

BAB III

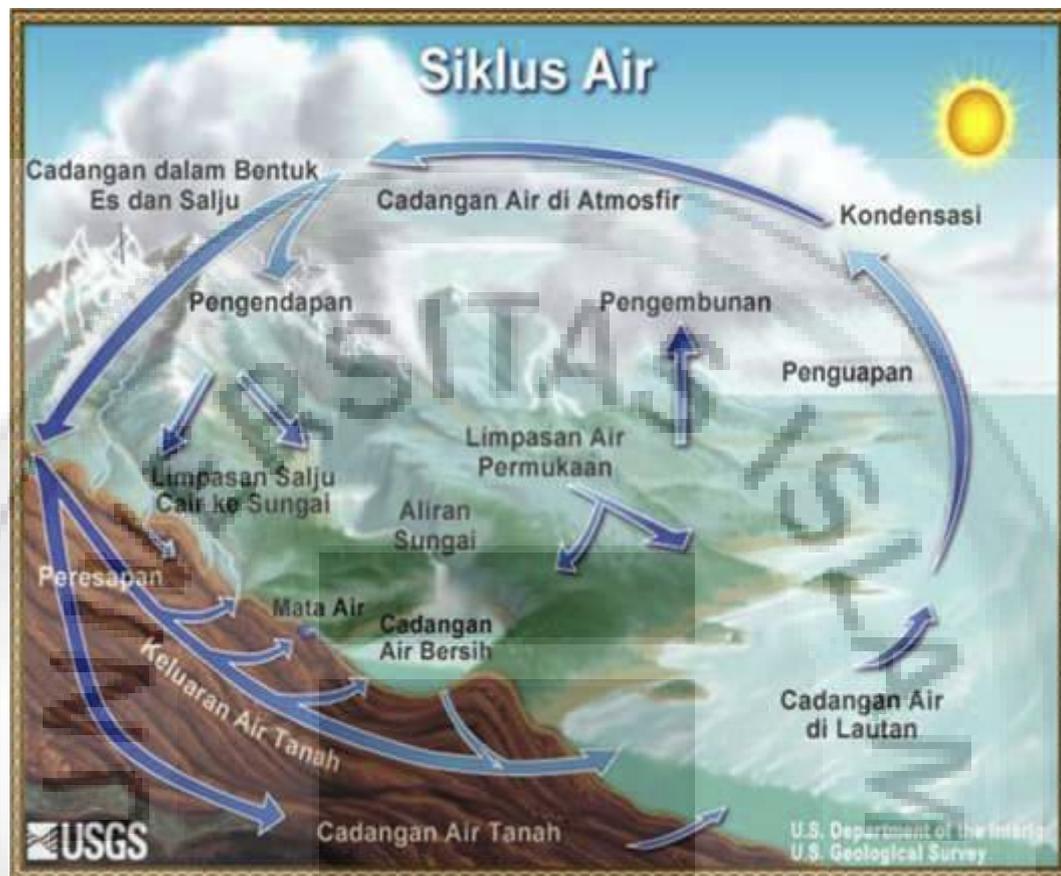
LANDASAN TEORI

3.1 Siklus Hidrologi dan Neraca Air (*Water Balance*)

Air di bumi mengalami suatu perputaran melalui serangkaian peristiwa yang berlangsung secara terus menerus dan membentuk suatu siklus yang dikenal dengan siklus hidrologi (*Hydrological Cycle*) seperti pada gambar 3.1.

Tahapan daur hidrologi dimulai dari penguapan air dari samudera. Perubahan bentuk air menjadi uap ini disebabkan oleh energi panas dari matahari. Uap air ini dibawa ke udara oleh massa udara yang bergerak. Uap air ini akan terkondensasi pada lapisan atmosfer bumi dan akan terjadi presipitasi (hujan).

Sebagian air hujan yang tiba ke permukaan tanah akan masuk ke dalam tanah (infiltrasi). Namun tidak semua air yang mengalir di dalam tanah akan tiba di laut karena dalam perjalanan menuju laut sebagian akan menguap dan kembali ke udara. Sebagian air yang masuk ke dalam tanah akan keluar lagi ke sungai-sungai (disebut aliran intra = *interflow*) dan sebagian lagi akan tersimpan sebagai air tanah (*groundwater*) yang akan keluar sedikit demi sedikit dalam jangka waktu yang lama ke permukaan tanah di daerah-daerah yang rendah (*groundwater run off*) atau limpasan air tanah (Indarto, 2010 : 58).



Sumber : U.S. Geological Survey. 2010.

Gambar 3.1
Siklus Hidrologi

Neraca air dapat ditunjukkan dengan hubungan antara komponen-komponen dalam siklus hidrologi yang dinyatakan sebagai persamaan berikut :

$$P = R + ET + I$$

atau,

$$P = R + ET + (BF + ds)$$

Dimana : P = Presipitasi (curah hujan) (mm),

R = Run off (limpasan) (mm),

E = Evaporasi (mm),

T = Transpirasi (mm),

ET = Evapotranspirasi (mm),

I = Infiltrasi (mm),

BF = *Base flow* (aliran sungai dari mataair) (mm),

dS = *Recharge* (imbuhan airtanah) (mm).



Sumber : Sudarto Notosiswoyo, *Bahan Ajar Hidrologi-Airtanah*, FIKTM ITB

Gambar 3.2

Skema Neraca Air (Air Meteorik)

Tabel 3.1
Perkiraan Kuantitas Air di Bumi

Jenis Air	Area	Volume	Persentase (%)	Persen (%)
	(10 ⁶ km ²)	(km ³)	Total Air di Bumi	dari air Tawar
Laut	361,3	1.338.000.000	96,5	
Air Bawah Tanah :				
Air Tawar	134,8	10.530.000	0,76	30,1
Air Asin	134,8	12.870.000	0,93	
Lengas Tanah	82,0	16.500	0,0012	0,05
Es di Kutub	16,0	24.023.500	1,7	68,6
Es Lain dan Salju	0,3	340.600	0,025	1,0
Danau :				
air Tawar	1,2	91.000	0,007	0,26
Air Asin	0,8	85.400	0,006	
Marshes	2,7	11.470	0,0008	0,03
Sungai	148,8	2.120	0,0002	0,006
Air Biologis	510,0	1.120	0,0001	0,003
Air di Atmosfer	510,0	12.900	0,001	0,04
Total Air	510,0	1.385.984.610	100	
Air Tawar	148,0	35.029.210	2,5	100

Sumber : Indarto (2010); dikutip dari Chow, V.T., 1988, Maidment, D.R., 1993.

3.2 Air Permukaan (*Surface Water*)

Air permukaan adalah bagian dari siklus air yang mengalir di atas permukaan bumi. Air permukaan juga merupakan bagian dari curah hujan yang mengalir di atas permukaan tanah menuju sungai, danau atau laut. Air limpasan secara garis besar dipengaruhi oleh elemen-elemen meteorologi yang diwakili oleh curah hujan dan elemen-elemen daerah pengaliran yang menyatakan sifat-sifat dari daerah pengaliran (Sosrodarsono, 1976 : 135).

Untuk memperkirakan debit air limpasan maksimal digunakan *Metoda Rasional* dengan rumus :

$$Q = 0.278 C I A$$

Dimana : Q = Debit Air (m^3 /detik),

C = Koefisien Limpasan,

I = Intensitas Curah Hujan (mm/jam),

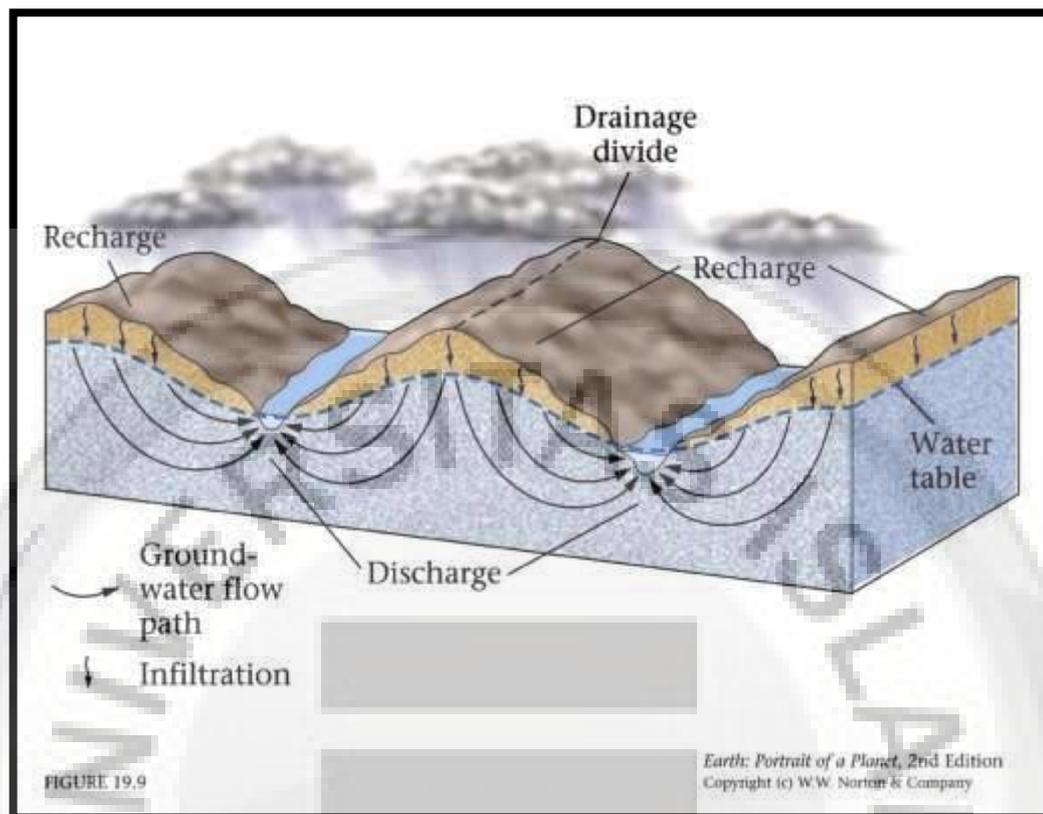
A = Luas Daerah Limpasan (m^2).

3.3 Airtanah (*Groundwater*)

Airtanah adalah air yang berada di bawah permukaan tanah (di dalam tanah) dan mengisi rongga atau pori-pori tanah dan batuan, pada zona jenuh air yang gerakan atau alirannya dipengaruhi oleh gaya gravitasi.

Keberadaan lapisan tanah atau batuan yang mampu meresapkan dan meluluskan air yang muncul di permukaan disebut kawasan resapan (*recharge area*). Kemunculan lapisan tersebut tidak selalu ada di setiap wilayah permukaan. Apabila suatu wilayah yang bagian permukaannya tertutup oleh lapisan kedap seperti lempung yang cukup tebal maka daerah tersebut bukan merupakan kawasan resapan (*discharge area*).

Discharge area merupakan vektor resultan dari aliran airtanah, energi (*head*) airtanah paling kecil sehingga adanya penumpukan aliran airtanah dan dicirikan adanya muka airtanah dangkal (kurang dari 5 m), sehingga adanya mata air (*springs*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.

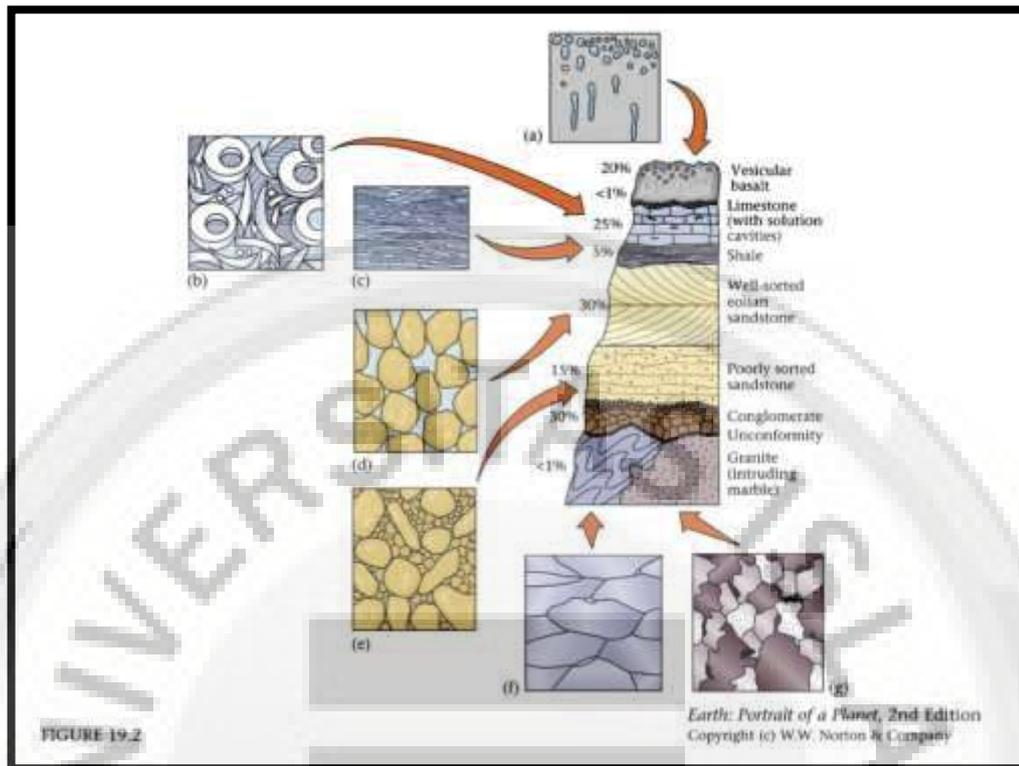


Sumber : Potret of a Planet, 2nd Edition Copyright © W.W. Norton and Company.

Gambar 3.3
Water Flow Path

Airtanah berasal dari sumber utama ialah air meteorik. Sumber lainnya relatif sedikit, misalnya air juvenil (air magma) dan air konnat (air yang terperangkap di sedimen pada saat pembentukannya). Sehubungan dengan itu, airtanah sangat tergantung dari jumlah air hujan yang meresap ke dalam tanah. Proses peresapan akan sangat tergantung dari laju turun hujan, zona saturasi, kandungan awal dari dalam airtanah, porositas, permeabilitas dan vegetasi di permukaan tanah (Bell, 1980).

Adapun persentase keterdapatan air di dalam batuan dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Sumber : Potret of a Planet, 2nd Edition Copyright © W.W, Norton and Company.

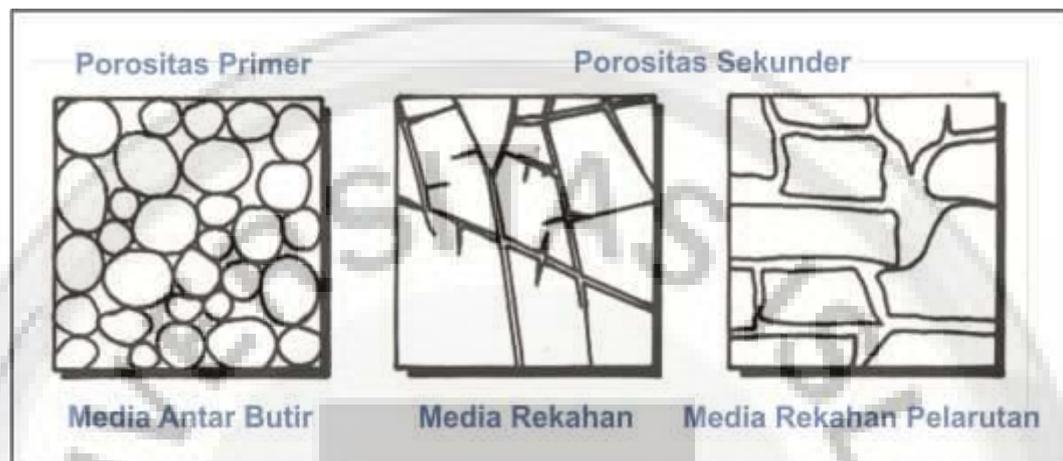
Gambar 3.4
Persentase Keterdapatn Air di Dalam Batuan

Bila terjadi hujan yang sangat lebat, ternyata tidak selalu menghasilkan peresapan bermakna, karena air lebih banyak mengalir sebagai air permukaan. Sedangkan jika tidak terlalu lebat namun teratur, lebih efisien untuk terjadi peresapan. Dalam hal ini vegetasi di permukaan dapat mengaturnya. Permukaan zona yang telah tersaturasi air disebut muka airtanah, nama lainnya yaitu freatik (*phreatic*).

Klasifikasi zona airtanah misalnya dibuat oleh *Meinzer* (1942), *de Weist* (1966) dan *Domenico & Schwartz* (1990), antara lain :

- **Akuifer (*Aquifer*)**

Lapisan yang dapat menyimpan dan mengalirkan air dalam jumlah yang banyak. Contoh : Pasir, kerikil, batupasir, batugamping rekahan.



Sumber : Meinzer (1942), de Weist (1966) dan Domenico & Schwartz (1990).

Gambar 3.5
Media Penyusun Akuifer

- **Akuifug (*Aquifug*)**

Lapisan batuan yang kedap air, tidak dapat menyimpan dan mengalirkan air, misalnya batuan kristalin dan batuan metamorf.

- **Akuitar (*Aquitard*)**

Lapisan batuan yang dapat menyimpan air dan mengalirkan dalam jumlah yang terbatas, misalnya lempungpasiran.

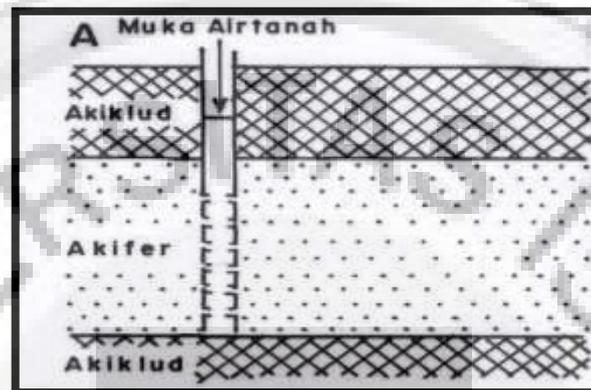
- **Akuiklud (*Aquiclude*)**

Lapisan yang mampu menyimpan air, tetapi tidak dapat mengalirkan air dalam jumlah yang berarti, misalnya lempung, serpih dan tuf.

Tiga tipe akuifer menurut Hidrodinamika :

➤ **Akuifer Tertekan (*Confined Aquifer*)**

Adalah akuifer yang bagian atas dan bawahnya dibatasi oleh lapisan bersifat akuifug atau akuiklud (Gambar 3.6).



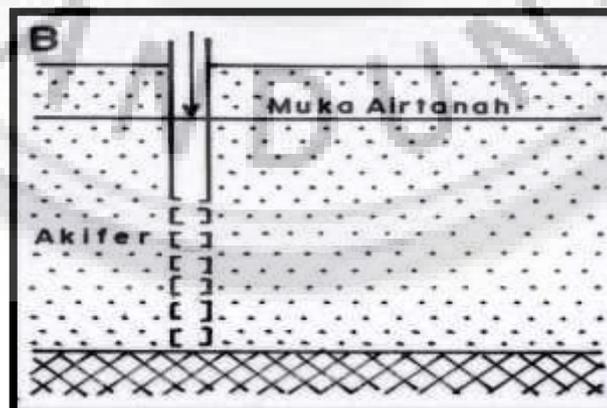
Sumber : Meinzer (1942), de Weist (1966) dan Domenico & Schwartz (1990)

Gambar 3.6

Akuifer Tertekan (*Confined Aquifer*)

➤ **Akuifer Bebas (*Unconfined Aquifer*)**

Adalah akuifer yang dibatasi oleh lapisan impermeabel di bagian bawahnya tetapi pada bagian atasnya tidak ada lapisan penutup (Gambar 3.7).



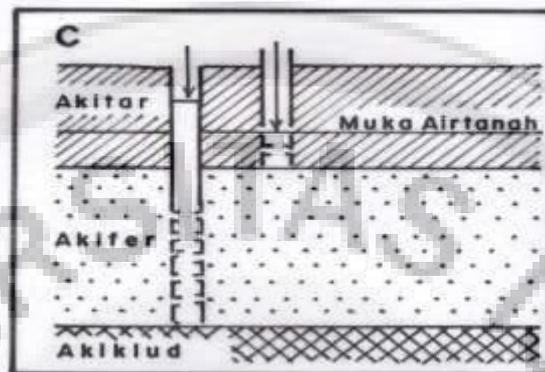
Sumber : Meinzer (1942), de Weist (1966) dan Domenico & Schwartz (1990)

Gambar 3.7

Akuifer Bebas (*Unconfined Aquifer*)

➤ **Akuifer Bocor (*Leaky Aquifer*)**

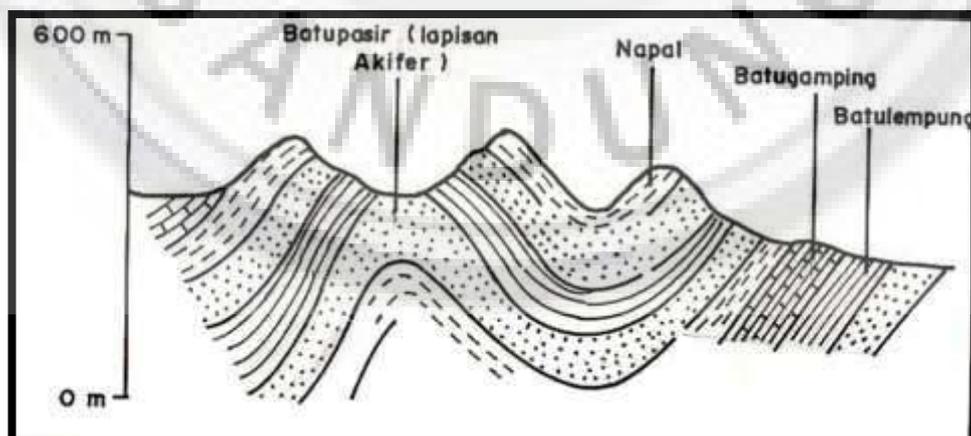
Adalah akuifer yang dibatasi oleh lapisan impermeabel di bagian atas dan atau di bagian bawahnya (Gambar 3.8).



Sumber : Meinzer (1942), de Weist (1966) dan Domenico & Schwartz (1990).

Gambar 3.8
Akuifer Bocor (*Leaky Aquifer*)

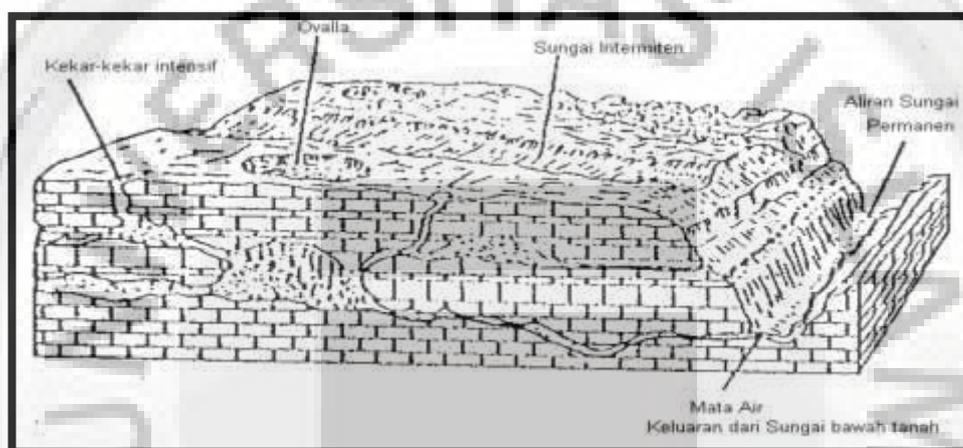
Batuan sedimen yang memiliki porositas baik seperti batupasir relatif akan memberikan pola penyebaran porositas maupun permeabilitas yang relatif homogen. Geometri batuan ini akan bersifat bidang atau lapisan dengan berbagai variasi lipatan akibat adanya struktur geologi (Gambar 3.9).



Sumber : S.Mandel, 1981

Gambar 3.9
Airtanah Fornasi Batuan Sedimen Terlipat

Airtanah pada zona lemah dapat terjadi pada batuan apapun. Akibat adanya zona lemah seperti sesar dan kekar, batuan dapat menjadi *porous* dan permeabel. Pola penyebaran kedua sifat fisik tersebut tergantung dari arah dan letak struktur geologi yang mengontrolnya (Gambar 3.10). Selain itu geometrinya juga sangat tergantung pada arah dan kedudukan bagian-bagian yang rusak.



Sumber : S.Mandel, 1981

Gambar 3.10
Airtanah pada Zona Lemah

3.4 Sistem Penyaliran Tambang

Sistem penyaliran tambang adalah suatu metoda yang dilakukan untuk mencegah masuknya air ke dalam lubang bukaan tambang baik berasal dari air hujan yang mengalir di permukaan (*run off*), maupun yang terinfiltrasi ke dalam tanah melalui lapisan batuan permeabel atau impermeabel serta mengeluarkan air yang telah masuk ke dalam lubang bukaan tambang (pit).

Efek langsung dan tidak langsung dari air tambang (airtanah maupun limpasan) terhadap aktifitas penambangan adalah menyangkut biaya

dan keselamatan kerja. Berikut ini diuraikan efek langsung maupun tidak langsung dari air terhadap aktifitas penambangan maupun di luar areal penambangan.

1. Efek Langsung dari Air Terhadap Penambangan

- Biaya untuk penyaliran.
- Longsor lereng akibat resapan air dapat menghentikan aktifitas produksi dan merusak *front* penambangan, perolehan bahan galian rendah, atau mungkin terjadi kecelakaan tambang.

2. Efek Air Tidak Langsung Terhadap Penambangan

- Mengurangi efisiensi kerja karyawan, peralatan dan menghambat penanganan material,
- Menambah waktu dan biaya perawatan (*maintenance*) alat, ban, atau kecelakaan akibat penggunaan listrik,
- Harus membersihkan material pengotor akibat longsor tanah di areal penambangan,
- Kemungkinan runtuhannya membawa serta gas beracun,
- Mengganggu aktifitas peledakan,
- Lumpur membuat produk menjadi tidak dapat diterima oleh proses berikutnya,
- Terjadi penyumbatan pada pipa-pipa akibat pompa menghisap air lumpur,
- Kemungkinan perusahaan perlu membeli material yang tahan air (*waterproof*) untuk melindungi produk.

3.4.1 Penyelidikan Hidrologi

Hidrologi adalah ilmu yang mempelajari ketersediaan dan sifat fisik air permukaan. Penyelidikan hidrologi dilakukan dengan cara pengumpulan dan analisis terhadap data sekunder meteorologi (curah hujan, hari hujan, tata guna lahan dan lain-lain) dari daerah penyelidikan dan daerah di sekitarnya, serta penentuan luas *catchment area*.

3.4.1.1 Daerah Tangkapan Air Hujan (*Catchment Area*)

Daerah tangkapan air hujan (*catchment area*) dapat diartikan sebagai luas wilayah yang apabila hujan turun, maka air hujan tersebut akan mengalir ke daerah yang lebih rendah menuju titik pengaliran. Daerah tangkapan hujan ini sangat berpengaruh dalam menentukan debit air limpasan yang akan masuk ke suatu tempat.

Semua air yang mengalir di permukaan belum tentu menjadi sumber air dari suatu sistem penyaliran. Kondisi ini tergantung dari daerah tangkapan hujan dan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kondisi topografi, kerapatan vegetasi serta keadaan geologi.

Adapun cara menentukan daerah tangkapan hujan adalah dengan menentukan batas terluar dari daerah penelitian karena berdasarkan dari keadaan daerah penelitian tidak semua air limpasan masuk ke *front* kerja tambang. Daerah tangkapan hujan ini dibatasi oleh

pegunungan dan bukit-bukit yang diperkirakan akan mengumpulkan air hujan sementara.

Dengan adanya proses penggalian dan penimbunan maka kemungkinan perubahan luas daerah tangkapan air hujan akan berubah sesuai dengan bentuk dan tinggi rendahnya galian maupun timbunan pada periode tertentu. Apabila diasumsikan dengan curah hujan tetap (curah hujan rata-rata maksimum perhari) maka besar kecilnya debit air yang harus dipompa serta dialirkan ke saluran utama akan dipengaruhi oleh perubahan luas daerah tangkapan air hujan.

3.4.1.2 Koefisien Limpasan (C)

Koefisien limpasan (C) dipengaruhi oleh faktor-faktor tutupan tanah, kemiringan serta intensitas dan lamanya hujan. Koefisien ini merupakan suatu konstanta yang menggambarkan dampak proses infiltrasi, penguapan, kondisi penggunaan lahan dan kemiringan lahan. Jadi yang harus diperhatikan dalam penentuan koefisien limpasan adalah sebagai berikut :

1. Kerapatan Vegetasi

Daerah dengan vegetasi yang rapat akan memberikan nilai koefisien limpasan yang kecil, karena air hujan yang jatuh tidak langsung mengenai tanah, tetapi akan tertahan oleh tumbuh-tumbuhan dan akan memperbesar infiltrasinya. Sebaliknya bila hujan jatuh di tanah yang gundul, akan memberikan nilai koefisien limpasan yang besar.

2. Tata Guna Lahan

Lahan persawahan atau rawa-rawa akan memberikan nilai koefisien limpasan yang kecil daripada daerah hutan atau perkebunan, karena air hujan yang jatuh di daerah persawahan akan tertahan oleh petak-petak sebelum akhirnya menjadi limpasan permukaan.

3. Kemiringan Tanah

Daerah dengan kemiringan yang kecil ($< 3\%$) diberikan nilai koefisien limpasan yang kecil, karena infiltrasi yang terjadi akan lebih besar daripada daerah dengan kemiringan tanah yang sedang atau curam.

4. Jenis Material

Jenis material pada *areal* penambangan berpengaruh terhadap kondisi penyerapan air limpasan karena untuk setiap jenis dan kondisi material yang berbeda memiliki koefisien materialnya masing-masing. Koefisien tersebut merupakan parameter yang menggambarkan hubungan curah hujan dan limpasan, yaitu memperkirakan jumlah air hujan yang mengalir menjadi limpasan langsung di permukaan. Beberapa perkiraan koefisien limpasan dan kecepatan aliran yang diizinkan terlihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2
Nilai Koefisien Limpasan

No	Kemiringan	Tata Guna Lahan Tutupan (<i>Landuse</i>)	Koefisien Limpasan (C)
1.	$< 3\%$	▪ Sawah, rawa	0,2
		▪ Hutan, perkebunan	0,3
		▪ Perumahan dengan kebun	0,4
2.	3 – 15 %	▪ Hutan, perkebunan	0,4
		▪ Perumahan	0,5
		▪ Tumbuhan yang jarang	0,6
		▪ Tanpa tumbuhan, daerah	0,7

		penimbunan	
3.	> 15 %	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hutan ▪ Perumahan, kebun ▪ Tumbuhan yang jarang ▪ Tanpa tumbuhan, daerah tambang 	0,6 0,7 0,8 0,9

Sumber : Sistem Penyaliran Tambang, ITB, 1999 dan "Applied Hidrogeology", C.W Fetter, 1994

3.4.1.3 Curah Hujan

Hujan merupakan air yang jatuh ke permukaan bumi dan merupakan uap air di atmosfer yang terkondensasi dan jatuh dalam bentuk tetesan air. Sistem penyaliran tambang lebih ditujukan pada penanganan air permukaan. Hal ini dikarenakan air yang masuk ke dalam lokasi tambang sebagian besar adalah air hujan.

Curah hujan adalah jumlah atau volume air hujan yang jatuh pada suatu satuan luas, dinyatakan dalam satuan mm. Curah hujan sebesar 1 mm berarti pada luasan 1 m² jumlah air hujan yang jatuh sebanyak 1 liter. Sehingga curah hujan 1 mm identik dengan 1 liter/m². Klasifikasi hujan yang digunakan adalah klasifikasi berdasarkan Badan Meteorologi dan Geofisika, yaitu seperti pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3
Klasifikasi Hujan Menurut BMG

Hujan	(mm/jam)	(mm/hari)
Ringan	1-5	5 - 20
Sedang	5 - 10	20 - 50
Lebat	10 - 20	50 - 100
Sangat Lebat	> 20	> 100

Sumber : Badan Meteorologi Geofisika (BMG)

Dalam pembuatan suatu rancangan penyaliran tambang data distribusi curah hujan yang diperlukan adalah distribusi curah hujan jangka waktu pendek yaitu jangka waktu harian. Penggunaan dari masing-masing data distribusi curah hujan tersebut disesuaikan dengan tujuan dari perencanaan yang dilakukan.

Curah hujan merupakan salah satu faktor penting dalam suatu sistem penyaliran, karena besar kecilnya curah hujan akan mempengaruhi besar kecilnya air tambang yang harus diatasi. Besar curah hujan dapat dinyatakan sebagai volume air hujan yang jatuh pada suatu areal tertentu. Oleh karena itu besarnya curah hujan dapat dinyatakan dalam meter kubik per satuan luas, secara umum dinyatakan dalam tinggi air (mm).

Data curah hujan yang diperoleh dari stasiun pengamatan hujan merupakan besarnya curah hujan harian maksimum yang terjadi selama satu tahun dan dinyatakan dalam satuan mm/24 jam. Data curah hujan tersebut merupakan data kasar yang tidak dapat digunakan secara langsung untuk perhitungan dalam analisis curah hujan (*Gumbel, E. J. 1954*).

Analisis curah hujan dapat dilakukan dengan beberapa metoda, diantaranya metoda analisis frekuensi langsung (*direct frequency analysis*). Analisis ini dilakukan untuk menentukan curah hujan rencana berdasarkan data curah hujan yang tersedia.

Analisis frekuensi langsung dapat dilakukan dengan dua sajian data curah hujan, yaitu :

a. Seri Tahunan (*Annual Series*)

Pengolahan data curah hujan dilakukan dengan mengambil satu curah hujan tertinggi dalam rentang waktu satu tahun. Kekurangan dalam analisis ini adalah data curah hujan dibawah curah hujan maksimum pada tahun tertentu tetapi lebih tinggi dari curah hujan maksimum pada tahun yang lain tidak diperhitungkan.

b. Seri Sebagian (*Partial Duration Series*)

Cara ini dapat menutupi kekurangan cara seri tahunan, karena pengolahan data dilakukan dengan mengambil data curah hujan yang melebihi suatu nilai tertentu dengan mengabaikan waktu kejadian hujan yang bersangkutan. Sebelum dilakukan analisis, harus ditentukan jumlah data yang akan diolahnya lebih dulu. Pada *partial duration series*, data diambil dari nilai maksimum yang mewakili tiap bulannya, Jumlah data curah hujan yang akan dipakai dalam analisis intensitas curah hujan ada 30 buah data.

1. Periode Ulang Hujan

Periode ulang hujan (PUH) adalah periode (tahun) dimana suatu hujan dengan tinggi intensitas yang sama kemungkinan bisa terjadi lagi. Kemungkinan terjadinya adalah satu kali dalam batas periode (tahun) ulang yang ditetapkan (Yunus Ashari. *Diktat Kuliah Sistem Penirisan Tambang, 2011*).

Penentuan periode ulang hujan dilakukan dengan menyesuaikan data dan keperluan pemakaian saluran yang berkaitan dengan umur tambang serta tetap memperhitungkan resiko hidrologi (*Hidrology Risk*). Penetapan periode ulang hujan sebenarnya lebih ditekankan pada masalah kebijakan dan resiko yang perlu diambil sesuai dengan perencanaan.



Tabel 3.4
Penentuan Periode Ulang Hujan

Lokasi	Periode Ulang Hujan
	(Tahun)
Sarana Tambang	2 - 5
Lereng Tambang dan Penimbunan	5 - 10
Sumuran Utama	10 - 25
Penyaliran Keliling Tambang	25
Pemindahan Aliran Sungai	100

Sumber : Kite, G.W, 1997

Formula Resiko hidrologi (Pt)

$$Pt = 1 - 1 - \left(\frac{1}{Tr} \right)^{TL} \times 100 \%$$

Dimana : Pt = Resiko Hidrologi (%),

Tr = Periode Ulang (Tahun),

TL = Umur tambang (Tahun).

2. Analisis Curah Hujan Rencana (CHR)

Intensitas Curah Hujan adalah jumlah curah hujan dalam jangka waktu tertentu, dan dinyatakan dalam mm persatuan waktu (mm/jam, mm/menit dan mm/detik). Intensitas curah hujan dapat digunakan untuk menghitung debit air limpasan. Besarnya intensitas curah hujan dapat ditentukan secara langsung jika ada rekaman durasi hujan setiap harinya yang diukur dengan alat penakar hujan otomatis. Perhitungan intensitas curah hujan dimaksudkan untuk mendapatkan kurva durasi yang nantinya dapat dipakai sebagai dasar perencanaan debit limpasan hujan pada daerah penelitian. Untuk mengolah data curah hujan

menjadi intensitas curah hujan digunakan cara statistik dari pengamatan durasi yang terjadi.

Analisis statistik yang digunakan adalah dengan formula *Extreme Value E.J Gumbel*. Adapun langkah-langkah analisis dari formula tersebut adalah sebagai berikut :

- a. Tentukan rata-rata \bar{X} nilai data, dengan rumus :

$$\bar{X} = \frac{CH}{n}$$

Dimana : \bar{X} = Rata-rata nilai data (mm),

CH = Jumlah nilai data (mm),

n = Jumlah data.

- b. Tentukan koreksi rata-rata (γ_n), dengan rumus :

$$\gamma_n = -\ln - \ln \frac{n+1-m}{n+1}$$

Dimana : γ_n = Koreksi Rata-Rata,

n = Jumlah Urut Data,

m = Nomor Urut Data.

Kemudian tentukan :

$$\bar{\gamma}_n = -\ln - \ln \frac{n+1-m}{n+1}$$

Dimana : $\bar{\gamma}_n$ = Rata-Rata γ_n ,

$\sum \gamma_n$ = Jumlah Nilai γ_n ,

n = Jumlah Data.

c. Tentukan standar deviasi (S), dengan rumus :

Standar Deviasi *Distribusi Gumbel*

$$S = \frac{(\sum Xi - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Standar Deviasi γ_n

$$S_{\gamma n} = \frac{(\sum \gamma_n - \bar{\gamma})^2}{n - 1}$$

Dimana : S = Standar Deviasi,

$\bar{\gamma}_n$ = Rata-Rata γ_n ,

$\sum \gamma_n$ = Jumlah Nilai γ_n ,

n = Jumlah Data.

d. Tentukan koreksi simpangan (S_n), dengan rumus :

$$S_n = \frac{(\sum \gamma_n - \bar{\gamma})}{n - 1}$$

Dimana : S_n = Koreksi Simpangan,

γ_n = Nilai γ_n Ke- i ,

$\bar{\gamma}_n$ = Rata-Rata γ_n ,

n = Jumlah Data.

- e. Tentukan koreksi varian (γ_t), dengan rumus :

$$\gamma_t = -\ln - \ln \frac{T-1}{T}$$

Dimana : γ_t = Koreksi Varians,

T = Periode Ulang Hujan.

Nilai koreksi varian (γ_t) dipengaruhi oleh lama periode ulang yang dipakai.

- f. Tentukan curah hujan rencana (CHR)

Tujuan akhir dari analisis ini adalah untuk memperoleh curah hujan rencana (CHR), nilai tersebut diperoleh dengan memasukkan nilai diatas kedalam persamaan seperti berikut :

$$CHR = \bar{X} + S x S_n (\gamma_t - \gamma)$$

Dimana : CHR = Curah Hujan Rencana **E.J. Gumbel** (mm/hari),

\bar{X} = Rata-Rata Intensitas Curah Hujan (mm/hari),

S = Standar Deviasi,

S_n = Koreksi Simpangan,

γ_t = Koreksi Varian,

γ_N = Rata-Rata Nilai γ_n .

- g. Curah Hujan untuk Periode Ulang Hujan (XT) menurut **E.J**

Gumbel :

$$X_T = R_{24} \frac{\gamma t - \gamma n}{S_{\gamma n}} \times S$$

Dimana : X_T = Curah Hujan untuk Periode Ulang Hujan (mm/hari),

CHR = Curah Hujan Rencana **E.J. Gumbel** (mm/hari), R_{24}

γt = Koreksi Varians,

γn = Koreksi Rata-Rata,

$S_{\gamma n}$ = Standar Deviasi dari γn ,

S = Standar Deviasi Curah Hujan Harian.

3. Intensitas Curah Hujan Perjam

Rumus yang dapat digunakan untuk mengolah data curah hujan harian kedalam satuan jam adalah dengan Rumus *Mononobe* :

$$I = \frac{R_{24}}{24} \times \frac{24^{\frac{2}{3}}}{t}$$

Dimana : R_{24} = Curah Hujan Dalam Satu Hari (mm/hari),

t = Durasi Hujan (jam),

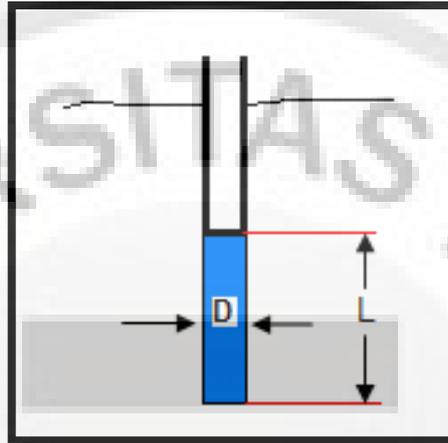
I = Intensitas Curah Hujan Perjam (mm/jam).

3.4.2 Penyelidikan Hidrogeologi

Hidrogeologi didefinisikan sebagai studi berbagai ilmu dengan interaksi ekstensif antara air dan kerangka kerja geologi (*Maxey, 1964*).

Penyelidikan hidrogeologi dilakukan dengan mempelajari lapisan

geologi batuan dan melakukan uji kelulusan air dengan metoda *falling head test*. Lapisan yang diuji adalah lapisan yang diperkirakan bersifat permeabel atau impermeabel yang dianggap sebagai sumber air yang berpotensi merembes masuk ke dalam bukaan tambang.



Gambar 3.11
Skema Uji *Falling Head Test*

Debit airtanah adalah volume air yang masuk ke dalam tambang (*pit*) yang berasal dari rembesan batuan pada dinding lereng tambang. Debit airtanah dihitung dengan Persamaan *Darcy* (1856), yaitu sebagai berikut :

$$Q = k i A$$

Dimana : Q = Debit Airtanah ($m^3/detik$),

k = Koefisien Permeabilitas ($m/detik$),

i = Gradien Hidrolik,

A = Luas Penampang Akuifer (m^2).

Dari data-data yang didapat dari pengukuran *falling head test*, perhitungan koefisien permeabilitas (k) menggunakan persamaan dari **Hoek and Bray (1981)**, yaitu sebagai berikut :

$$k = \frac{A}{F (t_2 - t_1)} \times \ln \frac{H_1}{H_2}$$

Dimana :

k = Koefisien Permeabilitas (m/s),

A = Luas Penampang dari Kolom Air (m^2),

F = *Shape Factor* yang disesuaikan dengan kondisi *bottom* dari lubang,

t_1, t_2 = Pengukuran Peubah Waktu Penurunan Level Air (detik),

H_1, H_2 = Level Air di Dalam Pipa.

$$F = \frac{2\pi L}{\ln \frac{2L}{D}} \dots \dots \text{Untuk } L > 4 D$$

Dimana :

L = Kedalaman Lubang (cm),

D = Diameter Lubang (cm).

3.4.3 Sistem Penanggulangan Air Tambang

Dengan mengetahui perkiraan debit air, koefisien permeabilitas lapisan batuan yang akan ditambang, dan perkiraan debit airtanah yang potensial masuk ke dalam bukaan tambang, maka sasaran akhir dari studi hidrologi dan hidrogeologi ini adalah membuat rekomendasi sistem pengendalian air tambang.



3.4.3.1 Penanggulangan Air Limpasan di Luar Area PIT

Air limpasan di luar *area* pit akan dialihkan melalui saluran pengalihan air yang disesuaikan dengan kondisi topografi dan posisi sungai dekat pit, sehingga air limpasan yang akan masuk ke dalam pit dapat langsung dialirkan ke luar lokasi penambangan. Perancangan dimensi saluran pengalihan air limpasan di luar pit didasarkan atas perhitungan debit air limpasan di luar pit.

Dalam merancang dimensi saluran perlu dilakukan analisis pada daerah lokasi penambangan sehingga saluran air tersebut dapat memenuhi hal-hal sebagai berikut :

- Dapat mengalirkan debit air yang direncanakan,
- Kecepatan air yang tidak merusak saluran (erosi),
- Kecepatan air yang tidak menyebabkan terjadinya pengendapan,
- Kemudahan dalam penggalian atau pembuatan,
- Kemudahan dalam hal pemeliharaan.

Salah satu bentuk saluran yang sering digunakan pada perusahaan tambang yaitu bentuk saluran trapesium. Keuntungan dari bentuk penampang trapesium adalah sebagai berikut :

- Dapat mengalirkan debit air yang besar,
- Tahan terhadap erosi,
- Tidak terjadi pengendapan didasar saluran,
- Mudah dalam pembuatan.

Pada perencanaan saluran pengalihan air di luar pit ada beberapa faktor lapangan yang perlu diperhatikan yaitu :

a. *Catchment Area*

Catchment area adalah suatu daerah tangkapan hujan yang dibatasi oleh wilayah tangkapan hujan yang ditentukan dari titik-titik elevasi tertinggi sehingga akhirnya merupakan suatu poligon tertutup dengan pola yang sesuai dengan topografi dan mengikuti kecenderungan arah gerak air. Dengan pembuatan *catchment area* maka diperkirakan setiap debit hujan yang tertangkap akan terkonsentrasi pada elevasi terendah. Pembatasan *catchment area* dilakukan pada peta topografi, dan untuk merencanakan sistem penyalirannya dianjurkan menggunakan peta rencana penambangan dan peta situasi tambang.

b. Koefisien kekasaran *Manning* (n)

Menentukan koefisien kekasaran *Manning* (n) berguna untuk memperkirakan hambatan aliran pada saluran tertentu yang benar-benar tidak dapat diperhitungkan, seperti kekasaran permukaan, tetumbuhan, ketidakteraturan saluran, pengendapan dan penggerusan serta belokan saluran. Adapun tabel koefisien kekasaran *Manning* (n) dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5
Koefisien Kekasaran *Manning* (n)

Chanel Conditions		Values	
<i>Material Involved</i>	<i>Earth</i>	no	0,02
	<i>Rock Cut</i>		0,025
	<i>Fine Gravel</i>		0,024
	<i>Coarse gravel</i>		0,028
<i>Degree of Irregularity</i>	<i>Smooth</i>	n1	0
	<i>Minor</i>		0,005
	<i>Moderate</i>		0,01
	<i>Severe</i>		0,02
<i>Variations off channel cross section</i>	<i>Gradual</i>	n2	0
	<i>Alternating occasionally</i>		0,005
	<i>Alternating frequently</i>		0,01 - 0,015
<i>Relative effect of obstruction</i>	<i>Negligible</i>	n3	0
	<i>Minor</i>		0,01 - 0,015
	<i>Appreciable</i>		0,02 - 0,03
	<i>Severe</i>		0,04 - 0,06
<i>Vegetation</i>	<i>Low</i>	n4	0,005 - 0,01
	<i>Medium</i>		0,01 - 0,025
	<i>High</i>		0,025 - 0,5
	<i>Very High</i>		0,05 - 0,1
<i>Degree of meandering</i>	<i>Minor</i>	m5	1
	<i>Appreciable</i>		1.15
	<i>Severe</i>		1.3

Sumber : Ven Te Chow , *Applied Hidrology*, 1959

Penampang saluran buatan biasanya direncanakan berdasarkan bentuk geometris yang umum. Bentuk yang umum dipakai untuk saluran berdinding tanah yang tidak dilapisi adalah bentuk trapesium, sebab stabilitas kemiringan dindingnya dapat disesuaikan. Bentuk persegi panjang dan segitiga merupakan bentuk khusus selain trapesium.

Dari kondisi-kondisi tersebut bisa diperkirakan dimensi dan pola aliran salurannya. Kemudian untuk merencanakan suatu dimensi saluran pengalihan air bisa dengan mengikuti tahapan berikut :

- Tentukan pembagian *water divide* untuk setiap kemungkinan kondisi areal penambangan yang ada dari pembacaan peta rencana. Dan untuk mengukur luasnya tersebut bisa dengan menggunakan pembuatan poligon pada peta rencana tersebut.
- Buat jalur saluran dari masing-masing *water divide*,
- Hitung intensitas curah hujan rencana dengan menggunakan Metoda **Gumbel**,
- Tentukan koefisien material yang sesuai dengan kondisi dilapangan,
- Hitung debit rencana dengan menggunakan Rumus Rasional,
- Analisis dimensi saluran pengalihan.

Bentuk penampang saluran yang paling sering digunakan dan umum dipakai adalah bentuk trapesium, sebab mudah dalam pembuatannya, murah, efisien dan mudah dalam perawatannya, serta stabilitas kemiringan dindingnya dapat disesuaikan dengan keadaan daerah.

Dimensi penampang yang paling efisien yaitu dapat mengalirkan debit yang maksimum untuk suatu luas penampang basah tertentu. Perhitungan kapasitas penyaliran suatu saluran air dilakukan dengan Rumus *Manning*.

$$Q_s = \frac{A^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n P^{\frac{2}{3}}}$$

Atau

$$Q_s = v d^2 \sqrt{3}$$

Dimana :

Q_s = Debit ($m^3/detik$),

S = Gradien (%),

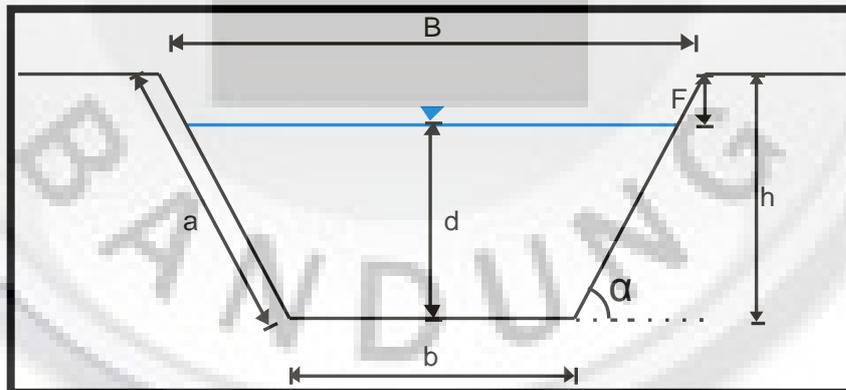
A = Luas Penampang Basah (m^2),

P = Keliling Basah (m),

n = Koefisien Manning Menunjukkan Kekasaran Dinding Saluran

v = Kecepatan Aliran Air (m/detik),

d = Kedalaman Basah Saluran (m).



Sumber : Ven Te Chow

Gambar 3.12
Penampang Saluran Pengalihan Bentuk Trapesium

Dimana :

B = Lebar Permukaan (m),

F = *Freeboard* (m),

- d = Kedalaman Basah (m),
h = Kedalaman Saluran (m),
a = Panjang Sisi saluran (m),
 α = Kemiringan Dinding Saluran ($^{\circ}$).

3.4.3.2 Penanggulan Air di Dalam Pit dengan Sistem Pemompaan

Air di dalam *area* pit berasal dari air limpasan permukaan dari air hujan dan airtanah yang merembes di bawah permukaan melalui lapisan batuan yang dapat merembeskan air baik melalui pori-pori maupun melalui rekahan batuan. Debit air tambang yang akan ditanggulangi dengan sistem pemompaan merupakan jumlah air di dalam pit akibat hujan yang turun langsung ke *area* tambang dan rembesan dari batuan di dalam pit.

Pompa adalah alat yang berfungsi mengalirkan cairan ke tempat yang memiliki tekanan atau perbedaan posisi tertentu, sehingga tidak dimungkinkannya cairan tersebut mengalir dengan secara alami.

Pemompaan adalah suatu proses penambahan energi kinetik dan energi potensial kepada fluida untuk memindahkannya dari satu titik ke titik lain.

Energi ini menyebabkan fluida mengalir melalui pipa atau naik ke ketinggian tertentu dan pompa memberikan tekanan kepada fluida untuk melewatinya dan keluar melalui ujung *outlet* (Sularso dan Haruo Tahara, 1983).

Kapasitas pompa dipengaruhi oleh :

- Beda elevasi antara tempat penampungan dengan tempat pembuangan,
- Kecepatan fluida yang mengalir,
- Gesekan antara fluida dengan pipa,
- Belokan-belokan dan perubahan aliran yang terjadi,
- Densitas cairan, dan
- Ukuran butiran material dalam cairan.

Beberapa faktor yang mempengaruhi umur alat adalah :

- pH Cairan

pH cairan yang akan dipompakan sangat berpengaruh terhadap umur pakai alat. Makin kecil pH suatu cairan atau semakin asam, maka cairan itu akan semakin mudah mengakibatkan terjadinya korosi pada logam. Untuk menghindari peralatan dari korosi maka sebelum digunakan sebaiknya alat tersebut dicat terlebih dahulu atau dengan pemberian kapur untuk menetralkan keasaman air.

- Jenis Material

Material lumpur yang abrasif akan menyebabkan material bagian dalam pompa cepat aus, karena gesekan antara cairan dengan pipa yang dilaluinya semakin besar. Pompa mempunyai spesifikasi tertentu tentang material yang dihisap yang berkaitan dengan densitas cairan.

- Ukuran Butiran Lumpur

Ukuran butiran lumpur dapat mempengaruhi life time pompa karena semakin besar butiran lumpur yang dialirkan, maka semakin besar pula gesekan antara material lumpur dengan bagian dalam pompa.

- Perawatan Alat

Cara perawatan dan pemeliharaan alat yang baik dapat mempengaruhi life time alat, misalnya pengecatan shock yang digunakan sebagai penyambung antara rubber house dengan pompa dapat memperlambat proses korosi karena mencegah kontak langsung antara cairan dengan bahan pompa dan pipa yang terbuat dari logam.

3.5 Pemodelan Hidrogeologi

Model adalah suatu pendekatan terhadap kenyataan di alam yang kompleks dan bukan merupakan kenyataan itu sendiri (*Kinzelbach 1986, 1987; Ruber, 1991 dalam Hendrayana, 1994*). *Domenico (1972)* mendefinisikan model sebagai wakil kenyataan yang berusaha untuk menjelaskan tingkah laku beberapa aspek kenyataan dan selalu tidak sekompleks sistem yang sesungguhnya diwakili. Ketepatan hasil dari suatu model tergantung tingkat penyederhanaan serta ketepatan dan kelengkapan dari parameter-parameter yang dipakai dalam menentukan model.

Dengan demikian model hidrogeologi adalah sebagai sajian sederhana (simple representation) dari suatu sistem hidrogeologi yang kompleks. Suatu model matematik mensimulasikan secara tidak langsung aliran

airtanah menggunakan pemisalan/persamaan yang menunjukkan proses fisik yang terjadi di dalam sistem (*Anderson dan Woessner, 1992*).

Model matematik baik numerik maupun analitik menggunakan perangkat komputer dengan software tertentu seperti *GMS v 2.1, Modpath, Visual Modflow 3.1, FEFLOW 5.3* maupun program lain untuk mensimulasikan perilaku dari airtanah. Model matematik menyajikan sistem dalam rangkaian yang menggambarkan hubungan antar variabel dan parameter. Secara umum model menunjukkan hubungan sebab akibat antar komponen dalam sistem dan antara sistem dengan lingkungannya. Suatu model dapat digunakan, apabila model tersebut memenuhi persyaratan berlakunya model tersebut. Dalam penyusunan model hidrogeologi selalu dilakukan beberapa asumsi dan batasan-batasan tertentu serta melalui beberapa tahapan pemodelan. Semakin kompleks suatu model semakin banyak parameter yang ditinjau, sehingga hasilnya semakin mendekati kenyataan dan dapat diterapkan pada beberapa macam kasus dengan hasil cukup baik.

3.5.1 Tahapan Pemodelan Aliran Airtanah

Dalam tahapan pemodelan aliran airtanah berikut ini hanya ditekankan pada pemodelan airtanah dengan metode numerik. Semakin kompleks suatu model yang disusun, maka semakin banyak parameter yang ditinjau dan dipakai dalam pemodelan, sehingga hasil model akan semakin mendekati kenyataan sebenarnya. Langkah-langkah yang umum ditempuh pada proses pemodelan airtanah seperti terlihat pada gambar

dibawah ini. Langkah tersebut secara umum ada tiga bagian utama yakni akuisisi data, pengembangan konseptual model serta pelaksanaan pemodelan secara numerik.



3.5.1.1 Data Pemodelan

Kebutuhan data untuk pemodelan airtanah disajikan pada tabel 1, yang terdiri dari kerangka hidrogeologi / *hydrogeological framework* dan data hidrologi. Kerangka hidrogeologi yang dibutuhkan meliputi sifat fisik dari kondisi geologi meliputi topografi, litologi serta karakteristik sistem akuifer seperti ketebalan, porositas, transmissivitas, konduktivitas hidrolika serta parameter lain yang tidak berubah menurut waktu, sedangkan data hidrologi meliputi data hidrolika air yang bersifat dinamis dan data klimatologi serta penggunaan lahan.

Pengumpulan data tersebut dibutuhkan dalam rangka pemahaman kondisi alami dari sistem airtanah serta proses hidrologi yang mengontrol atau memberikan dampak terhadap sistem aliran airtanah. Hal inilah yang menjadi dasar untuk membuat konseptual model. Kebutuhan data akan sangat kompleks pada suatu daerah model yang memiliki tingkat kekompleksan kondisi geologi dan hidrogeologi. Akuisisi data dan interpretasi merupakan aktivitas yang terus berlangsung untuk melengkapi konseptual model, sehingga menghasilkan konseptual model yang akurat dan handal.

3.5.1.2 Konseptual Model

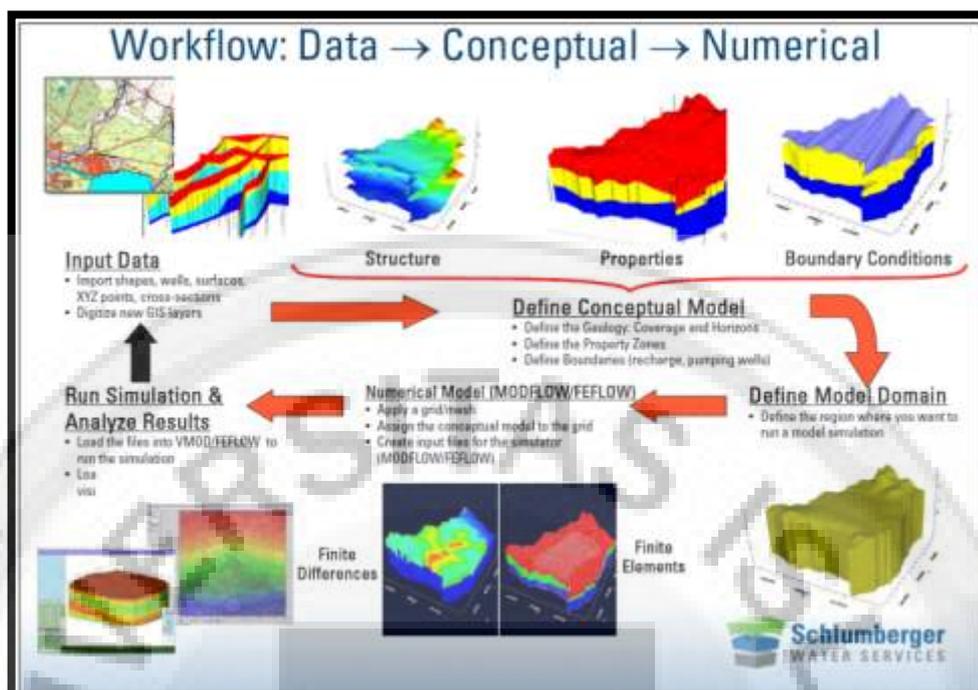
Konseptual model adalah gambaran sederhana dari kondisi sistem hidrogeologi yang utama dan perilaku sistem airtanah di daerah model. Konseptual model biasanya disajikan dalam grafik yang berupa sayatan melintang (*cross section*) ataupun blok diagram dengan penjelasan secara

deskriptif dan kuantitatif mengenai gambaran sistem. Konseptual model dibentuk dari kajian menyeluruh dari akuisisi data lapangan dan data sekunder serta analisis data. Konseptual model merupakan gambaran ideal dari pemahaman kondisi alam dan kunci utama bagaimana sistem tersebut bekerja dengan beberapa asumsi. Beberapa asumsi diperlukan sebagai penyederhanaan kondisi geologi maupun hidrogeologi alam yang kompleks serta tingkat kesediaan data pendukung.

3.5.1.3 Pemodelan Numerik

Pemecahan permasalahan aliran airtanah dengan metode numerik atau dapat juga disebut sebagai cara diskret diwujudkan dalam model numerik aliran airtanah. Penyelesaian ini memerlukan diskretisasi domain solusi, yang berarti membagi-bagi daerah kasus / sistem akuifer menjadi grid-grid dengan ukuran X dan Y masing-masing pada sumbu X dan Y .

Proses diskretisasi domain menurut *Anderson* dan *Woessner* (1992) dibagi menjadi dua, yaitu diskretisasi blok / *block centered grid* dan diskretisasi titik yang berhubungan / *mesh-centered grid*. Pada diskretisasi blok semua harga parameter sistem yang digunakan sebagai masukan model terletak di titik tengah blok, sedangkan pada jaringan diskretisasi titik terletak pada titik di keempat sisi blok.



Sumber : U.S. Geological Survey. 2010.

Gambar 3.13
Skema Tahapan Pemodelan Air Tanah

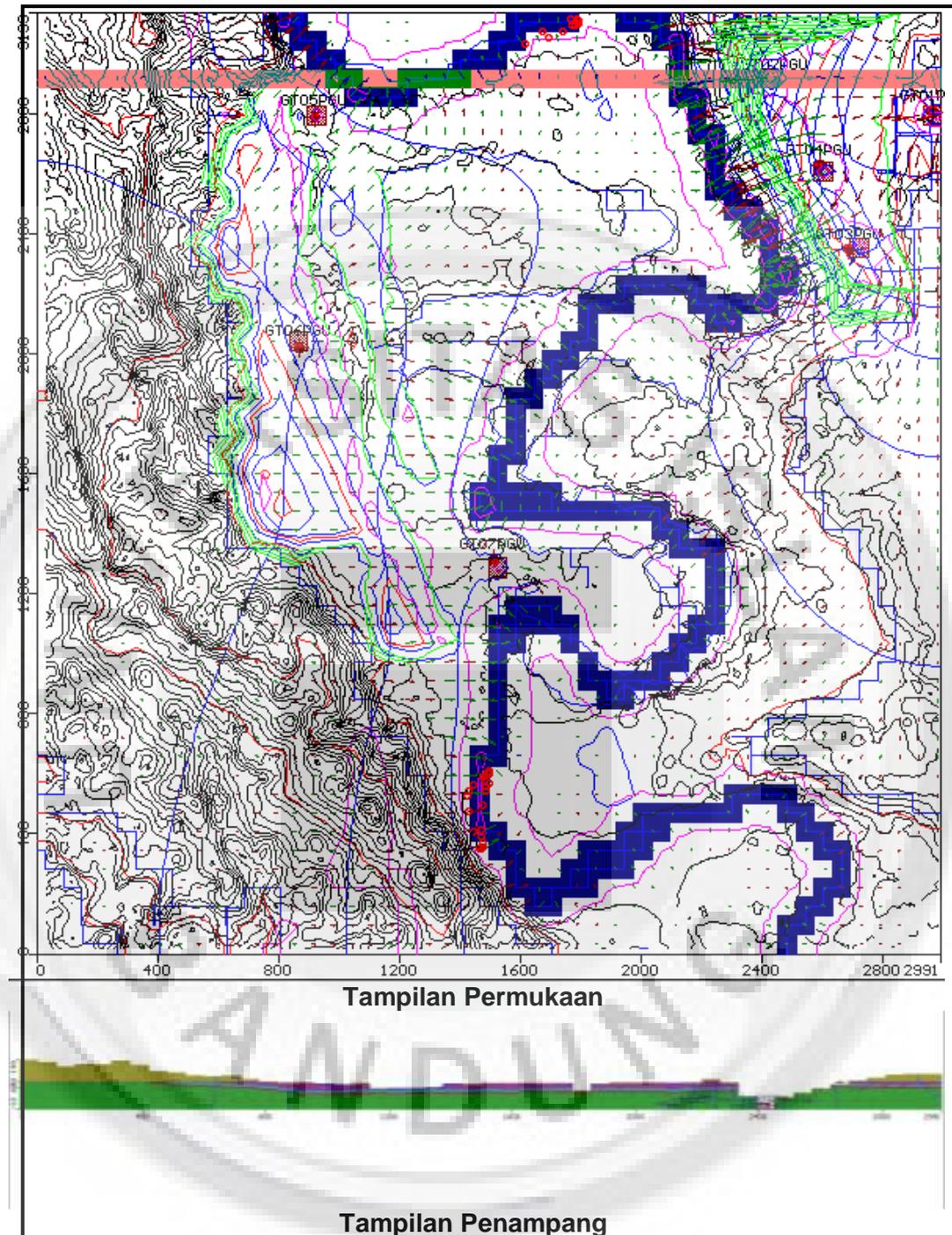
3.5.2 Aplikasi Modflow

MODFLOW adalah model aliran air tanah yang berbasis pada persamaan beda hingga mampu melakukan simulasi untuk semua jenis akuifer, seperti akuifer tertekan, akuifer tidak tertekan, akuifer semi tertekan, maupun akuifer campuran. Kelebihan MODFLOW yang lain adalah mampu menerima data masukan yang beragam, baik dari jenis akuifer, ketebalan lapisan maupun karakteristik transmisivitasnya.

MODFLOW memperhitungkan sistem tiga dimensi seperti pada rangkaian lapisan material yang porus. Pada grid arah horizontal, umumnya menggunakan grid arah sumbu X dan sumbu Y. Sebagai grid beda hingga, grid horizontalnya harus sama pada setiap lapisannya. Model ini tidak memerlukan masukan Δ_z , sebagai penggantinya adalah konduktivitas

hidraulik dikalikan ketebalan lapisan. Adapun alternative lainnya yaitu memberikan nilai konduktivitas hidraulik pada elevasi atas (*top*) dan dasar (*bottom*) dari lapisan yang ada. MODFLOW merupakan suatu model terapan dengan beberapa kondisi spesifik, yaitu :

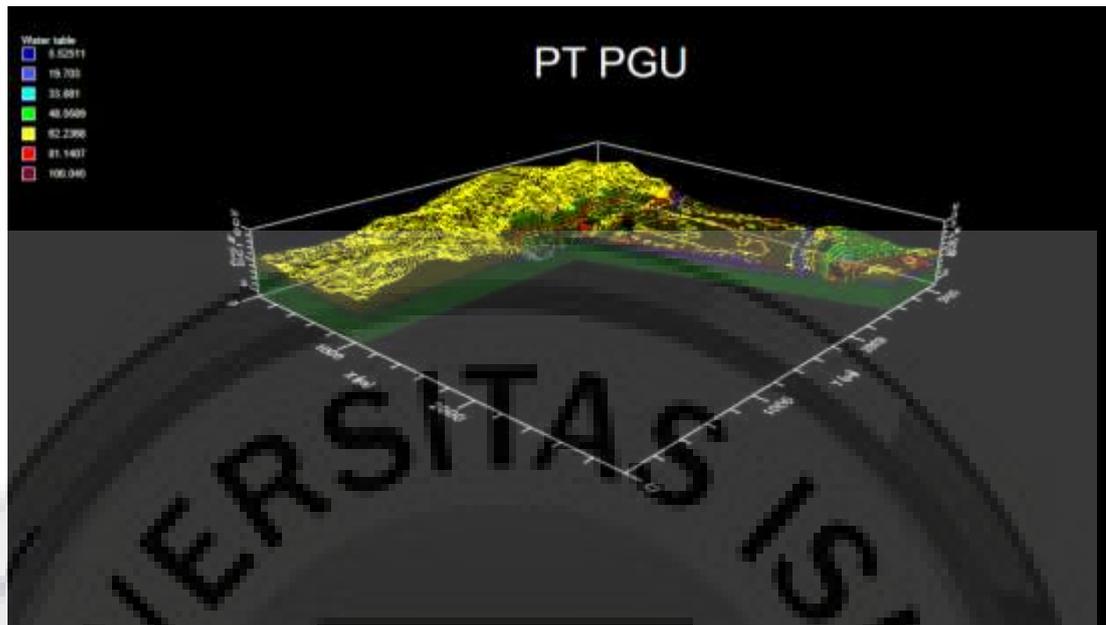
1. MODFLOW merupakan model yang berbasis pada persamaan beda hingga tiga dimensi, tetapi dengan catatan, bahwa tidak secara eksplisit membutuhkan besaran nilai (dimensi grid) pada arah vertical (sumbu z).
2. Untuk mendapatkan harga transmisivitas pada lapisan yang lebih dari satu, cukup memberikan nilai konduktivitas hidraulik dan Δ_z .
Selanjutnya MODFLOW akan menghitung harga transmisivitas, yaitu dengan mengalikan antara konduktivitas hidraulik dengan Δ_z .
3. Dapat digunakan untuk pemodelan dengan kondisi lapisan yang lebih dari satu lapis (*multi layer*), dengan memperhitungkan transmisivitas vertical yang diistilahkan VCONT.



Sumber : Hasil Pengolahan Data Tugas Akhir 2014

Gambar 3.14

Contoh Tampilan Dua Dimensi Modflow



Sumber : Hasil Pengolahan Data Tugas Akhir 2014

Gambar 3.15

Contoh Tampilan Tiga Dimensi Modflow