

KAJIAN TERHADAP KETEPATAN PEMETAAN
KERENTANAN PENCEMARAN AIR TANAH
MEMAKAI METODA DRASTIC BILA
DATA AKIFER TERBATAS

TESIS

Oleh :

ELLY KUSUMAWATI BUDIRAHARDJO

6405010367



DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2006/2007

**KAJIAN TERHADAP KETEPATAN PEMETAAN
KERENTANAN PENCEMARAN AIR TANAH
MEMAKAI METODA DRASTIC BILA
DATA AKIFER TERBATAS**

TESIS

Oleh :

ELLY KUSUMAWATI BUDIRAHARDJO

6405010367



**TESIS INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI MAGISTER TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2006/2007**

PERNYATAAN KEASLIAN THESIS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis dengan judul :

**KAJIAN TERHADAP KETEPATAN PEMETAAN KERENTANAN
PENCEMARAN AIR TANAH MEMAKAI METODA DRASTIC BILA
DATA AKIFER TERBATAS**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Departemen Teknik Sipil Kekhususan Manajemen Sumber Daya Air Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tesis yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar Magister di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 4 Januari 2007

ELLY KUSUMAWATI B

NPM 6405010367

PENGESAHAN

Tesis dengan judul :

**KAJIAN TERHADAP KETEPATAN PEMETAAN KERENTANAN
PENCEMARAN AIR TANAH MEMAKAI METODA DRASTIC BILA
DATA AKIFER TERBATAS**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Departemen Teknik Sipil Kekhususan Manajemen Sumber Daya Air Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Tesis ini telah diujikan pada sidang ujian tesis pada tanggal 29 Desember 2006 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai tesis pada Departemen Teknik Sipil Kekhususan Manajemen Sumber Daya Air Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, Januari 2007

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Herr Soeryantono, M.Sc, Ph.D

NIP 131173810

Ir. Siti Murniningsih, MS

NIP 130810130

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Ir. Herr Soeryantono, M.Sc, Ph.D

Ir. Siti Murniningsih, MS

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahannya, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga tesis ini dapat selesai dengan baik.

Elly Kusumawati B
NPM 6405010367
Departemen Teknik Sipil
Kekhususan Manajemen Sumber Daya Air

Dosen Pembimbing
1. Ir. Herr Soeryantono, M.Sc, Ph.D
2. Ir. Siti Murniningsih, MS

**KAJIAN TERHADAP KETEPATAN PEMETAAN KERENTANAN
PENCEMARAN AIR TANAH MEMAKAI METODA DRASTIC BILA
DATA AKIFER TERBATAS**

ABSTRAK

Informasi penting dalam strategi konservasi air tanah adalah tingkat kerentanan air tanah terhadap pencemaran. Untuk ini pendekatan Index & Overlay, metoda DRASTIC yang berdasarkan faktor hidrogeologi dapat digunakan. Metoda yang berasal dari Amerika ini, memerlukan data cukup intensif sehingga perlu diuji kemungkinannya untuk bias akibat kendala data yang terbatas yang merupakan kondisi umum di Indonesia.

Pengujian dilakukan dengan membandingkan distribusi kerentanan pencemaran antara hasil DRASTIC dengan simulasi komputer. Simulasi dikerjakan dengan bantuan software GMS (Groundwater Modelling System) yang membagi kelas distribusi berdasarkan kecepatan dan arah aliran air tanah serta penyebaran partikel pencemar. Selanjutnya hasil simulasi diuji tingkat sensitivitasnya untuk mencari parameter yang sensitif. Wilayah studi yang digunakan dalam pengujian ini adalah Jakarta dan sekitarnya.

Perbandingan di atas menunjukkan bahwa distribusi kelas kerentanan dipengaruhi oleh besaran kecepatan dan arah vektor kecepatan. Perbandingan peta kerentanan Metoda DRASTIC dengan simulasi menunjukkan hasil yang sudah mendekati. Selanjutnya hasil analisa sensitivitas terhadap parameter K dan *constant head* menunjukkan bahwa kedua parameter ini tidak sensitif. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa DRASTIC dapat digunakan dalam kondisi keterbatasan data karena ketidakakuratan parameter akifer tidak akan mengakibatkan penyimpangan informasi yang berarti.

Kata Kunci : Metoda DRASTIC, Kerentanan, Pencemaran, Air tanah

Elly Kusumawati B
NPM 6405010367
Civil Engineering Department
Water Resources Management

Counsellor
1. Ir. Herr Soeryantono, M.Sc, Ph.D
2. Ir. Siti Murniningsih, MS

**STUDY OF THE RELIABILITY OF DRASTIC METHOD IN ASSESSING
GROUNDWATER VULNERABILITY POLLUTION UNDER LIMITED
INFORMATION OF AQUIFER PARAMETER**

ABSTRACT

Essential information in conserving groundwater is knowledge of its vulnerability to pollution. DRASTIC, an Index & Overlay approach from US EPA, was developed to assess the vulnerability based on hydrogeology information. The method, however, might be considered as data demanding as compared to data scarcity that is common in Indonesia. As such, it is necessary to study any possibility of biased due to data limitation.

The pattern of velocity flow vector field obtained from computer simulation has been used to assess the bias. Prior to that, sensitivity characteristic of the model to the aquifer parameter variation was also examined to measure the effect of data accuracy.

The result shows that the model not sensitive to accuracy of K and changes of constant head at boundary condition. Therefore the result of comparison would be independent to the accuracy of K and constant head. Comparison between the vector field and the vulnerability derived by DRASTIC shows good agreement. Therefore can be concluded that DRASTIC able to use under limited information of aquifer parameter. The inaccuracy of aquifer data will not cause significant error.

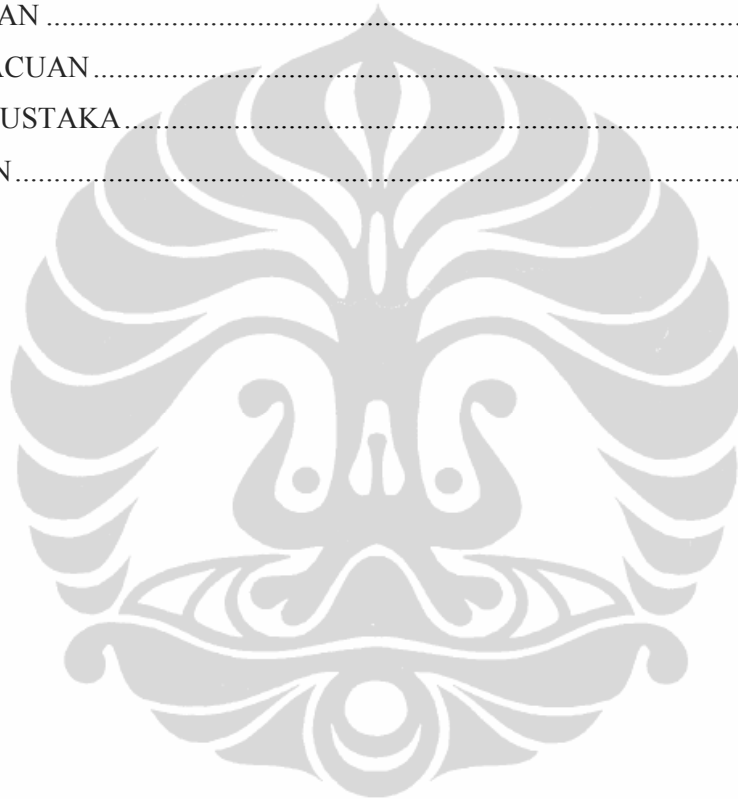
Keyword : DRASTIC method, Vulnerability, Pollution, Groundwater

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMAKASIH.....	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTARGAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR ISTILAH / SIMBOL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. LATAR BELAKANG MASALAH	I-1
1.2. TUJUAN PENELITIAN.....	I-3
1.3. BATASAN MASALAH.....	I-3
1.4. METODA PENELITIAN	I-3
BAB II STUDI PUSTAKA	
2.1. KARAKTERISTIK AIR TANAH.....	II-1
2.1.1. Persamaan Dasar Aliran Air Tanah.....	II-10
2.1.2. Solusi Numerik Persamaan Aliran Air Tanah dengan Metoda <i>Finite Difference</i>	II-14
2.1.3. Solusi Numerik Persamaan Pelacakan Jejak Partikel Pencemar dengan Metoda <i>Finite Difference</i>	II-16
2.2. PEMODELAN AIR TANAH.....	II-20
2.2.1. Model Konseptual	II-20
2.2.2. Kondisi Batas.....	II-22
2.3. ANALISA SENSITIVITAS.....	II-23

2.4. METODA DRASTIC	II-24
2.4.1. Gambaran Umum tentang Metoda DRASTIC.....	II-24
2.4.2. Metoda Penilaian DRASTIC	II-26
2.4.3. Deskripsi Masing-masing Parameter DRASTIC	II-31
2.5. KORELASI PARAMETER DRASTIC DENGAN PARAMETER SIMULASI MODEL ALIRAN JENUH.....	II-38
BAB III DESAIN PENELITIAN	
3.1. KONDISI GEOGRAFI DAN TOPOGRAFI	III-2
3.2. KONDISI GEOMORFOLOGI.....	III-3
3.3. KONDISI GEOLOGI	III-4
3.4. KONDISI HIDROGEOLOGI	III-5
3.4.1. Kondisi Batas Sistem Akifer	III-6
3.4.2. Transmittivitas Akifer	III-10
3.4.3. Horizontal Conductivity	III-11
3.5. SIMULASI MODEL ALIRAN AIR TANAH DENGAN PROGRAM GMS-MODFLOW.....	III-14
3.5.1. Membuat Model Konseptual	III-14
3.5.2. Pengecekan Model dan <i>Running</i> Model.....	III-15
3.6. SIMULASI PELACAKAN JEJAK PENYEBARAN PARTIKEL PENCEMAR DENGAN PROGRAM GMS-MODPATH.....	III-17
3.7. ANALISA SENSITIVITAS.....	III-17
3.8. PEMETAAN KERENTANAN PENCEMARAN AIR TANAH DENGAN DRASTIC.....	III-17
3.8.1. Pengolahan Peta Dasar Menjadi Peta Tematik DRASTIC	III-17
3.8.2. Pengolahan Peta Tematik Menjadi Peta Kerentanan DRASTIC	III-18
BAB IV ANALISA	
4.1. METODA DRASTIC	IV-1
4.2. SIMULASI MIGRASI PENCEMAR DENGAN GMS.....	IV-8
4.2.1. Simulasi Aliran Dengan GMS-Modflow.....	IV-8

4.2.2. Simulasi Penyebaran Partikel Pencemar dengan GMS-Modpath	IV-8
4.3. ANALISA SENSITIVITAS	IV-9
4.4. PERBANDINGAN PETA KERENTANAN METODA DRASTIC DENGAN HASIL SIMULASI	IV-19
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. KESIMPULAN.....	V-1
5.2. SARAN	V-1
DAFTAR ACUAN	A-1
DAFTAR PUSTAKA	P-1
LAMPIRAN	L-1



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Skema metoda penelitian	I-5
Gambar 2.1 Apparatus percobaan <i>Darcy</i>	II-1
Gambar 2.2 Konsep makroskopik dan mikroskopik aliran air tanah.....	II-3
Gambar 2.3 Hydraulic head h , tinggi tekan Ψ , elevasi z pada manometer laboratorium	II-5
Gambar 2.4 <i>Layered heterogeneity</i> dan <i>trending heterogeneity</i>	II-8
Gambar 2.5 Refraksi yang terjadi saat aliran melewati media dengan nilai K yang berbeda	II-9
Gambar 2.6 Hubungan antara tekstur dan porositas	II-10
Gambar 2.7 Diskretisasi suatu akifer 2 dimensi, horisontal, <i>confined</i>	II-15
Gambar 2.8 Sel <i>finite-difference</i>	II-17
Gambar 2.9 Contoh distribusi <i>hydraulic head</i> hasil simulasi MODFLOW	II-22
Gambar 2.10 Contoh jejak partikel pencemar hasil simulasi MODPATH.....	II-22
Gambar 2.11 Kondisi batas untuk suatu penampang melintang dari regional akifer	II-23
Gambar 2.12 Variasi perubahan <i>hydraulic head</i> sebagai hasil perubahan parameter model.....	II-24
Gambar 2.13 Jarak muka air dari permukaan tanah pada akifer bebas.....	II-32
Gambar 2.14 Jarak muka air dari permukaan tanah pada akifer tertekan..	II-32
Gambar 2.15 Grafik klasifikasi tekstur tanah.....	II-35
Gambar 2.16 Penentuan lapisan tak jenuh pada akifer bebas	II-36
Gambar 2.17 Penentuan lapisan tak jenuh pada akifer tertekan.....	II-37
Gambar 3.1 Peta wilayah studi	III-3
Gambar 3.2 Peta geologi wilayah studi.....	III-5

Gambar 3.3 Diagram blok skematik sistem akifer beserta batas hidrauliknya	III-6
Gambar 3.4 Cara mengestimasi fluktuasi muka air di S. Ciliwung.....	III-8
Gambar 3.5 Fluktuasi muka air sungai di wilayah studi.....	III-8
Gambar 3.6 Diagram blok transmitivitas akuifer	III-12
Gambar 3.7 K_h pada sistem akifer.....	III-13
Gambar 3.8 Model 3 dimensi sistem akifer di wilayah studi	III-16
Gambar 3.9 Lokasi titik sumur bor di wilayah studi.....	III-19
Gambar 3.10 Peta geologi & data litologi jenis tanah permukaan / penutup.....	III-20
Gambar 3.11 Peta geologi & data litologi jenis tanah <i>vadose zone</i>	III-21
Gambar 3.12 Peta tematik K & data litologi jenis tanah akuifer pada zona 40-100m	III-22
Gambar 4.1 Peta jenis tanah permukaan/penutup di wilayah studi	IV-3
Gambar 4.2 Peta kemiringan lereng di wilayah Jabotabek dan sekitarnya	IV-4
Gambar 4.3 Peta tematik konduktivitas hidraulik	IV-5
Gambar 4.4 Peta kerentanan air tanah berdasarkan DRASTIC Index.....	IV-7
Gambar 4.5a Kontur <i>head</i> interval 10 m.....	IV-10
Gambar 4.5b Kontur <i>head</i> interval 1 m	IV-11
Gambar 4.6 Arah vektor kecepatan aliran di wilayah studi	IV-12
Gambar 4.7 Distribusi kecepatan aliran di wilayah studi	IV-13
Gambar 4.8 Distribusi kecepatan dan arah vektor aliran	IV-14
Gambar 4.9a Grafik analisa sensitivitas terhadap <i>constant head</i> -.....	IV-15
Gambar 4.9b Grafik analisa sensitivitas terhadap <i>constant head</i> +	IV-16
Gambar 4.10a Grafik analisa sensitivitas terhadap K^+	IV-17
Gambar 4.10b Grafik analisa sensitivitas terhadap K^+	IV-18
Gambar 4.11 Hasil perbandingan peta kerentanan pencemaran air tanah.....	IV-20

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Rentang nilai <i>hydraulic conductivity</i> dan permeabilitas	II-7
Tabel 2.2 Rentang nilai porositas	II-9
Tabel 2.3 Bobot dari masing-masing parameter DRASTIC	II-27
Tabel 2.4 Range dan peringkat <i>depth of groundwater</i>	II-27
Tabel 2.5 Range dan peringkat <i>recharge rate</i>	II-28
Tabel 2.6 Range dan peringkat <i>aquifer media</i>	II-28
Tabel 2.7 Range dan peringkat <i>soil media</i>	II-29
Tabel 2.8 Range dan peringkat <i>topography</i>	II-29
Tabel 2.9 Range dan peringkat <i>impact of vadose zone</i>	II-30
Tabel 2.10 Range dan peringkat <i>hydraulic conductivity</i>	II-30
Tabel 2.11 Korelasi parameter DRASTIC dengan parameter akifer.....	II-38
Tabel 3.1 Nilai <i>head</i> pada kondisi batas di wilayah studi.....	III-9
Tabel 3.2 Nilai <i>head</i> pada sungai-sungai di wilayah studi.....	III-9
Tabel 3.3 Kemiringan sungai-sungai di wilayah studi.....	III-10
Tabel 3.4 Hubungan nilai <i>K</i> dengan jenis tanah akifer	III-22
Tabel 4.1 Hasil penilaian peringkat untuk masing-masing parameter DRASTIC	IV-6
Tabel 4.2 Perhitungan DRASTIC Index di tiap kelas kerentanan.....	IV-7

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Parameter Akifer <i>Hydraulic Conductivity (K)</i>	L-1
Lampiran 2 Koordinat dan Elevasi Permukaan Tanah Di Wilayah Studi.....	L-4
Lampiran 3 Koordinat Elevasi Muka Air Sungai.....	L-12
Lampiran 4 Data Litologi Sumur Bor.....	L-19

B A B I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Makin menurunnya kualitas dan kuantitas air permukaan menyebabkan masyarakat kesulitan memperoleh air bersih. Sebagai alternatif air tanah dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan air baku. Selain murah, air tanah memiliki kualitas yang lebih baik dibanding air permukaan karena adanya lapisan batuan dan tanah yang berfungsi sebagai filter polutan. Namun demikian kemampuan filter ini terbatas, jika beban yang diterima terlalu tinggi maka sebagian polutan akan lolos dan mencemari air tanah. Polutan yang telah larut dalam air tanah sulit sekali dihilangkan dan membutuhkan biaya yang mahal. Hal ini tentunya sangat merugikan tidak hanya bagi kesehatan manusia melainkan juga kondisi sosial-ekonomi. Dengan demikian air tanah yang merupakan sumber air baku perlu dilindungi dari pencemaran sehingga tidak merugikan masyarakat.

Dalam upaya menjaga keberlanjutan sumber daya alam, diperlukan suatu strategi pengembangan wilayah yang bertujuan menata ruang kegiatan manusia. Strategi ini mencakup perencanaan ruang yang akan dikembangkan untuk aktivitas manusia dan ruang yang harus dikonservasi untuk menjaga proses keseimbangan alam. Melalui penataan ruang, kuantitas dan kualitas air permukaan dapat terjaga. Air tanah sebagai salah satu aset sumber daya alam perlu dikonservasi. Kuantitas dan kualitasnya sangat dipengaruhi oleh air permukaan, karena sumber pengisian air tanah berasal dari air permukaan yang terinfiltrasi. Hal ini menunjukkan adanya keterkaitan yang kuat antara strategi pengembangan wilayah dengan strategi konservasi air tanah.

Berbagai macam informasi diperlukan untuk menyusun strategi konservasi air tanah yang tepat, salah satunya informasi mengenai tingkat kerentanan air tanah terhadap pencemaran. Tingkat kerentanan menunjukkan seberapa mudah pencemar mencapai air tanah, makin tinggi kerentanannya, makin mudah air tanah tercemari. Tingkat kerentanan ditentukan oleh kondisi

hidrogeologi setempat yang umumnya bervariasi sehingga akan membentuk tingkat kerentanan yang bervariasi pula.

Ada beberapa pendekatan yang digunakan untuk mengukur tingkat kerentanan air tanah antara lain Pendekatan Index & Overlay, Simulasi Komputer, dan Analisa Statistik. Salah satu metoda dengan pendekatan Index & Overlay yang sering digunakan adalah Metoda DRASTIC. Dalam metoda yang telah distandarisasi oleh EPA (*Environmental Protection Agency*) ini, faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kerentanan air tanah diinterpretasikan melalui pemberian skor dan klasifikasi untuk memperoleh indeks, ranking atau kelas kerentanan. Metoda ini membutuhkan banyak data masukan untuk menghasilkan keluaran yang akurat.

Di negara maju yang ketersediaan datanya lengkap, penggunaan metoda DRASTIC memberikan hasil yang memuaskan. Namun di Indonesia dimana ketersediaan datanya tidak lengkap, belum diketahui apakah metoda ini dapat digunakan. Akan tetapi di India, dimana kondisi ketersediaan data serupa dengan Indonesia, metoda ini telah memberikan hasil yang memuaskan (*Shamsuddin Shahid ; A Study of Groundwater Pollution Vulnerability Using DRASTIC/GIS, West Bengal, India ; Journal Environmental Hydrology Volume 8, 2000*). Dengan demikian metoda DRASTIC perlu diuji tingkat implementasinya terhadap keterbatasan data yang ada dilihat dari sisi seberapa jauh informasinya dapat dipercaya untuk pengambilan keputusan.

Pengujian dilakukan dengan membandingkan distribusi kerentanan pencemaran antara hasil DRASTIC dengan simulasi komputer. Simulasi dikerjakan dengan bantuan software GMS (*Groundwater Modelling System*) yang membagi kelas distribusi berdasarkan kecepatan dan arah aliran air tanah serta penyebaran partikel pencemar. Selanjutnya hasil simulasi diuji tingkat sensitivitasnya untuk mencari parameter yang sensitif dalam pembuatan peta kerentanan pencemaran. Data masukan dari parameter yang sensitif harus akurat agar DRASTIC dapat diimplementasikan dengan benar.

1.2. TUJUAN PENELITIAN

Menguji tingkat implemetansi DRASTIC terhadap keterbatasan data yang ada di Indonesia sehingga dapat diketahui tingkat keyakinan informasinya untuk pengambilan keputusan.

1.3. BATASAN MASALAH

Dalam melakukan kajian studi ini, terdapat dua hal yang ditetapkan menjadi batasan masalah. Batasan pertama, sumber pengisian air tanah (*recharge*) diasumsikan hanya berasal dari hujan (alami). Kegiatan manusia seperti pemompaan / pengimbuhan air tanah yang mempengaruhi laju pengisian air tanah tidak diperhitungkan. Hal ini dilakukan karena tidak diperolehnya informasi data yang akurat mengenai kegiatan tersebut. Batasan kedua, tingkat kerentanan pada simulasi komputer hanya ditinjau untuk kondisi aliran jenuh karena program komputer yang digunakan tidak dapat mensimulasi aliran tak jenuh.

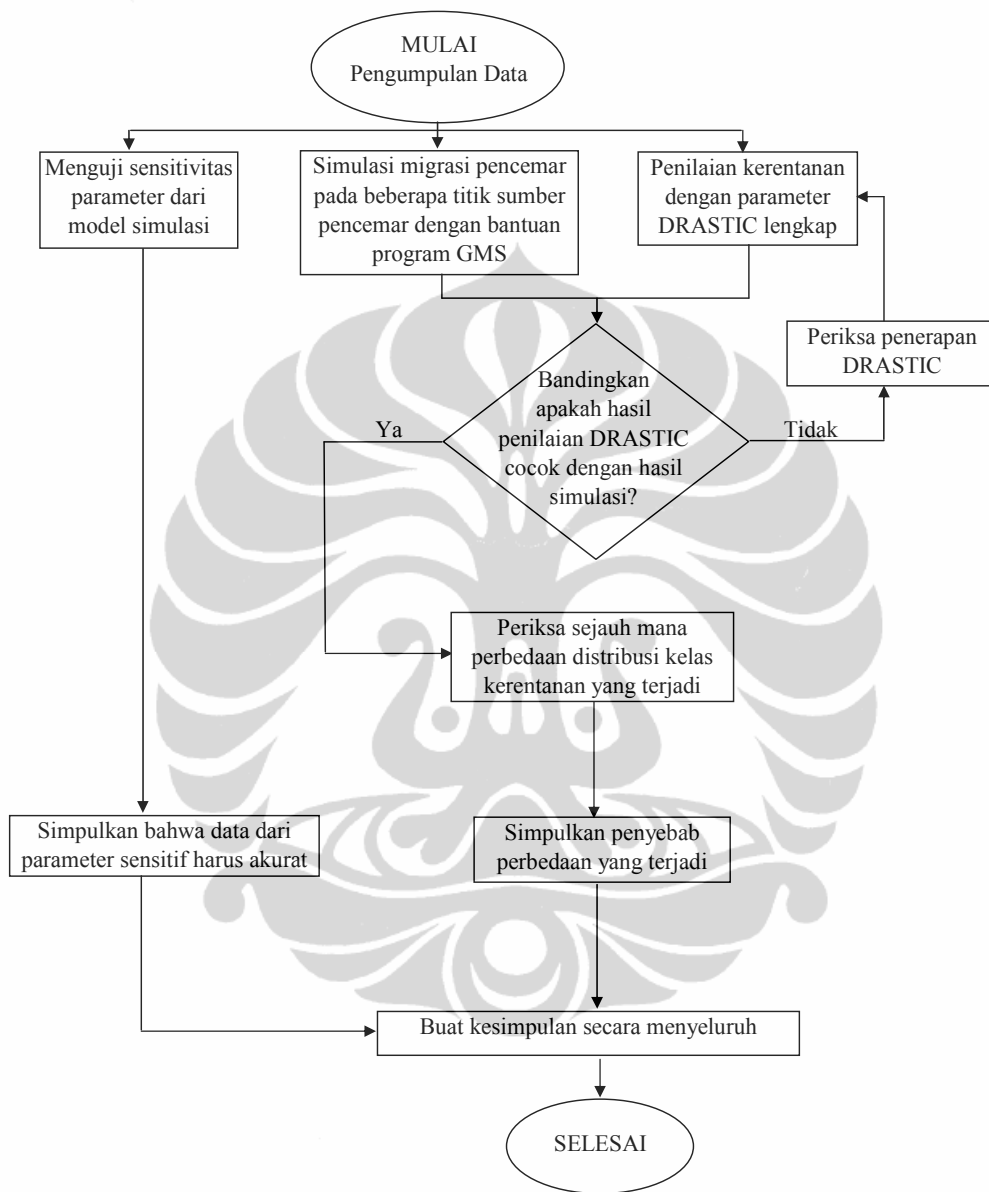
1.4. METODA PENELITIAN

DRASTIC merupakan metoda penilaian kerentanan air tanah yang sering digunakan dan memberikan hasil yang memuaskan. Meski demikian metoda DRASTIC memerlukan beragam data masukan untuk dapat menghasilkan data keluaran yang akurat. Keterbatasan data masukan akan mempengaruhi hasil DRASTIC. Dengan demikian perlu dicari data parameter apa saja yang sensitif terhadap penilaian DRASTIC. Secara skematis metoda penelitian yang dilakukan untuk mencapai tujuan dapat dilihat pada gambar 1.1.

Pemberian skor pada tiap parameter DRASTIC harus tepat sehingga memberikan hasil yang benar. Namun pada beberapa parameter, terutama *aquifer media* dan *impact of vadose zone*, rentang skornya cukup besar karena sangat bergantung kepada karakteristik butir penyusun tanah/batuan yang heterogen. Pemilihan skor yang tidak tepat akan mempengaruhi hasil keseluruhan. Dengan demikian hasil DRASTIC perlu dicek dengan hasil simulasi numerik agar pemilihan skornya tepat.

Setelah hasil DRASTIC benar, ingin diketahui sejauh mana perbedaan distribusi kelas kerentanan DRASTIC dengan hasil simulasi, apa penyebabnya, serta parameter hidraulik akifer yang sensitif terhadap penilaian kerentanan pencemaran. Data dari parameter yang sensitif harus akurat sehingga dapat memberikan hasil DRASTIC tepat.





Gambar 1.1 Skema metoda penelitian

B A B II

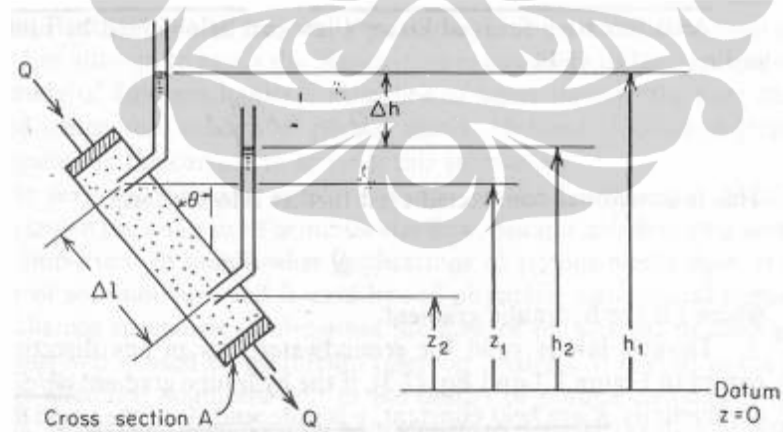
STUDI PUSTAKA

2.1. KARAKTERISTIK AIR TANAH

Konsep Media Berpori

Konsep media berpori pertama kali dicetuskan oleh *Henry Darcy* dengan melakukan eksperimen laboratorium mengenai terjadinya aliran pada media pasir (berpori). Aliran pada media berpori terjadi akibat adanya perpindahan air antar pori yang memiliki perbedaan energi hingga mencapai keseimbangan energi dalam ruang. Konsep ini mendasari prinsip dasar aliran air tanah.

Batuan dan sedimen tanah penyusun bumi tidak sepenuhnya berbentuk padat (*solid*). Batuan memiliki rongga karena mengalami proses pelapukan akibat perubahan cuaca. Sedangkan sedimen memiliki pori-pori antar butirannya karena terbentuk dari deposit butiran tanah yang terbawa oleh air, angin, es atau gravitasi. Kondisi ini serupa dengan kondisi media berpori. Rongga/pori tanah yang terisi oleh air permukaan yang terinfiltrasi memungkinkan terjadinya aliran air tanah.



Gambar 2-1 Apparatus percobaan *Darcy*

Sumber : R. Allan Freeze, John A. Cherry, *Groundwater*
(New Jersey : Prentice Hall, 1979), hal. 15

Hukum Darcy

Darcy, seorang ilmuwan Perancis, mempelajari terjadinya aliran pada media pasir yang dikembangkan untuk proses filtrasi. Hasil percobaannya menunjukkan bahwa laju aliran pada media berpori sebanding dengan h_1-h_2 saat Δl konstan dan berbanding terbalik dengan Δl saat h_1-h_2 konstan. Secara matematis rumus Darcy dapat dituliskan sebagai berikut :

$$v = K \frac{dh}{dl} \quad (2-1)$$

dimana :

v = specific discharge

K = hydraulic conductivity

h = hydraulic head

dh/dl = hydraulic gradient

K merupakan suatu konstanta yang nilainya bergantung pada jenis media tanah dan viskositas fluida. Pada jenis tanah pasir dan *gravel* nilai K lebih tinggi dibanding jenis *clay* atau batuan.

Kecepatan dalam Konsep Fluks

Dalam mekanika fluida, kecepatan tidak dapat didefinisikan sebagai perubahan jarak per satuan waktu. Jarak yang ditempuh partikel fluida mustahil dapat diukur, sehingga konsep kecepatan dalam mekanika fluida didefinisikan sebagai jumlah partikel fluida yang menembus dinding permukaan ruang *control volume* per satuan waktu. v pada rumus Darcy memiliki satuan sama dengan kecepatan atau fluks sehingga dikenal juga sebagai *kecepatan Darcy* atau *fluks Darcy*. v merupakan konsep makroskopik dan mudah diukur. Konsep ini berbeda dari konsep kecepatan mikroskopik yang merupakan alur aliran partikel air sebenarnya. Meski demikian kecepatan mikroskopik mustahil dapat diukur. Analisa aliran air tanah dengan pendekatan *Darcy* menggunakan konsep makroskopik, parameter (seperti *hydraulic conductivity*) maupun hukum-hukum yang berlaku, untuk memperoleh deskripsi umum dari perilaku mikroskopik. Rumus *Darcy* merupakan hasil percobaan empiris sehingga banyak ilmuwan

yang berusaha untuk menurunkan rumus *Darcy* dari hukum-hukum fisika dasar, salah satunya adalah Bear (1972).



Gambar 2-2 Konsep makroskopik (a) dan mikroskopik (b) aliran air tanah

Sumber : R. Allan Freeze, John A. Cherry, *Groundwater*
(New Jersey : Prentice Hall, 1979), hal. 17

Hydraulic Head dan Energi Potensial Fluida

Pada setiap proses fisika aliran dapat terjadi karena adanya potensi gradien. Contoh, aliran panas pada zat padat bergerak dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah, aliran listrik bergerak dari tegangan tinggi ke rendah. Dalam proses ini, temperatur dan tegangan memiliki potensi dan laju aliran sebanding dengan potensi gradien. *Hubbert*, dalam teorinya mengenai aliran air tanah telah mendefinisikan potensi gradien yang mengontrol aliran air melalui media berpori.

Menurut *Hubbert*, energi potensial sebagai kuantitas fisik harus dapat diukur di semua titik dalam suatu sistem aliran, yang selalu bergerak dari potensial tinggi ke rendah. Elevasi dan tekanan fluida merupakan dua hal yang membentuk energi potensial fluida. Buktinya, jika apparatus *Darcy* pada gambar 2-1 diletakkan vertikal ($\theta = 0^\circ$), aliran air tanah akan menuju kebawah (dari elevasi tinggi ke rendah) sebagai respons terhadap gaya gravitasi. Sebaliknya jika apparatus diletakkan horizontal ($\theta = 90^\circ$) sehingga tidak ada pengaruh gravitasi, aliran yang terjadi adalah akibat perbedaan tekanan di antara kedua titik terukur.

Aliran fluida pada media berpori merupakan proses mekanika. Gaya yang menyebabkan aliran harus lebih besar dari gaya friksi antara fluida dengan butir media berpori dan antar fluida yang bergerak. Pada mekanisme gesekan terjadi perubahan energi dari energi mekanis ke energi panas. Arah aliran akan bergerak dari energi mekanis per unit massa fluida yang tinggi ke rendah. Dengan demikian energi mekanis per unit massa fluida di setiap titik dalam suatu sistem

aliran dapat didefinisikan sebagai kerja yang dibutuhkan untuk menggerakkan satu unit massa fluida dari satu tempat ke tempat lain. Energi potensial fluida untuk aliran pada media berpori adalah energi mekanis per unit massa fluida.

Ada 3 gaya yang menyebabkan terjadinya aliran :

1. gaya untuk memindahkan massa dari elevasi $z = 0$ ke elevasi z

$$w_1 = mgz \quad (2-2)$$

2. gaya yang dibutuhkan untuk mengakselerasi fluida dari kecepatan $v = 0$ ke v

$$w_2 = \frac{mv^2}{2} \quad (2-3)$$

3. gaya yang dibutuhkan untuk menaikkan tekanan fluida dari $p = p_0$ ke p

$$w_3 = m \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho} \quad (2-4)$$

Energi potensial fluida Φ adalah total dari w_1 , w_2 , w_3 sehingga jika $m = 1$ persamaan (2-2), (2-3), (2-4) akan menjadi :

$$\Phi = gz + \frac{v^2}{2} + \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho} \quad (2-5)$$

Pada media berpori, kecepatan aliran sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Untuk fluida dengan massa jenis konstan, persamaan (2-5) dapat disederhanakan menjadi :

$$\Phi = gz + \frac{(p - p_0)}{\rho} \quad (2-6)$$

Pada titik P, tekanan fluida p didefinisikan sebagai berikut :

$$p = \rho g \Psi + p_0 \quad (2-7)$$

dimana Ψ adalah tinggi air pada kolom. Dari gambar 2-3 dan persamaan (2-7) :

$$p = \rho g(h - z) + p_0 \quad (2-8)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-8) ke persamaan (2-6) diperoleh :

$$\Phi = gz + \frac{[\rho g(h - z) + p_0] - p_0}{\rho} \quad (2-9)$$

$$\Phi = gh \quad (2-10)$$

Jadi energi potensial fluida Φ di setiap titik P pada media berpori merupakan hasil kali *hydraulic head* dengan percepatan gravitasi. Jika tekanan atmosfer p_0 dianggap sama dengan nol sehingga dari persamaan (2-6) dan (2-10) diperoleh :

$$\Phi = gz + \frac{p}{\rho} = gh \quad (2-11)$$

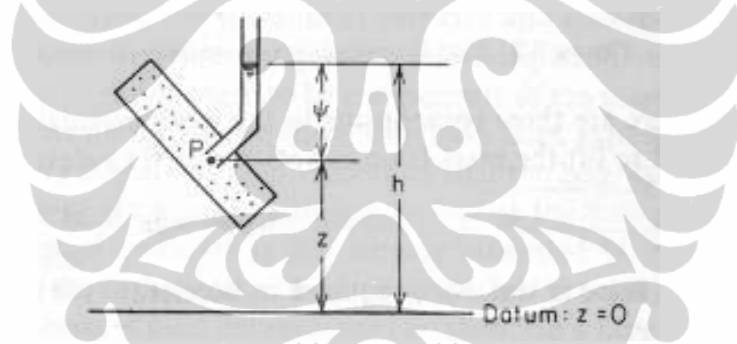
Jika kedua ruas dibagi dengan g , menjadi :

$$h = z + \frac{p}{\rho g} \quad (2-12)$$

Substitusikan persamaan (2-7) dengan $p_0 = 0$ ke persamaan (2-12) :

$$h = z + \Psi \quad (2-13)$$

Hubungan *hydraulic head* berdasarkan persamaan di atas merupakan dasar yang sangat penting dalam memahami aliran air tanah.



Gambar 2-3 Hydraulic head h , tinggi tekan Ψ , elevasi z pada manometer laboratorium

Sumber : R. Allan Freeze, John A. Cherry, *Groundwater* (New Jersey : Prentice Hall, 1979), hal. 20

Hydraulic Conductivity dan Permeabilitas

Seperti yang telah dikemukakan sebelumnya nilai *hydraulic conductivity* K bergantung pada jenis media berpori dan viskositas fluida. Untuk memperoleh hubungan viskositas dengan kecepatan aliran dilakukan percobaan sebagai berikut. Sebuah gelas percobaan diisi bola-bola kecil dengan diameter d yang seragam. Saat berbagai macam fluida dengan massa jenis ρ dan viskositas dinamis μ dilewatkan melalui apparatus pada *hydraulic gradient* yang konstan, diperoleh hubungan :

$$v \propto d^2$$

$$v \propto \rho g$$

$$v \propto 1/\mu$$

Dengan mensubstitusikan hasil pengamatan diatas ke rumus *Darcy* maka diperoleh :

$$v = -\frac{Cd^2 \rho g}{\mu} \frac{dh}{dl} \quad (2-14)$$

Parameter *C* mewakili material media berpori, seperti distribusi ukuran butir, bentuk butir, dll. Dengan membandingkan persamaan (2-14) dengan rumus (2-1) menunjukkan :

$$K = \frac{Cd^2 \rho g}{\mu} \quad (2-15)$$

Pada persamaan tersebut ρ dan μ adalah fungsi dari fluida dan Cd^2 merupakan fungsi dari media berpori. Jika :

$$k = Cd^2 \quad (2-16)$$

maka

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (2-17)$$

Parameter *k* dikenal sebagai permeabilitas intrinsik.

Tabel 2-1 mengindikasikan range nilai *K* dan permeabilitas *k* dari 5 jenis material geologi. Kesimpulan awal yang dapat diambil dari bacaan tabel adalah variasi nilai *K* sangat besar.

Heterogenitas dan Anisotropi dari Hydraulic Conductivity

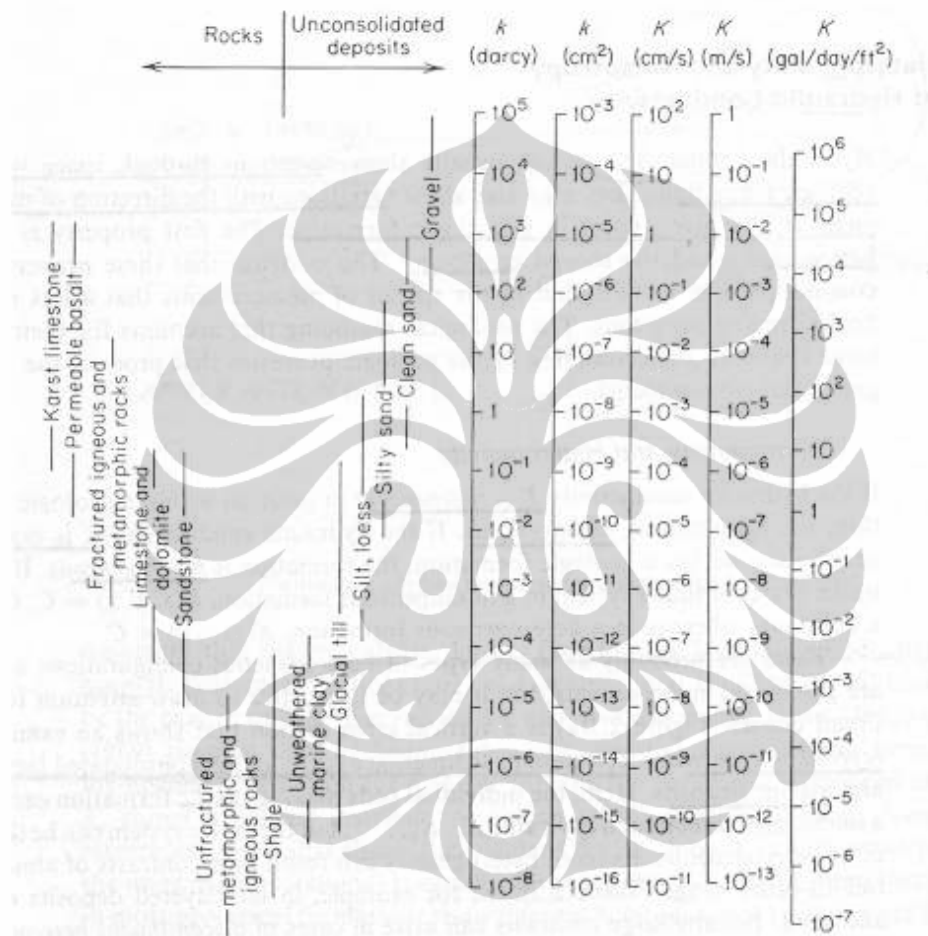
Hydraulic Conductivity bervariasi pada ruang formasi geologi dan di tiap titik pengukuran formasi geologi. Variasi yang pertama membentuk heterogenitas dan yang kedua membentuk formasi anisotropi.

Heterogenitas dan Homogenitas

Jika nilai *K* sama di setiap posisi dalam formasi geologi maka disebut homogen. Sebaliknya jika nilai *K* berbeda di setiap posisi dalam formasi geologi

maka disebut heterogen. Jika sistem koordinat xyz digunakan, maka pada konfigurasi homogen $K(x,y,z) = \text{konstan}$ dan heterogen $K(x,y,z) \neq \text{konstan}$. Tipe konfigurasi nilai K yang umum terjadi dapat dilihat pada gambar 2-4.

Tabel 2-1 Rentang nilai *hydraulic conductivity* dan permeabilitas



Sumber : R. Allan Freeze, John A. Cherry, *Groundwater* (New Jersey : Prentice Hall, 1979), hal. 29

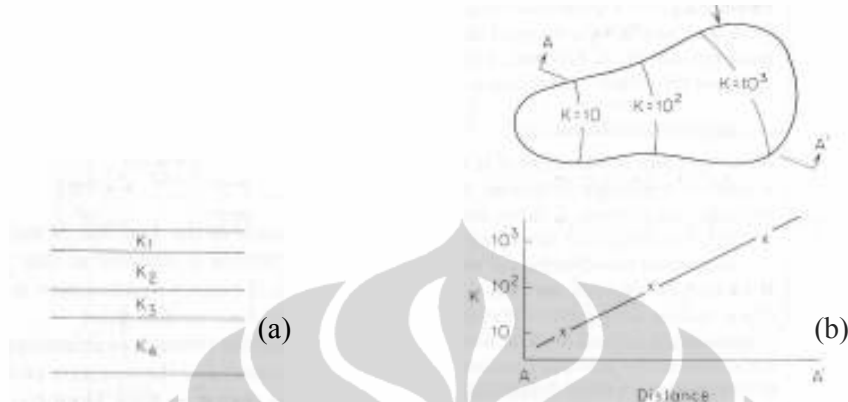
Isotropi dan Anisotropi

Suatu formasi disebut isotropi jika nilai K sama pada satu titik pengukuran dalam formasi geologi dan disebut anisotropi jika nilai K pada satu titik bervariasi. Pada sistem koordinat xyz formasi isotropi memiliki nilai $K_x = K_y = K_z$ dan $K_x \neq K_y \neq K_z$ pada formasi anisotropi.

Kombinasi heterogenitas dan anisotropi dapat membentuk formasi geologi :

1. homogen – isotropi

2. homogen – anisotropi
3. heterogen – isotropi
4. heterogen – anisotropi



Gambar 2-4 (a) *Layered heterogeneity* dan (b) *trending heterogeneity*

Sumber : R. Allan Freeze, John A. Cherry, *Groundwater*
(New Jersey : Prentice Hall, 1979), hal. 31

Refraksi

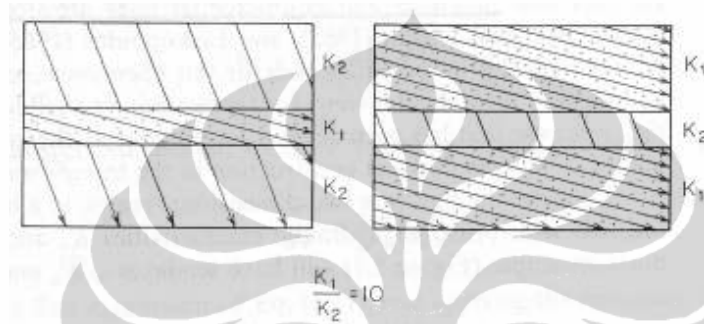
Pada saat aliran air tanah melalui formasi geologi dengan nilai K yang berbeda maka aliran tersebut akan mengalami terefraksi. Hal serupa terjadi juga pada cahaya yang melewati medium yang berbeda kerapatan. Namun sedikit berbeda dengan hukum pembiasan cahaya yang dikemukakan oleh Snellius, dimana sudut pembiasan mengikuti aturan sinus, refraksi aliran air tanah mengikuti aturan tangensial.

Aliran air tanah lebih memilih melewati formasi dengan nilai K yang lebih besar (lebih permeabel) dan berusaha mengambil rute terpendek pada formasi dengan nilai K kecil. Pada sistem akifer-akuitard dengan perbedaan permeabilitas lebih besar dari 2 ordo atau lebih, arah aliran cenderung lebih horisontal pada akifer dan hampir vertikal pada akuitard. Gambar 2-5 menunjukkan refraksi yang terjadi akifer.

Porositas dan Void Ratio

Jika total volume tanah atau batuan V_T terdiri dari volume *solid* V_s dan volume rongga V_v sehingga porositas dapat didefinisikan sebagai $n = V_v / V_T$.

Umumnya porositas dinyatakan dalam bentuk desimal atau prosentase. Gambar 2-6 menunjukkan hubungan beragam tekstur tanah dan batuan dengan porositas. Porositas primer merupakan pori yang terjadi dari susunan tanah atau batuan (gambar 2-6 (a),(b),(c),(d))sedangkan porositas sekunder terbentuk akibat adanya patahan (gambar (e),(f)). Porositas batuan lebih rendah dibanding tanah; gravel, pasir, silt yang tersusun



Gambar 2-5 Refraksi yang terjadi saat aliran melewati media dengan nilai K yang berbeda

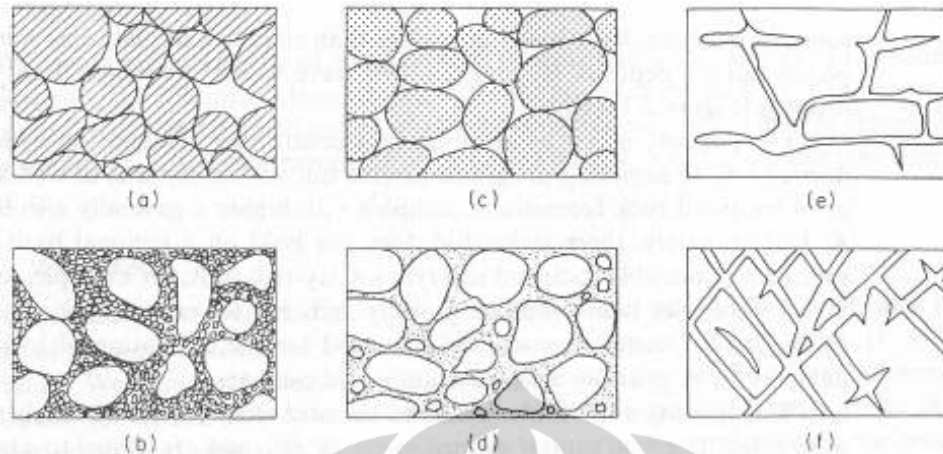
Sumber : R. Allan Freeze, John A. Cherry, *Groundwater* (New Jersey : Prentice Hall, 1979), hal. 173

Tabel 2-2 Rentang nilai porositas

	n (%)
Unconsolidated deposits	
Gravel	25-40
Sand	25-50
Silt	35-50
Clay	40-70
Rocks	
Fractured basalt	5-50
Karst limestone	5-50
Sandstone	5-30
Limestone, dolomite	0-20
Shale	0-10
Fractured crystalline rock	0-10
Dense crystalline rock	0-5

Sumber : R. Allan Freeze, John A. Cherry, *Groundwater* (New Jersey : Prentice Hall, 1979), hal. 37

dari partikel-partikel bulat dan bersudut memiliki porositas lebih rendah dibanding tanah jenis *clay*. Hal ini dapat dilihat pada tabel 2-2.



Gambar 2-6

Relation between texture and porosity. (a) Well-sorted sedimentary deposit having high porosity; (b) poorly sorted sedimentary deposit having low porosity; (c) well-sorted sedimentary deposit consisting of pebbles that are themselves porous, so that the deposit as a whole has a very high porosity; (d) well-sorted sedimentary deposit whose porosity has been diminished by the deposition of mineral matter in the interstices; (e) rock rendered porous by solution; (f) rock rendered porous by fracturing (after Meinzer, 1923).

Sumber : R. Allan Freeze, John A. Cherry, *Groundwater* (New Jersey : Prentice Hall, 1979), hal. 37

2.1.1. Persamaan Dasar Aliran Air Tanah

Hukum kekekalan massa dinyatakan sebagai :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{cv}} \rho dV = - \int_{A_{cv}} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (2-18)$$

dimana V adalah volume air tanah V_w yang berada di dalam *control volume*. Sementara $\vec{v} \cdot \vec{n}$ adalah besarnya fluks air tanah (v_i) yang menembus dinding ruang *control volume*. Sehingga khusus untuk aliran air tana, persamaan kekekalan massa menjadi :

$$\frac{\partial(\rho V_w)}{\partial t} = \rho \left[-v_x + \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) \right] dydz + \rho \left[-v_y + \left(v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \right) \right] dx dz + \rho \left[-v_z + \left(v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) \right] dx dy \quad (2-19)$$

Karena V_w bukan hanya fungsi t , maka bentuk turunan pada ruas kiri harus berupa turunan parsial dan bila volume *control volume* (yang besarnya = $dx \times dy \times dz$)

dilambungkan oleh V_T , serta massa jenis ρ dianggap konstan menurut waktu, maka

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial V_w}{\partial t} &= \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) V_T \\ \frac{\partial V_w}{\partial t} &= \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) V_T\end{aligned}\quad (2-20)$$

Persamaan ini menggambarkan seberapa banyak jumlah air yang ditambahkan kedalam ruang *control volume* (∂V_w), bila neto dari fluks yang masuk dan keluar dari ruang tersebut adalah sebesar ∂v . Pertambahan jumlah air ini, di dalam ruang *control volume*, akan diakomodasikan dalam bentuk :

- peningkatan tekanan air sebesar ∂p dan
- peningkatan volume porositas sebesar ∂V_v

Bila ∂V_p adalah perubahan volume air akibat perubahan tekanan sebesar ∂p , maka secara matematis dapat dituliskan :

$$\partial V_w = \partial V_p + \partial V_v \quad (2-21)$$

Hubungan antara ∂p dengan ∂V_p yang diakibatkannya bisa didapat dari definisi kompresibilitas air (β). Disini β didefinisikan sebagai perbandingan antara besarnya perubahan volume air ΔV_p (relatif terhadap total volume air didalam *control volume* V_w) terhadap perubahan tekanan Δp yang menyebabkan perubahan volume tadi sehingga

$$\beta = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} - \frac{V_p / V_w}{\Delta p} = - \frac{\partial V_p / \partial V_w}{\partial p} \quad (2-22)$$

atau

$$\partial V_p = -\partial p \beta V_w \quad (2-23)$$

Mengingat bahwa $p = \rho gh$ dan $V_w = n V_T$, dimana n adalah porositas, maka

$$\begin{aligned}\partial V_p &= -n\beta V_T \partial(\rho g(-h)) \\ \partial V_p &= n\beta V_T \partial h \rho g\end{aligned}\quad (2-24)$$

Disini harga h harus dimasukkan negatif karena peningkatan volume $+\partial V_p$ hanya dapat diakibatkan oleh penurunan head ($-h$).

Besarnya perubahan volume porositas dapat diformulasikan berangkat dari definisi kompresibilitas akifer (α). Perlu dicatat bahwa, apabila volume akifer

dipaksa untuk berubah sebesar ΔV_T maka tegangan efektif yang bekerja pada butiran materi akifer akan berubah pula sebesar $\Delta\sigma_e$. Dalam konteks ini, α didefinisikan sebagai perbandingan antara ΔV_T (relatif terhadap volume awalnya V_T) dengan $\Delta\sigma_e$ yang diakibatkannya sehingga

$$\alpha = \lim_{\Delta\sigma_e \rightarrow 0} -\frac{1}{V_T} \frac{\Delta V_T}{\Delta\sigma_e}$$

$$\alpha = -\frac{1}{V_T} \frac{\partial V_T}{\partial \sigma_e} \quad (2-25)$$

Ruang *control volume* yang berisi media berpori sebanyak V_T , sebenarnya terdiri dari volume butiran (V_s) ditambah volume pori (V_v) atau $V_T = V_s + V_v$ dengan demikian

$$\partial V_T = \partial(V_s + V_v)$$

$$\partial V_T = \partial V_s + \partial V_v \quad (2-26)$$

Perubahan volume media berpori ∂V_T yang sedang dibahas disini adalah mengembang atau memadat media berpori akibat berubahnya tekanan air tanah oleh aktivitas aliran air tanah. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa mengembang/menyusutnya ruang pori disini diakomodasi dalam bentuk *rearrangement* butiran tanah sedemikian rupa sehingga volume butirannya sendiri relatif tidak berubah ($\partial V_s \approx 0$). Dengan demikian persamaan (2-26) menjadi

$$\partial V_T = \partial V_v \quad (2-27)$$

Bila ini kita substitusikan ke persamaan (2-25) akan didapat

$$\alpha = -\frac{1}{V_T} \frac{\partial V_v}{\partial \sigma_e} \quad (2-28)$$

atau

$$\partial V_v = -\alpha V_T \partial \sigma_e \quad (2-29)$$

Besarnya tegangan efektif σ_e adalah tegangan total σ_T (akibat berat tanah lapisan atas yang aktif menekan akifer) setelah dikurangi tegangan pori (tekanan air tanah) sebesar p , sehingga $\sigma_e = \sigma_T - p$ dan sendirinya perubahan tegangan efektif $\partial\sigma_e = \partial\sigma_T - \partial p$. Disini $\partial\sigma_T$ adalah perubahan tegangan total dan tegangan total hanya akan berubah bila gaya dari lapisan atas yang aktif menekan akifer

berubah. Didalam konteks pembicaraan, yang ada hanyalah perubahan tekanan pori ∂p akibat adanya perubahan fluks air tanah. Sedangkan berat lapisan atas yang menekan akifer tidak berubah ($\partial \sigma_T = 0$). Dengan demikian

$$\partial \sigma_e = -\partial p \quad (2-30)$$

Disini terlihat jelas hubungan antara pengurangan tekanan air tanah (akibat pemompaan misalnya) akan meningkatkan *effective stress* sehingga tekanan terhadap butiran akan meningkat, yang selanjutnya dapat menyebabkan *land subsidence*. Bila hasil terakhir dikembalikan kedalam persamaan (2-29) maka

$$\partial V_v = -\alpha V_T (-\partial p) \quad (2-31)$$

dan karena $p = \rho gh$ maka

$$\partial V_v = \alpha \rho g V_T \partial h \quad (2-32)$$

Penggabungan persamaan (2-24) dan (2-32) kedalam persamaan (2-21) akan menghasilkan

$$\begin{aligned} \partial V_w &= \partial V_p + \partial V_v \\ \partial V_w &= n\beta \rho g V_T \partial h + \alpha \rho g V_T \partial h \\ \partial V_w &= \rho g (n\beta + \alpha) V_T \partial h \end{aligned} \quad (2-33)$$

dan bila hasil terakhir ini dikembalikan ke persamaan (2-19) akan didapat

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_w}{\partial t} &= \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) V_T \\ \rho g (n\beta + \alpha) V_T \frac{\partial h}{\partial t} &= \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) V_T \\ \rho g (n\beta + \alpha) \frac{\partial h}{\partial t} &= \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2-34)$$

Apabila didefinisikan bahwa

$$S_s = \rho g (n\beta + \alpha) \quad (2-35)$$

maka

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (2-36)$$

Besaran S_s dikenal sebagai *specific storage*. Bila dibandingkan antara definisinya sesuai dengan persamaan (2-33) dan (2-35) terlihat bahwa

$$\partial V_w = \rho g (n\beta + \alpha) V_T \partial h$$

$$\partial V_w = S_s V_T \partial h \quad (2-37)$$

atau

$$S_s = \frac{\partial V_w}{V_T \partial h} \quad (2-38)$$

Jadi interpretasi fisik S_s adalah perubahan volume air dari volume akifer V_T bila terjadi perubahan *hydraulic head* sebesar ∂h . Sering pual disajikan dalam ungkapan S_s adalah volume air yang keluar dari satu satuan volume akifer bila *hydraulic head*nya diturunkan sebanyak satu satuan.

Selanjutnya bila besarnya fluks dirumuskan menurut Darcy dimana $v_i = K_i \frac{\partial h}{\partial x}$

maka

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2-39)$$

2.1.2. Solusi Numerik Persamaan Aliran Air Tanah dengan Metoda *Finite Difference*

Kemampuan metoda analitis seperti yang dibahas pada sub bab 2.1.1. sangat terbatas untuk mendekati kondisi akifer di lapangan yang kompleks (heterogen). Dengan demikian para ahli mengembangkan metoda simulasi numerik pada komputer.

Ada 2 pendekatan dasar pada metoda simulasi numerik yaitu : 1. formulasi *finite difference* dan 2. formulasi *finite element*. Formulasi yang digunakan oleh MODFLOW pada pemodelan dengan program GMS adalah *finite difference*. Berikut pembahasan persamaan numeriknya.

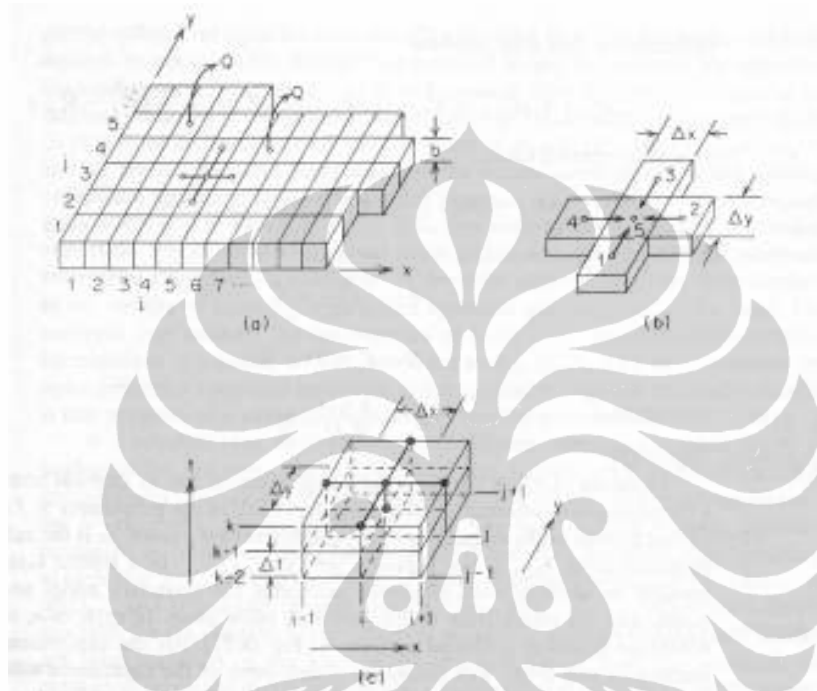
Suatu akifer tertekan dengan ketebalan konstan b seperti pada gambar 2-7(a) didiskretasi menjadi blok-blok kecil. Tiap blok memiliki material hidrogeologinya masing-masing dan nilai *hydraulic head* pada titik pusat mewakili nilai seluruh blok. Seperti yang dilihat pada gambar 2-7(a) beberapa blok menggambarkan sumur pompa yang ada di lapangan.

Menurut hukum kontinuitas, laju aliran yang masuk ke dalam blok harus sama dengan laju perubahan volume dalam blok :

$$Q_{15} + Q_{25} + Q_{35} + Q_{45} = S_{s5} \Delta x \Delta y b \frac{\partial h_5}{\partial t} \quad (2-54)$$

dimana S_s adalah *specific storage* pada kotak 5. Dari Hukum Darcy :

$$Q_{15} = K_{15} \frac{h_1 - h_5}{\Delta y} \Delta x b \quad (2-55)$$



Gambar 2-7 Diskretisasi suatu akifer 2 dimensi, horisontal, *confined*

Sumber : R. Allan Freeze, John A. Cherry, *Groundwater* (New Jersey : Prentice Hall, 1979), hal. 353

K_{15} merepresentasikan *hydraulic conductivity* antara titik 1 dan 5. Rumus tersebut juga dapat dituliskan untuk Q_{25} , Q_{35} , Q_{45} .

Diasumsikan pada media akifer homogen, isotropik, sehingga $K_{15} = K_{25} = K_{35} = K_{45} = K$ dan $S_{s1} = S_{s2} = S_{s3} = S_{s4} = S_s$. Jika $\Delta x = \Delta y$ dan $T = Kb$ dan $S = S_s b$ lalu substitusikan persamaan (2-55) ke (2-54) maka diperoleh

$$T(h_1 + h_2 + h_3 + h_4 - 4h_5) = S \Delta x^2 \frac{\partial h_5}{\partial t} \quad (2-56)$$

Perubahan waktu pada ruas kanan dapat dituliskan sebagai

$$\frac{\partial h_5}{\partial t} = \frac{h_5(t) - h_5(t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (2-57)$$

dengan Δt adalah perubahan waktu yang ditinjau pada diskretisasi model numerik. Selanjutnya jika penomoran diskretisasi kita ubah ke dalam sumbu ijk dengan ij merujuk pada penomoran titik dan k perubahan waktu maka

$$h_{i,j-1}^k + h_{i+1,j}^k + h_{i-1,j}^k + h_{i,j+1}^k - 4h_{i,j}^k = \frac{S \Delta x^2}{T \Delta t} (h_{i,j}^k - h_{i,j}^{k-1}) \quad (2-58)$$

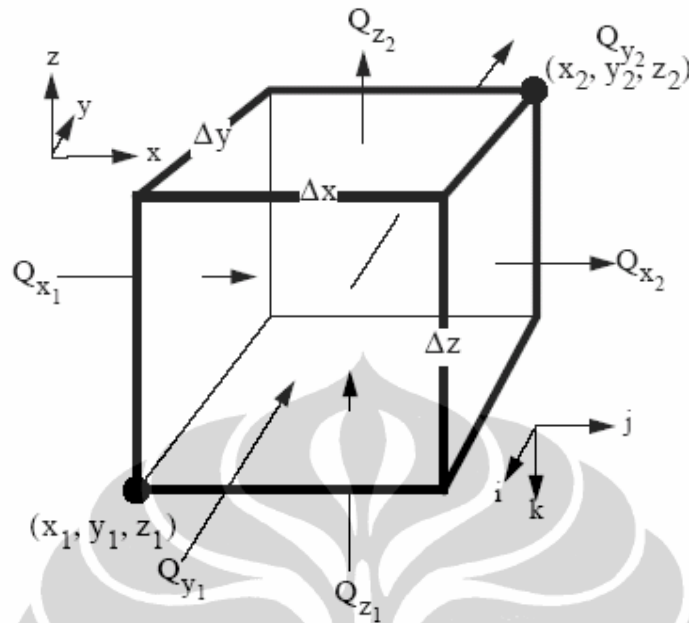
2.1.3. Solusi Numerik Persamaan Pelacakan Jejak Partikel Pencemar dengan Metoda *Finite Difference*

Untuk melacak jejak pergerakan partikel pencemar pada air tanah, program GMS mengembangkan model konseptual MODPATH. Model ini memanfaatkan medan aliran hasil simulasi MODFLOW untuk mensimulasi pergerakan partikel pencemar. Penjabaran algoritma pada kondisi *steady state* dijelaskan berikut ini.

Turunan parsial dari Hukum Konservasi Massa pada kondisi *steady state* untuk sistem aliran 3 dimensi adalah :

$$\frac{\partial}{\partial x} (nv_x) + \frac{\partial}{\partial y} (nv_y) + \frac{\partial}{\partial z} (nv_z) = W \quad (2-59)$$

dengan v_x , v_y , and v_z adalah vektor kecepatan rata-rata, n porositas dan W perubahan volume air pada ruang *control volume*. Hukum Konservasi Massa pada persamaan (2-59) berlaku juga pada potongan kecil dari suatu volume akifer yang didefinisikan sebagai ruang *control volume*. Persamaan tersebut menyatakan bahwa jumlah air yang keluar dan masuk pada *control volume* sama dengan perubahan volume dalam *control volume*. Gambar 2-8 memperlihatkan suatu ruang *control volume* dengan komponen aliran yang masuk dan keluar melalui keenam permukaannya.



Gambar 2-8 Sel *finite-difference*

Sumber : David W. Pollock, *User's Guide for Modpath/Modpath-Plot, Version 3* (U.S. Geological Survey), hal. 2-3

Kecepatan rata-rata yang melalui tiap permukaan *control volume* merupakan debit yang menembus permukaan dibagi porositas material ruang *control volume*.

$$v_{x1} = \frac{Q_{x1}}{n\Delta y\Delta z}, v_{x2} = \frac{Q_{x2}}{n\Delta y\Delta z} \quad (2-60)$$

$$v_{y1} = \frac{Q_{y1}}{n\Delta x\Delta z}, v_{y2} = \frac{Q_{y2}}{n\Delta x\Delta z} \quad (2-61)$$

$$v_{z1} = \frac{Q_{z1}}{n\Delta x\Delta y}, v_{z2} = \frac{Q_{z2}}{n\Delta x\Delta y} \quad (2-62)$$

Q adalah debit yang melalui permukaan ruang *control volume* dan $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ merupakan dimensi *control volume*. Aliran yang masuk atau keluar Q_s maka persamaan keseimbangan massa dapat dituliskan sebagai :

$$\frac{nv_{x2} - nv_{x1}}{\Delta x} + \frac{nv_{y2} - nv_{y1}}{\Delta y} + \frac{nv_{z2} - nv_{z1}}{\Delta z} = \frac{Q_s}{\Delta x\Delta y\Delta z} \quad (2-63)$$

Ruas kiri pada persamaan (2-63) merupakan laju perubahan volume yang meninggalkan *control volume* dan ruas kanan adalah laju perubahan volume di

dalam ruang *control volume*. Dengan mensubstitusikan rumus *Darcy* ke persamaan (2-63) *hydraulic head* pada titik pusat ruang *control volume* dapat dihitung. Hal ini seperti yang telah disampaikan pada sub bab 2.1.3. mengenai Persamaan Numerik untuk Aliran Air Tanah untuk model konseptual MODFLOW.

Untuk mengetahui jalur pergerakan partikel pencemar dalam air tanah, metoda yang dikembangkan harus dapat mengukur laju aliran yang terjadi antar sel diskretisasi. Algoritma yang digunakan MODPATH adalah interpolasi linier untuk mengukur kecepatan pada setiap titik di dalam sel diskretisasi sehingga komponen kecepatan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$v_x = A_x(x - x_1) + v_{x1} \quad (2-64)$$

$$v_y = A_y(y - y_1) + v_{y1} \quad (2-65)$$

$$v_z = A_z(z - z_1) + v_{z1} \quad (2-66)$$

dengan A_x , A_y , and A_z adalah konstanta gradien kecepatan dalam sel

$$A_x = \frac{(v_{x2} - v_{x1})}{\Delta x} \quad (2-67)$$

$$A_y = \frac{(v_{y2} - v_{y1})}{\Delta y} \quad (2-68)$$

$$A_z = \frac{(v_{z2} - v_{z1})}{\Delta z} \quad (2-69)$$

Interpolasi linier menghasilkan vektor kecepatan antar sel yang kontinu yang sesuai dengan Hukum Konservasi Massa di setiap posisi dalam sel (persamaan (2-59)). Hal ini dapat dibuktikan dengan mensubstitusikan persamaan (2-64), (2-65), (2-66) ke (2-59), maka bentuk turunan pada ruas kiri persamaan (2-59) akan sama dengan komponen pada ruas kiri dari persamaan (2-63) (dengan asumsi bahwa porositas di seluruh sel adalah sama). Dengan demikian, kecepatan linier pada keenam permukaan sel dapat memenuhi persamaan (2-59) pada setiap titik dalam sel, jika diasumsikan bahwa perubahan volume dalam sel terdistribusi merata.

Jika suatu partikel p , bergerak dalam sel diskretisasi 3 dimensi, perubahan laju kecepatan terhadap waktu pada arah x dapat dituliskan sebagai :

$$\left(\frac{dv_x}{dt}\right)_p = \left(\frac{dv_x}{dx}\right)\left(\frac{dx}{dt}\right)_p \quad (2-70)$$

Notasi p melambangkan lokasi partikel (x_p, y_p, z_p) . Misalnya notasi $\left(\frac{dv_x}{dt}\right)_p$ adalah laju perubahan kecepatan terhadap waktu yang terjadi pada posisi partikel yang ditinjau sedangkan $\left(\frac{dx}{dt}\right)_p$ merupakan perubahan jarak terhadap waktu dalam arah x . Dengan mendefinisikan komponen kecepatan dalam arah x sebagai :

$$v_{xp} = \left(\frac{dx}{dt}\right)_p \quad (2-71)$$

dan mendiferensialkan persamaan (2-64) terhadap x maka diperoleh hubungan

$$\left(\frac{dv_x}{dx}\right) = A_x \quad (2-72)$$

Substitusikan persamaan (2-71) dan (2-72) ke (2-70) maka

$$\left(\frac{dv_x}{dt}\right)_p = A_x v_{xp} \quad (2-73)$$

Dengan cara yang sama, diperoleh persamaan untuk arah y dan z

$$\left(\frac{dv_y}{dt}\right)_p = A_y v_{yp} \quad (2-74)$$

$$\left(\frac{dv_z}{dt}\right)_p = A_z v_{zp} \quad (2-75)$$

Persamaan (2-73), (2-74), (2-75) dapat diubah ke bentuk

$$\left(\frac{1}{v_{xp}}\right) d(v_{xp}) = A_x dt \quad (2-76)$$

Persamaan (2-76) jika diintegrasikan pada batas waktu t_1 dan t_2 ($t_2 > t_1$) menjadi

$$\ln \left| \frac{v_{xp}(t_2)}{v_{xp}(t_1)} \right| = A_x \Delta t \quad (2-77)$$

dengan $\Delta t = t_2 - t_1$. Dengan mengeksponensialkan kedua ruas dari persamaan diatas dan mensubstitusikan persamaan (2-64) untuk $v_{xp}(t_2)$ akan didapat

$$x_p(t_2) = x_1 + \frac{1}{A_x} \{v_{xp}(t_1) \exp(A_x \Delta t) - v_{x1}\} \quad (2-78)$$

Dengan cara yang sama dilakukan untuk arah y dan z

$$y_p(t_2) = y_1 + \frac{1}{A_y} \{v_{yp}(t_1) \exp(A_y \Delta t) - v_{y1}\} \quad (2-79)$$

$$z_p(t_2) = z_1 + \frac{1}{A_z} \{v_{zp}(t_1) \exp(A_z \Delta t) - v_{z1}\} \quad (2-80)$$

Kecepatan partikel saat t_1 merupakan fungsi koordinat partikel yang sudah diketahui nilainya, sehingga koordinat untuk waktu berikutnya (t_2) dapat dihitung dengan persamaan (2-78), (2-79), (2-80)

2.2. PEMODELAN AIR TANAH

Dalam usaha memahami sistem air tanah diperlukan suatu model yang mendekati sistem riil. Tujuan utama dari pemodelan adalah memahami perilaku sistem saat ini dan memperkirakan pola perilakunya di masa yang akan datang. Model air tanah telah diterapkan untuk 4 permasalahan pokok yaitu aliran air tanah, transport zat terlarut, aliran termal, dan deformasi akifer. Seluruh model diawali dengan penyelesaian persamaan dasar aliran air tanah sehingga diperoleh distribusi *hydraulic head* dari akifer. Model transport zat terlarut diperoleh dengan menambahkan persamaan perubahan konsentrasi kimia ke dalam model aliran. Model aliran termal diperoleh dengan menerapkan persamaan transfer termal pada akifer. Model deformasi akifer diperoleh dengan mengkombinasikan persamaan aliran dengan persamaan lain yang menggambarkan perubahan struktur fisik dari akifer yang diikuti dengan perubahan *hydraulic head*.

2.2.1. Model Konseptual

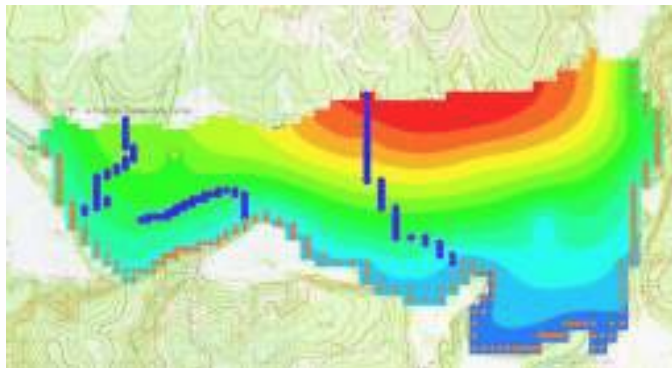
Model merupakan representasi dari sistem riil, model konseptual dikembangkan untuk mempelajari sistem aliran air tanah. Meski model konseptual jauh lebih sederhana dibanding sistem riil, namun model ini sangat membantu dalam memahami perilaku aliran. Model konseptual bersifat statis, hanya menggambarkan kondisi sistem saat ini. Untuk dapat memprediksi perilaku sistem di masa datang diperlukan model dinamis yang dapat

dimanipulasi. Ada beberapa macam model dinamis, antara lain model fisik dengan skala tertentu, model analog dan model matematik.

Model fisik dan model analog memerlukan biaya sangat mahal dan waktu penelitian yang cukup lama sebaliknya model matematik jauh lebih murah, cepat dan akurat. Oleh karena itu, model ini banyak dikembangkan oleh para ahli. Solusi model matematik dikembangkan dari persamaan dasar aliran air tanah, termal, dan transport massa. Model matematik aliran air tanah yang paling sederhana adalah Hukum *Darcy*. Untuk menerapkan Hukum *Darcy* diperlukan model konseptual dan data karakteristik fisik dari sistem akifer, medan potensial, dan karakteristik fluida. Ada 2 macam model matematik yaitu model analitis dan model numerik. Hukum *Darcy* merupakan salah satu contoh dari model analitis yang memerlukan masukan berupa kondisi awal dan kondisi batas pada lokasi studi. Kondisi ini harus sederhana sehingga persamaan aliran dapat diselesaikan dengan kalkulus. Model analitis aliran telah dikembangkan untuk mensimulasi aliran, termal dan transport massa menuju sumur bor atau sungai.

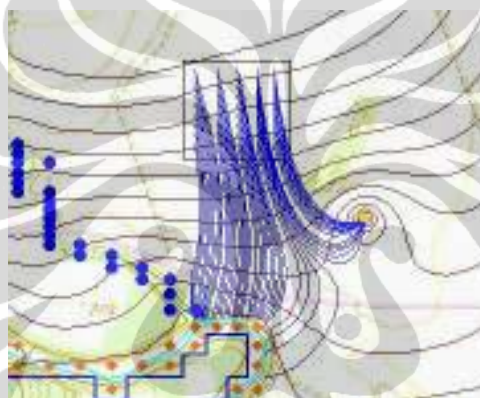
Model numerik dikembangkan untuk mengakomodir variasi parameter hidrogeologi pada lokasi studi atau kompleksitas kondisi batas. Solusinya diperoleh dengan mengubah persamaan aliran, termal dan transport massa ke dalam bentuk aljabar dan selanjutnya disusun dalam bentuk matriks untuk diselesaikan dengan bantuan komputer. Persamaan dalam bentuk aljabar merupakan pendekatan numerik sehingga hasilnya juga merupakan pendekatan. Program GMS yang digunakan dalam studi ini merupakan model numerik.

Transformasi model konseptual menjadi model matematik memerlukan beberapa data masukan untuk dapat menyelesaikan persamaan yang ada. Seluruh model diawali dengan model aliran air tanah. Data mengenai konfigurasi fisik akifer seperti lokasi akifer, bentang lokasi, dan ketebalan akifer dan kondisi batas, karakteristik hidraulik akifer seperti variasi transmitivitas T atau permeabilitas dan koefisien *storage* S_s , *hydraulic head*, laju pengisian air tanah dan debit sungai diperlukan untuk dapat menyelesaikan persamaan aliran air tanah. Dari simulasi ini diperoleh data keluaran berupa arah dan kecepatan fluida.



Gambar 2-9 Contoh distribusi *hydraulic head* hasil simulasi MODFLOW

Sumber : *User's Manual for GMS-Modflow*



Gambar 2-10 Contoh jejak partikel pencemar hasil simulasi MODPATH

Sumber : *User's Manual for GMS-Modpath*

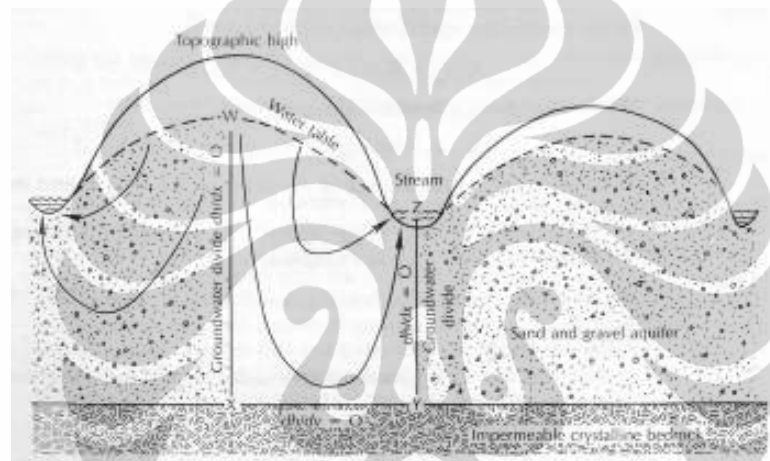
2.2.2. Kondisi Batas

Selain data konfigurasi fisik akifer, data mengenai kondisi batas juga diperlukan untuk dapat menyelesaikan persamaan aliran air tanah. Ada 2 tipe dasar kondisi batas, yaitu Dirichlet dan Neumann. Pada tipe Dirichlet nilai *hydraulic head* di sekeliling area studi diketahui, sedangkan pada kondisi Neumann yang diketahui adalah nilai fluksnya. Kadangkala kondisi batas yang diketahui campuran antara nilai *hydraulic head* di sebagian lokasi dan nilai fluksnya di bagian lain.

Gambar 2-11 merupakan contoh dari kondisi batas. Suatu akifer pasir dan *gravel* terletak di atas lapisan batuan impermeabel memiliki beberapa pola aliran, masing-masing bergerak dari *groundwater divide* menuju sungai. Perhatikan

bidang W,X,Y dan Z. Garis vertikal dari bidang W-X dan bidang Z-Y merupakan *groundwater divide*, pada garis tersebut tidak terjadi aliran sehingga $dh/dx = 0$. Sepanjang bidang X-Y merupakan lapisan impermeabel sehingga tidak mungkin ada aliran vertikal dari akifer menuju kebawah $dh/dy = 0$. Ketiga kondisi batas ini merupakan jenis Neumann.

Bidang W-Z merupakan permukaan air sehingga dapat dianggap jenis Dirichlet maupun Neumann. Termasuk jenis Dirichlet jika muka air pada kondisi *steady state* sehingga *hydraulic head*-nya konstan. Termasuk Neumann jika elevasi permukaan air berubah-ubah akibat pengaruh infiltrasi atau debit sungai.



Gambar 2-11 Kondisi batas untuk suatu penampang melintang dari regional akifer

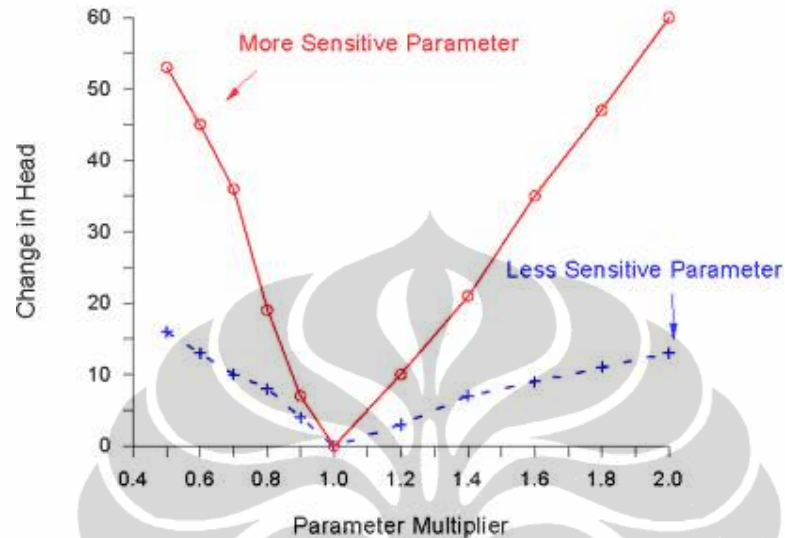
Sumber : C. W. Fetter, *Applied Hydrogeology*
(Ohio : Merril Publishing Company, 1988), hal. 533

2.3. ANALISA SENSITIVITAS

Model numerik menyederhanakan kompleksitas sistem akifer di lapangan agar simulasi dapat diproses dengan lebih mudah. Dengan penyederhanaan ini ada kemungkinan bahwa data masukan tidak presisi dengan kondisi lapangan sehingga mempengaruhi data keluaran. Untuk mengetahui seberapa jauh perubahan data keluaran akibat perubahan data masukan dilakukan analisa sensitivitas.

Kegunaan lain dari analisa sensitivitas adalah untuk menentukan arah aktivitas pengumpulan data di masa yang akan datang. Data yang sensitif memerlukan pengamatan yang lebih detail, sebaliknya untuk data yang tidak

sensitif. Jika ditemukan data yang tidak sensitif terhadap variasi perubahan data masukan, pemodel harus dapat menjelaskan alasan ketidaksensitifan ini.



Gambar 2-12 Variasi perubahan *hydraulic head* sebagai hasil perubahan parameter model

Sumber : *User's Manual for GMS-Sensitivity Analysis*

2.4. METODA DRASTIC

2.4.1. Gambaran Umum tentang Metoda DRASTIC

Potensi pencemaran air tanah merupakan kombinasi dari faktor hidrogeologi, aktivitas antropogenik, dan sumber pencemar yang terdapat di suatu wilayah. Informasi mengenai aktivitas antropogenik dan sumber pencemar merupakan informasi spesifik yang memerlukan pengamatan secara khusus. Sedangkan informasi hidrogeologi merupakan informasi dasar yang umumnya dimiliki oleh seluruh wilayah. DRASTIC merupakan salah satu metoda yang dikembangkan untuk menilai potensi pencemaran air tanah berdasarkan informasi dasar yang tersedia, yaitu hidrogeologi. Karakteristik hidrogeologi merupakan gambaran kombinasi dari faktor geologi dan hidrologi yang mempengaruhi dan membentuk aliran air tanah yang masuk dan keluar di suatu area. Tujuh parameter hidrogeologi yang dianggap paling berpengaruh terhadap potensi pencemaran air tanah diinterpretasikan melalui pemberian skor dan klasifikasi untuk memperoleh indeks, ranking atau kelas kerentanan.

DRASTIC dikembangkan untuk mengevaluasi potensi pencemaran pada area $\geq 40,47$ ha (100 acre). Metoda ini dapat diterapkan untuk akifer bebas dan tertekan, namun tidak dapat diaplikasikan secara langsung pada akifer semi-tertekan atau *leaky aquifer*. Untuk kondisi semi tertekan, akifer harus dievaluasi dulu pada kondisi tertekan atau bebas baru selanjutnya dijustifikasi menurut pertimbangan hidrogeologi dan tujuan penilaian.

Perlu diingat bahwa DRASTIC tidak dibuat untuk menggantikan penyelidikan lapangan, sehingga tidak boleh digunakan sebagai satu-satunya dasar pertimbangan dalam penyusunan strategi tata ruang. Fungsi utama DRASTIC adalah memberikan informasi dasar untuk perencanaan dan pengawasan air tanah agar dapat dilindungi dari pencemaran yang bersumber dari aktivitas manusia. Beberapa aplikasi DRASTIC di lapangan antara lain :

- pada perencanaan infrastruktur yang berpotensi mencemari air tanah, DRASTIC digunakan sebagai dasar pemilihan area lapangan yang memerlukan penyelidikan lebih detail. Daerah dengan tingkat kerentanan tinggi merupakan area yang perlu diselidiki lebih lanjut
- pada proses pengawasan, lokasi yang menurut DRASTIC memiliki tingkat kerentanan tinggi perlu memiliki sistem monitoring yang ketat
- data parameter DRASTIC dapat dimanfaatkan untuk memilih jenis tindakan yang tepat dalam pemulihan pencemaran air tanah

Asumsi dasar yang digunakan dalam metoda DRASTIC :

1. sumber pencemar berasal dari permukaan tanah
2. pencemar masuk ke akifer melalui proses infiltrasi (pengisian air tanah oleh hujan)
3. penyebaran pencemar dalam akifer mengikuti pola aliran air tanah
4. area yang dievaluasi oleh DRASTIC harus $\geq 40,47$ ha (100 acre)

2.4.2. Metoda Penilaian DRASTIC

Tujuh parameter hidrogeologi yang dianggap paling berpengaruh terhadap kerentanan air tanah adalah

D — **D**epth to Water

R — (Net) **R**echarge

A — **A**quifer Media

S — **S**oil Media

T — **T**opography (Slope)

I — **I**mpact of the Vadose Zone Media

C — **C**onductivity (Hydraulic) of the Aquifer

Ketujuh parameter inilah yang merupakan singkatan dari nama DRASTIC. Penilaian DRASTIC menggunakan sistem ranking. Sistem ini memiliki 3 hal pokok yaitu bobot, range dan peringkat.

1. Bobot

Tiap parameter DRASTIC diberi bobot sesuai dengan tingkat relevansinya terhadap potensi pencemaran. Rentang nilainya berkisar dari 1-5 (tabel 2-3). Parameter yang paling signifikan diberi bobot 5 dan yang paling kecil tingkat signifikansinya diberi bobot 1.

2. Range

Tiap-tiap parameter DRASTIC dibagi ke dalam range yang dikelompokkan menurut signifikansi jenis media terhadap potensi pencemaran (tabel 2-4 sampai 2-10).

3. Peringkat

Tiap range dari parameter DRASTIC diberi nilai peringkat dari angka 1-10 (tabel 2-4 sampai 2-10). Parameter D,R,S,T,C memiliki satu nilai peringkat pada tiap range. Sedangkan tiap range dari parameter A dan I memiliki rentang nilai peringkat dan *typical rating*. Rentang peringkat digunakan jika informasi parameter secara detail diketahui dan sebaliknya untuk *typical rating*.

Tabel 2-3 Bobot dari masing-masing parameter DRASTIC

<i>Parameter</i>	<i>Bobot</i>
Depth of groundwater	5
Recharge Rate	4
Aquifer Media	3
Soil Media	2
Topography	1
Impact of Vadose Zone	5
Hydraulic Conductivity	3

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 19

Tabel 2-4 Range dan peringkat *depth of groundwater*

Depth to Groundwater		
Range		Peringkat
(feet)	(meter)	
0-5	0 - 1,5	10
5-15	1,5 - 4,6	9
15-30	4,6 – 9,1	7
30-50	9,1 – 15,2	5
50-75	15,2 – 22,9	3
75-100	22,9 – 30,5	2
>100	>30,5	1

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 21

Tabel 2-5 Range dan peringkat *recharge rate*

Recharge Rate		
Range		Peringkat
(inches/year)	(mm/tahun)	
0-2	0 - 50,8	1
2-4	50,8 - 101,6	3
4-7	101,6 - 177,8	6
7-10	177,8 - 254	8
>10	>254	9

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 21

Tabel 2-6 Range dan peringkat *aquifer media*

Aquifer Media		
Range	Peringkat	Typical Rating
massive shale	1-3	2
metamorphic/igneous	2-5	3
weathered metamorphic/igneous	3-5	4
glacial till	4-6	5
bedded sandstone, limestone, shale sequences	5-9	6
massive sandstone	4-9	6
massive limestone	4-9	6
sand&gravel	4-9	8
Basalt	2-10	9
karst limestone	9-10	10

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 22

Tabel 2-7 Range dan peringkat *soil media*

Soil Media	
Range	Peringkat
thin/absent	10
gravel	10
sand	9
shrinking and/or aggregated clay	7
sandy loam	6
loam	5
silty loam	4
clay loam	3
nonshrinking&nonaggregated	1

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 22

Tabel 2-8 Range dan peringkat *topography*

Topography (% slope)	
Range	Peringkat
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 23

Tabel 2-9 Range dan peringkat *impact of vadose zone*

Impact of Vadose Zone		
Range	Peringkat	Typical Rating
confining layer	1	1
silt/clay	2-6	3
Shale	2-5	3
Limestone	2-7	6
Sandstone	4-8	6
bedded limestone, sandstone shale, sand&gravel with significant silt&clay	4-8	6
metamorphic/igneous	2-8	4
sand&gravel	6-9	8
Basalt	2-10	9
karst limestone	8-10	10

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 24

Tabel 2-10 Range dan peringkat *hydraulic conductivity*

Hydraulic Conductivity		
Range		Peringkat
(gpd/ft ²)	(m/hari)	
1-100	0,04 - 4,08	1
100-300	4,08 – 12,23	2
300-700	12,23 – 28,55	4
700-1000	28,55 – 40,78	6
1000-2000	40,78 – 81,56	8
>2000	> 81,56	10

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 25

Setelah masing-masing parameter dikelompokkan ke dalam range, diberi bobot dan peringkat, DRASTIC index dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W = \text{Potensi Pencemaran} \quad (2-93)$$

dimana : R = peringkat

: W = bobot

Setelah DRASTIC indeks dihitung, dapat diidentifikasi tingkat kerentanan suatu area terhadap pencemaran. Makin tinggi nilai indeksnya makin rentan terhadap pencemaran.

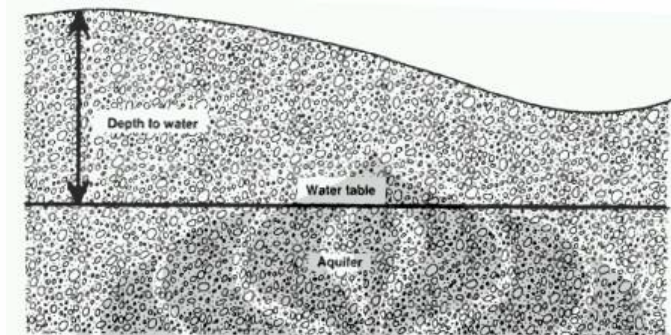
2.4.3 Deskripsi masing-masing parameter DRASTIC

a. *Depth to Water*

Parameter ini menggambarkan jarak yang harus ditempuh pencemar untuk mencapai akifer dan menentukan waktu kontak antara pencemar dengan lingkungan sekitar yang berperan dalam proses oksidasi. Semakin jauh jarak muka air tanah dari permukaan, makin besar waktu tempuh yang diperlukan pencemar untuk mencapai akifer sehingga kesempatan beratenuasi makin besar. Keberadaan lapisan kedap air juga menghambat pergerakan pencemar. Pengelompokan range dari parameter ini dibuat atas dasar perubahan jarak yang menimbulkan peningkatan konsentrasi pencemar.

Pada akifer bebas, elevasi muka air dapat naik-turun akibat perubahan tekanan atmosfer. Letak akifer bebas paling dekat dengan permukaan tanah sehingga lebih rentan terhadap pencemaran. Sebaliknya akifer tertekan memiliki tingkat kerentanan yang lebih rendah dibanding akifer bebas karena memiliki perlindungan alami dari lapisan kedap air. Akifer semi tertekan adalah akifer yang terletak di antara lapisan kedap air tapi masih terjadi aliran vertikal karena kebocoran pada lapisan kedap air. Karakteristik akifer ini bervariasi, bisa mendekati karakteristik akifer tertekan atau bebas. Dengan demikian jika karakteristik akifer semi tertekan mendekati akifer bebas, akifer akan lebih rentan terhadap pencemaran dan berlaku sebaliknya.

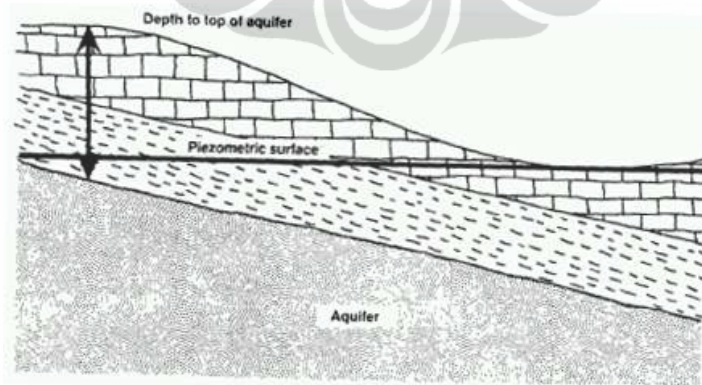
Metoda DRASTIC dapat digunakan untuk mengevaluasi akifer tertekan maupun bebas. Pada akifer tertekan, *depth to water* diukur dari permukaan tanah hingga muka air (gambar 2-17). Data muka air tanah diperoleh dari hasil pengamatan sumur bor dan peta muka air tanah.



Gambar 2-13 Jarak muka air dari permukaan tanah pada akifer bebas

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 46

Pada akifer tertekan, *depth to water* diukur dari permukaan tanah hingga batas atas akifer atau elevasi dasar lapisan kedap air (gambar 2-18). Informasi *depth to water* pada akifer tertekan tidak bisa dibaca dari peta muka air tanah melainkan dari penampang melintang formasi geologi atau peta elevasi lapisan batuan atau data sumur bor.



Gambar 2-14 Jarak muka air dari permukaan tanah pada akifer tertekan

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 46

b. Net Recharge

Sumber pengisian air tanah berasal dari infiltrasi hujan melalui permukaan tanah dan perkolasi ke dalam muka air tanah. *Net recharge* adalah jumlah air per satuan luas yang mengisi akifer. Proses ini mengendalikan mobilitas vertikal dan horisontal pencemar ke dalam air tanah serta mempengaruhi jumlah air yang tersedia untuk proses dispersi dan dilusi pada lapisan tak jenuh dan lapisan jenuh. Dengan demikian proses pengisian air tanah merupakan sarana utama pembentukan lindi dan mobilitas pencemar, baik padat atau cair, menuju muka air tanah. Makin tinggi laju pengisian air tanah, makin besar potensi pencemarannya.

Pada metodologi ini, laju pengisian air tanah merupakan jumlah infiltrasi tahunan tanpa mempertimbangkan distribusi, intensitas atau durasi dari kejadian. Data dari parameter ini dapat diperoleh dari laporan hidrologi atau olahan dari data hujan rata-rata tahunan, evaporasi dan limpasan permukaan. Pada akifer bebas data pengisian air tanah umumnya sudah tersedia, sedangkan pada akifer tertekan dihitung dari keseimbangan neraca air.

Selain hujan, sumber pengisian air tanah dapat berasal dari saluran irigasi, air limbah dan imbuhan air tanah. Jika kontribusi dari ketiga sumber tersebut cukup signifikan, maka laju pengisian air tanah tidak dapat diukur hanya berdasarkan curah hujan saja. Disamping itu penentuan laju pengisian air tanah juga harus memperhatikan faktor *recharge-discharge*. Laju pengisian akan berkurang jika jumlah air yang keluar dari *discharge area* lebih besar daripada air yang masuk pada *recharge area*. Namun bila jumlah air yang keluar relatif sedikit, pengaruh *discharge area* dapat diabaikan.

c. Aquifer Media

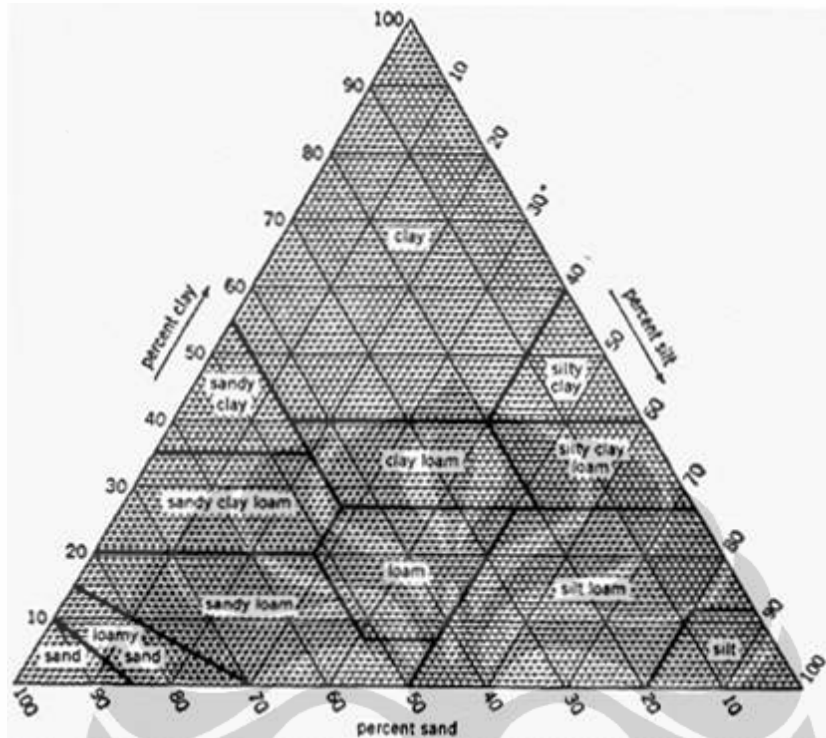
Akifer adalah lapisan yang terletak dibawah permukaan tanah yang memiliki kandungan air cukup tinggi sehingga dapat dieksplorasi. Sedangkan pengertian *aquifer media* merujuk pada jenis tanah/batuan penyusun akifer. Kandungan air pada akifer terletak pada pori yang terbentuk dari susunan butir tanah/batuan dan

rekahan atau patahan. Makin besar ukuran butir atau makin banyak rekahan/patahan di media akifer, permeabilitasnya makin tinggi sehingga kapasitas atenuasi media akifer makin rendah. Media akifer mempengaruhi pola aliran yang mengontrol arah pergerakan pencemar.

Data media akifer dapat diperoleh dari laporan geologi atau data tanah dari sumur bor.

d. Soil Media

Soil media (media tanah) merupakan bagian teratas dari lapisan tak jenuh dengan ciri khas memiliki aktivitas biologi yang tinggi. Pada metoda ini, media tanah didefinisikan memiliki kedalaman ≤ 6 feet (1,8 m) dari permukaan tanah dan masih dipengaruhi oleh perubahan cuaca. Laju infiltrasi yang merupakan sumber pengisian air tanah dan pergerakan vertikal kontaminan dipengaruhi oleh jenis tanah. Tanah dengan tekstur halus seperti *silt* atau *clay* memiliki permeabilitas rendah sehingga menghambat proses migrasi kontaminan. Ketebalan lapisan tanah juga mempengaruhi proses degradasi kontaminan. Secara umum, potensi pencemaran pada tanah dipengaruhi oleh keberadaan lapisan *clay*. Makin kecil potensi kembang/susut lapisan *clay* dan makin kecil ukuran butirnya, makin kecil pula potensi pencemarannya. Diagram pada gambar 2-19 yang dipublikasi oleh *Soil Conservation Service* merupakan metoda yang paling baik untuk menentukan jenis tanah.



Gambar 2-15 Grafik klasifikasi tekstur tanah

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 53

e. *Topography (Kemiringan lahan)*

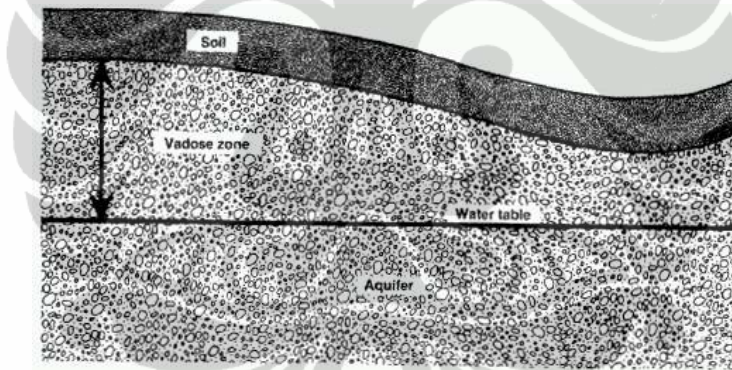
Data mengenai kemiringan lahan diperoleh dari data topografi. Kemiringan lahan merupakan faktor yang mengontrol arah aliran air permukaan yang merupakan sumber infiltrasi. Makin curam kemiringannya makin rendah laju infiltrasi sehingga potensi pencemaran air tanah makin kecil. Bentuk gradien, arah aliran dan muka air tanah, secara tak langsung mengikuti topografi permukaan, makin besar kemiringan lahan makin besar kecepatan alirannya.

e. *Impact of Vadose Zone*

Lapisan tak jenuh (*vadose zone*) adalah lapisan di atas muka air tanah yang tak jenuh air. Jenis tanah penyusun lapisan tak jenuh menentukan karakteristik atenuasi. Proses-proses degradasi kontaminan seperti biodegradasi,

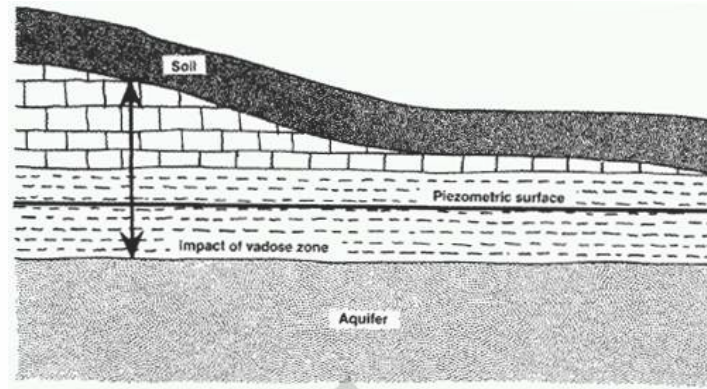
filtrasi, reaksi kimia terjadi pada lapisan ini. Semakin jauh dari permukaan tanah proses biodegradasi dan volatilisasi makin jarang terjadi. Media ini juga mengontrol panjang alur dan rute yang mempengaruhi waktu untuk proses atenuasi.

Pemilihan lapisan tak jenuh bergantung pada penilaian akifer yang ingin dilakukan, apakah akifer bebas atau tertekan. Pada penilaian akifer bebas, lapisan yang tak jenuh terletak antara muka air tanah dan permukaan tanah (gambar 2-20). Pada sistem akifer berlapis, pemilihan jenis lapisan tak jenuh bergantung pada ketebalan media yang paling berpotensi meloloskan pencemar. Pada penilaian akifer tertekan, yang termasuk lapisan tak jenuh adalah lapisan tanah yang berada di atas akifer (gambar 2-21) dan bisa saja merupakan lapisan jenuh. Hal ini dimungkinkan karena lapisan jenuh tersebut memiliki dampak terhadap potensi pencemaran.



Gambar 2-16 Penentuan lapisan tak jenuh pada akifer bebas

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 60



Gambar 2-17 Penentuan lapisan tak jenuh pada akifer tertekan

Sumber : Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987), hal. 60

Lapisan tak jenuh yang tak terkonsolidasi, memiliki porositas primer. Pada tabel 2-9 yang termasuk lapisan tak terkonsolidasi adalah range *sand&gravel, sand and gravel with significant silt and clay or silt/clay*. Sisanya merupakan lapisan terkonsolidasi yang memiliki porositas sekunder.

g. Hydraulic Conductivity

Hydraulic conductivity menggambarkan kemampuan material akifer untuk melalukan air. Perbedaan nilai *hydraulic conductivity* pada suatu akifer akan menimbulkan gradien hidraulik sehingga mengakibatkan terjadinya aliran air tanah. Aliran inilah yang menjadi media bagi pergerakan kontaminan. Nilai *hydraulic conductivity* diperoleh dari hasil *pumping test*. Informasi secara lengkap dapat diperoleh dari laporan hidrogeologi. Jika data ini tidak tersedia nilai *hydraulic conductivity* dapat diestimasi dari tabel 2-1.

Distribusi parameter DRASTIC jika tingkat kerentanannya dievaluasi berdasarkan waktu tempuh, fluks dan konsentrasi pencemar adalah

A. Waktu tempuh

- Depth to Water, Soil Media, Impact of the Vadose Zone Media, Net Recharge, Hydraulic Conductivity of the Aquifer

B. Fluks

- Aquifer Media, Hydraulic Conductivity

C. Konsentrasi pencemar

- Depth to Water, Net Recharge, Aquifer Media, Soil Media, Topography, Impact of the Vadose Zone Media, Hydraulic Conductivity of the Aquifer

2.5. KORELASI PARAMETER DRASTIC DENGAN PARAMETER SIMULASI MODEL ALIRAN JENUH

Dalam simulasi komputer, ketujuh parameter DRASTIC diwakili oleh parameter hidraulik akifer yang korelasinya sebagai berikut :

Tabel 2-11 Korelasi parameter DRASTIC dengan parameter akifer

Parameter DRASTIC	Parameter Simulasi Model
Depth of groundwater	Ketebalan akifer
Recharge rate	Laju pengisian air tanah
Aquifer media	Nilai <i>K</i> (<i>hydraulic conductivity</i>)
Soil media	Laju pengisian air tanah
Impact of vadose zone	Laju pengisian air tanah
Topography	Koordinat dan elevasi permukaan
Hydraulic conductivity	Nilai <i>K</i>

B A B III

DESAIN PENELITIAN

Seperti yang telah dikemukakan pada sub bab 1.2, studi ini bertujuan menguji tingkat implementasi Metoda DRASTIC terhadap keterbatasan data yang ada sehingga dapat diketahui tingkat keyakinan informasinya untuk pengambilan keputusan. Cara pengujian dilakukan membandingkan distribusi kerentanan pencemaran antara hasil DRASTIC dengan simulasi komputer. Data dari parameter yang sensitif harus akurat sehingga hasil DRASTIC benar. Sebaliknya parameter yang tidak sensitif, diizinkan memiliki toleransi ketidakakuratan yang lebih besar karena penyimpangan yang terjadi tidak akan/sangat kecil pengaruhnya terhadap hasil DRASTIC.

Untuk mencari parameter yang sensitif dilakukan analisa sensitivitas. Caranya dengan membuat grafik yang menyatakan hubungan perubahan hasil simulasi GMS dengan perubahan data masukan. Simulasi aliran air tanah diolah dengan bantuan subprogram GMS-Modflow.

Pemberian skor pada tiap parameter DRASTIC harus tepat sehingga memberikan hasil yang benar. Namun pada beberapa parameter, terutama *aquifer media* dan *impact of vadose zone*, rentang skornya cukup besar karena sangat bergantung kepada karakteristik butir penyusun tanah/batuan yang heterogen. Pemilihan skor yang tidak tepat akan mempengaruhi hasil keseluruhan. Dengan demikian hasil DRASTIC perlu dicek dengan hasil simulasi numerik agar pemilihan skornya tepat.

Setelah hasil DRASTIC benar, ingin diketahui sejauh mana perbedaan distribusi kelas kerentanan DRASTIC dengan hasil simulasi, apa penyebabnya, serta parameter hidraulik akifer yang sensitif terhadap penilaian kerentanan pencemaran. Data dari parameter yang sensitif harus akurat sehingga dapat memberikan hasil DRASTIC tepat.

Soil, topography, impact of vadose zone merupakan parameter DRASTIC yang mencerminkan kondisi di atas lapisan akifer yang ditinjau. Persamaan aliran yang mendasari GMS-MODFLOW adalah persamaan aliran jenuh (*saturated*)

sehingga tidak berlaku pada zona di atas lapisan akifer tersebut. Hal ini menjadi keterbatasan bagi studi ini. Untuk mengakomodir keterbatasan ini pengaruh dari ketiga parameter tersebut akan diperhitungkan sebagai kontribusi dari *recharge*.

Lokasi penelitian studi berada di wilayah Jabotabek, dengan luas area 1.465 km². Wilayah penelitian memiliki data yang lengkap baik untuk simulasi GMS maupun perhitungan DRASTIC sehingga bisa digunakan untuk pengujian implementasi. Uraian dibawah akan memberikan gambaran dan penjelasan mengenai kondisi wilayah studi.

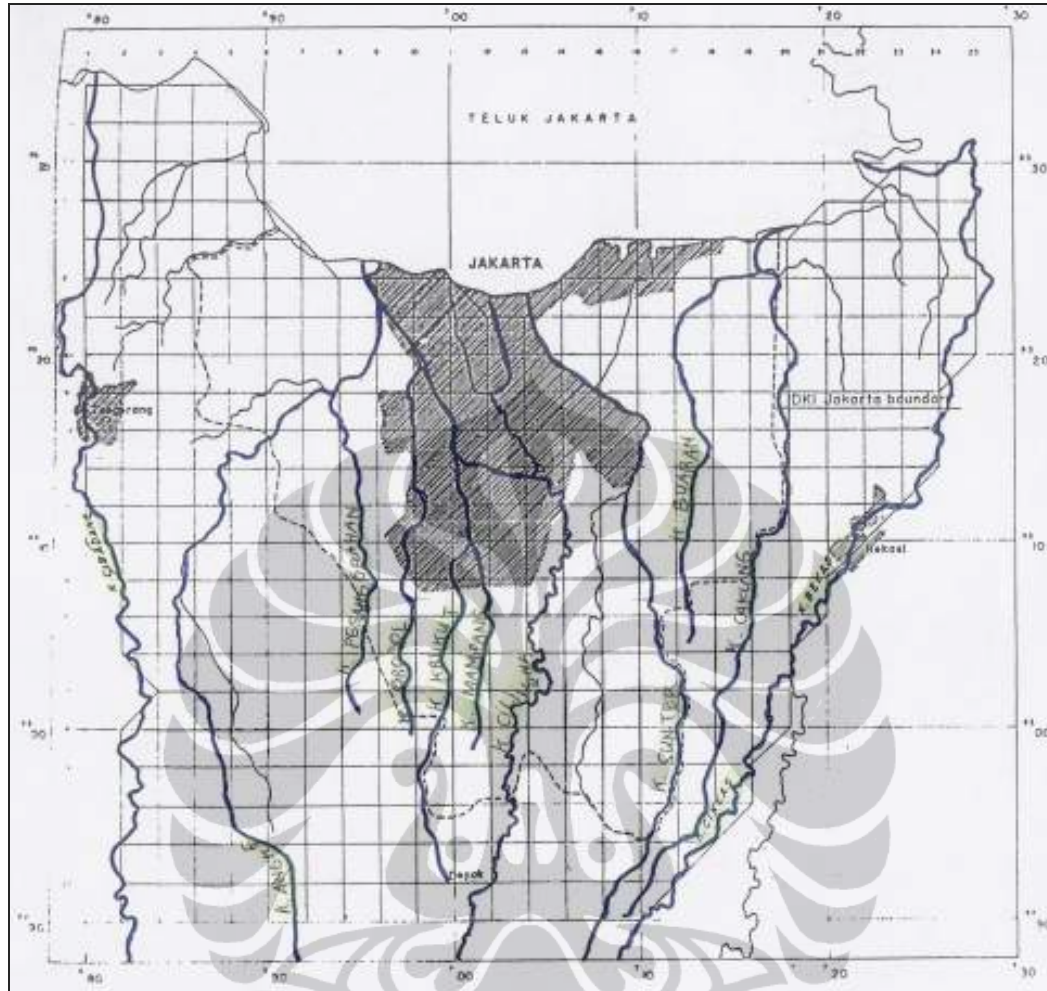
3.1. KONDISI GEOGRAFI DAN TOPOGRAFI

Wilayah studi terletak di bagian barat pulau Jawa dengan batas fisik :

- utara : Laut Jawa
- timur : Sungai Cisadane
- barat : Sungai Cikeas
- selatan : garis lintang 92.9 di Kota Depok

Bentuknya menyerupai segitiga terbalik dengan luas wilayah studi adalah 1.465 km² (gambar 3-1). Ketinggian lahan bervariasi mulai dari 0 m di daerah pantai hingga 87 m di daerah Depok. Seluruh wilayah studi memiliki kemiringan 0 – 0,5% dengan relief lahan bergelombang.

Selain Cisadane dan Cikeas, ada beberapa sungai yang mengalir di wilayah studi dan bermuara di Teluk Jakarta, antara lain S. Ciliwung, Kali Angke, Kali Krukut, Kali Sunter dan Kali Buaran. Sumber mata air sungai Cisadane, Cikeas dan Ciliwung berasal dari pegunungan di daerah selatan. Di daerah timur (Bekasi), terdapat Tarum Kanal Barat yang berfungsi menyalurkan air dari waduk Jatiluhur untuk kebutuhan air baku daerah perkotaan. Sistem kanal lain berada di bagian barat dan berfungsi mengendalikan banjir dengan cara mengalihkan aliran Sungai Cisadane langsung menuju Laut Jawa sehingga tidak melewati sistem sungai di Kota Jakarta. (Sumber : B. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt, *Final Report of Jakarta Groundwater Study 1983-1985*, Directorate of Environmental Geology Bandung, 1986)



Gambar 3-1 Peta wilayah studi

Sumber : G. Schmidt, Haryadi Tirtomihardjo, G. Koehler, *Groundwater Modelling of Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1985), hal. App. 116-1

3.2. KONDISI GEOMORFOLOGI

Secara geomorfologi wilayah studi terbagi menjadi 3 satuan yaitu :

1. Satuan Dataran Alluvial Pantai

Daerah ini terletak di bagian utara yang memanjang dari timur ke barat, relief permukaan umumnya halus dengan pola pengaliran sungai anastomasi.

2. Satuan Kipas Alluvial Berelief Halus

Daerah ini merupakan ujung dan bagian tengah dari kipas alluvial Bogor. Menempati area yang cukup luas, terbentuk dari produk gunung api dengan relief permukaan sedang hingga halus. Pola pengaliran sungai menunjukkan

pola meander. Satuan ini terbentang dari barat ke timur. Satuan ini terletak pada elevasi < 100 m dpl dan relatif datar, namun kemiringan lereng pada lembah-lembah sungai lebih terjal. Sungai-sungai yang mengalir berpola dendritik dengan lembah sungai berbentuk huruf U. Batuan penyusunnya terdiri dari endapan sedimen berupa tufa breksi, lempung lanauan dan batupasir tufaan.

3. Satuan Pedataran Kipas Alluvium

Daerah ini terdapat di bagian barat dan tengah wilayah studi. Elevasi berkisar antara 100 – 200 m dpl. Kemiringan lereng antara 0 – 5%, namun kemiringan lembah sungai bisa mencapai 45%. Satuan ini terutama dibentuk oleh lempung tufaan, pasir dan kerakal. Aliran sungainya berpola sejajar dengan lembah sungai curam.

(Sumber : PT. Luhung Media Sarana Kreasi, *Pemetaan Geologi Lingkungan dan Tata Guna Air Tanah Kawasan Jabodetabek-Punjur*, Direktorat Jendral Penataan Ruang Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002)

3.3. KONDISI GEOLOGI

Secara umum Jabotabek disusun oleh 4 kelompok jenis batuan yaitu batuan sedimen tersier, batuan terobosan, batuan vulkanik hasil dari letusan G.Salak dan G. Pangrango, serta endapan kipas alluvial dan endapan alluvial (gambar 3-2).

* Batuan Sedimen Tersier

Batuan-batuan ini terendapkan pada Miosen bawah, tengah, atas dan Pliosen bawah. Tersebar luas terutama di bagian barat dan timur. Secara stratigrafi, batuan-batuan ini memiliki hubungan selaras, kecuali batuan berumur Miosen karena terselingi oleh kegiatan tektonik.

* Batuan Terobosan

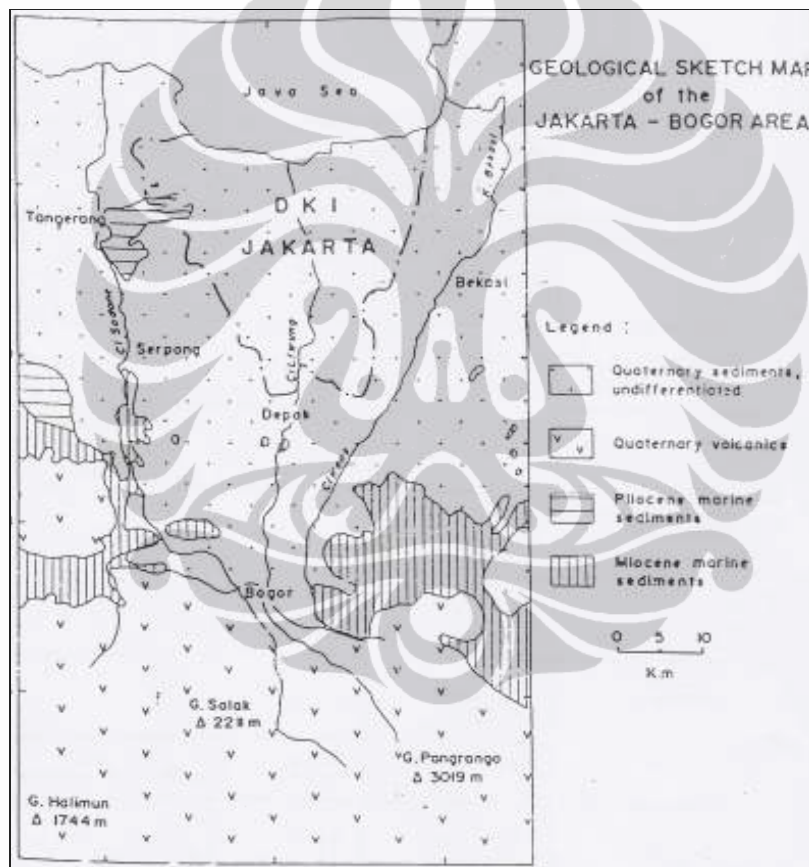
Batuan ini berupa andesit, berumur Miosen Tengah, menerobos batuan-batuan sedimen yang berumur lebih tua.

* Batuan Vulkanik

Batuan vulkanik ini berumur kuartar, merupakan hasil dari kegiatan pengendapan gunung api tua, Gunung Salak dan Gunung Pangrango. Secara tidak selaras batuan ini terendapkan di atas batuan sedimen tersier.

* Endapan Permukaan

Endapan permukaan ini berupa endapan kipas alluvial dan endapan alluvial. Kipas alluvial terbentuk dari mineral-mineral gunung api kuartar yang terendapkan kembali. Endapan alluvial merupakan endapan sungai resen dengan litologi terdiri dari lempung, lanau, pasir, kerikil, kerakal dan bongkah-bongkah. (Sumber : PT. Luhung Media Sarana Kreasi, *Pemetaan Geologi Lingkungan dan Tata Guna Air Tanah Kawasan Jabodetabek-Punjur*, Direktorat Jendral Penataan Ruang Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002)



Gambar 3-2 Peta geologi wilayah studi

Sumber : B. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt, *Final Report of Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1986), hal. 7

3.4. KONDISI HIDROGEOLOGI

German Hydrogeological Advisory Group in Indonesia (HAG) bersama dengan Dinas Tata Geologi Lingkungan-Bandung (DGTL) pada tahun 1983-1985 telah

melakukan kajian studi terhadap sistem akifer di Jakarta. Hasil dari kajian tersebut berupa parameter hidraulik sistem akifer akan digunakan dalam studi ini.

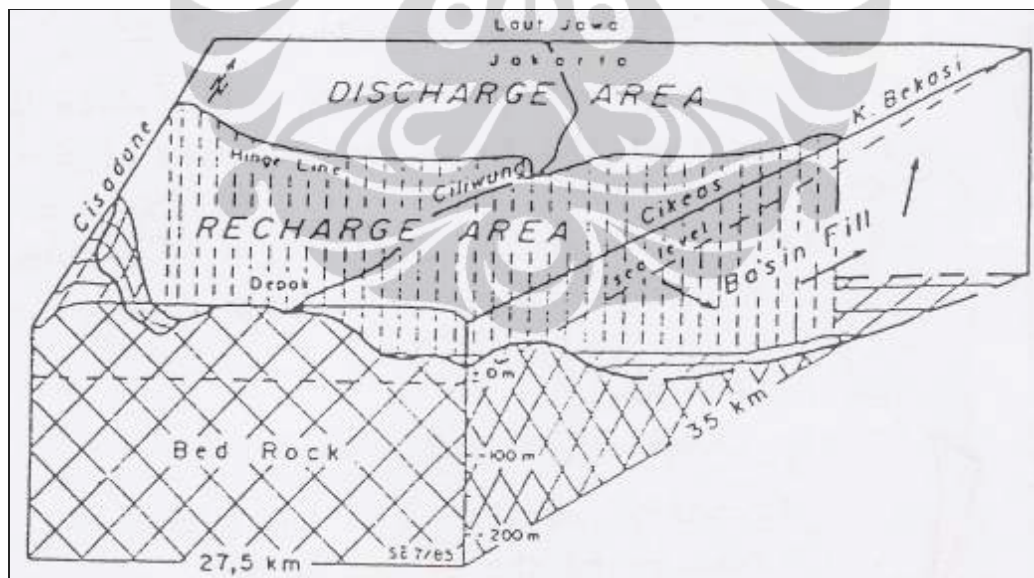
3.4.1. Kondisi Batas Sistem Akifer

Batas hidraulik dari sistem akifer ditetapkan berdasarkan hasil kajian terhadap kondisi geologi, topografi, geoelektrik dan pengeboran di wilayah studi yang dilakukan oleh *German Hydrogeological Advisory Group in Indonesia (HAG)* pada tahun 1983-1985.

Batas tersebut adalah :

- arah utara : Teluk Jakarta / Laut Jawa
- arah timur : Sungai Cikeas – Bekasi
- arah barat : Sungai Cisadane
- arah selatan : lapisan batuan di sepanjang garis lintang 92.9 di Kota Depok

Lebih jelasnya batas-batas ini dapat dilihat pada gambar 3-3.



Gambar 3-3 Diagram blok skematik sistem akifer beserta batas hidrauliknya

Sumber : B. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt, *Final Report of Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1986), hal. 17

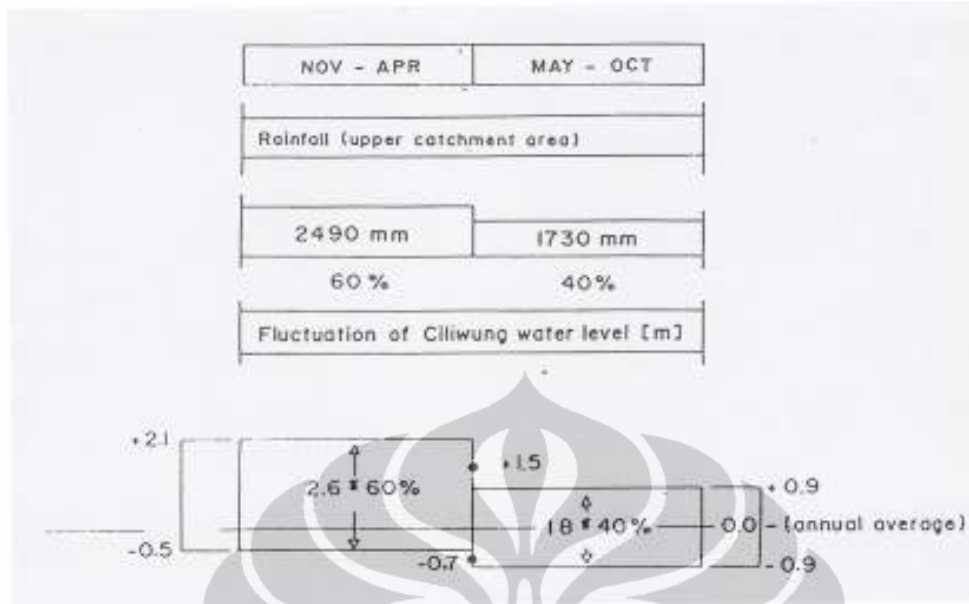
Sedangkan yang menjadi kondisi batas di bagian utara, timur, barat adalah nilai *head* konstan sesuai dengan elevasi muka air sungai/laut. Di bagian selatan terdapat lapisan batuan yang memotong perbukitan yang berperilaku seperti lapisan kedap air sehingga tidak ada aliran yang keluar/masuk melalui batas ini.

Data elevasi muka air sungai diperoleh dari stasiun pengukur, namun tidak semua sungai memiliki pencatatan data yang lengkap. Adapun data elevasi yang dapat diperoleh berasal dari sungai :

- Ciliwung (stasiun Ratujaya) dengan periode pencatatan 1982-1984 namun hanya data tahun 1983 yang lengkap sepanjang tahun
- Ciliwung, Angke, Krukut, Sunter (stasiun Jakarta) dengan periode pencatatan 1980-1984 selama musim penghujan saja

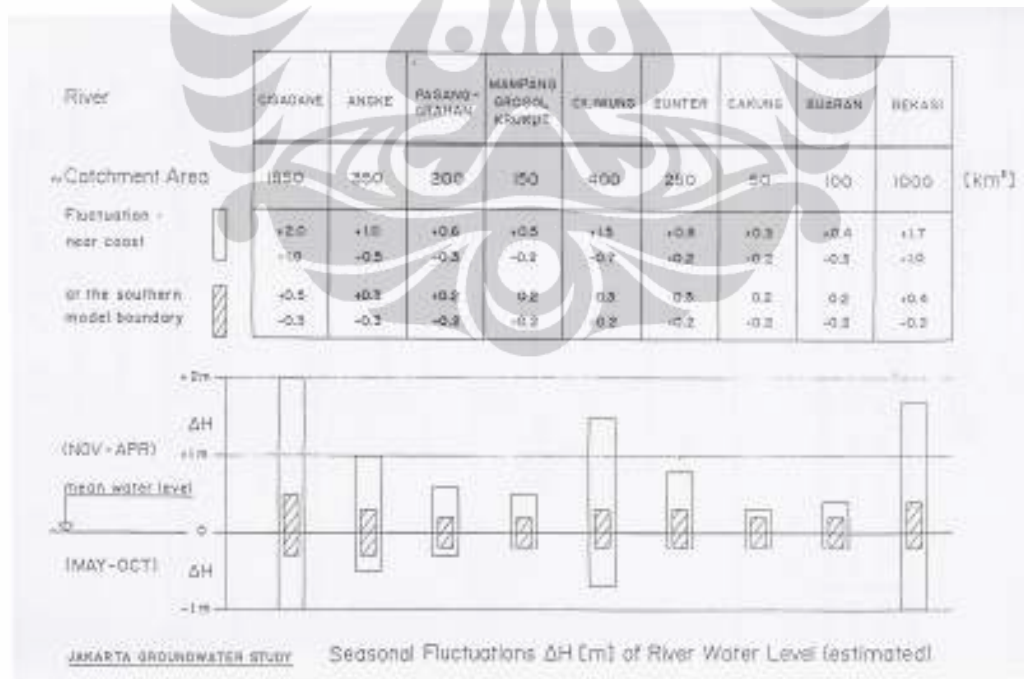
Karena tidak lengkapnya data pada masing-masing stasiun pengukur, maka elevasi muka air sungai ditentukan dengan cara estimasi. Estimasi fluktuasi muka air sungai diperoleh dengan membandingkan curah hujan di musim penghujan (November – April) dan musim kemarau (Mei – Oktober). Fluktuasi muka air sungai diasumsikan memiliki hubungan linier dengan curah hujannya. Sebagai contoh digunakan data yang diambil dari Sungai Ciliwung (gambar 3-4). Dari contoh tersebut diperoleh estimasi bahwa fluktuasi muka air sungai 2,2 m dengan ketinggian muka air maksimum ($H_{\max} = +1,5$ m dan $H_{\min} = -0,7$ m).

Dengan cara yang sama serta memperhatikan luas daerah tangkapannya (*catchment area*) didapatkan fluktuasi sungai lainnya. Estimasi fluktuasi dilakukan pada sungai-sungai di bagian selatan dan bagian utara, hasilnya dapat dilihat pada gambar 3-5 di halaman berikutnya. (Sumber : Haryadi Tirtomihardjo, *Studi Air Tanah Jakarta – Tinggi Muka Air Sungai di Daerah Cekungan Jakarta*, Direktorat Geologi dan Tata Lingkungan Bandung, 1985).



Gambar 3-4 Cara mengestimasi fluktuasi muka air di Sungai Ciliwung

Sumber : Haryadi Tirtomihardjo, *River Water Levels in the Jakarta Basin Area, Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1985), hal. 114-6



Gambar 3-5 Fluktuasi muka air sungai di wilayah studi

Sumber : Haryadi Tirtomihardjo, *River Water Levels in the Jakarta Basin Area, Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1985), hal. 114-7

Elevasi muka air sungai merupakan kondisi batas (*head* konstan) pada wilayah studi.. Tabel 3-1 dan 3-2 menunjukkan elevasi muka air sungai di titik paling hulu dan hilir. Elevasi di sepanjang sungai merupakan fungsi linier dari kemiringan dasar sungai.

Tabel 3-1 Nilai *head* pada kondisi batas di wilayah studi

Batas		Hulu			Hilir		
		H _{min} (m)	H _{max} (m)	H _{mean} (m)	H _{min} (m)	H _{max} (m)	H _{mean} (m)
Barat	Cisadane	+74,5	+75,3	+74,8	+1,1	+1,6	+1,3
Utara	Laut Jawa	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0
Timur	Bekasi-Cikeas	+64,9	+65,5	+65,1	+0,0	+0,0	+0,0
Selatan	lintang 92°9'	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0

Sumber : Hasil rangkuman dari laporan Haryadi Tirtomihardjo, *River Water Levels in the Jakarta Basin Area, Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1985)

Tabel 3-2 Nilai *head* pada sungai-sungai di wilayah studi

Sungai	Hulu			Hilir		
	H _{min} (m)	H _{max} (m)	H _{mean} (m)	H _{min} (m)	H _{max} (m)	H _{mean} (m)
Cisadane	+74,5	+75,3	+74,8	+1,1	+1,6	+1,3
Angke	+87,4	+88,0	+87,7	+0,7	+1,0	+0,9
Pesanggrahan	+46,2	+46,6	+46,4	+6,3	+7,2	+6,6
Grogol	+46,2	+46,6	+46,4	+3,2	+4,2	+3,7
Mampang, Krukut	+87,3	+87,7	+87,5	+1,2	+1,5	+1,3
Ciliwung	+74,9	+75,4	+75,1	+1,8	+2,3	+2,0
Sunter	+70,5	+71,0	+70,7	+2,0	+2,3	+2,2
Cakung	+24,2	+24,6	+24,4	+0,5	+1,3	+0,7
Buaran	+19,3	+19,7	+19,5	+1,1	+1,4	+1,2
Bekasi	+64,9	+65,5	+65,1	+0,0	+0,0	+0,0

Sumber : Hasil rangkuman dari laporan Haryadi Tirtomihardjo, *River Water Levels in the Jakarta Basin Area, Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1985)

Tabel 3-3 Kemiringan sungai-sungai di wilayah studi

Sungai	Kemiringan (‰)
Cakung	2,40
Buaran	1,60
Sunter	2,55
Ciliwung	2,55
Krukut	3,00
Grogol	2,60
Pesanggrahan	2,40
Angke	2,20

Sumber : Hasil rangkuman dari laporan Haryadi Tirtomihardjo, *River Water Levels in the Jakarta Basin Area, Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1985)

Menurut kedalamannya sistem akifer dibagi menjadi 6 zona yaitu kedalaman 0 – 40 m, 40 -100 m, 100 – 150 m, 150 – 200 m, 200 – 250 m dan > 250 m. Studi ini akan mengkaji sistem akifer pada zona II dengan kedalaman 40 – 100 m, karena sistem akifer ini paling banyak dieksplorasi dan cukup dekat dengan permukaan tanah sehingga memiliki tingkat kerentanan terhadap pencemar yang lebih tinggi dibanding zona akifer yang lebih dalam. Sistem akifer pada zona I (kedalaman 0 - 40m) memang lebih dekat ke permukaan tanah, namun merupakan sistem akifer bebas yang sangat dipengaruhi oleh lapisan tak jenuh di atasnya. Program GMS-Modflow, yang akan digunakan sebagai acuan pengujian, tidak dapat mensimulasikan aliran air tanah pada kondisi tak jenuh. Dengan demikian studi ini difokuskan untuk mengkaji zona akifer jenuh yang paling dekat dengan permukaan tanah, yaitu zona II.

3.4.2. Transmittivitas Akifer (T)

Berdasarkan hasil evaluasi terhadap beberapa sumur pengamatan, nilai S_s di wilayah studi rendah yaitu antara 0,1 – 5 m²/jam, hanya di beberapa lokasi yang mencapai nilai 10 m²/jam dan 30 m²/jam. Hasil perbandingan nilai S_s dengan nilai T yang diperoleh dari hasil *pumping test* adalah 1:1. Nilai T rata-rata pada tiap zona sistem akifer adalah :

- $5 \text{ m}^2/\text{jam}$ = pada akifer 0 – 40 m
- $3,1 \text{ m}^2/\text{jam}$ = pada akifer 40 – 100 m
- $1,8 \text{ m}^2/\text{jam}$ = pada akifer 100 – 150 m
- $1,9 \text{ m}^2/\text{jam}$ = pada akifer 150 – 200 m
- $5,9 \text{ m}^2/\text{jam}$ = pada akifer 200 – 250 m

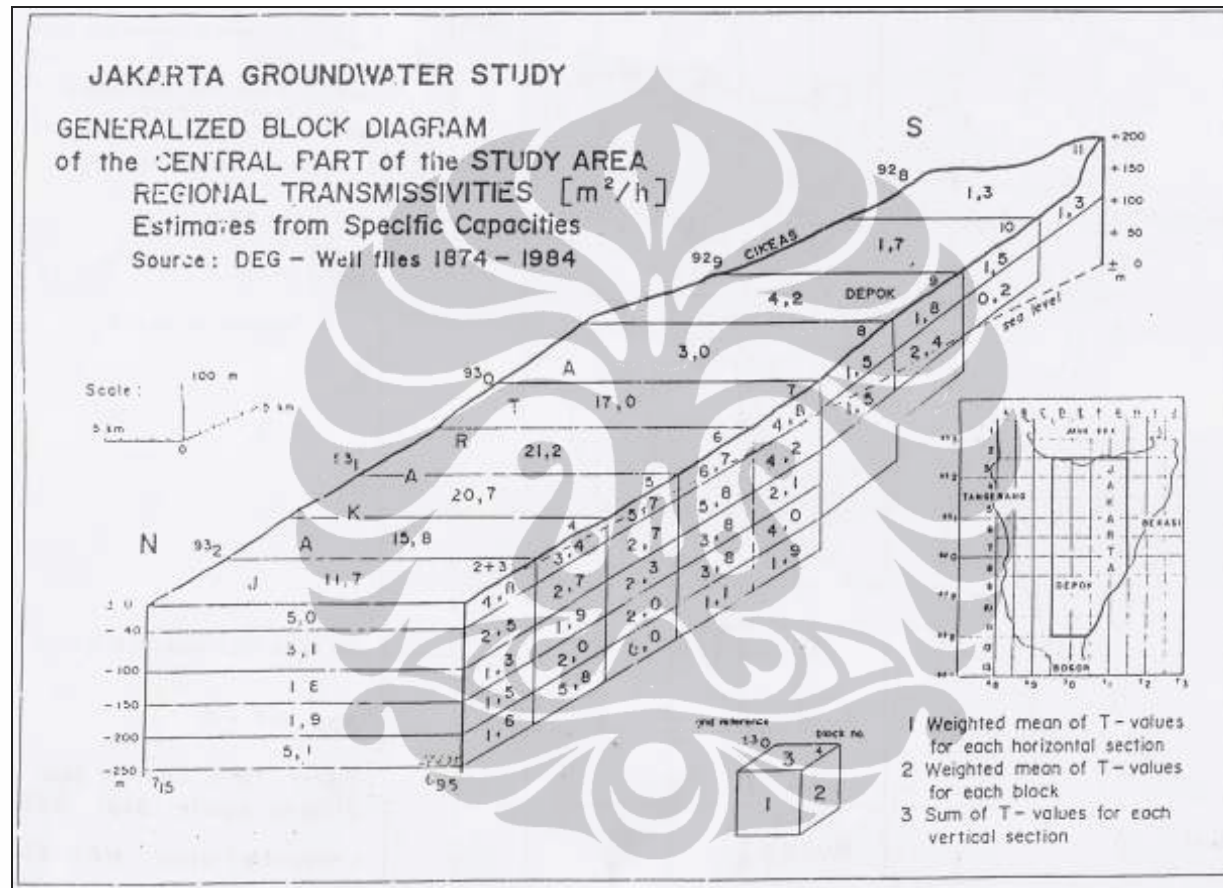
Gambar 3-6 menunjukkan nilai rata-rata T pada wilayah studi.

(Sumber : B. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt, *Final Report of Jakarta Groundwater Study 1983-1985*, Directorate of Environmental Geology Bandung, 1986)

3.4.3. Horizontal Conductivity (K_h)

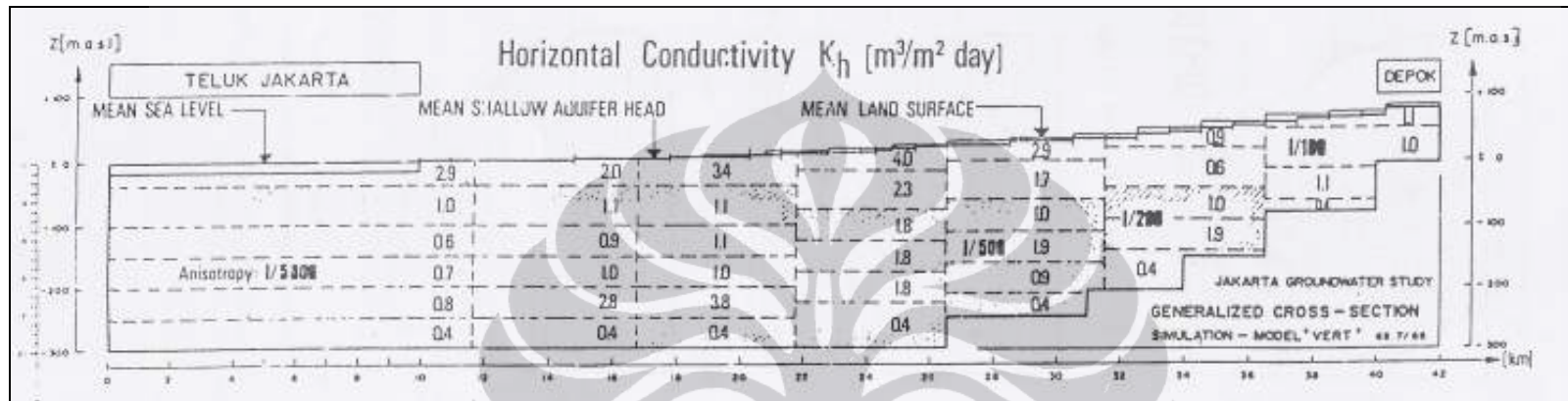
Dari hasil *pumping test* K_h pada wilayah studi berkisar antara $5 \times 10^{-7} - 8 \times 10^{-4}$ (0,04 – 52 m/hari). Untuk memperoleh nilai regional di wilayah studi digunakan data transmitivitas, dimana $K = T/D$ (T adalah transmitivitas dan D adalah ketebalan akifer yang ditinjau). Tabel L1-1 pada lampiran 1 menjabarkan perhitungan nilai K yang diturunkan dari data transmitivitas. Nilai rata-rata K_h adalah $1,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (1,3 m/hari) dengan variasi nilai $0,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (0,4 m/hari) di daerah selatan dan $2,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (2,1 m/hari) di daerah tengah (gambar 3-7a & 3-7b). Nilai ini telah dikonfirmasi data sumur pengamatan di Cengkareng, Pedongkelan dan Sunter melalui penelitian sampel, analisa ukuran butir, dan hasil *pumping test* dengan rata-rata $2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ dan $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Nilai ini memberikan gambaran regional namun tidak menunjukkan nilai permeabilitas tiap zona sistem akifer. Nilai K_v pada sistem akifer sangat kecil, sehingga diabaikan dalam studi ini. Dengan demikian sistem akifer yang ditinjau bersifat heterogen-isotropik. (Sumber : B. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt, *Final Report of Jakarta Groundwater Study 1983-1985*, Directorate of Environmental Geology Bandung, 1986)

Saat melakukan simulasi, sistem akifer diwakili oleh satu nilai K yang merupakan rata-rata dari seluruh nilai K pada zona akifer 0-100 m. Hal ini dilakukan untuk mengakomodir keterbatasan Modflow dalam mensimulasikan aliran air tanah pada zona tak jenuh. Hasil perhitungan K rata-rata dapat dilihat pada lampiran 1 tabel L1-2.

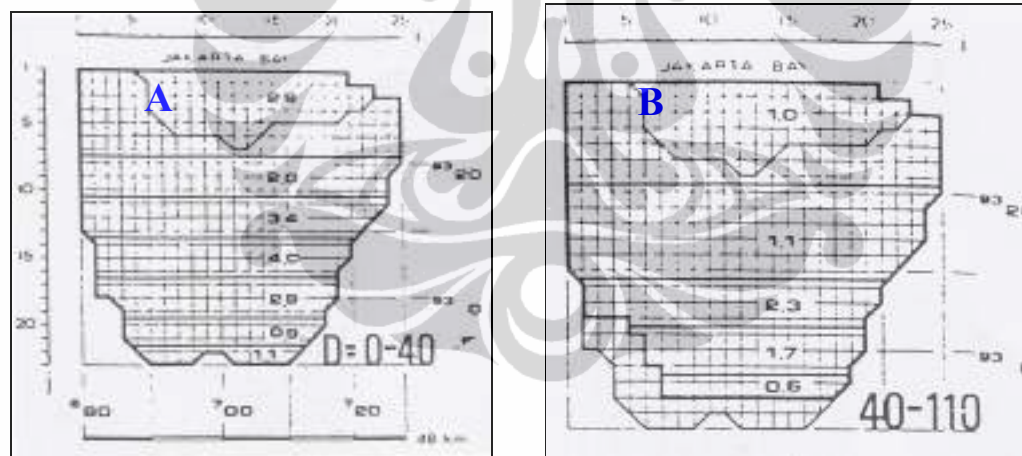


Gambar 3-6 Diagram blok transmittivitas akuifer

Sumber : B. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt, *Final Report of Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1986), hal. App. 117-5



Gambar 3-7a K_h pada penampang melintang sistem akifer



Gambar 3-7b K_h pada sistem akifer di kedalaman : (A) 0-40m ; (B) 40-110m

Sumber : B. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt, *Final Report of Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1986), hal.App 117-16,117-17

3.5. SIMULASI MODEL ALIRAN AIR TANAH DENGAN PROGRAM GMS-MODFLOW

3.5.1. Membuat Model Konseptual

Program GMS menyediakan 2 macam pendekatan untuk membuat model MODFLOW yaitu Modul *3D Grid* dan Modul Peta. Modul *3D Grid* berbasis sel, mudah digunakan untuk membuat model dengan geometri dan kondisi batas yang sederhana. Modul peta, yang menghasilkan model konseptual, merupakan metoda terbaik untuk merancang simulasi MODFLOW karena dapat lebih detail memodelkan kondisi lapangan yang kompleks. Setelah model konseptual selesai dibuat, data akan dikonversi menjadi grid/sel secara otomatis oleh program.

Pada studi ini pembuatan model diawali dengan digitasi peta wilayah penelitian (gambar 3-1) yang selanjutnya diterjemahkan menjadi beberapa *layer* (lapisan) dengan tujuan memudahkan input parameter hidraulik. *Layer* yang dibuat adalah

- *layer boundary* berisi parameter nilai *head* konstan rata-rata (H_{mean}) pada batas-batas wilayah studi sebagaimana yang tercantum pada tabel 3-1
- *layer river* berisi parameter nilai *head* konstan rata-rata (H_{mean}) pada sungai-sungai di dalam wilayah studi sebagaimana yang tercantum pada tabel 3-2
- *layer akifer* berisi parameter K_h yang bernilai 1,57 m/hari dan (lihat lampiran 1 tabel L1-2)

Langkah-langkah diatas akan menyelesaikan pembuatan model 2 dimensi, selanjutnya *layer-layer* tersebut diberi elevasi untuk menjadi model 3 dimensi. Input data elevasi dilakukan dengan memasukkan satu set data titik yang memiliki koordinat *xyz*. Setelah dibuat grid, GMS-Modflow akan menginterpolasi titik-titik tersebut sehingga menjadi model seperti pada gambar 3-8. Data koordinat titik *xyz* untuk membuat sistem akifer dapat dilihat pada lampiran 2 (tabel L2-1 dan L2-2).

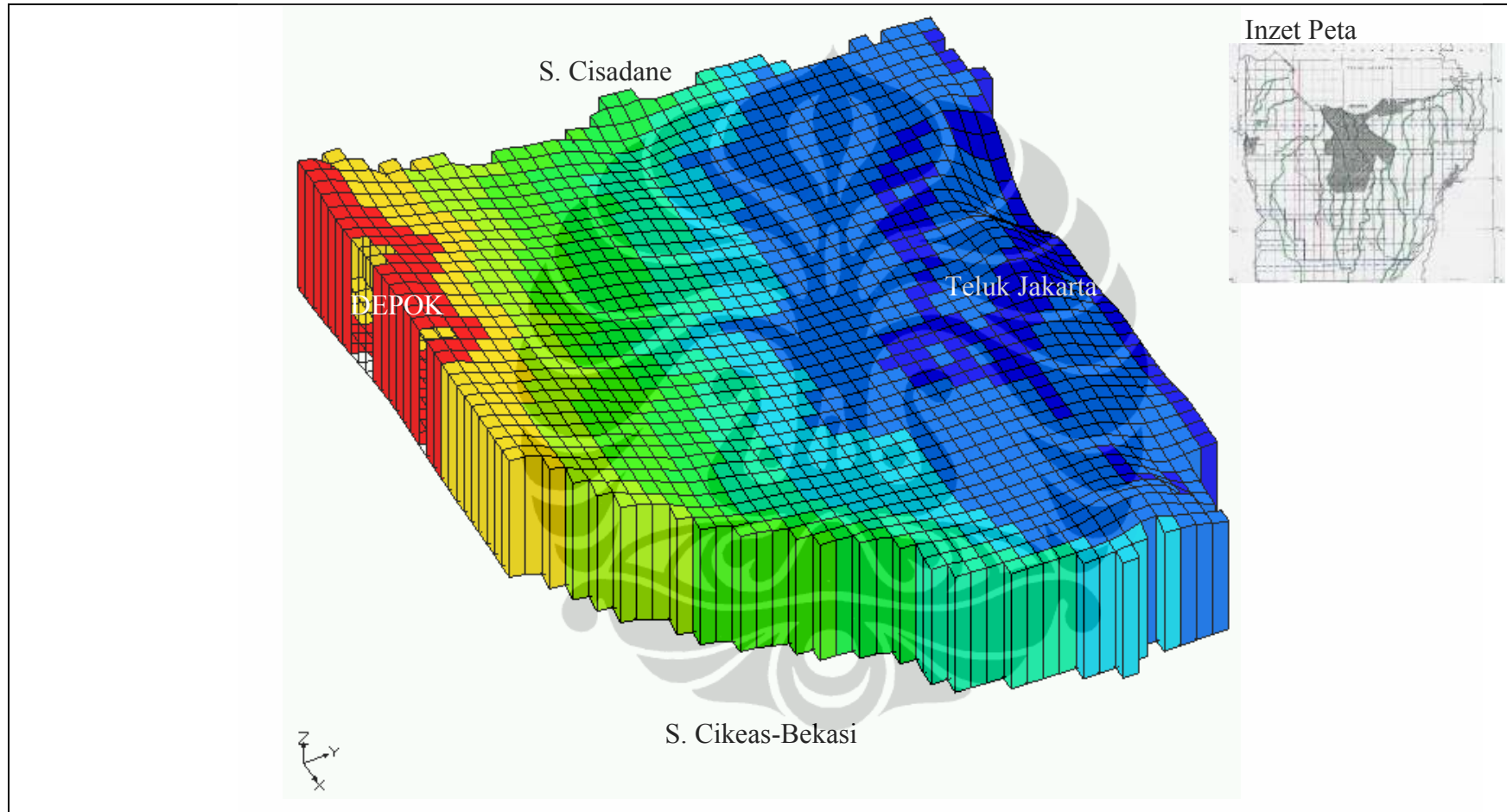
Nilai *head* konstan pada sistem sungai di *layer boundary* dan *river* di-input dengan memasukkan elevasi muka air sungai rata-rata (H_{mean}) di titik hulu dan titik perpotongan antar sungai saja (lihat gambar L3-1 di lampiran 3). Selanjutnya nilai *head* konstan di sepanjang sungai akan diinterpolasi dengan

data koordinat elevasi muka air sungai rata-rata (H_{mean}) yang tertera pada tabel L3-1 lampiran 3 oleh GMS-Modflow. Nilai *head* untuk kondisi awal diasumsikan sama dengan muka air tanah bebas yang diperoleh dari interpolasi titik-titik *constant head* di sepanjang sungai.

3.5.2. Pengecekan Model & *Running Model*

Pengecekan model diperlukan untuk menganalisa data masukan yang telah diberikan sehingga kesalahan/potensi kesalahan data masukan yang terjadi dapat diidentifikasi sebelum proses simulasi dijalankan. Setelah data model benar maka simulasi dapat dijalankan dengan memilih perintah *Run Modflow*.





Gambar 3-8 Model 3 dimensi sistem akifer di wilayah studi

3.6. SIMULASI PELACAKAN JEJAK PENYEBARAN PARTIKEL PENCEMAR DENGAN PROGRAM GMS-MODPATH

Pelacakan jejak partikel dengan MODPATH merupakan pengembangan dari simulasi aliran MODFLOW. Garis aliran yang terjadi merupakan sarana bagi partikel pencemar untuk bermigrasi (dengan asumsi hanya proses adveksi yang terjadi). Langkah selanjutnya adalah menentukan lokasi awal dan karakteristik dari partikel pencemar. Karakteristik pencemar meliputi :

1. jumlah partikel dalam tiap grid/sel; dipilih satu karena jumlah minimum.
2. distribusi partikel dalam tiap grid/sel ada 3 jenis yaitu dalam grid/sel, di permukaan grid/sel, dan di muka air tanah

3.7. ANALISA SENSITIVITAS

Untuk mengetahui tingkat sensitivitas data keluaran, model diuji dengan perubahan parameter data masukan pada rentang tertentu. Parameter yang akan diuji tingkat sensitivitasnya adalah parameter K dan *constant head*.

Merujuk pada tabel 2-1 di halaman II-7, tiap-tiap jenis tanah memiliki rentang nilai K yang cukup besar. Dengan memasukkan variasi nilai K satu ordo lebih tinggi dan lebih rendah dari K_{awal} data keluaran akan berubah sesuai dengan tingkat sensitivitasnya. Perubahan data masukan berupa nilai *constant head* pada sungai-sungai dan batas wilayah studi akan diberikan pada rentang $\pm 1m$ dari elevasi muka air sungai rata-rata.

3.8. PEMETAAN KERENTANAN PENCEMARAN AIR TANAH DENGAN DRASTIC

Evaluasi pemetaan kerentanan pencemaran air tanah dengan Metoda DRASTIC memerlukan data dari 7 parameter hidrogeologi. Parameter tersebut dapat diperoleh dari instansi pemerintah terkait seperti Dinas Geologi Tata Lingkungan, Dinas Pertambangan, maupun kajian-kajian studi mengenai air tanah regional.

3.8.1. Pengolahan Peta Dasar menjadi Peta Tematik DRASTIC

Peta tematik DRASTIC untuk parameter D, R, A, S, I dibuat berdasarkan informasi dari peta geologi, data litologi, dan peta tematik K .

Peta akuifer dan *vadose zone* diturunkan dari peta tematik *K* yang menggambarkan permeabilitas jenis tanah tertentu. Tabel 2-1 di bab 2 menunjukkan hubungan nilai *K* dengan jenis tanahnya. Dengan demikian jika nilai *K* pada wilayah studi diketahui, jenis tanahnya dapat ditentukan.

Pada peta ini, garis batas pengelompokan akan berupa garis lurus, karena informasi nilai *K* yang diperoleh merupakan nilai rata-rata pada tiap blok sebagaimana tersaji pada gambar 3-7b.

Pengelompokan jenis tanah penutup/permukaan pada peta tematik *soil media* dibuat atas dasar peta geologi permukaan. Untuk menguji kebenaran pengelompokan, peta tematik tersebut dicek lagi dengan data litologi dari sumur bor. Data litologi dari sumur bor dapat dilihat pada lampiran 4. (Sumber data litologi : Abdurrahman Assegaf, *Hidrodinamika Air Tanah Alamiah Cekungan Jakarta*, Tesis Magister, 1998).

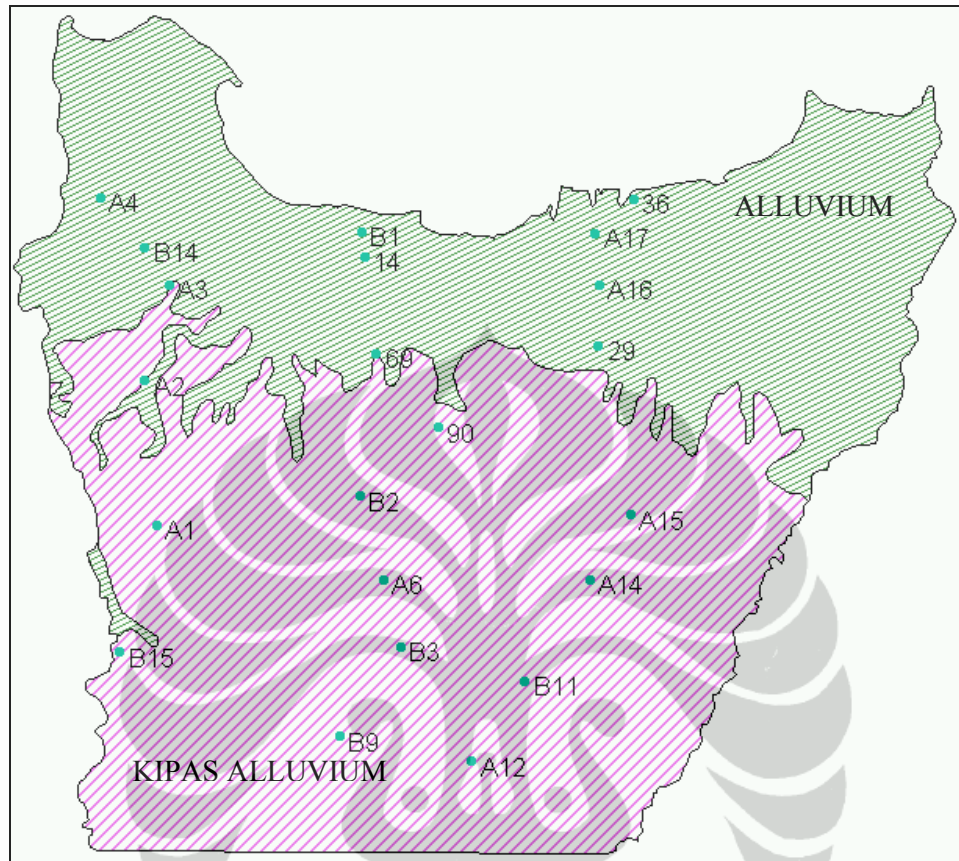
Gambar 3-10 sampai dengan 3-12 menunjukkan peta dasar geologi beserta data jenis tanah yang berasal dari data litologi.

3.8.2. Pengolahan Peta Tematik menjadi Peta Kerentanan DRASTIC

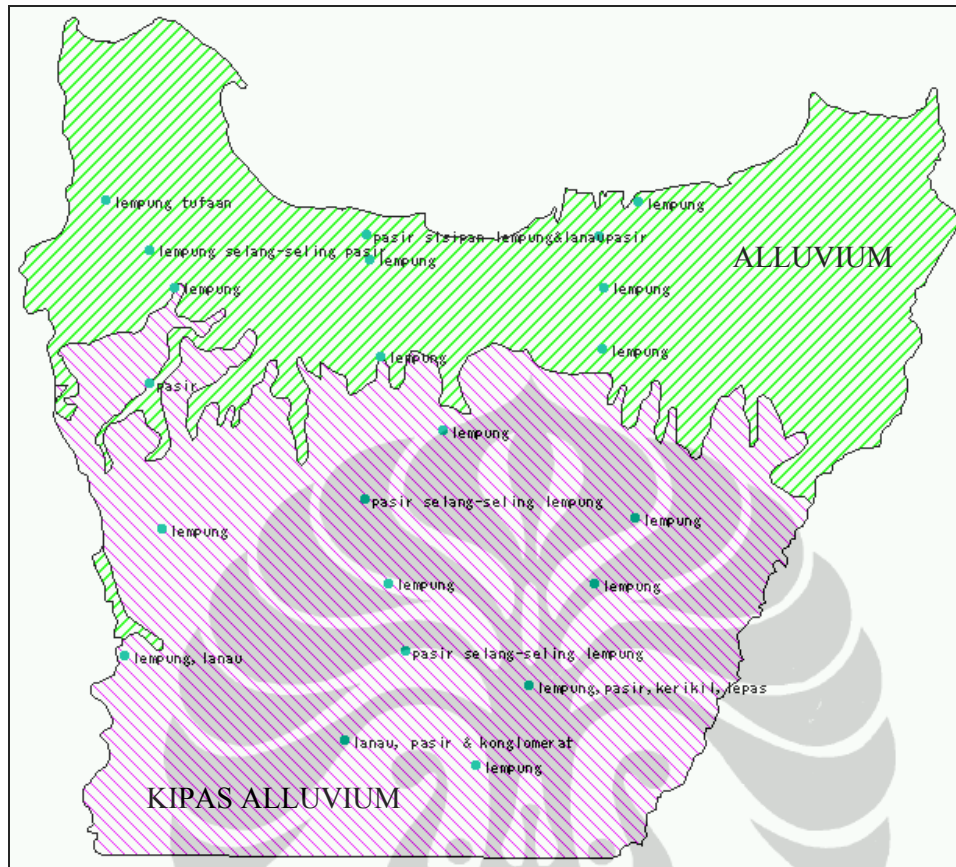
Pengolahan data DRASTIC akan dilakukan dengan bantuan program GIS (Geographic Information System). GIS adalah suatu program komputer yang didesain untuk menampilkan dan mengkombinasikan *layer* data spasial ke dalam format baru sehingga lebih mudah diinterpretasikan. Dengan GIS, 7 *layer* data spasial yang merupakan ketujuh data parameter DRASTIC dikombinasikan untuk menghasilkan sebuah peta kerentanan pencemaran air tanah.

Langkah-langkah pembuatan peta tersebut adalah sebagai berikut :

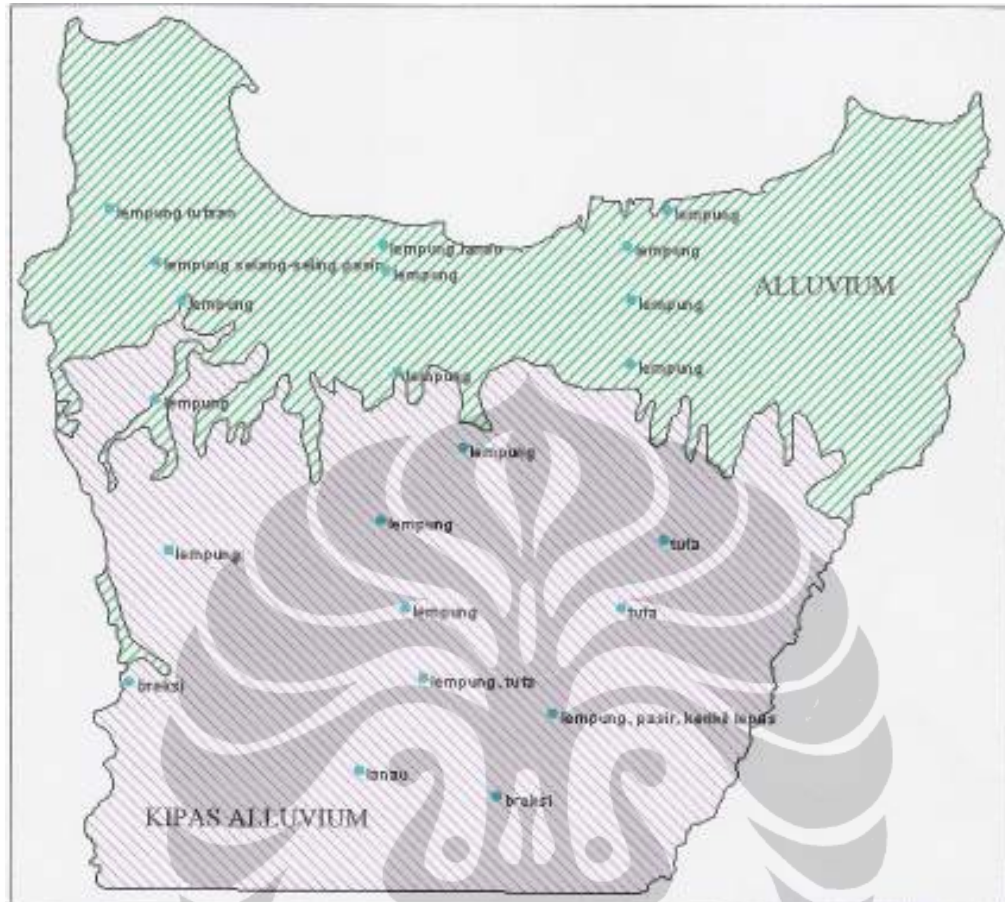
1. penyesuaian data masukan yang diperoleh sehingga pengelompokannya sesuai dengan *range* tiap-tiap parameter DRASTIC sebagaimana tertera pada tabel 2-4 sampai 2-10
2. penetapan nilai ranking dari tiap-tiap parameter sesuai dengan *range*-nya
3. memasukkan nilai bobot dari tiap-tiap parameter melakukan *overlay* ketujuh peta parameter DRASTIC dan menghitung DRASTIC index



Gambar 3-9 Lokasi titik sumur bor di wilayah studi
Sumber : Hasil olahan dari peta geologi dan plotting data litologi

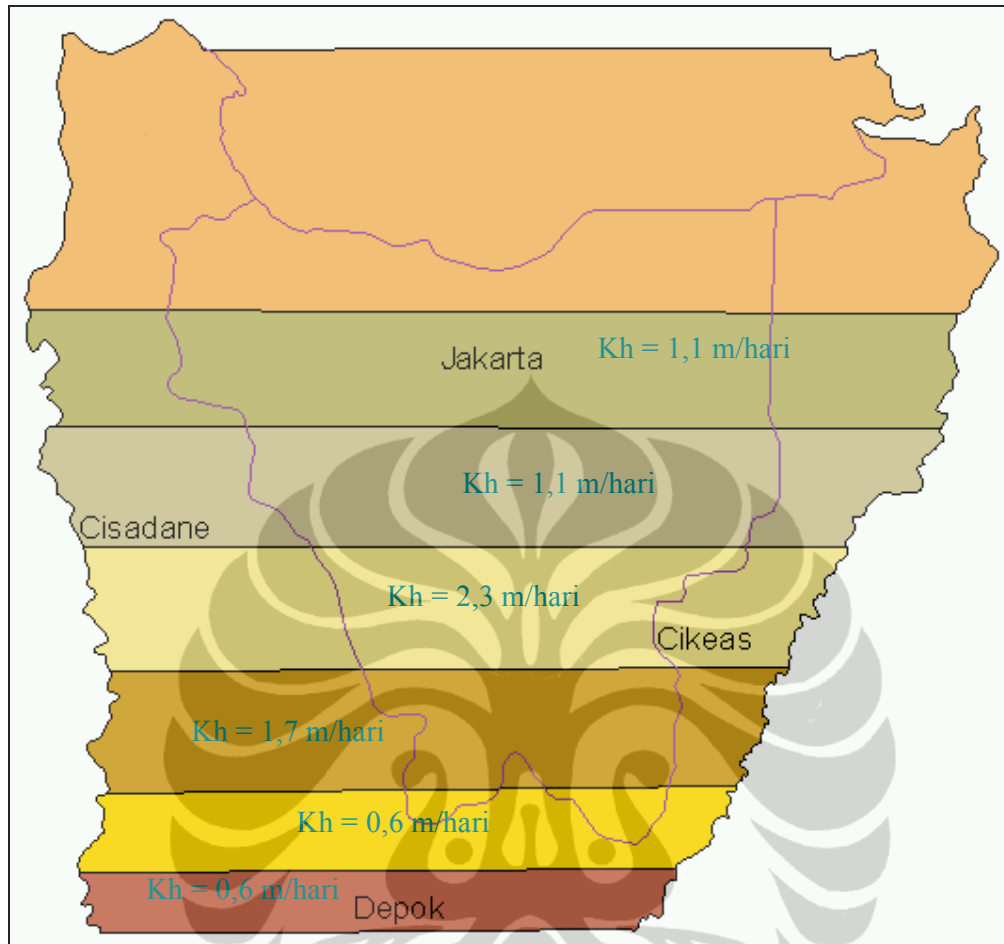


Gambar 3-10 Peta geologi & data litologi jenis tanah permukaan / penutup
Sumber : Hasil olahan dari peta geologi dan plotting data litologi



Gambar 3-11 Peta geologi & data litologi jenis tanah *vadose zone*

Sumber : Hasil olahan dari peta geologi dan plotting data litologi



Gambar 3-12 Peta tematik K & data litologi jenis tanah akuifer pada zona 40-100m

Sumber : Hasil olahan dari laporan B. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt, *Final Report of Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1986), hal. App. 117-17

Tabel 3-4 Hubungan nilai K dengan jenis tanah akuifer

K (m/hari)	K (m/s)	Jenis Tanah Akuifer
1,1	$1,27 \times 10^{-5}$	clean sand
2,3	$2,66 \times 10^{-5}$	clean sand
1,7	$1,97 \times 10^{-5}$	clean sand
0,6	$6,94 \times 10^{-6}$	silty sand

B A B IV

ANALISA

4.1. METODA DRASTIC

Dibawah ini merupakan uraian dari ketujuh parameter DRASTIC di wilayah studi. Peta tematik dari beberapa parameter DRASTIC disajikan pada gambar 4-1 sampai 4-3 dan hasil peta DRASTIC pada gambar 4-4.

Depth to Groundwater

Akifer yang dikaji pada studi ini terletak pada zona II dengan kedalaman 40 – 100 m. Jarak akifer ini cukup jauh dengan permukaan tanah sehingga memperpanjang waktu tempuh pencemar untuk mencapai akifer. Menurut DRASTIC (tabel 2-4) kondisi ini diberi peringkat nilai 1 karena potensi pencemarannya kecil.

Aquifer Media

Jenis media akifer pada sebagian besar wilayah studi didominasi oleh pasir, namun sedikit di bagian selatan tanah pasir bercampur lanau. Media pasir lebih permeabel dibanding pasir sisipan lempung, sehingga kemampuannya meloloskan air dan pencemar lebih besar. Dengan demikian untuk penilaian DRASTIC media pasir diberi peringkat 8 dan pasir lanau 6.

Soil Media

Jenis tanah permukaan di wilayah studi dikelompokkan menjadi 2 bagian, di wilayah utara *clay loam* dengan peringkat DRASTIC 3 dan wilayah selatan *sandy loam* dengan peringkat 4 (gambar 4-1). Tanah *clay loam* memiliki permeabilitas yang lebih kecil dibanding *sandy loam* sehingga memberikan proteksi pencemaran yang lebih baik.

Impact of Vadose Zone

Istilah *vadose zone* pada DRASTIC untuk tinjauan akifer tertekan tidak sepenuhnya berarti zona tak jenuh air. Awalnya metoda DRASTIC dikembangkan untuk mengkaji akifer bebas saja sehingga yang dimaksud dengan *vadose zone* memang benar-benar lapisan tak jenuh air di atas akifer bebas.

Namun setelah metoda ini dikembangkan untuk akifer tertekan, istilah tersebut tidak diubah, hanya pemahamannya bergeser menjadi lapisan kedap air yang berada di atas akifer tertekan yang menjadi filter bagi pencemar. Jenis tanah *vadose zone* pada wilayah studi didominasi oleh lempung sisipan pasir. Jenis tanah lempung menjadi filter pencemar yang baik, dengan demikian untuk penilaian DRASTIC masing-masing diberi nilai 3.

Recharge Rate

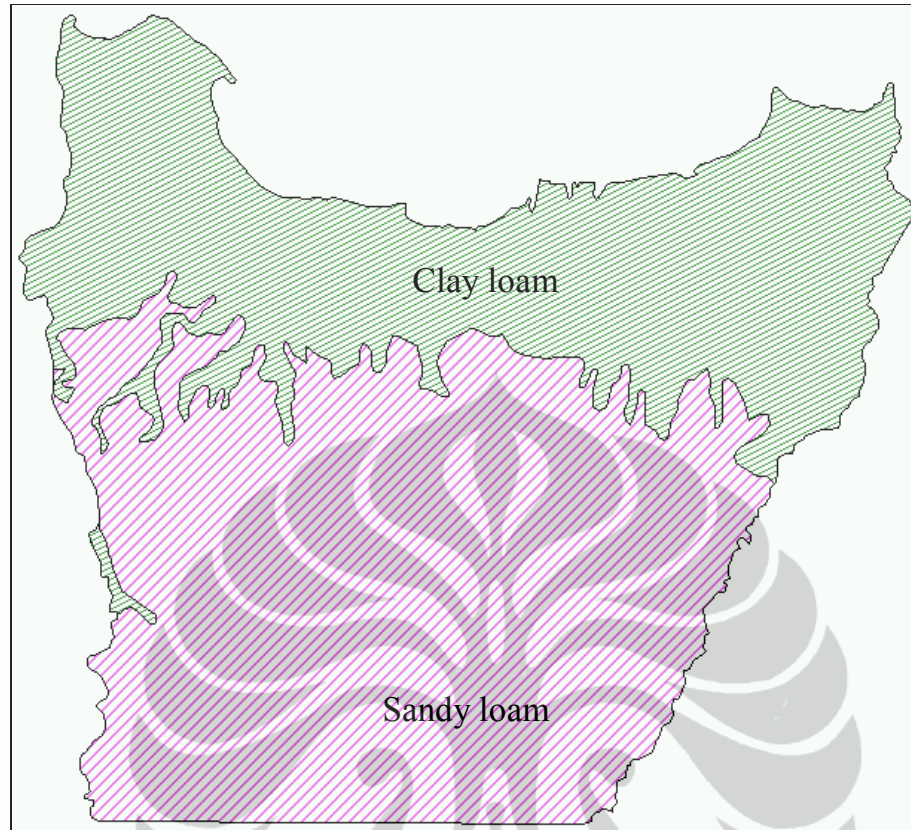
Akifer yang ditinjau adalah jenis akifer tertekan yang terletak dibawah akifer bebas dan lapisan kedap air. Infiltrasi akifer ini berasal dari aliran vertikal dari lapisan di atasnya. Di samping itu pengisian secara horisontal juga terjadi dari *recharge area* di wilayah utara ke *discharge area* di wilayah selatan. Laju infiltrasi pada akifer tertekan jauh lebih kecil dibanding infiltrasi pada akifer bebas. Dengan demikian pada penilaian DRASTIC diberi nilai 1. Kegiatan pemompaan /bangunan resapan mempengaruhi percepatan gerak pencemar menuju akifer. Pemompaan akan menghambat kecepatan sebaliknya peresapan akan mempercepat pergerakan pencemar menuju akifer. Kedua faktor tersebut tidak diperhitungkan pada studi ini, karena informasi mengenai laju pemompaan dan peresapan tidak diperoleh.

Topography

Data kemiringan lahan (*topography*) diperoleh dari peta tematik kemiringan lahan. Kemiringan lahan di wilayah studi landai hanya berkisar 0 – 0,5% (gambar 4-2). Menurut DRASTIC permukaan lahan yang landai memperlambat kecepatan aliran permukaan dan mempertinggi laju infiltrasi sehingga meningkatkan potensi masuknya sumber pencemar dari permukaan. Mengacu pada tabel 2-8 pada bab 2, DRASTIC memberikan peringkat 10 untuk kondisi ini.

Hydraulic Conductivity (K)

Data *K* diperoleh dari peta tematik *K*. Nilai *K* diturunkan dari data transmitivitas rata-rata yang diperoleh dari pengujian *pumping test* di lapangan. Nilai parameter *K* pada wilayah studi berkisar antara 0,6 – 2,3 m/hari (gambar 4-3). Menurut DRASTIC range *K* ini diberi peringkat 1 karena berpotensi rendah dalam melalukan air berikut pencemar.



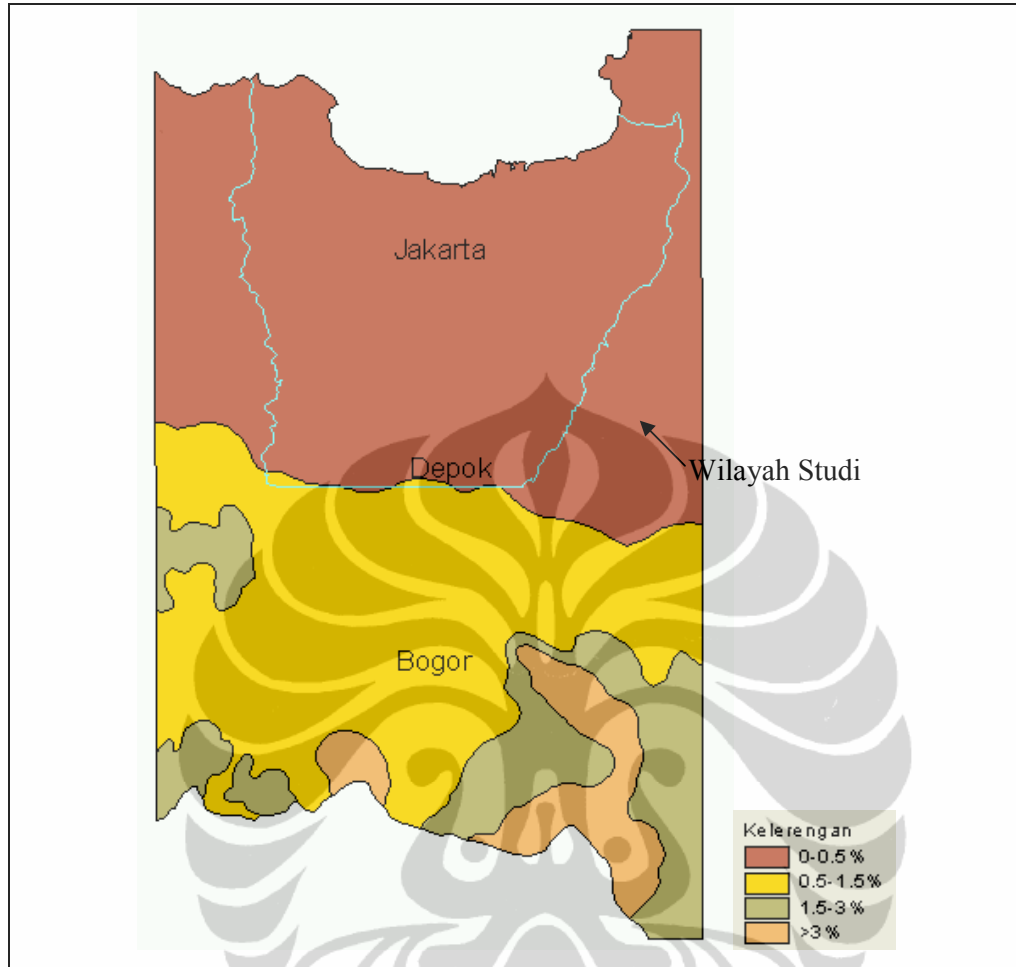
Gambar 4-1 Peta jenis tanah permukaan/penutup di wilayah studi

Sumber : Hasil olahan dari peta geologi dan plotting data litologi

Parameter DRASTIC Soil Media	
Range	Peringkat
thin/absent	10
gravel	10
sand	9
shrinking and/or aggregated clay	7
sandy loam	6
loam	5
silty loam	4
clay loam	3
nonshrinking&nonaggregated	1

Jenis tanah di wilayah utara *clay loam*, peringkat DRASTIC = 3

Jenis tanah di wilayah utara *sandy loam*, peringkat DRASTIC = 4

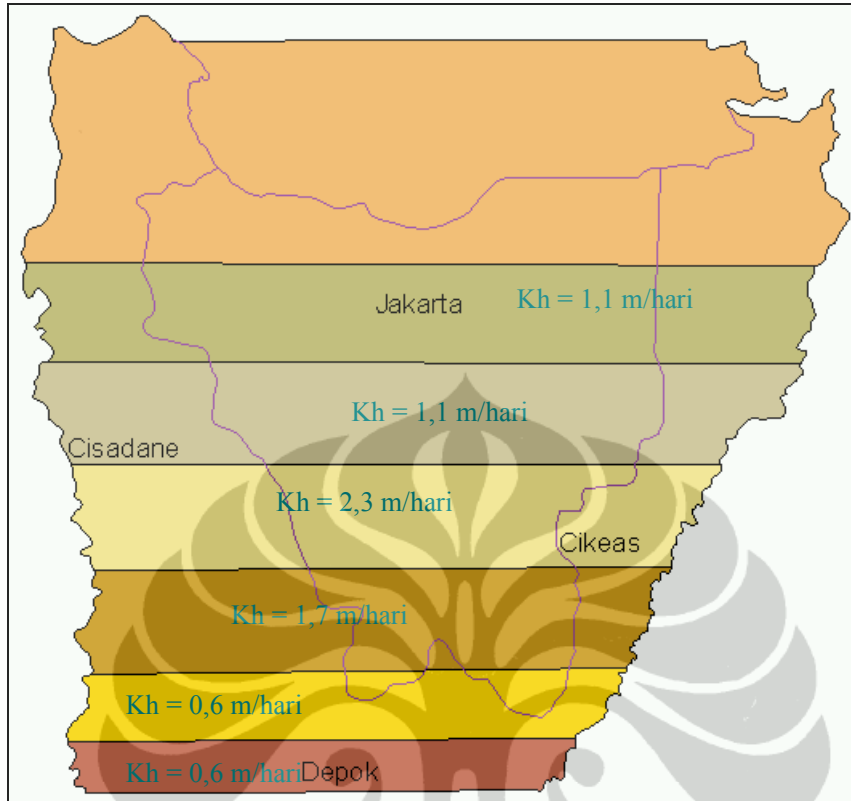


Gambar 4-2 Peta kemiringan lereng di wilayah Jabotabek dan sekitarnya

Sumber : Hasil olahan dari peta kemiringan lereng

Parameter DRASTIC Topography (% slope)	
Range	Peringkat
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Kelerengan wilayah studi 0 – 0,5%, peringkat DRASTIC = 10



Gambar 4-3 Peta tematik konduktivitas hidraulik

Sumber : Hasil olahan dari laporan B. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt, *Final Report of Jakarta Groundwater Study 1983-1985* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1986), hal. App. 117-17

Parameter DRASTIC Hydraulic Conductivity		
Range		Peringkat
(gpd/ft ²)	(m/hari)	
1-100	0,04 - 4,08	1
100-300	4,08 - 12,23	2
300-700	12,23 - 28,55	4
700-1000	28,55 - 40,78	6
1000-2000	40,78 - 81,56	8
>2000	> 81,56	10

Nilai K di wilayah studi berkisar antara 0,6 – 2,3 m/hari, peringkat DRASTIC = 1

Sebagai rangkuman hasil penilaian peringkat pada masing-masing parameter DRASTIC dapat ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 4-1 Hasil penilaian peringkat untuk masing-masing parameter DRASTIC

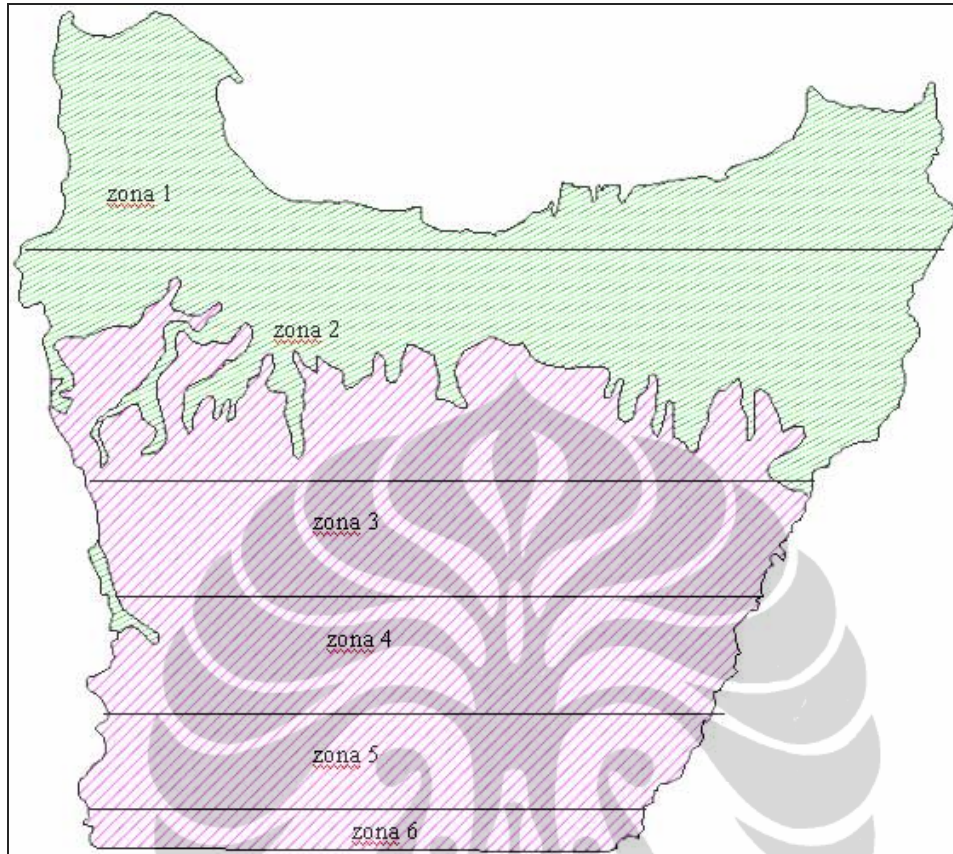
Parameter DRASTIC	Peringkat	Bobot	Potensi Pencemaran
Depth to groundwater	1	5	sangat rendah
Recharge rate	1	4	rendah
Aquifer media	6,8	3	sangat tinggi, tinggi
Soil media	3,4	2	rendah
Topography	10	1	sangat tinggi
Impact of vadose zone	3	5	rendah
Hydraulic conductivity	1	3	sangat rendah

cat : (peringkat DRASTIC) = (potensi pencemaran)

1-2 = sangat rendah, 3-4 = rendah, 5-6 = sedang,

7-8 = tinggi, 9-10 = sangat tinggi

Secara keseluruhan akifer di wilayah studi yang memiliki produktivitas tinggi cukup rentan terhadap pencemaran. Tingkat potensi pencemaran dapat dilihat dari hasil penilaian peringkat parameter DRASTIC pada tabel 4-1 di atas.



Gambar 4-4 Peta kerentanan air tanah berdasarkan DRASTIC Index

Tabel 4-2 Perhitungan DRASTIC Index di Tiap Kelas Kerentanan

		D	R	A	S	T	I	C	Total
	Bobot	5	4	3	2	1	5	3	
ZONA 1	Peringkat	1	1	8	3	10	3	1	
	Skor	5	4	24	6	10	15	3	67
ZONA 2	Peringkat	1	1	8	3	10	3	1	
	Skor	5	4	24	6	10	15	3	67
ZONA 3	Peringkat	1	1	8	4	10	3	1	
	Skor	5	4	24	8	10	15	3	69
ZONA 4	Peringkat	1	1	8	4	10	3	1	
	Skor	5	4	24	8	10	15	3	69
ZONA 5	Peringkat	1	1	8	4	10	3	1	
	Skor	5	4	24	8	10	15	3	69
ZONA 6	Peringkat	1	1	6	4	10	3	1	
	Skor	5	4	18	8	10	15	3	63

Catatan : skor = bobot x peringkat

4.2. SIMULASI MIGRASI PENCEMAR DENGAN GMS

4.2.1. Simulasi Aliran dengan GMS-Modflow

Berdasarkan peta kontur *head* dengan interval 10 m (gambar 4-5a) yang diperoleh dari hasil simulasi aliran dengan GMS Modflow menunjukkan bahwa *head* di wilayah selatan lebih tinggi dibanding wilayah utara, dengan demikian aliran air tanah akan mengalir dari wilayah selatan (Depok) ke wilayah utara (Jakarta). Kondisi di lapangan memang benar demikian mengingat arah aliran dari daerah resapan (*recharge area*) di wilayah utara ke daerah pelepasan (*discharge area*) di wilayah utara. Arah vektor kecepatan yang nampak pada gambar 4-6 juga menunjukkan hal yang serupa dimana arah aliran menjauhi lapisan batuan (*no flow boundary*) di batas studi bagian selatan dan bergerak menuju utara. Aliran yang terjadi di *no flow boundary* berasal dari air permukaan yaitu sungai-sungai yang hulunya di Bogor bukan berasal dari aliran air tanah di luar batas wilayah studi.

Pada kontur *head* yang intervalnya lebih rapat (gambar 4-5b) nampak bahwa bentuk kontur mengikuti punggung sungai.

Pada gambar 4-7 memperlihatkan bahwa distribusi kecepatan aliran di bagian utara dan sebagian wilayah di dekat *no flow boundary* lebih rendah dibanding di bagian tengah. Hal ini disebabkan karena kontur *head* di wilayah utara tidak rapat sehingga kemiringan hidrauliknya kecil meskipun nilai *K*-nya cukup besar. Di wilayah yang mendekati *no flow boundary* terjadi sebaliknya, meskipun kemiringan hidrauliknya lebih besar (kontur *head* rapat) namun nilai *K*-nya nol karena merupakan lapisan kedap air. Di bagian tengah wilayah studi, distribusi kecepatan di sekitar punggung sungai lebih rendah dibanding sekelilingnya karena elevasi sungai yang lebih rendah dibanding elevasi permukaan.

4.2.2. Simulasi Penyebaran Partikel Pencemar dengan GMS-Modpath

Hasil analisa terhadap penyebaran partikel pencemar menunjukkan bahwa tingkat kerentanan tidak hanya dipengaruhi oleh besar kecepatan namun juga arah vektor kecepatannya. Jadi meskipun nilai kecepatannya sama namun kemiringan vektornya lebih curam maka akan lebih jauh menghantarkan partikel

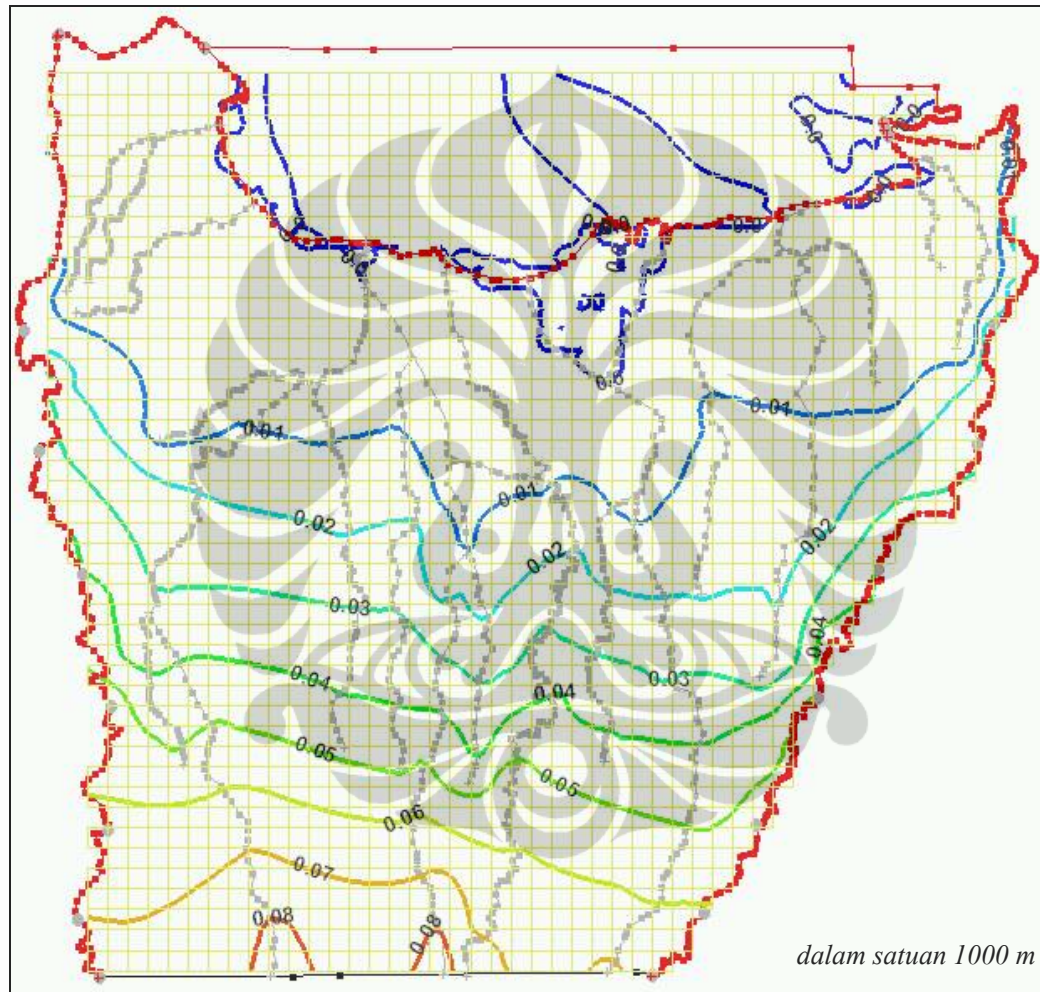
pencemar. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4-8 yang merupakan penggabungan peta distribusi kecepatan dengan arah vektor kecepatan (gambar 4-6 dan 4-7). Pada gambar tersebut disimulasikan beberapa partikel pencemar pada lokasi yang distribusi kecepatannya sama, namun arah vektornya berbeda. Terlihat bahwa jarak tempuh partikel B lebih panjang dibanding partikel A, karena kemiringan vektor kecepatannya lebih besar. Begitu pula dengan partikel C dan D.

Jadi secara garis besar pengelompokan kelas kerentanan berdasarkan simulasi, dapat dibagi menjadi 3 wilayah, yaitu kerentanan tinggi di wilayah tengah dan kerentanan rendah di wilayah utara dan selatan. Secara detail dengan memperhatikan arah vektor, hasil analisa menunjukkan bahwa wilayah barat dan timur memiliki tingkat kerentanan yang lebih tinggi dibanding wilayah tengah meskipun kelas distribusi kecepatannya yang sama.

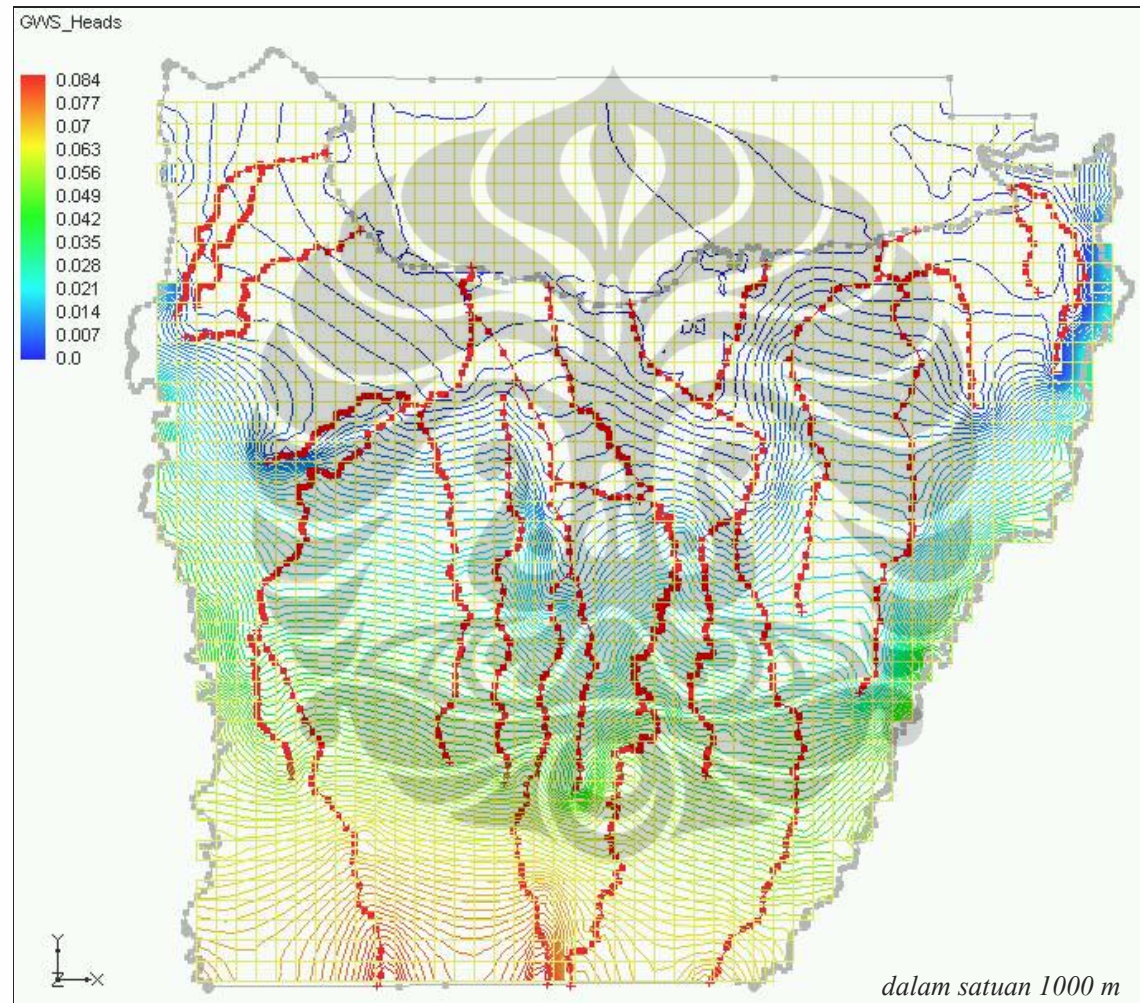
4.3. ANALISA SENSITIVITAS

Perubahan data masukan K dan *constant head* akan mengakibatkan perubahan data keluaran *head* di seluruh wilayah studi. Untuk mengukur tingkat sensitivitasnya dibuat grafik yang menyatakan hubungan data keluaran awal (H_{mean}) dengan selisih perubahan data keluaran terhadap keluaran awal (Δh) (gambar 4-9 dan 4-10). Hasil analisa grafik menunjukkan bahwa kedua parameter tidak sensitif. Pada perubahan *constant head* ± 1 m, Δh -nya juga ± 1 m bahkan banyak yang mendekati nol. Δh pada wilayah utara (dekat laut) dan selatan (dekat *no flow boundary*) lebih sensitif dibanding tengah. Hal ini terjadi karena di utara *constant head*-nya kecil dan di selatan nilai K -nya kecil (0,6 m/hari), sehingga sedikit gangguan akan mengakibatkan perubahan *head* yang besar. Pada perubahan nilai K satu ordo lebih tinggi dan satu ordo lebih rendah, hampir semua Δh -nya mendekati nol. Meskipun kedua parameter ini tidak sensitif, namun jika dibandingkan parameter *constant head* lebih sensitif dibanding parameter K .

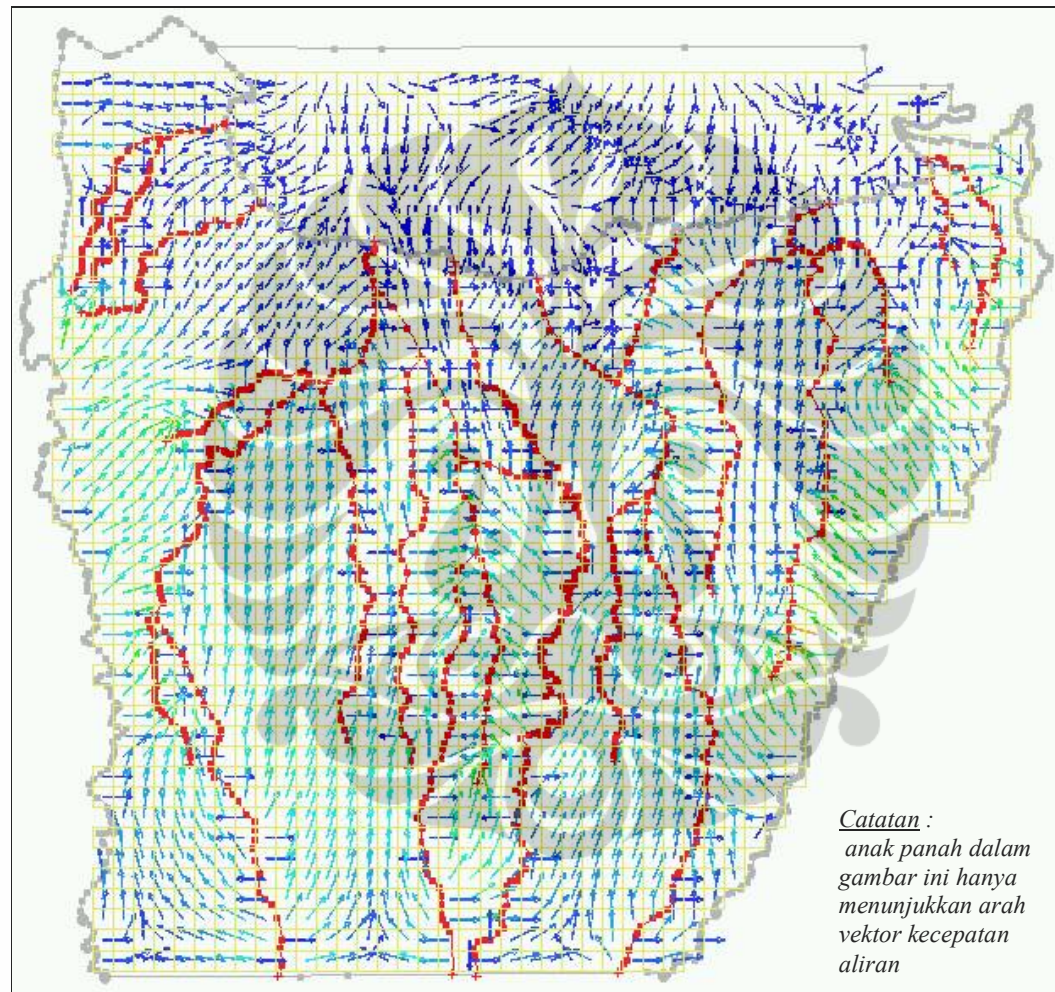
Pada kenyataan di lapangan, ketidakuratan data parameter akifer tidak akan berpengaruh besar terhadap *head* keluarannya, namun sangat sensitif terhadap data besarnya debit pemompaan/pengimbunan.



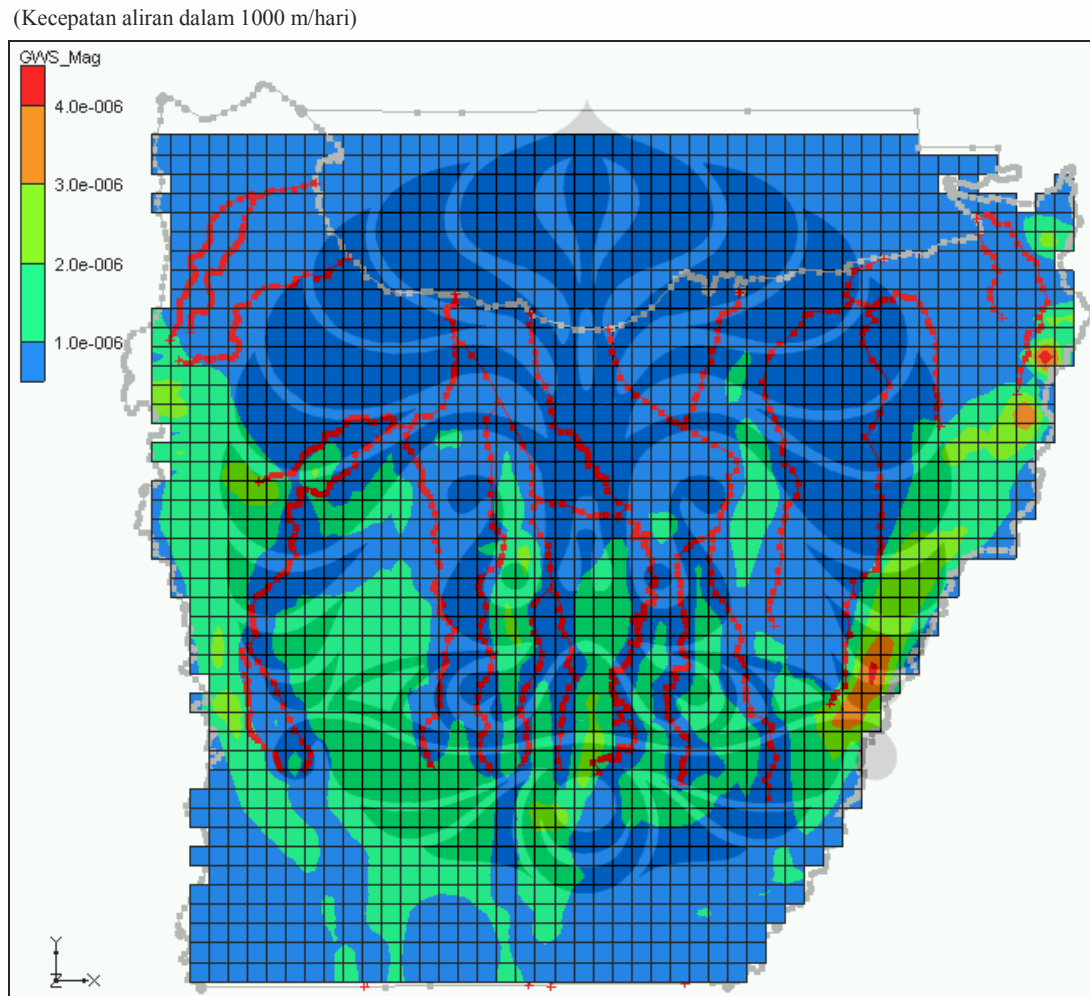
Gambar 4-5a Kontur *head* dengan interval 10 m



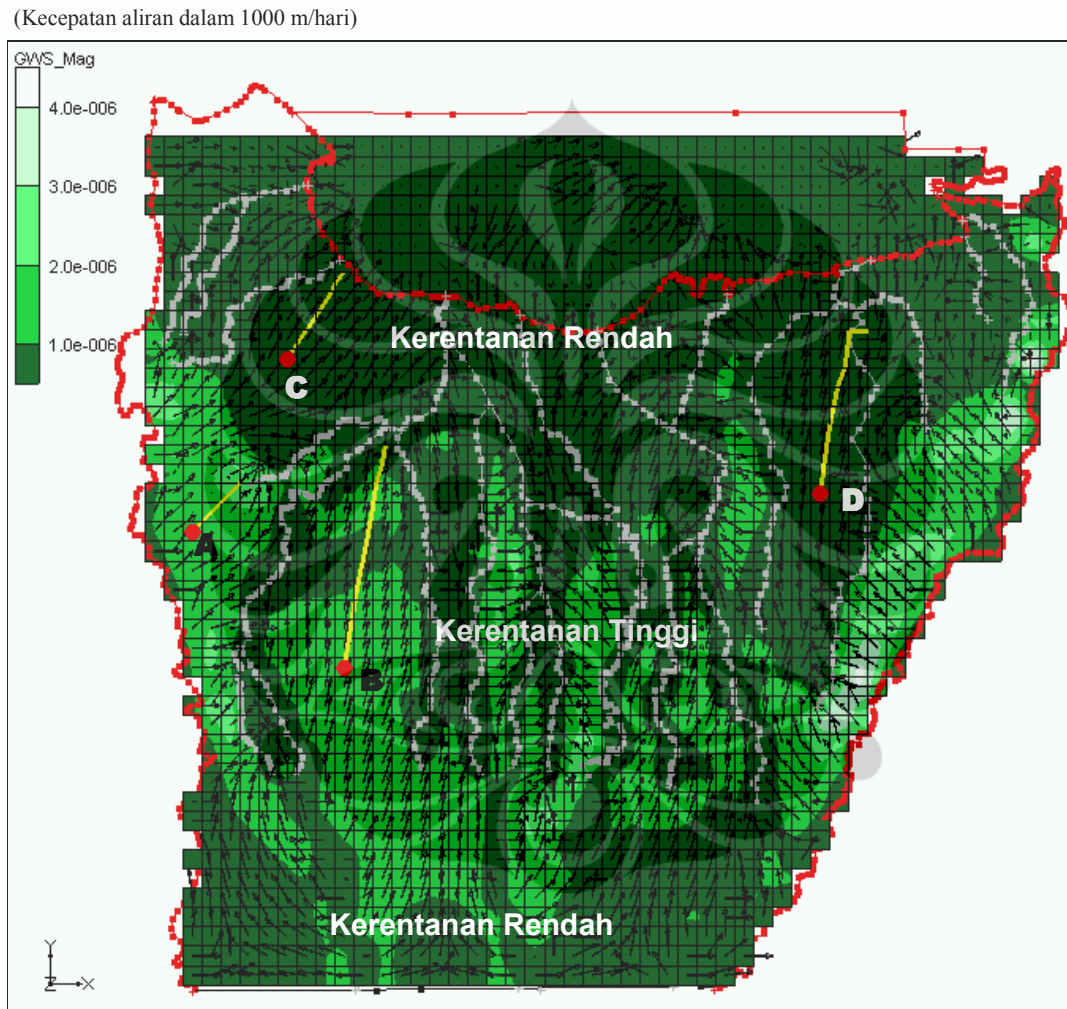
Gambar 4-5b Kontur *head* dengan interval 1 m



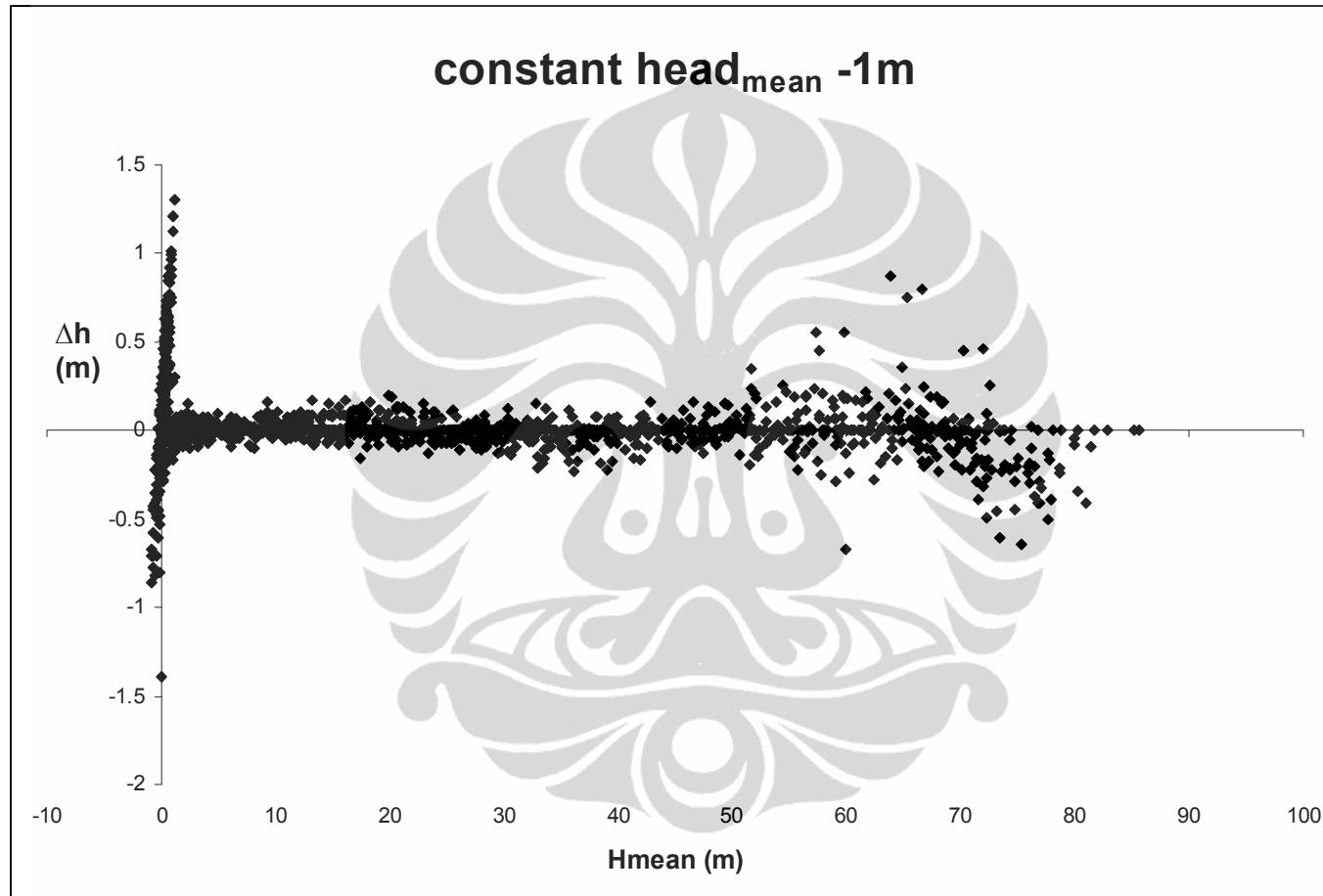
Gambar 4-6 Arah vektor kecepatan aliran di wilayah studi



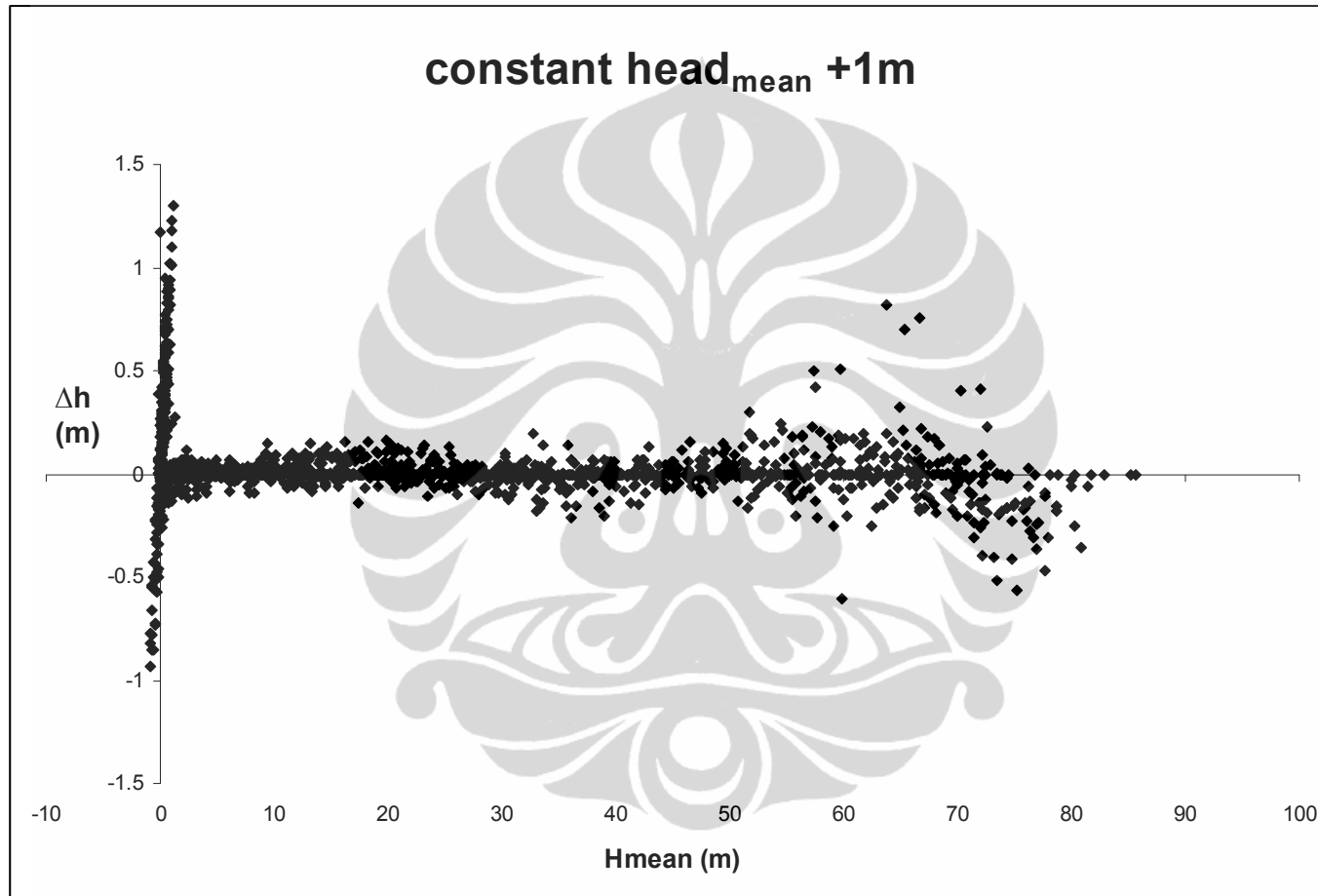
Gambar 4-7 Distribusi kecepatan aliran di wilayah studi dalam satuan 10^3 m/hari



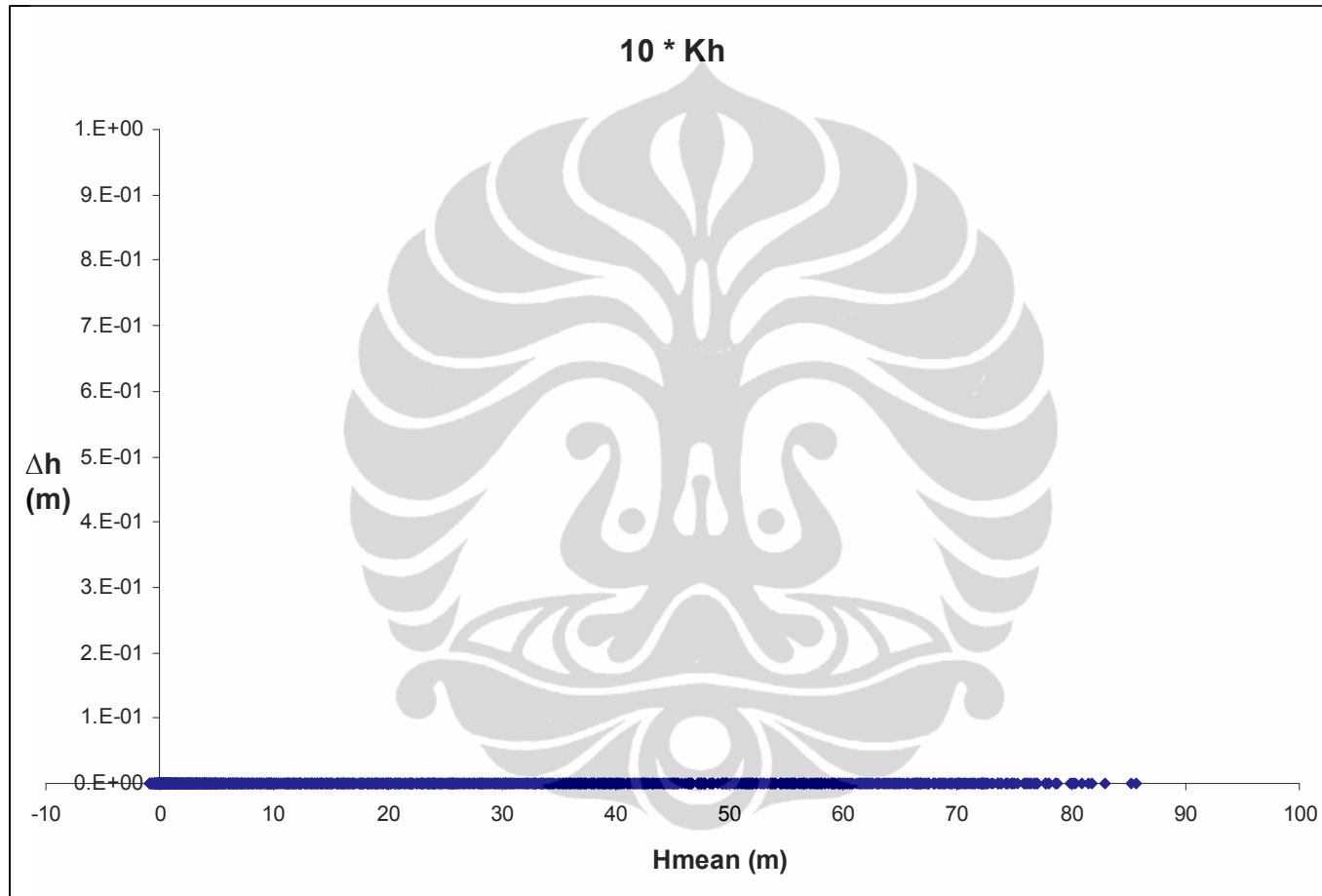
Gambar 4-8 Distribusi kecepatan dan arah vektor aliran



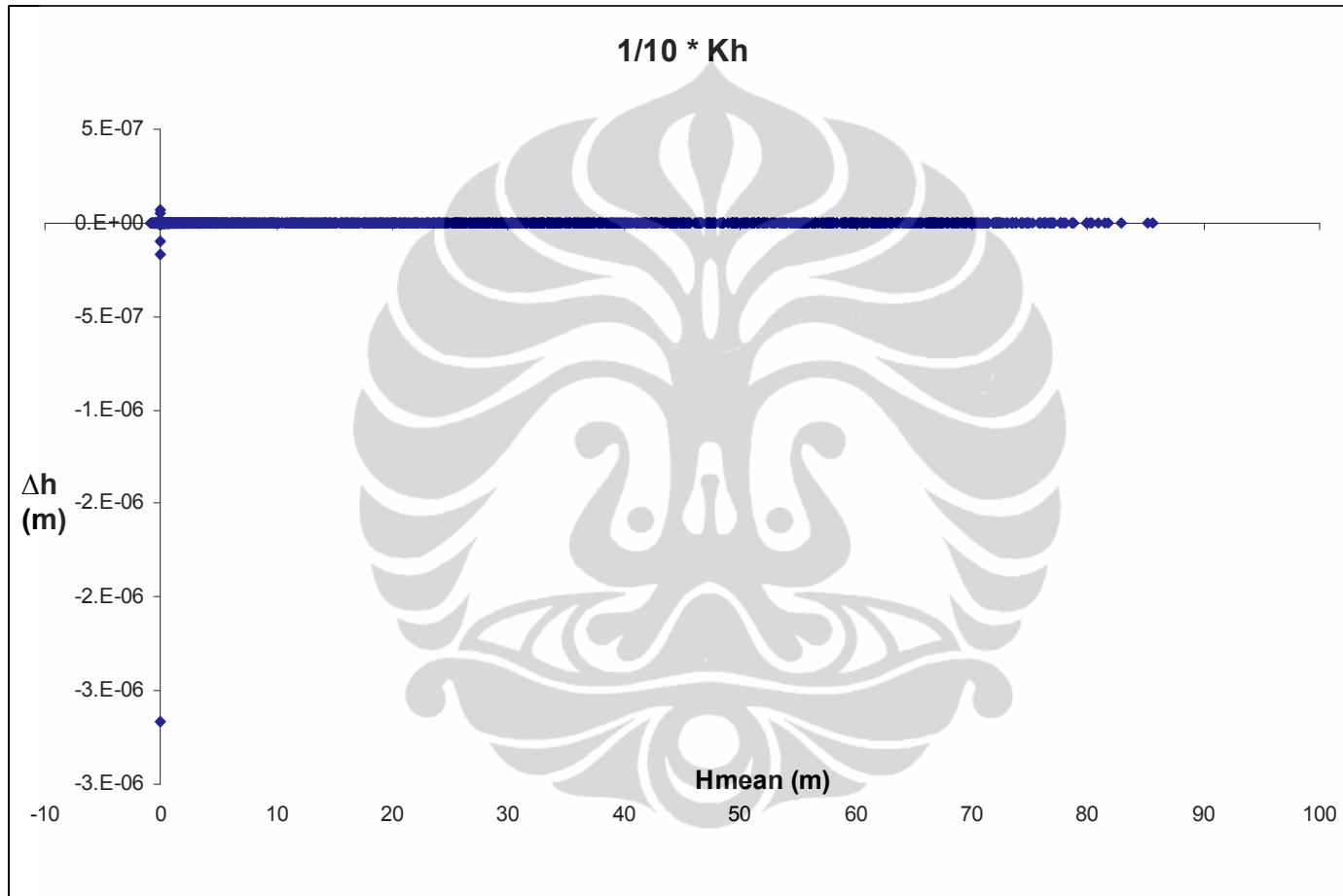
Gambar 4-9a Grafik analisa sensitivitas terhadap *constant head* - (elevasi muka air sungai rata-rata dikurangi 1m)



Gambar 4-9b Grafik analisa sensitivitas terhadap *constant head*+ (elevasi muka air sungai rata-rata ditambah 1m)



Gambar 4-10a Grafik analisa sensitivitas terhadap $K+$



Gambar 4-10b Grafik analisa sensitivitas terhadap K -

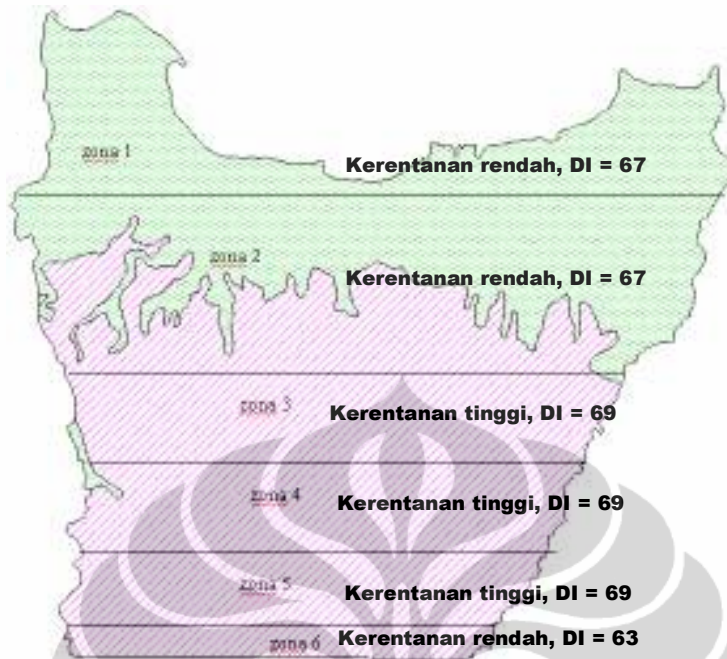
4.4. PERBANDINGAN PETA KERENTANAN METODA DRASTIC DENGAN HASIL SIMULASI

Secara garis besar, kelas kerentanan menurut hasil simulasi dapat dikelompokkan berdasarkan distribusi kecepatannya. Hasil analisa menunjukkan wilayah studi terbagi menjadi 3 wilayah kerentanan yaitu kerentanan rendah di utara dan selatan dan kerentanan tinggi di wilayah tengah (gambar 4-8).

Dari analisa sensitivitas diperoleh hasil bahwa parameter K dan *constant head* tidak sensitif. Simpangan data masukan kecil sekali pengaruhnya terhadap data keluaran. Meski demikian penentuan nilai *constant head* perlu lebih akurat dibanding K karena sebagaimana terlihat pada gambar 4-9, *constant head* lebih sensitif terutama di wilayah yang H_{mean} -nya ekstrim (sangat besar atau sangat kecil).

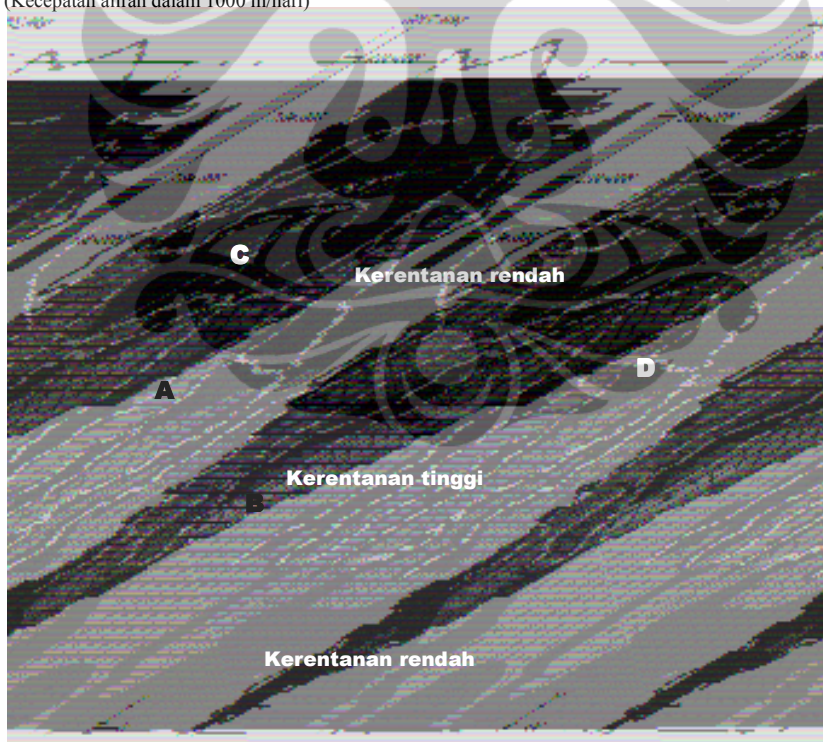
Menurut Metoda DRASTIC pengelompokkan kelas kerentanan di wilayah studi terbagi atas 3. DRASTIC indeks menunjukkan kerentanan tertinggi berada di bagian tengah wilayah studi, di bagian utara lebih rendah dan bagian selatan (mendekati batas wilayah studi) paling rendah. Pada wilayah penelitian dalam studi ini parameter yang mempengaruhi distribusi kerentanan adalah *aquifer media* (A), *soil media* (S), dan *hydraulic conductivity* (C).

Dengan demikian pengelompokkan kelas kerentanan menurut DRASTIC dan hasil simulasi sudah mendekati (gambar 4-11). Namun tentu saja pengelompokkan dari hasil simulasi lebih detail, karena data parameter akifernya juga lebih detail sedangkan DRASTIC hanya memanfaatkan informasi hidrogeologi secara global. Berdasarkan analisa sensitivitas, tidak ditemukan parameter data masukan yang sensitif. Dengan demikian informasi hidrogeologi yang tidak mendetail masih dapat digunakan oleh DRASTIC untuk membuat peta kerentanan pencemaran air tanah karena tidak akan mengakibatkan penyimpangan informasi yang berarti.



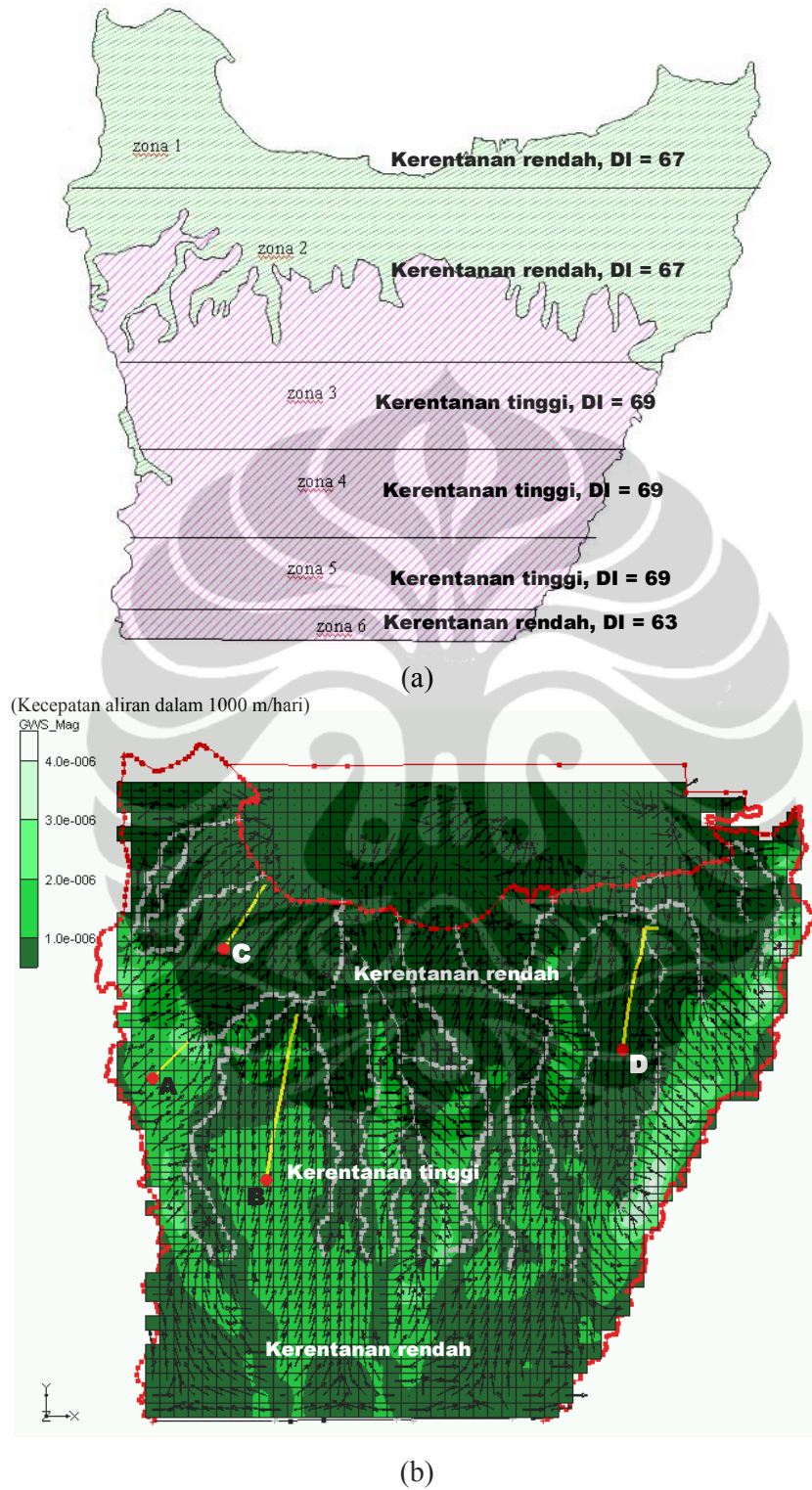
(a)

(Kecepatan aliran dalam 1000 m/hari)



(b)

Gambar 4-11 Hasil perbandingan peta kerentanan pencemaran air tanah
 (a) hasil DRASTIC (b) hasil simulasi komputer



Gambar 4-11 Hasil perbandingan peta kerentanan pencemaran air tanah
 (a) hasil DRASTIC (b) hasil simulasi komputer

B A B V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

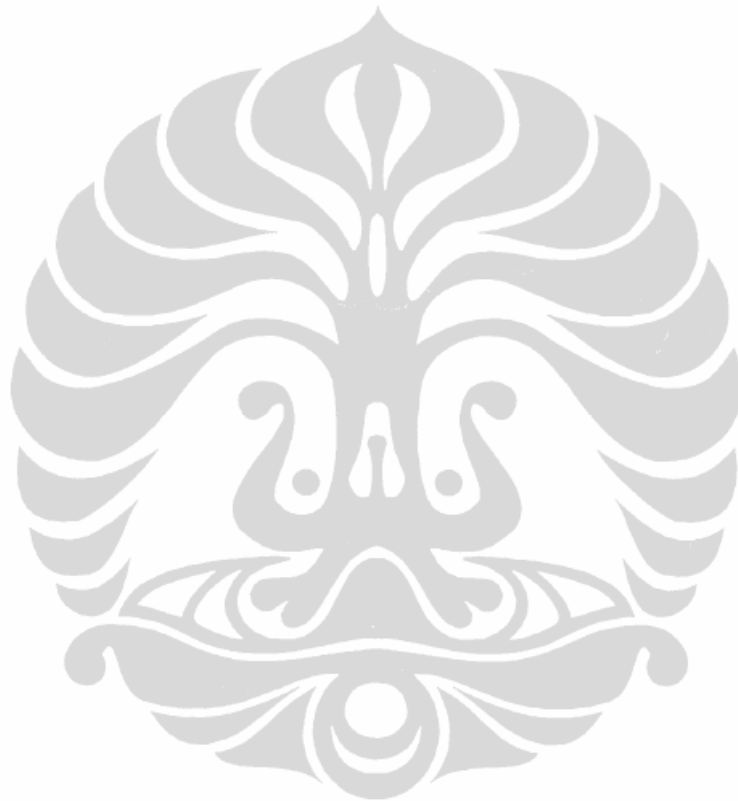
Berdasarkan hasil analisa pembuatan peta kerentanan pencemaran air tanah dengan metoda DRASTIC dan simulasi dapat disimpulkan bahwa :

1. dasar pengelompokan kelas kerentanan dengan simulasi adalah distribusi kecepatan dan arah vektor kecepatan
2. informasi parameter DRASTIC sebagai dasar pembobotan dalam pembuatan peta kerentanan pencemaran air tanah dapat menggunakan informasi umum maupun kajian-kajian studi yang lebih detail
3. hasil analisa sensitivitas menunjukkan bahwa simpangan data parameter akifer tidak berpengaruh besar terhadap perubahan data keluaran
4. perbandingan peta kerentanan hasil simulasi dengan DRASTIC tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan
5. penilaian DRASTIC dapat menggunakan data hidrogeologi yang umum karena ketidakakuratan data parameter akifer tidak akan mengakibatkan penyimpangan informasi yang berarti

5.2. SARAN

Untuk memperoleh peta kerentanan pencemaran air tanah dengan metoda DRASTIC yang lebih akurat diperlukan skala peta tematik dari masing-masing parameter DRASTIC yang cukup besar. Dengan demikian informasi hidrogeologi yang terekam akan lebih detail. Pengujian ini hanya mengasumsikan bahwa pergerakan partikel pencemar dipengaruhi oleh proses adveksi saja. Pada kenyataannya, proses dispersi dan biodegradasi juga ikut mempengaruhi migrasi pencemar. Untuk itu perlu diteliti lebih lanjut mengenai hal tersebut. Selain itu kegiatan eksplorasi air tanah (pemompaan dan pengimbuhan) yang berperan dalam proses menghambat / mempercepat migrasi pencemar juga belum diperhitungkan, karena informasi data mengenai kegiatan tersebut tidak diperoleh. Jika kegiatan tersebut hendak diperhitungkan, parameter *recharge* pada

DRASTIC perlu dijustifikasi. Kegiatan pengimbuhan mempercepat proses *recharge* sehingga meningkatkan potensi pencemaran dengan demikian peringkat DRASTIC-nya perlu dinaikkan. Sebaliknya proses pemompaan memperlambat aliran air tanah secara vertikal sehingga mengurangi potensi pencemaran, untuk itu peringkat DRASTIC-nya dapat diturunkan.



DAFTAR ACUAN

- [1] PT. Luhung Media Sarana Kreasi, *Pemetaan Geologi Lingkungan dan Tata Guna Air Tanah Kawasan Jabodetabek-Punjur*, Direktorat Jendral Penataan Ruang Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002
- [2] Abdurrahman Assegaf, *Hidrodinamika Air Tanah Alamiah Cekungan Jakarta*, Tesis Magister, 1998
- [3] Elang Erlangga, Bernt Soefner, Joachim Zaepke, *Evaluation of DEG-Well Files 1874-1984, Aquifer Parameters and Piezometric Heads, Groundwater Properties, Jakarta Groundwater Study 1983-1985, Working Paper 102* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1985)
- [4] A. Djaeni, G. Koehler, B. Soefner, *Piezometric Heads of the Confined Aquifer System, Jakarta Groundwater Study 1983-1985, Working Paper 103* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1985)
- [5] Haryadi Tirtomihardjo, *River Water Levels in the Jakarta Basin Area, Jakarta Groundwater Study 1983-1985, Working Paper 114* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1985)
- [6] G. Schmidt, Haryadi Tirtomihardjo, G. Koehler, *Groundwater Modelling of Jakarta Groundwater Study 1983-1985, Working Paper 116* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1985)
- [7] B. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt, *Final Report of Jakarta Groundwater Study 1983-1985, Working Paper 117* (Bandung : Directorate of Environmental Geology, 1986)

DAFTAR PUSTAKA

- Freeze, Allan R., Cherry, John A., *Groundwater* (New Jersey : Prentice Hall, 1979)
- Fetter, C.W., *Applied Hydrogeology* (Ohio : Merrill Publishing Company, 1988)
- Linda Aller, *et al.*, *DRASTIC : A Standarized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings* (Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1987)
- Sahid, Shamsuddin (2000), "A Study of Groundwater Pollution Vulnerability Using DRASTIC/GIS, West Bengal, India". *Journal of Environmental Hydrology Volume 8*
[http:// www.hydroweb.com](http://www.hydroweb.com)
- Fatta, D, *et al.*, "Numerical Simulation of Flow and Contaminant Migration at a Municipal Landfill". *Journal of Environmental Hydrology Volume 8*
[http:// www.hydroweb.com](http://www.hydroweb.com)
- Prahasta, Eddy, *Sistem Informasi Geografis : Tutorial ArcView* (Bandung : Informatika, 2005)
- Budiyanto, Eko, *Sistem Informasi Geografis Menggunakan ArcView GIS* (Yogyakarta : Andi, 2002)
- Environmental Modelling Research Laboratory, *Groundwater Modelling System Tutorials* (Brigham Young University, 2004)
- Pollock, David W., *User's Guide for Modpath/Modpath Plot, Version 3: A particle tracking post processing package for Modflow, the US Geological Survey Finite Difference Groundwater Flow Model*, (Virginia : US Geological Survey, 1994)
- Harbaugh, Arlen W., *et al.*, *Modflow-2000, The US Geological Survey Modular Groundwater Model – User Guide to Modularization Concepts and The Groundwater Flow Process* (Virginia : US Geological Survey, 2000)



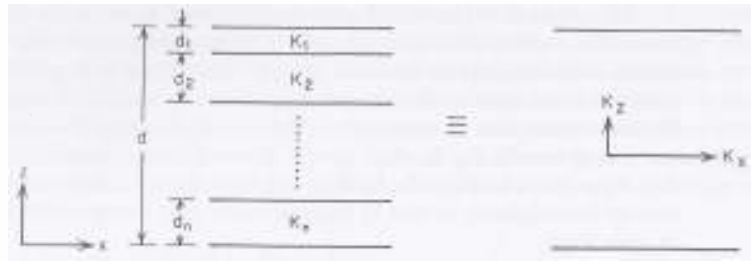
LAMPIRAN 1

Parameter Akifer

Hydraulic Conductivity (K)

Tabel L1-1 Perhitungan nilai K yang diturunkan dari data transmitivitas

Zona Akifer	T (m ² /jam) (1)	D (m) (2)	Kh (m/jam) (3) = (1) / (2)	Kh (m/hari) (4) = (3) * 24
0-40m	4.8	40	0.12	2.9
	3.4	40	0.09	2.0
	5.7	40	0.14	3.4
	6.7	40	0.17	4.0
	4.8	40	0.12	2.9
	1.5	40	0.04	0.9
40-100m	1.8	40	0.05	1.1
	2.5	60	0.04	1.0
	2.7	60	0.05	1.1
	2.7	60	0.05	1.1
	5.8	60	0.10	2.3
	4.2	60	0.07	1.7
100-150m	1.5	60	0.03	0.6
	2.4	60	0.04	1.0
	1.3	50	0.03	0.6
	1.9	50	0.04	0.9
	2.3	50	0.05	1.1
	3.8	50	0.08	1.8
150-200m	2.1	50	0.04	1.0
	1.5	50	0.03	0.7
	2.0	50	0.04	1.0
	2.0	50	0.04	1.0
200-250m	3.8	50	0.08	1.8
	4.0	50	0.08	1.9
	1.6	50	0.03	0.8
	5.8	50	0.12	2.8
	8.0	50	0.16	3.8
	1.1	50	0.02	0.5
	1.9	50	0.04	0.9



Gambar L1-1 Hubungan antara lapisan heterogen dan anisotropi

$$*) K_x = \frac{\sum_{i=1}^n K_i d_i}{d}$$

$$**) K_z = \frac{d}{\sum_{i=1}^n d_i / K_i}$$

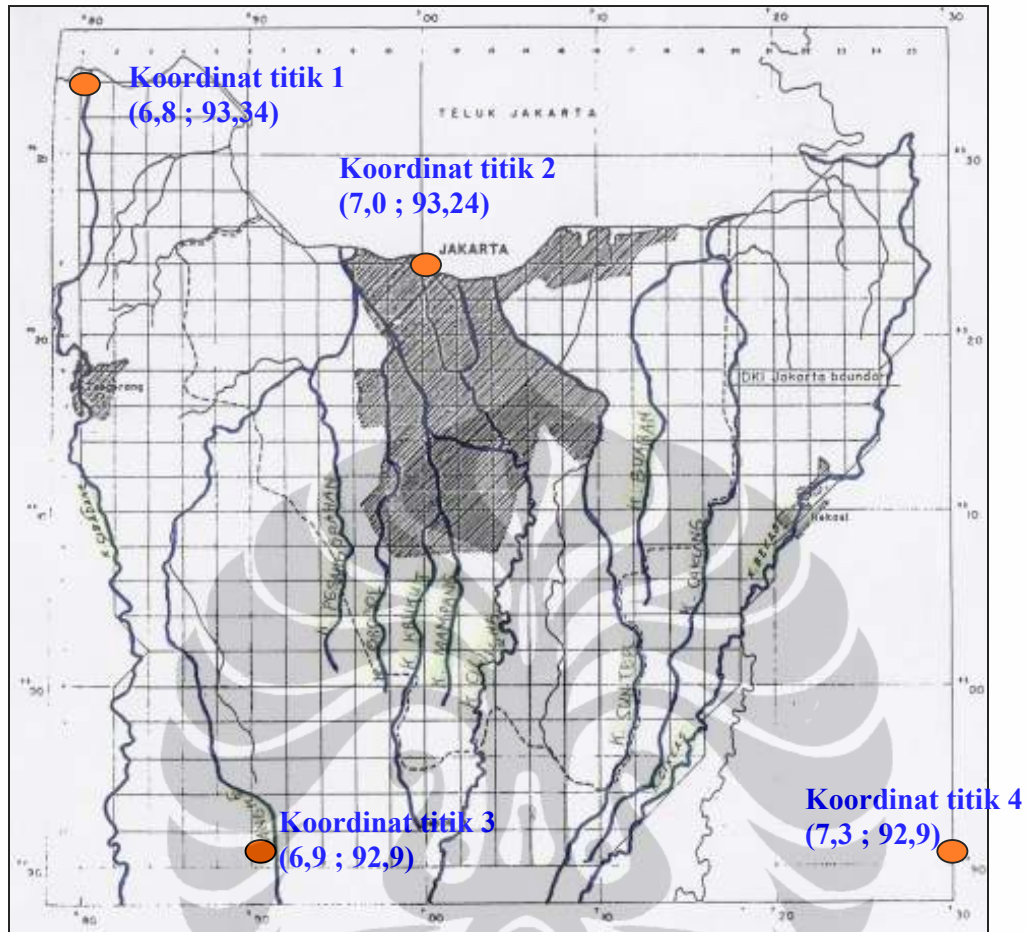
Tabel L1-2 Nilai K di seluruh sistem akifer yang ditinjau

Zona Akifer	K_h (m ² /hari)	$d_{\text{horizontal}}$ (m)	K_h per layer (m/hari)	d_{vertikal} (m)	K_h (m/hari)
0-40m	2.9	13,000	2.20	40	1.57
	2.0	6,000			
	3.4	6,000			
	4.0	6,000			
	2.9	6,000			
	0.9	4,000			
	1.1	3,000			
40-100m	1.0	13,000	1.14	60	1.57
	1.1	6,000			
	1.1	6,000			
	2.3	6,000			
	1.7	6,000			
	0.6	3,000			
Total akifer yang ditinjau =		100 m			



LAMPIRAN 2

Koordinat dan Elevasi Permukaan Tanah di Wilayah Studi



Gambar L2-1 Peta wilayah studi

Tabel L2-1 Data titik koordinat di permukaan tanah (elevasi 0 m)

x	y	z	x	y	z
6.80	93.34	0.0000	6.80	93.34	0.00000
6.80	93.32	0.00300	6.82	93.34	0.00000
6.80	93.30	0.00400	6.84	93.34	0.00000
6.80	93.28	0.00500	6.86	93.34	0.00000
6.80	93.26	0.00600	6.88	93.34	0.00000
6.80	93.24	0.00750	6.90	93.32	0.00000
6.80	93.22	0.00900	6.90	93.30	0.00000
6.80	93.20	0.01250	6.90	93.28	0.00000
6.80	93.18	0.01400	6.92	93.26	0.00000
6.80	93.16	0.01500	6.94	93.24	0.00000
6.80	93.14	0.01800	6.96	93.24	0.00000
6.80	93.12	0.02400	6.98	93.24	0.00000
6.80	93.10	0.03500	7.00	93.24	0.00000
6.82	93.08	0.03500	7.02	93.22	0.00000
6.82	93.06	0.03700	7.04	93.22	0.00000
6.82	93.04	0.04500	7.06	93.24	0.00000
6.84	93.02	0.04700	7.08	93.26	0.00000
6.82	93.00	0.05600	7.10	93.26	0.00000
6.80	92.98	0.06300	7.12	93.26	0.00000
6.80	92.96	0.06700	7.14	93.26	0.00000
6.80	92.94	0.07500	7.16	93.26	0.00000
6.80	92.92	0.08500	7.18	93.26	0.00000
6.80	92.90	0.09400	7.20	93.28	0.00000
6.92	92.90	0.09750	7.22	93.28	0.00000
7.00	92.90	0.09700	7.24	93.30	0.00000
7.02	92.90	0.09600	6.88	93.34	-0.02500
7.08	92.90	0.09400	6.90	93.34	-0.02500
7.10	92.90	0.09000	7.00	93.34	-0.02500
7.12	92.92	0.08800	7.10	93.34	-0.02500
7.14	92.94	0.07100	7.20	93.34	-0.02500
7.16	92.96	0.06200	7.20	93.32	-0.02500
7.16	92.98	0.05300	7.22	93.32	-0.02500
7.18	93.00	0.04500	7.24	93.32	-0.02500
7.18	93.02	0.03600	7.24	93.30	-0.02500
7.18	93.04	0.03000	6.84	93.30	0.00250
7.20	93.06	0.02450	6.86	93.30	0.00180
7.20	93.08	0.02200	6.88	93.30	0.00100
7.22	93.10	0.02400	6.84	93.28	0.00320
7.24	93.12	0.01500	6.86	93.28	0.00310
7.26	93.14	0.01050	6.82	93.26	0.00600
7.26	93.16	0.00780	6.84	93.26	0.00400
7.26	93.18	0.00690	6.86	93.26	0.00350
7.28	93.20	0.00560	6.88	93.26	0.00220
7.28	93.22	0.00469	6.90	93.26	0.00150
7.28	93.24	0.00400	6.82	93.24	0.00700
7.28	93.26	0.00400	6.84	93.24	0.00500
7.28	93.28	0.00300	6.86	93.24	0.00500
7.28	93.30	0.00300	6.82	93.22	0.00900
7.26	93.30	0.00250	6.84	93.22	0.00700
7.24	93.30	0.00100	6.96	93.22	0.00240

x	y	z	x	y	z
6.96	93.20	0.00280	7.00	93.14	0.00900
6.94	93.18	0.00450	7.02	93.14	0.00870
6.92	93.18	0.00500	7.02	93.12	0.01400
6.90	93.18	0.00600	7.00	93.12	0.01450
6.88	93.18	0.00750	7.00	93.10	0.01900
6.90	93.16	0.00700	7.02	93.10	0.01850
6.88	93.16	0.00900	7.00	93.08	0.02600
6.86	93.16	0.01200	7.02	93.08	0.02500
6.88	93.14	0.01200	7.00	93.06	0.03400
6.88	93.12	0.02000	7.02	93.06	0.02950
6.86	93.10	0.02300	7.00	93.04	0.04300
6.86	93.08	0.02900	7.02	93.04	0.03700
6.86	93.06	0.03550	7.00	93.02	0.04800
6.86	93.04	0.03900	7.02	93.02	0.04500
6.88	93.04	0.04050	7.00	93.00	0.05500
6.86	93.02	0.04600	7.02	93.00	0.05400
6.88	93.02	0.04540	6.98	92.98	0.06300
6.86	93.00	0.05400	6.98	92.96	0.07000
6.88	93.00	0.05500	6.98	92.94	0.07900
6.90	92.98	0.06300	7.00	92.92	0.08700
6.90	92.96	0.06950	7.00	92.90	0.09700
6.90	92.94	0.07700	7.02	93.20	0.00250
6.92	92.92	0.08800	7.02	93.18	0.00500
6.92	92.90	0.09750	7.04	93.16	0.00700
6.94	93.16	0.00810	7.04	93.14	0.00900
6.94	93.14	0.01200	7.06	93.12	0.01300
6.96	93.12	0.01700	7.06	93.10	0.01900
6.96	93.10	0.02200	7.06	93.08	0.02500
6.96	93.08	0.02900	7.04	93.06	0.03000
6.96	93.06	0.03550	7.04	93.04	0.03800
6.96	93.04	0.04000	7.06	93.02	0.04200
6.96	93.02	0.04500	7.04	93.00	0.05350
6.96	93.00	0.05500	7.04	92.98	0.06250
6.96	93.18	0.00430	7.04	92.96	0.07000
6.98	93.18	0.00500	7.02	92.94	0.07600
6.98	93.16	0.00600	7.02	92.92	0.08500
6.98	93.14	0.00900	7.02	92.90	0.09600
6.98	93.12	0.01500	7.06	93.20	0.00300
6.98	93.10	0.02000	7.08	93.18	0.00440
6.98	93.08	0.02800	7.10	93.24	0.00180
6.98	93.06	0.03400	7.10	93.22	0.00200
6.98	93.04	0.03850	7.10	93.20	0.00280
6.98	93.02	0.04500	7.10	93.16	0.00550
6.98	93.00	0.05500	7.10	93.14	0.00900
6.98	93.22	0.00200	7.08	93.12	0.01300
7.00	93.22	0.00200	7.10	93.12	0.01230
6.98	93.20	0.00280	7.08	93.10	0.01700
7.00	93.20	0.00300	7.10	93.10	0.01600
7.00	93.18	0.00400	7.08	93.08	0.02300
7.00	93.16	0.00600	7.10	93.08	0.02100

x	y	z
7.08	93.06	0.02800
7.10	93.06	0.02700
7.08	93.04	0.03500
7.12	93.04	0.03500
7.08	93.02	0.04150
7.12	93.02	0.03800
7.08	93.00	0.05100
7.12	93.00	0.04800
7.12	92.98	0.05700
7.12	92.96	0.06500
7.10	92.94	0.07500
7.08	92.92	0.08400
7.08	92.90	0.09400
7.14	93.24	0.00180
7.16	93.24	0.00170
7.12	93.22	0.00270
7.12	93.20	0.00370
7.12	93.18	0.00500
7.14	93.16	0.00700
7.12	93.14	0.00850
7.12	93.12	0.01200
7.12	93.10	0.01700
7.12	93.08	0.02100
7.18	93.24	0.00200
7.20	93.24	0.00200
7.18	93.22	0.00200
7.20	93.22	0.00250
7.18	93.20	0.00290
7.20	93.20	0.00300
7.18	93.18	0.00400
7.20	93.18	0.00500
7.18	93.16	0.00700
7.18	93.14	0.01100
7.18	93.12	0.01400
7.16	93.10	0.01500
7.16	93.08	0.02000
7.16	93.06	0.02400
7.16	93.04	0.02700

Tabel L2-2 Data titik koordinat di dasar akifer zona II

x	y	z	x	y	z
6.80	93.34	-0.10000	6.94	93.24	-0.10000
6.80	93.32	-0.09700	6.96	93.24	-0.10000
6.80	93.30	-0.09600	6.98	93.24	-0.10000
6.80	93.28	-0.09500	7.00	93.24	-0.10000
6.80	93.26	-0.09400	7.02	93.22	-0.10000
6.80	93.24	-0.09250	7.04	93.22	-0.10000
6.80	93.22	-0.09100	7.06	93.24	-0.10000
6.80	93.20	-0.08750	7.08	93.26	-0.10000
6.80	93.18	-0.08600	7.10	93.26	-0.10000
6.80	93.16	-0.08500	7.12	93.26	-0.10000
6.80	93.14	-0.08200	7.14	93.26	-0.10000
6.80	93.12	-0.07600	7.16	93.26	-0.10000
6.80	93.10	-0.06500	7.18	93.26	-0.10000
6.82	93.08	-0.06500	7.20	93.28	-0.10000
6.82	93.06	-0.06300	7.22	93.28	-0.10000
6.82	93.04	-0.05500	7.24	93.30	-0.10000
6.86	93.04	-0.06100	6.88	93.34	-0.10000
6.88	93.04	-0.05950	6.90	93.34	-0.10000
6.88	93.04	-0.05460	7.00	93.34	-0.10000
6.90	92.98	-0.03700	7.10	93.34	-0.10000
7.14	92.94	-0.02900	7.20	93.34	-0.10000
7.16	92.96	-0.03800	7.20	93.32	-0.10000
7.16	92.98	-0.04700	7.22	93.32	-0.10000
7.18	93.00	-0.05500	7.24	93.32	-0.10000
7.18	93.02	-0.06400	7.24	93.30	-0.10000
7.18	93.04	-0.07000	6.84	93.30	-0.09750
7.20	93.06	-0.07550	6.86	93.30	-0.09820
7.20	93.08	-0.07800	6.88	93.30	-0.09900
7.22	93.10	-0.07600	6.84	93.28	-0.09680
7.24	93.12	-0.08500	6.86	93.28	-0.09690
7.26	93.14	-0.08950	6.82	93.26	-0.09400
7.26	93.16	-0.09220	6.84	93.26	-0.09600
7.26	93.18	-0.09310	6.86	93.26	-0.09650
7.28	93.20	-0.09440	6.88	93.26	-0.09780
7.28	93.22	-0.09531	6.90	93.26	-0.09850
7.28	93.24	-0.09600	6.82	93.24	-0.09300
7.28	93.26	-0.09600	6.84	93.24	-0.09500
7.28	93.28	-0.09700	6.86	93.24	-0.09500
7.28	93.30	-0.09700	6.82	93.22	-0.09100
7.26	93.30	-0.09750	6.84	93.22	-0.09300
7.24	93.30	-0.09900	6.96	93.22	-0.09760
6.80	93.34	-0.10000	6.96	93.20	-0.09720
6.82	93.34	-0.10000	6.94	93.18	-0.09550
6.84	93.34	-0.10000	6.92	93.18	-0.09500
6.86	93.34	-0.10000	6.90	93.18	-0.09400
6.88	93.34	-0.10000	6.88	93.18	-0.09250
6.90	93.32	-0.10000	6.90	93.16	-0.09300
6.90	93.30	-0.10000	6.88	93.16	-0.09100
6.90	93.28	-0.10000	6.86	93.16	-0.08800
6.92	93.26	-0.10000	6.88	93.14	-0.08800

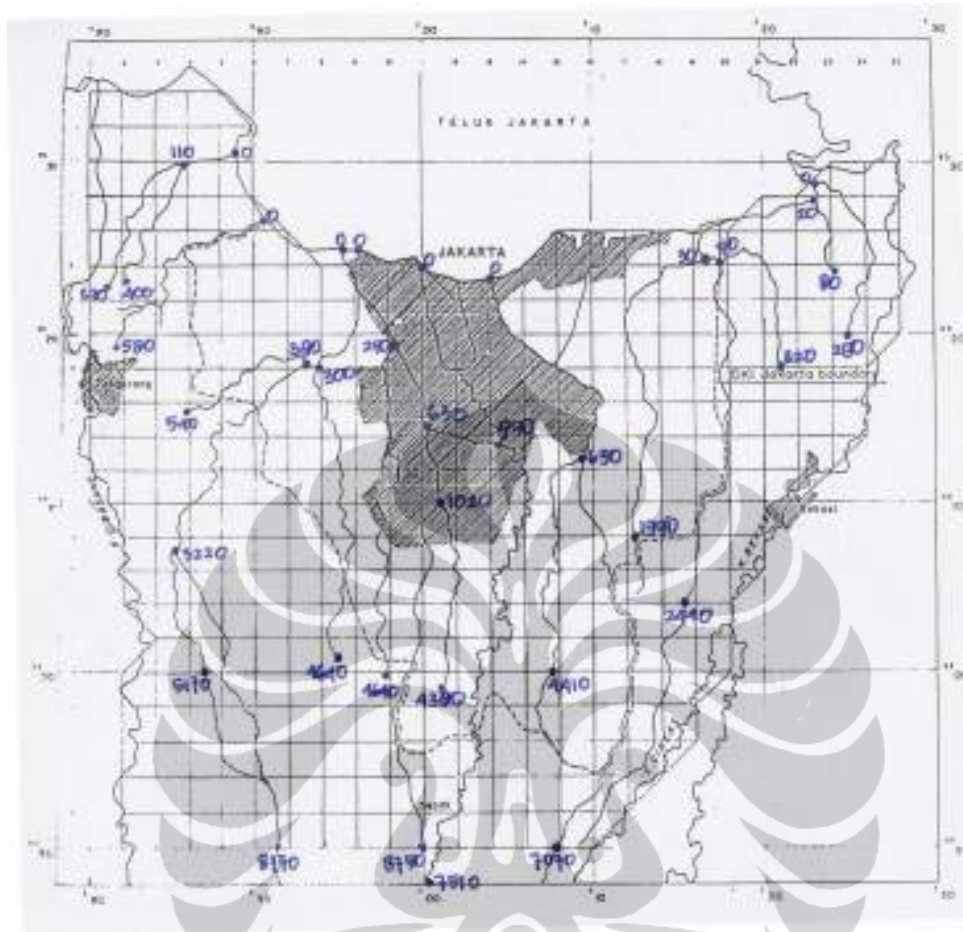
x	y	z	x	y	z
6.88	93.12	-0.08000	7.02	93.06	-0.07050
6.86	93.10	-0.07700	7.00	93.04	-0.05700
6.86	93.08	-0.07100	7.02	93.04	-0.06300
6.86	93.06	-0.06450	7.00	93.02	-0.05200
6.86	93.04	-0.06100	7.02	93.02	-0.05500
6.88	93.04	-0.05950	7.00	93.00	-0.04500
6.86	93.02	-0.05400	7.02	93.00	-0.04600
6.88	93.02	-0.05460	6.98	92.98	-0.03700
6.86	93.00	-0.04600	6.98	92.96	-0.03000
6.88	93.00	-0.04500	6.98	92.94	-0.02100
6.90	92.98	-0.03700	7.00	92.92	-0.01300
6.90	92.96	-0.03050	7.00	92.90	-0.00300
6.90	92.94	-0.02300	7.02	93.20	-0.09750
6.92	92.92	-0.01200	7.02	93.18	-0.09500
6.92	92.90	-0.00250	7.04	93.16	-0.09300
6.94	93.16	-0.09190	7.04	93.14	-0.09100
6.94	93.14	-0.08800	7.06	93.12	-0.08700
6.96	93.12	-0.08300	7.06	93.10	-0.08100
6.96	93.10	-0.07800	7.06	93.08	-0.07500
6.96	93.08	-0.07100	7.04	93.06	-0.07000
6.96	93.06	-0.06450	7.04	93.04	-0.06200
6.96	93.04	-0.06000	7.06	93.02	-0.05800
6.96	93.02	-0.05500	7.04	93.00	-0.04650
6.96	93.00	-0.04500	7.04	92.98	-0.03750
6.96	93.18	-0.09570	7.04	92.96	-0.03000
6.98	93.18	-0.09500	7.02	92.94	-0.02400
6.98	93.16	-0.09400	7.02	92.92	-0.01500
6.98	93.14	-0.09100	7.02	92.90	-0.00400
6.98	93.12	-0.08500	7.06	93.20	-0.09700
6.98	93.10	-0.08000	7.08	93.18	-0.09560
6.98	93.08	-0.07200	7.10	93.24	-0.09820
6.98	93.06	-0.06600	7.10	93.22	-0.09800
6.98	93.04	-0.06150	7.10	93.20	-0.09720
6.98	93.02	-0.05500	7.10	93.16	-0.09450
6.98	93.00	-0.04500	7.10	93.14	-0.09100
6.98	93.22	-0.09800	7.08	93.12	-0.08700
7.00	93.22	-0.09800	7.10	93.12	-0.08770
6.98	93.20	-0.09720	7.08	93.10	-0.08300
7.00	93.20	-0.09700	7.10	93.10	-0.08400
7.00	93.18	-0.09600	7.08	93.08	-0.07700
7.00	93.16	-0.09400	7.10	93.08	-0.07900
7.00	93.14	-0.09100	7.08	93.06	-0.07200
7.02	93.14	-0.09130	7.10	93.06	-0.07300
7.02	93.12	-0.08600	7.08	93.04	-0.06500
7.00	93.12	-0.08550	7.12	93.04	-0.06500
7.00	93.10	-0.08100	7.08	93.02	-0.05850
7.02	93.10	-0.08150	7.12	93.02	-0.06200
7.00	93.08	-0.07400	7.08	93.00	-0.04900
7.02	93.08	-0.07500	7.12	93.00	-0.05200
7.00	93.06	-0.06600	7.12	92.98	-0.04300

x	y	z
7.12	92.96	-0.03500
7.10	92.94	-0.02500
7.08	92.92	-0.01600
7.08	92.90	-0.00600
7.14	93.24	-0.09820
7.16	93.24	-0.09830
7.12	93.22	-0.09730
7.12	93.20	-0.09630
7.12	93.18	-0.09500
7.14	93.16	-0.09300
7.12	93.14	-0.09150
7.12	93.12	-0.08800
7.12	93.10	-0.08300
7.12	93.08	-0.07900
7.18	93.24	-0.09800
7.20	93.24	-0.09800
7.18	93.22	-0.09800
7.20	93.22	-0.09750
7.18	93.20	-0.09710
7.20	93.20	-0.09700
7.18	93.18	-0.09600
7.20	93.18	-0.09500
7.18	93.16	-0.09300
7.18	93.14	-0.08900
7.18	93.12	-0.08600
7.16	93.10	-0.08500
7.16	93.08	-0.08000
7.16	93.06	-0.07600
7.16	93.04	-0.07300

A large, light gray watermark of a stylized floral or mandala design is centered on the page. It features intricate, symmetrical patterns with a central vertical axis and radiating, leaf-like or petal-like shapes.

LAMPIRAN 3

Koordinat Elevasi Muka Air Sungai



Gambar L3-1 Elevasi muka air sungai di titik hulu dan titik perpotongan antar sungai

Tabel L3-1 Data titik koordinat elevasi muka air sungai

Sungai/Batas	x	y	Hmean	Hmin	Hmax
Cisadane	6.80	93.34	0.0000	-0.00100	0.00100
	6.80	93.32	0.00130	0.00030	0.00230
	6.80	93.30	0.00250	0.00150	0.00350
	6.80	93.28	0.00370	0.00270	0.00470
	6.80	93.26	0.00490	0.00390	0.00590
	6.80	93.24	0.00510	0.00510	0.00710
	6.80	93.22	0.00730	0.00630	0.00830
	6.80	93.20	0.01020	0.00920	0.01120
	6.80	93.18	0.01070	0.00970	0.01170
	6.80	93.16	0.01130	0.01030	0.01230
	6.80	93.14	0.01630	0.01530	0.01730
	6.80	93.12	0.02220	0.02120	0.02320
	6.80	93.10	0.02550	0.02450	0.02650
	6.82	93.08	0.02900	0.02800	0.03000
	6.82	93.06	0.03280	0.03180	0.03380
	6.82	93.04	0.03800	0.03700	0.03900
	6.84	93.02	0.04280	0.04180	0.04380
	6.82	93.00	0.04780	0.04680	0.04880
	6.80	92.98	0.05470	0.05370	0.05570
	6.80	92.96	0.06150	0.06050	0.06250
6.80	92.94	0.06780	0.06680	0.06880	
6.80	92.92	0.07050	0.06950	0.07150	
6.80	92.90	0.07480	0.07380	0.07580	
selatan	6.92	92.90	0.08770	0.08670	0.08870
	7.00	92.90	0.08750	0.08650	0.08850
	7.02	92.90	0.07510	0.07410	0.07610
	7.08	92.90	0.07070	0.06970	0.07170
	7.10	92.90	0.06510	0.06410	0.06610
Bekasi	7.12	92.92	0.06510	0.05900	0.06100
	7.14	92.94	0.06000	0.05280	0.05480
	7.16	92.96	0.05380	0.04730	0.04930
	7.16	92.98	0.04830	0.04210	0.04410
	7.18	93.00	0.04310	0.03720	0.03920
	7.18	93.02	0.03820	0.03260	0.03460
	7.18	93.04	0.03360	0.02730	0.02930
	7.20	93.06	0.02830	0.02240	0.02440
	7.20	93.08	0.02340	0.01700	0.01900
	7.22	93.10	0.01800	0.01070	0.01270
	7.24	93.12	0.01170	0.00700	0.00900
	7.26	93.14	0.00800	0.00630	0.00830
	7.26	93.16	0.00730	0.00580	0.00780
	7.26	93.18	0.00680	0.00500	0.00700
	7.28	93.20	0.00600	0.00380	0.00580
	7.28	93.22	0.00480	0.00300	0.00500
	7.28	93.24	0.00400	0.00220	0.00420
	7.28	93.26	0.00240	0.00140	0.00340
	7.28	93.28	0.00160	0.00060	0.00260
	7.28	93.30	0.00080	-0.00020	0.00180
7.26	93.30	0.00000	-0.00100	0.00100	
7.24	93.30	0.00000	-0.00100	0.00100	

Sungai/Batas	x	y	Hmean	Hmin	Hmax
utara (Teluk Jakarta / Laut Jawa)	6.80000	93.34000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.82000	93.34000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.84000	93.34000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.86000	93.34000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.88000	93.34000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.90000	93.32000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.90000	93.30000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.90000	93.28000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.92000	93.26000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.94000	93.24000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.96000	93.24000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.98000	93.24000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.00000	93.24000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.02000	93.22000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.04000	93.22000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.06000	93.24000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.08000	93.26000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.10000	93.26000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.12000	93.26000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.14000	93.26000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.16000	93.26000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.18000	93.26000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.20000	93.28000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.22000	93.28000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.24000	93.30000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.88000	93.34000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.90000	93.34000	0.00000	-0.00100	0.00100
	7.00000	93.34000	0.00000	-0.00100	0.00100
7.10000	93.34000	0.00000	-0.00100	0.00100	
7.20000	93.34000	0.00000	-0.00100	0.00100	
7.20000	93.32000	0.00000	-0.00100	0.00100	
7.22000	93.32000	0.00000	-0.00100	0.00100	
7.24000	93.32000	0.00000	-0.00100	0.00100	
7.24000	93.30000	0.00000	-0.00100	0.00100	
North-west	6.84000	93.30000	0.00220	0.00120	0.00320
	6.86000	93.30000	0.00110	0.00010	0.00210
	6.88000	93.30000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.84000	93.28000	0.00290	0.00190	0.00390
	6.86000	93.28000	0.00290	0.00190	0.00390
	6.82000	93.26000	0.00440	0.00340	0.00540
	6.84000	93.26000	0.00370	0.00270	0.00470
	6.86000	93.26000	0.00300	0.00200	0.00400
	6.88000	93.26000	0.00150	0.00050	0.00250
	6.90000	93.26000	0.00000	-0.00100	0.00100
	6.82000	93.24000	0.00530	0.00430	0.00630
	6.84000	93.24000	0.00400	0.00300	0.00500
	6.86000	93.24000	0.00300	0.00200	0.00400
	6.82000	93.22000	0.00580	0.00480	0.00680
6.84000	93.22000	0.00520	0.00420	0.00620	

Sungai/Batas	x	y	Hmean	Hmin	Hmax
Angke	6.96000	93.22000	0.00090	-0.00010	0.00190
	6.96000	93.20000	0.00180	0.00080	0.00280
	6.94000	93.18000	0.00300	0.00200	0.00400
	6.92000	93.18000	0.00380	0.00280	0.00480
	6.90000	93.18000	0.00450	0.00350	0.00550
	6.88000	93.18000	0.00520	0.00420	0.00620
	6.90000	93.16000	0.00460	0.00360	0.00560
	6.88000	93.16000	0.00530	0.00430	0.00630
	6.86000	93.16000	0.00540	0.00440	0.00640
	6.88000	93.14000	0.00530	0.00430	0.00630
	6.88000	93.12000	0.01110	0.01010	0.01210
	6.86000	93.10000	0.02030	0.01930	0.02130
	6.86000	93.08000	0.02640	0.02540	0.02740
	6.86000	93.06000	0.03220	0.03120	0.03320
	6.86000	93.04000	0.03790	0.03690	0.03890
	6.88000	93.04000	0.03930	0.03830	0.04030
	6.86000	93.02000	0.04380	0.04280	0.04480
	6.88000	93.02000	0.04420	0.04320	0.04520
	6.86000	93.00000	0.05170	0.05070	0.05270
	6.88000	93.00000	0.05040	0.04940	0.05140
6.90000	92.98000	0.05380	0.05280	0.05480	
6.90000	92.96000	0.05980	0.05880	0.06080	
6.90000	92.94000	0.07020	0.06920	0.07120	
6.92000	92.92000	0.08110	0.08010	0.08210	
6.92000	92.90000	0.08770	0.08670	0.08870	
Pesanggrahan	6.94000	93.16000	0.00660	0.00560	0.00760
	6.94000	93.14000	0.01110	0.01010	0.01210
	6.96000	93.12000	0.01580	0.01480	0.01680
	6.96000	93.10000	0.02040	0.01940	0.02140
	6.96000	93.08000	0.02520	0.02420	0.02620
	6.96000	93.06000	0.03000	0.02900	0.03100
	6.96000	93.04000	0.03510	0.03410	0.03610
	6.96000	93.02000	0.04050	0.03950	0.04150
	6.96000	93.00000	0.04640	0.04540	0.04740
Grogol	6.96000	93.18000	0.00370	0.00270	0.00470
	6.98000	93.18000	0.00390	0.00290	0.00490
	6.98000	93.16000	0.00530	0.00430	0.00630
	6.98000	93.14000	0.00790	0.00690	0.00890
	6.98000	93.12000	0.01230	0.01130	0.01330
	6.98000	93.10000	0.01810	0.01710	0.01910
	6.98000	93.08000	0.02410	0.02310	0.02510
	6.98000	93.06000	0.02960	0.02860	0.03060
	6.98000	93.04000	0.03520	0.03420	0.03620
	6.98000	93.02000	0.04070	0.03970	0.04170
	6.98000	93.00000	0.04640	0.04540	0.04740

Sungai/Batas	x	y	Hmean	Hmin	Hmax
Krukut+Mampang	6.98	93.22	0.00130	0.00030	0.00230
	7.00	93.22	0.00120	0.00020	0.00220
	6.98	93.20	0.00250	0.00150	0.00350
	7.00	93.20	0.00250	0.00150	0.00350
	7.00	93.18	0.00360	0.00260	0.00460
	7.00	93.16	0.00500	0.00400	0.00600
	7.00	93.14	0.00630	0.00530	0.00730
	7.02	93.14	0.00740	0.00640	0.00840
	7.02	93.12	0.01260	0.01160	0.01360
	7.00	93.12	0.01020	0.00920	0.01120
	7.00	93.10	0.01740	0.01640	0.01840
	7.02	93.10	0.01780	0.01680	0.01880
	7.00	93.08	0.02480	0.02380	0.02580
	7.02	93.08	0.02300	0.02200	0.02400
	7.00	93.06	0.03320	0.03220	0.03420
	7.02	93.06	0.02820	0.02720	0.02920
	7.00	93.04	0.04150	0.04050	0.04250
	7.02	93.04	0.03340	0.03240	0.03440
	7.00	93.02	0.04680	0.04580	0.04780
	7.02	93.02	0.03860	0.03760	0.03960
	7.00	93.00	0.05250	0.05150	0.05350
	7.02	93.00	0.04380	0.04280	0.04480
	6.98	92.98	0.05960	0.05860	0.06060
	6.98	92.96	0.06820	0.06720	0.06920
6.98	92.94	0.07680	0.07580	0.07780	
7.00	92.92	0.08420	0.08320	0.08520	
7.00	92.90	0.08750	0.08650	0.08850	
Ciliwung	7.02	93.20	0.00200	0.00100	0.00300
	7.02	93.18	0.00400	0.00300	0.00500
	7.04	93.16	0.00620	0.00520	0.00720
	7.04	93.14	0.00850	0.00750	0.00950
	7.06	93.12	0.01260	0.01160	0.01360
	7.06	93.10	0.01750	0.01650	0.01850
	7.06	93.08	0.02350	0.02250	0.02450
	7.04	93.06	0.02940	0.02840	0.03040
	7.04	93.04	0.03500	0.03400	0.03600
	7.06	93.02	0.03970	0.03870	0.04070
	7.04	93.00	0.04640	0.04540	0.04740
	7.04	92.98	0.05360	0.05260	0.05460
	7.04	92.96	0.05900	0.05800	0.06000
	7.02	92.94	0.06430	0.06330	0.06530
	7.02	92.92	0.07030	0.06930	0.07130
	7.02	92.90	0.07510	0.07410	0.07610

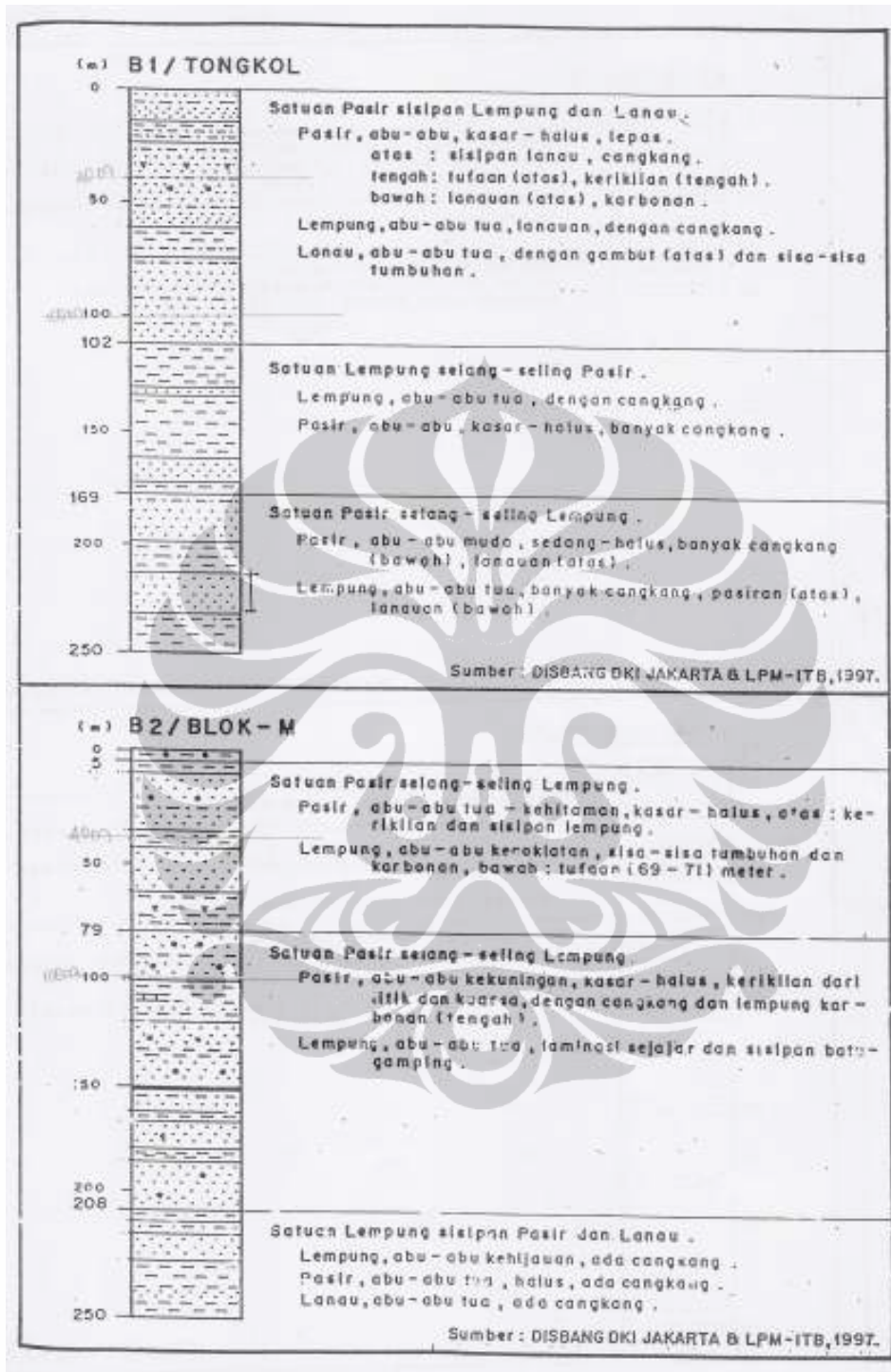
Sungai/Batas	x	y	Hmean	Hmin	Hmax
Sunter	7.06	93.20	0.00220	0.00120	0.00320
	7.08	93.18	0.00440	0.00340	0.00540
	7.10	93.24	0.00090	-0.00010	0.00190
	7.10	93.22	0.00180	0.00080	0.00280
	7.10	93.20	0.00310	0.00210	0.00410
	7.10	93.16	0.00530	0.00430	0.00630
	7.10	93.14	0.00630	0.00530	0.00730
	7.08	93.12	0.01230	0.01130	0.01330
	7.10	93.12	0.00950	0.00850	0.01050
	7.08	93.10	0.01600	0.01500	0.01700
	7.10	93.10	0.01460	0.01360	0.01560
	7.08	93.08	0.02190	0.02090	0.02290
	7.10	93.08	0.02010	0.01910	0.02110
	7.08	93.06	0.02740	0.02640	0.02840
	7.10	93.06	0.02560	0.02460	0.02660
	7.08	93.04	0.03330	0.03230	0.03430
	7.12	93.04	0.03300	0.03200	0.03400
	7.08	93.02	0.03790	0.03690	0.03890
	7.12	93.02	0.03680	0.03580	0.03780
	7.08	93.00	0.04410	0.04310	0.04510
7.12	93.00	0.04280	0.04180	0.04380	
7.12	92.98	0.04770	0.04670	0.04870	
7.12	92.96	0.05290	0.05190	0.05390	
7.10	92.94	0.05960	0.05860	0.06060	
7.08	92.92	0.06640	0.06540	0.06740	
7.08	92.90	0.07070	0.06970	0.07170	
Buaran	7.14	93.24	0.00120	0.00020	0.00220
	7.16	93.24	0.00030	-0.00070	0.00130
	7.12	93.22	0.00250	0.00150	0.00350
	7.12	93.20	0.00340	0.00240	0.00440
	7.12	93.18	0.00430	0.00330	0.00530
	7.14	93.16	0.00560	0.00460	0.00660
	7.12	93.14	0.00690	0.00590	0.00790
	7.12	93.12	0.01100	0.01000	0.01200
	7.12	93.10	0.01580	0.01480	0.01680
	7.12	93.08	0.01950	0.01850	0.02050
Cakung	7.18	93.24	0.00070	-0.00030	0.00170
	7.20	93.24	0.00110	0.00010	0.00210
	7.18	93.22	0.00160	0.00060	0.00260
	7.20	93.22	0.00190	0.00090	0.00290
	7.18	93.20	0.00250	0.00150	0.00350
	7.20	93.20	0.00260	0.00160	0.00360
	7.18	93.18	0.00340	0.00240	0.00440
	7.20	93.18	0.00320	0.00220	0.00420
	7.18	93.16	0.00430	0.00330	0.00530
	7.18	93.14	0.00520	0.00420	0.00620
	7.18	93.12	0.00710	0.00610	0.00810
	7.16	93.10	0.00910	0.00810	0.01010
	7.16	93.08	0.01770	0.01670	0.01870
	7.16	93.06	0.02030	0.01930	0.02130
	7.16	93.04	0.02440	0.02340	0.02540

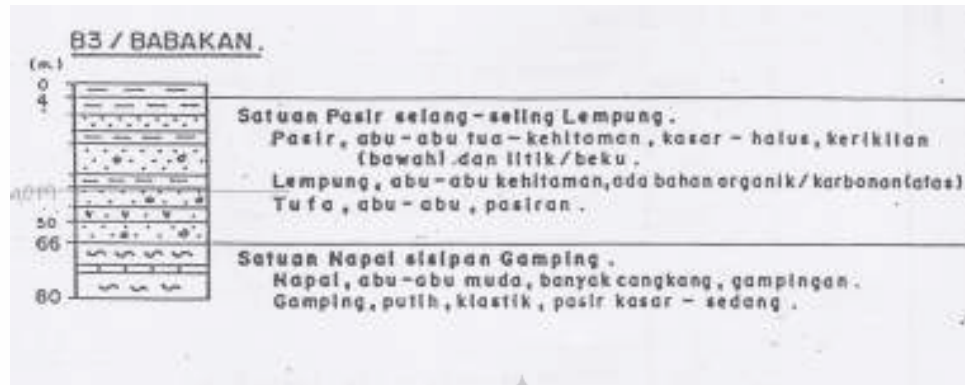


LAMPIRAN 4

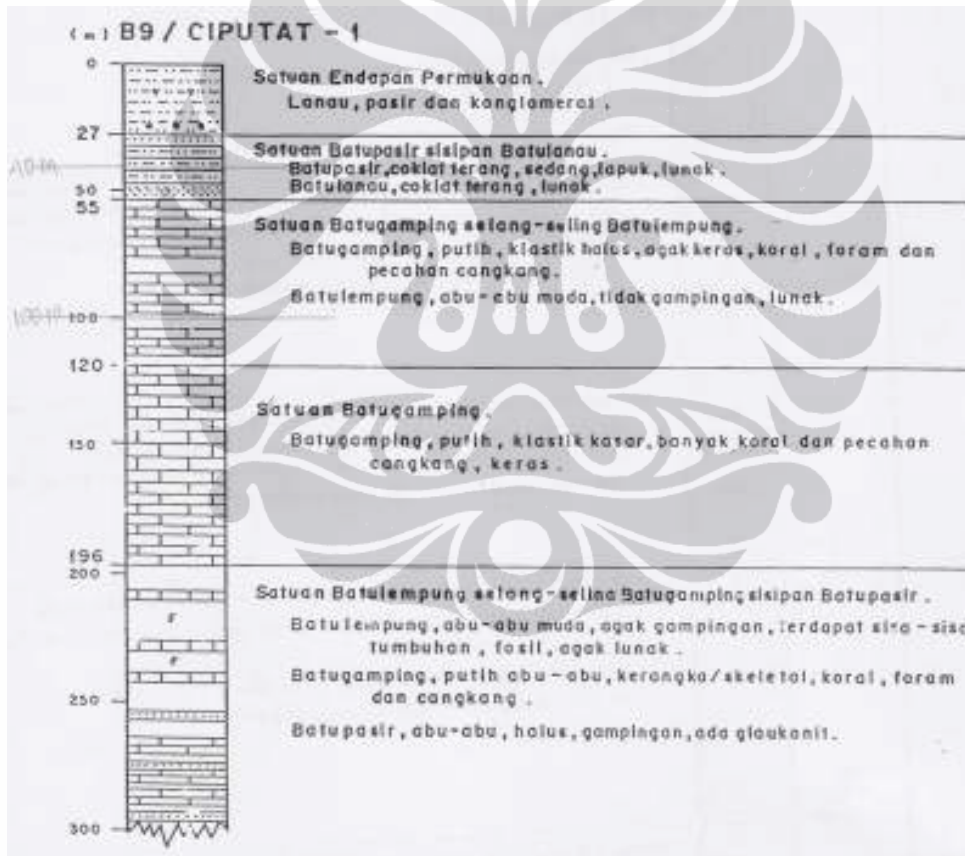
Data Litologi Sumur Bor

(Sumber : Abdurrahman Assegaf, *Hidrodinamika Air Tanah Alamiah
Cekungan Jakarta*, Tesis Magister, 1998)

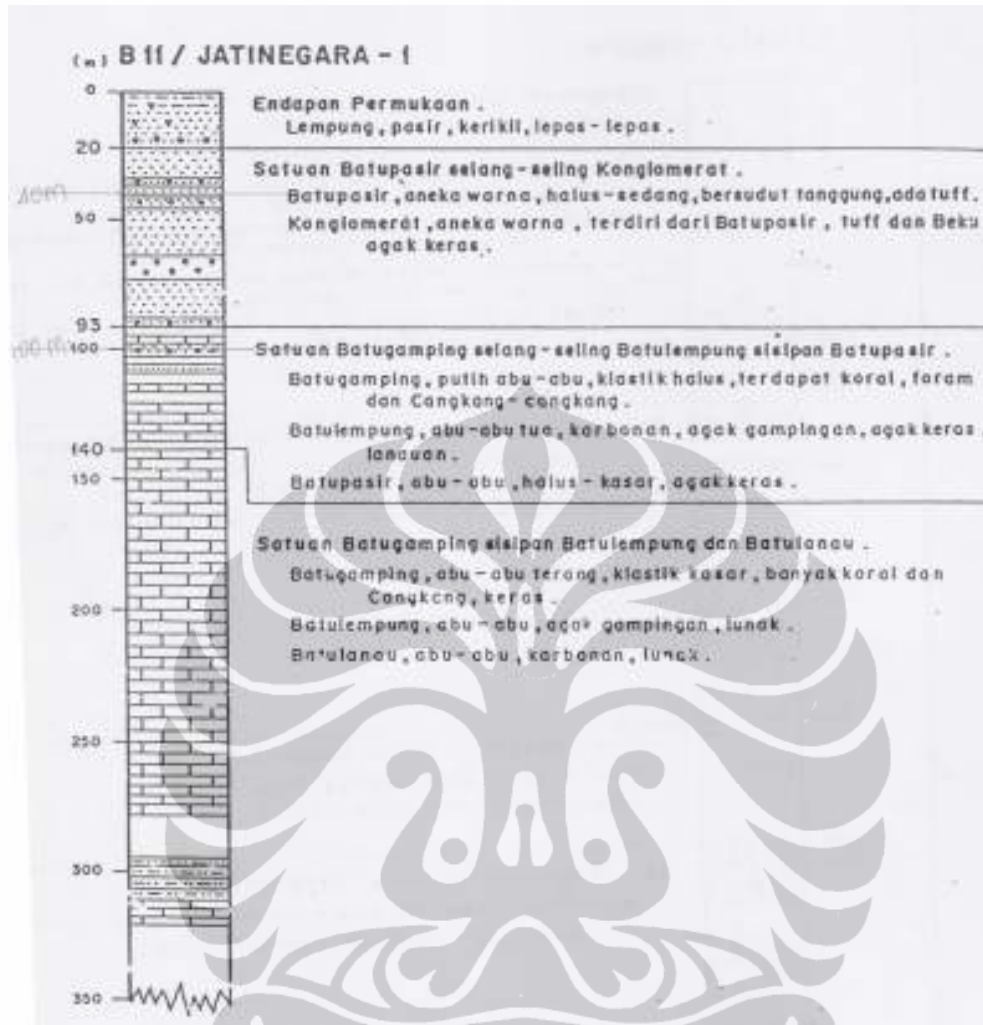




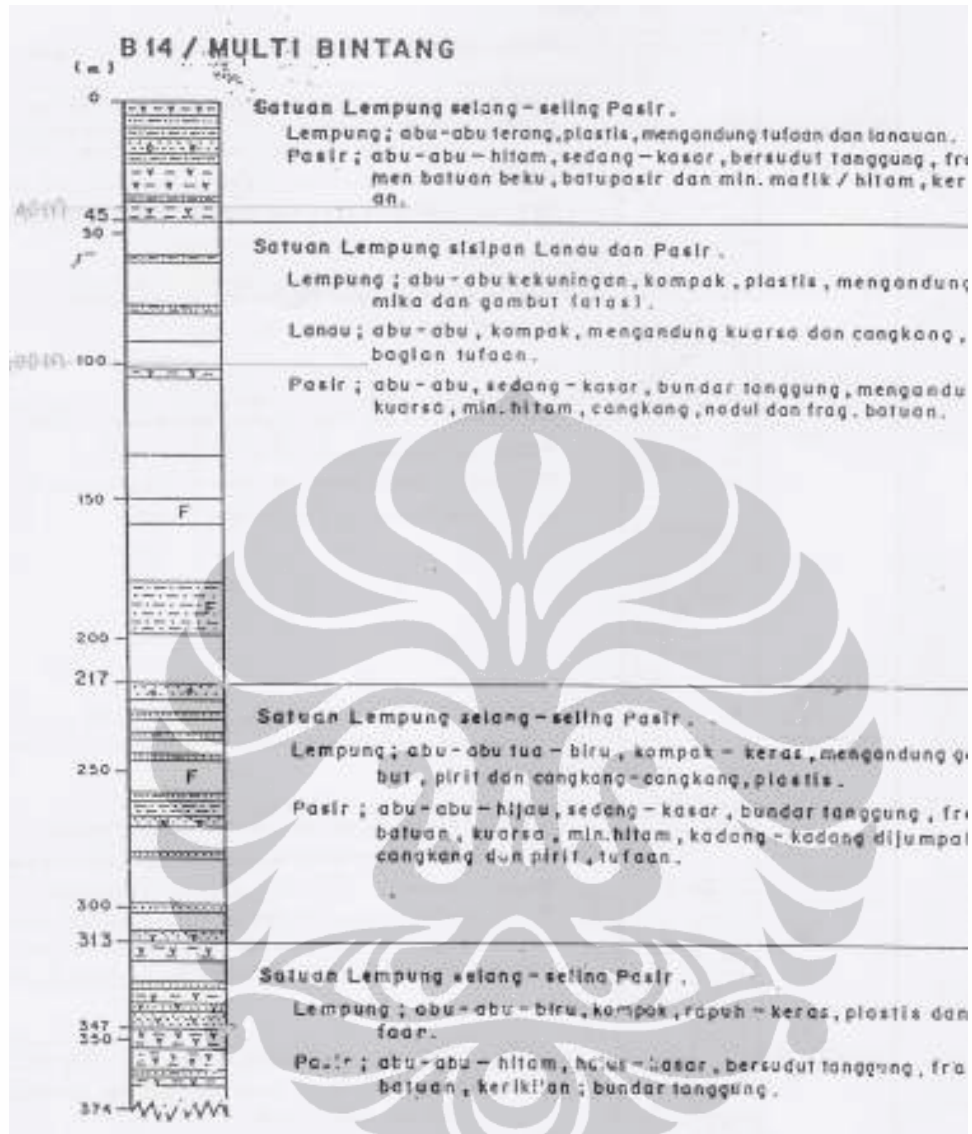
Sumber : DISBANG OKI JAKARTA & LPM-ITB, 1997.



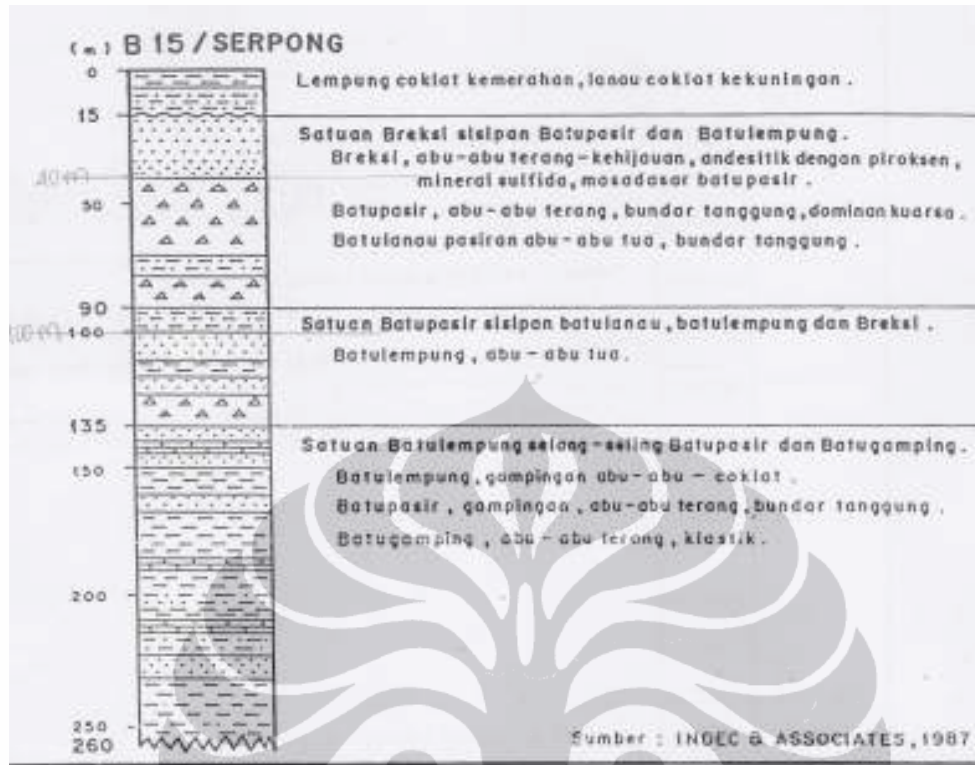
Sumber : PERTAMINA, 1975



Sumber : PERTAMINA , 1989 .

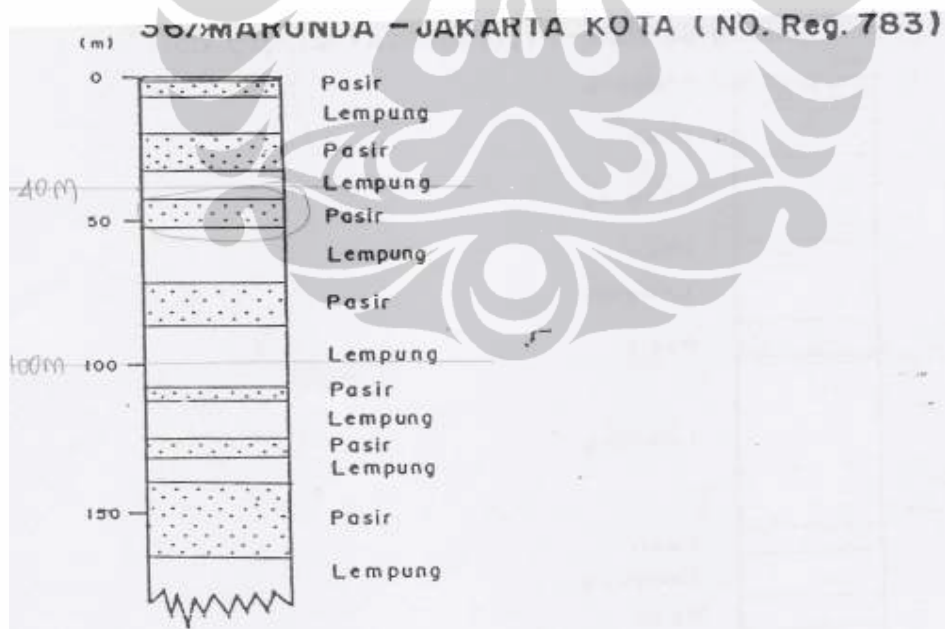


Sumber : IWACO & WASECO , 199



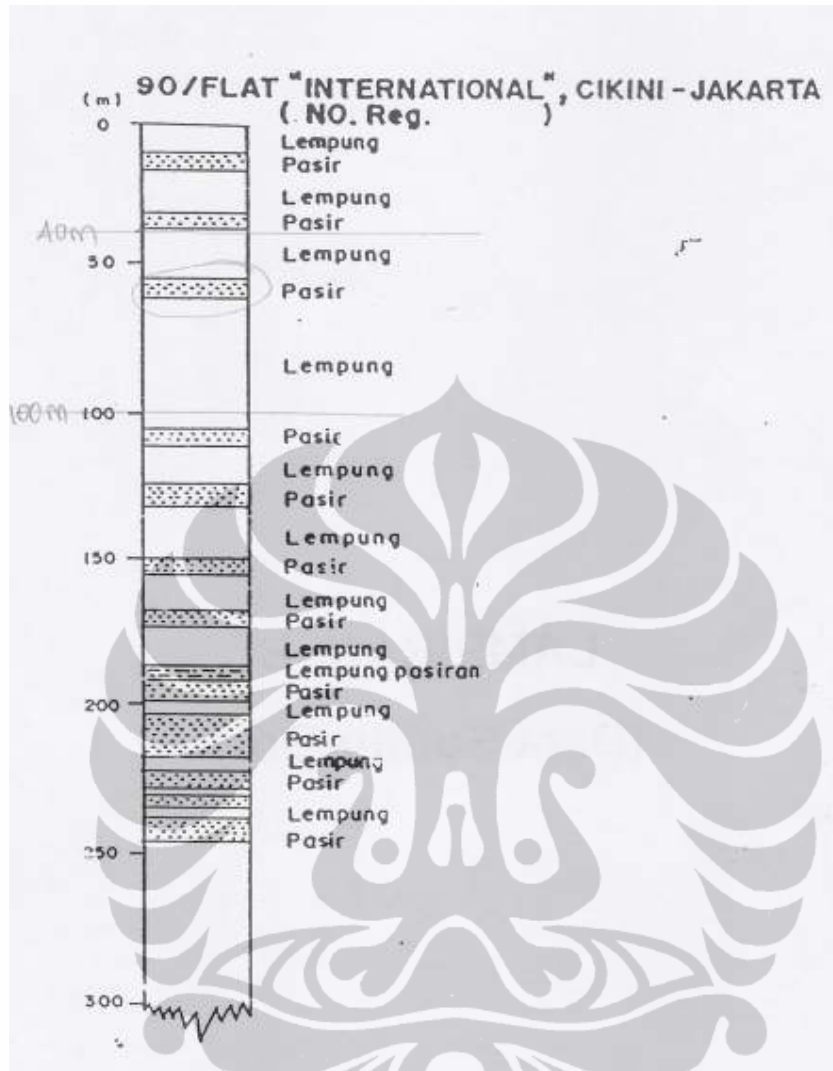


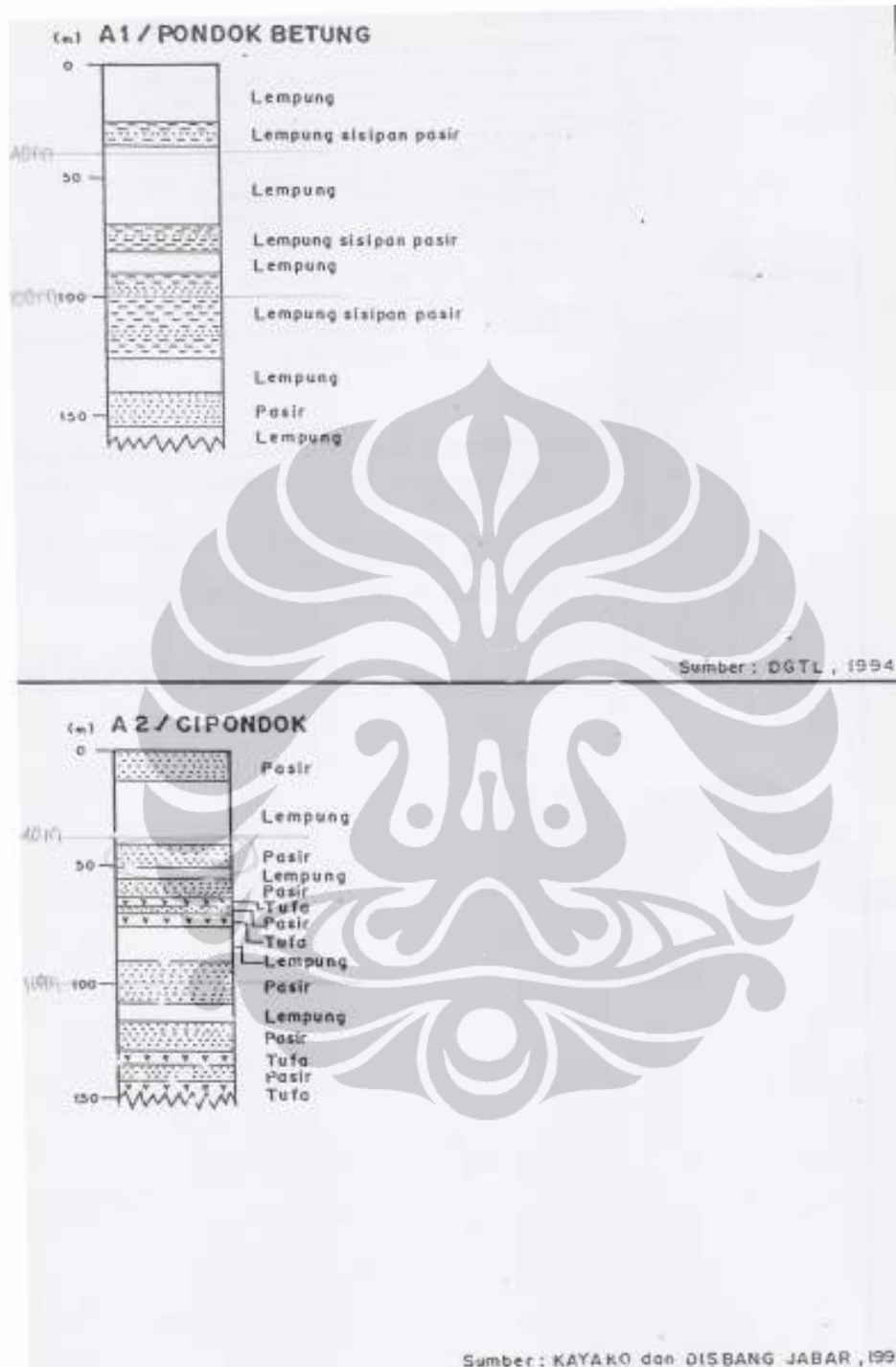
SUMBER : DGTL , 1913

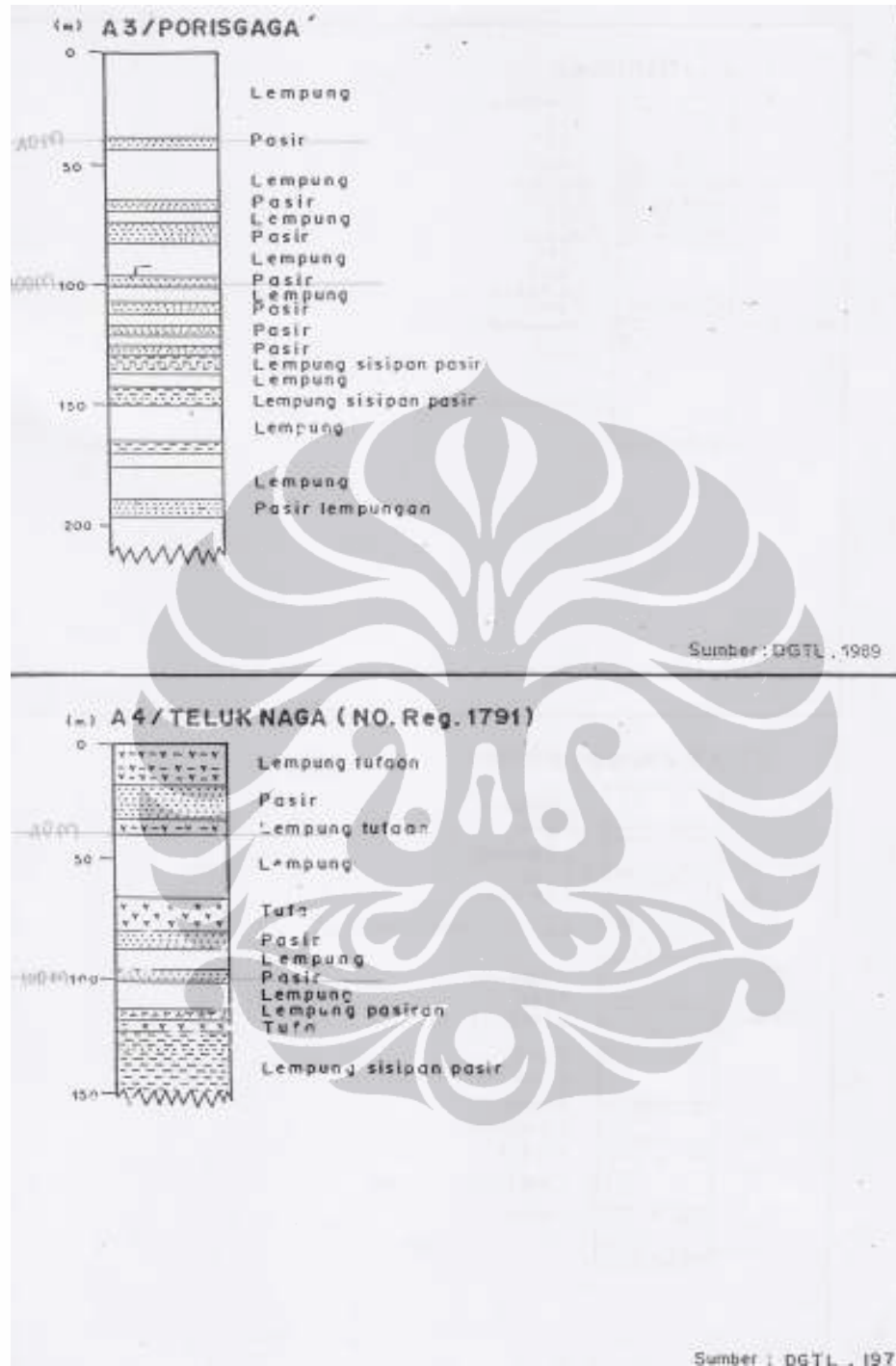


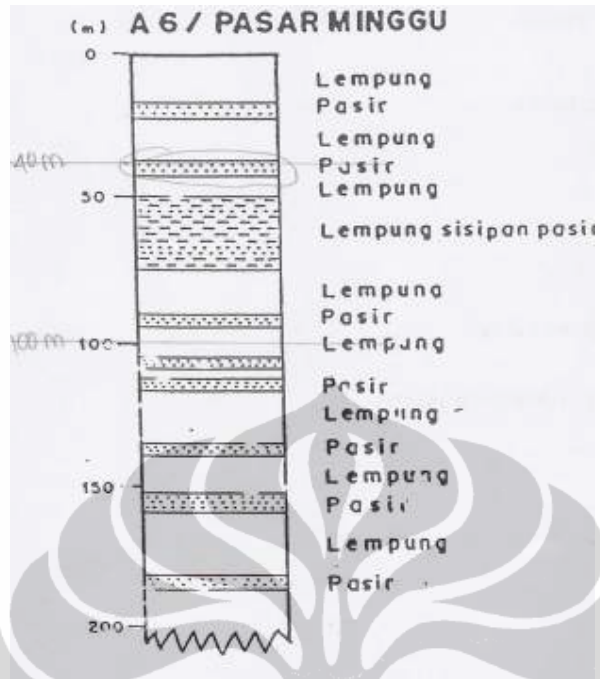
Sumber : DGTL , 1919



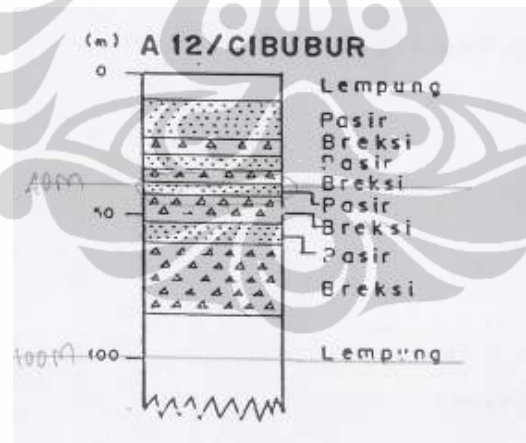




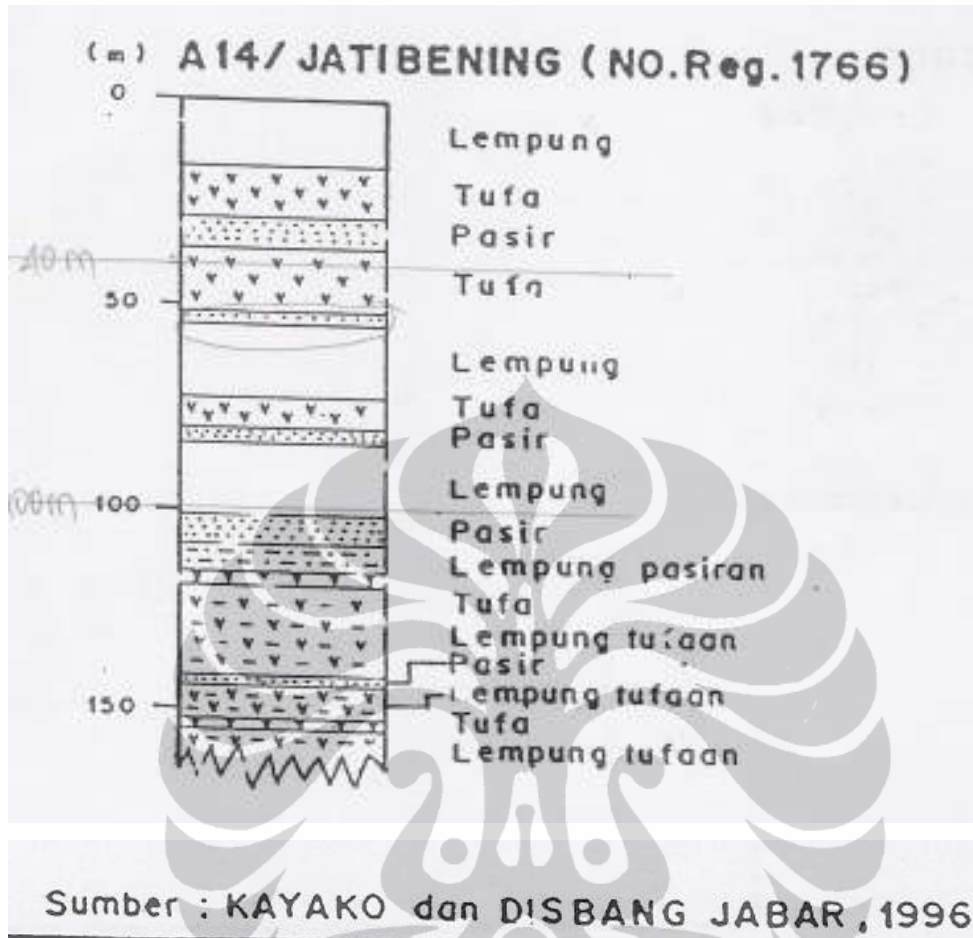


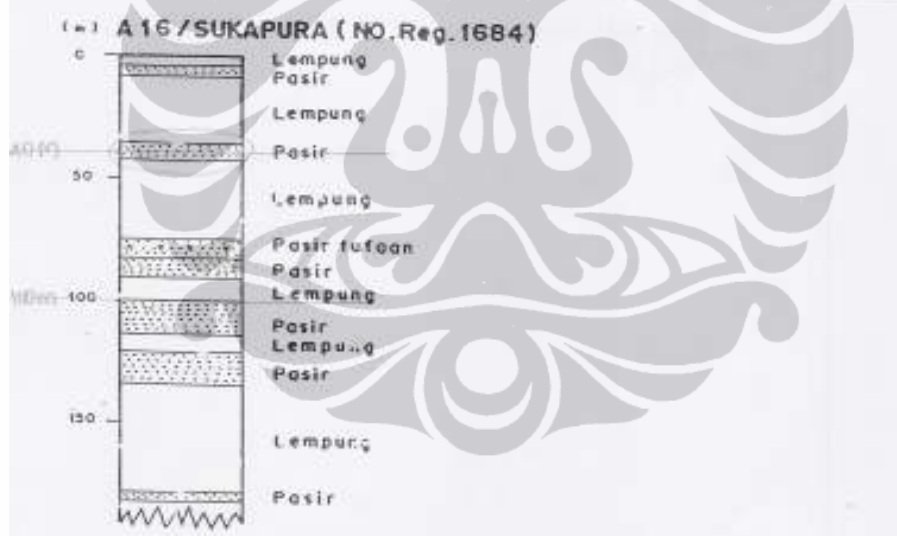
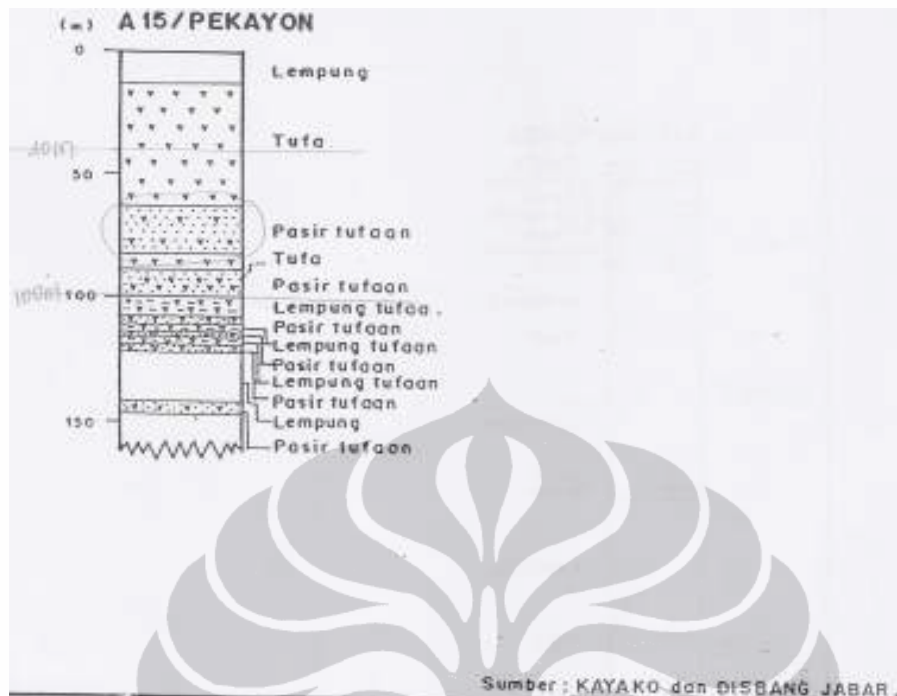


Sumber : DGTL . 1983



Sumber : DGTL





Sumber : DGTL

