



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN FISIK ALIRAN AIR DAN TRANSPOR
PENCEMAR PADA MEDIA BERPORI JENUH
MENGUNAKAN *SEEPAGE TANK***

SKRIPSI

**HERLAMBAANG CIPTA AJI
0806315710**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR
DEPOK
JUNI 2012**

1140/FT.01/SKRIP/07/2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN FISIK ALIRAN AIR DAN TRANSPOR
PENCEMAR PADA MEDIA BERPORI JENUH
MENGUNAKAN *SEEPAGE TANK***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik

**HERLAMBAANG CIPTA AJI
0806315710**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : Herlambang Cipta Aji

NPM : 0806315710

Tanda Tangan : 

Tanggal : 25 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Herlambang Cipta Aji
NPM : 0806315710
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Pemodelan Fisik Aliran Air dan Transpor
Pencemar pada Media Berpori Jenuh
Menggunakan *Seepage Tank*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian dari persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Herr Soeryantono, M.Sc, Ph.D (.....)

Penguji 1 : Ir. Widjojo Adi Prakoso M.Sc, Ph.D (.....)

Penguji 2 : Ir. Ruswan Rasul, MSi (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 25 Juni 2012

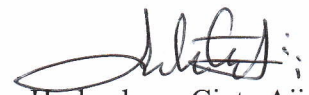
UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur hanya bagi Allah SWT yang karena rahmat-Nya, penulisan skripsi berjudul **“Pemodelan Fisik Aliran Air dan Transpor Pencemar pada Media Berpori Jenuh menggunakan Seepage Tank”** ini dapat terselesaikan. Makalah ini ditulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Bagaimana pun juga, terselesaikannya karya tulis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak yang telah mendukung penulis dari awal hingga akhir, secara sadar maupun tidak. Terima kasih saya ucapkan kepada:

- 1) Ir. Herr Suryantono, M.Sc, Phd. sebagai pembimbing skripsi yang dengan sabar memberikan arahan dan motivasi di tengah kesibukannya;
- 2) Ma'rufi, Nanda, dan Desy, teman-teman yang telah menjadi tiga “tembok besar” yang harus dilampaui, memberi semangat kompetisi, dan membuat suasana kuliah selama satu tahun belakangan terasa menyenangkan;
- 3) Bapak Subagyo dan Mbak Wiwit yang telah rela disibukkan untuk membantu praktikum dan perawatan alat *seepage tank* selama 3 bulan lebih;
- 4) Irvan, Nico, Indra, Febri, Meydam, Lina, Faza, Zidni, Ryan, Sella, Rezki D. N., Asrovi, Crystin, Noni, Akbar, Yuditia, Zahra, Kemal, Nisa, dan Vincent yang telah membantu proses percobaan di laboratorium;
- 5) Seluruh staf pengajar dan karyawan Departemen Teknik Sipil serta teman-teman angkatan 2008 yang telah berhasil membuat kampus terasa seperti rumah;
- 6) Sumpeno dan Handri Anik E., kedua orang tua terbaik yang telah menjadi sebuah “alasan” terkuat untuk menyelesaikan skripsi ini, serta adikku Rani yang bisa menjadi penghibur di kala susah; serta
- 7) Semua pihak telah yang mendukung dan membantu terselesaikannya skripsi ini.

Akhir kata, kiranya Allah memberi balasan terbaik kepada semua pihak yang telah membantu proses pengerjaan skripsi saya. Semoga skripsi ini dapat menjadi salah satu karya yang bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 25 Juni 2012


Herlambang Cipta Aji



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Herlambang Cipta Aji
NPM : 0806315710
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pemodelan Aliran Air dan Transpor Pencemar pada Media Berpori Jenuh
Menggunakan *Seepage Tank*


beserta perangkat yang ada. Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal: 25 Juni 2012

Yang menyatakan


(Herlambang Cipta Aji)

ABSTRAK

Nama : Herlambang Cipta Aji
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Pemodelan Fisik Aliran Air dan Transpor Pencemar pada Media Berpori Jenuh Menggunakan *Seepage Tank*

Hubungan manusia dan sumberdaya air penting dan saling mempengaruhi satu sama lain. Salah satu peristiwa yang perlu mendapat perhatian adalah kontaminasi air tanah melalui dinding sungai. Makalah skripsi ini mengusulkan suatu protokol untuk memodelkan kejadian tersebut menggunakan *seepage tank*. Pemodelan ini meliputi aliran air melalui media berpori pada kondisi steady dan unsteady serta transpor pencemar mekanisme adveksi-dispersi yang terjadi akibat *point-source loading*. Meski demikian, terdapat kekurangan dalam analisa hasil pemodelan ini sehingga dibutuhkan pengembangan yang lebih lanjut.

Kata kunci: pemodelan fisik, seepage tank, aliran air melalui media berpori, *steady*, *unsteady*, adveksi-dispersi

ABSTRACT

Name : Herlambang Cipta Aji
Study Program : Teknik Sipil
Title : Physical Modeling of Flow and Contaminant Transport through Saturated Porous Media Using Seepage Tank

There is a reciprocal interaction between human and groundwater resources in which all components influence each other. Contamination occurred along soil-water interface in a river is an issue that has to be examined. Physical model of flow through porous media and contaminant transport using seepage tank is proposed to help the understanding of the phenomena. This model describes the flow of water through porous media in steady and unsteady condition and also transport of contaminant in advection-dispersion mechanism that happens for point-source loading. Yet, more development is needed to complete the analysis of this model's output.

Keywords: physical model, seepage tank, flow through porous media, steady, unsteady, advection-dispersion

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	3
1.3 Ruang Lingkup Permasalahan	3
1.4 Sistematika Penulisan	4
2. DASAR TEORI	6
2.1 Air Tanah	6
2.2 Persamaan Aliran Air Tanah: <i>Transient Saturated Flow</i>	7
2.3 Transpor Pencemar	9
2.4 Persamaan Transpor Pencemar	9
2.5 Klasifikasi Tanah	11
2.6 Hukum Darcy	12
2.7 Porositas	15
2.8 Konduktivitas Hidrolik	15
2.8.1 Konduktivitas Hidrolik dari Tanah Berlapis	16
2.8.2 Pengujian Konduktivitas Hidrolik	18
2.8.2.1 Pengujian Tinggi Konstan (<i>Constant Head Test</i>)	19
2.8.2.2 Pengujian Tinggi Jatuh (<i>Falling Head Test</i>)	19
2.9 Kompresibilitas	23
2.9.1 Kompresibilitas dari Media Berpori	23
2.9.2 Kompresibilitas dari Air	23
2.10 <i>Specific Yield</i> dari Akifer Tidak Terkekang	23
2.11 Koefisien Dispersi	24
2.12 Jaringan Aliran	26
2.13 <i>Seepage Tank</i>	28
3. METODE PENELITIAN	30
3.1 Pemilihan Pasir sebagai Media Berpori	31
3.2 Pengukuran Karakteristik Sistem Aliran	31
3.2.1 Pengujian Porositas Media Berpori	32
3.2.2 Pengujian Konduktivitas Hidrolik	32
3.2.3 Pengukuran Kompresibilitas Pasir	32
3.2.4 Pengukuran Konsentrasi Larutan Dye	32
3.2.5 Pengukuran Koefisien Dispersi	33

3.3	Pemodelan Aliran Air Tanah dan Transpor Pencemar	33
3.3.1	Persiapan Alat Seepage Tank	33
3.3.2	Mengatur Kondisi Pengaliran untuk Model Aliran Air Tanah <i>Unsteady</i>	34
3.3.3	Pembacaan Manometer untuk Model Aliran Air Tanah <i>Unsteady</i>	34
3.3.4	Mengatur Kondisi Pengaliran <i>Steady</i> untuk Model Transpor Pencemar	34
3.3.5	Memasukkan <i>Dye</i> sebagai Model Pencemar ke Pasir	35
3.3.6	Pengamatan Gradien Konsentrasi <i>Dye</i> Sepanjang Aliran	35
3.4	Algoritma Permodelan Fisik Aliran Air Tanah dan Transpor Pencemar pada Akifer Tak Terkekang Jenuh.....	36
4.	IMPLEMENTASI RENCANA PENELITIAN	38
4.1	Pengecekan Visibilitas Pasir dalam Mengalirkan Larutan <i>Dye</i>	38
4.2	Pengukuran Karakteristik Sistem Aliran	39
4.2.1	Pengujian Porositas Media Berpori	39
4.2.2	Pengujian Konduktivitas Hidrolik	39
4.2.3	Pengukuran Kompresibilitas Pasir	42
4.2.4	Pengukuran Konsentrasi Larutan <i>Dye</i>	43
4.2.5	Pengukuran Koefisien Dispersi	43
4.3	Pemodelan Aliran Air Tanah dan Transpor Pencemar	43
4.3.1	Metode Deposit Pasir	43
4.3.2	Pengaturan Kondisi Batas	44
4.3.3	Pengaturan Tinggi Muka Air di Hulu dan Hilir.....	48
4.3.4	Injeksi larutan <i>dye</i> ke dalam pasir.....	49
4.3.5	Pengamatan data tekanan kondisi <i>steady</i>	51
4.3.6	Pengamatan data tekanan kondisi <i>unsteady</i>	52
4.3.7	Pengamatan Transpor Pencemar.....	52
5.	PELAKSANAAN PEMODELAN ALIRAN AIR DAN TRANSPOR PENCEMAR PADA MEDIA BERPORI JENUH MENGGUNAKAN SEEPAGE TANK.....	54
5.1	Tujuan Percobaan	54
5.2	Alat dan Bahan	54
5.3	Prosedur Percobaan	55
5.3.1	Persiapan	55
5.3.2	Pengamatan data tekanan pada kondisi <i>steady</i>	55
5.3.3	Pengamatan data tekanan pada kondisi <i>unsteady</i>	56
5.3.4	Pengamatan transpor pencemar	56
5.4	Hasil Pengamatan	57
5.4.1	Pengamatan Kondisi <i>Steady</i>	57
5.4.2	Pengamatan Kondisi <i>Unsteady</i>	57
5.4.3	Pengamatan Transpor Pencemar.....	57
5.5	Pengolahan Data	59
5.5.1	Distribusi Tekanan dan Garis Aliran Kondisi Pertama	59
5.5.2	Distribusi Tekanan dan Garis Aliran Kondisi Kedua.....	59
5.5.3	Kecepatan Transpor Pencemar	59

5.6 Analisa	60
5.6.1 Analisa Praktikum.....	60
5.6.2 Analisa Hasil.....	62
5.6.3 Analisa Kesalahan.....	63
6. PENUTUP	64
6.1 Kesimpulan	64
6.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA.....	66

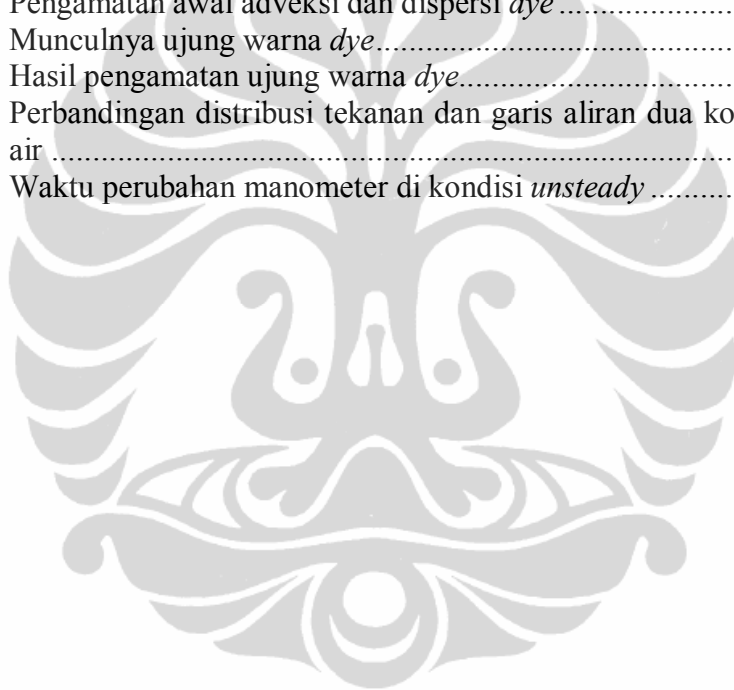


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Distribusi air di bawah permukaan tanah	6
Gambar 2.2	Control volume elemental untuk aliran melalui media berpori	7
Gambar 2.3	(a) Peristiwa adveksi-dispersi	9
Gambar 2.3	(b) Peristiwa adveksi	9
Gambar 2.4	Keseimbangan massa pada transport pencemar.....	10
Gambar 2.5	Kurva distribusi ukuran partikel	12
Gambar 2.6	Percobaan Darcy	13
Gambar 2.7	...Konduktivitas hidrolik ekuivalen pada aliran horisontal melalui tanah berlapis	17
Gambar 2.8	Konduktivitas hidrolik ekuivalen pada aliran vertikal melalui tanah berlapis	18
Gambar 2.9	Percobaan <i>constant head test</i>	21
Gambar 2.10	Percobaan <i>falling head test</i>	22
Gambar 2.11	Ilustrasi <i>specific yield</i> pada akifer tidak terkekang	24
Gambar 2.12	Pengujian koefisien dispersi	25
Gambar 2.13	Grafik C/C_0 terhadap $(U-1)/U_0.5$	26
Gambar 2.14	Jaringan Aliran.....	27
Gambar 2.15	Peralatan <i>seepage tank</i>	29
Gambar 3.1	Pengaturan alat <i>seepage tank</i>	30
Gambar 3.2.	Algoritma pemodelan.....	37
Gambar 4.1	Pengecekan visibilitas pasir	38
Gambar 4.2	Sampel pasir dalam <i>mould permeability</i>	40
Gambar 4.3	Selang untuk mengalirkan air ke <i>mould</i>	41
Gambar 4.4	Selang terhubung dengan reservoir atas.....	41
Gambar 4.5	Pengukuran debit air yang keluar	41
Gambar 4.6	Penumbukan pasir dengan beban cincin 1 kg.....	44
Gambar 4.7	Distribusi tekanan untuk <i>head</i> hulu 39 cm dan <i>head</i> hilir 32,5 cm, <i>permeable boundary</i>	45
Gambar 4.8	<i>Equipotential line</i> untuk kondisi batas lolos air.....	45
Gambar 4.9	Distribusi tekanan untuk <i>head</i> hulu 39 cm dan <i>head</i> hilir 32,5 cm, <i>impermeable boundary</i>	46
Gambar 4.10	<i>Equipotential line</i> untuk kondisi batas tidak lolos air	46
Gambar 4.11	.Gerusan di awal pengisian air	47
Gambar 4.12	.Air mulai berbalik ke arah pembatas	47
Gambar 4.13	.Rangkaian alat injeksi <i>dye</i>	49
Gambar 4.14	.Ilustrasi metode injeksi larutan <i>dye</i>	50
Gambar 4.15	.Larutan <i>dye</i> tidak dapat masuk akibat tekanan yang terlalu besar	51
Gambar 4.16	Gelembung udara terperangkap dalam manometer	52
Gambar 5.1	Pengamatan perjalanan ujung warna <i>dye</i>	58
Gambar 5.2	Distibusi tekanan dan garis aliran kondisi pertama	59
Gambar 5.3	Distibusi tekanan dan garis aliran akhir kondisi kedua.....	59
Gambar 5.4	Grafik jarak terhadap waktu tempuh ujung pencemar	60

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Distribusi ukuran partikel	11
Tabel 2.2.	Rentang nilai permeabilitas	15
Tabel 2.3.	Konduktivitas hidrolis menurut Casagrande	16
Tabel 2.4.	Konduktivitas hidrolis menurut Wesley pada suhu standar (20 ⁰ C)	16
Tabel 4.1	Data sampel pasir	40
Tabel 4.2	Hasil pengukuran debit.....	41
Tabel 5.1	Bacaan manometer kondisi steady	57
Tabel 5.2	Waktu perubahan manometer hingga stabil (dalam detik).....	57
Tabel 5.3	Bacaan akhir manometer (dalam cm).....	57
Tabel 5.4	Bacaan manometer untuk transpor pencemar	58
Tabel 5.5	Pengamatan awal adveksi dan dispersi <i>dye</i>	58
Tabel 5.6	Munculnya ujung warna <i>dye</i>	58
Tabel 5.7	Hasil pengamatan ujung warna <i>dye</i>	60
Tabel 5.8	Perbandingan distribusi tekanan dan garis aliran dua kondisi muka air	62
Tabel 5.9	Waktu perubahan manometer di kondisi <i>unsteady</i>	62



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kegiatan produksi dan konsumsi yang dilakukan manusia telah mempengaruhi kondisi lingkungan di sekitarnya. Termasuk sumber daya air, yang dengannya manusia terus berinteraksi. Perubahan kualitas dan kuantitas air akibat kegiatan manusia hingga saat ini telah menjadi masalah yang populer mengingat besarnya dampak yang bisa muncul dari hal ini.

Salah satu permasalahan sumber daya air akibat aktivitas manusia adalah pencemaran badan air permukaan oleh limbah. Pencemaran air permukaan ini dapat berasal dari tingginya kandungan sedimen yang berasal dari (1) erosi, kegiatan pertanian, penambangan, konstruksi, pembukaan lahan, dan aktivitas lain; (2) limbah organik dari manusia, hewan, dan tanaman; (3) kecepatan pertambahan senyawa kimia yang berasal dari aktivitas industri yang membuang limbahnya ke perairan (Hendrawan, 2005). Menurut penilaian IKA (Indeks Kualitas Air) yang mewakili parameter fisika, kimia, dan biologi pada sungai dan situ DKI Jakarta pada tahun 2005, diketahui bahwa 83% sungai dan 79% situ yang ada berada pada kondisi yang buruk.

Pencemaran air di badan sungai tidak hanya mempengaruhi kualitas air di sungai saja, tetapi juga kualitas air tanah. Hal ini terjadi terutama di sungai alami pada daerah dataran rendah yang dindingnya masih berupa tanah. Air sungai yang tercemar dapat masuk ke dalam tanah ketika muka air sungai lebih tinggi daripada muka air tanah. Hal ini tentu menjadi berbahaya mengingat menyebarnya pencemar pada sistem air tanah secara kasat mata tidak terlihat namun dampaknya dapat dirasakan secara nyata.

Untuk dapat meminimalisasi efek dari pencemaran air tanah akibat kontak dengan badan sungai yang tercemar, perlu ada pencegahan dan pengendalian terhadap sumber pencemar maupun mekanisme transpornya. Pencegahan dan pengendalian pada sumber pencemar dapat dilakukan dengan mengurangi masukan pencemar yang masuk ke sungai, sementara pengendalian terhadap mekanisme transpor pencemar dapat dilakukan dengan melakukan

tindakan-tindakan rekayasa guna mencegah pencemar menyebar ke wilayah yang lebih luas. Agar dapat melakukan pengendalian dan pencegahan yang sesuai, diperlukan adanya pemahaman mengenai rembesan dan transpor pencemar di dalam sistem air tanah.

Ada berbagai kondisi yang menyebabkan terjadinya peristiwa aliran air dan transpor pencemar dalam air tanah. Untuk itu perlu diketahui terlebih dahulu batasan-batasan mengenai jenis pencemar yang akan ditinjau beserta sudut pandang yang digunakan dalam mengamati alirannya.

Materi-materi yang dalam pergerakannya tidak mengalami perubahan struktur kimia mengalir dalam tanah melalui mekanisme adveksi dan dispersi. Dalam mekanisme adveksi, massa pencemar mengalir sesuai arah aliran air dalam tanah. Dan dengan adanya peristiwa dispersi, konsentrasi pencemar dalam alirannya kemudian terpecah ke arah longitudinal dan transversal aliran sehingga menimbulkan perubahan konsentrasi terhadap ruang dan waktu. Aliran yang terjadi dalam peristiwa transpor pencemar dari sungai ke air tanah melalui dinding sungai ini bergerak secara dua dimensi. Pencemar bergerak ke arah tegak lurus aliran sungai akibat resapan tanah dan ke bawah akibat pengaruh gravitasi.

Pemahaman mengenai aliran dan transpor pencemar dalam air tanah tidak mudah didapatkan. Air tanah, sebagai suatu sumber daya alam, memiliki sifat yang kompleks dan melibatkan banyak variabel. Untuk itu diperlukan adanya model yang dapat menyederhanakan kejadian dalam sistem air tanah. Dengan pemodelan, pemahaman mengenai hubungan antar parameter menjadi lebih jelas dan prediksi pun dapat dilakukan tanpa harus melakukan pengujian secara langsung di lapangan. Berbagai macam model dapat dibuat untuk menggambarkan aliran dan transpor pencemar dalam air tanah, begitu pula dengan metode analisa yang digunakan. Secara garis besar, ada dua model yang dapat dibuat: model matematis yang diwujudkan dalam program komputer dan model fisik yang diwujudkan melalui percobaan.

Pemodelan fisik dengan *Seepage Tank* merupakan suatu bentuk metode yang belum banyak ditemukan dalam pembelajaran air tanah karena adanya kesulitan dalam memperoleh kondisi yang dapat mewakili keadaan sesungguhnya. Masukan atau perlakuan yang diberikan harus dapat menghasilkan respon sesuai

dengan prediksi-prediksi matematis yang sudah lebih dahulu di sepakati. Karena itu diperlukan adanya kontrol terhadap lingkungan dari peralatan, media berpori yang digunakan, dan masukan yang diberikan. Setelah semua itu tercapai, kesulitan berikutnya yang muncul adalah bagaimana memastikan pengamatan yang dilakukan melalui alat tersebut dapat digunakan untuk berbagai kasus lain yang memiliki kondisi batas (*boundary condition*) berbeda.

Melihat tantangan-tantangan yang ada, penulis merasa perlu adanya suatu prosedur operasional standar yang dapat digunakan dalam memodelkan aliran dan transpor pencemar dalam air tanah secara fisik. Dalam karya tulis ini akan dibuat suatu percobaan dari aliran dan transpor pencemar dalam air tanah menggunakan *Seepage Tank* yang dapat menyederhanakan pemahaman mengenai karakter air tanah sekaligus menjadi pembanding bagi model-model matematik yang sudah ada. Dengan terlebih dahulu mempersiapkan alat agar dapat menggambarkan berbagai parameter aliran dan berbagai kasus yang mungkin terjadi, diharapkan dapat diperoleh suatu standar untuk dapat merepitasi sekaligus menduplikasi percobaan mengenai aliran dan transpor pencemar dalam air tanah.

1.2 Tujuan

Tujuan dari karya tulis ini adalah:

1. Mendapatkan prosedur standar untuk mensimulasi secara fisik aliran air dan transpor pencemar pada media berpori jenuh menggunakan peralatan *Seepage Tank*.
2. Mensimulasi dinamika tekanan hidrolik (*hydraulic head*) di berbagai titik akibat perubahan tekanan hidrolik pada kondisi batas media berpori jenuh menggunakan peralatan *Seepage Tank*.
3. Memodelkan fungsi konsentrasi terhadap jarak dan waktu dalam kejadian transpor pencemar pada media berpori jenuh akibat *point source loading* menggunakan peralatan *Seepage Tank*.

1.3 Ruang Lingkup Permasalahan

Untuk menyederhanakan pembahasan, dalam karya tulis ini dibuat batasan-batasan masalah sesuai tujuan yang ingin dicapai sebagai berikut:

1. Percobaan menggunakan peralatan *Seepage Tank* untuk memodelkan aliran dan transpor pencemar pada media berpori jenuh.
2. Aliran air yang dimodelkan berada pada kondisi pengaliran tak-tunak (*unsteady*) dan bergerak dalam arah dua dimensi tanpa adanya perubahan massa jenis.
3. Mekanisme transpor pencemar yang dimodelkan merupakan peristiwa adveksi dan dispersi dan berada pada kondisi pengaliran tunak (*steady*).

1.4 Sistematika Penulisan

BAB 1 : PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian mengenai latar belakang, deskripsi permasalahan, tujuan penelitian, ruang lingkup permasalahan, dan sistematika penulisan.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini dibahas teori-teori dasar dari air tanah, persamaan aliran air tanah dan transpor pencemar, parameter-parameter dalam aliran air pada media berpori dan transpor pencemar, serta alat yang digunakan dalam pengamatan.

BAB 3 : METODE PENELITIAN

Membahas rancangan langkah-langkah yang akan diambil dalam kegiatan hingga diperoleh suatu prosedur pemodelan aliran air tanah dan transpor pencemar pada media berpori jenuh menggunakan peralatan *seepage tank*.

BAB 4 : IMPLEMENTASI RENCANA PENELITIAN

Menjelaskan pelaksanaan, hasil, dan kendala dalam pelaksanaan rancangan penelitian yang dilakukan untuk memperoleh prosedur pemodelan fisik.

BAB 5 : PELAKSANAAN PEMODELAN ALIRAN AIR DAN TRANSPOR PENCEMAR PADA MEDIA BERPORI JENUH MENGGUNAKAN *SEEPAGE TANK*

Memberikan prosedur pemodelan fisik menggunakan *seepage tank* beserta pembahasan suatu kasus aliran air dan transpor pencemar pada media berpori.

BAB 6 : PENUTUP

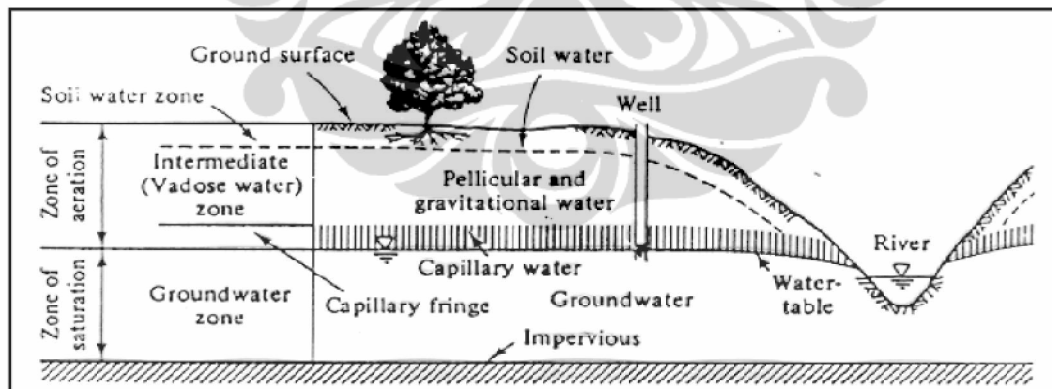
Berisi kesimpulan dari kegiatan yang sudah dilakukan, jawaban dari tujuan penelitian, dan saran untuk pengembangan lebih lanjut.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Air Tanah

Keberadaan air di dalam tanah dapat dibagi menjadi beberapa lapisan seperti yang terlihat pada gambar 2.1. Pertama, *soil water zone*, yaitu lapisan yang paling dekat dengan permukaan tanah dan memiliki kandungan air yang jumlahnya sangat bergantung pada curah hujan dan infiltrasi. Kedua, *vadose zone*, yang merupakan lapisan yang terletak di atas muka air tanah. Munculnya kandungan air di zona ini terjadi akibat gaya higroskopis dan gaya kapiler dari air tanah di bawahnya. Tebal zona kapiler (*capillary zone/fringe*) berbanding terbalik dengan ukuran pori tanah dan berbanding lurus dengan tegangan permukaan (*surface tension*) air di bawahnya. Kedua lapisan tersebut di atas disebut juga sebagai zona aerasi dan merupakan lapisan tidak jenuh air (*unsaturated zone*). Lapisan ketiga, adalah *groundwater zone*, yang merupakan lapisan jenuh air (*saturated zone*) dan berada di bawah muka air tanah. Di lapisan ini lah pengambilan air tanah dengan sumur dilakukan.



Gambar 2.1. Distribusi air di bawah permukaan tanah

Sumber: Bear (1979)

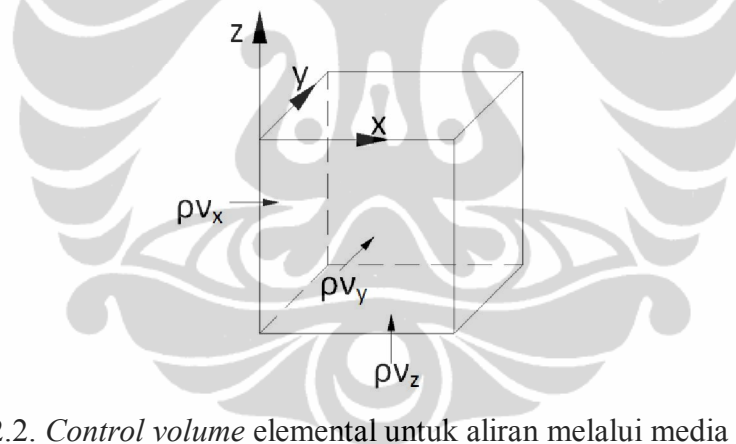
Akifer didefinisikan sebagai suatu formasi tanah yang mengandung cukup banyak material lolos air (permeabel) untuk dapat menghasilkan air dalam jumlah yang signifikan bagi sumur dan mata air (Bedient, Rifai, & Newell, 1994).

Akifer terbagi menjadi dua, yaitu akifer tidak terkekang (*unconfined aquifer*) dan akifer terkekang (*confined aquifer*). Akifer tidak terkekang adalah zona air tanah yang berada di atas lapisan kedap air dan membentuk muka air tanah di atasnya. Akifer terkekang adalah zona air tanah yang dibatasi oleh dua lapisan kedap air di atas dan bawahnya.

2.2 Persamaan Aliran Air Tanah: *Transient Saturated Flow*

Hukum kekekalan massa untuk aliran tak tunak (*unsteady*) pada kondisi tanah jenuh (*saturated*) menyatakan bahwa jumlah massa yang masuk dan keluar dari suatu *control volume* sama dengan perubahan massa tumpangan dari *control volume* tersebut.

Persamaan massa untuk aliran tak tunak pada akifer terkekang jenuh adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2. *Control volume* elemental untuk aliran melalui media berpori

Sumber: Bedient, et al (1994)

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = n \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2.1)$$

dengan

ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)

v : kecepatan aliran (m/s)

n : porositas

Suku pertama dari persamaan di sisi kanan, $\left(n \frac{\partial \rho}{\partial t}\right)$, menunjukkan peristiwa berubahnya massa akibat perubahan massa jenis air ρ per satuan waktu

sementara suku kedua, $\left(\rho \frac{\partial n}{\partial t}\right)$, menunjukkan peristiwa berubahnya massa akibat perubahan porositas n per satuan waktu. Suku pertama dipengaruhi oleh kompresibilitas fluida β dan suku kedua dipengaruhi oleh kompresibilitas tanah atau media berpori α .

Persamaan tersebut kemudian disederhanakan dengan pemahaman bahwa perubahan ρ dan n dipengaruhi oleh perubahan tekanan hidrolik h dan bahwa volume air yang dihasilkan dari kedua mekanisme per satuan tekanan dapat dinyatakan sebagai S_s , *specific storage*, yang dirumuskan dengan $S_s = \rho g(\alpha + n\beta)$. Diperoleh persamaan

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.2)$$

Dengan penurunan parsial $\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} = \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x}$, ditemukan bahwa $\rho \frac{\partial v_x}{\partial x} \gg v_x \frac{\partial \rho}{\partial x}$ dan begitu pula untuk sumbu y dan sumbu z . Persamaan lalu dirubah menjadi:

$$-\rho \frac{\partial v_x}{\partial x} - \rho \frac{\partial v_y}{\partial y} - \rho \frac{\partial v_z}{\partial z} = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.3)$$

Sesuai Hukum Darcy, $v_x = K_x \frac{\partial h}{\partial x}$ dengan K_x adalah konduktivitas tanah pada arah x , maka didapat persamaan aliran transien air tanah pada akifer terkekang sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.4)$$

atau

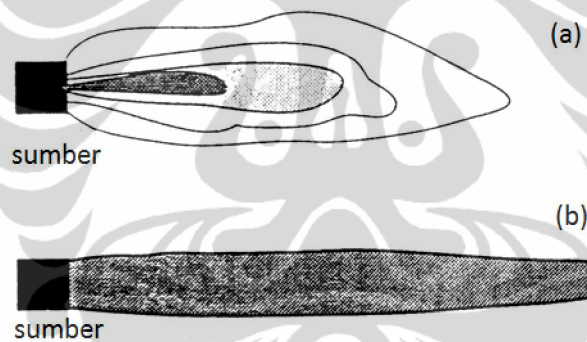
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.5)$$

Untuk akifer tidak terkekang, ruas kanan persamaan ini dinyatakan dalam *Specific Yield* S_y , sehingga menjadi

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.6)$$

2.3 Transpor Pencemar

Menurut Bedient, Rifai, & Newell (1994), mekanisme transpor pencemar yang menjadi perhatian utama pada pembahasan air tanah adalah adveksi, dispersi, adsorpsi, biodegradasi, dan reaksi kimia. Adveksi adalah Bergeraknya pencemar bersama aliran air tanah dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan aliran tersebut. Difusi adalah transpor massa molekular yang membuat padatan berpindah dari tempat dengan konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah. Dispersi adalah proses gabungan yang terjadi akibat perbedaan kecepatan rembesan pada media berpori. Pada peristiwa dispersi, terjadi penyebaran konsentrasi pada tepi pencemar yang bergerak. Adsorpsi adalah terurainya pencemar dari larutan asal yang kemudian masuk ke dalam matriks tanah. Biodegradasi adalah perubahan senyawa organik menjadi CO₂ dan air akibat aktivitas mikroba dalam tanah.



Gambar 2.3. (a) Peristiwa adveksi-dispersi, dan (b) Peristiwa adveksi

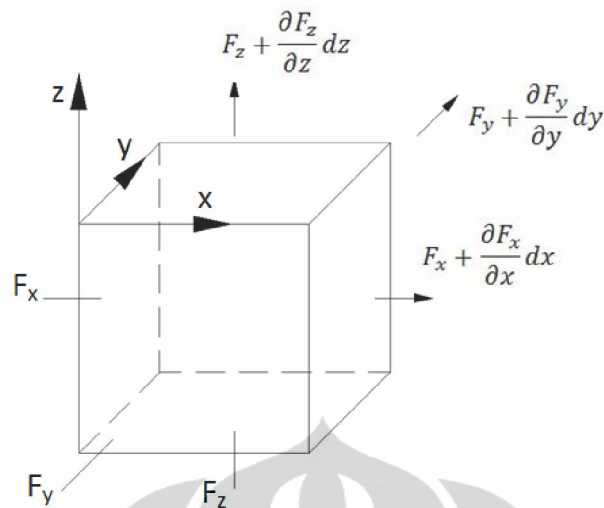
Sumber: Bedient, et al (1994)

2.4 Persamaan Transpor Pencemar: *Advection-Dispersion Equations*

Hukum kekekalan massa yang berlaku dalam transpor pencemar adalah

$$\begin{array}{ccccccc} \text{perubahan massa} & & \text{fluks larutan} & & \text{fluks larutan} & & \text{Perubahan} \\ \text{larutan dalam} & = & \text{keluar } control & + & \text{masuk } control & \pm & \text{akibat reaksi-} \\ \text{control volume} & & \text{volume} & & \text{volume} & & \text{reaksi tertentu} \end{array}$$

Proses fisik yang berpengaruh pada fluks keluar dan masuk control volume adalah peristiwa adveksi dan dispersi, sementara perubahan akibat reaksi kimia dipengaruhi oleh peristiwa biodegradasi atau reaksi kimia.



Gambar 2.4. Keseimbangan massa pada transport pencemar

Sumber: Bedient, et al (1994)

$$\text{Transpor massa pencemar akibat adveksi} = \bar{v} nC dA \quad (2.7)$$

$$\text{Transpor massa pencemar akibat dispersi} = nD_l \frac{\partial C}{\partial t} dA \quad (2.8)$$

D_l merupakan koefisien dispersi pada arah longitudinal aliran, $D_l = \alpha_l \bar{v} + D^*$. Nilai α_l adalah properti fisik dari media berpori yang disebut sebagai *dispersivity* (L) sementara D^* adalah *coefficient of molecular diffusion* dari larutan dalam media berpori (L^2/T).

F_x , F_y , dan F_z merupakan total massa larutan per satuan luas yang bergerak akibat peristiwa adveksi dan dispersi.

$$\begin{aligned} F_x &= \bar{v}_x nC - nD_x \frac{\partial C}{\partial x} \\ F_y &= \bar{v}_y nC - nD_y \frac{\partial C}{\partial y} \\ F_z &= \bar{v}_z nC - nD_z \frac{\partial C}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Karena pencemar yang masuk dianggap non reaktif, maka selisih antara massa yang masuk dan keluar dari *control volume* sama dengan jumlah kandungan larutan yang terjadi dalam *control volume* tersebut. Persamaan massa yang terjadi adalah

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = -n \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\left[D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] - \left[\bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial C}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial C}{\partial z} \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.11)$$

2.5 Klasifikasi Tanah

Menurut ukuran partikelnya, British Standard mengklasifikasikan tanah menjadi lima: lempung, lanau, pasir, kerikil, *cobbles*, dan *boulders*. Rentang ukuran partikel menurut BS diberikan oleh gambar berikut:

Tabel 2.1. Distribusi ukuran partikel

Lempung	Lanau			Pasir			Kerikil			Cobbles	Boulders
	Halus	Medium	Kasar	Halus	Medium	Kasar	Halus	Medium	Kasar		
0.001	0.002	0.006	0.02	0.06	0.2	0.6	2	6	20	60	200
		0.01		0.1		1		10		100	

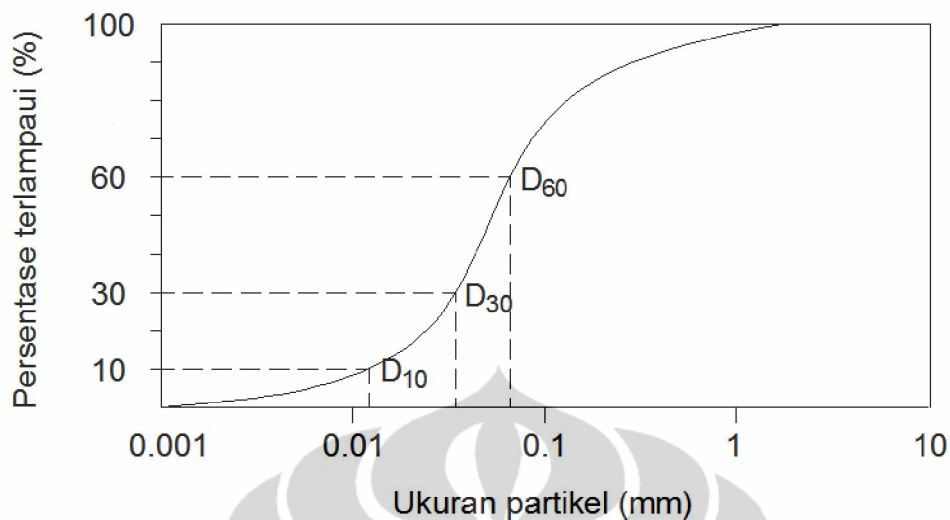
Sumber: Craig (1991)

Kebanyakan jenis tanah terdiri dari campuran beberapa ukuran dan biasanya lebih dari dua rentang ukuran (Craig, 1991). Dalam analisa distribusi ukuran partikel tanah, dilakukan penentuan persentase berat partikel dalam rentang ukuran yang berbeda. Distribusi ukuran tanah berbutir kasar ditentukan melalui metode pengayakan, sementara distribusi ukuran tanah berbutir halus ditentukan melalui metode pengendapan.

Distribusi ukuran partikel dapat digambarkan di atas kertas semi logaritmik dengan sumbu ordinatnya adalah persentase berat partikel yang lebih kecil daripada ukuran absisnya yang diketahui. Semakin landai kurva distribusi, semakin besar rentang distribusinya. Sementara semakin curam kurvanya, semakin kecil rentang distribusinya.

Secara umum tanah bergradasi baik diwakili oleh kurva distribusi yang cembung dan mulus (Craig, 1991). Sementara tanah bergradasi buruk ditandai dengan ukuran partikel yang seragam atau dengan adanya lompatan (gap) pada distribusi ukuran partikelnya.

Ukuran partikel tanah yang memiliki persentase lebih kecil dari suatu angka yang ditinjau dinyatakan sebagai D_x . Sebagai contoh, D_{10} menyatakan ukuran partikel tanah yang memiliki persentase lebih kecil daripada 10% total tanah.



Gambar 2.5. Kurva distribusi ukuran partikel

Parameter penting dalam kurva distribusi ukuran adalah koefisien keseragaman ($C_u = \text{coefficient of uniformity}$) dan koefisien kelengkungan ($C_c = \text{coefficient of curvature}$). Semakin besar nilai C_u , semakin besar rentang distribusi partikel tanah. Tanah bergradasi baik biasanya memiliki nilai C_c antara 1 sampai 3. Nilai kedua koefisien ini masing-masing adalah

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.12)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}} \quad (2.13)$$

2.6 Hukum Darcy

Aliran air tanah melalui media dapat dijelaskan melalui Hukum Darcy. Hukum Darcy menyatakan bahwa debit aliran melalui media berpori berbanding lurus dengan kehilangan energi yang terjadi dan berbanding terbalik dengan panjang lintasannya. Secara matematis, Hukum Darcy dituliskan sebagai

$$Q = A * K \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (2.14)$$

dengan

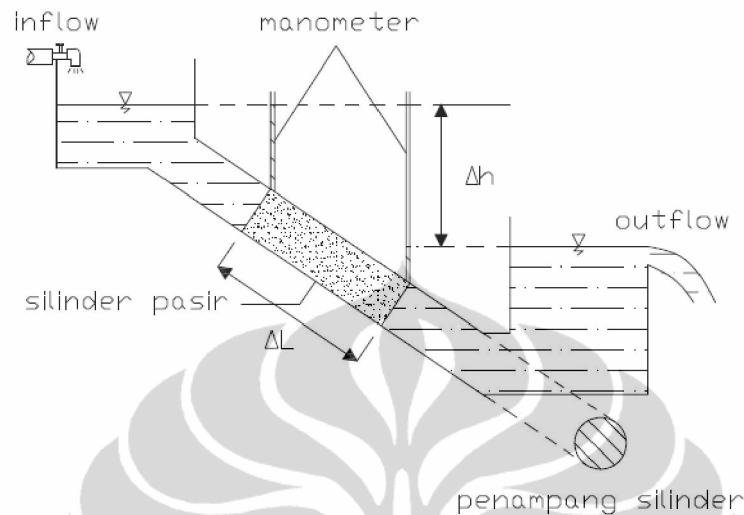
Q = debit aliran (m^3/s)

A = luas penampang yang dilalui aliran (m^2)

K = konduktivitas hidrolik dari media berpori, berupa konstanta (m/s)

Δh = besarnya kehilangan energi (m)

ΔL = panjang lintasan aliran air (m)



Gambar 2.6. Percobaan Darcy

Sumber: Instruction Manual Seepage Tank (Armfield, Ltd, 1995)

Energi yang diwakilkan oleh variabel h merupakan energi total yang terdiri atas tekanan pori, kecepatan aliran, dan elevasi.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (2.15)$$

dengan

h = tekanan hidrolik/*hydraulic head* (m)

u = tekanan air pori (N/m^2)

γ_w = berat jenis air (N/m^3)

v = kecepatan aliran air (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

z = elevasi (m)

Rasio $\frac{\Delta h}{\Delta L}$ dalam persamaan (2.3) disebut sebagai gradien hidrolik (i) dan merupakan kemiringan dari garis energi antara dua titik pengamatan. Sementara K merupakan konstanta proporsionalitas pada aliran melalui media berpori, disebut sebagai konduktivitas hidrolik dan nilainya tergantung dari jenis media berpori serta fluida yang melewatinya. Dimensi dari konduktivitas hidrolik sama dengan dimensi kecepatan, yaitu LT^{-1} .

Pada skala mikroskopis, aliran air dalam tanah mengikuti suatu alur yang berliku di antara partikel-partikel tanah, tetapi secara makroskopis, untuk pengamatan aliran satu dimensi, alur tersebut dapat dianggap sebagai garis lurus. Besarnya kecepatan rata-rata aliran air ke pori-pori tanah dapat dihitung dengan membagi volume aliran per satuan waktu dengan luas rata-rata pori-pori (A_v) pada potongan melintang normal terhadap arah aliran. Kecepatan ini disebut kecepatan rembesan (seepage velocity; v_s) (Craig, 1991).

$$Q = A_v * v_s \quad (2.16)$$

bila diketahui $A = A_v + A_s$

dan $Q = A * v$;

$$\text{maka } A_v * v_s = (A_v + A_s) * v \quad (2.17)$$

dengan

A = luas penampang total media berpori (m^2)

A_v = luas pori dalam penampang media berpori (m^2)

A_s = luas partikel padat dalam penampang media berpori (m^2)

v = kecepatan debit (*discharge velocity*) (m/s)

v_s = kecepatan rembesan (m/s)

Kecepatan rembesan jika dinyatakan dengan porositas dapat berubah menjadi persamaan baru tanpa adanya variabel luas penampang.

Diketahui porositas

$$n = \frac{v_v}{v} \quad (2.18)$$

dan dinyatakan sebagai

$$n = \frac{A_v}{A}$$

$$v_s = \frac{Q}{A_v}$$

$$v_s = \frac{Q}{n * A} = \frac{v}{n} \quad (2.19)$$

atau

$$v_s = K \frac{\Delta h}{\Delta L * n} \quad (2.20)$$

2.7 Porositas

Porositas merupakan rasio dari volume pori per volume total dari tanah. Menurut Freeze & Cherry (1979), pengukuran nilai porositas dapat dilakukan dengan membuat suatu sampel tanah menjadi jenuh, mengukur volume total dan massanya, kemudian mengeringkan sampel pada oven. Berat dari air yang hilang dapat diubah menjadi volume dengan membaginya terhadap massa jenis air.

2.8 Konduktivitas hidrolik

Konduktivitas hidrolik merupakan ukuran dari kemampuan media berpori meloloskan fluida yang melewatinya. Nilai konduktivitas hidrolik tergantung dari jenis media berpori serta fluida yang melewatinya dengan dimensi yang sama dengan kecepatan, yaitu LT^{-1} . Konduktivitas hidrolik ini sering disebut sebagai koefisien permeabilitas.

Koefisien permeabilitas tergantung pada ukuran rata-rata pori yang dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel, bentuk partikel, dan struktur tanah. Secara garis besar, makin kecil ukuran partikel, makin kecil pula ukuran pori dan makin rendah permeabilitasnya (Craig, 1991).

Dari segi gradasi butiran, tanah dengan distribusi ukuran partikel baik memiliki nilai konduktivitas hidrolik yang lebih kecil daripada tanah dengan distribusi ukuran partikel buruk. Hal ini terjadi karena pada tanah bergradasi baik, ruang pori yang terbentuk di antara partikel kasar dapat tertutupi oleh partikel yang lebih halus.

Tabel 2.2. Rentang nilai permeabilitas (m/s) menurut BS 8004:1986

	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}
Kerikil bersih	Pasir bersih dan campuran pasir-kerikil			Pasir sangat halus, lanau dan lempung-lanau berlapis-lapis			Lempung tak bercelah dan lempung lanau (>20% lempung)				
	Lempung yang mengalami pengawetan dan bercelah										

Sumber: Craig (1991)

Tabel 2.3. Koefisien permeabilitas menurut Casagrande

Jenis Tanah	K (m/s)
Kerikil	$1 \times 10^{-2} - 1$
Pasir/campuran pasir-kerikil	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-2}$
Pasir halus, lanau organik, campuran pasir, lanau, lempung	$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-5}$
Lempung padat	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-9}$

Sumber: Modul Praktikum Mekanika Tanah UI

Tabel 2.4. Koefisien permeabilitas menurut Wesley pada suhu standar (20^0 C)

Jenis Tanah	K (m/s)
Pasir berlempung, pasir berlanau	$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$
Pasir halus	$1 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$
Pasir kelanauan	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$
Lanau	$1 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6}$
Lempung	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$

Sumber: Modul Praktikum Mekanika Tanah UI

2.8.1 Konduktivitas hidrolik dari tanah berlapis

Adanya lapisan-lapisan dalam tanah memunculkan perbedaan konduktivitas hidrolik aliran air pada arah sejajar dan tegak lurus lapisan. Air akan lebih mudah mengalir pada arah sejajar lapisan daripada pada arah tegak lurus menembus lapisan-lapisan tanah. Konduktivitas hidrolik untuk aliran sejajar lapisan lebih besar daripada konduktivitas hidrolik untuk aliran tegak lurus lapisan. Konduktivitas hidrolik pada tanah yang berlapis dapat diketahui dengan terlebih dahulu memeriksa besarnya konduktivitas hidrolik dari masing-masing lapisan tanah.

dengan

i_1, i_2, \dots, i_n = gradien hidrolik di tiap lapisan (m/m)

K_1, K_2, \dots, K_n = konduktivitas hidrolik dari masing-masing lapisan (m/s)

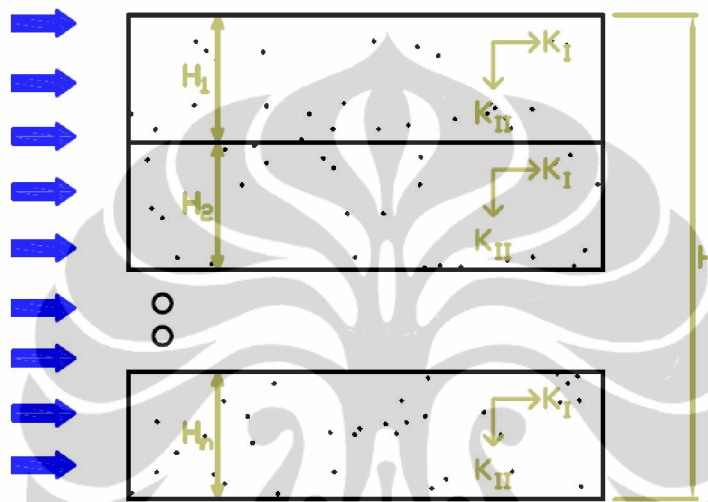
H_1, H_2, \dots, H_n = tebal dari masing-masing lapisan (m)

$H = H_1 + H_2 + \dots H_n =$ total tebal dari massa tanah (m)

$K_I =$ konduktivitas hidrolik rata-rata untuk aliran dengan arah sejajar lapisan (m/s)

$K_{II} =$ konduktivitas hidrolik rata-rata untuk aliran dengan arah tegak lurus lapisan (m/s)

Besarnya konduktivitas hidrolik untuk aliran dengan arah sejajar lapisan dihitung dengan metode berikut:



Gambar 2.7. Konduktivitas hidrolik ekuivalen pada aliran horizontal melalui tanah berlapis

Sumber: Presentasi kuliah Mekanika Tanah UI

kecepatan aliran rata-rata dinyatakan dalam kecepatan aliran terbobot:

$$v = \frac{1}{H} (v_1 H_1 + v_2 H_2 + \dots v_n H_n) \quad (2.21)$$

$$K_I * i = \frac{1}{H} (K_1 i_1 H_1 + K_2 i_2 H_2 + \dots K_n i_n H_n) \quad (2.22)$$

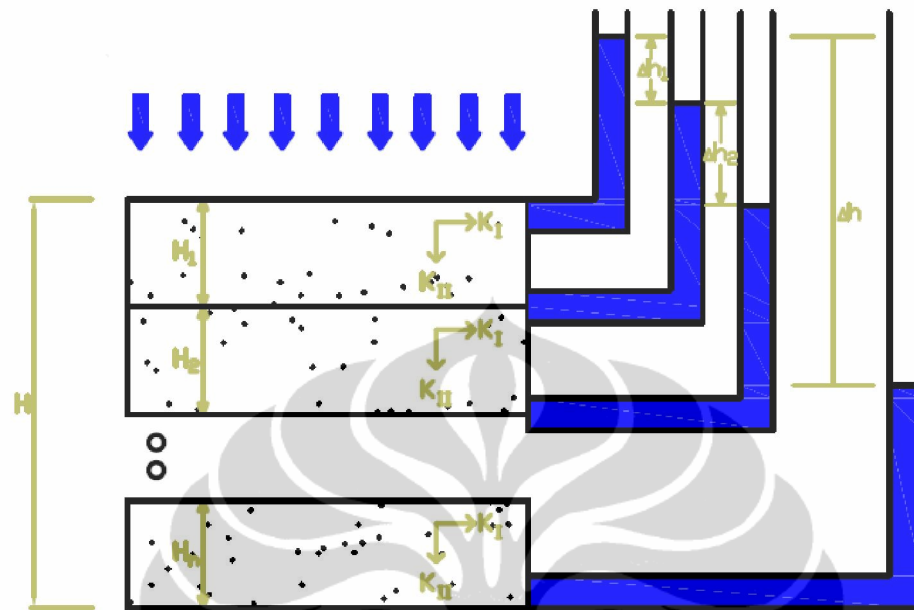
karena dalam aliran sejajar lapisan nilai gradien hidrolik I di tiap lapisan harus seragam, maka

$$K_I = \frac{1}{H} (K_1 H_1 + K_2 H_2 + \dots K H_n) \quad (2.23)$$

$$K_I = \frac{1}{H} \sum_{j=1}^n K_j H_j \quad (2.24)$$

Sementara untuk aliran pada arah tegak lurus lapisan, nilai gradien hidrolik i berbeda di tiap lapisnya dan besar gradien hidrolik total di sepanjang

tebal lapisan sama dengan total kehilangan energi (Δh) dibagi dengan tebal seluruh tanah (H).



Gambar 2.8. Konduktivitas hidrolis ekuivalen pada aliran vertikal melalui tanah berlapis

Sumber: Presentasi kuliah Mekanika Tanah UI

$$\Delta h = H_1 i_1 + H_2 i_2 + \dots + H_n i_n \quad (2.25)$$

Pada aliran ini, kecepatan di masing-masing lapisan harus sama.

$$v = K_{II} * \frac{\Delta h}{H} = K_1 i_1 = K_2 i_2 = \dots = K_n i_n \quad (2.26)$$

$$K_{II} = \frac{H}{\frac{H_1}{K_1} + \frac{H_2}{K_2} + \dots + \frac{H_n}{K_n}} \quad (2.27)$$

$$K_I = \frac{H}{\left(\sum_{j=1}^n \frac{H_j}{K_j} \right)} \quad (2.28)$$

2.8.2 Pengujian Konduktivitas Hidrolik

Nilai konduktivitas hidrolik dari suatu media berpori dapat diketahui melalui empat metode: *Capillarity Head Test*, korelasi data konsolidasi untuk menghitung konduktivitas hidrolik, *Variable Head Test* (atau pada literatur lain disebut *Falling Head Test*), dan *Constant Head Test*.

2.8.2.1 Pengujian Tinggi Konstan (*Constant Head Test*)

Konduktivitas hidrolik untuk tanah berbutir-kasar dapat ditentukan ditentukan dari uji tinggi konstan (*constant head test*). Contoh tanah pada kelembaban yang sesuai ditempatkan pada sebuah silinder tembus pandang (*perspex*), dengan luas penampang A . Contoh tanah tersebut beralaskan sebuah filter kasar atau sebuah saringan kawat. Pada saat pengujian, air mengalir konstan dalam arah vertikal dengan tinggi energi yang konstan pula. Kemudian volume pengaliran air per satuan waktu (Q) dihitung. Di sisi silinder terdapat kran-kran yang digunakan dalam penentuan gradien hidrolik (h/L). Kemudian dari Hukum Darcy didapat:

$$K = \frac{Q * L}{A * h}$$

$$K = \frac{V * L}{t * A * h} \quad (2.29)$$

Keterangan:

K = konduktivitas hidrolik media berpori (m/s)

V = volume aliran (m^3)

L = panjang sampel tanah (m)

t = lama pengamatan (s)

A = luas penampang sampel tanah (m^2)

h = tinggi muka air (m)

Pengujian ini harus dilakukan beberapa kali, masing-masing dengan laju aliran yang berbeda-beda. Sebelum pengujian dilakukan, contoh tanah divakumkan dulu untuk mendapatkan tingkat kejenuhan yang mendekati 100%. Kalau tingkat kejenuhan yang tinggi harus dipertahankan, air yang digunakan dalam pengujian harus tanpa udara (*de-aired water*).

2.8.2.2 Pengujian Tinggi Jatuh (*Falling Head Test*)

Untuk tanah berbutir halus digunakan uji tinggi jatuh (*falling-head test*). Dalam hal ini digunakan contoh tanah tidak terganggu (*undisturbed*) dan silinder yang digunakan dalam pengujian ini adalah tabung penyimpanan contoh tanah tersebut. Panjang contoh tanah dalam uji coba adalah L m dan luas potongannya A . Sebuah filter kasar ditempatkan di kedua ujung contoh tanah tersebut dan bagian atas silinder disambungkan dengan sebuah pipa tegak yang memiliki luas

penampang a . Pada saat percobaan, air yang mengalir ke luar ditampung pada sebuah reservoir dengan tinggi air yang diusahakan konstan. Pipa tegak diisi penuh dengan air dan dalam kurun waktu tertentu (t_1) dilakukan pengukuran terhadap tinggi muka air pipa relatif terhadap tinggi muka air pada reservoir. Dalam kurun waktu tersebut, tinggi muka air pipa turun dari h_0 menjadi h_1 . Pada suatu waktu antara t , tinggi muka air pada pipa adalah h dan laju perubahannya adalah $-dh/dt$. Pada saat itu perbedaan tinggi energi total adalah h . Sehingga berdasarkan rumus Darcy:

$$\begin{aligned}
 Q &= a * v = a \frac{-dh}{dt} \\
 -a \frac{dh}{dt} &= AK \frac{\Delta h}{\Delta L} \\
 -a \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{dt} &= \frac{AK}{\Delta L} \int_0^{t_1} dt \\
 K &= \frac{a * \Delta L}{A * t_1} \ln \frac{h_0}{h_1} \\
 K &= 2,3 \frac{a * \Delta L}{A * t_1} \log \frac{h_0}{h_1} \tag{2.30}
 \end{aligned}$$

Keterangan:

K = konduktivitas hidrolis media berpori (m/s)

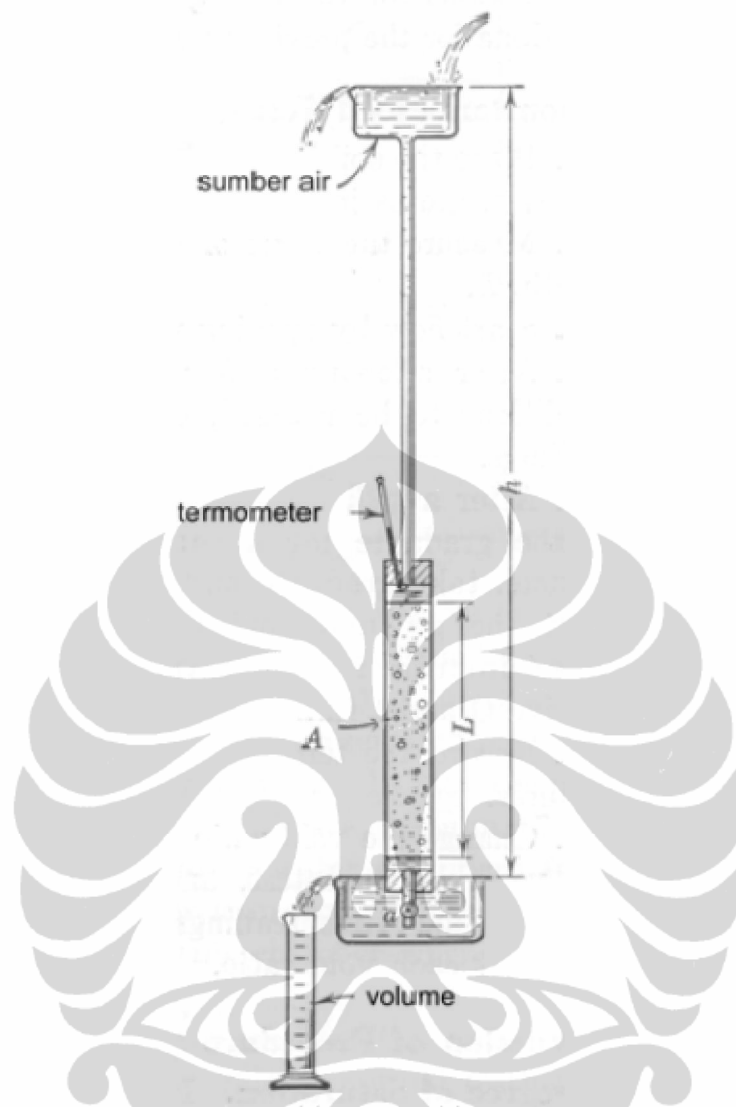
A = luas penampang silinder tegak (m^2)

L = panjang contoh tanah di dalam permeameter (m)

A = luas penampang contoh tanah (m^2)

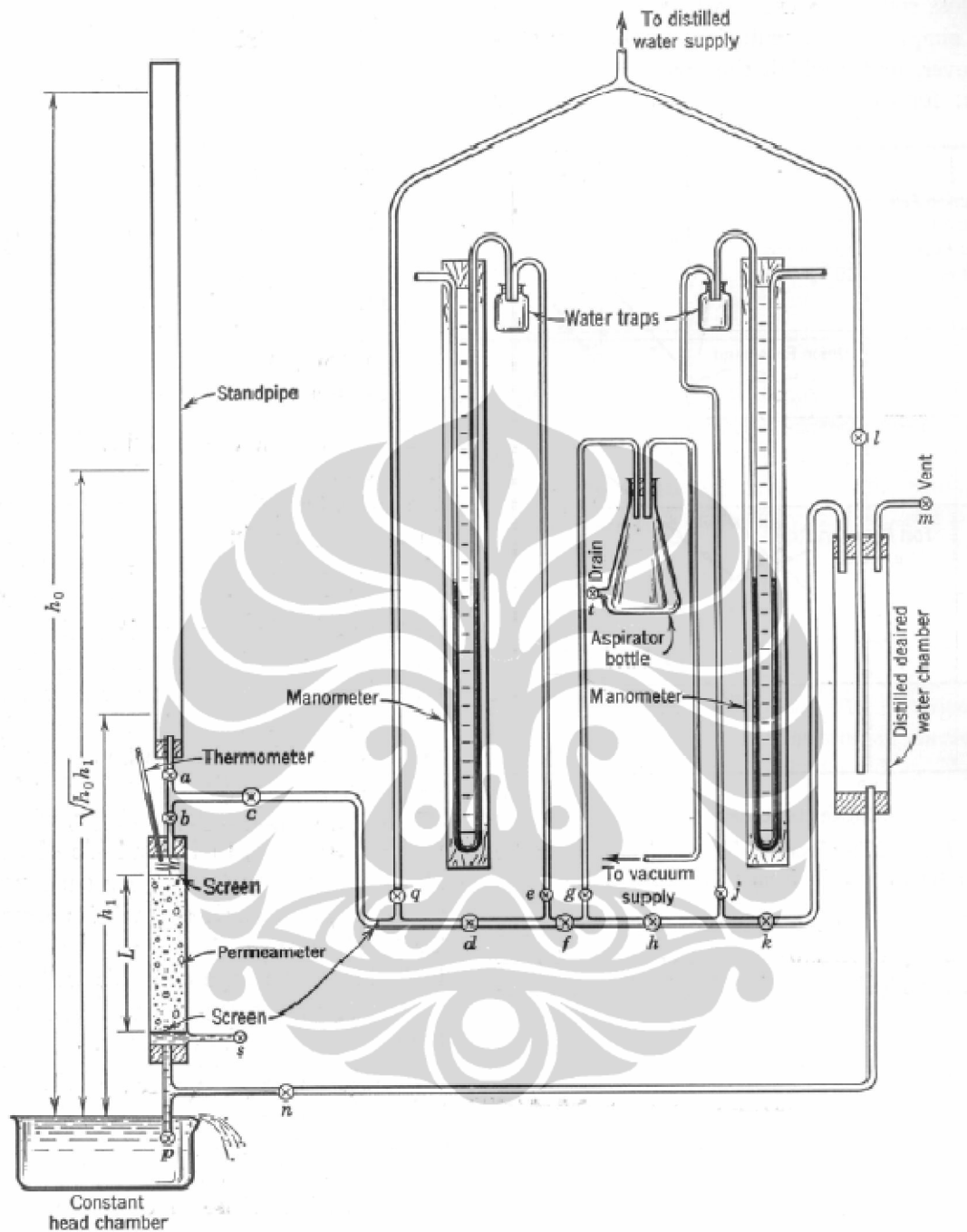
t_1 = total waktu pada pengukuran (s)

h_0, h_1 = tinggi head (m)



Gambar 2.9. Percobaan *constant head test*

Sumber: Modul Praktikum Mekanika Tanah UI



Gambar 2.10. Percobaan *falling head test*

Sumber: Modul Praktikum Mekanika Tanah UI

Pada pengujian ini tanah harus dijaga tingkat kejenuhannya mendekati 100%. Pengujian ini harus dilakukan beberapa kali, dengan harga h_0 dan h_1 yang berbeda dan/atau dengan diameter pipa tegak yang berbeda.

2.9 Kompresibilitas

Kompresibilitas (*compressibility*) merupakan sifat material yang menjelaskan perubahan volume media berpori maupun air per volume total material akibat adanya perubahan tekanan.

2.9.1 Kompresibilitas dari Media Berpori (α)

Kompresibilitas media berpori (α) adalah perubahan volume tanah (dV_s) per volume total tanah (V_t) akibat perubahan tegangan efektif (σ_e).

$$\alpha = - \frac{dV_t/V_t}{d\sigma_e} \quad (2.31)$$

Volume total tanah V_t terdiri dari volume butiran tanah (V_s) dan volume pori (V_v), yaitu $V_t = V_s + V_v$. Peningkatan tekanan efektif tanah σ_e akan menurunkan nilai volume total tanah V_t . Meski demikian, dianggap volume butiran tanah tidak berubah ($dV_s = 0$) sehingga $dV_t = dV_v$.

Besarnya kompresibilitas suatu sampel tanah dapat diketahui melalui uji konsolidasi. Dari uji konsolidasi akan dicari nilai void ratio tanah e untuk menghitung persamaan kompresibilitas

$$\alpha = \frac{-de/(1+e_0)}{d\sigma_e} \quad (2.32)$$

2.9.2 Kompresibilitas dari Air (β)

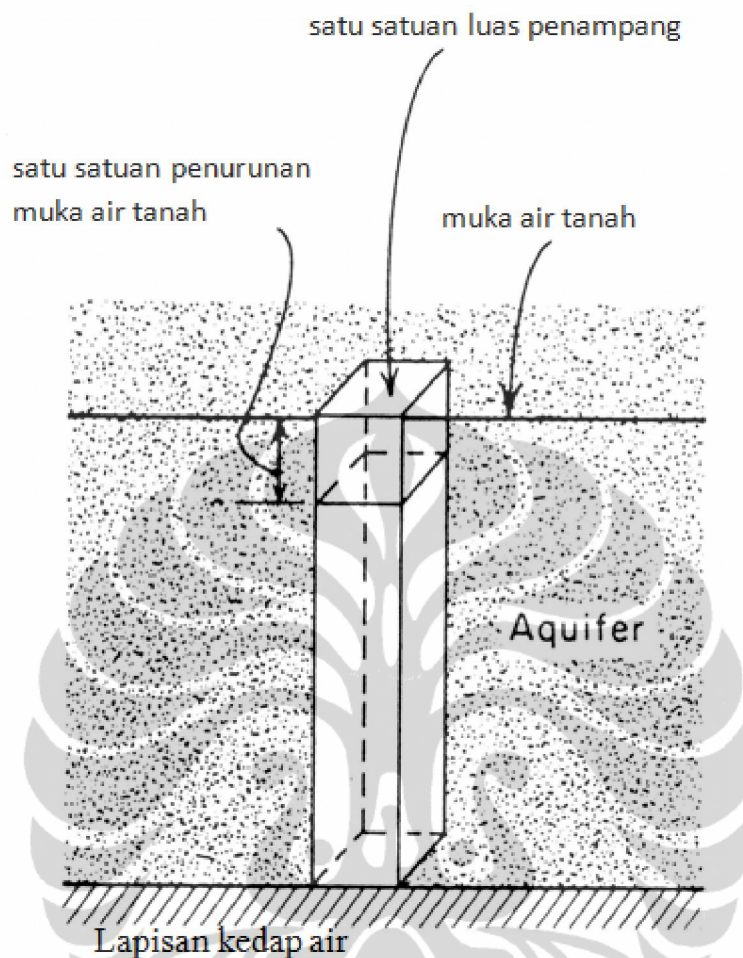
Kompresibilitas dari air (β) adalah perubahan volume air (dV_w) per volume total air (V_w) akibat perubahan tekanan fluida p .

$$\beta = - \frac{dV_w/V_w}{dp} \quad (2.33)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa nilai β adalah kemiringan garis dari grafik regangan versus tegangan dari air. Sepanjang rentang tekanan yang menjadi pembahasan dalam masalah air tanah, nilai β ini konstan, yaitu sebesar $4,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$.

2.10 *Specific Yield* dari Akifer Tidak Terkekang

Specific yield S_y didefinisikan sebagai volume air yang dikeluarkan oleh akifer tidak terkekang dari tampungannya per satuan luas penampang akifer untuk tiap penurunan muka air tanah. Besarnya S_y dapat dihitung sebagai $S_y = \rho g(\alpha + n\beta)$.



Gambar 2.11. Ilustrasi *specific yield* pada akifer tidak terkekang

Sumber: Freeze dan Cherry (1979)

2.11 Koefisien Dispersi

Koefisien dispersi besarnya tergantung pada nilai dispersivitas α dan koefisien difusi D^* dengan persamaan

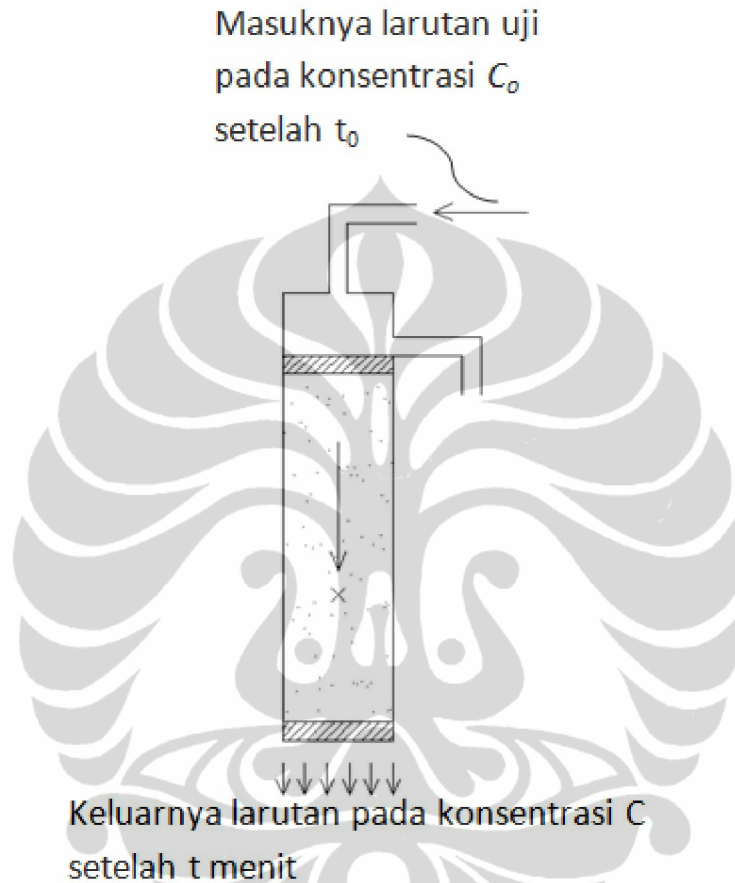
$$D_l = \alpha_l \bar{v} + D^* \quad (2.34)$$

Koefisien dispersi dari suatu media berpori dapat diukur di laboratorium dengan menggunakan kolom tanah atau pasir yang dialiri oleh larutan. Pengujian bertujuan untuk mencari nilai konsentrasi larutan C yang melalui kolom pasir dan nilai volume pori U dari massa pasir tersebut. Volume pori (*pore volume*, U) mewakili volume air yang akan mengisi seluruh pori-pori pasir di sepanjang sampel kolom. Nilai volume pori total suatu kolom pasir selama pengujian sama dengan debit total dibagi dengan volume satu pori.

Universitas Indonesia

$$U = \frac{v_x n A t}{A L n} = \frac{v_x t}{L} \quad (2.13)$$

dengan v_x adalah kecepatan rembesan, A adalah luas penampang kolom pasir, L adalah panjang kolom, dan n adalah porositas pasir.



Gambar 2.12. Pengujian koefisien dispersi

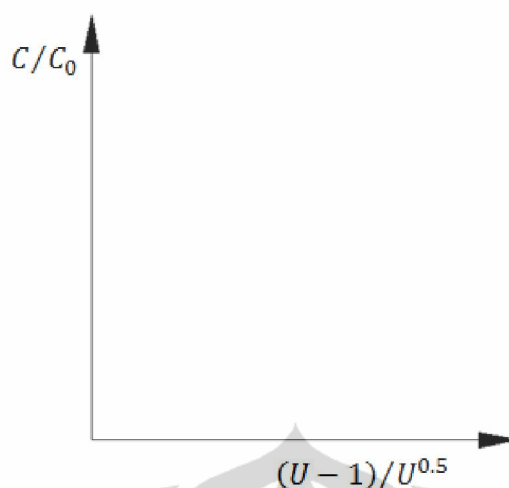
Sumber: Freeze dan Cherry (1979)

Pickens dan Grisak (1981) menunjukkan bahwa plot data C/C_0 terhadap $(U - 1)/U^{0.5}$ pada distribusi normal menghasilkan sebuah garis lurus yang kemiringan garisnya berhubungan dengan nilai D_l .

Estimasi koefisien dispersi adalah sebagai berikut

$$D_l = \frac{v_x L}{8} \times [J(0,84) - J(0,16)]^2 \quad (2.35)$$

dengan $J(0,84)$ adalah nilai dari fungsi volume pori saat $C/C_0 = 0.84$ dan $J(0,16)$ adalah nilai dari fungsi volume pori saat $C/C_0 = 0.16$.



Gambar 2.13. Grafik C/C_0 terhadap $(U-1)/U^{0.5}$

2.12 Jaringan Aliran

Jaringan aliran merupakan representasi grafis dari aliran air melalui tanah atau media berpori lainnya. Jaringan aliran digunakan untuk menggambarkan fungsi dari tekanan dan kecepatan pada kondisi-kondisi batas yang diketahui.

Aliran dalam media berpori dapat terjadi akibat adanya perbedaan tekanan. Perbedaan tekanan ini ditransformasi menjadi energi kinetik aliran air. Sebagai reaksi, tanah yang dilalui oleh air kemudian melawan aliran ini dengan suatu tekanan negatif. Tahanan yang diberikan tanah terhadap aliran air ini disebut sebagai gesekan viskos (*viscous friction*) dan menyebabkan terjadinya pelepasan energi kinetik dari aliran air secara bertahap.

Jalur yang dibentuk oleh aliran air pada peristiwa rembesan melalui massa tanah yang jenuh disebut sebagai garis aliran (*flow lines*). Garis aliran disebut juga sebagai kontur kecepatan yang menggambarkan fungsi aliran $\psi(x,z)$. Selisih kecepatan antara dua garis berdekatan dinotasikan sebagai $\Delta\psi$. Fungsi $\psi(x,z)$ ini merupakan kecepatan aliran per satuan tebal tanah sehingga $\partial\psi = \Delta q$.

$$-\frac{\partial\psi}{\partial x} = v_z = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.36)$$

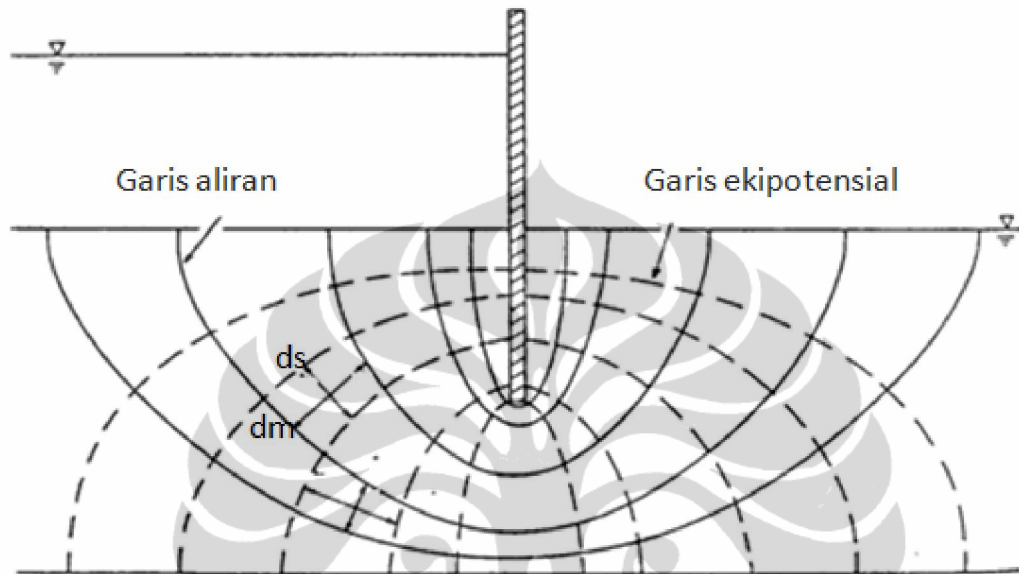
$$-\frac{\partial\psi}{\partial z} = v_x = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.37)$$

Sementara garis pada jaringan aliran yang menghubungkan titik-titik dengan tinggi tekanan total yang sama disebut garis ekipotensial (*equipotential lines*). Garis ekipotensial disebut juga sebagai kontur tekanan yang

menggambarkan fungsi tekanan $\phi(x,z)$. Selisih tekanan total antara dua garis berdekatan dinotasikan sebagai $\Delta\phi$.

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = v_x = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial z} = v_z = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.39)$$



Gambar 2.14. Jaringan Aliran

Sumber: Presentasi kuliah Mekanika Tanah UI

Untuk memudahkan analisa grafis, ada beberapa kondisi dasar yang harus dipenuhi dalam penggambaran jaringan aliran. Pertama, sudut yang terbentuk pada perpotongan antara garis aliran dan garis ekuipotensial harus membentuk sudut siku-siku. Kedua, dianjurkan untuk menggunakan $\Delta\psi$ yang sama besar untuk dua garis aliran berdekatan dan menggunakan $\Delta\phi$ yang sama besar untuk dua garis ekuipotensial berdekatan. Ketiga, menggunakan ds dan dm yang sama panjang sehingga daerah yang dibatasi oleh dua garis ekuipotensial dan dua garis aliran membentuk area bujur sangkar. Dengan terpenuhinya ketiga kondisi ini, akan berlaku

$$\Delta\psi = \Delta\phi \quad (2.40)$$

karena $\Delta\psi = \Delta q$ dan $\Delta\phi = K \cdot \Delta h$, maka

$$\Delta q = K \cdot \Delta h \quad (2.41)$$

Sementara gradien hidrolik ditentukan sebesar

$$i = \frac{\Delta h}{ds} \quad (2.40)$$

untuk keseluruhan jaringan aliran, h = perbedaan tinggi energi total antara garis ekipotensial pertama dan terakhir, N_d = jumlah penurunan ekipotensial, masing-masing dengan kehilangan tinggi energi total Δh yang sama, dan N_f = jumlah alur aliran (*flow channels*), masing-masing dengan kapasitas aliran Δq yang sama. Dari sini dapat ditentukan bahwa

$$\Delta h = \frac{h}{N_d} \quad (2.41)$$

dan

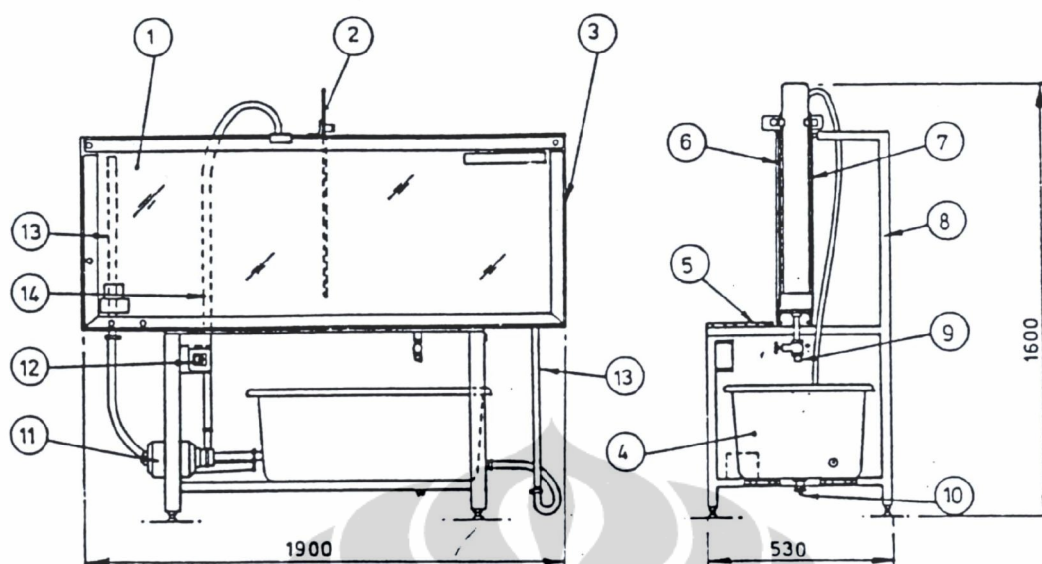
$$q = N_f \cdot \Delta v \quad (2.42)$$

Sehingga debit aliran per satuan tebal tanah di suatu titik pada jaringan aliran dapat dinyatakan dengan

$$q = K \cdot h \cdot \frac{N_f}{N_d} \quad (2.43)$$

2.13 Seepage Tank

Seepage tank merupakan suatu perangkat percobaan yang digunakan untuk menggambarkan fenomena rembesan pada media berpori. Komponen utama alat ini terdiri atas kotak kaca tembus pandang yang sisi belakangnya terhubung dengan manometer, pipa masukan air, dua pipa pelimpah air di sisi kiri dan kanan, pelat tak-lolos air (*impermeable*) sebagai model *sheet pile*, serta pompa dan bak air di bagian bawahnya.



Gambar 2.15. Peralatan *Seepage Tank*

Sumber: Instruction Manual *Seepage Tank* (Armfield, Ltd, 1995)

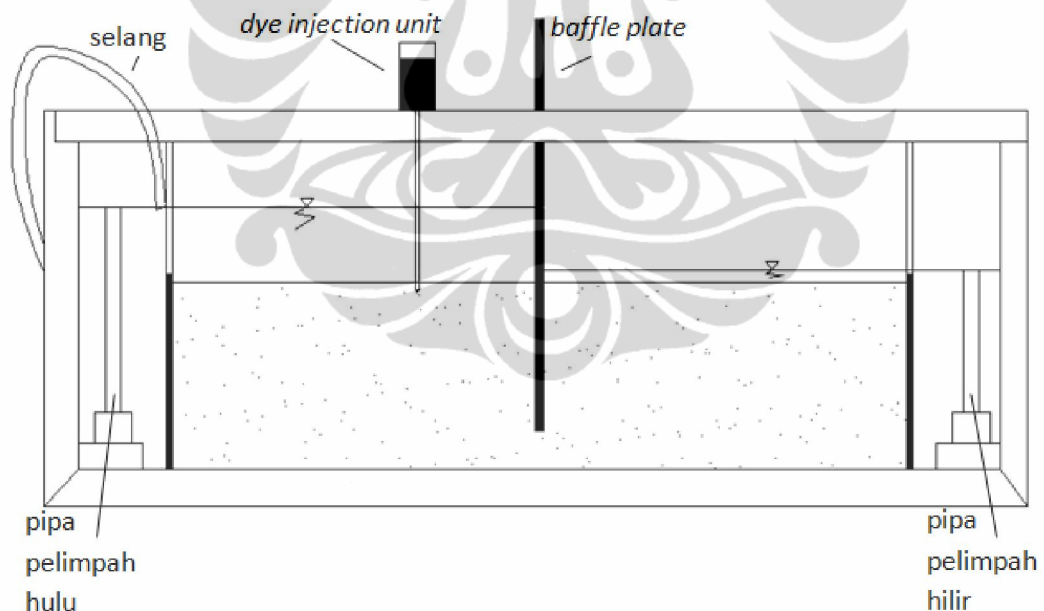
Keterangan:

1. Tangki *seepage tank*
2. *Baffle plate* (membran impermeabel)
3. Bingkai baja berbentuk U
4. Bak air
5. Rak/papan
6. Kaca
7. Panel aluminium
8. Penyangga
9. Keran penguras
10. Penguras bak air
11. Pompa sentrifugal
12. Saklar
13. Pipa pelimpah
14. Pipa inlet air

BAB 3

METODE PENELITIAN

Pemodelan fisik untuk aliran air tanah dan transpor pencemar pada akifer jenuh tak terkekang dilakukan menggunakan alat seepage tank. Pengamatan dilakukan terhadap aliran air dan transpor pencemar pada media pasir yang ditaruh di dalam tangki kaca. Di tengah tangki kaca tersebut diletakkan suatu pembatas berupa *baffle plate* yang tidak tembus air sehingga volume pasir di dalam kotak terbagi menjadi dua di hulu dan hilir. Pipa pelimpah di sisi kanan dan kiri seepage tank diatur untuk mendapatkan tinggi muka air di hulu dan hilir *sheet pile*. Air dimasukkan dengan selang ke dalam set alat, dibiarkan mengalir melalui pasir dan merembes di bawah *baffle plate* hingga ke hilir. Kondisi jenuh diperoleh setelah muka air sama dengan ketinggian pipa pelimpah di masing-masing sisi alat. Setelah kondisi jenuh terpenuhi, dimulailah pengamatan untuk aliran air dan transpor pencemar pada media pasir.



Gambar 3.1. Pengaturan Alat Seepage Tank

Sumber: Olahan penulis

Pemodelan aliran air tanah dilakukan dengan mengamati tinggi tekanan dari berbagai titik dalam media pasir akibat peristiwa rembesan. Aliran air diatur sedemikian rupa sehingga didapat kondisi pengaliran tak-tunak (*unsteady*).

Tekanan yang terjadi diukur melalui bacaan manometer yang diletakkan pada dua puluh titik di tepi *seepage tank* dan merupakan fungsi dari ruang dan waktu.

Pemodelan transpor pencemar dilakukan dengan mengamati pola penyebaran warna dari larutan yang dimasukkan ke dalam media pasir. Larutan ini dimasukkan dengan sebuah *dye injection unit* setelah diperoleh kondisi pasir jenuh. Berbeda dengan pemodelan aliran air tanah, pemodelan transpor pencemar ini dilakukan pada kondisi pengaliran tunak (*steady*).

Dibutuhkan serangkaian kegiatan percobaan, perhitungan, dan pengujian untuk memperoleh model fisik aliran dan transpor pencemar air tanah pada akifer jenuh tak terkekang dengan alat *seepage tank*. Rangkaian kegiatan tersebut dimaksudkan untuk memastikan bahwa seluruh kondisi batas (*boundary condition*) dan kondisi awal (*initial condition*) yang diharapkan dapat terpenuhi, intervensi yang diberikan dapat terukur, serta respon yang terjadi dapat diamati. Dengan memastikan hal-hal tersebut di atas, diharapkan dapat diperoleh sebuah pemodelan fisik yang valid untuk diulang (*repeatable*) dan diduplikasi (*replicable*) pada kegiatan-kegiatan berikutnya.

3.1 Pemilihan Pasir sebagai Media Berpori

Pemodelan transpor pencemar membutuhkan media berpori dengan karakter visual yang sesuai. Dalam pemodelan ini digunakan pasir dengan warna putih. Hal ini dilakukan untuk memudahkan pengamatan penyebaran larutan yang dimasukkan ke dalam media berpori pada kegiatan pemodelan transpor pencemar. Untuk itu jenis pasir yang digunakan harus diuji dahulu kemampuannya dalam memperlihatkan larutan berwarna yang melewatinya. Dengan pasir berwarna putih, diharapkan warna larutan yang muncul dapat terlihat lebih jelas daripada jika menggunakan pasir berwarna gelap.

3.2 Pengukuran Karakteristik Sistem Aliran

Dalam persamaan aliran air tanah dan transpor pencemar pada akifer jenuh tak terkekang, dibutuhkan data-data mengenai properti sistem aliran. Properti yang dimaksud adalah porositas, konduktivitas hidrolis, kompresibilitas,

dan koefisien dispersi. Melalui pengukuran, data-data tersebut dapat diperoleh sebelum kegiatan pemodelan dengan *seepage tank* dimulai.

Sebelum memulai pengukuran, ditetapkan terlebih dahulu kerapatan pasir yang diinginkan. Kerapatan pasir dapat diatur dengan menuangkan pasir mengikuti suatu metode tertentu. Metode penuangan ini harus konsisten sehingga kerapatan pasir yang akan dimasukkan ke dalam alat *seepage tank* sama dengan kerapatan dari sampel pasir yang digunakan dalam pengukuran karakteristik sistem aliran. Dalam kegiatan ini akan digunakan metode penuangan pasir secara berlapis tanpa pemadatan. Pasir dituang secara bertahap setinggi 30 mm untuk tiap lapisnya. Angka ini merupakan taksiran yang dibuat untuk mendapatkan massa pasir yang cukup rapat tanpa adanya pemadatan.

3.2.1 Pengujian Porositas Media Berpori

Porositas diperlukan sebagai tolak ukur sama atau tidaknya sampel pasir dalam pengujian dengan pasir yang akan digunakan dalam peralatan *seepage tank*. Pengujian porositas (n) dilakukan dengan kegiatan perendaman dan pengeringan sampel pasir. Melalui rangkaian kegiatan tersebut akan diperoleh volume total dan volume pori yang kemudian dibandingkan untuk mendapatkan nilai porositasnya.

3.2.2 Pengujian Konduktivitas Hidrolik

Konduktivitas hidrolik (K) diukur dengan metode pengujian tinggi jatuh (*falling head test*). Metode ini dipilih karena sampel merupakan pasir dengan permeabilitas dan angka pori yang besar. Dalam pengujian ini digunakan air karena dalam pemodelan, yang dibutuhkan adalah kemampuan air dalam meloloskan air.

3.2.3 Pengukuran Kompresibilitas Pasir

Kompresibilitas pasir diukur untuk dapat menghitung nilai *specific yield*. Pengukuran dilakukan dengan alat konsolidometer tipe cincin tetap (*fixed-ring consolidometer*) dan dari hasil pengujian ini akan diperoleh angka pori yang dapat digunakan untuk menghitung nilai kompresibilitas sampel pasir.

3.2.4 Pengukuran Konsentrasi Larutan *Dye*

Konsentrasi larutan diperlukan untuk pengujian koefisien dispersi dari sistem aliran transpor pencemar. Konsentrasi larutan dapat diketahui melalui informasi langsung dari produk pewarna makanan, bila digunakan larutan yang

sudah jadi, maupun dengan cara mengukur massa bubuk pewarna dan volume total larutan, bila diperlukan pencampuran terlebih dahulu. Banyaknya konsentrasi larutan dapat dievaluasi jika ternyata setelah dilakukan pemodelan dirasa warna yang muncul kurang jelas terlihat.

3.2.5 Pengukuran Koefisien Dispersi

Koefisien dispersi arah longitudinal aliran (D_l) diukur dengan mengalirkan larutan *dye* melalui kolom berisi pasir dan mengukur kecepatan rembesan yang terjadi beserta konsentrasi larutan yang keluar. Hasil dari pengujian ini akan dibuat sebagai grafik dan kemudian dihitung kemiringan garisnya yang dapat dianggap sebagai nilai koefisien dispersi.

3.3 Pemodelan Aliran Air Tanah dan Transpor Pencemar

3.3.1 Persiapan Alat *Seepage Tank*

Persiapan *seepage tank* meliputi pengaturan tinggi pasir, posisi *baffle plate*, dan tinggi pipa pelimpah pada hulu dan hilir. Pengaturan ini dimaksudkan untuk memperoleh kondisi-kondisi batas dari pengamatan yang akan dimodelkan.

Tinggi pasir di dalam tangki dan posisi *baffle plate* menjadi kondisi batas yang tetap untuk kegiatan pemodelan aliran air tanah maupun transpor pencemar. Pasir diisi hingga mencapai ketinggian 300 mm di atas dasar tangki. Penuangan pasir ke dalam tangki ini mengikuti cara yang sama dengan cara penuangan pasir saat dilakukan pengujian karakteristik pasir, yaitu dengan mengisi tangki secara bertahap, setinggi 30 mm untuk tiap lapisnya. *Baffle plate* diletakkan di tengah tangki dengan jarak tepi bawahnya terhadap dasar tangki adalah 150 mm. Bidang kontak antara tepi *baffle plate* di sebelah hilir dengan tangki diberi lilin sebagai perkuatan guna mengantisipasi terdorongnya *baffle plate* akibat tekanan air yang terjadi di sisi hulu.

Tinggi muka air dalam pemodelan aliran air tanah dan transpor pencemar dibuat berbeda. Hal ini dilakukan karena pemodelan aliran air tanah membutuhkan kondisi aliran tak-tunak (*unsteady*) sementara pemodelan transpor pencemar membutuhkan aliran tunak (*steady*). Meski demikian, sebagai persiapan untuk membuat media pasir jenuh, muka pipa pelimpah di hulu dibuat berada pada jarak 150 mm di bawah permukaan atas tangki dan muka pipa pelimpah di

hilir berada pada jarak 25 mm di atas permukaan pasir. Pengisian air dimulai dari kotak pengisian di hilir lalu selang dipindah ke hulu sampai ketinggian muka airnya tercapai. Kegiatan ini dimaksudkan untuk mengurangi tekanan yang terjadi pada sisi hulu *baffle plate* akibat rembesan.

3.3.2 Mengatur Kondisi Pengaliran untuk Model Aliran Air Tanah *Unsteady*

Aliran tidak tunak (*unsteady*) dibuat untuk mendapatkan variasi nilai tekanan terhadap waktu. Kondisi ini dapat diperoleh dengan membuat tinggi muka air di hulu berubah terhadap waktu. Maka dalam kegiatan ini, sebagai percobaan awal, tinggi muka air di hulu dibuat naik sebanyak 100 mm. Setelah pasir jenuh pada posisi muka air awal yang konstan, pipa pelimpah di sisi hulu dinaikkan sebanyak 100 mm sementara aliran air ke dalam tangki tetap dipertahankan sehingga muncul kenaikan tekanan. Tinggi kenaikan pipa ini akan dievaluasi lagi untuk memastikan bahwa bacaan manometer dapat menunjukkan perubahan tinggi tekanan yang terlihat jelas. Jika tidak, maka perubahan tinggi muka air diperbesar sehingga perbedaan tekanannya semakin signifikan.

3.3.3 Pembacaan Manometer untuk Model Aliran Air Tanah *Unsteady*

Pembacaan manometer bertujuan untuk mengamati perubahan tekanan per satuan waktu yang terjadi dan dilakukan pada selang waktu tertentu yang konstan selama terjadi kenaikan tinggi muka air di hulu. Sebagai percobaan awal, pengamatan dilakukan sebanyak lima kali sejak pipa hulu dinaikkan sampai tinggi muka air di hulu mencapai elevasi rencana akhir. Dengan demikian, penentuan waktu pengamatan dilakukan dengan cara mengukur waktu yang dibutuhkan air untuk naik dan membaginya menjadi lima bagian. Diharapkan dengan begini didapat perbedaan bacaan manometer yang cukup jelas di tiap waktu pengamatannya. Hasil pengamatan kemudian dicatat sebagai tinggi tekanan pada tiga puluh enam manometer pada lima rentang waktu yang ditetapkan.

3.3.4 Mengatur Kondisi Pengaliran *Steady* untuk Model Transpor Pencemar

Pemodelan transpor pencemar bertujuan untuk mendapatkan gradien konsentrasi pencemar ketika merembes di massa pasir. Pemodelan transpor pencemar dilakukan pada kondisi pengaliran tunak (*steady*) agar diperoleh kecepatan rembesan yang konstan. Tinggi muka air di hulu dibuat tetap, yaitu sama dengan tinggi akhir muka air hulu di kegiatan pemodelan aliran air tanah

sebelumnya. Sebelum kegiatan dilanjutkan, harus dipastikan bahwa pada kondisi ini bacaan manometer sudah konstan, atau tidak ada perubahan tekanan terhadap waktu. Kondisi awal muka air ini dapat dievaluasi jika ternyata penyebaran konsentrasi larutan yang diamati di akhir kegiatan tidak memberikan hasil yang jelas.

3.3.5 Memasukkan *Dye* sebagai Model Pencemar ke Pasir

Posisi dan cara memasukkan *dye* perlu dikontrol untuk memastikan bahwa *dye* dapat mengalir bersama dengan aliran air yang terjadi pada pasir dan bahwa gradien konsentrasi *dye* dalam aliran dapat terlihat jelas. Larutan yang digunakan sebagai *dye* adalah pewarna makanan dengan warna merah. Larutan ini dimasukkan ke dalam pasir menggunakan *dye injection unit* yang merupakan salah satu kelengkapan dari *seepage tank*. Larutan ditampung dalam botol dari *dye injection unit* dan dikeluarkan dengan konsentrasi konstan melalui jarum. Konsentrasi larutan yang masuk ini harus diperhitungkan agar *dye* dapat mengalir bersama aliran air dan tidak menyebar ke arah atas atau horisontal dari permukaan pasir akibat terlalu tingginya konsentrasi pencemar yang masuk.

Sebagai percobaan awal, jarum dari *dye injection unit* dimasukkan di tengah penampang atas pasir dengan kedalaman penetrasi sebesar 6 mm. Jarum dimasukkan di tengah penampang pasir, bukan di tepi kaca, agar larutan berwarna benar-benar mengalir melalui massa pasir. Jika penempatan jarum terlalu dekat dengan tepi tangki, dikhawatirkan proses transpor pencemar justru terjadi melalui tepi kaca. Meski penempatan *dye injection unit* di tepi kaca membuat penjalaran larutan lebih mudah diamati, masuknya *dye* di tengah pasir dianggap lebih baik karena dapat mewakili peristiwa adveksi dan dispersi.

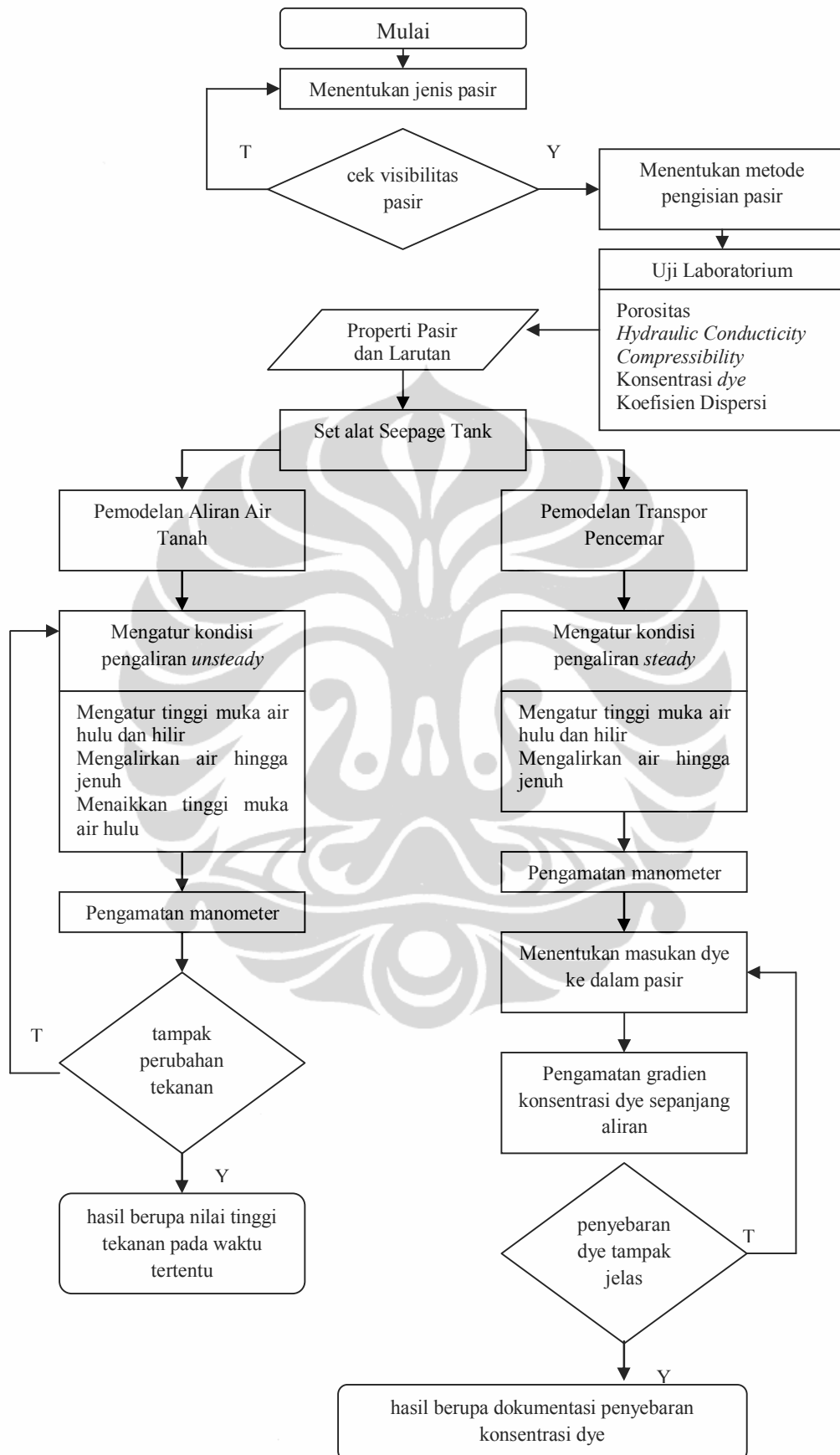
3.3.6 Pengamatan Gradien Konsentrasi *Dye* Sepanjang Aliran

Setelah *dye* disuntikkan ke dalam pasir, diharapkan ia akan menyebar secara gradual mengikuti arah aliran rembesan. Penjalaran konsentrasi larutan terjadi di arah longitudinal dan transversal aliran sehingga muncul gradien konsentrasi larutan sepanjang aliran. Penjalaran ini kemudian dicatat sebagai dokumentasi video yang menunjukkan perubahan konsentrasi selama rentang waktu tertentu.

3.4 Algoritma Pemodelan Fisik Aliran Air Tanah dan Transpor Pencemar pada Akifer Tak Terkekang Jenuh

Rangkaian kegiatan yang dilakukan untuk menemukan prosedur pemodelan aliran air tanah dan transpor pencemar dengan alat seepage tank dapat digambarkan melalui bagan alir berikut:





Gambar 3.2. Algoritma Pemodelan

BAB 4

IMPLEMENTASI RENCANA PENELITIAN

Untuk memperoleh kegiatan pemodelan fisik yang terukur dan sesuai dengan kondisi sistem yang diharapkan, telah dilakukan serangkaian pengujian dan percobaan sesuai dengan rancangan metode penelitian yang telah dijelaskan sebelumnya. Hasil dari pengujian dan percobaan ini menjadi penentu arah dalam penetapan protokol dari kegiatan pemodelan aliran air dan transpor pencemar pada media berpori jenuh menggunakan *seepage tank*.

4.1 Pengecekan Visibilitas Pasir dalam Mengalirkan Larutan *Dye*

Pengecekan dilakukan dengan percobaan skala kecil yang bertujuan untuk melihat kenampakan warna dari larutan yang melewati suatu sampel pasir. Dalam percobaan ini digunakan wadah transparan dari bekas kemasan air mineral, sampel pasir, dan larutan pewarna makanan.

Kemasan air mineral berbentuk gelas dilubangi di bagian alasnya dan kemudian diisi pasir. Untuk menjaga pasir tidak jatuh, alas wadah ini perlu ditahan dengan tangan. Setelah pasir masuk, kemudian sampel tersebut dialiri air untuk membuatnya jenuh. Larutan pewarna pun dimasukkan ke pasir menggunakan alat suntik yang diletakkan di tengah permukaan pasir, sedikit ke tepi wadah. Apabila turunnya pewarna dapat terlihat dari tepi wadah, maka pasir dianggap dapat digunakan untuk memodelkan kejadian transpor pencemar mekanisme adveksi-dispersi.



Gambar 4.1 Pengecekan visibilitas pasir

Sumber: dokumentasi pribadi

4.2 Pengukuran Karakteristik Sistem Aliran

4.2.1 Pengujian Porositas Media Berpori

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa sampel pasir yang digunakan dalam kegiatan pengukuran karakteristik sistem aliran memiliki kerapatan yang sama dengan pasir yang digunakan dalam alat *seepage tank*. Pengujian ini mengalami kendala karena tidak dapat dilakukan pengambilan sampel pasir dari dalam alat *seepage tank* untuk diuji porositasnya akibat gaya kohesi antar pasir sangat lemah. Sebagai solusi dari kendala ini, pembuatan sampel untuk pengujian properti pasir di laboratorium dilakukan dengan cara yang sama dengan cara penumpukan pasir di alat *seepage tank*, yaitu dipadatkan dengan beban yang sama dan dijatuhkan dari ketinggian yang sama pula.

4.2.2 Pengujian Konduktivitas Hidrolik

Pengujian konduktivitas hidrolik dijalankan melalui tes permeabilitas dari suatu sampel pasir. Tes permeabilitas dilakukan dengan peralatan yang terdiri dari alat *constant head-test*, *mould permeability*, batang penumbuk, gelas ukur, *stopwatch*, penggaris, dan jangka sorong.

Pengujian konduktivitas hidrolik ini dibuat sedemikian rupa sehingga dapat memastikan bahwa sampel media berpori dan fluida yang diuji sesuai dan mewakili sistem yang digunakan dalam pemodelan di *seepage tank*. Media berpori yang diuji merupakan pasir dengan jenis *fine sand* berdiameter 0,084 – 0,141 mm. dan fluida yang dipakai untuk penetesan adalah air.

Penetesan diawali dengan pembuatan sampel pasir. Pembuatan sampel dalam *mould permeability* dilakukan dalam beberapa lapis dengan tebal tiap lapis adalah 3 cm. Setiap lapis ditumbuk dengan sebuah alat pemukul yang menggunakan beban cincin 1 kg sebagai penumbuknya. Beban dijatuhkan dari tinggi konstan 20 cm sebanyak 10 kali. Metode penumbukan ini mengikuti metode penumbukan pasir yang dilakukan di tahap persiapan kegiatan pemodelan di *seepage tank*. Setelah mould terisi penuh dengan pasir, diberi satu lembar kertas saring di atasnya. Kertas saring ini nantinya akan berada di bagian bawah setelah *mould* dibalik dan berfungsi untuk menjaga agar pasir tidak jatuh. *Mould* kemudian dibalik dan diletakkan di atas piringan logam yang memiliki lubang-lubang dan berfungsi untuk mengalirkan air yang melewati kolom pasir saat

dilakukan tes permeabilitas. Terakhir, *mould* ditutup dengan piringan logam lain yang hanya memiliki satu lubang di atasnya untuk memasukkan air dan kemudian kedua piringan logam di atas dan bawah tersebut dikencangkan dengan batang besi penjaga.

Tabel 4.1 Data sampel pasir

tinggi silinder	: 13,03 cm
diameter dalam	: 9,95 cm ²
luas permukaan	: 310,8678 cm ²



Gambar 4.2 Sampel pasir dalam *mould permeability*

Sumber: dokumentasi pribadi

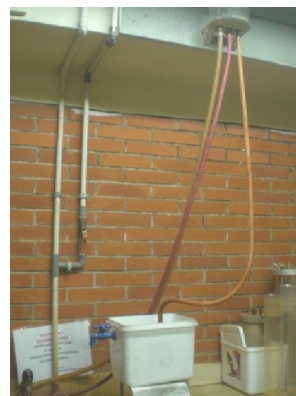
Tahap berikutnya adalah menyambungkan semua peralatan untuk pelaksanaan pengujian. *Mould permeability* dimasukkan ke dalam sebuah wadah yang berfungsi untuk menampung volume air yang keluar dari mould. Wadah yang digunakan dalam kegiatan ini adalah suatu kotak plastik berwarna putih dengan kapasitas 8 L dan memiliki keran untuk mengeluarkan limpasan air. Bagian atas mould permeability disambungkan dengan selang dari reservoir atas.

Tes permeabilitas dilakukan dengan mengalirkan air ke reservoir atas dan mengamati debit air yang keluar dari keran wadah tampungan. Debit air yang keluar dari reservoir dan masuk ke kolom pasir konstan karena terdapat pipa pelimpah yang dapat mengatur tinggi permukaan air di dalam reservoir. Air turun melalui selang dan masuk ke *mould permeability* sehingga terjadi aliran air dalam media berpori. Sebagian air keluar melalui lubang-lubang yang ada di dasar *mould* dan mengisi wadah tampungan. Ketika tinggi muka air telah mencapai keran outlet, air akan keluar dari wadah. Volume dan waktu keluarnya air dari keran ini kemudian dicatat sebagai debit aliran dalam pasir.



Gambar 4.3 Selang untuk mengalirkan air ke *mould*

Sumber: dokumentasi pribadi



Gambar 4.4 Selang terhubung dengan reservoir atas

Sumber: dokumentasi pribadi

Untuk menghitung konduktivitas hidrolis, dipastikan dahulu bahwa debit yang keluar tersebut sudah konstan, karenanya dibutuhkan beberapa pengambilan data debit. Pengukuran debit dilakukan dengan gelas ukur dan *stopwatch*. Dalam pengukuran debit ini, tidak ditentukan volume maupun waktu pengambilan air ke gelas ukur. Sehingga pengukuran dilakukan secara spontan, penampungan air dapat dilakukan pada volume dan waktu yang berbeda-beda. Hal ini dilakukan untuk menghindari terjadinya ketidakakuratan waktu dalam mengangkat gelas ukur maupun dalam menghentikan *stopwatch*.



Gambar 4.5 Pengukuran debit air yang keluar

Sumber: dokumentasi pribadi

Tabel 4.2 Hasil pengukuran debit

Time (s)	Volume (mL)
80,5	380
87	410

Lanjutan tabel 4.2

Time (s)	Volume (mL)
85,9	400
85	390

Dari data tersebut kemudian dihitung nilai permeabilitas dari media berpori dengan persamaan

$$K = \frac{V * L}{t * A * h} \quad (4.1)$$

dengan:

K = konduktivitas hidrolis media berpori (m/s)

V = volume aliran (m³)

L = panjang sampel tanah (m)

t = lama pengamatan (s)

A = luas penampang sampel tanah (m²)

h = beda tinggi antara muka air di wadah dengan di reservoir atas = 1,2 m

Diperoleh nilai permeabilitas sampel pasir adalah 0,00985 m/s. Angka ini menunjukkan bahwa pasir yang digunakan termasuk jenis *clean sand*.

4.2.3 Pengukuran Kompresibilitas Pasir

Kompresibilitas media berpori dibutuhkan untuk menghitung nilai *Specific Yield* dari suatu model akifer tidak terkekang. Untuk menghitungnya secara empiris, dibutuhkan pengujian konsolidasi dari sampel tanah. Karena media berpori yang digunakan dalam kegiatan pemodelan ini adalah pasir dengan nilai permeabilitas tinggi, tes konsolidasi tidak dapat dilakukan. Yang menjadi kendala adalah pembuatan sampel yang sulit dan karakteristik pasir yang akan langsung mendisipasi kandungan air seketika setelah diberi pembebanan sehingga tidak sempat mengalami konsolidasi.

4.2.4 Pengukuran Konsentrasi Larutan *Dye*

Untuk prinsip kemudahan, digunakan model pencemar berupa larutan berwarna merah. Sifat larutan ini hanya sebagai *dye* atau *tracer* untuk memberi warna pada aliran air yang terjadi dalam massa pasir. Karena *dye* ini merupakan produk jadi yang tidak memiliki informasi konsentrasi pada kemasannya, dibutuhkan pengukuran untuk mendapatkan konsentrasinya. Namun hal ini tidak

dilakukan karena tidak diketahui parameter apa dalam kandungan larutan tersebut yang dapat dinyatakan sebagai konsentrasi. Pengukuran yang tersedia hanya dapat mengukur tingkat kepekatan warna dalam satuan *Platinum-Cobalt Scale* (Pt/Co) dan tidak dapat digunakan untuk mengisi variabel konsentrasi pada persamaan transpor pencemar.

4.2.5 Pengukuran Koefisien Dispersi

Koefisien dispersi merupakan suatu variabel transpor pencemar yang sifatnya spesifik untuk media berpori dan fluida tertentu yang melewatinya. Pengujian yang disarankan untuk kegiatan laboratorium adalah dengan menggunakan kolom pasir yang dilewati oleh fluida pencemar dan diambil sampelnya untuk dicatat waktu pengambilan serta konsentrasi sampel yang keluar dari kolom pasir. Untuk pencemar berupa pewarna, hal ini sulit dilakukan karena pencemar ini tidak memiliki parameter larutan yang dapat dinyatakan sebagai konsentrasi.

4.3 Pemodelan Aliran Air Tanah dan Transpor Pencemar

4.3.1 Metode Deposit Pasir

Pemodelan aliran air dan transpor pencemar dalam media berpori jenuh diawali dengan deposit pasir ke dalam alat. Pasir dimasukkan ke dalam Seepage Tank secara berlapis, dengan tebal tiap lapis adalah 3 cm. Setiap kali satu lapisan selesai dimasukkan, dilakukan pemadatan menggunakan beban yang dijatuhkan dari tinggi konstan. Pemadatan dibutuhkan untuk meningkatkan kerapatan pasir dan menghindari pasir terbawa oleh aliran air.

Alat pemadat yang digunakan terdiri dari alas berbentuk persegi dengan ukuran sisi 9x9 cm, gagang besi bulat dengan tinggi 20 cm yang dapat dimasuki oleh beban cincin, dan beban cincin dengan berat 1 kg. Alat pemadat menumbuk satu area pasir sebanyak 10 kali dengan tinggi jatuh beban cincin adalah 20 cm. Setelah menyelesaikan satu area yang luasnya sama dengan alasnya, pemadat dipindahkan ke sebelahnya dan terus dijalankan hingga seluruh permukaan pasir terpadatkan.



Gambar 4.6 Penumbukan pasir dengan beban cincin 1 kg

Sumber: dokumentasi pribadi

4.3.2 Pengaturan Kondisi Batas

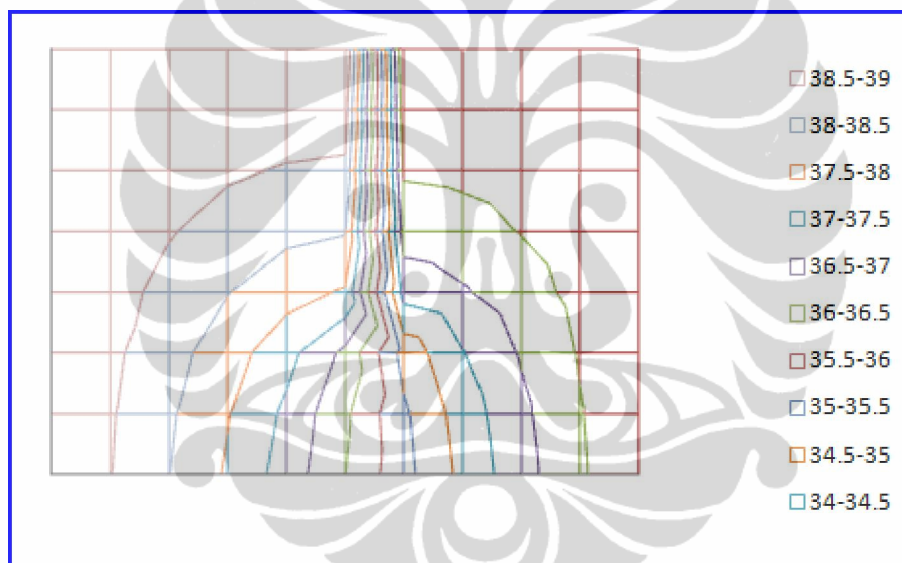
Kondisi batas ditentukan oleh kondisi pembatas di tepi kiri dan kanan pasir. Dalam pemodelan menggunakan seepage tank, kondisi batas dapat dibuat menjadi lolos air (*permeable*) ataupun tidak lolos (*impermeable*). Pemilihan kondisi ini berpengaruh terhadap keadaan tekanan hidrolis pasir di tepi kiri dan kanan.

Untuk memperkirakan pengaruh dari tiap kondisi batas, sebelumnya dilakukan pemodelan numerik menggunakan metode *finite difference*. Dari pemodelan ini dapat diketahui sebaran tekanan hidrolis di dalam massa pasir secara teoritis dan dapat diperkirakan *equipotential line* serta *flow line* yang dihasilkan darinya.

Distribusi tekanan di pasir akibat kondisi batas yang tidak kedap air atau *constant head boundary* diberikan oleh gambar 4.7 sampai 4.10.

39	39	39	39	39	39	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5
39	38.93	38.85	38.79	38.75	38.73	32.7	32.68	32.64	32.57	32.5
39	38.85	38.7	38.57	38.46	38.42	32.94	32.9	32.79	32.65	32.5
39	38.77	38.53	38.31	38.12	38.03	33.27	33.18	32.98	32.75	32.5
39	38.68	38.36	38.02	37.69	37.45	33.8	33.55	33.21	32.85	32.5
39	38.6	38.19	37.73	37.17	36.38	34.82	34.02	33.45	32.96	32.5
39	38.55	38.07	37.53	36.89	36.09	35.09	34.27	33.61	33.04	32.5
39	38.52	38.01	37.44	36.78	36.01	35.15	34.37	33.68	33.07	32.5

Gambar 4.7 Distribusi tekanan untuk *head* hulu 39 cm dan *head* hilir 32,5 cm, *permeable boundary*

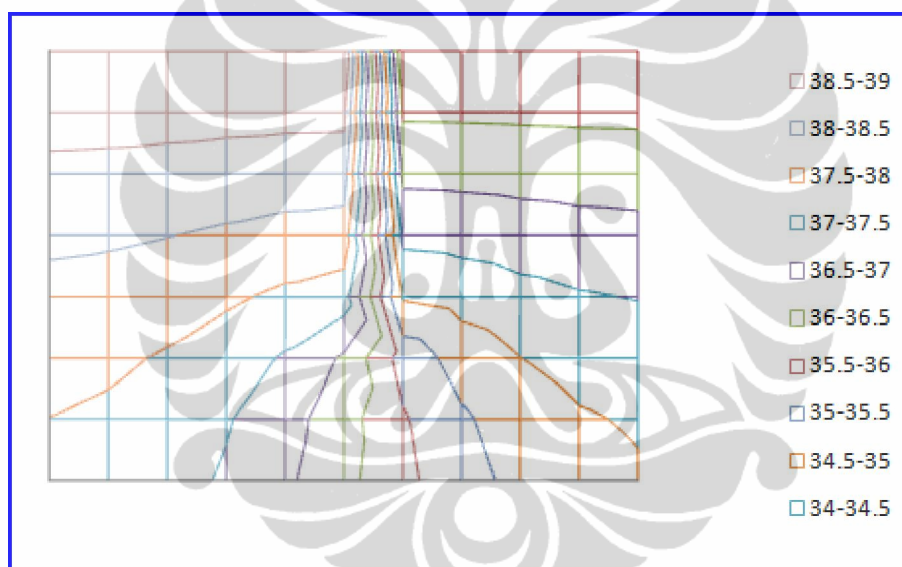


Gambar 4.8 *Equipotential line* untuk kondisi batas lolos air

Sementara distribusi tekanan di pasir akibat kondisi batas yang kedap air adalah:

39	39	39	39	39	39	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5
38.69	38.68	38.66	38.65	38.63	38.62	32.94	32.93	32.92	32.9	32.89
38.39	38.37	38.33	38.29	38.25	38.23	33.38	33.37	33.33	33.3	33.28
38.1	38.07	38.01	37.93	37.84	37.79	33.87	33.82	33.75	33.68	33.65
37.85	37.8	37.71	37.58	37.41	37.26	34.44	34.3	34.15	34.04	33.98
37.64	37.58	37.46	37.26	36.95	36.43	35.31	34.8	34.51	34.34	34.26
37.5	37.43	37.28	37.04	36.7	36.2	35.55	35.07	34.75	34.55	34.45
37.42	37.34	37.19	36.94	36.59	36.14	35.63	35.19	34.86	34.65	34.55

Gambar 4.9 Distribusi tekanan untuk *head* hulu 39 cm dan *head* hilir 32,5 cm, *impermeable boundary*



Gambar 4.10 *Equipotential line* untuk kondisi batas tidak lolos air

Dalam pemodelan ini, digunakan kondisi batas *impermeable*. Dengan pemilihan kondisi batas *impermeable*, permukaan pasir di sisi hulu dan hilir *baffle plate* menjadi dua *equipotential line* yang berbeda, sementara tepi kiri, kanan, dan bawah *seepage tank* menjadi batas dari *flow line*. Dengan susunan yang demikian, di tengah massa pasir akan diperoleh *streamtube* berbentuk parabola dan mengelilingi *baffle plate*. Hal ini memudahkan pengamatan jalannya pencemar di dalam massa pasir.

Perlu diperhatikan bahwa tinggi dari pembatas yang memisahkan kolom air dan pasir harus sama dengan tinggi timbunan pasir itu sendiri. Pembatas yang

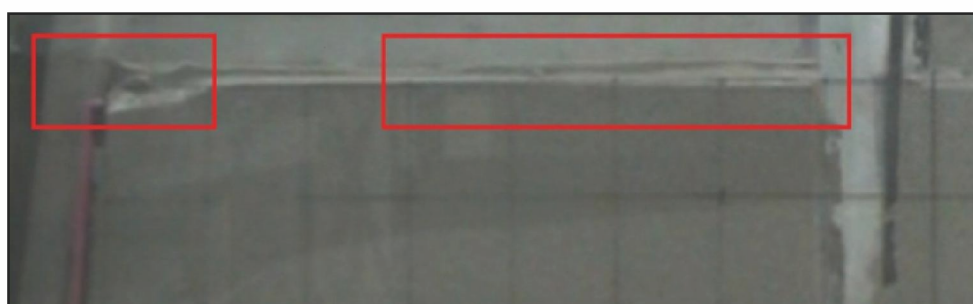
lebih rendah dari tinggi permukaan pasir menyebabkan jatuhnya pasir ke dalam kolom air. Sementara pembatas yang lebih tinggi daripada tinggi permukaan pasir menyebabkan terjadinya gerusan.

Pembatas yang lebih tinggi daripada permukaan pasir bertindak seperti sebuah bendung. Ketika melewati mercu pembatas, aliran di hulu pembatas akan berubah menjadi aliran superkritis dan mengalami peningkatan kecepatan air. Semakin jauh dari bendung, aliran akan mencapai kondisi subkritis lagi. Perubahan aliran dari superkritis menjadi subkritis menyebabkan terjadinya loncatan hidraulik (Raju, 1986). Akibat loncatan hidraulik, terjadi pelepasan energi dan timbul gelombang yang kemudian menggerus permukaan pasir. Dari kegiatan yang dilakukan, peristiwa gerusan berhenti setelah aliran air berbalik ke arah pembatas.



Gambar 4.11 Gerusan di awal pengisian air

Sumber: dokumentasi pribadi



Gambar 4.12 Air mulai berbalik ke arah pembatas

Sumber: dokumentasi pribadi

4.3.3 Pengaturan Tinggi Muka Air di Hulu dan Hilir

Tinggi muka air hulu dan hilir berpengaruh terhadap kecepatan rembesan yang terjadi dalam massa pasir. Semakin besar selisih tinggi muka air di kedua lokasi, semakin besar pula gradien hidrauliknya dan menghasilkan kecepatan rembesan yang lebih besar.

Dalam pemodelan aliran air tanah kondisi *steady* dan *unsteady*, ketinggian muka air yang dapat dimodelkan sifatnya fleksibel. Percobaan yang dilakukan pada variasi gradien hidraulik sebesar 2,5 – 7,5 cm menunjukkan bahwa bacaan manometer *Seepage Tank* dapat memberikan hasil sebaran tekanan yang rasional menurut pemodelan teoritis dengan metode *Finite Difference*.

Kesulitan dalam mengatur tinggi muka air terjadi ketika ketinggian pipa harus diubah untuk mendapat pemodelan kondisi transien atau *unsteady*. Pipa pelimpah seepage tank tidak dirancang untuk dapat berfungsi sempurna ketika dinaik-turunkan secara tiba-tiba. Dasar dari pipa pelimpah diselubungi oleh sebuah selubung karet yang berfungsi untuk menahan posisi pipa dan menjaga rongga dari kebocoran. Ketika ketinggian pipa diubah secara tiba-tiba, selubung karet ini terbawa ke atas dan tidak dapat menutup rongga di dasar pipa sehingga terjadi kebocoran. Untuk mengatasi masalah ini, diberikan lapisan lilin mainan di bawah rongga tersebut sehingga kebocoran dapat ditahan.

Pemodelan transpor pencemar membutuhkan pengaturan tinggi muka air hulu dan hilir yang lebih hati-hati. Karena kegiatan pemodelan ini membutuhkan injeksi pencemar berjenis *point source loading* di hulu *baffle plate*, tinggi muka air hulu menentukan bisa atau tidaknya pencemar masuk ke dalam massa pasir. Untuk dapat masuk ke dalam pasir, tekanan hidrostatik dari larutan *dye* yang keluar dari alat penyuntik harus dipastikan lebih besar daripada tekanan hidraulik di lokasi penyuntikan. Semakin tinggi muka air di hulu, makin besar tekanan hidraulik di lokasi ujung alat suntik dan semakin besar pula tekanan yang dibutuhkan untuk memasukkan pencemar tersebut. Untuk memenuhi kondisi tekanan yang dibutuhkan, perlu adanya kesesuaian dalam mengatur tinggi muka air hulu, kedalaman penetrasi alat suntik *dye*, dan tinggi reservoir larutan *dye*.

4.3.4 Injeksi larutan *dye* ke dalam pasir

Dalam kegiatan ini digunakan biuret untuk memasukkan larutan *dye* ke dalam pasir. Keuntungan menggunakan biuret adalah bentuknya yang panjang sehingga memudahkan penyesuaian ketinggian muka air larutan *dye*, terdapat keran pengatur bukaan lubang, dan terdapat bacaan skala di tepinya untuk membaca debit air yang keluar dari biuret. Biuret ini disambungkan dengan sebuah gelas ukur yang terbuat dari plastik untuk memudahkan penampungan dan pengukuran larutan yang turun.

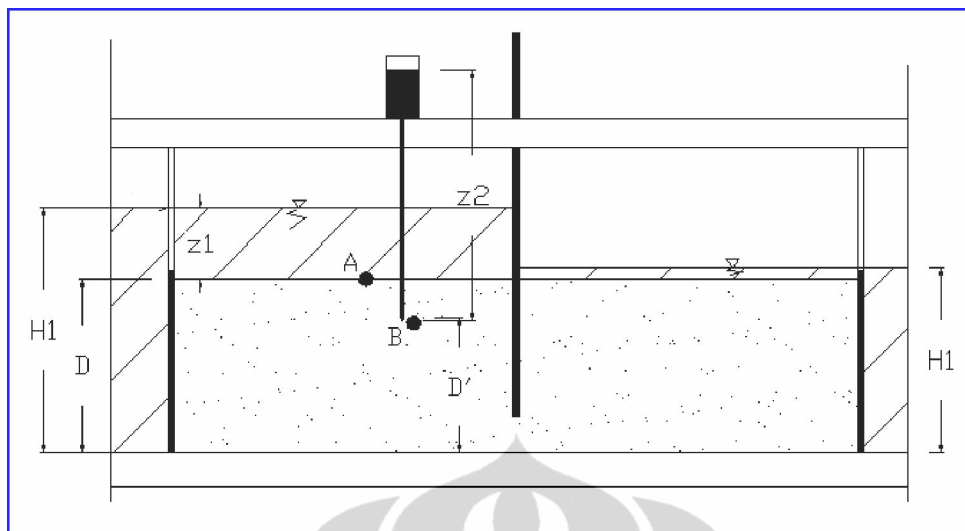


Gambar 4.13 Rangkaian alat injeksi *dye*

Sumber: dokumentasi pribadi

Ada dua hal yang perlu diperhatikan dalam proses masuknya larutan *dye* ke dalam pasir pada kegiatan pemodelan menggunakan *Seepage Tank* ini: pertama, tekanan fluida di ujung alat suntik pencemar dan kedua, jarak horisontal alat suntik dari tepi kaca. Hal yang pertama menentukan bisa atau tidaknya larutan *dye* masuk ke pasir, sementara hal yang kedua menentukan terlihat atau tidaknya perjalanan *dye* dalam pasir.

Untuk dapat memasukkan larutan *dye* ke dalam pasir, harus dipastikan bahwa tekanan hidrostatik *dye* di ujung alat suntik lebih besar daripada tekanan air yang terjadi di lokasi penyuntikan. Tekanan hidrostatik dari pencemar dipengaruhi oleh tinggi reservoir pencemar dan kedalaman penetrasi alat suntik *dye*. Ilustrasi mengenai hubungan kedua hal ini diberikan oleh gambar 4.14.



Gambar 4.14 Ilustrasi metode injeksi larutan *dye*

Sumber: olahan penulis

syarat pencemar masuk:

tekanan *dye* di B > tekanan akibat rembesan di B, atau

$$\left(z_2 + D' + \frac{v^2}{2g} \right)_{dye} > (z_1 + D')_{pasir}$$

Untuk memudahkan pencemar masuk, dibutuhkan penempatan reservoir pencemar yang tinggi dan penetrasi yang dalam. Semakin tinggi jarak reservoir pencemar dari permukaan pasir, semakin besar tekanan yang diberikan untuk masuk ke dalam pasir. Sementara semakin dalam penetrasi dilakukan, semakin rendah tekanan hidrostatik partikel tanah yang harus ditembus. Besarnya *hydraulic head* di titik penetrasi dapat diketahui dari bacaan manometer yang berada pada sisi belakang alat. Bentuk dari tabung yang digunakan untuk mengalirkan *dye* juga menentukan bisa atau tidaknya pencemar masuk ke pasir. Semakin besar diameter tabung, semakin sulit larutan *dye* masuk ke pasir karena *velocity head* yang dihasilkan semakin kecil.

Ketinggian volume larutan *dye* ini juga perlu dikontrol lebih jauh untuk memastikan *hydraulic head* yang dihasilkan tidak terlalu besar. Tekanan yang terlalu besar dapat menyebabkan larutan *dye* terpental ke arah tampungan air di atas pasir dan tidak masuk ke pasir. Percobaan menunjukkan bahwa penggunaan selang berdiameter kecil memiliki resiko yang lebih besar untuk hal ini terjadi daripada jika menggunakan biuret yang diameternya lebih besar.

Universitas Indonesia



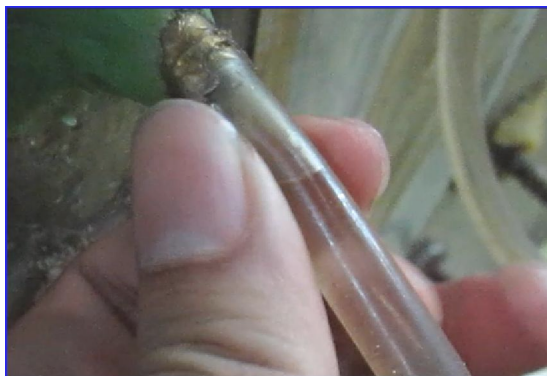
Gambar 4.15 Larutan *dye* tidak dapat masuk akibat tekanan yang terlalu besar

Sumber: dokumentasi pribadi

Untuk mengontrol visibilitas transpor pencemar, dibutuhkan jarak horisontal yang sesuai antara titik penetrasi dengan tepi kaca sehingga dispersi larutan *dye* ke arah transversal dapat mencapai kaca. Meski demikian, masuknya pencemar ke pasir tidak boleh dilakukan dengan meletakkan ujung alat suntik pencemar tepat di tepi kaca karena tidak dapat mewakili peristiwa transpor pencemar dalam media berpori. Dalam menentukan jarak antara titik penetrasi dan tepi kaca ini, telah dilakukan beberapa percobaan yang bertujuan untuk mengecek visibilitas transpor pencemar. Berdasarkan percobaan, diusulkan untuk meletakkan ujung alat suntik *dye* di jarak 200 mm dari tepi kaca.

4.3.5 Pengamatan data tekanan kondisi *steady*

Tekanan hidraulik di tiga puluh enam titik dalam massa pasir dapat diketahui dari pembacaan manometer yang dipasang pada sisi belakang alat *seepage tank*. Untuk mendapatkan kondisi pengaliran tunak (*steady*), pembacaan tekanan dilakukan setelah kolom air di sebelah hilir mencapai mulut pipa pelimpah. Agar presisi, pada setiap pembacaan manometer perlu dilakukan pengeluaran gelembung udara yang terperangkap dalam selang terlebih dahulu.



Gambar 4.16 Gelembung udara terperangkap dalam manometer

Sumber: dokumentasi pribadi

4.3.6 Pengamatan data tekanan kondisi *unsteady*

Pengamatan data tekanan kondisi *unsteady* dilakukan untuk memahami pengaruh perubahan tekanan hidrolis akibat perubahan tinggi muka air di atas permukaan pasir. Dalam percobaan yang dilakukan, kondisi *unsteady* diperoleh dengan meninggikan tinggi pipa pelimpah di sisi hulu peralatan. Pada rancangan metode penelitian, direncanakan untuk mengamati tinggi manometer yang bergerak setiap seperlima waktu dari total waktu yang dibutuhkan oleh muka air hulu untuk naik sampai ke ketinggian terakhir. Namun ternyata hal itu tidak dapat dilakukan karena singkatnya waktu tersebut dan dari percobaan terlihat bahwa waktu yang dibutuhkan oleh tiap manometer untuk mencapai kondisi stabil berbeda-beda. Maka diputuskan bahwa pengamatan dilakukan melalui pencatatan waktu yang dibutuhkan oleh tiap manometer untuk menaikkan tinggi bacaannya hingga kemudian stabil dan berhenti.

4.3.7 Pengamatan Transpor Pencemar

Dari kegiatan pemodelan transpor pencemar mekanisme adveksi dan dispersi, dapat dilihat pengaruh tekanan terhadap kejadian transpor pencemar, pengaruh gradien hidraulik hulu dan hilir terhadap kecepatan masuknya pencemar, dan gambaran mengenai perbedaan kecepatan antara transpor pencemar arah longitudinal aliran dengan arah transversal aliran.

Kecepatan rembesan mempengaruhi waktu yang dibutuhkan pencemar untuk berjalan dalam suatu garis aliran (*streamline*). Proses adveksi berlangsung sepanjang garis aliran rembesan dan memiliki kecepatan yang sama dengan kecepatan rembesan di jalur tersebut. Semakin besar perbedaan tekanan hidraulik

Universitas Indonesia

antara pasir di hulu dan hilir *baffle plate*, semakin besar kecepatan adveksi yang terjadi.

Memanfaatkan konsep kekekalan massa, besarnya kecepatan transpor pencemar larutan *dye* dapat diukur dengan mengamati fluks pencemar yang keluar dari reservoir pencemar. Kecepatan ini nilainya tidak sama dengan kecepatan rembesan yang terjadi di massa pasir karena fluks larutan *dye* menggambarkan tidak hanya turunnya pencemar di arah longitudinal aliran saja, tetapi juga turunnya pencemar ke arah transversal aliran.

Untuk mempelajari kejadian adveksi dan dispersi, dapat dilakukan pengamatan terhadap penjalaran warna yang tampak dari kotak kaca. Akan terlihat bahwa *front* (ujung) dari larutan *dye* muncul lebih dahulu daripada penjalaran warna arah transversal aliran. Perjalanan *front* larutan *dye* ini kemudian ditandai dengan isolasi atau spidol yang diberikan di permukaan kaca. Setiap kali penandaan dilakukan, perlu dibaca berapa lama waktu yang diperlukan *dye* untuk mencapai titik tersebut. Untuk variasi data, ketinggian muka air hulu dan hilir diubah-ubah untuk mengamati pengaruh tekanan terhadap kecepatan penjalaran larutan *dye* ini.

BAB 5
PELAKSANAAN PEMODELAN ALIRAN AIR DAN TRANSPOR
PENCEMAR PADA MEDIA BERPORI JENUH MENGGUNAKAN
SEEPAGE TANK

5.1 Tujuan Percobaan

Tujuan dari pemodelan ini terdiri dari tiga poin utama, yaitu:

- Memodelkan kejadian aliran air dan transport pencemar pada media berpori jenuh menggunakan *seepage tank*.
- Memperoleh data mengenai fungsi tekanan dan fluks kecepatan terhadap jarak pada media berpori jenuh.
- Memperoleh data mengenai fungsi konsentrasi terhadap jarak dan waktu dalam kejadian transport pencemar mekanisme adveksi-dispersi pada media berpori jenuh.

5.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam pemodelan aliran air dan transport pencemar pada media berpori adalah:

1. Pasir putih yang telah dicuci
2. Air
3. Pewarna makanan warna merah
4. Satu set peralatan seepage tank.
5. Alat penumbuk
6. Dua buah lembaran kayu yang dilapisi bahan tidak lolos air.
7. Lilin mainan
8. Gelas ukur plastik yang disambung dengan biuret
9. Biuret dan klem
10. Besi penyangga biuret
11. Benda pengganjal selang inlet
12. Isolasi
13. Stopwatch

5.3 Prosedur Percobaan

5.3.1 Persiapan

Persiapan bertujuan untuk memastikan kondisi batas dari pasir benar-benar *impermeable* dan pasir cukup padat sehingga tidak tergerus saat dialiri air. Cara kerjanya adalah:

- Letakkan dua lembaran kayu yang dilapisi bahan tidak lolos air di tepi kiri dan kanan rencana tumpukan pasir.
- Rapatkan permukaan kontak antara kayu dan kaca menggunakan lilin yang ditempel di sekeliling tepi kayu pembatas.
- Masukkan pasir ke dalam alat *seepage tank* secara berlapis dengan tebal tiap lapis adalah 3 cm.
- Pada setiap lapis penumpukan pasir, lakukan pemadatan dengan alat pemadat menggunakan beban 1 kg dan tinggi jatuh 20 cm sebanyak sepuluh kali untuk tiap area alat pemadat. Alat terus digeser hingga seluruh permukaan terpadatkan.
- Penumpukan pasir dilanjutkan hingga mencapai tinggi yang direncanakan.
- Masukkan air ke dalam bak penampungan yang berada di bawah *seepage tank*.

5.3.2 Pengamatan data tekanan pada kondisi *steady*

Rangkaian kegiatan pemodelan ini diawali dengan pengaturan kondisi pengaliran *steady* untuk mendapat data tekanan dan kecepatan sesuai urutan berikut:

- Atur ketinggian pipa pelimpah di hulu dan hilir.
- Masukkan selang inlet ke dalam kolom air hulu dan nyalakan pompa. Selang harus ditahan dengan benda pengganjal sehingga aliran air tidak menumbuk pasir secara langsung.
- Tunggu hingga air mencapai muka pipa pelimpah hulu dan bacaan manometer stabil.
- Hilangkan gelembung udara yang terperangkap di dalam manometer yang ada di belakang alat *seepage tank*.
- Lakukan pembacaan dan pencatatan manometer.

5.3.3 Pengamatan data tekanan pada kondisi *unsteady*

Untuk mengubah kondisi pengaliran menjadi *unsteady* dan mendapat data perubahan tekanan manometer terhadap waktu, diperlukan langkah-langkah berikut:

- Muka pipa pelimpah dari kegiatan sebelumnya dinaikkan hingga mencapai tinggi muka air baru yang diinginkan.
- Catat waktu yang dibutuhkan air untuk naik ke elevasi baru menggunakan *stopwatch*.
- Amati dan catat waktu yang dibutuhkan oleh masing-masing manometer untuk naik hingga mencapai keadaan stabil.

5.3.4 Pengamatan transpor pencemar

Urutan kegiatan yang dilakukan untuk dapat memasukkan model pencemar dan mengamati penjarannya meliputi:

- Rangkaian besi penyangga, biuret, dan klemnya.
- Rangkaian alat injeksi dye dipasang ke atas alat *seepage tank*. Ujung biuret dimasukkan sedalam 30 mm dari permukaan pasir dan diberi jarak 20 mm dari tepi kaca.
- Tahan sayap dari besi penyangga biuret menggunakan beban agar tidak terguling.
- Pastikan keran biuret tertutup, lalu masukkan larutan dye ke dalam tampungan gelas ukur di atas biuret.
- Hilangkan gelembung udara pada buret.
- Buka keran biuret, catat sebagai awal pemasukan *dye*.
- Amati dan catat lokasi serta waktu munculnya warna pertama kali di dalam pasir.
- Amati dan catat waktu yang dibutuhkan ujung (*front*) larutan *dye* untuk mencapai titik-titik tertentu.
- Setiap mencapai titik sembarang yang diharapkan, beri tanda bagi ujung larutan *dye* ini menggunakan isolasi atau spidol.

5.4 Hasil Pengamatan

5.4.1 Pengamatan Kondisi *Steady*

Menjadi awal dari rangkaian kegiatan dengan kondisi ketinggian air di hulu 40,5 cm dan di hilir 34 cm

Tabel 5.1 Bacaan manometer kondisi *steady*

40,5	40,5	40,5	40,6	33,8	34	34	34	33,9
40,3	40,3	40,2	40	34,3	34,3	34,2	34,2	34
40	39,8	39,7	39,1	35,5	34,7	34,5	34,3	34
39,8	39,7	39,4	38,5	36,5	35,4	34,7	34,5	34,2

5.4.2 Pengamatan Kondisi *Unsteady*

Kondisi aliran air diubah untuk mendapatkan perubahan tekanan terhadap waktu sehingga muka air di hulu 50 cm dan ketinggian air di hilir 34 cm.

Tabel 5.2 Waktu perubahan manometer hingga stabil (dalam detik)

28	34,56	35,06	35,22	39	45,54	58	58	58,10
28	34,56	35,06	35,22	39	45,54	58	58	58,10
28	34,56	35,06	35,22	39	45,54	58	58	58,10
28	34,56	35,06	35,22	39	45,54	58	58	58,10

Tabel 5.3 Bacaan akhir manometer (dalam cm)

50,2	50,2	50,2	50,5	34	34	34	34	34
49,8	49,5	49,1	48,7	34,8	34,8	34,5	34,3	34,2
49,2	49	48,4	46,8	37,7	36	35,2	34,8	34,3
48,8	48,7	48	45,3	40,5	37,5	35,9	35	34,6

5.4.3 Pengamatan transpor pencemar

Dilakukan pada kondisi yang berbeda dari kedua pengamatan sebelumnya. Kondisi awal yang ditetapkan dalam percobaan ini adalah

- ketinggian air di hulu 49,5 cm,
- ketinggian air di hilir 34 cm
- volume awal larutan dye = 950 mL, dan
- tinggi permukaan larutan dye = 70 cm dari permukaan pasir.

Tabel 5.4 Bacaan manometer untuk transpor pencemar

49,5	49,7	49,8	49,5	33,8	34	34	34,2	34
49,3	48,9	47,8	48	34,6	34,6	34,4	34,5	34,2
48,5	48,5	47,5	46	37,5	35,6	34,9	34,7	34,2
48	47,6	46,8	44,7	40	37	36,2	35	34,4

Tabel 5.5 Pengamatan awal adveksi dan dispersi dye

Muka Air (cm)		Penetrasi (mm)	Jarak Kaca (mm)	Flowrate dye	
Hulu	Hilir			ΔV (mL)	Δt (s)
49,5	34	30	20	50	526



Gambar 5.1 Pengamatan perjalanan ujung warna dye

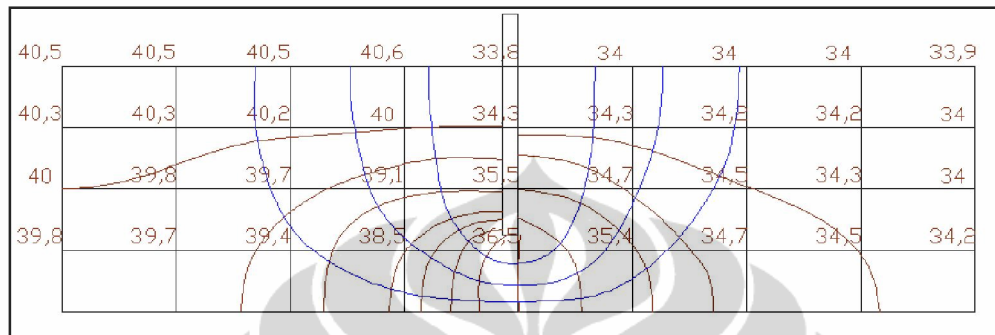
Tabel 5.6 Munculnya ujung warna dye

Titik	A	B	C	D	E	F	G
Jarak dari 0 (cm)	13,02	19,97	35,21	49,91	64,64	84,72	92,76
Waktu (s)	358	493	772	931	1121	1660	1800

5.5 Pengolahan Data

5.5.1 Distribusi Tekanan dan Garis Aliran Kondisi Pertama

Menggambarkan garis kontur tekanan dan kecepatan pada ketinggian air hulu 40,5 cm dan ketinggian air hilir 34 cm

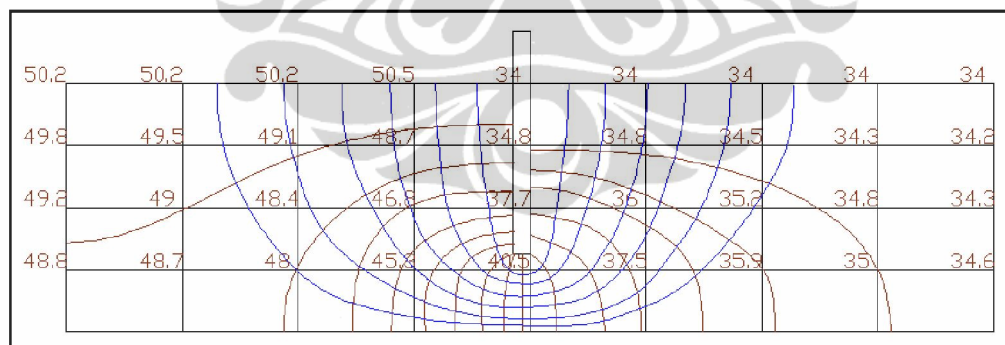


Gambar 5.2 Pola arus dan garis ekitensial kondisi pertama

5.5.2 Distribusi Tekanan dan Garis Aliran Kondisi Kedua

Menggambarkan garis kontur tekanan dan kecepatan pada

- ketinggian air hulu 50 cm, dan
- ketinggian air hilir 34 cm.



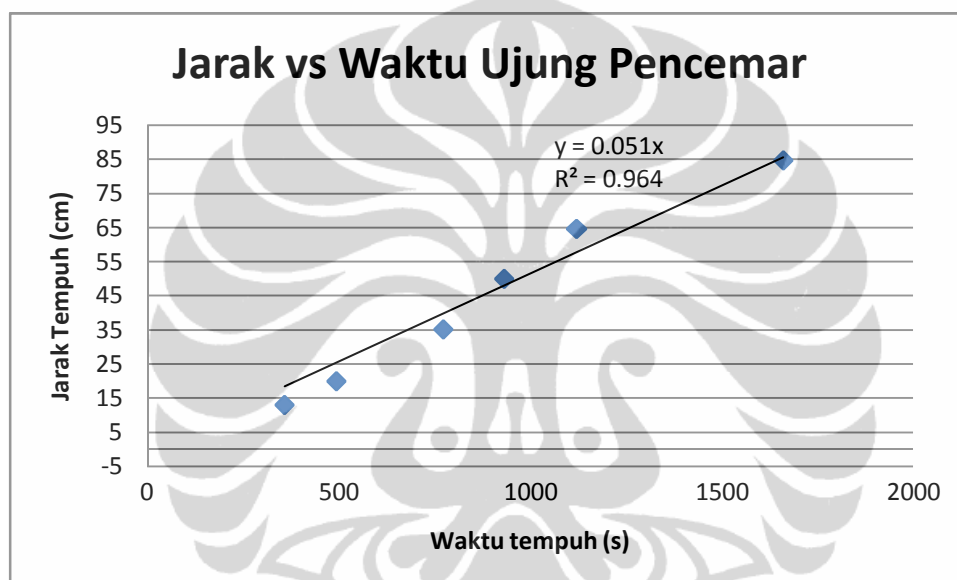
Gambar 5.3 Pola arus dan garis ekitensial akhir kondisi kedua

5.5.3 Kecepatan Transpor Pencemar

Pengolahan data untuk kegiatan ini dilakukan dengan membuat grafik jarak terhadap waktu dari kemunculan warna *dye* kemudian dibuat regresinya untuk mendapat nilai kecepatan.

Tabel 5.7 Hasil pengamatan ujung warna *dye*

Jarak tempuh (cm)	Waktu tempuh (s)
13.01985	358
19.96947	493
35.21221	772
49.90534	931
64.63511	1121
84.7145	1660
92.76336	1800



Gambar 5.4 Grafik jarak terhadap waktu tempuh ujung pencemar

Maka diperoleh kecepatan penjaralan ujung warna larutan *dye* adalah 0,051 cm/s.

5.6 Analisa

5.6.1 Analisa Praktikum

Kegiatan diawali dengan menyiapkan alat dan bahan ke dalam *seepage tank*. Kondisi batas tepi kiri dan kanan pasir diatur posisinya dan dibuat tidak lolos air. Pasir dimasukkan ke alat secara berlapis dengan ditambahkan pemadatan.

Kondisi pertama yang diamati adalah sebaran tekanan pada manometer saat kondisi tinggi muka air hulu 40,5 cm dan hilir 34 cm. Bacaan manometer

menunjukkan tekanan hidrolik pada 36 titik dalam massa pasir. Berdasarkan hasil pembacaan manometer, terlihat bahwa pada satu kolom di hilir *baffle plate*, semakin rendah posisi manometer, semakin rendah pula bacaan manometer. Jika dibandingkan antara dua manometer yang berada pada satu baris, maka manometer terdekat dari *baffle plate* memiliki tekanan yang lebih rendah. Sementara di hilir *baffle plate*, semakin rendah posisi manometer, justru bacaan tekanannya semakin tinggi. Dan semakin dekat jarak manometer dari *baffle plate*, tekanan yang didapat semakin besar.

Kondisi kedua yang diamati adalah kondisi transien atau *unsteady*. Muka pipa pelimpah di hulu dinaikkan sehingga diperoleh tinggi muka air 50 cm. Untuk menaikannya, pipa didorong ke atas. Dalam pelaksanaannya hal ini sulit dilakukan karena ketika pipa digeser, selubung karet yang menjaga agar bagian dasar alat tempat pipa dipasang menjadi terbawa ke atas sehingga terjadi kebocoran di bawah pipa. Untuk mengatasinya, sebelum praktikum, telah dipasang lilin untuk menutup dasar pipa sehingga dapat mengurangi tingkat kebocoran. Dari kegiatan yang dilakukan terlihat bahwa peninggian muka air menyebabkan bacaan tekanan seluruh manometer menjadi meningkat. Dalam mencatat waktu yang dibutuhkan oleh manometer untuk naik, dialami kesulitan karena jeda waktunya yang sangat singkat dan dibutuhkan lebih banyak orang untuk mengamatinya.

Kegiatan berikutnya merupakan suatu bentuk pemodelan transpor pencemar menggunakan larutan *dye* sebagai pencemarnya. Data percobaan yang digunakan merupakan data dari percobaan yang dilakukan di hari yang berbeda dari dua kegiatan sebelumnya. Oleh karena itu terlihat bahwa kondisi muka air di percobaan ini tidak sama dengan yang ada di akhir percobaan kondisi *unsteady*. Dalam kegiatan ini biuret dan rangkaian alat injeksi *dye* lainnya dipasang di *seepage tank* sebelum alat diisi air. Hal ini dilakukan untuk memudahkan pemasangan rangkaian alat tersebut. Muka air hulu dibuat setinggi 49,5 cm dan hilir 34 cm. Setelah diperoleh kondisi pengaliran yang stabil, dimulai pemasukan pencemar ke pasir.

Pengamatan dilakukan dengan menandai secara acak kemunculan titik-titik ujung pencemar yang terlihat dari kaca *seepage tank*. Waktu yang diperlukan

oleh tiap titik pengamatan untuk muncul diukur menggunakan *stopwatch* dan dicatat. Setelah penjalaran warna mulai terlihat, dilakukan pengukuran debit turunnya pencemar di dalam biuret. Untuk kemudahan, pengukuran dilakukan setiap selisih 50 cc sehingga ada bacaan yang menjadi tanda waktu mulai dan waktu berhenti.

5.6.2 Analisa Hasil

Gambar *flow net* yang diperoleh dari kondisi steady pertama tampak telah sesuai dengan teori sehingga sebaran tekanan di massa pasir dianggap telah terbaca dengan baik. Zona yang dibatasi oleh dua *equipotential line* dan dua *flow line* terlihat telah hampir menyerupai lingkaran sehingga pengukuran debit alirannya pun dapat disederhanakan dengan asumsi pasir homogen dan isotropik.

Akibat peningkatan ketinggian muka air pada kegiatan pemodelan aliran transien, gradien hidrolik dalam massa pasir menjadi lebih rapat. Hal ini ditunjukkan dengan selisih tekanan antara dua manometer berdekatan, baik secara vertikal ataupun horisontal, yang menjadi lebih besar. Peningkatan gradien hidrolik juga menaikkan nilai debit aliran air.

Tabel 5.8 Perbandingan distribusi tekanan dan garis aliran dua kondisi muka air

Tinggi Muka Air		Equipotential Line	Jumlah Streamtube
Hulu	Hilir		
40,5	34	13	4
50	34	16	7

Ketika muka pipa pelimpah dinaikkan, manometer membutuhkan jeda waktu beberapa saat hingga menunjukkan bacaan tekanan yang baru. Waktu yang diperlukan untuk tiap manometer berbeda-beda. Karena selisih waktu antar manometer dalam satu kolom sangat kecil, catatan waktu untuk empat manometer dalam satu kolom dianggap sama. Semakin dekat manometer dengan hilir, waktu yang dibutuhkan semakin lama.

Tabel 5.9 Waktu perubahan manometer di kondisi *unsteady*

Kolom	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t (s)	28	34,56	35,06	35,22	39	45,54	58	58	58,10

Pengamatan adveksi dan dispersi larutan *dye* hanya dapat menampilkan perjalanan dari ujung pewarna dalam pasir. Terlihat bahwa kecepatan perjalanan larutan dalam arah longitudinal aliran lebih besar dari pada arah transversal aliran. Hal ini dibuktikan dari gambar yang menunjukkan bahwa di awal waktu warna merah dari larutan tidak terlihat dari kaca. Penentuan titik tinjau dilakukan secara acak dan kemudian dicatat waktu sampainya. Kecepatan dihitung menggunakan regresi linear grafik dari data jarak terhadap waktu, dengan jarak tempuh sebagai sumbu y dan waktu tempuh sebagai sumbu x-nya. Diperoleh kecepatan penjarangan warna adalah 0,051 cm/s. Nilai kecepatan akibat adveksi dan dispersi ini tidak dapat dibandingkan dengan fluks kecepatan dari *streamtube* yang dibuat oleh *flow net* karena lebar dari *streamtube* yang ditembus oleh pewarna *dye* tidak dapat dianalisa melalui praktikum.

5.6.3 Analisa Kesalahan

Kesalahan yang mungkin muncul dalam percobaan ini adalah:

- Kesalahan bacaan manometer akibat gelembung udara ataupun akibat adanya pasir sangat halus yang terperangkap dalam manometer.
- Ketidaktepatan waktu dalam membaca manometer, terjadi apabila manometer dibaca sebelum tinggi muka airnya stabil.
- Kesalahan paralaks dalam membaca skala manometer di belakang alat *seepage tank*.
- Kesalahan dalam menghitung waktu menggunakan *stopwatch*.
- Penandaan titik warna yang tidak tepat karena warna diamati hanya secara kualitatif.

BAB 6

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Dari pemodelan yang telah dilakukan terhadap aliran air dan transpor pencemar pada media berpori jenuh menggunakan *seepage tank*, kesimpulan yang dapat diambil untuk menjawab tujuan dari kegiatan ini adalah sebagai berikut:

- Prosedur dari simulasi fisik aliran air dan transport pencemar pada media berpori jenuh dengan *seepage tank* meliputi deposit pasir ke dalam alat, pengaturan kondisi batas, pengaturan tinggi muka air di hulu dan hilir, injeksi larutan *dye* ke dalam pasir, pengamatan data tekanan kondisi *steady*, pengamatan data tekanan kondisi *unsteady*, dan pengamatan transpor pencemar.
- Simulasi aliran air pada media berpori di kondisi *steady* menghasilkan distribusi tekanan hidrolik di tiga puluh enam titik pembacaan manometer yang dapat diolah menjadi sebuah gambar pola arus dan garis ekipotensial
- Simulasi aliran air pada media berpori di kondisi *unsteady* menghasilkan catatan waktu perubahan manometer dari awal perubahan muka air hingga stabil di bacaan tekanan yang baru. Semakin dekat dengan hilir, waktu yang dibutuhkan manometer untuk stabil semakin lama.
- Kenaikan selisih tekanan hidrolik pada kondisi batas media berpori jenuh meningkatkan tekanan hidrolik di seluruh lokasi manometer.
- Simulasi transpor pencemar mekanisme adveksi-dispersi menghasilkan catatan waktu perjalanan ujung warna larutan *dye* dalam pasir pada titik-titik yang dipilih secara acak. Kuantifikasi nilai konsentrasi pada titik-titik tersebut belum dapat dilakukan dengan baik sehingga pengamatan rambatan warna sifatnya masih kualitatif. Keluaran dari kegiatan ini adalah kecepatan rambat warna ujung larutan *dye* yang terlihat dari kaca.
- Media berpori yang digunakan sifatnya kurang dispersif karena penjalaran warna arah transversal aliran secara visual terlihat sangat rendah.

6.2 Saran

Untuk mengembangkan pemodelan aliran air dan transport pencemar menggunakan *seepage tank*, terdapat beberapa saran yang dapat diajukan oleh penulis:

- Percobaan aliran air pada kondisi transien membutuhkan peralatan tambahan yang dapat menyesuaikan posisi selubung karet terhadap perubahan tinggi pipa sehingga kebocoran dapat dihindari.
- Perlu dipilih pencemar lain sebagai *tracer* untuk mengamati proses adveksi dan dispersi pada pasir. Penggunaan pewarna makanan hanya dapat menampilkan perjalanan larutan *dye* tetapi tidak dapat digunakan untuk mengukur nilai dispersivitas media berpori yang digunakan. Hal ini akibat tidak diketahuinya parameter yang menjadi penentu tingkat kekeruhan warna dan dapat dinyatakan sebagai konsentrasi.
- Perlu dilakukan suatu kegiatan *parameter estimation* yang membandingkan hasil praktikum dengan pemodelan matematik untuk memperoleh nilai dari properti-properti sistem aliran dan media berpori yang tidak dapat diketahui dari hasil laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrosyid, Jaji, Gurawan Jati Wibowo, M. Nursahid. Studi Gerusan dan Perlindungannya di Hilir Kolam Olakan Bendung Tipe USBR-I. *Dinamika Teknik Sipil* Volume 9, No 1, Januari 2009.
- Bedient, Philip B., Rifai, Hanadi S., & Newell, Charies J. (1994). *Ground Water Contamination*. New Jersey: Prentice Hall
- Craig, R.F. (1991). *Mekanika Tanah* (Budi Susilo S., Penerjemah). Jakarta: Penerbit Erlangga
- Freeze, R. Allan & John A. Cherry (1979). *Groundwater*. New Jersey: Prentice Hall
- Hendrawan, Diana. (2005). *Kualitas Air Sungai dan Situ di DKI Jakarta* (Jurnal Makara Teknologi Vol. 9 No.1, April 2005). Depok: Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Universitas Indonesia
- Instruction Manual Drainage and Seepage Tank* (1995). Hampshire: Armfield, Ltd
- Terzaghi, Karl, Peck, R.B., & Mesri G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Pedoman Praktikum Mekanika Tanah Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil Universitas Indonesia