pada aluvium dataran pantai Jakarta memiliki ketebalan mencapai 300 meter dan tersusun oleh beberapa lapisan akuifer yang relatif mendatar atau sedikit miring ke arah pantai. Akuifer pada cekungan antar gunung dengan potensi besar sebagai contoh pada aluvium dataran Sungai Brantas yang memanjang dari Kediri-Jombang-Mojokerto sampai Sidoarjo memiliki ketebalan akuifer sekitar 200 meter tersusun oleh pasir halus sampai kasar dengan permeabilitas air yang tinggi.

Penyebaran satuan hidrogeologi batuan lepas sebagai contoh terdapat di dataran Yogyakarta, dataran Surakarta yang juga merupakan cekungan antar gunung yang berada di lembah antara G. Merapi di sebelah Barat Laut dan G. Lawu di sebelah Timur, serta dataran Madiun – Ngawi.

Kelompok 2: Akuifer dengan aliran melalui celahan dan ruang antar butir

Material penyusun kelompok akuifer ini berupa hasil produk gunung api. Ukuran butir material gunung api beragam, pada konglomerat dan breksi vulkanik ukuran fragmen bervariasi dari beberapa centimeter (kerikil) hingga beberapa meter (bongkahan) dan diikat (disemen) oleh material berukuran pasir dan lempung, biasa terdapat pada endapan lahar dan umumnya berperan sebagai akuifer. Tuf berukuran lempung atau pasir umumnya kedap air. Pasir vulkanik gunung api muda umumnya lepas dan lulus air, sedangkan pasir vulkanik gunung api tua umumnya padat, keras dan kurang meluluskan air kecuali bila banyak rekahan. Lava merupakan material gunung api yang pejal dan keras, bersifat kedap air, biasanya mempunyai penyebaran yang memanjang dari puncak hingga kaki gunung menempati dan mengikuti alur lembah sungai. Apabila lelehan lava banyak terdapat retakan atau rongga yang saling

berhubungan maka akan berperan sebagai akuifer yang potensial dan umumnya menghasilkan air artesis di bagian kaki gunung.

Berbagai lokasi di P. Sumatera, P. Jawa, P. Bali, P. Lombok, P. Sumbawa, dan P. Sulawesi banyak terdapat gunung api yang masih cukup aktif sehingga menghasilkan batuan yang belum padu dan dikenal sebagai batuan gunung api muda yang memiliki sifat meluluskan air. Pada daerah yang terdapat gunung api yang sudah tidak aktif umumnya tersusun oleh batuan gunung api tua dengan ciri batuan yang sudah padu dan keras memiliki sifat yang kurang meluluskan air. Endapan vulkanik yang menempati daerah gunung api muda umumnya berbentuk kerucut, penyebarannya radial (melingkar), contoh G. Lawu di Kab. Karanganyar, dan G. Merapi-Merbabu di Kab. Magelang. Daerah resapan ada di bagian atas (puncak dan bagian tubuh gunung), ke arah kaki gunung yang lebih rendah air tanah muncul berupa rembesan atau mata air di beberapa tempat di kaki lereng gunung.

Kelompok 3: Akuifer dengan aliran melalui celahan, rekahan dan saluran

Material penyusun kelompok akuifer ini berupa batuan karbonat (kapur) terutama batu gamping dan dolomit yang tersebar luas di Indonesia, meskipun hanya terdiri dari beberapa persen luas daratan Indonesia, yang dapat ditemui di Sumatera, Jawa, Bali, Sulawesi, hingga Papua. Terdapat dua macam batu gamping yaitu, batu gamping terumbu yang pejal (masif) tidak berlapis dan batu gamping klastik yang membentuk perlapisan dengan ukuran butir pasir halus sampai pasir kasar.

Penyebaran batu gamping terumbu pada Pegunungan Seribu di Kab. Gunung Kidul bagian Selatan memanjang ke arah Timur meliputi Kab. Wonogiri bagian Selatan hingga Kab. Pacitan bagian Barat Daya dan Maros di Sulawesi Selatan berkembang menjadi karst yang terbentuk oleh ratusan bukit berbentuk kerucut yang dipisahkan oleh lembah-lembah dengan bentuk yang tak beraturan. Meskipun batu gamping hanya mencakup beberapa persen luas daratan Indonesia, akan tetapi akuifer pada batu gamping karst tergolong formasi pembawa air tanah yang terbaik di Indonesia setelah pada endapan vulkanik dan endapan aluvium.

Batu gamping klastik yang terdapat di daerah Sumenep Madura banyak yang terlipat, diantaranya membentuk sinklin dengan dasar cekungan memanjang dari Barat dan miring ke Timur mulai dari Guluk Guluk – Ganding – Lenteng, sehingga pada dasar sinklin tersebut banyak terkumpul air tanah yang mengalir berasal dari kedua sisi lereng sebelah Utara dan dari Selatan.

Keterdapatannya air tanah pada batu gamping (batu kapur) ditentukan oleh keberadaan dan hubungan antar celahan, rekahan, dan saluran hasil pelarutan. Oleh sebab itu air tanah tersebar tidak merata dan potensinya tergantung terutama pada intensitas lubang-lubang pelarutan, muka air tanah umumnya dalam dan produksi sumur serta mata air beragam dalam kisaran yang besar umumnya rendah.

Kelompok 4: Akuifer bercelah atau sarang dengan produktif rendah dan daerah air tanah langka

Material penyusun kelompok ini berupa batuan yang bersifat padu dari semua jenis batuan. Pada umumnya merupakan satuan batuan berumur tua, meliputi batuan gunung api tua, dan batuan sedimen tua terdiri atas batu gamping, batu pasir, batu lanau, dan batu lempung. Sementara batuan beku dan metamorf pada umumnya merupakan daerah air tanah langka.

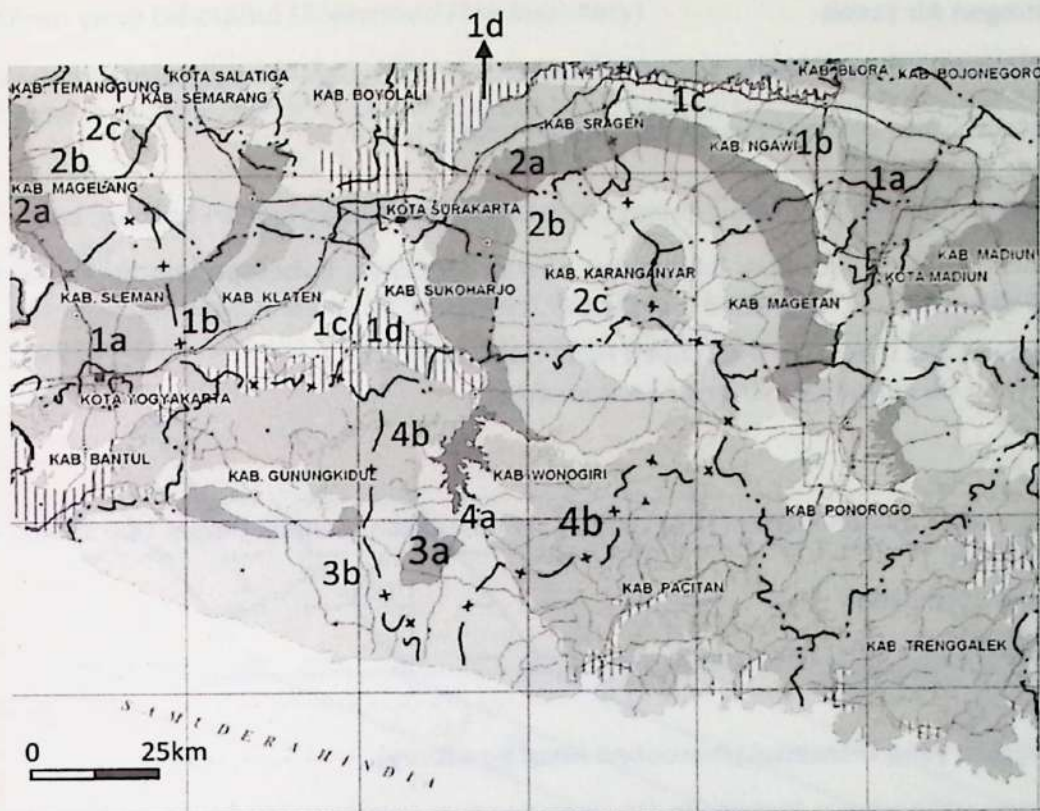
Karena berumur tua batuan padu sudah mengalami tektonik sehingga banyak terdapat struktur geologi. Struktur geologi pada batuan sedimen tua umumnya dicirikan oleh lipatan, patahan (sesar), dan rekahan. Akibat pengaruh lipatan maka kedudukan lapisan batuan sedimen tidak lagi mendatar tetapi miring membentuk sinklin (cekung), antiklin (cembung), atau monoklin (miring ke satu arah).

Karena sifat batuan padu umumnya mempunyai permeabilitas yang rendah, maka keterdapatan air tanah pada batuan padu di Indonesia dapat dikatakan tidak mempunyai arti penting. Air tanah terutama mengisi celahan, rekahan, dan bidang lapisan dari batuan. Oleh sebab itu, keterdapatan air tanah umumnya relatif kecil akibat sistem rekahan yang tidak berhubungan secara baik.

Contoh penyebaran satuan hidrogeologi batuan padu yang tersusun oleh batuan gunung api tua terdapat di daerah bagian Utara Kab. Gunungkidul, Kab. Wonogiri memanjang ke arah Timur meliputi Kab. Pacitan, Kab. Ponorogo hingga Kab. Trenggalek.

Kelompok ini antara lain terdapat di Pegunungan Kendeng yang memanjang dari Blora di bagian Barat ke Timur hingga Mojokerto, serta di bagian tengah P. Madura yang memanjang dari Bangkalan di bagian Barat ke arah Timur hingga Sumenep. Bagian Timur P. Sumba, bagian tengah P. Timor, P. Flores dan bagian tengah Papua.

Contoh keempat kelompok akuifer ini ditunjukkan dalam Gambar 5-24.



Keterangan gambar:

1. Kelompok 1: Akuifer dengan aliran melalui ruang antar butir
 - 1a. Akuifer dengan produktif sangat tinggi dengan penyebaran luas
 - 1b. Akuifer produktif tinggi dengan penyebaran luas
 - 1c. Akuifer produktif sedang dengan penyebaran luas
 - 1d. Setempat akuifer berproduksi sedang
2. Kelompok 2: Akuifer dengan aliran melalui celahan dan ruang antar butir
 - 2a. Akuifer produktif tinggi dengan penyebaran luas
 - 2b. Akuifer produktif sedang, dengan penyebaran luas
 - 2c. Setempat, akuifer produktif
3. Kelompok 3: Akuifer dengan aliran melalui celahan, rekahan dan saluran
 - 3a. Akuifer berproduksi tinggi
 - 3b. Akuifer produktif sedang
4. Kelompok 4: Akuifer bercelah atau sarang dengan produktif rendah dan daerah air tanah langka
 - 4a. Akuifer produktif kecil
 - 4b. Daerah air tanah langka

Gambar 5-24. Contoh Peta Hidrogeologi Indonesia: Lembar IX Yogyakarta (Djaeni, 1982)

5.6 Batas Cekungan Air tanah

Seperti telah disebutkan sebelumnya, CAT dibatasi oleh batas-batas hidrogeologis, antara lain:

- Batas dua batuan, yaitu batuan lulus air dan batuan tidak lulus air.
- Batas pemisah air tanah.
- Batas yang terbentuk karena struktur geologi, antara lain kemiringan lapisan batuan, lipatan, patahan.

CAT juga dibatasi oleh satu atau lebih batas daerah alirannya. Beberapa kondisi batas dan kondisi awal dijelaskan di bawah ini (Toth, 1990 dan Kupper, 1990):

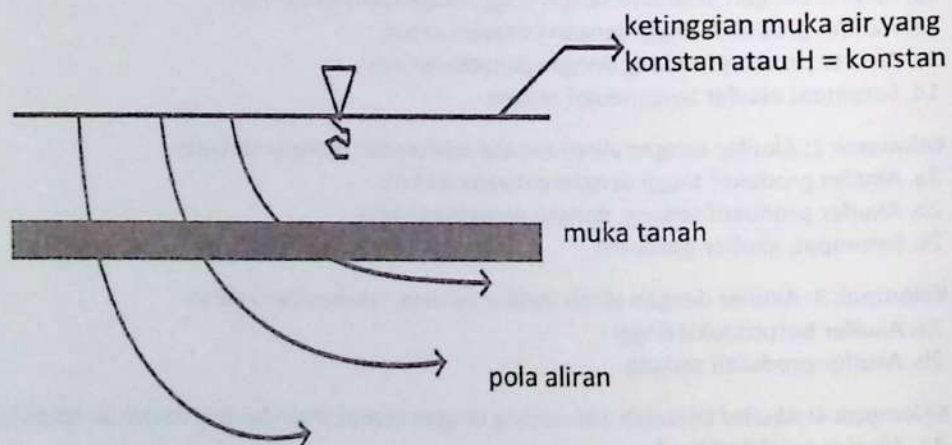
1. Batas Ketinggian yang Diketahui (*Prescribed Head Boundary*)
2. Batas Aliran yang Diketahui (*Prescribed Flux Boundary*)
3. Batas Muka Air
4. Batas Kedap Air

Menurut Boonstra dan de Ridder (1981) batas CAT dibedakan menjadi empat tipe sebagai berikut:

1. Batas Tanpa Aliran
2. Batas Muka Air Permukaan
3. Batas Aliran Air tanah
4. Batas Muka Air tanah Bebas

1. Batas Ketinggian yang Diketahui (*Prescribed Head Boundary*)

Batas ini merupakan batas ketinggian (H) yang konstan, misalnya: muka air laut, muka air danau, dan muka air sungai. Batas ini sudah disesuaikan dengan datum yang ada. Ilustrasi batas ditunjukkan dalam Gambar 5-25.



Gambar 5-25. Batas ketinggian yang diketahui (Toth, 1990 dan Kupper, 1990)

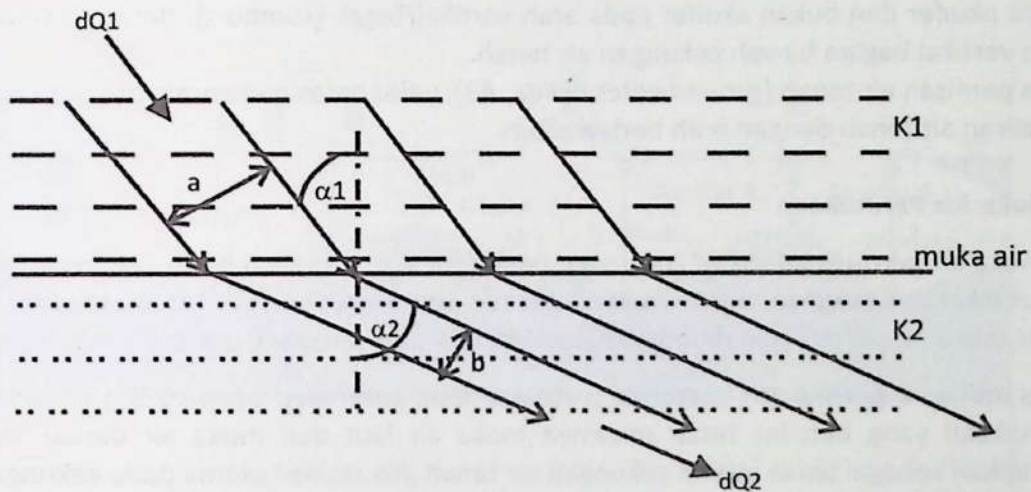
2. Batas Aliran yang Diketahui (Prescribed Flux Boundary)

Besarnya aliran sudah diketahui. Aliran ini secara konstan memberikan distribusi debit yang tetap namun bila tidak ada aliran dan $h = \text{konstan}$ disebut batas ketinggian konstan (*constant head boundary*).

$$q = -K \frac{dh}{dn}$$

3. Batas Muka Air

Batas ini merupakan batas muka air yang diketahui. Dalam kondisi ini diketahui bahwa berdasarkan persamaan kontinuitas maka $dQ = \text{konstan}$ atau seperti ditunjukkan dalam Gambar 5-26 di bawah ini maka $dQ_1 = dQ_2$.



Gambar 5-26. Kuantitatif Batas Muka Air (Toth, 1990 dan Kupper, 1990)

Dengan harga K yang berbeda, maka dari garis aliran yang melalui daerah tersebut, perbandingan harga K dapat di cari dengan persamaan:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2}$$

Dalam hal pengertian secara aplikatif ialah aliran air akan berbias melalui batas yang konstruktif (muka air yang diketahui) tersebut namun besaran debitnya akan selalu konstan.

4. Batas Kedap Air

Suatu daerah yang kedap air (*impermeable*) sehingga aliran air tidak dapat melewatinya. Sering disebut batas tanpa aliran (*no flow boundary*).

$$q = -K \frac{dh}{dn} = 0$$

Empat batas CAT menurut Boonstra dan de Ridder (1981) adalah:

1. Batas Tanpa Aliran

Batas tanpa aliran merupakan batas cekungan air tanah, dengan kondisi hidraulik pada batas tersebut menunjukkan tidak terjadi aliran air tanah atau alirannya tidak berarti jika dibandingkan dengan aliran pada akuifer utama (*zero-flow boundaries/Non-flow boundaries/barrier boundaries*).

Batas tanpa aliran dibedakan menjadi tiga tipe sebagai berikut (Danaryanto dkk., 2005):

- a. Batas tanpa aliran eksternal (*external zero-flow boundary, A1*), yaitu batas yang merupakan kontak/persinggungan antara akuifer dan bukan akuifer (akuiklud/akuifug) pada arah lateral/mendatar (sumbu x, y).
- b. Batas tanpa aliran internal (*internal zero-flow boundary, A2*), yaitu batas yang merupakan kontak antara akuifer dan bukan akuifer pada arah vertikal/tegak (sumbu z). Batas tersebut merupakan batas vertikal bagian bawah cekungan air tanah.
- c. Batas pemisah air tanah (*groundwater divide, A3*), yaitu batas pada arah lateral yang memisahkan dua aliran air tanah dengan arah berlawanan.

2. Batas Muka Air Permukaan

Batas muka air permukaan (*head controlled boundaries*) merupakan batas cekungan air tanah, pada atas tersebut diketahui tekanan hidrauliknya. Batas tersebut dapat bersifat tetap atau berubah terhadap waktu. Batas muka air permukaan dibedakan menjadi dua tipe sebagai berikut (Danaryanto dkk., 2005):

- a. Batas muka air permukaan eksternal (*external head-controlled boundary, B1*) yaitu batas muka air permukaan yang bersifat tetap misalnya muka air laut dan muka air danau. Batas tersebut ditetapkan sebagai batas lateral cekungan air tanah jika akuifer utama pada cekungan itu bersifat tak tertekan. Jika akuifer utama berupa akuifer tertekan, batas cekungan itu dapat berada di daerah lepas pantai.
- b. Batas muka air permukaan internal (*internal head controlled boundary, B2*) yaitu batas muka air permukaan yang berubah terhadap waktu, misalnya sungai dan kanal, yang ditetapkan sebagai batas cekungan air tanah pada arah vertikal.

3. Batas Aliran Air tanah

Batas aliran tanah (*flow controlled boundaries*) atau batas imbuhan air tanah (*recharge boundary*) merupakan batas cekungan air tanah, pada batas tersebut volume air tanah per satuan waktu yang masuk ke dalam cekungan tersebut berasal dari lapisan batuan yang tidak diketahui tekanan hidraulik dan atau keterusannya.

Berdasarkan arah alirannya, batas aliran air tanah dibedakan menjadi dua tipe sebagai berikut (Danaryanto dkk., 2005):

- a. Batas aliran air tanah masuk (*inflow boundary, C1*), yaitu batas cekungan air tanah dengan arah aliran menuju ke dalam cekungan tersebut.

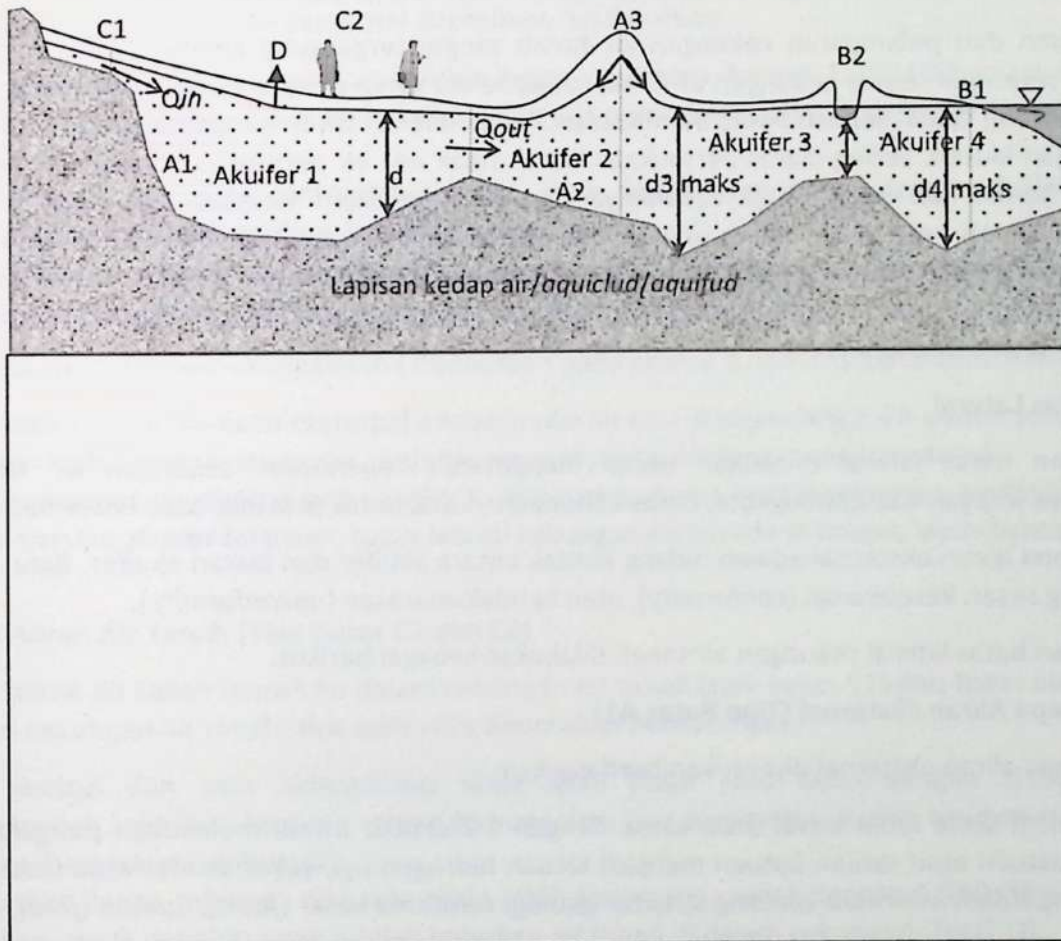
b. Batas aliran air tanah ke luar (*outflow boundary, C2*), yaitu batas cekungan air tanah dengan arah aliran menuju ke luar cekungan tersebut.

Kedua batas aliran air tanah ini ditetapkan sebagai cekungan air tanah pada arah lateral.

4. Batas Muka Air tanah Bebas

Batas muka air tanah bebas (*free surface boundary, D*) merupakan batas cekungan air tanah, pada batas tersebut diketahui tekanan hidrauliknya yakni sebesar tekanan udara luar. Muka air tanah bebas, atau disebut muka preatik, merupakan batas vertikal bagian atas cekungan air tanah.

Secara lebih rinci, empat batas tersebut dapat dilihat dalam Gambar 5-27.



Gambar 5-27. Batas CAT (Danaryanto dkk., 2005)

5.7 Penentuan Batas, Penamaan dan Penetapan Cekungan Air tanah

5.7.1 Penentuan Batas Cekungan Air tanah

Penentuan batas cekungan air tanah dilakukan melalui identifikasi tipe batas cekungan air tanah, yakni batas hidraulik yang dikontrol oleh kondisi dan kontur permukaan tanah, kondisi geologi dan hidrogeologi regional maupun setempat. Oleh karena itu, di suatu wilayah kabupaten/kota atau provinsi, kadangkala tidak ditemukan setiap sisi batas cekungan air tanah yang dikaji karena berada di wilayah administrasi lainnya (Danaryanto dkk., 2005).

Dalam kondisi seperti itu, penentuan batas cekungan air tanah perlu dilakukan secara terpadu dan terkoordinasi antar kabupaten/kota, provinsi, atau mancanegara yang tercakup di dalam cekungan tersebut. Penentuan batas cekungan air tanah meliputi batas lateral dan batas vertikal.

Keberadaan dan pelamparan cekungan air tanah sangat tergantung kepada kondisi geologi dan hidrogeologi setempat. Batas cekungan air tanah tidak selalu sama dengan batas yang didasarkan pada kondisi permukaan tanah seperti batas administrasi, batas daerah aliran sungai, termasuk batas antara daratan dengan lautan. Sering diatas permukaan tanah tidak ada air permukaan tetapi di bawah tanah dijumpai air tanah dan begitu juga sebaliknya di atas permukaan tanah terdapat air permukaan sedangkan di bawah permukaan tanah tidak dijumpai air tanah. Sebagai contoh di Kep. Nusa Tenggara dan Maluku serta pulau – pulau kecil lain di Indonesia sering ditemukan air tanah di bawah permukaan tanah yang kering. Di daerah Indonesia lainnya pada daerah yang sama sering dijumpai air permukaan dan air tanah secara bersamaan.

5.7.1.1 Batas Lateral

Penentuan batas lateral dilakukan untuk mengetahui keberadaan cekungan air tanah yang mencakup satu wilayah kabupaten/kota, lintas kabupaten/kota, lintas provinsi, atau lintas batas negara.

Batas tanpa aliran eksternal adalah bidang kontak antara akuifer dan bukan akuifer. Batas itu dapat berupa bidang sesar, keselarasan (*conformity*), atau ketidakselarasan (*unconformity*).

Penentuan batas lateral cekungan air tanah dilakukan sebagai berikut:

1. Batas Tanpa Aliran Eksternal (Tipe Batas A1)

Batas tanpa aliran eksternal ditentukan berdasarkan:

- a. Peta geologi skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, untuk melakukan pengelompokan formasi batuan atau satuan batuan menjadi satuan hidrogeologi, yakni akuifer atau bukan akuifer, dan memperoleh informasi tentang struktur geologi terutama sesar (*fault*), lipatan (*fold*), dan kekar (*joint*).
- b. Peta hidrogeologi skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, untuk memperoleh informasi tentang satuan hidrogeologi (akuifer dan Non akuifer).

2. Batas Pemisah Air Tanah (Tipe Batas A3)

Batas pemisah air tanah terletak berimpit dengan batas pemisah air permukaan pada suatu akuifer utama, yang memisahkan dua aliran air tanah dengan arah berlawanan. Batas pemisah air tanah ditentukan berdasarkan:

- a. Peta geologi dan peta hidrogeologi skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, untuk memperoleh informasi tentang satuan hidrogeologi.
- b. Peta topografi/peta rupa bumi skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, untuk menentukan batas pemisah air permukaan (*surface water divide*).

3. Batas Muka Air Permukaan Eksternal (Tipe Batas B1)

Batas muka air permukaan eksternal ditentukan berdasarkan:

- a. Peta topografi/peta rupa bumi skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, untuk memperoleh informasi tentang lokasi dan kedudukan muka air permukaan yang bersifat tetap, misal muka air laut dan danau.
- b. Peta geologi dan peta hidrogeologi skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, untuk memperoleh informasi tentang satuan hidrogeologi.
- c. Hasil analisis data hidrogeologi bawah permukaan dari kegiatan pengeboran dan atau pendugaan geofisika, untuk memperoleh informasi jenis akuifer dan sebarannya.

Berdasarkan informasi sebagaimana disebutkan pada poin a, b, dan c dapat ditentukan:

- a. batas muka air permukaan eksternal adalah muka air laut di sepanjang garis pantai yang berbatasan dengan akuifer utama dan muka air danau yang berbatasan dengan akuifer utama.
- b. Batas sebagaimana disebut pada angka 1, merupakan batas lateral cekungan air tanah jika akuifer utama berupa akuifer tertekan, batas lateral cekungan itu berada di daerah lepas pantai.

4. Batas Aliran Air Tanah (Tipe Batas C1 dan C2)

Batas aliran air tanah masuk ke dalam cekungan air tanah (tipe batas C1) dan batas aliran air tanah ke luar dari cekungan air tanah (tipe batas C2) ditentukan berdasarkan:

- a. Peta geologi dan peta hidrogeologi skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, untuk memperoleh informasi tentang satuan hidrogeologi dan parameter akuifer terutama keterusan (T) dan koefisien permeabilitas (k).
- b. Peta curah hujan tahunan rata-rata skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, sebagai data masukan untuk penghitungan jumlah imbuhan air tanah di dalam cekungan ($Total-Q$).
- c. Peta aliran air tanah skala lebih besar atau sama dengan 1:100.000, untuk menentukan arah aliran air tanah dan penghitungan jumlah aliran air tanah yang masuk kedalam cekungan (Q_{in}) atau jumlah aliran air tanah yang keluar dari cekungan (Q_{out}).

Berdasarkan informasi seperti disebutkan pada angka 1., 2., dan 3. di atas, batas aliran air tanah ditentukan sebagai berikut:

- a. Jika $Q_{in}/Total-Q$ dan $Q_{out}/Total-Q$ cukup berarti, di lokasi yang dikaji (tipe batas C1 dan C2) merupakan batas aliran air tanah masuk dan batas aliran air tanah keluar, artinya Q_{in} dan Q_{out} perlu diperhitungkan dalam evaluasi potensi cekungan air tanah yang bersangkutan.
- b. Jika $Q_{in}/Total-Q$ dan $Q_{out}/Total-Q$ tidak berarti, Q_{in} dan Q_{out} dapat diabaikan. Artinya, tipe batas C1 dan C2 dapat ditentukan sebagai batas tanpa aliran eksternal atau sebagai tipe batas A1.

5.7.1.2 Batas Vertikal

Penentuan batas vertikal dilakukan untuk mengetahui batas, sebaran, dan dimensi cekungan air tanah pada arah vertikal. Penentuan batas vertikal cekungan air tanah dilakukan sebagai berikut.

1. Batas Tanpa Aliran Internal (Tipe Batas A2)

Batas tanpa aliran internal adalah bidang kontak antara akuifer dan bukan akuifer yang mengalasnya atau yang berfungsi sebagai dasar akuifer (*aquifer basement*). Batas itu dapat berupa bidang keselarasan atau ketidakeselarasan.

Batas tanpa aliran internal ditentukan berdasarkan: peta geologi dan peta hidrogeologi skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, hasil analisis pendugaan geofisika, dan penampang litologi dari hasil kegiatan pengeboran, untuk memperoleh informasi tentang sebaran dan dimensi akuifer dan bukan akuifer secara vertikal.

2. Batas Muka Air Permukaan Internal (Tipe Batas B2)

Batas muka air permukaan internal ditentukan berdasarkan:

- a. Peta geologi dan peta hidrogeologi skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, hasil analisis pendugaan geofisika, dan penampang litologi dari hasil kegiatan pengeboran, untuk memperoleh informasi tentang ketebalan akuifer di bawah kanal atau sungai (d) dan ketebalan maksimum akuifer utama ($d3$ -maks dan $d4$ -maks) yang berada di kedua sisi kanal atau sungai (Akuifer-3 dan Akuifer-4, pada Gambar 5-27).
- b. Peta topografi skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, untuk memperoleh informasi lokasi dan sebaran kanal dan sungai.
- c. Hasil analisis data pengukuran atau rekaman kedudukan muka air kanal dan muka air sungai, untuk memperoleh informasi tentang kedudukan muka air kanal dan muka air sungai.

Berdasarkan informasi seperti pada angka 1), 2) dan 3) di atas, batas muka air permukaan internal ditentukan sebagai berikut:

- a. Jika $d/d3$ -maks $> 5\%$ dan $d/d4$ -maks $> 5\%$, tipe batas B2 merupakan batas vertikal bagian atas cekungan air tanah, artinya Akuifer-3 dan Akuifer-4 berada dalam satu cekungan air tanah.
- b. Jika $d/d3$ -maks $\leq 5\%$ dan $d/d4$ -maks $\leq 5\%$, tipe batas B2 merupakan batas lateral cekungan air tanah, artinya Akuifer-3 dan Akuifer-4 berada pada cekungan air tanah yang berbeda.

- c. Jika $d/d3\text{-maks} > 5\%$ dan $d/d4\text{-maks} \leq 5\%$, tipe batas B2 merupakan batas lateral cekungan air tanah dari Akuifer-4.
- d. Jika $d/d3\text{-maks} \leq 5\%$ dan $d/d4\text{-maks} > 5\%$, tipe batas B2 merupakan batas lateral cekungan air tanah dari Akuifer-3.

3. Batas Muka Air Tanah Bebas (Tipe Batas D)

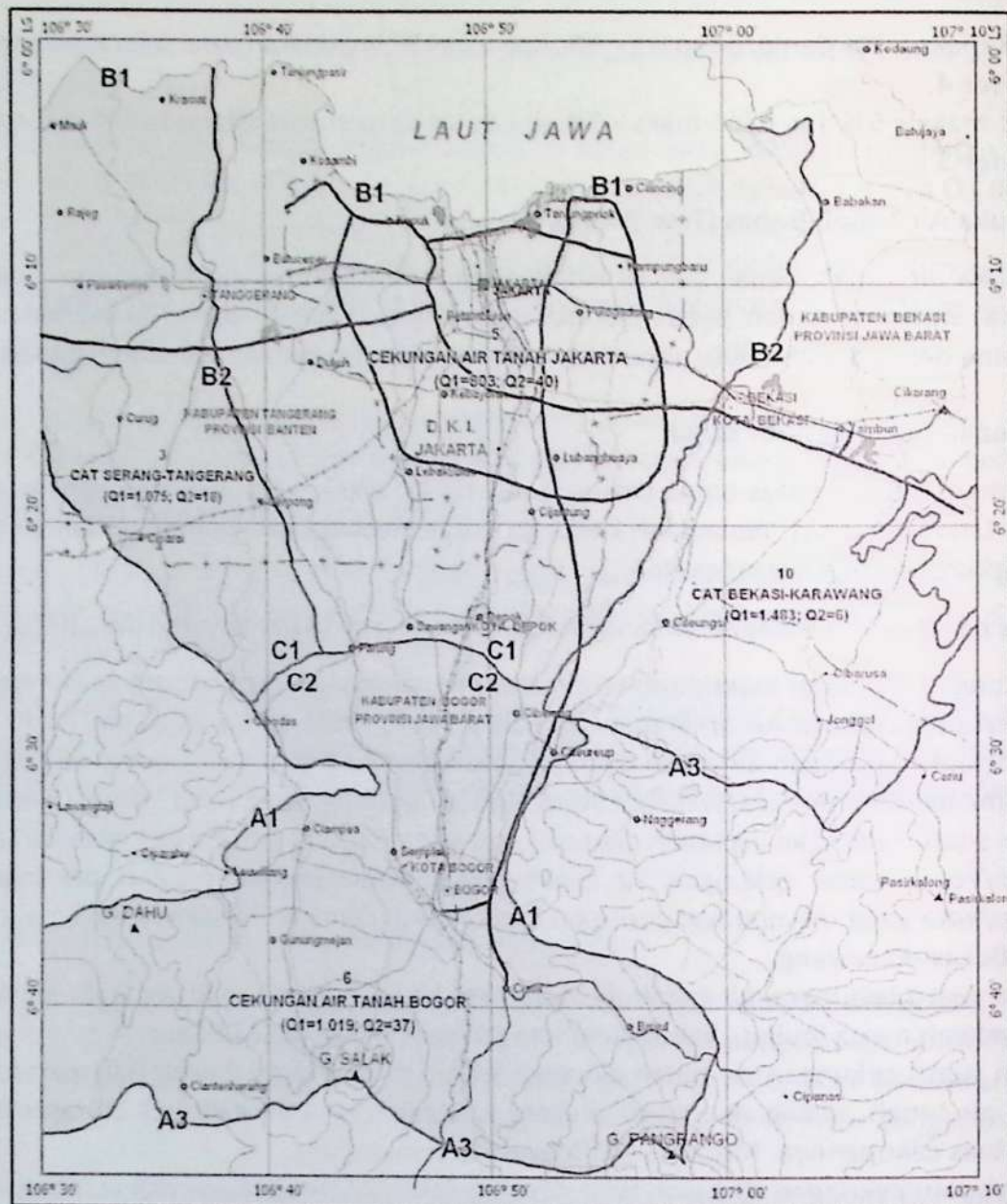
Batas muka air tanah bebas adalah bidang yang merupakan tempat kedudukan muka air tanah tersebut. Batas muka air tanah bebas ditentukan berdasarkan peta muka air tanah bebas skala lebih besar atau sama dengan 1:250.000, untuk memperoleh informasi tentang kedudukan muka air tanah.

5.7.2 Penamaan Cekungan Air tanah

Setelah menetapkan batas-batas cekungan air tanah, maka perlu dilakukan penamaan terhadap cekungan air tanah tersebut. Penamaan berfungsi untuk memudahkan identifikasi dan pengelolaan air tanah pada cekungan yang bersangkutan.

Tata cara penamaan cekungan air tanah adalah sebagai berikut (Danaryanto dkk.,2005):

1. Nama cekungan air tanah maksimum terdiri atas dua nama lokasi geografi, antara lain nama ibu kota provinsi, kabupaten/kota, kecamatan, nama danau, rawa, sungai, pulau, teluk, dan bukit.
2. Jika dalam suatu cekungan air tanah dijumpai satu lokasi ibu kota provinsi, nama cekungan air tanah adalah nama ibu kota provinsi tersebut. Misalnya Cekungan Air tanah (CAT) Jakarta (Gambar 5.28).
3. Jika dalam suatu cekungan air tanah dijumpai satu lokasi ibu kota provinsi dan lebih dari satu ibukota kabupaten/kota, nama cekungan air tanah adalah nama ibukota provinsi dan nama ibukota kabupaten/kota yang mempunyai peringkat luas cakupan dominan. Misalnya CAT Serang-Tangerang, atau CAT Bekasi-Karawang.
4. Jika dalam suatu cekungan air tanah dijumpai satu lokasi ibukota kabupaten/kota, nama cekungan air tanah adalah nama ibukota kabupaten/kota tersebut. Misalnya CAT Bogor.
5. Jika dalam suatu cekungan air tanah dijumpai lebih dari satu lokasi ibukota kabupaten/kota, nama cekungan air tanah adalah dua nama ibukota kabupaten/kota dengan urutan sesuai dengan peringkat luas cakupannya. Misalnya CAT Magelang-Temanggung.
6. Jika dalam suatu cekungan air tanah tidak dijumpai lokasi ibukota provinsi dan atau kabupaten/kota, atau cekungan tersebut mencakup beberapa lokasi ibukota provinsi dan atau kabupaten/kota dalam suatu wilayah sungai, nama cekungan air tanah adalah nama geografi/hidrologi yang lebih dikenal seperti nama ibukota kecamatan, pulau, bukit, teluk, danau, rawa, dan sungai/wilayah sungai. Misalnya CAT Rawa Danau dan CAT Brantas.



Gambar 5-28. Contoh Cekungan Air Tanah Lintas Kabupaten/Kota, dan lintas Provinsi (Kepmen ESDM No. 716.k/48/MEM/2003)

5.7.3 Penetapan Cekungan Air Tanah

Pengelolaan air tanah didasarkan pada cekungan air tanah, oleh karena itu penetapan cekungan air tanah sangat penting artinya untuk memudahkan pengelolaan air tanah di kemudian hari. Penetapan cekungan air tanah didasarkan pada kriteria dan tata cara penetapan cekungan air tanah.

Kriteria cekungan air tanah adalah sebagai berikut (PP No. 43 Tahun 2008):

1. mempunyai batas hidrogeologis yang dikontrol oleh kondisi geologis dan/atau kondisi hidraulik air tanah;
2. batas hidrogeologis dapat berupa antara lain batas dua batuan lulus dan tidak lulus air, batas pemisah air tanah, dan batas yang terbentuk karena struktur geologi meliputi antara lain kemiringan lapisan batuan, lipatan, patahan
3. mempunyai daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah dalam satu sistem pembentukan air tanah
4. memiliki satu kesatuan sistem akuifer.

Menteri yang membidangi air tanah atas inisiatif sendiri atau berdasarkan usulan Gubernur dan/atau Bupati/Walikota menyampaikan usulan mengenai penentuan cekungan air tanah kepada Dewan Sumber Daya Air Nasional. Berdasarkan usulan tersebut, Menteri menyusun rancangan penetapan cekungan air tanah. Penetapan cekungan air tanah meliputi cekungan air tanah:

- dalam satu kabupaten/kota
- lintas kabupaten/kota
- lintas provinsi
- lintas negara.

Penyusunan rancangan penetapan cekungan air tanah dilakukan melalui tahapan:

1. Identifikasi Cekungan Air Tanah
2. Penentuan batas Cekungan Air Tanah
3. Konsultasi publik

Pada tahap konsultasi publik, rancangan penetapan cekungan air tanah dikonsultasikan oleh Menteri kepada pemerintah provinsi dan/atau pemerintah kabupaten/kota yang bersangkutan. Hasil konsultasi kemudian disampaikan oleh Menteri kepada Presiden dengan tembusan kepada Dewan Sumber Daya Air Nasional untuk mendapatkan pertimbangan. Setelah memperhatikan pertimbangan dari Dewan Sumber Daya Air Nasional, Presiden kemudian menetapkan cekungan air tanah. Cekungan Air Tanah yang telah ditetapkan oleh Presiden tersebut menjadi dasar pengelolaan air tanah oleh Menteri, Gubernur, atau Bupati/Walikota sesuai dengan kewenangannya. Penetapan cekungan air tanah dapat ditinjau kembali apabila ada perubahan fisik dan/atau Nonfisik di cekungan air tanah bersangkutan atau ditemukan cekungan baru yang mengakibatkan perubahan batas atau jumlah cekungan air tanah.

5.8 Daerah Imbuhan dan Daerah Lepasannya Air Tanah

Proses hidrogeologis yang terjadi dalam cekungan air tanah meliputi pengimbuhan, pengaliran, dan pelepasan air tanah. Setiap kejadian hidrogeologis tersebut berlangsung pada daerah yang berbeda. Pengimbuhan terjadi di daerah imbuhan (*recharge area*) dan pelepasan air tanah terjadi di daerah lepasan (*discharge area*). Sedangkan proses pengaliran terjadi di kedua daerah tersebut namun lebih khusus terjadi di daerah transisi antara daerah imbuhan dan lepasan. Daerah imbuhan air tanah atau yang lebih populer disebut sebagai daerah resapan, adalah daerah resapan air yang mampu menambah air tanah secara alamiah pada Cekungan Air Tanah. Pengertian tersebut menunjukkan bahwa tidak semua daerah yang mampu meresapkan air hujan ke dalam tanah otomatis merupakan daerah imbuhan. Sebagai contoh permukaan tanah pada daerah lepasan air tanah yang terletak di daerah

dataran juga mampu meresapkan air hujan kedalam zona tidak jenuh air sehingga mengubah zona tidak jenuh menjadi kolom yang jenuh air. Akibatnya muka air tanah naik menjadi semakin dangkal bahkan dekat ke permukaan tanah. Namun karena muka air tanah di daerah lepasan pada awalnya cukup dangkal maka kolom air tambahan tersebut tidak cukup menimbulkan tekanan hidrolika ke bawah. Pada kondisi ini air hujan yang jatuh ke permukaan tanah tidak mampu lagi meresap. Sehingga selama hujan masih berlangsung maka daerah tersebut menjadi tergenang atau dikenal sebagai banjir.

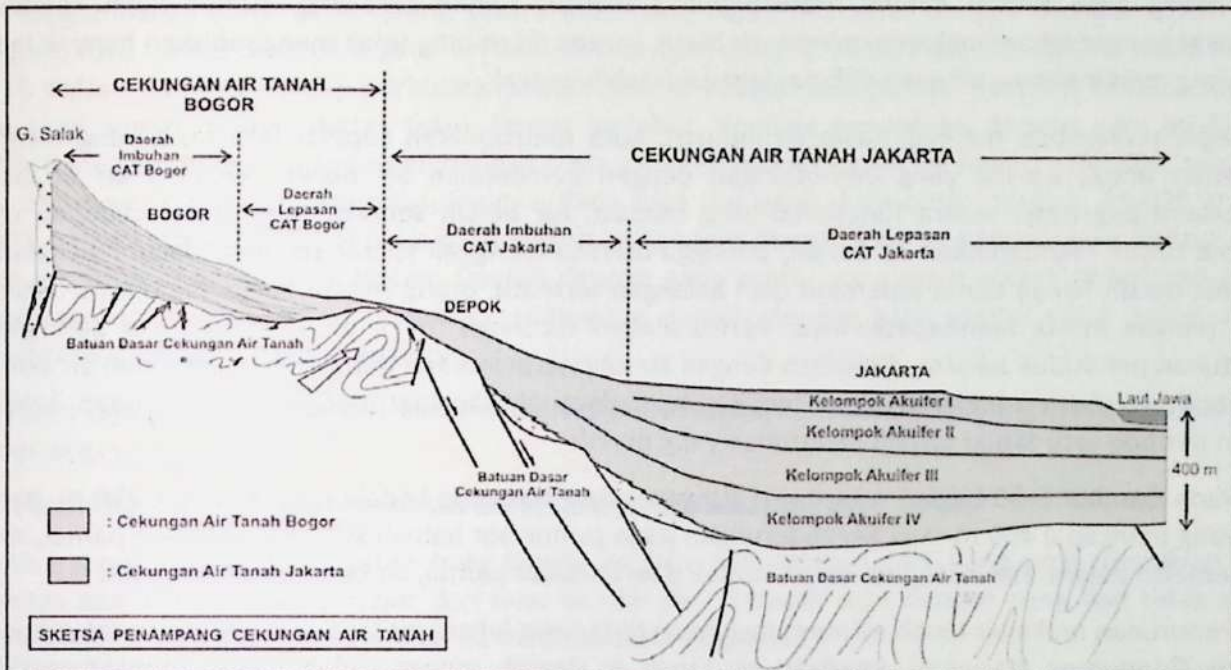
Air hujan yang jatuh di daerah imbuhan pada awalnya mengisi zona tidak jenuh dan mengubah zona tidak jenuh menjadi jenuh sehingga muka air tanah semakin naik atau dangkal. Karena kedudukan muka air tanah di daerah imbuhan awalnya relatif dalam maka kenaikan muka air tanah tersebut membentuk kolom air yang cukup tebal dan menimbulkan tekanan hidrolika yang cukup kuat untuk menekan ke bawah sehingga air hujan yang meresap akan terus mengalir ke bawah menambah air tanah yang terdapat di zona jenuh. Sehingga selama hujan berlangsung permukaan tanah di daerah imbuhan selalu mampu meresapkan air hujan yang jatuh di permukaan tanah. Letak daerah imbuhan biasanya berada di kawasan hulu aliran sungai dengan morfologi berupa perbukitan atau pegunungan.

Daerah lepasan air tanah adalah daerah keluaran air tanah yang berlangsung secara alamiah pada Cekungan Air Tanah. Letak daerah lepasan biasanya berada di daerah hilir dengan morfologi berupa dataran rendah. Penentuan batas antara daerah imbuhan dan daerah lepasan sangat penting dalam pelaksanaan upaya konservasi daerah imbuhan atau resapan air tanah.

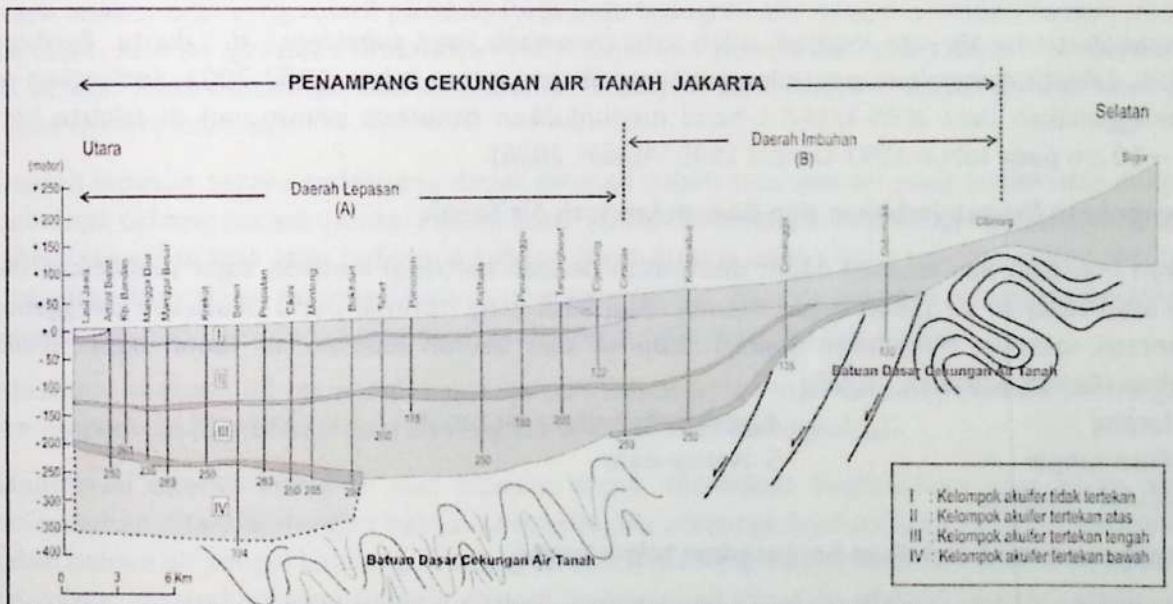
Gambar 5-29 merupakan sketsa penampang melintang dari dua cekungan air tanah meliputi Cekungan Air Tanah Bogor dan Cekungan Air Tanah Jakarta yang menggambarkan keadaan bawah permukaan yang ditarik dari Gunung Salak di bagian Selatan sampai pantai Utara Jakarta (Gambar 5.28). Di daerah Depok atau tepatnya sekitar CibiNong ke arah Barat hingga Parung letak batuan dasar cekungan air tanah berupa batu gamping relatif dangkal, bahkan di beberapa tempat tersingkap di permukaan, sehingga daerah CibiNong-Parung merupakan batas antara Cekungan Air Tanah Bogor dan Cekungan Air Tanah Jakarta. Sebagian kecil air tanah dari Cekungan Air Tanah Bogor, yang berada di daerah lepasan, mengalir masuk ke dalam Cekungan Air Tanah Jakarta di daerah imbuhan.

Cekungan air tanah Jakarta sendiri terbagi atas dua daerah (Gambar 5-30) yaitu, daerah lepasan (A) dan daerah imbuhan (B). Daerah imbuhan untuk kelompok akuifer tertekan atas (II), tertekan tengah (III), dan tertekan bawah (IV) terutama berada pada daerah CibiNong sampai dengan Ciracas, sedangkan daerah Ciracas sampai daerah Ancol merupakan daerah lepasan. Daerah imbuhan merupakan daerah pemasukkan air kedalam cekungan air tanah. Dari daerah imbuhan, air yang terdapat di dalam tanah akan terdistribusikan ke daerah lepasan. Akuifer tidak tertekan (I) selain mendapat pasokan air dari daerah imbuhan (B) juga mendapat pasokan dari air hujan yang jatuh dan meresap langsung di daerah lepasan (A). Daerah imbuhan memiliki elevasi yang lebih tinggi dari daerah lepasan dan karena elevasinya lebih tinggi biasanya terletak jauh dari pantai. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5-30. Bogor memiliki elevasi diatas 250 meter di atas permukaan air laut. Begitu pula daerah CibiNong sampai Ciracas memiliki elevasi tanah diatas 50 meter di atas muka air laut. Daerah pemasukan air digambarkan pada daerah dengan warna lapisan tanah coklat muda. Air meresap pada daerah ini lalu mengalir ke daerah lepasan. Pada daerah imbuhan dijumpai sumur industri pada suatu kedalaman tertentu. Pada

Sidomukti kedalaman sumur yang diambil mencapai 133 m sedangkan di Kelapa dua adalah 250 meter. Ada kecenderungan bahwa semakin dekat daerah lepasan, maka muka air tanah lebih rendah sehingga pengambilan air butuh sumur yang lebih dalam.



Gambar 5-29. Sketsa kondisi bawah tanah CAT Bogor dan CAT Jakarta (Soekardi, 1982)



Gambar 5-30. Penampang Melintang CAT Jakarta (Soekardi, 1982)

Daerah Lepas yang digambarkan pada Gambar 5-30 bagian A merupakan daerah banyak pengambilan air. Disini banyak dijumpai sumur bor, salah satu teknik pemanfaatan air tanah dapat menggunakan pompa maupun tenaga biasa/menimba. Teknik menimba sumur sudah biasa dilakukan oleh orang desa zaman dahulu. Perbedaannya dengan zaman sekarang, sumur lebih cenderung memakai pompa dibandingkan menimba air biasa, karena disamping tidak menghabiskan banyak tenaga bagi yang menimbanya, air yang didapat juga jauh lebih banyak.

Sejak merambah menjadi kawasan industri, kota metropolitan seperti Jakarta, kurang memberi perhatian untuk hal-hal yang berhubungan dengan pemenuhan air bersih. Kualitas air di Jakarta mengalami degradasi secara fungsional yang berkala. Air bersih semakin sulit untuk didapat, orang berebut untuk mendapatkan air bersih, sehingga mereka menggali sumur sedalam-dalamnya sekalipun ada. Air bersih hanya dapat diperoleh oleh kalangan tertentu, orang miskin harus membayar 20x lipat lebih banyak untuk mendapatkannya. Permasalahan turunnya muka air tanah karena peningkatan kebutuhan penduduk Jakarta, ditambah dengan kurangnya prasarana dan sarana peresapan air semakin membuat susah mendapatkan air bersih. Muka air tanah tiap saat mengalami penurunan, sehingga dalam periode satu tahun terjadi penurunan yang drastis

Pada Gambar 5-30 bagian A terdapat banyak sumur bor yang kedalamannya berkisar 250 m, bahkan ada yang mencapai 400 m. Ada kecenderungan pada sumur bor bahwa semakin dekat ke pantai, sumur bor semakin dalam. Hal ini terjadi karena untuk daerah dekat pantai, air bersih semakin sulit.

Penurunan muka air tanah ini memungkinkan terjadinya intrusi air laut. Kini air laut sudah mencapai Monas (Monumen Nasional). Keadaan air tanah di daerah monas sudah cukup mengkhawatirkan. Karena kesulitan mendapatkan air tawar, maka penduduk di sekitar lebih cenderung membeli air bersih ke pemasok (Romauli, 2007).

Penurunan air tanah juga menjadi salah satu penyebab *land subsidence* di Jakarta. Berdasarkan survey GPS, Jakarta mengalami penurunan sebesar 50 cm antara tahun 1997-2002. Sedangkan teknik InSAR menggunakan data JERS-1/SAR L-band menunjukkan besarnya penurunan di Jakarta berkisar antara 5 – 10 cm pada tahun 1993 sampai 1995 (Abidin, 2006).

5.8.1 Penentuan Daerah Imbuhan dan Daerah Lepas Air Tanah

Daerah imbuhan dan lepasan dapat ditentukan dengan berbagai metoda. Agar identifikasi daerah imbuhan atau resapan air tanah dapat memberikan hasil yang optimal perlu dilakukan penggabungan dari beberapa metoda. Penentuan daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah dapat dilakukan berdasarkan (Danaryanto dkk., 2008):

1. tekuk lereng
2. pola aliran sungai
3. pemunculan mata air
4. kedalaman muka air tanah
5. isotop alam

1. Penentuan daerah imbuhan berdasarkan tekuk lereng

Tekuk lereng merupakan batas antara morfologi dataran dengan perbukitan. Biasanya merupakan daerah kaki bukit atau kaki pegunungan. Apabila seseorang menyusuri jalan di daerah dataran ke arah

hulu kemudian menemukan tanjakan maka secara sederhana dapat dikatakan bahwa batas antara dataran dan tanjakan tersebut adalah tekuk lereng. Daerah imbuhan secara sederhana dapat disebutkan terletak di atas tekuk lereng tersebut, sedangkan daerah lepasan terletak di bawah tekuk lereng.

Penggambaran garis tekuk lereng secara sederhana dapat dilakukan dengan mengandalkan peta topografi, foto udara, atau citra satelit. Pada peta dengan skala 1: 25.000 atau 1: 50.000 batas antara daerah dataran dengan lereng perbukitan dapat terlihat dengan cukup jelas. Semakin kecil skala peta maka akan semakin kabur batas tekuk lereng tersebut. Kendala penentuan dengan cara ini terjadi apabila hanya tersedia peta topografi dengan skala yang terlalu kecil misalnya skala 1: 250.000, sehingga tidak dapat menunjukkan detil morfologinya. Pada peta topografi skala besar misal 1: 25.000 atau 1: 50.000, batas antara daerah dengan garis kontur yang rapat dengan daerah dengan garis kontur yang jarang merupakan garis tekuk lereng. Daerah dengan garis kontur yang rapat secara sederhana dapat diklasifikasikan sebagai daerah imbuhan, sedangkan daerah dengan garis kontur yang jarang dapat diklasifikasikan sebagai daerah lepasan.

Tentu saja metoda ini sangat kasar namun dapat dilakukan untuk daerah yang tidak tersedia data hidrogeologi yang memadai.

2. Penentuan batas daerah imbuhan berdasarkan pola aliran sungai

Alur aliran sungai dari daerah hulu hingga ke hilir membentuk pola yang unik. Demikian juga beberapa alur sungai yang berjajar dari hulu ke hilir dan terpisah satu dengan yang lain tidak saling berhubungan secara keseluruhan akan membentuk pola yang khas.

Daerah imbuhan secara sederhana dapat dikenali dalam satu daerah yang terdiri atas serangkaian anak sungai. Daerah imbuhan pada umumnya dicirikan dengan morfologi kawasan yang ditempati oleh beberapa anak sungai yang relatif pendek. Pada peta topografi alur sungai memperlihatkan pola seperti rangka daun. Alur sungai pada umumnya relatif lurus dan pendek saling bertemu membentuk cabang sungai utama. Pada umumnya daerah imbuhan ditempati oleh sungai orde ketiga dan keempat atau orde yang lebih rendah lagi.

Daerah lepasan secara sederhana dapat dikenali dalam satu daerah yang terdiri atas sungai induk dan beberapa cabang sungai utama. Pada umumnya dicirikan dengan morfologi kawasan yang ditempati oleh aliran sungai utama atau beberapa cabang aliran sungai utama yang relatif panjang alurnya. Pada peta topografi alur sungai memperlihatkan pola yang sejajar. Alur sungai pada umumnya berkelok-kelok. Daerah lepasan pada umumnya ditempati oleh sungai orde pertama dan kedua.

Meskipun metoda ini termasuk kasar namun dalam penentuan daerah imbuhan secara gabungan dapat memperkuat identifikasi daerah yang kekurangan data hidrogeologi.

Identifikasi daerah imbuhan dan lepasan dapat ditentukan berdasarkan sifat aliran air sungai. Daerah imbuhan ditandai dengan sungai yang sebagian alirannya memasok air tanah di bawahnya. Atau dikatakan bahwa air sungai kehilangan sebagian alirannya yang masuk ke dalam sistem air tanah. Sungai yang demikian disebut sebagai *influent stream*. Sungai yang mengalir melalui daerah lepasan alirannya

mendapatkan tambahan dari air tanah di bawahnya dan disebut *effluent stream* (Freeze and Cherry, 1979).

3. Penentuan batas daerah imbuhan berdasarkan pemunculan mata air

Daerah lepasan air tanah secara visual dapat dikenali di lapangan dari pemunculan mata air. Mata air pada umumnya banyak terdapat di daerah kaki bukit, kaki pegunungan atau tekuk lereng, serta pada lereng bukit dan lereng pegunungan bagian bawah. Kawasan di sebelah bawah atau arah hilir dari titik pemunculan mata air merupakan daerah lepasan air tanah. Sedangkan kawasan di sebelah atas atau arah hulu dari titik pemunculan mata air merupakan daerah imbuhan air tanah. Beberapa titik pemunculan mata air pada umumnya terletak berjajar pada ketinggian yang relatif sama. Dari deretan titik pemunculan mata air tersebut dapat ditarik garis yang memisahkan daerah imbuhan dan lepasan air tanah (*hinge line*).

Metoda ini termasuk cukup akurat dalam penentuan batas daerah imbuhan dan lepasan air tanah.

4. Penentuan batas daerah imbuhan berdasarkan kedalaman muka air tanah

Metoda penentuan daerah imbuhan dan lepasan air tanah pada cekungan air tanah dengan menggunakan data kedudukan atau kedalaman muka air tanah merupakan cara yang paling akurat.

Berdasarkan kedudukan muka air tanah dan arah aliran air tanahnya maka daerah imbuhan merupakan bagian dari cekungan yang dicirikan dengan aliran air tanah pada lapisan jenuh mengalir menjauhi muka air tanah (Freeze and Cherry, 1979). Di daerah imbuhan arah aliran air tanah di dekat permukaan mengarah ke bawah. Sedangkan daerah lepasan merupakan bagian dari cekungan yang dicirikan dengan aliran air tanah pada lapisan jenuh mengalir menuju muka air tanah. Di daerah lepasan arah aliran air tanah di dekat permukaan mengarah ke atas. Batas antara daerah imbuhan dan lepasan disebut *hinge line*.

Sedangkan kawasan tempat keberadaan lapisan jenuh air yang ditandai dengan arah aliran air tanah yang sejajar dengan muka air tanah merupakan daerah transisi antara daerah imbuhan dan lepasan.

Di dalam lapisan jenuh air tekanan hidrolika (*hydraulic head*) pada titik yang berada di daerah hulu selalu lebih besar daripada tekanan hidrolika pada titik yang berada di daerah hilir. Sehingga terjadi aliran air tanah dari daerah hulu ke arah hilir.

Di daerah imbuhan tekanan hidrolika lapisan jenuh air pada titik yang berdekatan dengan bidang muka air tanah lebih besar daripada tekanan hidrolika pada titik yang berada di bawahnya. Sehingga terjadi aliran air tanah yang arahnya berasal dari titik yang lebih dangkal dekat dari bidang muka air tanah ke arah yang lebih dalam menjauhi bidang muka air tanah. Secara garis besar dapat dikatakan arah aliran air tanah berasal dari atas menuju ke bawah mengarah ke hilir.

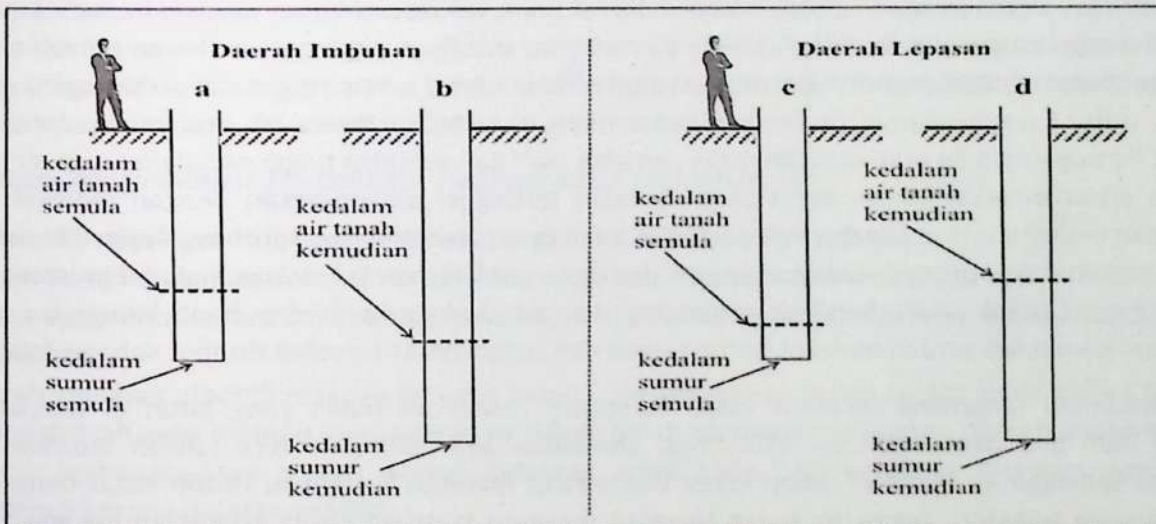
Di daerah lepasan tekanan hidrolika lapisan jenuh air pada titik yang berdekatan dengan bidang muka air tanah lebih kecil dari pada tekanan hidrolika pada titik yang berada di bawahnya. Sehingga terjadi aliran air tanah yang arahnya berasal dari titik yang lebih dalam jauh dari bidang muka air tanah

ke arah yang lebih dangkal mendekati bidang muka air tanah. Secara garis besar dapat dikatakan arah aliran air tanah berasal dari bawah menuju ke atas mengarah ke hilir.

Di daerah transisi tekanan hidrolika lapisan jenuh air pada titik yang berdekatan dengan bidang muka air tanah sama dengan tekanan hidrolika pada titik yang berada di bawahnya. Sehingga terjadi aliran air tanah yang arahnya sejajar dengan bidang muka air tanah ke arah hilir. Secara garis besar dapat dikatakan arah aliran air tanah relatif mendatar mengarah ke hilir.

Data tekanan hidrolika lapisan jenuh air dapat diketahui dari kegiatan pengeboran. Pada saat lubang pengeboran mencapai lapisan jenuh air akan didapatkan muka air tanah. Kedudukan atau kedalaman muka air tanah yang ditemui tersebut menggambarkan tekanan hidrolika pada kedalaman dasar lubang bor tersebut. Kemudian pengeboran diteruskan lebih dalam lagi dan diukur kedalaman muka air tanahnya, sehingga diketahui tekanan hidrolika pada dasar lubang yang lebih dalam.

Kedalaman muka air tanah pada dasar lubang bor yang dangkal kemudian dibandingkan dengan lubang bor yang lebih dalam (Gambar 5-31). Apabila kedalaman muka air tanah pada lubang bor yang dangkal ternyata lebih dangkal dari kedalaman muka air tanah pada lubang bor yang lebih dalam, berarti tekanan hidrolika pada dasar lubang bor yang dangkal lebih besar dari tekanan hidrolika pada lubang bor yang lebih dalam. Kawasan dengan kedudukan muka air tanah yang semakin dalam seiring dengan semakin dalamnya lubang bor tersebut merupakan daerah imbuhan. Itulah sebabnya sumur yang dibuat di daerah imbuhan umumnya mempunyai muka air tanah yang dalam, dan semakin diperdalam sumur tersebut makin dalam pula kedudukan muka air tanahnya.



Gambar 5-31. Kedalaman air tanah di daerah imbuhan semakin dalam seiring dengan semakin dalamnya sumur (kedalaman sumur semula a dan kemudian b dan sebaliknya di daerah lepasan kedalaman air tanah semakin dangkal seiring dengan semakin dalamnya sumur (kedalaman sumur semula c dan kemudian d (Danaryanto dkk., 2008)

Sebaliknya apabila kedalaman muka air tanah pada lubang bor yang dangkal ternyata lebih dalam dari kedalaman muka air tanah pada lubang bor yang lebih dalam, berarti tekanan hidrolika pada dasar lubang bor yang dangkal lebih kecil dari tekanan hidrolika pada lubang bor yang lebih dalam. Kawasan dengan kedudukan muka air tanah yang semakin dangkal seiring dengan semakin dalamnya lubang bor tersebut merupakan daerah lepasan. Sumur yang dibuat di daerah lepasan umumnya mempunyai muka air tanah yang dangkal, dan semakin diperdalam sumur tersebut makin dangkal pula kedudukan muka air tanahnya. Bahkan ada kalanya muka air tanah tersebut naik melampaui permukaan tanah sehingga air meluap mengalir sendiri keluar dari lubang sumur bor dan dikenal dengan sumur artesis (Freeze & Cherry, 1979).

5. Penentuan daerah imbuhan berdasarkan isotop alam

Isotop alam yang digunakan untuk penentuan daerah imbuhan adalah isotop stabil ^2H (Deuterium) dan ^{18}O yang disebut isotop berat. Metoda ini didasarkan atas adanya hubungan fungsi ketinggian topografi terhadap komposisi ^2H dan ^{18}O dalam air hujan. Komposisi ^2H dan ^{18}O dalam air tanah sesuai dengan harga rata-rata distribusi konsentrasi isotop air hujan yang meresap pada ketinggian tertentu melalui infiltrasi. Air tanah yang kemudian mengalir di dalam batuan tersebut tidak mengalami reaksi kimia dengan material batuan penyusun akuifer yang dilaluinya. Sehingga nilai isotop ^2H dan ^{18}O air tanah selama menempuh perjalanannya tidak mengalami perubahan dan tetap menunjukkan komposisi asalnya (air hujan).

Air yang mempunyai rumus kimia H_2O memiliki komposisi jumlah molekul isotop ringan dan isotop berat tertentu. Perbandingan jumlah molekul H_2^{18}O (molekul isotop berat untuk oksigen) dan H_2^{16}O (molekul isotop ringan untuk oksigen) nilainya tertentu, demikian juga perbandingan jumlah molekul $\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ (molekul isotop berat untuk hidrogen) dan H_2^{16}O (molekul isotop ringan untuk hidrogen) nilainya tertentu pula. Karena adanya perbedaan berat molekul tersebut ketika air laut menguap dan uap tersebut tertiuap angin ke arah daratan maka semakin jauh dan semakin tinggi perjalanan uap air (awan) tersebut maka molekul isotop berat akan semakin tertinggal dibandingkan dengan molekul isotop ringan, dan molekul isotop berat cenderung akan lebih dulu jatuh bersama turunnya hujan dibandingkan dengan molekul isotop ringan. Akibatnya perbandingan jumlah molekul isotop ringan dan isotop berat pada uap air (awan) selalu berubah sebanding dengan jarak tempuh dan beda ketinggian, proses perubahan komposisi jumlah molekul isotop ringan dan isotop berat tersebut disebut sebagai fraksinasi.

Berdasarkan fenomena tersebut maka komposisi isotop air hujan yang jatuh di tempat yang semakin jauh dari pantai dan semakin tinggi elevasinya akan semakin kecil jumlah molekul isotop beratnya. Sehingga air hujan di setiap lokasi dan elevasi memiliki komposisi isotop berat dengan nilai rata-rata yang tertentu. Ketika air hujan tersebut meresap kedalam tanah kemudian mengalir dalam akuifer serta telah menempuh jarak yang jauh dari tempat meresap, komposisi isotop berat air tanah tersebut tetap sama dengan komposisi isotop berat air hujan yang jatuh di tempat meresap. Sehingga untuk mengetahui daerah asal resapan atau imbuhan air tanah dilakukan dengan membandingkan atau mencocokkan nilai komposisi isotop berat (^{18}O atau ^2H) air tanah dengan nilai yang sama dengan komposisi isotop berat air hujan yang jatuh di tempat tertentu.

Sebagai contoh berikut ini disampaikan hasil penelitian Wandowo (2000) untuk menentukan daerah resapan/imbunan air tanah di Jakarta. Berdasarkan hasil penelitiannya memperlihatkan bahwa komposisi isotop ^{18}O air tanah dangkal di berbagai lokasi nilainya antara -4,5 ‰ hingga -6,5 ‰ sesuai dengan nilai komposisi isotop ^{18}O air hujan setempat, artinya air tanah dangkal di Cekungan Air Tanah Jakarta berasal dari infiltrasi air hujan lokal yang turun pada permukaan tanah di atasnya. Sedangkan air tanah pada akuifer tertekan (air tanah dalam yang kedalamannya lebih dari 60 meter) yang berasal dari berbagai lokasi di Jakarta ternyata memiliki nilai rata-rata komposisi isotop ^{18}O sekitar $-6,14 \pm 0,14$ ‰ yang apabila dicocokkan (*matching*) memiliki nilai yang sama dengan komposisi isotop ^{18}O air hujan (dengan nilai antara -6,28 ‰ sampai -6,00 ‰) yang jatuh pada tempat dengan ketinggian antara 130 – 280 meter atau terletak antara daerah Depok dan Bogor. Dengan demikian daerah resapan atau imbunan air tanah di Jakarta yang terkandung dalam akuifer tertekan (kedalaman lebih dari 60 meter) terletak pada kawasan antara Depok dan Bogor. Harga rata-rata komposisi air hujan antara daerah Tugu (elevasi 1080 meter) dan Puncak (1480 meter) sekitar -8,00 ‰ yang sangat berbeda dengan nilai komposisi isotop air hujan antara Depok dan Bogor sekitar -6,14 ‰, sehingga daerah Puncak bukan daerah imbunan air tanah yang ada di Jakarta.

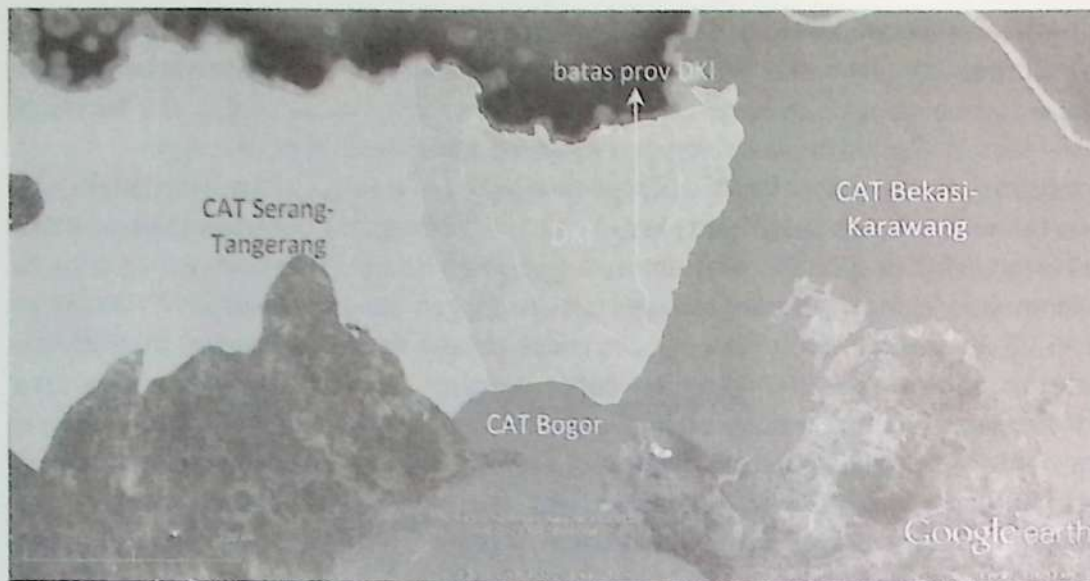
5.8.2 Penyebaran Daerah Imbunan dan Daerah Lepas

Penyebaran daerah imbunan tergantung pada tata letak lapisan batuan yang berperan sebagai pembawa air tanah (akuifer). Tata letak dan susunan akuifer tersebut tergantung pada kondisi geologi. Pada umumnya cekungan air tanah yang tersusun oleh batuan sedimen atau batuan produk material gunung api menunjukkan tata letak akuifer yang berlapis-lapis. Lapisan akuifer yang saling terpisahkan oleh lapisan kedap air dengan lapisan akuifer yang berada di bawah atau di atasnya mempunyai daerah imbunan dan lepasan masing-masing yang berbeda letaknya. Semakin dalam letak keberadaan lapisan akuifer maka semakin jauh ke arah hulu daerah imbuannya.

Proses pengimbuhan dan peluahan/lepasan adalah seperti berikut:

- Proses hidrogeologis CAT: pengimbuhan, pengaliran, & peluahan/lepasan.
- Pengimbuhan di daerah imbunan & peluahan air tanah terjadi di daerah luhan.
- Proses pengaliran antara ke-2 daerah tersebut, lebih khusus terjadi di daerah transisi antara imbunan dan luhan.
- Daerah imbunan: daerah resapan air yang mampu menambah air tanah secara alami pada CAT \Leftrightarrow Tak semua daerah yang mampu meresapkan air dalam tanah otomatis merupakan daerah imbunan.
- Daerah luhan/lepasan adalah daerah keluaran alami pada CAT. Letaknya biasanya daerah hilir, morfologi berupa dataran rendah.
- Penentuan batas antara daerah imbunan dan daerah luhan sangat penting dalam pelaksanaan upaya konservasi daerah imbunan atau resapan air tanah.

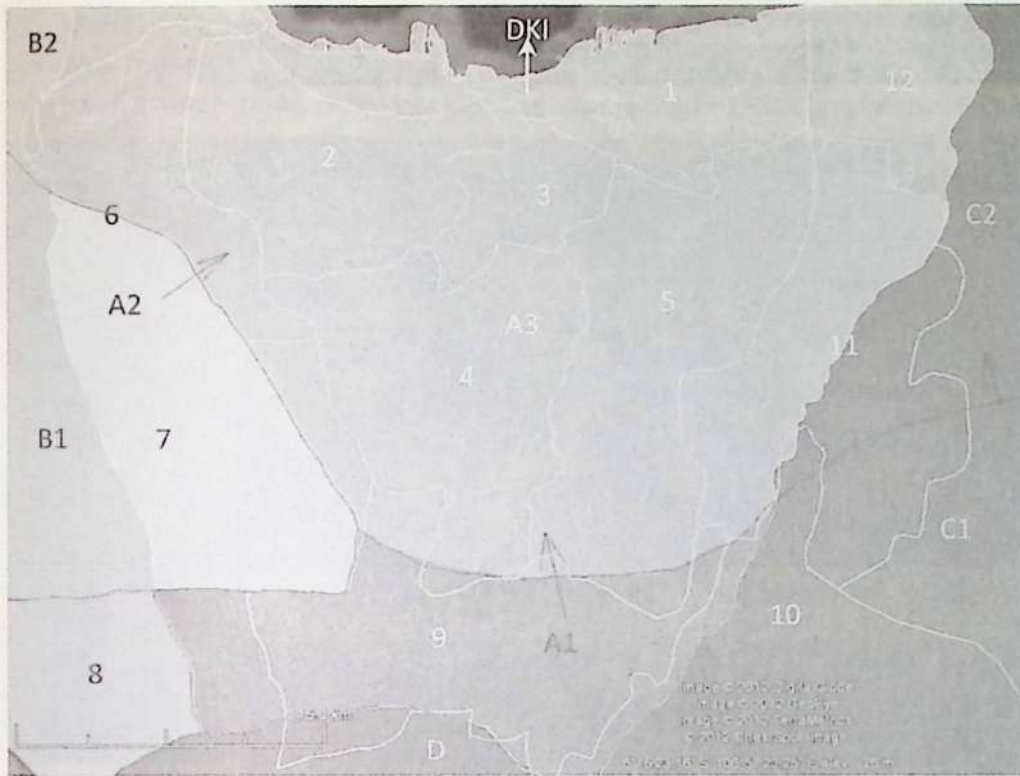
Contoh daerah imbunan dan daerah lepasan ditunjukkan dalam Gambar 5-32.



a. CAT Jakarta dan CAT lain disekitarnya



b. Daerah Imbuhan dan Daerah Lepas CAT Jakarta dan CAT lain disekitarnya



Prov. DKI → 5 kota:	7. Kab. Tangerang	A2. CAT Jakarta (daerah imbuhan)
1. Kota Jakarta Utara	8. Kab Bogor	A3. CAT Jakarta (daerah lepasan)
2. Kota Jakarta Barat	9. Kota Depok	B1. CAT Serang-Tangerang (imbuhan)
3. Jakarta Pusat	10. Kab. Karawang	B2. CAT Serang-Tangerang (lepasan)
4. Jakarta Selatan	11. Kota Bekasi	C1 CAT Bekasi-Karawang (imbuhan)
5. Jakarta Timur	12. Kab Bekasi	C2 CAT Bekasi-Karawang (lepasan)
6. Kota Tangerang	A1. CAT Jakarta (daerah imbuhan)	D CAT Bogor

c. Kota-Kota Prov. DKI dan kab/kota sekitarnya serta CAT, imbuhan dan lepasan

Recharge area CAT Jakarta di Kota Depok sudah menjadi pemukiman, daerah industri dan lainnya, juga sudah banyak situ-situ yang berubah menyebabkan berkurangnya daerah resapan air. Untuk pengelolaan air tanah perlu harmoni antara PemProv DKI, Kota Depok dan Pem Kab Bogor. Perubahan fungsi lahan ini juga meningkatkan *run-off* sehingga banjir di Jakarta menjadi semakin besar dan luas.



d. Kota Depok merupakan *recharge area* (daerah imbuhan) CAT Jakarta

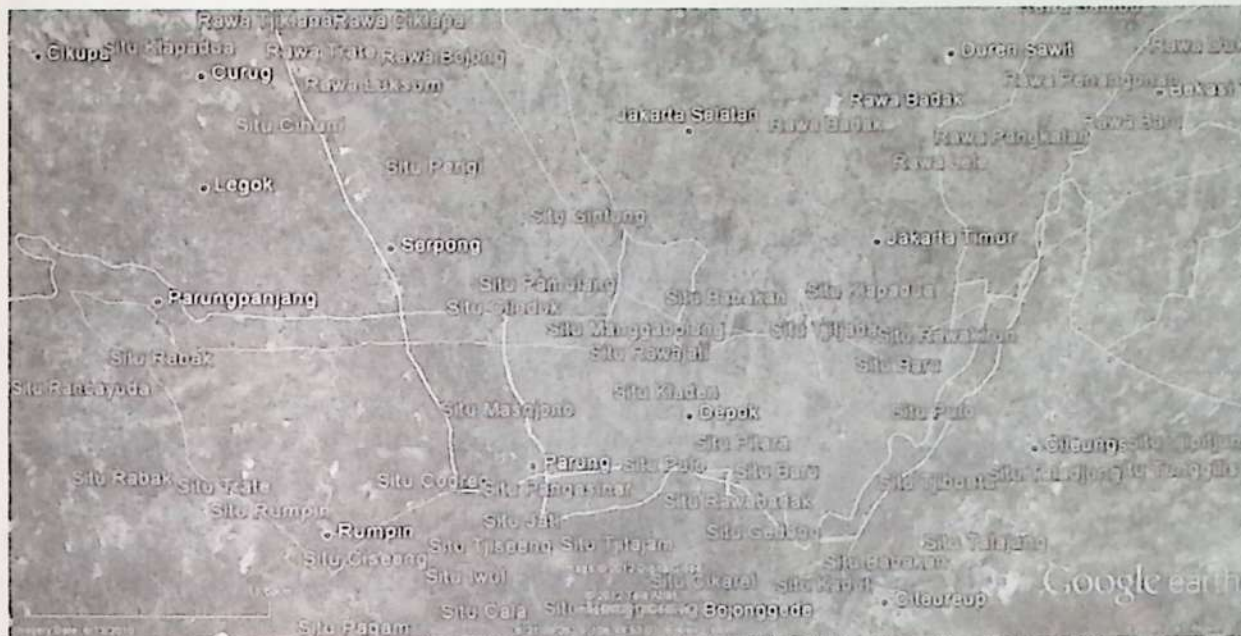


e. Detail A Gambar d.

Gambar 5-32. CAT Jakarta dan CAT lain disekitarnya dan perkembangan kota (KepPres No. 26 Tahun 2011; Kep. Men. Energi & Sumber Daya Mineral No. 716 Tahun 2003)

Daerah hulu Jakarta sampai ke Depok dari sisi sejarah dapat diketahui banyak lokasi menggunakan nama depan situ (nama lokal untuk embung/waduk kecil). Semakin ke hilir banyak lokasi yang menggunakan nama depan rawa. Daerah dengan nama depan situ pada prinsipnya sesuai dengan karakteristik CAT Jakarta adalah daerah imbuhan atau daerah resapan. Sedangkan daerah dengan nama depan rawa pada prinsipnya merupakan daerah lepasan (Gambar 5-33a dan b)

Namun seiring dengan perkembangan waktu daerah dengan nama depan situ dan rawa telah berubah menjadi pemukiman. Pertumbuhan penduduk yang pesat menyebabkan terjadi alih fungsi lahan yang cepat pula (a dan b).



a. Daerah hulu (daerah resapan) banyak terdapat situ



b. Daerah lepasan banyak terdapat rawa

Gambar 5-33. Di Daerah imbuhan CAT Jakarta banyak lokasi dengan nama depan situ dan daerah lepasan banyak lokasi dengan nama depan rawa

5.9 Pengisian Air Tanah

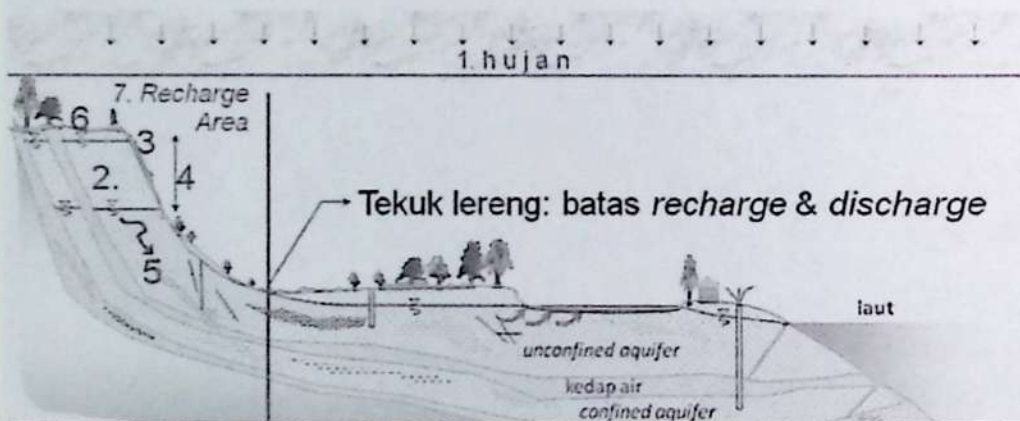
5.9.1 Pengisian Air Tanah Alami di *Recharge Area* dan *Discharge Area*

Setelah hujan turun ke muka tanah terjadi proses infiltrasi, air akan mengisi pori-pori tanah. Air akan menggantikan udara yang mengisi pori dalam tanah sehingga muka air tanah akan naik. Pergerakan air pada proses infiltrasi adalah fungsi dari ketebalan lapisan tanah tidak jenuh dan konduktivitas hidraulik vertikal yang tidak jenuh.

Keberadaan lapisan tanah, seperti lanau atau lempung dapat memperlambat pengimbuhan, walaupun lapisan tanah tipis. Sedangkan durasi untuk daerah yang lembab untuk tanah kasar di mana muka air tanah dekat dengan permukaan hanya membutuhkan waktu beberapa jam. Pada lahan kering, dengan pengimbuhan yang jarang dan kedalaman muka air tanah sangat jauh dari permukaan, air akan membutuhkan beberapa tahun untuk mencapai lapisan tidak jenuh (Fetter, 1994).

Kecepatan pengimbuhan sangat bervariasi, tergantung dari banyak hal, seperti ketebalan lajur tak jenuh. Saat lajur tak jenuh tidak begitu tebal, pengimbuhan dapat lebih cepat sampai muka air tanah. Umumnya tebal tipisnya lajur tak jenuh tergantung dari topografi. Semakin rendah topografi, semakin tipis lajur tak jenuhnya, contohnya pada daerah dekat danau, pantai, atau di dataran rendah.

Proses pengisian daerah imbuhan/*recharge* dan daerah lepasan/*discharge* ditunjukkan dalam Gambar 5-34.



Keterangan gambar:

- | | |
|---|--|
| 1. Hujan di daerah <i>recharge</i> | 5. Air meresap terus mengalir ke bawah menambah AT di lajur jenuh |
| 2. Air mengisi lajur tak jenuh menjadi jenuh | 6. Saat hujan muka tanah selalu mampu meresapkan air (infiltrasi) |
| 3. Muka air tanah naik/dangkal | 7. Letaknya biasanya di hulu DAS: morfologi berupa perbukitan/pegunungan |
| 4. Membentuk kolom air tebal → tekanan hidraulika kuat menekan ke bawah | |

a. Pengisian air di daerah imbuhan (*recharge area*)

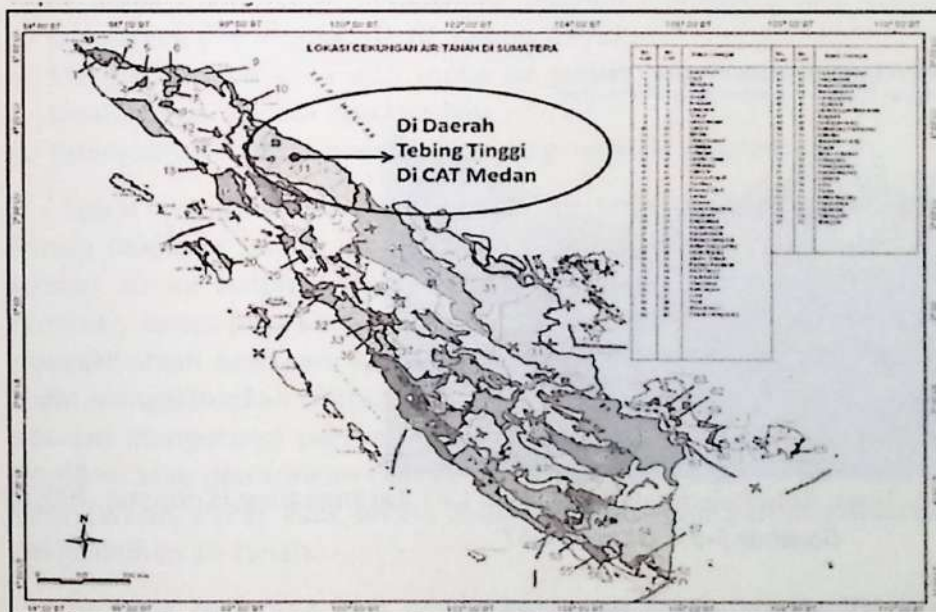


<p>Keterangan gambar:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Hujan daerah luahan (<i>discharge area</i>) 2. Air mengisi lajur tak jenuh menjadi jenuh (di <i>Vadoze Zone</i>) 	<ol style="list-style-type: none"> 3. Muka air tanah (m.a.t.) dangkal naik sampai kondisi tanah jenuh (<i>saturated</i>) → akibatnya m.a.t. naik menjadi semakin dangkal bahkan sampai dekat muka tanah. Namun karena m.a.t. awalnya sudah dangkal maka kolom air tambahan tersebut tak cukup menimbulkan tekanan hidrolika ke bawah. 4. Hujan yang jatuh ke muka tanah tak mampu lagi meresap namun muka air naik di atas muka tanah. Maka selama hujan daerah tersebut menjadi tergenang ⇔ terjadilah banjir
--	--

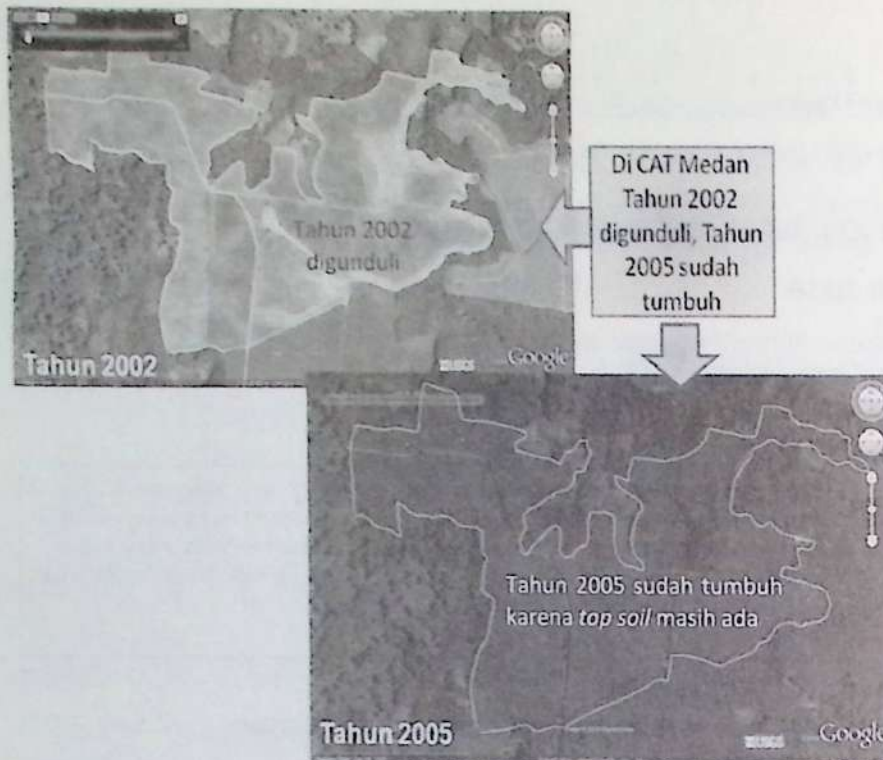
b. Pengisian air di daerah luahan/lepasan (*discharge area*)

Gambar 5-34. Proses pengisian daerah imbuhan dan daerah lepasan (Kodoatie, 2009e dan Danaryanto dkk., 2008a)

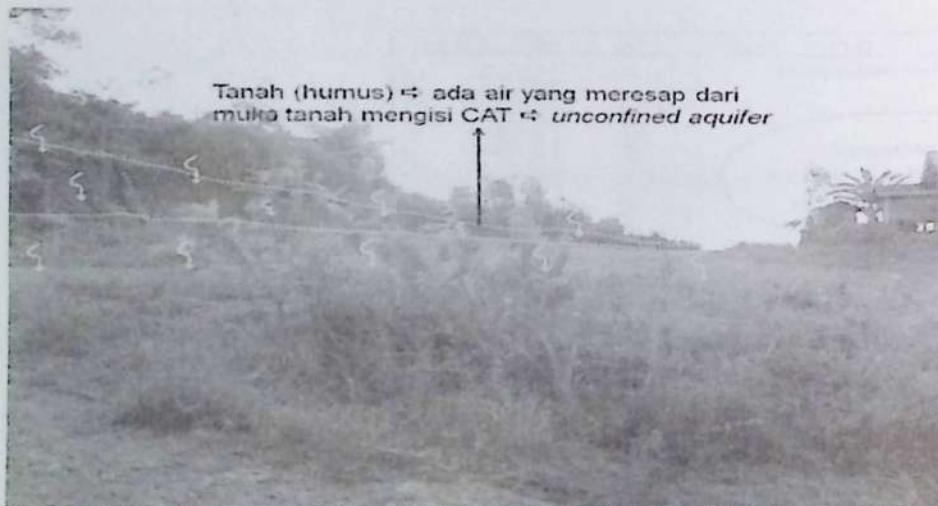
Ilustrasi perubahan daerah CAT ditunjukkan dalam Gambar 5-35.



a. Daerah CAT di Daerah Tebing Tinggi (CAT Medan) → lihat Gambar b



b. Perubahan lahan di CAT Medan sekitar Tebing Tinggi (Google Earth, 2009)



c. Gambaran CAT di Muka Bumi di Timur Kota Palembang di Daerah CAT Karangagung (Kodoatie, 2009b)

Gambar 5-35. Daerah CAT

5.9.2 Pengisian Air Tanah Buatan (*Artificial Groundwater Recharge*)

Untuk menambah keberadaan alamiah air tanah, manusia mencoba untuk mengisi cadangan air tanah secara buatan. Pengimbuhan buatan ini didefinisikan sebagai penambahan jumlah/besarnya

infiltrasi dari presipitasi atau masuknya air di permukaan ke dalam tanah baik dengan menggunakan alat, memperbesar luas penyebaran air, atau secara buatan mengubah keadaan alami. Banyak metode telah dikembangkan, termasuk penyebaran air, pengimbuhan melalui lubang, penggalian, sumur, atau pemompaan dari air permukaan ke dalam tanah. Pemilihan metode sangat dipengaruhi oleh hal-hal seperti: topografi lokal, geologi, dan kondisi tanah, jumlah air untuk pengimbuhan, dan pemakaian air. Pada kondisi khusus, nilai lahan, kualitas air, atau iklim adalah faktor yang penting (Todd, 1959).

Tujuan dari pengimbuhan air tanah buatan (Taylor, 1963):

1. Untuk menambahkan jumlah pengimbuhan alami dalam akuifer. Bila pengimbuhan alami dari akuifer lebih kecil dari rata-rata permintaan air tanah tahunan, maka pengimbuhan buatan dapat meningkatkan batas aman dalam akuifer.
2. Menyimpan air dalam tanah untuk penggunaan di masa depan. Di beberapa wilayah terdapat daerah yang kurang layak untuk menampung air permukaan. Dengan keadaan seperti ini, penampungan air tanah dapat menjadi saran yang menarik.
3. Peningkatan pemakaian air di daerah yang mengalami kekurangan air pada musim-musim tertentu. Di waktu musim penghujan, air permukaan dapat dialihkan untuk pengimbuhan, sehingga air yang tersimpan di dalam tanah dapat dipakai pada musim-musim kemarau. Hal ini adalah dasar rencana di mana tujuannya adalah untuk mengoptimalkan pemakaian dari sumber air total dari suatu daerah supaya didapat keterpaduan kebijakan pengelolaan antara air permukaan dan air tanah atau dikenal dengan pemakaian air saling menunjang (*conjunctive use*).
4. Menjadi ukuran sekaligus mengurangi intrusi air laut. Jika air masuk ke dalam akuifer pantai maka hal ini dapat membentuk penghalang tekanan hidrolik antara daerah pantai dengan sumur daerah pedalaman (Signor dkk., 1970; Knapp, 1973).
5. Menghindari pengurangan muka air tanah yang nantinya juga dapat menghindari dari amblesan tanah, intrusi air laut dan lain-lain.
6. Peningkatan standar pada akuifer yang memiliki kualitas rendah.

Syarat utama dalam pengimbuhan air tanah buatan adalah ketersediaan air. Sumber air dapat berupa limpasan hujan, air untuk pendinginan, air limbah industri, bahkan air selokan. Banyak dari sumber air ini butuh pengolahan terlebih dahulu, karena tidak hanya resiko bahwa akuifer akan tercemar, tetapi juga kemungkinan interaksi antara pengimbuhan air dengan air tanah. Interaksi bisa mengakibatkan endapan yang mengandung kalsium karbonat atau garam mangan. Selain itu bakteri dapat mengakibatkan bertambahnya endapan. Kedua proses ini cenderung menyumbat saringan yang ada dan mengurangi permeabilitas dari akuifer, sehingga memperlambat lama waktu pengimbuhan. Nitrifikasi atau denitrifikasi dan pengurangan sulfat akan terjadi pada saat tahap awal pengimbuhan air tanah (Wood, 1975). Lalu, secara buatan ada beberapa permasalahan yang akan terjadi pada saat proses pengimbuhan air tanah.

Terdapat beberapa cara pengimbuhan air tanah buatan. Hal ini sudah termasuk kolam resapan maupun selokan, irigasi semprot dan sumur pengimbuhan. Kolam resapan adalah salah satu dari pengimbuhan air tanah buatan. Supaya menjadi efektif, tanah harus memiliki kapasitas infiltrasi yang tinggi dan jenis akuifer tidak tertekan yang biasanya 2 sampai 3 m dari permukaan tanah. Kualitas air

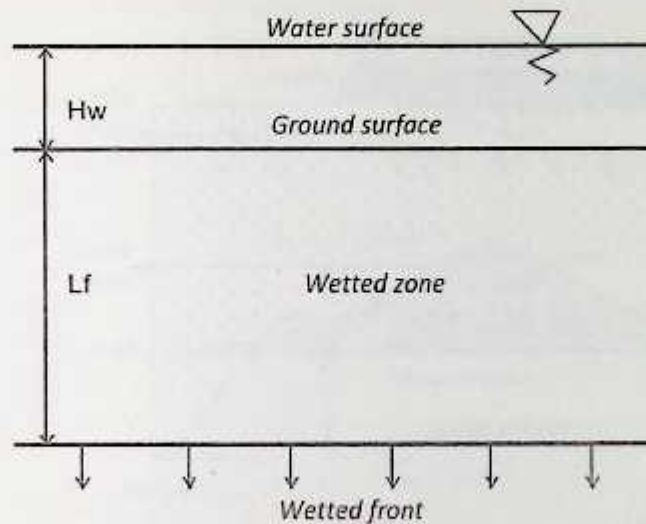
dipakai dalam pengimbuhan kolam tidak kritis. Dalam kenyataannya, kolam resapan terdapat elemen yang penting dalam pengolahan air, sebagai penyaring pasir, menghancurkan benda padat yang melayang, amonia, bakteri dan virus. Dalam kondisi-kondisi tertentu, kolam harus dibersihkan secara periodik, di atas 10 sampai 30 mm dari dasar harus diganti dengan materi yang bersih. Kolam resapan dapat beroperasi sampai berpuluh-puluh tahun di beberapa daerah di dunia dan kolam-kolam ini sanggup untuk menghasilkan kualitas air yang baik (Imhoff, 1925; Riedel, 1934).

Kolam resapan adalah metode yang banyak diterapkan. Metode ini dapat diklasifikasikan seperti kolam, parit/saluran, penggenangan, saluran alami, dan irigasi. Air dapat ditampung atau dialirkan melalui saluran alami maupun buatan atau permukaan tanah, tergantung pada metode yang dipilih. Prinsip dasar dari metode ini adalah meningkatkan waktu dasar, sehingga air akan lebih banyak tertampung dan akan memberikan waktu untuk terjadi infiltrasi sehingga akan meningkatkan imbuhan air tanah. Agar pengimbuhan dapat efektif dan efisien maka sangat penting jika material pada zona aerasi mempunyai keterhantaran hidraulik vertikal (K_v) yang baik, sehingga dapat terjadi penelusan dan akuifer mempunyai keterusan untuk mengalirkan air dari tempat tampungan di permukaan tanah. Ketika daerah penyebaran terisi, terjadi infiltrasi air kemudian tanah menjadi jenuh sehingga akan cepat mengalir vertikal ke bawah. Infiltrasi dengan penambahan lajur jenuh air seperti dapat dilihat pada Gambar 5-36 diatur dengan persamaan Darcy's (Karehnt, 2003):

$$v_i = K (H_w + L_f - h_{cr}) / L_f$$

di mana:

- v_i = infiltrasi
- K = keterhantaran hidraulik vertikal (*vertical hydraulic conductivity*)
- H_w = kedalaman air dari permukaan tanah
- h_{cr} = tinggi tekanan kritis lajur jenuh (nilainya bervariasi dari - 10 m atau lebih untuk material kasar sampai -100 cm atau kurang untuk material halus)
- L_f = kedalaman tambahan lajur jenuh

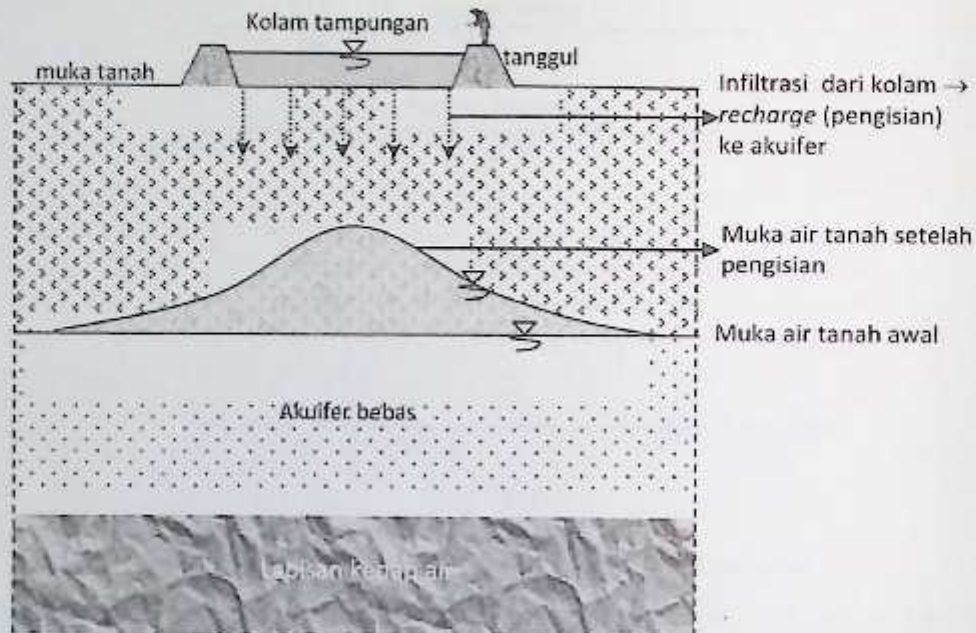


Gambar 5-36. Pergerakan penambahan lajur jenuh

Penambahan lajur jenuh air dipengaruhi oleh v_i / θ_i di mana θ_i = porositas-kadar kelembaban. Pada saat air perkolasi mencapai lajur air tanah maka muka air akan naik sebagai respon terhadap imbuhan dan terjadi seperti gundukan air (*ground water mound*) seperti terlihat pada Gambar 5-37 di bawah ini. Besarnya ukuran dari gundukan air tanah yang terjadi setelah pengimbuhan, sangat tergantung pada ukuran dan bentuk dari daerah imbuhan, waktu pengimbuhan, besarnya imbuhan, keterusan, dan serahan jenis dari akuifer.

Banyak persamaan telah dikembangkan untuk analisis prediksi konfigurasi gundukan air tanah untuk cekungan yang berbentuk segi empat (Hantush, 1967) dan persegi (Bianchi dan Muckel, 1970). Gundukan air tanah akan mencapai permukaan tanah dalam waktu tertentu tergantung dengan karakteristik akuifer (Gambar 5-37).

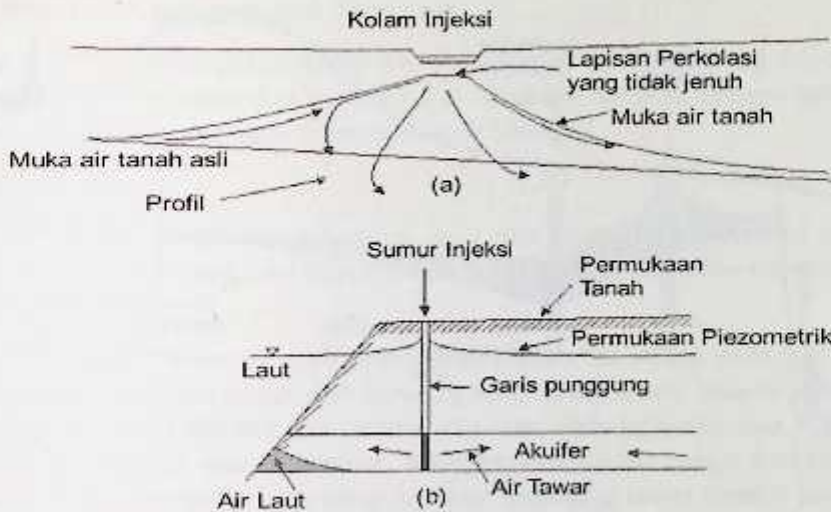
Irigasi semprot hanya dapat diimplementasikan pada areal yang sangat luas. Kecepatan untuk pengimbuhan biasanya sangat lambat, karena tidak ada tinggi muka air yang dapat diaplikasikan walaupun kualitas air lebih tinggi. Irigasi semprot sangat terbatas untuk jenis tanah dengan kapasitas infiltrasi yang tinggi, daerah di mana muka air tanah lebih tinggi dan periode tanaman aktif tumbuh. Dalam pelaksanaan, irigasi semprot harus dilakukan dengan hati-hati supaya garam atau nutrisi tidak tersiram. Di daerah dengan iklim yang panas akan sangat berbahaya di mana evaporasi dari air yang diisi dapat mengakibatkan menumpuknya garam di tanah. Kedua mekanisme ini dapat mengurangi kesuburan tanah dan hasil panen.



Gambar 5-37. Profil gundukan air tanah di bawah kolam tampungan

Sumur resapan juga sering dipakai bila akuifer yang ingin diisi terletak cukup dalam atau tertekan, atau di saat daerahnya kurang luas untuk dibangun kolam resapan. Pengaruh dari pengimbuhan air tanah buatan adalah adanya gundukan air tanah. Untuk daerah akuifer tidak tertekan, akan ada peningkatan muka air di tempat pengimbuhan. Sedangkan pada akuifer tertekan, ketebalan lapisan jenuh tidak mengalami kenaikan, sehingga terjadi tumpukan yang menggambarkan kenaikan dari tekanan piezometrik. Bentuk dari tumpukan tersebut tergantung dari metode pengimbuhan, seperti kolam atau sumur, geometri dari pengimbuhan, volume air, dan karakter dari akuifer. Dimensi dari tumpukan resapan pada kolam resapan dapat dikalkulasi, sedangkan bentuk kerucut yang dihasilkan dari sumur resapan dapat dianalisis menggunakan asumsi Dupuit (Todd, 1980). Perhitungan ini cenderung kurang teliti. Pada kasus kolam resapan, kapasitas resapan juga ditentukan oleh air hujan dan sumbatan dari lubang-lubang di akuifer. Hal ini juga terjadi pada sumur resapan. Gambar tumpukan dapat dilihat pada Gambar 5-37.

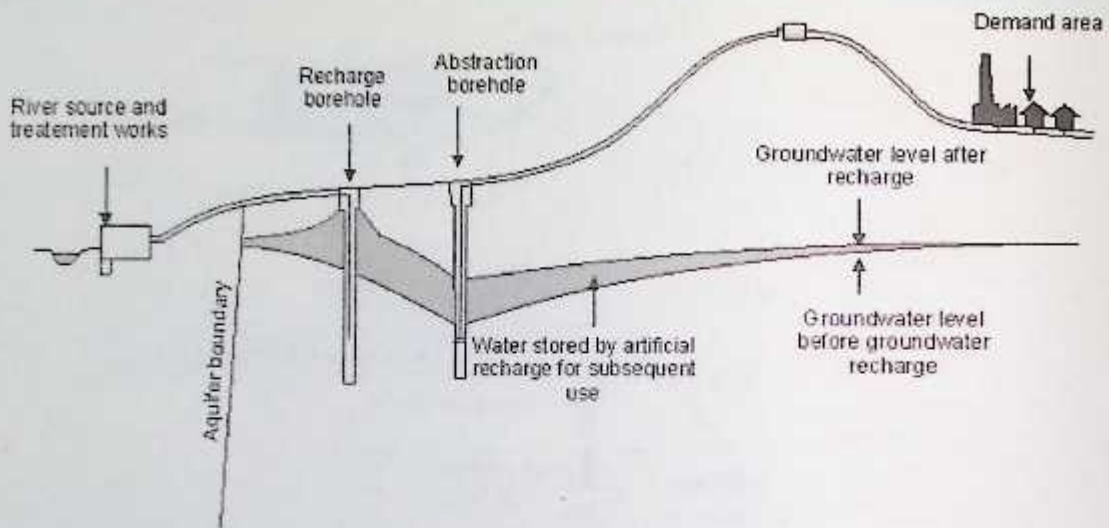
Pada dasarnya, perbedaan dari sumur resapan dan sumur luahan adalah aliran air yang berkebalikan. Pada akuifer tidak tertekan, lajur jenuh dan keterusan akan meningkatkan sumur resapan sehingga nilai imbuhan lebih tinggi dari nilai luahan. Pada kenyataannya, hal ini jarang terjadi, karena pada sumur luahan, air yang terpompa membawa lanau dan sedimen melayang keluar dari akuifer, sedangkan pada sumur resapan, sumbatan akan semakin parah (Buchan, 1963). Hal ini ditunjukkan dalam Gambar 5-38.



Gambar 5-38. Pengaruh pengimbuhan air tanah pada muka air tanah di akuifer (a) Kenaikan muka air tanah pada kolam resapan, (b) Kenaikan muka air tanah pada sumur resapan (Deutsch, 1963)

Akumulasi air yang membentuk gunung menunjukkan bahwa terjadi kenaikan elevasi dari air tanah atau tekanan piezometrik sehingga membentuk kembali garis aliran pada daerah imbuhan. Beberapa garis aliran berawal dari akumulasi air yang menunjukkan sumber air tersebut berasal, sedangkan garis aliran lain berasal dari beberapa jarak daerah imbuhan yang mengalami pembelokan di dekat akumulasi air.

Sebelum perencana melakukan pengimbuhan air tanah buatan, kelayakan dari akuifer untuk operasi jenis seperti ini harus terlebih dahulu diinvestigasi. Akuifer harus memiliki tempat penyimpanan yang cukup dan sebagian besar dari air yang diisikan dapat disimpan dan tidak hilang karena aliran antara, misal, kehilangan air tanah menuju sungai. Hal ini juga membutuhkan perhatian khusus karena interaksi kimia dapat menghasilkan masalah pada saat pelaksanaan. Pentingnya investigasi dini dapat diilustrasikan dengan Gambar 5-39 di bawah ini.



Gambar 5-39. Rencana diagram pengimbuhan air tanah buatan, pengambilan air dan sistem distribusi di Bunter Sandstone (ANon, 1981)

Gambar 5-39 di atas merupakan pengimbuhan air tanah buatan yang terjadi di Bunter Sandstone, Inggris. Untuk menguji kelayakan pengimbuhan air tanah buatan, rencana purwarupa senilai 2 juta poundsterling dimulai Mei 1981. Rencananya mempertimbangkan pengambilan air dari S. Severn kira-kira 90 persen per tahun, mengolahnnya, lalu memompanya ke dalam tanah melalui sumur resapan. Air akan diambil melalui sumur bor lain lalu didistribusikan ke konsumen. Proyek ini diharapkan dapat menghasilkan debit air sekitar $9.000 \text{ m}^3/\text{hari}$.

Keuntungan dari rencana ini adalah ekonomis, sedikit atau hampir tidak ada pengaruh sama sekali pada lingkungan sekitar, tidak memakan areal yang luas, dan biaya pengambilan dapat dikurangi karena kenaikan muka air tanah (ANon, 1981). Sehingga, pengimbuhan air tanah buatan memiliki kelebihan lebih banyak daripada metode lain untuk kondisi lahan yang baik, namun sebelumnya perlu adanya rencana awal yang akan menggabungkan 15 lubang penelitian dalam upaya untuk resapan dan sumur pengambilan. Sebagai tambahan, reaksi dari tiap akuifer untuk pengimbuhan sudah diinvestigasi menggunakan teknik modeling, dan rencana tersebut membutuhkan 5 tahun untuk pelaksanaan secara penuh. Pada kenyataannya dengan biaya pengeluaran 2 juta poundsterling pada tahun 1981, menunjukkan bahwa proyek pengimbuhan air tanah buatan tidaklah solusi yang cepat, murah dan mudah untuk semua permasalahan. Apabila proyek pengimbuhan air tanah dapat berjalan dengan sukses, maka hal itu harus diinvestigasi secara penuh, dimonitor dan dikelola secara efisien. Jika kurang diperhatikan pada pra studi kelayakan, maka hasilnya akan menjadikan waktu, usaha, dan uang yang terbuang percuma.

5.10 Pelepasan Air Tanah (*Groundwater Discharge*)

Pada kondisi alami, sebagian besar akuifer mengeluarkan air secara langsung dan tidak langsung ke sungai atau laut melalui rembesan dan mata air. Hal ini sangat berbeda dengan peluahan buatan di mana manusia mengintervensi daur alami pergerakan air tanah.

5.10.1 Pelepasan ke Sungai

Peluahan air tanah biasanya menjadi aliran dasar dari sungai, atau keluaran dari lapisan tidak tertekan atau akuifer artesian yang membatasi sungai, yang dapat melepaskan air dengan pelan sesuai perbedaan tinggi air.

Kontribusi air tanah untuk aliran sungai yang paling menentukan adalah pada saat musim kemarau, saat limpasan berkurang sebagai akibat dari kekurangan kadar air tanah. Selama musim panas, aliran sungai dengan proporsi tinggi didapat dari sumber air tanah. Pada kenyataannya, kontribusi air tanah menambah aliran sungai pada musim tersebut, sehingga menghindari sungai dari kekeringan. Sungai yang dapat mempertahankan aliran yang terus menerus sepanjang tahun disebut sebagai sungai ajek (*perennial*), sedangkan sungai yang kering secara periodik dikenal sebagai sungai musiman (*ephemeral* atau *intermiten*).

Di daerah Chalkland Inggris, jenis sungai musiman cukup banyak dijumpai. Aliran sungai musiman terjadi karena fluktuasi tahunan dari muka air tanah. Saat muka air tanah di atas muka air sungai pada musim dingin dan musim semi, sungai dipasok oleh mata air baik secara langsung maupun tidak langsung. Sebaliknya, saat muka air tanah di bawah muka air sungai, biasanya pada saat musim panas dan gugur, aliran sungai tak ada.

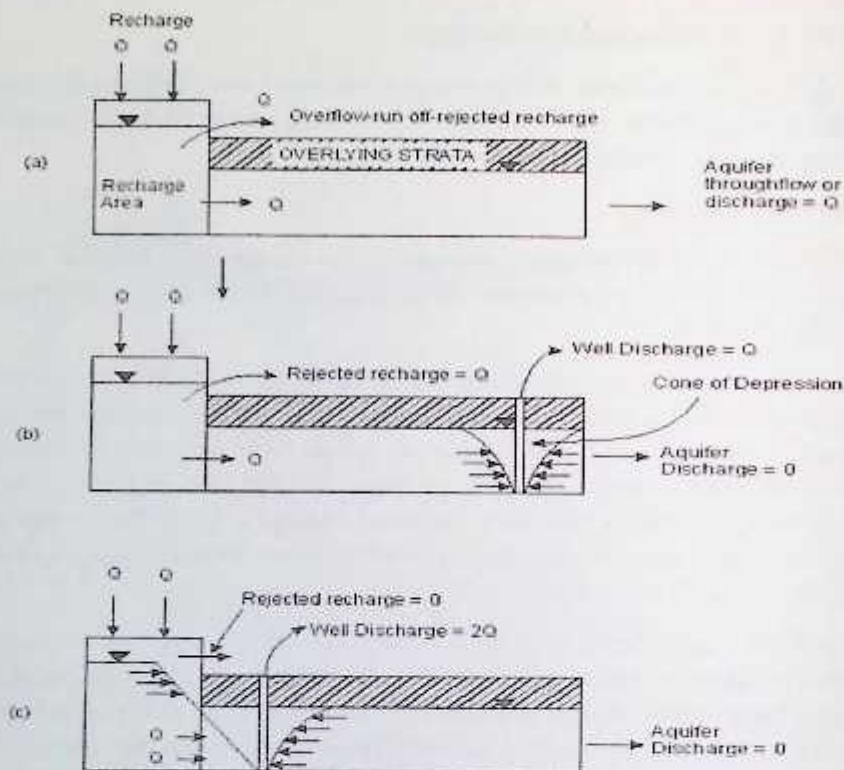
5.10.2 Pelepasan ke Mata Air

Mata air berkembang di daerah-daerah di mana terdapat aliran air tanah yang melepaskan airnya ke permukaan. Air jarang bergerak secara seragam di dalam massa batuan dan mata air, sehingga mata air terjadi karena aliran terpusat. Mata air yang terjadi karena perkolasi dari bukaan-bukaan kecil dapat dianggap sebagai rembesan mata air dan mata air dapat melepaskan sedikit air sehingga tidak jarang bahwa mata air tersebut hampir tidak terlihat. Secara nyata, banyak mata air dipakai sebagai sumber pasokan air.

Lokasi mata air sangat tergantung oleh banyak faktor. Iklim dan kondisi geologi merupakan faktor utama yang menentukan. Mata air musiman banyak dipengaruhi oleh iklim. Setelah hujan, muka air tanah akan naik dan bersinggungan dengan muka tanah dan menghasilkan mata air. Pada musim kemarau, muka air tanah menurun sehingga aliran air hilang.

Keadaan geologi yang sering dijumpai untuk pemunculan mata air adalah persinggungan antara dua formasi batuan dengan permeabilitas yang berbeda. Keadaan ini biasanya memberi kenaikan garis mata air dan mata air ini dianggap sebagai mata air peralihan (*stratum*).

Kuantifikasi dari luasan air tanah melalui mata air dan aliran dasar sungai adalah tahap utama dari beberapa metode untuk menentukan mata air pengimbuhan dan batas tampungan akuifer.



Gambar 5-40. Diagram mekanisme pengimbuhan-peluahan (Oakes, 1976; Reeves, 1978)

Pada Gambar 5-40(a) daerah akuifer imbuhan pada saat kondisi normal. Pengimbuhan potensial sebesar $2Q$, walaupun kapasitas infiltrasi terbatas sampai Q , sehingga sisa Q lainnya menjadi limpasan. Q yang tidak menjadi limpasan mengalir di dalam akuifer. Gambar 5-40(b) sama seperti Gambar 5-40(a), namun terdapat sumur luahan yang terletak di dekat akuifer sehingga besar aliran air tanah dalam akuifer mendekati 0 . Gambar 5-40(c) terdapat sumur pada akuifer sehingga kerucut penurunan berpotongan dengan imbuhan tertolak (*rejected recharge*). Akibatnya terbentuk kelandaian hidrolik lebih tinggi.

5.10.3 Kawasan Lindung dan Kawasan Budi Daya

Daerah imbuhan air tanah merupakan kawasan lindung air tanah, di daerah tersebut air tanah tidak untuk didayagunakan dan dalam tata ruang identik sebagai Kawasan Lindung yaitu wilayah yang ditetapkan dengan fungsi utama melindungi kelestarian lingkungan hidup yang mencakup sumber daya alam dan sumber daya buatan (PP No. 43 Tahun 2008 dan UU No. 26 Tahun 2007).

Dalam UU No. 7 Tahun 2004 disebutkan bahwa Kawasan Lindung Sumber Air adalah kawasan yang memberikan fungsi lindung pada sumber air misalnya daerah sempadan sumber air, daerah resapan air, dan daerah sekitar mata air.

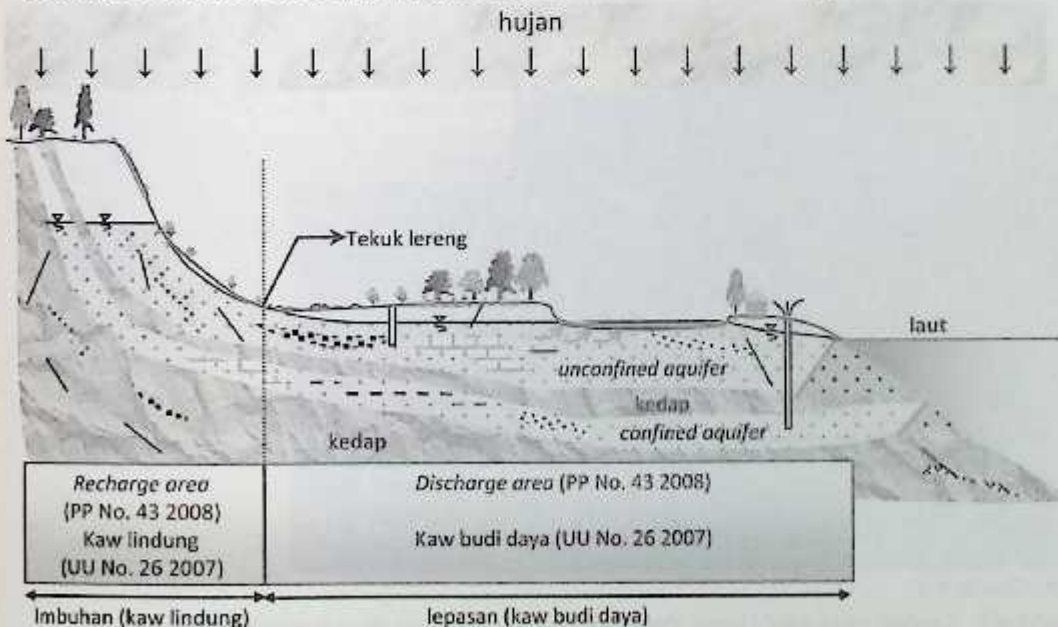
Daerah lepasan air tanah secara umum dapat didayagunakan. Daerah ini identik sebagai Kawasan Budi Daya (wilayah yang ditetapkan dengan fungsi utama budi daya atas dasar kondisi dan potensi Sumber Daya Alam, Sumber Daya Manusia dan Sumber Daya Buatan (PP No. 43 Tahun 2008 dan UU No. 26 Tahun 2007).

Salah satu aspek pengelolaan sumber daya air adalah pendayagunaan sumber daya air di mana salah satu bagiannya adalah penataan sumber daya air. Tujuan penataan ini adalah penetapan zona pemanfaatan sumber air dan peruntukkan air pada sumber air. Zona pemanfaatan sumber air adalah ruang pada sumber air (waduk, danau, rawa, atau sungai) yang dialokasikan baik sebagai fungsi lindung maupun fungsi budi daya (UU No. 7 Tahun 2004).

Gambaran daerah imbuhan (resapan) dan daerah lepasan (luahan) ditunjukkan dalam Gambar 5-41.



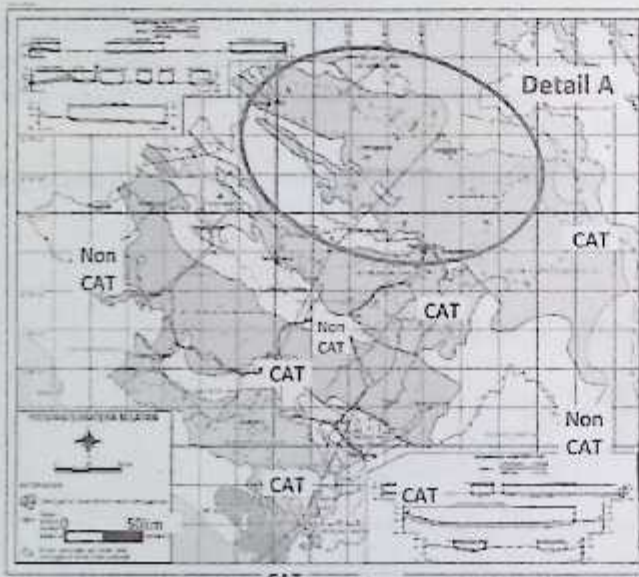
a. Skema daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah serta batasnya



b. Daerah recharge/imbuhan (kaw. lindung) dan daerah discharge/lepasan (kaw. budi daya) air tanah

Gambar 5-41. Daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah serta batasnya (imajiner)

KepPres tentang penetapan CAT Indonesia sudah ada yaitu KepPres No. 26 Tahun 2011 Tentang CAT. Dalam lampiran keputusan ini disampaikan peta CAT Indonesia yang berjumlah 421. Dalam Peta ini digambarkan daerah CAT dan Non-CAT untuk tiap-tiap provinsi maupun untuk tiap-tiap pulau. Di dalam peta ini juga ada pembagian daerah imbuhan dan daerah lepasan. Gambar 5-42 menunjukkan uraian tersebut.



a. Contoh Peta CAT (Pusat Lingkungan Geologi, 2009)



b.. Detail A dalam Gambar a

Gambar 5-42. Contoh Peta CAT Lintas Provinsi, daerah lepasan dan daerah imbuhan

5.11 Non-CAT

5.11.1 Umum

Menurut Pusat Lingkungan Geologi (2009), Wilayah Indonesia dibagi menjadi CAT dan Bukan CAT atau CAT tidak potensial. Definisi CAT disebutkan dalam UU No. 7 Tahun 2004 dan PP No. 43 Tahun 2008.

Mengacu pada definisi CAT maka Daerah Bukan CAT (Non-CAT) adalah wilayah yang tidak dibatasi oleh batas hidrogeologis dan tidak atau bukan tempat semua kejadian hidrogeologis seperti proses pengimbuhan, pengaliran, dan pelepasan air tanah berlangsung serta tidak memiliki satu kesatuan sistem akuifer. Dengan kata lain Non-CAT berarti juga wilayah yang:

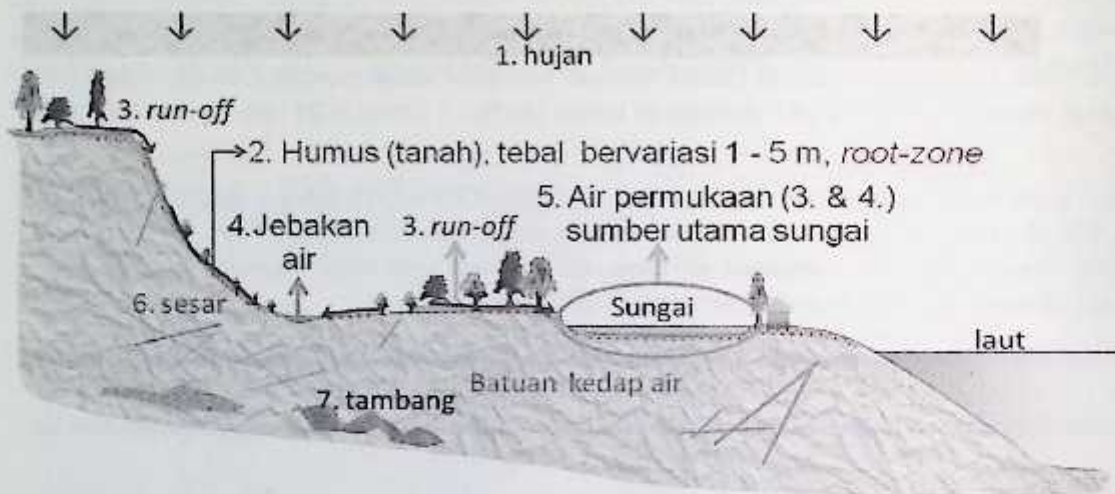
- Tidak mempunyai batas hidrogeologis yang dikontrol oleh kondisi geologis dan/atau kondisi hidrologik air tanah.
- Tidak mempunyai daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah dalam satu sistem pembentukan air tanah.
- Tidak memiliki satu kesatuan sistem akuifer.

Penjelasan Non-CAT tersebut ditunjukkan dalam Gambar 5-43.



Gambar 5-43. Sketsa sederhana potongan Non-CAT (Kodoatie, 2009d)

Proses aliran air di daerah Non-CAT ditunjukkan dalam Gambar 5-44.



Keterangan gambar, proses aliran air:

- | | |
|---|---|
| <p>1. Hujan turun</p> <p>2. Humus (tanah) tebal 1-5 m (air berinfiltrasi sampai humus saja)</p> <p>3. Air hujan: semua jadi <i>run-off</i> di permukaan tanah dan <i>interflow</i> dalam <i>soil water</i> tak ada yang meresap jadi <i>groundwater</i> (tak ada perkolasi)</p> | <p>4. Atau air hujan terjebak: Jebakan air permukaan</p> <p>5. Air permukaan sebagai sumber utama sungai</p> <p>6. Banyak sesar/patahan (<i>fault</i>) → daerah longsor</p> <p>7. Daerah Non-CAT umumnya banyak tambang</p> |
|---|---|

Gambar 5-44. Proses aliran air di daerah Non-CAT (Kodoatie, 2009e)

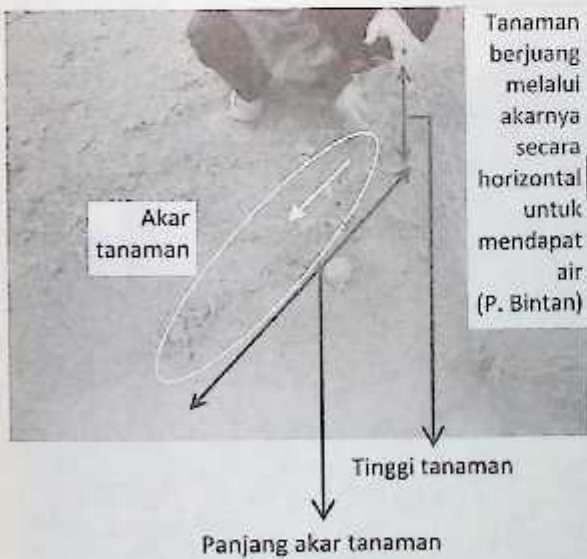
Ilustrasi/dokumentasi daerah Non-CAT ditunjukkan dalam Gambar 5-45.



a. Daerah-Daerah Non-CAT di Wilayah Sungai Berau Kelay (Kodoatie, 2009g)



b. Daerah Non-CAT di Fak-Fak, Papua dan Pulau Ambon



c. Daerah Non-CAT di Pulau Bintan (Prov. KepRi)



d. Daerah Non-CAT di Kota Jambi dan Pulau Kisar (Provinsi Maluku)

Gambar 5-45. Dokumentasi Daerah-Daerah Non-CAT (Kodoatie 2009a & f)

Di Daerah Non-CAT ada perbedaan *root-zone* yang mempengaruhi ketinggian tanaman seperti ditunjukkan dalam Gambar 5-46.



Keterangan: *root zone* (daerah akar tanaman) A lebih dalam dibandingkan B, sehingga tanaman bisa lebih lebat dan lebih tinggi dibandingkan di B

Gambar 5-46. Perbedaan kedalaman root zone dan jenis tanaman

5.11.2 Karakteristik dan Keberadaan Air Daerah Non-CAT

Secara geologis, daerah Non-CAT umumnya berupa batuan dengan lapisan tanah (humus) tipis di atasnya. Bila hutan atau vegetasi menutupi daerah Non-CAT maka hutan atau vegetasi itu akan mempertahankan lapisan tanah humus itu secara alami. Dari sejarahnya, hutan-hutan di bagian tengah Kalimantan telah tumbuh dan akan terus tumbuh secara alami bila tak ada gangguan dan hutan menjaga/mempertahankan *top soil* di bawahnya. Karena lapisan tanah (*top soil*) yang mampu menyerap air cukup tipis (dalam angka satuan meter) maka air yang ditampung lebih banyak dan menyebabkan kondisi lebih lembab dibandingkan daerah CAT. Air di dalam lapisan tanah ini menjadi sumber kehidupan tanaman dengan volume yang lebih banyak dibandingkan daerah CAT. Pada kondisi alami ini maka umumnya hutan atau vegetasi di daerah Non-CAT lebih subur dibandingkan dengan daerah CAT. Walaupun daerah CAT mampu meresapkan air lebih banyak namun kedalaman bisa sampai ratusan meter di bawah muka tanah dan air akan mengalir ke bagian yang lebih rendah. Itulah sebabnya pada kondisi alami daerah Non-CAT selama lapisan tanah (humusnya) masih ada akan relatif lebih subur dibandingkan dengan daerah CAT. Gambar 5-47 a s/d d menunjukkan contoh kesuburan vegetasi di daerah Non-CAT yang belum terganggu dan Gambar 5-47 e dan f menunjukkan Non-CAT yang sudah terganggu.

Namun apabila tanah humus hilang karena digali untuk suatu kepentingan (misal penambangan) maka tanaman tidak akan tumbuh lagi karena di bawah humus hanya batuan yang kedap air. Gambar 5-48 a dan b menunjukkan contoh daerah Non-CAT yang sudah kehilangan tanah (humus) sehingga tanaman tidak bisa tumbuh lagi serta contoh Padang Gurun Sahara yang telah dibuktikan dulu berupa hutan (Gambar 5-48c). Perlu diketahui bahwa Papua, Kaltim dan SumSel merupakan penghasil tambang yang terbesar (LPEM-FEUI, 1999 dalam Simanjutak, 2000 yang diolah), bila tak terkendali maka potensi menjadi gurun sangat besar. Hal ini sudah tampak di Kaltim seperti ditunjukkan dalam Gambar 5-48b dan beberapa tempat di Sumatra seperti misal di Riau.

Di kedua lokasi ini *top soil* belum terganggu tanaman masih tumbuh dengan subur bahkan bisa lebih subur dibandingkan di daerah CAT



a. Daerah Non CAT di Pulau Biak Papua
(Kodoatie, 2009g)



b. Daerah Non CAT Pulau Galang
(Kodoatie, 2009a)



c. Sungai Warsamson, Kab. Sorong, Papua Barat
(Kodoatie, 2005c)



d. WS Berau-Kelay 2°5.43' LU & 117° 23.28' BT
Kalimantan Timur (Kodoatie, 2009g)

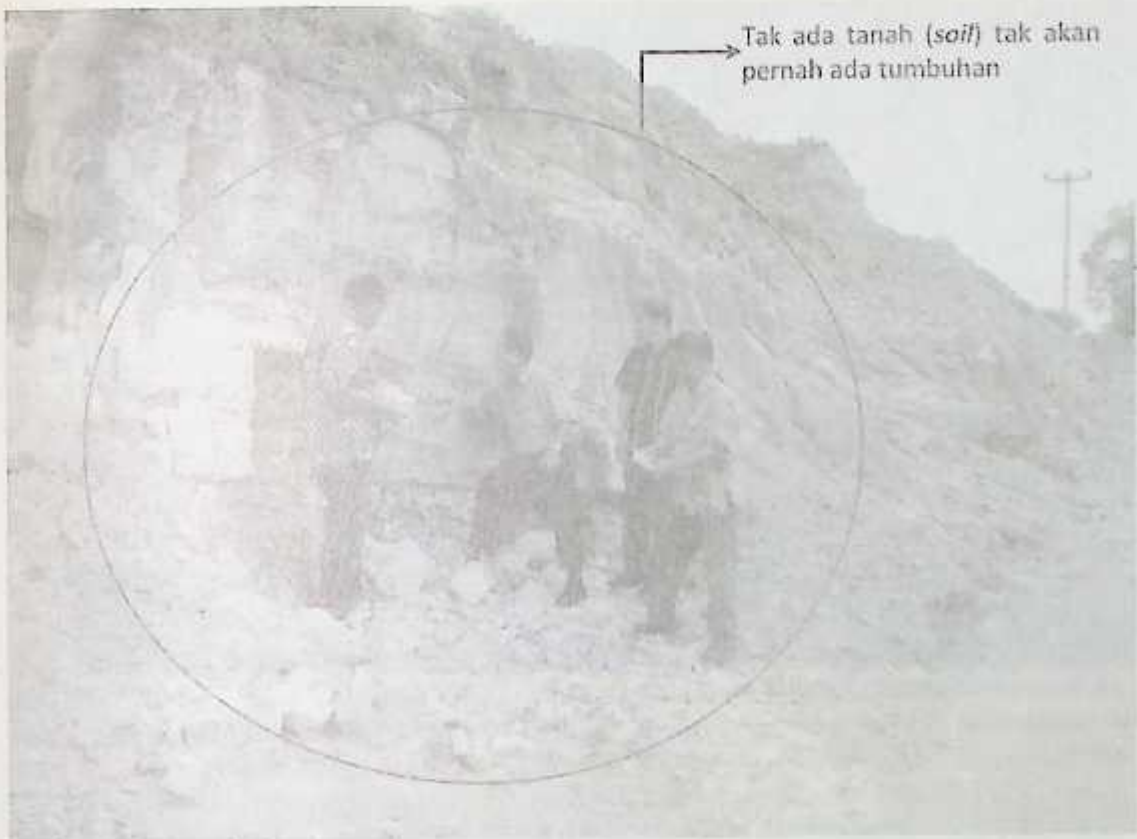


Contoh daerah Non-CAT yang top soilnya sigall (telah hilang) dan ada yang dibangun pemukiman, sudah lebih dari 1 tahun tanah tetap tandus. Padahal dari batuan menjadi top soil butuh ribuan tahun (lihat Sub-Bab 1.7)

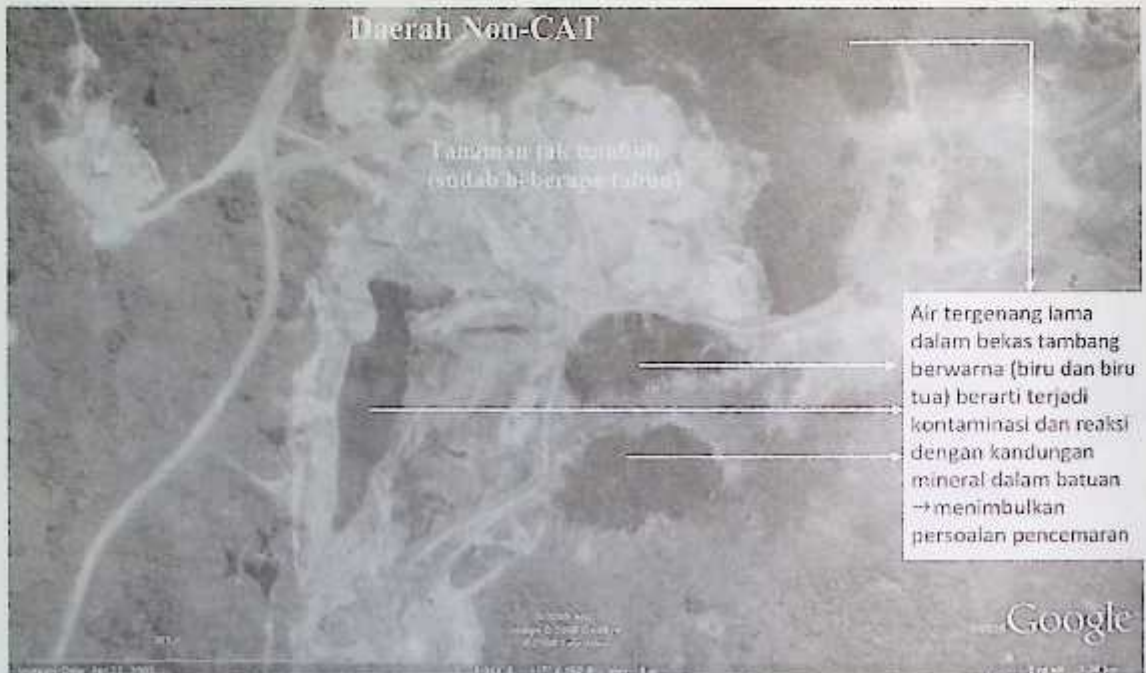
e. Daerah Kab. Sarolangun Jambi
(Kodoatie, 2009c)

f. Daerah di Barat Kota Jambi
(Kodoatie, 2009c)

Gambar 5-47. Contoh kesuburan daerah Non-CAT yang belum dan sudah terganggu



a. Lokasi Non-CAT di Batam



b. Lokasi bekas penambangan di KalTim di daerah Non-CAT dengan koordinat $0^{\circ}29.044''$ LS dan $117^{\circ}4.150'$; selama tak ada tanah humus, tanaman tak akan pernah tumbuh (*download Google Earth, Agustus 2009*)

Gambaran Hutan Sahara dahulu kala



Padang Gurun Sahara sekarang (Marijn, 2009)



c. Gambaran Hutan Sahara dahulu kala dan Padang Gurun Sahara sekarang

Catatan: kondisi seperti Gambar c di beberapa tempat sudah terjadi seperti Jambi, Riau di Pulau Sumatra

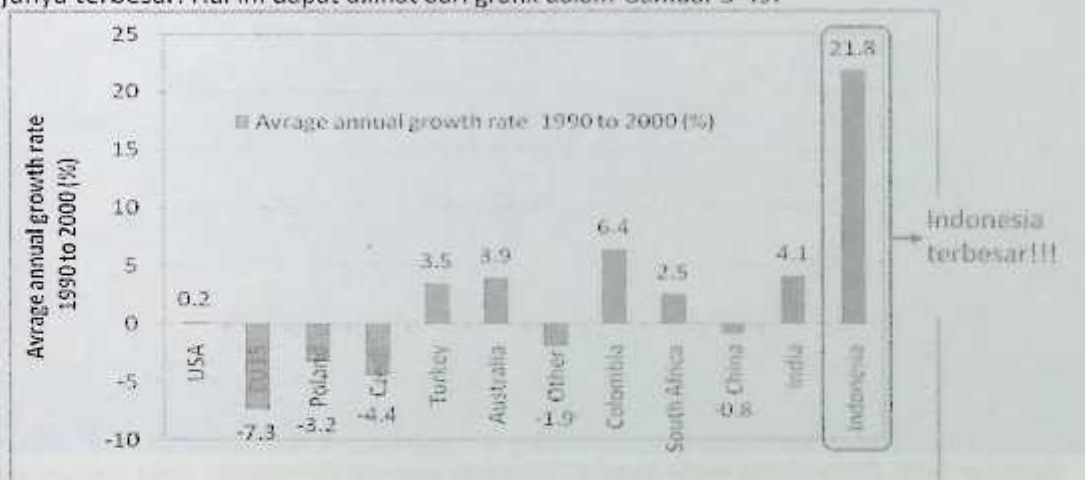
Gambar 5-48. Perubahan kondisi daerah Non-CAT yang sudah terkupas tanah dan humusnya

Berdasarkan uraian di atas maka terlihat vegetasi tumbuh karena ada *top soil* (pucuk tanah). Pada kondisi belum terganggu *top soil* lebih lembab dibandingkan *top soil* di daerah CAT. Bilamana humus cukup memadai bisa terjadi di daerah Non-CAT tanamannya lebih subur, lebih tinggi dan lebih lebat. Maka adalah sangat beralasan bila Kalimantan dengan daerah Non-CAT sebesar 66 % dari luas daratannya disebutkan sebagai salah-satu paru-paru dunia. Hal ini disebabkan oleh kondisi hutan yang masih subur dan lebat, belum terganggu oleh penambangan yang membuang *top soil*nya.

Pada waktu penambangan umumnya dilakukan penggalian untuk mencapai kedalaman daerah tambang. Pada waktu penggalian di daerah tambang *top soil* tergali dan umumnya (bahkan hampir selalu) *top soil* terbuang. Sehingga bila penambangan berakhir maka yang tinggal hanya bekas galian dan tak ada tanaman. Hal ini akan terus terjadi sampai *soil* yang baru terbentuk akibat proses penghancuran batuan induk menjadi *soil*. Proses ini membutuhkan waktu ribuan tahun. Oleh karena itu salah satu syarat penting adalah setelah penambangan selesai maka penambang diwajibkan mengembalikan *top soil* yang subur (humus) yang sudah ada sebelumnya.

Jangan sampai kondisi padang gurun terjadi seperti di Sahara, di mana telah dibuktikan bahwa dahulu kala sekitar 5500 tahun yang lalu kondisi Sahara berupa hutan yang cukup subur dibandingkan dengan kondisi Padang Gurun Sahara saat ini (Gambar 5-48c). Gurun yang kering berarti juga sedikit kelembaban sehingga penguapan juga sedikit dan akibatnya hujan juga sedikit. Hal ini akan menyebabkan daerah sekitar Sahara berpotensi juga menjadi gurun (Derbyshire, 2008; Pearce, 2003).

Perlu diketahui bahwa data Tahun 2002 laju pertumbuhan penambangan batubara menunjukkan *trend* yang berbeda. Umumnya negara maju berupaya untuk mengurangi penambangan dalam negerinya, bahkan ada yang mencapai tingkat pertumbuhan yang negatif. Sedangkan di negara berkembang masih mempertahankan laju pertumbuhan penambangannya, bahkan untuk Indonesia lajunya terbesar. Hal ini dapat dilihat dari grafik dalam Gambar 5-49.



Gambar 5-49. Laju pertumbuhan rata-rata tahunan penambangan batubara dari Tahun 1990 sampai Tahun 2000 (World Coal Institute, 2002)

Dampak dari penambangan Indonesia telah dapat di lihat di beberapa pulau seperti Kalimantan, Sumatra dan Papua. Di Kalimantan Timur, kerusakan lingkungan sudah besar, daerah-daerah tambang sudah menjadi tandus/gurun yang tak bisa ditumbuhi tanaman.

Terhadap kualitas air, maka ada empat jenis dampak penambangan, yaitu (BC Wild and Environmental Mining Council of BC, 1997):

- Drainase tambang asam (*acid*)
- Kebocoran dan kontaminasi logam berat
- Polusi kimia pemrosesan (misal tambang emas ada produk tambahan sianida → zat racun yang mematikan, air raksa untuk penyaringan emas), asam belerang
- Terjadi erosi dan sedimentasi ⇒ Hutan menjadi gundul ⇒ Tandus menyebabkan peningkatan banjir

Sampai saat ini penambangan batubara masih terus dilakukan seperti di Sumatra dan Kalimantan. Dampak tak adanya tumbuhan sudah ditunjukkan dalam Gambar 5-48b. Tanpa peraturan dan pengawasan yang ketat maka dampak kerusakan lingkungan akibat penambangan ini akan sangat besar. Oleh karena itu perlu dibuatkan rambu-rambu dalam penambangan seperti ditunjukkan Gambar 5-56.

Tampaknya alam juga menjadi galau terhadap kondisi kerusakan akibat penambangan. Hal ini ditunjukkan oleh penampang muka bumi di Kalimantan yang menggambarkan dua wajah yang berbeda seperti ditunjukkan dalam Gambar 5-50.

Perhatikan dua wajah yang berbeda dalam kedua buletan tersebut.



Gambar 5-50. Penampang muka bumi di salah satu wilayah Kalimantan yang menunjukkan dua wajah yang berbeda

Di bagian bawah dari lapisan humusnya Non-CAT umumnya berupa batuan (Lihat Gambar 5-45). Dalam hal ini maka secara material Non-CAT terutama di bagian dekat muka tanah lebih kaku (*rigid*) dibandingkan daerah CAT. Hal ini disebabkan oleh lokasi CAT yang umumnya terletak di cekungan sedimen/*sedimentary basin*, sehingga CAT relatif lebih elastis. Konsekuensinya, Non-CAT akan rentan terhadap gerakan dan deformasi permukaan misal akibat gempa (baik tektonik maupun vulkanik).

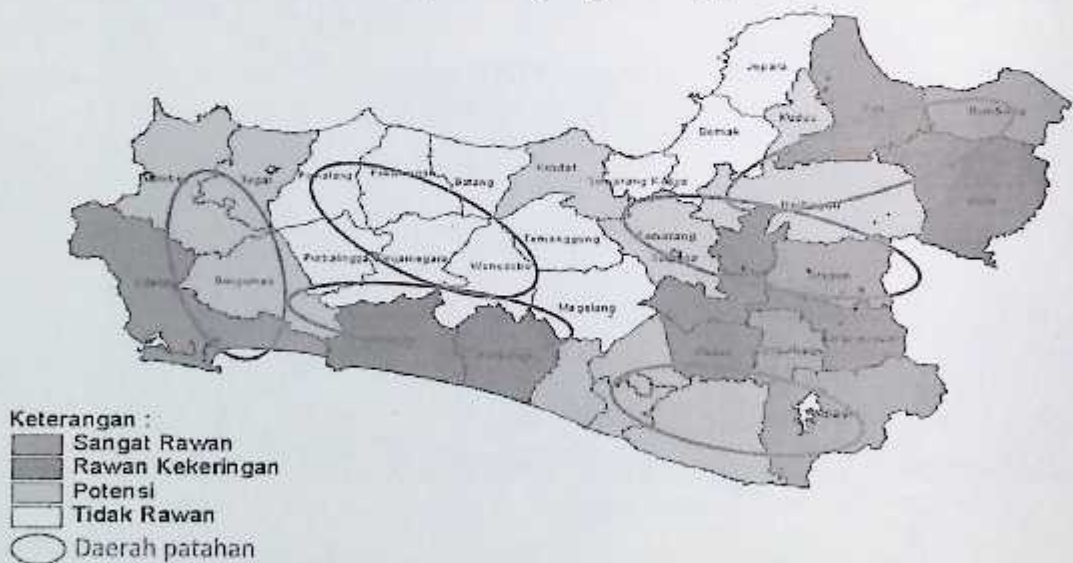
Daerah Non-CAT juga umumnya daerah dengan rentan gerakan tanah tinggi (mudah longsor). Juga daerah Non-CAT bisa merupakan daerah yang rawan kekeringan baik dari segi pertanian maupun kebutuhan air bersih. Pada kondisi daerah Non-CAT masih lebat dengan tumbuhan maka sumber utama air adalah dari curah hujan yang hanya menjadi air permukaan karena infiltrasi air ke dalam tanah hanya sebatas ketebalan humusnya. Bilamana humus hilang maka air hujan menjadi air permukaan baik yang teretensi karena bentuk topografinya maupun yang menjadi *run-off*. Gambar 5-51 dan Gambar 5-52 menunjukkan uraian tersebut.



a. Daerah CAT (berwarna) dan Non-CAT Jawa Tengah



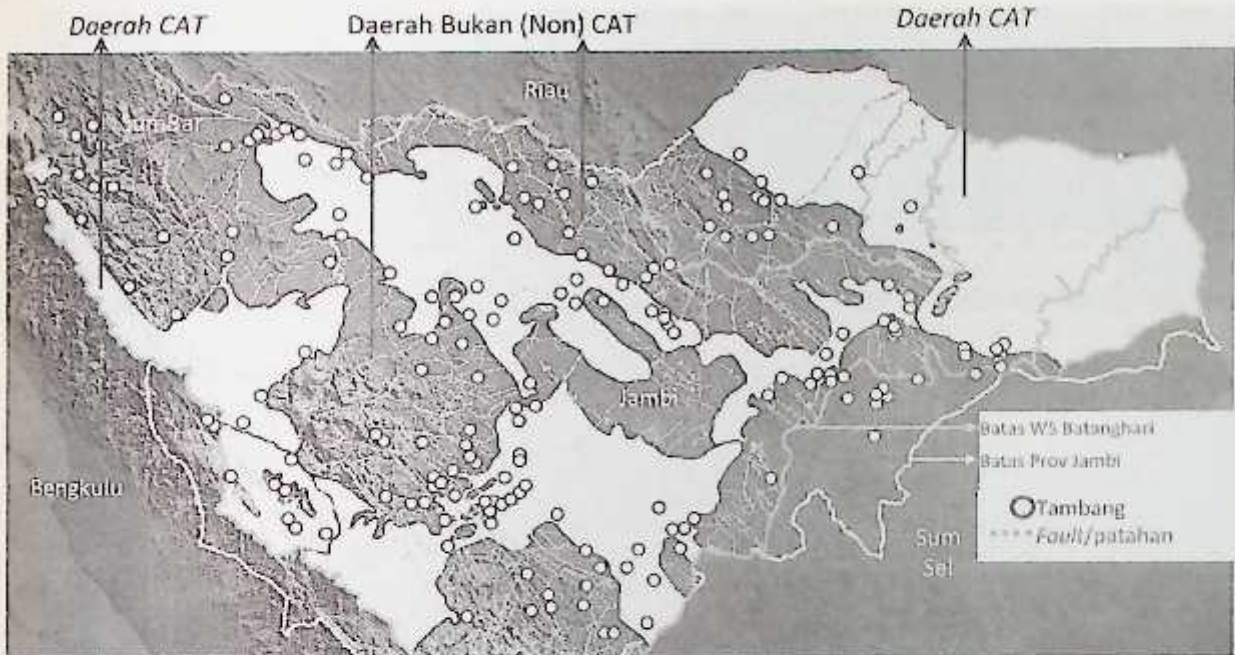
b. Daerah patahan di CAT dan Non-CAT (Pusat Lingkungan Geologi, 2007)



c. Daerah rawan kekeringan pertanian Jawa Tengah (Dinas Pertanian & Tanaman Pangan, 2002 dan Pemerintah Prov Jawa Tengah, 2005)

Gambar 5-51. Daerah CAT dan Non-CAT, Daerah Patahan dan Daerah Rawan Kekeringan Prov Jateng dan rupa bumi Non-CAT

Daerah Non-CAT juga merupakan daerah patahan yang umumnya banyak tambang. Gambar 5-52 menunjukkan salah satu contoh daerah Non-CAT yang banyak tambang.



Daerah Non-CAT umumnya:

- Banyak patahan → daerah longsor dan daerah tidak stabil, bila gempa kerusakannya paling parah
- Banyak tambang → Tanah digali dan dikeruk → tanah/humus hilang → tanaman tak dapat tumbuh menjadi gurun seperti Gurun Sahara. Contoh: Kab. Sarolangun → ada tambang emas & Arsen. Merkuri (Hg) dipakai untuk pencucian emas → Sungai Batanghari tercemar, ikan mengandung Merkuri dan Arsen (racun mematikan)

Gambar 5-52. Daerah Non-CAT umumnya mengandung tambang dan patahan

Daerah Non-CAT juga merupakan daerah dimana sistem sungai dan DASnya tak stabil, karena merupakan daerah bukan aluvial atau daerah *Non-regime channels* dan juga karena adanya deformasi (perubahan bentuk) muka bumi (Schumm, 2005; Schumm et al., 2000). Untuk CAT yang relatif kecil yang ada patahannya dan dikelilingi Non-CAT, sungai juga tak stabil, ada perubahan morfologinya. Di samping itu daerah CAT yang dangkal (kedalaman tidak besar) juga akan mengalami perubahan morfologi sistem fluvialnya. CAT yang dangkal ini terutama pada daerah lepasannya akan mengalami kondisi tanah yang jenuh air (*saturated*). Kejenuhan tanah dangkal ini menyebabkan perubahan morfologi yang cepat.

Gambar 5-53 a s/d i menunjukkan perubahan morfologi sungai yang sangat cepat.



a. Perubahan penampang sungai di Padang Pariaman dari 12 April 2005 sampai 27 Juni 2006 (satu tahun 3 bulan)



b. Sungai di Palu Sulawesi 5 Maret 2005 sampai 21 April 2005 ($\pm 1\frac{1}{2}$ bulan)

14 April 2004



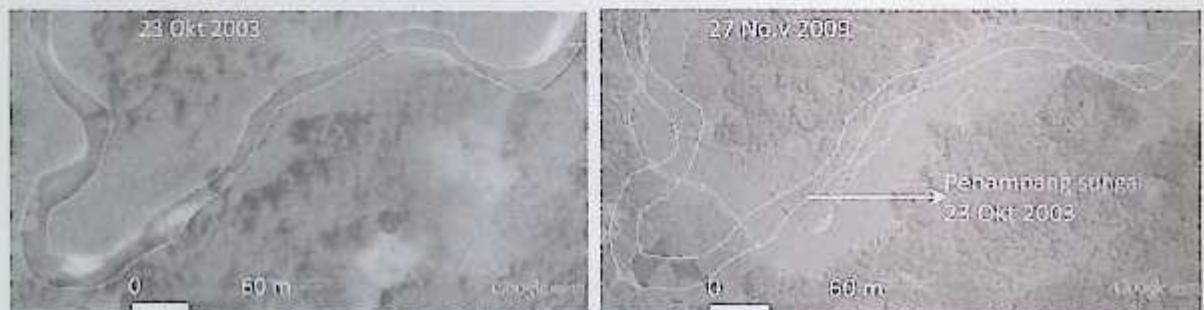
c. Sungai Grindulu Pacitan 14 April 2004 sampai 18 Agustus 2011 224 436



d. Perubahan alur sungai di bagian Timur kepala burung Papua ($1^{\circ} 30' 28.82''$ LS dan $134^{\circ} 09' 32.85''$ BT) dari 3 Juli 2005 \rightarrow 12 Jan 2006 sampai 6 Juni 2010



e. Sungai di Bali 29 Mei 2003 sampai 6 Agustus 2005 (\pm 2 tahun 2 bulan)



f. Sungai di Moriatas Sulawesi Tengah

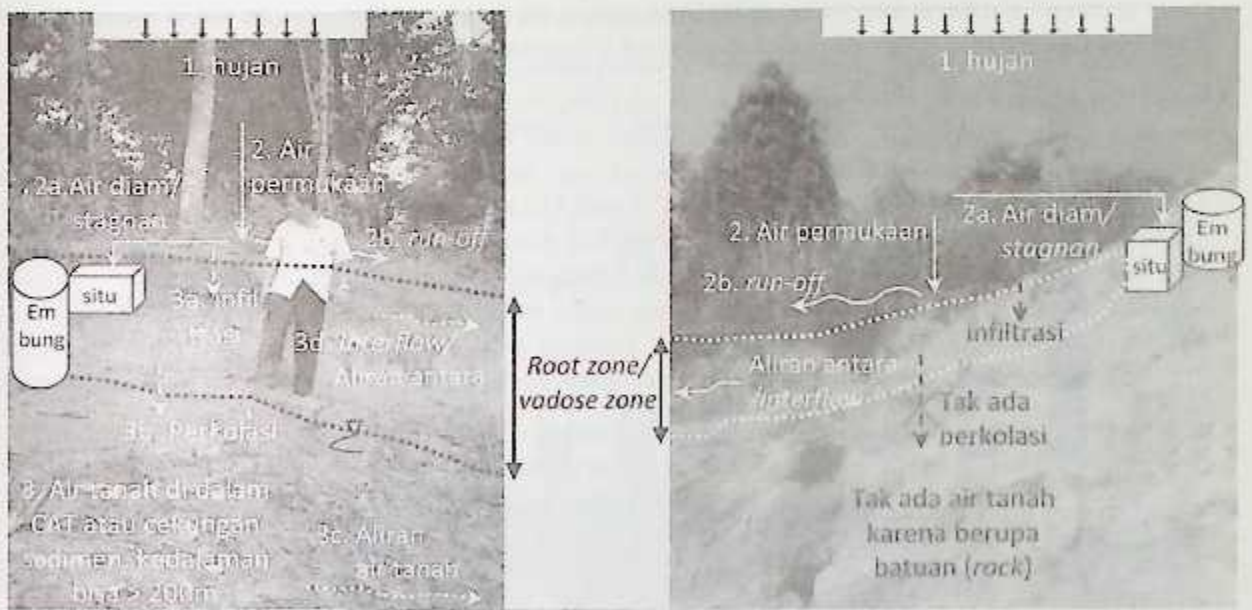
Catatan: di seluruh Indonesia masih banyak kondisi sungai yang berubah-ubah dalam waktu yang pendek (beberapa tahun, bulanan bahkan harian). Hal ini juga menunjukkan banyaknya variabel sungai dengan kompleksitas yang besar. Perubahan morfologi yang cukup cepat ini perlu dikaji detail secara multi-dimensi.

Gambar 5-53. Perubahan beberapa sungai di Indonesia (Google Earth, April 2012)

5.12 Keberadaan CAT, Non-CAT dan Bencana Yang Sudah Terjadi

Di Indonesia Luas CAT adalah: 907,615 km² (atau 47,2% luas daratan) dan Luas Non-CAT: 1,014,985 km² (atau 52,8% luas daratan).

Di Daerah CAT, air hujan menjadi air permukaan, aliran antara (*interflow*) dan perkolasi ke air tanah (*groundwater*); di daerah Non-CAT air hujan hanya menjadi air permukaan dan aliran antara namun tidak ada perkolasi seperti ditunjukkan Gambar 5-54.



a. Daerah CAT (ada perkolasi)

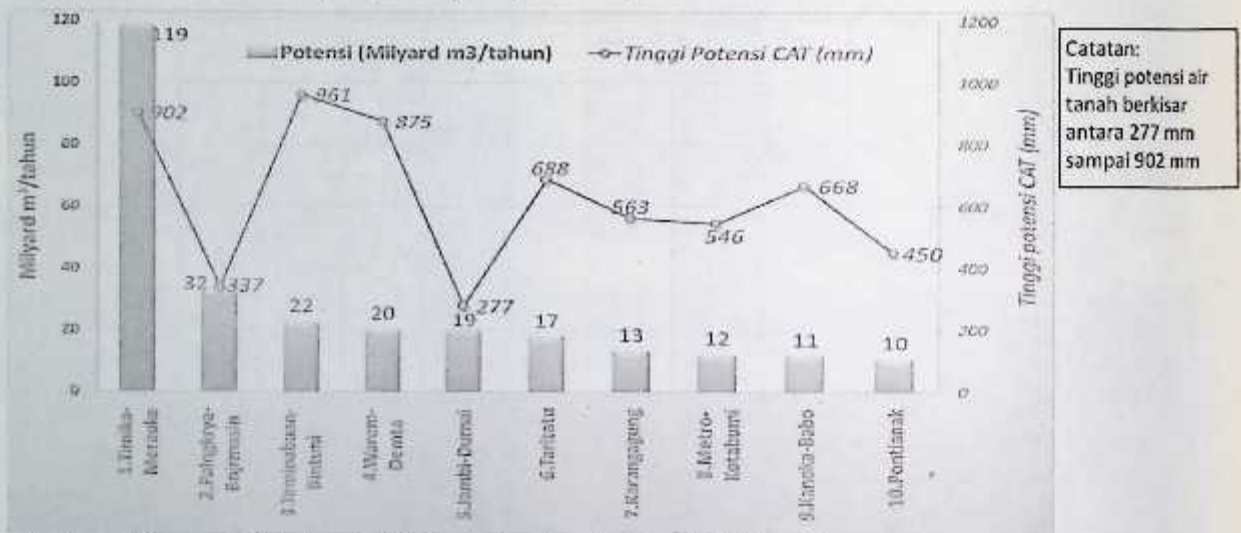
b. Daerah Non-CAT (tak ada perkolasi)



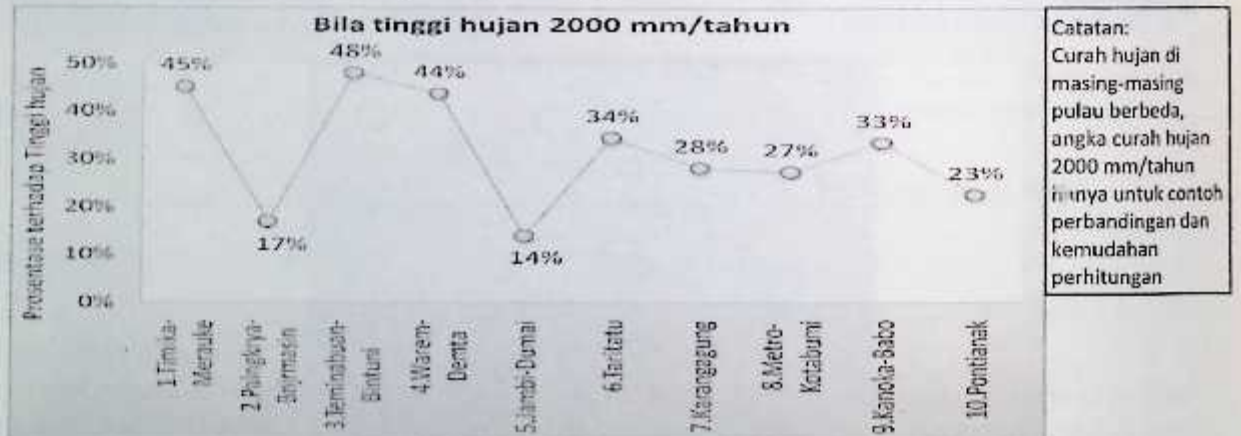
Vadose zone/ root zone, kedalaman bisa sampai 5 m baik untuk CAT dan Non CAT

c. Vadose zone/root zone daerah CAT dan Non CAT
Gambar 5-54. Perbedaan daerah CAT dan Non CAT

CAT merupakan salah satu pengendali aliran permukaan, terutama pada musim kemarau. Air Tanah mem"feeding" air permukaan bila mengalir ke sungai sebagai *base flow*. Hal ini dapat dilihat potensi tingginya CAT dalam menampung air hujan seperti ditunjukkan dalam Gambar 5-55.



a. Potensi 10 besar CAT (milyard m³/tahun) dan tinggi potensi CAT (mm)



b. % Potensi 10 besar CAT terhadap curah hujan per tahun (asumsi Curah hujan 2000 mm/tahun)

Gambar 5-55. Potensi CAT dan potensi tinggi CAT

Sebagai contoh dapat dilihat dalam Gambar 5-15, di mana saat musim kemarau aliran Sungai Batanghari berupa *interflow* dan *groundwater flow* (aliran air tanah) yang muncul sebagai *base flow* dengan kuantitasnya bisa mencapai 30 % dari curah hujan per tahun.

Air hujan akan tersimpan:

- Sebagai air permukaan tersimpan di sistem sungai dan DAS, di waduk, danau, daerah retensi, dll.

- Sebagai air tanah (*groundwater*) tersimpan di dalam akuifer bebas dan tertekan dalam satu CAT.
- Sebagai *soil water* di daerah *vadoze zone* yang menyebabkan aliran antara (*interflow*).

Daerah CAT umumnya tidak banyak patahan/sesar sehingga bahaya longsor relatif lebih kecil daripada di daerah Non-CAT. Apabila ada patahan maka perlu ekstra hati-hati dalam pemanfaatannya karena sifat patahannya aktif. Daerah CAT dapat dibagi dua yaitu daerah imbuhan (atau kawasan lindung sumber air atau daerah konservasi) dan daerah lepasan atau kawasan budi daya. Untuk Penentuan RTRW, perlu penggabungan peta CAT daerah imbuhan sebagai kawasan lindung dan daerah lepasan sebagai kawasan budi daya. Di daerah CAT dengan kedalaman dangkal maka gerakan tanah mudah terjadi yang mengakibatkan perubahan sungai atau terjadinya longsor. Hal ini disebabkan oleh tanah yang selalu jenuh air. Contoh perubahan sungai adalah S. palu di Kota Palu (lihat Gambar 5-53b). Contoh longsor yang pernah terjadi adalah bencana tanah longsor di Desa Pulau Aro Kecamatan Sekernan Kabupaten Muaro Jambi yang dilalui S. Batanghari yang terjadi di Bulan Agustus lalu.

Daerah Non-CAT umumnya banyak tambang. Sehingga untuk penambangan berwawasan lingkungan harus mengikuti aturan seperti Gambar 5-56.



Gambar 5-56. Penambangan berwawasan lingkungan

Di daerah Non-CAT, semua air hujan akan hanya menjadi air permukaan dan aliran antara. Di DAS, kedalaman tanah yang mampu menyimpan air hanya di daerah *vadose* (daerah kedalaman humus tanah).

Untuk aspek-aspek pengelolaan Sumber Daya Air, daerah Non-CAT perlu diatur tata guna lahannya. Aspek-aspek tersebut adalah konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air dan pengendalian daya rusak air.

Untuk aspek konservasi sumber daya air maka daerah Non-CAT direkomendasikan untuk menjadi kawasan lindung atau harus dibuat tampungan air sebanyak-banyaknya, untuk mengurangi laju *run-off* dan banjir di musim penghujan, sekaligus cadangan air di musim kemarau.

Untuk aspek pendayagunaan air perlu dipahami adanya keterbatasan simpanan air yang hanya berupa air permukaan dan *soil water*.

Untuk aspek pengendalian daya rusak air, karena adanya potensi tambang dan mineral di daerah Non-CAT, maka penambangan yang tidak berwawasan lingkungan menyebabkan perubahan lahan yang umumnya memberi dampak negatif terhadap lingkungan terutama peningkatan banjir dan longsor.

Di samping itu karena lapisan tanah di atas batuan cukup dangkal terjadi pergerakan tanah yang mengakibatkan terjadi banjir bandang (banjir dan longsor) serta pergeseran bangunan di atasnya. Contoh nyata bencana dan persoalan yang telah terjadi, diantaranya:

- Bencana banjir bandang Leuser di Sumatra dengan korban ratusan orang.
- Bencana Wasior di Papua dengan korban lebih dari 150 orang.
- Longsor di Banjarnegara Jawa Tengah dengan korban lebih dari 300 orang.
- Persoalan Pembangunan Jalan Tol Semarang Solo di Susukan Ungaran dan Lemah Ireng Bawen yang masih terus bermasalah.
- Runtuhnya beberapa bangunan di Proyek Pusat Pembinaan dan Pengembangan Prestasi Olahraga Nasional Hambalang di Bogor dan bencana longsor lainnya.

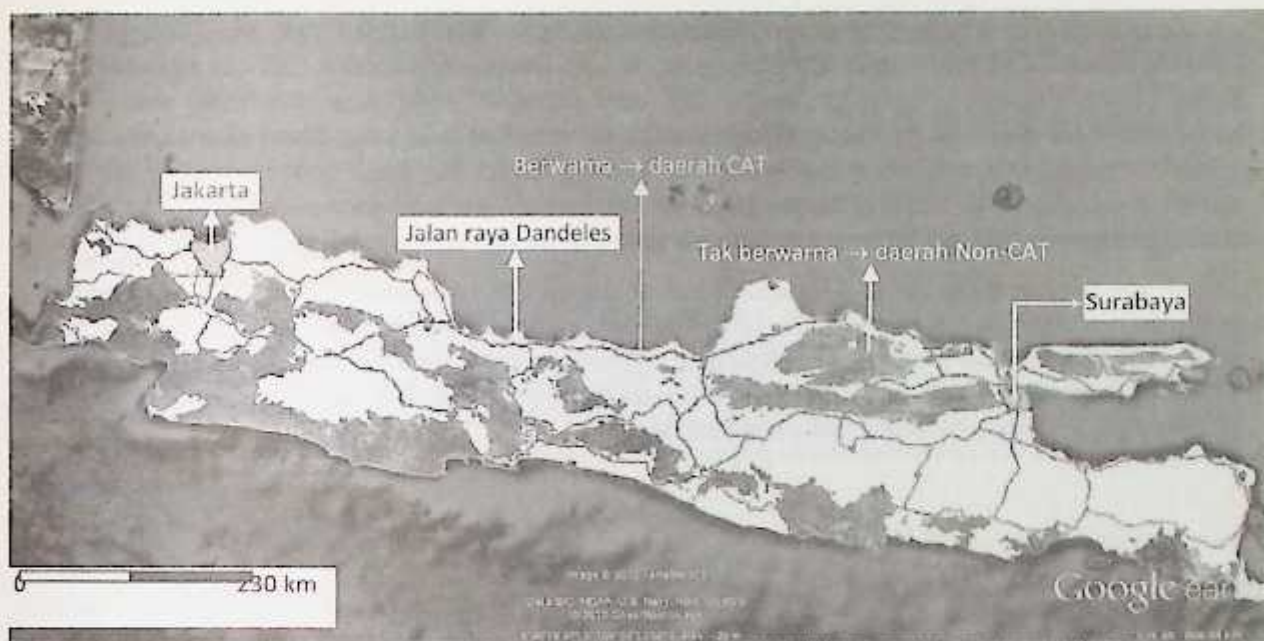
Semua bencana dan persoalan tersebut terletak di daerah Non-CAT.

Pemahaman kondisi geologi, CAT, Non-CAT dan geomorfologi yang mendasar dan mendalam sebelum pembangunan suatu proyek sangat dibutuhkan. Perlu juga dipahami karakter daerah CAT yang kedalamannya rendah (dangkal). Secara implisit, persoalan di daerah ini identik dengan daerah Non-CAT terutama terhadap banjir, longsor, kekeringan dan perubahan morfologi sistem fluvialnya.

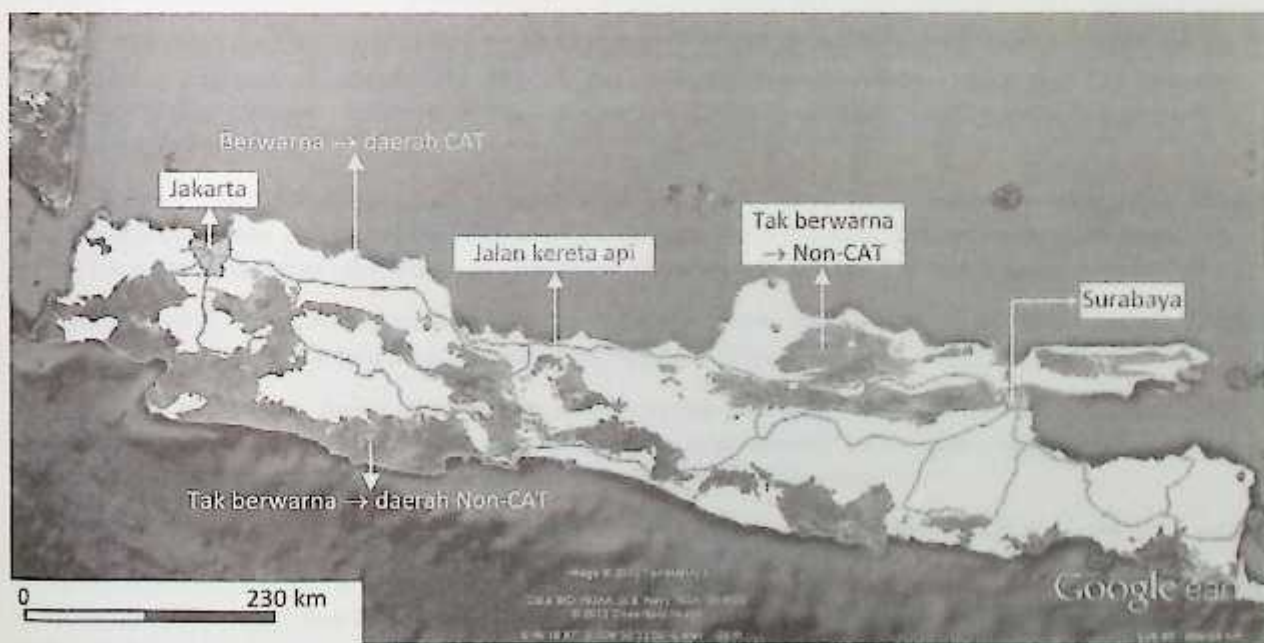
Untuk sebagai bahan pertimbangan hipotesis kajian adalah jalan tol yang melingkar Kota Jakarta yang diletakkan di atas pilar. Dapat dikatakan bahwa jalan tol tersebut merupakan jembatan yang panjang sekali. Dari mulai awal beroperasinya jalan tol (berupa jembatan panjang) di seputar Jakarta hingga sekarang belum pernah timbul masalah walaupun dilewati dengan jumlah lintas kendaraan yang sangat banyak dan dengan berbagai jenis ukuran maupun berat (sedan sampai truk tronton). Hal tersebut disebabkan oleh seluruh Kota Jakarta berada di daerah CAT. Pertimbangan hipotesis lainnya adalah jalan raya yang dibangun oleh Pemerintah Belanda selama Pemerintahan Dandeeles. Mulai dari Jakarta hingga Surabaya jalan raya tersebut dibangun di daerah CAT. Demikian pula jalan kereta api. Mulai dari Jakarta sampai Surabaya baik melalui jalur Utara maupun Jalur Selatan, jalan rel tersebut hampir seluruhnya melalui daerah CAT. Rute jalan raya dan jalan kereta api tersebut ditunjukkan dalam Gambar 5-57.

Timbul pertanyaan apakah daerah Non-CAT tidak bisa didirikan bangunan? Jawabannya adalah bisa karena hal tersebut terbukti dari bangunan-bangunan air besar berupa waduk-waduk besar di Jawa dibangun di daerah Non-CAT. Contohnya: Waduk Jatiluhur, Waduk Cirata di Jawa Barat, Waduk Sempor, Waduk Wadas Lintang, Waduk Kedung Ombo di Jawa Tengah dan Waduk Karangates di Jawa Timur. Hal ini karena untuk pembangunan waduk besar melibatkan semua disiplin ilmu.

Kesimpulannya sebelum mendirikan bangunan di suatu tempat maka kondisi dan karakter geologi, keberadaan air (CAT dan Non-CAT) harus benar-benar dipahami sehingga bisa diantisipasi dengan disiplin ilmu yang sesuai.



a. Jalan raya Dandelees di Pantura



b. Jalan kereta api Jakarta Surabaya yang dibangun pada masa lalu oleh Belanda

Gambar 5-57. Jalan raya Dandelees dan jalan kereta api Jakarta-Surabaya di daerah CAT

Daerah-daerah lain seperti Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, Kep. Maluku, Bali, Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur dan Papua dan pulau-pulau lainnya mempunyai kondisi CAT dan Non-CAT seperti Pulau Jawa. Namun di samping kondisi CAT dan Non-CAT perlu juga dipahami sejarah geologi pembentukan pulau-pulau tersebut. Sebagai contoh Sumatra dan Jawa yang dilalui oleh deretan gunung berapi terbentuknya CAT umumnya merupakan produk aluvial dari hasil letusan gunung api. Secara makro dapat dikatakan kedua pulau tersebut memiliki karakter geologis yang mirip. Hal ini juga terbukti dari sejarah terbentuknya kedua pulau tersebut yaitu dahulu kala kedua pulau tersebut menyatu.

Di Kalimantan tidak ada gunung apinya jadi walaupun telah diketahui daerah CAT dan Non-CAT di pulau ini, karakter geologinya berbeda dengan Sumatra dan Jawa. Demikian pulau-pulau lainnya. Seperti disebutkan oleh pakar geologi Pulau Sulawesi terbentuk setidaknya dari pertemuan 3 lempeng tektonik yaitu Lempeng Australia, Lempeng Euroasia dan Lempeng Pasifik. Hal ini berarti kondisinya juga berbeda dibandingkan Sumatra, Jawa dan Kalimantan.

BAB 6. MANAJEMEN AIR TANAH TERPADU

6.1 Umum

Air tanah (*groundwater*) sebagaimana telah disebutkan dalam Bab 2 merupakan salah satu komponen dalam daur hidrologi (siklus hidrologi) yang terbentuk dari air hujan yang meresap ke dalam tanah melalui media lapisan yang berupa media pori dan media retakan di daerah imbuhan (*recharge area*) yang kemudian tersimpan dalam suatu lapisan batuan yang sering disebut sebagai akuifer dalam satu cekungan air tanah (CAT) yang berada di bawah permukaan tanah menuju ke suatu daerah lepasan (*discharge area*).

Dalam UU No. 7 Tahun 2004 Tentang Sumber Daya Air, wilayah air tanah (*groundwater basin*) disebut cekungan air tanah (CAT) yang didefinisikan sebagai suatu wilayah yang dibatasi oleh batas hidrogeologis, tempat semua kejadian hidrogeologis seperti proses pengimbuhan, pengaliran, dan pelepasan air tanah berlangsung. Cekungan air tanah berada di daratan dengan pelamparan dapat mencapai pada daerah di bawah dasar laut.

Untuk daerah CAT, manajemen air tanah berbasis cekungan air tanah (karena ada *groundwater* dan *soil water*) merupakan suatu pengelolaan air tanah secara menyeluruh, terpadu, dan berwawasan lingkungan hidup dimana pada pengelolaan air tanah harus berbasis pada suatu wilayah yang dibatasi suatu batas hidrogeologis.

Di daerah Non-CAT pusat-pusat sumber daya air tanah hanya pada daerah *vadoze zone* atau *unsaturated zone* dan dalam hal ini tidak ada *groundwater* namun hanya ada *soil water*. Wilayah Non-CAT (53 % wilayah daratan) di Indonesia lebih besar dibandingkan wilayah CAT (47 % wilayah daratan).

Untuk daerah Non-CAT pengelolaan air tanah tidak berbasis pada cekungan air tanah namun pada area bawah tanah yang dikenal dengan daerah *vadoze zone* dimana terdapat *soil water* saja.

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa untuk mencapai keterpaduan pengelolaan, satu cekungan air tanah dikelola oleh satu manajemen (*one groundwater basin, one management*). Untuk daerah Non-CAT maka pengelolaannya bisa mengikuti sistem fluvial sungai.

Namun seperti uraian dalam Sub-Bab 2.6.3 dalam suatu sistem siklus hidrologi suatu DAS ada beberapa kemungkinan yang terjadi, yaitu:

- Daerah hulu Non-CAT dan daerah hilir CAT.
- Daerah hulu CAT dan daerah hilir Non-CAT.
- Daerah hulu Non-CAT, daerah tengah CAT dan Daerah hilir Non-CAT.
- Daerah hulu CAT, daerah tengah Non-CAT dan Daerah hilir CAT.

Untuk pengelolaan sumber daya air kemungkinan tersebut di atas harus diperhitungkan karena setiap kemungkinan yang ada akan memberikan dan berkontribusi yang sangat besar terhadap aspek konservasi sumber daya air, aspek pendaya-gunaan sumber daya air dan aspek pengendalian daya rusak air, aspek pemberdayaan dan peran masyarakat dan aspek sistem informasi sumber daya air.

6.1.1 Permasalahan dalam Pengelolaan Air Tanah

Tantangan yang dihadapi dalam pengelolaan air tanah adalah terbatasnya ketersediaan air tanah di alam dan maraknya pengambilan sumber air ini karena tuntutan kebutuhan akan air yang dari tahun ke tahun terus mengalami peningkatan. Salah satu penyebab krisis air di dunia sebagaimana terungkap pada 2nd World Water Forum di Den Haag adalah kelemahan penyelenggaraan (*governance*) pengelolaan air di negara-negara berkembang termasuk Indonesia.

Dalam pelaksanaan pengelolaannya masih ditemui berbagai permasalahan, antara lain (Danaryanto, dkk., 2008a):

1. Kebijakan pengelolaan yang belum menjamin:
 - a. Hak setiap individu untuk mendapatkan air termasuk air tanah guna memenuhi kebutuhan pokok hidup.
 - b. Hak dasar masyarakat memperoleh akses penyediaan air untuk berbagai keperluan.
 - c. Pemanfaatan air tanah yang berkelanjutan bagi kemakmuran dan kesejahteraan rakyat.
 - d. Perlindungan air tanah agar senantiasa tersedia dalam kuantitas dan kualitas yang memadai demi kesejahteraan umat manusia.
 - e. Wewenang dan tanggung jawab pelaksanaan pengelolaan air tanah.
 - f. Pelaksanaan koordinasi pengelolaan air tanah antar instansi Pemerintah dan atau antar Pemerintah Daerah guna mengoptimalkan pelaksanaan konservasi dan pendayagunaan air tanah.
 - g. Keterpaduan antara air tanah dan air permukaan sebagai upaya mengefektifkan pengelolaan sumber daya air.
 - h. Pelaksanaan penggunaan yang saling menunjang antara air tanah dan air permukaan guna mengatasi kekurangan air.
2. Pengelolaan sumber daya air, yang terdiri dari air hujan, air permukaan, air tanah, air laut di darat dan pendukungnya tidak mungkin bisa dilaksanakan oleh satu institusi, akan tetapi dalam pelaksanaannya sulit terkoordinasi.
3. Sentralisasi pengelolaan yang terlalu kuat, berakibat memperpanjang sistem pengambilan keputusan.
4. Desentralisasi pengelolaan sampai tingkat kabupaten/kota cenderung mengabaikan prinsip pengelolaan cekungan air tanah lintas batas.
5. Belum terbentuk jaringan data dan informasi air tanah yang baik antar lembaga pengumpul atau pengelola data air tanah.
6. Pemanfaatan air tanah yang parsial, kurang berkeadilan, terutama bagi masyarakat miskin untuk mendapatkan air guna memenuhi kebutuhan dasarnya.

7. Pemanfaatan lebih menitikberatkan pada eksploitasi untuk mendapatkan pendapatan bagi daerah dari pada konservasinya.
8. Data dan informasi air tanah yang kurang memadai baik kuantitas maupun kualitasnya.
9. Degradasi kualitas, kuantitas, dan lingkungan air tanah akibat pengambilan air tanah yang berlebihan, pencemaran, serta perubahan fungsi lahan, terutama di cekungan air tanah di perkotaan.
10. Keterbatasan sumber daya (manusia, peralatan, biaya) baik di pusat maupun daerah, menyebabkan pengelolaan air tanah kurang efektif dilaksanakan.
11. Pengawasan dan penegakan hukum yang lemah atas setiap pelanggaran yang terjadi terhadap peraturan pengelolaan air tanah yang ada.
12. Konsep pengelolaan dan konservasi air tanah tidak didasarkan pada konsep pengelolaan cekungan air tanah, tetapi lebih mendasarkan pada pengelolaan sumur (*well management*) dan juga mendasarkan pada batas administrasi.
13. Masih terbatasnya pengetahuan masyarakat terhadap pemahaman air tanah, sehingga kurang peduli terhadap keberadaan dan fungsi air tanah, baik kualitas, kuantitas dan kontinuitasnya.

6.1.2 Tantangan dalam Pelaksanaan Pengelolaan Air Tanah

Dalam rangka penyelenggaraan otonomi daerah, maka pelaksanaan pengelolaan air tanah menghadapi beberapa tantangan, antara lain seperti berikut (Danaryanto, dkk., 2008a):

1. Pengelolaan secara terpadu antara air tanah dan air permukaan, hal ini dengan menyadari, bahwa air tanah adalah bagian tak terpisahkan dari ekosistem dan berinteraksi dengan air permukaan.
2. Menerapkan konsep dasar pengelolaan air tanah secara total yang memadukan konsep pengelolaan *Groundwater Basin* dan *River Basin*.
3. Desentralisasi pengelolaan dengan cara memberdayakan daerah untuk mengelola air tanah dalam lingkup wilayahnya tanpa mengabaikan sifat keterdapatan dan aliran air tanah serta prinsip-prinsip pengelolaan akuifer lintas batas.
4. Pemenuhan hak dasar yang menjamin hak setiap orang untuk mendapatkan air dari air tanah di daerah yang kondisi air tanahnya memungkinkan, bagi kebutuhan pokok sehari-hari guna memenuhi kehidupannya yang sehat, bersih, dan produktif.
5. Ketersediaan data, informasi, dan jaringan informasi air tanah yang terpadu didasarkan pada data keair-tanahan yang andal, tepat, akurat, dan berkesinambungan, yang mencakup seluruh wilayah Indonesia.
6. Keberlanjutan ketersediaan air tanah dengan menjamin keseimbangan antara pemanfaatan dan ketersediaan air tanah sebagai bagian dari ekosistem.
7. Pemanfaatan air saling menunjang, yaitu menciptakan keterpaduan pemanfaatan air tanah, air permukaan, dan air hujan.
8. Ketersediaan sumber daya (keahlian, peralatan, dan biaya) pengelolaan, yaitu dengan memberdayakan sumber daya dari masyarakat, swasta, para pihak berkepentingan, pemerintah daerah, dan pemerintah pusat.

6.2 Konsepsi Manajemen Air Tanah (*Groundwater dan Soil Water Management*)

Kegiatan pengelolaan air tanah meliputi kegiatan perencanaan, pelaksanaan, pemantauan dan evaluasi, konservasi, pengendalian daya rusak dan pendayagunaan.

Telaah manajemen air tanah dilakukan berdasarkan pada kebijakan dan peraturan yang sudah ada, sehingga menghasilkan suatu konsep manajemen air tanah yang menjamin ketersediaannya dan pendayagunaannya secara berkelanjutan:

1. Pengelolaan SDA berdasarkan Global Water Partnership (2001)
2. Pengelolaan SDA berdasarkan UU No. 7 Tahun 2004
3. Pengelolaan Air Tanah berdasarkan PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008
4. Pengelolaan Air Tanah Ideal yang merupakan gabungan dari butir 1, 2 dan 3.

6.2.1 Manajemen Sumber Daya Air Berdasarkan Global Water Partnership (2001)

Menurut Grigg (1996), pengelolaan sumber daya air didefinisikan sebagai aplikasi dari cara struktural dan non-struktural untuk mengendalikan sistem sumber daya air alam dan buatan manusia untuk kepentingan/manfaat manusia dan tujuan-tujuan lingkungan.

Secara lebih spesifik pengelolaan sumber daya air terpadu didefinisikan sebagai suatu proses yang mempromosikan koordinasi pengembangan dan pengelolaan air, tanah dan sumber daya terkait dalam rangka tujuan untuk mengoptimalkan resultan ekonomi dan kesejahteraan sosial dalam sikap yang cocok/tepat tanpa mengganggu kestabilan dari ekosistem-ekosistem penting (Global Water Partnership/ GWP, 2001).

Konsep pengelolaan sumber daya air terpadu menurut GWP (2001) melibatkan berbagai elemen yang kemudian dikelompokkan dalam 3 elemen utama Manajemen Sumber Daya Air Terpadu yaitu:

1. *The enabling environment* adalah kerangka umum dari kebijakan nasional, legislasi, regulasi dan informasi untuk pengelolaan SDA oleh *stakeholders*. Fungsinya merangkai dan membuat peraturan serta kebijakan. Sehingga dapat disebut sebagai *rules of the games*.
2. Peran-Peran Institusi (*institutional roles*) merupakan fungsi dari berbagai tingkatan administrasi dan *stakeholders*. Perannya mendefinisikan para pelaku.
3. Alat-alat manajemen (*management instruments*) merupakan instrumen operasional untuk regulasi yang efektif, monitoring dan penegakkan hukum yang memungkinkan pengambil keputusan untuk membuat pilihan yang informatif diantara aksi-aksi alternatif. Pilihan-pilihan ini harus berdasarkan kebijakan yang telah disetujui, sumberdaya yang tersedia, dampak lingkungan dan konsekuensi sosial dan budaya.

Ketiga komponen tersebut sangat tergantung adanya kesadaran populis dan kemauan dari semua pihak untuk bertindak dengan sikap yang tepat. Oleh karena itu diperlukan suatu pengelolaan sumber daya air terpadu, menyeluruh dan berwawasan lingkungan dengan segitiga keseimbangan dan skenario manajemen sumber daya air terpadu (Kodoatie dan Sjarief, 2005). Skenario segitiga keseimbangan tersebut dijelaskan dalam Gambar 6-1.



Gambar 6-1. Segitiga keseimbangan sosial, ekonomi dan ekosistem untuk PSDA Terpadu dan Berkelanjutan (GWP, 2001; Kodoatie dan Sjarief, 2004)

6.2.2 Manajemen Sumber Daya Air Berdasarkan UU SDA No. 7 Tahun 2004

Menurut UU SDA No. 7 Tahun 2004, pengelolaan sumber daya air adalah upaya merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi penyelenggaraan konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air, dan pengendalian daya rusak air. Dalam UU SDA ada dua komponen utama sumber daya air yaitu air permukaan (*surface water*) dan air tanah (*groundwater*). Untuk pengelolaan air permukaan, wilayah sungai merupakan konsep dasarnya. Definisinya adalah suatu kesatuan sumber daya air yang dapat merupakan satu atau lebih daerah aliran sungai (DAS). Sedangkan untuk pengelolaan air tanah, *groundwater basin* atau suatu cekungan air tanah sebagai acuannya.

Dari uraian di atas, dapat diambil kesimpulan bahwa pengelolaan sumber daya air terpadu meliputi pengelolaan air permukaan dan air tanah. Karena pada hakekatnya terdapat hubungan erat antara air tanah dan air permukaan, yaitu terjadinya pasokan air tanah pada air permukaan, dan pada kondisi tertentu air permukaan juga dapat memasok air tanah (lihat **Error! Reference source not found.**). Dengan demikian diperlukan manajemen penggunaan yang saling menunjang dalam tahap perencanaan dan pendayagunaan.

Dalam UU No. 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air, telah disebutkan bahwa komponen utama sumber daya air yaitu air permukaan (*surface water*) dan air tanah (*groundwater*). Untuk pengelolaan air permukaan, wilayah sungai merupakan konsep dasarnya, sedangkan untuk pengelolaan air tanah, *groundwater basin* atau suatu cekungan air tanah sebagai acuannya.

Ada empat wilayah/daerah teknis atau hidrologis Pengelolaan Sumber Daya Air yaitu: Cekungan Air Tanah (CAT), Non-CAT, Daerah Aliran Sungai (DAS) dan Wilayah Sungai.

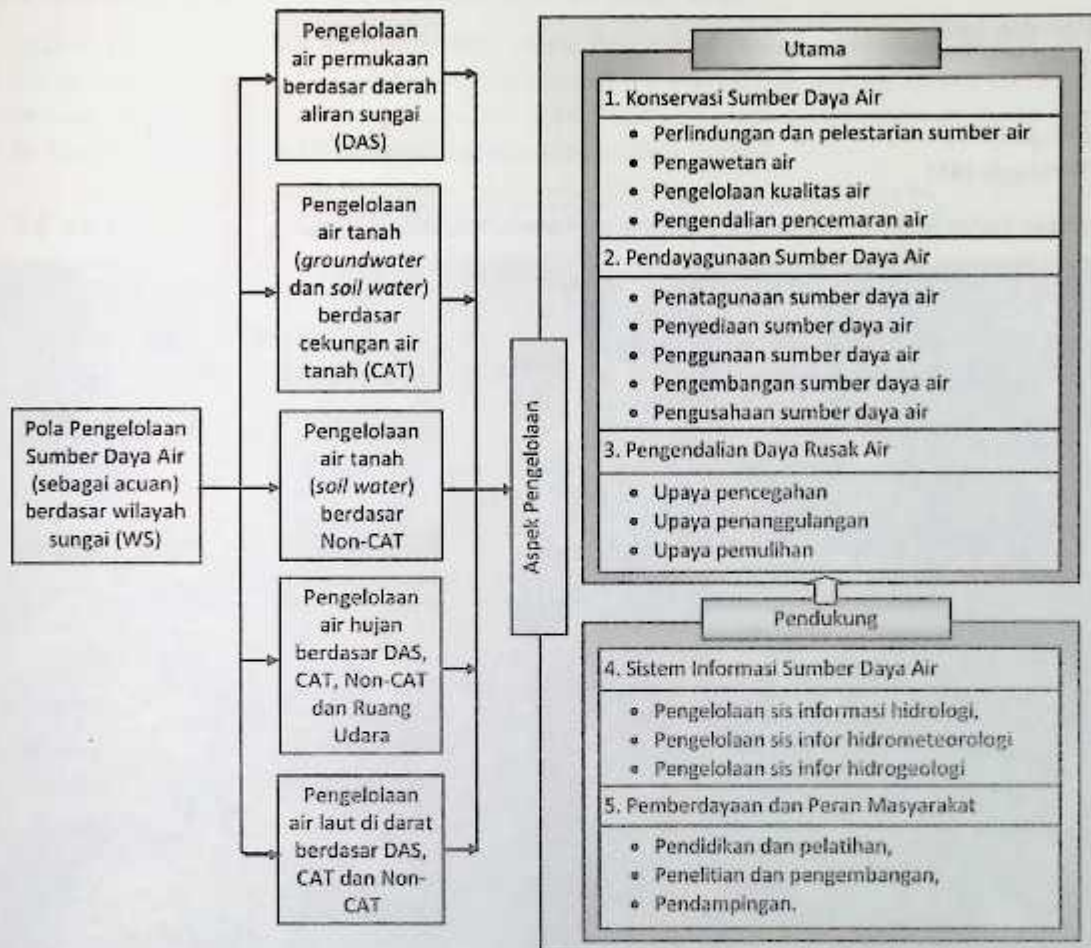
Oleh karena itu UU No. 7 Tahun 2004 perlu direvisi seperti berikut:

- Untuk pengelolaan air permukaan, daerah aliran sungai (DAS) merupakan konsep dasarnya atau sebagai batas hidrologisnya bukan wilayah sungai.

- Untuk pengelolaan air tanah (*groundwater* dan *soil water*), *groundwater basin* atau suatu cekungan air tanah (CAT) sebagai dasarnya atau sebagai batas hidrogeologisnya.
- Untuk pengelolaan air hujan, DAS, CAT, Non-CAT dan ruang udara (batas hidrometeorologis) sebagai dasarnya.
- Untuk pengelolaan air laut di darat maka DAS, CAT dan Non-CAT sebagai dasarnya.
- Untuk *soil water* maka DAS, CAT dan Non-CAT sebagai dasarnya.
- Untuk pengelolaan sumber daya air yang terdiri atas: air permukaan, air tanah (baik *groundwater* maupun *soil water*), air hujan dan air laut yang di darat maka wilayah sungai (*river basin*) sebagai dasarnya atau sebagai batas hidrologis, hidrogeologis dan hidrometeorologis.

Uraian revisi tersebut dan pengelolaan sumber daya air ditunjukkan dalam Gambar 6-2.

- Walaupun pengelolaan air tanah dan air permukaan merupakan pengelolaan yang terintegrasi, namun ada hal mendasar yang membedakan antara pengelolaan air tanah dan pengelolaan air permukaan. Pengelolaan air permukaan berbasis pada daerah aliran sungai (DAS) atau *watershed/ catchment area* yang didasarkan pada konsep hidrolika sistem fluvial sedangkan pengelolaan air tanah berdasarkan cekungan air tanah (CAT) atau *groundwater basin*. DAS dan CAT tidak selalu sama batas hidrologi dan hidrogeologisnya. Untuk pengelolaan sumber daya air berdasarkan wilayah sungai (*river basin*). Sehingga dapat dikatakan bahwa wilayah sungai merupakan pengintegrasian antara semua pengelolaan air.



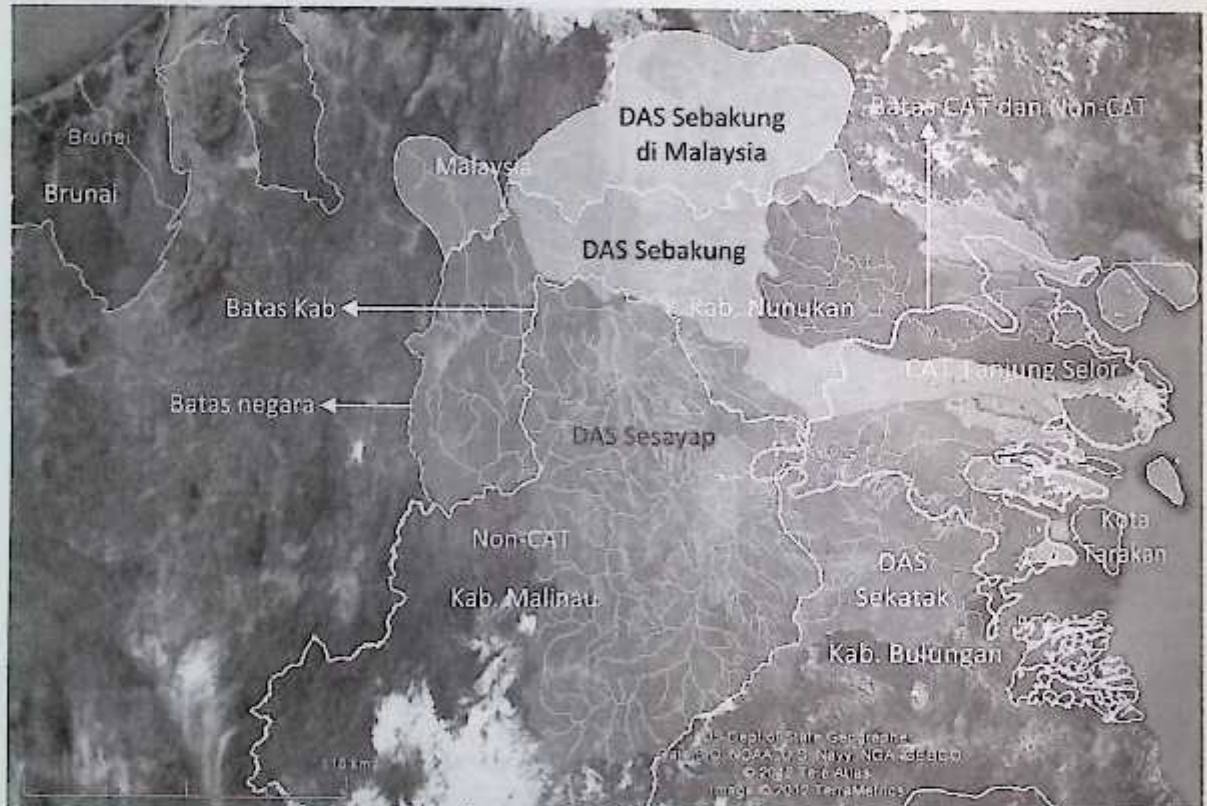
Gambar 6-2. Aspek pengelolaan sumber daya air terpadu (Kodoatie dan Sjarief, 2005 dengan modifikasi)

Agar kelestarian air tanah dapat tetap terjaga dan pendayagunaannya dapat berkelanjutan, maka sangat diperlukan integrasi dan keterpaduan antar instansi terkait dalam penyusunan kebijakan nasional pengelolaan sumber daya air, termasuk penyusunan kerangka kerja legislatif yang mengatur pengelolaan sumber daya air terpadu.

Sedangkan wilayah/daerah untuk pemerintahan menurut UU No. 32 Tahun 2004 Tentang Pemerintahan Daerah disebutkan bahwa Negara Kesatuan Republik Indonesia secara administrasi dibagi atas:

- Nasional (berkaitan dengan batas negara)
- Provinsi
- Kabupaten dan kota
- Kecamatan
- Desa
- Rukun Warga (RW)
- Rukun Tetangga (RT)

Perbedaan batas wilayah teknis dan administrasi kabupaten/kota ditunjukkan dalam Gambar 6-3.

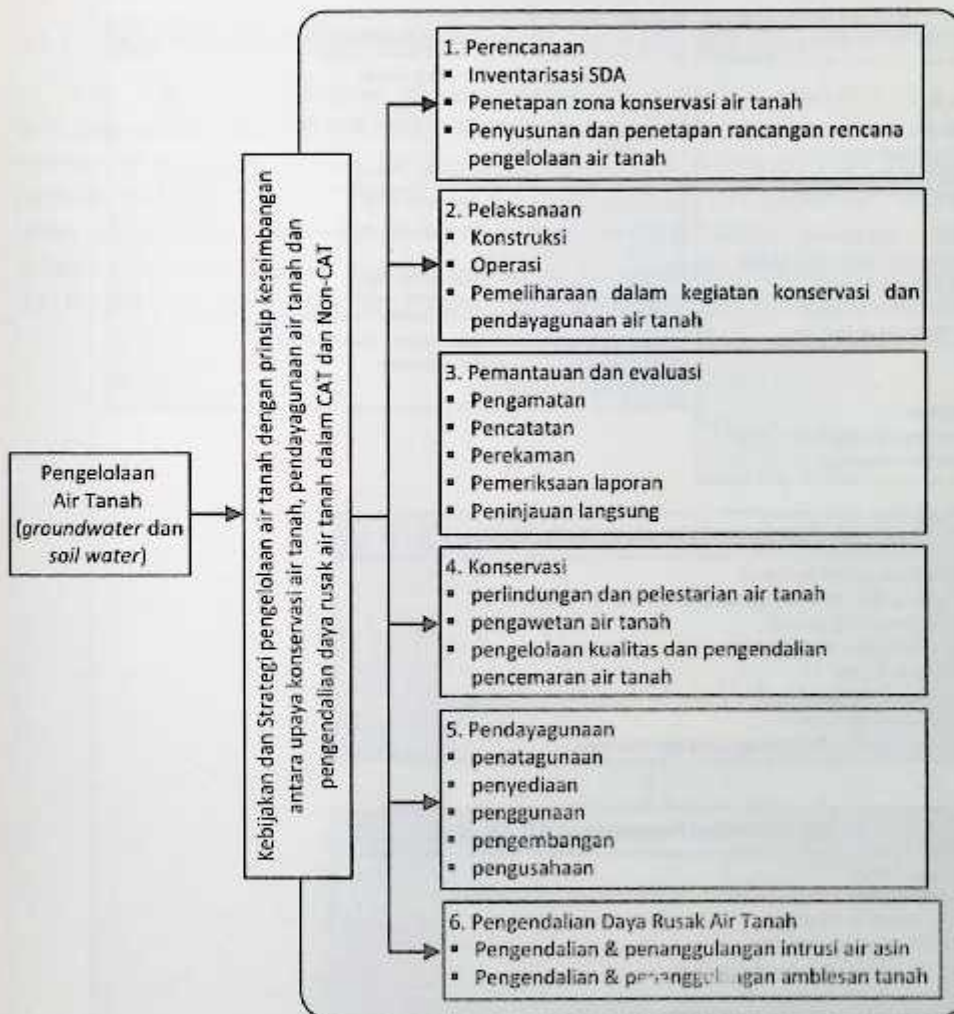


Gambar 6-3. Ilustrasi DAS, CAT, Non-CAT, Wilayah Sungai dan Wilayah Administratif Kabupaten/Kota (Balai BWS Kalimantan III Provinsi Kalimantan Timur, 2012; Kodoatie dan Sjarief, 2005)

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa wilayah sungai (WS) merupakan pengintegrasian secara internal antara air permukaan, air tanah (*groundwater* dan *soil water*), air hujan dan air laut di darat dalam batas-batas DAS, CAT dan Non-CAT sebagai batas teknis sekaligus pengintegrasian secara eksternal dengan tata ruang wilayah dalam batas-batas nasional (berkaitan dengan batas negara), provinsi, kabupaten/kota, kecamatan, desa, RW dan RT sebagai batas administrasi.

6.2.3 Manajemen Air Tanah berdasarkan PP No. 43 Tahun 2008

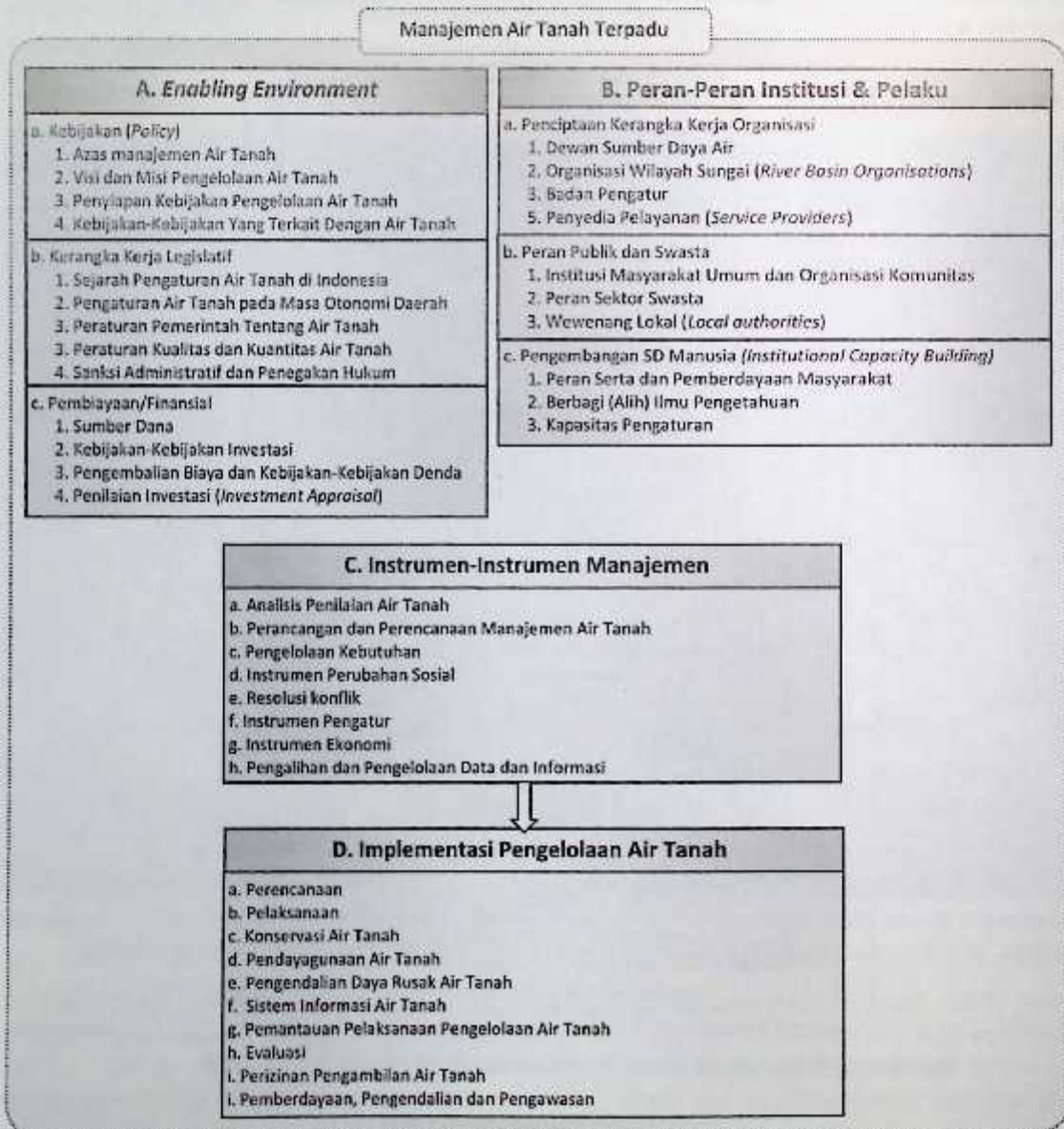
Dalam PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, disebutkan bahwa manajemen air tanah atau pengelolaan air tanah adalah upaya merencanakan, melaksanakan, memantau, mengevaluasi penyelenggaraan konservasi air tanah, dan pendayagunaan air tanah. Secara skematis pengelolaan air tanah berdasarkan PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 6-4. Pengelolaan air tanah menurut PP No. 43 Tahun 2008

6.2.4 Manajemen Air Tanah Terpadu

Konsep manajemen air tanah terpadu merupakan gabungan dari tiga konsep pengelolaan air sebagaimana telah dijelaskan di atas dan ditunjukkan dalam Gambar 6-1. Secara lebih detail, konsepsi manajemen air tanah tersebut ditunjukkan dalam Gambar 6-5 berikut ini.



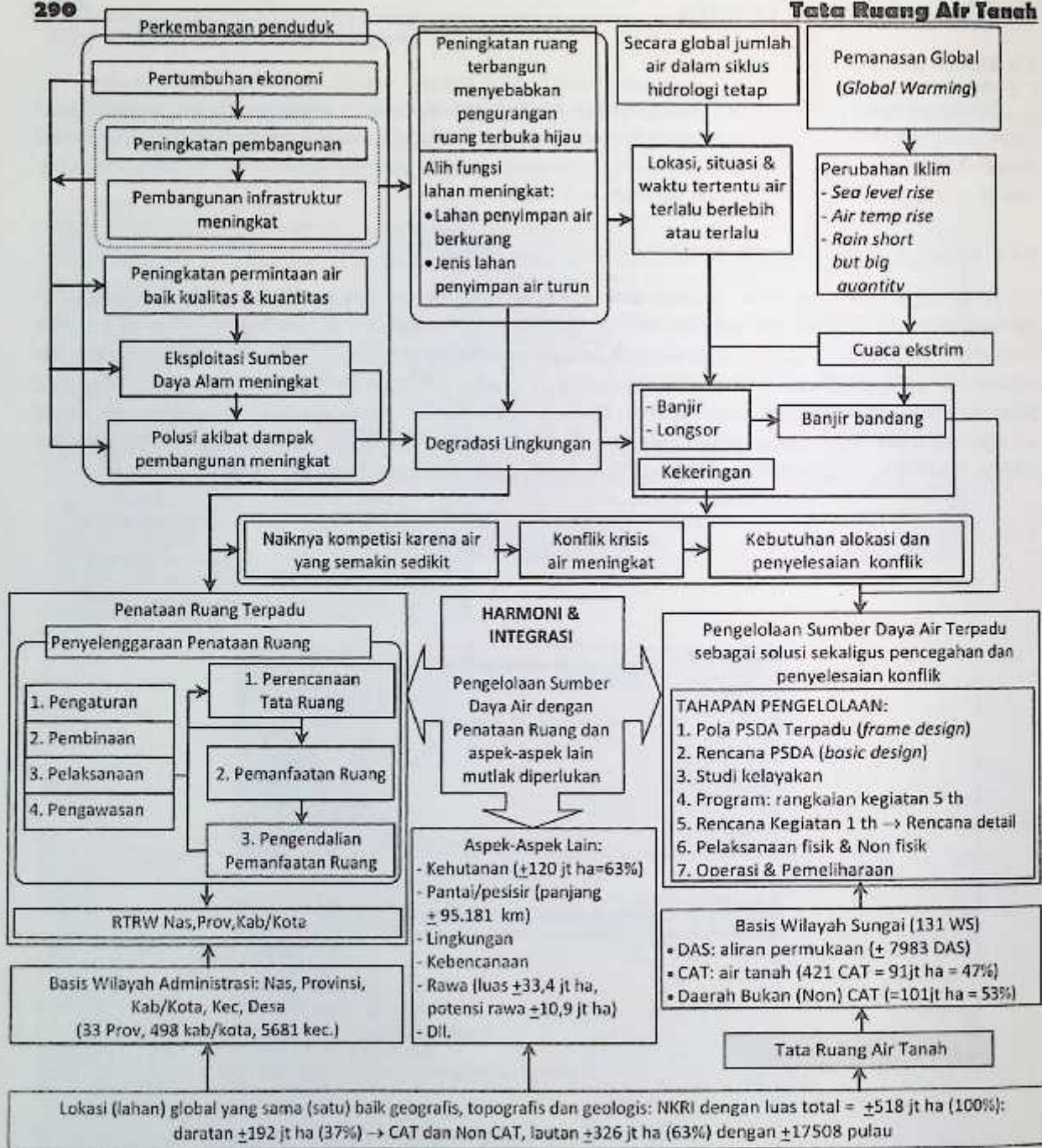
Gambar 6-5. Manajemen air tanah terpadu

6.3 Kilasan Manajemen Air tanah

Substansi-substansi yang berkaitan dengan pengelolaan air tanah, meliputi: kritisnya persediaan air tanah, hal-hal substansi yang menyebabkan air tanah perlu dikelola, saling ketergantungan pengelolaan dengan banyak hal, dan Prinsip Dublin serta aplikasinya sebagai pemecahan masalah air tanah. Masing-masing substansi dijelaskan sebagai berikut.

6.3.1 Kritisnya Persediaan Air Tanah

Para pakar menyebutkan bahwa ada paradoks antara penduduk dan air, yaitu peningkatan pertumbuhan penduduk mengakibatkan pengurangan ketersediaan air, sehingga untuk tetap bisa memenuhi kebutuhan akan air dilakukan upaya pengeksploitasian air tanah sebagai pengganti air permukaan yang debitnya cenderung menurun di musim kemarau dan akibat perubahan tata guna lahan sumber air permukaan menjadi berkurang. Oleh karena itu diperlukan manajemen air tanah sebagai solusi sekaligus pencegahan dan penyelesaian konflik. Gambar 6-6 menunjukkan uraian tersebut (UU No. 26 Tahun 2007; UU No. 7 Tahun 2004; GWP, 2001; Kodoatie & Sjarief, 2010).



Gambar 6-6. Persoalan, Solusi Penataan Ruang, Pengelolaan SD Air Dan Tata Ruang Air Tanah

Dengan melihat Gambar 6-6 dapat diketahui bahwa ketersediaan air tanah pada kondisi kritis akan menimbulkan berbagai macam konflik. Konflik utama yang terjadi adalah pada saat ketersediaan air tidak dapat memenuhi kebutuhan. Konflik lain yang terjadi adalah konflik yang berkaitan dengan perubahan tata guna lahan.

Oleh karena itu, pemerintah yang berfungsi sebagai *enabler* harus membuat rambu-rambu tentang perubahan tata guna lahan. Biasanya peraturannya sudah ada, tetapi aplikasi dari peraturan belum dilaksanakan, sehingga perlu dilakukan peningkatan *law enforcement* secara kontinyu.

Dari uraian tersebut maka adalah sangat wajar bila John F. Kennedy menyatakan bahwa: *Anyone who solves the problems of water deserves not one Nobel Prize but two – one for science and the other for peace.*

6.3.2 Hal-Hal Substansi yang Menyebabkan Air Tanah perlu Dikelola

Air tanah mempunyai ciri khas dan unik yang menyebabkan air tanah menjadi spesial dan perlu dikelola dengan baik. Hal-hal tersebut meliputi (GWP, 2001 dengan elaborasi berdasarkan sumber-sumber lainnya, diantaranya Hamengku Buwono X, 2002):

1. Kondisi kebutuhan pangan dan air (sumberdaya alam).
2. Kondisi kebutuhan air dan tanah (sumberdaya alam).
3. Batas administrasi wilayah berbeda dengan batas teknis (DAS, CAT, Non-CAT dan WS)
4. Perubahan tata guna lahan akan berpengaruh besar terhadap ketersediaan air tanah secara kuantitas maupun kualitas.
5. Tiap tata guna lahan membutuhkan air namun juga akan memberikan dampak keberadaan air tanah di tata guna yang lain. Perubahan tata guna lahan memberikan dampak yang besar terhadap keberadaan air tanah di lahan tersebut.
6. *Recovery* kerusakan tata guna lahan dan tata air yang terjadi umumnya akan sulit mengembalikan sampai sama seperti semula. Untuk air tanah jauh lebih sulit *recovery*.
7. Tiap kehidupan dan semua sektor sosial, budaya, ekonomi serta lingkungan bergantung air.
8. Kita tinggal dalam dan dengan siklus hidrologi artinya air secara terus menerus diisi ulang (*renewable source*), dipakai, dikembalikan dan dipakai lagi. Oleh karena itu kita semua bergantung satu sama lain.
9. Dalam kaitan dengan sumber daya air, kita hampir semuanya tinggal di hilir dan sebagian di hulu. Kita saling bergantung dan saling mempengaruhi. Perubahan di hulu akan berdampak di hilir.
10. Infrastruktur keairan: alami dan buatan manusia.
11. Sistem infrastruktur keairan terikat dan saling bergantung dengan infrastruktur lainnya.
12. Tuntutan reformasi: demokrasi, transparansi, akuntabilitas.
13. Otonomi Daerah: munculnya egosentris kedaerahan, bahwa daerah saya bisa saya eksploitasi sesukanya. Konflik muncul akibat perbedaan batas teknis dan administrasi.
14. Partisipasi dan pemberdayaan masyarakat.
15. Globalisasi.
16. Keterbatasan dana.

17. Degradasi lingkungan yang terus meningkat dan di pemukiman padat cenderung parah.
18. Lemahnya penegakkan hukum (perlu *law enforcement*)
19. Krisis kepercayaan dan kebudayaan.
20. Air tanah menjadi andalan utama kebutuhan air di musim kemarau.
21. Air tanah pada kondisi tertentu bersifat *renewable* (dapat diperbaharui) namun pada kondisi yang lain dapat bersifat *unrenewable*

6.3.3 Saling Ketergantungan Manajemen dengan Banyak Hal

Secara menyeluruh sumber daya air tanah tergantung dari banyak hal yang memerlukan perpaduan baik dalam sistem alam maupun dalam sistem kehidupan. Perpaduan itu antara lain (GWP, 2001 dengan modifikasi dalam Kodoatie, 2005):

- Perpaduan dalam sistem alam: antara pemakaian tanah dan air, antara air permukaan dan air tanah, antara jumlah dan kualitas air, antara hulu dan hilir, antara air tawar dan air asin, antara penyebab dan penerima dampak.
- Perpaduan pengelolaan untuk pencapaian keseimbangan ideal dalam sistem alam dan dalam sistem kehidupan (sistem manusia). Langkah-langkah yang perlu diambil antara lain: pengutamakan air dalam sistem ekonomi, sosial, dan lingkungan, kepastian koordinasi antar sektor-sektor, kepastian adanya kerjasama antara pengelolaan sektor umum dan pribadi, pengikut-sertaan semua stakeholders karena: *water is every one's business!*

Mengacu UU No. 26 Tahun 2007 dan PP No. 43 Tahun 2008, pada dasarnya muatan pokok tentang penataan ruang yang selaras dengan manajemen air tanah diperlihatkan pada gambar berikut:



Gambar 6-7. Wujud penataan ruang

Sesuai dengan gambar tersebut, dalam upaya mendukung manajemen air tanah maka perlu adanya pembatasan dan pengembangan yang jelas antara fungsi lindung dan fungsi budidaya. Disamping itu perlu juga disesuaikan dengan perubahan paradigma yang cukup mendasar dari pola pembangunan yang berupa:

- Perubahan dari pengelolaan air sektoral ke sektor silang.
- Pengelolaan sumber daya air terpadu yang mengutamakan dialog.
- Dari *top-down to bottom-up approach*.
- Yang demokratis, transparan dan akuntabilitas.
- Dari sentralisasi ke desentralisasi (otonomi daerah)

6.3.4 Prinsip Dublin Dan Aplikasinya Sebagai Pemecahan Masalah Air Tanah

Konferensi PBB tentang Lingkungan dan Pembangunan (*the United Nations conference on Environment and Development – UNCED*) atau yang dikenal dengan Konferensi Tingkat Tinggi Bumi (*Earth Summit*) diselenggarakan pada Bulan Juni 1992 di Rio de Janeiro. Konferensi ini menghasilkan Agenda 21 Global atau Agenda Rio 21 yang merupakan program kerja besar untuk Abad 20 sampai dengan Abad 21 yang mewujudkan hubungan kemitraan global yang bertujuan terciptanya keserasian antara dua kebutuhan penting, yaitu lingkungan yang bermutu tinggi dan perkembangan serta pertumbuhan ekonomi yang sehat bagi seluruh penduduk dunia.

Berdasarkan agenda ini dikembangkan hal-hal substansi yang sederhana dikembangkan pada Tahun 1992 di Dublin untuk visi-ke-aksi millenium, yaitu (*Earth Summit, 1992* dengan elaborasi):

- Air tawar baik air permukaan dan air tanah adalah terbatas dan dengan sumber yang rentan dan lemah namun sangat penting untuk mempertahankan kehidupan, pengembangan dan lingkungan. Dengan demikian air tawar tersebut harus dikelola secara terpadu dan holistik.
- Pengembangan dan pengelolaan air harus didasari dalam pendekatan partisipatif, melibatkan pemakai, perencana dan penentu kebijakan dalam semua tingkatan yaitu mengelola air dengan manusia dan dekat dengan manusia.
- Perempuan mempunyai peran sentral dalam ketentuan, pengelolaan dan perlindungan air yaitu mengikutsertakan perempuan seluruhnya.
- Air memiliki nilai ekonomi dalam setiap pemakaian kompetitifnya dan harus dipahami sebagai benda ekonomi:
 - Merupakan kebutuhan dasar, distribusi air sampai nilai tertinggi
 - Mengarahkan pada penentuan harga penuh untuk mendorong pemakaian rasional dan harga pemulihan (*recovery cost*)
- Air juga memiliki nilai sosial sebagai salah satu sumber kehidupan. Ini berarti semua orang mempunyai hak atas air dan bagi yang tidak mampu wajib disediakan oleh Pemerintah.

Tujuan Prinsip Dublin bertujuan pada pengelolaan air yang bijak dengan fokus pada kemiskinan. Sebagaimana sering diungkapkan bahwa pengelolaan yang buruk hampir selalu memberikan dampak buruk bagi yang tidak mampu (*miskin*): *Poor water management hurts the poor most!*

6.4 Enabling Environment

Enabling environment dapat diterjemahkan sebagai suatu pengkondisian lingkungan yang memungkinkan terjadi. Dalam hal pengelolaan air tanah, maka pengertian *enabling environment* adalah hal-hal utama atau substansi-substansi pokok yang membuat pengelolaan dilakukan dengan cara-cara, strategi dan langkah-langkah ideal yang tepat sehingga tercapai tujuan pengelolaan yang optimal.

Menurut GWP (2001), ada tiga hal substansi di dalam pengkondisian itu, yaitu: kebijakan, kerangka kerja legislatif dan finansial.

Uraian tentang ketiga hal tersebut ditunjukkan berikut ini dengan referensi utama diambil dari GWP (2001) dan Swiss Centre of Hydrogeology (2003), UU No. 7 Tahun 2004 dan referensi-referensi lainnya.

6.4.1 Kebijakan

Kebijakan air tanah didefinisikan sebagai keputusan untuk mencapai tujuan, melakukan kegiatan, dan mengatasi masalah dalam menyelenggarakan tugas pemerintahan di bidang air tanah pada tingkat nasional, provinsi, dan kabupaten/ kota. Kebijakan air tanah ditetapkan oleh Menteri, Gubernur, Bupati/ Walikota, dan disusun berdasarkan kebijakan sumber daya air.

Dalam PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, kebijakan merupakan acuan dalam penyusunan strategi air tanah, yang selanjutnya dijadikan pedoman dalam menyusun rencana pengelolaan air tanah. Untuk lebih rincinya, dijelaskan sebagai berikut:

1. Pengelolaan air tanah mengacu pada kebijakan pengelolaan air tanah, sebagai bagian dari kebijakan pengelolaan sumber daya air yang disusun dan ditetapkan berlandaskan pada visi pengelolaan sumber daya air, yaitu menyeluruh, terpadu, dan berwawasan lingkungan hidup dengan tujuan mewujudkan kemanfaatan sumber daya air yang berkelanjutan untuk sebesar-besar kemakmuran rakyat.
2. Kebijakan pengelolaan air tanah menjadi acuan dalam menyusun dan menetapkan strategi pengelolaan air tanah pada Cekungan Air Tanah yang merupakan bagian dari pola pengelolaan sumber daya air pada wilayah sungai. Sebagaimana diamanatkan dalam Pasal 11 Undang-Undang No. 7 Tahun 2004, pola pengelolaan sumber daya air disusun berdasarkan wilayah sungai dengan prinsip keterpaduan antara air permukaan dan air tanah.
3. Selanjutnya, strategi pengelolaan air tanah digunakan sebagai pedoman dalam menyusun rencana pengelolaan air tanah pada Cekungan Air Tanah, yang merupakan bagian dari rencana pengelolaan sumber daya air pada wilayah sungai dimana Cekungan Air Tanah berada. Rencana pengelolaan air tanah berfungsi sebagai pedoman dan arahan dalam pelaksanaan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air tanah, sistem informasi air tanah, dan pemberdayaan masyarakat.



Gambar 6-8. Integrasi pengelolaan sumber daya air

Dalam suatu proses manajemen pasti akan muncul masalah inter-relasi dan persoalan lain yang sulit, dan kebijakan yang baik harus dapat menanggulangi masalah-masalah tersebut. Menurut Kodoatie dan Sjarief (2005) secara makro hal-hal yang perlu diakomodir dalam penentuan kebijakan diantaranya:

- Sumber daya air tanah harus dilihat dari aspek-aspek lingkungan, ekonomi dan sosial.
- *Stakeholder* yang berperan sebagai pengelola air tanah yang meliputi penyedia pelayanan (service provider), pengatur (regulator), perencana (planner), organisasi pendukung (support organizations), dan pemakai (user) (Grigg, 1996).
- Perhatian terhadap keberlanjutan sumber daya air tanah dan isu-isu lingkungan dalam proses pembangunan mulai dari: studi, perencanaan, pelaksanaan konstruksi, operasi dan pemeliharaan.
- Dampak sosial dalam pengembangan air tanah.
- Pemenuhan kuantitas dan kualitas yang tetap untuk air tanah.
- Keterkaitan kebijakan sumber daya air tanah dengan kebijakan ekosistem yang lain.
- Kebutuhan biaya untuk pengelolaan air tanah.

6.4.1.1 Asas Manajemen Air Tanah

Asas manajemen air tanah diatur dalam Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 1451.K/10/MEM/2000, yaitu dilaksanakan berdasarkan asas fungsi sosial dan nilai ekonomi. Secara lebih rinci asas manajemen air tanah berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 1451.K/10/MEM/2000 antara lain meliputi:

1. Asas kemanfaatan umum, dalam arti pengelolaan sumber daya air tanah dilaksanakan untuk memberikan manfaat sebesar-besarnya bagi kepentingan umum secara efektif dan efisien.
2. Asas keterpaduan dan keserasian, artinya pengelolaan air tanah perlu dilakukan secara seimbang dalam mewujudkan keserasian untuk berbagai kepentingan dengan memperhatikan sifat alamiah air yang dinamis.
3. Asas kelestarian, yakni pengelolaan air tanah diselenggarakan untuk menjaga kelestarian fungsinya secara berkelanjutan.

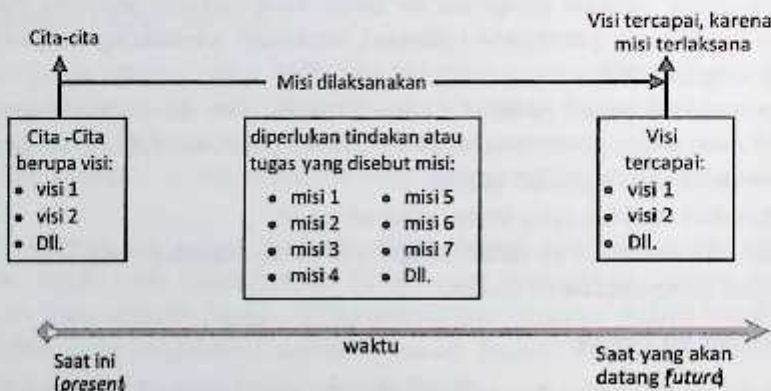
4. Asas keadilan, yakni pengelolaan air tanah dilakukan untuk kepentingan semua lapisan masyarakat di seluruh wilayah tanah air dan setiap warga negara berhak memperoleh kesempatan yang sama untuk berperan dan menikmati hasilnya secara nyata menurut peraturan perundangan yang berlaku.
5. Asas kemandirian, artinya bahwa penyelenggaraan pengelolaan air tanah dilandaskan kepada kepercayaan dan kemampuan sendiri.
6. Asas transparansi dan akuntabilitas publik, yakni pengelolaan air tanah merupakan proses yang terbuka dan dapat dipertanggungjawabkan kepada publik.

6.4.1.2 Visi dan Misi Pengelolaan Air Tanah

Visi merupakan suatu impian atau bayangan masa depan yang cerah dan besar bahkan ideal, jadi pada waktu yang akan datang kita memiliki sesuatu yang jauh lebih baik dari sekarang. Menurut Sinamo (1998) visi dapat diartikan "akan memiliki apa" dan disinonimkan dengan sasaran agung. Visi lebih mengarah pada pengertian "what do we want to have in the future" (*vision achieved*).

Sedangkan misi berarti tugas penting yang harus dilakukan yang kemudian oleh Sinamo (1998) didefinisikan sebagai dambaan "akan menjadi apa" dan disinonimkan dengan tugas agung dengan pengertian "what do we want to be in the future" (*mission accomplished*).

Secara visual visi dan misi ditunjukkan dalam gambar berikut ini.



Gambar 6-9. Gambaran pengertian visi dan misi (Kodoatie dan Sjarief, 2005)

Dalam Forum Air Indonesia Tanggal 20-30 November 2000, dihasilkan Visi Air Indonesia 2020 adalah: "Established, effective and efficient water utilization for the welfare all people", yaitu terwujudnya kemanfaatan air yang mantap berdayaguna, berhasil guna dan berkelanjutan untuk kesejahteraan seluruh rakyat.

Sedangkan bila didasarkan pada definisi kegiatan pengelolaan air tanah pada PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, maka untuk lingkup nasional visi misi pengelolaan air tanah adalah:

1. Visi manajemen air tanah yaitu: pengelolaan yang menyeluruh, terpadu, dan berwawasan lingkungan hidup dengan tujuan mewujudkan kemanfaatan sumber daya air tanah yang berkelanjutan untuk sebesar-besar kemakmuran rakyat.
2. Misi nasional manajemen air tanah adalah:
 - Keseimbangan antara upaya konservasi dan pendayagunaan air tanah, demi menjamin keberlanjutan ketersediaan air tanah.
 - Menginventarisasi potensi air tanah yang terdapat pada setiap cekungan air tanah.
 - Pemanfaatan air yang tepat, adil, efisien dan efektif, dengan mengutamakan pada pemenuhan kebutuhan pokok sehari-hari.
 - Pengawetan air tanah yang bertujuan menjaga keberadaan dan kesinambungan ketersediaan air tanah.
 - Melakukan upaya perlindungan dan pelestarian air tanah guna melindungi dan melestarikan kondisi lingkungan serta fungsi air tanah.
 - Pengelolaan kualitas dan pengendalian pencemaran air tanah agar tetap sesuai dengan kondisi alaminya.
 - Pengaturan ijin penggunaan air tanah untuk mencegah eksploitasi besar-besaran.
 - Ketersediaan dan keberlanjutan sistem informasi dalam pengelolaan air tanah
 - Peningkatan peran aktif semua *stakeholders* dengan berdasarkan bahwa *water is every one's business*.

6.4.1.3 Penyiapan Kebijakan Pengelolaan Air Tanah

Kebijakan pengelolaan air tanah disusun dan ditetapkan secara terintegrasi dalam kebijakan pengelolaan sumber daya air. Kebijakan pengelolaan sumber daya air terdiri dari:

1. Kebijakan nasional sumber daya, yang disusun dan ditetapkan oleh Dewan Sumber Daya Air Nasional
2. Kebijakan pengelolaan sumber daya air provinsi, yang disusun dan ditetapkan oleh Dewan Sumber Daya Air Provinsi,
3. Kebijakan pengelolaan sumber daya air kabupaten/kota, yang disusun dan ditetapkan oleh Dewan Sumber Daya Air kabupaten/kota.

Kebijakan pengelolaan air tanah sebagaimana disebutkan dalam PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, Pasal 5 dan Pasal 6, terdiri dari:

1. Kebijakan nasional air tanah, yang ditetapkan oleh Menteri dengan mengacu kepada kebijakan nasional sumber daya air.
2. Kebijakan pengelolaan air tanah di provinsi, yang ditetapkan oleh Gubernur dengan mengacu pada kebijakan nasional air tanah dan berpedoman pada kebijakan pengelolaan sumber daya air provinsi.
3. Kebijakan pengelolaan air tanah kabupaten/kota yang ditetapkan oleh Bupati/Walikota, dengan mengacu pada kebijakan pengelolaan air tanah provinsi dan berpedoman pada kebijakan pengelolaan sumber daya air kabupaten/kota.

Kebijakan-kebijakan mengenai pengelolaan air tanah berbasis pada wilayah administrasi, sehingga untuk cekungan air tanah lintas provinsi atau cekungan air tanah lintas negara, Gubernur dan Bupati/Walikota tetap menetapkan kebijakan teknis pengelolaan air tanah.

Beberapa kunci pokok untuk kebijakan air tanah yang efektif adalah (PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008; Kodoatie dan Sjarief, 2005):

1. Kebijakan tentang penyelenggaraan konservasi air tanah yang berkelanjutan.
2. Kebijakan tentang pendayagunaan air tanah.
3. Kebijakan pengendalian daya rusak air tanah.
4. Kebijakan tentang penyediaan sistem informasi air tanah.
5. Kebijakan-kebijakan yang menegaskan pemberdayaan masyarakat dalam pengelolaan air tanah.
6. Kebijakan-kebijakan yang menegaskan peran *stakeholders* (pemerintah dan pihak lainnya) dalam pencapaian tujuan dan terutama mendefinisikan peran pemerintah sebagai penyedia pelayanan, pengatur, sebagai organisator proses partisipasi dan sebagai mediator dalam penyelesaian konflik.
7. Pengetahuan pemahaman air sebagai benda sosial sekaligus benda ekonomi, sehingga dalam perencanaan kebijakan alokasi sumber air harus dapat memberikan nilai yang tinggi untuk kemasyarakatan, mulai dari pemenuhan kebutuhan dasar.
8. Pembuatan kebijakan nyata yang mengkaitkan tata guna lahan dengan aktivitas ekonomi dan aktifitas sosial dengan aspek lingkungan sebagai salah satu variabel utama.
9. Ajakan ke para pihak untuk berdialog, mengenalkan potensi konflik dan kebutuhan solusinya.
10. Perhitungan dan analisis pertukaran antara biaya jangka pendek dan perolehan jangka panjang dengan masukan variabel-variabel ekonomi, sosial dan lingkungan yang seimbang.

6.4.1.4 Kebijakan-Kebijakan yang Terkait dengan Air Tanah

Ada banyak sekali kebijakan di luar kebijakan pengelolaan air tanah yang terkait maupun yang bisa memberikan dampak terhadap pengelolaan air tanah. Kebijakan itu diantaranya meliputi: kebijakan pengelolaan sumber daya air, kebijakan tentang tata ruang, kebijakan tentang lingkungan, kebijakan tentang otonomi daerah, kebijakan tentang infrastruktur (Kodoatie dan Sjarief, 2005).

Walaupun proses mencapai keterpaduan sangat sulit namun beberapa saran dari pengalaman dapat dilihat berikut ini (Kodoatie dan Sjarief, 2005):

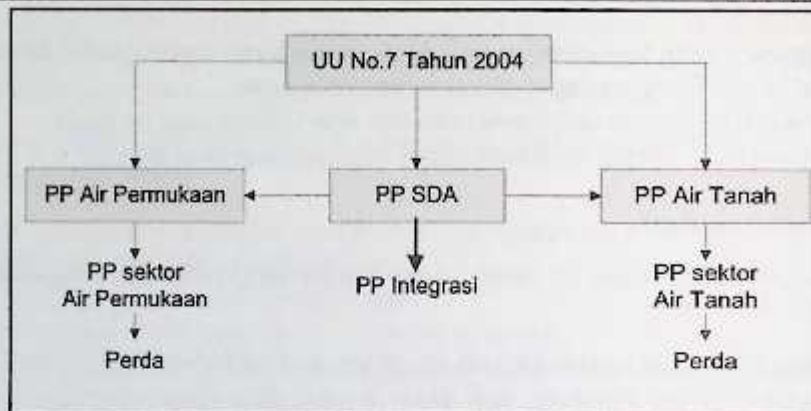
1. Perlu pengkondisian partisipasi dan peran serta dari para pihak untuk dapat secara bersama mengatasi persoalan dan dampak yang timbul walaupun hasilnya tidak dapat memuaskan semua pihak. Oleh sebab itu, Pemerintah harus dapat mengetahui dan memahami posisi para pihak lainnya dan implikasi dampaknya.
2. Mengetahui fungsi dan perubahan tata guna lahan, pengelolaan air tanah, dan pengembangannya baik pada saat yang lampau, saat ini dan prediksi yang akan datang.
3. Pemahaman birokrasi dan karakter budaya lokal sangat penting untuk mengetahui pola pikir dan para penentu kebijakan.

4. Persoalan-persoalan yang bisa memicu terjadinya konflik perlu dipahami dan diketahui secara dini sehingga solusi pemecahannya dapat dibuat secara lebih awal.
5. Perlu karakter-karakter demokrasi, transparansi dan akuntabilitas yang memadai.
6. Pengetahuan yang luas tentang kebijakan publik merupakan potensi penting.

6.4.2 Kerangka Kerja Legislatif

Dalam melakukan pengelolaan air tanah aspek hukum yang melandasi pengelolaan air tanah di Indonesia meliputi:

- a. Undang-Undang Dasar 1945 pasal 33 ayat (3). Di sini tersirat bahwa air yang terkandung di dalam buku ini perlu dikelola dan dilindungi agar dapat dimanfaatkan sebesar-besarnya bagi kemakmuran rakyat.
- b. Ketetapan MPR, tentang Garis-Garis Besar Haluan Negara. Dalam GBHN diamanatkan bahwa dalam melaksanakan pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan pengembangan tata guna air (termasuk air tanah) perlu diberikan pada penyediaan air yang cukup dan bersih serta berkesinambungan, mencegah kemerosotan mutu dan kelestarian air serta setiap perubahan keadaan dan fungsi lingkungan berikut unsumnya perlu terus dinilai dan dikendalikan secara seksama agar pengamanan dan perlindungannya dapat dilaksanakan setepat mungkin.
- c. Undang-Undang No. 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air, khusus mengenai air tanah Pasal 12 ayat (2) menyebutkan pengelolaan air tanah didasarkan pada cekungan air tanah. Selanjutnya pasal 14 mengamanatkan pada pemerintah untuk menetapkan kebijakan nasional sumber daya air, pasal 15 kepada pemerintah provinsi untuk menetapkan kebijakan pengelolaan sumber daya air di wilayahnya berdasarkan kebijakan nasional sumber daya air dengan memperhatikan kepentingan provinsi sekitarnya, serta pasal 16 kepada pemerintah kabupaten/kota menetapkan kebijakan pengelolaan sumber daya air di wilayahnya berdasarkan kebijakan nasional sumber daya air dan kebijakan pengelolaan sumber daya air provinsi dengan memperhatikan kepentingan kabupaten/kota sekitarnya.
- d. PP No. 43 Tahun 2008 tentang Air Tanah, dibuat khusus untuk mengatur pengelolaan air tanah di Indonesia, mulai dari strategi, kebijakan, sampai dengan sanksi.
- e. Peraturan Menteri ESDM No. 1451.K/10/MEM/2000, Pengurusan Administrasi Air tanah. Peraturan ini merupakan landasan kebijaksanaan pengelolaan air tanah, sebagai perwujudan dari kewenangan Menteri yang bertanggung jawab dalam bidang pertambangan dalam pengurusan administratif atas sumber air tanah.



Gambar 6-10. Kerangka legislatif UU SDA, PP PSDA, PP Air Tanah dan PP Air Permukaan

Menurut Kodoatie dan Sjarief (2005) kerangka legislatif berperan sebagai rambu-rambu yang harus dipatuhi oleh semua pihak karena:

1. Air sebagai salah satu sumber kehidupan bersifat multi guna sekaligus berpotensi menimbulkan konflik. Peraturan dan perundangan tentang sumber daya air dapat berfungsi untuk dasar dan kerangka kerja pengelolaan yang terpadu.
2. Air perlu dikelola oleh semua pihak. Dalam kerangka legislatif perlu dijelaskan peran dari para pihak baik yang sinergi maupun yang kontra.
3. Air diperlukan sepanjang hidup sehingga kerangka legislatif ini harus dapat meyakinkan eksistensi sumber daya air yang berkelanjutan.
4. Perolehan air tidak boleh untuk spekulasi atau dibiarkan mengalir tanpa digunakan atau dibuang percuma (*waste*). Di tempat pemakaian akhir air masih dapat dimanfaatkan dan secara sosial dapat diterima sisa pemakaian tersebut (*conjunctive use*). Artinya pembuangan akhir air tidak menimbulkan masalah sosial di bagian hilirnya akibat pemanfaatan di bagian hulu misalnya tercemar, beracun dll. Air tidak boleh untuk pemakaian yang salah, pemakaiannya harus cukup beralasan dibandingkan dengan pemakaian yang lainnya.

Kunci utama untuk peraturan tentang air yang baik meliputi (Kodoatie dan Sjarief, 2005):

1. Transparan terhadap alokasi dan hak penguasaan untuk mengurangi potensi kegelisahan sosial yang pada akhirnya bisa menimbulkan konflik sosial.
2. Terbuka (transparan) dan demokratis dalam menetapkan suatu persyaratan sebelum hak-hak dan kewajiban atas air tanah diputuskan, dengan tujuan untuk menghindari konflik-konflik ekonomi, sosial ataupun politik bilamana terjadi perubahan.
3. Akuntabilitas dalam pengembangan dan pengelolaan sumber daya air.
4. Informasi yang cukup dan data memadai mengenai sumber daya air permukaan tanah dan air tanah.
5. Penentuan suatu mekanisme yang memastikan bahwa alokasi air antara kebutuhan kompetitif cocok dengan pemanfaatan berkelanjutan.

6. Akomodasi untuk hal-hal yang bersifat kekal. Walaupun beberapa sistem legal mengizinkan hak-hak yang bersifat kekal/abadi, konsesi batas waktu cenderung dipilih untuk hak-hak kekal tersebut.

6.4.2.1 Sejarah Pengaturan Air Tanah di Indonesia

Di Indonesia pengambilan dan pendayagunaan air tanah sudah mulai diatur sejak jaman kolonial Belanda hingga kini pada masa otonomi daerah. Sejarah pengaturan air tanah di Indonesia mulai dari periode sebelum kemerdekaan adalah sebagai berikut (Danaryanto dkk., 2008a):

1. Periode sebelum 1945

Sejak zaman kolonial, Pemerintah Hindia Belanda telah menuangkan kebijakan pengelolaan air tanah dalam suatu perundangan, yang pada dasarnya negara menguasai sumber alam tersebut. Pada tingkat permulaan, seperti tertera dalam Staatblad 1871 No. 19, pengeboran air tanah dalam dilaksanakan oleh Pemerintah (dalam hal ini Zeni Angkatan Darat). Setelah berdirinya Dinas Penyelidik Bumi (Dienst van het Grondpiewezen) pada 1873, seluruh kegiatan pengeboran dilaksanakan oleh dinas tersebut (Staatblad, No. 337). Pada lembaran tersebut diatur bahwa pengeboran artesis hanya boleh dilaksanakan oleh Menteri Pertambangan dari dinas tersebut (Danaryanto dkk., 2005).

Keterlibatan perusahaan pengeboran swasta dimulai pada 1884 (Staatblad 1884, No. 50) dan izin pengeboran air tanah lebih dalam dari 15 meter dikeluarkan oleh Gubernur Jenderal Pemerintah Hindia Belanda. Dua puluh delapan tahun kemudian, kewenangan pemberian izin pengeboran dilakukan oleh Dienst van Mijneuzen (Staatblad 1912, No. 430).

Pada 1924, peraturan baru dalam kegiatan pengeboran air tanah yang dilaksanakan oleh perusahaan swasta diberlakukan (Staatblad 1924, No. 74). Berdasarkan peraturan ini, pengeboran sumur lebih dalam dari 15 meter, dikenakan izin yang dikeluarkan oleh Pemerintah Provinsi, setelah dikonsultasikan dengan Biro Pertambangan. Izin ini diperlukan untuk mengubah, menutup, memperdalam, ataupun membersihkan sumur.

Pada 1936, peraturan pusat di bidang sumber daya air, yang berlaku di Jawa dan Madura diundangkan, Algemeen Waterreglement (Staatblad 1936, No. 489). Pasal 28 yang menyangkut air tanah pada peraturan tersebut, mengatur (Danaryanto dkk., 2005):

1. Tanpa izin dari Pemerintah Provinsi, kegiatan berikut ini dilarang:
 - a. Pengambilan air bawah tanah lebih dari 15 meter.
 - b. Pengubahan dan pembersihan sumur lebih dalam dari 15 meter.
2. Izin seperti di atas, akan dikeluarkan setelah dikonsultasikan terlebih dahulu dengan Kepala Biro Pertambangan.

Semua peraturan tentang air tanah diatas adalah produk masa kolonial, meskipun tetap di pakai selama masa-masa awal kemerdekaan, sampai pada saat ini tidak sesuai lagi.

2. Periode 1945 – 1974

Pada Tahun 1972 dikeluarkan Keputusan Presiden No. 64 tentang Pengaturan Penguasaan dan Pengurusan Uap Geothermal, Sumber Air Bawah Tanah dan Mata Air Panas. Seperti tercantum pada pasal 1 dari keputusan tersebut, tanggung jawab pengurusan administrasi atas geothermal, sumber air bawah tanah, mata air panas yang terdapat di Indonesia ada pada Menteri Pertambangan (Danaryanto dkk., 2005).

3. Periode 1974 – 2000

Sebagai perwujudan dari ayat (3) pasal 33 Undang-Undang Dasar 1945, maka pada 1974 diundangkan Undang-Undang No. 11 tentang Pengairan. Undang-Undang ini menitikberatkan pada fungsi sosial dari sumber daya air dan oleh sebab itu penguasaan atas penggunaan sumber daya tersebut dilakukan oleh Negara bagi kemakmuran rakyat.

Algemeen Waterreglement (AWR) Tahun 1936 yang dipakai sebagai dasar pengaturan sebelum undang-undang tersebut tidak memberikan dasar yang kuat untuk usaha-usaha pengembangan pemanfaatan air dan atau sumber-sumber air guna meningkatkan taraf hidup rakyat. Selain itu AWR hanya berlaku di Pulau Jawa dan Madura (Danaryanto dkk., 2005).

Khusus mengenai air tanah pasal 5 ayat (2) undang-undang tersebut menetapkan sebagai berikut "pengurusan administratif atas sumber air bawah tanah dan mata air panas sebagai sumber mineral dan tenaga adalah di luar wewenang dan tanggung jawab Menteri yang disebut dalam ayat (1) pasal ini" (maksudnya Menteri yang diserahi tugas urusan pengairan).

Pasal tersebut jelas mengamanatkan bahwa terhadap air bawah tanah diperlukan pengaturan tersendiri oleh Menteri yang diserahi tugas urusan air bawah tanah. Beberapa peraturan yang diterbitkan pada zaman sebelum otonomi daerah antara lain (Danaryanto dkk., 2005):

- a. Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 1982.
- b. Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No. 03/P/M/Per-tamben/1983.
- c. Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No. 08P/03/M.PE/1991.
- d. Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No. 02/P/101/M.PE/1994.
- e. Keputusan Direktur Jenderal Geologi dan Sumber Daya Mineral No. 005.K/10/DDJG/1995.
- f. Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No. 1945.K/102/-M.PE/1995.
Berkaitan dengan penyerahan sebagian urusan pemerintah di beberapa bidang kepada Daerah Tingkat II Otonomi Percontohan seperti diatur dalam Peraturan Pemerintah No. 8 Tahun 1995, maka di bidang air bawah tanah.
- g. Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No. 1946.K/102/-M.PE/1995.
Sebagai pelaksanaan pasal 7 Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No. 02/P/101/M.PE/1994, maka ditetapkan Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No. 1946.K/102/M.PE/1995 tanggal 26 Desember 1995 tentang Perizinan Pengeboran dan Pengambilan Air Bawah Tanah untuk Kegiatan Usaha Pertambangan dan Energi.

6.4.2.2 Pengaturan Air Tanah di Indonesia pada Masa Otonomi Daerah

Setelah diberlakukannya UU No. 22 Tahun 1999 (yang diganti dengan UU No. 32 Tahun 2004) dan PP No. 25 Tahun 2000, penyelenggaraan pengelolaan air tanah dilakukan oleh Pemerintah Kabupaten/Kota, Pemerintah Provinsi dan Pemerintah (Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, DESDM) sesuai dengan kewenangannya masing-masing. Acuan dalam penyelenggaraan pengelolaan air tanah berbasis cekungan air tanah adalah dikeluarkannya Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 716.K/40/MEM/2003 tentang Batas Horisontal Cekungan Air Tanah di Pulau Jawa dan Madura yang termuat dalam peta cekungan air tanah skala 1:250.000. Disamping itu juga disiapkan Keputusan MESDM yang memuat 16 pedoman teknis, prosedur, dan kriteria untuk melengkapi panduan dalam pengelolaan air tanah (Danaryanto dkk., 2005).

Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 1451.K/10/MPM/2000, tentang Tekhnis Penyelenggaraan Tugas Pemerintahan dibidang Pengelolaan Air Bawah Tanah. Keputusan Presiden No. 64 Tahun 1972 tentang Pengaturan Pengurusan dan penguasaan Uap Geotermal, Sumber Air Bawah Tanah dan Mata Air.

Untuk menyesuaikan pengelolaan sumber daya air di era otonomi daerah, Pemerintah telah menetapkan UU No. 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air yang bersifat desentralistik menggantikan UU No. 11 Tahun 1974 yang bersifat sentralistik. Selain undang-undang tersebut perlu dilengkapi dengan peraturan pemerintah tentang air tanah. Peraturan ini berfungsi sebagai payung dalam penyelenggaraan pengelolaan air tanah oleh pemerintah provinsi dan pemerintah kabupaten/kota termasuk sebagai acuan dalam penyusunan peraturan daerah di bidang air tanah. Substansi pengaturan pada peraturan pemerintah ini merupakan tindakan pemecahan berbagai masalah yang muncul dalam pengelolaan air tanah, disesuaikan dengan kebijakan yang ditetapkan oleh pemerintah (Danaryanto dkk., 2005).

Tindakan-tindakan pemecahan masalah tersebut antara lain:

- a. Menetapkan kebijakan pengelolaan air tanah secara terpadu dengan pengelolaan sumber daya air yang lain serta bagian tak terpisahkan dalam penataan ruang.
- b. Menetapkan kebijakan atas pengakuan hak dasar setiap orang untuk mendapatkan air, hak mendapatkan informasi, dan hak keterlibatan dalam pengelolaan.
- c. Menetapkan wewenang dan tanggung jawab pemerintah dan pemerintah daerah otonom dalam pengelolaan air tanah sesuai dengan prinsip-prinsip desentralisasi dan sifat pengaliran air tanah.
- d. Membuat perencanaan pengelolaan yang terpadu, didasarkan atas data dan informasi keairan yang menjamin ketersediaan data yang handal, tepat, akurat, dan berkesinambungan, serta menjamin terselenggaranya konservasi, pendayagunaan, pencegahan kemerosotan air tanah, dan pemberdayaan para pelaku pengelolaan.
- e. Menyelenggarakan konservasi dengan menetapkan kawasan lindung dan kawasan budidaya air tanah, serta upaya-upaya pelestarian dan pengawetan air tanah.
- f. Menyelenggarakan pendayagunaan air tanah secara terpadu dan menyeluruh dengan menerapkan prinsip-prinsip konservasi, keadilan, pemanfaatan akuifer lintas batas, *conjunctive use*, *demand*

management, dan korporasi yang mencerminkan keseimbangan nilai-nilai ekonomi, lingkungan, sosial, dan budaya dari air tanah.

- g. Menyelenggarakan pengendalian dan pemantauan pemanfaatan air tanah, melalui penciptaan instrumen pengendalian, penutupan daerah bagi pengambilan air tanah, pembatasan/penghentian pengambilan, peningkatan imbuhan, mitigasi, penegakan hukum yang taat asas, menerus, dan tidak diskriminatif.
- h. Menyelenggarakan pemberdayaan masyarakat, swasta, para pihak berkepentingan, pemerintah daerah, dan pemerintah dengan melibatkan pada setiap proses pengelolaan, pendidikan sepanjang hayat, dan pelatihan.

Beberapa pengaturan pengelolaan air tanah dalam peraturan pemerintah antara lain (Danaryanto dkk., 2005):

1. Pengelolaan pada cekungan air tanah

Pengelolaan air tanah dilaksanakan berdasarkan cekungan air tanah, dalam satu neraca air secara utuh mulai dari daerah imbuhan sampai daerah lepasan. Pengelolaan air tanah ini meliputi inventarisasi, perencanaan, pendayagunaan, konservasi, peruntukkan pemanfaatan, perizinan, pembinaan dan pengendalian, serta pengawasan dilaksanakan secara utuh dalam satu cekungan air tanah.

2. Perizinan air tanah

Perizinan air tanah merupakan bentuk legitimasi dalam pengelolaan air tanah juga dimaksudkan sebagai pengendalian dalam pendayagunaan air tanah. Izin hanya berlaku untuk masa tertentu, untuk izin pengambilan air tanah diberlakukan selama 1-3 tahun dan dapat diperpanjang kembali setelah memperhatikan kondisi lingkungan air tanah, dan dapat dicabut jika terbukti menimbulkan kerusakan lingkungan.

3. Pengendalian pengambilan air tanah

Kebijakan yang diambil dalam pengendalian pemanfaatan air tanah antara lain pengaturan persyaratan teknis dalam pemberian izin pengeboran, penurapan mata air, dan pengambilan, serta pembatasan debit pengambilan. Kebijakan ini bertujuan untuk menjaga lingkungan sumber daya air tanah, serta mempertahankan kesinambungan keberadaan air tanah agar mampu menopang kebutuhan air untuk jangka panjang dan masa datang.

6.4.2.3 Peraturan Pemerintah tentang Air Tanah

Undang-undang No. 7 Tahun 2004 telah mengatur mengenai pengelolaan sumber daya air baik air permukaan maupun air tanah. Namun pola pengaturannya lebih bersifat umum. Untuk mengatur pengelolaan air tanah secara spesifik pada tingkat/level di bawah UU SDA dibuat Peraturan Pemerintah (PP), Peraturan Presiden (PerPres) mengenai air tanah.

Pengaturan pengelolaan air tanah diperlukan untuk mewujudkan keseimbangan antara upaya konservasi dan pendayagunaan air tanah. Pelaksanaan kegiatan ini secara teknis perlu disesuaikan

dengan perilaku air tanah yang meliputi keterdapatan, penyebaran, potensi mencakup kuantitas dan kualitas air tanah, serta lingkungan air tanah. Namun karena keberadaannya dalam batuan yang pembentukannya erat kaitannya dengan proses geologi, maka dalam pengelolaan air tanah diperlukan pengaturan yang mendasarkan pada kaidah-kaidah geologi dan hidrogeologi (PP No. 43 Tahun 2008 tentang Air Tanah). Peraturan Pemerintah RI No. 43 Tahun 2008 tentang Air Tanah merupakan pengganti Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 1982 tentang Tata Pengaturan Air (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1982 No. 37, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia No. 3225), yang terdiri atas 10 BAB dengan 97 Pasal. Secara garis besar PP ini ditunjukkan pada Tabel berikut.

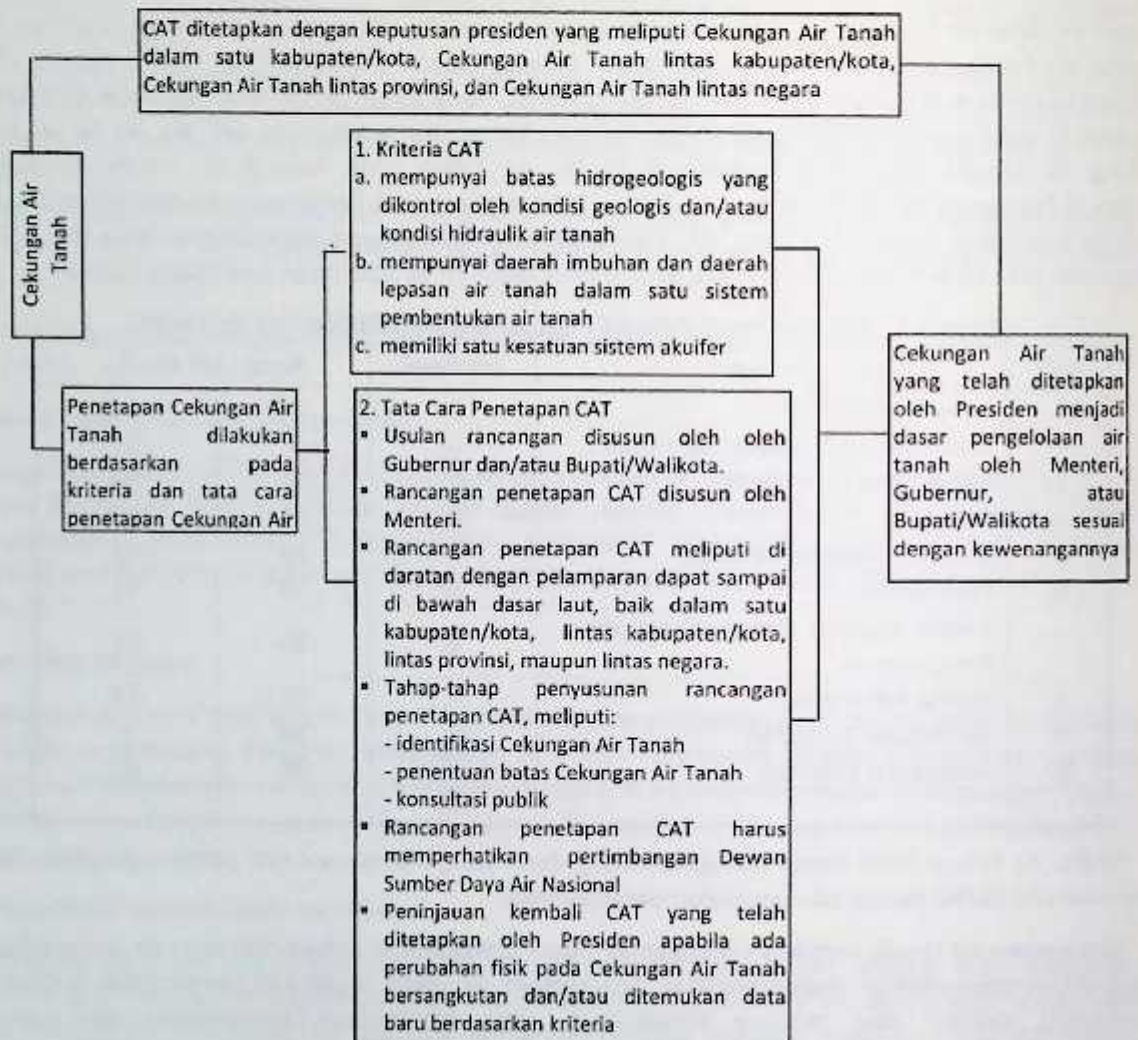
Tabel 6-1. Bab dan Pasal dalam PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah

Bab	Uraian	Jml Pasal	Pasal...s/d Pasal...	
1	Ketentuan Umum	1	1	-
2	Landasan Pengelolaan Air Tanah	16	2	17
3	Pengelolaan Air Tanah	49	18	66
4	Perizinan	13	67	79
5	Sistem Informasi air tanah	3	80	82
6	Pembiayaan	3	83	85
7	Pemberdayaan, Pengendalian dan Pengawasan	6	86	91
8	Sanksi Administratif	2	92	93
9	Ketentuan Peralihan	1	94	-
10	Ketentuan Penutup	3	95	97
		97		

PP No. 43 Tahun 2008 hanya mengatur ruang darat yang mempunyai CAT (47%) sedangkan ruang darat Non-CAT (53%) belum ada perangkat peraturannya.

Manajemen air tanah berbasis cekungan air tanah dimaksudkan bahwa cekungan air tanah sebagai acuan dalam menentukan segala kegiatan pengelolaan air tanah mulai dari pengambilan kebijakan, penyusunan strategi dan rencana pengelolaan, serta pelaksanaan, pemantauan dan evaluasi pengelolaan mencakup kegiatan konservasi, pendayagunaan air tanah dan pengendalian daya rusak air. Oleh karena itu disusun peraturan yang khusus mengatur tentang cekungan air tanah, yaitu Keputusan Presiden tentang Penetapan Cekungan Air Tanah. Manajemen air tanah berbasis konservasi merupakan pengelolaan air tanah dengan memelihara dan melindungi keberadaan dan kondisi lingkungan air tanah guna mempertahankan kelestarian dan kesinambungan ketersediaannya dengan menitikberatkan daerah imbuhan air tanah (*recharge area*) dan daerah luhan air tanah (*discharge area*). Di samping itu manajemen air tanah berbasis konservasi diharapkan bisa menjadi alternatif dalam menjaga kesinambungan sumber daya air yang ada agar penggunaannya dapat lebih bertanggung jawab. Sehingga kekurangan air atau persediaan air yang kian menipis tersebut dapat teratasi jika ada kerja sama yang baik antara masyarakat dan pemerintah dalam melakukan pengelolaan lingkungan hidup yang baik.

Berikut merupakan gambaran mengenai penetapan cekungan air tanah.



Gambar 6-11. Diagram penetapan cekungan air tanah

Keputusan Presiden Tahun 2011 tentang Penetapan Cekungan Air Tanah telah berlaku sebagai acuan dalam pengelolaan air tanah. Dalam Keputusan Presiden tentang Penetapan Cekungan Air Tanah, terdapat Lampiran Daftar Cekungan Air Tanah yang telah teridentifikasi di Indonesia, yaitu sebanyak 421 Cekungan Air Tanah (CAT) dengan potensi air tanah per tahun sebesar:

- CAT akuifer bebas : 496.217 juta m³/tahun
- CAT akuifer tertekan: 20.906 juta m³/tahun

6.4.2.4 Peraturan Kualitas dan Kuantitas Air Tanah

Kuantitas air adalah adanya suatu jumlah air dan keberadaan air pada suatu tempat dan waktu. Jadi eksistensi air yang memadai pada suatu lokasi dan suatu waktu dapat diartikan sebagai kuantitas air, misalnya volume air pada suatu waduk, berapa debit air yang mengalir di sungai, tinggi air pada saluran, dan kecepatan air (Kodoatie dan Sjarief, 2005).

Kualitas air menunjukkan kondisi air, misal air minum, air bersih, air baku, air kotor, tercemarnya air, dan air asin. Standard tentang kualitas air sudah dibuat oleh berbagai macam instansi yang mencakup semua hal yang berkaitan dengan air tanah baik secara langsung maupun tidak langsung. Di Indonesia peraturan tentang kuantitas dan kualitas air telah banyak dibuat baik yang berupa peraturan-perundangan, manual, standar (misal SNI), pedoman (Kodoatie dan Sjarief, 2005).

Air tanah mempunyai peran penting dalam pemenuhan kebutuhan dan keberlanjutan kehidupan masyarakat, karenanya pengaturan kuantitas dan kualitas air tanah sangat diperlukan. Peraturan-peraturan tentang kuantitas dan kualitas air berfungsi sebagai pelindung air untuk tetap ada (*exist*) pada suatu tempat (*space*) dan pada suatu waktu (*time*) di dalam pengelolaan dan perencanaan sumber daya air. Di Indonesia sudah ada beberapa peraturan pemerintah yang mengatur tentang kualitas air tanah, diantaranya PP No. 82 Tahun 2001 tentang Kualitas Air, dan Peraturan Menteri Kesehatan No. 528 Tahun 1982 tentang Kualitas Air Tanah yang berhubungan dengan Kesehatan

Menurut PP No. 82 Tahun 2001 pengelolaan kualitas air dilakukan sebagai upaya pemeliharaan air sehingga tercapai kualitas air yang diinginkan sesuai peruntukannya untuk menjamin agar kualitas air tetap dalam kondisi alamiahnya.

Bahkan dalam PerMen Kesehatan No. 528 Tahun 1982 disebutkan bahwa air tanah mempunyai peranan dalam pemeliharaan, perlindungan dan mempertinggi derajat kesehatan rakyat, sehingga perlu dilakukan pengendalian kualitas air tanah, pencegahan terhadap pencemaran air tanah dan perlu melindungi masyarakat dari penggunaan air tanah yang tidak memenuhi syarat-syarat kesehatan.

6.4.2.5 Sanksi Administratif dan Penegakan Hukum

Setelah pembuatan kerangka legislatif, dalam hal ini adalah peraturan perundangan, hal yang sangat penting dalam pengelolaan air tanah adalah penegakkan hukum (*law enforcement*). Banyak peraturan-perundangan telah diterbitkan. Namun pada implementasinya, sering peraturan-peraturan tersebut dilanggar. Walaupun dalam peraturan telah disebutkan sanksi maupun hukuman yang tegas bilamana terjadi pelanggaran, hal ini disebabkan pengawasan oleh pihak berwenang (lebih dominan dari Pemerintah) yang belum berjalan baik.

Sanksi administratif tersebut berupa:

1. peringatan tertulis;
2. penghentian sementara seluruh kegiatan; atau
3. pencabutan izin.

Pengenaan sanksi administratif berupa penghentian sementara kegiatan dilakukan setelah pemegang izin diberi peringatan secara tertulis sebanyak 3 kali berturut-turut dengan tenggang waktu 1 bulan. Kemudian jika pemegang izin tidak memenuhi persyaratan yang ditetapkan setelah dikenakan sanksi administratif berupa penghentian sementara, Pemerintah berhak menjatuhkan sanksi administratif berupa pencabutan izin. Namun sebelum melaksanakan pencabutan izin tersebut, Pemerintah terlebih dahulu memberikan kesempatan selama jangka waktu paling lama 3 bulan untuk memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

6.4.3 Pembiayaan/Finansial

Setelah ada kebijakan dan peraturan, faktor penting lainnya dalam *enabling environment* yang menjadi syarat suatu manajemen dapat berjalan dengan baik adalah faktor finansial/pembiayaan. Tanpa adanya biaya, maka proses manajemen tidak akan berjalan walaupun sudah ada kebijakan dan kerangka kerja legislatif yang mendasarinya.

Pembangunan selalu memerlukan dana untuk pembiayaan. Pada saat proyek pelaksanaan pembangunan infrastruktur keairan selesai dan mulai dimanfaatkan masih diperlukan biaya, yaitu biaya untuk operasional dan pemeliharaan agar infrastruktur tersebut dapat berfungsi sesuai dengan umur bangunan atau umur proyek. Disamping itu, pemanfaatan bangunan itu juga menghasilkan pendapatan (*benefit* atau *revenue*) yang bilamana nilainya secara keseluruhan lebih besar dengan biaya, maka proyek dikatakan untung (Kodoatie dan Sjarief, 2005).

Pembiayaan pengelolaan air tanah antara lain dilakukan untuk kegiatan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air tanah. Pembiayaan tersebut antara lain meliputi:

1. biaya sistem informasi
2. biaya perencanaan termasuk biaya studi
3. biaya pelaksanaan konstruksi termasuk biaya pengawasan
4. biaya operasi, pemeliharaan
5. biaya pemantauan, evaluasi, peran dan pemberdayaan masyarakat.

Biaya sistem informasi merupakan biaya yang dibutuhkan untuk pengambilan dan pengumpulan, penyimpanan dan pengolahan, pembaharuan, penerbitan serta penyebarluasan data dan informasi air tanah.

Biaya perencanaan merupakan biaya yang dibutuhkan untuk kegiatan inventarisasi air tanah, penetapan zona konservasi air tanah, penyusunan rancangan rencana pengelolaan air tanah, dan penetapan rencana pengelolaan air tanah.

Biaya pelaksanaan konstruksi merupakan biaya untuk memenuhi kebutuhan penyediaan bangunan fisik.

Biaya operasi dan pemeliharaan merupakan biaya untuk operasi prasarana air tanah dan pemeliharaan prasarana air tanah pada Cekungan Air Tanah. Biaya pemantauan, evaluasi, dan

pemberdayaan masyarakat merupakan biaya yang dibutuhkan untuk memantau dan mengevaluasi pengelolaan air tanah serta pembiayaan untuk pemberdayaan masyarakat dalam pengelolaan air tanah.

Biaya sistem informasi dan biaya perencanaan termasuk dalam biaya modal tidak langsung, sedangkan biaya pelaksanaan konstruksi termasuk biaya modal langsung. Biaya operasional dan pemeliharaan serta biaya pemantauan, evaluasi, dan pemberdayaan masyarakat termasuk dalam biaya tahunan. Jenis biaya akan lebih rinci dijelaskan pada sub bab berikut.

Pengelolaan sumber daya air membutuhkan bermacam-macam biaya. Biaya itu antara lain: Biaya investasi (modal), biaya tahunan dan biaya operasi dan pemeliharaan.

1. Biaya Modal/Investasi

Biaya modal (*capital cost*) untuk pembangunan suatu konstruksi, adalah jumlah semua pengeluaran yang dibutuhkan mulai dari pra studi sampai proyek selesai dibangun. Semua pengeluaran yang termasuk biaya modal ini dibagi menjadi dua bagian yaitu: biaya langsung dan biaya tak langsung (Kuiper, 1971).

A. Biaya langsung (*direct cost*)

Biaya ini merupakan biaya yang diperlukan untuk pembangunan suatu proyek. Misal, untuk membangun sumur resapan, biaya langsung yang diperlukan terdiri antara lain:

- biaya pembebasan tanah
- biaya konstruksi (galian dan timbunan, pembuatan dinding sumur dari pasangan batu atau bambu, dll)
- biaya tenaga kerja
- dan lainnya

Semua biaya inilah kecuali biaya pembebasan tanah yang nantinya menjadi biaya konstruksi yang ditawarkan pada kontraktor. Biasanya biaya ini ditanggung oleh pemilik (*owner*). Perlu diketahui penentuan jenis material yang dipakai dan tipe bangunan dilakukan pada tahap perencanaan.

B. Biaya tak langsung (*indirect cost*)

Biaya ini dibagi menjadi tiga komponen yaitu: Kemungkinan yang tak diduga, biaya teknik dan biaya bunga.

- Kemungkinan/hal yang tak diduga (*contingencies*) dari biaya langsung dapat dibagi menjadi tiga, yaitu: biaya/pengeluaran yang mungkin timbul tetapi tidak pasti, biaya yang mungkin timbul namun belum terlihat dan biaya yang mungkin timbul akibat tidak tetapnya harga pada waktu yang akan datang (misal kemungkinan adanya kenaikan harga). Biasanya biaya untuk ini merupakan suatu angka prosentase dari biaya langsung, bisa misal, 5%, 10% ataupun 15%. Hal ini sangat tergantung dari pihak pemilik dan perencana. Semakin berpengalaman pemilik ataupun perencana, besarnya prosentase ini bisa lebih kecil.

- Biaya teknik (*engineering cost*) adalah biaya untuk pembuatan desain mulai dari studi awal (*preliminary study*), pra studi kelayakan, studi kelayakan, biaya perencanaan dan biaya pengawasan selama waktu pelaksanaan konstruksi.
- Bunga (*interest*) dari periode waktu mulai ide sampai pelaksanaan fisik, bunga berpengaruh terhadap biaya langsung, biaya kemungkinan dan biaya teknik sehingga harus diperhitungkan.

2. Biaya tahunan (*annual cost*)

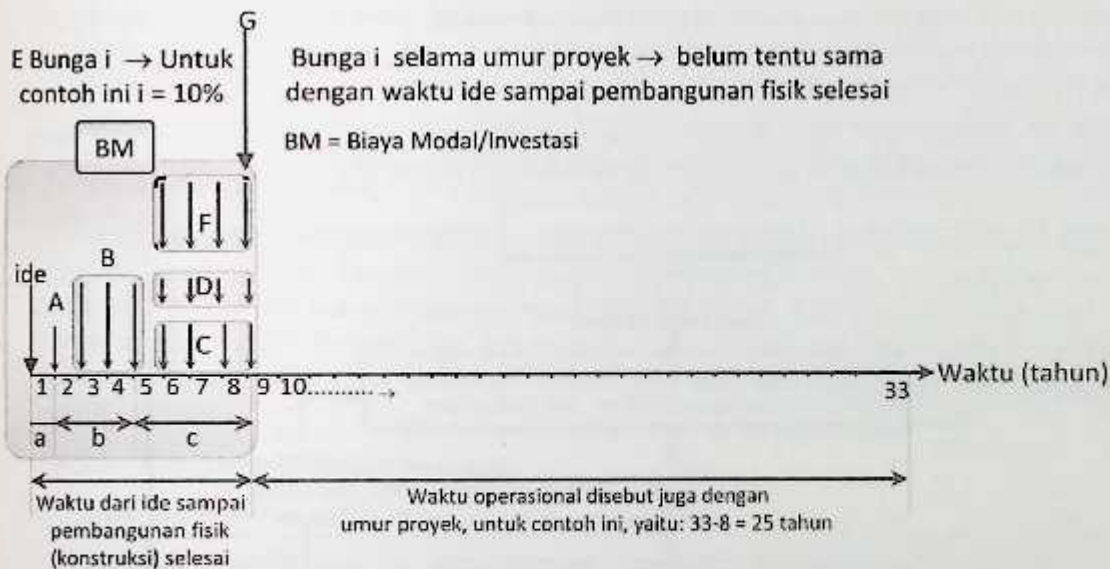
Umumnya, saat penyelesaian pembangunan fisik suatu proyek merupakan waktu awal dari proyek dioperasikan dan dapat juga disebut awal dari umur proyek sesuai dengan rekayasa teknik yang telah dibuat pada waktu detail desain. Pada saat ini pemanfaatan proyek mulai dilaksanakan, misal sebagai sumber air bersih, irigasi, pembangkit tenaga listrik dan lain sebagainya. Namun ada juga proyek yang sifatnya masal misalnya pembangunan perumahan, awal dari pemanfaatannya tidak harus menunggu sampai seluruh perumahan dibangun. Bisa terjadi satu blok dari suatu kawasan pemukiman sudah dapat ditawarkan kepada pembeli (konsumen) untuk ditempati. Dalam hal ini *benefit* (manfaat) sudah sejak dini dapat diperoleh dari proyek tersebut.

Selama pemanfaatan atau operasionalnya, beberapa biaya masih diperlukan sampai umur proyek selesai. Biaya ini merupakan beban yang masih harus dipikul oleh pihak pemilik atau pemodal (*investor*). Pada prinsipnya biaya yang masih diperlukan sepanjang umur proyek ini, yang merupakan biaya tahunan (*annual cost*), terdiri dari 4 komponen, yaitu: bunga, inflasi, penyusutan (*depresiasi*) serta biaya operasi dan pemeliharaan.

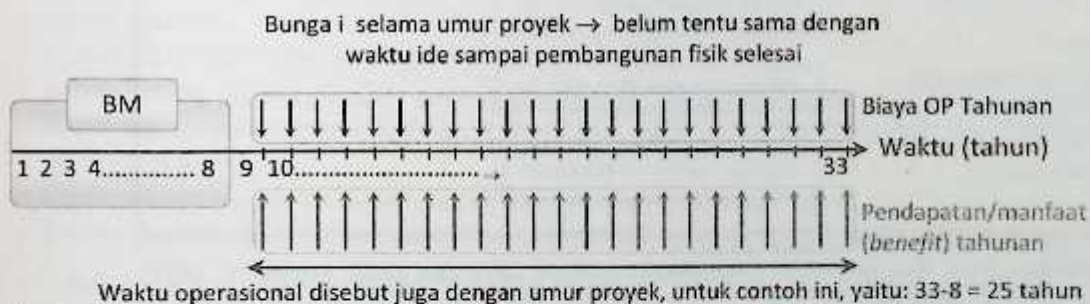
- Bunga: biaya ini menyebabkan terjadinya perubahan biaya modal karena adanya tingkat suku bunga selama umur proyek. Besarnya bisa berbeda dengan bunga selama waktu dari ide sampai pelaksanaan fisik selesai. Bunga ini umumnya merupakan komponen terbesar yang diperhitungkan terhadap biaya modal.
- Inflasi: Inflasi merupakan faktor yang menyebabkan nilai mata uang turun dan menyebabkan kenaikan harga barang. Sangat sulit untuk mengukur inflasi yang tepat karena kenaikan harga barang atau jasa tersebut tidak seragam. Dengan kata lain, perbandingan kenaikan atau prosentase kenaikan harga semua jenis barang merupakan hal yang random. Uraian singkat tentang pengaruh inflasi di sini hanya difokuskan pada suatu angka inflasi yang pasti pada suatu periode yang dipakai sebagai parameter yang mempengaruhi tingkat suku bunga. Bila ingin mengkaji dan menganalisis inflasi ini secara detail, pembaca dipersilahkan untuk mempelajari ilmu ekonomi. Secara sederhana, untuk perhitungan pengaruh inflasi terhadap bunga adalah: tingkat suku bunga dikurangi inflasi sama dengan tingkat suku bunga yang sesungguhnya (Kodoatie, 2007).
- Penyusutan/depresiasi atau amortisasi: menurut Kuiper (1971) depresiasi adalah turunya/penyusutan suatu harga/nilai dari sebuah benda karena pemakaian dan kerusakan atau keusangan benda itu; sedangkan amortisasi adalah pembayaran dalam suatu periode tertentu (tahunan misalnya) sehingga hutang yang ada akan terbayar lunas pada akhir periode tersebut. Prinsip perhitungannya sama yaitu mencari harga tahunan (atau bulanan) dari harga *future* (harga yang akan datang) yang diketahui dengan *interest rate* (bunga) yang berlaku (Kodoatie, 2007).

3. Biaya Operasi Pemeliharaan

Agar dapat memenuhi umur proyek sesuai yang direncanakan pada detail desain, maka diperlukan biaya operasi dan pemeliharaan untuk proyek tersebut. Biaya ini adalah semua biaya-biaya untuk administrasi (misal gaji pegawai, kegiatan administrasi, pembelian alat tulis kantor), supervisi, operasi, pemeliharaan (pembelian alat, pembelian bahan untuk infrastruktur), preservasi dan perlindungan suatu infrastruktur. Bisa juga biaya operasi dan pemeliharaan ditentukan besarnya artinya tidak merupakan prosentase dari biaya modal. Dalam kaitannya dengan ide sampai umur proyek selesai ditunjukkan dalam Gambar 6-12.



a. Sketsa diagram waktu dan biaya dari ide sampai terwujud pembangunannya



b. Setelah proyek selesai dibangun identik dengan mulainya operasi & pemeliharaan sesuai umur proyek

Gambar 6-12. Sketsa diagram waktu dan biaya dari ide sampai terwujud pembangunannya serta pengoperasiannya sampai umur proyek (Kuiper, 1971; Kodoatie dan Sjarief, 2005)

Keterangan Gambar 6-12:

A = Biaya studi → biasanya disebut studi kelayakan

B = Biaya perencanaan (*detail engineering design/D&D*)

C = Biaya pengawasan

D = Biaya *contigency* (biaya tak diduga)

E = Bunga *i* (*interest*); untuk contoh tersebut *i* diambil 10 % → faktor ekivalensi dari semua biaya yang ada sesuai dengan waktu

A s/d E adalah biaya-biaya tak langsung (*indirect cost*)

F = Biaya pelaksanaan (*construction*) → biaya langsung (*direct cost*)

G = Biaya modal (*capital cost*) yaitu semua biaya dari A s/d F yang diekuivalensikan dengan bunga 10 %

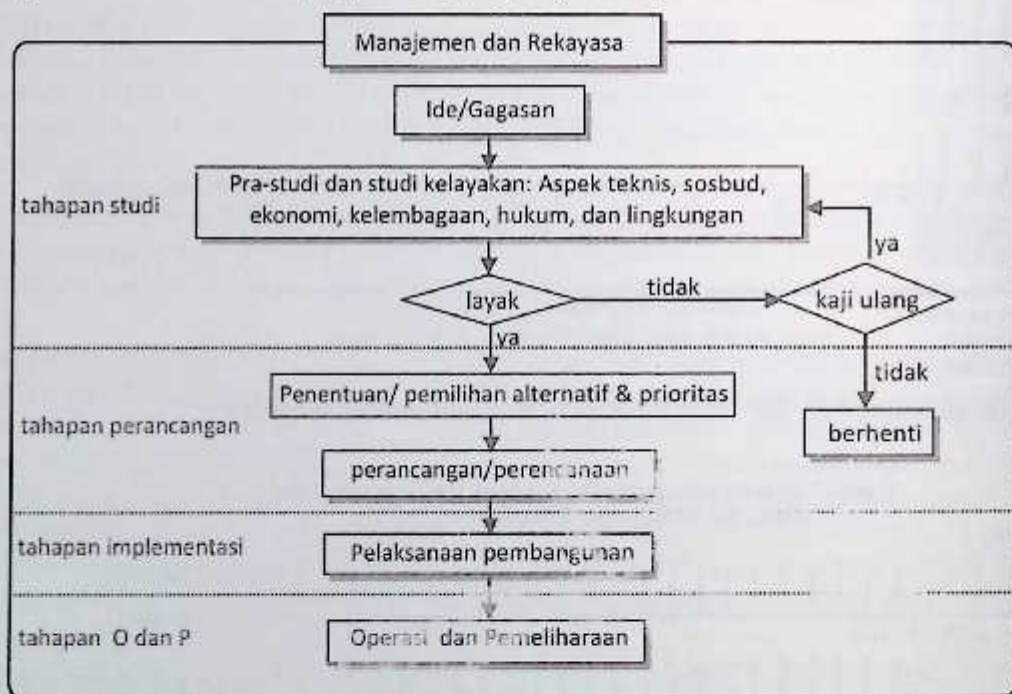
H = Bunga selama umur (operasi) proyek → bisa sama dengan E bisa tidak sama

a = Waktu *pre-eliminatory studi*, pra-studi sampai studi kelayakan (waktu studi) → untuk contoh ini 1 tahun

b = Waktu detail desain (waktu perencanaan) → untuk contoh ini 3 tahun

c = Waktu pembangunan fisik (waktu pelaksanaan) → untuk contoh ini 4 tahun

Berikut ini diilustrasikan alur kegiatan suatu proses pembangunan yang bisa dipakai sebagai salah satu langkah dalam memadukan program-program pengembangan infrastruktur.



Gambar 6-13. Alur proses pembangunan (Kuiper, 1971 dan 1989; Kodoatie 1995)

6.4.3.1 Sumber Dana

Sumber dana untuk membiayai kegiatan pengelolaan air tanah dapat berupa:

1. Anggaran Pemerintah/Pemerintah Daerah

Anggaran Pemerintah atau Pemerintah Daerah bersumber dari:

- a. APBN untuk membiayai kegiatan pengelolaan air tanah pada Cekungan Air Tanah lintas provinsi dan lintas negara.
- b. APBD Provinsi untuk membiayai kegiatan pengelolaan air tanah pada Cekungan Air Tanah lintas kabupaten/kota.
- c. APBD Kabupaten/Kota untuk membiayai kegiatan pengelolaan air tanah pada Cekungan Air Tanah dalam kabupaten/kota.

2. Anggaran swasta

Bersumber dari anggaran swasta atas peran serta dalam pengelolaan air tanah. Jika terdapat kepentingan mendesak atau kepentingan yang memerlukan penanganan cepat dan menjadi permasalahan bersama pada Cekungan Air Tanah lintas Provinsi, lintas Kabupaten/Kota, pembiayaan pengelolaannya ditetapkan bersama oleh Pemerintah, Pemerintahan Daerah Provinsi, dan Pemerintahan Daerah Kabupaten/Kota yang bersangkutan dalam bentuk pembagian beban biaya atau bentuk lainnya, sesuai kondisi kepentingan tersebut dengan peran serta swasta.

Biaya untuk kepentingan mendesak misalnya kepentingan yang memerlukan penanganan cepat dan menjadi permasalahan bersama antar pemerintahan daerah dalam pengelolaan air tanah pada Cekungan Air Tanah lintas Provinsi, lintas Kabupaten/Kota ditetapkan bersama oleh Pemerintah, Pemerintahan Daerah Provinsi, dan Pemerintahan Daerah Kabupaten/Kota yang bersangkutan dalam bentuk kerjasama antara lain pembagian beban biaya atau bentuk lainnya sesuai kondisi kepentingan yang mendesak.

6.4.3.2 Kebijakan-Kebijakan Investasi

Investasi-investasi pengelolaan air tanah, antara lain:

- Keseluruhan pengelolaan air tanah meliputi: konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air.
- Pembangunan serta operasi dan pemeliharaan infrastruktur air tanah, seperti sumur pantau dan sumur resapan.
- Perbaikan infrastruktur air tanah.
- Keberlanjutan sistem jaringan data yang memadai, hal ini didasarkan atas konsep bahwa air bersifat dinamis yang selalu membutuhkan rentang data yang cukup dari masa lampau, sekarang dan untuk prediksi ke depan.
- Penyeimbang suplai dan permintaan dalam dimensi waktu dan ruang.
- Barang publik seperti perlindungan masyarakat dari kejadian yang merugikan misal kekeringan.

Beberapa kebijakan-kebijakan lain yang memberikan dampak kepada pengelolaan air tanah sebagai bagian dari pengelolaan sumber daya air meliputi (GWP, 2001):

- Kebijakan makro-ekonomi: Kebijakan moneter, fiskal, dan perdagangan sangat mempengaruhi langkah dan tipe pengembangan ekonomi umumnya dan sektor air khususnya. Dalam penentuan

kebijakan pembangunan nasional, regional (provinsi, kabupaten/kota) diperlukan kajian makro tentang perkembangan ekonomi dan pengaruhnya terhadap perkembangan dan pengelolaan sumber daya air termasuk air tanah

- Perubahan ekonomi: Perubahan ekonomi memberikan dampak terhadap PSDA misalnya devaluasi dapat menyebabkan kenaikan yang tinggi pada ekspor tanaman irigasi, insentif pajak akan mengakibatkan pertumbuhan kebutuhan air. Industri yang intensif dan perdagangan yang liberal dapat mengakibatkan perubahan pada keseimbangan produk yang juga mengakibatkan perubahan pada pemakaian air termasuk air tanah.
- Kebijakan yang berorientasi ke peningkatan penghasilan: Kebijakan tersebut seperti PAD dapat secara langsung memberikan dampak negatif terhadap keberlanjutan sumber daya air. Sebagai contoh, pemberian izin yang sangat mudah kepada para pengembang untuk pemukiman baru dan pembangunan kawasan industri mengakibatkan perubahan tata guna lahan yang cepat dan besar. Akibatnya banjir dan kekeringan akan meningkat drastis. Peningkatan banjir adalah akibat peningkatan *run-off* sekaligus pengurangan resapan air yang memberi dampak kekeringan pada musim kemarau. Bilamana dampak banjir dan kekeringan juga dimasukkan dalam analisis finansial, maka ada kemungkinan hasilnya negatif karena umumnya kerugian yang terjadi cukup besar.
- Kebijakan tentang pemanfaatan kayu untuk berbagai keperluan termasuk untuk ekspor dapat menyebabkan lahan hutan menjadi gundul karena hutan dijarah habis-habisan. Kebijakan ini akan memberi pengaruh yang signifikan kepada pengelolaan sumber daya air terutama dalam kaitannya terhadap keberlanjutan ketersediaan air baik air permukaan dan air tanah.
- Investasi publik: Investasi dalam banyak sektor dapat mengakibatkan permintaan untuk air meningkat, seperti perumahan, kota baru dan perkembangan industri, transportasi, daya dan energi, pertanian dan kepariwisataan.
- Investasi publik dan swasta dalam sektor air: Sektor air adalah modal intensif yang potensial membutuhkan biaya yang sangat besar. Misalnya investasi untuk irigasi, air bersih, pengolahan air kotor, banjir, dan perlindungan lingkungan. Hal ini akan menjadi persoalan yang sulit ketika aspek sosial dan aspek lingkungan harus menjadi pertimbangan yang penting.
- Investasi air nasional, regional maupun lokal: Investasi air nasional, regional, maupun lokal oleh Pemerintah yang berdasar pada pengelolaan sumber daya air terpadu yang memadukan tiga aspek utama yaitu ekonomi, sosial dan lingkungan akan merupakan sumber utama yang teridentifikasi. Salah satu strateginya adalah konsep pembiayaan untuk program yang realistis dan yang dapat dijalankan meliputi semua aspek pengelolaan sumber daya air, termasuk konservasi dan pengolahan limbah.

Pra-kondisi untuk kebijakan investasi yang baik meliputi:

- Proyeksi makroekonomi: untuk jangka pendek 1-2 tahun, untuk jangka menengah 3-5 tahun dan jangka panjang bisa 10 sampai 25 tahun.
- Koordinasi yang memadai baik di pusat, provinsi maupun kabupaten/kota dan peninjauan kembali semua aturan.
- Program investasi yang dijabarkan secara transparan, demokratis dan akuntabilitas.
- Kemampuan pengujian/penilaian program pembangunan yang memadai.
- Data dan informasi mengenai suplai dan kebutuhan air (neraca air) yang *up-to-date*.

- Institusi-institusi yang mempunyai kapasitas untuk mengimplementasikan secara efektif lingkup dan volume program atau yang sering disebut tugas (tugas dan fungsi).
- Institusi yang mampu melakukan kontrol, evaluasi dan monitoring terhadap program yang sedang berlangsung.
- Investasi disamping untuk kepentingan ekonomi juga harus dapat dipakai untuk kepentingan sosial.

Strategi investasi yang aplikatif untuk sektor air meliputi:

- Estimasi kebutuhan investasi secara keseluruhan dalam aspek-aspek ekonomi, sosial dan lingkungan yang harmoni dan seimbang.
- Alokasi tanggung jawab untuk penyediaan dan pencarian dana (misal antar pemerintahan di level pusat, provinsi dan kabupaten/kota, antar masyarakat, agen-agen otonom, dan perusahaan swasta).
- Identifikasi sumber dana hibah dan pinjaman konsesional (donor-donor bilateral dan multi lateral misal ADB, World Bank).
- Definisi dari peranan sektor swasta, dan target finansial untuk konsesi, joint venture, penggabungan, dsb.
- Penilaian dalam lingkup untuk pendekatan-pendekatan alternatif, seperti pengelolaan kebutuhan atau instrumen ekonomi untuk mengurangi kebutuhan modal.
- Tafsiran dalam jangkauan investasi untuk tingkat masyarakat.
- Skema dan program yang jelas dalam pembiayaan untuk air sebagai bahan baku maupun sebagai hasil dari pembuangan air limbah.
- Penilaian yang jelas mengenai peranan publik dan sektor swasta serta instrument aturan yang terkait.
- Pengumpulan/pencairan dana dapat didelegasikan oleh pemerintah kepada para pihak lainnya. Delegasi yang didirikan harus dapat menghasilkan dan memperoleh sumber dana dengan kondisi memadai. Sebagai contoh pemerintah kabupaten/kota memiliki kapasitas untuk memperoleh dana tanpa diperlukan garansi dari pemerintah pusat dan selanjutnya perusahaan swasta dapat membiayai pinjamannya untuk suatu proyek.

6.4.3.3 Pengembalian Biaya dan Kebijakan-Kebijakan Denda

Ada beberapa kondisi untuk aturan biaya pemulihan yang baik, yaitu:

- Pemahaman dan kesadaran masyarakat secara umum tentang kebutuhan perbaikan kerugian. Dalam hal ini, masyarakat mungkin akan membutuhkan informasi untuk mempengaruhi mereka, apabila mereka menganggap air sebagai hadiah dari alam.
- Dukungan politik yang kuat serta penghindaran terhadap janji yang terlalu muluk-muluk (sehingga tidak bisa dipenuhi).
- Perhatian bagi masyarakat yang kurang mampu dan konsumen yang dirugikan. Dukungan dan bantuan langsung umumnya mungkin akan lebih efektif, karena pengalaman menyimpulkan biasanya subsidi justru menguntungkan pihak-pihak yang mampu atau kaya.
- Keuangan transparan yang juga meliputi pengawasan independen.

- Aturan tegas, umum dan jelas mengenai tarif yang telah ditetapkan. Karena kekurangan kompetisi dan kepekaan air secara sosial, pemerintah biasanya mengatur harga walaupun sudah ditetapkan oleh fasilitas umum.
- Pelanggan cenderung menanggapi kenaikan harga dengan tuntutan pelayanan yang lebih baik.

6.4.3.4 Penilaian Investasi

Suatu bentuk penilaian atau penaksiran investasi (*investment appraisal*) dibutuhkan untuk dapat mengetahui proyek air tanah yang paling baik. Prinsip dalam penilaian investasi dapat dilihat dari analisis biaya yang efektif atau perbandingan antara manfaat dan biaya. Untuk konservasi air tanah harus dilakukan secara hati-hati, karena harus berdasarkan ketiga pilar pembangunan: ekonomi, sosial dan lingkungan yang harmoni.

Ketika investor ingin memberikan modal, maka keuntungan menjadi dasar utama, namun karena air merupakan benda dengan sifat fungsi yang bersamaan yaitu secara ekonomi menguntungkan namun secara sosial harus tetap memperhatikan masyarakat dan sekaligus secara lingkungan harus tetap dapat memelihara ekosistem yang ada.

Dalam UU No. 7 Tahun 2004, keseimbangan akan ketiga aspek tersebut dinyatakan dengan jelas. Oleh karena itu dalam penilaian tersebut dasar legislatifnya harus mengacu pada ketentuan dalam UU tersebut.

6.5 Peran-Peran Institusi

Dalam manajemen aktifitas dimulai dari perencanaan, pelaksanaan, pengawasan, operasi dan pemeliharaan serta evaluasi dan monitoring. Termasuk di dalamnya pengorganisasian, kepemimpinan, pengendalian, pengawasan, penganggaran dan keuangan. Rincian fase utama manajemen secara umum meliputi:

- Perencanaan (*planning*)
- Pengorganisasian (*organizing*)
- Kepemimpinan (*directing*)
- Pengkoordinasian (*coordinating*)
- Pengendalian (*controlling*)
- Pengawasan (*supervising*)
- Penganggaran (*budgeting*)
- Keuangan (*financing*)

Disamping rincian fase manajemen tersebut juga diperlukan mekanisme sehingga terwujud suatu koordinasi yang efektif. Menurut Pearce & Robinson (2005), Svendsen (2004), Terry (2003) dan Sjarief (1994) dalam Hasibuan (2007) *clear role sharing* merupakan kunci utama untuk melaksanakan koordinasi dengan efisien dan efektif. Tanpa adanya pembagian tugas yang jelas untuk siapa mengerjakan apa dan tanggung jawabnya apa, maka pengelolaan air tanah menjadi tidak dapat terlaksana dengan baik. Penyusunan mekanisme koordinasi yang efektif antar institusi dengan integrasi

adalah inti dari konsolidasi (Sjarief, 1994 dan Basuki, 1992). Grigg (1988) dalam Basuki (1992) menyatakan bahwa koordinasi adalah kunci efektifnya suatu organisasi dan juga memperkenalkan koordinasi adalah bagian dari dasar militer untuk konsep operasi C³, *communication, control, command, and intelegence*. Konsep ini menyediakan manajer sebagai alat pengecekan yang cepat untuk mengetahui sebaikmana operasi daripada organisasi. Dengan dasar C³ mempunyai 4 (empat) fungsi kritikal dari organisasi: *command* untuk meyakinkan *control*; komunikasi untuk meyakinkan adanya koordinasi; dan intelejen untuk mencari informasi yang jelas.

Berdasarkan PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah, pembagian kewenangan pengelolaan cekungan air tanah dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 6-2. Kewenangan pengelolaan air tanah

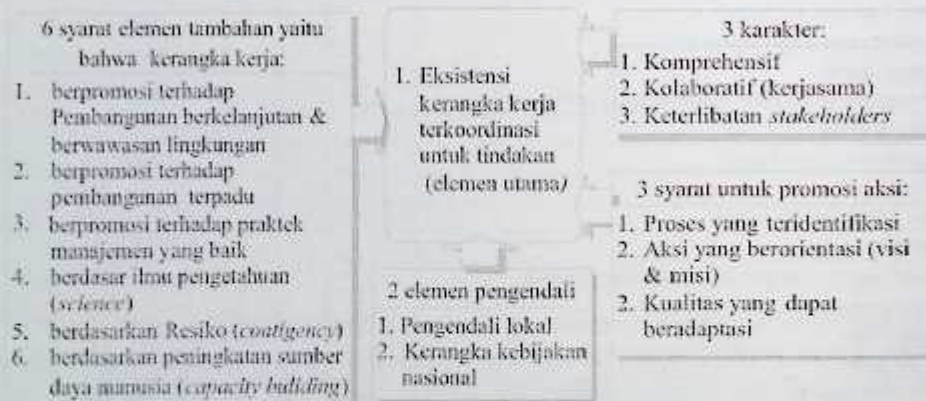
Pengaturan	Dewan SDA	Menteri	Gubernur	Bupati/Walikota	Peran Serta Masya
Landasan Pengelolaan Air Tanah					
Kebijakan Pengelolaan Air Tanah	X				
Kebijakan Teknis		X	X	X	X
Cekungan Air Tanah					
Strategi Pengelolaan Air Tanah		X			
Strategi Pelaksanaan		X			X
Pengelolaan Air Tanah		X			
Perencanaan		X			
Inventarisasi		X			
Penetapan Zona Konservasi		X			X
Penyusunan & Penetapan Renc. Pengelolaan Air Tanah		X			X
Pelaksanaan		X			X
Pemantauan dan Evaluasi		X			
Konservasi Air Tanah		X			X
Pemantauan Air Tanah		X			
Perlindungan dan Pelestarian		X			
Pengawetan		X			
Pengelolaan Kualitas & Pengendalian Pencemaran		X			
Pendayagunaan		X			X
Pengendalian Daya Rusak		X			X
Perizinan		X		X	
Sistem Informasi Air Tanah		X	X	X	X
Pembiayaan		X			
Pemberdayaan, Pengendalian dan Pengawasan		X		X	
Pemberdayaan		X			X
Pengendalian		X			
Pengawasan		X	X	X	X
Sanksi Administrasi				X	

6.5.1 Kerangka Kerja Organisasi

Dalam implementasi pengelolaan, hal yang tersulit adalah bagaimana semua pihak dapat melakukan koordinasi pengelolaan terutama dalam sistem skala yang cukup besar, karena menurut Kodoatie dan Sjarief (2005) untuk dapat diaplikasikan secara sukses maka:

- diperlukan banyak faktor pendukungnya (misalnya faktor-faktor sebagai pengendali).
- perlu pemahaman dan kesepakatan bahwa pengelolaan sumber daya air harus merupakan suatu proses yang jelas.
- pengelolaan harus sebagai promosi yang mengarah pada keberlanjutan dll. Peran, tanggung jawab dan manfaat dari organisasi atau institusi dalam sumber daya air bermacam-macam. Pada prinsipnya peran dari organisasi ini dapat dikelompokkan menjadi 6 grup (Grigg, 1996), yaitu:
 - Penyedia pelayanan: bisa pemerintah (institusi), bisa kemitraan pemerintah dengan *stakeholders*.
 - Pengatur/pemfasilitasi (*regulator/fasilitator*) umumnya unsur pemerintah.
 - Perencana dapat dari pemerintah, konsultan, perguruan tinggi, LSM bahkan masyarakat tergantung dari jenis, kapasitas dan volume kegiatan.
 - Pelaksana atau kontraktor.
 - Organisasi pendukung misalnya Himpunan Ahli Teknik Hidraulik (HATHI), Kemitraan Air Indonesia (KAI), dll.
 - Pemakai (*user*) atau konsumen: semua *stakeholders*.

Grigg (1996) menawarkan kerangka kerja yang terpadu dan menyeluruh berlaku untuk semua persoalan dalam pengorganisasian yang dapat menembus (memecahkan) kebingungan atau kekacauan yang timbul akibat struktur yang rumit (kompleks) dan ketidak-fokusan yang ditemukan dalam persoalan-persoalan dengan skala besar. Salah satu model kerangka kerja pengelolaan yang ditawarkan terdiri dari 15 elemen, dan diilustrasikan seperti dalam gambar berikut ini.



Gambar 6-14. Lima belas (15) elemen model kerangka kerja untuk tindakan terorganisasi (Grigg, 1996)

Manfaat dari kerangka kerja organisasi ini adalah antara lain untuk dapat terjalin kerjasama, pembagian tugas sesuai fungsi, hak dan kewenangan, terjadinya suatu hubungan kerja yang harmonis, untuk dapat melakukan pengelolaan yang efisien dan efektif (Kodoatie dan Sjarief, 2005).

6.5.1.1 Dewan Sumber Daya Air

Konsep pembentukan Dewan Sumber Daya Air Nasional atau *National Water Resources Council* adalah sebagai wadah koordinasi kebijakan dalam pengelolaan sumber daya air nasional merupakan penggabungan kelembagaan pengelolaan sumber daya air ke dalam satu unit organisasi, karena pengelolaan sumber daya air menyangkut banyak faktor dan kebijakan, meliputi meteorologi, geologi, kehutanan, pertanian, tata ruang, serta lingkungan hidup. Dewan Sumber Daya Air Nasional merupakan satu badan koordinasi non-struktural yang dimaksudkan untuk merumuskan kebijakan nasional mengenai sumber daya air, dan secara langsung melaporkan dan bertanggung jawab kepada Presiden.

Dalam UU No. 7 Tahun 2004 Tentang Sumber Daya Air disebutkan bahwa Dewan Sumber Daya Air diperlukan sebagai wadah koordinasi dalam upaya mengintegrasikan kepentingan berbagai sektor atau lintas sektor, wilayah atau lintas wilayah, para pemilik kepentingan dalam bidang sumber daya air, baik tingkat nasional, provinsi maupun kabupaten kota (Pasal-Pasal 14 s/d 16 UU No. 7 Tahun 2004).

Tugas pokok dewan tersebut menyusun dan merumuskan Kebijakan serta Strategi Pengelolaan Sumber Daya Air dimana air tanah merupakan bagiannya. Dewan ini beranggotakan unsur pemerintah dan unsur Non-pemerintah dalam jumlah yang seimbang atas dasar prinsip keterwakilan. Seimbang berarti jumlah anggota yang proporsional antara unsur pemerintah dan unsur non-pemerintah. Prinsip keterwakilan adalah terwakilinya kepentingan unsur-unsur yang terkait, misalnya sektor, wilayah, serta kelompok pengguna dan pengusaha sumber daya air. Kelompok pakar, asosiasi profesi, organisasi masyarakat dapat dilibatkan sebagai narasumber (Pasal 86 dan Pasal 87 UU No. 7 Tahun 2004).

Dalam UU No. 7 Tahun 2004 Pasal 13 Ayat (2) dan Penjelasannya disebutkan fungsi Dewan Sumber Daya Air Nasional adalah memberikan pertimbangan kepada Presiden dalam menetapkan wilayah sungai (WS) dan cekungan air tanah/ CAT (dan Non-CAT) baik di pusat, provinsi maupun kabupaten/kota. Diharapkan dengan adanya masukan dari dewan ini Pemerintah maupun Pemerintah Daerah dapat menetapkan kebijakan dengan rencana tindak yang tepat.

Demikian juga dalam PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah keberadaan Dewan atau Wadah Koordinasi Pengelolaan Sumber Daya Air secara eksplisit disebutkan pada Ayat (3) dan (4) dan keberadaan Dewan Sumber Daya Air Nasional disebutkan dalam Ayat (1) dan Ayat (2) Pasal 11.

Tahun 2008 telah terbit Peraturan Presiden No. 12 tentang Dewan Sumber Daya Air sebagai amanat dan implementasi dari uraian tersebut.

Selanjutnya sebagai wadah koordinasi pada tingkat provinsi, dibentuk dewan sumber daya air provinsi atau forum sejenis, yang berfungsi sebagai dewan yang menyusun kebijakan pengelolaan sumber daya air provinsi termasuk air tanah. Sedangkan untuk pelaksanaan koordinasi pada tingkat kabupaten/kota wadah koordinasinya adalah dewan sumber daya air kabupaten/kota atau forum

sejenis. Hubungan kerja antar wadah koordinasi tingkat nasional, provinsi, kabupaten/kota, dan wilayah sungai bersifat konsultatif dan koordinatif.

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan mengenai fungsi dan tugas dewan sumber daya air, dalam melakukan pengelolaan sumber daya air terpadu, antara lain (Kodoatie dan Sjarief, 2005):

- Peningkatan koordinasi dari fungsi pemerintah melalui rencana terpadu dan aksi.
- Adanya perubahan struktural dalam instansi pemerintah memberikan fasilitasi koordinasi lebih baik.
- Dimungkinkan penciptaan bagian-bagian baru dari institusi yang telah ada untuk memfasilitasi koordinasi yang baik.
- Diakui oleh banyak pihak bahwa pengalaman tentang suksesnya keberadaan dewan sumber daya air ini masih sedikit. Sehingga untuk negara berkembang termasuk Indonesia harus dibuktikan dulu secara nyata akan pentingnya eksistensi dewan tersebut.
- Pengalaman yang lalu juga menunjukkan bahwa suksesnya dewan ini tidak bisa instan namun merupakan proses yang akan terus diperbaiki untuk mencapai tujuan akhir, biasanya jangka waktunya cukup panjang. Oleh karena itu perlu disepakati oleh semua pihak bahwa keberadaan dewan tidak otomatis secara instan dapat mengatasi persoalan-persoalan sumber daya air.
- Suksesnya dewan ini juga sangat tergantung dengan kondisi politik dan konteks sejarah (para pihak harus mengalami secara langsung akan manfaat keberadaan dewan ini).
- Agar dewan ini dapat berfungsi efektif semua pihak yang terlibat baik langsung maupun tidak langsung harus mempunyai komitmen yang nyata terhadap dewan tersebut dan yang utama juga perlu dikondisikan agar dewan ini tidak sekedar wadah koordinasi namun secara perlahan mempunyai kekuatan (power) yang bisa ditaati oleh semua pihak.
- Penyelesaian konflik yang tepat (misalnya win-win solution) dan peningkatan kepedulian publik juga merupakan sebagian dari faktor-faktor kunci dari keberhasilan dewan ini.

6.5.1.2 Organisasi Wilayah Sungai

Dalam Penjelasan PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 disebutkan bahwa Kebijakan pengelolaan air tanah menjadi acuan dalam menyusun dan menetapkan strategi pengelolaan air tanah pada Cekungan Air Tanah yang merupakan bagian dari pola pengelolaan sumber daya air pada wilayah sungai. Sebagaimana diamanatkan dalam Pasal 11 Undang-Undang No. 7 Tahun 2004, pola pengelolaan sumber daya air disusun berdasarkan wilayah sungai dengan prinsip keterpaduan antara air permukaan dan air tanah.

Oleh karena itu organisasi dalam suatu WS mempunyai peran dalam menopang keberhasilan pengelolaan air tanah. Untuk suksesnya organisasi di dalam suatu WS diperlukan dukungan:

- Kemampuan untuk menetapkan kompetensi teknik yang dapat dipercaya.
- Fokus dalam masalah yang berulang-ulang seperti banjir, kekeringan atau penurunan penawaran dan pengawasan solusi yang dapat diterima oleh semua pihak.
- Partisipasi semua pihak.
- Kemampuan untuk menghasilkan bentuk pendapatan atau penghasilan kontinyu melalui iuran, penarikan bantuan yang gratis (grant) atau pinjaman lunak.

- Batas yurisdiksi yang jelas dan sumber daya yang tepat.

6.5.1.3 Badan Pengatur

Badan pengatur adalah badan khusus yang mengatur suatu CAT dan Non-CAT tertentu dengan kewenangan yang cukup untuk membuat kebijakan dan keputusan strategis, menentukan kerangka organisasi dan institusi, menentukan alokasi finansial, dan melakukan pengelolaan di CAT dan Non-CAT tersebut. Secara lebih detail dapat dijelaskan tentang hal-hal yang berkaitan dengan badan ini:

- Badan ini diperlukan untuk dapat memastikan aplikasi pengelolaan air tanah yang efektif dan efisien. Jangkauan tugasnya mulai dari peraturan air tanah, pengelolaan lingkungan yang terkait dengan air tanah, kuantitas dan kualitas air, pengaturan tata guna lahan termasuk pengelolaan finansialnya.
- Badan ini dapat didirikan dan dibiayai oleh pemerintah untuk tahap permulaan lalu dapat secara mandiri mengelola air tanah. Di Indonesia contoh untuk badan yang telah ada yang bertugas mengatur sumber daya air dikenal dengan nama Jasa Tirta.
- Hakekat adanya badan ini adalah bahwa pengelolaan air tanah dapat dilakukan lebih profesional.
- Sebagai mitra kerja pemerintah yang penting (baik pusat, provinsi maupun kabupaten/kota).
- Secara bertahap pengelolaan air tanah bisa dilakukan dan didukung oleh semua pihak termasuk dari segi pendanaannya sehingga dapat mengurangi beban pemerintah dalam pembangunan.
- Badan ini bekerja dengan mengikuti kaidah yang dinyatakan dalam UU Sumber Daya Air dan PP Air Tanah, yaitu bahwa air mempunyai fungsi sosial yang berarti kepentingan umum lebih diutamakan daripada kepentingan individu.

Hal di atas dapat dilakukan dengan mewujudkan Pengelolaan Air Tanah yang terpadu, menyeluruh dan berwawasan lingkungan, mampu memberikan jaminan pelayanan umum yang handal dan dipercaya, dapat meningkatkan partisipasi masyarakat dan swasta.

6.5.1.4 Penyedia Pelayanan

Penyedia pelayanan diperlukan untuk dapat memberikan pelayanan yang kontinyu dan memadai baik kuantitas maupun kualitas air tanah. Menurut Kodoatie dan Sjarief (2005) hal-hal yang diperlukan berkaitan dengan pelayanan adalah:

- Penyedia pelayanan bisa pemerintah (Institusi), bisa kemitraan pemerintah dengan stakeholders.
- Struktur pelayanan berhubungan dengan struktur sosial, ekonomi dan politik dalam masyarakat, oleh karena itu penyamarataan akan sangatlah sulit diaplikasikan. Diperlukan suatu kajian yang detail sehubungan dengan kondisi sosial dan budaya masyarakat.
- Pelayanan dituntut untuk dapat memberikan standar kuantitas dan kualitas tinggi.
- Penyediaan air tanah yang bisa berlanjut untuk para pemakai dengan kuantitas dan kualitas yang memadai
- Selalu dapat mengembangkan teknologi tepat guna untuk peningkatan efisiensi dan efektifitas pelayanan.

Selain itu penyedia pelayanan tidak hanya mengedepankan faktor ekonomi dan sosial, tapi juga harus tetap memperhatikan faktor lingkungan dengan menjaga daerah imbuhan air tanah, dan melakukan pengambilan air tanah untuk pelayanan masyarakat sesuai dengan *safe yield*.

6.5.2 Peran Publik dan Swasta

Dalam rangka pelaksanaan tugas-tugas pemerintahan umum di bidang pengelolaan sumberdaya air yang menyangkut penggunaan bersama air permukaan dan air tanah dilakukan oleh lembaga-lembaga Dinas/Institusi teknis/Badan hukum tertentu yang bertanggung jawab di bidang pengelolaan sumberdaya air pada air permukaan dan air tanah sesuai dengan kewenangan pengelolaan yang diatur dalam peraturan perundangan yang berlaku.

Terlebih lagi dalam masa otonomi daerah seperti sekarang, hierarki kelembagaan pengelola sumber daya air termasuk air tanah sebagai berikut (Kodoatie dan Sjarief, 2005):

- Tingkat departemen (pusat), tingkat dinas (untuk provinsi dan kabupaten/kota)
- Unit khusus pengelola air yang bertanggung jawab kepada pemerintah (Menteri, Gubernur atau Bupati/Walikota).
- Otonomi penuh, utilitas air yang mempunyai kapasitas finansial.
- Kerjasama antara pemerintah dan swasta.
- Perusahaan swasta murni.

6.5.2.1 Institusi Masyarakat Umum dan Organisasi Komunitas

Institusi masyarakat umum dan organisasi komunitas diperlukan antara lain untuk (Kodoatie dan Sjarief, 2005):

- Advokasi dengan dasar proteksi lingkungan dan alam.
- Mempertinggi pengetahuan air untuk menyadarkan masyarakat pentingnya pengelolaan ketersediaan dan kebutuhan air yang berkelanjutan.
- Advokasi untuk yang lemah dan yang terpinggirkan.
- Mobilisasi masyarakat lokal supaya turut ikut serta dalam pengelolaan sumber daya air lokal dan pengiriman air.
- Pemegang peran kuat dalam pengelolaan air tanah pada cekungan air tanah (CAT).
- Dalam konteks urban, institusi dapat memainkan peranan penting dalam pembangunan dan pandangan tentang penyediaan air dan sistem sanitasi.
- Kolaborasi antar penyedia pelayanan dan organisasi masyarakat dapat memperkuat rasa memiliki dari masyarakat umum dan membangun pengelolaan air dalam level atau jenjang komunitas.

6.5.2.2 Peran Sektor Swasta

Dasar hukum utama pengelolaan sumber daya air adalah Pasal 33 UUD 1945, yaitu "Bumi, air dan kekayaan alam terkandung di dalamnya dikuasai oleh negara dan dipergunakan sebesar-besar untuk kemakmuran rakyat".

Atas dasar penguasaan negara tersebut maka ditentukan hak guna air yang dapat dibagi menjadi 2, yaitu: hak guna pakai air dan hak guna usaha air, seperti ditunjukkan dalam gambar berikut.



Gambar 6-15. Hak guna air (UU No. 7 Tahun 2004)

Sumber daya air mempunyai fungsi sosial, lingkungan hidup, dan ekonomi yang diselenggarakan serta diwujudkan secara selaras. Fungsi sosial berarti bahwa sumber daya air untuk kepentingan umum lebih diutamakan daripada kepentingan individu. Fungsi lingkungan hidup berarti bahwa sumber daya air menjadi bagian dari ekosistem sekaligus sebagai tempat kelangsungan hidup flora dan fauna. Fungsi ekonomi berarti bahwa sumber daya air dapat didayagunakan untuk menunjang kegiatan usaha (Pasal 4 UU No. 7 Tahun 2004).

Air yang utamanya berasal dari hujan dapat dikategorikan menjadi: air baku, air bersih dan air minum. Untuk memperoleh air maka diperlukan infrastruktur keairan baik yang bersifat alami (misal sistem sungai yang sudah ada) maupun artifisial (buatan manusia). Sebagai contoh, untuk menampung air maka dapat dibuat waduk. Pembuatan waduk dibutuhkan biaya yang besar.

Keterbatasan dana dari pemerintah merupakan salah satu alasan untuk dapat melibatkan peran sektor swasta. Peran sektor swasta pada prinsipnya adalah ikut mendukung finansial untuk mencapai tujuan dari pengelolaan sumber daya air.

Peran serta sektor swasta dalam manajemen air tanah antara lain meliputi:

- **Keuangan:** Keterbatasan dana pemerintah dalam menyalurkan biaya dan sulitnya pencarian dana dari berbagai sumber.
- **Politik:** motivasi ini sangat penting namun merupakan reformasi yang tidak populer, misalnya keputusan kenaikan tarif air, kajian dan evaluasi ke para-pihak yang berupaya untuk menghindari pembiayaan yang lebih besar (misal pajak).
- **Keahlian:** Perusahaan swasta yang besar dapat berperan dalam peningkatan ilmu pengetahuan dan teknologi.
- **Resiko:** Perusahaan swasta umumnya lebih baik dalam menghadapi resiko dibandingkan dengan pemerintah.

Bentuk peran sektor swasta yang membantu pemerintah dikenal atau diwujudkan dengan istilah kemitraan atau kerjasama. Beberapa macam bentuk kemitraan antara lain meliputi (Direktorat Bina Tata Perkotaan dan Perdesaan, Ditjen Cipta Karya, Dep. PU, 1999):

- Kontrak Pelayanan (*Service Contract*).
- Kontrak Kelola (*Management Contract*).
- Kontrak Sewa (*Lease Contract*).
- Kontrak Bangun:
 - Kontrak Bangun, Kelola, Alih Milik (*Build, Operate, and Transfer Contract*).
 - Kontrak Bangun, Alih Milik (*Build dan Transfer Contract*).
 - Kontrak Bangun, Alih Milik, dan Kelola (*Build, Transfer, and Operate Contract*).
 - Kontrak Bangun, Sewa, dan Alih Milik (*Build, Lease, and Transfer Contract*).
 - Kontrak Bangun, Milik, dan Kelola (*Build, Own, and Operate Contract*).
- Kontrak Rehabilitasi, Milik, dan Operasi (*Rehabilitate, Own, and Operate Contract*).
- Kontrak Rehabilitasi, Kelola, dan Alih Milik (*Rehabilitate, Operate, and Transfer Contract*).
- Kontrak Kembang/Bangun, Kelola, dan Alih Milik (*Develop/Build, Operate, and Transfer Contract*).
- Kontrak Tambah dan Kelola (*Add and Operate Contract*).
- Kontrak Konsesi (*Concession Contract*).
- *Joint ventures in operating companies*.

Keikutsertaan sektor-sektor swasta dapat menghasilkan manfaat dari beberapa situasi dan persoalan yang antara lain meliputi:

- Keterbatasan sumber dana pemerintah
- Penurunan level pelayanan, kurangnya perbaikan, jaminan koneksi baru, dsb.
- Tekanan anggaran berat dalam pengelolaan sumber daya air dan keengganan ataupun ketidakmampuan pemerintah untuk memberi subsidi yang disebabkan oleh terbatasnya dana.
- Aturan yang baik yang disediakan pemerintah, untuk peningkatan perhatian secara politis dan peningkatan kepercayaan publik.
- Pelelangan yang terbuka dan transparan.
- Kepastian dan jaminan Pemerintah bagi para investor melalui legislasi yang dilaksanakan.
- Pencapaian peningkatan efisiensi.

6.5.2.3 Wewenang Lokal

Kewenangan untuk *stakeholders* di wilayah pengelolaan perlu lebih diberikan secara proporsional mengingat *stakeholders* tersebut langsung akan berpengaruh ataupun dipengaruhi oleh aktifitas pengelolaan sumber daya air. Pengalaman masa lalu mengingatkan kita bahwa sering masyarakat lokal terpinggirkan.

Sebagai contoh masyarakat di daerah pengambilan air tanah lebih dominan dirugikan, dengan adanya pengambilan air tanah untuk industri di sekitar tempat tinggal mereka, sumber air tanah mereka menjadi berkurang. Di wilayah ini masyarakat yang mempunyai kewenangan secara proporsional akan dapat berpartisipasi aktif dalam upaya pelestarian sumber daya air yang ada. Upaya yang perlu dilakukan antara lain:

- Pemberdayaan.
- Peningkatan SDM.
- Pengetahuan O dan P.
- Komunikasi rutin.
- Pemberian kompensasi dari hilir ke hulu.

Yuridiksi dan aktifitas yang terlalu luas dalam manajemen air tanah menyebabkan timbulnya kesulitan dalam generalisasi efektifitas. Oleh karena itu diperlukan hal-hal:

- Partisipasi aktif semua pihak dalam pembuatan keputusan dan keterlibatan dalam dialog nyata dengan pembuat keputusan sehingga cukup stabil dengan perubahan pemerintahan.
- Kemudahan akses publik kepada informasi dasar mengenai kualitas dari sumber daya air lokal dan masalah yang berhubungan dengan jaminan air jangka panjang untuk masyarakat sangatlah penting. Hal ini juga untuk meningkatkan peran dan tanggung jawab masyarakat.
- Kepemimpinan lokal sangat dibutuhkan untuk mengawali proses berkelanjutan pengelolaan sumber daya air dalam masyarakat.
- Perencanaan jangka panjang perlu dilakukan dengan kegiatan yang nyata untuk mempertahankan kepentingan dari para-pihak.
- Perubahan terhadap aturan daerah adalah efektif jika dihubungkan dengan perubahan nyata dalam peran dan tanggung jawab organisasi pemerintah resmi.
- Para-pihak berbasis inisiatif dapat memainkan peran yang penting dalam menembus kendala-kendala politis pada aktivitas pengelolaan sumber air terpadu di daerah urban.

6.5.3 Institutional Capacity Building

Institutional Capacity Building berkaitan dengan masalah pengembangan sumber daya manusia, sehingga dapat dikatakan sebagai semua usaha dan upaya untuk melatih, mendidik, mengajar, mengembangkan kemampuan dan kecakapan sumber daya manusia pada semua *stakeholder* yang terkait sehingga penampilan sumber daya manusia secara fisik maupun mental meningkat.

Dengan adanya usaha-usaha peningkatan tersebut diharapkan sumber daya manusia dapat bekerja di bidangnya dengan lebih efektif dan efisien, dapat bekerja sama dan menjalin komunikasi secara lebih baik dengan sumber daya manusia di bidang lainnya, dan dapat bekerja untuk tujuan yang lebih luas.

6.5.3.1 Peran Serta dan Pemberdayaan Masyarakat

Dalam meningkatkan peran serta dan pemberdayaan masyarakat, maka masyarakat (*civil society*) dapat dijadikan pusat kemitraan dalam pengelolaan air tanah.

Partisipasi akan sukses apabila masyarakat cukup peduli untuk benar-benar ikut terlibat, dan mengetahui sasaran serta tujuan pentingnya dilakukan pengelolaan air tanah. Partisipasi aktif dari masyarakat harus diatur secara teliti untuk menghindari adanya grup minoritas yang pandai dalam berbicara dan berargumentasi; bila ini terjadi, pembuatan keputusan sangat dipengaruhi oleh grup tersebut yang pada hakekatnya mempunyai legitimasi yang terbatas (Kodoatie dan Sjarief, 2007).

Bentuk keterlibatan para pihak yang terkait dengan air tanah akan efektif dikembangkan apabila berupa institusi/organisasi yang diciptakan karena kebutuhan *bottom up approach* bukan karena proyek dari pemerintah atau dari *top down approach*. Sebagai contoh dalam bentuk Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM), yang berisi kumpulan para pemakai air tanah. Semua kategori untuk para pemakai air harus ada yang terwakili dalam asosiasi atau perkumpulan tersebut.

Pembiayaan eksternal dan dukungan struktural dapat menjadi awal yang penting untuk memastikan keseimbangan partisipasi masyarakat. Walau demikian, keberlanjutan dan efektivitas sangat bergantung pada kepercayaan sendiri. Keberlanjutan juga bergantung pada adanya peraturan yang sudah disetujui sebagai mekanisme yang dapat diandalkan untuk memperkuat peraturan tersebut dan menyelesaikan pertikaian.

Pemberdayaan dilakukan oleh pemerintah, yaitu Menteri, Gubernur, Bupati/Walikota, kepada aparat pengelola air tanah, pemegang hak guna pakai dan hak guna usaha air dari pemanfaatan air tanah, asosiasi profesi, asosiasi perusahaan pengeboran air tanah, kelompok masyarakat, untuk meningkatkan kinerja dalam pengelolaan air tanah (Kodoatie dan Sjarief, 2007).

Kegiatan pemberdayaan diselenggarakan dalam bentuk penyuluhan, pendidikan, pelatihan, pembimbingan, dan pendampingan. Pemberdayaan dapat diselenggarakan dalam bentuk kerjasama yang terkoordinasi antara Pemerintah, pemerintah provinsi, dan pemerintah kabupaten/kota. Kelompok masyarakat atas prakarsa sendiri juga dapat melaksanakan upaya pemberdayaan untuk kepentingan masing-masing (PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 Pasal 86).

Masyarakat berhak terlibat dalam pengawasan penyelenggaraan pengelolaan air tanah dengan mengajukan pengaduan, gugatan, dan laporan kepada pihak yang berwenang atas pendayagunaan air tanah yang diduga dapat menimbulkan kerusakan lingkungan hidup atau merugikan kepentingan masyarakat. Laporan hasil pengawasan merupakan bahan/masukan bagi perbaikan dan penyempurnaan penyelenggaraan konservasi air tanah.

Pembinaan dilaksanakan sebagai upaya untuk meningkatkan kinerja dalam melaksanakan pengelolaan air tanah, dapat dilakukan dengan cara:

1. bimbingan teknis
2. pendidikan
3. penelitian dan pengembangan ilmu dan teknologi
4. pendampingan dan pelatihan
5. penyuluhan peraturan perundang-undangan.

Pembinaan tersebut dilaksanakan pada kegiatan perencanaan, pelaksanaan dan pengawasan konservasi air tanah.

6.5.3.2 Alih Ilmu Pengetahuan

Pengelolaan air tanah mengharuskan koordinasi dan kerjasama dari semua *stakeholders* dan mitra-mitra institusi baik yang di bidang air tanah maupun yang bukan bidang air tanah. Setiap tindakan aksi

akan berpengaruh terhadap ketersediaan air tanah baik secara kuantitas maupun kualitas. Hal ini didasarkan pada kemauan baik dan modal sosial antar mitra.

Instrumen untuk pengembangan kemauan baik dan modal sosial adalah alih ilmu pengetahuan. Alih ini harus berpromosi ke saling pengertian, transparansi dan saling percaya. Jenis-jenis alih pengetahuan meliputi data teknis, informasi teknis & Non-teknis, informasi institusi dan informasi finansial (Kodoatie dan Sjarief, 2007).

Program-program *capacity building* harus diimplementasikan berdasarkan analisis penilaian antara kemampuan sumber daya manusia yang ada dengan instrumen-instrumen manajemen yang diusulkan. Transfer pengetahuan sederhana dari suatu negara ke negara yang lain tanpa mempertimbangkan konteks budaya dan politik dapat tidak efektif bahkan menimbulkan resiko kerusakan dan konflik.

Mekanisme dan saluran untuk alih pengetahuan ini meliputi antara lain partisipasi dalam program pelatihan, penyuluhan, lokakarya, seminar, *study tour* dan konferensi.

1. Pelatihan

Program pelatihan adalah alat *capacity building* efektif, terutama program pelatihan untuk pelatih. Namun program pelatihan pelatih membutuhkan biaya sangat mahal. Selain itu juga dapat dilakukan program pelatihan pada manajer senior agar dapat meyakinkan proses *capacity building* dalam organisasi dan serta dapat sebagai dukungan untuk pegawai juniornya.

Capacity building kurang sukses untuk peralatan teknis (canggih). Peralatan canggih perlu dukungan kontinyu dari pelatihan, bahan-bahan dan persetujuan pelayanan untuk memastikan umur alatnya dan jaminan penggunaannya (Kodoatie dan Sjarief, 2007).

Program pelatihan harus dijadwalkan untuk memenuhi siklus peserta dan tidak dijadwalkan dalam waktu sibuk.

2. Pendidikan

Karena persoalan pengelolaan air berubah secara dinamis, ada kebutuhan untuk pendidikan jangka panjang. Para peneliti harus didorong dan diajari untuk menyebarkan apa yang telah mereka dapatkan melalui ketrampilan komunikasi yang tepat

Capacity building sudah ditunjukkan menjadi yang paling efektif saat mengimplementasikan prinsip-prinsip dari pengelolaan air tanah dalam sumber daya air terpadu dilengkapi dengan ketrampilan lapangan, daripada terfokus pada solusi khusus untuk masalah yang khusus. *Capacity building project* harus berdasarkan kebutuhan (*demand driven*) dan hanya dipertimbangkan di mana tuntutan dari manajemen senior adalah jelas dan tegas.

Proyek pengembangan institusi adalah sulit dan jangka panjang. Dalam prakteknya asistensi teknis (*technical assistance*) berseri bisa menjadi pendekatan yang lebih dipilih untuk peningkatan sumber daya manusia karena asistensi teknis berseri lebih siap dalam perubahan keadaan, menumbuhkan kekuatan dan menunjukkan kelemahan.

Aktifitas yang berdasarkan tuntutan kuat lebih sukses dibandingkan dengan aktifitas yang diterima oleh pihak manajemen. Selain itu pembagian atau alih pengetahuan membutuhkan pikiran yang terbuka.

6.5.3.3 Kapasitas Pengaturan

Pengaturan merupakan instrumen penting dalam pengelolaan air tanah, namun untuk pemastian pemenuhannya sering sulit. Peraturan efektif mensyaratkan kapasitas SDM dan kapasitas teknis. Sebagai contoh, untuk melakukan tugas monitoring yang efektif, sebuah organisasi membutuhkan peralatan yang dapat dipakai dalam kondisi ketiadaan kerangka kerja pengaturan.

SDM yang cukup, keahlian dan data memadai penting untuk aplikasi instrumen-instrumen pengaturan yang berbeda dan instrumen-instrumen ekonomi. Sebagai contoh, untuk peningkatan kualitas air tanah, suatu institusi pengatur harus memiliki data kualitas air tanah yang handal dan staf terlatih yang juga handal untuk menginterpretasikan data tersebut secara tepat. Pengatur ekonomi butuh kapasitas dalam analisis finansial dan akses ke informasi yang dibutuhkan. Lebih dari itu, regulasi butuh temuan fakta dan investigasi. Semua aktifitas tersebut butuh dukungan dari kapasitas finansial (Kodoatie dan Sjarief, 2007).

Pengalaman menunjukkan bahwa *capacity building* yang menonjolkan ketrampilan daripada alih ilmu pengetahuan dapat dipakai untuk meningkatkan penampai organisasi yang terstruktur.

Regulatory capacity building dapat dilihat sebagai keterpaduan akan perkembangan peraturan tentang kapasitas tersebut. Jika *regulatory capacity building* dilakukan lebih awal, resiko untuk aturan yang tidak efektif dapat dikurangi.

Usaha untuk memastikan bahwa para pelaku dapat menerima legitimasi dari tugas mereka dan menekankan keterpaduan adalah kunci pokok untuk membangun organisasi yang kuat. Legitimasi dengan aturan sangat penting untuk memastikan penerimaan dan pemenuhan kebutuhan.

6.6 Instrumen-Instrumen Manajemen

Dalam GWP (2001) disebutkan bahwa instrumen-instrumen manajemen terdiri atas 8 hal meliputi:

1. Analisis Penilaian Sumber Daya Air
2. Perancangan dan Perencanaan Manajemen Air Tanah
3. Pengelolaan Kebutuhan
4. Instrumen Perubahan Sosial
5. Resolusi Konflik
6. Instrumen Pengatur
7. Instrumen Ekonomi
8. Pengalihan dan Pengelolaan Informasi

Masing-masing instrumen menyangkut beberapa aspek yang akan dijelaskan pada sub bab berikut:

6.6.1 Analisis Penilaian Air Tanah

Analisis secara terpadu dan komprehensif perlu dilakukan di suatu kawasan regional dalam kaitannya dengan pemahaman, kebutuhan dan pemanfaatan sumber daya air oleh para pihak. Analisis meliputi kuantitas dan kualitas baik untuk air permukaan maupun air tanah (Kodoatie dan Sjarief, 2005).

Pertimbangan-pertimbangan analisis yang diperlukan antara meliputi:

- Pertumbuhan penduduk dan pertumbuhan ekonomi. Hal ini berkaitan erat dengan keseimbangan antara ketersediaan dan kebutuhan air.
- Air bisa menjadi penyebab konflik tatkala kebutuhan air melampaui ketersediannya.
- Perubahan tata-guna lahan akibat pertumbuhan penduduk dan ekonomi.
- Pemahaman keseimbangan antara air untuk kehidupan dan air sebagai sumber daya.
- Keseimbangan antara keberlanjutan ekologi, ekonomi dan sosial.
- Air merupakan kebutuhan semua pihak. Dengan kata lain dalam pengelolaan sumber daya air maka semua pihak harus melibatkan atau dilibatkan baik secara langsung maupun tidak langsung.
- Air mengikuti batas wilayah daerah alirannya: untuk aliran permukaan air mengikuti daerah aliran sungai (DAS) dan untuk air tanah mengikuti daerah aliran air tanah atau cekungan air tanah/CAT (groundwater and soil water in groundwater basin) dan Non-CAT (soil water). DAS, CAT dan Non-CAT masuk dalam WS. Suatu wilayah provinsi atau kabupaten/kota mengikuti batas wilayah administrasi. Batas-batas DAS, CAT, Non-CAT, WS dan batas administrasi umumnya tidak sama.
- Sumber daya air dan sumber daya-sumber daya lainnya (misalnya lahan) membentuk sumber daya alam. Dengan kata lain sumber daya air merupakan bagian dari sumber daya alam. Kondisi sumber daya air saling tergantung dan dipengaruhi oleh sumber daya yang lain.
- Otonomi daerah memberikan pengaruh yang besar terhadap sumber daya air. Termasuk di dalamnya adalah tuntutan reformasi, perubahan paradigma dari *top-down* menjadi *bottom-up approach*.
- Sumber daya air merupakan multi sektor, multi disiplin dan sangat kompleks.
- Perpaduan dalam sistem alam maupun dalam sistem manusia.
- Pemahaman bahwa sumber daya air bersifat kontinyu sehingga analisisnya juga harus secara kontinyu (dengan segala konsekuensinya). Demikian pula sifat air tanah yang *renewable* dan *non-renewable*.

Sesuai dengan UU Sumber Daya Air, aspek-aspek pengelolaan sumber daya air termasuk air tanah yang harus dianalisis meliputi:

- Konservasi sumber daya air untuk keberlanjutan sumber daya air yang ada:
 - Perlindungan dan pelestarian sumber air
 - Pengawetan air
 - Pengelolaan kualitas air
 - Pengendalian pencemaran air
- Pendayagunaan sumber daya air untuk dapat melakukan:
 - Penatagunaan sumber daya air
 - Penyediaan sumber daya air
 - Penggunaan sumber daya air

- Pengembangan sumber daya air
- Pengusahaan sumber daya air.
- Pengendalian daya rusak air yang diarahkan pada kegiatan: pencegahan, penanggulangan, dan pemulihan.
- Sistem Informasi sumber daya air untuk dapat secara kontinyu mendapatkan data yang *up-to date* mengingat sistem sumber daya air adalah sistem yang kontinyu dari hulu ke hilir, dari waktu ke waktu.
- Pemberdayaan dan peran masyarakat.

6.6.1.1 Analisis Penilaian Air Tanah

Analisis sumber daya air di mana air tanah merupakan bagiannya pada umumnya dipakai sebagai dasar pembangunan infrastruktur. Analisis sumber daya air mempunyai tujuan yang cukup luas dan beragam untuk kepentingan pengelolaan sumber daya air mengingat demikian kompleksnya persoalan yang dihadapi. Analisis-analisisnya antara lain meliputi (Kodoatie dan Sjarief, 2007):

- *Supply-Demand Assessment*: mengetahui keseimbangan antara ketersediaan sumber daya air dan kebutuhan akan air. Hal ini juga dipakai dalam upaya-upaya pencarian sumber dana untuk pengelolaan sumber daya air termasuk di dalamnya adalah pengelolaan air tanah
- *Environmental Impact Assessment*: bertujuan untuk mengetahui dampak suatu kegiatan pengelolaan air tanah mulai dari pra, saat dan pasca konstruksi. Dampak tersebut dikaitkan dengan kelestarian sumber daya air, aspek sosial, aspek ekonomi, aspek institusi dan hukum serta aspek teknis.
- *Social Impact Assessment*: kajian ini dipakai untuk mengetahui dampak dari suatu kegiatan pengelolaan air tanah terhadap masyarakat baik secara lokal, regional maupun cakupan wilayah yang lebih luas.
- *Risk or Vulnerability Assessment*: analisis ini bertujuan untuk mengetahui resiko dan kerentanan dari semua pihak akibat terkena bencana misalnya banjir, longsor atau kekeringan.

Analisis sumber daya air kadang dilakukan melewati langkah-langkah mulai dari yang sederhana sampai yang kompleks. Di dalam proses pembangunan biasanya langkah-langkahnya meliputi: pra studi kelayakan, studi kelayakan, detail desain, implementasi, operasi dan pemeliharaan. Dasar analisis sumber daya air disarankan untuk melalui langkah-langkah tersebut.

Untuk proyek dengan skala besar dan jangka panjang maka tiap langkahnya harus dilakukan secara lebih detail mengikuti peraturan, standar, norma dan pedoman yang berlaku secara multi dimensi, multi sector dan keterlibatan semua pihak. Persoalan-persoalan yang akan terjadi dapat diprediksi secara lebih awal berikut solusinya.

6.6.1.2 Permodelan dalam Pengelolaan Air Tanah

Permodelan dapat dibagi dua, yaitu:

- Permodelan rekayasa
- Permodelan manajemen

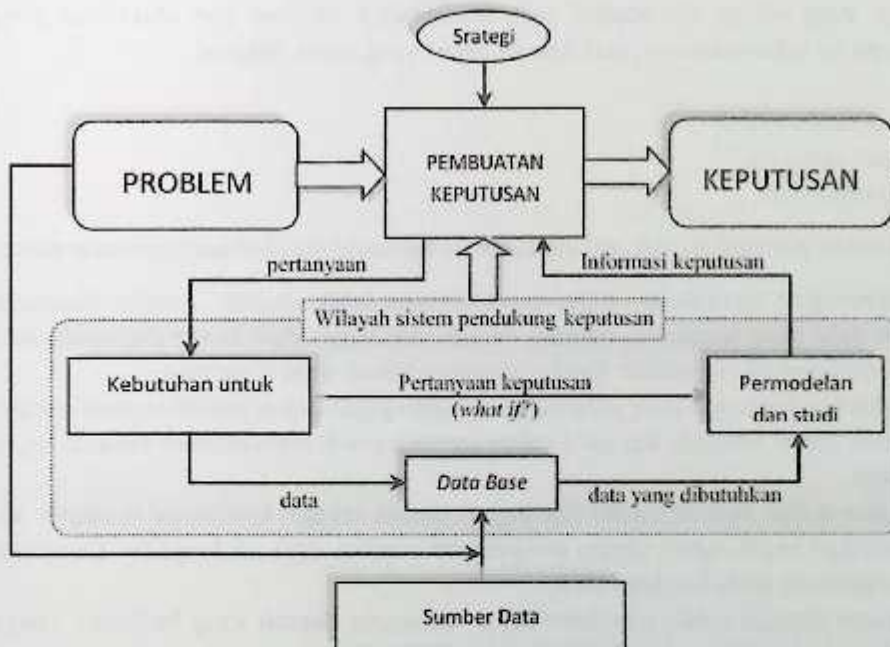
Permodelan rekayasa pada prinsipnya adalah mencari solusi dari persamaan dasar aliran air tanah di suatu daerah. Persamaan dasarnya ada dua yaitu persamaan untuk aliran air tanah pada akuifer

bebas dan persamaan akuifer tertekan. Persamaan umum kedua aliran tersebut adalah Persamaan 4-17 dan Persamaan 4-18. Beberapa contoh solusi dari kedua persamaan tersebut diuraikan dalam Bab 4.

Permodelan manajemen adalah permodelan pengelolaan air tanah secara terpadu. Permodelan ini bisa bersifat kualitatif, kuantitatif atau gabungan dari keduanya. Permodelan pengelolaan air tanah terkait banyak aspek, diantaranya aspek-aspek: teknis, sosial, budaya, ekonomi, hukum, kelembagaan dan lingkungan.

Salah satu alat untuk permodelan adalah Sistem Pendukung Keputusan (*Decision Support System(DSS)*). Alat ini menjadi populer karena kemajuan komputer sangat cepat, baik dari proses, kapasitas maupun perangkat lunaknya. Untuk persoalan yang sangat kompleks seperti pengelolaan sumber daya air maka alat DSS dapat berperan sangat strategis.

DSS merujuk pada penggunaan komputer untuk mengembangkan dan menunjukkan informasi dalam peningkatan proses keputusan. Sistem ini tidak hanya memproses data namun juga menganalisis, dan memanfaatkan penggunaan model yang terkait. Dengan kata lain, sistem ini merupakan sistem yang mengatur/dan mengorganisasikan proses, analisis dan pengantaran informasi yang dibutuhkan untuk pembuatan keputusan (Grigg, 1988). Bagian-bagian penting dari sistem pendukung keputusan diilustrasikan dalam gambar berikut ini.



Gambar 6-16. Alur sistem pendukung keputusan (Grigg, 1988 & 1996)

Multi-tujuan dari DSS menjadikan pemakai untuk menyatu-padukan data dalam 5 fase, dimana setiap data membutuhkan konsultasi dengan para-pihak yang potensial (Kodoatie dan Sjarief, 2005):

- Identifikasi isu: identifikasi isu, informasi yang memadai, identifikasi para-pihak yang mempunyai posisi kunci.
- Definisi opsi-opsi manajemen: mengidentifikasi opsi pengelolaan sumber daya air dan lahan yang potensial.
- Penetapan kriteria keputusan–penegasan kriteria untuk dipilih sebagai salah satu opsi.
- Perolehan dan kompilasi data: sebagai input dalam DSS
- Proses pendukung keputusan-menganalisis informasi yang tersusun oleh para-pihak.

Hal yang penting dalam penggunaan DSS adalah harus bersifat transparan, sehingga tak ada yang disembunyikan dibalik proses analisisnya. Pembuatan model *input* dan *output* yang tersedia harus dapat diakses dan dilihat masyarakat.

6.6.1.3 Indikator Pengelolaan Air Tanah

Indikator dapat dipakai untuk menganalisis dan membandingkan:

- Variasi ruang dan waktu dalam siklus hidrologi air, dan membandingkan ketersediaan dan pemakaian air.
- Pemakaian air yang efisien dan efektif, yaitu diantaranya: efisiensi dan efektifitas pengantaran air, jumlah keluarga pengonsumsi air, luas daerah irigasi yang harus dilayani.
- Kualitas air.
- Kuantitas air di suatu lokasi.
- Penampilan penyedia air.
- Penampilan pemakai air.

Pengalaman dari pemakaian alat-alat indikator ini menunjukkan bahwa (Kodoatie dan Sjarief, 2007):

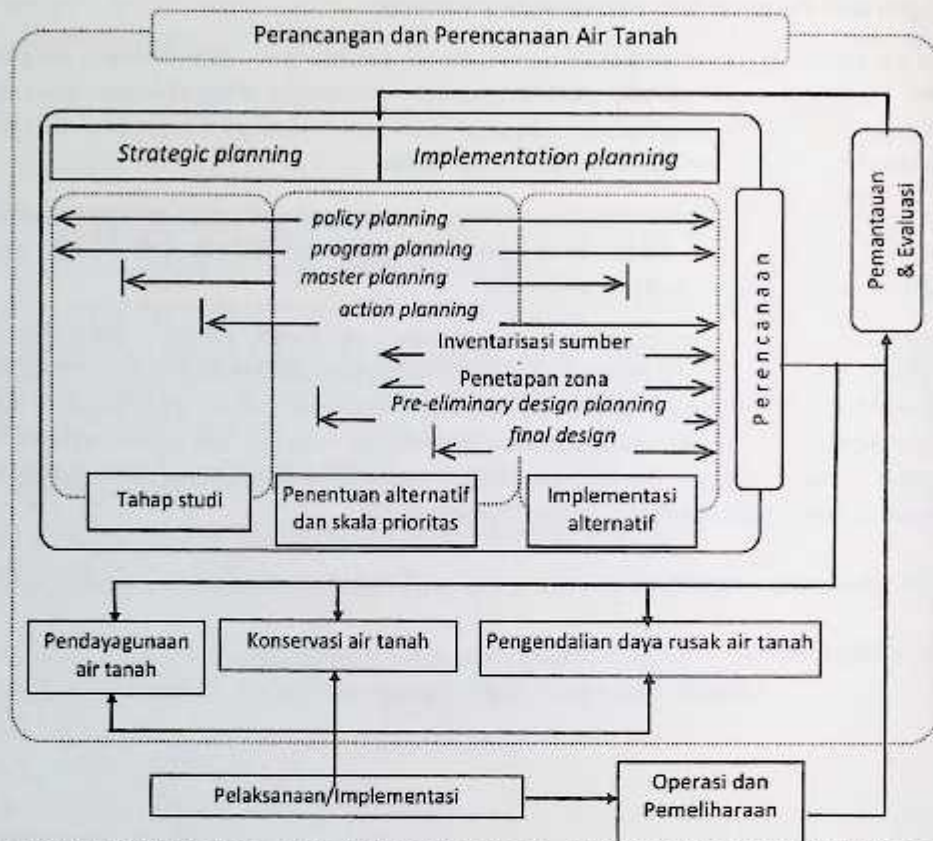
- Walaupun pembagian perwakilan indikator cenderung lebih mudah, namun biasanya sulit untuk mendapatkan data yang konsisten, reliabel, berarti dan dapat dipertanggungjawabkan dalam upaya penggambaran penampilan kegiatan dalam mencapai tujuan yang diinginkan.
- Walaupun indikator-indikator yang sederhana mungkin gagal untuk merefleksikan variasi-variasi yang penting, mereka dapat menjadi alat yang cukup penting untuk menciptakan kesadaran, perhatian dan kemauan politik.
- Indikator dipakai dalam bentuk cluster (inti pusat) karena sebagai kombinasi indikator akan lebih baik dalam menjelaskan keseluruhan proses pengelolaan sumber daya air terpadu. Kombinasi yang tepat umumnya bergantung pada keadaan lokal.
- Apabila indikator dipakai untuk membandingkan beberapa daerah yang berbeda, sangatlah penting jika elemen data dari indikator didefinisikan secara tepat.
- Nilai dari indikator atau indeks perlu selalu ditinjau secara periodik.

6.6.2 Perancangan dan Perencanaan Manajemen Air Tanah

Pengelolaan air tanah meliputi kegiatan perencanaan, pelaksanaan, pemantauan, pengevaluasian penyelenggaraan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, pengendalian daya rusak air berdasarkan cekungan air tanah. Kegiatan ini ditujukan untuk mewujudkan kelestarian, kesinambungan ketersediaan serta kemanfaatan air tanah yang berkelanjutan.

Konsep cekungan air tanah sebagai kesatuan wilayah pengelolaan air tanah didasarkan pada prinsip terbentuknya air tanah yang utuh dalam satu neraca air sejak dari daerah imbuhan hingga daerah lepasan pada suatu wadah, yaitu cekungan air tanah.

Tahapan perancangan dan perencanaan manajemen air tanah meliputi tahap-tahap: studi, penentuan alternatif dan atau skala prioritas maupun implementasi perancangan. Produk akhir dari implementasi perancangan biasanya berbentuk perencanaan akhir atau final desain. Selanjutnya dilanjutkan dengan pelaksanaan yang mengacu pada *final design* tersebut. Ketika pelaksanaan sistem air tanah telah selesai maka tahapan berikutnya adalah melakukan operasional dari sistem tersebut. Keseluruhan proses tersebut diilustrasikan dalam Gambar 6-17.



Gambar 6-17. Proses pembangunan dari perencanaan, pelaksanaan sampai pada operasional dan pemeliharannya (Grigg, 1996 dengan elaborasi disesuaikan dengan PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008)

Pada prinsipnya perancangan pengelolaan air tanah merupakan penggabungan dari pengembangan opsi, sumber daya dan interaksi antar manusia, yang merupakan bagian dari perancangan pengelolaan sumber daya air.

Karena air tanah merupakan bagian dari sumber daya air maka proses perancangan dan perencanaan air tanah dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- Pembuatan Pola Pengelolaan Sumber Daya Air: merupakan kerangka dasar dalam pembangunan mulai dari studi, perencanaan, pelaksanaan, operasi, pemeliharaan, monitoring dan evaluasi.
- Perencanaan Pengelolaan Air Tanah: merupakan perencanaan yang menyeluruh dan terpadu berdasarkan Pola Pengelolaan Sumber Daya Air.
- Pemrograman Pengelolaan Air Tanah oleh instansi pemerintah, swasta, dan masyarakat.
- Pelaksanaan.
- Operasi dan pemeliharaan.
- Monitoring dan evaluasi.

Aspek-aspek pengelolaannya meliputi: konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, pemantauan air tanah, dan sistem informasi air tanah, pemberdayaan dan peran masyarakat.

6.6.2.1 Konservasi

Konservasi air tanah dilakukan untuk menjaga kelestarian, kesinambungan, ketersediaan, daya dukung, fungsi air tanah, serta mempertahankan keberlanjutan pemanfaatan air tanah.

Konservasi air tanah sesuai dengan PP No. 43 Tahun 2008 dapat dilaksanakan melalui serangkaian upaya sebagai berikut:

1. Penentuan Zona Konservasi Air tanah
2. Perlindungan dan Pelestarian Air Tanah
3. Pengawetan Air Tanah
4. Pemulihan Air Tanah
5. Pengelolaan Kualitas dan Pengendalian Pencemaran Air Tanah
6. Pengendalian Kerusakan Kuantitas Air Tanah
7. Pemantauan Air Tanah
8. Pengawasan, Pengendalian, dan Pembinaan
9. Pengembangan Sistem Informasi Air Tanah

6.6.2.2 Pendayagunaan Air Tanah

Pendayagunaan air tanah diutamakan pada pemenuhan kebutuhan pokok hidup masyarakat secara adil dan berkelanjutan yang dilaksanakan berdasarkan rencana pengelolaan air tanah serta diselenggarakan oleh pemerintah dengan melibatkan masyarakat (PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 Pasal 47).

Pendayagunaan air tanah dilakukan melalui kegiatan penatagunaan, penyediaan, penggunaan, pengembangan, dan pengusahaan air tanah. Namun karena air tanah terletak di bawah permukaan tanah maka pengambilan atau eksploitasinya dalam upaya pemanfaatan atau penggunaannya memerlukan proses sebagaimana dilakukan pada kegiatan pertambangan mencakup kegiatan penggalian, atau pengeboran, pemasangan konstruksi sumur dan sebagainya.

6.6.2.3 Pengendalian Daya Rusak Air Tanah

Pengendalian daya rusak air tanah adalah pengendalian daya rusak air pada cekungan air tanah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 58 Undang-Undang No. 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air.

Menurut PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, pengendalian daya rusak air tanah ditujukan untuk mencegah, menanggulangi intrusi air asin, dan memulihkan kondisi air tanah akibat intrusi air asin, serta mencegah, menghentikan, atau mengurangi terjadinya amblesan tanah.

Pengendalian daya rusak air tanah dilakukan dengan mengendalikan pengambilan air tanah dan meningkatkan jumlah imbuhan air tanah untuk menghambat/mengurangi laju penurunan muka air tanah. Penurunan muka air tanah menyebabkan ketidakseimbangan kondisi hidrogeologi, apabila terjadi terus menerus dapat mengakibatkan terjadinya intrusi air asin dan/atau amblesan tanah.

Pengendalian daya rusak air tanah meliputi upaya pencegahan, penanggulangan, dan pemulihan. Untuk mencegah terjadinya intrusi air asin dilakukan dengan membatasi pengambilan air tanah di daerah pantai yang mengakibatkan terganggunya keseimbangan antara muka air tanah tawar dan muka air tanah asin, untuk menanggulangi terjadinya intrusi air asin dilarang mengambil air tanah di daerah pantai. Sedangkan untuk memulihkan kondisi air tanah akibat intrusi air asin dilakukan dengan cara menciptakan resapan buatan (*artificial recharge*) atau membuat sumur injeksi di daerah yang air tanahnya telah tercemar air asin.

Pengendalian pada amblesan tanah meliputi kegiatan pencegahan terjadinya amblesan tanah dilakukan dengan mengurangi pengambilan air tanah bagi pemegang izin pemakaian air tanah atau izin perusahaan air tanah pada zona kritis dan zona rusak. Upaya penghentian terjadinya amblesan tanah dilakukan dengan menghentikan pengambilan air tanah. Sedangkan untuk mengurangi terjadinya amblesan tanah sebagaimana dilakukan dengan membuat sumur resapan.

6.6.2.4 Perencanaan

Dalam melakukan perencanaan pengelolaan air tanah, ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan, yaitu (ASCE, 1987):

1. Pertimbangan ekonomi
2. Pertimbangan sosial dan kelembagaan
3. Pertimbangan hukum

Kegiatan perencanaan meliputi kegiatan inventarisasi air tanah, penentuan zona konservasi, dan penyusunan rancangan pengelolaan air tanah.

Di Indonesia perencanaan pengelolaan air tanah disusun berdasarkan rencana pengelolaan sumber daya air. Dalam PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah, pengelolaan air tanah meliputi kegiatan perencanaan, pelaksanaan, pemantauan dan evaluasi, konservasi, dan pendayagunaan.

6.6.2.5 Pelaksanaan

Pelaksanaan pengelolaan air tanah meliputi kegiatan pelaksanaan konstruksi, operasi, dan pemeliharaan dalam kegiatan konservasi dan pendayagunaan air tanah.

Pelaksanaan konstruksi ditujukan untuk penyediaan sarana dan prasarana air tanah yang dilakukan antara lain dengan pengeboran, penggalian, pengadaan alat pantau air tanah dengan berdasarkan norma, standar, pedoman, dan manual sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan

Pelaksanaan operasi prasarana air tanah yang terdiri atas kegiatan pengaturan, pengalokasian serta penyediaan air tanah yang ditujukan untuk mengoptimalkan upaya konservasi, pendayagunaan, pengendalian daya rusak air tanah, dan prasarana air tanah

Pelaksanaan pemeliharaan prasarana air tanah yang terdiri atas kegiatan pencegahan kerusakan dan/atau penurunan fungsi prasarana air tanah.

Dalam pelaksanaan pengelolaan air tanah Pemerintah melibatkan pihak lain yang memegang izin pelaksanaan konstruksi, operasi, dan pemeliharaan. Pemegang ijin adalah perorangan atau badan usaha yang memiliki izin pemakaian air tanah atau izin pengusahaan air tanah.

6.6.2.6 Pemantauan Pelaksanaan Pengelolaan Air Tanah

Upaya pemantauan berdasarkan PP No. 43 Tahun 2008 dilakukan secara berkala atau terus menerus dan berkesinambungan meliputi: pengukuran, pencatatan, pengamatan, pemeriksaan laporan, peninjauan langsung, dan analisis terhadap perubahan kuantitas maupun kualitas air tanah serta kondisi lingkungan yang mempengaruhi atau dipengaruhi oleh terjadinya perubahan tersebut.

Hasil pemantauan tersebut dipakai sebagai dasar pertimbangan pengambilan keputusan dalam melakukan peninjauan atas perencanaan pengelolaan air tanah oleh pemerintah daerah, agar keberadaan air tanah di suatu daerah dapat dikendalikan pengelolaannya sehingga air tanah dapat lestari dan berkesinambungan sehingga pemanfaatannya dapat berkelanjutan (DESDM, 2006).

Kegiatan pemantauan pelaksanaan pengelolaan air tanah dilakukan melalui (PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 Pasal 32):

1. Pengamatan
2. Pencatatan
3. Perekamanan
4. Pemeriksaan Laporan
5. Peninjauan Secara Langsung

6.6.3 Pengelolaan Kebutuhan

Kegiatan ini bertujuan untuk dapat menggunakan air secara efisien dan efektif baik dari segi kuantitas maupun kualitasnya. Untuk itu ada beberapa hal yang perlu dilakukan yaitu: peningkatan efisiensi pemakaian, daur ulang dan penggunaan kembali, peningkatan efisiensi suplai air dan pemanfaatan air secara berkesinambungan (*conjunctive use*).

6.6.3.1 Efisiensi Pemakaian

Salah satu kunci keberhasilan untuk meningkatkan efisiensi adalah mekanisme untuk mengubah sifat perilaku masyarakat dalam pemakaian air, meliputi:

- Pendidikan dan komunikasi, termasuk program untuk bekerja dengan pemakai di sekolah, masyarakat dan level institusi
- Insentif ekonomi, termasuk tarif dan biaya penggunaan air dan biaya untuk lingkungan.
- Subsidi untuk penggunaan air lebih efisien

Peningkatan efisiensi pemakaian membutuhkan banyak instrumen yang bersifat khusus dan hanya berlaku untuk kondisi lokal dengan target grup tertentu.

Kampanye pendidikan, komunikasi dan sosialisasi kontinyu harus ditujukan pada pemakai langsung di lokasi yang tertentu. Dengan kata lain kegiatannya tidak dapat digeneralisir.

Pada kenyataannya sering terjadi program efisiensi diganggu oleh kesalahan kebijakan yang mengalokasikan air untuk pemakaian yang lain (misal kebijakan air baku yang semula untuk air minum menjadi untuk air irigasi atau sebaliknya). Hal ini dimungkinkan terjadi ketika pengelolaan air tanah dipengaruhi oleh kebijakan-kebijakan penguasa yang beorientasi pada kepentingan lain.

Penentuan harga air adalah efektif dalam peningkatan efisiensi untuk suplai air masyarakat perkotaan dan cenderung juga dipakai untuk pengelolaan irigasi (mengurangi pemakaian air yang boros). Bila penentuan harga ini bisa berhasil untuk pemanfaatan air tanah pada berbagai keperluan maka dapat dilakukan optimalisasi untuk pembagian air tanah yang efektif.

6.6.3.2 Daur Ulang dan Penggunaan Kembali

Daur ulang dan penggunaan kembali sangat bagus untuk dipakai di tingkat DAS untuk air permukaan maupun CAT untuk air tanah. Dengan pengolahan limbah cair (*waste water treatment plant*), air yang kotor dapat diolah dan dikembalikan ke sungai ataupun ke dalam tanah. Secara umum sudah diketahui bahwa disamping degradasi kuantitas, air juga mengalami degradasi kualitas yang hebat.

Sebagai contoh, pada dekade tahun 60-an, Kali Semarang di Kota Semarang masih berwarna jernih sedikit kekuningan dan dipakai oleh penduduk sekitar untuk keperluan mandi cuci. Sekarang seiring dengan perkembangan kota terutama pertambahan penduduk dan pesatnya peningkatan industri di Semarang kali tersebut sudah berwarna kehitaman dan tidak bisa dipakai lagi. Bahkan bila kita berada di sekitarnya baunya cukup menyengat.

Hal diatas menunjukkan secara visual bahwa kualitas air permukaan telah mengalami degradasi yang sangat cepat. Sumber air permukaan ini bisa juga berasal dari air tanah yang tercemar. Degradasi kualitas air umumnya terjadi di kota-kota besar di mana faktor pertumbuhan penduduk dengan segala konsekuensinya merupakan sumber pencemaran air tanah.

6.6.3.3 Efisiensi Suplai Air

Hal-hal yang penting untuk peningkatan efisiensi pemakaian air tanah pada bagian distribusi (hilir) meliputi:

- Pengukuran meter air secara menyeluruh pada jaringan air bersih.
- Pembagian zona-zona pengukuran meter air.
- Pengurangan adanya tekanan dan kehilangan air baik kebocoran teknis maupun kebocoran administrasi.
- Peningkatan suplai air (misal pembuatan waduk-waduk kecil dan ground reservoir di daerah Non-CAT).

- Pemeliharaan sistem suplai air yang rutin mulai dari transmisi sampai distribusi.

Peningkatan efisiensi juga dapat dilakukan dengan perbaikan dari jaringan transmisi dan distribusi, misalnya untuk air bersih dengan merubah saluran tanah menjadi saluran dengan pasangan batu, mengganti jaringan pipa yang sudah lama umurnya. Demikian pula untuk sistem irigasi, peningkatan efisiensi pemakaian air dapat dilakukan cara-cara: penggantian jenis saluran tanah menjadi saluran pasangan batu, penentuan pola tanam yang tepat berdasarkan konsensus semua pemakai air, pemeliharaan yang kontinyu. Peningkatan efisiensi ini juga berarti dapat menunda tambahan modal/investasi walaupun perlu dilakukan dengan analisis keuangan dan ekonomi yang hati-hati dan akurat.

Pemanfaatan air hujan juga merupakan teknologi tepat guna yang efektif, misalnya dengan pembangunan tampungan air berupa situ-situ atau embung-embung (waduk kecil) dan *ground reservoir* terutama di daerah Non-CAT. Kebutuhan modal relatif lebih kecil dibandingkan dengan pembuatan waduk besar untuk sistem yang lebih besar. Di daerah yang kekurangan air, umumnya tampungan air tersebut bisa langsung dikelola oleh masyarakat sekitarnya karena hasilnya dirasakan langsung.

6.6.4 Instrumen Perubahan Sosial

Aspek sosial merupakan merupakan salah satu aspek penting dalam pengelolaan sumber daya air terpadu termasuk pengelolaan air tanah baik di daerah CAT maupun Non-CAT. Oleh karena itu, pengelolaan tersebut harus dipandang sebagai suatu aktifitas menyeluruh yang pada hakekatnya adalah dari masyarakat, oleh masyarakat dan untuk masyarakat dalam mewujudkan suatu kehidupan yang layak, berkeadilan dan sejahtera (Kodoatie dan Sjarief, 2007).

Instrumen-instrumen perubahan sosial dalam pengelolaan sumber daya air meliputi: pendidikan, pelatihan, komunikasi, partisipasi.

6.6.4.1 Pendidikan dalam Pengelolaan Air

Pendidikan dapat dilakukan mengikuti cara-cara pendidikan formal maupun Non-formal.

1. Pendidikan formal

Terdapat banyak cara dimana pengelolaan air tanah diperkenalkan ke dalam kurikulum umum baik di dalam maupun di luar kelas, misalnya:

- peningkatan dan pemakaian buku mengenai air dan buku lingkungan umum di sekolah-sekolah
- pemanfaatan internet tentang air tanah.
- pengembangan model pengalaman tentang air tanah untuk menambah pengetahuan tentang IPA, geografi dan sejarah.
- pemakaian dan pemanfaatan proyek pengelolaan sumber daya air lokal (artinya proyek yang berdekatan dengan lokasi sekolah) sebagai sarana belajar di luar kelas
- kunjungan ke infrastruktur keairan untuk menambah pengetahuan anak SMP, misalnya ke contoh-contoh sumur resapan.
- Kunjungan ke daerah-daerah yang kekurangan air, untuk menumbuhkan kesadaran akan perlunya konservasi serta pendayagunaan air tanah yang aman dan ramah lingkungan.
- Kunjungan studi ke daerah-daerah wisata mata air, atau daerah *recharge area*.

Pengelola air dan para pendidik dapat bekerjasama untuk:

- Memikirkan bersama bagaimana aset air tanah lokal dapat dipakai sebagai sumber pembelajaran untuk masyarakat dan sekolah.
- Seminar, diskusi, pelatihan diseminasi mengenai persoalan air

Studi-studi tentang pengenalan sikap terhadap konservasi air tanah menunjukkan bahwa jalan yang paling efisien dalam mempengaruhi sikap orang dewasa adalah dengan pendidikan dan pelajaran anak di sekolah. Karena umumnya, orang tua akan mendengarkan cerita anaknya tentang pelajaran apa yang didapat di kelas. Hal tersebut untuk air tanah lebih sulit dibandingkan dengan air permukaan karena letaknya di bawah muka tanah.

Perkenalan proyek ilmu pengetahuan alam di dalam kelas akan membuat siswa paham akan realita persoalan air. Gambar, photo dan visualisasi lainnya seperti film akan sangat membantu bagi anak-anak untuk memahami dengan lebih jelas.

Disamping disampaikan kepada anak didik, promosi mengenai lingkungan alam dapat juga diberikan kepada para guru dalam bentuk pelatihan, kursus, dan seminar. Hal ini sangat bermanfaat terutama untuk penyusunan kurikulum yang terkait dengan pengelolaan sumber daya air.

2. Pendidikan Non-Formal

Pendidikan Non-formal dapat dilakukan dengan berbagai cara, diantaranya pelatihan untuk para profesional dan pelatihan pelatih.

Pelatihan untuk para profesional bertujuan untuk reorientasi pola pikir. Karena reorientasi ini khususnya dalam profesi keairan adalah cukup penting dengan melihat perkembangan yang cepat dari pengelolaan sumber daya air terpadu dalam dua puluh dekade terakhir. Caranya dengan penawaran kursus-kursus spesifik yang dimodifikasi dari kuliah-kuliah di universitas. Stimulasi pola pikir dapat

dilakukan dengan peningkatan wawasan lingkup tradisional sumber daya air yang sebelumnya terfokus hanya pada aspek rekayasa (engineering) dengan memasukkan topik-topik tentang dampak sosial, desain institusi, analisis kebijakan publik, penilaian kebutuhan dan resolusi konflik dalam pengelolaan sumber daya air.

Cara-cara khusus yang dilakukan meliputi:

- Penyediaan kursus yang khusus dalam rangka pendekatan keikutsertaan dan kesadaran gender.
- Peningkatan pelatihan yang mengikutsertakan para praktisi air, termasuk para pakar lingkungan, ekonomi, teknik, sosial, ilmu pengetahuan dan bisnis.
- Pengembangan modul pelatihan kerja untuk mengejar ketertinggalan dalam teknologi
- Mengembangkan pelatihan dengan modul dalam pendekatan *bottom-up* dan teknik baru (teknologi tepat guna)
- Tindakan-tindakan untuk memastikan bahwa pengelolaan air termasuk dalam program gelar fakultas teknik dan fakultas-fakultas lainnya seperti ekonomi, sosial, lingkungan, biologi, dsb.
- Aktifitas *on the job training* adalah sangat efektif sebagai alat pembelajaran dan agen perubahan dalam organisasi air yang besar.
- Pelatihan pelatih (*training of trainee*) meliputi mekanisme-mekanisme untuk menginstruksikan orang (yang dikategorikan sebagai pelatih) bagaimana melatih orang-orang lain dalam transfer informasi dan komunikasi. Pengalaman menunjukkan bahwa kursus yang sukses untuk melatih pelatih merupakan gabungan dari pelajaran di kelas (kuliah) dengan belajar dari praktek (Kodoatie dan Sjarief, 2007).

6.6.4.2 Komunikasi dengan Para Pihak

Dengan kompleksnya persoalan yang berkaitan dengan sumber daya air termasuk air tanah maka kepandaian berkomunikasi dapat merupakan alat (sarana) dalam pemberian informasi ke semua pihak baik menurut disiplin ilmu maupun tingkatan (lapisan) masyarakat.

Peoples (2002) membuat ranking tentang faktor-faktor apa yang menyebabkan orang berhasil seperti ditunjukkan dalam tabel berikut.

Tabel 6-3. Faktor-faktor utama dalam meraih sukses

No.	Deskripsi	Nilai/Skor (%)
1	Kepandaian berkomunikasi	71
2	Kemampuan berfikir/kecerdasan	64
3	Integritas	54
4	Pengalaman	50
5	Antusias, berfikir positif	46
6	Menghargai/percaya diri	37
7	Berani menanggung resiko	35
8	Pendidikan formal	29
9	Ambisi	25
10	Berpikiran matang	16

Dalam berkomunikasi masing-masing *stakeholder* harus mengetahui perannya yang pada umumnya dikelompokkan dalam 7 grup, meliputi: 1. penyedia pelayanan (*service provider*), 2. pengatur (*regulator*), 3. perencana (*planner*), 4. pelaksana, 5. pengawas, 6. organisasi pendukung (*support organizations*) dan 7. pemakai (*user*).

Terdapat banyak cara yang dapat dipakai untuk mendapatkan pertukaran informasi dan berkomunikasi diantara *stakeholder* dan cocok untuk berbagai macam orang yang berbeda. Beberapa diantaranya meliputi:

- Pertukaran dalam pengalaman sosial, konferensi, simposium ataupun pertemuan profesional.
- Material tertulis seperti surat kabar, media elektronik, buletin, dan email chatting mengenai pengalaman pengelolaan sumber daya air terpadu.
- Sistem informasi CAT dengan fasilitas web site interaktif yang mengkhususkan opsi-opsi pengelolaan pada situasi dan kondisi tertentu dalam CAT ataupun WS.
- Sistem informasi geografi yang interaktif untuk pemakaian dalam agen-agen atau kemitraan yang ditargetkan dalam konteks pengelolaan sumber daya air.
- Pelatihan profesional untuk saling menukar pengalaman inti pengelolaan air tanah.
- Penyiaran radio dan presentasi video di media elektronik (TV) tentang berbagai informasi air tanah, misalkan berita mengenai kondisi krisis air tanah di DKI Jakarta.
- Capacity building tingkat desa melalui diskusi dengan para petani dan tokoh-tokoh di pedesaan.
- Kunjungan kerja yang bersifat pembelajaran dan teknis bersifat nasional dan regional akan lebih membantu para praktisi dan pakar saling bertukar informasi mengenai hasil dari pengelolaan sumber daya air terpadu.

Praktisi air belajar banyak dari interaksi langsung satu sama lain, berbagi masalah-masalah umum, perhatian dan sukses. Informasi dan komunikasi yang baik dapat lebih ditingkatkan dengan:

- Ketepatan
- Penyediaan informasi yang relevan terhadap pengelolaan air tanah, hasil-hasil pengelolaan yang sudah teruji di lapangan dan juga dibuktikan secara teliti melalui riset dan pengembangan.
- Akses

Pembangunan atau peningkatan kapasitas terkini para praktisi akan lebih baik dibandingkan dengan pembaharuan yang besar

Pertukaran informasi harus dapat menghargai kebutuhan budaya, kearifan lokal dan isu gender tanpa ada diskriminasi antara pemakai dan penyedia dengan alasan lokasinya cukup jauh.

6.6.4.3 Kampanye Air dan Peningkatan Kepedulian

Kampanye tentang air perlu dilakukan untuk mengenalkan dan menyadarkan masyarakat akan pentingnya air.

Secara garis besar maka bahan sebagai awalan untuk kampanye tentang air meliputi (Kodoatie dan Sjarief, 2007):

- Manusia dan semua makhluk hidup butuh air. Air merupakan material yang membuat kehidupan terjadi di bumi.
- Manusia wajib minum air putih 8 gelas per hari.
- Kebutuhan air orang per hari untuk standard normal adalah antara 125–200 liter yaitu untuk, minum dan masak, cuci alat masak, mandi, wc, cuci tangan, bersih rumah dan cuci pakaian
- Untuk tanaman, kebutuhan air juga mutlak. Pada kondisi tidak ada air terutama pada musim kemarau tanaman akan segera mati.
- Andalan sumber air pada musim kemarau adalah air tanah.
- Bila banjir meningkat, kekeringan juga akan meningkat.
- Kapasitas air tanah bisa tidak kontinyu dan tidak berkelanjutan bila pengambilan melebihi ambang batas safe yield.

Awalan di atas secara psikologis dimaksudkan agar *stakeholder* akan tertarik terhadap masalah air. Bahkan akan lebih baik jika *stakeholder* merasa mempunyai kepentingan tentang air atau merasa memiliki keberadaan air (*water's everyone business*). Dengan demikian kampanye air dengan bahan yang lebih luas akan dapat diikuti. Selanjutnya, isu-isu tentang air lainnya mencakup: konservasi air, kepedulian untuk hemat air, kepedulian untuk membayar atau berkontribusi kepada pelayanan air, pengaruh dampak kerusakan lingkungan terhadap ketersediaan air, tidak membuang sampah di sembarang tempat yang akan menyebabkan tersumbatnya saluran/sungai sehingga terjadi banjir.

Kampanye air seyogyanya merupakan komunikasi timbal balik bukan komunikasi satu arah. Pelaku kampanye dan peserta dapat berinteraktif secara penuh. Jenis metode komunikasi yang tersedia untuk kampanye kesadaran adalah cukup banyak, antara lain meliputi (Kodoatie dan Sjarief, 2007):

- Penggunaan langsung media konvensional atau Non-konvensional seperti pesan dalam tagihan air, permainan, tiket transportasi, cerita bergambar yang menarik, dll.
- Pengikutsertaan para selebriti untuk berkampanye. Walau tidak begitu banyak mengetahui masalah air namun kehadiran selebriti yang menjadi ikon masyarakat akan menjadi daya tarik tersendiri bagi *stakeholder* untuk datang atau mengikuti kampanye.
- Penggunaan jaringan kerja yang ada.
- Pemakaian logo untuk memberi identifikasi terhadap kampanye.

6.6.4.4 Perluasan Partisipasi dalam Pengelolaan Air Tanah

Peningkatan dan perluasan partisipasi ke semua pihak dalam pengelolaan sumber daya air, termasuk peningkatan peran wanita merupakan hal yang sangat penting dalam pengelolaan sumber daya air terpadu.

Penegakkan hukum (*law enforcement*) juga dapat dikatakan sebagai salah satu upaya peningkatan partisipasi. Sebagai contoh, peraturan tentang larangan membuang sampah di sembarang tempat yang ditegakkan secara tegas dengan pemberian sanksi atau hukuman kepada pelanggar dan dipublikasikan secara luas akan memberikan efek jera kepada masyarakat secara psikologis. Demikian halnya dengan

pemberian hukuman bagi pelaku-pelaku penjarahan hutan akan berdampak positif terhadap lingkungan yang berarti pula bisa meningkatkan ketersediaan air.

6.6.5 Resolusi konflik

Konflik merupakan salah satu bentuk interaksi sosial dalam proses sosial yang disosiatif. Penyebab dari konflik antara lain (Soekanto, 2002):

- Perbedaan antar individu, kelompok atau golongan, dapat berupa perbedaan prinsip atau perbedaan perasaan.
- Perbedaan kebudayaan yang secara sadar maupun tidak sadar mempengaruhi pola pemikiran dan pendirian.
- Perbedaan kepentingan dalam berbagai dimensi seperti ekonomi, politik dan sosial.
- Perubahan sosial, terutama yang berlangsung dengan cepat akan mengubah nilai-nilai yang ada dalam masyarakat.

Konflik memang tidak dapat dihindari dalam pengelolaan sumber daya air terutama saat sumber daya air di suatu wilayah adalah terbatas.

Konflik bisa juga menjadi sesuatu yang bersifat positif, konflik dapat membantu untuk:

- Identifikasi masalah yang sesungguhnya membutuhkan solusi.
- Membuat perubahan yang pada hakekatnya tidak merusak lingkungan alam.
- Penyesuaian tanpa adanya ancaman yang berbasis hubungan.
- Membantu membuat ikatan hubungan yang baru.
- Perubahan, cara kita melihat persoalan, penjelasan tujuan.
- Identifikasi hal-hal utama atau yang paling penting.

6.6.5.1 Alat Pengelolaan Konflik

Alat untuk pencarian solusi konflik ada bermacam-macam, diantaranya: fasilitasi, mediasi, pencarian fakta (*fact finding*) dan arbitrase. Fasilitasi biasanya sering dipakai dalam situasi yang mengikutsertakan banyak pihak. Fasilitator yang netral harus secara aktif dan terus menerus berpartisipasi dalam rencana dan diskusi penyelesaian masalah.

Mediasi adalah proses negosiasi untuk konflik kepentingan. Pelaku konflik akan memilih penengah yang dapat diterima untuk membantu mereka dalam mendesain proses penyelesaian dan pencapaian persetujuan yang dapat diterima semua pihak (*win-win solution*). Mediasi lebih formal dibandingkan fasilitasi dan dipakai bilamana ada hubungan antar pihak yang bertikai walaupun masalahnya sangat sulit dan juga bermanfaat ketika yang bertikai mengalami kebuntuan (Kodoatie dan Sjarief, 2007).

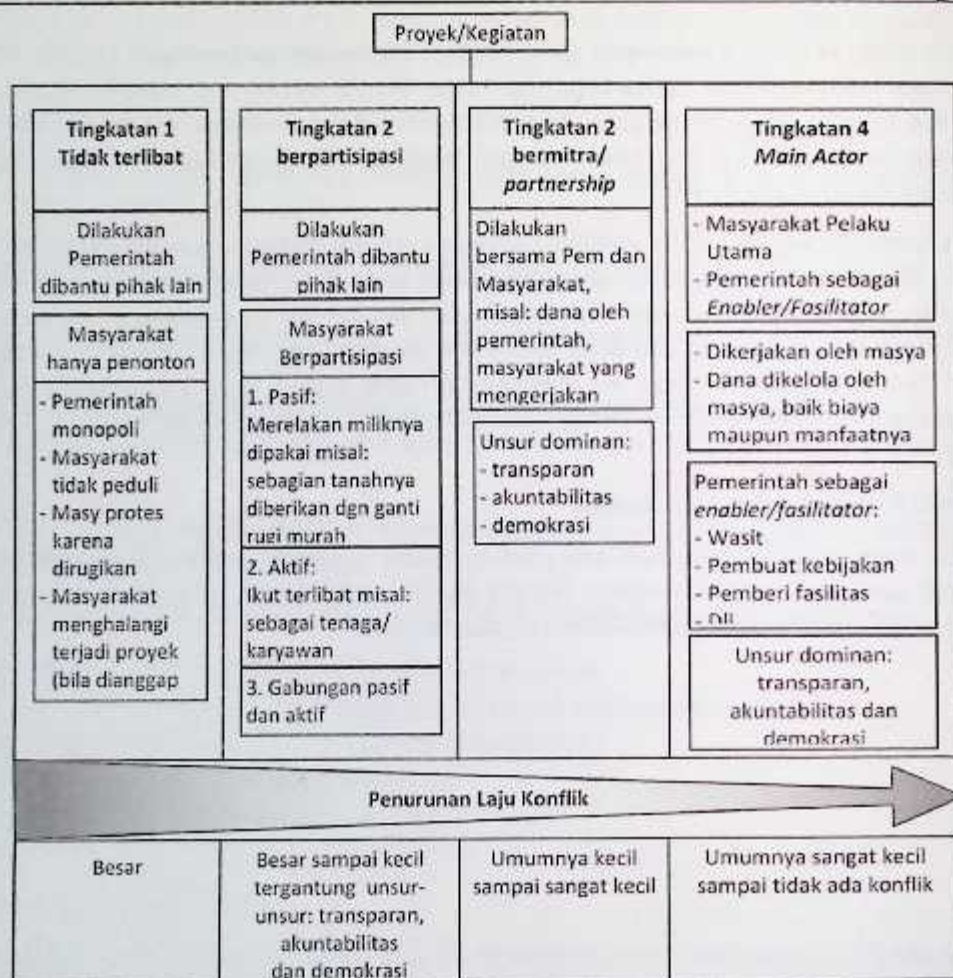
Pencarian suatu fakta (*fact finding*) adalah untuk memperjelas persoalan yang ada dan dapat merupakan alat untuk lebih mempertegas pernyataan, argumentasi ataupun pendapat dari pelaku konflik dalam koridor yang ilmiah.

Dalam arbitrase, kelompok-kelompok yang bertikai mengeluarkan pendapat kepada arbiter yang bertindak sebagai hakim. Artinya ketika keputusan akhir diambil ada kecenderungan terjadinya pro dan kontra terhadap keputusan. Arbitrase juga sangatlah penting dalam keadaan dimana keadilan sangatlah lemah misalnya konflik masyarakat biasa dengan penguasa (yang mempunyai kekuasaan) ataupun pengusaha (yang mempunyai dana).

Para ahli sumber daya air sering melihat pertikaian sebagai masalah yang aktual akibat suatu misinformasi, misinterpretasi ataupun kesalahpahaman dari suatu data. Tetapi kasus yang sering terjadi di lapangan adalah munculnya pertikaian lebih didominasi oleh konflik kepentingan dibandingkan dengan fakta. Dalam kasus ini pencarian fakta akan cenderung dibatasi atau bahkan dihindari. Ini terlihat jelas bilamana isu persoalan sumber daya air mempunyai ruang lingkup yang luas (global) dibandingkan dengan kasus-kasus spesifik misalnya pembuatan infrastruktur di suatu lokasi tertentu (Kodoatie dan Sjarief, 2007).

6.6.5.2 Proses Partisipasi dan Laju Konflik

Partisipasi masyarakat mempunyai arti penting dalam suksesnya suatu proyek sumber daya air. Semakin tinggi partisipasi maka semakin rendah konflik yang timbul. Hubungan antara partisipasi masyarakat dan laju konflik ditunjukkan dalam gambar berikut.



Gambar 6-18. Tingkatan partisipasi dan penurunan laju konflik

6.6.5.3 Pembagian Perencanaan Visi

Perkembangan teknologi yang pesat membantu dan memberikan kesempatan pembuatan model-model interaktif dalam pengelolaan sumber daya air.

Beberapa contoh model adalah: optimasi, penilaian (*valuation*), dan pembagian visi. Model optimasi menghasilkan ide dalam penentuan investasi ataupun pilihan yang terbaik berdasarkan asumsi-asumsi tertentu. Model ini dapat dipakai untuk penyelesaian konflik walaupun harus dilakukan secara hati-hati.

Model penilaian adalah alat penting untuk mendukung pengelolaan konflik dan dapat memfasilitasi proses pembagian keuntungan (*sharing benefit*). Ini akan membantu menentukan solusi secara implisit.

Model pembagian visi paling baik dipakai dalam kondisi multi *stakeholders* atau multi persoalan. Proses pengembangan pembagian visi dapat berfungsi sebagai alat bantu membangun kesamaan bahasa tentang isu-isu sumber daya air antar pihak-pihak terkait. Proses ini juga berguna pada kondisi-kondisi tidak adanya kesamaan *data-base*, sulitnya pembagian data ataupun terbatasnya pembagian pengetahuan tentang sumber daya air.

6.6.5.4 Kesepahaman dan Kesepakatan

Kesepahaman dan kesepakatan (*consensus building*) adalah strategi atau pendekatan yang dipakai untuk dialog kebijakan sumber daya air inter-sektor.

Proses *consensus building* pada umumnya mempunyai beberapa tahap, prosedur ataupun intensitas, meliputi:

- Dimulai dengan definisi masalah daripada mencari solusi ataupun pengambilan posisi.
- Berfokus pada kepentingan
- Mengidentifikasi beberapa alternatif
- Persetujuan pada prinsip atau kriteria untuk mengevaluasi alternatif
- Mengharapkan persetujuan untuk mengurangi resiko kesalahpahaman
- Setuju dalam proses dimana persetujuan terbuka untuk direvisi dan juga ketidaksetujuan yang lain dapat dipecahkan solusinya
- Pemakaian proses untuk menciptakan persetujuan
- Penciptaan komitmen untuk diimplementasikan oleh para partisipan yang ikut dalam pengambilan keputusan.
- Menerima legitimasi perasaan.

Beberapa instrumen atau alat yang berkaitan dengan kesepakatan dan kesepahaman adalah:

- Pelatihan bersama yang akan membawa dan mengantarkan pelaku konflik duduk bersama untuk belajar bagaimana menyelesaikan pengelolaan konflik.
- Dialog kebijakan yang akan membawa para pelaku konflik bersama dalam suatu pandangan akhir. Partisipasi semua pihak dalam penentuan formulasi kebijakan akan mempercepat pelaksanaan dan mengurangi konflik.
- Penilaian konflik strategi yang digunakan pada tahap intervensi awal, untuk intervensi konflik yang nyata, dan sekaligus dapat direncanakan resolusi konflik tersebut.
- Negosiasi berbasis kepentingan yang dipakai oleh individual atau lembaga netral untuk menciptakan dan mengelola proses. Pengalaman melakukan kegiatan ini menunjukkan keberhasilan dalam berbagai kegiatan antara lain dalam klaim proyek konstruksi, persetujuan untuk formulasi pembagian pembiayaan, implementasi peraturan, operasi infrastruktur air dan lain-lain.

Kesepahaman dan kesepakatan akan sangat berguna menyelesaikan situasi konflik tingkat rendah sampai sedang dimana setiap pihak akan saling mengenal satu sama lain. Kesepahaman dan kesepakatan dapat dipakai dalam tingkat lokal, kabupaten/kota, lintas kabupaten/kota, provinsi, bahkan nasional.

6.6.6 Instrumen Pengatur

Instrumen pengatur pada hakekatnya bertujuan agar kebijakan dan perencanaan dapat dilaksanakan di lapangan dengan benar.

Dengan fasilitas kerangka kerja legal yang tepat, instrumen ini mengatur, mengarahkan, mengijinkan, melarang, membatasi ataupun menentukan hal-hal yang terkait dengan sumber daya air.

Pembuatan peraturan mulai dari tingkat pusat, provinsi dan kabupaten/kota melalui proses yang panjang, melibatkan semua pihak baik pemerintah maupun Non-pemerintah. Sebagai contoh untuk tingkat undang-undang, pada Tahun 2004 telah diterbitkan UU No. 7 Tentang Sumber Daya Air sebagai pengganti dari UU No. 11 Tahun 1974 Tentang Pengairan. Prosesnya dimulai Tahun 1992 dan baru disahkan 12 tahun kemudian. Walaupun telah disahkan Tahun 2004, sampai awal Tahun 2005 UU ini masih digugat dalam bentuk *judicial review* di Mahkamah Konstitusi.

Herarki instrumen pengatur yang berlaku adalah seperti ditunjukkan dalam tabel berikut.

Tabel 6-4. Herarki instrumen pengatur (Kodoatie dan Sjarief, 2007)

No.	Instrumen pengatur	Kedudukan	Berlaku
1	Undang-Undang Dasar (UUD)	1	Nasional
2	Ketetapan MPR (Tap MPR)	1	Nasional
3	Undang-undang (UU)	2	Nasional
4	Peraturan Pemerintah Pengganti UU (Perpu)	2	Nasional
5	Peraturan Pemerintah (PP)	3	Nasional
6	Peraturan Presiden (Perpres)	4	Nasional
7	Keputusan Presiden (KepPres)	4	Nasional
8	Instruksi Presiden (InPres)	4	Nasional
9	Peraturan Menteri (Permen)	5	Nasional
10	Keputusan Menteri (Kepmen)	5	Nasional
11	Peraturan Daerah Propinsi (PerDaProp)	6	Provinsi
12	Peraturan Gubernur (PerGub)	7	Provinsi
13	Surat Keputusan Gubernur (SK Gub)	7	Provinsi
14	Instruksi Gubernur (InGub)	7	Provinsi
15	Peraturan Daerah Kabupaten/Kota (Perda Kab/kota)	8	Kab/Kota
16	Surat Keputusan Bupati/Walikota (SK Bupati/Walikota)	9	Kab/Kota
17	Instruksi Bupati/ Walikota	9	Kab/Kota

Disamping instrumen pengatur yang legal secara hukum juga dibuat norma, standar, pedoman, manual, prosedur, baku mutu dan kriteria yang dipakai sebagai salah satu referensi dalam pengelolaan sumber daya air.

6.6.6.1 Pengaturan Kualitas Air Tanah

Pengaturan ini menyangkut hal-hal yang berkaitan dengan pencemaran air tanah baik dari polusi sumber titik (*point source pollution*) maupun polusi sumber bukan titik (*Non-point source pollution*).

Tindakan-tindakan pengelolaan dalam upaya pengaturan kualitas air tanah menurut Brooks dkk. (1994) dibagi menjadi tiga kategori, yaitu: pengaturan, fiskal, dan pengelolaan serta investasi publik secara langsung. Yang masuk dalam kategori fiskal meliputi harga, pajak, subsidi, denda, dan bantuan. Sedangkan yang masuk dalam kategori pengelolaan dan investasi publik diantaranya bantuan teknis, riset, pendidikan dan pengelolaan tanah dan air, instalasi dan infrastruktur.

Novotny dan Chesters (1981) mengklasifikasikan teknik atau praktek pengelolaan tepat guna (*best management practice*) untuk polusi sumber bukan titik dalam tiga bagian, yaitu: pengendalian sumber tanah-tanah yang terkena dampak pencemaran dan pengendalian tata guna lahan, pengendalian pengumpulan pencemaran, reduksi pengantaran pencemaran ke wadah-wadah air dan perbaikan/pengolahan aliran permukaan.

Instrumen pengatur dapat dikembangkan untuk melindungi air tanah, mencari kesulitan dalam mengawasi dan merehabilitasi air tanah. Tipe lain alat pengatur termasuk (Kodoatie dan Sjarief, 2007):

- Standar produk yang diatur untuk bahan kimia, seperti pestisida dan pelarangan DDT.
- Kontrol penggunaan tanah dapat mempengaruhi ketetapan standar.
- Peraturan keamanan dan cara kerja untuk ketidaksengajaan polusi akan juga berguna.
- Pendekatan kualitas air yang biasanya berbasis pada prioritas dan lebih kompleks untuk mengaplikasikan daripada pendekatan emisi.
- Pendekatan kualitas air membutuhkan ketersediaan air daripada kualitas air yang mendetail dari penerima.
- Supaya peraturan lebih efektif mereka harus diimplementasikan oleh institusi dengan kapasitas implementasi, pengawasan kepenuhan dan penegakkan.
- Pendekatan kualitas air dapat menuju ke kondisi pengaturan yang berbeda untuk polluter yang sama dari lembah sungai yang berbeda karena kondisi mereka menerima lingkungan, untuk menentukan pelaksanaan standar yang berbeda di lingkungan yang berbeda pula. Secara politik hal ini akan lebih sulit dibandingkan aplikasi yang sama.
- Pendekatan emisi atau control polusi berbasis pada teknologi terbaik yang ada akan sangat penting bagi polutan yang memenuhi lingkungan.
- Produk standar akan lebih baik untuk mematikan polusi karena emisi jauh lebih sulit untuk dipantau.
- Standar harus dapat dicapai dalam jangka pendek, tetapi mereka juga harus menstimulasi perkembangan dalam jangka panjang melalui kemajuan ketat.

6.6.6.2 Pengaturan Kuantitas Air

Alat pengatur untuk air permukaan dan air tanah mempunyai fungsi bermacam-macam, meliputi: mengetahui kapasitas aliran (debit) sehingga bisa diketahui ketersediaan air, mengetahui berapa air yang bisa diambil (*safe yield*) sehingga bisa diijinkan berapa air yang bisa diambil (kebutuhan air). Perlu ada regulasi pengambilan air permukaan dan air tanah sesuai karakter dari keduanya untuk menghindari pengambilan berlebih satu dengan lainnya.

Dalam UU Sumber Daya Air pengaturan kualitas dan kuantitas air dijelaskan cukup rinci. Hal ini tersurat dalam bagian konservasi dan pendayagunaan air. Pengendalian kualitas air dilakukan dengan Pengelolaan Kualitas untuk mempertahankan dan memulihkan kualitas air yang masuk dan yang ada pada sumber-sumber air. Dilakukan dengan cara memperbaiki kualitas air pada sumber air antara lain dilakukan melalui upaya aerasi pada sumber air dan prasarana sumber daya air. Pengendalian pencemaran dilakukan dengan cara mencegah masuknya pencemaran air pada sumber air dan prasarana sumber daya air. Untuk mencegah masuknya pencemaran air pada sumber air misalnya dilakukan dengan cara tidak membuang sampah di sumber air, dan mengolah air limbah sebelum dialirkan ke sumber air.

Sedangkan pengendalian kuantitas air dilakukan dengan pengawetan air yang berupa menyimpan air yang berlebihan di saat hujan untuk dapat dimanfaatkan pada waktu diperlukan, menghemat air dengan pemakaian yang efisien dan efektif dan/atau mengendalikan penggunaan air tanah.

6.6.6.3 Pengaturan untuk Pelayanan Air

Standar umum biasanya ditetapkan dengan melihat semua aspek meliputi pengiriman air, kualitas air, keamanan suplai air, distribusi ke konsumen, dan pemeliharaan sistem pelayanan infrastruktur air.

Kondisi pelayanan air bersih untuk masyarakat terutama yang dilayani oleh PDAM masih belum baik. Banyak keluhan dari pelanggan mulai dari air keruh, mampet, dan tidak pernah mengalir. Bahkan pada saat air tidak mengalir pun masih ditagih.

Perangkat hukum untuk peningkatan pelayanan air bagi konsumen sudah ada dengan terbit dan berlakunya UU No. 8 Tahun 1999 tentang Perlindungan Konsumen.

Dalam UU juga disebutkan hak-hak konsumen meliputi antara lain: kenyamanan, keamanan, dan keselamatan dalam mengonsumsi barang dan/atau jasa; hak untuk memilih barang dan/atau jasa serta mendapatkan barang dan/atau jasa tersebut sesuai dengan nilai tukar dan kondisi serta jaminan yang dijanjikan; hak atas informasi yang benar, jelas dan jujur mengenai kondisi dan jaminan barang dan/atau jasa; hak untuk didengar pendapat dan keluhannya atas barang dan/atau jasa yang digunakan; hak untuk mendapatkan advokasi, perlindungan dan upaya penyelesaian sengketa perlindungan konsumen secara patut; hak untuk diperlakukan atau dilayani secara benar dan jujur serta tidak diskriminatif dan hak untuk mendapatkan kompensasi, ganti rugi dan/atau penggantian, apabila barang dan/atau jasa yang diterima tidak sesuai dengan perjanjian atau tidak sebagaimana mestinya.

6.6.6.4 Pengendalian Perencanaan Tata Guna Lahan dan Perlindungan Alam

Contoh dari peralatan untuk pemakaian tanah termasuk (Kodoatie dan Sjarief, 2007):

- Zona mengidentifikasi area dimana bentuk khusus dari pemakaian tanah dilarang dan beberapa peraturan khusus dipakai. Perlu ada peraturan tentang zona (*zoning regulation*).
- Surat izin konstruksi terkadang dibutuhkan sebelum perumahan atau infrastruktur dikonstruksikan dalam zona-zona perlindungan atau di sekitar daerah urban untuk melindungi kualitas dan kuantitas air terutama air tanah.

- Peraturan pembangunan diterapkan untuk mitigasi (mengurangi) kerapuhan dan kerentanan bencana air
- Perlindungan tanah dan pengendalian erosi seperti pembajakan atau pengolahan tanah yang sejajar dengan garis kontur dan penanaman pohon. Batasan khusus dapat diaplikasikan dalam perencanaan daerah konservasi dan suaka alam.
- Peraturan pembuangan sampah, lokasi pembuangan sampah yang tepat sangat penting terhadap perlindungan air baik air permukaan dan air tanah.

6.6.7 Instrumen Ekonomi

6.6.7.1 Tarif Air dan Pelayanan Air

Tujuan dari penetapan harga air

- Perlindungan lingkungan: mendorong konservasi dan pemakaian yang efisien; pemahaman tentang keuntungan alam perlu diberikan kepada semua pihak karena meninggalkan air dari keadaan alamnya.
- Biaya pemulihan: dana untuk operasi dari sektor-sektor terkait
- Reflektivitas biaya: memberi tanda pada pemakai arti dari kelangkaan air dan biaya untuk pelayanan; hal ini akan menjadikan dorongan untuk pemakaian air yang lebih tepat guna. Hal ini menolong untuk menunjuk sumber daya yang cukup untuk penggunaan air.

Penentuan tarif air yang efektif diupayakan terjangkau dan dapat diterima oleh umum. Terjangkau dimaksudkan dapat mengerti peran utama dari air, kebutuhan spesial dari kasus sosial dan pentingnya air yang baik dan sanitasi untuk kesehatan umum. Dalam penentuan pajak harus dapat diterima oleh umum dan pengumpulannya harus sesuai dengan kapasitas pelaksanaan air.

Untuk mendapatkan tarif yang bagus salah satu caranya dengan melalui survey permintaan dan konsultasi dari pelanggan adalah penting. Dalam komunitas orang yang kurang mampu yang pelayanannya kurang berkembang, kemauan untuk membayar survey dapat menjadi point penting penetapan tarif. Hal ini juga berfungsi agar dapat dibuat mekanisme perlindungan bagi komunitas yang secara ekonomi kurang mampu dari biaya yang tinggi.

6.6.7.2 Denda Polusi

Pembiayaan polusi didasari atas:

- Biaya lingkungan dan polusi air limbah.
- Pengurangan polusi dengan penyediaan dana khusus bagi penyebab polusi misalnya industri. Hal ini perlu diatur dengan peraturan perundangan yang khusus yang merefleksikan antara polusi dan dampak yang ditimbulkannya.

Perlu ada standar denda sesuai dengan polusi yang ditimbulkannya yang sudah secara eksplisit disebutkan besarnya sehingga memudahkan instansi yang berwenang memberikan sanksi denda pada para pelaku. Denda ini merupakan bagian dari sistem peraturan yang ada. Ada instansi yang bertindak sebagai pengamat, evaluasi dan monitoring.

6.6.7.3 Pengusahaan Air dan Izin Perdagangan

Pengusahaan air sesuai dengan yang tertulis di UU Sumber Daya Air merupakan suatu upaya pemanfaatan sumber daya air untuk tujuan usaha atau menunjang suatu kegiatan usaha. Pengusahaan sumber daya air tersebut dapat berupa pengusahaan air baku:

- Sebagai bahan baku produksi
- Sebagai salah satu media atau unsur utama dari kegiatan suatu usaha, seperti PDAM, perusahaan air mineral, perusahaan minuman dalam kemasan lainnya, PLTA, olahraga arung jeram
- Sebagai bahan pembantu proses produksi, seperti air untuk sistem pendingin mesin (*water cooling system*) atau air untuk pencucian hasil eksplorasi bahan tambang.

Untuk wilayah sungai pengusahaan sumber daya air hanya dapat dilaksanakan oleh BUMN/BUMD pengelola sumber daya air. Untuk perorangan, badan usaha lainnya, atau kerjasama antar badan usaha dapat melaksanakan pengusahaan sumber daya air secara terbatas berdasarkan izin pengusahaan dari pemerintah (Pusat/Prov/Kab/Kota sesuai dengan kewenangannya) dan harus sesuai dengan rencana alokasi air yg telah ditetapkan. Izin pengusahaan antara lain memuat substansi alokasi air dan/atau ruas (bagian) sumber air yang dapat diusahakan.

Berdasarkan PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, pengusahaan dapat berbentuk:

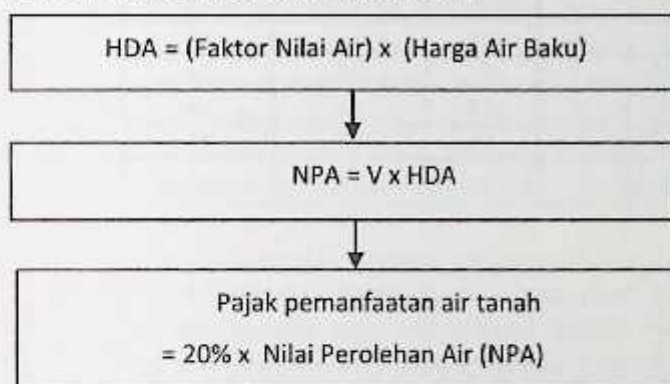
- penggunaan air pada suatu lokasi tertentu sesuai persyaratan yang ditentukan dalam perizinan.
- pemanfaatan wadah air pada suatu lokasi tertentu sesuai persyaratan yang ditentukan dalam perizinan. Pemanfaatan wadah air pada lokasi tertentu antara lain adalah pemanfaatan atau penggunaan sumber air untuk keperluan wisata air, olahraga arung jeram, atau lalu lintas air.
- pemanfaatan daya air pada suatu lokasi tertentu sesuai persyaratan yang ditentukan dalam perizinan. Pemanfaatan daya air antara lain sebagai penggerak turbin pembangkit listrik atau sebagai penggerak kincir.

Pengusahaan air untuk negara lain:

- Pengusahaan air untuk negara lain tidak diijinkan kecuali apabila penyediaan air untuk berbagai kebutuhan telah dapat terpenuhi dan harus didasarkan pada rencana pengelolaan sumber daya air wilayah sungai yang bersangkutan, serta memperhatikan kepentingan daerah di sekitarnya.
- Rencana pengusahaan air untuk negara lain dilakukan melalui proses konsultasi publik oleh pemerintah sesuai dengan kewenangannya.
- Pengusahaan air untuk negara lain wajib mendapat izin dari Pemerintah berdasarkan rekomendasi dari Pemerintah Daerah dan sesuai dengan peraturan perundang-undangan.

Pengusahaan air tanah dilakukan setelah memiliki hak guna usaha air dari pemanfaatan air tanah. Hak guna usaha air dari pemanfaatan air tanah dapat diperoleh melalui izin pengusahaan air tanah yang diberikan oleh Bupati/Walikota. Izin pengusahaan air tanah, meliputi penyediaan dan peruntukkan melalui kegiatan pengeboran atau penggalian, pengambilan, dan pengusahaan air tanah.

Pengusahaan air tanah yang dilakukan baik oleh perorangan maupun badan usaha, dapat memberikan sumbangan bagi penambahan PAD daerah tersebut. Berikut adalah cara penghitungan pajak air tanah berdasarkan PP No. 65 Tahun 2001 tentang Pajak Daerah.



di mana:

1. Faktor nilai air = (sumber daya alam + kompensasi)

Sumber daya alam = 60% x Bobot komponen sumber daya alam

Kompensasi = 40% x Bobot komponen kompensasi

2. Harga Air Baku

- Air baku: air yang berasal dari air tanah termasuk mata air yang telah diambil dari sumbernya dan telah siap untuk dimanfaatkan.
- Harga air baku: nilai rupiah dari biaya eksploitasi atau investasi untuk mendapatkan air baku tersebut besarnya yang ditentukan oleh Daerah.

Gambar 6-19. Perhitungan pajak air tanah

Perhitungan diatas juga disesuaikan dengan komponen-komponen harga dasar air, sumber daya alam, dan kompensasi yang ditabelkan sebagai berikut.

Tabel 6-5. Bobot komponen sumber daya alam
(PP No. 65 Tahun 2001 tentang Pajak Daerah)

No.	Kriteria	Peringkat	Bobot
1	Air tanah, kualitas baik, ada sumber air alternatif	3	9
2	Air tanah, kualitas baik, tidak ada sumber air alternatif	2	4
3	Air tanah, kualitas jelek	1	1

Tabel 6-6. Bobot komponen harga dasar air
(PP No. 65 Tahun 2001 tentang Pajak Daerah)

No.	Komponen	Bobot
1	Sumberdaya Alam	60 %
2	Kompensasi Pemulihan, Peruntukan dan Pengelolaan	40 %

Tabel 6-7. Bobot komponen kompensasi
(PP No. 65 Tahun 2001 tentang Pajak Daerah)

No.	Peruntukan	0-50 m ³	51-500 m ³	501-1000 m ³	1001-2500 m ³	> 2500 m ³
1	Non Niaga	1	1,1	1,2	1,3	1,4
2	Niaga Kecil	2	2,2	2,4	2,6	2,8
3	Industri Kecil	3	3,3	3,6	3,9	4,5
4	Niaga Besar	4	4,4	4,8	5,2	5,6
5	Industri Besar	5	5,5	6,0	6,5	7,0

6.6.7.4 Subsidi dan Insentif

Pemberian subsidi seperti pada penjualan air untuk kepentingan PLTA, air baku untuk minum maupun industri (dikelola oleh PDAM) dimaksudkan agar operasi dan pemeliharaan sistem wilayah sungai dapat berkelanjutan. Dengan adanya dana untuk operasi dan pemeliharaan sistem wilayah sungai maka infrastruktur keairan yang dikelola sekaligus dapat mengurangi dampak banjir dan ketersediaan air untuk irigasi (dalam wilayah sungai ini mencapai 70% seluruh kebutuhan air) dapat terus berlanjut (Kodoatie dan Sjarief, 2007).

6.6.8 Pengalihan dan Pengelolaan Data dan Informasi

Perlu diketahui akibat dari diberlakukannya otonomi daerah, timbul persoalan tentang data dan informasi yang perlu mendapat perhatian bersama. Dampak negatif dari otonomi ini adalah ada gap (*lack*) data khususnya dari kabupaten/kota yang mempunyai kekuatan otonomi (desentralisasi) yang besar, akibatnya *sequence* data banyak yang terputus sebagai konsekuensinya.

Sesuai dengan sifat dinamis aliran air yang bersifat kontinyu, maka data sumber daya air dari sisi historis harus dikumpulkan dan dikompilasi secara kontinyu.

Oleh karena itu dalam kondisi perubahan pendekatan dari *top-down* menjadi *bottom-up* harus dicari langkah-langkah strategis pengumpulan, kompilasi dan pengolahan data. Karena data akurat merupakan pendukung utama dalam pengelolaan sumber daya air yang benar.

Beberapa hal yang berkaitan dengan informasi dijelaskan sebagai berikut:

A. Sistem Informasi

Informasi yang diperlukan antara lain:

- Data baik kuantitatif maupun kualitatif.
- Informasi yang dapat dikemas menjadi bermanfaat.
- Pengetahuan untuk berbagai ilmu (multi disiplin).
- Kearifan (*wisdom*) yaitu suatu kesepakatan atau persetujuan yang diterima secara umum dalam upaya penggunaan sumber daya air yang berkelanjutan.

1. Penyelenggaraan dan Materi Informasi

- Untuk mendukung pengelolaan sumber daya air, Pemerintah dan Pemerintah Daerah menyelenggarakan pengelolaan sistem informasi sumber daya air sesuai dengan kewenangannya.
- **Informasi Teknis:** Informasi sumber daya air meliputi informasi mengenai kondisi hidrologis, hidrometeorologis, hidrogeologis, kebijakan sumber daya air, prasarana sumber daya air, teknologi sumber daya air, lingkungan pada sumber daya air dan sekitarnya, serta kegiatan sosial ekonomi budaya masyarakat yang terkait dengan sumber daya air. Informasi kondisi hidrologis misalnya tentang curah hujan, debit sungai, dan tinggi muka air pada sumber air. Informasi kondisi hidrometeorologis misalnya tentang temperatur udara, kecepatan angin dan kelembaban udara. Informasi kondisi hidrogeologis mencakup cekungan air tanah misalnya potensi air tanah dan kondisi akuifer atau lapisan pembawa air.
- **Informasi Non-Teknis:** Informasi sosial dan ekonomi yang berhubungan langsung dengan pengelolaan sumber daya air.

2. Jaringan Informasi

- Sistem informasi sumber daya air merupakan jaringan informasi sumber daya air yang tersebar dan dikelola oleh berbagai institusi.
- Jaringan informasi sumber daya air harus dapat diakses oleh berbagai pihak yang berkepentingan dalam bidang sumber daya air. Akses terhadap informasi sumber daya air yang tersedia di pusat pengelolaan data di instansi pemerintah, badan atau lembaga lain di masyarakat dapat dilakukan dengan berbagai cara, antara lain melalui internet, media cetak yang diterbitkan secara berkala, surat menyurat, telepon, facsimile atau kunjungan langsung dengan prinsip terbuka untuk semua pihak yang berkepentingan di bidang sumber daya air.
- Pemerintah dan Pemerintah Daerah dapat membentuk unit pelaksana teknis untuk menyelenggarakan kegiatan sistem informasi sumber daya air.

3. Penyelenggaraan Informasi

- Pemerintah dan Pemerintah Daerah serta pengelola sumber daya air, sesuai dengan kewenangannya, menyediakan informasi sumber daya air bagi semua pihak yang berkepentingan dalam bidang sumber daya air.
- Untuk melaksanakan kegiatan penyediaan informasi, seluruh instansi Pemerintah, Pemerintah Daerah, badan hukum, organisasi, dan lembaga serta perseorangan yang melaksanakan kegiatan berkaitan dengan sumber daya air menyampaikan laporan hasil kegiatannya kepada instansi Pemerintah dan Pemerintah Daerah yang bertanggung jawab di bidang sumber daya air.
- Pemerintah, Pemerintah Daerah, pengelola sumber daya air, badan hukum, organisasi, lembaga dan perseorangan bertanggung jawab menjamin keakuratan, kebenaran, dan ketepatan waktu atas informasi yang disampaikan.

4. Sistem Informasi Hidrologi, Hidrometeorologi, Dan Hidrogeologi

- Untuk mendukung pengelolaan sistem informasi sumber daya air diperlukan pengelolaan sistem informasi hidrologi, hidrometeorologi, dan hidrogeologi wilayah sungai pada tingkat nasional, provinsi, dan kabupaten/kota.

- Kebijakan pengelolaan sistem informasi hidrologi, hidrometeorologi, dan hidrogeologi ditetapkan oleh Pemerintah berdasarkan usul Dewan Sumber Daya Air Nasional.
- Pengelolaan sistem informasi hidrologi, hidrometeorologi, dan hidrogeologi dilaksanakan oleh Pemerintah, Pemerintah Daerah, dan pengelola sumber daya air sesuai dengan kewenangannya.
- Pengelolaan sistem informasi hidrologi, hidrometeorologi, dan hidrogeologi dapat dilakukan melalui kerja sama dengan pihak lain.

B. Data yang Dibutuhkan untuk Pengelolaan Air Tanah (KepMen ESDM No. 1451 Tahun 2000)

1. Peta-Peta

- Lokasi (area maps): menunjukkan keseluruhan area yang dikaji. Peta ini diperlukan dalam kaitannya untuk melihat apakah ada pengaruh dari daerah di luar daerah studi atau sebaliknya daerah studi berpengaruh pada daerah di luar daerah studi. Umumnya, skalanya kecil menunjukkan kabupaten/kota, daerah rural, pegunungan. Bila melewati provinsi maka perlu ditunjukkan peta provinsi-provinsi. Misal, untuk wilayah sungai peta harus cukup mampu menunjukkan sistem sungai termasuk DASnya. Skala peta umumnya di bawah 1:20.000
- Daerah sekitar (vicinity maps): Skala lebih besar yang menunjukkan daerah sekitar lokasi studi, misalnya: DAS, morfologi sungai, peta Daerah Irigasi dll. Skala Peta antara 1:5.000 sampai 1:20.000
- Kondisi lapangan (site maps): Skala yang paling besar menunjukkan dan menentukan detail lapangan yang dikaji dengan skala umumnya lebih besar dari 1:5.000
- Geologi: dibutuhkan untuk mengetahui dan mengindikasikan bentuk geologi dan geofisik di DAS, out cropping, simpanan material di sungai yang membentuk titik kontrol di sistem sungai.
- Peta-peta, antara lain:
 - Wilayah Sungai dan Daerah Aliran Sungai
 - Peta Cekungan Air Tanah (akuifer bebas dan akuifer tertekan)
 - Peta batas administrasi (batas provinsi, kabupaten/kota, kecamatan, desa)
 - Peta tata ruang wilayah (nasional, provinsi, kabupaten/kota)
 - Peta kawasan lindung dan kawasan budidaya
 - Peta daerah irigasi
 - Peta daerah rawa
 - Peta zona pantai
 - Peta geologi, geomorfologi dan geohidrologi
 - Peta tingkat kelongsoran dan erosi lahan
 - Peta kehutanan dan lahan kritis
 - Peta lokasi banjir
 - Peta lokasi situ, embung dan waduk
 - Peta lokasi alat hidrologi, lokasi AWLR, lokasi alat klimatologi
 - Peta lokasi areal pertanian, perkebunan dan tambak
 - Peta alih fungsi lahan (perbandingan tata guna lahan sekarang dengan sebelumnya)

2. Foto Udara dan Dokumentasi

- Foto Udara (Aerial Photographs): diperlukan dalam persiapan peta sekitar dan peta lapangan. Kamera multi-image memakai jangkauan spektrum cahaya yang berbeda-beda untuk mengarahkan identifikasi

dari bentuk yang bermacam-macam seperti jenis tanaman, bangunan air, morfologi sungai, formasi geologi, dll. Garis kontur dapat juga dikembangkan lebih teliti dengan penggabungan foto udara dan pengukuran geodesi

- Dokumentasi lapangan: Bermanfaat untuk melihat secara visual kondisi lapangan yang ada, namun data ini lebih bersifat kualitatif untuk dikonfirmasi dengan peta yang ada. Kondisi sumber daya air yang dikaji cukup mudah untuk didokumentasi dan hal ini akan membantu para perencana baik yang meninjau lapangan maupun (terutama) yang tidak mempunyai kesempatan untuk melakukan kunjungan lapangan. Vegetasi, formasi geologi, kondisi morfologi DAS, bangunan yang ada di daerah studi dapat didokumentasi untuk lebih memperjelas data lapangan lainnya yang dikumpulkan.

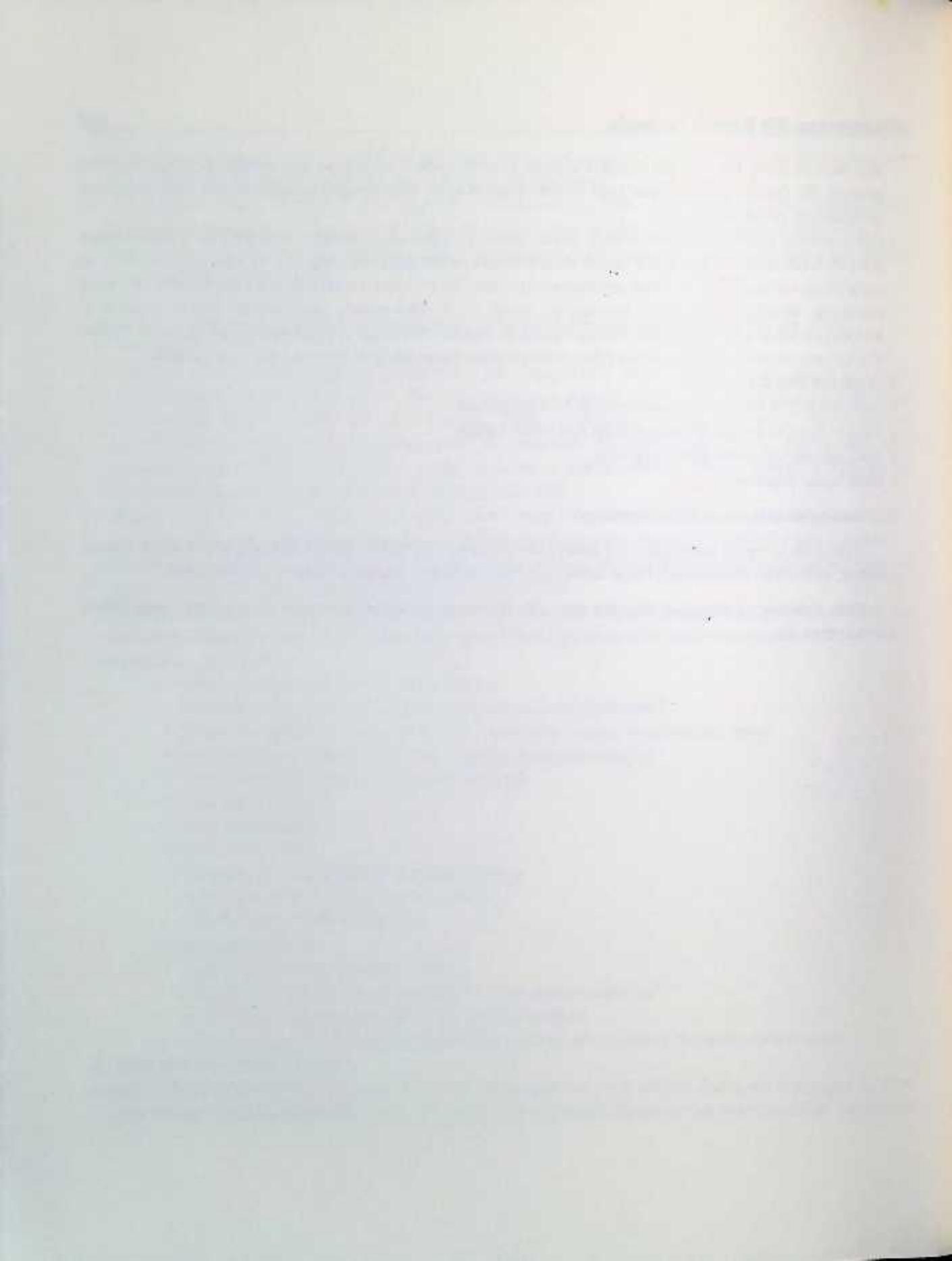
3. Laporan dan Data Lain

- Hasil studi SDA terdahulu, laporan-laporan terdahulu
- Data historis hidrografis, klimatologi dan debit sungai
- Data infrastruktur keairan yang ada.
- Data Sosial-Ekonomi

C. Pembagian Data Dan Alih Teknologi

Dilakukan dengan berbagai cara antara lain melalui pendidikan formal maupun Non formal, kursus, seminar, pelatihan diseminasi, kerja sama baik lokal, regional, nasional maupun internasional.

Pada prinsipnya pembagian data dan alih teknologi ini bertujuan untuk peningkatan pengelolaan sumber daya air.



BAB 7. MANAJEMEN AIR TANAH BERDASARKAN PP AIR TANAH

7.1 CAT Dan Non-CAT

Seperti yang disebutkan sebelumnya, ruang darat di Indonesia (100 %) terdiri atas CAT (47 %) dan Non-CAT (53 %). Peraturan Pemerintah RI No. 43 Tahun 2008 tentang air tanah dibuat untuk mengatur air tanah (*groundwater*). Dengan kata lain aturan ini hanya untuk ruang darat yang memiliki CAT (47 %) atau ruang darat yang mempunyai akuifer bebas (*unconfined aquifer*) dan akuifer tertekan (*confined aquifer*).

Daerah Non-CAT (53%) di Indonesia yang lebih besar dibandingkan daerah CAT (47%) tidak diatur dalam PP No. 43 Tahun 2008, bahkan dalam UU No. 7 tahun 2004 juga tak disebutkan daerah Non-CAT. Ruang darat yang diatur oleh PP No. 43 Tahun 2008 ditunjukkan dalam Gambar 7-1.



Gambar 7-1. Ruang darat yang diatur (CAT, 47%) dan yang tidak diatur (Non-CAT, 53%) oleh PP No. 43 Tahun 2008

Prosentase CAT dan Non-CAT per pulau ditunjukkan dalam Tabel 5-4.

PP No. 43 Tahun 2008 tentang air tanah (hanya untuk daerah CAT) merupakan pengganti Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 1982 tentang Tata Pengaturan Air (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1982 No. 37, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia No. 3225), yang terdiri atas 10 Bab dengan 97 Pasal. Secara garis besar PP ini ditunjukkan pada tabel berikut.

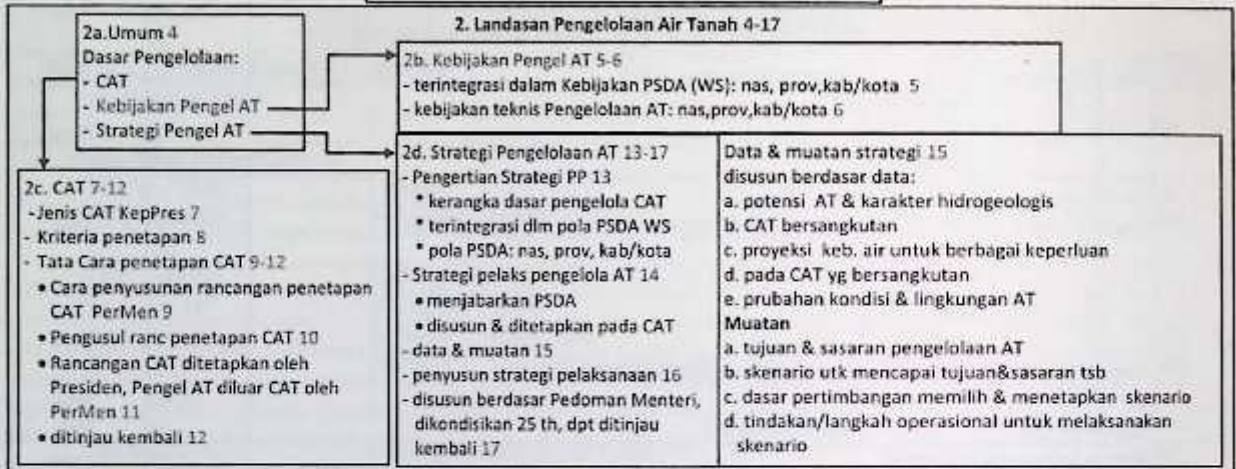
Tabel 7-1. Garis besar PP No. 43 Tahun 2008

Bab	Uraian Bab dan Bagian	Paragraf	Pasal	Penjelasan
I	Ketentuan Umum		1,2 3	Ada
II	Landasan Pengelolaan AT			
	Bagian Kesatu	Umum	4	
	Bagian Kedua	Kebijakan Pengelolaan AT	5 6	Ada
	Bagian Ketiga	Cekungan Air Tanah		
		Paragraf 1 Umum	7	
		Paragraf 2 Kriteria CAT	8	Ada
		Paragraf 3 Tata cara penetapan CAT	9	Ada
			10	
			11,12	Ada
	Bagian Keempat	Strategi pengelolaan Air Tanah	13	Ada
			14,15	
			16,17	Ada
III	Pengelolaan AT			
	Bagian Kesatu	Umum	18	Ada
	Bagian Kedua	Perencanaan		
		Paragraf 1 Umum	19-20	
		Paragraf 2 Inventarisasi	21-22	Ada
			23	
		Paragraf 3 Penetapan Zona Konservasi	24	Ada
		Paragraf 4 Rencana Pengelolaan Air Tanah	25,26	
			27	Ada
	Bagian Ketiga	Pelaksanaan	28,29	Ada
			30,31	
	Bagian Keempat	Pemantauan dan Evaluasi	32	Ada
			33,34	
	Bagian Kelima	Konservasi		
		Paragraf 1 Umum	35	
			36	Ada
			37	
			38	Ada
		Paragraf 2 Perlindungan & pelestarian	39,40	Ada
		Paragraf 3 Pengawetan AT	41-43	
			44	Ada
		Paragraf 4 Pengelola kualitas & pengendalian pencemaran	45-46	Ada
	Bagian Keenam	Pendayagunaan		
		Paragraf 1 Umum	47	
		Paragraf 2 Penatagunaan	48	Ada
			49	
		Paragraf 3 Penyediaan	50	Ada

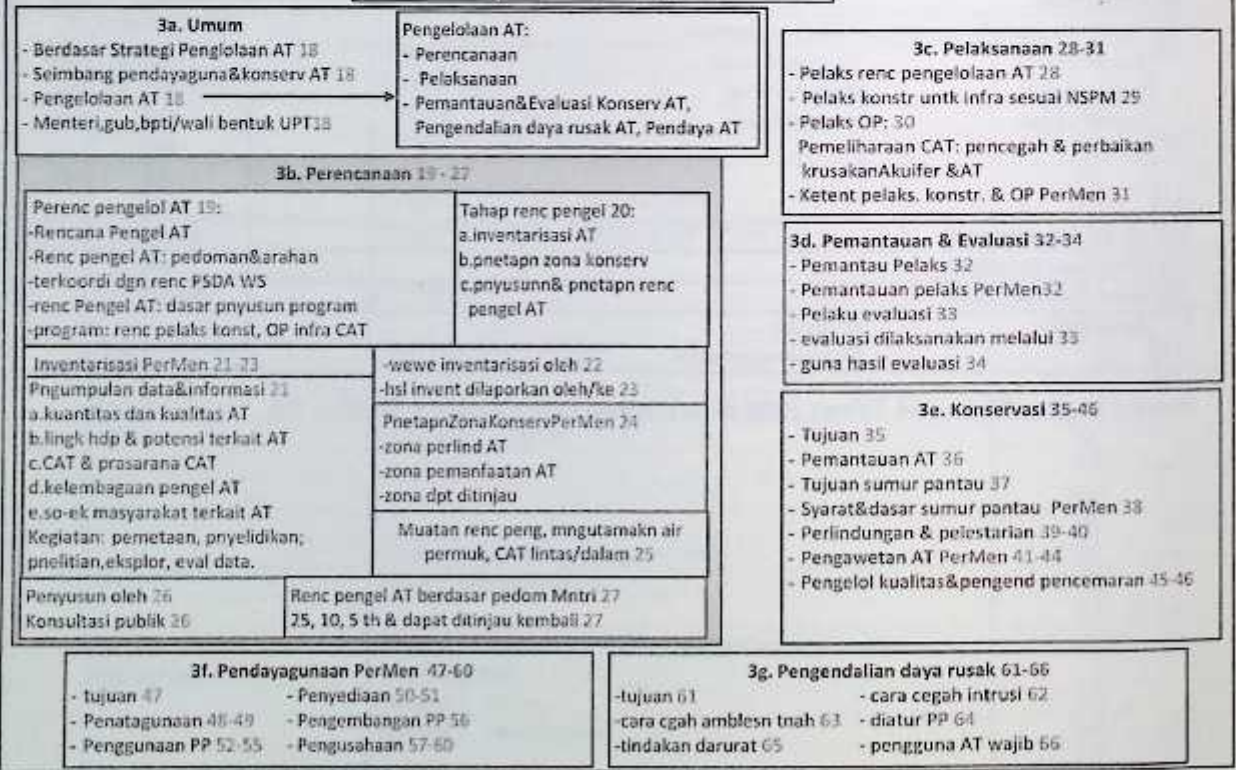
			51	
		Paragraf 4 Penggunaan	52-54	Ada
			55	
		Paragraf 5 Pengembangan	56	Ada
		Paragraf 6 Pengusahaan	57-59	Ada
			60	
	Bagian Ketujuh	Pengendalian daya rusak	61-62	Ada
			63,64	
			65	Ada
			66	
IV	Perizinan			
	Bagian Kesatu	Tata cara memperoleh izin	67-68	Ada
			69	
			70	Ada
			71-73	
			74,75	Ada
	Bagian Kedua	Hak dan kewajiban pemegang izin	76	
			77,78	Ada
	Bagian Ketiga	Berakhirnya izin	79	Ada
V	Sistem Informasi Air Tanah		80	Ada
			81,82	
VI	Pembiayaan		83-85	Ada
VII	Pemberdayaan, Pengendalian dan Pengawasan			
	Bagian Kesatu	Pemberdayaan	86	Ada
	Bagian Kedua	Pengendalian	87	Ada
	Bagian Ketiga	Pengawasan	88	Ada
			89	
			90	Ada
			91	
VIII	Sanksi Administratif		92,93	
IX	Ketentuan Peralihan		94	
X	Ketentuan Penutup		95-97	
	Penjelasan	I. Umum		
		II. Pasal demi pasal		

Secara ringkas PP No. 43 Tahun 2008 diilustrasikan dalam diagram Gambar 7-2.

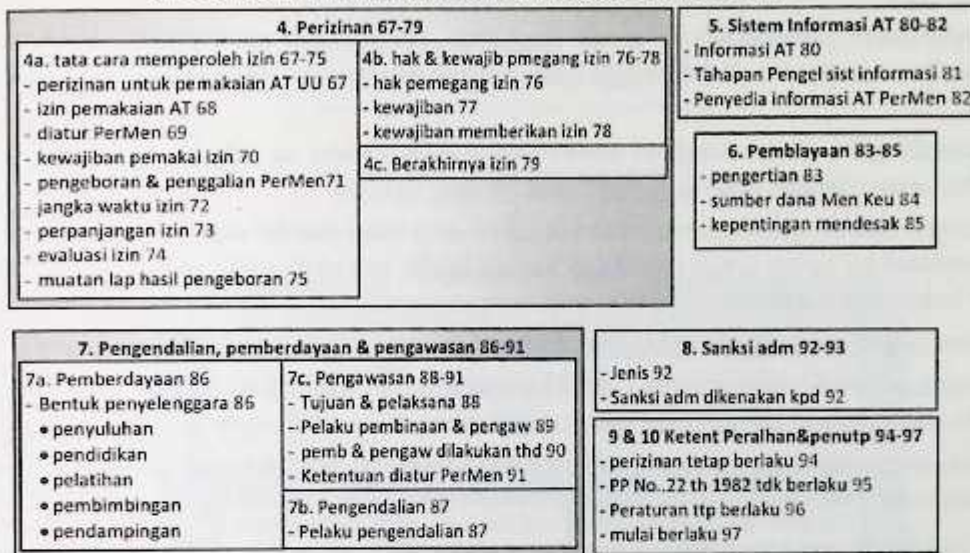
1. Ketentuan Umum 1-3
 - 22 Definisi 1
 - menyeluruh, terpadu & wawasan lingk hidup 2
 - dikelola secara terpadu dgn air permukaan (PP) 3



3. Pengelolaan Air Tanah (AT) 18-66



a. Ketentuan umum, landasan dan pengelolaan air tanah



b. Perizinan, sistem informasi, pengendalian, pemberdayaan & pengawasan, sanksi administrasi, ketentuan peralihan dan penutup

Catatan: Angka di depan uraian adalah No. Bab dan angka di belakang uraian adalah No. Pasal

Gambar 7-2. Diagram ringkasan PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah

Air tanah yang dikelola meliputi air tanah pada lapisan jenuh air (*saturated zone*), lapisan tidak jenuh air (*unsaturated zone*), dan sungai bawah tanah di daerah batu gamping. Secara lebih rinci keseluruhan kegiatan manajemen air tanah berdasarkan PP Air Tanah dapat dilihat pada Gambar 7-3.

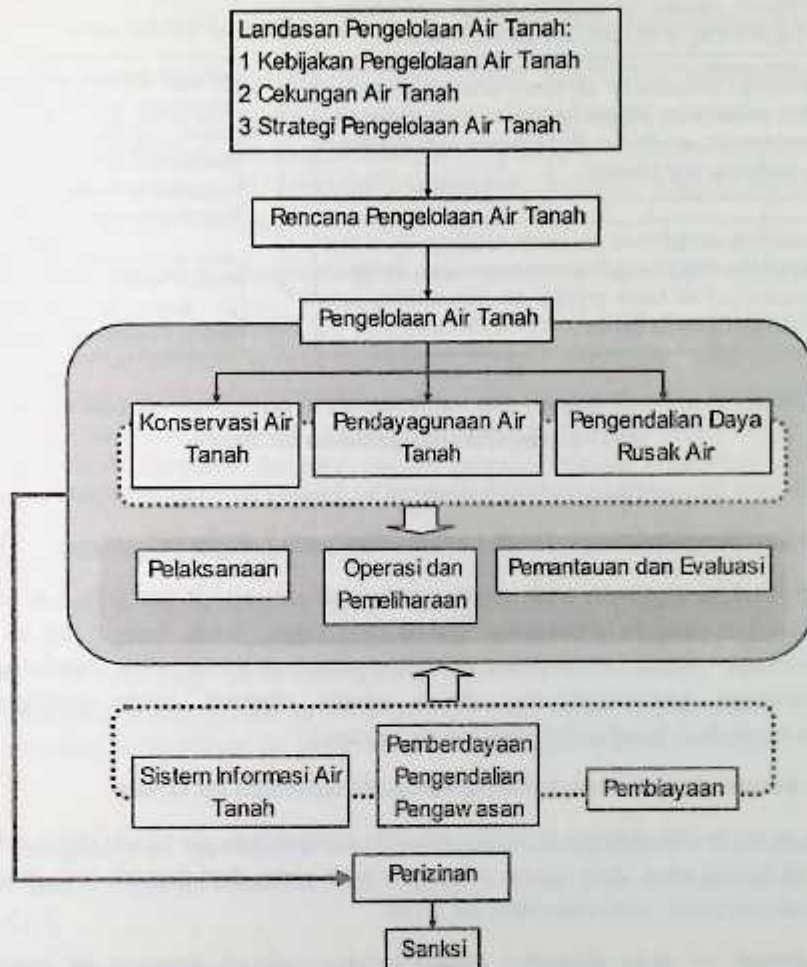
Sebagaimana ditetapkan dalam Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 1451 K/10/MEM/2000 tentang Pedoman Teknis Penyelenggaraan Tugas Pemerintahan di Bidang Pengelolaan Air Tanah. Kebijakan pengelolaan air tanah kewenangan penyelenggaraannya diletakkan di daerah.

Sehubungan dengan pelaksanaan desentralisasi pengelolaan air tanah, beberapa hal penting yang perlu mendapat perhatian dan perlu dipersiapkan daerah antara lain:

1. Penyediaan peta dan informasi tentang air tanah.
2. Kesepakatan antar Bupati/Walikota dalam mengelola cekungan air tanah lintas Kabupaten/Kota dan kesepakatan Gubernur dalam mengelola cekungan air tanah lintas Provinsi, terutama mencakup inventarisasi potensi, perencanaan pendayagunaan, peruntukan pemanfaatan, konservasi dan pengendalian.
3. Pemberdayaan daerah dalam penyelenggaraan pengelolaan, menyangkut kemampuan teknis sumber daya manusia, peralatan serta ketersediaan data/informasi tentang sumber daya air tanah.

4. Pengaturan terpadu berbagai sektor dalam pemanfaatan air tanah, sehingga tidak terjadi konflik kepentingan.
5. Pendayagunaan (eksploitasi) air tanah yang lebih menekankan pada tujuan untuk memperbesar Penghasilan Asli Daerah (PAD) dengan mengabaikan pelestarian dan perlindungan sumber daya air tanah.
6. Pengaturan penempatan kawasan industri yang memerlukan air sebagai bahan baku dan proses industri, sesuai dengan potensi sumber daya air yang tersedia.
7. Konsistensi daerah dalam meneruskan kebijakan yang telah diambil saat ini yaitu pengurangan debit pengambilan air tanah untuk industri di daerah rawan air tanah, serta pelarangan pemanfaatan air tanah bebas untuk industri.
8. Rencana jangka panjang atas kebutuhan air untuk masyarakat luas dan berbagai kegiatan sektoral.
9. Keterbatasan jumlah sumur pantau untuk mengetahui perubahan-perubahan kondisi air tanah akibat pengambilan sebagai tindak lanjut dalam mengambil keputusan pengelolaan air tanah.
10. Penertiban sumur-sumur pengambilan air tanah yang tidak berizin/ilegal, yang dapat menimbulkan kerusakan air.

Keberhasilan pengelolaan air tanah sangat tergantung pada fungsi pengawasan dan pengendalian termasuk fungsi pembinaan. Dengan pengawasan dan pengendalian maka keberlanjutan pemanfaatan air tanah akan dapat terjamin. Berikut adalah diagram manajemen air tanah berdasarkan PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008.



Gambar 7-3. Manajemen air tanah berdasarkan PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah

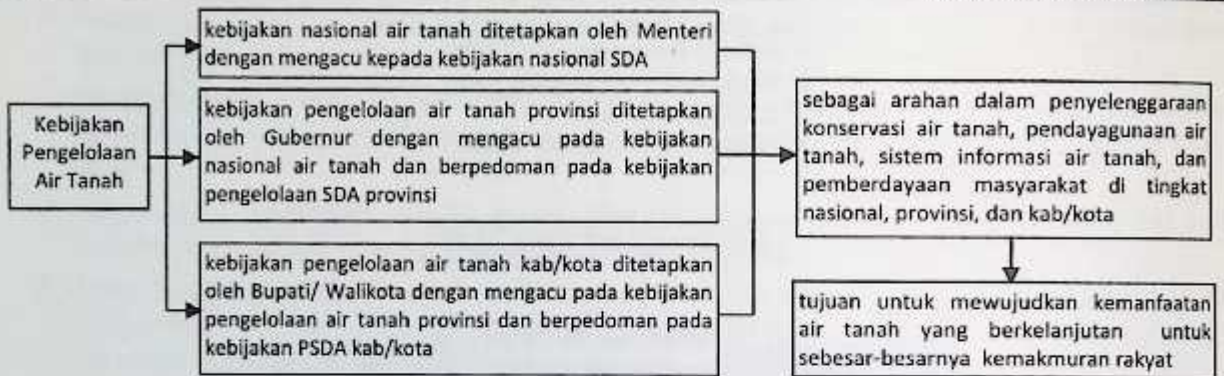
7.2 Landasan Pengelolaan Air Tanah

Landasan pengelolaan air tanah adalah kebijakan pengelolaan air tanah, CAT dan strategi pengelolaan air tanah.

7.2.1 Kebijakan pengelolaan air tanah

Kebijakan pengelolaan air tanah merupakan keputusan yang bersifat mendasar untuk mencapai tujuan, melakukan kegiatan, atau mengatasi masalah tertentu yang dilakukan oleh instansi yang berwenang dalam rangka penyelenggaraan tugas pemerintahan di bidang air tanah pada CAT.

Pihak-pihak yang menentukan kebijakan pengelolaan air tanah ditunjukkan dalam Gambar 7-4.



Gambar 7-4. Pihak-pihak yang menetapkan pengelolaan air tanah dan tujuan kebijakan pengelolaan air tanah

Kebijakan tata cara pengelolaan air tanah dituangkan dalam rumusan ketentuan sebagai berikut:

1. Menyelenggarakan pengelolaan air tanah berdasarkan pada prinsip kelestarian

Lamanya pembentukan air tanah pada akuifer menyebabkan upaya perbaikan atau rehabilitasinya sangat sulit dilakukan serta membutuhkan waktu yang sangat lama. Kenyataan ini perlu dipahami oleh semua pihak agar dalam setiap upaya pendayagunaannya perlu selalu diimbangi dengan upaya konservasi, sehingga pemanfaatannya dapat secara optimal, serta pelaksanaannya tidak mengakibatkan kerusakan kondisi dan lingkungan air tanah.

2. Melaksanakan pengelolaan air tanah didasarkan pada cekungan air tanah

Konsep cekungan air tanah sebagai kesatuan wilayah pengelolaan air tanah didasarkan pada prinsip terbentuknya air tanah yang utuh dalam satu neraca air sejak dari daerah imbuhan hingga daerah lepasan pada suatu wadah, yaitu cekungan air tanah.

Berdasarkan konsep ini akan diketahui secara terukur seluruh potensi air tanah dalam suatu cekungan air tanah, termasuk kemampuan penyediaan air tanah dari akuifer yang terdapat dalam cekungan tersebut.

Cekungan air tanah di Indonesia ditetapkan oleh Presiden sebagai dasar penyelenggaraan pengelolaan air tanah oleh Pemerintah Provinsi dan Pemerintah Kabupaten/Kota.

3. Mendorong penyelenggaraan pengelolaan sumber daya air yang terpadu

Menyikapi pentingnya keterpaduan dalam mewujudkan tujuan pengelolaan sumber daya air, Pemerintah telah memasukkan kegiatan ini ke dalam Undang-Undang (UU) No. 25 Tahun 2000 tentang Program Pembangunan Nasional. Terdapat tiga program keterpaduan yang telah dicanangkan dalam UU tersebut untuk dilaksanakan, yaitu penyelenggaraan konservasi air tanah dan air permukaan yang terpadu, meningkatnya keterpaduan penggunaan air tanah dan air permukaan, serta keterpaduan pengendalian pencemaran air tanah dan air permukaan.

4. Prioritas pemanfaatan untuk keperluan air minum di atas semua peruntukkan lain

Guna memberikan perlindungan terhadap masyarakat luas untuk memperoleh hak atas air, ditetapkan bahwa hak atas air tanah adalah hak guna air dan peruntukkan untuk keperluan air minum merupakan prioritas utama di atas segala keperluan lain, menyusul prioritas untuk keperluan rumah tangga, peternakan dan pertanian sederhana, industri, irigasi, pertambangan, usaha perkotaan dan kepentingan lainnya.

5. Strategi pengelolaan air tanah sebagai dasar pengembangan sumber daya air tanah

Strategi pengelolaan air tanah ditetapkan berdasarkan prinsip kelestarian kondisi dan lingkungan air tanah dengan memperhatikan pola pengelolaan sumber daya air. Pola pengelolaan tersebut dilaksanakan secara menyeluruh, seimbang antara upaya konservasi dan pendayagunaan air tanah, terpadu dalam penggunaan air yang saling menunjang, serta melibatkan peran masyarakat. Pola pengelolaan air tanah berisikan tentang: tujuan jangka panjang, ketentuan umum pengelolaan, kebijakan umum pengelolaan, dan strategi yang diambil dalam pengelolaan.

6. Perencanaan pengelolaan air tanah

Perencanaan pengelolaan air tanah disusun sebagai ketentuan dan arahan dalam pelaksanaan inventarisasi, konservasi, dan pendayagunaan air tanah. Perencanaan pengelolaan air tanah dilakukan secara terkoordinasi pada cekungan air tanah oleh Pemerintah, Pemerintah Provinsi, dan Pemerintah Kabupaten/Kota sesuai kewenangannya. Pelaksanaan pengelolaan air tanah dilakukan berdasarkan rencana pengelolaan air tanah yang telah ditetapkan pada cekungan air tanah.

7. Pelaksanaan

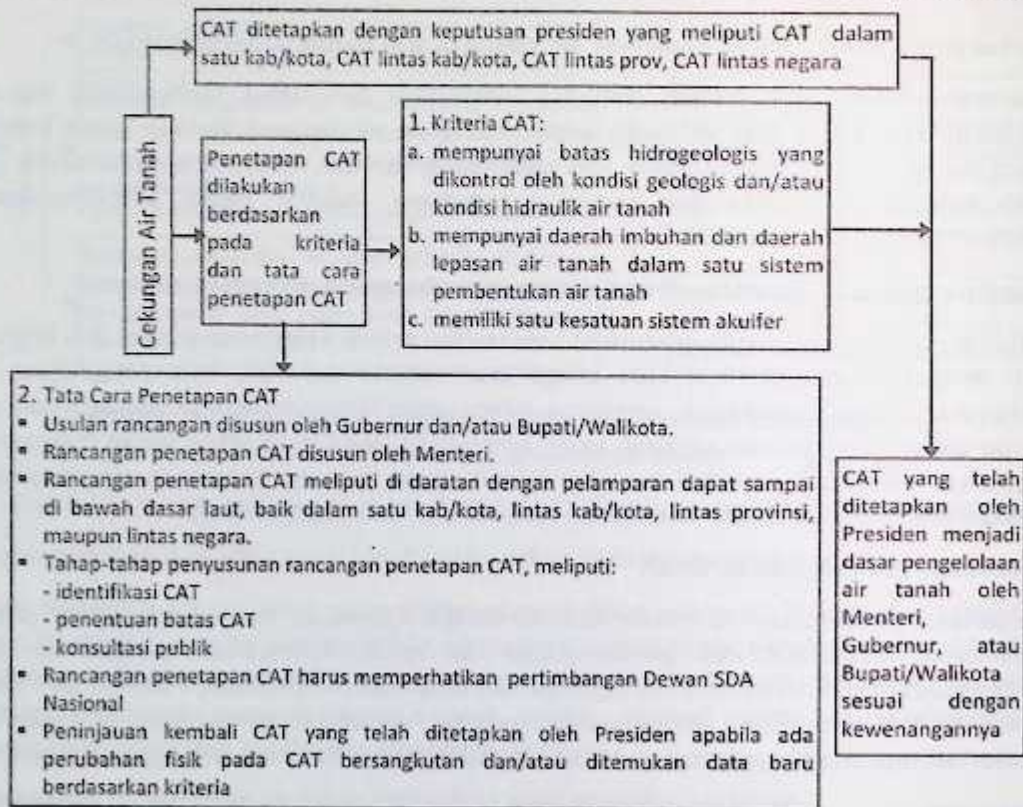
Pelaksanaan pengelolaan air tanah meliputi kegiatan pelaksanaan konstruksi, operasi, dan pemeliharaan dalam kegiatan konservasi, pendayagunaan air tanah dan pengendalian daya rusak air tanah dalam CAT.

8. Pemantauan dan evaluasi pengelolaan air tanah

Pemantauan dan evaluasi atas penyelenggaraan pengelolaan air tanah dilakukan terhadap kegiatan inventarisasi, konservasi, dan pendayagunaan air tanah. Hasil pemantauan dan evaluasi pengelolaan air tanah digunakan untuk pengendalian pelaksanaan dan perbaikan kinerja pengelolaan air tanah.

7.2.2 CAT

Pengelolaan air tanah didasarkan pada cekungan air tanah/CAT (Ayat (2) Pasal 12 UU No. 7 Tahun 2004). Kriteria dan tata cara penetapan cekungan air tanah ditunjukkan dalam Gambar 7-5.



Gambar 7-5. Kriteria dan tata cara penetapan cekungan air tanah

Batas hidrogeologis adalah batas fisik wilayah pengelolaan air tanah. Batas hidrogeologis dapat berupa batas antara batuan lulus dan tidak lulus air, batas pemisah air tanah, dan batas yang terbentuk oleh struktur geologi meliputi antara lain kemiringan lapisan batuan, lipatan, dan patahan.

Daerah imbuhan air tanah merupakan kawasan lindung air tanah, di daerah ini air tanah tidak untuk didayagunakan, sementara daerah lepasan air tanah secara umum dapat didayagunakan.

Sistem akuifer adalah kesatuan susunan akuifer, termasuk lapisan batuan kedap air yang berada di dalamnya. Akuifer dapat berada pada kondisi tidak tertekan (*unconfined*) dan/atau tertekan (*confined*).

Identifikasi Cekungan Air Tanah antara lain meliputi kegiatan survei dan evaluasi data hidrogeologi.

Penentuan batas Cekungan Air Tanah antara lain meliputi kegiatan deliniasi batas Cekungan Air Tanah, pembuatan legenda Cekungan Air Tanah, penamaan Cekungan Air Tanah dan penentuan geometri.

Perubahan fisik Cekungan Air Tanah dapat berupa antara lain perubahan batas Cekungan Air Tanah dan perubahan batas administrasi pemerintahan.

7.2.3 Strategi pengelolaan air tanah

Sebagaimana telah disebutkan dalam PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, strategi pengelolaan air tanah merupakan kerangka dasar dalam merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kegiatan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air tanah pada cekungan air tanah.

Pola pengelolaan sumber daya air terdiri dari pola pengelolaan sumber daya air pada wilayah sungai:

- lintas provinsi atau lintas negara
- lintas kabupaten/kota
- dalam satu kabupaten/kota
- strategis nasional.

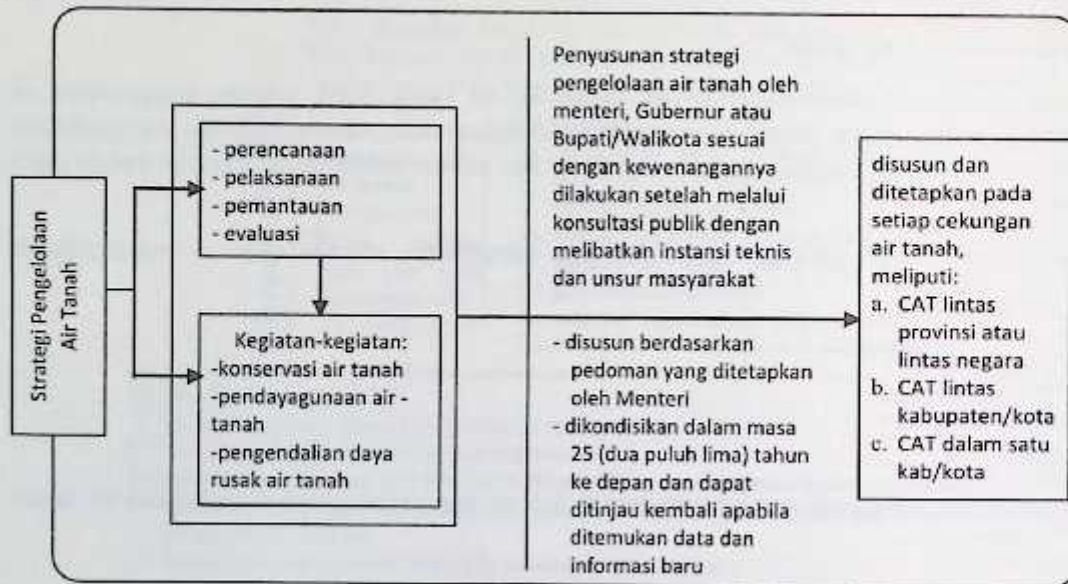
Strategi pelaksanaan pengelolaan air tanah terdiri dari strategi pelaksanaan pengelolaan air tanah pada:

- cekungan air tanah lintas provinsi atau lintas negara
- cekungan air tanah lintas kabupaten/kota
- cekungan air tanah dalam satu kabupaten/kota

Strategi pengelolaan air tanah terdiri atas:

- Perencanaan.
- Pelaksanaan.
- Pemantauan.
- Evaluasi.
- Kegiatan-Kegiatan Konservasi air tanah, Pendayagunaan air tanah, Pengendalian daya rusak air tanah

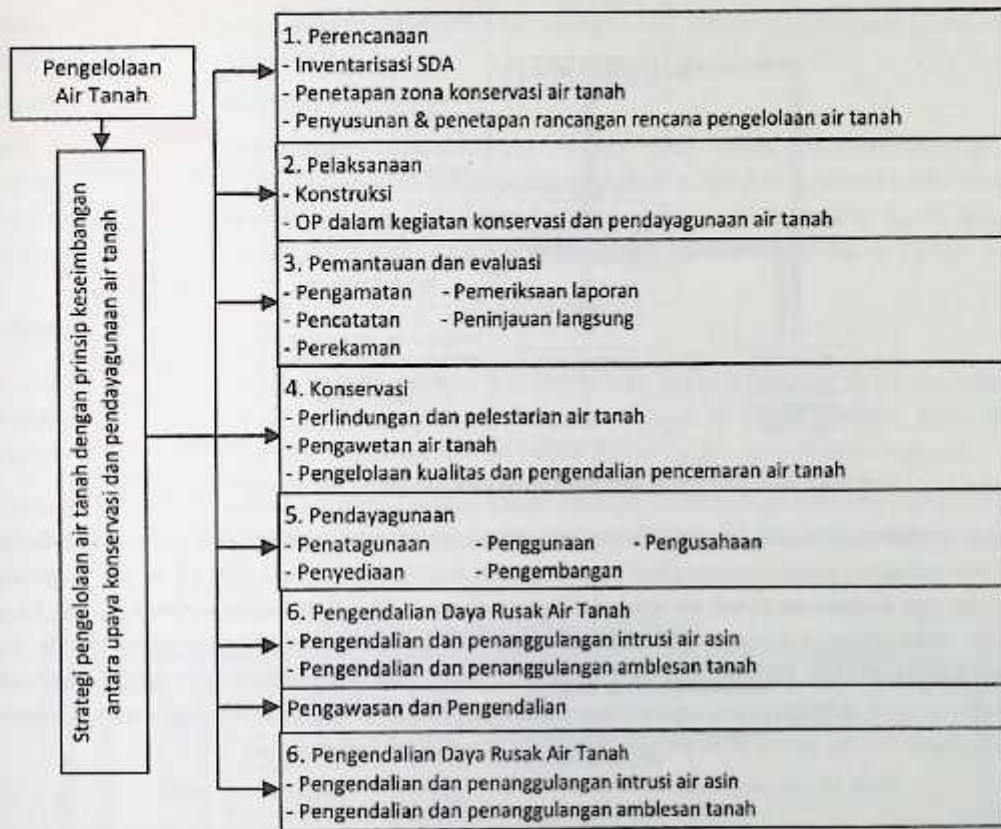
Secara lebih detail strategi pengelolaan air tanah ditunjukkan dalam Gambar 7-6 berikut.



a. Strategi pengelolaan air tanah

Strategi Pengelolaan Air Tanah	
Strategi pengelolaan air merupakan kerangka dasar dalam merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kegiatan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air tanah pada cekungan air tanah yang disusun dan ditetapkan secara terintegrasi dalam PSDA pada WS	
Data & informasi strategi pengelolaan air tanah a. potensi air tanah dan karakteristik hidrogeologis cekungan air tanah yang bersangkutan b. proyeksi kebutuhan air untuk berbagai keperluan pada cekungan air tanah yang bersangkutan c. perubahan kondisi dan lingkungan air tanah	Isi strategi pengelolaan air tanah: 1. tujuan dan sasaran pengelolaan air tanah pada cekungan air tanah yang bersangkutan 2. skenario yang dipilih untuk mencapai tujuan dan sasaran pengelolaan air tanah 3. dasar pertimbangan yang digunakan dalam memilih dan menetapkan skenario 4. tindakan atau langkah-langkah operasional untuk melaksanakan skenario pengelolaan air tanah.
Penyusunan dan Penetapan Strategi Pengelolaan Air Tanah	
Penyusunan dan penetapan strategi pengelolaan air tanah: 1. Menteri menyusun dan menetapkan strategi pengelolaan air tanah pada CAT lintas provinsi atau CAT lintas negara berdasarkan kebijakan nasional air tanah dengan mengacu pada PSDA pada WS yang bersangkutan. 2. Gubernur menyusun dan menetapkan strategi pengelolaan air tanah pada CAT lintas kabupaten/kota berdasarkan kebijakan pengelolaan air tanah provinsi dan mengacu pada PSDA pada WS yang bersangkutan. 3. Bupati/Walikota menyusun dan menetapkan strategi pengelolaan air tanah pada CAT dalam satu kab/kota berdasarkan kebijakan pengelolaan air tanah kabupaten/kota dan mengacu pada PSDA pada WS yang bersangkutan.	1. Penyusunan strategi pengelolaan air tanah oleh Menteri, Gubernur atau Bupati/Walikota sesuai dengan kewenangannya dilakukan setelah melalui konsultasi publik dengan melibatkan instansi teknis dan unsur masyarakat terkait 2. Disusun berdasarkan pedoman yang ditetapkan oleh Menteri. 3. Dikondisikan dalam masa 25 (dua puluh lima) tahun kedepan dan dapat ditinjau kembali apabila ditemukan data dan informasi baru.

b. Definisi, penyusunan, dan penetapan strategi pengelolaan air tanah



c. Tahap-tahap pengelolaan air tanah

Gambar 7-6. Strategi pengelolaan air tanah

7.3 Tata Cara Pengelolaan Air Tanah

Tata cara pengelolaan air tanah merupakan rangkaian ketentuan yang perlu ditaati agar hasil pengelolaan tersebut dapat bermanfaat bagi kesejahteraan bersama. Tata cara tersebut dapat dilihat pada Gambar 7-7.

Pengaturan pengelolaan air tanah bertujuan untuk mewujudkan keseimbangan antara upaya konservasi dan pendayagunaan air tanah.



Gambar 7-7. Diagram alir tata cara pengelolaan air tanah

Pelaksanaan kegiatan tersebut secara teknis perlu disesuaikan dengan perilaku air tanah, meliputi keterdapatannya, penyebarannya, potensi mencakup kuantitas dan kualitas air tanah serta kondisi lingkungan air tanah. Akan tetapi, karena air tanah terletak di dalam batuan, maka pembentukannya sudah barang tentu berkaitan erat dengan proses geologi, sehingga dalam pengaturan pengelolaannya perlu memperhatikan kaidah-kaidah geologi dan hidrogeologi. Pengaturan pengelolaan air tanah mencakup pengaturan perencanaan, pelaksanaan, pemantauan dan evaluasi terhadap penyelenggaraan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air tanah.

7.4 Perencanaan

Perencanaan pengelolaan air tanah yang baik adalah perencanaan yang bisa berubah sesuai dengan perubahan di masa depan. Kondisi hidrologi di masa depan tidak pasti, keadaan ekonomi, sosial dan hukum yang sah akan terus berubah. Fleksibilitas dari perencanaan dan penyesuaian hasil dari pengawasan adalah kunci dari suksesnya perencanaan pengelolaan (ASCE, 1987).

Perencanaan pengelolaan yang dipilih harus bisa diterima pelaksanaannya oleh semua bidang. Analisis final untuk perencanaan tersebut dapat mencakup kendala di bidang ekonomi, sosial, kelembagaan dan hukum. Oleh karena itu implementasi dari perencanaan pengelolaan air tanah harus dapat mencakup inter-hubungan antara bidang-bidang yang bersangkutan (ASCE, 1987).

Dalam melakukan perencanaan pengelolaan air tanah, ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan, yaitu (ASCE, 1987):

1. Pertimbangan ekonomi

Seorang perencana harus dapat mengestimasi keseluruhan dari biaya total dan keuntungan total yang didapat, sehingga seorang insinyur, ahli ekonomi dan ahli ekologi harus dapat bekerjasama dengan baik. Tiap bagian dari perencanaan harus dapat dipertimbangkan secara individual dan kombinasi

supaya potensi dari pembangunan dapat berkembang secara penuh dan rencana pengelolaan dapat diaplikasikan secara maksimal.

2. Pertimbangan sosial dan kelembagaan

Dalam memilih rencana pengelolaan, seorang manajer tidak hanya mempertimbangkan rencana yang paling ekonomis saja, tetapi harus mempertimbangkan aspek dan struktur sosial dari air. Teknik yang paling mudah adalah dengan membentuk dewan penasehat di bidang sosial yang mewakili aspirasi para pengguna air, sehingga dapat meminimalisasi konflik sosial dalam tahap perencanaan air.

3. Pertimbangan hukum

Perlu adanya keputusan hukum mengenai hak air, hal ini dapat dilakukan sebelum, pada saat dan sesudah investigasi pengelolaan sumber air. Biasanya banyak terdapat batasan pada pelaksanaan perencanaan pengelolaan air. Biasanya hak air sudah diatur dalam alokasi biaya operasi.

Di Indonesia perencanaan pengelolaan air tanah disusun berdasarkan rencana pengelolaan sumber daya air. Kegiatan perencanaan menurut PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 dapat dilihat pada diagram berikut.



Gambar 7-8. Kegiatan perencanaan pengelolaan air tanah

7.4.1 Inventarisasi Air Tanah

Inventarisasi air tanah merupakan kegiatan untuk memperoleh data dan informasi air tanah sebagai dasar perencanaan pengelolaan air tanah, yang dilakukan pada setiap cekungan air tanah.

Kegiatan inventarisasi sumber daya air termasuk air tanah dimaksudkan antara lain untuk mengetahui kondisi hidrologis, hidrometeorologis, hidrogeologis, potensi sumber daya air yang tersedia, dan kebutuhan air baik menyangkut kuantitas maupun kualitas beserta prasarana dan sarana serta lingkungannya termasuk kondisi sosial ekonomi dan budaya masyarakatnya.

Kegiatan inventarisasi dilakukan melalui pengumpulan dan pengolahan data untuk memperoleh data dan informasi tentang (PP No. 43 Tahun 2008 tentang Air Tanah):

- Sebaran dan potensi cekungan air tanah
- Dimensi dan geometri akuifer
- Parameter akuifer
- Daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah
- Keterdapatan dan jumlah ketersediaan air tanah
- Mutu air tanah
- Jumlah pengambilan air tanah
- Sebaran daerah Non-CAT

Kegiatan inventarisasi dapat dirinci sebagai berikut:

1. Pemetaan

Pemetaan air tanah dilakukan untuk memperoleh data keterdapatan, sebaran, dan produktivitas akuifer, serta kondisi keberadaan air tanah dengan tema tertentu yang disajikan dalam bentuk peta. Pemetaan air tanah dilakukan berdasarkan lembar peta, cekungan air tanah, wilayah administrasi, atau sesuai kebutuhan. Pemetaan air tanah dapat dilakukan oleh Pemerintah, Pemerintah Provinsi, dan Pemerintah Kabupaten/Kota, serta pihak yang berkepentingan dengan air tanah.

2. Penyelidikan

Penyelidikan dan penelitian air tanah dilakukan untuk memperoleh data spesifik kondisi dan lingkungan air tanah meliputi konfigurasi dan parameter akuifer, sebaran daerah imbuhan dan lepasan air tanah, kuantitas dan kualitas air tanah, serta dampak pengambilan air tanah. Penyelidikan dan penelitian air tanah dapat dilakukan oleh Pemerintah, Pemerintah Provinsi, dan Pemerintah Kabupaten/Kota, serta pihak yang berkepentingan dengan air tanah.

3. Penelitian

Eksplorasi air tanah dilakukan untuk memperoleh data air tanah melalui kegiatan pemboran atau penggalian eksplorasi air tanah dan survei geofisika. Kegiatan eksplorasi air tanah wajib dilakukan oleh Pemerintah, Pemerintah Provinsi, dan Pemerintah Kabupaten/Kota, serta pihak yang berkepentingan dengan air tanah.

4. Eksplorasi

Eksplorasi air tanah bertujuan untuk memperoleh data air tanah mencakup antara lain sebaran dan sifat fisik batuan yang mengandung air tanah, kedalaman akuifer, konstruksi sumur, debit optimum, kualitas air tanah, dan lain-lain, melalui kegiatan survei geofisika, pengeboran, penampangan sumur, uji pemompaan, dan pemeriksaan laboratorium.

5. Evaluasi

Evaluasi data air tanah bertujuan untuk mengetahui sebaran, kuantitas, dan kualitas air tanah. Hasil kegiatan evaluasi data inventarisasi air tanah berupa informasi dimensi cekungan air tanah, konfigurasi dan parameter akuifer, serta potensi air tanah. Hasil evaluasi sebagaimana digunakan sebagai dasar perencanaan pengelolaan air tanah, serta pelaksanaan konservasi dan pendayagunaan air tanah.

Wewenang mengenai kegiatan inventarisasi berada di tangan Pemerintah dalam hal ini yaitu Menteri, Gubernur, dan Bupati/Walikota, dan dalam pelaksanaannya dapat menugaskan pihak lain baik instansi, lembaga pemerintah maupun swasta seperti Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Perguruan Tinggi, dan badan usaha yang mempunyai kompetensi di bidang air tanah. Ketentuan lebih lanjut mengenai kegiatan inventarisasi diatur dengan Peraturan Menteri.

Hierarki pelaporan hasil kegiatan inventarisasi yaitu (Pasal 23 PP No. 43 Tahun 2008):

- Hasil kegiatan inventarisasi tingkat kabupaten/kota yang dilakukan oleh Bupati/Walikota dilaporkan kepada Gubernur.
- Hasil kegiatan inventarisasi yang dilakukan oleh Gubernur kemudian dilaporkan kepada Menteri.
- Seluruh hasil kegiatan inventarisasi tersebut merupakan milik negara.

Data dan informasi hasil kegiatan inventarisasi digunakan sebagai bahan penyusunan zona konservasi air tanah.

7.4.2 Data Yang Diperoleh

1. Sebaran dan Potensi CAT dan Non-CAT

Sebaran CAT ditentukan oleh batas lateral cekungan air tanah berikut tipenya dan batas vertikal cekungan air tanah yang meliputi batas bagian atas dan bagian bawah. Daerah di luar batas-batas tersebut adalah Non-CAT.

Uraian mengenai CAT dan tata cara penentuan batas CAT dan Non-CAT secara lebih jelas dapat dilihat pada Bab 5.

Dengan adanya batas cekungan air tanah yang tidak berimpit dengan batas administrasi, maka konsekuensinya akan terdapat areal cakupan cekungan air tanah (PP No. 43 Tahun 2008 tentang Air Tanah):

- Cekungan tunggal dalam Kabupaten/Kota
- Cekungan lintas Kabupaten/Kota
- Cekungan lintas Provinsi
- Cekungan lintas negara

2. Dimensi dan Geometri Akuifer

Informasi yang diperoleh dapat dibedakan antara konfigurasi sistem akuifer dan parameter akuifer. Pengkajian konfigurasi sistem akuifer dimaksudkan untuk mengetahui sebaran baik lateral maupun vertikal serta dimensi akuifer dan Non akuifer yang merupakan suatu wadah atau media di mana air tanah tersimpan dan mengalir. Pengkajian ini meliputi:

a. Penentuan sebaran lateral akuifer dan Non-akuifer

Sebaran lateral akuifer dan Non-akuifer dalam suatu cekungan air tanah ditentukan berdasarkan kemampuan meluluskan air dari satuan batuan/formasi batuan yang membentuk cekungan tersebut. Artinya, mengkonversikan satuan batuan atau formasi batuan menjadi satuan-satuan hidrogeologi berdasarkan kemampuan meluluskan air, apakah termasuk akuifer atau Non-akuifer (akuiklud, akuitar, akuifug).

b. Penentuan sebaran vertikal sistem akuifer (CAT) dan Non-akuifer (Non-CAT)

Sebaran vertikal dari unit hidrogeologi ditentukan dengan pendekatan sistem, artinya beberapa akuifer atau Non-akuifer yang mempunyai karakteristik hidraulika yang relatif sama, misal kedudukan muka air tanahnya, dikelompokkan menjadi satu sistem (akuifer atau Non-akuifer). Data yang digunakan meliputi data hidrogeologi bawah permukaan yang diperoleh dari hasil analisis geofisika dan hasil kegiatan pengeboran sumur eksplorasi, sumur eksploitasi, serta sumur pantau. Penentuan sebaran vertikal dilakukan dengan cara:

- Membuat penampang hidrogeologi.
- Menentukan kedalaman bagian atas sistem akuifer.
- Menentukan kedalaman bagian bawah sistem akuifer.

c. Penentuan model konseptual sistem akuifer

Hasil pengkajian pada butir a dan b di atas, dipakai dasar untuk menentukan model konseptual sistem akuifer dari CAT yang dikaji, dengan tujuan antara lain untuk memudahkan di dalam penghitungan neraca air pada CAT tersebut.

3. Parameter Akuifer

Pengkajian parameter akuifer dan Non akuifer dimaksudkan untuk menentukan koefisien permeabilitas (k), koefisien keterusan (T), dan koefisien kandungan (S). Parameter akuifer ini sangat penting artinya untuk melakukan perhitungan-perhitungan yang berkaitan dengan hidrodinamika air bawah tanah.

4. Daerah Imbuhan dan Daerah Lepas Air Tanah

Penentuan daerah imbuhan dan daerah lepasan bukanlah hal yang mudah mengingat ketersediaan data di suatu cekungan berbeda-beda, terutama ketersediaan data muka preatik dan muka pisometrik yang dipakai dasar untuk penentuan batas kedua daerah tersebut.

1. Di suatu cekungan air tanah di mana data muka preatik dan muka pisometri tersedia memadai, penentuan batas antara daerah imbuhan dan daerah lepasan diperoleh dengan cara menumpang-tindih (*overlay*) antara peta muka preatik dan peta muka pisometrik. Garis perpotongan antara muka preatik dan muka pisometrik adalah garis engsel (*hinge line*), yang merupakan batas antara daerah imbuhan dan daerah lepasan.
2. Di suatu cekungan air tanah di mana data muka preatik dan muka pisometri tidak tersedia secara memadai, penentuan batas antara daerah imbuhan dan daerah lepasan dilakukan dengan cara pendekatan yang mengacu kepada konsepsi-konsepsi hidrogeologi yang berlaku.

5. Keterdapatn dan Jumlah Ketersediaan Air Tanah

Pengkajian jumlah air tanah dimaksudkan untuk mengetahui hubungan antara perubahan air tanah yang masuk maupun ke luar dari suatu wadah di dalam cekungan (*intra basin*) maupun antar cekungan (*inter basin*) dalam batasan waktu tertentu (neraca air). Pengkajian jumlah air tanah melalui penghitungan parameter-parameter jumlah adalah sebagai berikut:

a. Imbuhan Air Tanah

Perhitungan imbuhan air tanah untuk mengetahui perkiraan secara kuantitatif tentang jumlah imbuhan ke dalam suatu akuifer di suatu cekungan. Perkiraan secara kuantitatif ini sering menemui kesulitan sehubungan dengan faktor-faktor yang terkait seperti hidrometeorologi dan sifat fisik tanah serta karakteristik hidrauliknya.

Penilaian jumlah imbuhan air tanah dapat dilakukan dengan berbagai metode, antara lain persentasi curah hujan (*precipitation percentage*), neraca klorida (*chloride balance*), dan hidrograf sumur (*well hydrograph*).

b. Neraca Air

Pengkajian tentang neraca air pada suatu cekungan air tanah dilakukan untuk menentukan angka besaran beberapa komponen daur hidrologi (*hydrologic cycle*), artinya melakukan evaluasi terhadap jumlah masukan dan keluaran air di cekungan tersebut. Dalam kondisi di mana jumlah masukan sama besarnya dengan jumlah keluaran, maka neraca air dalam keadaan seimbang walupun daya simpan air juga perlu diperhitungkan.

Dalam pengkajian potensi sumber daya air tanah, neraca air dapat digunakan untuk menghitung jumlah air tanah jika komponen daur hidrologi lainnya diketahui.

6. Mutu Air Tanah

Mutu air tanah dinyatakan menurut sifat fisik, kandungan unsur kimia, maupun kandungan bakteriologi yang terkandung didalamnya. Data yang digunakan untuk menentukan mutu air tanah bersumber dari hasil pengamatan dan pengukuran lapangan serta analisis laboratorium dari beberapa contoh air yang mewakili. Informasi yang lebih jelas mengenai mutu air tanah dapat dilihat pada Bab 5.

7. Jumlah Pengambilan Air Tanah

Dengan pembatasan debit pengambilan air tanah maka penurunan muka air akan dapat dibatasi pada kedudukan yang aman, aman di sini dalam arti mencegah terjadinya kondisi air tanah menjadi rawan, kritis dan rusak, sehingga pengambilan air tanah harus disesuaikan dengan cadangan air tanah yang tersedia.

7.4.3 Zona Konservasi Air Tanah

Penentuan zona konservasi air tanah merupakan salah satu unsur untuk menyusun rencana pengambilan, penyediaan, pemanfaatan, pengembangan, pengusahaan air tanah, dan rencana tata ruang wilayah pada suatu cekungan air tanah.

Zona konservasi air tanah ditentukan berdasarkan faktor-faktor berikut:

1. keterdapatan dan potensi ketersediaan air tanah
2. perubahan muka air tanah
3. perubahan kualitas air tanah
4. perubahan lingkungan air tanah
5. ketersediaan sumber air lain di luar air tanah.
6. prioritas pemanfaatan air tanah.
7. kepentingan masyarakat dan pembangunan

Berdasarkan faktor-faktor tersebut zona konservasi air tanah suatu daerah dibedakan dalam katagori aman, rawan kritis dan rusak, yang kemudian disajikan dalam bentuk peta. Selain itu di dalamnya juga memuat informasi mengenai hidrogeologi dan potensi air tanah. Ketentuan lebih lanjut mengenai klasifikasi zona konservasi air tanah diatur dengan Peraturan Menteri (Pasal 24 PP No. 43 Tahun 2008).

Kewenangan penetapan zona konservasi air tanah berada di tangan Pemerintah yaitu Menteri, Gubernur, atau Bupati/Walikota, setelah dilakukan konsultasi publik (Pasal 24 Ayat (2) PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008).

Zona konservasi air tanah ditinjau kembali setiap 2 (dua) tahun atau paling lama 5 (lima) tahun berdasarkan atas perubahan kuantitas, kualitas, dan lingkungan air tanah (Pasal 24 PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008).

7.4.4 Rancangan Rencana Pengelolaan Air Tanah

Rencana pengelolaan air tanah disusun berdasarkan pada kebijakan air tanah dan strategi pengelolaan air tanah. Sebelum membuat rencana pengelolaan air tanah, maka disusun rancangan rencana pengelolaan air tanah terlebih dahulu (Gambar 7-9).

Menteri, Gubernur, atau Bupati/Walikota sesuai dengan kewenangannya menyusun rancangan rencana pengelolaan air tanah pada setiap Cekungan Air Tanah berdasarkan kondisi dan lingkungan air tanah pada zona konservasi air tanah (Pasal 26 PP No. 43 Tahun 2008).



Gambar 7-9. Tahapan dan waktu rencana pengelolaan air tanah

Rancangan rencana pengelolaan air tanah terdiri dari rencana jangka panjang, jangka menengah, dan jangka pendek dengan rincian sebagai berikut:

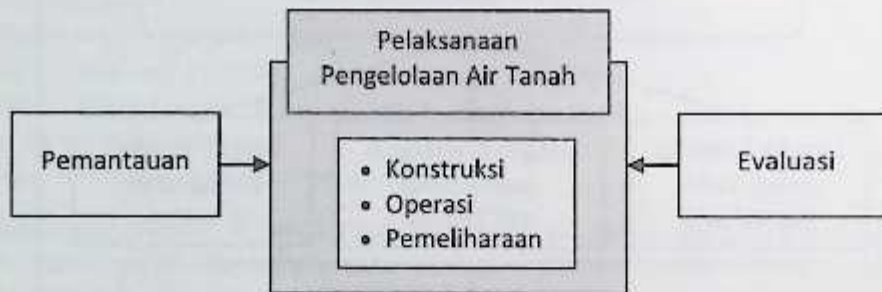
1. Rencana jangka panjang pengelolaan air tanah memuat pokok-pokok program konservasi, pendayagunaan dan pengendalian daya rusak air tanah untuk jangka waktu paling lama 25 tahun.

2. Rencana jangka menengah pengelolaan air tanah memuat pokok-pokok program konservasi, pendayagunaan dan pengendalian daya rusak air tanah untuk jangka waktu paling lama 10 tahun.
3. Rencana jangka pendek pengelolaan air tanah memuat pokok-pokok program konservasi, pendayagunaan dan pengendalian daya rusak air tanah untuk jangka waktu paling lama 5 tahun.

Rancangan rencana pengelolaan air tanah diumumkan secara terbuka kepada masyarakat dan kemudian ditetapkan oleh Menteri, Gubernur, atau Bupati/Walikota sesuai dengan kewenangannya. Pengumuman secara terbuka dapat dilakukan melalui papan pengumuman, media cetak, dan/atau media elektronik. Masyarakat dapat menyampaikan keberatan terhadap rancangan rencana pengelolaan air tanah yang telah diumumkan dalam jangka waktu paling lama 30 hari kalender sejak tanggal diumumkan.

7.5 Pelaksanaan

Pelaksanaan pengelolaan air tanah meliputi kegiatan pelaksanaan konstruksi, operasi, dan pemeliharaan dalam kegiatan konservasi, pendayagunaan air tanah dan pengendalian daya rusak air tanah (Gambar 7-10). Pelaksanaan konstruksi, operasi, dan pemeliharaan tersebut dilakukan oleh Menteri, Gubernur, dan Bupati/Walikota dan pemegang izin dengan mengacu pada program dan rencana kegiatan air tanah yang dilakukan pada Cekungan Air Tanah, akuifer, dan lapisan batuan lainnya yang berpengaruh terhadap ketersediaan air tanah pada Cekungan Air Tanah yang bersangkutan.



Gambar 7-10. Diagram alir pelaksanaan pengelolaan air tanah

Dalam pelaksanaan pengelolaan air tanah Pemerintah melibatkan pihak lain yang memegang izin pelaksanaan konstruksi, operasi, dan pemeliharaan. Pemegang ijin adalah perorangan atau badan usaha yang memiliki izin pemakaian air tanah atau izin perusahaan air tanah.

Pelaksanaan konstruksi, operasi, dan pemeliharaan secara lebih detail diatur dengan Peraturan Menteri.

1. Pelaksanaan konstruksi

Pelaksanaan konstruksi ditujukan untuk penyediaan sarana dan prasarana air tanah. Penyediaan sarana dan prasarana dilakukan antara lain dengan pengeboran, penggalian, dan pengadaan alat

pantau air tanah. Pelaksanaan konstruksi dilakukan berdasarkan norma, standar, pedoman, dan manual sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan.

2. Operasi

Pelaksanaan operasi ditujukan untuk mengoptimalkan upaya konservasi, pendayagunaan, dan prasarana air tanah, yang dilakukan melalui pengaturan konservasi dan pendayagunaan air tanah berdasarkan atas rencana yang disepakati antara pemerintah dan pemilik kepentingan lainnya di bidang air tanah.

3. Pemeliharaan

Pelaksanaan pemeliharaan ditujukan untuk menjamin kelestarian fungsi daerah imbuhan air tanah, fungsi air tanah dan prasarana air tanah. Pelaksanaan pemeliharaan tersebut dilakukan melalui penjagaan dan perbaikan kondisi dan lingkungan air tanah serta sarana dan prasarana air tanah pada Cekungan Air Tanah.

7.6 Konservasi Air Tanah

Pengambilan air tanah di Indonesia untuk berbagai sektor pembangunan cenderung terus meningkat. Hampir 70% kebutuhan air bersih masih mengandalkan air tanah, pada sektor industri bahkan 90% kebutuhan airnya masih harus dipenuhi dari air tanah.

Konservasi air tidak bisa lepas dari konservasi tanah, sehingga keduanya sering disebut bersamaan menjadi konservasi tanah dan air. Hal ini mengandung makna, bahwa kegiatan konservasi tanah akan berpengaruh tidak hanya pada perbaikan kondisi lahan tetapi juga pada perbaikan kondisi Sumber daya airnya, demikian juga sebaliknya (Suripin, 2002).

Konservasi air tanah adalah upaya melindungi dan memelihara keberadaan, kondisi dan lingkungan air tanah guna mempertahankan kelestarian atau kesinambungan ketersediaan dalam kuantitas dan kualitas yang memadai, demi kelangsungan fungsi dan kemanfaatannya untuk memenuhi kebutuhan makhluk hidup, baik waktu sekarang maupun pada generasi yang akan datang (Danaryanto dkk., 2005).

Pada awalnya konservasi air tanah diartikan sebagai menyimpan air dan menggunakannya untuk keperluan yang produktif di kemudian hari. Konsep ini disebut konservasi segi suplai. Perkembangan selanjutnya, konservasi lebih mengarah kepada pengurangan atau efisiensi penggunaan air, dan dikenal sebagai konservasi sisi kebutuhan (Suripin, 2002).

Konservasi air yang baik merupakan gabungan dari kedua konsep tersebut, yaitu menyimpan air dikala berlebihan, menggunakannya sesedikit mungkin untuk keperluan tertentu yang produktif.

7.6.1 Metode Konservasi Air Tanah

Menurut pasal 35 PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, konservasi tanah ditujukan untuk menjaga kelangsungan keberadaan, daya dukung, dan fungsi air tanah. Strategi dalam pelaksanaan konservasi tanah harus mengarah pada: melindungi tanah dari hantaman air hujan dengan penutup permukaan

tanah, mengurangi aliran permukaan dengan meningkatkan kapasitas infiltrasi, meningkatkan stabilitas agregat tanah, dan mengurangi kecepatan aliran permukaan dengan meningkatkan kekasaran lahan.

Metode-metode yang dilakukan dalam rangka konservasi air tanah secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi tiga golongan utama, yaitu (1) secara agronomis, (2) secara mekanis, dan (3) secara kimia menurut Suripin (2002).

7.6.1.1 Konservasi secara Agronomis

Metode agronomis atau biologi adalah metode konservasi dengan memanfaatkan vegetasi untuk membantu menurunkan erosi lahan dengan cara mengurangi daya rusak hujan yang jatuh, jumlah daya rusak aliran permukaan dan meningkatkan pengisian air tanah.

Cara kerja dari konservasi agronomis ini adalah dengan melalui:

- Pengurangan daya perusak butiran hujan yang jatuh akibat intersepsi butiran hujan oleh dedaunan tanaman atau tajuk tanaman.
- Pengurangan volume aliran permukaan akibat meningkatkan kapasitas infiltrasi oleh aktifitas perakaran tanaman dan penambahan bahan organik.
- Peningkatan kehilangan air tanah akibat meningkatnya evapotranspirasi, sehingga tanah cepat lapar air.
- Memperlambat aliran permukaan akibat meningkatnya panjang lintasan aliran permukaan oleh keberadaan batang-batang tanaman.
- Pengurangan daya rusak aliran permukaan sebagai akibat pengurangan volume aliran permukaan, dan kecepatan aliran permukaan akibat meningkatnya panjang lintasan dan kekasaran permukaan.

Konservasi tanah dan air secara vegetatif dapat dilakukan dengan berbagai macam cara, yaitu:

- Pertanaman tanaman atau tumbuhan penutup tanah secara terus-menerus (*permanent plant cover*)
- Pertanaman dalam strip (*strip cropping*)
- Pertanaman berganda (*multiple cropping*)
- Pertanaman bergilir (*rotation cropping*)
- Pemanfaatan mulsa (*residue management*)
- Sistem pertanian hutan (*agroforestry*)

1. Tanaman/Tumbuhan Penutup Tanah

Pada dasarnya semua jenis tanaman atau tumbuhan yang dapat menutup tanah dengan baik dapat dikatakan sebagai tanaman penutup tanah, namun demikian dalam arti yang khusus yang dimaksud dengan tanaman penutup tanah adalah tanaman yang memang sengaja ditanam untuk melindungi tanah dari erosi, menambah bahan organik tanah, dan sekaligus meningkatkan produktivitas tanah.

Ochse et al. (1961) dalam Seta (1991) mengelompokkan tanaman penutup menjadi lima golongan, yaitu:

1. Tanaman penutup tanah rendah, jenis rumput-rumputan dan tumbuhan merambat atau menjalar:
 - a. Dipergunakan pada pola pertanaman rapat.
 - b. Dipergunakan dalam barisan.
 - c. Dipergunakan untuk keperluan khusus dalam perlindungan tebing, talud terras, dinding saluran irigasi maupun drainase.
2. Tanaman penutup tanah sedang, berupa semak.
 - a. Dipergunakan dalam pola pertanaman teratur diantara barisan tanaman pokok.
 - b. Dipergunakan dalam barisan pagar.
 - c. Ditanam di luar tanaman pokok dan merupakan sumber mulsa atau pupuk hijau.
3. Tanaman penutup tanah tinggi.
 - a. Dipergunakan dalam pola pertanaman teratur diantara barisan tanaman pokok.
 - b. Ditanam dalam barisan.
 - c. Dipergunakan khusus untuk melindungi tebing ngarai dan penghutanan kembali (reboisasi).
4. Tumbuhan rendah alami (semak belukar), dan
5. Tumbuhan yang tidak disukai (rumput pengganggu).

Penggunaan dan jenis tanaman penutup tanah yang banyak dijumpai ditunjukkan dalam Tabel 7-2.

Tabel 7-2. Penggunaan dan jenis tanaman penutup tanah yang banyak dijumpai (Seta, 1991)

Golongan	Penggunaan	Jenis tanaman	Keterangan
Tanaman penutup tanah rendah	Pola pertanaman rapat	<i>Calopogonium</i>	Tumbuh pada ketinggian 300 m, pada perkebunan karet yang masih muda
		<i>Muconoides</i> Desv.	
		<i>Centrosema pubescens</i> Benth	Tumbuh pada ketinggian 250 m, pada perkebunan karet tua
	Pola pertanaman barisan	<i>Mimosa invisa</i> Mart	Berduri banyak, tidak cocok untuk perkebunan
		<i>Eupatorium Triplinerve</i> Vahl	Dapat tumbuh baik pada tanah miskin, sebagai pelindung teras
		<i>Salvia Accidental</i> Schwartz	Banyak dipakai pada perkebunan kopi dan karet, dan juga di tepi teras
		<i>Ageratum Mexicanum</i> Sims	Dapat tumbuh pada hampir seluruh jenis tanah, lebih baik di lahan basah
	Perlindungan teras atau saluran-saluran air	<i>Indigifera Endecaphella</i> Jacq	Tumbuh sebagai semak, di berbagai kondisi tanah, iklim dan peneduh
		<i>Ageratum Conizoides</i> L	Tumbuh pada ketinggian 1750 m, cocok untuk tempat yang teduh
		<i>Erechites Valerianifolia</i> Rasim	Tumbuh pada ketinggian 0 – 2200 m, ditemukan pada kebun teh tua
<i>Borreria Latifolia</i> Schum		Dapat tumbuh pada tanah-tanah miskin	
Tanaman penutup tanah sedang	Pola pertanaman teratur, diantara barisan tanaman pokok	<i>Oxalis Corymbosa</i> DC dan <i>Oxalis Latifolia</i> HBK	Dijumpai pada perkebunan teh
		<i>Clibadium surinamense var asperum</i> Baker.	Merupakan tanaman komposit digunakan pada perkebunan muda
		<i>Eupatorium pallessens</i> DC	Dapat tumbuh di daerah masam di mana <i>Clibadium</i> tidak dapat tumbuh

Golongan	Penggunaan	Jenis tanaman	Keterangan
	Pola pertanaman pagar	<i>Lantana camara</i> L	Banyak ditanam di antara barisan tanaman karet pada perkebunan karet di Sumatera
		<i>Crotalaria anagyroides</i> HBK	Dapat tumbuh cepat, daunnya dapat untuk makanan ternak.
		<i>Tephrosia candida</i> DC	Banyak tumbuh disepanjang pantai Pulau Jawa sampai ketinggian 1650 m
		<i>Desmodium gyroides</i> DC	Dapat tumbuh baik pada ketinggian kurang dari 800 m
	Ditanam di luar areal tanaman utama, penguat tebing/teras	<i>Leucaena glauca</i> (L) Benth, <i>Tithonia tangethiflora</i> Desp.	Merupakan sumber bahan organik atau mulsa. Ditanam bercampur dengan jenis leguminosa yang merambat atau berbentuk pohon yang tahan pangkasan
Tanaman penutup tanah tinggi	Diantara barisan tanaman utama	<i>Albizia falcata</i> Backer	Tumbuh pada ketinggian 1600 m, ditanam secara teratur diantara tanaman pokok
	Dalam barisan	<i>Leucaena glauca</i> (L)	Tumbuh pada ketinggian 1500 m, perakarannya sangat dalam. Dipakai sebagai pagar.
	Melindungi jurang, tebing	<i>Albizia falcata</i> dan <i>Leucaena glauca</i>	Dapat ditanam rapat pada pagar
Tumbuhan yang tidak disukai		<i>Imperata cylindrica</i> BEAU, <i>Pacium repens</i> L.	Dapat berfungsi sebagai penutup tanah tapi tidak disukai karena merugikan tanaman pokok

2. Pertanaman dalam Strip

Pertanaman dalam strip (*strip cropping*) adalah cara cocok tanam dengan beberapa jenis tanaman yang ditanam berselang-seling dalam strip-strip pada sebidang tanah dan disusun memotong lereng atau garis kontur. Tanaman yang ditanam biasanya tanaman pangan atau tanaman semusim diselingi dengan strip-strip tanaman penutup tanah yang tumbuh cepat, dan rapat untuk pupuk hijau. Pertanaman dalam strip cocok untuk tanah dengan drainase bagus, karena sistem ini dapat menurunkan kecepatan aliran, sehingga jika diterapkan pada lahan dengan drainase jelek dan laju infiltrasi rendah akan berakibat terjadinya pengisian air tanah yang berlebihan (*water logging*) (Suripin, 2002).

Pertanaman dalam strip hanya efektif untuk tujuan konservasi lahan pada kemiringan kurang dari $8,5^\circ$ (Morgan, 1988). Namun pada daerah-daerah tertentu, karena keadaan, pertanaman dalam strip juga dilakukan pada lahan dengan klasifikasi tanah Kelas II, bahkan kadang-kadang pada tanah Kelas III, dan Kelas IV dengan kemiringan 6 – 15% (Arsyad, 1989; Seta, 1991)

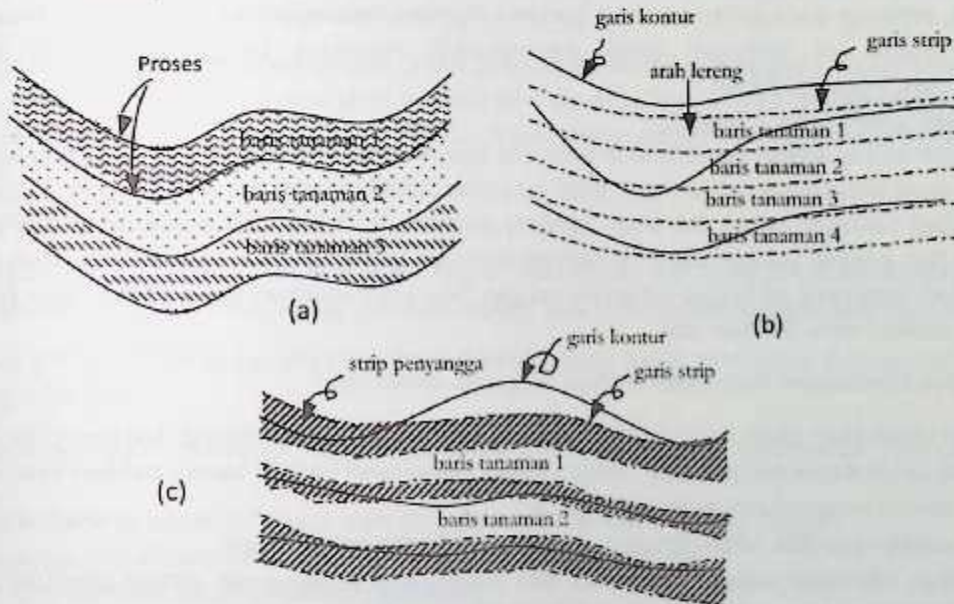
Sistem Pertanaman dalam strip dapat dikelompokkan dalam tiga tipe (Troeh et al., 1980), yaitu:

1. Pertanaman dalam strip menurut garis kontur (*contour strip cropping*)
2. Pertanaman dalam strip lapangan (*field strip cropping*)
3. Pertanaman dalam strip berpenyangga (*buffer strip cropping*)

Pertanaman dalam strip menurut kontur yaitu susunan strip-strip harus tepat sejajar dengan garis kontur dengan urutan pergiliran yang tepat pula. Oleh karena itu sistem ini hanya cocok untuk lahan yang lerengnya panjang dan rata atau seragam (Gambar 7-11a).

Pertanaman dalam strip lapangan terdiri dari strip-strip tanaman yang tidak perlu persis sejajar, namun lebarnya seragam dan disusun melintang/memotong arah lereng (Gambar 7-11b). Sistem ini dapat diterapkan pada lahan kelerengan tidak teratur, akan lebih baik jika dilengkapi dengan saluran bertanaman penutup (*grassed waterway*).

Pertanaman dalam strip berpenyangga terdiri dari strip-strip rumput atau leguminosa (tanaman penyangga) yang dibuat diantara strip-strip tanaman pokok. Strip-strip dapat seragam atau tidak seragam lebarnya, strip rumput ditempatkan pada lereng yang kritis. Sistem ini dilakukan untuk mengatasi lahan yang mempunyai kelerengan sangat tidak teratur (Gambar 7-11c).



Gambar 7-11. Penanaman dalam strip (a) menurut garis kontur (*contour strip cropping*), (b) lapangan (*field strip cropping*), dan (c) strip berpenyangga (*buffer strip cropping*) (Suripin, 2002)

3. Pertanaman Berganda

Metode pertanaman berganda (*multiple cropping*) berguna untuk meningkatkan produktifitas lahan sambil menyediakan proteksi terhadap tanah dari erosi. Sistem ini dapat dilakukan baik dengan cara Pertanaman beruntun (*sequential cropping*); tumpang sari (*inter cropping*); atau tumpang gilir (*relay cropping*) (Suripin, 2002).

a. Pertanaman beruntun (*sequential cropping*)

Pertanaman beruntun adalah sistem bercocok tanam dengan menggunakan dua atau lebih jenis tanaman pada sebidang tanah, dimana tanaman kedua dan berikutnya ditanam bersamaan dengan pemanenan tanaman pertama. Sistem ini bertujuan untuk meningkatkan intensitas penggunaan lahan. Berdasarkan jumlah tanaman, sistem ini dibedakan menjadi beberapa tipe, yaitu *double*

cropping (menggunakan dua jenis tanaman), *triple cropping* (menggunakan tiga jenis tanaman), dan *quadruple cropping* (menggunakan empat jenis tanaman).

b. Tumpang sari (*inter cropping*)

Tumpang sari adalah sistem bercocok tanam dengan menggunakan dua atau lebih jenis tanaman yang ditanam serentak (bersamaan) pada sebidang tanah baik secara campuran (*mixed intercropping*) maupun secara terpisah-pisah dalam baris-baris yang teratur (*row intercropping*)

c. Tumpang gilir (*relay cropping*)

Tumpang gilir adalah sistem bercocok tanam dengan menggunakan dua atau lebih jenis tanaman pada sebidang tanah, dimana tanaman kedua atau berikutnya ditanam setelah tanaman pertama berbunga, sehingga pada waktu tanaman pertama dipanen, tanaman kedua/berikutnya sudah mulai tumbuh. Sistem ini bertujuan untuk meningkatkan intensitas penggunaan lahan sekaligus meningkatkan frekuensi tanam.

d. Pertanaman lorong (*alley cropping*)

Pertanaman lorong adalah suatu bentuk bercocok tanam dengan menggunakan dua atau lebih jenis tanaman pada sebidang tanah, dimana salah satu jenis tanaman yang ditanam adalah tanaman Non pangan. Jadi tanaman pokok (tanaman pangan) ditanam di lorong atau gang yang ada diantara tanaman Non pangan sebagai pagar. Sistem pertanaman lorong sangat cocok untuk tanah tegalan, untuk lahan berlereng sebaiknya tanaman pangan ditanam mengikuti garis kontur agar fungsinya sebagai penahan erosi berjalan baik.

Keuntungan-keuntungan sistem pertanaman berganda antara lain:

- Permukaan tanah akan selalu tertutup oleh vegetasi, sehingga tanah terlindung dari energi air hujan.
- Pengolahan tanah dapat diminimalkan dengan tanpa mengurangi kondisi tanah, bahkan akan menjadi lebih baik karena ketersediaan mulsa yang cukup.
- Mampu menekan populasi hama dan penyakit serta tumbuhan pengganggu.
- Meningkatkan intensitas penggunaan lahan, dan mengurangi penggunaan sarana produksi (pupuk, insektisida) sehingga memperbaiki pendapatan petani.
- Dapat mengurangi pengangguran musiman.

4. Penggunaan Mulsa

Mulsa adalah sisa-sisa tanaman (*crop residues*) yang ditekankan diatas permukaan tanah. Sedangkan sisa-sisa tanaman yang ditanam di bawah permukaan tanah dinamakan pupuk hijau. Jika sisa-sisa tanaman tersebut ditumpuk terlebih dahulu di suatu tempat sehingga mengalami proses humifikasi dinamakan kompos.

Dari segi konservasi tanah, penggunaan mulsa mempunyai beberapa keuntungan, yaitu:

1. memberi pelindung terhadap permukaan tanah dari hantaman air hujan sehingga mengurangi laju erosi,
2. mengurangi volume dan kecepatan aliran permukaan,
3. memelihara temperatur dan kelembaban tanah,
4. meningkatkan kemantapan struktur tanah,

5. meningkatkan kandungan bahan organik tanah, dan
6. mengendalikan tanaman pengganggu (*weeds*).

Bahan mulsa yang baik untuk tujuan konservasi tanah adalah sisa-sisa tanaman yang sukar lapuk seperti batang jagung, sorghum, atau jerami padi (Suwarjo, 1981). Sedangkan cara penggunaan yang terbaik adalah dengan memotong-motong bahan mulsa sepanjang 25-30 cm, dan menebarkannya secara merata di permukaan tanah (Mannering dan Meyer, 1961). Mulsa harus menutup 70 sampai 75% dari permukaan tanah (kira-kira 5t/ha jerami, Morgan, 1988). Pemakaian kurang dari jumlah tersebut tidak cukup memberi perlindungan pada tanah, sementara pemakaian yang lebih tinggi akan menghambat pertumbuhan tanaman.

Di samping ditebarkan dipermukaan tanah, mulsa juga sering ditempatkan dalam jalur dan dalam lajur. Penempatan mulsa dalam lajur maupun jalur dimaksudkan untuk menjaga kelembaban tanah, dan dengan kemampuannya menyimpan air hujan, mulsa dalam lajur maupun jalur juga memberi suplai air bagi tanaman.

5. Penghutanan Kembali (Reboisasi)

Reboisasi dapat diartikan sebagai usaha untuk memulihkan dan menghutankan kembali tanah yang mengalami kerusakan fisik, kimia, maupun biologis; baik secara alami maupun oleh ulah manusia.

Dalam kaitannya dengan usaha konservasi, tanaman yang dipilih hendaknya mempunyai persyaratan sebagai berikut:

- Mempunyai sistem perakaran yang kuat, dalam dan luas, sehingga membentuk jaringan akar yang rapat.
- Pertumbuhannya cepat, sehingga mampu menutup tanah dalam waktu singkat.
- Mempunyai nilai ekonomis, baik kayunya maupun hasil sampingnya.
- Dapat memperbaiki kualitas/kesuburan tanah.

7.6.1.2 Konservasi secara Mekanis

Metode mekanis atau fisik adalah konservasi yang berkonsentrasi pada penyiapan tanah supaya dapat ditumbuhi vegetasi yang lebat, dan cara memanipulasi topografi mikro untuk mengendalikan aliran air dan angin. Pematusan air berlangsung lebih lama sehingga kesempatan air untuk meresap ke dalam tanah lebih panjang.

Fungsi konservasi secara mekanis, yaitu:

- memperlambat aliran permukaan
- menampung dan mengalirkan aliran permukaan sehingga tidak merusak
- memperbesar kapasitas infiltrasi air ke dalam tanah dan memperbaiki aerasi tanah
- menyediakan air bagi tanaman.

Adapun usaha konservasi tanah dan air yang termasuk dalam metode mekanis antara lain meliputi:

1. Pengolahan tanah
2. Pengolahan tanah menurut garis kontur
3. Guludan
4. Terras
5. Saluran Pembuang air
6. Sumur resapan
7. Bangunan Stabilisasi

1. Pengolahan Tanah

Tujuan utama pengolahan tanah adalah menyiapkan tempat tumbuh bagi benih, menggemburkan tanah pada daerah perakaran, membalikkan tanah sehingga sisa-sisa tanaman terbenam didalam tanah, dan memberantas gulma.

Menurut Utomo dan Dexter (1982), pengolahan tanah dapat meningkatkan kapasitas infiltrasi, tetapi juga tanah yang gembur akan lebih mudah hancur karena air hujan. Pengolahan air tanah juga mempercepat mineralisasi bahan organik sehingga kemantapan agregat akan menurun.

Usaha-usaha pengolahan tanah yang dapat dilakukan dalam rangka konservasi air tanah, adalah sebagai berikut (Suripin, 2002):

1. Tanah diolah seperlunya saja.
2. Pengolahan tanah dilakukan pada saat kandungan air yang tepat (pH 3 sampai 4).
3. Pengolahan tanah dilakukan sejajar garis kontur.
4. Merubah kedalaman pengolahan tanah.
5. Pengolahan tanah sebaiknya diikuti dengan pemberian mulsa.

2. Pengolahan Tanah Menurut Garis Kontur

Pada pengolahan tanah menurut kontur maka pembajakan dilakukan memotong lereng atau mengikuti kontur, sehingga terbentuk jalur-jalur tumpukan tanah dan alur yang sejajar atau mengikuti garis kontur. Pengolahan menurut kontur akan lebih efektif jika diikuti dengan penanaman mengikuti kontur juga.

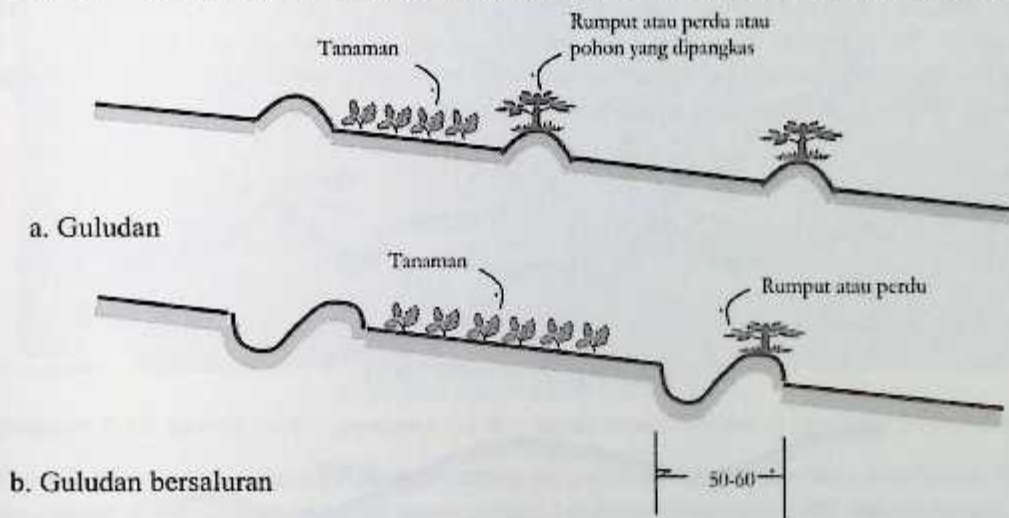
Efektifitas pengolahan tanah dan penanaman menurut kontur tergantung pada kemiringan dan panjang lereng. Pengaruhnya menjadi tidak berarti untuk panjang lereng yang lebih dari 180 m pada kemiringan lahan 1° , batasan ini akan berkurang sejalan dengan meningkatnya kemiringan lereng, untuk kemiringan lahan $5,5^\circ$ dan $8,5^\circ$ panjangnya berturut-turut menjadi 30 m dan 20 m (Morgan, 1988). Yang perlu diperhatikan bahwa sistem kontur ini hanya efektif untuk hujan dengan intensitas rendah. Untuk hujan yang lebat sistem ini sebaiknya dikombinasikan dengan penanaman sistem strip.

Pada jenis tanah lempung dan pasir halus, laju erosi dapat dikurangi lebih lanjut dengan menyimpan air di permukaan dari pada membiarkannya menjadi aliran permukaan. Hal ini dapat dilakukan dengan membuat gundukan-gundukan tanah pada jarak tertentu.

3. Guludan

Sebagai contoh dari metode pengolahan tanah menurut garis kontur adalah penerapan cara guludan (Gambar 7-12). Guludan adalah tumpukan tanah (galengan) yang dibuat memanjang memotong kemiringan lahan (lereng). Fungsi guludan ini adalah untuk menghambat aliran permukaan, menyimpan air di bagian atasnya, dan untuk memotong panjang lereng. Tinggi tumpukan tanah berkisar antara 25–30 cm dengan lebar dasar 25–30 cm. Jarak antara guludan bervariasi tergantung pada kecuraman lereng, kepekaan tanah terhadap erosi, dan erosivitas hujan. Pada tanah dengan kepekaan erosi rendah guludan dapat diterapkan pada lahan dengan kemiringan sampai 6%.

Pada lahan yang lebih curam atau lahan dengan kondisi tanah yang peka terhadap erosi fungsi guludan kemungkinan kurang efektif. Dalam hal ini perlu dipergunakan guludan bersaluran. Pada sistem guludan bersaluran, di sebelah atas guludan dibuat saluran memanjang mengikuti guludan.



Gambar 7-12. Sketsa penampang Guludan dan Guludan bersaluran (Suripin, 2002)

4. Terras

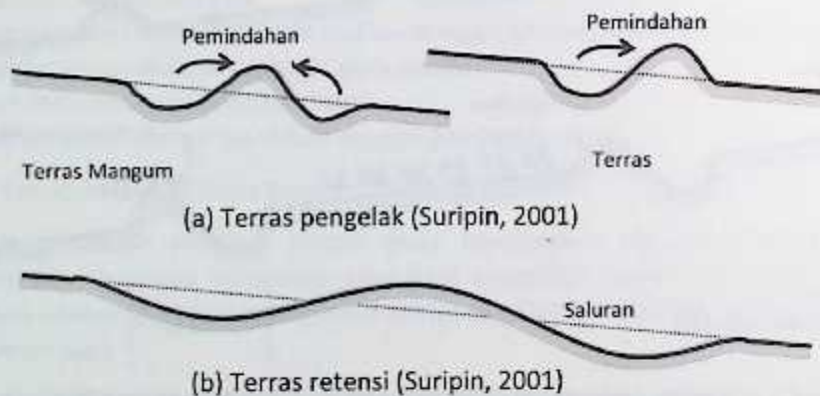
Terras adalah timbunan tanah yang dibuat melintang atau memotong kemiringan lahan, yang berfungsi untuk menangkap dan memperkecil aliran permukaan agar air tertahan dan dapat berinfiltrasi, serta mengarahkannya ke *outlet* yang mantap/stabil dengan kecepatan yang tidak erosif. Dengan demikian memungkinkan terjadinya penyerapan air dan berkurangnya erosi.

Berdasarkan fungsinya, terras dapat dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu (1) terras pengelak (*diversion terrace*), (2) terras retensi (*retention terrace*), dan (3) terras bangku (*bench terrace*).

Terras pengelak mempunyai fungsi utama untuk menangkap aliran permukaan dan mengalirkannya memotong kontur melalui *outlet* yang tepat. Terras jenis ini cocok diterapkan untuk lahan dengan kemiringan kecil, sekitar 1:250. Beberapa tipe terras pengelak yang sudah dikenal diantaranya Terras

Mangum dan Terras Nicholas. Terras Mangum dibuat dengan cara menimbun tanah yang diambil dari kedua sisinya (atas dan bawahnya). Sedangkan terras Nicholas tanah timbunan hanya diambil dari sisi sebelah atasnya saja.

1. Gambar 7-13a. Terras retensi dibuat di mana diperlukan penyimpanan air dengan menampungnya di bagian bukit.
2. Gambar 7-13b. Dalam hal ini diperlukan adanya bagian tanah yang datar yang mampu menampung/menyimpan aliran permukaan dengan periode ulang 10 tahunan dengan tanpa terjadi limpasan (*overtopping*). Terras jenis ini biasanya hanya direkomendasikan untuk tanah permeabel dengan kemiringan kurang dari $4,5^\circ$.
3. Terras bangku atau tangga dibuat dengan jalan memotong lereng dan meratakan tanah di bagian bawah sehingga terbentuk suatu deretan anak tangga atau bangku yang dipisahkan oleh talud. Terras bangku cocok untuk lahan dengan kemiringan sampai 30° atau kurang lebih 50% yang masih difungsikan sebagai lahan pertanian. Talud merupakan bagian yang kritis terhadap bahaya erosi, dan biasanya dilindungi dengan tumbuhan/rumput atau kadang-kadang dilapisi dengan pemasangan batu kali atau beton untuk lahan yang ditanami komoditas dengan nilai ekonomi tinggi.



Luas areal yang dapat ditanami pada lahan yang menggunakan terras bangku makin berkurang dengan bertambah kecuraman lereng lahan. Pada lereng 30% misalnya, dengan jarak vertikal 1 meter, lebar lahan yang dapat ditanami adalah 1,83 m, lahan yang dapat ditanami tinggal hanya 55%. Tabel 7-3 memperlihatkan luas lahan yang dapat ditanami pada terras bangku untuk berbagai kemiringan lahan.



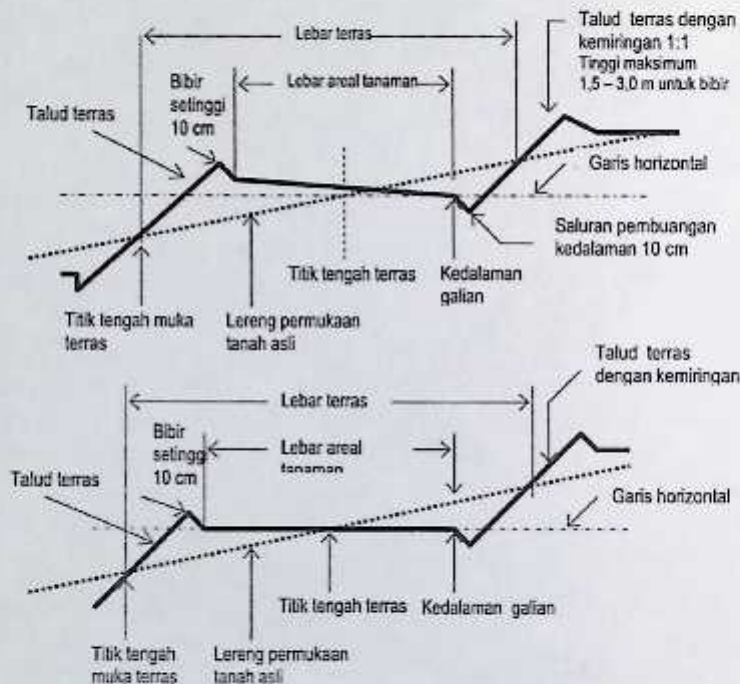
(c) Contoh dokumentasi terrasering

Gambar 7-13. Sketsa terras pengelak (a) dan terras retensi (b) dan (c) contoh dokumentasi

Tabel 7-3. Hubungan antara kecuraman lereng dengan lebar terras, dan luas areal yang dapat ditanami pada terras bangku dengan jarak vertikal 1 m (Constantinesco, 1987 dalam Suripin, 2002).

Kecuraman lereng (°)	5	10	15	20	25	30	35
Lebar areal yang dapat ditanami (m)	18,50	8,50	5,17	3,50	2,50	1,83	1,36
Lebar terras (m)	20,00	10,00	6,67	5,00	4,00	3,33	2,86
Jumlah terras tangga per 100 m lereng	5	10	15	20	25	30	35
Kedalaman potongan maksimum (m), tidak termasuk saluran pembuangan	0,47	0,45	0,42	0,40	0,37	0,35	0,32
Persentase areal yang dapat ditanami per hektar (%)	92,5	85,0	77,5	70,0	62,5	55,0	47,5
Luas muka terras per hektar areal berterras (m ²)	994	2162	3559	5253	7354	10027	13545
Volume galian tanah per hektar areal berterras (m ³)	1270	1335	1390	1457	1540	1642	1783

Ada dua jenis teras bangku yang banyak dibuat di Indonesia, yaitu teras bangku berlereng ke dalam dan teras bangku datar (Gambar 7-14).



Gambar 7-14. Sketsa teras bangku berlereng ke dalam (atas), dan teras bangku datar (bawah) (Suripin, 2002).

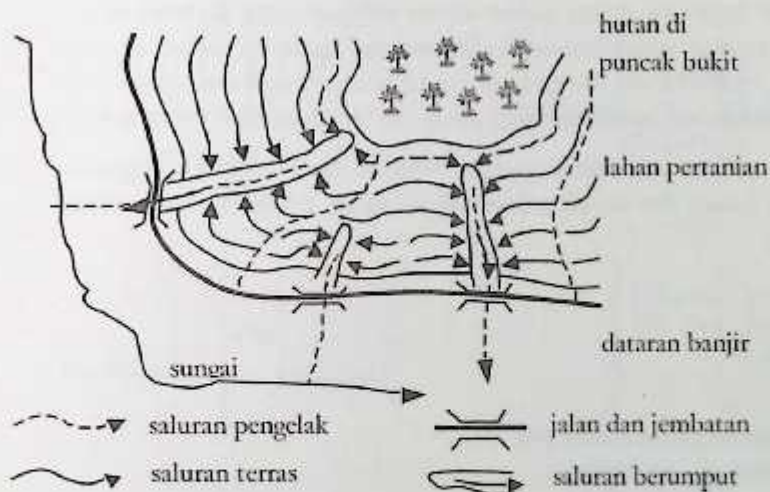
Teras bangku berlereng ke dalam dipergunakan untuk tanah-tanah dengan permeabilitas rendah, dengan maksud air yang tidak terinfiltrasi dengan cepat tidak mengalir keluar melalui talud. Teras bangku sulit diterapkan pada usaha pertanian yang menggunakan mesin-mesin pertanian besar, sehingga konstruksinya memerlukan modal yang cukup besar. Teras bangku juga sulit dilaksanakan untuk lahan dengan lapisan tanah tipis.

5. Saluran Pembuang Air

Untuk menghindari terkonsentrasinya aliran permukaan di sembarang tempat, yang akan membahayakan dan merusak tanah yang dilewatinya, maka perlu dibuatkan jalan khusus berupa saluran pembuangan air (*water ways*). Sehingga tujuan utama pembangunan saluran pembuang air adalah untuk mengarahkan dan menyalurkan aliran permukaan dengan kecepatan yang tidak erosif ke lokasi pembuangan air yang sesuai. Untuk itu saluran pembuang perlu didesain dengan cermat, sehingga mampu menampung debit puncak dengan kala ulang 10 tahunan.

Ada tiga macam saluran pembuang air yang dapat dibuat dalam sistem konservasi tanah dan air, yaitu (1) saluran pengelak, (2) saluran teras, dan (3) saluran berumput (*grass water ways*) (Gambar

7-15). Saluran pengelak dibuat di bagian atas lereng dari lahan pertanian, berfungsi untuk menangkap air yang mengalir dari lereng di atasnya dan menyalurkannya ke saluran berumput. Saluran terras berfungsi mengumpulkan air dari areal antar terras dan menyalurkannya memotong lereng menuju ke saluran berumput. Saluran berumput, yang biasanya berupa saluran alamiah yang terletak di bagian yang rendah, berfungsi menyalurkan air yang berasal dari kedua saluran lainnya ke arah bawah menuju sistem sungai. Saluran berumput direkomendasi untuk lahan berkemiringan sampai 11° , pada lahan yang lebih terjal, sampai 15° , saluran perlu dilapisi batu, pasangan, atau beton. Untuk lahan-lahan perbukitan dengan lereng sangat terjal, saluran perlu dilengkapi dengan bangunan terjunan.



Gambar 7-15. Sketsa tata letak saluran pembuang air dalam sistem konservasi tanah dan air (Morgan, 1988)

6. Sumur Resapan

Adanya pertumbuhan penduduk dan pembangunan yang begitu cepat menyebabkan perubahan tata guna lahan. Banyak lahan-lahan yang semula berupa lahan terbuka dan/atau hutan berubah menjadi areal permukiman maupun industri. Dampak dari perubahan tata guna lahan tersebut adalah meningkatnya aliran permukaan sekaligus menurunnya air yang meresap ke dalam tanah. Akibat selanjutnya distribusi air yang makin timpang antara musim penghujan dan musim kemarau, debit banjir meningkat dan ancaman kekeringan makin menjadi-jadi.

Untuk menanggulangi defisit air tanah ini, telah banyak pemikir yang mengajukan konsep pengisian buatan, misalnya dengan genangan buatan dengan sumber air dari sungai (Todd, 1980); membuat kolam-kolam di sekitar rumah (Seaburn, 1970); pemanfaatan pipa jaring-jaring drainase yang porus guna meresapkan air hujan di sekitar rumah (Dune et.al. (1978); dan menyebarkan air pada lahan luas yang sekaligus untuk mengairi daerah pertanian (Mac Donald, 1969 dalam Sunjoto, 1988). Cara

yang terakhir ini telah lama dipraktekkan di Jawa dan Bali yaitu pada lahan pertanian basah (padi sawah).

Cara lain yang sebenarnya telah banyak dipraktekkan oleh nenek moyang kita adalah sumur resapan, yaitu dengan membuat lobang-lobang galian di kebun halaman serta memanfaatkan sumur-sumur yang tidak terpakai sebagai penampung air hujan.

a. Konsep Sumur Resapan

Konsep dasar sumur resapan pada hakekatnya adalah suatu sistem drainase dimana air hujan yang jatuh di atap atau lahan kedap air ditampung pada suatu sistem resapan air. Berbeda dengan cara konvensional dimana air hujan dibuang/dialirkan ke sungai kemudian menuju laut, cara ini mengalirkan air hujan ke dalam sumur-sumur resapan yang di buat di halaman rumah. Sumur resapan ini merupakan sumur kosong dengan maksud kapasitas tampungannya cukup besar sebelum air meresap ke dalam tanah. Dengan adanya tampungan, maka air hujan mempunyai cukup waktu untuk meresap ke dalam tanah, sehingga pengisian tanah menjadi optimal (Sunjoto,1988).

Secara teoritis, volume dan efisiensi sumur resapan dapat dihitung berdasarkan keseimbangan air yang masuk ke sumur dan air yang meresap ke dalam tanah (Sunjoto, 1988) dan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$H = \frac{Q}{FK} \left(1 - e^{-\frac{FKT}{\pi R^2}} \right) \quad 7-1$$

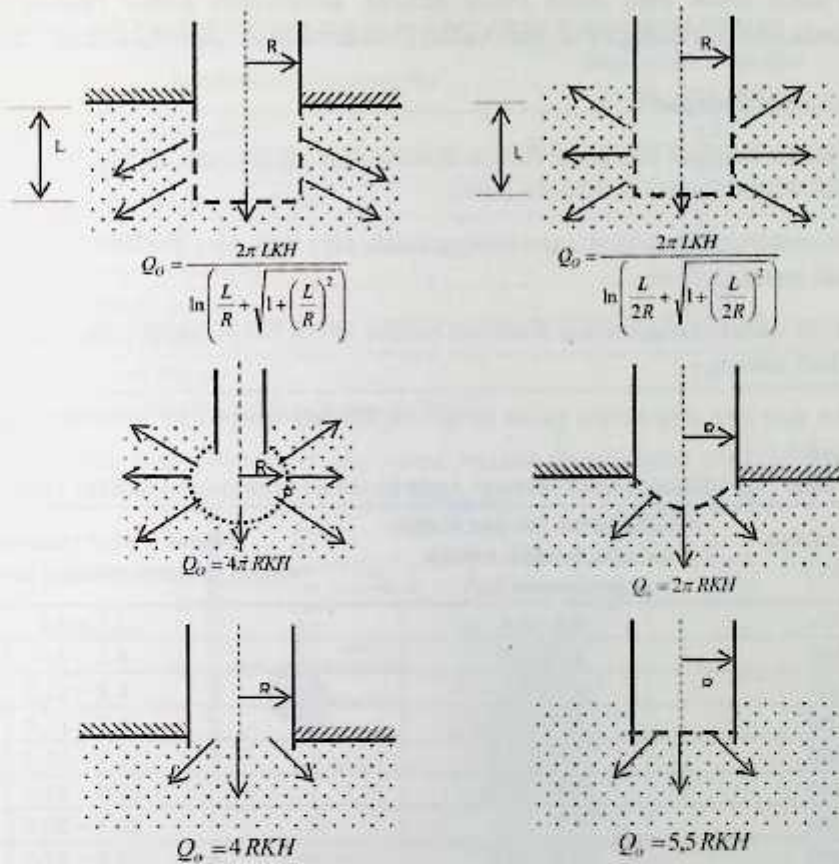
dimana:

- H = tinggi muka air dalam sumur (m)
- F = adalah faktor geometrik (m)
- Q = debit air masuk (m^3/dt)
- T = waktu pengaliran (detik)
- K = koefisien permeabilitas tanah (m/dt)
- R = jari-jari sumur (m)

Faktor geometrik tergantung pada berbagai keadaan secara umum dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$Q_s = F.K.H \quad 7-2$$

Kedalaman efektif sumur resapan dihitung dari tinggi muka air tanah bila dasar sumur berada di bawah muka air tanah tersebut, dan diukur dari dasar sumur bila muka air tanah berada di bawah dasar sumur. Sebaiknya dasar sumur berada pada lapisan tanah dengan permeabilitas tinggi.



Gambar 7-16. Debit resapan pada sumur dengan berbagai kondisi (Bouilliot, 1976 dalam Sunjoto, 1988)

Faktor-faktor yang mempengaruhi dimensi sumur meliputi (Sunjoto,1988):

1. Luas permukaan penutupan, yaitu lahan yang airnya akan ditampung dalam sumur resapan, meliputi luas atap, lapangan parkir dan perkerasan-perkerasan lain.
2. Karakteristik hujan, meliputi intensitas hujan, lama hujan, selang waktu hujan. Secara umum dapat dikatakan bahwa makin tinggi hujan dan makin lama berlangsungnya hujan maka memerlukan volume sumur resapan yang makin besar. Sementara selang waktu hujan yang besar dapat mengurangi volume sumur yang diperlukan.
3. Koefisien permeabilitas tanah, yaitu kemampuan tanah dalam melewati air per satuan waktu. Tanah berpasir mempunyai koefisien permeabilitas lebih tinggi dibandingkan tanah berlempung.
4. Tinggi muka air tanah. Pada kondisi muka air tanah yang dalam, sumur resapan perlu dibuat secara besar-besaran karena tanah benar-benar memerlukan pengisian air melalui sumur-sumur resapan.

Sebaliknya pada lahan yang muka airnya dangkal, pembuatan sumur resapan kurang efektif, terutama pada daerah pasang surut atau daerah rawa dimana air tanahnya sangat dangkal.

b. Konstruksi Sumur Resapan

Sebaiknya sumur resapan dilengkapi dengan dinding demi keamanan. Bahan-bahan yang diperlukan untuk sumur resapan meliputi (Sunjoto, 1988):

1. Saluran pemasukan/pengeluaran dapat menggunakan pipa besi, pipa paralon, buis beton, pipa tanah liat, atau dari pasangan batu.
2. Dinding sumur dapat menggunakan anyaman bambu, drum bekas, tangki *fiberglass*, pasangan batu bata, atau buis beton.
3. Dasar sumur dan sela-sela antara galian tanah dan dinding tempat air meresap dapat diisi dengan ijuk atau kerikil.

Tabel 7-4. Volume sumur resapan pada tanah dengan permeabilitas rendah.

No.	Luas kavling (m ²)	Volume sumur resapan dengan saluran drainase sebagai pelimpasan (m ³)	Volume sumur resapan tanpa saluran drainase sebagai pelimpasan (m ³)
1.	50	1,3 – 2,1	2,1 – 4,0
2.	100	2,6 – 4,1	4,1 – 7,9
3.	150	3,9 – 6,2	6,2 – 11,9
4.	200	5,2 – 6,2	8,2 – 15,8
5.	300	7,8 – 12,3	12,3 – 23,4
6.	400	10,4 – 16,4	16,4 – 31,6
7.	500	13,0 – 20,5	20,5 – 39,6
8.	600	15,6 – 24,6	24,6 – 47,4
9.	700	18,2 – 28,7	28,7 – 55,3
10.	800	20,8 – 32,8	32,8 – 63,2
11.	900	23,4 – 36,8	36,8 – 71,1
12.	1000	26,0 – 41,0	41,0 – 79,0
13.	dst	-	-

Sumber: SK. Gub. No.. 17 Tahun 1992 dalam Dinas Pertambangan DKI Jakarta.

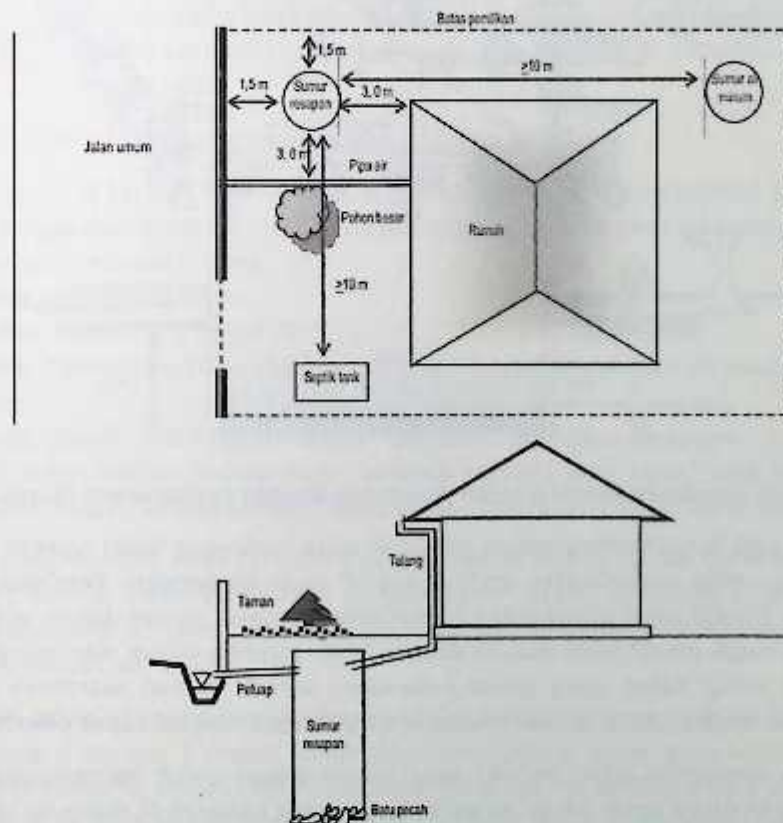
Untuk memberikan hasil yang baik, serta tidak menimbulkan dampak negatif, penempatan sumur resapan harus memperhatikan kondisi lingkungan setempat. Penempatan sumur resapan harus memperhatikan letak septiktank, sumur air minum, posisi rumah, dan jalan umum. Tabel 7-5 memberikan batas minimum jarak sumur resapan terhadap bangunan lainnya.

Tabel 7-5 Jarak minimum sumur resapan dengan bangunan lainnya

No.	Bangunan/obyek yang ada	Jarak minimal dengan sumur resapan (m)
1.	Bangunan/rumah	3,0
2.	Batas pemilikan lahan/kapling	1,5
3.	Sumur untuk air minum	10,0
4.	Septiktank	10,0
5.	Aliran air (sungai)	30,0
6.	Pipa air minum	3,0
7.	Jalan umum	1,5
8.	Pohon besar	3,0

Sumber: Cotteral and Norris dalam Kusnaedi, 2000.

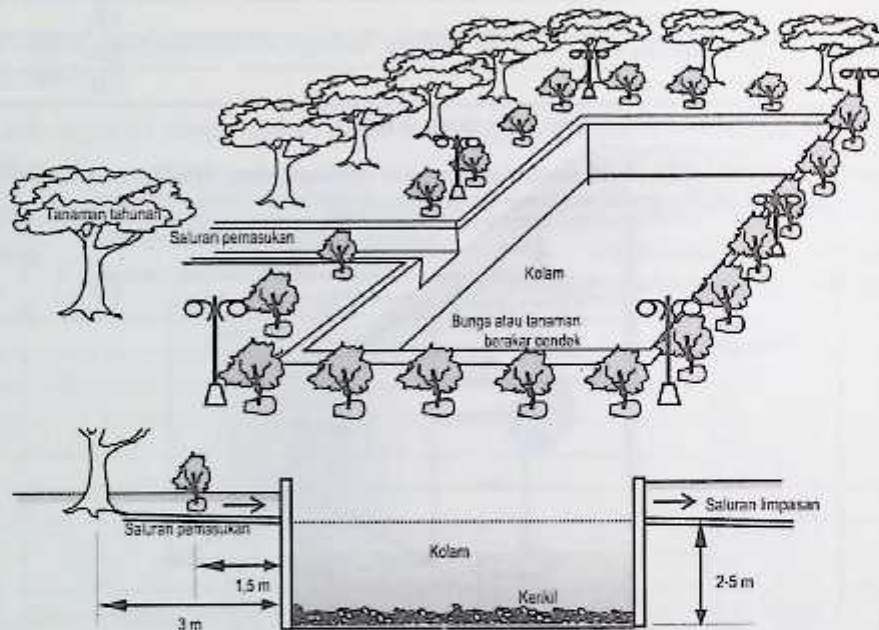
Sebagai gambaran tata letak serta konstruksi sumur resapan diperlihatkan pada Gambar 7-17.



Gambar 7-17. Tata letak sumur resapan (atas) dan konstruksinya (bawah) untuk resapan air hujan rumah tinggal (dalam Suripin, 2002)

c. Sumur Resapan Kolektif

Pada rumah tinggal dengan ukuran kapling yang terbatas, misalnya kompleks perumahan sederhana atau sangat sederhana, penempatan sumur resapan yang memenuhi syarat akan mengalami kesulitan. Untuk mengatasi hal ini maka perlu dibuat sumur resapan kolektif (bersama), dimana satu sumur resapan kolektif dapat melayani beberapa rumah, misalnya per blok, atau per RT, atau kawasan yang lebih luas lagi (Gambar 7-18). Untuk menjamin air mengalir dengan lancar, maka sumur resapan kolektif sebaiknya diletakkan pada lahan yang paling rendah diantara kawasan yang dilayani.



Gambar 7-18. Konstruksi kolam resapan dipadukan dengan pertamanan (Suripin, 2002)

Sumur kolektif juga harus memperhatikan tata letak serta jarak yang tepat supaya dapat berfungsi dengan baik dan tidak menimbulkan dampak negatif pada lingkungan. Berdasarkan lahan yang tersedia, sumur kolektif dapat dibuat dalam bentuk kolam resapan, sumur dalam, atau parit berorak. Kolam resapan cocok dibuat pada wilayah dimana lahan tersedia cukup dan kondisi air tanahnya dangkal (<5m). Sumur dalam dapat dibuat pada lahan sempit, namun syaratnya air tanah harus dalam (> 5m). Sedangkan jika lahannya sempit dan air tanahnya dangkal dapat dibuat parit berorak.

Kolam resapan merupakan kolam terbuka yang khusus dibuat untuk menampung air hujan dan meresapkannya ke dalam tanah. Model kolam ini cocok untuk kawasan di mana air tanahnya dangkal namun tersedia lahan yang cukup luas. Model ini dapat dipadukan dengan pertamanan atau hutan kota/hutan masyarakat. Dengan demikian kolam resapan dapat mempunyai fungsi ganda, konservasi air dan udara, sekaligus mempunyai nilai estetika.

7. Bangunan Stabilisasi

Bangunan stabilisasi yang umum berupa dam penghambat (*check dam*), balong, dan rorak. Bangunan-bangunan tersebut berfungsi untuk mengurangi volume dan kecepatan aliran permukaan, disamping juga untuk menambah masukan air tanah dan air bawah tanah.

Dam penghambat (*check dam*) adalah bangunan yang dibuat melintang parit atau selokan yang berfungsi untuk menghambat kecepatan aliran dan menangkap sedimen yang dibawa aliran sehingga kedalaman dan kemiringan parit berkurang. Bangunan ini biasanya dibuat dari bahan lokal yang tersedia, misalnya kayu, tanah, atau batu. Bangunan ini mempunyai resiko kegagalan yang tinggi, namun dapat memberikan stabilisasi sementara dan dapat dikombinasikan dengan sistem agronomi.

Balong adalah waduk kecil yang dibuat di daerah perbukitan dengan kemiringan lahan kurang dari 30%. Bangunan ini berfungsi untuk menampung air aliran permukaan guna memenuhi kebutuhan air tanaman, ternak dan keperluan-keperluan lainnya, menampung sedimen hasil erosi, meningkatkan jumlah air yang meresap ke dalam tanah (*infiltrasi*), mendekatkan permasalahan dan penyelesaian konservasi kepada masyarakat.

Syarat-syarat utama balong yang efektif yaitu:

1. kondisi topografi di tempat balong yang akan dibangun harus memungkinkan pembangunan yang ekonomis; tenaga dan biaya merupakan fungsi langsung panjang dan kedalaman balong, dua faktor yang menentukan volume balong,
2. cukup air yang memenuhi syarat,
3. terdapat bahan tanah yang kedap air,
4. semua balong harus dilengkapi fasilitas pelimpah untuk menyalurkan air pada saat terjadi banjir secara aman,
5. balong harus dapat dikeringkan untuk keperluan perbaikan-perbaikan. Untuk menghindari sedimentasi, areal sekitar balong harus tertutup vegetasi yang rapat, tidak boleh terbuka atau digarap. Tanah bagian bawah (*subsoil*) harus terdiri-dari lapisan yang relatif kedap air.

Tipe balong yang dikenal, yaitu (a) balong galian (*digaout ponds*) sumber air utamanya berasal dari air tanah, (b) balong aliran permukaan (*surface water ponds*), (c) balong mata atau sungai kecil (*spring-fed* atau *creek-fed ponds*), (d) balong *by-pass* (*off-stream ponds* atau *by-pass ponds*) (Calkin's, 1947 dalam Frevet et.al., 1963).

Rorak (*silt pit*) adalah bangunan yang dibuat dengan menggali lubang sedalam 60 cm, lebar 50 cm, dengan panjang 4 sampai 5 meter. Rorak dibuat memanjang sejajar garis kontur atau memotong lereng. Jarak ke samping antara satu rorak dengan rorak lainnya berkisar antara 10 sampai 15 meter, sedangkan jarak ke arah lereng berkisar antara 10 meter, untuk lereng yang agak curam sampai 20 meter untuk lahan yang landai. Bangunan ini berfungsi untuk menangkap air dan tanah yang tererosi, sehingga terjadi pengisian air tanah dan mengurangi erosi.

7.6.1.3 Konservasi secara Kimiawi

Metode kimia adalah usaha konservasi yang ditujukan untuk memperbaiki struktur tanah sehingga lebih tahan terhadap erosi. Metode yang terakhir ini perannya sangat kecil dalam hal konservasi air. Struktur tanah merupakan salah satu sifat tanah yang sangat menentukan kepekaan tanah terhadap ancaman erosi. Oleh karena itu sejak tahun 1950-an telah dimulai adanya usaha-usaha untuk memperbaiki kemandapan struktur tanah melalui pemberian preparat-preparat kimia yang secara umum disebut pemantap tanah (*soil conditioner*). Bahan pemantap tanah yang baik harus mempunyai sifat-sifat sebagai berikut (Seta, 1991):

- Mempunyai sifat yang adhesif serta dapat bercampur dengan tanah secara merata.
- Dapat merubah sifat hidrofobik atau hidrofilik tanah, yang dengan demikian dapat merubah kurva penahanan air tanah.
- Dapat meningkatkan kapasitas tukar kation tanah, yang berarti mempengaruhi kemampuan tanah dalam menahan air.
- Daya tahan sebagai pemantap tanah cukup memadai, tidak terlalu singkat dan tidak terlalu lama.
- Tidak bersifat racun (*phytotoxix*) dan harganya terjangkau (*murah*).

Beberapa macam bahan pemantap tanah yang banyak digunakan dalam rangka konservasi tanah dan air dapat dilihat pada Tabel 7-6. Penggunaan bahan pemantap tanah pada dasarnya dapat dilakukan melalui tiga cara, yaitu:

- Pemakaian di permukaan tanah (*surface treatment*). Pada cara ini larutan atau emulsi bahan pemantap tanah yang telah diencerkan dengan air (dengan perbandingan tertentu) disemprotkan langsung ke atas permukaan tanah dengan *sprayer*. Cara ini dapat dilakukan baik untuk penelitian di lapangan maupun di laboratorium.
- Pemakaian secara dicampur (*incorporation treatment*). Pada cara ini larutan atau emulsi bahan pemantap tanah yang telah diencerkan dengan air (dengan perbandingan tertentu) disemprotkan langsung ke atas permukaan tanah dengan *sprayer*, kemudian tanah diaduk-aduk sampai campuran merata sampai kedalaman antara 0–25 cm. Cara ini banyak dilakukan dalam penelitian di laboratorium, namun dapat juga untuk pemakaian di lapangan. Untuk areal yang luas, penyemprotan dan pengadukan tanah dapat dilakukan dengan mesin atau traktor.
- Pemakaian setempat/lobang (*local/pit treatment*). Pada cara ini pemakaian bahan pemantap tanah hanya terbatas pada lobang-lobang (dengan ukuran misalnya 60 x 60 x 60 cm³) yang dipersiapkan untuk ditanami tanaman (biasanya tanaman tahunan) saja.

Tabel 7-6. Macam-macam bahan pemantap tanah yang banyak digunakan untuk memperbaiki struktur tanah (Gabriels et al., 1977)

Nama Kimia	Wujud
Polyninyl acetate (PVa)	emulsi
Polyacrilamide (PAM)	larutan
Polyvinyl pyrrolidone	larutan
Asphalt	emulsi
Polyvynil alkohol (PVA)	larutan
Polyurethane	larutan
Polyethyneglycol	larutan
Latex	emulsi

Cara kerja bahan pemantap tanah tersebut dapat digambarkan dengan contoh penggunaan *Polyacrylamide* (PAM) di bawah ini.

PAM adalah *polymer Non-hydrophobic* mempunyai bagian aktif amide yang mengikat bagian-bagian -OH pada butir liat melalui ikatan hidrogen. Yang kemudian mengikat bagian-bagian negatif liat, dan mengikat atom-atom oksigen pada permukaan liat melalui ikatan hidrogen.

Cara pemakaiannya adalah dengan mencampurkan PAM dan air dengan perbandingan volume 1:3, kemudian disemprotkan ke permukaan tanah yang diperbaiki dan diaduk-aduk dengan cangkul dan/atau sekop dan garu. Pengaruh PAM dalam memperbaiki struktur tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Berat molekul polymer (berat molekul optimal PAM sekitar 10^6).
2. Kandungan air tanah; kandungan air tanah yang optimum bagi pembentukan struktur tanah adalah pada titik lengkung terbesar dalam kurva pF tanah.
3. Konsentrasi emulsi; tanah berkadar liat tinggi tampaknya memerlukan konsentrasi yang lebih kecil daripada tanah yang berpasir.

Emulsi bitumen merupakan preparat pemantap tanah yang paling murah, sehingga bahan ini paling banyak digunakan. Pemakaian bahan ini menyebabkan tanah lebih hidrofobik, yang bermanfaat bagi pembentukan agregat tanah-tanah yang mudah mengeras dan mengurangi penguapan air jika dicampurkan pada kedalaman 5-8 cm dari permukaan tanah. Gugusan aktif pada bahan ini berupa Carboxyl. Untuk membuat tanah lebih hidrofobik maka bagian aktif harus diberi asam yang lebih keras dengan cara sulfonasi atau penggunaan pengemulsi yang mengandung asam sulfonik sehingga gugusan aktif mengandung ion HSO_3^- .

Cara pemakaian emulsi bitumen tidak beda dengan cara pemakaian PAM, yaitu mencampurkan air dengan perbandingan tertentu (misalnya 1:3), kemudian menyemprotkannya ke permukaan tanah dengan *sprayer* dan mencampurnya dengan cangkul.

Efektifitas penggunaan bitumen sangat dipengaruhi oleh kandungan air tanah pada saat pencampuran antara bitumen dan tanah (De Broodt et.al., 1973).

Penggunaan bahan pemantap tanah pada dasarnya dapat dilakukan melalui tiga cara, yaitu:

1. Pemakaian di permukaan tanah (*surface treatment*). Pada cara ini larutan atau emulsi bahan pemantap tanah yang telah diencerkan dengan air (dengan perbandingan tertentu) disemprotkan langsung ke atas permukaan tanah dengan *sprayer*. Cara ini dapat dilakukan baik untuk penelitian di lapangan maupun di laboratorium.
2. Pemakaian secara dicampur (*incorporation treatment*). Pada cara ini larutan atau emulsi bahan pemantap tanah yang telah diencerkan dengan air (dengan perbandingan tertentu) disemprotkan langsung ke atas permukaan tanah dengan *sprayer*, kemudian tanah di aduk-aduk sampai campuran merata sampai kedalaman antara 0–25 cm. Cara ini banyak dilakukan dalam penelitian di laboratorium, namun dapat juga untuk pemakaian di lapangan. Untuk areal yang luas, penyemprotan dan pengadukan tanah dapat dilakukan dengan mesin atau traktor.
3. Pemakaian setempat/lobang (*local/pit treatment*). Pada cara ini pemakaian bahan pemantap tanah hanya terbatas pada lobang-lobang (dengan ukuran misalnya 60 x 60 x 60 cm³) yang dipersiapkan untuk ditanami tanaman (biasanya tanaman tahunan) saja.

7.6.2 Upaya Konservasi Air Tanah

Upaya penyelamatan air tanah dilakukan melalui berbagai upaya konservasi meliputi pemantauan, perlindungan dan pelestarian, pengawetan, pengelolaan kualitas dan pengendalian pencemaran air tanah.

Kegiatan konservasi air tanah didasarkan pada:

1. Hasil kajian identifikasi dan evaluasi cekungan air tanah.
2. Rencana pengelolaan air tanah.
3. Hasil pemantauan perubahan kondisi dan lingkungan air tanah.

Konservasi air tanah dapat dilaksanakan melalui serangkaian upaya sebagai berikut:

1. Penentuan Zona Konservasi Air tanah
2. Perlindungan dan Pelestarian Air Tanah
3. Pengawetan Air Tanah
4. Pengelolaan Kualitas dan Pengendalian Pencemaran Air Tanah

7.6.2.1 Penentuan Zona Konservasi Air Tanah

Zona konservasi air tanah merupakan acuan dalam penyusunan pola perencanaan daerah untuk konservasi air tanah serta penyusunan rencana tata ruang untuk wilayah konservasi air tanah berdasarkan Cekungan Air Tanah (CAT).

Penyusunan zona konservasi disesuaikan dengan kondisi geologi dan jenis penutup lahan yang mungkin di wilayah tersebut. Konservasi air tanah terutama dilaksanakan pada daerah tangkapan air, kawasan suaka alam, kawasan pelestarian alam dan kawasan hutan.

Penyusunan zona konservasi ditujukan untuk mengoptimalkan fungsi *recharge* area dalam menjaga ataupun meningkatkan volume air tanah, dengan melakukan aksi-aksi konservasi yang lebih terarah sesuai dengan morfologi wilayah yang akan dikonservasi, sehingga ada perbaikan kondisi lahan dan kondisi sumber daya airnya, begitu pula sebaliknya (Kodoatie, 2005).

Menurut PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, zona konservasi air tanah disajikan dalam bentuk peta dan diklasifikasikan menjadi zona aman, zona rawan, zona kritis, dan zona rusak. Zona konservasi ini memuat mengenai ketentuan konservasi dan pendayagunaan air tanah pada cekungan air tanah. Zona konservasi ditinjau kembali setiap dua tahun atau paling lama lima tahun berdasarkan atas perubahan kuantitas, kualitas, dan lingkungan air tanah.

Zona konservasi air tanah merupakan pengelompokan suatu daerah yang juga ditentukan berdasarkan kesamaan kondisi daya dukung air tanah, kesamaan tingkat kerusakan air tanah dan kesamaan pengelolaannya (Dep. Energi dan sumber Daya Mineral, 2006).

Berdasarkan kriteria tersebut diatas, zona konservasi air tanah dapat dibedakan menjadi 5 (lima) zona, yaitu (Dep. Energi dan sumber Daya Mineral, 2006):

- Zona Rusak,
- Zona Kritis,
- Zona Rawan,
- Zona Aman,
- Zona Aman dengan produktivitas rendah/daerah air tanah langka.

A. Tingkat Kerusakan Kondisi Air tanah

1. Berdasarkan pertimbangan penurunan muka air tanahnya, tingkat kerusakan kondisi air tanah dapat dibagi menjadi 4 (empat) tingkatan, yaitu:

A m a n : penurunan muka air tanah < 40%

R a w a n : penurunan muka air tanah 40% - 60%

K r i t i s : penurunan muka air tanah 60% - 80%

R u s a k : penurunan muka air tanah > 80%

Tingkat Kerusakan Kondisi Air Tanah Tidak-Tertekan

A m a n : penurunan preatik < 40%

R a w a n : penurunan preatik 40% - 60%

K r i t i s : penurunan preatik 60% - 80%

R u s a k : penurunan preatik > 80%

Tingkat Kerusakan Kondisi Air Tanah Tertekan

Aman : penurunan pisometrik < 40%

Rawan : penurunan pisometrik 40% - 60%

Kritis : penurunan pisometrik 60% - 80%

Rusak : penurunan pisometrik > 80%

Perubahan/penurunan pisometrik maupun preatik tersebut dihitung dari kondisi awal sebagai titik acuan.

2. Berdasarkan pertimbangan penurunan kualitas air tanahnya, tingkat kerusakan kondisi air tanah tertekan maupun tidak tertekan dapat dibagi menjadi 4 (empat) tingkatan, yaitu:

Aman : penurunan kualitas yang ditandai dengan kenaikan salinitas kurang dari 1000 mg/l atau daya hantar listrik kurang dari 1000 μ S/cm.

Rawan : penurunan kualitas yang ditandai dengan kenaikan salinitas antara 1000 – 10.000 mg/l atau daya hantar listrik antara 1000 - 1500 μ S/cm.

Kritis : penurunan kualitas yang ditandai dengan kenaikan salinitas antara > 10.000 – 15.000 mg/l atau daya hantar listrik antara > 1500 - 5000 μ S/cm.

Rusak : penurunan kualitas yang ditandai dengan kenaikan salinitas lebih dari 100.000 mg/l atau daya hantar listrik lebih dari 5000 μ S/cm atau tercemar oleh logam berat dan atau bahan berbahaya dan beracun.

B. Tingkat Kerusakan Lingkungan Air Tanah

Berdasarkan pertimbangan ada tidaknya amblesan tanah, tingkat kerusakan lingkungan air tanah dapat dibagi menjadi 2 (dua), yaitu:

Aman : apabila pemanfaatan air tanah belum berdampak terjadinya amblesan tanah.

Kritis : apabila pemanfaatan air tanah telah berdampak terjadinya amblesan tanah.

C. Tingkat Kerusakan Kondisi dan Lingkungan Air tanah

Berdasarkan penurunan muka air tanah dan kualitasnya, serta ada tidaknya amblesan tanah, maka tingkat kerusakan kondisi dan lingkungan air tanah dapat ditentukan sebagai berikut.

Penentuan peringkat kerusakan kondisi dan lingkungan air tanah (Dep. Energi dan sumber Daya Mineral, 2006)

1. **Aman** : apabila penurunan muka tanah <40%, penurunan kualitas air tanah TDS <1000 mg/l dan DHL < 1000 μ S/cm
2. **Rawan**: apabila penurunan muka tanah 40%-60%, penurunan kualitas air tanah TDS 1000-10.000 mg/l dan DHL 1000-1500 μ S/cm
3. **Kritis** : apabila penurunan muka tanah >60%-80%, penurunan kualitas air tanah TDS 1000-10.000 mg/l dan DHL >1500-5000 μ S/cm
4. **Rusak** : apabila penurunan muka tanah >80%, penurunan kualitas air tanah TDS >100.000mg/l dan DHL >5000 μ S/cm

7.6.2.2 Perlindungan dan Pelestarian Air Tanah

Perlindungan dan pelestarian air tanah sebagaimana disebutkan dalam Pasal 39 PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 merupakan upaya menjaga keberadaan serta mencegah terjadinya kerusakan kondisi dan lingkungan air tanah. Pelestarian air tanah merupakan usaha menjaga kelestarian kondisi dan lingkungan serta fungsi air tanah agar tidak mengalami perubahan.

Perlindungan dan pelestarian air tanah dapat dilakukan melalui:

1. Menjaga daya dukung dan fungsi daerah imbuhan air tanah, dengan cara:
 - Pemeliharaan kelangsungan fungsi resapan air dan daerah tangkapan air
 - Pengendalian pemanfaatan air, yang diwujudkan dalam larangan pengeboran, penggalian, atau kegiatan lain dalam radius 200 m dari lokasi pemunculan mata air
 - Pengisian air pada sumber air
2. Menjaga daya dukung akuifer, dengan cara:
 - Pengaturan prasarana dan sarana sanitasi
 - Perlindungan sumber air dalam hubungannya dengan kegiatan pembangunan dan pemanfaatan lahan pada sumber air
 - Pengendalian pengolahan tanah di daerah hulu
 - Pengaturan daerah sempadan sumber air
3. Memulihkan kondisi dan lingkungan air tanah pada zona kritis dan zona rusak
 - Rehabilitasi hutan dan lahan dan/atau
 - Pelestarian hutan lindung, kawasan suaka alam dan kawasan pelestarian alam, yang diwujudkan dalam: pembatasan penggunaan air tanah hanya untuk pemenuhan kebutuhan pokok sehari-hari.

7.6.2.3 Pengawetan Air Tanah

Pengawetan air tanah dilakukan untuk menjaga kesinambungan ketersediaan air tanah dalam kuantitas dan kualitas yang memadai guna memenuhi kebutuhan hidup, dilaksanakan dengan cara:

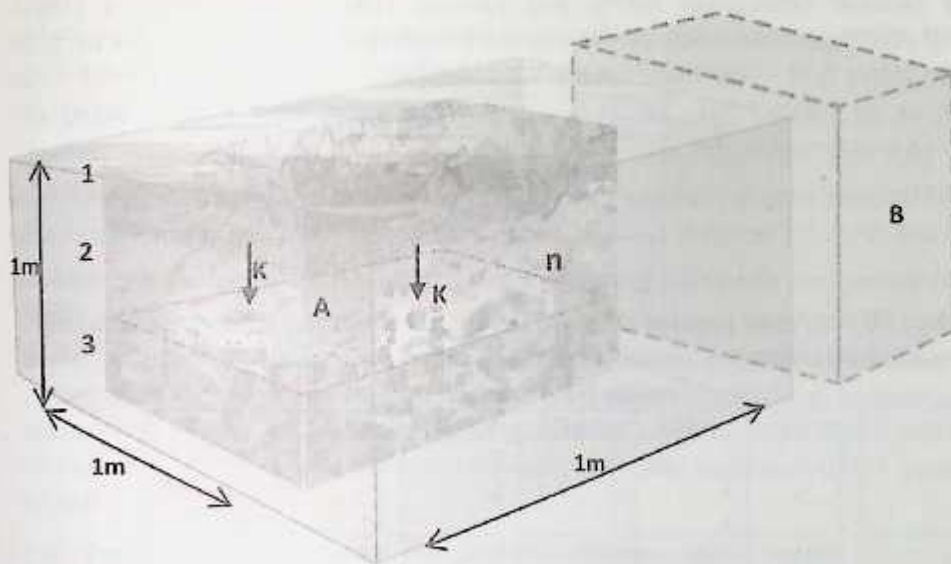
1. **Mengendalikan pengambilan dan pemanfaatan air tanah.**

Pengendalian pengambilan dan pemanfaatan air tanah, dilakukan untuk menjaga keseimbangan antara ketersediaan dan pemanfaatan air tanah sehingga tidak merusak kondisi dan lingkungan air tanah, dapat dilakukan dengan cara:

 - a. penerapan perizinan air tanah;
 - b. pengaturan debit pengambilan air tanah;
 - c. pengaturan pelaksanaan *dewatering*;
 - d. pengaturan debit penurapan mata air;
 - e. pengaturan pemanfaatan air tanah;
 - f. penerapan tarif progresif yang ketat sesuai dengan kondisi air tanah.
2. **Menghemat pemanfaatan air tanah**

Upaya penghematan pemanfaatan air tanah dilakukan untuk efisiensi dan efektivitas pemanfaatan air tanah. Upaya tersebut dapat dilakukan dengan cara:

- a. daur ulang;
 - b. pemanfaatan diprioritaskan untuk memenuhi kebutuhan pokok air minum dan rumah tangga;
 - c. pengambilan sesuai kebutuhan;
 - d. pemanfaatan air tanah sebagai alternatif terakhir selama masih tersedia air yang lain;
 - e. gerakan hemat air
3. Meningkatkan kapasitas resapan air
- a. Membuat imbuhan air tanah buatan, yaitu membuat sumur-sumur imbuhan, pelestarian hutan, danau, situ, bendungan, jaringan irigasi, pembuatan embung di sepanjang sungai, penataan ladang/kebun dan kavling perumahan yang dilengkapi sumur pantau.
 - b. Merehabilitasi daerah imbuhan air tanah, dengan melakukan reboisasi hutan jika kepadatan pohon kurang atau mengalami degradasi, penataan ladang/kebun pada lahan yang bertopografi miring ($\pm 5\%$) dengan metoda *terrassering*.
 - c. pemanfaatan *vadose zone* sebagai pengisi air tanah.
 - d. proses masuknya *run-off* air hujan ke dalam tanah adalah melalui infiltrasi dan perkolasi, yang kemudian menjadi air tanah. Pada saat terjadi peristiwa infiltrasi, air dari permukaan yang masuk ke lapisan tanah berada di *vadoze zone (unsaturated zone)* (Hunt, 1984). Pada saat kandungan air di *unsaturated zone* maksimal (mencapai *field capacity*), maka secara gravitasi air akan mengalami perkolasi dan menuju ke *saturated zone* yang kemudian disebut air tanah (US. Department of Interior, 1979). Untuk lebih jelasnya proses aliran air tanah dijabarkan pada gambar di bawah ini.



Keterangan:

1. Aliran permukaan/run-off
2. Vadose zone/unsaturated zone
3. Aliran air tanah (zona jenuh air/phreatic zone)

n: Porositas tanah (%)

K: Konduktivitas hidraulik (m/sec)

A: Lahan resapan air seluas 1 m²

B □ : Luas lahan yang diperlukan untuk konservasi jika lahan kritis seluas A

Gambar 7-19. Ilustrasi sederhana hubungan antara infiltrasi air tanah pada vadose zone dan luas lahan konservasi yang dibutuhkan (Keller, 1979; Thomson and Turk, 1993; Beven, 2003; Rushton, 2003; dengan modifikasi)

Tabel 7-7. Waktu infiltrasi rata-rata untuk berbagai kondisi tanah, asumsi daerah tangkapan hujan dengan volume 1m³ (Morris & Johnson, 1967; Freeze & Cherry, 1979)*

Jenis tanah	Asumsi volume	Porositas (%)	Volume akibat porositas (m ³)	K (m/detik)	t (detik)
Kerikil	1m ³	34	0,34	10 ⁻¹ - 1	0,34
Pasir	1m ³	39	0,39	10 ⁻⁵ - 10 ⁻²	39
Lanau	1m ³	46	0,46	10 ⁻⁶ - 10 ⁻³	460
Silt	1m ³	42	0,42	10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁵	42000
Clay	1m ³	50	0,50	10 ⁻¹² - 10 ⁻¹⁰	42 x 10 ⁻⁶

* bisa juga dilihat dan dibandingkan dengan Tabel 3-1.

Perhitungan tabel tersebut berdasarkan Morris and Johnson (1967) dalam Karanth (1987). Berdasarkan tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa waktu infiltrasi yang dibutuhkan untuk berbagai jenis tanah berkisar antara 0,34 – 460 detik. Karena *Silt* bukanlah jenis tanah yang efektif untuk perantara infiltrasi air ke dalam tanah, karena waktu infiltrasi yang lama (42000 detik) dan konduktivitas hidraulik yang sangat lambat (0,00001 m/detik).

Berikut disajikan contoh tabel hasil perhitungan variasi waktu resap air untuk berbagai variasi slope (S) dan faktor penutup lahan (n) ke dalam tanah terhadap area konservasi yang dibutuhkan untuk jenis tanah pasir.

Tabel 7-8. Variasi slope (S) dan faktor penutup lahan (n) terhadap kebutuhan lahan untuk daerah resapan air seluas 1 m^2 , untuk contoh jenis tanah pasir (lihat

Gambar 7-19)

	$n = 0,01$	$n = 0,02$	$n = 0,025$	$n = 0,06$	$n = 0,2$	$n = 1$
Jarak (m)	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1
Slope (S)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Kecepatan (m/dtk)	10	5	4	1,67	0,5	0,1
	3,16	1,58	1,26	0,53	0,16	0,03
	1	0,5	0,4	0,17	0,05	0,01
Lamanya infiltrasi (dtk)	0,1	0,2	0,25	0,6	2	10
	0,32	0,63	0,79	1,89	6,25	33,33
	1	2	2,5	5,88	20	100
Lahan konservasi yang dibutuhkan (m^2)	390	195	156	65,13	19,5	3,9
	123,24	61,62	49,14	20,67	6,24	1,17
	39	19,5	15,6	6,63	1,95	0,39

keterangan:

- $n = 0,03-0,06$ adalah kedalaman aliran lebih dari 5 kali tinggi vegetasi (untuk jenis rumput Kentucky, Bermuda, dan Buffalo)
- $n = 0,01-0,2$ adalah kedalaman aliran \leq tinggi vegetasi yang ada (untuk jenis rumput Kentucky, Bermuda, dan Buffalo)
- n dapat melebihi 1 untuk tinggi vegetasi $>$ kedalaman aliran (untuk vegetasi yang sangat padat/rimbun) (sumber: Maidment, 1993)
- jarak yang dimaksud adalah jarak memanjang
- Lamanya infiltrasi adalah waktu infiltrasi untuk 1 m^2 luas tanah
- Lahan konservasi yang dibutuhkan adalah luasan permukaan lahan yang diperlukan untuk konservasi tiap 1 m^2 luas lahan (lihat
- Gambar 7-19)

Dengan melihat tabel di atas, dapat diketahui bahwa untuk contoh jenis tanah pasir, dengan lama infiltrasi 39 detik dibutuhkan lahan untuk konservasi berkisar antara $0,39-390 \text{ m}^2$.

Menurut Linsey dkk. (1988) bahwa besarnya infiltrasi dari presipitasi sekitar 10 cm/hari dan hal itu sudah mencukupi untuk menjenuhkan tanah yang cukup dalam.

Sedangkan untuk memperbandingkan karakteristik ukuran partikel tanah dengan baik, adalah dengan mempelajari nilai-nilai numeris berdasar kurva distribusi. Dua nilai yang paling banyak dipakai adalah D_{10} , yaitu ukuran butir efektif, dan $C_u = D_{60}/D_{10}$, yaitu koefisien keseragaman (Peck et al., 1953).

4. Mendorong penggunaan air yang saling menunjang (*conjunctive use*) antara air tanah dengan air selain air tanah

Kegiatan konservasi tersebut di atas dilakukan dalam tahapan perencanaan dan pelaksanaan pendayagunaan air tanah, sebagai upaya pengaturan peruntukkan penggunaan air tanah untuk mengurangi konflik antara kepentingan masyarakat dengan industri atau keperluan lainnya. Dengan demikian konservasi air tanah harus menjadi salah satu komponen dalam perencanaan tata ruang wilayah.

7.6.2.4 Pengelolaan Kualitas dan Pengendalian Pencemaran Air Tanah

Tiga kegiatan utama dalam pengelolaan kualitas dan pengendalian pencemaran air tanah, antara lain:

1. Mencegah pencemaran air tanah
2. Menanggulangi pencemaran air tanah
3. Memulihkan kualitas air tanah yang telah tercemar.

Adapun definisi yang berkaitan dengan pengelolaan kualitas dan pengendalian terhadap pencemaran antara lain:

1. Pengelolaan kualitas air adalah upaya pemeliharaan air sehingga tercapai kualitas air yang diinginkan sesuai peruntukannya agar menjadi kualitas air tetap dalam kondisi alamiahnya.
2. Pengelolaan kualitas air dan pengendalian pencemaran air ditujukan untuk mempertahankan dan memulihkan kualitas air yang masuk dan yang ada pada sumber-sumber air.
3. Pelestarian kualitas air merupakan upaya untuk memelihara fungsi air agar kualitasnya tetap pada kondisi alamiahnya. Pelestarian kualitas air dilakukan pada sumber air yang terdapat di hutan lindung. Sedangkan pengelolaan kualitas air pada sumber air di luar hutan lindung dilakukan dengan upaya pengendalian pencemaran air, yaitu upaya memelihara fungsi air sehingga kualitas air memenuhi baku mutu air.
4. Baku mutu air adalah ukuran batas atau kadar makhluk hidup, zat, energi atau komponen yang ada atau harus ada dan atau unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya di dalam air. Baku mutu air ditetapkan dan berfungsi sebagai tolok ukur untuk menentukan telah terjadinya pencemaran air. Penetapan baku mutu air selain didasarkan pada peruntukkan (*designated beneficial water uses*), juga didasarkan pada kondisi nyata kualitas air yang mungkin berbeda antara satu daerah dengan daerah lainnya.

5. Mutu air adalah kondisi kualitas air yang diukur dan atau diuji berdasarkan parameter-parameter tertentu dan metoda tertentu berdasarkan peraturan perundang-undangan yang berlaku. Kelas air adalah peringkat kualitas air yang dinilai masih layak untuk dimanfaatkan bagi peruntukkan tertentu. Kriteria mutu air adalah tolak ukur mutu air untuk setiap kelas air.

Menurut WHO (*World Health Organization*) ditetapkan batas ambang air minum bagi tiga unsur anorganik tersebut yaitu TDS, Sulfat dan Klorida masing-masing tidak melampaui 500 mg/l, 250mg/l, dan 250 mg/l. Apabila air memiliki unsur-unsur tersebut baik satu, dua atau ketiga-tiganya melampaui angka-angka tersebut berarti air sudah tercemar dan tidak layak untuk diminum.

Sampah di areal pembuangan yang terkena hujan menyebabkan terjadinya cairan yang meresap ke dalam tanah melalui proses perkolasi atau infiltrasi. Cairan ini membawa unsur-unsur kontaminasi yang cukup banyak. Unsur TDS dapat mencapai 40.000 mg/l, unsur klorida mencapai 1.500 mg/l dan sulfat mencapai 3.000 mg/l yang kesemuanya jauh diatas ambang batas. Ditambah dengan unsur-unsur lainnya yang jumlahnya juga jauh diatas ambang yang diijinkan. Apabila cairan ini sampai pada suatu sumber air tanah maka pencemaran mulai terjadi dan akan berlangsung terus selama areal pembuangannya masih terus difungsikan. Salah satu sumber kontaminasi lainnya adalah tempat pembuangan yang dikenal dengan nama *septictank*. Di Amerika dilaporkan oleh USPA (1977) bahwa *septictank* memberikan kontribusi air kotor terbesar ke dalam tanah (Kodoatie, 1996).

Beberapa aturan yang menjadi pedoman pengelolaan kualitas badan air, pengendalian pencemaran air dan kualitas air minum merupakan upaya pemerintah untuk melindungi perairan alam dan efek yang dapat ditimbulkan terhadap kesehatan manusia. Aturan-aturan tersebut adalah:

- PP No. 82 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.
- Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 907/MENKES/SK/VII/2002 Tentang Syarat-Syarat dan Pengawasan Kualitas Air Minum.

7.6.2.5 Kendala yang Dihadapi dalam Upaya Konservasi Air Tanah

Kendala yang dihadapi dalam pelaksanaan konservasi air tanah selama ini adalah:

1. Belum seluruh daerah diketahui kondisi air tanahnya secara rinci, akibatnya, pemahaman tentang sumber daya air tanah dapat menimbulkan analisis yang tidak tepat, sehingga konservasi tidak dapat mencapai sasaran.
2. Belum dimengerti dan dipahaminya pengetahuan keairtanahan, termasuk tentang berbagai keterbatasan sumber daya air ini.
3. Perubahan lingkungan sebagai konsekuensi dari kemajuan, kadang tidak menguntungkan bagi konservasi air tanah. Kegiatan manusia di daerah imbuhan air tanah misalnya, dapat mengganggu keseimbangan hidrogeologi.
4. Tidak dimengerti atau kurangnya kesadaran pihak pengguna air tanah terhadap ketentuan-ketentuan dan kewajiban yang seharusnya dilakukan.
5. Belum berfungsinya fungsi-fungsi manajemen dalam kegiatan konservasi air tanah yang meliputi perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, dan pengawasan.
6. Keterpaduan koordinasi antar sektor yang berkaitan dengan konservasi air tanah pada beberapa hal masih lemah.

7. Belum dimengerti dan dipahaminya peraturan perundang-undangan di bidang konservasi air tanah.
8. Konservasi air tanah, membutuhkan biaya yang tidak sedikit, misalnya dalam membangun sistem jaringan sumur pantau

7.6.2.6 Peran Pemerintah Daerah dalam Upaya Konservasi Air Tanah

Dalam rangka desentralisasi pengelolaan air tanah, beberapa hal penting yang perlu memperoleh perhatian daerah dalam pelaksanaan upaya konservasi air tanah adalah:

1. Menyediakan data dan informasi tentang air tanah, meliputi peta cekungan dan potensi air tanah, sebagai dasar pelaksanaan konservasi air tanah.
2. Menyediakan peta konservasi air tanah sebagai acuan dalam pengaturan dan pengendalian pengambilan dan pemanfaatan air tanah.
3. Menyiapkan kelembagaan sumber daya manusia, sarana dan peralatan, serta pembiayaan yang mendukung pelaksanaan konservasi air tanah.
4. Pengaturan penempatan kawasan industri dan sektor lain yang memerlukan air sebagai bahan baku dan proses industri, disesuaikan dengan potensi sumber daya air yang tersedia.
5. Penertiban pengambilan air tanah yang tidak berizin untuk mencegah terjadinya kerusakan air tanah dan berkurangnya pendapatan daerah akibat pencurian air tanah.
6. Penertiban perusahaan pengeboran air tanah tanpa izin.
7. Peningkatan jumlah sumur pantau mengetahui perubahan kondisi dan lingkungan air tanah akibat pengambilan air tanah sebagai dasar pengambilan keputusan dalam upaya konservasi air tanah selanjutnya.
8. Pelaksanaan konservasi air tanah dilaksanakan secara terkoordinasi antara Pemerintah Provinsi dan Pemerintah Kabupaten/Kota. Sepanjang yang menyangkut hal-hal yang bersifat teknis Pemerintah Provinsi memberikan dukungan dan fasilitasi sebagai dasar pelaksanaan konservasi air tanah oleh Pemerintah Kabupaten/Kota.
9. Membuat peraturan daerah tentang pengelolaan air tanah

7.7 Pendayagunaan Air Tanah

Pendayagunaan air tanah diutamakan pada pemenuhan kebutuhan pokok hidup masyarakat secara adil dan berkelanjutan dan dilaksanakan berdasarkan rencana pengelolaan air tanah serta diselenggarakan oleh pemerintah dengan melibatkan masyarakat (PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 Pasal 47).

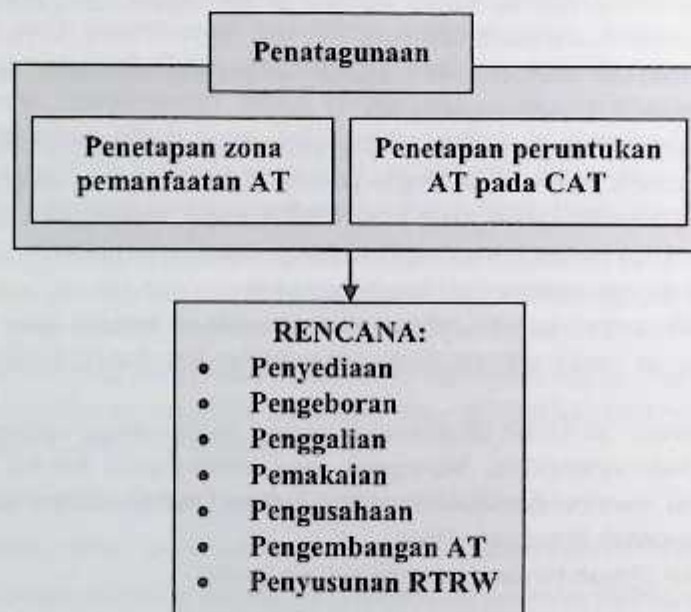
Pendayagunaan air tanah dilakukan melalui kegiatan penatagunaan, penyediaan, penggunaan, pengembangan, dan pengusahaan air tanah. Namun karena air tanah terletak di bawah permukaan tanah maka pengambilan atau eksploitasinya dalam upaya pemanfaatan atau penggunaannya memerlukan proses sebagaimana dilakukan pada kegiatan pertambangan mencakup kegiatan penggalian, atau pengeboran, pemasangan konstruksi sumur dan sebagainya.

Kegiatan pendayagunaan air tanah dilakukan melalui (PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 Pasal 47 ayat (3):

1. penatagunaan
2. penyediaan
3. penggunaan
4. pengembangan
5. pengusahaan.

7.7.1 Penatagunaan

1. Penatagunaan air tanah ditujukan untuk menetapkan zona pemanfaatan air tanah dan peruntukkan air tanah pada Cekungan Air Tanah yang disusun berdasarkan zona konservasi air tanah (PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 Pasal 48).



Gambar 7-20. Diagram penatagunaan air tanah

Penetapan zona pemanfaatan air tanah dilakukan dengan mempertimbangkan:

2. sebaran dan karakteristik akuifer:
antara lain meliputi porositas, permeabilitas dan keterusan air.
3. kondisi hidrogeologis:
antara lain meliputi sistem akuifer, pola aliran air tanah.
4. kondisi dan lingkungan air tanah:
antara lain kuantitas, kualitas, lapisan batuan yang mengandung air tanah.
5. kawasan lindung air tanah:
antara lain daerah imbuhan air tanah (*recharge area*), zona kritis dan zona rusak.

6. kebutuhan air bagi masyarakat dan pembangunan.
7. data dan informasi hasil inventarisasi pada Cekungan Air Tanah.
8. ketersediaan air permukaan.

Zona pemanfaatan air tanah, merupakan acuan dalam penyusunan rencana pengeboran, penggalian, pemakaian, pengusahaan, dan pengembangan air tanah, serta penyusunan rencana tata ruang wilayah.

Sedangkan penetapan peruntukkan air tanah pada Cekungan Air Tanah sebagaimana dilakukan dengan mempertimbangkan:

1. kuantitas dan kualitas air tanah
2. daya dukung akuifer terhadap pengambilan air tanah
3. jumlah dan sebaran penduduk serta laju pertumbuhannya
4. proyeksi kebutuhan air tanah
5. pemanfaatan air tanah yang sudah ada.

Pelaksanaan kegiatan penatagunaan air tanah mulai dari penetapan zona pemanfaatan air tanah sampai dengan penetapan peruntukkan air tanah pada CAT, diawasi oleh Menteri, Gubernur, atau Bupati/Walikota sesuai dengan kewenangannya.

7.7.2 Penyediaan

Penyediaan air tanah sangat penting dalam perencanaan tata kota baik pada pedesaan dan perkotaan. Penyediaan air tanah ditujukan untuk memenuhi kebutuhan air untuk berbagai keperluan sesuai dengan kualitas dan kuantitasnya. Penyediaan air tanah dalam setiap Cekungan Air Tanah dilaksanakan sesuai dengan penatagunaan air tanah antara lain untuk memenuhi (PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 Pasal 50):

1. Kebutuhan pokok sehari-hari

Pemenuhan kebutuhan pokok sehari-hari mencakup keperluan air minum, masak, mandi, cuci, peturasan, dan ibadah. Penyediaan air tanah untuk kebutuhan pokok sehari-hari merupakan prioritas utama di atas segala keperluan lain.

Penyediaan air tanah untuk kebutuhan pokok harus memenuhi kriteria air bersih, di mana air tidak tercemar oleh bahan-bahan yang membahayakan bagi kesehatan masyarakat. Sistem drainase juga perlu diperhatikan, sehingga air bekas atau air yang sudah digunakan dapat dibuang pada tempat yang baik dengan menerapkan sistem drainase permukaan, misalnya dialirkan ke sungai.

Oleh karena penyediaan air tanah merupakan prioritas utama, maka dapat diusahakan di semua daerah dan semua kedalaman dengan cara membuat sumur-sumur produksi dengan tetap memperhatikan batas debit pengambilan air tanah pada akuifer.

2. Pertanian rakyat

Penyediaan air tanah untuk memenuhi kebutuhan pertanian rakyat antara lain budidaya pertanian dalam berbagai komoditas, yaitu pertanian tanaman pangan, hortikultura, perikanan, peternakan, perkebunan, dan kehutanan yang dikelola oleh rakyat dengan luas tertentu yang kebutuhan airnya tidak lebih dari 2 liter per detik per kepala keluarga. Pertanian tanaman pangan diutamakan bagi tanaman yang tidak membutuhkan air tanah dalam jumlah banyak, antara lain palawija dan jagung.

3. Industri

Pengambilan air tanah merupakan salah satu implementasi pengusahaan air tanah yang seharusnya dapat dilaksanakan jika kebutuhan pokok sudah terpenuhi. Agar terwujud suatu keberlanjutan air tanah, maka pendayagunaan air tanah untuk keperluan industri harus dilaksanakan secara seimbang dengan upaya konservasi air tanah yang terintegrasi dalam kebijakan dan pola pengelolaan sumber daya air terpadu, saling menunjang antara air tanah, air permukaan dan air hujan untuk memenuhi kebutuhan air berbagai keperluan dengan mengutamakan kebutuhan pokok hidup sehari-hari.

Pelaksanaan konservasi air tanah secara utuh pada cekungan air tanah terutama pada kawasan padat industri perlu dilakukan dengan diawali studi keseimbangan air tanah pada cekungan daerah dimaksud. Pada proses industri pemanfaatan air tanah digunakan sebagai bahan pelarut atau bahan utama. Air tanah yang digunakan pada proses industri harus memenuhi kriteria syarat air untuk industri.

4. Pertambangan

Pemanfaatan air tanah pada bidang pertambangan digunakan untuk pencucian hasil eksplorasi bahan tambang. Meningkatnya pemanfaatan bahan galian konstruksi sebagai konsekuensi dari pesatnya pembangunan disamping akan menimbulkan dampak positif akan pula menimbulkan dampak negatif baik yang diderita oleh lingkungan setempat maupun wilayah yang lebih luas. Dampak negatif yang terjadi antara lain ialah meningkatnya erosi dan gerakan tanah, hilangnya sumber-sumber air dan tanah pucuk yang subur.

5. Pariwisata

Pemanfaatan pada bidang pariwisata seperti pemanfaatan pada sungai bawah tanah, misalnya pada daerah karst. Aliran-aliran air yang terjadi akan membentuk sebuah aliran air bawah tanah (sungai bawah tanah) dan membentuk suatu tipe topografi tiga dimensi yang sering disebut dengan gua batu kapur. Gua batu kapur ini terdiri stalaktit dan stalakmit yang memberikan suatu daya tarik, sehingga bisa dimanfaatkan untuk pariwisata selain sebagai sumber air tanah.

Contoh lain adalah mata air, misalnya mata air pengging di daerah Klaten. Mata air ini dimanfaatkan sebagai pemandian umum dengan dibuatkan kolam-kolam. Air dari pemandian ini murni berasal dari air tanah, sehingga dapat menarik masyarakat sekitar sebagai obyek pariwisata.

7.7.3 Penggunaan

Penggunaan air tanah ditujukan untuk pemanfaatan air tanah dan prasarannya dan dilaksanakan sesuai penatagunaan dan penyediaan yang telah ditetapkan pada Cekungan Air Tanah (PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008 Pasal 52).

Menurut Pasal 52 PP Air Tanah No. 43 Tahun 2008, pengambilan air tanah harus memperhatikan debit pengambilan tanah. Debit pengambilan air tanah ditentukan berdasarkan atas:

1. daya dukung akuifer terhadap pengambilan air tanah
2. kondisi dan lingkungan air tanah
3. alokasi penggunaan air tanah bagi kebutuhan mendatang, yaitu jumlah dan jangka waktu pengambilan dan pengusahaan air tanah.
4. penggunaan air tanah yang telah ada.

Pada zona konservasi air tanah telah ditentukan batas maksimum pemanfaatan air tanah pada setiap zona konservasi yang dikaitkan dengan kedalaman akuifernya. Setiap sistem akuifer mempunyai potensi dan kondisi air tanah serta batasan debit maksimum yang berbeda.

Dari hasil uji pemompaan dapat di tentukan batas debit maksimum. Batas maksimum turunnya muka air tanah akibat pemompaan dengan debit tertentu pada akuifer dalam adalah hingga mencapai kedalaman batas atas akuifer, pada kondisi ini air tanah pada akuifer tersebut sudah mencapai tingkatan kritis. Bila turunnya muka air tanah telah mencapai 60% dari kedudukan muka air tanah pada kondisi awal, maka mencapai tingkatan rawan.

7.7.3.1 Penggunaan Air Yang Saling Menunjang (*Conjunctive Use*)

Penggunaan air yang saling menunjang (*conjunctive use*) antara air tanah dengan air permukaan perlu dilakukan mengingat secara alami masing-masing memiliki keterbatasan ketersediaan sehingga apabila dibutuhkan jumlah air yang besar perlu dipasok dari air tanah dan air permukaan sekaligus, dengan sedapat mungkin tetap mendahulukan penggunaan air permukaan dalam upaya pencegahan kerusakan air tanah.

Perbedaan karakter dari air tanah dan air permukaan dapat dipakai untuk mengoptimasi batas maksimum pemakaian total sumber air. Tampungannya air tanah cenderung bergerak lambat pada perubahan *inflow* maupun *outflow*. Sehingga, makin sedikit ketidakpastian yang dapat diprediksi untuk keberadaan air tanah untuk masa depan dibandingkan dengan air permukaan. Pendekatan *conjunctive use* untuk ketersediaan air bertujuan untuk menggabungkan penggunaan air permukaan dan air tanah pada suatu daerah sehingga didapat batas maksimum pemakaian air. Saat permintaan air semakin naik sampai ke batas paling maksimal, strategi *conjunctive use* akan menjadi sangat menarik (Maknoon and Burges, 1978).

Konsep dari keterpaduan pemakaian air tanah dan air permukaan, dan mengoptimasi sumber air untuk beberapa daerah sangat menarik. Beberapa pertimbangan yang harus dilkutsertakan untuk perancangan dan pelaksanaan rencana *conjunctive use* adalah:

1. Air tanah dapat dipakai untuk memperbanyak aliran sungai saat musim kemarau. Kuantitas air tanah dibutuhkan tergantung dari variabel air sungai dan tingkat regulasi air sungai, misalnya 60, 70, 80, dan 90 persen dari aliran rata-rata.
2. Penurunan air tanah dalam *aquifer* yang membutuhkan waktu lama untuk kembali lagi seperti semula. Hal ini tidak hanya tergantung pada karakter *aquifer* namun juga tingkat regulasi air sungai.
3. Beberapa ide yang berhubungan dengan tingkat pemulihan air tanah dapat dilihat dari pertimbangan seperti waktu respon *aquifer*. Parameter ini juga memberi indikasi adanya variabel musiman pada aliran air tanah yang menuju sungai. Waktu respon dapat didefinisikan sebagai T/SL^2 , dimana T adalah koefisien transmisivitas, S adalah koefisien tampungan dan L adalah jarak dari sungai menuju batas permeabel dari akuifer atau bagian air tanah yang paralel dengan garis sungai (Downing et al., 1974; Oakes and Wilkinson, 1972).
4. Muka air tanah ditingkatkan saat periode air sungai berlebih memakai teknik *recharge* buatan bila *recharge* alami kurang atau terlalu lama.
5. Kekurangan aliran sungai biasanya disertai dengan pengambilan air tanah melalui sumur. Pemompaan akan menurunkan muka air tanah yang akan mengakibatkan debit mata air dan *outflow* dari air tanah berkurang. Sedangkan kehilangan pada dasar sungai akan semakin naik dan terjadi intersepsi pada beberapa *baseflow* sungai. Kekurangan pada debit akuifer akan tergantung apakah akuifer secara hidraulik berhubungan dengan sungai atau tidak, sifat hidraulik dari akuifer (S dan T), waktu respon dari akuifer dan jarak antara sungai dan sumur.
6. Efisiensi dari sistem *conjunctive aquifer—river* ditunjukkan sebagai *net gain*. Hal ini akan digambarkan pada persamaan di bawah ini.

$$\text{Net gain} = \frac{\text{Groundwater abstraction rate} - \text{Reduction in river flow}}{\text{Groundwater abstraction rate}}$$

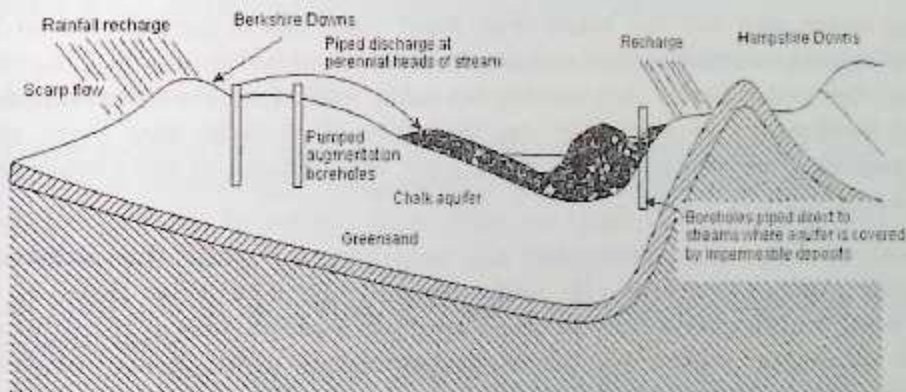
7. Menurut Downing dkk., hasil yang baik didapat saat akuifer memiliki permeabilitas yang rendah dan koefisien penampungan yang tinggi (sehingga waktu respon kecil).
8. Dengan akuifer tidak tertekan, biasanya sebuah daerah memiliki waktu respon yang cepat, sehingga daerahnya cukup layak untuk dibangun sumur pompa untuk jarak yang jauh dari sungai. Jika sumur terlalu dekat dengan sungai, infiltrasi akan mengakibatkan sirkulasi cepat pada sistem di sungai dengan nilai *net gain* dapat diabaikan. Meletakkan sumur yang jauh dari sungai juga kurang menguntungkan, pemompaan akan tinggi dan biaya pompa juga banyak.
9. Akuifer tertekan, karena koefisien tampungan yang kecil dan respon cepat, tidak selalu layak untuk *conjunctive use*, walaupun isolasi yang nyata antara air permukaan dengan air tanah akan terlihat menarik awalnya.

Untuk mengevaluasi secara penuh faktor-faktor yang tertulis di atas dan menaksir keadaan hidrogeologi suatu daerah, perlu dibentuk beberapa rencana awal. Downing et al. (1974) menjelaskan syarat-syarat yang dibutuhkan untuk rencana, sedangkan Backshall et al. (1972) memberi catatan yang baik tentang studi awal yang dapat diaplikasikan di Sungai Thet di Norfolk, Inggris.

Rencana awal harus dimulai dengan test pemompaan dari sumur individu untuk menaksir hubungan produksi air dengan penurunan muka air tanah dan efektivitas sumur, sifat hidraulik dari akuifer dan hubungan antara sumur individu dan sungai atau batasan hidrologis lainnya. Tahap berikutnya berhubungan dengan pengujian di sungai untuk memperkirakan dampak dari pengambilan air di akuifer dan di sungai. Kondisi aktual yang dilihat pada saat pengujian dibandingkan dengan jika tidak ada pemompaan. Untuk dapat mengetahui sistem secara penuh, tingkat pengambilan air harus cukup besar untuk menghasilkan dampak dari aliran sungai dan mengurangi dampak signifikan dari *error-error* yang diprediksi.

Backshall et al. (1972) memakai tingkat pengambilan tiga kali lebih banyak dari tingkat infiltrasi rata-rata saat tahap pembuktian pada skema awal. Satu tujuan adalah untuk mengerti bagaimana tiap sumur mempengaruhi aliran air sungai, hal ini sangat baik untuk efisiensi manajemen. Sedangkan tujuan lain adalah untuk menaksir konsekuensi pengambilan dari ekologi sekitar, daerah rendah, pertanian dan lainnya. Pengaruh pada tanaman dan hewan air dari penggunaan air tanah harus dikaji lebih lanjut, karena air memiliki temperatur dan komposisi kimia yang berbeda.

Banyak aspek dari skema *conjunctive use* yang dapat dipelajari dengan teknik modeling dan mereka sangat penting untuk memprediksi bagian dari studi awal. Salah satunya model pada gambar di bawah ini:



Gambar 7-21. Inter-relasi antara air tanah, aliran sungai, hujan, dan pengambilan air tanah

Gambar di atas adalah potongan melintang utara-selatan dari *aquifer* Chalk di bawah Berkshire Downs dimana air tanah yang diambil akan mengisi Sungai Thames pada saat musim kering. Akuifer yang ditutupi oleh lapisan impermeabel, sumur terletak dekat dengan permukaan sungai sehingga dapat mengurangi jumlah pipa dan biaya pemompaan. Di bagian akuifer yang tertekan, sumur harus terletak pada jarak tertentu dari sungai untuk menghindari infiltrasi. Berikutnya, air tanah dipompa sampai ke *perennial heads* dari sungai intermiten untuk menghindari kehilangan melalui dasar sungai yang kering (ANon, 1975)

Prinsip dasar kelebihan dan kekurangan dari *conjunctive use* akan diringkas di bawah ini:

a. Kelebihan

1. Optimasi penggunaan air. Menggunakan tampungan air permukaan dan bawah tanah untuk menghasilkan kapasitas tampungan yang lebih besar dan mengurangi *run-off* yang sia-sia.
 2. Sedikit tampungan permukaan yang dibutuhkan karena di bawah tanah sudah memiliki tampungan air tanah sendiri
 3. Pengendalian banjir yang lebih baik. Air dapat ditransfer ke dalam tampungan bawah tanah.
 4. Fleksibilitas lebih besar untuk merespon kenaikan permintaan akan air karena ada lebih dari satu sumber tersedia.
- b. Kekurangan:
1. Biaya yang lebih banyak karena mengkonsumsi daya yang lebih besar dengan banyaknya pemompaan. *Conjunctive use* membutuhkan pompa untuk mengambil air dari bawah tanah, lalu mengangkut ke sungai kemudian perlu adanya *recharge* buatan untuk air tanah sebagai pengganti air yang diambil nantinya, sehingga dibutuhkan biaya pengawasan yang tentunya akan lebih besar.
 2. Berkurangnya efisiensi pompa karena tingginya fluktuasi muka air tanah.
 3. Permasalahan manajemen karena ada banyak hal yang harus diperhatikan seperti: kapan memakai sumber air permukaan dan air tanah, kapan menghentikan pengambilan air tanah dan mengganti menjadi air permukaan, kapan memulai *recharge* air tanah, dll.
 4. Penafsiran ekonomi untuk skema ini cukup sulit karena banyaknya sumber air tanah dan permukaan yang dapat dipakai secara independen dan bersamaan. Memilih alternatif yang paling murah akan sulit dan belum tentu dapat menghasilkan penggunaan air yang paling efektif atau memuaskan konstrain manajemen lainnya.
 5. Jika air diambil dari sumber yang berbeda tiap waktu, waktu yang disediakan kepada konsumen dapat berubah dari air permukaan yang lunak menjadi air tanah yang keras. Hal ini dapat mengakibatkan permasalahan atau ketidakpuasan. Pencampuran air dari sumber yang berbeda dibutuhkan (Buchan, 1963).

Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan pola *conjunctive use* sangat kompleks dan memiliki kekurangan yang signifikan. Oleh karena itu, sangat disarankan untuk pemilihan skema ini hanya pada kondisi yang tepat, misalnya kekurangan air yang tidak dapat dipenuhi dengan alasan yang jelas. Jika skema sudah ditentukan, maka perlu dimulai dengan adanya pembangunan ukuran kecil dan pengembangan model untuk memprediksi *trend* masa depan, memilih alternatif yang paling cocok dan biasanya dapat membantu proses manajemen.

7.7.3.2 Hak Guna Pakai Air Tanah

Pemakaian air tanah merupakan kegiatan penggunaan air tanah untuk memenuhi kebutuhan pokok sehari-hari, pertanian rakyat, dan kegiatan bukan usaha.

Urutan prioritas penggunaan air tanah, yaitu: air minum; rumah tangga; peternakan dan pertanian sederhana; irigasi; industri; kebutuhan lainnya. Keperluan air minum dan rumah tangga merupakan prioritas utama peruntukkan pemanfaatan air tanah. Pada umumnya pemanfaatan air tanah untuk keperluan air minum dan rumah tangga sekitar 100 m^3 per bulan per sumur

Pemakaian air tanah hanya dapat dilakukan setelah memiliki hak guna pakai air dari pemanfaatan air tanah. Hak guna pakai air dari pemanfaatan air tanah diperoleh dengan izin yang diberikan oleh pemerintah kabupaten/kota. Izin tersebut diperoleh melalui izin pemakaian air tanah. Izin pemakaian air tanah antara lain meliputi penyediaan dan peruntukkan melalui kegiatan pengeboran atau penggalian, pengambilan, dan pemakaian air tanah.

Izin pemakaian air tanah perlu dimiliki mengingat:

1. cara pengeboran atau penggalian air tanah atau penggunaannya mengubah kondisi dan lingkungan air tanah antara lain berupa penyusutan ketersediaan air tanah, penurunan muka air tanah, perubahan pola aliran air tanah, penurunan kualitas air tanah, mengganggu sistem akuifer; atau
2. penggunaannya untuk memenuhi kebutuhan yang memerlukan air tanah dalam jumlah besar melebihi ketentuan.

Izin pemakaian air tanah dapat diberikan kepada perseorangan, badan usaha, instansi pemerintah, atau badan sosial seperti yayasan, rumah ibadah, dan sekolah. Penjelasan lebih lengkap mengenai izin pemakaian air tanah akan dibahas pada Sub-bab Perizinan Pengambilan Tanah.

Hak guna pakai air dari pemanfaatan air tanah dapat diperoleh tanpa izin apabila untuk memenuhi kebutuhan pokok sehari-hari bagi perseorangan dan bagi pertanian rakyat.

Hak guna pakai air dari pemanfaatan air tanah untuk memenuhi kebutuhan pokok sehari-hari bagi perseorangan ditentukan sebagai berikut:

1. penggunaan air tanah dari sumur bor berdiameter kurang 2 inci (kurang dari 5 cm)
2. penggunaan air tanah dengan menggunakan tenaga manusia dari sumur gali
3. penggunaan air tanah kurang dari 100 m³/bulan per kepala keluarga dengan tidak menggunakan sistem distribusi terpusat.

Hak guna pakai air dari pemanfaatan air tanah untuk memenuhi kebutuhan pertanian rakyat ditentukan sebagai berikut:

1. sumur diletakkan di areal pertanian yang jauh dari pemukiman
2. pemakaian tidak lebih dari 2 liter per detik per kepala keluarga
3. debit pengambilan air tanah tidak mengganggu kebutuhan pokok sehari-hari masyarakat setempat.

7.7.4 Pengembangan

Pengembangan air tanah diselenggarakan berdasarkan rencana pengelolaan air tanah dan rencana tata ruang wilayah, dengan mempertimbangkan:

1. daya dukung akuifer terhadap pengambilan air tanah
2. kondisi dan lingkungan air tanah
3. kawasan lindung air tanah

4. proyeksi kebutuhan air tanah
5. pemanfaatan air tanah yang sudah ada
6. data dan informasi hasil inventarisasi pada Cekungan Air Tanah
7. ketersediaan air permukaan.

Pengembangan air tanah dilakukan melalui kegiatan:

1. survei hidrogeologi
2. eksplorasi air tanah melalui penyelidikan geofisika, pengeboran, atau penggalian eksplorasi;
3. pengeboran atau penggalian eksploitasi
4. pembangunan kelengkapan sarana pemanfaatan air tanah.

7.7.4.1 Survei Hidrogeologi

Metode-metode yang dilakukan dalam survei hidrogeologi antara lain:

1. Studi Geologi (Pemetaan)

Studi geologi dimulai dengan mengumpulkan, menganalisis dan menginterpretasikan hidrogeologi pada peta topografi, foto udara, dan peta geologi. Data-data tambahan dari metode geologi dan evaluasi data hidrologi yaitu, aliran permukaan dan mata air, jumlah air yang bisa dihasilkan dari sumur, pengisian air tanah (*groundwater recharge*), pelepasan air tanah (*groundwater discharge*), elevasi muka air, dan kualitas air tanah (Todd & Mays, 2005).

2. *Remote Sensing*

Remote sensing adalah pengumpulan data tentang objek, permukaan, atau material tanpa kontak langsung dan tanpa jarak pemisah antara pengobservasi dan alam. Gelombang elektromagnet yang digunakan adalah infra merah. Infra merah dapat memberikan informasi mengenai suhu, kandungan tanah, sirkulasi air tanah, patahan yang kemungkinannya ditemukan akuifer. *Radar imagery* memberikan informasi keberadaan air tanah pada kedalaman yang dangkal (Todd & Mays, 2005).

3. *Aerial Photography*

Yaitu pemetaan dengan menggunakan foto mulai skala 1: 15000 sampai 1: 40.000 baik hitam-putih maupun berwarna.

4. *Photo Interpretation*

Didefinisikan sebagai seni dalam fotografi yang bertujuan untuk mengidentifikasi obyek dan pengambilan keputusan penting (Barret and Curtis, 1976 dalam Johnson and DeGraff, 1988).

5. *Terrestrial Photogrametry*

Digunakan untuk mendapatkan *image/gambar* permukaan. Memberikan gambaran *orientasi exposed discontinuities* dan kekasaran permukaan.

7.7.4.2 Eksplorasi Air Tanah

Kegiatan-kegiatan *Subsurface Eksplorasi* meliputi (Johnson and DeGraff, 1988):

1. Penggalian (*Exploratory excavation*)

Kegiatan ini menyediakan alat baik untuk *sampling surface materials* dan *mapping* kondisi *subsurface features*.

2. Pengeboran (*Borehole Exploration*)

Meliputi berbagai metode untuk *drilling hole sampling materials* pada *subsurface* untuk keperluan pemetaan permukaan dan pengecekan kondisi yang lebih luas.

3. Eksplorasi geofisika (*Geophysical Exploration*)

Eksplorasi geofisika adalah penyelidikan sifat-sifat fisik, misalnya kerapatan, elastisitas, *electrical resistivity* pada endapan mineral atau struktur geologi. Metode ini dapat mendeteksi kelainan-kelainan sifat-sifat fisik sampai pada kerak bumi (Todd & Mays, 2005).

4. *Seismic Refraction Method*

Merupakan metode dengan memberikan tumbukan alat berat atau ledakan kecil kemudian diukur waktu yang dibutuhkan sampai terdengar suara, atau besarnya cepat rambat gelombang yang dihasilkan. Metode ini menginformasikan struktur geologi ribuan meter di bawah permukaan (Todd & Mays, 2005).

5. Geolistrik (*Electrical Method*)

Metode ini meliputi pengukuran permukaan material bumi untuk mengendalikan aliran yang ada dengan konduksi *ionic*.

Pada prinsipnya pendugaan geolistrik didasarkan pada karakteristik sifat fisik batuan terhadap arus yang dialirkan ke dalamnya.

Metode geolistrik mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan metode langsung, diantaranya pemboran, penyondiran dan lain-lain. Metode geolistrik dapat dilakukan dengan mudah pada lereng-lereng bukit, peralatan relatif ringan, dapat menembus berbagai lapisan tanah/batuan, kedalaman dapat mencapai beberapa ratus meter sesuai kebutuhan.

7.7.4.3 Pengeboran dan Penggalian

Pengeboran atau penggalian air tanah ditujukan untuk mengeluarkan air tanah dari akuifer melalui sumur bor, sumur gali atau dengan cara lainnya.

Pengeboran eksplorasi dan eksploitasi air tanah didasarkan pada kondisi dan lingkungan air tanah di lokasi rencana pengeboran. Kondisi air tanah baik kuantitas dan kualitas serta lingkungan air tanah di suatu daerah dapat diketahui dari peta yang tersedia. Peta yang dipakai sebagai acuan adalah peta

konservasi air tanah, apabila belum ada peta tersebut dapat mengacu pada peta potensi cekungan air tanah, peta hidrogeologi, peta geologi, dan peta topografi

Hal-hal yang perlu dipertimbangkan dalam pengeboran atau penggalian air tanah untuk membuat sumur produksi, antara lain:

1. Lokasi rencana titik pengeboran

Lokasi rencana titik pengeboran dalam kaitannya dengan daerah imbuhan air tanah sangat menentukan dalam memberikan pertimbangan untuk rancang bangun konstruksi sumur dan peruntukannya.

Lokasi titik pengeboran terkait dengan zona konservasi air tanah. Rekomendasi teknis pengeboran air tanah harus mempertimbangkan ketentuan yang terkandung pada zona konservasi air tanah dimana lokasi rencana titik pengeboran berada.

2. Jenis dan sifat fisik batuan

Jenis dan sifat fisik batuan misalnya batu gamping berongga memiliki sifat potensi kehilangan air (*water loss*), pasir lepas memiliki sifat mudah runtuh, lempung memiliki sifat mudah mengembang.

3. Kondisi hidrogeologis

Kondisi hidrogeologis disajikan dalam peta zona konservasi air tanah dan zona pemanfaatan air tanah, meliputi antara lain sebaran dan karakteristik akuifer, pola aliran air tanah, potensi air tanah, dan kedudukan muka air tanah.

4. Kondisi Air Tanah

Kondisi air tanah meliputi kuantitas dan kualitas air tanah di daerah yang akan dilakukan pengeboran, dipakai sebagai dasar dalam memberikan rekomendasi teknis pengeboran eksploitasi air tanah. Berdasarkan kondisi air tanahnya suatu daerah dapat dibedakan menjadi 4 (empat) kategori, yaitu: aman, rawan, kritis dan rusak.

5. Kondisi lingkungan sekitarnya.

Keberadaan dan sebaran sumur produksi di sekitar rencana titik pengeboran menjadi pertimbangan dalam merekomendasikan rancang bangun konstruksi dan kedalaman sumur.

7.7.4.4 Pembangunan Kelengkapan Sarana Pemanfaatan Air Tanah

Dalam pembangunan kelengkapan sarana pemanfaatan air tanah diperlukan dalam menjaga kualitas dan kuantitas air tanah. Sebagai contoh pada perusahaan penyedia air bersih (PAM), ataupun perusahaan air mineral, apabila kualitas air tanah kurang memenuhi syarat, maka dilengkapi dengan instalasi pengolahan air.

Contoh lain misalnya pada industri-industri sebaiknya dilengkapi dengan sumur pantau dan sumur resapan. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui kualitas dan kuantitas air tanah.

Ketentuan lebih lanjut mengenai teknis pengembangan air tanah diatur dalam Peraturan Menteri.

7.7.5 Pengusahaan

Pengusahaan air tanah merupakan kegiatan penggunaan air tanah yang ditujukan untuk memenuhi kegiatan usaha meliputi:

1. bahan baku produksi, antara lain air minum dalam kemasan, air bersih, makanan, minuman, dan obat-obatan.
2. pemanfaatan potensi
3. media usaha
4. bahan pembantu atau proses produksi.

Pengusahaan air tanah hanya dapat dilakukan sepanjang penyediaan air tanah untuk kebutuhan pokok sehari-hari dan pertanian rakyat masyarakat setempat terpenuhi.

Pengusahaan air tanah dapat berbentuk:

1. Penggunaan air tanah pada suatu lokasi tertentu, yaitu lokasi sesuai dalam izin.
2. Pemanfaatan akuifer pada suatu lokasi tertentu.
3. Pemanfaatan daya air tanah pada suatu lokasi tertentu.

Pengusahaan air tanah wajib memperhatikan:

1. Rencana pengelolaan air tanah.
2. Kelayakan teknis dan ekonomi.
3. Fungsi sosial air tanah.
4. Kelestarian kondisi dan lingkungan air tanah.
5. Ketentuan lainnya sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan.

Pengusahaan air tanah hanya dapat dilakukan setelah memiliki hak guna usaha air dari pemanfaatan air tanah, yang dapat diperoleh dengan izin yang diberikan oleh pemerintah kabupaten/kota.

Izin pengusahaan air tanah antara lain meliputi penyediaan dan peruntukkan melalui kegiatan pengeboran atau penggalian, pengambilan, dan pengusahaan air tanah.

Izin pengusahaan air tanah tidak diperlukan terhadap air ikutan, yaitu air tanah yang keluar dengan sendirinya pada kegiatan eksplorasi dan eksploitasi di bidang pertambangan dan energi. Izin pengusahaan air tanah juga tidak diperlukan untuk kegiatan pengeringan (*dewatering*), untuk kegiatan eksplorasi dan eksploitasi di bidang pertambangan dan energy, dan di bidang kegiatan konstruksi sipil, sepanjang air tanah tidak digunakan, dimanfaatkan, diusahakan, dan tidak mengganggu kebutuhan pokok sehari-hari masyarakat setempat, serta tidak merusak kondisi dan lingkungan air tanah.

Selanjutnya penetapan alokasi penggunaan air tanah pada Cekungan Air Tanah untuk pemakaian maupun pengusahaan air tanah dilakukan oleh Menteri, Gubernur, atau Bupati/Walikota sesuai dengan kewenangannya.

7.8 Pengendalian Daya Rusak Air Tanah

Pengendalian daya rusak air tanah adalah pengendalian daya rusak air pada cekungan air tanah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 58 UU No. 7 Tahun 2004.

Menurut PP No. 43 Tahun 2008, pengendalian daya rusak air tanah ditujukan untuk mencegah, menanggulangi intrusi air asin, dan memulihkan kondisi air tanah akibat intrusi air asin, serta mencegah, menghentikan, atau mengurangi terjadinya amblesan tanah.

Pengendalian daya rusak air tanah dilakukan dengan mengendalikan pengambilan air tanah dan meningkatkan jumlah imbuhan air tanah untuk menghambat/mengurangi laju penurunan muka air tanah. Penurunan muka air tanah menyebabkan ketidakseimbangan kondisi hidrogeologi, apabila terjadi terus menerus dapat mengakibatkan terjadinya intrusi air asin dan/atau amblesan tanah.

Pengendalian daya rusak air tanah meliputi upaya pencegahan, penanggulangan, dan pemulihan. Untuk mencegah terjadinya intrusi air asin dilakukan dengan membatasi pengambilan air tanah di daerah pantai yang mengakibatkan terganggunya keseimbangan antara muka air tanah tawar dan muka air tanah asin. Untuk menanggulangi terjadinya intrusi air asin dilakukan pelarangan pengambilan air tanah di daerah pantai. Sedangkan untuk memulihkan kondisi air tanah akibat intrusi air asin dilakukan dengan cara menciptakan resapan buatan atau membuat sumur injeksi di daerah yang air tanahnya telah tercemar air asin.

Imbuhan buatan (*artificial recharge*) adalah resapan yang dibuat untuk meningkatkan kapasitas pengisian air tanah pada akuifer dalam suatu cekungan air tanah melalui, antara lain, sumur resapan, parit resapan, dan/atau kolam resapan.

Pengendalian pada amblesan tanah meliputi kegiatan pencegahan terjadinya amblesan tanah dilakukan dengan mengurangi pengambilan air tanah bagi pemegang izin pemakaian air tanah atau izin perusahaan air tanah pada zona kritis dan zona rusak. Upaya penghentian terjadinya amblesan tanah dilakukan dengan menghentikan pengambilan air tanah. Sedangkan untuk mengurangi terjadinya amblesan tanah sebagaimana dilakukan untuk menanggulangi intrusi air asin dengan membuat sumur resapan.

Ketentuan lebih lanjut mengenai pengendalian daya rusak air tanah diatur dengan peraturan Menteri.

Dalam keadaan yang membahayakan lingkungan, Menteri, Gubernur, atau Bupati/Walikota sesuai dengan kewenangannya mengambil tindakan darurat sebagai upaya pengendalian daya rusak air tanah.

Keadaan yang membahayakan lingkungan adalah keadaan yang menimbulkan kerusakan lingkungan seperti semburan lumpur, gas, zat yang berbahaya dari dalam tanah, atau merusak fasilitas umum.

Tindakan darurat antara lain, menghentikan pengeboran atau penggalian yang dapat menimbulkan keadaan yang membahayakan lingkungan tersebut.

Setiap pengguna air tanah wajib memperbaiki kondisi dan lingkungan air tanah yang rusak akibat penggunaan air tanah yang dilakukannya dengan tindakan penanggulangan intrusi air asin dan

pemulihan akibat intrusi air asin dan/atau melakukan tindakan penghentian dan pengurangan terjadinya amblesan tanah.

7.9 Sistem Informasi Air Tanah

Sistem informasi air tanah merupakan jaringan informasi air tanah yang tersebar dan dikelola oleh berbagai institusi, serta dapat diakses oleh berbagai pihak yang berkepentingan dalam pengelolaan air tanah.

Data dan informasi yang dikelola dalam sistem informasi air tanah meliputi:

1. Inventarisasi air tanah.
2. Konservasi air tanah.
3. Pendayagunaan air tanah.
4. Pengendalian dan pengawasan air tanah.
5. Perizinan air tanah.
6. Kebijakan pengelolaan air tanah.

Adapun pengelolaan sistem informasi air tanah dilakukan melalui tahapan:

1. Pengambilan dan pengumpulan data.
2. Penyimpanan dan pengolahan data.
3. Pembaharuan data.
4. Penerbitan serta penyebarluasan data dan informasi.

Informasi air tanah mencakup informasi hidrogeologis sebagai bagian dari informasi sumber daya air, isinya meliputi data dan informasi mengenai:

1. Konfigurasi Cekungan Air Tanah.
2. Hidrogeologi.
3. Potensi air tanah.
4. Konservasi air tanah.
5. Pendayagunaan air tanah.
6. Kondisi dan lingkungan air tanah.
7. Pengendalian dan pengawasan air tanah.
8. Kebijakan dan pengaturan di bidang air tanah.
9. Kegiatan sosial ekonomi budaya masyarakat yang terkait dengan air tanah.

7.9.1 Pengambilan dan Pengumpulan Data

Proses pengumpulan dan pengadaan bahan data dan informasi air tanah dilakukan melalui tahapan-tahapan sebagai berikut:

- a. Pemilihan data dan informasi yang berasal dari berbagai sumber, baik berupa data primer maupun data sekunder.

- b. Pelaksanaan pengadaan data dan informasi.
- c. Pengidentifikasi data dan informasi.

Data dan informasi tersebut diperoleh dari kegiatan inventarisasi, baik melalui pemetaan, penyelidikan, penelitian, eksplorasi, dan/atau evaluasi data.

7.9.2 Penyimpanan dan Pengolahan Data

Data dan informasi air tanah hasil inventarisasi yang dilaksanakan oleh pihak swasta, perguruan tinggi, serta instansi/lembaga pemerintah di wilayah provinsi dan/atau kabupaten/kota wajib disampaikan kepada pusat data dan informasi di tingkat provinsi dan/atau kabupaten/kota. Data dan informasi air tanah terbuka untuk umum dan dapat digunakan oleh masyarakat

Proses pengolahan data dan informasi air tanah tahap awal meliputi:

- a. Pemilahan Data dan Informasi Air Tanah.
- b. Katalogisasi yaitu kegiatan pembuatan file katalog untuk setiap jenis data dan informasi.
- c. Labelisasi: Pelabelan akan memudahkan pelacakan terhadap data yang diperlukan. Kode yang digunakan dalam pelabelan menggunakan abjad dan angka yang disesuaikan dengan jenis bahan, judul, lokasi dan lain sebagainya.

Setelah proses pengolahan awal, selanjutnya dilakukan pengolahan lanjut untuk mempersiapkan data dan informasi yang berbasis komputer yang dikelola dalam suatu *Database Management System (DBMS)*. Berbagai data yang telah dikumpulkan harus dikonversikan menjadi data digital yang berformat seragam.

Data dan informasi yang sudah dikerjakan dalam pengolahan awal kemudian dievaluasi dan dibuat suatu desain sistem basis data yang ditunjang dengan program software khusus yang telah beredar di pasaran. Dalam penentuan struktur data dan informasi ini diperlukan beberapa hal antara lain:

- a. Ketersediaan data.
- b. Tingkat kepercayaan data yang tersedia.
- c. Tingkat kini (*up to date*) data yang tersedia.
- d. Tingkat konsistensi data yang tersedia.

Berdasarkan jenis pengolahan seperti yang sudah diterangkan di atas, data dan informasi terbagi dua yaitu data Non digital dan data digital. Hal ini akan memudahkan dalam pengintegrasian data dan informasi air tanah secara keseluruhan.

Data dan informasi yang telah diseleksi dan diolah, disimpan di tempat-tempat tertentu (map, rak, lemari, *hardisk* dan lain-lain) berdasarkan kelompok macamnya sesuai dengan urutan nomor penempatannya.

Untuk data digital yang telah tersimpan dalam *hardisk*, secara rutin harus dilakukan proses penggandaan data (*back up*) dalam suatu media penyimpanan file (*flopy disk*, CD dan *hardisk*).

7.9.3 Pembaharuan Data

Sistem informasi air tanah dikembangkan untuk menghasilkan informasi keairtanahan yang bersifat administrasi dan teknis secara terpadu yang dapat diakses secara cepat melalui jaringan komputer.

Dengan cara tersebut mempercepat pemberian persyaratan/rekomendasi teknis untuk izin pengeboran eksplorasi dan eksploitasi, izin pengambilan air tanah, izin penurapan dan izin pengambilan mata air, izin pengusahaan air tanah, dan pemberian informasi kondisi air tanah kepada pihak-pihak terkait, sehingga membantu dalam menentukan kebijakan konservasi air tanah pada waktu yang akan datang.

Pembaharuan data dalam sistem informasi bertujuan untuk memberikan informasi yang akurat mengenai data-data yang dibutuhkan dalam pengelolaan air tanah.

Untuk mempermudah penyelenggaraan sistem informasi air tanah, maka dibentuk pusat pengelolaan data di tingkat nasional, provinsi dan kabupaten kota.

Pembentukan dan pengelolaan pusat data dan informasi air tanah dilaksanakan oleh Menteri, Gubernur, dan Bupati/Walikota sesuai kewenangannya setelah dikoordinasikan dengan Dewan Sumber Daya Air

Pusat data dan informasi air tanah dibangun di tingkat nasional, tingkat provinsi, dan tingkat kabupaten/kota sebagai pengelola sistem informasi air tanah.

7.9.4 Penerbitan serta Penyebarluasan Data dan Informasi

Data dan informasi yang sudah diolah dan disimpan secara teratur, harus dikelola dalam suatu sistem pengelolaan data dan informasi mulai dari proses pengumpulan, pengolahan hingga pengaturan penyajian data dan informasi.

Data yang telah dikumpulkan, disajikan dalam 5 (lima) macam informasi, yaitu:

- a. Informasi Tabular
- b. Informasi Grafik
- c. Informasi berbentuk peta
- d. Informasi berbentuk Foto atau Gambar
- e. Informasi Naratif

Data dan informasi yang sudah diolah dapat disajikan dalam bentuk:

- a. Penayangan pada media tayang berdasarkan jenis data dan informasi yang dibutuhkan melalui proses pengklasifikasian pencarian data (*query*)
- b. Pencetakan (print data dan informasi pada kertas sesuai dengan data yang diinginkan).

Pusat data dan informasi air tanah di tingkat provinsi dan tingkat kabupaten/kota wajib menyampaikan data dan informasi kepada pusat data dan informasi di tingkat nasional. Pusat data dan informasi air tanah di tingkat kabupaten/kota wajib menyampaikan data dan informasi kepada pusat

data dan informasi di tingkat provinsi. Data dan informasi air tanah terbuka untuk umum dan dapat digunakan oleh masyarakat.

Untuk memperlancar pelaksanaan kegiatan penyediaan informasi, seluruh instansi pemerintah, organisasi, lembaga, perorangan dan Badan Usaha yang melaksanakan kegiatan berkaitan dengan air tanah wajib menyampaikan laporan hasil kegiatannya kepada pemerintah, yaitu Menteri, Gubernur, atau Bupati/Walikota sesuai dengan kewenangannya.

Ketentuan lebih lanjut mengenai sistem informasi air tanah diatur dalam Peraturan Menteri. Pengaturan sistem informasi air tanah tersebut ditujukan untuk menyimpan, mengolah, menyediakan, dan menyebarkan data dan informasi air tanah dalam upaya mendukung pengelolaan air tanah.

7.10 Pemantauan Pelaksanaan Pengelolaan Air Tanah

Pemantauan air tanah adalah pengamatan dan pencatatan secara menerus atas perubahan kuantitas, kualitas, dan lingkungan air tanah, yang diakibatkan oleh perubahan lingkungan dan atau pengambilan air tanah.

Kegiatan pemantauan pengelolaan air tanah dilakukan oleh Pemerintah mulai dari Menteri, Gubernur, dan Bupati/Walikota, dengan tujuan utama pemantauan agar keberadaan air tanah di suatu daerah dapat dikendalikan pengelolaannya sehingga air tanah dapat lestari dan berkesinambungan sehingga pemanfaatannya dapat berkelanjutan. Dalam pelaksanaan pemantauan, Pemerintah dapat dibantu oleh pihak lain seperti instansi atau lembaga baik pemerintah maupun swasta. Upaya pemantauan dilakukan secara berkala atau terus menerus dan berkesinambungan.

Hasil pemantauan tersebut dipakai sebagai dasar pertimbangan pengambilan keputusan dalam melakukan peninjauan atas perencanaan pengelolaan air tanah oleh pemerintah daerah, agar keberadaan air tanah di suatu daerah dapat dikendalikan pengelolaannya sehingga air tanah dapat lestari dan berkesinambungan sehingga pemanfaatannya dapat berkelanjutan (DESDM, 2006).

Kegiatan pemantauan pelaksanaan pengelolaan air tanah dilakukan melalui:

- Pengamatan.
- Pencatatan.
- Perekamanan.
- Pemeriksaan laporan.
- Peninjauan secara langsung.

Obyek pemantauan air tanah antara lain:

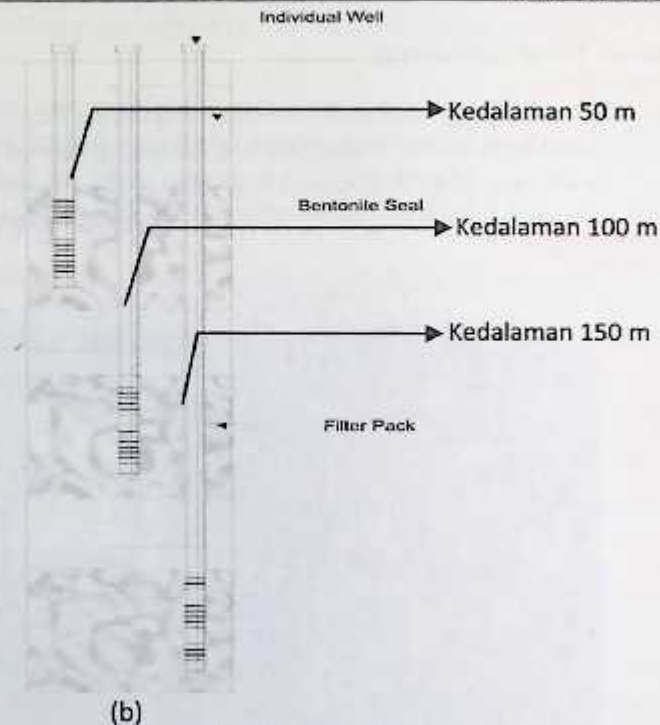
1. Debit aliran air tanah.
2. Jumlah pengambilan dan pemanfaatan air tanah.
3. Kedudukan muka air tanah.
4. Kuantitas air tanah.
5. Kualitas air tanah.
6. Dampak lingkungan keberadaan air tanah.

7. Amblesan tanah (*land subsidence*).

Untuk air tanah salah satu alat pemantauan adalah sumur pantau. Pembuatan sumur pantau di suatu daerah dimaksudkan untuk pengamatan perubahan kuantitas air tanah di daerah tersebut akibat pengambilan air tanahnya, apakah terjadi penurunan muka air tanah yang signifikan dan berpengaruh terhadap kondisi geologi tanahnya atau tidak. Salah satu contoh sumur pantau ditunjukkan dalam Gambar 7-22.



(a)



Gambar 7-22. (a) Konstruksi sumur pantau muka air tanah, (b) Detail pipa sumur pantau (sumber: foto survei 20 September 2007)

Desain sumur pantau tergantung pada (Driscoll, 1986):

- Fungsi sumur resapan tersebut, apakah untuk mengetahui perubahan tinggi (pengukuran) muka air tanah atau untuk menjaga dari kontaminasi.
- Lingkungan hidrogeologi.
- Sifat kimia alami kontaminan.
- Apakah sumur tersebut digunakan untuk keperluan investigasi geofisik.

7.10.1 Penentuan Debit Aliran Air Tanah

Penentuan debit aliran air tanah ditujukan untuk mengetahui perubahan debit aliran dengan melakukan pengukuran debit pada mata air dan sungai bawah tanah.

Suatu daerah umumnya mengandung beberapa akuifer (*multi layer aquifers*), sehingga memungkinkan dilakukan pengaturan kedalaman penyadapan air tanah pada akuifer tertentu, yaitu:

1. Penyadapan air tanah pada akuifer tidak tertekan, hanya diperuntukan untuk keperluan air minum dan rumah tangga melalui sumur gali dan sumur bor dengan diameter kurang dari 4 inci dengan debit $100 \text{ m}^3/\text{bulan}$.

2. Apabila pada suatu daerah hanya tersedia air tanah pada akuifer tidak tertekan, maka penyadapan air tanah untuk keperluan di luar air minum dan rumah tangga dipertimbangkan.
3. Penyadapan air tanah pada akuifer tertekan dapat dilakukan selama tingkat kerusakan air tanah pada akuifer tersebut dalam kategori aman berdasarkan hasil pemantauan kuantitas, kualitas dan lingkungan air tanahnya.

Pengaturan jumlah pengambilan dan pemanfaatan air tanah dapat dilaksanakan dengan melakukan pemodelan air tanah (*groundwater modelling*), yaitu untuk mengetahui kuota jumlah maksimum pengambilan dan pemanfaatan air tanah pada suatu akuifer tertentu pada area setiap km².

Apabila potensi ketersediaan air tanah pada suatu akuifer pada area 1 km² (100 hektar) diketahui, dan ditentukan pada area tersebut hanya diperbolehkan maksimum terdapat 5 sumur produksi dengan jarak masing-masing su. nur 150 m, maka kuota pengambilan dan pemanfaatan maksimum air tanah per sumur dapat ditentukan.

Pengukuran debit aliran mata air dan sungai bawah tanah secara menerus dilaksanakan sebagai berikut:

1. Pengukuran dilakukan dengan alat AWLR (*Automatic Water Level Recorder*) yang merekam tinggi permukaan air pada suatu penampang saluran.
2. Besarnya debit aliran diperoleh dengan mengkonversikan tinggi permukaan air dengan spesifikasi penampang saluran.
3. Perubahan debit aliran pada periode waktu tertentu dapat diketahui berdasarkan hasil analisis rekaman AWLR tersebut di atas.
4. Pengukuran debit mata air dan sungai bawah tanah secara berkala
5. Pengukuran dilakukan sekurang-kurangnya dua kali dalam setahun yaitu pada musim kemarau dan penghujan.
6. Pengukuran dilakukan secara manual dengan menggunakan:
 - a. meter air
 - b. alat penakar (*container*)
 - c. sekat ukur
 - d. *flow meter*

Perubahan debit aliran pada periode waktu tertentu dapat diketahui berdasarkan hasil analisis pengukuran tersebut di atas.

7.10.2 Pemantauan Jumlah Pengambilan dan Pemanfaatan Air Tanah

Pemantauan jumlah pengambilan dan pemanfaatan air tanah ditujukan untuk mengetahui perubahan jumlah pengambilan dan pemanfaatan air tanah dari sumur produksi, mata air atau sungai bawah tanah yang diturap.

Pemantauan jumlah pengambilan air tanah dapat dilaksanakan sebagai berikut:

1. Pencatatan atau pengukuran jumlah pengambilan dan pemanfaatan air tanah dilakukan secara berkala setiap bulan melalui meter air atau alat pengukur debit lainnya.
2. Selisih angka dua jangka waktu pencatatan jumlah pengambilan dan pemanfaatan air tanah pada meter air atau alat ukur debit lainnya merupakan jumlah air tanah yang diambil dan dimanfaatkan selama satu bulan.

Perubahan jumlah pengambilan dan pemanfaatan air tanah pada periode waktu tertentu dapat diketahui dari hasil analisis pencatatan atau pengukuran tersebut di atas.

7.10.3 Pemantauan Kedudukan Muka Air Tanah

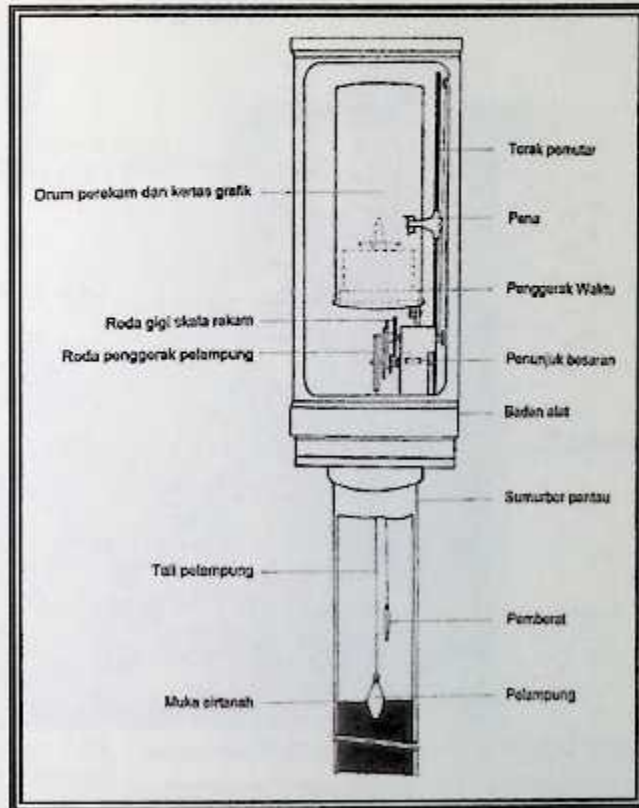
Pemantauan kedudukan muka air tanah ditujukan untuk mengetahui perubahan kedudukan muka air tanah dengan cara melakukan pengukuran kedudukan muka air tanah pada sumur pantau dan sumur produksi air tanah.

Pemantauan kedudukan muka air tanah pada sumur pantau dilaksanakan sebagai berikut (Danaryanto & Hadipurwo, 2006):

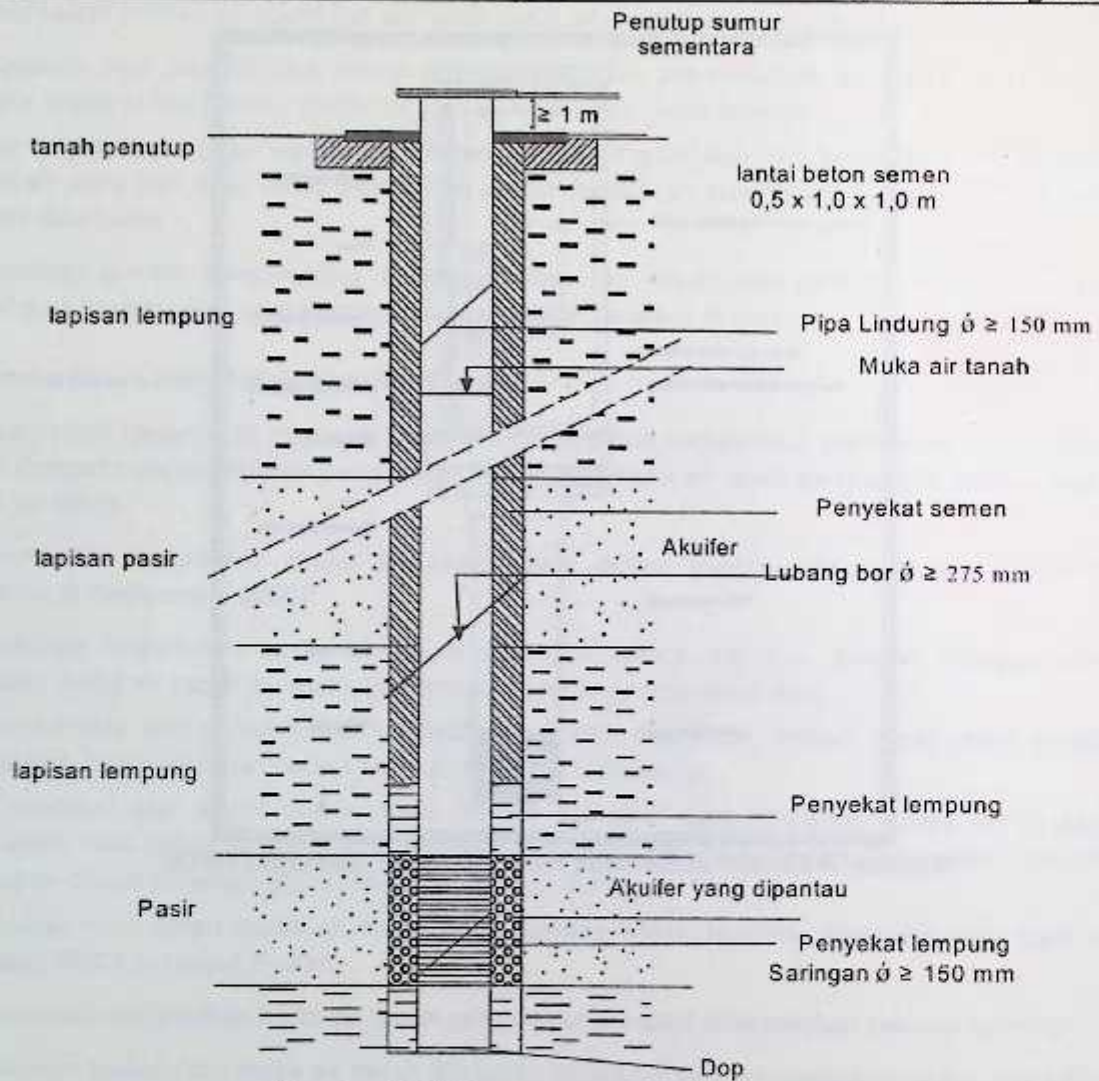
1. Pengukuran kedudukan muka air tanah dilakukan secara menerus dengan menggunakan alat perekam muka air tanah otomatis (*automatic water level recorder-AWLR*).
2. Secara berkala setiap bulan hasil pengukuran AWLR dikalibrasi dengan melakukan pengukuran kedudukan muka air tanah secara manual memakai hidrometer.
3. Hasil rekaman alat AWLR tipe mekanik berupa hidrograf yang tergambar pada kertas perekam, sedangkan hasil rekaman alat AWLR tipe digital hasilnya berupa hidrograf dan angka numerik yang tersimpan dalam perekam digital (disket atau hard disk).
4. Perubahan kedudukan muka air tanah pada periode waktu tertentu diperoleh dari hasil analisis hidrograf AWLR tersebut di atas.

Pemantauan kedudukan muka air tanah pada sumur produksi dilaksanakan sebagai berikut:

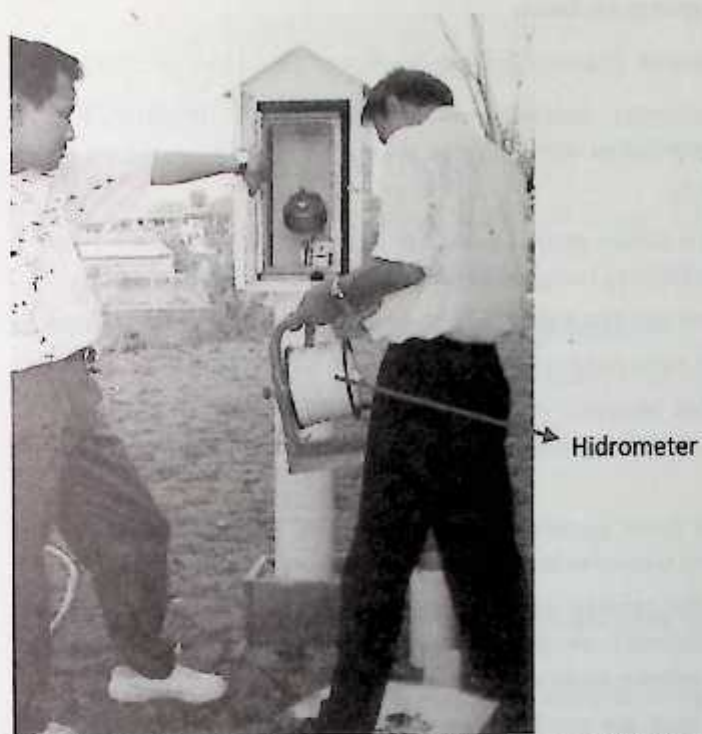
1. Pengukuran kedudukan muka air tanah dilakukan secara berkala sekurang-kurangnya dua kali dalam setahun yakni pada musim kemarau dan penghujan.
2. Pengukuran dilakukan ketika pompa pada sumur produksi telah dihentikan selama 30–60 menit.
3. Kedudukan muka air tanah yang berada di bawah muka tanah setempat diukur secara manual dengan menggunakan hidrometer, sedangkan muka air tanah yang berada di atas muka tanah setempat diukur dengan memakai manometer atau memakai pipa hingga air tanah berhenti mengalir sendiri.
4. Perubahan kedudukan muka air tanah pada periode waktu tertentu.



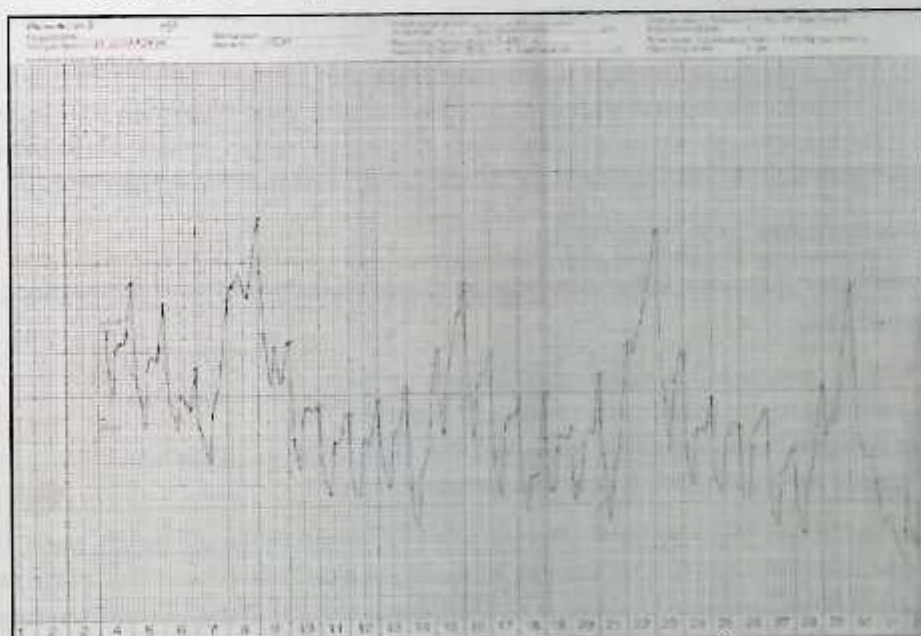
Gambar 7-23. Alat perekaman muka air tanah otomatis (AWLR)



Gambar 7-24. Penampang sumur bor pantau



Gambar 7-25. Alat perekaman muka air tanah manual (Hidrometer)



Gambar 7-26. Contoh hasil penggambaran Hidrograf dari AWLR

7.10.4 Pemantauan Kuantitas Air Tanah

7.10.4.1 Teknis Pelaksanaan

Keberhasilan pelaksanaan pemantauan air tanah selain ditentukan oleh kesiapan petugas pemantau, biaya juga ditentukan oleh teknis pelaksanaannya. Adapun teknis pelaksanaan pemantauan diuraikan sebagai berikut:

1. Spesifikasi konstruksi sumur pantau mengacu pada SNI No. 13-4687-1998, dan alat AWLR type vertikal memakai pelampung mengacu pada SNI No. 13-4690-1998.
2. Sumur pantau berikut alat AWLR ditempatkan pada daerah padat sumur produksi.
3. Sumur pantau dibersihkan dengan kompresor setiap 5 tahun sekali.
4. Apabila pada daerah tersebut di atas belum terdapat sumur pantau maka untuk keperluan pemantauan dipilih salah satu sumur produksi terpilih yang dapat mewakili sumur-sumur produksi lainnya.
5. Kedudukan saringan sumur pantau atau sumur produksi terpilih ditentukan berdasarkan keperluan pemantauan dan atau pada akuifer yang pengambilan dan pemanfaatan air tanahnya intensif.
6. Jumlah, kerapatan dan sebaran sumur pantau atau sumur produksi terpilih ditentukan sedemikian rupa sehingga membentuk suatu jaringan sumur pantau yang dapat memantau perubahan kuantitas air tanah di seluruh wilayah suatu cekungan air tanah.
7. Dari sekelompok sumur gali penduduk di daerah yang pengambilan air tanah dalamnya intensif dapat dipilih salah satu sumur gali yang mewakili untuk keperluan pemantauan pengaruh pengambilan dan pemanfaatan air tanah dalam terhadap kuantitas air tanah dangkal.

Selain data hasil pengukuran langsung di lapangan maka pemantauan debit aliran air tanah atau jumlah pengambilan air tanah dapat dilaksanakan berdasarkan data yang diperoleh dari laporan jumlah pengambilan dan pemanfaatan air tanah yang wajib dikirimkan setiap bulan oleh pemegang izin pengambilan air tanah dan izin pengambilan mata air atau sungai bawah tanah yang diturap

7.10.4.2 Tingkat Kerusakan Kuantitas Air tanah

Berdasarkan faktor penurunan kedudukan muka air tanah, tingkat kerusakan dapat dibagi menjadi 4 (empat) tingkatan, yaitu:

1. Aman, apabila penurunan kedudukan muka air tanah < 40%
2. Rawan, apabila penurunan kedudukan muka air tanah 40% - 60%
3. Kritis, apabila penurunan kedudukan muka air tanah 60% - 80%
4. Rusak, apabila penurunan kedudukan muka air tanah > 80%

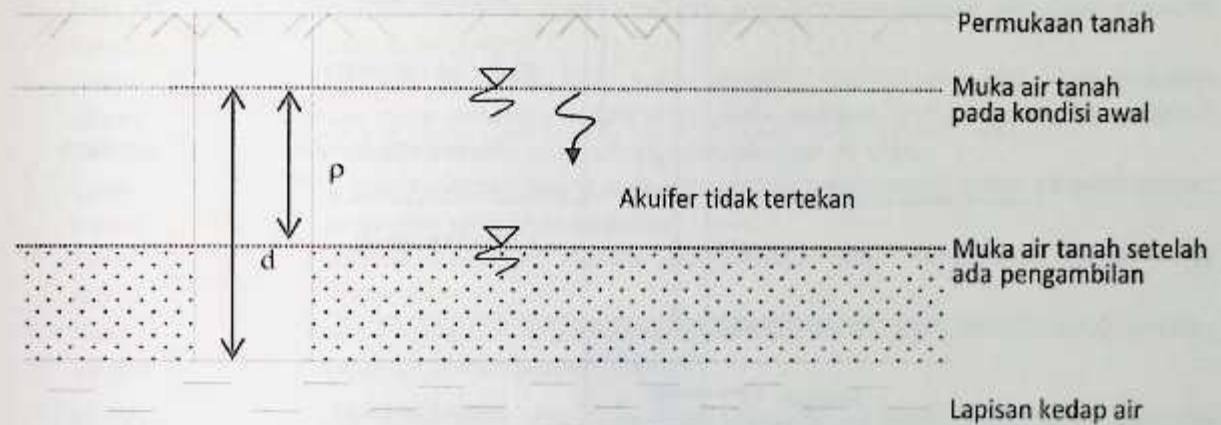
Penurunan kedudukan muka air tanah dihitung dari kedudukan muka air tanah pada saat kondisi awal sebagai titik referensi, yaitu kondisi alamiah air tanah sebelum ada pengambilan air tanah dalam jumlah yang berarti (lihat Gambar 7-27, Gambar 7-28 dan Gambar 7-29). Dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Perubahan muka air tanah (s)} = p/d \times 100\%$$

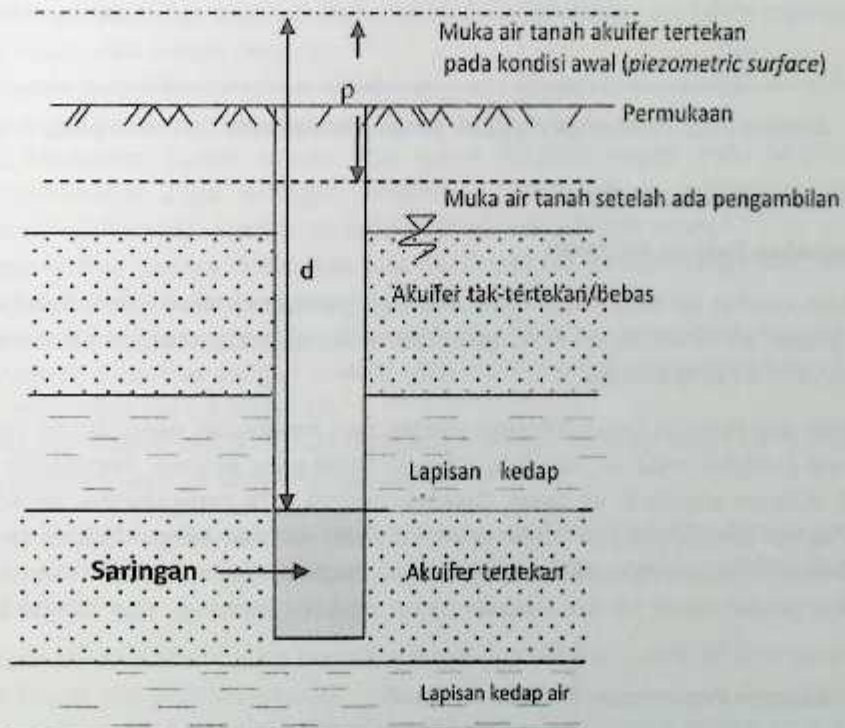
Dimana:

d = Muka air tanah awal dihitung dari batas bawah akuifer tidak tertekan

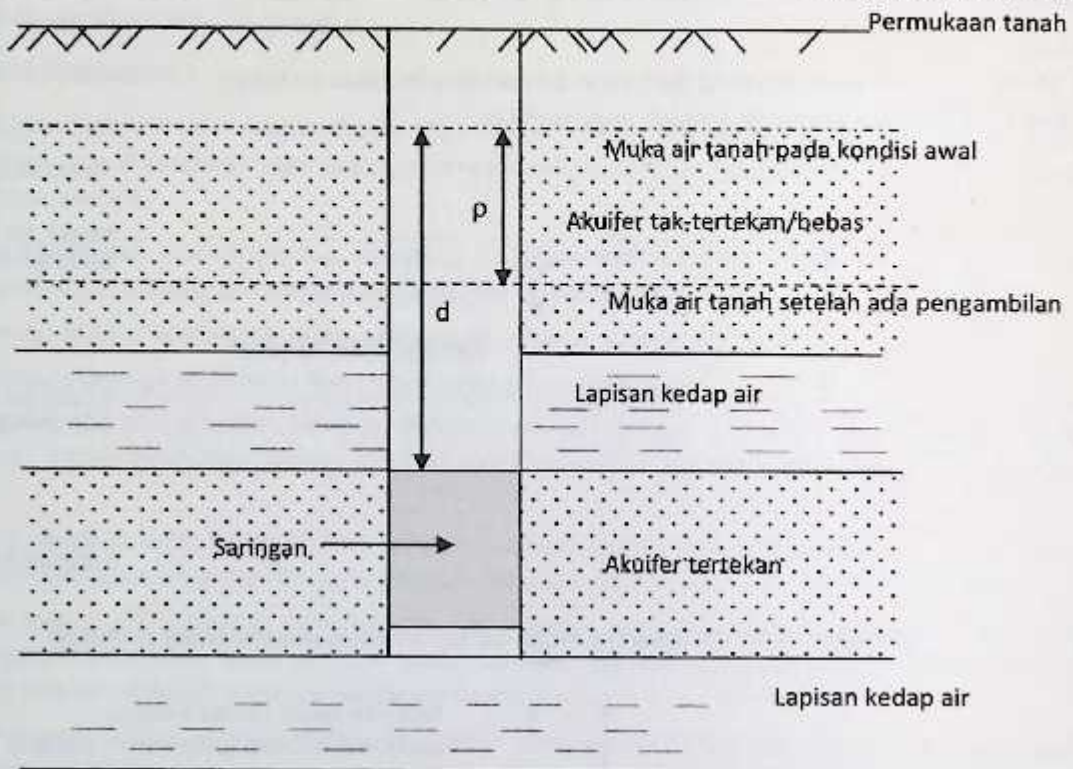
ρ = Penurunan muka air tanah setelah pengambilan



Gambar 7-27. Perubahan muka air tanah pada akuifer tidak tertekan



Gambar 7-28. Perubahan muka air tanah pada akuifer tertekan yang positif



Gambar 7-29. Perubahan muka air tanah pada akuifer tertekan yang negatif

7.10.5 Pemantauan Kualitas Air Tanah

7.10.5.1 Perubahan Kualitas Air Tanah

Perubahan kualitas air tanah dapat diketahui dari perubahan sifat fisika, kandungan kimia serta kandungan bakteri air tanah. Kualitas air tanah dinilai berdasarkan standar air bersih sesuai dengan peraturan pemerintah yang berlaku.

Perubahan sifat fisika air tanah dipantau dengan cara melakukan pengukuran pada sumur pantau ataupun sumur produksi, mata air, dan sungai bawah tanah yang diturap. Perubahan kandungan kimia baik organik maupun anorganik air tanah dipantau dengan cara menganalisis contoh air tanah yang berasal dari sumur pantau ataupun sumur produksi, mata air, dan sungai bawah tanah yang diturap, sedangkan perubahan kandungan mikrobiologi air tanah yaitu *coliform* dipantau dengan cara melakukan analisis contoh air dari sumur pantau ataupun sumur produksi, mata air, dan sungai bawah tanah yang diturap.

7.10.5.2 Pelaksanaan Pemantauan Kualitas Air Tanah

Perubahan sifat fisika air tanah dipantau dengan cara melakukan pengukuran pada sumur pantau ataupun sumur produksi, mata air, dan sungai bawah tanah yang diturap dengan cara sebagai berikut:

1. Pengukuran dilakukan secara berkala minimal dua kali dalam satu tahun masing-masing sekali pada musim hujan dan musim kemarau.
2. Pengukuran dilakukan dengan cara mengambil contoh air yang belum mengalami pengolahan.
3. Dari sekelompok sumur bor produksi dipilih salah satu sebagai sumur pantau yang dapat mewakili kondisi kualitas air tanah di sekitarnya
4. Jumlah dan kerapatan sumur pantau atau sumur produksi terpilih serta tata letak lokasinya ditentukan sedemikian rupa sehingga membentuk suatu jaringan pemantauan yang mewakili pemantauan seluruh kondisi kualitas air tanah di suatu cekungan air tanah.
5. Letak saringan sumur pantau ditentukan atau dipilih pada kedudukan yang dapat mewakili lapisan batuan atau kelompok akuifer yang akan dipantau.
6. Contoh air segera dianalisis dengan standar yang berlaku untuk mengetahui sifat fisiknya berdasarkan baku kualitas air.
7. Hasil pengukuran dipakai sebagai dasar evaluasi izin pemanfaatan air tanah, izin pemanfaatan mata air atau izin pemanfaatan air sungai bawah tanah.

Perubahan kandungan kimia baik organik maupun anorganik air tanah dipantau dengan cara menganalisis contoh air tanah yang berasal dari sumur pantau ataupun sumur produksi, mata air, dan sungai bawah tanah yang diturap sebagai berikut:

1. Analisis contoh air dilakukan secara berkala minimal dua kali dalam satu tahun masing-masing sekali pada musim hujan dan musim kemarau.
2. Dari sekelompok sumur bor produksi dipilih salah satu sebagai sumur pantau yang dapat mewakili kondisi kualitas air tanah di sekitarnya
3. Jumlah dan kerapatan sumur pantau atau sumur produksi terpilih serta tata letak lokasinya ditentukan sedemikian rupa sehingga membentuk suatu jaringan pemantauan yang mewakili pemantauan seluruh kondisi kualitas air tanah di suatu cekungan air tanah.
4. Letak saringan sumur pantau ditentukan atau dipilih pada kedudukan yang dapat mewakili lapisan batuan atau kelompok akuifer yang akan dipantau.
5. Analisis dilakukan dengan cara mengambil contoh air yang belum mengalami pengolahan.
6. Contoh air segera dianalisis dengan standar yang berlaku untuk mengetahui kandungan kimia air tanahnya berdasarkan baku kualitas air.
7. Hasil pengukuran dipakai sebagai dasar evaluasi izin pengambilan air tanah, izin pemanfaatan mata air atau izin pemanfaatan air sungai bawah tanah.

Perubahan kandungan mikrobiologi air tanah yaitu coliform dipantau dengan cara melakukan analisis contoh air dari sumur pantau ataupun sumur produksi, mata air, dan sungai bawah tanah yang diturap sebagai berikut:

1. Analisis contoh air dilakukan secara berkala minimal dua kali dalam satu tahun masing-masing sekali pada musim hujan dan musim kemarau.
2. Dari sekelompok sumur bor produksi dipilih salah satu sebagai sumur pantau yang dapat mewakili kondisi kualitas air tanah di sekitarnya

3. Jumlah dan kerapatan sumur pantau atau sumur produksi terpilih serta tata letak lokasinya ditentukan sedemikian rupa sehingga membentuk suatu jaringan pemantauan yang mewakili pemantauan seluruh kondisi kualitas air tanah di suatu cekungan air tanah.
4. Letak saringan sumur pantau ditentukan atau dipilih pada kedudukan yang dapat mewakili lapisan batuan atau kelompok akuifer yang akan dipantau
5. Analisis dilakukan dengan cara mengambil contoh air yang belum mengalami pengolahan.
6. Contoh air dianalisis sesuai standar yang berlaku untuk mengukur kandungan coliform berdasarkan baku kualitas air.

Hasil pengukuran dipakai sebagai dasar evaluasi izin pengambilan air tanah, izin pengambilan mata air atau izin pemanfaatan air sungai bawah tanah.

7.10.6 Pemantauan Dampak Lingkungan Keberadaan Air Tanah

Pemanfaatan air tanah dalam dengan sumur bor dapat menyebabkan dampak lingkungan berupa keringnya sumur dangkal atau sumur penduduk di sekitar sumur bor dalam, intrusi air laut, serta amblesan tanah. Oleh karena itu parameter lingkungan keberadaan air tanah yang menjadi obyek pemantauan adalah muka air tanah dangkal serta kualitasnya pada sumur penduduk, serta permukaan tanah yang menunjukkan gejala amblesan. Dampak lingkungan tersebut dipantau dengan melakukan pengukuran pada sumur pantau atau pisometer yang khusus dibuat untuk tujuan pemantauan air tanah dangkal, pemantauan juga dilakukan pada sumur penduduk. Pemantauan amblesan tanah dilakukan pada titik ikat yang dibuat di daerah yang menunjukkan gejala amblesan.

Pemantauan mengenai penurunan muka tanah dan kualitas air tanah dapat dilihat pada Subbab 7.10.4 dan Sub-bab 7.10.5. Pemantauan mengenai amblesan tanah akan dijelaskan pada subbab berikut.

7.10.7 Pemantauan Amblesan Tanah

Pemantauan amblesan tanah dilakukan pada sumur pantau amblesan tanah, titik ikat dan gejala amblesan tanah.

1. Pemantauan pada sumur pantau amblesan tanah
 - a. Pengukuran dilakukan secara otomatis menggunakan alat rekam amblesan tanah yang dipasang pada sumur pantau amblesan tanah.
 - b. Hasil pengukuran dianalisis dan dipakai sebagai dasar evaluasi izin pemanfaatan air tanah di daerah tersebut.
2. Pemantauan pada titik ikat di daerah amblesan tanah
 - a. Pengukuran dilakukan secara berkala minimal dua kali dalam satu tahun.
 - b. Pengukuran dilakukan secara manual atau digital dengan menggunakan alat ukur teodolit serta menggunakan GPS (*Global Positioning System*).
 - c. Hasil pengukuran dianalisis dan dipakai sebagai dasar evaluasi izin pemanfaatan air tanah di daerah tersebut.

3. Pemantauan pada gejala amblesan tanah

Apabila pengukuran secara teknis seperti tersebut pada a dan b belum memungkinkan, maka dilakukan:

- a. Pengamatan amblesan tanah ditujukan pada konstruksi sumur produksi yang menunjukkan kenampakan gejala menyembul ke atas dari permukaan tanah setempat, beton cor permukaan pipa jambang terangkat dari permukaan tanah setempat, atau beton cor tersebut mengalami retakan bahkan pecah.
- b. Pengamatan amblesan tanah juga ditujukan pada bangunan sekitar sumur produksi terutama bangunan dengan menggunakan tiang pancang yang menunjukkan kenampakan terangkat pondasinya.
- c. Bentuk hasil pengamatan amblesan tanah tersebut berupa uraian keterangan, gambar sketsa, atau foto.
- d. Hasil pengamatan dikaji/dianalisis dan dipakai sebagai dasar evaluasi izin pemanfaatan air tanah di daerah tersebut.

Pemantauan pelaksanaan pengelolaan air tanah dilakukan secara berkala sesuai kebutuhan.

7.11 Evaluasi

Pada hasil pemantauan, kemudian dilakukan evaluasi melalui kegiatan analisis dan penilaian. Hasil evaluasi pelaksanaan pengelolaan air tanah kemudian digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam melakukan peninjauan atas perencanaan pengelolaan air tanah. Evaluasi merupakan suatu proses yang dapat dibuat siklus seperti Gambar 7-30.



Gambar 7-30. Siklus evaluasi (http://www.ifad.org/hfs/tools/hfs/bsfpub/bsf_7.pdf)

Evaluasi pelaksanaan pengelolaan air tanah dilakukan oleh pejabat sesuai kewenangannya. Untuk CAT Lintas Negara dan Lintas Provinsi dilakukan oleh Menteri, untuk CAT Lintas Kab/Kota dilakukan oleh Gubernur dan untuk CAT Dalam Kabupaten/Kota dilakukan oleh Bupati/Walikota.

Evaluasi dilakukan untuk mengetahui perubahan ketersediaan air tanah pada Cekungan Air Tanah. Evaluasi debit dan kualitas air tanah dilakukan berdasarkan laporan pelaksanaan pengeboran atau penggalian air tanah, yang paling sedikit memuat:

1. Gambar penampang litologi dan penampangan sumur;
2. Hasil analisis fisika dan kimia air tanah;
3. Hasil analisis uji pemompaan terhadap akuifer yang disadap
4. Gambar konstruksi sumur berikut bangunan di atasnya.

Yang dievaluasi diantaranya meliputi hasil-hasil pemantauan:

- Debit aliran air tanah.
- Jumlah pengambilan dan pemanfaatan air tanah.
- Kedudukan muka air tanah.
- Kuantitas air tanah.
- Kualitas air tanah.
- Dampak lingkungan keberadaan air tanah.
- Amblesan tanah (*land subsidence*).

Hasil evaluasi pelaksanaan pengelolaan air tanah digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam peningkatan kinerja dan/atau melakukan peninjauan atas rencana pengelolaan air tanah.

7.12 Perizinan Pengambilan Air Tanah

7.12.1 Tata Cara Perolehan Izin

Izin pemakaian air tanah atau izin perusahaan air tanah diberikan untuk setiap titik sumur produksi. Untuk memperoleh izin pemakaian air tanah atau izin perusahaan air tanah, pemohon wajib mengajukan permohonan secara tertulis kepada Bupati/Walikota dengan tembusan kepada Menteri dan Gubernur.

Izin pemakaian air tanah atau izin perusahaan air tanah hanya dapat diterbitkan oleh Bupati/Walikota dengan ketentuan:

1. Pada setiap Cekungan Air Tanah lintas provinsi dan lintas negara setelah memperoleh rekomendasi teknis dari Menteri.
2. Pada setiap Cekungan Air Tanah lintas kabupaten/kota setelah memperoleh rekomendasi teknis dari Gubernur.
3. Pada setiap Cekungan Air Tanah dalam wilayah kabupaten/kota berdasarkan zona konservasi air tanah dan/atau zona pemanfaatan air tanah.

Rekomendasi teknis untuk penerbitan izin pemakaian air tanah atau izin perusahaan air tanah berisi antara lain:

1. lokasi dan kedalaman pengeboran atau penggalian air tanah,
2. jenis dan kedalaman akuifer yang disadap,

3. debit pengambilan air tanah,
4. kualitas air tanah,
5. peruntukkan penggunaan air tanah.

Informasi yang harus dilampirkan pada saat mengajukan permohonan izin antara lain:

1. peruntukkan dan kebutuhan air tanah yang akan diambil
2. rencana pelaksanaan pengeboran atau penggalian air tanah
3. upaya pengelolaan lingkungan (UKL) atau upaya pemantauan lingkungan (UPL) atau analisis mengenai dampak lingkungan (Amdal) sesuai dengan ketentuan peraturan perundangan.

Izin pemakaian air tanah harus memuat paling sedikit:

1. nama dan alamat pemohon
2. titik lokasi rencana pengeboran atau penggalian
3. debit pemakaian atau pengusaha air tanah
4. ketentuan hak dan kewajiban

Pemegang izin wajib memberitahukan kepada Bupati/Walikota tentang rencana pelaksanaan konstruksi sumur produksi dan uji pemompaan yang pelaksanaannya harus disaksikan oleh petugas berwenang.

Untuk memperoleh izin pemakaian air tanah atau izin pengusaha air tanah, pemohon dikenakan biaya sesuai dengan ketentuan peraturan perundangan-undangan.

Berdasarkan PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah, tata cara perizinan pengelolaan air tanah dapat dilihat pada Gambar 7-31.

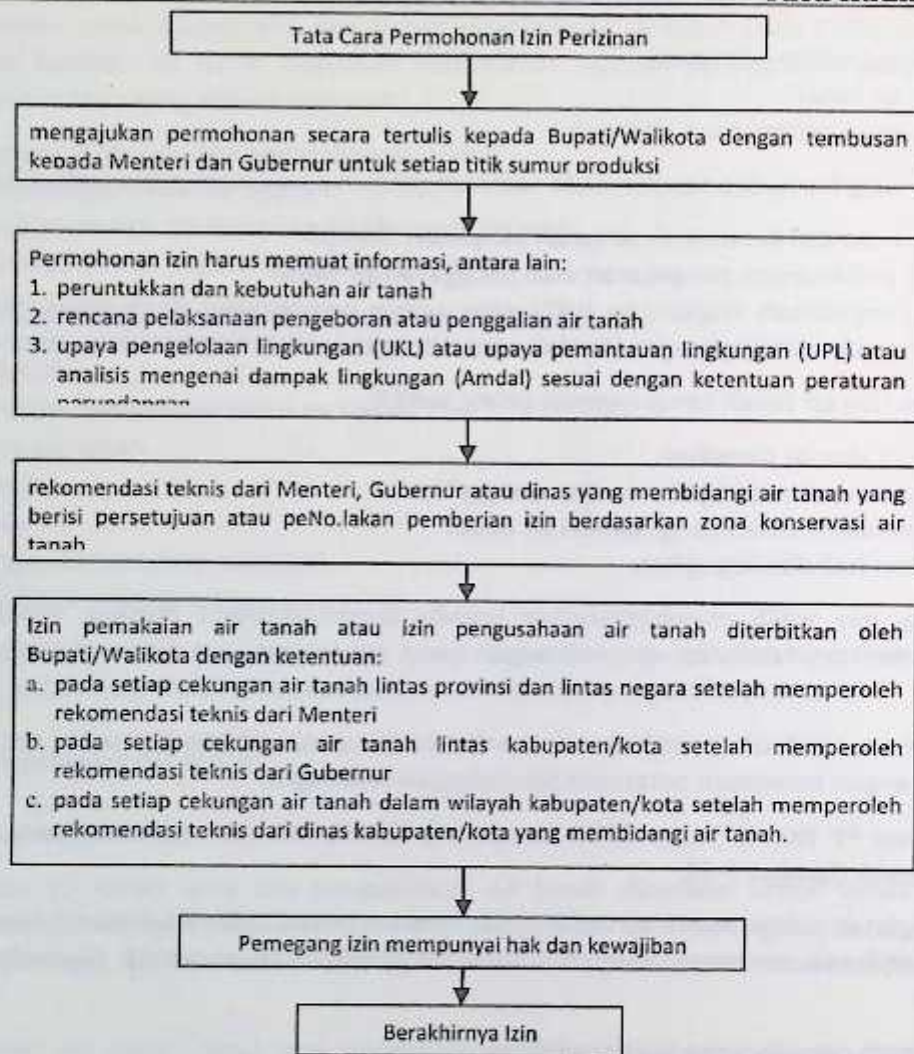
Untuk kegiatan pengambilan air tanah dalam jumlah besar, yaitu lebih dari 2 liter per detik, wajib melakukan eksplorasi air tanah terlebih dahulu. Hasil eksplorasi air tanah digunakan sebagai dasar perencanaan:

1. kedalaman pengeboran atau penggalian;
2. penempatan saringan pada pekerjaan konstruksi;
3. debit dan kualitas air tanah yang akan dimanfaatkan.

Kegiatan pengeboran eksploitasi air tanah tidak memerlukan izin bila:

1. Dilaksanakan oleh instansi pemerintah yang memiliki tugas dan fungsi di bidang air tanah.
2. Dilaksanakan oleh masyarakat untuk memenuhi kebutuhan pokok dalam jumlah pengambilan tertentu yang tidak didistribusikan

Pemegang izin pemakaian air tanah atau izin pengusaha air tanah hanya dapat melakukan pengeboran atau penggalian di lokasi yang telah ditetapkan, dan hanya dapat dilakukan oleh instansi pemerintah, perorangan atau badan usaha yang memenuhi kualifikasi dan klasifikasi untuk melakukan pengeboran atau penggalian air tanah.



Gambar 7-31. Diagram tata cara perizinan pengelolaan air tanah

Kualifikasi dan klasifikasi untuk melakukan pengeboran atau penggalian air tanah dapat diperoleh melalui:

1. sertifikasi instalasi bor air tanah
2. sertifikasi keterampilan juru pengeboran air tanah.

7.12.2 Jangka Waktu Izin

Izin pemakaian air tanah atau izin perusahaan air tanah hanya berlaku selama 3 tahun, namun izin tersebut dapat diperpanjang. Perpanjangan izin hanya dapat diberikan oleh Bupati/Walikota, setelah

memperoleh rekomendasi teknis, dan selama air tanah masih tersedia dan dapat diambil tanpa menyebabkan kerusakan kondisi dan lingkungan air tanah.

Setelah kegiatan pengeboran atau penggalian air tanah selesai dilakukan, Bupati/Walikota wajib melakukan evaluasi terhadap debit dan kualitas air tanah yang dihasilkan.

7.12.3 Hak dan Kewajiban Pemegang Izin

Hak setiap pemegang izin pemakaian air tanah atau izin perusahaan air tanah adalah untuk memperoleh hak guna pakai atau hak guna usaha air dari pemanfaatan air tanah.

Sedangkan kewajiban setiap pemegang izin pemakaian air tanah atau perusahaan air tanah, antara lain:

1. Menyampaikan laporan hasil kegiatan pengeboran atau penggalian air tanah serta debit pemakaian atau perusahaan air tanah setiap bulan kepada Pemerintah.
2. Memasang meteran air pada setiap sumur produksi dalam pemakaian atau perusahaan air tanah.
3. Membangun sumur resapan di lokasi yang ditentukan oleh Bupati/Walikota.
4. Berperan serta dalam menyediakan sumur pantau air tanah.
5. Melakukan upaya konservasi air tanah.
6. Melaporkan kepada Bupati/Walikota apabila dalam pelaksanaan pengeboran, penggalian air tanah, serta pemakaian dan perusahaan air tanah ditemukan hal-hal yang dapat membahayakan lingkungan.
7. Wajib memberikan air sekurang-kurangnya 10% dari batasan debit pemakaian atau perusahaan air tanah yang ditetapkan dalam izin, untuk memenuhi kebutuhan pokok sehari-hari masyarakat di sekitar lokasi perusahaan air tanah.

7.13 Pemberdayaan, Pengendalian dan Pengawasan

Pengaturan air tanah pada suatu cekungan air tanah secara utuh mencakup daerah imbuhan dan daerah lepasan air tanah. Pengaturan yang dilakukan pada setiap zona konservasi air tanah sesuai dengan tingkat kerusakan air tanahnya, meliputi:

1. Pengaturan batasan kedalaman penyadapan air tanah
2. Pengaturan jumlah pengambilan dan pemanfaatan air tanah
3. Pengaturan peruntukan pemanfaatan air tanah.

Untuk mendukung kegiatan di atas maka dibutuhkan pemberdayaan, pengendalian, dan pengawasan oleh berbagai pihak, baik pemerintah, swasta, dan peran serta masyarakat.

7.13.1 Pemberdayaan

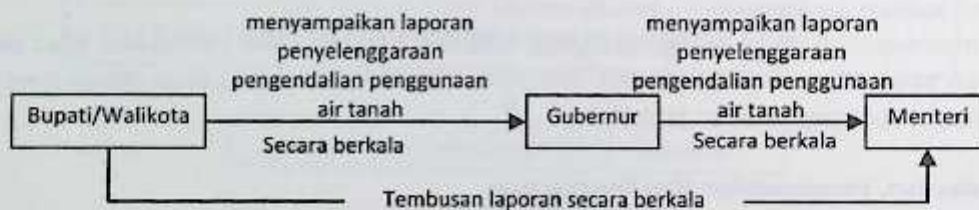
Penyelenggaraan pemberdayaan kepada aparat pengelola air tanah, pemegang hak guna pakai dan hak guna usaha air dari pemanfaatan air tanah, asosiasi profesi, asosiasi perusahaan pengeboran air tanah, dan kelompok masyarakat.

Pemberdayaan diselenggarakan oleh Menteri, Gubernur, Bupati/Walikota dalam bentuk penyuluhan, pendidikan, pelatihan, pembimbingan, dan pendampingan. Pemberdayaan dapat diselenggarakan dalam bentuk kerjasama yang terkoordinasi antara Pemerintah, pemerintah provinsi, dan pemerintah kabupaten/kota. Kelompok masyarakat atas prakarsa sendiri dapat melaksanakan upaya pemberdayaan untuk kepentingan masing-masing.

7.13.2 Pengendalian

Kegiatan pengendalian penggunaan air tanah dilakukan oleh Menteri, Gubernur, Bupati/Walikota sesuai dengan kewenangannya. Penyampaian laporan penyelenggaraan pengendalian penggunaan air tanah dilakukan mulai dari tingkat daerah oleh Bupati/Walikota kepada Gubernur, kemudian Gubernur menyampaikan laporan penyelenggaraan pengendalian penggunaan air tanah tersebut kepada Menteri secara berkala.

Laporan penyelenggaraan pengendalian penggunaan air tanah berisi antara lain jumlah dan lokasi sumur bor, jumlah pengguna air tanah, jumlah pengambilan air tanah, peruntukkan penggunaan air tanah, jumlah pajak pemanfaatan air tanah. Lebih jelasnya dapat dilihat pada diagram berikut.



Gambar 7-32. Mekanisme penyampaian laporan penyelenggaraan penggunaan air tanah

7.13.3 Pengawasan

Pengawasan penyelenggaraan pengelolaan air tanah ditujukan untuk menjamin kesesuaian antara pelaksanaan pengelolaan air tanah dengan peraturan perundang-undangan.

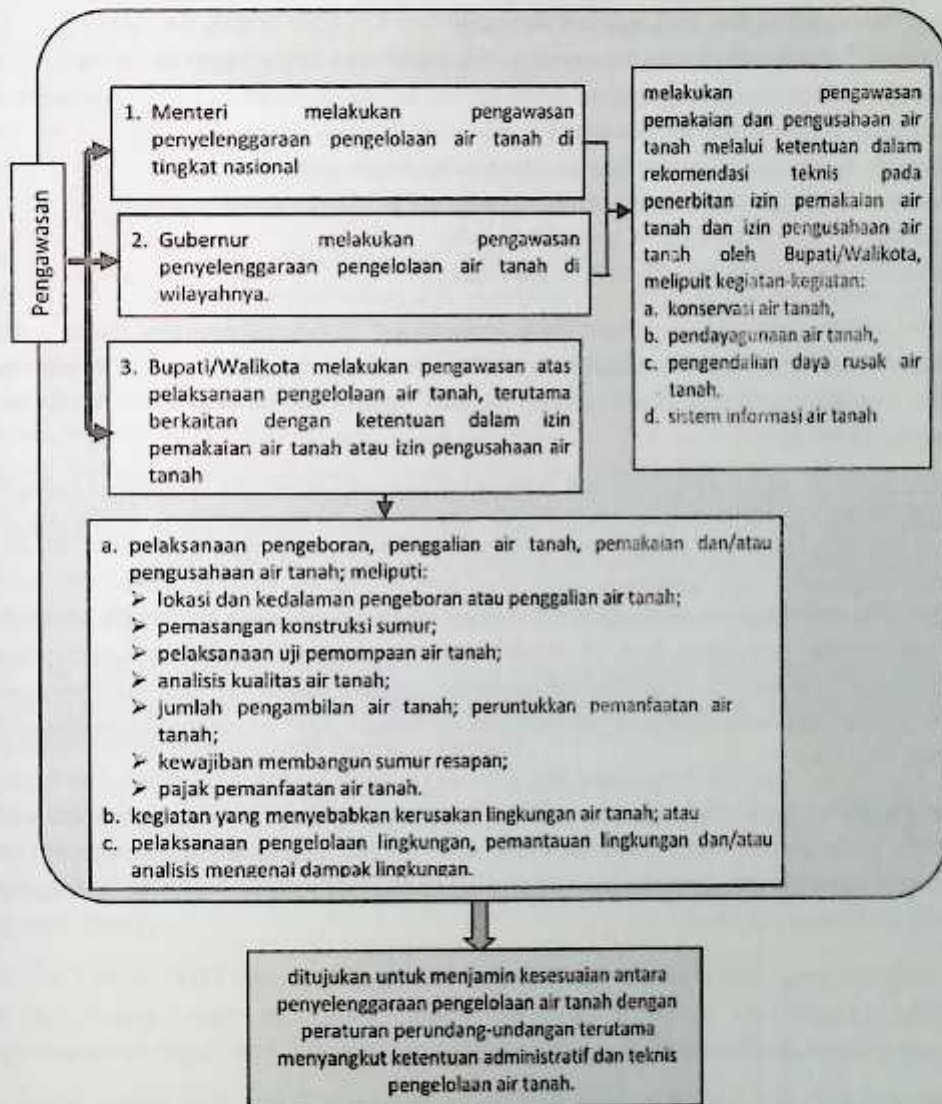
Wewenang pengawasan penyelenggaraan pengelolaan air tanah di tingkat nasional berada di tangan Menteri, di tingkat provinsi dilakukan oleh Gubernur, dan di tingkat kabupaten/kota oleh Bupati/Walikota. Keikutsertaan masyarakat dalam pengawasan pengelolaan air tanah juga dapat dilakukan dengan menyampaikan laporan dan/atau pengaduan.

Kegiatan pengawasan penyelenggaraan air tanah meliputi pelaksanaan:

1. konservasi air tanah,

2. pendayagunaan air tanah,
3. pengendalian daya rusak air tanah,
4. sistem informasi air tanah, dan
5. pemberdayaan masyarakat.

Secara skematis kegiatan pengawasan dapat dilihat pada diagram berikut:



Gambar 7-33. Diagram Kegiatan Pengawasan

Kegiatan pengawasan dan pengendalian pendayagunaan air tanah dalam rangka konservasi meliputi:

1. Pengawasan terhadap pelaksanaan pengeboran eksplorasi dan eksploitasi air tanah yang dilaksanakan oleh Instansi/Lembaga Pemerintah atau Swasta.
2. Pengawasan terhadap pelaksanaan ketentuan teknis yang tercantum dalam izin dalam rangka pembuatan maupun perbaikan/penyempurnaan sumur bor atau penurapan mata air, pengambilan air tanah dan pengusaha air tanah.
3. Pengawasan terhadap terjadinya pencemaran dan kerusakan lingkungan air tanah.
4. Pengawasan dalam rangka penertiban pengeboran, penurapan, dan pengambilan air tanah dan mata air serta pengusaha air tanah tanpa izin.
5. Pengawasan dalam rangka penertiban kegiatan perusahaan pengeboran air tanah.
6. Pengawasan terhadap pelaksanaan pembuatan sumur pantau.
7. Pengawasan terhadap pembuatan sumur imbuhan.
8. Pengawasan pelaksanaan UKL dan UPL atau AMDAL.

Air tanah adalah sumberdaya alam yang terbarukan, yang memegang peran vital dalam pembangunan kita. Namun, pengambilannya tetap harus mempertimbangkan aspek keseimbangan dan kelestariannya. Degradasi yang terjadi pada sumberdaya air tanah baik jumlah maupun mutunya, sangat sulit upaya pemulihannya.

Kebutuhan akan air tanah yang semakin meningkat sementara di sisi lain ketersediaannya yang makin langka mendorong perlunya perencanaan yang matang dalam pemanfaatan sumberdaya tersebut disesuaikan dengan jumlah ketersediaannya yang paling layak untuk dimanfaatkan

Mengingat sifat keterdapatan sumberdaya air tanah, maka seyogyanya air tanah menjadi alternatif paling akhir bagi pasokan kebutuhan akan air untuk berbagai peruntukkan setelah sumber-sumber yang lain. Di lain pihak, perlu diupayakan pengurangan ketergantungan pasokan air dari sumberdaya air tanah dengan meningkatkan kapasitas pelayanan perusahaan air minum agar air permukaan dapat mengganti peran air tanah.

Penataan peraturan perundang-undangan dalam rangka pengelolaan air tanah pada cekungan air tanah, terutama pada kegiatan konservasi air tanah oleh semua pihak, serta penegakan hukum dari peraturan perundang-undangan oleh instansi yang berwenang, merupakan hal yang paling menentukan di dalam upaya pelestarian air tanah.

BAB 8. PENATAAN RUANG AIR TANAH

8.1 Tata Ruang Air Tanah

Proses perjalanan air dalam ruang (3 dimensi) baik di ruang laut, ruang udara dan ruang darat yang secara global dikenal dengan siklus hidrologi telah dijelaskan dalam Sub-Bab 1.8. Di ruang laut proses perjalanan air ada dalam laut dan di daerah pantai. Air laut juga berubah wujud menjadi uap dan masuk ke ruang udara, yang dalam proses perjalanannya akan memberi kontribusi kepada hujan di ruang darat. Arus laut yang ada di samudra berpengaruh kepada terjadinya hujan, badai dan gelombang laut. Di ruang darat air bisa berada dan mengalir di permukaan tanah dan di dalam tanah.

UU No. 7 Tahun 2004 menyebutkan bahwa Pengelolaan Sumber Daya Air adalah upaya merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi penyelenggaraan konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air, dan pengendalian daya rusak air. Sumber daya air merupakan Karunia Tuhan Yang Maha Esa yang memberikan manfaat untuk mewujudkan kesejahteraan bagi seluruh rakyat Indonesia dalam segala bidang. Untuk menghadapi ketidakseimbangan antara ketersediaan air yang cenderung menurun dan kebutuhan air yang semakin meningkat, sumber daya air wajib dikelola dengan memperhatikan fungsi sosial, lingkungan hidup dan ekonomi secara selaras. Pengelolaan sumber daya air perlu diarahkan untuk mewujudkan sinergi dan keterpaduan yang harmonis antar-wilayah, antar-sektor, dan antar-generasi. Sejalan dengan semangat demokratisasi, desentralisasi, dan keterbukaan dalam tatanan kehidupan bermasyarakat, berbangsa, dan bernegara, masyarakat perlu diberi peran dalam Pengelolaan Sumber Daya Air.

UU No. 26 Tahun 2007 menyebutkan bahwa penyelenggaraan penataan ruang bertujuan untuk mewujudkan ruang wilayah nasional yang aman, nyaman, produktif, dan berkelanjutan berlandaskan Wawasan Nusantara dan Ketahanan Nasional dengan:

- terwujudnya keharmonisan antara lingkungan alam dan lingkungan buatan
- terwujudnya keterpaduan dalam penggunaan sumber daya alam dan sumber daya buatan dengan memperhatikan sumber daya manusia
- terwujudnya perlindungan fungsi ruang dan pencegahan dampak negatif terhadap lingkungan akibat pemanfaatan ruang.

UU No. 26 Tahun 2007 juga menyebutkan bahwa ruang adalah wadah yang meliputi ruang darat, ruang laut, dan ruang udara, termasuk ruang di dalam bumi sebagai satu kesatuan wilayah, tempat manusia dan makhluk hidup lain, melakukan kegiatan, dan memelihara kelangsungan hidupnya.

Ruang darat, ruang laut, dan ruang udara merupakan satu kesatuan ruang yang tidak dapat dipisahkan. Ruang darat, ruang laut, dan ruang udara dimanfaatkan berbagai macam keperluan sesuai dengan tingkat intensitas yang berbeda untuk kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya. Pemanfaatannya diantaranya sebagai tempat melakukan kegiatan pemenuhan kebutuhan pangan,

industri, pertambangan, sebagai jalur perhubungan, sebagai obyek wisata, sebagai sumber energi, atau sebagai tempat penelitian dan percobaan.

UU No. 26 Tahun 2007 tidak mendefinisikan ruang darat, ruang laut dan ruang udara. Definisi ketiga ruang tersebut ada dalam UU No. 24 Tahun 1992. UU ini mendefinisikan ruang-ruang: udara, darat dan laut sebagai berikut:

- Ruang daratan adalah ruang yang terletak di atas dan di bawah permukaan daratan termasuk permukaan perairan darat dan sisi darat dari garis laut terendah.
- Ruang lautan adalah ruang yang terletak di atas dan di bawah permukaan laut dimulai dari sisi laut garis laut terendah termasuk dasar laut dan bagian bumi di bawahnya, di mana Republik Indonesia mempunyai hak yurisdiksi.
- Ruang udara adalah ruang yang terletak di atas ruang darat dan/atau ruang laut sekitar wilayah negara dan melekat pada bumi, di mana Republik Indonesia mempunyai hak yurisdiksi. Pengertian ruang udara (*air-space*) tidak sama dengan pengertian ruang angkasa (*outer space*). Ruang angkasa beserta isinya seperti bulan dan benda-benda langit lainnya adalah bagian dari antariksa, yang merupakan ruang di luar ruang udara.

Lebih lanjut disebutkan bahwa ruang yang dimaksud adalah ruang di mana Republik Indonesia mempunyai hak yurisdiksi yang meliputi hak berdaulat di wilayah teritorial maupun kewenangan hukum di luar wilayah teritorial berdasarkan ketentuan konvensi yang bersangkutan yang berkaitan dengan ruang lautan dan ruang udara.

Tata ruang menurut UU No. 26 Tahun 2007 didefinisikan sebagai wujud struktur ruang dan pola ruang. Struktur ruang adalah susunan pusat-pusat permukiman dan sistem jaringan prasarana dan sarana yang berfungsi sebagai pendukung kegiatan sosial ekonomi masyarakat yang secara hierarkis memiliki hubungan fungsional. Pola ruang adalah distribusi peruntukkan ruang dalam suatu wilayah yang meliputi peruntukkan ruang untuk fungsi lindung dan peruntukkan ruang untuk fungsi budi daya.

Air dalam perspektif siklus hidrologi secara global mengikuti, lewat, berada dan mengalir melalui ketiga ruang tersebut. Air terdiri atas air permukaan, air tanah, air hujan dan air laut yang di darat.

PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah yang merupakan turunan dari UU No. 7 Tahun 2004 lebih menegaskan secara spesifik pengelolaan air tanah yang berkelanjutan sebagai bagian dari sumber daya di bawah muka bumi.

Ruang darat untuk air tanah di Indonesia dibagi menjadi (KepPres No. 26 Tahun 2011; Kodoatie & Sjarief, 2010; Schumm, 2005):

- 47 % Cekungan Air Tanah (CAT).
- CAT terdiri atas akuifer bebas dan akuifer tertekan.
- 53 % Non-CAT.

Dari sisi air tanah maka ada beberapa substansi penting dalam ruang darat, yaitu:

- Karakter CAT dan Non-CAT berbeda baik di muka bumi maupun di bawah muka bumi.

- Di muka bumi CAT dan Non-CAT mempengaruhi *fluvial system* (DAS dan sistem jaringan sungainya). Pengaruhnya diantaranya adalah:
 - Ada beberapa daerah CAT di Indonesia yang bersifat aluvial, produk dari sedimen muda dan terletak di cekungan sedimen muda (*young sedimentary basin*) pada jaman kuartar/holosen. Di daerah ini *fluvial system* bersifat saluran/sungai beregim (*channel in regime*) sedangkan *fluvial system* daerah Non-CAT termasuk daerah saluran/sungai Non-regim (*Non-regime channel*) (Schumm, 2005).
 - Sungai beregim akan selalu berubah untuk mencapai keseimbangan antara agradasi (penambahan sedimen) dan degradasi (gerusan). Muatan sedimen utamanya pasir, lanau dan lempung umumnya ada di sungai ini.
 - Sungai Non regim (di daerah Non-CAT) dikendalikan oleh: lapisan batuan dasar, aluvial tua dan cenderung tidak stabil.

Mengacu pada definisi tata ruang maka "tata ruang air tanah" dapat didefinisikan sebagai wujud struktur ruang air tanah dan pola ruang air tanah.

Struktur ruang air tanah adalah susunan pusat-pusat sumber daya air tanah dan sistem infrastruktur air tanah berupa akuifer tertekan (*confined aquifer*) dan akuifer bebas (*unconfined aquifer*). Air tanah dalam hal ini terjemahan dari *groundwater*. Di atas *groundwater* ada daerah *vadoze zone* yang berisi *soil water*.

Pola ruang air tanah adalah distribusi peruntukkan ruang air tanah dalam suatu wilayah berupa Cekungan Air Tanah (CAT) dan Non-CAT. Air tanah di CAT selain *groundwater* juga *soil water*. Peruntukkan ruang air tanah dibagi dua yaitu untuk fungsi lindung air tanah (daerah konservasi atau kawasan lindung) yang merupakan daerah resapan air tanah (*recharge area*) dan untuk fungsi budi daya sumber daya air tanah (pendayagunaan sumber daya air tanah atau kawasan budi daya) berupa daerah lepasan air tanah (*discharge area*). Air tanah di Non-CAT hanya berupa *soil water*.

Di Indonesia sesuai pembagian CAT dan Non-CAT maka dari proses siklus hidrologinya ada berbagai variasi kondisi ruang daratnya, meliputi:

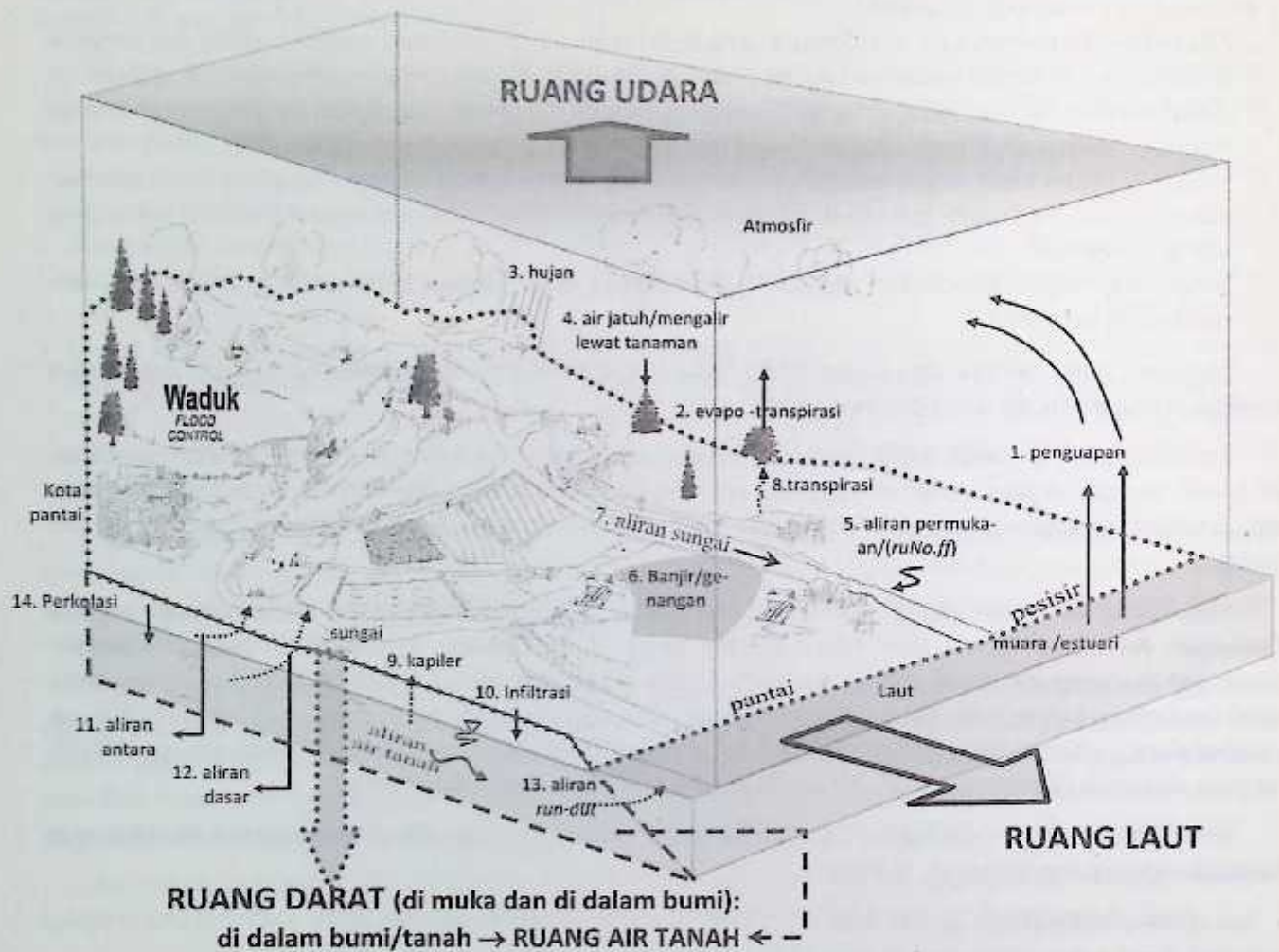
- Ruang darat seluruhnya daerah CAT.
- Ruang darat seluruhnya daerah Non-CAT.
- Ruang darat terbagi CAT dan Non CAT dengan variasi:
 - Hulu CAT dan hilir Non-CAT.
 - Hulu Non-CAT dan hilir CAT.
 - Dll.

Maksud "Dll." adalah proses perjalanan air mulai dari hulu sampai ke hilir bisa mempunyai variasi:

- CAT → Non-CAT → CAT atau
- Non-CAT → CAT → Non-CAT.

Gambar 8-1 menunjukkan ilustrasi sederhana ruang air tanah, ruang darat, ruang laut, ruang udara dan keterkaitan dengan sumber daya air.

Untuk gambaran ruang darat dengan variasi CAT dan Non-CAT diuraikan di Bab 5.



Catatan: Contoh gambar ini seluruh ruang darat adalah daerah CAT

Gambar 8-1. Keterkaitan antar ruang dalam pengelolaan sumber daya air
(Kodoatie & Sjarief, 2010 yang dilebaorasi)

8.2 Penyelenggaraan Penataan Ruang Air Tanah

Penataan ruang adalah suatu sistem proses perencanaan tata ruang, pemanfaatan ruang, dan pengendalian pemanfaatan ruang (UU No. 26 tahun 2007). Oleh karena itu Penataan Ruang Air Tanah dapat dibuat ilustrasinya seperti Gambar 8-2.

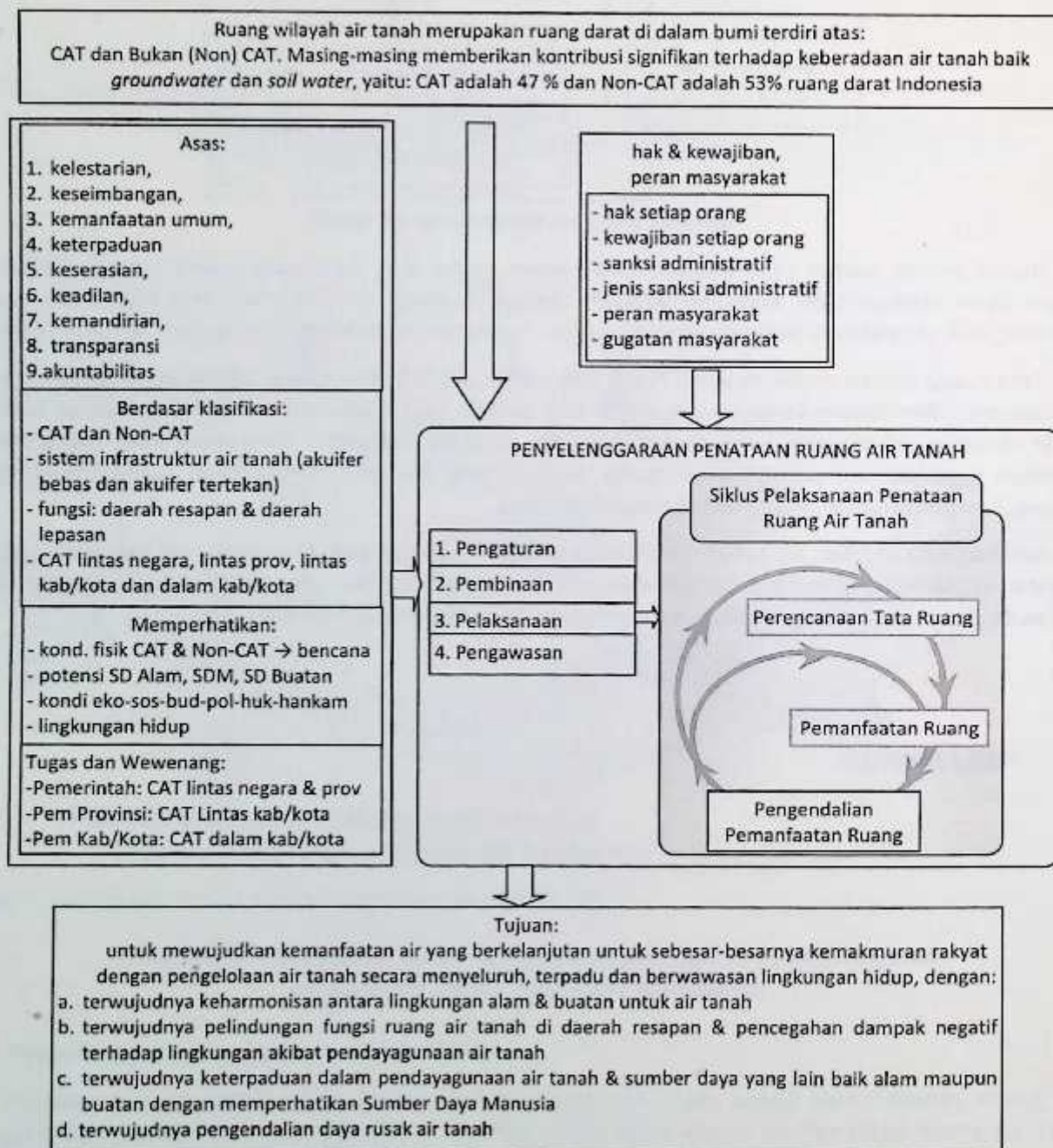


Gambar 8-2. Penataan ruang air tanah

Ruang adalah wadah yang meliputi ruang darat, ruang laut, dan ruang udara, termasuk ruang di dalam bumi sebagai satu kesatuan wilayah, tempat manusia dan makhluk lain hidup, melakukan kegiatan, dan memelihara kelangsungan hidupnya. Ruang air tanah adalah ruang darat di dalam bumi.

Tata ruang adalah wujud struktur ruang dan pola ruang. Struktur ruang adalah susunan pusat-pusat permukiman dan sistem jaringan prasarana dan sarana yang berfungsi sebagai pendukung kegiatan sosial ekonomi masyarakat yang secara hierarkis memiliki hubungan fungsional. Pola ruang adalah distribusi peruntukkan ruang dalam suatu wilayah yang meliputi peruntukkan ruang untuk fungsi lindung dan peruntukkan ruang untuk fungsi budi daya.

Berdasarkan UU No. 26 Tahun 2007 maka penyelenggaraan penataan ruang air tanah merupakan kegiatan-kegiatan yang meliputi pengaturan, pembinaan, pelaksanaan, dan pengawasan penataan ruang air tanah. Detail penyelenggaraan penataan ruang ditunjukkan dalam Gambar 8-3.



Gambar 8-3. Penyelenggaraan Penataan Ruang Air Tanah dan Substansi-Substansi Penting Yang Terkait (UU No. 26 Tahun 2007; PP No. 43 Tahun 2008)

8.3 Pelaksanaan Penataan Ruang Air Tanah

Mengacu UU No. 26 Tahun 2007, UU No. 7 Tahun 2004 dan PP No. 43 Tahun 2008 maka pelaksanaan penataan ruang air tanah dapat dikelompokkan menjadi:

- Perencanaan Tata Ruang Air Tanah
- Pemanfaatan Ruang dan Air Tanah
- Pengendalian dan Pengawasan Pemanfaatan Ruang dan Air Tanah

Perencanaan Tata Ruang Air Tanah terdiri atas Perencanaan Struktur Ruang Air Tanah dan Pola Ruang Air Tanah. Perencanaan struktur ruang berupa perencanaan akuifer baik yang bebas maupun yang tertekan di daerah CAT yang mempunyai *groundwater* dan *soil water*. Untuk daerah Non-CAT maka perencanaan berupa perencanaan terkait dengan keberadaan air tanah (*soil water*) pada *vadoze zone* saja. Perencanaan pola ruang adalah perencanaan CAT dan Non-CAT dalam suatu wilayah.

Pola ruang air tanah adalah distribusi peruntukkan ruang air tanah dalam suatu wilayah berupa Cekungan Air Tanah (CAT) dan Non-CAT. Untuk daerah CAT maka pola ruang air tanah diwujudkan dalam fungsi lindung pada daerah resapan air dan daerah budi daya untuk daerah lepasan air tanah. Untuk Non-CAT, karena di bawah *vadoze zone* tak ada *groundwater zone* maka pola ruang air tanah diwujudkan dalam fungsi lindung dan budidaya sekaligus memperhatikan aspek pengendalian rusak air tanah.

Pemanfaatan ruang dan air tanah mengacu pada fungsi ruang yang ditetapkan dalam pengelolaan air tanah (*groundwater* dan *soil water*) di daerah CAT dan pengelolaan *soil water* di daerah Non-CAT. Untuk pemanfaatan air tanah perlu disusun neraca penatagunaan air tanah (ketersediaan/*supply* dan kebutuhan/*demand*). Perlu diperhatikan sifat unik air tanah yaitu air tanah yang bersifat terbarukan/*renewable* dan air tanah yang bersifat tak terbarukan/*Non-renewable*. CAT tidak sama dengan batas hidrologis yang lainnya yaitu batas DAS bahkan batas WS. Demikian juga CAT tidak sama dengan batas administrasi.

Untuk suatu wilayah administrasi maka perlu dilakukan analisis detail terhadap peta cekungan air tanah yang telah dibuat dalam bentuk legal yaitu terbitnya KepPres No. 26 Tahun 2011.

Dalam pemanfaatan ruang maka perlu diperhatikan fungsi ruang air tanah untuk daerah resapan air dan daerah lepasan air tanah. Oleh karena itu dalam pemanfaatan ruang dan air tanah perlu dilakukan:

- a. perumusan kebijakan strategis operasionalisasi rencana tata ruang air tanah
- b. perumusan program dalam rangka perwujudan struktur dan pola ruang air tanah

Pemanfaatan ruang dan air tanah dilaksanakan sesuai dengan:

- a. standar pelayanan minimal bidang penataan ruang air tanah
- b. standar kualitas lingkungan daerah CAT dan Non-CAT
- c. daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup daerah CAT dan Non-CAT.

Pengendalian pemanfaatan ruang dan air tanah dilakukan melalui penetapan peraturan zonasi, perizinan pengambilan air tanah, pemberian insentif dan disinsentif, serta pengenaan sanksi.

Pengawasan pemanfaatan ruang dan air tanah ditujukan untuk pemanfaatan ruang air tanah dan pemanfaatan air tanah. Pemanfaatan ruang air tanah dimaksudkan agar terjaminnya distribusi peruntukan ruang air di daerah CAT sebagai daerah resapan air dan daerah lepasan air tanah sedangkan di daerah Non-CAT agar ketersediaan air tanah yang hanya dalam bentuk *soil water* bisa terjaga. Pengawasan pemanfaatan air tanah dimaksudkan agar dapat menjamin kesesuaian antara pelaksanaan pengelolaan air tanah dengan peraturan perundang-undangan. Kegiatan pengawasan penyelenggaraan air tanah meliputi pelaksanaan pengelolaan air tanah dalam aspek-aspek:

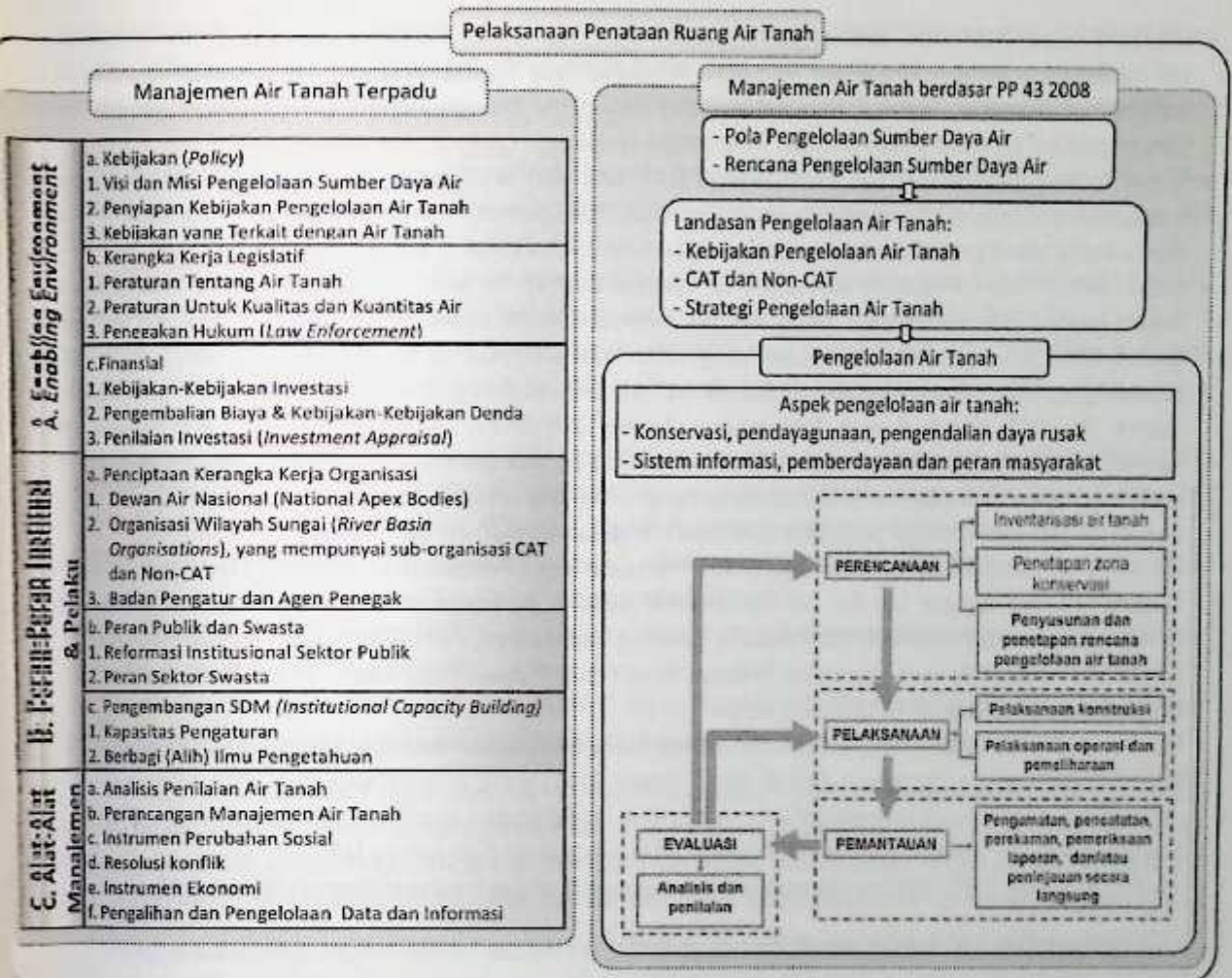
- konservasi air tanah,
- pendayagunaan air tanah,
- pengendalian daya rusak air tanah,
- sistem informasi air tanah, dan
- pemberdayaan masyarakat.

Pelaksanaan penataan ruang air tanah dapat diidentikkan dengan:

- Secara terpadu identik dengan manajemen air tanah sesuai uraian dalam Bab 6
- Secara normatif identik dengan manajemen air tanah berdasar PP No. 43 Tahun 2008.

Secara skematis pelaksanaan ruang air tanah ditunjukkan dalam Gambar 8-4.

Pelaksanaan kegiatan tersebut secara teknis perlu disesuaikan dengan perilaku air tanah, meliputi keterdapatan, penyebaran, potensi mencakup kuantitas dan kualitas air tanah serta kondisi lingkungan air tanah. Akan tetapi, karena air tanah terletak di dalam batuan, maka pembentukannya sudah barang tentu berkaitan erat dengan proses geologi, sehingga dalam pengaturan pengelolaannya perlu memperhatikan kaidah-kaidah geologi dan hidrogeologi. Pengaturan pengelolaan air tanah mencakup pengaturan perencanaan, pelaksanaan, pemantauan dan evaluasi terhadap penyelenggaraan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air tanah.



Gambar 8-4. Pelaksanaan Penataan Ruang Air Tanah

8.4 Harmoni Pengertian, Istilah dan Definisi

8.4.1 Umum

Dalam peraturan-perundangan yang berlaku di Indonesia banyak dijumpai pengertian, istilah dan definisi yang berbeda. Untuk hal tersebut perlu dilakukan harmonisasi, kesepakatan dan kesepahaman perbedaan yang terjadi. Sebagai contoh:

- Pengertian aspek pengelolaan dalam UU No. 7 Tahun 2004 yaitu Konservasi Sumber Daya Air terkait erat dengan istilah Kawasan Lindung dalam UU No. 26 Tahun 2007. Demikian pula Pendayagunaan Sumber Daya Air dalam UU No. 7 Tahun 2004 terkait dengan Kawasan Budi Daya dalam UU No. 26 Tahun 2007.

- UU No. 7 Tahun 2004 menyebutkan perlu dibuat Pola Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai. Hal ini sepadan dengan kewajiban membuat Rencana Tata Ruang Wilayah yang berbasis wilayah administrasi (Nasional, Provinsi, Kabupaten/Kota) dalam UU No. 26 Tahun 2007. Dalam UU No. 41 Tahun 1999 hal tersebut terkait dengan Pengurusan Hutan.
- Untuk sumber daya air ada batas teknis yaitu DAS, CAT dan WS. Sedangkan untuk penataan ruang menggunakan batas administrasi (Nasional, Provinsi, Kabupaten/Kota). Untuk wilayah pesisir perlu dibuat batas teknis pengelolaannya misalnya Satuan Wilayah Pesisir (Pantai) atau *coastal cell*.
- Untuk daerah Non-CAT belum ada acuan formalnya. Daerah ini perlu diatur dalam bentuk produk hukum karena luas wilayahnya untuk seluruh Indonesia lebih besar dibandingkan daerah CAT. Di daerah Non-CAT ada banyak persoalan yang telah nyata terjadi di seluruh Indonesia. Dari aspek geomorfologi fluvial dapat disebutkan bahwa Daerah CAT adalah daerah *regime channel* sedangkan daerah Non-CAT adalah daerah *Non-regime channel* (Schumm, 2005). Salah satu permasalahan penting yang terjadi adalah di daerah Non-CAT sering terjadi bencana longsor yang besar dengan jumlah kerugian jiwa dan harta benda yang besar. Ada pernyataan yang menarik yaitu bukit atau daerah longsor selalu terjadi pada saat tanahnya mengalami jenuh air (*saturated*).
- UU No. 7 Tahun 2004 mengamanatkan untuk membuat Pola Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai. Padanan dengan UU No. 26 Tahun 2007 adalah pembuatan rencana tata ruang wilayah (RTRW) dengan batas administrasi (nasional, provinsi, kabupaten, kota). Padanan dengan UU No. 27 Tahun 2007 adalah Rencana Strategis Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil. Sedangkan dengan UU No. 41 Tahun 1999 adalah Pengurusan Hutan.
- UU No. 26 Tahun 2007 Tentang Penataan Ruang mengamanatkan bahwa dalam penatagunaan air, dikembangkan pola pengelolaan daerah aliran sungai (DAS) yang melibatkan dua atau lebih wilayah administrasi provinsi dan kabupaten/kota serta untuk menghindari konflik antar daerah hulu dan hilir. Hal ini disebabkan dalam UU ini Wilayah Sungai tidak dikenal namun hanya DAS.
- UU No. 41 Tahun 1999 Tentang Kehutanan tidak mengenal wilayah sungai namun hanya DAS.

Urutan kegiatan berdasarkan beberapa UU yang berlaku ditunjukkan dalam Tabel 8-1.

Tabel 8-1. Urutan kegiatan berdasar UU

UU No. 7/2004	UU No. 26/2007	UU No. 27/2007	UU No. 41/1999
Pola PSDA WS	RTRW	RenStra Wilayah Pesisir	Pengurusan Hutan
-Pola PSDA	Penyelenggaraan	-Perencanaan	-Perencanaan
-Rencana PSDA	Penatan Ruang:	~Rencana Strategis	-Kehutanan
-Studi Kelayakan	-Pengaturan,	~Rencana Zonasi	-Pengelolaan hutan
-Penyusunan	-Pembinaan	~Rencana Pengelolaan	-Penelitian &
Program	-Pelaksanaan:	~Rencana Aksi Pengelolaan	Pengembangan
-DED (Renc. Detail)	~Perencanaan	-Pemanfaatan	-Pendidikan &
-Pelaks. konstruksi	~Pemanfaatan	-Pengendalian & Pengawasan	Pelatihan,
-O & P	~Pengendalian		Penyuluhan
	-Pengawasan		Kehutanan
			-Pengawasan

Kata "pengelolaan" bila dilihat dari beberapa UU dan peraturan yang lain ternyata mempunyai pengertian, definisi dan pemakaian yang berbeda-beda. Dengan kata lain penggunaan kata tersebut

dalam peraturan perundangan tidak sesuai dan tidak konsisten sesuai dengan kaidah-kaidah dalam Bahasa Indonesia. Perbedaan tersebut diuraikan berikut ini.

UU No. 7 Tahun 2004 menyebutkan bahwa:

- Pengelolaan Sumber Daya Air adalah upaya merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi penyelenggaraan konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air, dan pengendalian daya rusak air.
- Sumber daya air dikelola berdasarkan asas kelestarian, keseimbangan, kemanfaatan umum, keterpaduan dan keserasian, keadilan, kemandirian, serta transparansi dan akuntabilitas.
- Sumber daya air dikelola secara menyeluruh, terpadu, dan berwawasan lingkungan hidup dengan tujuan mewujudkan kemanfaatan sumber daya air yang berkelanjutan untuk sebesar-besar kemakmuran rakyat.
 - menyeluruh mencakup semua bidang pengelolaan yang meliputi konservasi, pendayagunaan, dan pengendalian daya rusak air, serta meliputi satu sistem wilayah pengelolaan secara utuh yang mencakup semua proses perencanaan, pelaksanaan serta pemantauan dan evaluasi.
 - terpadu merupakan pengelolaan yang dilaksanakan dengan melibatkan semua pemilik kepentingan antar sektor dan antar wilayah administrasi.
 - berwawasan lingkungan hidup adalah pengelolaan yang memperhatikan keseimbangan ekosistem dan daya dukung lingkungan.
 - berkelanjutan adalah Pengelolaan Sumber Daya Air yang tidak hanya ditujukan untuk kepentingan generasi sekarang tetapi juga termasuk untuk kepentingan generasi yang akan datang.

UU No. 27 Tahun 2007 menyebutkan bahwa: Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil adalah suatu proses perencanaan, pemanfaatan, pengawasan, pengendalian Sumber Daya Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil antarsektor, antara Pemerintah dan Pemerintah Daerah, antara ekosistem darat dan laut, serta antara ilmu pengetahuan dan manajemen untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat.

Pengelolaan lingkungan hidup adalah upaya terpadu untuk melestarikan fungsi lingkungan hidup yang meliputi kebijaksanaan penataan, pemanfaatan, pengembangan, pemeliharaan, pemulihan, pengawasan, dan pengendalian lingkungan hidup. Pengelolaan risiko meliputi evaluasi risiko atau seleksi risiko yang memerlukan pengelolaan, identifikasi pilihan pengelolaan risiko, pemilihan tindakan untuk pengelolaan, dan pengimplementasian tindakan yang dipilih (UU No. 23 Tahun 1997).

Menurut UU 32 Tahun 2009 perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup adalah upaya sistematis dan terpadu yang dilakukan untuk melestarikan fungsi lingkungan hidup dan mencegah terjadinya pencemaran dan/atau kerusakan lingkungan hidup yang meliputi perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pemeliharaan, pengawasan, dan penegakan hukum.

Pengelolaan sampah adalah kegiatan yang sistematis, menyeluruh, dan berkesinambungan yang meliputi pengurangan dan penanganan sampah (UU No. 18 Tahun 2008).

Pengelolaan jaringan irigasi adalah kegiatan yang meliputi O & P serta rehabilitasi jaringan irigasi di daerah irigasi (PP No. 20 Tahun 2006).

Pengelolaan air tanah adalah upaya merencanakan, melaksanakan, memantau, mengevaluasi penyelenggaraan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air tanah (PP No. 43 Tahun 2008).

Pengelolaan hutan meliputi kegiatan: a. tata hutan dan penyusunan rencana pengelolaan hutan, b. pemanfaatan hutan dan penggunaan kawasan hutan, c. rehabilitasi dan reklamasi hutan, dan d. perlindungan hutan dan konservasi alam (UU No. 41 Tahun 1999).

Pengelolaan DAS adalah upaya manusia dalam mengatur hubungan timbal balik antara sumberdaya alam dengan manusia di dalam DAS dan segala aktivitasnya, agar terwujud kelestarian dan keserasian ekosistem serta meningkatnya kemanfaatan sumberdaya alam bagi manusia secara berkelanjutan (PP No. 37 Tahun 2012 Tentang Pengelolaan DAS).

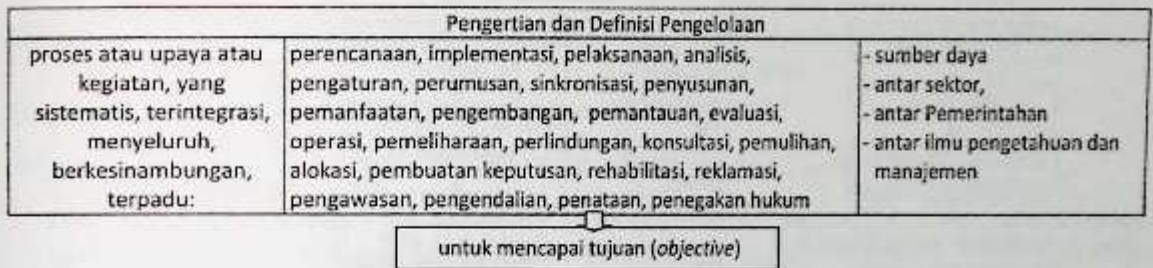
Pengelolaan DAS Terpadu adalah rangkaian upaya perumusan tujuan, sinkronisasi program, pelaksanaan dan pengendalian pengelolaan sumber daya DAS lintas para pemangku kepentingan secara partisipatif berdasarkan kajian kondisi biofisik, ekonomi, sosial, politik dan kelembagaan guna mewujudkan tujuan Pengelolaan DAS.

Pengelolaan perikanan adalah semua upaya, termasuk proses yang terintegrasi dalam pengumpulan informasi, analisis, perencanaan, konsultasi, pembuatan keputusan, alokasi sumber daya ikan, dan implementasi serta penegakan hukum dari peraturan perundang-undangan di bidang perikanan, yang dilakukan oleh pemerintah atau otoritas lain yang diarahkan untuk mencapai kelangsungan produktivitas sumber daya hayati perairan dan tujuan yang telah disepakati (UU No. 31 Tahun 2004 Tentang Perikanan).

UU Persungai Jepang mendefinisikan pengelolaan sungai adalah segala usaha yang dilaksanakan untuk memanfaatkan potensi sungai, memelihara fungsi sungai dan mencegah terjadinya bencana yang ditimbulkan oleh sungai (Sosrodarsono dan Tominaga, 1985). Cakupan dari pengelolaan sungai sangat luas diantaranya:

- Perbaikan dan pengaturan sungai.
- Pengoperasian bangunan-bangunan sungai.
- Pengendalian administratif seperti pembatasan atau pelarangan atas kegiatan-kegiatan yang dapat memberikan dampak negatif terhadap fungsi sungai.
- Pemberian izin atas pemanfaatan sungai.
- Pemberian tanda batas-batas daerah sungai.

Berdasarkan beberapa peraturan-perundangan tersebut maka pengertian pengelolaan dirangkum dalam gambar berikut.



Gambar 8-5. Pengertian dan definisi pengelolaan berdasarkan peraturan perundang-undangan

Berdasar uraian tersebut dan Tabel 8-1 untuk pengertian “pengelolaan” maka perlu harmoni, integrasi, kesepahaman dan kesepakatan tentang penggunaan, pengertian istilah dan definisi kata atau kalimat yang dipakai.

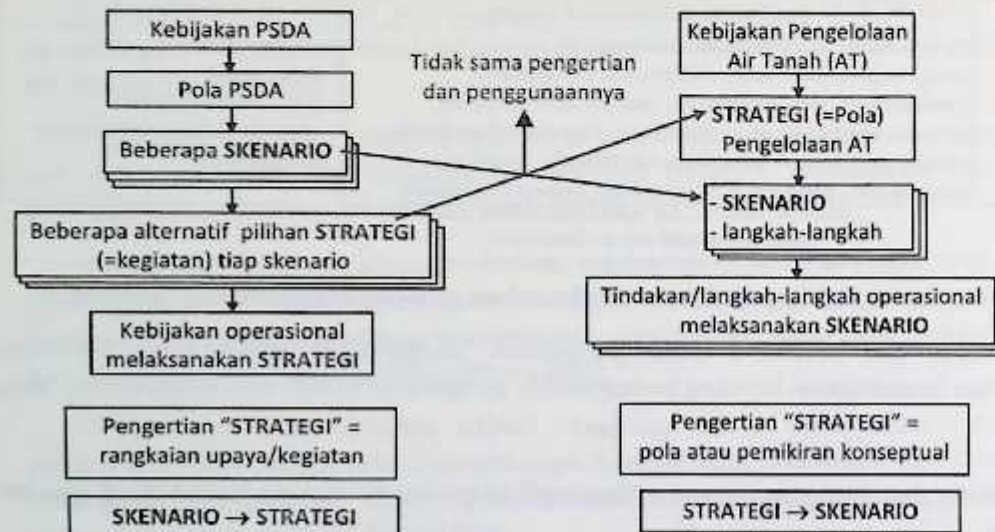
8.4.2 Perbedaan Pengertian dan Penggunaan Kata “Strategi” Menurut PP No. 42 Tahun 2008 dan PP No. 43 Tahun 2008

PP No. 42 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sumber Daya Air (PSDA) dan PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah telah berlaku sejak tanggal diundangkan. Kedua PP tersebut berdasarkan UU No. 7 Tahun 2004 Tentang Sumber Daya Air. Untuk PP No. 42 Tahun 2008 inisiator/fasilitator pembuat adalah Departemen PU dan PP No. 43 Tahun 2008 inisiator pembuat adalah Departemen ESDM.

Setelah mencermati isi dari kedua PP tersebut ditemukan arti dan penggunaan kata “strategi” yang berbeda dalam PP No. 42 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sumber Daya Air dan dalam PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah, sebagai berikut:

1. Menurut PP No. 42 Tahun 2008 “strategi” merupakan rangkaian upaya atau kegiatan (Lihat Penjelasan Huruf d. Pasal 16)
2. Menurut PP No. 43 Tahun 2008 “strategi” merupakan kerangka dasar. Hal ini dapat dibaca dalam Ayat (1) Pasal 13 yang menyebutkan bahwa strategi pengelolaan air tanah merupakan kerangka dasar dalam merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kegiatan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air tanah pada cekungan air tanah.
3. Menurut UU No. 7 Tahun 2004 dan PP No. 42 Tahun 2008 “Pola” adalah kerangka dasar. Hal ini dapat dilihat dalam Angka 8. Pasal 1 UU No. 7 Tahun 2004 dan Angka 8. Pasal 1 PP No. 42 Tahun 2008 yang menyebutkan bahwa: Pola pengelolaan sumber daya air adalah kerangka dasar dalam merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kegiatan konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air, dan pengendalian daya rusak air.
4. Berdasar 2. dan 3. Maka “strategi” berdasar PP No. 43 Tahun 2008 berarti juga “pola”
5. Penggunaan “strategi” dalam PP No. 42 Tahun 2008 adalah setelah skenario (skenario → strategi)
6. Penggunaan “strategi” dalam PP No. 43 Tahun 2008 adalah sebelum skenario (strategi → skenario).

Penjelasan keenam hal di atas ditunjukkan dalam Gambar 8-5 dan diuraikan dengan detail sebagai berikut.



a. Strategi menurut PP No. 42 Tahun 2008

b. Strategi menurut PP No. 43 Tahun 2008

Gambar 8-6. Perbedaan pengertian dan penggunaan kata "strategi"

1. Berdasar PP No. 42 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sumber Daya Air

Beberapa hal yang terkait dengan strategi adalah sebagai berikut:

Rancangan pola PSDA memuat (Pasal 16 PP No. 42 Tahun 2008):

- a. tujuan PSDA pada wilayah sungai yang bersangkutan;
- b. dasar pertimbangan yang digunakan dalam melakukan PSDA;
 Dasar yang digunakan dalam melakukan PSDA, antara lain mencakup analisis kondisi yang ada, asumsi, standar, dan kriteria. Asumsi, standar, dan kriteria tersebut perlu ditetapkan secara jelas sehingga analisis dan perhitungan yang dilakukan mempunyai dasar yang jelas. Kejelasan tersebut diperlukan dalam penyusunan skenario, strategi, dan evaluasi pelaksanaan PSDA.
- c. beberapa skenario kondisi wilayah sungai;
 Skenario kondisi wilayah sungai merupakan asumsi tentang kondisi pada masa yang akan datang yang mungkin terjadi, misalnya, kondisi perekonomian, perubahan iklim, atau perubahan politik
- d. alternatif pilihan strategi PSDA untuk setiap skenario sebagaimana dimaksud pada huruf c
 Strategi PSDA merupakan rangkaian upaya atau kegiatan pengelolaan sumber daya air untuk mencapai tujuan PSDA sesuai dengan skenario kondisi wilayah sungai
- e. kebijakan operasional untuk melaksanakan strategi PSDA.
 Yang dimaksud dengan "kebijakan operasional" adalah arahan pokok untuk melaksanakan strategi PSDA yang telah ditentukan, misalnya, arahan pokok yang harus dituangkan dalam substansi peraturan perundang-undangan yang harus disusun sebagai instrumen untuk:
 - a. penghematan penggunaan air, antara lain, penerapan tarif progresif; dan
 - b. mendukung upaya konservasi sumber daya air, antara lain, baku mutu air limbah yang boleh dibuang ke perairan umum

Warna biru berarti
PENJELASAN

Berdasarkan uraian di atas maka strategi dapat diartikan sebagai rangkaian upaya atau kegiatan.

2. Berdasar PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah

Beberapa hal yang terkait dengan strategi adalah sebagai berikut:

1. PSDA adalah upaya merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi penyelenggaraan konservasi sumberdaya air, pendayagunaan sumber daya air, dan pengendalian daya rusak air (No. 6 Pasal 1 PP No. 42 Tahun 2008; No. 6 Pasal 1 UU No. 7 Tahun 2004).
2. Pola PSDA adalah kerangka dasar dalam merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kegiatan konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air, dan pengendalian daya rusak air (No. 8. Pasal 1 PP No. 42 Tahun 2008; No. 8 Pasal 1 UU No. 7 Tahun 2008).
3. Pengelolaan air tanah adalah upaya merencanakan, melaksanakan, memantau, mengevaluasi penyelenggaraan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air tanah (No. 7 Pasal 1 PP No. 43 Tahun 2008)
4. Strategi pengelolaan air tanah merupakan kerangka dasar dalam merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kegiatan konservasi air tanah, pendayagunaan air tanah, dan pengendalian daya rusak air tanah pada CAT {Ayat (1) Pasal 13 PP No. 43 Tahun 2008}

Berdasarkan butir-butir di atas maka dapat disebutkan bahwa strategi PSDA adalah kerangka dasar dalam merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kegiatan konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air, dan pengendalian daya rusak air, atau dapat disebutkan bahwa strategi PSDA adalah pola PSDA

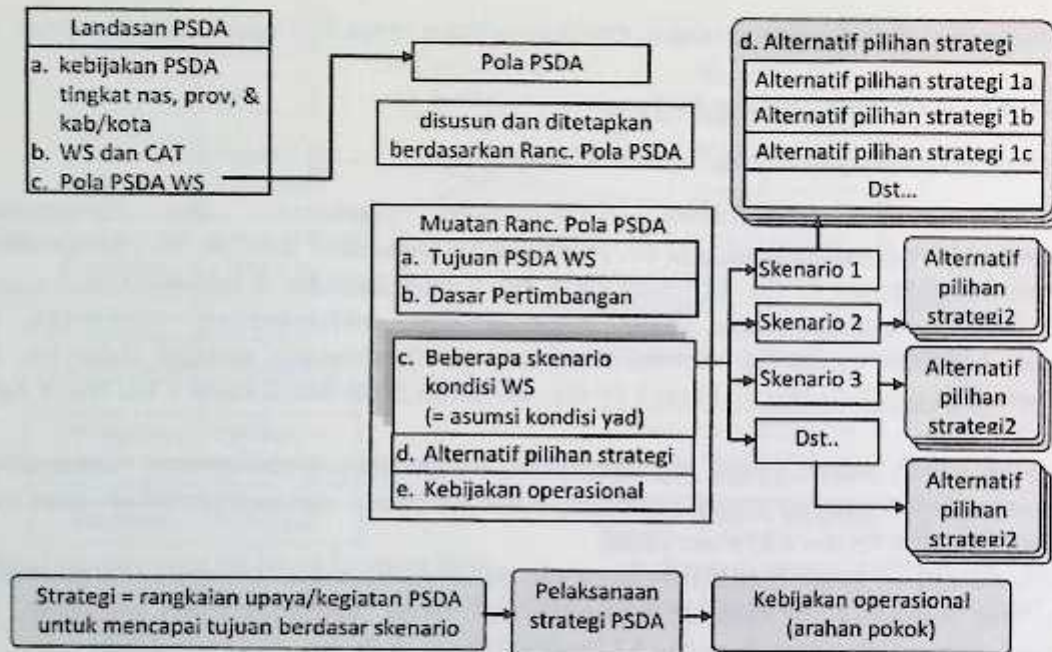
→ strategi = pola.

Pengertian lain tentang strategi ditunjukkan berikut ini.

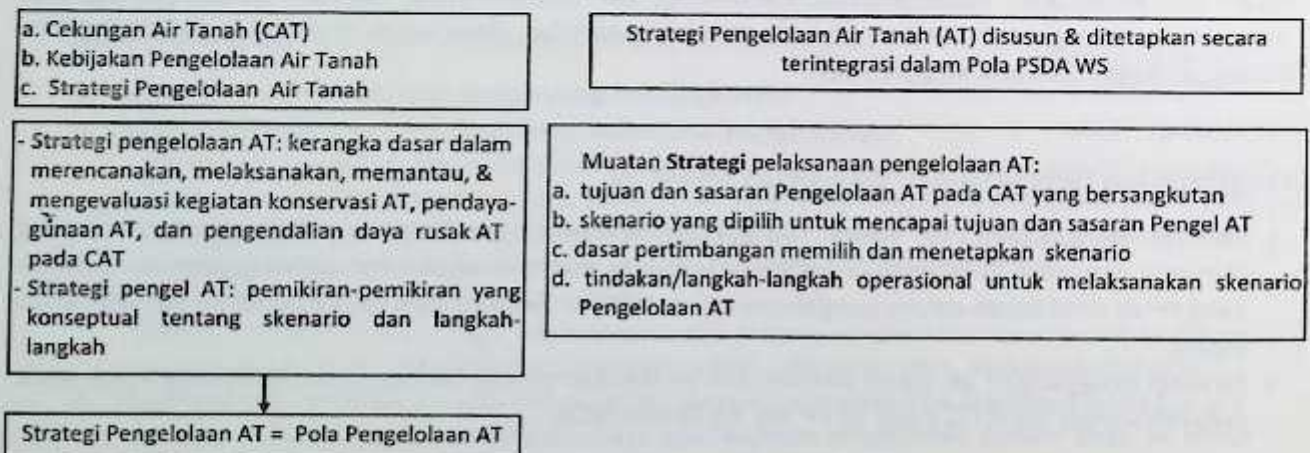
- Strategi pengelolaan air tanah merupakan pemikiran-pemikiran yang konseptual tentang skenario dan langkah-langkah untuk mencapai atau mempercepat pencapaian tujuan dan sasaran yang telah ditetapkan dalam pengelolaan air tanah {Penjelasan Ayat (1) Pasal 13 PP No. 43 Tahun 2008}.
- Strategi pengelolaan air tanah disusun dan ditetapkan secara terintegrasi dalam pola PSDA pada wilayah sungai {Ayat (2) Pasal 13 PP No. 43 Tahun 2008}.

3. Strategi dan hal-hal terkait yang diilustrasikan dalam bentuk Diagram

Perbedaan dan penggunaan strategi menurut PP No. 42 Tahun 2008 dan PP No. 43 Tahun 2008 ditunjukkan dalam Gambar 8-7.



a. "Strategi" berdasar PP No. 42 Tahun 2008 Tentang PSDA



b. "Strategi" berdasar PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah

Gambar 8-7. Pengertian "strategi" menurut PP No. 42 Tahun 2008 dan PP No. 43 Tahun 2008

Oleh karena itu perlu dilakukan klarifikasi dan penjelasan dari pihak yang berwenang tentang pengertian dan penggunaan kata "strategi" yang berbeda tersebut agar implementasi kedua PP tersebut tidak menimbulkan kerancuan dan dapat dipahami oleh semua pihak. Hal ini disebabkan dasar acuan yang dipakai kedua PP tersebut adalah sama yaitu UU No. 7 Tahun 2004 Tentang Sumber Daya Air.

Klarifikasi dan penjelasan tersebut harus bersifat formal dan resmi, misalnya dalam bentuk produk hukum. Pihak yang berwenang dalam hal ini bisa Dewan Sumber Daya Air Nasional.

8.5 Wilayah Sungai (WS) dan Cekungan Air Tanah (CAT)

8.5.1 Aspek Legal

Sesuai ketentuan dalam peraturan yang ada air tanah merupakan bagian dari sumber daya air. Sumber daya air dikelola berdasar WS dan air tanah (*groundwater*) dikelola berdasar CAT. Oleh karena itu CAT harus berada dalam WS. Uraian tersebut dijelaskan berikut ini.

No. 1 s/d No. 4 Pasal 1 UU No. 7 Tahun 2004 Tentang SD Air menyatakan bahwa:

- Sumber daya air adalah air, sumber air, dan daya air yang terkandung didalamnya.
- Air adalah semua air yang terdapat pada, di atas ataupun di bawah permukaan tanah, termasuk dalam pengertian ini air permukaan, air tanah, air hujan, dan air laut yang berada di darat.
- Air permukaan adalah semua air yang terdapat pada permukaan tanah.
- Air tanah adalah air yang terdapat dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan tanah.

No. 10 s/d No. 12 Pasal 1 UU No. 7 Tahun 2004 Tentang SD Air menyatakan bahwa:

- Wilayah sungai adalah kesatuan wilayah Pengelolaan Sumber Daya Air dalam satu atau lebih daerah aliran sungai dan/atau pulau-pulau kecil yang luasnya kurang dari atau sama dengan 2.000 km².
- Daerah aliran sungai adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan, dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alami, yang batas di darat merupakan pemisah topografis dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan.
- Cekungan air tanah adalah suatu wilayah yang dibatasi oleh batas hidrogeologis, tempat semua kejadian hidrogeologis seperti proses pengimbuhan, pengaliran, dan pelepasan air tanah berlangsung.

Isi Ayat (2) Pasal 11 UU No. 7 Tahun 2004 dan Penjelasan Ayat (2) adalah:

- Isi Ayat (2): Pola Pengelolaan Sumber Daya Air sebagaimana dimaksud pada Ayat (1) disusun berdasarkan wilayah sungai dengan prinsip keterpaduan antara air permukaan dan air tanah.
- Penjelasan Ayat (2): Prinsip keterpaduan antara air permukaan dan air tanah diselenggarakan dengan memperhatikan wewenang dan tanggungjawab masing-masing instansi sesuai dengan tugas pokok dan fungsinya.

Isi Ayat (1) dan Ayat (2) Pasal 12 UU No. 7 Tahun 2004:

- (1) Pengelolaan air permukaan didasarkan pada wilayah sungai.
- (2) Pengelolaan air tanah didasarkan pada cekungan air tanah.

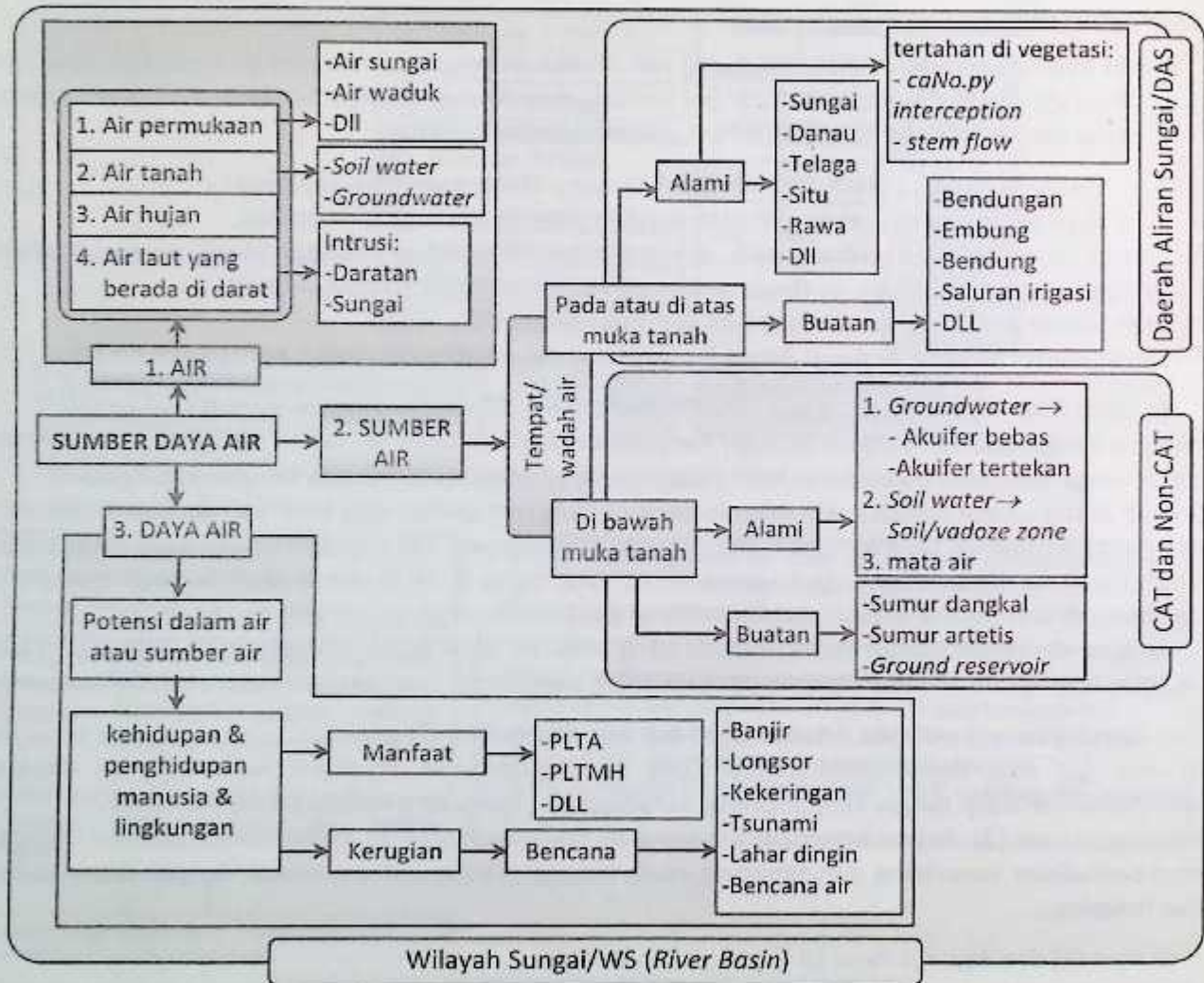
Isi Ayat (1) Pasal 13 UU No. 7 Tahun 2004: Wilayah sungai dan cekungan air tanah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 12 Ayat (1) dan Ayat (2) ditetapkan dengan keputusan presiden.

Dari uraian isi peraturan tersebut maka dapat disimpulkan bahwa:

- Pengelolaan Sumber Daya Air berdasarkan wilayah sungai (WS)

- Air tanah adalah bagian dari Sumber Daya Air
- Pengelolaan air tanah berdasarkan cekungan air tanah (CAT)
- CAT harus berada dalam WS

Uraian tersebut ditunjukkan dalam Gambar 8-8.



Gambar 8-8. Sumber daya air, komponennya, Wilayah Sungai (WS), Daerah Aliran Sungai (DAS), Cekungan Air Tanah (CAT) dan Non-CAT

8.5.2 Aspek Teknis

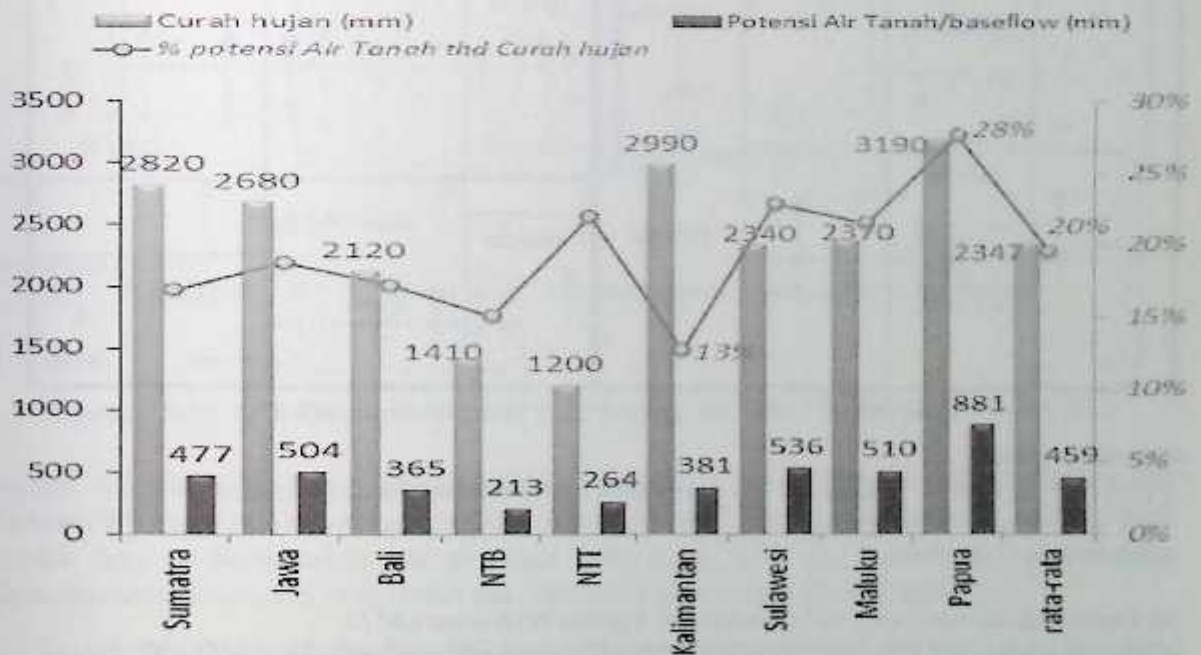
Siklus hidrologi baik di daerah CAT maupun Non-CAT telah dijelaskan di Sub-Bab 2.6. Air tanah (*groundwater*) dalam CAT akan mengisi sungai dalam bentuk *base flow*. Sedangkan air tanah (*soil water*) akan mengisi sungai dalam bentuk *interflow*.

Pada waktu musim kemarau air yang masih mengalir secara kontinyu adalah merupakan air tanah (baik *soil water* maupun *groundwater*) dalam bentuk *interflow* dan *base flow*.

Maka untuk *base flow* sering disebut dengan berbagai istilah diantaranya (Kendall & McDonnel, 1998):

- Aliran sungai musim kemarau (*drought flow*).
- Aliran rendah (*low flow*).
- Aliran air rendah (*low water flow*).
- Debit aliran rendah (*low flow discharge*).
- Aliran permukaan (*run-off*) berkelanjutan (*sustained*).
- Aliran permukaan musim sedang/secukupnya (*fair weather run-off*).

Di daerah CAT, potensi *base flow* CAT ditunjukkan dalam Gambar 8-9.



Gambar 8-9. Curah hujan tahunan (mm), potensi air tanah tahunan sebagai base flow (mm) dan persen potensi air tanah terhadap curah hujan

Dari Gambar 8-9 dapat dilihat bahwa potensi air tanah cukup besar. Dibandingkan dengan curah hujan tahunan maka dapat disimpulkan bahwa:

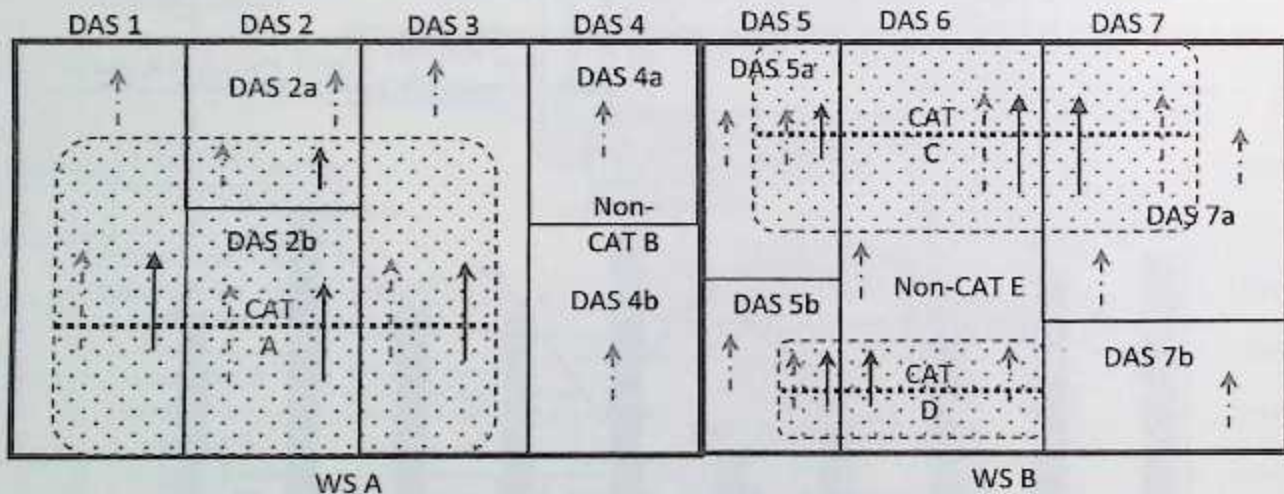
- Potensi air tanah terendah adalah 213 mm ada di NTB.
- Potensi air tanah tertinggi adalah 881 mm ada di Papua.
- Rata-rata potensi air tanah adalah 459 mm.

Bila dibandingkan potensi air tanah tahunan dengan curah hujan tahunan (100%) dapat disimpulkan bahwa:

- Yang terendah adalah 13% ada di Kalimantan.
- Yang tertinggi adalah 28% ada di Papua.
- Rata-rata 20%.

Dari uraian tersebut dapat dilihat bahwa peranan air tanah cukup besar terhadap keberadaan air. Rata-rata 20% selama setahun dalam pulau-pulau besar akan menjadi andalan utama ketersediaan air pada musim kemarau.

Kondisi ideal dari WS, CAT ditunjukkan dalam Gambar 8-10.



Keterangan gambar:

- ⊞ CAT
- DAS
- ▭ WS
- Batas daerah imbuhan & daerah lepasan CAT
- ↑ baseflow
- ↑ interflow

- WS A terdiri atas DAS-DAS 1 s/d 4, CAT A dan Non-CAT B (semua WS A di luar CAT A)
- WS B terdiri atas DAS-DAS 5 s/d 7, CAT C, CAT D dan Non-CAT E (semua WS B di luar CAT C dan CAT D)
- DAS 2 terdiri atas DAS 2a dan DAS 2b
- DAS 4 terdiri atas DAS 4a dan DAS 4b
- DAS 5 terdiri atas DAS 5a dan DAS 5b
- DAS 7 terdiri atas DAS 7a dan DAS 7b
- Di daerah CAT, DAS diisi oleh *baseflow* dan *interflow*
- Di daerah Non-CAT, DAS diisi oleh *interflow*

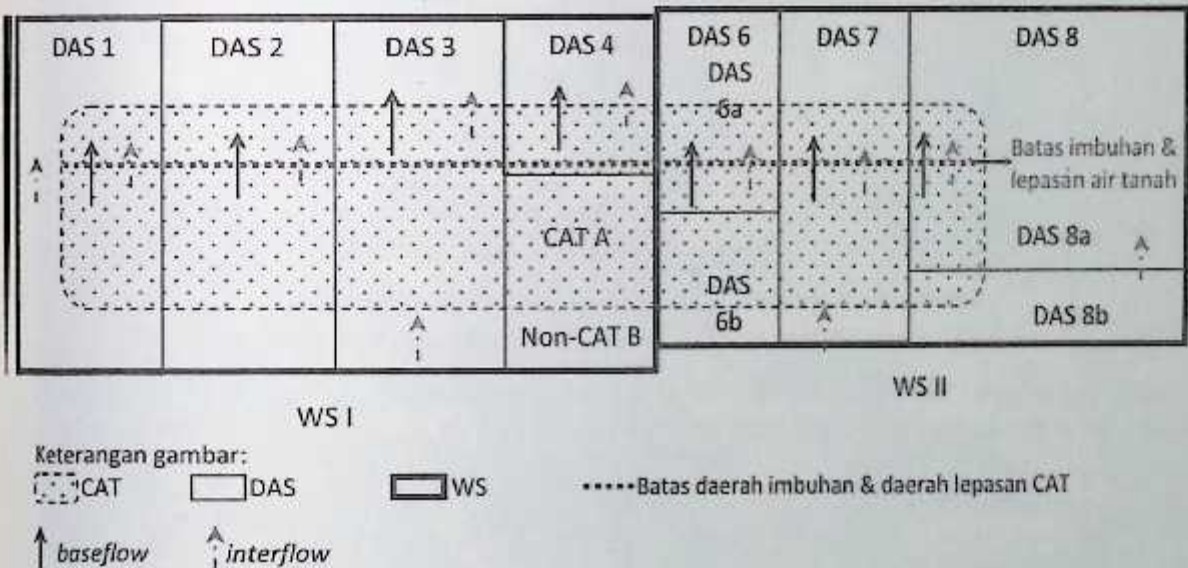
Gambar 8-10. Skema ideal pembagian WS, DAS, CAT dan Non-CAT yang sesuai peraturan

Melihat Gambar 8-10 maka CAT A mengisi DAS 1, DAS 2 dan DAS 3 dalam bentuk *baseflow* dan *interflow*, DAS-DAS 4, 4a dan 4b diisi oleh Non-CAT B dalam bentuk *interflow*. Proses ini dapat disebutkan bahwa air tanah mengisi air permukaan dengan WS A sebagai batas teknis pengelolaan untuk sumber daya air.

Demikian pula untuk DAS-DAS dalam WS B yang diisi oleh CAT C, CAT D dan Non-CAT E dalam satu kesatuan pengelolaan sumber daya air dalam WS II.

Kondisi ini sesuai dengan ketentuan dan definisi dalam UU No. 7 Tahun 2004, PP No. 42 Tahun 2008, PP No. 43 Tahun 2008 serta KepPres No. 26 Tahun 2011.

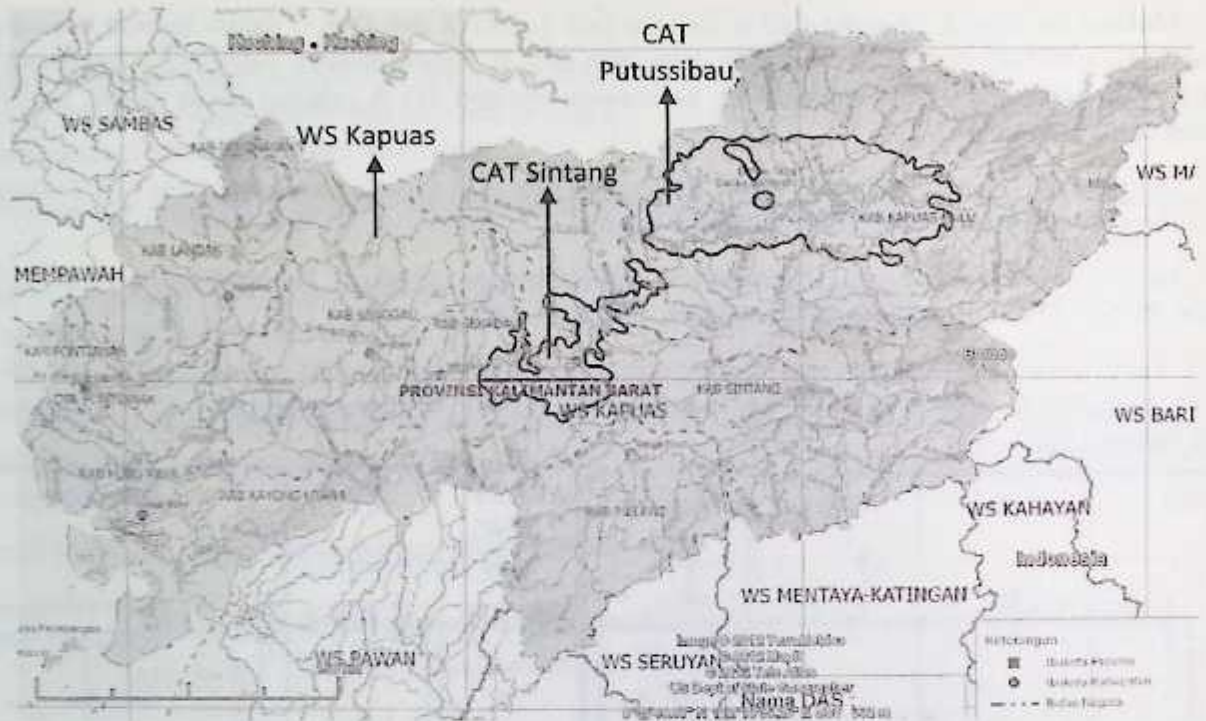
Pada kenyataannya di lapangan dan mengacu pada pembagian daerah CAT sesuai KepPres No. 26 Tahun 2011, banyak CAT yang melewati lebih dari satu WS. Berikut ini dalam Gambar 8-11 ditunjukkan satu CAT dalam 2 WS.



Gambar 8-11. CAT A mengisi DAS-DAS 1 s/d 4 dalam WS I dan DAS-DAS 6 s/d 8 dalam WS II

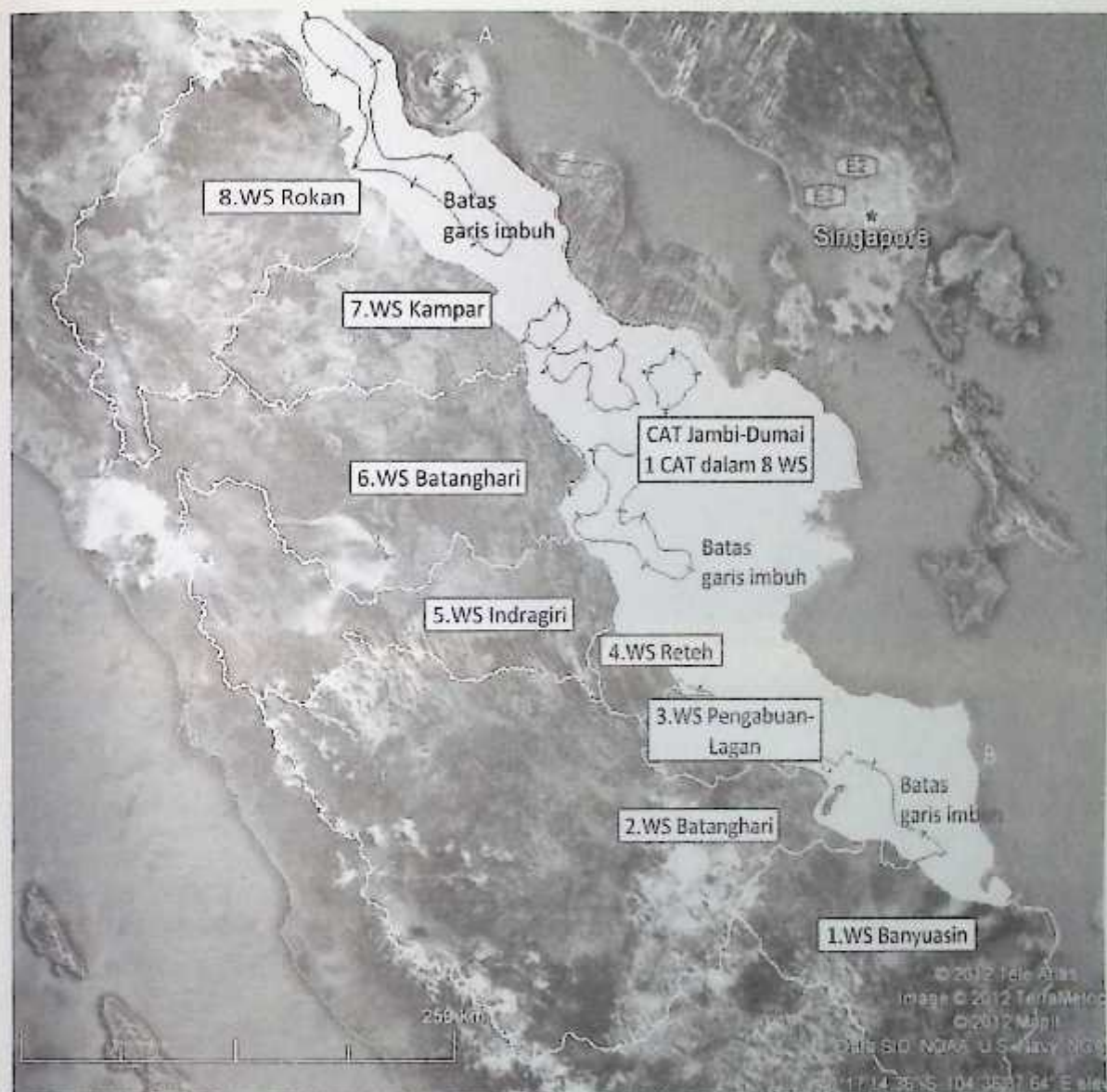
Melihat Gambar 8-11 dapat diketahui bahwa pengelolaan sumber daya air tidak lagi dalam satu kesatuan WS karena CAT A mengisi DAS-DAS di WS I dan WS II. Agar menjadi satu kesatuan pengelolaan sumber daya air berdasarkan wilayah sungai maka kondisi WS I dan II dalam Gambar 8-11 harus digabung menjadi satu WS yang terdiri atas: DAS-DAS 1 s/d 8 dengan satu CAT yaitu CAT A.

Contoh WS, DAS, CAT dan Non-CAT sesuai ketentuan uraian tersebut dan sesuai Gambar 8-8 dan Gambar 8-10 diilustrasikan dalam Gambar 8-12.

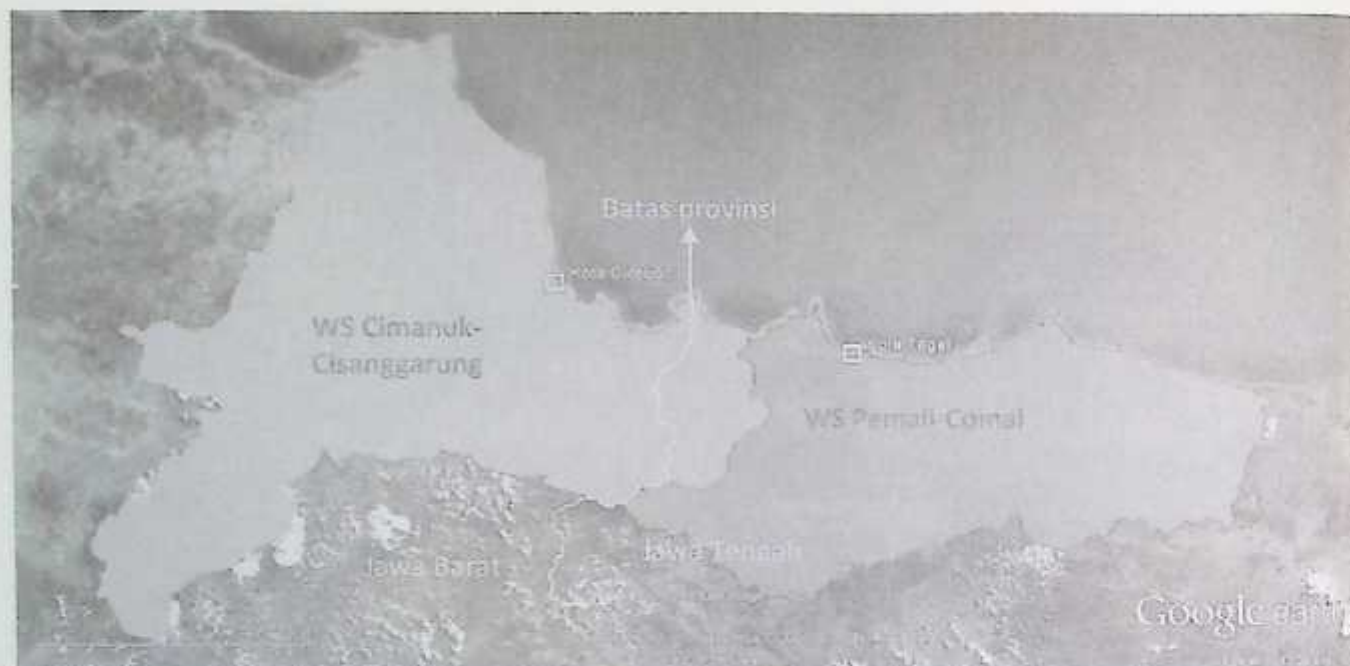


**Gambar 8-12. WS dan CAT yang sesuai ketentuan peraturan
→ 2 CAT dalam WS Kapuas di Kalimantan Barat (Dit Bina PSDA, 2011)**

Contoh pembagian WS dan CAT yang tidak sesuai ditunjukkan dalam Gambar 8-13 untuk Pulau Sumatra dan dalam Gambar 8-14 untuk Pulau Jawa.



Gambar 8-13. WS dan CAT yang tidak sesuai dengan ketentuan peraturan dan dengan ilustrasi pada Gambar 8-8 → ada tujuh buah WS, yaitu: 1. WS Banyuasin, 2. WS Batang hari, 3. WS Reth, 4. Batanghari, 5. WS Indragiri, 6. WS Siak dan 7. WS Rokan ada dalam satu CAT yaitu CAT Jambi-Dumai
 Dalam Gambar 8-13 dapat dilihat bahwa satu CAT mengisi DAS-DAS dalam 8 WS.



a. Wilayah Sungai (WS) Cimanuk-Cisanggarung dan WS Pemali-Comal



b. DAS-DAS dalam WS Cimanuk-Cisanggarung dan WS Pemali-Comal



c. CAT Tegal-Brebes dalam dua WS, tidak sesuai peraturan

Gambar 8-14. WS dan CAT di Jawa yang tak sesuai peraturan

Dalam Gambar 8-14 dapat dilihat bahwa CAT Tegal-Brebes mengisi DAS-DAS baik Dalam WS Cimanuk-Cisanggarung maupun DAS-DAS dalam WS Pemali-Comal.

Dari Gambar 8-13 dan Gambar 8-14 dapat disimpulkan bahwa pengelolaan sumber daya air dalam satu WS tidak berlaku.

Selain contoh yang tidak sesuai dalam Gambar 8-13 dan Gambar 8-14, untuk seluruh ruang darat Indonesia masih banyak hubungan sumber daya air dengan air tanah serta WS dan CAT yang tidak konsisten dengan kaidah teknis sesuai kondisi alamnya dan tidak sesuai dengan peraturan yang telah ditetapkan

Oleh karena itu penentuan WS dan CAT menjadi sangat penting dalam perhitungan ketersediaan air di suatu daerah. Bila CAT ada di dalam WS perhitungan akan lebih mudah dan prediksi ketersediaan air akan lebih akurat. Namun apabila CAT terdiri atas 2 atau lebih WS maka ada kesalahan yang cukup besar untuk ketersediaan air setiap WS. Padahal, sesuai peraturan pengelolaan sumber daya air berdasarkan wilayah sungai.

Maka pembagian WS, CAT dan juga DAS harus lebih teliti dan diawali dengan kaidah teknis keberadaan CAT, Non-CAT, DAS dan WS.

Ketentuan antara PerMen PU 11A Tahun 2006 tentang WS (yang telah direvisi menjadi KepPres No. 12 Tahun 2012) dan KepPres Tahun No. 26 Tahun 2011 tidak konsisten dan tidak sesuai dengan isi dari UU No. 7 Tahun 2004 terutama Pasal 1 dan Pasal 12. Alangkah baiknya isi peraturan-peraturan dibuat

konsisten terutama dengan isi peraturan di atasnya (dengan hierarki yang lebih tinggi) serta dengan kaidah teknis.

Opsi untuk perbaikan agar WS, DAS dan CAT sesuai dengan kaidah teknis maupun peraturan, diantaranya:

- Revisi isi peraturan atau ketentuan dalam peraturan yang tidak sesuai → bisa KepPres No. 12 Tahun 2012, bisa KepPres No. 26 Tahun 2011, PP No. 42 Tahun 2008, PP No. 43 Tahun 2008 atau bahkan UU No. 7 Tahun 2004. Dengan kata lain yang direvisi bisa pembagian WS atau pembagian CAT atau bisa kedua-duanya.
- Revisi definisi WS dan CAT di dalam peraturan sesuai dengan kaidah teknik yang berlaku.

8.6 Harmoni Sumber Daya Air, Tata Ruang Air Tanah Dan Penataan Ruang

Air tanah merupakan bagian yang tak terpisahkan dengan Sumber Daya air. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa hubungan antara Sumber Daya Air dan Penataan Ruang adalah identik dengan hubungan Tata Ruang Air Tanah dengan Penataan Ruang.

8.6.1 Perbedaan Substansi Sumber Daya Air, Air Tanah Dan Penataan Ruang

Seperti telah disebutkan menurut UU No. 7 Tahun 2004 Sumber Daya Air dikelola berdasarkan WS, pengelolaan air permukaan didasarkan pada WS dan air tanah berdasar CAT. Namun dalam UU No. 26 Tahun 2007 tidak ada kata-kata WS, air permukaan, air tanah, CAT dan hanya menyebutkan kata-kata daerah aliran sungai (DAS). Padahal DAS adalah bagian dari WS menurut UU No. 7 Tahun 2004. Yang bertentangan namun sangat prinsip didalam kedua UU tersebut adalah:

- Pola Pengelolaan Sumber Daya Air berdasarkan WS dan tidak ada pola pengelolaan DAS (UU No. 7 Tahun 2004)
- Dalam penatagunaan air, dikembangkan pola pengelolaan DAS (UU No. 26 Tahun 2007)

Beberapa perbedaan substansi perlu kajian detail agar didapat persamaan persepsi dalam implementasi UU No. 7 Tahun 2004 Tentang Sumber Daya Air dengan UU No. 26 Tahun 2007 Tentang Penataan Ruang. Dengan kata lain, secara normatif kedua UU itu perlu direvisi agar tidak menimbulkan masalah dalam implementasinya dan tidak ada tafsir yang berbeda pada peraturan-peraturan di bawahnya (PP, KepPres, PerMen, PerDa) karena pada hakekatnya secara alami lokasinya (bentang alam) sama yaitu NKRI.

Lebih lanjut beberapa substansi penting keterkaitan Pengelolaan Sumber Daya Air, air tanah dan Penataan Ruang berdasarkan UU No. 7 Tahun 2004, UU No. 26 Tahun 2007 dan referensi yang lain ditunjukkan dalam Tabel 8-2.

Tabel 8-2. Substansi sumber daya air, air tanah dan penataan ruang
 (Kodoatie & Sjarief, 2010; UU No. 7 Tahun 2004; UU No. 26 Tahun 2007; PP No. 42 Tahun 2008;
 PP No. 43 Tahun 2008; <http://en.wikipedia.org/wiki/Indonesia>)

UU SUMBER DAYA AIR	UU PENATAAN RUANG
<p>Asas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Kelestarian 2. Keseimbangan 3. Kemanfaatan Umum 4. Keterpaduan dan Keserasian 5. Keadilan 6. Kemandirian 7. Transparansi dan Akuntabilitas 	<p>Asas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Keterpaduan 2. Keserasian, keselarasan, dan keseimbangan 3. Keberlanjutan 4. Keberdayagunaan dan keberhasilgunaan 5. Keterbukaan 6. Kebersamaan dan Kemitraan 7. Pelindungan Kepentingan Umum 8. Kepastian Hukum dan Keadilan 9. Akuntabilitas
<ul style="list-style-type: none"> - Pola PSDA: kerangka dasar dalam merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kegiatan konservasi SDA, pendayagunaan SDA, dan pengendalian daya rusak air. - Pola PSDA berdasar WS bukan DAS, karena DAS bagian dari WS 	<ul style="list-style-type: none"> - Pola ruang: distribusi peruntukkan ruang dalam suatu wilayah yang meliputi peruntukkan ruang untuk fungsi lindung dan peruntukkan ruang untuk fungsi budi daya. - Dalam penatagunaan air, dikembangkan pola pengelolaan daerah aliran sungai (DAS) yang melibatkan 2 atau lebih wilayah administrasi provinsi dan kabupaten/kota serta untuk menghindari konflik antar daerah hulu dan hilir.
<p>3 Aspek Pengelolaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Konservasi Sumber Daya Air (SDA) • Pendayagunaan SDA • Pengendalian Daya Rusak Air <p>2 Pendukung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistem Informasi SDA • Pemberdayaan dan Peran Masyarakat • Daerah CAT: daerah imbuhan & daerah lepasan • Daerah imbuhan identik kawasan lindung • Darah lepasan identik kawasan budidaya 	<p>Substansi:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Struktur Ruang: <ul style="list-style-type: none"> o Pusat-Pusat Pemukiman o Infrastruktur • Pola Pemanfaatan Ruang: <ul style="list-style-type: none"> o Kawasan Lindung o Kawasan Budi Daya
<p>Wilayah Hidrologis:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wilayah Sungai (WS) → beberapa DAS, CAT dan Non-CAT • Indonesia dibagi menjadi 131 WS, • Aliran Permukaan: 7983 DAS • Air Tanah: 421 CAT dan Bukan (Non) CAT • Luas CAT 47% luas daratan dan Luas Non-CAT 53% luas daratan 	<p>Wilayah Administrasi</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pusat (Nasional) • Indonesia dibagi menjadi: <ul style="list-style-type: none"> - 33 provinsi - 398 kab dan 1 kab adm - 93 kota dan 5 kota adm - total kab/kota 497 - 6158 kecamatan - desa
<p>Pengelolaan Sumber Daya Air (PSDA):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Pola PSDA Wilayah Sungai 2. Rencana PSDA WS (Rencana Induk tiap aspek) 3. Studi Kelayakan (<i>Feasibility Study</i>) 4. Program PSDA → 5 tahun 5. Penyusunan Rencana Kegiatan PSDA → 1 tahun 6. Rencana Detail (<i>DED</i>) → Rencana Pelaksanaan Konstruksi & OP 7. Pelaksanaan konstruksi 8. Pelaksanaan OP 	<p>Penyelenggaraan Penataan Ruang:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Pengaturan Penataan Ruang 2. Pembinaan Penataan Ruang 3. Pengawasan Penataan Ruang 4. Pelaksanaan Penataan Ruang: <ul style="list-style-type: none"> • Perencanaan Tata Ruang: RTRW Nas, RTRW Prov, RTRW Kab/Kota • Pemanfaatan Ruang • Pengendalian Pemanfaatan Ruang • Penataan Ruang Kawasan Perkotaan <ul style="list-style-type: none"> - Perencanaan Tata Ruang: - Pemanfaatan Ruang - Pengendalian Pemanfaatan Ruang

	<ul style="list-style-type: none"> • Penataan Ruang Kawasan Perdesaan - Perencanaan Tata Ruang - Pemanfaatan Ruang - Pengendalian Pemanfaatan Ruang
PP No. 43 Tahun 2008 Tentang Air Tanah	
1. Landasan pengelolaan air tanah: <ul style="list-style-type: none"> - Kebijakan pengelolaan air tanah - CAT dan Non-CAT - Strategi pengelolaan air tanah 	
2. Pengelolaan air tanah	

Berikut diuraikan perbedaan substansi antara kedua UU:

- UU Penataan Ruang tidak menyebutkan Wilayah Sungai namun hanya daerah aliran sungai (DAS), padahal Indonesia dibagi menjadi 131 WS (KepPres No. 12 Tahun 2012) menurut tinjauan batas hidrologis dan 33 Provinsi untuk tinjauan batas administrasi.
- Untuk pengelolaan sumber daya air perlu disusun Pola Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai (lihat Ayat (2) Pasal 11 UU SD Air).
- UU Penataan Ruang menyebutkan bahwa dalam penatagunaan air, dikembangkan "Pola Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS)" (lihat Penjelasan Ayat (1) Pasal 33 UU Penataan Ruang, bukan "Pola Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai" seperti yang diamanatkan dalam UU SD Air.
- UU Sumber Daya Air menyatakan bahwa DAS adalah bagian dari WS.
- Berdasarkan ketiga hal tersebut maka diperlukan klarifikasi, kesepahaman dan kesepakatan tentang pengertian "Pola Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai menurut UU SD Air" dan "Pola Pengelolaan DAS" menurut UU Penataan Ruang.

Untuk pengelolaan air tanah, perbedaan mendasarnya adalah:

- UU Penataan Ruang tidak menyebutkan air tanah dan CAT.
- UU SDA menyebutkan bahwa untuk pengelolaan air tanah didasarkan atas Cekungan Air Tanah (lihat Ayat (2) Pasal 12 UU SDA).
- UU SDA menyebutkan bahwa penetapan cekungan air tanah meliputi cekungan air tanah dalam satu kabupaten/kota, cekungan air tanah lintas kabupaten/kota, cekungan air tanah lintas provinsi, dan cekungan air tanah lintas negara (lihat Ayat (4) Pasal 13 UU SDA), termasuk dengan siapa yang berwenang dan bertanggungjawab sesuai lokasi CAT (lihat Bab II UU SD Air).

Untuk pengelolaan rawa:

- UU Penataan Ruang tak menyebut rawa. Padahal rawa merupakan bagian dari sumber daya air yang penting baik dari segi luasan (*space*) maupun potensi sumber daya. Luasnya 17,4% luas daratan Indonesia, lebih besar dari gabungan luas Pulau Jawa dan Pulau Sulawesi yang hanya 17%. Perlu diketahui bahwa semua rawa pasang surut ada pada daerah CAT.
- Akan timbul pertanyaan: Bagaimana mengkaitkan Pengelolaan Rawa dengan Tata Ruang?

Untuk pantai:

- UU Penataan Ruang tak menyebut pesisir atau pantai dalam pengertian dan substansi yang benar untuk pesisir atau pantai. UU Penataan Ruang hanya menyebut "pesisir pantai" dalam satu gabungan kata seperti ditulis dalam Penjelasan Huruf d Pasal 61 seperti berikut:

Yang termasuk dalam kawasan yang dinyatakan sebagai milik umum, antara lain, adalah sumber air dan pesisir pantai.
- Kata "pesisir": selain dalam Penjelasan Huruf d Pasal 61 tersebut tidak ada kata "pesisir" lagi
- Untuk kata "pantai": selain tertulis dalam Penjelasan Huruf d Pasal 61 tersebut maka kata "pantai" disebutkan dalam beberapa pasal sebagai berikut:

Penjelasan Ayat (2) Huruf b dan huruf c Pasal 5, yaitu:

- b. kawasan perlindungan setempat, antara lain, sempadan pantai,
- c. kawasan suaka alam dan cagar budaya, antara lain, kawasan suaka alam, kawasan suaka alami laut dan perairan lainnya, kawasan pantai berhutan bakau, taman ...

Penjelasan Ayat (5) Pasal 5, yaitu:

Yang termasuk kawasan strategis dari sudut kepentingan pendayagunaan sumber daya alam dan/atau teknologi tinggi, antara lain, adalah kawasan pertambangan minyak dan gas bumi termasuk pertambangan minyak dan gas bumi lepas pantai, serta....

Penjelasan Ayat (1) Pasal 29, yaitu:

Ruang terbuka hijau publik merupakan..... umum, dan jalur hijau sepanjang jalan, sungai, dan pantai. Yang

Menurut UU No. 27 Tahun 2007 yang dimaksud Sempadan Pantai adalah daratan sepanjang tepian yang lebarnya proporsional dengan bentuk dan kondisi fisik pantai, minimal 100 (seratus) meter dari titik pasang tertinggi ke arah darat. Wilayah Pesisir adalah daerah peralihan antara Ekosistem darat dan laut yang dipengaruhi oleh perubahan di darat dan laut.

Dari uraian tersebut akan timbul pertanyaan: Bagaimana mengkaitkan Pengelolaan Zona Pantai Terpadu dengan Tata Ruang karena pantai tak disebut secara substansi? Hal tersebut akan sangat penting bila dikaitkan dengan pengelolaan air tanah, karena:

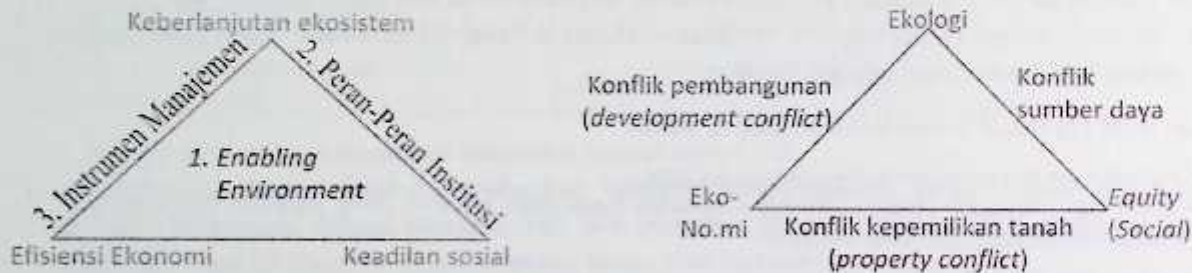
- Umumnya pantai untuk air tanah merupakan daerah lepasan dimana air tanah bisa dibudidayakan atau didayagunakan.
- Ada potensi air laut ke darat di dalam tanah berupa intrusi air laut.
- UU No. 7 Tahun 2004 mengamanatkan untuk air laut yang di darat perlu dibuat Peraturan Pemerintah (PP). Salah satu tujuannya adalah agar ada harmoni antara air laut di darat dan air tanah.

8.6.2 Substansi Perlunya Harmoni Dan Integrasi

Seperti telah disebutkan, secara global air mengalir dari daerah lebih tinggi ke daerah lebih rendah melalui sistem gravitasi dalam siklus hidrologi. Perjalanan air dalam siklus ini melalui ruang udara, ruang darat (termasuk di dalam bumi) dan ruang laut. Dalam proses perjalanan tersebut muncul persoalan air dalam ketiga ruang tersebut seperti ditunjukkan dalam Gambar 8-1. Salah satu tujuan utama mengatasi persoalan tersebut adalah keberlanjutan keberadaan air sebagai sumber kehidupan di dunia. Oleh

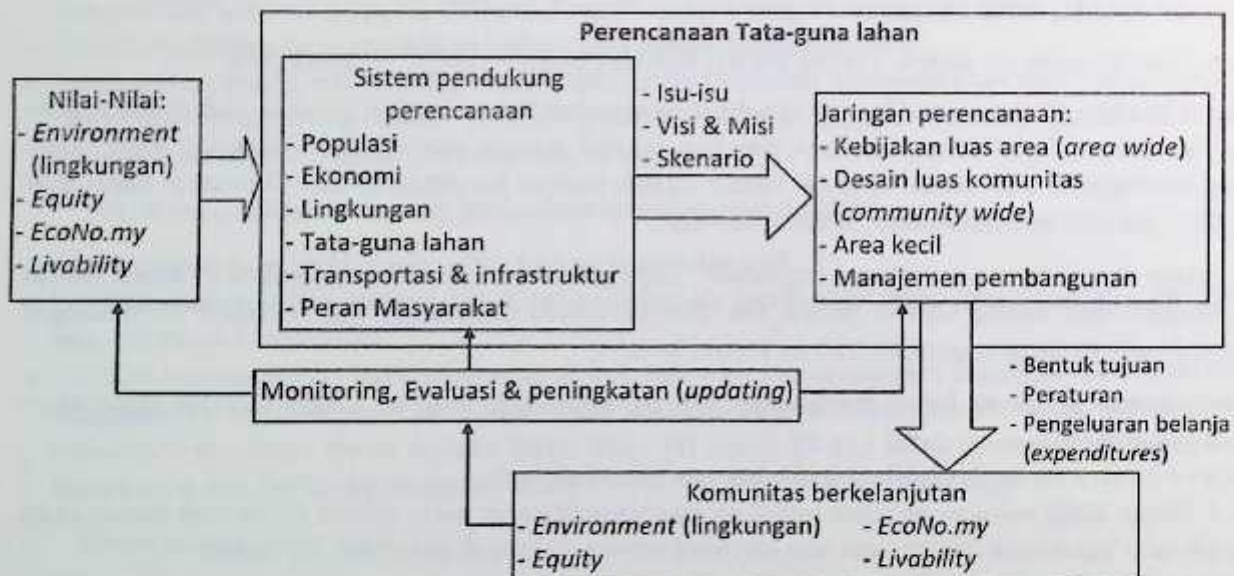
karena itu dalam kajian sumber daya air termasuk air tanah maka perlu harmoni antara sumber daya air dengan aspek-aspek lain berdasarkan kondisi alam maupun berdasarkan kondisi artifisial.

Segitiga keseimbangan dan skenario pengelolaan sumber daya air terpadu seperti dijelaskan dalam Gambar 6-1 juga terkait dengan segitiga konflik dari pembangunan, sumber daya dan kepemilikan tanah seperti ditunjukkan dalam Gambar 8-15.



Gambar 8-15. Hubungan sosial, ekonomi dan ekologi (GWP, 2001; Godschalk, 2004)

Salah satu contoh kerangka konseptual perencanaan tata-guna lahan ditunjukkan dalam Gambar 8-16.



Gambar 8-16. Kerangka konseptual perencanaan tata-guna lahan (Berke dkk., 2006)

Harmoni berarti: *balance*, keseimbangan, proporsi, simetri, kepaduan, kesamaan, keselarasan, keserasian, kesesuaian, keteraturan, konsistensi dan ketertiban. Integrasi juga berarti inkorporasi, konsolidasi, *merger*, peleburan, pembauran, penggabungan, penyatuan, unifikasi (Endarmoko, 2006).

Harmoni juga berarti: keselarasan, keserasian, kecocokan, kesesuaian, kerukunan dan integrasi berarti penggabungan (Echols & Shadily, 2002).

Hal-hal substansi spesifik mengharuskan adanya harmonisasi dan integrasi penataan ruang dan pengelolaan sumber daya air. Dibandingkan sumber daya alam yang lain, air mempunyai ciri khas dan unik yang menyebabkan air menjadi spesial untuk dikelola. Di sisi lain kebutuhan ruang baik di perkotaan dan perdesaan makin meningkat karena pertumbuhan penduduk. Adanya hubungan peningkatan penduduk, penataan ruang dan pengelolaan sumber daya air mengharuskan adanya harmonisasi dan integrasi antara penataan ruang dan pengelolaan sumber daya air serta pengelolaan aspek-aspek lainnya.

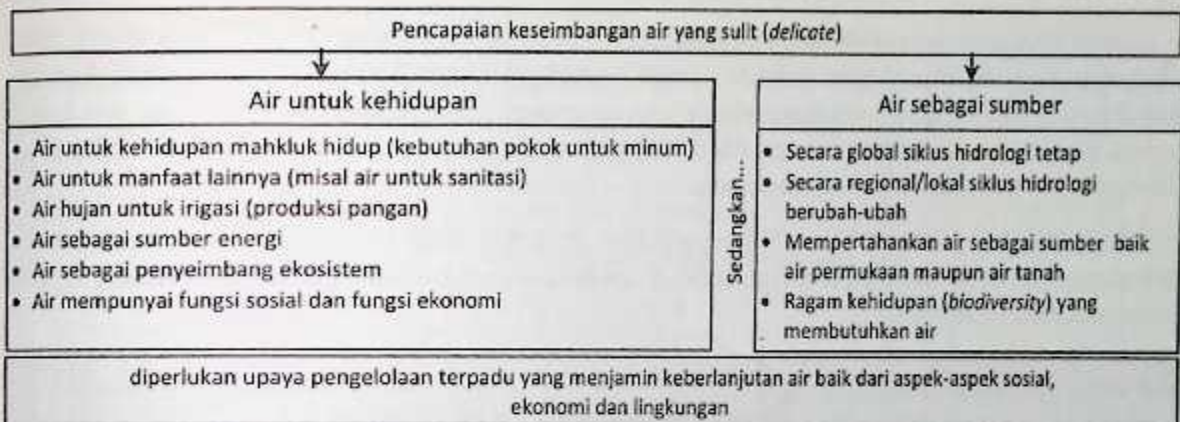
Secara lebih detail perlunya harmonisasi tersebut ditunjukkan dalam Tabel 8-3 (Sumber: GWP, 2001 dengan elaborasi berdasarkan sumber-sumber lainnya, diantaranya Hamengku Buwono X, 2002; Kodoatie, 2001b).

Tabel 8-3. Substansi perlunya harmonisasi

No. Uraian
1. Air merupakan salah satu sumber kehidupan sehingga untuk kepentingan manusia dan makhluk hidup lainnya ketersediaan air dari segi kualitas maupun kuantitas mutlak diperlukan. Namun kelebihan air menimbulkan bencana yaitu banjir dan longsor, kekurangan air juga menimbulkan bencana yaitu kekeringan.
2. Ada hubungan langsung antara banjir di musim hujan dengan kekeringan di musim kemarau.
3. Batas administrasi wilayah (misal batas kab/kota) berbeda dengan batas teknis (DAS). Di samping itu juga ada WS, CAT, Wilayah Pesisir (Kawasan, Zona), kawasan hutan, taman buru, dll.
4. Perubahan tata-guna lahan akan berpengaruh besar terhadap SDA baik secara kuantitas maupun kualitas. Air yang terlalu banyak menimbulkan bencana banjir dan longsor, sedangkan air yang terlalu sedikit menimbulkan bencana kekeringan.
5. Tiap tata guna lahan membutuhkan air namun juga memberikan dampak keberadaan air di tata guna yang lain.
6. <i>Recovery</i> kerusakan tataguna lahan dan tata air yang terjadi umumnya akan sulit mengembalikan sampai sama seperti semula.
7. Tiap kehidupan dan semua sektor sosial, budaya, ekonomi serta lingkungan bergantung namun juga sekaligus memberi dampak ke air.
8. Kita tinggal dalam ruang dan dengan siklus hidrologi artinya air secara terus menerus diisi ulang (<i>renewable source</i>), dipakai, dikembalikan dan dipakai lagi. Oleh karena itu kita semua bergantung satu sama lain. Secara umum dapat dikatakan bahwa air merupakan salah satu bagian sentral dan pokok dalam kehidupan.
9. Selama kita hidup, kita akan membutuhkan air → ini berarti sumber daya air harus berkelanjutan (<i>sustainable resources</i>).
10. Dalam kaitan dengan sumber daya air, kita ada yang tinggal di bagian hulu dan kita juga ada yang tinggal di hilir. Oleh karena itu kita saling bergantung dan saling mempengaruhi.
11. Infrastruktur keairan: alami dan buatan manusia.
12. Sistem infrastruktur keairan terkait dengan pengelolaan bencana terikat dan saling bergantung dengan infrastruktur lainnya.
13. Tuntutan reformasi: demokrasi, transparansi, akuntabilitas.
14. Otonomi Daerah: salah satu dampak munculnya egosentris kedaerahan, bahwa "daerah saya bisa saya eksploitasi sesukanya". Konflik muncul akibat perbedaan batas teknis dan batas administrasi.
15. Partisipasi dan pemberdayaan masyarakat.
16. Globalisasi.
17. Keterbatasan dana.
18. Degradasi lingkungan yang parah.
19. Lemahnya penegakkan hukum (perlu <i>law enforcement</i>).
20. Krisis kepercayaan dan krisis kebudayaan.
21. Panjang garis pantai di Indonesia adalah kurang lebih 95.181 km. Lebih dari 50 % dari garis pantai tersebut berpotensi terkena Tsunami, terutama yang berhadapan langsung dengan lempeng-lempeng tektonik.
22. Pantai juga daerah bagian paling hilir dalam sistem sumber daya air. Umumnya pantai akan dominan sebagai penerima

- dampak dari pengelolaan sumber daya air.
23. Banyak penduduk tinggal di wilayah pantai dan banyak juga kota dengan penduduk padat berlokasi di pantai.
 24. Pantai merupakan tempat atraktif untuk dihuni.
 25. Bangsa Indonesia hidup di wilayah di atas 4 lempeng di dunia yaitu Lempeng: Indo-Australia, Pasifik, Eurasia dan Philipina. Indonesia juga memiliki bukit barisan memanjang dari Sumatra, Jawa sampai Nusa Tenggara. Pertemuan lempeng ini membuat Indonesia sebagai salah satu negara yang paling banyak berubah wilayah geologinya di dunia.
 26. Hampir semua sifat pertemuan antar lempeng di wilayah Indonesia adalah sub-duksi. Artinya gempa yang ditimbulkannya bisa mencapai lebih dari 9 Skala Richter atau setara dengan 32 milyar ton TNT untuk hasil energi seismik. Bila terjadi gempa > 9 Skala Richter maka dapat menyebabkan kerusakan sangat besar pada beberapa daerah dengan jangkauan 100 km. Dapat juga disebut malapetaka karena semua benda di atas tanah bisa hancur total, tanah naik turun, obyek beterbangan. Bila gempa ini terjadi di laut maka akan dapat menimbulkan gelombang Tsunami dengan kekuatan amat dahyat.
 27. Kecepatan Tsunami di tengah laut menuju pantai bisa mencapai kecepatan pesawat terbang (di atas 600 km/jam) dengan tinggi gelombang yang pendek (bisa hanya antara 1 sampai 2 m) tergantung dari kedalaman laut. Dengan kondisi ini maka periode waktu setelah gempa menjadi Tsunami bisa hanya dalam hitungan puluhan menit. Alat sistem peringatan dini (*early warning system*) menjadi tak efektif atau bahkan menjadi tak berguna. Namun mendekati pantai kecepatan akan sangat berkurang tapi tinggi gelombang meningkat tajam. Gelombang Tsunami yang menerjang pantai dapat mencapai ketinggian 30 meter (= gedung bertingkat 10 atau lebih). Tsunami di Aceh telah membuktikan kekuatan dahsyat (daya rusak) air.
 28. Indonesia juga memiliki sungai besar dan kecil yang berjumlah 5590 buah yang terbagi menjadi 131 wilayah sungai (Direktorat Sungai, 1994; KepPres No. 12 Tahun 2012).
 29. Indonesia memiliki 421 cekungan air tanah (KepPres No. 26 Tahun 2011).
 30. Indonesia terdiri atas 33 provinsi, 399 kabupaten, 98 kota, (total kabupaten/kota 497) dan 6158 kecamatan.
 31. Kondisi kebutuhan pangan dan air (sumberdaya alam).
 32. Lebarnya kesenjangan tingkat pembangunan antar wilayah secara nasional (sudah berkembang: Sumatra, Jawa, Bali; berkembang: Kalimantan, Sulawesi, NTB; perkembangan baru: Maluku, NTT, Papua).
 33. Peningkatan penduduk dan tingginya jumlah penduduk miskin (lebih dari 48 juta jiwa atau lebih kurang 23% terutama di daerah tertinggal dan perkotaan).
 34. Perubahan tata-guna lahan akan berpengaruh besar terhadap SD Air baik secara kuantitas maupun kualitas. Air terlalu banyak menimbulkan bencana banjir dan longsor, sedangkan air terlalu sedikit menimbulkan bencana kekeringan. Demikian sebaliknya ketersediaan air akan mempengaruhi perencanaan tata guna lahan.
 35. Sistem infrastruktur keairan terikat dan saling bergantung dengan infrastruktur lainnya.
 36. Tak ada satupun bangsa di dunia yang ditakdirkan hidup berdampingan dengan segala bencana kecuali bangsa Indonesia. Ada 39 jenis bencana yang sudah terjadi dan di masa yang akan datang potensi ke jenis 39 bencana tersebut masih berpeluang terjadi sehingga perlu diantisipasi melalui pengelolaan bencana terpadu.
 37. Wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia yang sangat luas: memiliki 5 Pulau Besar, Gugus Pulau Samudra, Gugus Pulau Pantai yang keseluruhannya berjumlah 17508 pulau dan adanya gunung baik yang aktif maupun yang tidak disertai dengan pegunungan tinggi serta dilalui jalur patahan dan sesar.
 38. Tata ruang air tanah secara lebih spesifik adalah identik dengan ruang darat di bawah muka bumi terdiri atas daerah CAT (47%) dan daerah Non-CAT (53%).
 39. Karakter geomorfologi fluvial (DAS dan sistem sungainya) antara daerah CAT dan Non-CAT berbeda.
 40. Air bersih di masa mendatang akan semakin langka dan semakin mahal.

Air sebagai salah satu sumber kehidupan mempunyai berbagai macam fungsi. Di sisi lain, air juga merupakan bagian dari sumber daya alam. Dari kedua hal tersebut maka diperlukan suatu pengelolaan sumber daya air terpadu yang memberikan jaminan keberlanjutan air. Uraian tersebut ditunjukkan dalam Gambar 8-17.



Gambar 8-17. Kebutuhan pengelolaan terpadu untuk pencapaian keseimbangan fungsi dan peran air (GWP, 2001; Kodoatie & Sjarief, 2005 & 2010)

Secara menyeluruh sumber daya air termasuk sumber daya air tanah tergantung dari banyak hal yang memerlukan harmoni dan perpaduan baik dalam sistem alam maupun dalam sistem kehidupan. Karena seperti telah disebutkan bahwa "tiada kehidupan tanpa air", maka dapat dikatakan *water is the best of all things* dan *water is every one's business!*

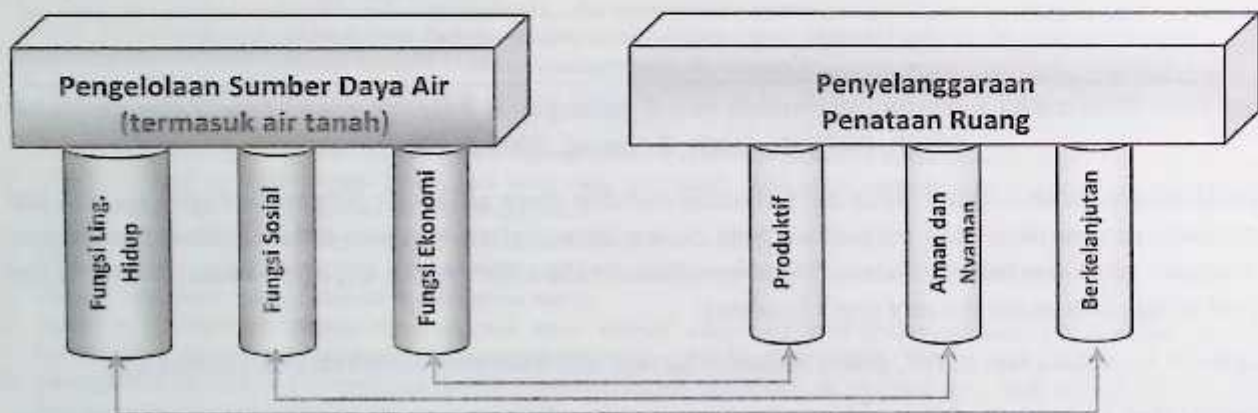
Harmoni itu antara lain (GWP, 2001; Kodoatie Sjarief, 2010 dengan modifikasi dan elaborasi):

1. Harmoni dan perpaduan dalam sistem alam: antara pemakaian tanah dan air, antara air permukaan dan air tanah, antara jumlah dan kualitas air, antara hulu dan hilir, antara air tawar dan air asin, antara penyebab dan penerima dampak.
2. Harmoni dan perpaduan pengelolaan untuk pencapaian keseimbangan ideal dalam sistem alam dan dalam sistem kehidupan (sistem manusia) dengan langkah-langkah: pengutamakan air dalam sistem ekonomi, pengutamakan air dalam sistem sosial, pengutamakan air dalam sistem lingkungan, kepastian koordinasi antar sektor-sektor, kepastian adanya kerjasama antara pengelolaan sektor umum dan pribadi, pengikutsertakan semua *stakeholders*.
3. Harmoni dan perpaduan antara pengelolaan sumber daya air dan penataan ruang.
4. Harmoni dan perpaduan antara pengelolaan sumber daya air dan pengelolaan wilayah pesisir.
5. Harmoni dan perpaduan antara pengelolaan sumber daya air dan pengurusan hutan.
6. Harmoni dan perpaduan antara pengelolaan sumber daya air tanah dan penataan ruang.
7. Harmoni dan perpaduan antara pengelolaan sumber daya air tanah dan pengelolaan wilayah pesisir.
8. Harmoni dan perpaduan antara pengelolaan sumber daya air tanah dan pengurusan hutan.
9. Harmoni dan perpaduan antara infrastruktur keairan untuk air tanah dan infrastruktur lainnya.
10. Harmoni dan perpaduan antara pembangunan berkelanjutan dan keberlanjutan ekologi.
11. Harmoni dan perpaduan antara pengertian, istilah dan definisi dalam peraturan perundang-an.
12. Harmoni antara air permukaan dan air tanah.

Keseimbangan gerakan air dari ruang darat, ruang laut dan ruang udara dikenal dengan siklus hidrologi seperti ditunjukkan dalam Gambar 8-1.

Sumber daya air termasuk air tanah mempunyai fungsi sosial yang berarti kepentingan umum lebih diutamakan daripada kepentingan individu. Fungsi lingkungan hidup berarti bahwa sumber daya air menjadi bagian dari ekosistem sekaligus sebagai tempat kelangsungan hidup flora dan fauna, dan fungsi ekonomi berarti bahwa sumber daya air dapat didayagunakan untuk menunjang kegiatan usaha yang diselenggarakan dan diwujudkan secara selaras.

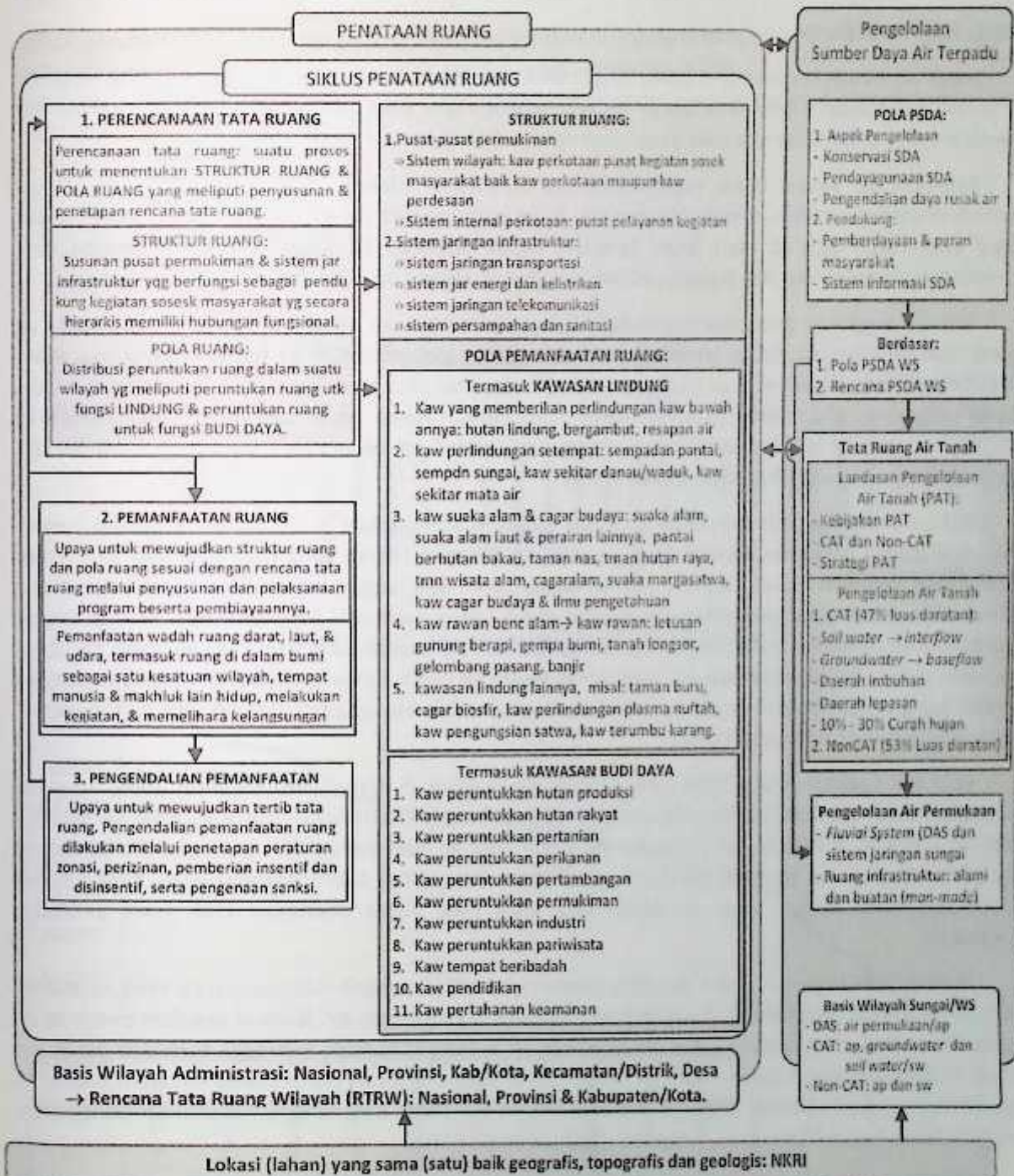
Mengacu kepada UU No. 7 Tahun 2004 dan UU No. 26 Tahun 2007 Tentang Penataan Ruang, maka ada kesamaan dasar antara Pengelolaan Sumber Daya Air maupun penyelenggaraan tata ruang seperti ditunjukkan dalam Gambar 8-18.



Gambar 8-18. Kesamaan dasar dalam pengelolaan sumber daya air, air tanah dan penataan ruang (Kodoatie dan Sjarief, 2007 & 2010)

Secara simultan penentuan Rencana Tata Ruang Wilayah dan Pengelolaan Sumber Daya Air harus dilakukan bersama. Keterkaitan antara Penyelenggaraan Penataan Tata Ruang dan Pola Pengelolaan Sumber Daya Air merupakan hal yang mutlak untuk pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan. Di dalam hubungan masing-masing bagian (aspek) dari penataan ruang maupun PSDA perlu dikompromikan dalam bentuk kesepakatan dan kesepakatan yang sama.

Sebagai contoh Wilayah Sungai (termasuk DAS, CAT dan Non-CAT) dalam PSDA harus ditransformasikan dan diekivalensikan dengan Wilayah Administrasi Penataan Ruang. Dengan demikian didapat hubungan harmonis antara Penataan Ruang, Pengelolaan Sumber Daya Air dan Pengelolaan Air Tanah. Secara garis besar hubungan detail aspek-aspek penataan ruang, pola PSDA dan pengelolaan air tanah ditunjukkan dalam Gambar 8-19.



Gambar 8-19. Harmoni Pengelolaan SD Air, Tata Ruang Air tanah dan Penataan Ruang (UU No. 26 Tahun 2007; UU No. 7 Tahun 2004 dengan modifikasi oleh Kodoatie & Syarif, 2007 dan Kodoatie, 2008)

8.6.3 Nilai Air Di Dunia

Harga air minum (air leding) di dunia sangat bervariasi mulai yang termahal sampai yang harganya 0. Secara logika dapat diketahui bahwa air semakin mahal, maka akan ada penghematan pemakaian air. Semakin boros semakin banyak uang yang harus dikeluarkan (Cookson et al., 2010).

Mahalnya air karena untuk mendapatkannya diperlukan infrastruktur yang memadai. Sebagai contoh bila lokasi air lebih rendah dari pemakai maka perlu pompa dengan energi yang memadai dan pipa yang cukup agar air dari lokasi tersebut dapat dialirkan ke lokasi pemakai. Pompa yang membutuhkan energi dan pipa tersebut adalah yang harus dibayar agar air dapat sampai ke pemakai.

Semakin langka air maka semakin mahal nilainya karena hukum *supply demand* terjadi. Suplai air yang lebih kecil dari kebutuhan (*demand*) dari sisi kuantitas menyebabkan air harus dibayar mahal bila dibutuhkan. Dari sisi kualitas akan lebih nampak lagi betapa air akan semakin mahal. Air dalam kemasan botol yang hanya 600 mililiter (0,6 liter) harus dibeli dengan harga mulai dari Rp. 2.000,- sampai Rp 20.000,- tergantung lokasi pembeliannya. Harga yang mahal ini karena ada perasaan pemakai dan jaminan bahwa air yang dikonsumsi adalah bersih.

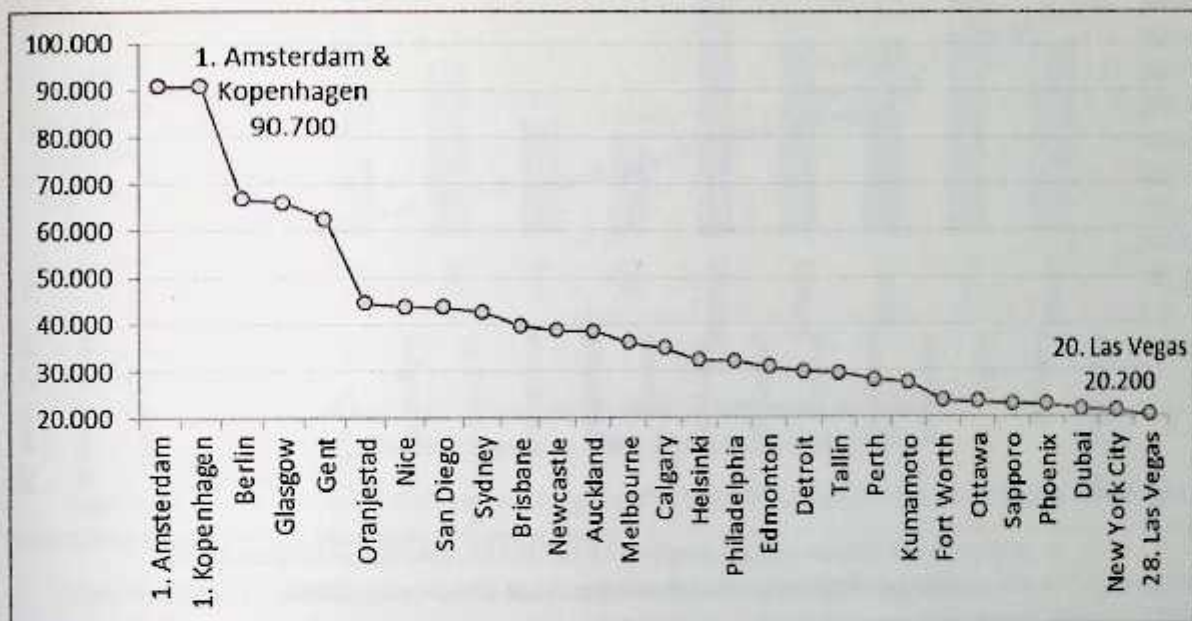
Di Kota Semarang pada era 60-an air masih sangat murah bahkan gratis. Saat itu banyak rumah-rumah di pinggir jalan menyediakan kendi (wadah air) di depan rumah yang bisa diminum airnya oleh orang yang melewati rumah tersebut saat kehausan. Beberapa sungai masih dipakai oleh penduduk untuk MCK karena secara kuantitas dan kualitas masih cukup memadai (*appropriate*). Seiring dengan pertumbuhan penduduk yang pesat yang mengakibatkan perubahan tata guna lahan yang cepat hal tersebut sudah tidak dijumpai saat ini. Yang marak adalah air dalam kemasan botol terus bertambah dan berkembang dengan banyak merk. Hal tersebut secara implisit dan eksplisit berarti ada penurunan air baik dari sisi kuantitas maupun kualitas.

Data dari Cookson et al. (2010) menunjukkan hal tersebut di dunia. Untuk Tahun 2009, harga air termahal adalah ada di Amsterdam (Belanda) dan di Kopenhagen (Denmark) yang mencapai Rp. 90.700,- per m³. Harga air di Jakarta saat itu adalah Rp. 7.500,- per m³ dan merupakan peringkat ke 50 dari 80 harga air kota di dunia. Harga air untuk 80 kota di dunia ditunjukkan dalam Gambar 8-20. Yang menjadi persoalan adalah berapa harga air bersih yang ideal yang dapat dijangkau oleh para penduduk termiskin?

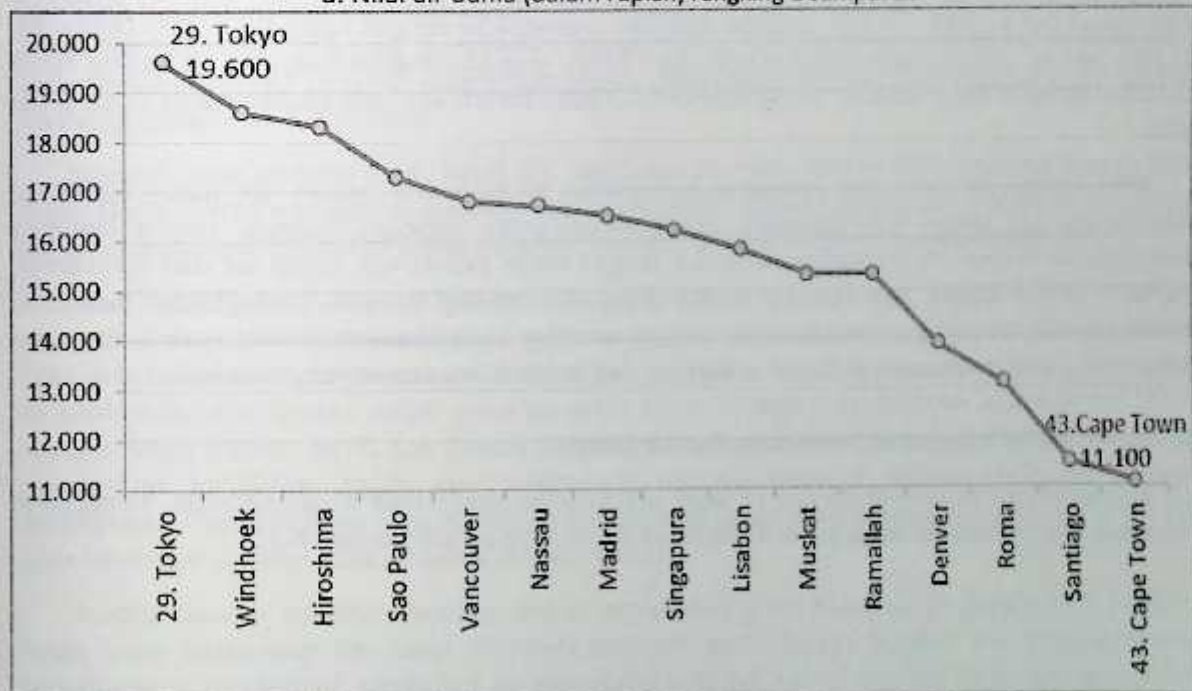
Di New Delhi harga air adalah Rp. 800,- namun ini menjadi sebuah dilema. Harga yang rendah ini dimaksudkan agar rakyat miskin dapat terbantu menikmati kebutuhan air. Namun jawatan penyedia air yang minim dana tidak mampu untuk menyediakan air di tempat kumuh, sehingga terpaksa penduduk (termasuk yang miskin) harus membeli air dengan biaya yang tinggi dari perusahaan swasta (Cookson et al., 2010). Di Amerika Serikat harga air termahal di Kota San Diego karena 90% kebutuhannya dipompa dari California bagian Utara dan S. Colorado (Cookson et al., 2010).

Air juga memicu konflik. Di gang padat dan kumuh Nehru Camp di Kota Delhi seorang remaja dipukuli massa sampai mati karena berusaha menyerobot antrian (Larmer, 2010). Diramalkan bahwa kekurangan air dan listrik akan makin parah dan juga merosotnya produksi pangan, migrasi yang meluas

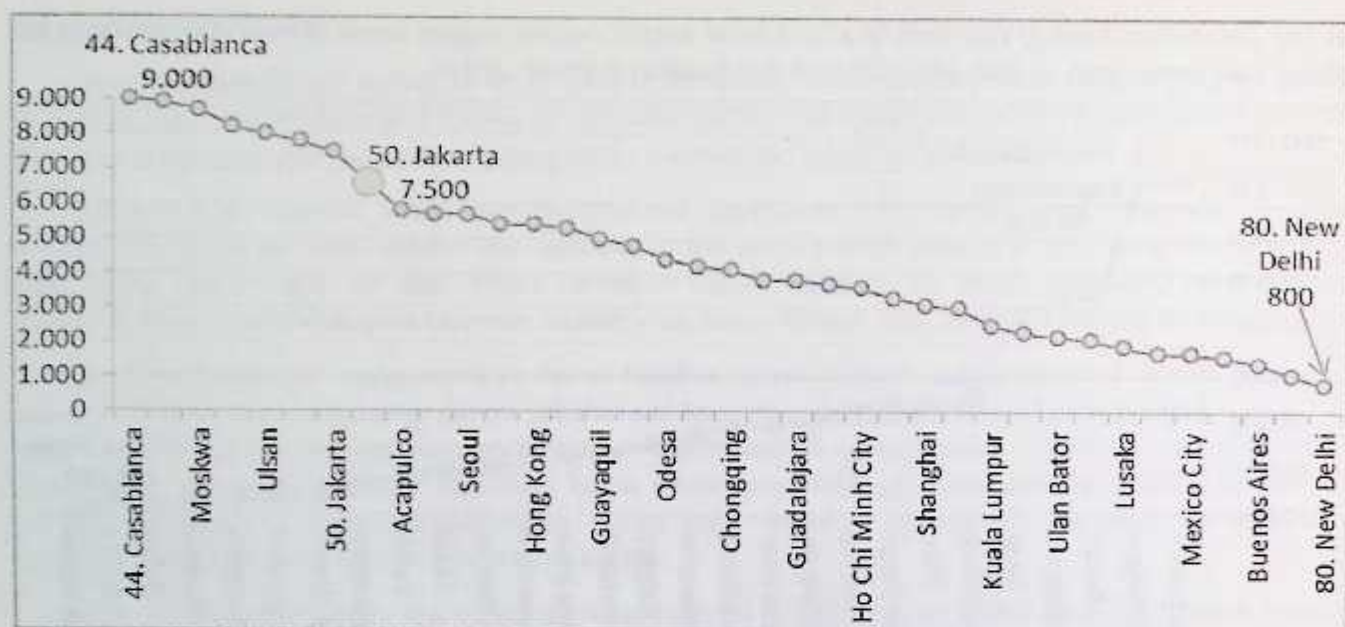
akibat perubahan ekologi dan peningkatan konflik antara negara-negara besar di Asia. Kesemuanya ini akibat dari penurunan air baik dari kuantitas dan kualitas (Larmer, 2010).



a. Nilai air dunia (dalam rupiah) rangking 1 sampai 28



b Nilai air dunia (dalam rupiah) rangking 29 sampai 43



c. Nilai air dunia (dalam rupiah) rangking 44 sampai 80, Jakarta peringkat ke 50

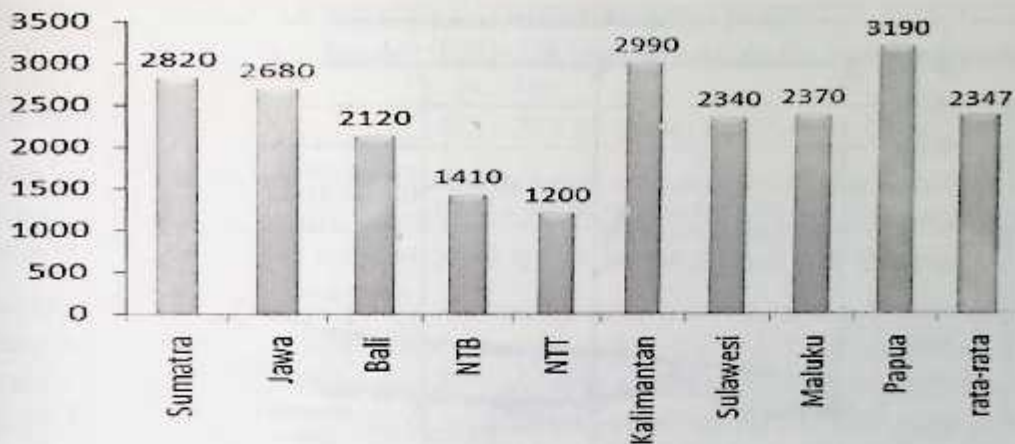
Gambar 8-20. Nilai air di dunia (National Geography, 2008)

LBH Jakarta dan bersama Koalisi Masyarakat Menolak Swastanisasi Air Jakarta (KMMSAJ) menyatakan bahwa lebih dari 40% warga Jakarta harus membeli air dengan harga Rp 37.00,- sampai Rp. 85.000,- per m³ (<http://metro.vivanews.com>, April 2012). Membandingkan harga air di Jakarta Tahun 2010 dari National Geographic Indonesia sebesar Rp. 7.500,- berarti ada peningkatan harga air yang luar biasa.

Oleh karena itu perlu ada kesadaran menyeluruh di Indonesia bahwa air harus dipelihara, dikonservasi dan dijaga keberadaannya secara berkelanjutan sehingga mampu secara kontinyu, berkelanjutan memenuhi kebutuhan penduduk dengan tanpa penurunan suplai air dari sumbernya. Harmoni antara *supply* dan *demand* mutlak diperlukan seiring dengan peningkatan penduduk. Keberadaan air tanah harus berkelanjutan dengan menjaga keseimbangan antara ketersediaan dan kebutuhan air tanah terutama di daerah perkotaan yang penduduknya cenderung meningkat.

8.7 Harmoni Dan Integrasi Air Permukaan dan Air Tanah

Sumber utama air permukaan dan air tanah adalah hujan yang terjadi dalam setahun. Tinggi curah hujan tiap tahun untuk beberapa pulau di Indonesia ditunjukkan dalam Gambar 8-21.



Gambar 8-21. Tinggi curah hujan di tiap pulau (mm/tahun)
(Ditjen Pengairan, 1986; Mock, 1973; JICA, 1992)

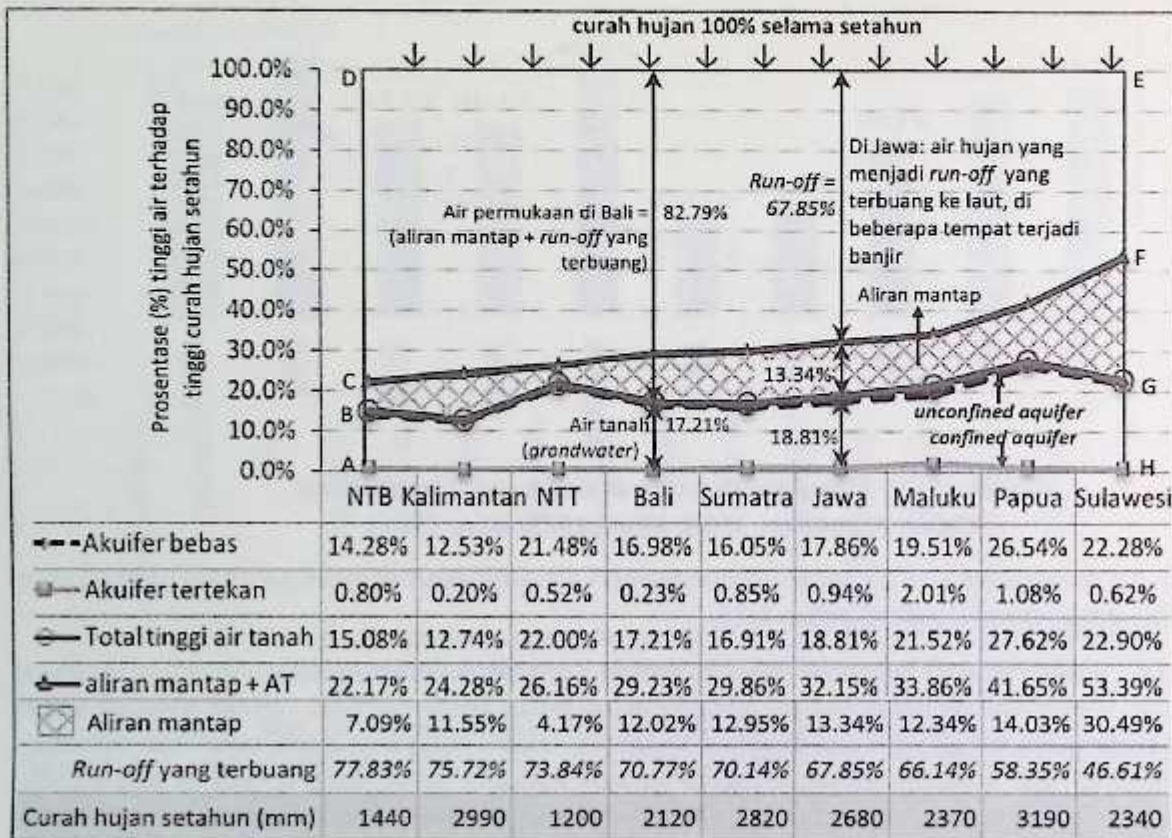
Gabungan air permukaan dan air tanah (*groundwater*) dibandingkan dengan air hujan setiap tahun untuk tiap pulau ditunjukkan dalam Gambar 8-22.

Daerah CDEF dalam Gambar 8-22 adalah kelebihan air yang menjadi *run-off* dan umumnya langsung mengalir ke laut. Kelebihan air hujan hampir seluruh pulau-pulau besar menjadi *run-off* (Daerah CDEF) jauh lebih besar daripada yang tersimpan di dalam tanah (air tanah) dan permukaan tanah (air mantap). Secara tak langsung CDEF juga menjelaskan secara implisit bencana banjir yang terjadi di pulau-pulau besar tersebut, karena air hujan yang tertampung di dalam tanah maupun di muka tanah jauh lebih kecil dibanding dengan air permukaan.

Merujuk pada gambar 2-34, Tabel 2-7, dan Tabel 2-8 maka Daerah CDEF dan juga Daerah BCFG dalam Gambar 8-22 mengalami evaporasi dan *surface outflow* yang cukup besar. Oleh karena itu, untuk setiap wilayah perlu dilakukan kajian detail menentukan setiap komponen Gambar ABCDFGH.

Salah satu tujuan utama dari keharmonisan pengelolaan sumber daya air, pengelolaan air tanah dan penataan ruang dan aspek-aspek penting lainnya pada prinsipnya adalah upaya memperkecil daerah CDEF dalam Gambar 8-22. Dengan kata lain adalah melakukan upaya memperbesar daerah BCFG untuk air permukaan dan daerah ABGH untuk air tanah dalam Gambar 8-22. Semakin kecil daerah CDEF → semakin besar daerah BCFG dan daerah ABGH berarti akan mengurangi *run-off* sekaligus menambah resapan air ke dalam tanah atau mengurangi bencana banjir di musim penghujan sekaligus meningkatkan ketersediaan air yang berarti memperkecil bencana kekeringan di musim kemarau. Tata guna lahan dan sumber daya air saling mempengaruhi.

Apabila daerah imbuhan menjadi daerah pemukiman maka kuantitas air yang masuk ke dalam tanah akan berkurang dan akan memberi pengaruh pada daerah lepasan. Air yang seharusnya berinfiltrasi akan menjadi tambahan air permukaan sehingga *run-off* menjadi besar sehingga potensi banjir akan meningkat. Sebaliknya air tanah yang berfungsi sebagai sumber air pada musim kemarau akan berkurang.



Keterangan gambar:

ABGH = Tinggi air tanah dalam CAT (tinggi akuifer bebas + tinggi akuifer tertekan)

BCFG = Tinggi aliran mantap di permukaan

CDEF = Tinggi run-off yang terbangun

BCDEFG = Tinggi air permukaan (tinggi aliran mantap + run-off yang terbangun)

Aliran mantap adalah aliran yang tertampung di permukaan tanah (danau, waduk, situ, daerah retensi, dll.) yang dimanfaatkan sebagai cadangan air di musim kemarau

Ruang darat Indonesia (100%) terdiri atas daerah CAT (47%) dan daerah Non-CAT (53%)

- Air hujan selain uraian tersebut ada juga yang menjadi soil water baik di daerah CAT dan Non-CAT

- Di daerah CAT ada groundwater dan soil water

- Di daerah Non-CAT hanya soil water tak ada groundwater

Contoh: Di Pulau Jawa dari total curah hujan 100% tiap tahun yang:

- menjadi air tanah (groundwater) 18,81% (17,86% masuk ke dalam akuifer bebas & 0,94% akuifer tertekan).

- menjadi air permukaan 81,19% terdiri atas:

~ aliran mantap 13,34%

~ air permukaan/run-off yang terbangun ke laut 67,85%,
di beberapa tempat terjadi banjir di musim hujan

Gambar 8-22. Perbandingan air permukaan, air mantap, air tanah dengan curah hujan setiap pulau (Kodoatie & Sjarief, 2010)

Dari Gambar 8-22 terlihat juga bahwa air hujan berkontribusi menjadi:

Air tanah (<i>groundwater</i> dan <i>soil water</i>):	13% – 28% (menjadi <i>interflow</i> dan <i>base flow</i> di sistem sungai)
Air mantap	: 4% – 30%
<i>Run-off</i> terbuang	: 47% – 78% (langsung ke laut pada musim penghujan).

Walau secara kuantitas curah hujan yang terjadi sepanjang tahun cukup besar, namun sebagian besar *run-off* terus mengalir dan terbuang percuma ke laut. Akibatnya di musim hujan terjadi banjir yang signifikan di beberapa daerah sebagai dampak dari perubahan tata guna lahan tersebut.

Semakin banyak daerah yang kedap air maka semakin besar *run-off* yang terjadi. Dengan kata lain kenaikan *run-off* yang signifikan diakibatkan perubahan *land-use*. Sebaliknya banyak dijumpai di beberapa daerah pada musim kemarau tidak ada aliran permukaan (aliran mantap). Banyak sungai yang kering, air di danau, waduk, situ-situ, embung, dll menyusut drastis. Dalam hal ini maka peran air tanah menjadi sangat vital dalam rangka pemenuhan kebutuhan air di musim kemarau terutama di daerah CAT. Dapat dikatakan bahwa saat air permukaan tidak ada pada musim kemarau maka andalan untuk pemenuhan kebutuhan air adalah air tanah (*groundwater*).

Kondisi saat ini adalah potensi air permukaan dan air tanah di banyak daerah cenderung turun terutama di kota-kota besar karena perubahan tata guna lahan yang cepat (sebagai penyebab utama).

Pemahaman Daerah CAT dan Daerah Non-CAT adalah sangat penting dalam upaya menentukan daerah yang perlu dikonservasi dan daerah yang bisa dibudidayakan. Pada Daerah CAT ada daerah imbuhan atau daerah konservasi (kawasan lindung) dan daerah lepasan atau daerah pendayagunaan air tanah (kawasan budi daya). Sedangkan di daerah Non-CAT, semua air hujan menjadi air permukaan dan aliran antara (*interflow*) di *vadoze zone*.

8.8 Harmoni Batas Administrasi dan Batas Teknis

Dalam penataan ruang, batas administrasi dipakai sebagai dasar untuk membedakan wilayah administrasi dengan hirarki: nasional, prov, kab/kota, kecamatan, desa/kelurahan, rukun warga (RW), dan rukun tetangga (RT). Umumnya dengan mudah masyarakat mengetahui batas administrasi tersebut.

Batas administrasi berbeda dengan batas teknis hidrologi. Batas hidrologi ditentukan berdasarkan air mengalir secara gravitasi di suatu lokasi dengan melihat perbedaan topografi yang pada prinsipnya dibagi dalam daerah aliran sungai (DAS) untuk air permukaan. Sedangkan untuk aliran air tanah batas alirannya ditentukan berdasarkan cekungan air tanah (CAT) yang dibagi lagi menjadi akuifer tertekan (*confined aquifer*) dan akuifer bebas (*unconfined aquifer*). Di samping itu perlu dipahami daerah bukan CAT (Non-CAT) yang dikaitkan dengan Sumber Daya Air karena berpengaruh kepada ketiga aspek PSDA dan kawasan lindung serta kawasan budi daya dalam Pola Ruang signifikan.

Untuk pengelolaan sumber daya air dan penataan ruang yang harmoni pada prinsipnya harus mengkombinasi batas-batas administrasi dan teknis yang jelas dengan salah satu caranya adalah *overlay* peta-peta batas administrasi dan batas teknis menjadi satu kesatuan peta kombinasi yang

sinergis. Dengan peta tersebut maka tindakan-tindakan untuk mengharmonikan pengelolaan sumber daya air dan penataan ruang dapat dilakukan.

Sebagai contoh kasus *overlay* peta-peta adalah Prov Jambi. Provinsi ini terdiri atas 9 kabupaten dan 2 kota, yaitu: Kabupaten-Kabupaten 1. Kerinci, 2. Bungo, 3. Tebo, 4. Sarolangun, 5. Merangin, 6. Batanghari, 7. Muaro Jambi, 8. Tanjung Jabung Barat, 9. Tanjung Jabung Timur, 10. Kota Jambi dan Kota Sungai Penuh. Batas administrasi ditunjukkan dalam Gambar 8-23.



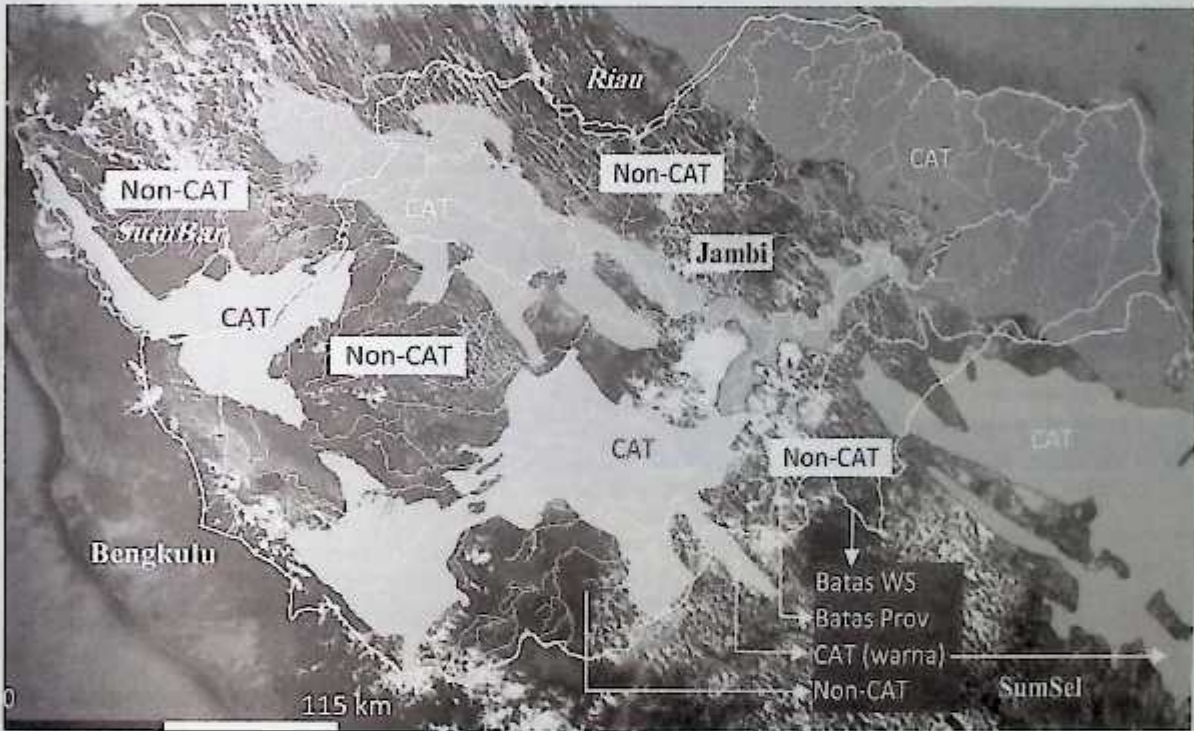
Gambar 8-23. Peta administrasi kabupaten di Provinsi Jambi (BPS Provinsi Jambi, 2007)

Overlay antara batas administrasi dan batas teknis (hidrologi) ditunjukkan dalam Gambar 8-24.

Dari Gambar 8-24 diketahui bahwa batas yang diacu untuk penataan ruang dan pengelolaan sumber daya air berbeda. Untuk masing-masing kajian batas-batas tersebut yang diacu. Untuk harmonisasinya maka ketika Pola Pengelolaan Sumber Daya Air sudah ditentukan, batas teknis sebaiknya diekivalensikan ke batas administrasi. Hal ini disebabkan pada kondisi riil di lapangan batas teknis sulit ditentukan (lebih bersifat imajiner) dan tidak semua pihak memahami batas teknis tersebut. Bahkan untuk batas CAT sama sekali tak bisa dilihat di permukaan tanah. Batas ini lebih ditentukan dengan melakukan interpretasi dan kajian geologi, hidrogeologi dan geomorfologi fluvial.

Namun untuk batas administrasi di lapangan mudah ditentukan, karena untuk kepemilikan lahan setiap orang akan tahu batas-batas kepemilikannya dengan pembagian wilayah administrasi berhierarki mulai dari: provinsi, kabupaten/kota, kecamatan, kelurahan/desa, rukun warga (RW), rukun tetangga (RT) sampai kepemilikan pribadi.

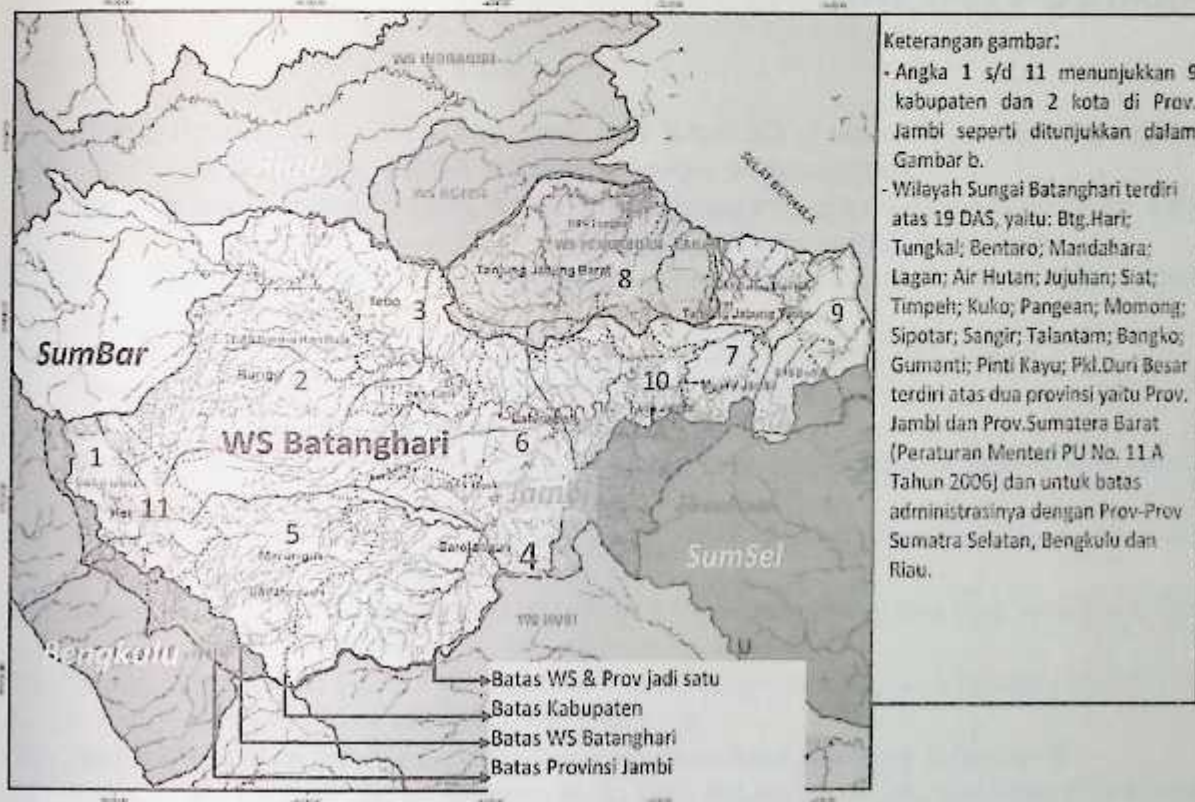
Dengan acuan ketentuan yang dibuat dalam Pola Pengelolaan Sumber Daya Air maka transformasi batas teknis ke batas administrasi akan memberikan kemudahan dalam upaya harmonisasi dan integrasi antara pengelolaan sumber daya air dengan penataan ruang dan aspek-aspek lainnya seperti kehutanan, wilayah pesisir (*coastal cell*) dan lainnya.



a. Batas Provinsi, Cekungan air tanah (CAT), Non-CAT dan Wilayah Sungai (WS)



b. CAT, Non-CAT dan batas kabupaten/kota di Provinsi Jambi



c. Overlay antara batas administrasi dan batas teknis (hidrologi)

Gambar 8-24. Contoh Batas Teknis dan Administrasi

(BPS Provinsi Jambi, 2007; Satker BWS Sumatra VI, 2008; KepPres No. 12 Tahun 2012)