

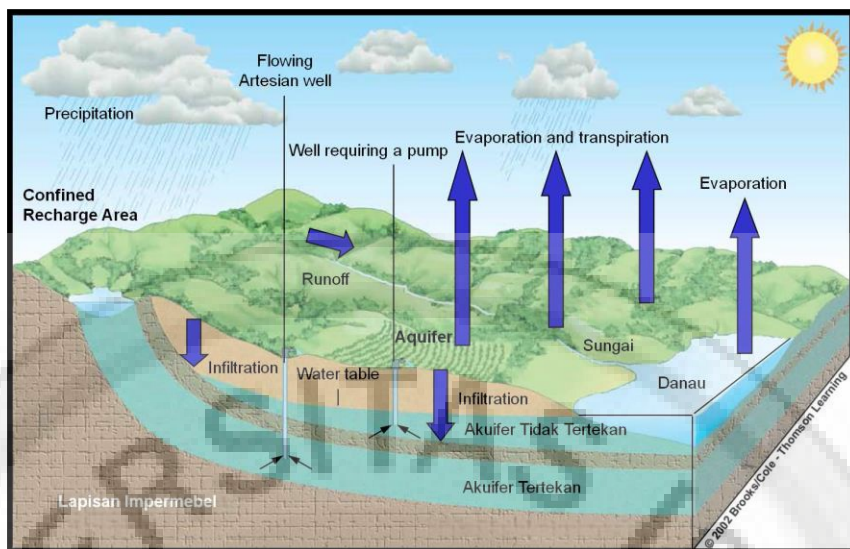
BAB III

TEORI DASAR

3.1 Siklus Hidrologi

Air adalah materi atau unsur yang sangat penting bagi semua kehidupan di muka bumi ini. Manusia dan semua makhluk lainnya membutuhkan air (Kodoatie dan Sjarief, 2010). Secara etimologi hidrogeologi berasal dari kata hidro yang berarti air dan geologi berarti ilmu mengenai batuan. Hidrogeologi merupakan bagian dari hidrologi yang mempelajari penyebaran dan pergerakan air tanah dan batuan di kerak bumi (umumnya dalam akuifer).

Siklus hidrologi merupakan salah satu aspek penting yang diperlukan pada proses analisis hidrologi. Siklus hidrologi menurut Suyono (2006) adalah air yang menguap ke udara dari permukaan tanah dan laut, berubah menjadi awan sesudah melalui beberapa proses dan kemudian jatuh sebagai hujan atau salju ke permukaan laut atau daratan. Sedangkan siklus hidrologi menurut Soemarto (1987) adalah gerakan air laut ke udara, yang kemudian jatuh ke permukaan tanah lagi sebagai hujan atau bentuk presipitasi lain, dan akhirnya mengalir ke laut kembali. Dalam siklus hidrologi ini terdapat beberapa proses yang saling terkait, yaitu antara proses hujan (*precipitation*), penguapan (*evaporation*), transpirasi, infiltrasi, perkolasi, aliran limpasan (*runoff*), dan aliran bawah tanah.



Sumber : Brooks/cole- Thomson Learning,2002.

Gambar 3.1
Siklus Hidrologi

Pemanasan air samudera oleh sinar matahari merupakan kunci proses siklus hidrologi tersebut dapat berjalan secara kontinu. Air berevaporasi, kemudian jatuh sebagai presipitasi dalam bentuk air, es, atau kabut. Pada perjalanan menuju bumi beberapa presipitasi dapat berevaporasi kembali ke atas atau langsung jatuh yang kemudian diintersepsi oleh tanaman sebelum mencapai tanah. Setelah mencapai tanah, siklus hidrologi terus bergerak secara kontinu dalam tiga cara yang berbeda:

1. Evaporasi / transpirasi terjadi apabila air yang ada di laut, di daratan, di sungai, di tanaman, dsb. kemudian akan menguap ke angkasa (atmosfer) dan kemudian akan menjadi awan. Pada keadaan jenuh uap air (awan) itu akan menjadi titik-titik air yang selanjutnya akan turun (*precipitation*) dalam bentuk hujan, salju, es.
2. Infiltrasi / perkolasi ke dalam tanah terjadi apabila air bergerak ke dalam tanah melalui celah celah dan pori-pori tanah dan batuan menuju muka air tanah. Air dapat bergerak akibat aksi kapiler atau air dapat bergerak secara vertikal atau horizontal dibawah permukaan tanah hingga air tersebut memasuki kembali sistem air permukaan.

3. Air permukaan terjadi apabila air bergerak diatas permukaan tanah dekat dengan aliran utama dan danau; makin landai lahan dan makin sedikit pori-pori tanah, maka aliran permukaan semakin besar. Aliran permukaan tanah dapat dilihat biasanya pada daerah urban. Sungai-sungai bergabung satu sama lain dan membentuk sungai utama yang membawa seluruh air permukaan disekitar daerah aliran sungai menuju laut.

3.2 Pembagian Air

Air adalah substansi kimia dengan rumus kimia H_2O , dimana satu molekul air tersusun atas dua atom hidrogen yang terikat secara kovalen pada satu atom oksigen. Air secara fisik bersifat tidak memiliki warna, tidak berasa, dan tidak berbau.

Air dapat berwujud padat, cair, maupun gas. Air sering disebut sebagai pelarut universal karena air memiliki kemampuan untuk melarutkan banyak zat kimia lainnya, seperti garam-garam, gula, dan asam. Air merupakan sumber kehidupan yang tidak dapat tergantikan oleh apapun juga. Tanpa air, manusia, hewan dan tanaman tidak dapat hidup. Air di bumi digolongkan menjadi dua, yaitu air permukaan dan juga air tanah.

3.2.1 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). Air yang mengalir dari daratan menuju suatu badan air disebut limpasan permukaan (*surface run off*) dan air yang mengalir di sungai

menuju laut disebut aliran air sungai (*river run off*). Sekitar 60 % air yang masuk ke sungai berasal dari hujan, pencairan es/salju, dan sisanya berasal dari air tanah. Wilayah di sekitar daerah aliran sungai

Perairan permukaan diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu badan air tergenang (*standing waters* atau *lentik*) dan badan air mengalir (*flowing waters* atau *lotik*). Perairan tergenang meliputi danau, kolam, waduk, rawa dan sebagainya. Perairan tergenang (*lentik*), khususnya danau. Biasanya mengalami stratifikasi secara vertikal akibat perbedaan intensitas cahaya dan perbedaan suhu pada kolam air yang terjadi secara vertikal. Sedangkan perairan mengalir (*lotik*) contohnya adalah sungai. Klasifikasi perairan lentik sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya dan perbedaan suhu air, sedangkan klasifikasi perairan lotik justru dipengaruhi oleh kecepatan arus atau pergerakan air, jenis sedimen dasar, erosi, dan sedimentasi. (Hefni. E 2003).

3.2.2 Air Tanah (*Groundwater*)

Air tanah dapat didefinisikan sebagai semua air yang terdapat dalam ruang batuan dasar atau *regolith*. Dapat juga disebut aliran yang secara alami mengalir ke permukaan tanah melalui pancaran atau rembesan. Air yang tidak tertahan dekat permukaan menerobos kebawah sampai zona dimana seluruh ruang terbuka pada sedimen atau batuan terisi air (jenuh air). Air dalam zona saturasi (*zone of saturation*) ini dinamakan air tanah (*ground water*). Batas atas zona ini disebut muka air tanah (*water table*). Lapisan tanah, sedimen atau batuan di atasnya yang tidak jenuh air disebut zona aerasi (*zone of aeration*). Muka air tanah umumnya tidak horisontal, tetapi lebih kurang mengikuti permukaan topografi di atasnya. Apabila tidak ada hujan maka muka air di bawah bukit akan menurun perlahan-lahan sampai sejajar dengan lembah. Namun hal ini tidak terjadi, karena hujan akan mengisi (*recharge*) lagi.

Daerah dimana air hujan meresap kebawah (*precipitation*) sampai zona saturasi dinamakan daerah rembesan (*recharge area*). Dan daerah dimana air tanah keluar dinamakan discharge area (Wuryantoro, 2007).

Air tanah pada dasarnya berupa air yang dibedakan menurut asal dan tempat keberadaannya yang digolongkan menjadi air *meteoric*, *juvenile* dan air *connate*. Air *meteoric* apabila air tanahnya berasal dari air hujan yang meresap ke dalam tanah, sedangkan disebut air *juvenile*, apabila airnya berasal dari proses *volcanic*, yaitu saat terjadinya proses pembekuan magma, sehingga terjadi pemisahan antara bahan padat dan bahan cair. Selanjutnya, apabila air *juvenile* ini tertutup oleh lapisan kedap air, maka dinyatakan sebagai air *connate*.

3.3 Sistem Akuifer

Sebagai lapisan kulit bumi, maka akuifer membentang sangat luas, menjadi semacam *reservoir* bawah tanah. Pengisian akuifer ini dilakukan oleh resapan air hujan ke dalam tanah. Berdasarkan perlakuannya terhadap air tanah, maka lapisan - lapisan batuan dapat dibedakan menjadi :

1. *Aquifer* (Akuifer) adalah formasi geologi atau grup formasi yang mengandung air dan secara signifikan mampu mengalirkan air melalui kondisinya. Batasan lain yang digunakan adalah reservoir air tanah, lapisan pembawa air. Todd (1955) menyatakan bahwa akuifer berasal dari Bahasa Latin yaitu *aqui* dari *aqua* yang berarti air dan *ferre* yang berarti membawa, jadi akuifer adalah lapisan pembawa air. Contoh : pasir, kerikil, batupasir, batugamping rekahan.
2. *Aquiclude* adalah formasi geologi yang mungkin mengandung air, tetapi dalam kondisi alami tidak mampu mengalirkannya. Untuk keperluan praktis, *aquiclude* dipandang sebagai lapisan kedap air. misalnya lempung, serpih, tuf halus, lanau.

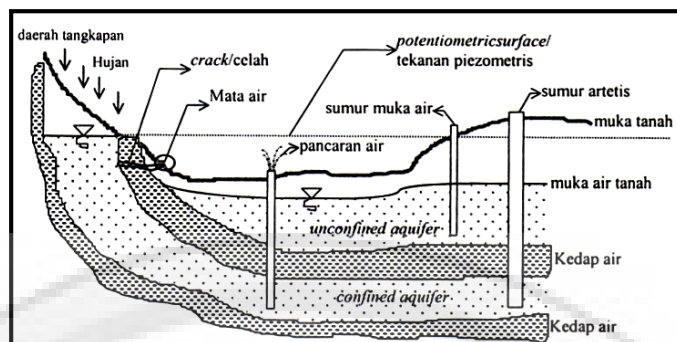
3. *Aquifuge* merupakan formasi kedap yang tidak mengandung dan tidak mampu mengalirkan air. misalkan batuan kristalin, metamorf kompak. misalnya lempung pasir (*sandy clay*).
4. *Aquitard* adalah formasi geologi yang semi kedap, mampu mengalirkan air tetapi dengan laju yang sangat lambat jika dibandingkan dengan akuifer. Meskipun demikian dalam daerah yang sangat luas, mungkin mampu membawa sejumlah besar air antara akuifer yang satu dengan lainnya. *Aquiclude* ini juga dikenal dengan nama formasi semi kedap atau *leaky aquifer*.

Sedangkan jenis lapisan akuifer berdasarkan aliran air tanahnya dibedakan dalam aliran akuifer bebas (*unconfined aquifer*) atau akuifer terkekang (*confined aquifer*) (Kodoatie, 2005).

1. Akuifer Tertekan (*Confined Aquifer*)

Merupakan lapisan rembesan air yang mengandung kandungan air tanah yang bertekanan lebih besar dari tekanan udara bebas/tekanan atmosfer, karena bagian bawah dan atas dari akuifer ini tersusun dari lapisan kedap air (biasanya tanah liat). Muka air tanah dalam kedudukan ini disebut pisometri, yang dapat berada diatas maupun dibawah muka tanah. Apabila tinggi pisometri ini berada diatas muka tanah, maka air sumur yang menyadap akuifer jenis ini akan mengalir secara bebas.

Air tanah dalam kondisi demikian disebut *artois* atau *artesis*. Dilihat dari kelulusan lapisan pengurungnya akuifer tertekan dapat dibedakan menjadi akuifer setengah tertekan (*semi-confined aquifer*) atau tertekan penuh (*confined aquifer*) dan dapat disebut pula dengan akuifer dalam (Kodoatie, 2005).



Sumber : Todd, 1959 dalam Kodoatie, 2005.

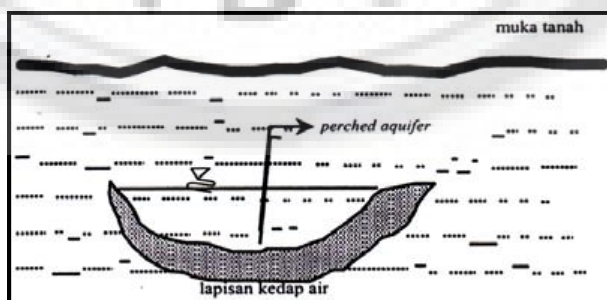
Gambar 3.2
Confined Aquifer & Unconfined Aquifer

2. Akuifer Bebas/Tak Tertekan (*Unconfined Aquifer*)

Merupakan lapisan rembesan air yang mempunyai lapisan dasar kedap air, tetapi bagian atas muka air tanah lapisan ini tidak kedap air, sehingga kandungan air tanah yang bertekanan sama dengan tekanan udara bebas/tekanan atmosfer. Ciri khusus dari akuifer bebas ini adalah muka air tanah yang sekaligus juga merupakan batas atas dari zona jenuh akuifer tersebut, sering disebut pula dengan akuifer dangkal.

Beberapa macam Unconfined Aquifer (Kodoatie, 2005) :

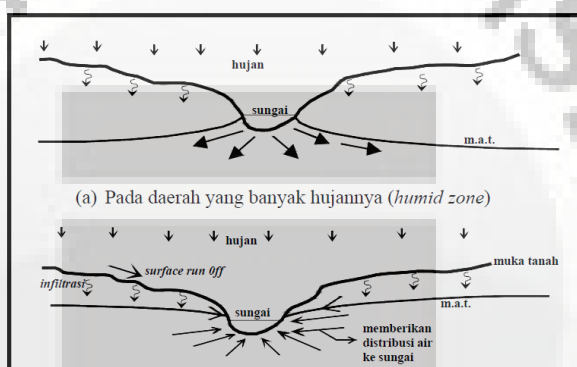
- a. Akuifer Terangkat (*Perched Aquifer*), merupakan kondisi khusus, dimana air tanah pada akuifer ini terpisah dari air tanah utama oleh lapisan yang relatif kedap air dengan penyebaran terbatas, dan terletak diatas muka air tanah utama.



Sumber : Todd, 1959 dalam Kodoatie, 2005.

Gambar 3.3
Akuifer Terangkat (*Perched Aquifer*)

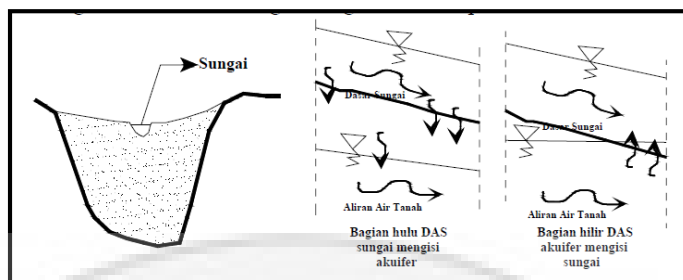
- b. Akuifer Lembah (*Valley Aquifer*), merupakan akuifer yang berada pada suatu lembah dengan sungai sebagai batas (*inlet* atau *outlet*). Dapat dibedakan berdasarkan lokasinya yaitu di daerah yang banyak curah hujannya (*humidzone*), dimana pengisian air sungai yang ada di akuifer ini diisi melalui infiltrasi dari daerah-daerah yang sama tingginya dengan ketinggian sungai. Dan juga di daerah gersang (*arid zone*), dimana pengisian (infiltrasi) ke akuifer tidak ada akibat dari curah hujan. Pengisian air berasal dari sungai ke akuifer dengan aliran pada akuifer searah aliran sungai.



Sumber : Todd, 1959 dalam Kodoatie, 2005.

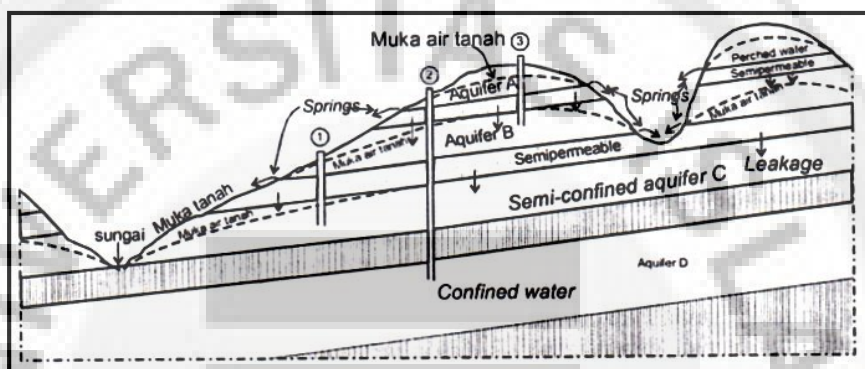
Gambar 3.4
Valley Aquifer pada Daerah Humid dan Arid

- c. *Alluvial Aquifer*, merupakan akuifer yang terjadi akibat proses fisik baik pergeseran sungai maupun perubahan kecepatan penyimpanan yang beragam dan heterogen disepanjang daerah aliran sungai atau daerah genangan (*flood plains*). Akibatnya kapasitas air di akuifer ini menjadi besar dan umumnya air tanahnya seimbang (*equilibrium*) dengan air yang ada di sungai. Di daerah hulu DAS umumnya air sungai meresap ke tanah (infiltrasi) dan mengisi akuifer ini. Sedangkan di hilir muka air tanah di akuifer lebih tinggi dari dasar sungai, dan akuifer mengisi sungai terutama pada musim kemarau.



Sumber : Todd, 1959 dalam Kodoatie, 2005.

Gambar 3.5
Alluvial Aquifer dengan Sungai di atasnya



Sumber : Davis and DeWiest, 1966 dalam Kodoatie, 2005.

Gambar 3.6
Potongan Melintang Beberapa Akuifer

3.4 Sifat Hidrolik Akuifer

Sifat – sifat akuifer dapat dibagi menjadi beberapa yaitu : porositas, konduktifitas hidrolik, transmisibilitas, *storativity*, *specific storage* dan *specific yields*.

3.4.1 Porositas

Porositas dapat diartikan sebagai perbandingan antara volume ruang antar butir terhadap volume total batuan.

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \% \dots\dots\dots (3.1)$$

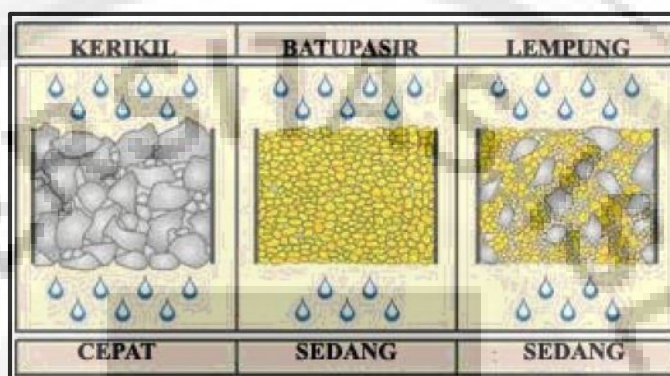
Dimana :

N = Porositas

V_v = Volume Ruang

V = Volume Total Batuan

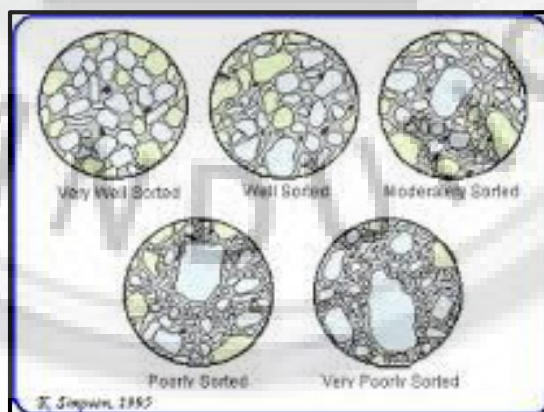
Porositas efektif (n_e) adalah porositas batuan yang dapat melewatkan fluida (Peyton, 1986). Untuk menghitung porositas efektif dapat dipakai rumus $V_p = V/n_e$, di mana n_e adalah porositas efektif, V_p adalah kecepatan fluida di media berpori dan V adalah kecepatan fluida total. Nilai porositas total umumnya lebih besar atau sama dengan porositas efektif (Sulistijo, 1998).



Sumber : www.omafra.gov.on.ca/.../environment/06-111.htm.

Gambar 3.7
Perbedaan Porositas Antar Batuan

Porositas tergantung pada kebundaran, pemilahan (*sorting*) dan kompaksi. Batuan dengan butir yang semakin membesar dan *sorting* yang baik menyebabkan porositas yang besar, sedang kompaksi akan memperkecil porositas.

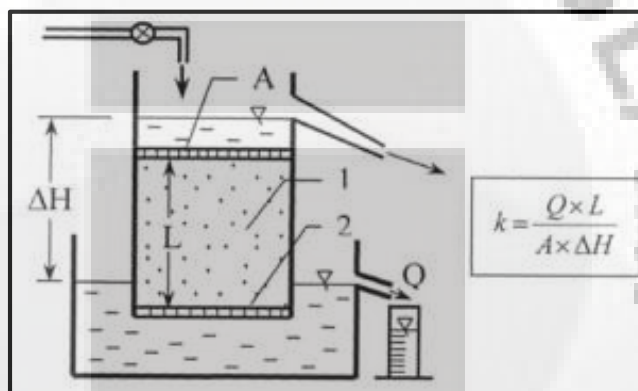


Sumber : <http://nuranigeo.blogspot.com>

Gambar 3.8
Jenis Pemilahan Batuan dan Hubungannya dengan Porositas

3.4.2 Konduktivitas Hidrolik

Konduktivitas Hidrolik disebut juga sebagai permeabilitas adalah sebuah koefisien perbandingan yang menjelaskan tingkatan dimana air dapat bergerak melalui media permeable (Fetter,1980). Dalam ilmu teknik terapan permeabilitas adalah merupakan unit kecepatan dari kemampuan lapisan batuan untuk meloloskan air. Dengan kata lain bahwa permeabilitas adalah parameter hidrolika yang menyatakan ukuran jumlah air yang dapat diteruskan oleh media porous persatuan luas penampang. Konduktivitas hidrolika dipengaruhi oleh porositas, ukuran butir dan distribusinya. Satuannya dinyatakan dalam cm^3/detik atau m^3/hari .



Sumber : <http://akucintadota.wordpress.com>

Gambar 3.9
Percobaan Darcy

Adapun hasil dari percobaan tersebut dapat ditulis dengan rumus sebagai berikut :

$$Q = -KA \left(\frac{h_a - h_b}{L} \right) \dots \dots \dots (3.2)$$

Dimana :

Q = Debit Air yang Masuk (m^3/s)

K = Konduktivitas Hidrolik (m/s)

A = Luas Penampang (m^2)

L = Panjang Penampang (m)

h_a = Tinggi Air Awal (m)

h_b = Tinggi Air Akhir (m)

Rumus Darcy ini dapat juga dituliskan dengan :

$$Q = -KA \left(\frac{dh}{dl} \right) \dots \dots \dots (3.3)$$

Dimana dh/dl adalah gradient hidrolik. Dari rumus di atas maka diperoleh rumus untuk konduktivitas hidrolik adalah :

$$K = \frac{-Q}{A \left(\frac{dh}{dl} \right)} \dots \dots \dots (3.4)$$

Rumus Darcy seperti yang di atas hanya berlaku jika fluida yang mengalir air saja, sedangkan untuk fluida lainnya yang memiliki viskositas dinamik (μ) dan berat jenis (γ) yang berbeda rumus ini tidak berlaku (Hubbert, 1956). Tanda minus menunjukkan bahwa aliran terjadi dari titik rendah yang berpotensi tinggi ke titik tinggi yang berpotensi rendah. Sehingga untuk fluida dengan viskositas dinamik (μ) dan berat jenis (γ) yang berbeda dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Q = - \frac{Cd^2 \gamma A}{\mu} \frac{dh}{dl} \dots \dots \dots (3.5)$$

Dimana :

C = *Shape factor* (tidak memiliki satuan)

d = Diameter Pori (m)

μ = Viskositas Dinamik Fluida (g/s.cm)

γ = Berat Jenis Fluida (N/m³)

A = Luas Penampang (m³)

Nilai konduktivitas hidrolik akan dipengaruhi oleh karakter fisik yang dimiliki oleh media tersebut, di antaranya adalah besar butir, jumlah rekahan yang dimiliki, porositas, keseragaman butir dan penyebaran (*sorting*) butiran.

3.4.3 Transmisibilitas atau Transimisivitas (T)

Transmisivitas adalah banyaknya air yang dapat mengalir melalui suatu bidang vertikal setebal akuifer, selebar satu satuan panjang dengan landaian hidrolika 100%. Dimana satuannya adalah m^2/jam atau $m^2/hari$. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$T = K \cdot b \dots\dots\dots (3.6)$$

Dimana :

T = Transmissivitas (m^2/s)

K = Konduktivitas Hidrolik (m/s)

b = Tebal Akuifer (m)

Pemompaan air tanah dari akuifer yang mempunyai nilai T besar menyebabkan sifat depresi air tanah dangkal tetapi radiusnya luas sedangkan sebaliknya apabila T kecil maka depresi air tanah relatif lebih dalam namun radiusnya sempit.

3.4.4 *Storativity* (S)

Storativity adalah volum air yang dapat disimpan atau dapat dilepaskan oleh suatu akuifer setiap satu satuan luas akuifer pada satu satuan perubahan kedudukan muka air tanah atau bidang piezometrik. Nilai kisaran *storativity* antara 10^{-5} - 10^{-3} . nilai S pada akuifer bebas berbeda dengan nilai pada akuifer tertekan sedangkan pada leakage akuifer tidak mempunyai dimensi. Pada akuifer bebas batasan hasil jenis (*Specific yield*) sama dengan koefisien simpanan. Untuk akuifer tidak tertekan *storativity* dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$S = S_y + h S_s \dots\dots\dots (3.7)$$

Dimana :

S = *Storativity*

h = Ketebalan Akuifer yang Penuh dengan Air (m)

S_s = *Specific Storage* (m^{-1})

S_y = *Specific Yield*

3.4.5 *Specific Storage* dan *Specific Yields*

Specific storage adalah volume air dan formasi yang penuh dengan air yang tersimpan atau keluar dari penyimpanan karena adanya gaya tekan dan akuifer dan gaya tekan dari air untuk setiap unit perubahan muka air tanah. *Specific storage* dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n\beta) \dots\dots\dots (3.8)$$

Dimana :

S_s = *Specific Storage* (m^{-1})

ρ_w = Massa Jenis Air (kg/m^3)

g = Percepatan Gravitasi (m/s^2)

α = Kompresibilitas Akuifer (m^3/N)

β = Kompresibilitas Air (m^2/N)

n = Porositas

Specific yield (S_y) adalah rasio dari volume air yang keluar dari batu yang penuh air akibat gaya gravitasi terhadap volume total dari batuan (Meinzer, 1923). Satuan dari *specific yield* adalah persen. *Specific yield* dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$S_y = \frac{\Delta V}{\Delta h A} \dots\dots\dots (3.9)$$

Dimana:

S_y = *Specific Yield*

ΔV = Perubahan Volume Air dalam *Storage* (m^3)

Δh = Perubahan *head* (m)

A = Luas Daerah Aliran Akuifer

3.5 Sumber Pencemaran Air

Pencemaran lingkungan hidup adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan (UU No.32 Tahun 2009).

Berdasarkan sumber pencemarannya, terdapat dua jenis sumber pencemar air yakni sumber pencemar titik (*point source pollution*) dan sumber pencemar sebaran menyebar (*non-point source pollution*).

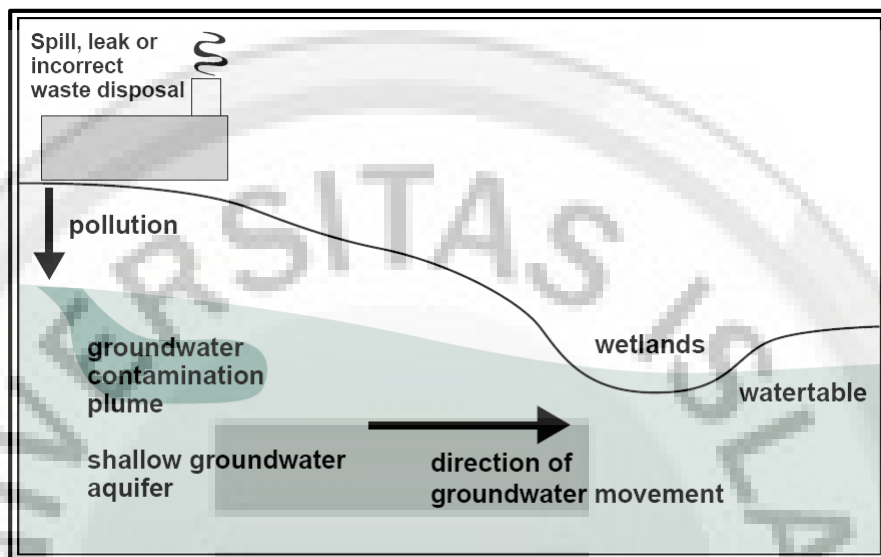
1. Sumber Pencemar Titik (*Point Source Pollutants*)

Sumber pencemar titik (*point source pollutants*) di air permukaan dan airtanah biasanya ditemukan dalam bentuk *plume* yang memiliki konsentrasi tertinggi yang dekat dengan sumber polutannya (seperti contohnya pipa pembuangan atau sistem injeksi bawah tanah) dan konsentrasi kecil yang lebih jauh dari sumbernya. Tipe yang bervariasi dari sumber pencemar titik dapat ditemukan dalam air sebagai hasil dari kegiatan industri, agrikultural, dan aktifitas manusia.

Bisnis komersial dan industri menggunakan material - material berbahaya dalam produksi ataupun dalam pemeliharaan, dan kemudian menghasilkan berbagai limbah dari akhir operasinya. Bahan mentah dan limbah yang termasuk sebagai polutan seperti pelarut, produk minyak (seperti oli dan bensin) atau logam berat.

Beberapa dari kebanyakan sumber pencemar titik yang ditemukan di air tanah adalah senyawa organik volatile yang termasuk zat berbahaya yang diproduksi seperti pelarut, oli, cat dan bahan bakar. Sekali airtanah terkontaminasi, maka akan sulit dan membutuhkan banyak biaya dan bahkan tidak bisa untuk dibersihkan.

Sedangkan sumber pencemar titik yang ditemukan di air permukaan yakni berupa pembuangan limbah dengan temperatur tinggi, mikroorganisme dan nutrisi (seperti nitrogen dan fosfat).



Sumber : Yunus Ashari dalam Pencemaran Air Tanah PDF,2015.

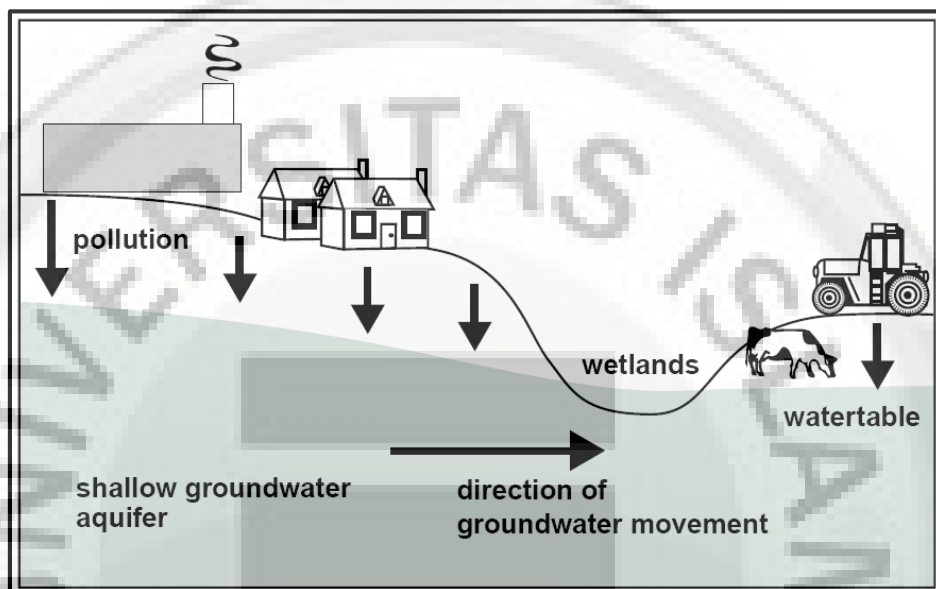
Gambar 3.10
Alur Point Source Pollution

2. Sumber Pencemar Sebaran Menyebar (Non - Point Source Pollutants)

Sumber pencemar sebaran menyebar (*non - point source pollutants*) terjadi sebagai air yang bergerak di tanah atau melewati tanah dan membawa polutan yang berasal dari alam maupun yang dihasilkan dari kegiatan manusia, kemudian dapat terkumpul di danau, sungai, lahan yang basah, perairan pantai dan bahkan air tanah. Air membawa sumber pencemar sebaran menyebar yang berasal dari proses alamiah seperti air hujan atau salju yang mencair, atau dari aktifitas manusia seperti irigasi tanaman atau pemeliharaan tanaman.

Sumber pencemar sebaran menyebar ini biasanya ditemukan menyebar pada area yang luas. Terkadang sulit untuk mengetahui sumber asli dari polutan tersebut karena bisa saja dihasilkan dari berbagai aktifitas manusia. Sumber pencemar sebaran menyebar yang paling banyak dan umum yakni berupa sedimen, nutrisi,

mikroorganisme dan racun. Sedimen dapat menurunkan kualitas air yakni dengan mengkontaminasi ketersediaan air minum. Selain itu pencemar jenis ini dapat ditemukan pada area yang memiliki kerapatan tinggi untuk sistem septik atau sistem septik tidak terpelihara dengan baik.



Sumber : Yunus Ashari dalam Pencemaran Air Tanah PDF,2015.

Gambar 3.11
Alur Non-Point Source Pollution

3.6 Sampah

Sampah adalah sebagian dari sesuatu yang tidak dipakai, tidak disenangi atau sesuatu yang harus dibuang yang umumnya berasal dari kegiatan yang dilakukan oleh manusia (termasuk kegiatan industri) tetapi yang bukan biologis (karena *human waste* tidak termasuk didalamnya) dan umumnya bersifat padat karena air bekas tidak termasuk di dalamnya. Sampah adalah sesuatu bahan/benda padat yang terjadi karena berhubungan dengan aktivitas manusia yang tak dipakai lagi, tak disenangi dan dibuang dengan cara-cara saniter kecuali buangan yang berasal dari tubuh manusia.

Pembuangan sampah pada penimbunan darat termasuk menguburnya untuk membuang sampah, metode ini adalah metode paling populer di dunia. Penimbunan ini biasanya dilakukan di tanah yang tidak terpakai, lubang bekas pertambangan, atau lubang-lubang dalam. Sebuah lahan penimbunan darat yang dirancang dan dikelola dengan baik akan menjadi tempat penimbunan sampah yang higienis dan murah. Sedangkan penimbunan darat yang tidak dirancang dan tidak dikelola dengan baik akan menyebabkan berbagai masalah lingkungan, di antaranya angin berbau sampah, menarik berkumpulnya Hama, dan adanya genangan air sampah. Efek samping lain dari sampah adalah gas metan dan karbon dioksida yang juga sangat berbahaya. (di Bandung kandungan gas metan ini meledak dan melongsorkan gunung sampah)

Menurut Notoatmodjo (2000), Sampah dapat dibagi menjadi berbagai jenis yakni:

1. Berdasarkan zat kimia yang terkandung di dalamnya, sampah dibagi menjadi:
 - a. Sampah anorganik, adalah sampah yang umumnya tidak dapat membusuk, misalnya : logam/besi, botol, plastik, gelas dan sebagainya.
 - b. Sampah organik, adalah sampah yang pada umumnya dapat membusuk, misalnya : sisa-sisa makanan, daun-daunan, buah-buahan dan sebagainya.
2. Berdasarkan dapat dan tidaknya dibakar
 - a. Sampah yang mudah terbakar, misalnya : kertas, karet, kayu, plastik, kain bekas dan sebagainya.
 - b. Sampah yang tidak dapat terbakar, misalnya : kaleng-kaleng bekas, besi/logam, pecahan gelas, kaca dan sebagainya.

3.6.1 Pengelolaan Sampah

Pengolahan sampah yaitu perlakuan terhadap sampah yang bertujuan memperkecil atau menghilangkan masalah-masalah yang berkaitan dengan lingkungan. TPA (Tempat Pembuangan Akhir) Leuwigajah merupakan tempat pembuangan akhir sampah yang beroperasi di atas tanah milik pemerintah daerah yang menampung limbah padat yang dihasilkan masyarakat. Pada awalnya TPA ini beroperasi dengan sistem semi *control landfill*, namun dengan seiring waktu sistem ini berubah menjadi sistem *open dumping* yaitu sistem pembuangan secara terbuka pada area landfill tanpa adanya penutupan tanah.

Sistem *open dumping* merupakan sistem tertua yang dikenal manusia dalam pembuangan sampah. Sampah hanya dibuang/ditimbun di suatu tempat tanpa ada perlakuan khusus, sehingga dapat menimbulkan gangguan terhadap lingkungan. Pembuangan sampah secara terbuka dapat menjadi sarang/tempat perkembangan vektor penyakit (lalat, tikus dan kecoa), menyebarkan bau, mencemari udara, mencemari tambak di sekitarnya serta dapat menimbulkan bahaya kebakaran.

Sedangkan sistem *sanitary landfill* adalah sistem pengelolaan sampah yang mengembangkan lahan cekungan dengan syarat tertentu, antara lain jenis dan porositas tanah. Tentunya harus memenuhi desain teknis tertentu sehingga sampah yang dimasukkan ke tanah tidak mencemari tanah dan air tanah. Di sejumlah negara maju, sebelum dibuang ke tempat pembuangan akhir (TPA), sampah dipilah terlebih dahulu antara sampah organik dan anorganik, sampah yang mudah terdegradasi dan yang sulit. Dasar TPA dilapisi bahan kedap air dan diberi saluran untuk cairan hasil dari pembusukan sampah (lindi).

3.7 Pengertian Air Lindi

Air lindi didefinisikan sebagai suatu cairan yang dihasilkan dari pemaparan air hujan pada timbunan sampah. Dalam kehidupan sehari-hari air lindi ini dapat dianalogikan seperti seduhan air teh. Air lindi membawa materi tersuspensi dan terlarut yang merupakan produk degradasi sampah. Komposisi air lindi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis sampah terdeposit, jumlah curah hujan di daerah TPA dan kondisi spesifik tempat pembuangan tersebut. Air lindi pada umumnya mengandung senyawa-senyawa organik (Hidrokarbon, Asam Humat, Sulfat, Tanat dan Galat) dan anorganik (Natrium, Kalium, Kalsium, Magnesium, Klor, Sulfat, Fosfat, Fenol, Nitrogen dan senyawa logam berat) yang tinggi. Konsentrasi dari komponen-komponen tersebut dalam air lindi bisa mencapai 1000 sampai 5000 kali lebih tinggi dari pada konsentrasi dalam air tanah.

Cairan pekat dari TPA yang berbahaya terhadap lingkungan dikenal dengan istilah *leachate* atau air lindi. Cairan ini berasal dari proses perkolasi/percampuran (umumnya dari air hujan yang masuk kedalam tumpukan sampah), sehingga bahan-bahan terlarut dari sampah akan terekstraksi atau berbaur. Cairan ini harus diolah dari suatu unit pengolahan aerobik atau anaerobik sebelum dibuang ke lingkungan. Tingginya kadar COD dan ammonia pada air lindi (bisa mencapai ribuan mg/L), sehingga pengolahan air lindi tidak boleh dilakukan sembarangan (Machdar, I, 2008).

Leachate adalah larutan yang terjadi akibat bercampurnya air limpasan hujan (baik melalui proses infiltrasi maupun proses perkolasi) dengan sampah yang telah membusuk dan mengandung zat tersuspensi yang sangat halus serta mikroba patogen. *Leachate* dapat menyebabkan kontaminasi yang potensial baik bagi air permukaan maupun air tanah. Hal ini diakibatkan karena kandungan BOD yang tinggi yaitu sekitar 3.500 mg/L.

Komposisi air lindi sangat bervariasi karena proses pembentukannya dipengaruhi oleh karakteristik sampah (organik-anorganik), mudah tidaknya penguraian (larut -tidak larut), kondisi tumpukan sampah (suhu, pH, kelembaban, umur), karakteristik sumber air (kuantitas dan kualitas air yang dipengaruhi iklim dan hidrogeologi), komposisi tanah penutup, ketersediaan nutrisi dan mikroba, dan kehadiran inhibitor. Selain itu Sulinda (2004) menyatakan bahwa proses penguraian bahan organik menjadi komponen yang lebih sederhana oleh mikroorganisme aerobik dan anaerobik pada lokasi pembuangan sampah dapat menjadi penyebab terbentuknya gas dan air lindi.

Sebagian besar limbah yang dibuang pada lokasi pembuangan sampah adalah padatan. Limbah tersebut berasal dari berbagai sumber yang berbeda dengan tipe limbah yang berbeda pula, sehingga setiap air lindi memiliki karakteristik tertentu (Pohland dan Harper, 1985).

Kuantitas dan kualitas air lindi juga dapat dipengaruhi oleh iklim. Infiltrasi air hujan dapat membawa kontaminan dari tumpukan sampah dan memberikan kelembaban yang dibutuhkan bagi proses penguraian biologis dalam pembentukan air lindi (Pohland dan Harper, 1985). Meskipun sumber dari kelembabannya mungkin dibawa oleh sampah masukannya, tetapi sumber utama dari pembentukan air lindi ini adalah adanya infiltrasi air hujan. Jumlah hujan yang tinggi dan sifat timbunan yang tidak solid akan mempercepat pembentukan dan meningkatkan kuantitas air lindi yang dihasilkan (Pohland dan Harper, 1985).

Pohland dan Harper (1985) menyatakan bahwa umur tumpukan sampah juga bisa mempengaruhi kualitas air lindi dan gas yang terbentuk. Perubahan kualitas air lindi dan gas menjadi parameter utama dalam mengetahui tingkat stabilisasi tumpukan sampah.

3.7.1 Parameter Air Lindi

Parameter air lindi dibedakan menjadi tiga yakni parameter fisika, parameter kimia dan parameter mikrobiologi.

1. Parameter Fisika

- a. Suhu, peningkatan suhu dapat mengakibatkan peningkatan viskositas, reaksi kimia, evaporasi dan volatilisasi dan juga dapat menyebabkan penurunan kelarutan gas dalam air, seperti O₂, CO₂, N₂ dan sebagainya (Haslam 1995 in Effendi, 2003).
- b. TDS (*Total Dissolved Solid*), merupakan bahan-bahan terlarut (diameter < 10⁻⁶ mm) dan koloid (diameter 10⁻⁶ mm – 10⁻³ mm) yang berupa senyawa-senyawa kimia dan bahan-bahan lain, yang tidak tersaring pada kertas saring berdiameter 0,45 µm (Rao, 1992 dalam Effendi, 2003).
- c. Daya hantar listrik (DHL) merupakan kemampuan suatu cairan untuk menghantarkan arus listrik (disebut juga konduktivitas). DHL pada air merupakan ekspresi numerik yang menunjukkan kemampuan suatu larutan untuk menghantarkan arus listrik. Oleh karena itu, semakin banyak garam-garam terlarut yang dapat terionisasi, semakin tinggi pula nilai DHL. Besarnya nilai DHL bergantung kepada kehadiran ion-ion anorganik, valensi, suhu, serta konsentrasi total maupun relatifnya (Boyd, 1988 dalam Effendi, 2003).
- d. Kecerahan adalah kecerahan adalah sebagian cahaya yang diteruskan kedalam air dan dinyetakan dalam (%). Kemampuan cahaya matahari untuk tembus sampai ke dasar perairan dipengaruhi oleh kekeruhan (*turbidity*) air. Kekeruhan disebabkan adanya bahan organik dan anorganik yang tersuspensi dan terlarut (misalnya lumpur dan pasir halus), maupun bahan anorganik dan organik yang berupa plankton dan mikroorganismen lain (APHA, 1976; Davis dan Cornwell, 1991 dalam Effendi 2003).

- e. Bau air dapat memberi petunjuk terhadap kualitas air, misalnya bau amis dapat disebabkan oleh adanya algae dalam air tersebut. Berdasarkan Keputusan Menteri Kesehatan RI Nomor 907/MENKES/SK/VII/2002, diketahui bahwa syarat air minum yang dapat dikonsumsi manusia adalah tidak berbau.
- f. Rasa, berdasarkan Keputusan Menteri Kesehatan RI Nomor 907/MENKES/SK/VII/2002, diketahui bahwa syarat air minum yang dapat dikonsumsi manusia adalah tidak berasa.

2. Parameter Kimia

- a. pH, nilai pH menunjukkan tinggi rendahnya konsentrasi ion hidrogen dalam air. Kemampuan air untuk mengikat atau melepaskan sejumlah ion hidrogen akan menunjukkan apakah perairan tersebut bersifat asam atau basa.
- b. DO (*Dissolved Oxygen*), merupakan konsentrasi gas oksigen yang terlarut dalam air. Oksigen yang terlarut dalam air berasal dari hasil fotosintesis oleh fitoplankton atau tumbuhan air dan proses difusi dari udara.
- c. BOD₅ (*Biochemical Oxygen Demand*), adalah jumlah oksigen yang diperlukan oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik yang terdapat dalam air pada keadaan aerobik yang diinkubasi pada suhu 20°C selama 5 hari, sehingga sering disebut BOD₅.
- d. COD (*Chemical Oxygen Demand*), menyatakan jumlah total oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi semua bahan organik yang terdapat di perairan, menjadi CO₂ dan H₂O.
- e. Amonia, Amonia pada perairan dihasilkan oleh proses dekomposisi, reduksi nitrat oleh bakteri, kegiatan pemupukan dan ekskresi organisme yang ada di dalamnya.

- f. Nitrat, adalah bentuk nitrogen utama dalam perairan dan merupakan nutrisi utama bagi tumbuhan dan algae. Nitrat sangat mudah larut dalam air dan bersifat stabil, dihasilkan dari proses oksidasi sempurna senyawa nitrogen di perairan (Effendi, 2003).
- g. Sulfat, adalah bentuk sulfur utama dalam perairan dan tanah. Di perairan yang diperuntukkan bagi air minum sebaiknya tidak mengandung senyawa natrium sulfat (Na_2SO_4) dan magnesium sulfat (MgSO_4).
- h. Besi, kadar besi pada perairan alami berkisar antara 0,05 - 0,2 mg/l (Boyd, 1988 in Effendi, 2003) pada air tanah dalam dengan kadar oksigen yang rendah kadar besinya dapat mencapai 10 – 100 mg/l. Kadar besi > 1,0 mg/l dianggap membahayakan kehidupan organisme akuatik.

3. Parameter Mikrobiologi

Alaerts dan Santika (1984) menyatakan bahwa bakteri yang sering digunakan sebagai indikator untuk menilai kualitas perairan adalah bakteri *koliform*, *fecal koliform*, dan *fecal streptococcus*. Menurut Peraturan Pemerintah No. 82 tahun 2001, kadar maksimum total koliform yang diperbolehkan pada perairan umum yang diperuntukkan untuk mengairi pertanian dan peternakan sebesar 10.000 MPN/100ml.

3.7.2 Zat Kimia dalam Air Lindi

3.7.2.1 Logam Berat

Logam berat masih termasuk golongan logam dengan kriteria - kriteria yang sama dengan logam-logam yang lain. Perbedaan terletak pada pengaruh yang dihasilkan bila logam berat ini masuk atau diberikan ke dalam tubuh organisme hidup. Karakteristik dari kelompok logam berat adalah sebagai berikut:

1. Memiliki spesifikasi grafitasi yang sangat besar (lebih dari 4).
2. Mempunyai nomor atom 22 - 23 dan 40 - 50 serta unsur laktanida dan aktinida.
3. Mempunyai respon biokimia yang khas (spesifik) pada organisme hidup.

Berikut ini sebagai contoh logam berat yakni Besi (Fe) dan Mangan (Mn).

1. Besi (Fe)

Besi merupakan salah satu unsur mineral yang mempunyai simbol Fe dan nomor atom 26 dengan berat atom 55,845, terletak pada periode 4 dan termasuk golongan logam. Besi dapat ditemui pada setiap tempat di bumi pada semua lapisan geologis dan semua badan air.

Konsentrasi besi terlarut dalam air yang masih diperbolehkan adalah < 0,1 mg/L. Apabila konsentrasi besi terlarut dalam air melebihi batas tersebut akan menyebabkan warna kulit akan menjadi hitam hal ini dikarenakan tubuh manusia tidak dapat mensekresi Fe sehingga bagi mereka yang sering mendapat transfusi darah karena akumulasi Fe. Air minum yang mengandung besi cenderung menimbulkan rasa mual apabila dikonsumsi. Selain itu, dalam dosis besar dapat merusak dinding usus. Kadar Fe yang lebih dari 1 mg/L akan menyebabkan terjadinya iritasi pada mata dan kulit.

2. Mangan

Mangan adalah suatu logam rapuh berwarna kelabu keputihan yang terdapat dalam delapan bentuk oksida. Mangan berwarna putih keabu-abuan, dengan sifat yang keras tapi rapuh. Mangan sangat reaktif secara kimiawi, dan terurai dengan air dingin perlahan-lahan. Paparan jangka panjang menyebabkan kerusakan sistem saraf pusat dan paru-paru. Efek terhadap system saraf pusat (manganisme) ditandai dengan adanya gangguan kapasitas mental, terlihat pada paparan ≥ 2 tahun, sedangkan efek pada paru yaitu pneumonia dan bronchitis akut maupun kronis

terutama pada perokok yang terpapar, efek lain yaitu penurunan tekanan darah, disproteinemia dan gangguan reproduktif.

Mn dalam dosis tinggi bersifat toksik. Paparan Mn dalam debu atau asap maupun gas tidak boleh melebihi 5 mg/m³ karena dalam waktu singkat hal itu akan meningkatkan toksisitas. Hasil uji coba menunjukkan bahwa paparan Mn lewat inhalansi pada hewan uji tikus bisa mengakibatkan toksisitas pada system syaraf pusat. Paparan per oral Mn menunjukkan toksisitas yang rendah dibandingkan mikro unsur lain sehingga sangat sedikit dilaporkan kasus toksisitas Mn per oral pada manusia.

3.7.2.2 Kimia Air Tanah

1. Kesadahan

Kesadahan air berkaitan erat dengan kemampuan air membentuk busa. Semakin besar kesadahan air, semakin sulit bagi sabun untuk membentuk busa karena terjadi presipitasi. Kesadahan (*hardness*) disebabkan adanya kandungan ion-ion logam bervalensi banyak (terutama ion-ion bervalensi dua, seperti Ca, Mg, Fe, Mn, Sr). Kation-kation logam ini dapat bereaksi dengan sabun membentuk endapan maupun dengan anion-anion yang terdapat di dalam air membentuk endapan/karat pada peralatan logam. Ada perairan sadah (*hard*), kandungan kalsium, magnesium, karbonat, dan sulfat biasanya tinggi (Brown, 1987 dalam Effendi, 2003). Jika dipanaskan, perairan sadah akan membentuk deposit (kerak). Klasifikasi perairan berdasarkan nilai kesadahan dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1
Klasifikasi Perairan Berdasarkan Nilai Kesadahan

Kesadahan CaCO ₃ (Mg/L)	Klasifikasi Perairan
< 50	Lunak (<i>Soft</i>)
50 - 150	Menengah (<i>Moderately Hard</i>)
150 – 300	Sadah (<i>Hard</i>)
>300	Sangat Sadah (<i>Very Hard</i>)

Sumber : Peavy et al, 1985 dalam Effendi, 2003.

Tebbut (1992) dalam Effendi (2003) mengemukakan bahwa nilai kesadahan tidak memiliki pengaruh langsung terhadap kesehatan manusia. Dampak dari air sadah dapat dijelaskan sebagai berikut ini:

- a. Sabun sulit berbusa, sabun terbuat dari garam natrium dan potasium dari asam lemah. Jika terdapat ion kalsium dan magnesium, akan terbentuk Ca palmitat atau Mg palmitat dalam bentuk endapan sehingga sabun tidak berbusa.
- b. Pembentukan kerak pada boiler, dalam air terdapat bikarbonat (HCO₃⁻). Dalam temperatur normal bentuk tersebut stabil, namun dalam temperatur tinggi akan menghasilkan kerak. Apabila terdapat Mg²⁺, maka CO₂ akan terlepas dan pH air akan naik. Kerak yang timbul dapat mempersempit volume boiler dan meningkatkan tekanan pada boiler sehingga memungkinkan boiler meledak.
- c. Kerak pada pipa penyaluran air, pada pipa distribusi air, kerak dapat mengakibatkan pemampatan dan mempengaruhi aliran air karena kerak yang muncul akan menaikkan faktor kekasaran (c) dan mengakibatkan debit turun.

2. Nitrat (NO₃)

Nitrat (NO₃) adalah bentuk utama nitrogen di perairan alami dan merupakan nutrisi utama bagi pertumbuhan tanaman dan algae. Nitrat nitrogen sangat mudah

larut dalam air dan bersifat stabil. Nitrat merupakan salah satu sumber utama nitrogen di perairan. Kadar nitrat pada perairan alami tidak pernah lebih dari 0,1 Mg/Liter. Kadar nitrat lebih dari 5 Mg/Liter menggambarkan terjadinya pencemaran antropogenik yang berasal dari aktivitas manusia dan tinja hewan.

Nitrat tidak bersifat toksik terhadap organisme akuatik. Konsumsi air yang mengandung kadar nitrat yang tinggi akan menurunkan kapasitas darah untuk mengikat oksigen, terutama pada bayi yang berumur kurang dari lima bulan. Keadaan ini dikenal sebagai methemoglobinemia atau blue baby disease yang mengakibatkan kulit bayi berwarna kebiruan (*cyanosis*) (Davis dan Cornwell, 1991; Mason, 1993 dalam Effendi, 2003).

3.8 Standar Kualitas Air Tanah

Dalam penentuan standar kualitas air tanah yang dipergunakan untuk keperluan air minum maka dipakailah standar kualitas air minum yang ditetapkan dalam Keputusan Menteri Kesehatan RI No.907/Menkes/SK/VII/2002 pada tanggal 29 Juli 2002 yang dapat dilihat pada Tabel 3.2 sebagai berikut ini :

Tabel 3.2
Standar Kualitas Air Minum (KEPMENKES RI No. 907/Menkes/SK/VII/2002)

No	Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang Diperbolehkan	Keterangan
A. FISIKA				
1.	Bau	-	-	Tidak Berbau
2.	Jumlah Zat Padat Terlarut (TDS)	Mg/L	1000	-
3.	Kekeruhan	NTU	5	-
4.	Rasa	-	-	Tidak Berasa
5.	Suhu	X°	Suhu Udara 3°C	-
6.	Warna	TCU	15	
B. KIMIA				

a. Kimia Anorganik				
1.	Air Raksa	mg/L	0.001	
2.	Aluminium	mg/L	0.2	
3.	Arsen	mg/L	0.01	
4.	Barium	mg/L	0.7	
5.	Besi	mg/L	0.3	
6.	Fluorida	mg/L	1.5	
7.	Kadmium	mg/L	0.003	
8.	Kesadahan (CaCO ₃)	mg/L	500	
9.	Klorida	mg/L	250	
10.	Kromium, val 6	mg/L	0.05	
11.	Mangan	mg/L	0.1	
12.	Natrium	mg/L	200	
13.	Nitrat, sebagai N	mg/L	50	
14.	Nitrit, sebagai N	mg/L	3	
15.	Perak	mg/L	0.05	Batas Min & Max
16.	pH	mg/L	6.5 – 8.5	
17.	Selenium	mg/L	0.01	
18.	Seng	mg/L	3.0	
19.	Sianida	mg/L	0.07	
20.	Sulfat	mg/L	250	
21.	Sulfida (H ₂ S)	mg/L	0.05	
22.	Tembaga	mg/L	1.0	
23.	Timbal	mg/L	0.01	
b. Kimia Organik				
1.	Aldrin dan dieldrin	µm/L	0.03	
2.	Benzene	µm/L	10	
3.	Benzo(a)pyrine	µm/L	0.7	
4.	Chlordane (total isomer)	µm/L	0.2	
5.	Chloroform	µm/L	200	
6.	2,4 - D	µm/L	30	
7.	DDT	µm/L	2	
8.	Detergen	µm/L	50	
9.	1,2 Dichloroethene	µm/L	30	
10.	1,1 Dichloroethane	µm/L	30	
11.	Heptachlor dan	µm/L	0.03	

	Heptachlor Epoxide			
12.	Hexachlorobenzene	µm/L	1	
13.	Gamma – HCH (Lindane)	µm/L	2	
14.	Methoxychlor	µm/L	20	
15.	Pentachlorophenol	µm/L	9	
16.	2,4,6 - Trichlorophenol	µm/L	2	
17.	Zat Organik (KMnO ₄)	µm/L	10	
C. MIKROBIOLOGI				
	Koliform Tinja	Jml/100 ml	0	
	Total Coliform	Jml/100 ml	0	95% dari sampel yang diperiksa selama 1 tahun Kadang boleh ada 3/100 ml sampel air, tetapi tidak berturut - turut
D. RADIOAKTIVITAS				
	Aktivitas alpha			
	(<i>Gross Alpha Activity</i>)	Bq/L	0.1	
	Aktivitas beta			
	(<i>Gross Beta Activity</i>)	Bq/L	1.0	

Sumber : Keputusan Menteri Kesehatan RI No.907/Menkes/SK/VII/2002

Keterangan :

mg = milligram

mL = milliliter

L = liter

Bq = *Bequerel*

NTU = *Nephelometric Turbidity Units*

TCU = *True Color Units*

Logam berat merupakan logam terlarut

3.9 Transportasi Massa

Terdapat beberapa konsep transportasi massa yakni adveksi, difusi, dan dispersi.

3.9.1 Mekanisme Adveksi

Terdapat banyak tipe gerak angkutan materi air didalam badan-badan air alami. Energi angin dan gaya berat memberi gerakan pada air yang berujung pada proses transport massa. Adveksi adalah proses di mana air tanah bergerak membawa zat padat terlarut. Jumlah zat terlarut yang tertransport merupakan fungsi konsentrasi dalam air tanah dan banyaknya air tanah yang mengalir (Fetter, 1993). Adveksi dihasilkan oleh aliran yang bersifat *unidirectional* dan tidak mengubah identitas dari substansi yang sedang mengalir atau berpindahkan. Kecepatan aliran air tanah dapat dihitung menggunakan persamaan Darcy, yaitu :

$$V_x = - \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl} \dots\dots\dots (3.10)$$

Dimana :

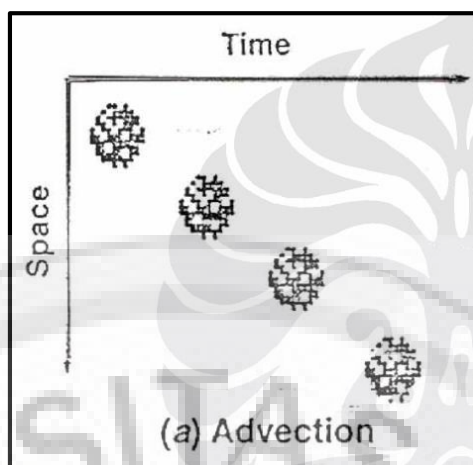
V_x = Rata – rata kecepatan linear (m/s)

K = Konduktivitas hidraulik (m/s)

n_e = Porositas efektif

$\frac{dh}{dl}$ = Gradien hidraulik

Contoh sederhana transportasi secara primer dari tipe adveksi adalah aliran air melalui outlet danau dan transportasi hilir (*downstream transport*) akibat aliran didalam sebuah sungai atau *estuary*.



Sumber : Pengembangan Model Adveksi, 2008.

Gambar 3.12
Ilustrasi Mekanisme Adveksi

3.9.2 Mekanisme Difusi

Difusi adalah proses pergerakan ion – ion dan molekul – molekul terlarut dalam air tanah dari daerah konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah. Difusi akan terjadi sepanjang gradient konsentrasi ada sekalipun fluida tidak bergerak (Fetter, 1993). Proses difusi massa di dalam air dapat dinyatakan dalam hukum Fick's sebagai berikut :

$$F = - D_d \frac{dC}{dx} \dots\dots\dots (3.11)$$

Dimana :

F = Fluks massa per unit area per unti waktu

D_d = Koefisien difusi (m^2/s)

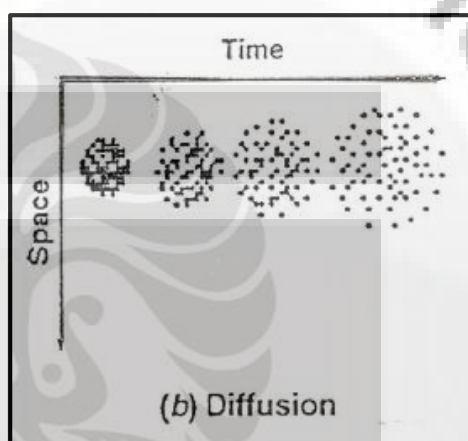
C = Konsentrasi Padatan (kg/m^3)

$\frac{dC}{dx}$ = Gradien konsentrasi, konsentrasi per unit panjang (kg/m^4)

Tanda negatif menunjukkan pergerakan adalah dari konsentrasi yang besar ke konsentrasi yang lebih kecil. Nilai D untuk ion – ion utama berkisar antara 1×10^{-9} hingga $2 \times 10^{-9} m^2/det$ (Fetter, 1994). Dalam media poros digunakan koefisien difusi efektif (D^*). Nilai D^* dihitung dengan persamaan :

$$D^* = wD_d \dots\dots\dots (3.12)$$

W adalah koefisien empiris yang dihitung melalui eksperimen laboratorium. Nilai w untuk polutan yang tidak terabsorpsi oleh mineral adalah antara 0,5 hingga 0,01 (Freeze & Cherry, 1979). Contoh difusi merujuk pada pergerakan massa akibat gerak acak dari molekul air (dikenal pula dengan nama Gerak Brown) atau akibat proses mixing. Contoh transportasi seperti ini yang menyebabkan materi berupa tinta pada Gambar 3.11 yang menyebar dan menipis terhadap waktu dengan pergerakan dari pusat massa tinta yang dapat diabaikan.



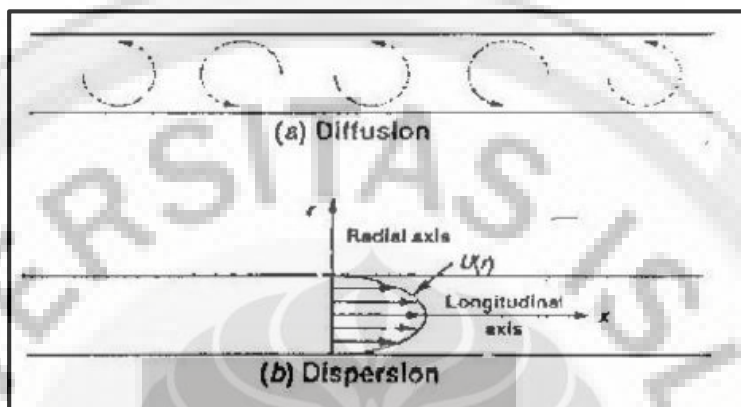
Sumber : Pengembangan Model Adveksi, 2008.

Gambar 3.13
Ilustrasi Mekanisme Difusi

3.9.3 Mekanisme Dispersi

Dispersi merupakan salah satu mekanisme yang dapat menyebabkan polutan atau suatu materi tertentu menyebar didalam air. Hanya saja, berbeda dengan difusi yang merupakan gerak acak molekul air, dispersi merupakan produk dari terbentuknya perbedaan kecepatan didalam dimensi ruang. Hal ini dapat lebih mudah dimengerti dengan mengambil contoh tinta yang ditetaskan pada aliran air yang mengalir dalam suatu pipa, seperti pada Gambar 3.14. Pada kasus tersebut, molekul tinta didekat dinding pipa akan berjalan lebih lambat dibandingkan dengan molekul tinta yang berada tepat ditengah pusat aliran dalam pipa, akibat profil kecepatan

aliran yang berbentuk parabolik atau akibat gaya geser pada dinding pipa. Efek dari perbedaan kecepatan aliran terhadap dimensi ruang inilah yang menyebabkan tinta atau suatu materi terlarut akan tersebar atau tercampur disepanjang sumbu yang sejajar arah aliran.



Sumber : Pengembangan Model Adveksi, 2008.

Gambar 3.14
Ilustrasi Mekanisme Dispersi

Mekanisme dispersi ini terdapat dua macam yakni dispersi mekanik dan dispersi hidrodinamik. Dispersi mekanik adalah proses dimana larutan terkontaminasi yang mengalir melalui media pori bercampur dengan air yang belum terkontaminasi, hal ini akan menyebabkan pengenceran kontaminan. Sedangkan dispersi hidrodinamik yaitu merupakan penjumlahan antara dispersi mekanik dan difusi.

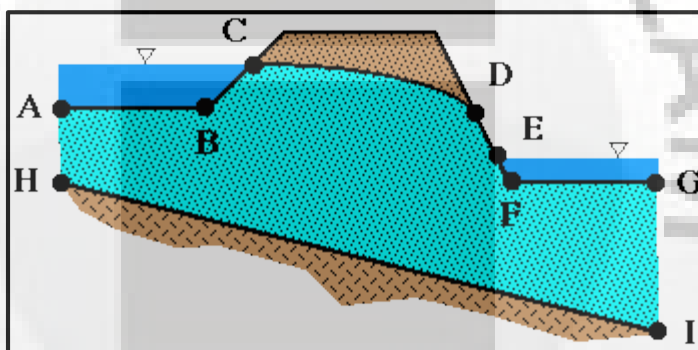
3.10 Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Permodelan kuantitatif dari sistem air tanah memerlukan solusi dari masalah nilai batas untuk permasalahan matematika yang telah diaplikasikan di banyak bidang ilmu pengetahuan dan teknologi. Aliran air tanah secara umum digambarkan dalam persamaan diferensial parsial.

Menentukan kondisi batas dari sistem aliran air tanah berarti menetapkan jenis batas (biasanya terdiri dari satu atau kombinasi) untuk setiap titik pada

permukaan batas. Biasanya pemilihan kondisi batas untuk model konseptual atau numeric melibatkan penyederhanaan kondisi hidrogeologi yang sebenarnya.

Hydraulik Head (h) dalam sistem air tanah adalah jumlah dari *head elevation* (z) dan *pressure head* (p/γ), dimana p adalah pengukur tekanan dan γ adalah bobot jenis air. *Elevation head* merupakan energi potensial partikel air karena posisi vertikal diatas beberapa datum, dan *pressure head* mewakili tekanan yang diukur dari tinggi kolom air dalam sebuah *piezometer*. Secara fisik, *hydraulic head* mewakili level air di atas datum dalam *piezometer* atau sumur observasi. *Constant head* terjadi di mana bagian dari permukaan batas sistem akuifer bertepatan dengan permukaan dari dasar *constant head*. Sebagai contoh ditunjukkan pada Gambar 3.13 (USGS,1987).



Sumber : <http://inside.mines.edu>.

Gambar 3.15
Ilustrasi *Constant Head*

Keterangan :

Constant Head : Kasus khusus untuk *specified head* (ABC, EFG)

Specified Head : *Head* didefinisikan sebagai fungsi ruang dan waktu (dapat digantikan ABC, EFG)

No Flow (Streamline) : Kasus khusus untuk *specified flux* dimana *flux* sama dengan nol (HI)

Specified Flux : Dapat terisi di (CD) atau nol di (HI)

Head Dependent Flux : Dapat digantikan (ABC, EFG)

Free Surface : Muka air tanah (CD)

Seepage Face : $h = z$; tekanan = atmosfer dari permukaan tanah (DE)

3.11 Aplikasi Modflow

Program Modflow merupakan perangkat lunak yang dapat membantu memvisualisasikan pola aliran air tanah bebas maupun tertekan. Program ini juga mampu menggambarkan pergerakan polutan dalam air tanah untuk media berpori. Hasil permodelan program Modflow versi 3.1.0 dapat ditampilkan dalam bentuk dua dan tiga dimensi. Tampilan tiga dimensi ditampilkan dalam sumbu x, sumbu y, dan sumbu z dimana sumbu x dan y adalah koordinat dan sumbu z adalah elevasi permukaan sedangkan untuk tampilan dua dimensi dapat berupa penampang dan daerah permukaan (tampak atas).

Modflow menggunakan metode beda hingga (*finite difference method*) untuk melakukan permodelan yaitu dengan cara membuat *block centered grid* sehingga yang diketahui adalah nilai pada bagian tengah blok. Metode beda hingga merupakan suatu teknik dalam memecahkan persamaan differensial yang disebut metode numeric. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Richardson pada tahun 1910 dengan dasar mengganti turunan pada suatu titik oleh rasio perubahan yang sangat kecil dalam interval yang terbatas. Program Modflow hanya mensimulasikan aliran air pada daerah jenuh dan media pori. Modflow tidak dapat mensimulasikan aliran air pada daerah tidak jenuh air, aliran pada media rekahan (kecuali dianggap sama dengan media pori) atau pada akuifer dengan kondisi anisotropy yang berubah - ubah (Fetter, 1994).

Semua grid horizontal yang menggunakan metode beda hingga harus memiliki grid yang sama untuk semua lapisan. Untuk grid vertikal (ΔZ) tidak diperlukan data masukan, namun nilainya akan mempengaruhi nilai transimisivitas dimana nilainya sama dengan nilai konduktifitas hidrolik dikali dengan nilai tebal lapisan,

sehingga nilai transimisivitas atau tranmisibilitas akan berubah apabila akan berubah apabila terjadi perubahan nilai tebal lapisan yang jenuh air. Hal ini menimbulkan kemungkinan terjadinya error dalam penilaian unit hidrostatik ke dalam *finite difference*. Namun karena error yang dihasilkan sangat kecil sehingga dapat diabaikan (McDonals dan Harbaugh, 2000).

Ada 2 sudut pandang (*view point*) di dalam sistem air tanah, yaitu akuifer dan sistem alirannya sendiri. Jika yang menjadi sudut pandang adalah akuifer maka konsep yang dipakai adalah *confined* (tertekan) dan *unconfined* (tidak tertekan). Di sini aliran airtanah diasumsikan mengalir secara horizontal melalui akuifer atau secara vertikal melewati antar lapisan.

Rumus umum dipakai (Fetter, 1994) dalam permodelan :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad \dots \dots \dots (3.13)$$

Dimana :

$$L = -K_z \frac{h_{source} - h}{b'} \quad \dots \dots \dots (3.14)$$

Keterangan:

K_z = Konduktifitas hidrolik vertikal (m/s)

T = Transmisivitas ($m^2/hari$)

S = Storativitas

R = *Recharge* (mm/tahun)

L = *Leakage* (kebocoran)

h_{source} = Elevasi muka airtanah dari titik pengamatan (m)

b' = Tebal lapisan (m)

Jika yang menjadi titik pandang adalah airnya maka yang diidentifikasi di sini adalah distribusi *heads* (muka air tanah), konduktifitas hidrolik dan *storage* di semua tempat dalam sistem secara tiga dimensi (3D).

Rumus umum yang dipakai (fetter,1994) dalam permodelan 3 dimensi:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \dots \dots \dots (3.15)$$

Dimana S_s adalah *specific storage* dan R^* adalah volume masukan ke dalam sistem per unit volume dari akuifer per unit waktu. Seperti yang telah dibahas di atas bahwa rumus (1) dipakai untuk akuifer *unconfined* dimana $T_s = K_x h$ dan $T_y = K_y h$, h adalah tebal lapisan terisi air. Ketika T_x dan T_y diganti maka akan dihasilkan *Rumus Boussinesq* seperti berikut (Fetter,1994):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R \dots \dots \dots (3.16)$$

Dimana L menjadi nol dan *storativity* menjadi *specific yield*. Kemudian akan terlihat bahwa:

$$\frac{\partial h^2}{\partial x} = 2h \frac{\partial h}{\partial x} \dots \dots \dots (3.17)$$

$$\frac{\partial h^2}{\partial y} = 2h \frac{\partial h}{\partial y} \dots \dots \dots (3.18)$$

Sehingga rumus (3) dapat ditulis menjadi :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2S_s \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \dots \dots \dots (3.19)$$

3.11.1 Perancangan Model

Yang termasuk dalam tahapan perancangan model adalah rancangan grid, parameter waktu, kondisi batas dan kondisi awal serta pembuatan estimasi parameter - parameter model. Apakah yang dimaksud dengan rancangan grid, parameter waktu, kondisi batas dan kondisi awal, dapat dijelaskan sebagai berikut :

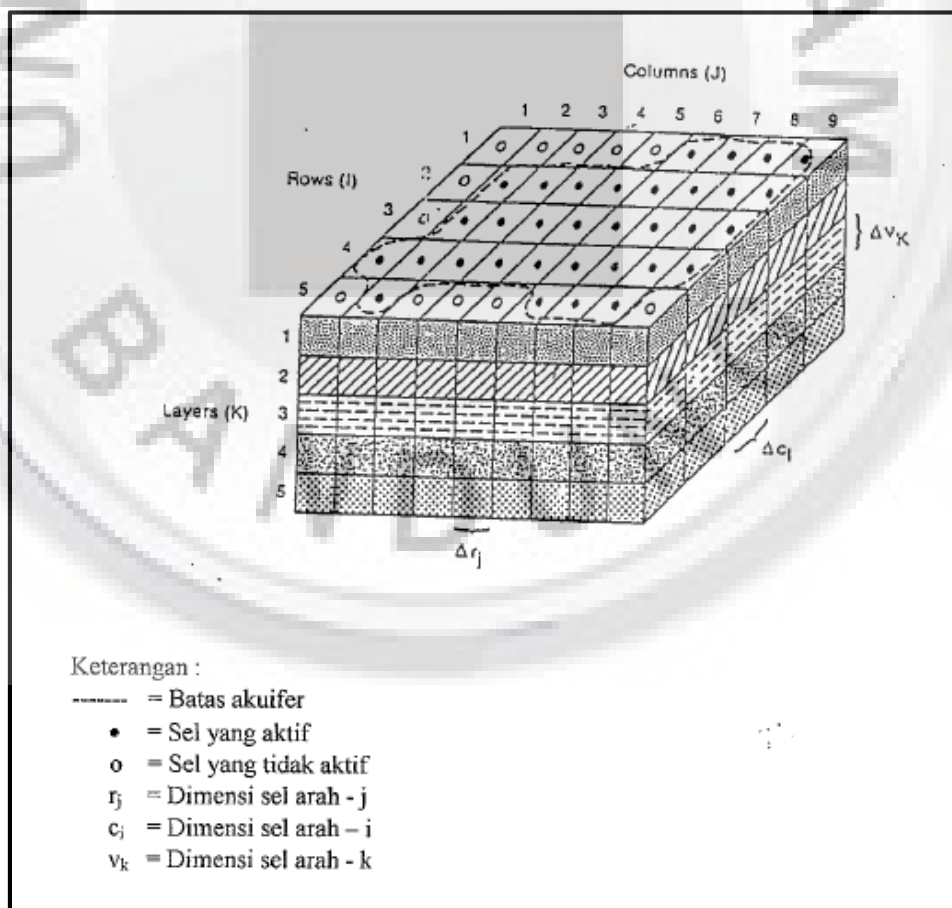
1. Diskritisasi

Dalam permodelan numerik, daerah model ditentukan dengan serangkaian model diskrit yang disebut dengan grid, blok atau elemen bergantung dari metode yang

digunakan. Proses pembuatan grid biasanya dilakukan dengan meng-*overlay*-kan dengan peta lokasi yang akan dimodelkan.

Penentuan ukuran sel dan elemen yang akan digunakan merupakan pekerjaan yang tidak mudah dalam proses perancangan grid, hal ini karena adanya ketergantungan beberapa faktor : variabelitas ruang parameter model, sistem pembatas fisik, jenis model yang digunakan, batasan model computer, batasan penanganan data, waktu komputasi dan biaya computer.

Pengambilan keputusan diskritisasi juga membutuhkan pertimbangan parameter waktu. Sebagian besar model - model numeric menghasilkan perhitungan pada waktu T yang dibagi menjadi beberapa waktu tahapan, t . Umumnya tahapan waktu yang kecil lebih baik, walaupun waktu dan biaya komputasi akan meningkat.



Sumber : McDonald dan Harbaugh, 1984

Gambar 3.16
Ilustrasi Diskritisasi Pada Suatu Sistem Akuifer

2. Kondisi batas

Menurut Toth (1990) dan Kuper (1990) (dalam Kodoatie,1996), terdapat empat jenis kondisi yang dapat dijadikan batas dari suatu model, yaitu :

- a. Batas ketinggian yang diketahui (*Prescribed Head Boundary*), batas ini merupakan batas ketinggian (H) yang konstan, misal : muka air laut, muka air danau, muka air sungai. Batas ini disesuaikan dengan data yang ada.
- b. Batas aliran yang diketahui (*Prescribed Flux Boundary*), besarnya aliran sudah diketahui, artinya nilai aliran air sudah diketahui (tertentu). Aliran ini secara konstan memberikan distribusi debit yang tetap kepada persoalan akuifer yang dianalisis. Apabila diketahui $q = 0$ maka $H = \text{konstan}$, dan ini disebut ketinggian konstan (*constant head boundary*).
- c. Batas muka air, batas ini merupakan batas muka air yang diketahui. Dalam kondisi ini diketahui bahwa berdasarkan persamaan kontinuitas maka pertambahan debit adalah konstan $dQ = \text{konstan}$. Dalam hal ini pengertian secara aplikatif adalah aliran air akan berbias melalui batas yang konstruktif (muka air yang diketahui) tersebut, namun besaran debitnya akan selalu konstan.
- d. Batas kedap air, yaitu suatu daerah yang kedap air (*impermeable*) sehingga aliran tidak dapat melewatinya. Sering disebut batas tanpa aliran (*no flow boundary*).

3. Kondisi Awal (*Initial Condition*)

Kondisi awal merupakan suatu keadaan dari sistem akuifer yang mempunyai parameter - parameter dengan nilai tertentu pada suatu waktu tertentu, serta digunakan pada awal proses perhitungan pada penyelesaian masalah aliran air tanah. Dengan demikian dapat diartikan pula sebagai proses pemberian nilai parameter pada saat mulai dilakukan perhitungan dan dipakai sebagai acuan kondisi sistem

akuifer mula - mula. Sebagai kondisi awal misalnya dapat dipilih berupa ketinggian potensial yang diukur atau didapatkan pada suatu waktu tertentu, yang umumnya digunakan adalah pada saat awal dimulainya penelitian.

3.11.2 Prosedur Pembuatan Model Pencemaran Air Tanah

Untuk memulai pengerjaan pembuatan model pencemaran air tanah, langkah awal yang perlu dilakukan yakni mempersiapkan input data yang dibutuhkan yakni sebagai berikut :

1. Data topografi.
2. Data geologi.
3. Data Curah hujan.
4. Data evapotranspirasi.
5. Data sifat fisik lapisan batuan, seperti :
 - a. Nilai K (Konduktifitas hidrolik).
 - b. Nilai S_s (*Specific storage*).
 - c. Nilai S_y (*Specific yields*).
 - d. Nilai n_e (porositas efektif).
 - e. Nilai n_{total} (porositas total).
 - f. Nilai d_s dan d_y yang merupakan nilai koefisien disperse untuk kontaminan.
6. Data mata air, sungai dan sumur penduduk.
7. Data *recharge, constant head*.
8. Data *pumping well*.
9. Data sebaran partikel atau fluida lainnya.

Setelah mendapatkan data yang dibutuhkan selanjutnya dilakukan pengerjaan pembuatan model dengan menggunakan *software Modflow* yakni dengan beberapa tahapan seperti berikut ini :

1. Peng-*input*-an Data Lokasi Penelitian dan Geometri Akuifer

Memasukkan nilai koordinat tempat penelitian meliputi koordinat maksimum (max), minimum (min) (X_{max} , X_{min} , Y_{max} , Y_{min}) dan elevasi permukaan tanahnya (Z_{max} , Z_{min}) serta geometri sistem akuifer. Elevasi permukaan tanah diperlukan untuk menggambarkan kondisi permukaan tanah dan untuk menentukan geometri sistem akuifer dan nonakuifer. Geometri sistem akuifer dan nonakuifer diperoleh dari hasil interpretasi data pengeboran dan pendugaan geolistrik yang tersedia serta informasi dari hasil penelitian sebelumnya.

2. Perancangan *Grid* Model

Buatlah rancangan *grid* model yang diinginkan. *Grid* model ini dimaksudkan untuk membantu dalam pemecahan permasalahan air tanah secara lebih sistematis dengan pendekatan matematis. Terdapat beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan dalam merencanakan *grid* model yakni jenis permasalahannya, keakuratan hasil yang ingin di capai, wujud dari akuifer, ketersediaan data, bentuk dari batas model dan jumlah sel yang direncanakan.

3. Peng-*input*-an Data *Initial Head*

Memasukkan nilai *initial head* yaitu dengan cara memasukkan kontur MAT (muka air tanah). *Initial Head* ini berperan sebagai batas vertikal atas dari sistem air tanah daerah model. *Visual ModFlow* menetapkan muka freatik tersebut, dihitung dari permukaan laut, berfungsi sebagai permukaan air tanah awal (*initial heads*) yang digunakan sebagai titik referensi untuk menghitung perubahan permukaan air tanah antara sebelum dan setelah pengambilan air tanah pada periode tertentu (Guiger dan Thomas, 2003).

4. Peng-input-an Data Titik Sampel dan Batasan TPA

Masukkan koordinat titik sampel (sumur, sungai dan mata air) dan juga batas TPA. Parameter sungai yang diperlukan untuk data masukan meliputi waktu awal simulasi (*start time*, dalam hari), waktu akhir simulasi (*stop time*, dalam hari), kedudukan permukaan air sungai (*river stage*, dalam meter dari permukaan laut), kedudukan dasar sungai (*riverbed bottom*, dalam meter dari permukaan laut), ketebalan lapisan dasar sungai (*riverbed thickness*, dalam meter), kelulusan vertikal lapisan dasar sungai, dalam meter/detik (Guiger dan Thomas, 2003).

Parameter batas pelepasan yang diperlukan untuk data masukan meliputi waktu awal simulasi (*start time*, dalam hari), waktu akhir simulasi (*stop time*, dalam hari), ketinggian pemunculan mata air (*drain elevation*, dalam meter dari permukaan laut), konduktansi (*conductance*, dalam m^2/hari), konduktansi per satuan luas (*conductance per unit area*, dalam hari^{-1}) (Guiger dan Thomas, 2003).

Data masukan yang berkaitan dengan sumur pemompaan terdiri atas nomor dan koordinat lokasi sumur pemompaan (sumur produksi), identitas saringan (screen ID), kedudukan saringan bagian atas (screen top, dalam m dari permukaan laut), kedudukan saringan bagian bawah (screen bottom, dalam m dari permukaan laut), jari-jari pipa saringan dan jari-jari pipa naik (dalam m), waktu akhir simulasi (stop time, dalam hari), dan debit pengambilan air tanah (rate, dalam m^3/hari) (Guiger dan Thomas, 2003).

5. Peng-input-an Nilai Konduktivitas Hidrolik Pada Setiap Lapisan Batuan

6. Peng-input-an Nilai S_s , S_y , n_e , n_{total} Pada Setiap Lapisan Batuan

7. Peng-input-an Nilai *Constant Concentration*

Nilai *constant concentration* ini merupakan nilai konsentrasi untuk kontaminan/polutan dari TPA.

8. Peng-input-an Data *Constant Head*.

Pemasukan data *constant head* dilakukan secara langsung pada Visual *ModFlow* (Menu *Boundaries*) dengan cara mendeliniasi dan memberikan nilai parameter pada setiap sel yang berada sepanjang garis batas. Parameter *constant head* yang diperlukan untuk data masukan meliputi deskripsi (*description*, diisikan nomor lokasi *constant head*), waktu awal simulasi (*start time*, dalam hari), waktu akhir simulasi (*stop time*, dalam hari), kedudukan permukaan air pada awal simulasi (*start time head*, dalam meter dari permukaan laut), dan kedudukan permukaan air pada akhir simulasi (*stop time head*, dalam meter dari permukaan laut) (Guiger dan Thomas, 2003).

9. Perencanaan Batasan Waktu

Masukkan batasan waktu yang diinginkan untuk mengetahui pergerakan *constant concentration* yang sudah dimasukkan sebelumnya. Langkah ini dilakukan sebelum data dibaca oleh *Modflow*.

10. Me-running Data

Untuk simulasi aliran air tanah secara kuantitatif data di *run* menggunakan *Modflow2000*, sedangkan untuk simulasi penyebaran kontaminan dari hasil yang sudah disimulasikan *Modflow2000* menggunakan MT3DMS.