

PROPOSAL PENELITIAN TESIS  
PENDEKATAN UNSATURATED SOIL  
MECHANICS PADA KASUS KONSTRUKSI  
TIMBUNAN JALAN DENGAN KADAR AIR  
TINGGI DAN CURAH HUJAN TINGGI

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL



Diajukan oleh  
Lea Marsela  
2016831010

Kepada  
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN  
KONSETRSI GEOTEKNIK  
2020

## ABSTRAK

*ABSTRACT*

## PRAKATA

## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
<i>ABSTRACT .....</i>	ii
PRAKATA .....	iii
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN.....	xi
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Lingkup Pembahasan.....	3
1.4 Metodologi Penelitian .....	3
1.5 Sistematika Penelitian .....	4
BAB 2 STUDI LITERATUR .....	5
2.1 <i>Unsaturated Soil Mechanics</i> .....	5
2.1.1 Sejarah Singkat.....	5
2.1.2 <i>Unsaturated</i> dan <i>Saturated</i> .....	6
2.2 <i>State Variable</i> .....	8
2.2.1 <i>Stress State Variable</i> .....	8
2.2.2 <i>Deformation State Variable</i> .....	8
2.2.3 <i>Constitutive Relations</i> .....	8

2.2.4 <i>Effective Stress</i> .....	9
2.3 Hukum Konstitutif Untuk <i>Unsaturated Soils</i> .....	11
2.3.1 <i>Volume Change</i> .....	11
2.3.2 <i>Shear Strength</i> .....	12
2.4 <i>Suction</i> .....	13
2.4.1 Mengukur <i>Matric Suction</i> .....	16
2.4.2 <i>High Air Entry Ceramic Disks</i> .....	18
2.5 <i>Volumetric Water Content</i> .....	19
2.6 <i>Soil Water Characteristic Curve</i> .....	20
2.7 <i>Hydraulic Conductivity</i> .....	21
2.7.1 <i>Constant Head</i> .....	23
2.7.2 <i>Constant Flow Method</i> .....	25
2.7.3 <i>Centrifuge</i> .....	26
2.7.4 <i>Hydraulic Diffusivity</i> .....	28
2.7.5 <i>Horizontal Infiltration Method</i> .....	29
2.7.6 <i>Outflow Methods</i> .....	33
2.7.7 <i>Instantaneous Profile Methods</i> .....	39
2.8 Material Vulkanik.....	41
2.8.1 Sifat Material Vulkanik .....	42
2.9 Hujan .....	43
2.10 Kriteria Jenis Aliran.....	45
BAB 3 METODE PENELITIAN .....	46

3.1 Aliran Pada Tanah <i>Unsaturated</i> .....	46
3.1.1 Aliran Satu Dimensi pada Tanah <i>Unsaturated</i> .....	46
3.1.2 Solusi Persamaan Diferensial Parsial Aliran Satu Dimensi ....	49
3.1.3 Aliran Dua Dimensi Pada Tanah <i>Unsaturated</i> .....	52
3.1.4 Solusi Persamaan Diferensial Parsial Aliran Dua Dimensi.....	54
3.2 Metode Elemen Hingga.....	56
3.2.1 Model Elemen.....	57
3.2.2 Fungsi Pendekatan.....	58
3.2.3 Hubungan Gradien, <i>Suction</i> dan Kecepatan Aliran.....	59
3.2.4 Menentukan Persamaan Elemen dan Solusi Besaran Primer ..	59
3.2.5 Besaran Sekunder .....	61
3.3 Fungsi Estimasi SWCC .....	61
3.4 Fungsi Estimasi <i>Hydraulic Conductivity- Suction</i> .....	63
3.5 Metode Pengolahan Data.....	64
<b>BAB 4 STUDI KASUS .....</b>	<b>66</b>
4.1 Kondisi Geologi.....	66
4.2 Karakteristik Tanah .....	69
4.3 Analisa.....	69
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>70</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>71</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>72</b>

## DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 1. FASE SOIL UNSATURATED (SUMBER: M. WIJAYA, 2020).....	7
GAMBAR 2. KATEGORI SOIL MECHANICS (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. RAHARDJO, M. D. FREDLUND, 1993) .....	8
GAMBAR 3. KONSTITUTIF ANGKA PORI UNTUK UNSATURATED SOILS ((SUMBER: D. G. FREDLUND, H. RAHARDJO, M. D. FREDLUND, 1993) .....	11
GAMBAR 4. MOHR-COLOUMB FAILURE ENVELOPE UNTUK UNSATURATED SOILS (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. RAHARDJO, M. D. FREDLUND, 1993)...	12
GAMBAR 5. TOTAL SUCTION DAN KOMPONEN MATRIC SUCTION DAN OSMOTIC SUCTION (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. RAHARDJO, M. D. FREDLUND, 2012) .....	13
GAMBAR 6. MODEL FISIK DAN FENOMENA KAPILARITAS (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. HARIANTO, 2001).....	14
GAMBAR 7. (A) OSMOTIC SUCTION TERHADAP MOLARITAS NaCl DAN (B) OSMOTIC SUCTION TERHADAP KONSENTRASI GARAM PER LITER NaCl (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012).....	16
GAMBAR 8. ALAT JET-FILL (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. HARIANTO, 2001).....	17
GAMBAR 9. ALAT CONVENTIONAL TENSIOMETER (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. HARIANTO, 2001) .....	17
GAMBAR 10. ALAT SMALL TIP TENSIOMETER (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. HARIANTO, 2001) .....	18
GAMBAR 11. THERMAL CONDUCTIVITY SENSOR (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012) .....	18
GAMBAR 12. CARA KERJA PIRINGAN KERAMIK/HAEC (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012) .....	19
GAMBAR 13. FASE PADA ELEMEN TANAH (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012) .....	19
GAMBAR 14. KURVA HUBUNGAN $W-\theta$ DENGAN VARIASI SATURASI.....	20

GAMBAR 15. CONTOH SWCC UNTUK BEBERAPA TANAH BELANDA (SUMBER: KOOREVAR, MENELIK DAN DIRKSEN, 1983).....	21
GAMBAR 16. CONTOH SISTEM PENGUKURAN UNSATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY DENGAN METODE CONSTANT HEAD (SUMBER: NING LU, WILLIAM J. LIKOS, 2004).....	23
GAMBAR 17. HASIL UJI DAN ANALISA CONSTANT HEAD HYDRAULIC CONDUCTIVITY (SUMBER: NING LU, WILLIAM J. LIKOS, 2004).....	24
GAMBAR 18. FUNGSI HYDRAULIC CONDUCTIVITY UNTUK MATERIAL PASIR (SUMBER: NING LU, WILLIAM J. LIKOS, 2004).....	24
GAMBAR 19. SKEMA UJI CONSTANT FLOW (SUMBER: OLSEN ET AL., 1994).....	25
GAMBAR 20. KURVA DATA HASIL UJI METODE CONSTANT FLOW (SUMBER: NING LU, WILLIAM J. LIKOS, 2004).....	25
GAMBAR 21. KURVA HASIL HYDRAULIC CONDUCTIVITY PENGUJIAN CONSTANT FLOW (SUMBER: SUMBER: NING LU, WILLIAM J. LIKOS, 2004).....	26
GAMBAR 22. SKEMA CENTRIFUGE (SUMBER: SUMBER: NING LU, WILLIAM J. LIKOS, 2004) .....	26
GAMBAR 23. KURVA HYDRAULIC CONDUCTIVITY-VWC UJI CENTRIFUGE UNTUK PASIR OAKLEY (SUMBER: NIMMO ET AL., 1987, 1992).....	27
GAMBAR 24. KURVA SWCC UJI CENTRIFUGE (SUMBER: NIMMO ET AL., 1987, 1992) .....	28
GAMBAR 25. FUNGSI HYDRAULIC CONDUCTIVITY-VWC UJI CENTRIFUGE DENGAN VARIASI KEDALAMAN (SUMBER: ASTM D 6527, 2001).....	28
GAMBAR 26. ILUSTRASI UJI HORIZONTAL INFILTRATION (SUMBER: KLUTE DAN DIRKSTEN, 1986) .....	29
GAMBAR 27. KURVA BOLTZMANN VARIABLE-VWC (SUMBER: KLUTE DAN DIRKSTEN, 1986) .....	31
GAMBAR 28. PLOT DATA BOLTZMAN VARIABLE-VWC DARI UJI HORIZONTAL INFILTRATION (SUMBER: NING LU, WILLIAM J. LIKOS, 2004).....	32
GAMBAR 29. KURVA VWC-HYDRAULIC DIFFUSIVITY DARI DATA UJI TABEL 5 (SUMBER: SUMBER: NING LU, WILLIAM J. LIKOS, 2004).....	32
GAMBAR 30. SKEMA METODE OUTFLOW (SUMBER: BENSON ET AL, 1993).....	33

GAMBAR 31. PRESSURE PLATE EXTRACTOR (SUMBER: TINUM ET AL, 1997) .....	34
GAMBAR 32. PERBANDINGAN DATA HYDRAULIC CONDUCTIVITY DENGAN UJI STEADY STATE DAN MULTI-STEP (SUMBER: GARDNER, 1956).....	34
GAMBAR 33. HYDRAULIC CONDUCTIVITY DARI UJI MULTI-STEP OUTFLOW (SUMBER: KUNZE DAN KIRKHAM, 1962) .....	35
GAMBAR 34. KURVA DIFFUSIVITY DIUKUR DENGAN ONE-STEP OUTFLOW (SUMBER: PASSIOURA, 1976).....	35
GAMBAR 35. KURVA HYDRAULIC CONDUCTIVITY DARI PASIR DUNE DENGAN UJI ONE-STEP OUTFLOW DAN HORIZONTAL INFILTRATION METHOD (SUMBER: STEPHENS 1989) .....	35
GAMBAR 36. ILUSTRASI METODE OUTFLOW DENGAN TEMPE PRESSURE CELL (SUMBER: T. W. GREEN., Z. PAYDAR., H. P. CRESSWELL DAN R. J. DRINKWATER, 1998).....	36
GAMBAR 37. SKEMA UJI MULTI-STEP DENGAN MODIFIKASI TEMPE PRESSURE CELL (SUMBER: S. O. ECHING., J. W. HOPMANS., O. WENDROTH, 1994).....	37
GAMBAR 38. KURVA HYDRAULIC CONDUCTIVITY (A) YOLO SILT LOAM (B) PANOCHE LOAM (C) HANFORD SANDY LOAM (D) Oso FLACO FINE SAND (SUMBER: S. O. ECHING., J. W. HOPMANS., O. WENDROTH, 1994) .....	37
GAMBAR 39. CELL YANG DIPAKAI OLEH SALEHZADEH DAN DEMOND (1994).....	38
GAMBAR 40. SWCC DARI UJI METODE CONTINOUS OUTFLOW DAN 100 kPa PRESSURE PLATE EXTRACTOR (SUMBER: SALEHZADEH DAN DEMOND, 1994).....	38
GAMBAR 41. SKEMA KONDISI LOKASI UJI INSTANTANEOUS PROFILE METHOD (SUMBER: CRAIG H. BENSON., MOLLY M. GRIBB, 1997) .....	39
GAMBAR 42. PERMEAMETER YANG DIGUNAKAN MEERDINK (1996) UNTUK UJI INSTANTANEOUS PROFILE.....	40
GAMBAR 43. KONSEP PROFIL (KIRI) SUCTION HEAD (KANAN) VOLUMETRIC WATER CONTENT DARI HASIL UJI METODE INSTANTANEOUS PROFILE (SUMBER: NING LU, WILLIAM J. LIKOS, 2004).....	40
GAMBAR 44. HYSTERESIS DALAM UNSATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY UNTUK WENATCHEE SILTY CLAY (SUMBER: MEERDINK ET AL, 1996).....	41

GAMBAR 45. DIAGRAM PROSES TERBENTUKNYA TANAH (SUMBER: WESLEY 2009) .....	42
GAMBAR 46. CONTOH HASIL UJI KOMPAKSI (SUMBER: WESLEY, 2009) .....	43
GAMBAR 47. ILUSTRASI KONDISI HIDROSTATIK DAN ALIRAN STEADY STATE PADA ZONA NEGATIVE PORE WATER PRESSURE (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012) .....	46
GAMBAR 48. KONDISI ALIRAN SATU DIMENSI PADA ELEMEN TANAH (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012) .....	47
GAMBAR 49. ILUSTRASI BEDA HINGGA (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012) .....	49
GAMBAR 50. PEMODELAN KONDISI STEADY STATE DAN SYARAT BATAS (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012).....	51
GAMBAR 51. KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI PADA ELEMEN TANAH (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012) .....	52
GAMBAR 52. (A) KONDISI HETEROGENEOUS, ISOTROPIK (B) KONDISI HETEROGENEOUS, ANISOTROPIC (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012) .....	52
GAMBAR 53. TITIK NODAL METODE BEDA HINGGA (SUMBER: MAHADZER MAHMUD, 1996)....	56
GAMBAR 54. PASCAL'S TRIANGLE .....	58
GAMBAR 55. CONTOH GRAFIK SWCC (SUMBER: D. G. FREDLUND, 2019).....	62
GAMBAR 56. TIPIKAL KURVA SWCC DAN HYDRAULIC CONDUCTIVITY UNTUK TANAH PASIR DAN LANAU KELEMPUNGAN (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. FREDLUND, M. D. FREDLUND, 2012) .....	63
GAMBAR 57. METODE STATISTIK UNTUK PERMEABILITAS UNSATURATED (MARTIN WIJAYA, 2020) .....	64
GAMBAR 58. DIAGRAM ALIR PENELITIAN .....	65
GAMBAR 59. PETA FISIOGRAFI JAWA BARAT (SUMBER: MARTOJOJO, 1984) .....	66
GAMBAR 60. PETA GEOLOGI AREA BOGOR (SUMBER: A.C. EFFENDI DKK, 1998), SUPERIMPOSE PETA DESA DAN PETA JALAN .....	68
GAMBAR 61. STRATIGRAFI AREA BOGOR (SUMBER: SUJANTO DAN SUMANTRI, 1977; MARTODOJOJO, 2003; SUYONO ET AL, 2005).....	68

## **DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN**

## DAFTAR TABEL

TABEL 1. PERBEDAAN SATURATED DENGAN UNSATURATED (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. RAHARDJO, M. D. FREDLUND, 1993) .....	6
TABEL 2. KOMBINASI STRESS STATE VARIABLES (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. RAHARDJO, M. D. FREDLUND, 1993) .....	10
TABEL 3. CONTOH KADAR GARAM DALAM AIR (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. HARIANTO, M. D. FREDLUND, 2012) .....	15
TABEL 4. JENIS CARA PENGUKURAN SUCTION (SUMBER: HU PAN, YANG QING, LI PEI-YONG, 2010) .....	16
TABEL 5. DATA HASIL ANALISA UJI HORIZONTAL INFILTRATION (SUMBER: NING LU, WILLIAM J. LIKOS, 2004).....	31
TABEL 6. DAFTAR SOLUSI ANALITIKAL UNTUK PERSAMAAN LAPLACIAN.....	54
TABEL 7. DAFTAR SOLUSI PENDEKATAN UNTUK PERSAMAAN LAPLACIAN.....	54
TABEL 8. JENIS ELEMEN.....	57

## **DAFTAR LAMPIRAN**

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Permasalahan kondisi alam seperti curah hujan yang tinggi serta material konstruksi yang didapatkan disekitar lokasi kerja menjadi pilihan utama pada awalnya. Selain untuk mengoptimalkan metode kerja juga untuk minimalisir biaya konstruksi yang dikeluarkan. Prinsip ini yang biasa luput dari perhatian pada saat penentuan lokasi konstruksi yang akan dibangun. Karena pada saat penentuan lokasi dikerjakan, data utama sebagai bahan pertimbangan belum didapatkan atau sedang dalam proses pengumpulan. Permasalahan timbul setelah proses konstruksi berjalan, dimana waktu menjadi kendala utama yang menyebabkan aktifitas terhambat dan pada akhirnya biaya menjadi tinggi.

Kegiatan pembangunan yang memerlukan material konstruksi dari alam dengan jumlah yang sangat besar seperti pekerjaan penggalian dan penimbunan untuk jalan tol menjadi contoh nyata bahwa material tanah yang dipakai untuk pekerjaan diatas menjadi sangat dominan sebagai penentu kecepatan kapan proyek akan selesai.

Sifat material tanah yang terbentuk tegantung dari kondisi geologi dan alam sekitar, kondisi geologi meliputi bagaimana material tanah atau batuan itu terbentuk sedangkan untuk kondisi alam menggambarkan bagaimana material tanah atau batuan tersebut bereaksi. Seperti contoh material yang ada disekitar pegunungan ataupun kaki gunung biasa terbentuk dari material yang mengandung lava yang mengendap, bila dalam skala umur bantuan masuk dalam kriteria yang tidak terlalu lama maka pada endapan tersebut terbentuk material yang berpori. Pada kondisi alam seperti curah hujan yang tinggi akan diketemukan material tanah yang dilokasi permukaan akan mengandung kadar air yang cukup tinggi.

Sifat material yang disebutkan sebelumnya akan menjadi tantangan tersendiri saat akan digunakan sebagai bahan timbunan ataupun galian, yang mana area kerja akan

sulit karena landasan kerja selalu basah dan akan sulit dipadatkan apabila akan digunakan sebagai bahan pengisi timbunan.

Saat ini metode kerja yang dipakai untuk mensiasati kendala yang ada adalah dengan memberikan material sirtu sebagai lapisan pengisi agar lantai kerja bisa dilewati dan ketinggian timbunan yang diharapkan bisa tercapai dengan cepat.

Kendala saat dilakukan penambahan material sirtu adalah biaya menjadi tinggi dan geometri timbunan berubah menjadi berlapis serta timbulnya rembesan akibat infiltrasi dari air yang masuk melalui lapisan sirtu.

Mekanisme terjadinya infiltrasi dan rembesan dapat didekati dengan teori mekanika tanah tidak jenuh (*Unsaturated Soil Mechanics*), didalam teori tersebut didapatkan hubungan parameter *hydraulic conductivity* terhadap *suction* serta hubungan parameter *volumetric water content* terhadap *suction*.

Kemajuan dari *unsaturated soil mechanics* juga sudah bisa dikombinasikan dengan metode elemen hingga/*finite element method*. Kombinasi tersebut dapat menggambarkan urutan konstruksi disertai dengan simulasi kondisi curah hujan selama konstruksi berlangsung ataupun pengecekan kondisi setelah akhir konstruksi.

## 1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian

Adapun maksud dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan analisa kondisi timbunan secara khusus pada lokasi STA 18+975.
2. Melakukan kajian efek infiltrasi dan rembesan terhadap kondisi curah hujan.
3. Mempelajari efek infiltrasi terhadap kondisi timbunan multi lapis material.
4. Melakukan analisa kurva *VWC-Suction* dan *Hydraulic Conductivity-Suction*.

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Memperoleh informasi mengenai karakteristik timbunan dengan kondisi curah hujan yang ada.
2. Mempelajari perilaku kurva *VWC-Suction* dan *Hydraulic Conductivity-Suction* dari material tersebut.

### **1.3 Lingkup Pembahasan**

Studi yang akan dilakukan mencakup tahap sebagai berikut:

1. Studi literatur terkait topik penelitian.
2. Mengumpulkan dan mengolah data sekunder serta melakukan korelasi dari data aktual lapangan sebagai bahan penelitian.
3. Melakukan analisa perilaku timbunan dengan kondisi curah hujan yang bervariasi.

### **1.4 Metodologi Penelitian**

Penelitian dilakukan di STA 18+975, lokasi ini berada di ruas jalan Tol Bocimi seksi 2 sepanjang 12 Km yang akan melintasi formasi geologi dan lapisan tanah yang bervariasi. Proyek Tol Bocimi Seksi 2 membentang dari utara (Cigombong) ke bagian selatan (Cibadak).

Pada penelitian dilakukan pengumpulan data hasil pengujian sampel tanah di laboratorium dan lapangan, data curah hujan serta data hasil pembacaan dari *jet-fill* untuk mengukur *volumetric water content* langsung dari lokasi lapangan. Data yang terkumpul akan dilakukan pemodelan dengan menggunakan bantuan software Geostudio. Hasil keluaran dari perhitungan tersebut akan dibandingkan untuk ditarik kesimpulan mengenai pemodelan tersebut.

## **1.5 Sistematika Penelitian**

Penulisan terdiri dari lima bab dengan susunan sebagai berikut:

### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Berisi mengenai latar belakang penelitian, pembatasan masalah, maksud dan tujuan penelitian, lingkup pembahasan, metodologi penelitian serta sistematika penulisan.

### **BAB 2 STUDI LITERATUR**

Pada bab ini akan ditinjau mengenai *unsaturated soil mechanics*, pembahasan mengenai *soil water characteristic curve*, *hydraulic conductivity*, *volumetric water content*, *suction*, membahas beberapa cara pengukuran yang dilakukan berkaitan dengan parameter tersebut serta karakteristik dari tanah vulkanik.

### **BAB 3 METODE PENELITIAN**

Bab ini membahas mengenai metodelogi yang digunakan untuk analisa, seperti metode beda hingga, metode elemen hingga yang akan digunakan pada saat analisa.

### **BAB 4 STUDI KASUS**

Bab ini menguraikan kondisi lapangan yang akan dijadikan referensi untuk analisa, data-data yang tersedia, korelasi yang digunakan, parameter yang dipakai serta hasil perhitungan dengan bantuan program komputer.

### **BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi beberapa kesimpulan dan saran-saran dari hasil analisis dan evaluasi.

## BAB 2

# STUDI LITERATUR

### 2.1 *Unsaturated Soil Mechanics*

#### 2.1.1 Sejarah Singkat

Sejarah singkat perkembangan *unsaturated soil mechanics* dimulai sejak tahun 1930an, dimana pada waktu itu ada kegiatan konferensi perdana bernama ISSMFE (International Society of *Soil Mechanics* and Foundation Engineering) yang diadakan pada tahun 1936. Poin penting utama yang dihasilkan dari acara tersebut adalah dicetuskannya prinsip *saturated soil mechanics*, dipertimbangkannya *unsaturated soil mechanics*, ada dua paper yang ditampilkan berkenaan dengan kapilaritas tanah oleh Ostashev (1936) dan diusulkannya dua alat untuk mengukur tekanan kapiler dan ketinggian kapiler dari air pada tanah oleh Boulichev (1936) (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Hogentogler dan Barber pada tahun 1941 mencoba menjelaskan lebih detil mengenai sifat alami kapiler dari air. Lalu pada tahun 1943, Terzaghi menulis buku berjudul “*Theoretical Soil Mechanics*” dan memperkenalkan mekanisme daripada kapilaritas.

Ditempat lain yaitu di Imperial College, London, dilakukan penelitian mengenai *unsaturated soil mechanics* yang konteksnya mirip dengan saturated soils. Para peneliti tersebut diantaranya: Bishop, Alpan, Blight dan Donald pada tahun 1960 dan Black, Croney pada tahun 1957.

Selanjutnya, pada tahun 1970an dan 1980an mulai dibangun penelitian untuk *unsaturated soils* berdasarkan dua *independent stress state variables* oleh: Matyas, Randhakrishna tahun 1968 dan Fredlund, Morgenstern tahun 1977.

## 2.1.2 Unsaturated dan Saturated

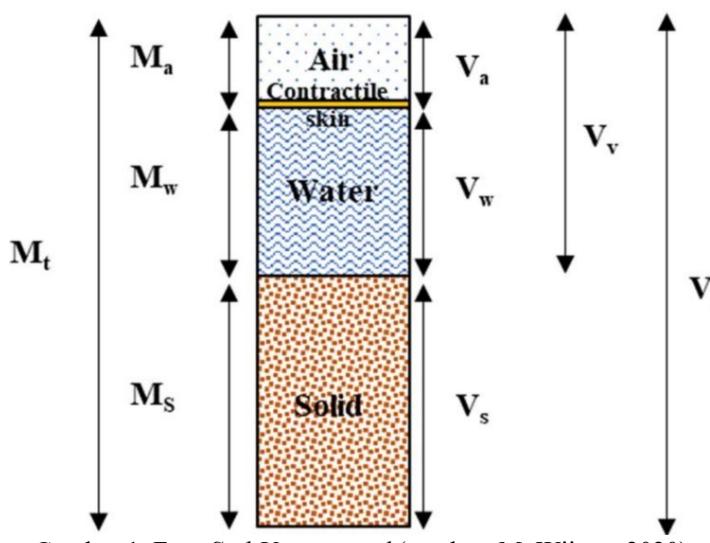
Pada umumnya, pemodelan material dengan perilaku yang tidak konsisten dan mempunyai fase lebih dari dua akan sulit dimodelkan dan tidak praktis secara teknis. Perbedaan mendasar antara *saturated soil* dan *unsaturated soil* adalah pada perilaku dasar. Untuk *unsaturated soil* mempunyai lebih dari dua fase dan nilai tekanan air pori relatif bernilai negatif terhadap tekanan pori udara. Untuk lokasi material tanah yang berada di lokasi permukaan akan cenderung relatif lebih kering yang mana ini menunjukkan adanya tekanan air pori negatif dan kemungkinan adanya kondisi tak jenuh.

Tabel 1. Perbedaan *Saturated* dengan *Unsaturated* (sumber: D. G. Fredlund, H. Rahardjo, M. D. Fredlund, 1993)

Principle or equation	Saturated soil	Unsaturated soil
Stress state variables	$(\sigma - u_w)$	(3) $(\sigma - u_a)$ and $(u_a - u_w)$
Shear strength	$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi'$	(5) $\tau = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b + (\sigma - u_a) \tan \phi'$
		(6a) $c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$ (6b)
Flow law for water (Darcys law)	$v_w = -k_s (\partial h_w / \partial y)$ $h_w = y + (u_w / \rho_w g)$	(7) $v_w = -k_s (u_a - u_w) (\partial h_w / \partial y)$ $h_w = y + (u_w / \rho_w g)$
Unsteady state seepage		
	$k_s \left( \frac{\partial^2 h_w}{\partial x^2} \right) + k_s \left( \frac{\partial^2 h_w}{\partial y^2} \right) = m_1 A_w \frac{\partial h_w}{\partial t}$	(9) $\frac{\partial}{\partial x} \left( k_w \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) = m_2^w A_w g \frac{\partial h_w}{\partial t}$ (10)
Slope stability based on limit equilibrium		
Moment equilibrium	$F_m = \frac{\sum [c' f R + (N - u_w \beta) R \tan \phi']}{\sum Wx - \sum Nf}$	(11) $F_m = \frac{\sum \left[ c' \beta R + \left\{ N - u_w \beta \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \right\} R \tan \phi' \right]}{\sum Wx - \sum Nf}$ (12)
Force equilibrium	$F_f = \frac{\sum [c' \beta \cos \alpha + (N - u_w \beta) \tan \phi' \cos \alpha]}{\sum N \sin \alpha}$	(13) $F_f = \frac{\sum \left[ c' \beta \cos \alpha + \left\{ N - u_w \beta \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \right\} \tan \phi' \cos \alpha \right]}{\sum N \sin \alpha}$ (14)

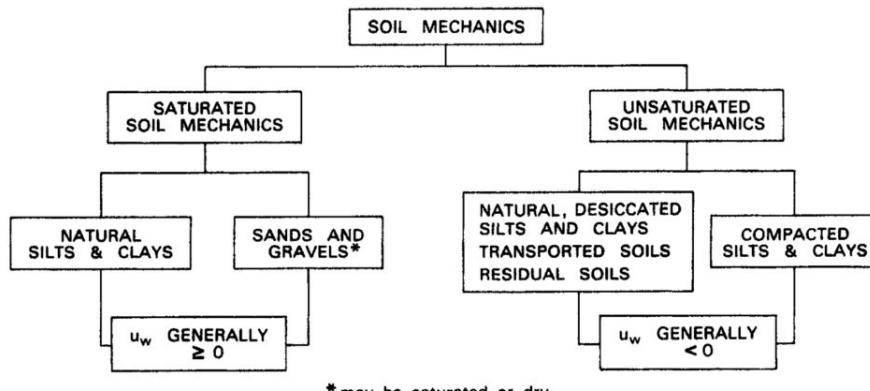
Adanya proses pekerjaan galian dan timbunan pada material tanah akan menyebabkan material tanah berada pada kondisi *unsaturated*. Kondisi ini yang membuat sulit bila hanya memodelkan material menjadi *saturated soil*.

*Unsaturated soil* umumnya dimodelkan dengan hanya tiga fase yang terdiri dari: butir, air dan udara, bahkan dapat dimodelkan menjadi empat fase yang terdiri dari: butir, air, udara dan lapisan kontraktile yaitu lapisan tipis diantara air dan udara. Walaupun sangat kecil keberadaannya, ini dapat menyebabkan adanya sumbatan udara yang menjadi gelembung udara yang menyebabkan terjadinya air pori yang terkompresi.



Gambar 1. Fase Soil *Unsaturated* (sumber: M. Wijaya, 2020)

Cuaca memainkan peranan penting dalam pembentukan kondisi material tanah apakah *saturated* atau *unsaturated* dikarenakan adanya proses evaporasi dari permukaan tanah bahkan evapotranspirasi akibat vegetasi sekitar permukaan. Proses ini yang menimbulkan adanya aliran air yang masuk atau keluar dari dalam tanah, disamping itu adanya hujan yang memberikan tambahan aliran air masuk kedalam tanah. Perbedaan aliran air masuk dan keluar ini yang sangat menentukan akhir dari kondisi tanah. Bila aliran air yang keluar lebih banyak maka material tanah akan menjadi kering atau kondisi menjadi tak jenuh dan timbulnya retakan dipermukaan dan bila terjadi sebaliknya, kondisi tanah menjadi jenuh. Kedalaman muka air tanah dipengaruhi oleh besarnya selisih aliran air yang terjadi. Garis hidrostatik pada muka air tanah akibat adanya kondisi seimbang antara aliran air yang masuk dan aliran air yang keluar. Selama periode kemarau, tekanan air pori menjadi negatif, ini ditandai dengan muka air tanah hidrostatik akan bertambah terhadap permukaan dan begitu juga kondisi sebaliknya.



Gambar 2. Kategori *soil mechanics* (sumber: D. G. Fredlund, H. Rahardjo, M. D. Fredlund, 1993)

## 2.2 *State Variable*

*State variable* adalah besaran yang bisa diukur dalam suatu bentuk dengan cara pengukuran yang berbeda untuk menggambarkan suatu sistem yang tidak terkait dengan properti dari suatu material.

### 2.2.1 *Stress State Variable*

*Stress state variable* adalah *state variable* yang berhubungan dengan gaya pada kondisi seimbang tanpa terkait dengan properti dari material, contohnya adalah tegangan dan sebagainya.

### 2.2.2 *Deformation State Variable*

*Deformation state variable* adalah *state variable* yang berhubungan dengan perpindahan, distorsi dan perbedaan dari kondisi awal tanpa terkait dengan properti daripada material.

### 2.2.3 *Constitutive Relations*

*Constitutive relations* atau biasa disebut hubungan konstitutif adalah sebuah persamaan tunggal yang menggambarkan hubungan masing-masing *state variable* dan berhubungan dengan properti atau sifat daripada material dan dapat disimulasikan prosesnya.

## 2.2.4 Effective Stress

Pada tahun 1963, Terzaghi memberikan gambaran bahwa *stress state variable* menentukan perilaku daripada *saturated soils*. Kegunaan daripada *stress state variable* adalah untuk digunakan saat menyusun persamaan konstitutif yang menggambarkan perilaku kuat geser dan perubahan volume dari suatu material. Saat kondisi tidak ada air, tegangan yang terjadi pada massa tanah dapat dihitung dengan cara menggunakan prinsip total *stress*, tetapi bila dalam rongga massa tanah terisi air maka total *stress* terdiri dari dua bagian yaitu tegangan dari air dan tegangan dari massa tanah itu sendiri. Karena tegangan dari air sama besar untuk semua arah, maka komponen setiap perubahan arah tegangan yang diukur akan sangat tergantung dari tegangan efektifnya. Sehingga *stress state variable* untuk *saturated soil* menggunakan konsep tegangan efektif, dengan persamaan Eq. 1.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad \text{Eq. 1}$$

dimana:

$$\begin{aligned} \sigma &= \text{total normal stress, kPa} \\ u_w &= \text{pore-water pressure, kPa} \end{aligned}$$

Untuk *unsaturated soil*, telah banyak diusulkan oleh para peneliti untuk menghitung besanya tegangan efektif antara lain Croney, 1952 pada persamaan Eq. 2.

$$\sigma' = \sigma - \beta' u_w \quad \text{Eq. 2}$$

dimana:

$$\beta' = \text{bonding factor}$$

Bishop (1959), mengusulkan persamaan untuk menghitung tegangan efektif dengan persamaan Eq. 3.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad \text{Eq. 3}$$

dimana:

$$\begin{aligned} \chi &= \text{parameter related to the degree of saturation of the soil} \\ u_a &= \text{pore-air pressure, kPa} \end{aligned}$$

Richards (1966), ikut mengusulkan persamaan untuk menghitung tegangan efektif dengan memasukan faktor *suction* dari kandungan material terlarut, Eq. 4.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi_m(h_m + u_a) + \chi_s(h_s + u_a) \quad \text{Eq. 4}$$

dimana:

$\chi_m$	= effective stress parameter for matric suction
$h_m$	= matric suction
$\chi_s$	= effective stress parameter for solute suction
$h_s$	= solute suction

Setelah adanya beberapa usulan untuk menentukan besarnya tegangan efektif, dan berdasarkan percobaan diketahui besarnya tegangan efektif mempunyai nilai yang tidak tunggal karena berhubungan dengan banyak faktor. Berdasarkan pertimbangan ini maka banyak peneliti mengusulkan menggunakan *independent stress state variables* seperti  $(\sigma - u_a)$  dan  $(u_a - u_w)$  untuk menggambarkan perilaku mekanis dari *unsaturated soils* serta memasukan beberapa kemungkinan kombinasi yang dapat digunakan, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kombinasi *Stress State Variables* (sumber: D. G. Fredlund, H. Rahardjo, M. D. Fredlund, 1993)

Reference Pressure	Stress State Variables
Air, $u_a$	$(\sigma - u_a)$ and $(u_a - u_w)$
Water, $u_w$	$(\sigma - u_w)$ and $(u_a - u_w)$
Total, $\sigma$	$(\sigma - u_a)$ and $(\sigma - u_w)$

Perkembangan selanjutnya, penggunaan konsep tegangan efektif untuk *unsaturated soils* menggunakan persamaan Bishop (1959) dengan menggantikan parameter  $\chi$  (chi) dengan parameter S (derajat saturasi).

## 2.3 Hukum Konstitutif Untuk *Unsaturated Soils*

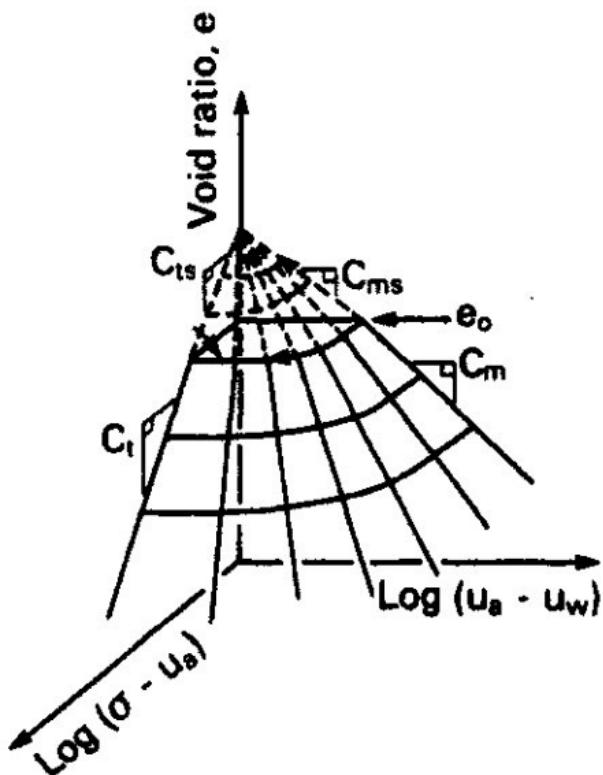
### 2.3.1 Volume Change

Persamaan perubahan volume ditentukan oleh besarnya nilai angka pori, berdasarkan usulan Fredlund (1979), persamaan konstitutif untuk nilai dari angka pori pada kondisi besarnya tegangan tertentu adalah pada persamaan Eq. 5.

$$e = e_o - C_t \cdot \log \frac{\sigma - u_a}{(\sigma - u_a)_0} - C_m \cdot \log \frac{u_a - u_w}{(u_a - u_w)_0} \quad Eq. 5$$

dimana:

$e_o$	= initial void ratio
$C_t$	= volume change index respect to net normal stress
$C_m$	= volume change index respect to matric suction
$(\sigma - u_a)_0$	= initial net normal stress
$(u_a - u_w)_0$	= initial matric suction



Gambar 3. Konstitutif angka pori untuk *unsaturated soils* ((sumber: D. G. Fredlund, H. Rahardjo, M. D. Fredlund, 1993)

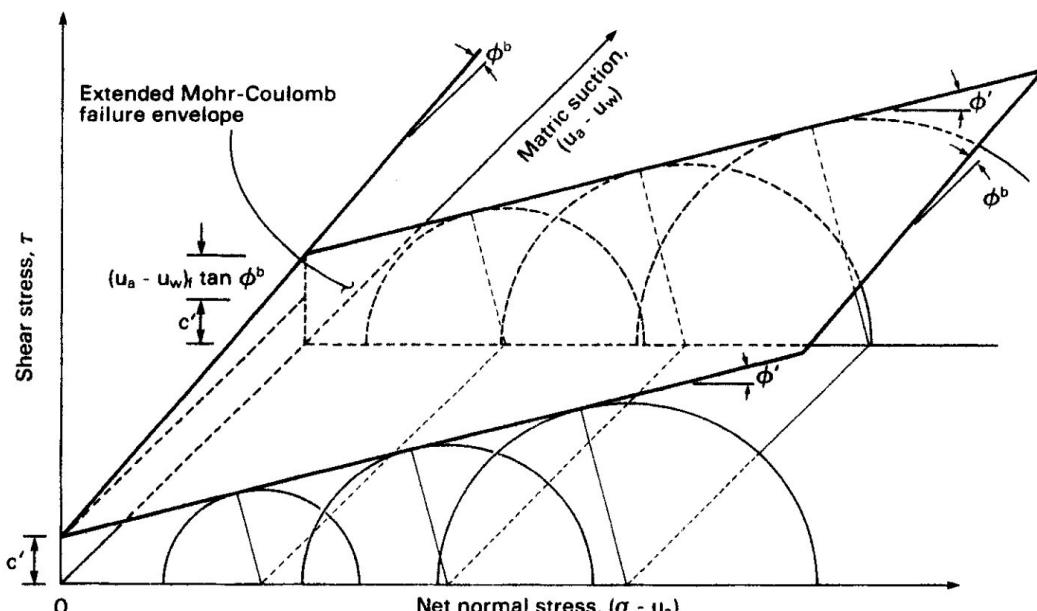
### 2.3.2 Shear Strength

Bentuk linear persamaan tegangan geser untuk *unsaturated soil* dirumuskan oleh Fredlund (1978) dengan menggunakan *independent stress state variable* dapat dilihat pada persamaan Eq. 6.

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)_f \cdot \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \cdot \tan \phi^b \quad \text{Eq. 6}$$

dimana:

- $c'$  = effective cohesion
- $\phi^b$  = angle indicating the rate of increase in shear strength with respect to a change in matric suction
- $\phi'$  = angle of internal friction associated with the net normal stress state variable
- $(\sigma_f - u_a)_f$  = net normal stress state on the failure plane at failure
- $(u_a - u_w)_f$  = matric suction on the failure plane at failure



Gambar 4. Mohr-Coloumb failure envelope untuk *Unsaturated Soils* (sumber: D. G. Fredlund, H. Rahardjo, M. D. Fredlund, 1993)

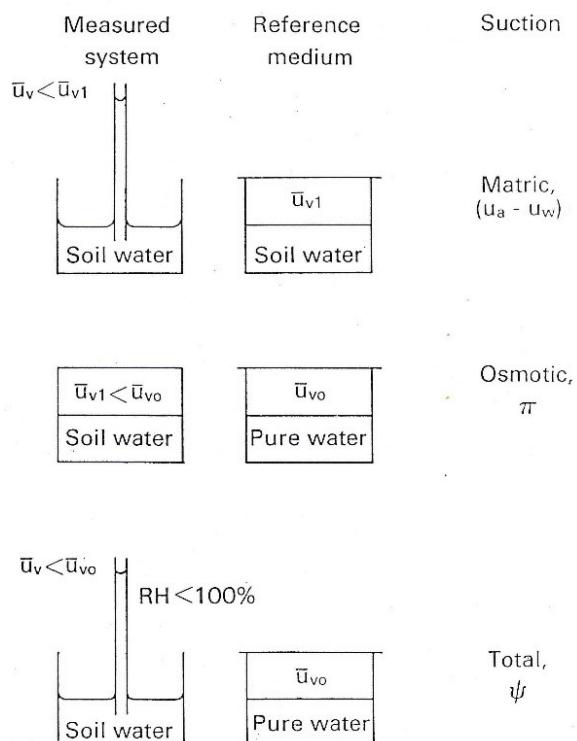
## 2.4 Suction

*Suction* dalam istilah lain disebut juga *negative pore water pressure* terdiri dari dua komponen, komponen pertama adalah *matric suction* dan komponen lainnya adalah *osmotic suction*.

Dikutip dari Aitchison (1964), definisi masing-masing adalah:

*Matric or capillary component of free energy: Matric suction is the equivalent suction derived from the measurement of the partial pressure of the water vapor in equilibrium with the soil-water relative to the partial pressure of the water vapor in equilibrium with a solution identical in composition with the soil-water.*

*Osmotic (or solute) component of free energy: Osmotic suction is the equivalent suction derived from the measurement of the partial pressure of the water vapor in equilibrium with a solution identical in composition with the soil-water relative to the partial pressure of water vapor in equilibrium with free pure water.*



Gambar 5. Total *suction* dan komponen *matric suction* dan *osmotic suction* (sumber: D. G. Fredlund, H. Rahardjo, M. D. Fredlund, 2012)

Dari definisi yang sudah disebutkan diatas, bahwa *suction* berkaitan dengan *free energy* dari air-tanah, sementara *matric* dan *osmotic suction* adalah komponen dari *free energy*. Secara matematika, *suction* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi$$

*Eq. 7*

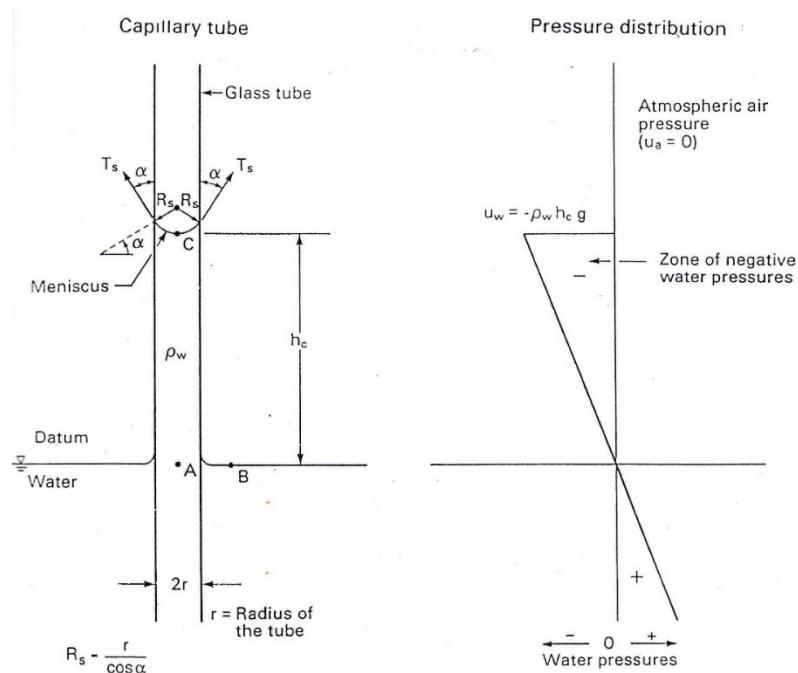
dimana:

- $u_a - u_w$  = *matric suction*, kPa,
- $u_a$  = *pore-air pressure*, kPa,
- $u_w$  = *pore-water pressure*, kPa,
- $\pi$  = *osmotic suction*, kPa

Komponen *matric suction* yang merupakan tegangan permukaan air dianalisa dengan tekanan kapiler. Nilai tekanan kapiler tergantung pada tegangan permukaan ( $T_s$ ), sudut kontak ( $\theta$ ) dan berbanding terbalik dengan diameter (d).

$$u_a - u_w = \frac{4T_s \cos\alpha}{d}$$

*Eq. 8*



Gambar 6. Model fisik dan fenomena kapilaritas (sumber: D. G. Fredlund, H. Harianto, 2001)

Nilai dari *osmotic suction* tergantung dari kandungan garam yang ada dalam material tanah, karena secara geologi, kadar garam relatif konstan, maka besarnya dari *osmotic suction* akan konstan juga. *Osmotic suction* tidak banyak dilakukan pengukuran bila berkaitan dengan aktifitas geoteknik. *Osmotic suction* juga dapat langsung diukur dari besarnya konsentrasi garam yang terdapat pada air.

Tabel 3. Contoh kadar garam dalam air (sumber: D. G. Fredlund, H. Harianto, M. D. Fredlund, 2012)

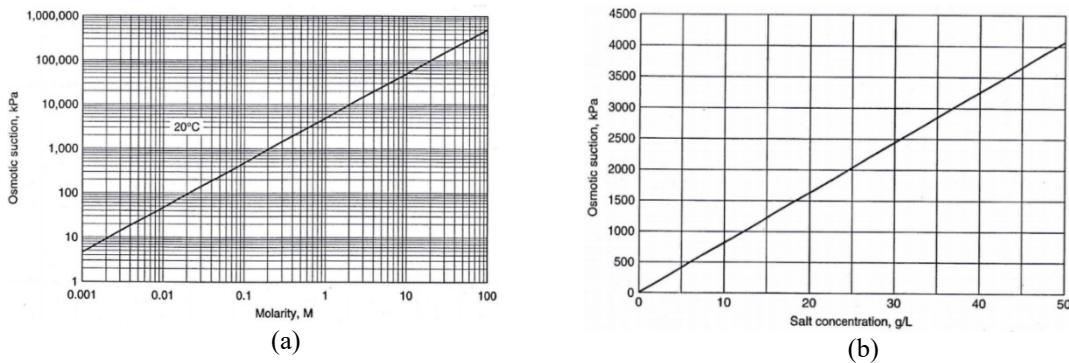
Water Source	Concen- tration, $s$ (g/g), %	Concen- tration, $s_s$ (g/L)	Electrical Conductivity (mmhos/cm)
Distilled water	0.0	0.0	$5.5 \times 10^{-8}$
Freshwater	0.02	0.2	0.005 – 0.05
Ocean water	3.5	36	48
Semisaline water	8.0	88	
Potash brine	20	250	
Dead-sea water	22	270	

Persamaan yang dipakai untuk menghitung besarnya nilai *osmotic suction* adalah menggunakan persamaan Van't Hoff (Campbell, 1985)

$$\pi = v \cdot C \cdot R \cdot T_k \quad Eq. \ 9$$

dimana:

- $\pi$  = *osmotic suction*, kPa
- $v$  = *number of osmotic active particles per molecule*
- $C$  = *molarity of the salt solution*
- $R$  = *universal (molar) gas constant*, J/(mol.K)
- $T_k$  = *absolute temperature*, Kelvin



Gambar 7. (a) osmotic suction terhadap molaritas NaCl dan (b) osmotic suction terhadap konsentrasi garam per liter NaCl (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)

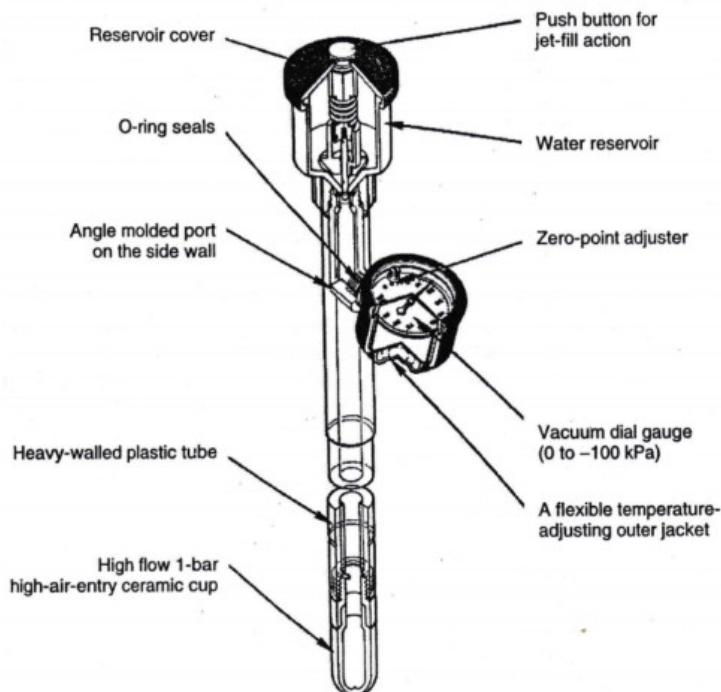
#### 2.4.1 Mengukur *Matric Suction*

*Matric suction* adalah perbedaan dari tekanan pori udara ( $u_a$ ) dan tekanan air pori ( $u_w$ ) dan dapat diukur dengan cara *direct* dan *indirect*. Cara *direct* adalah dengan mengukur tekanan air pori negatif. Tekanan pori udara yang mana komponen bagian dari *matric suction* didapat dari tekanan atmosfir di lokasi pengamatan. Untuk cara *indirect* yang diukur adalah selain dari tekanan air pori negatif, misalkan dengan mengukur menggunakan sensor *thermal conductivity*, pada bagian sensor akan terdapat batu porous yang akan berkaitan dengan nilai dari kadar air dari sampel yang hendak diukur. Kadar air yang terukur akan tergantung dengan besarnya *matric suction*. Tetapi sebelum pengujian dilakukan, harus dilakukan terlebih dahulu proses kalibrasi.

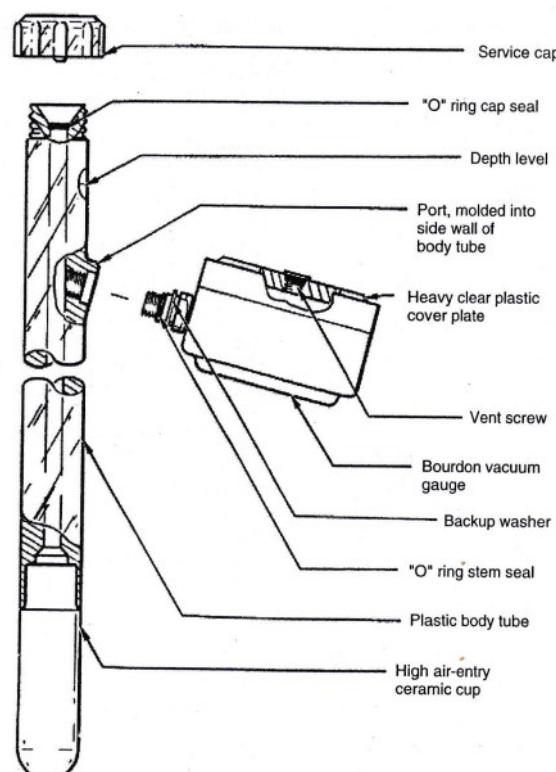
Tabel 4. Jenis cara pengukuran *suction* (sumber: Hu Pan, Yang Qing, Li Pei-yong, 2010)

		Technique (Method)	Suction range (kPa)	Equilibrium time
Direct suction measurement	Matric suction	axis-transition technique		
		tensiometer	0-1500	hours
	Matric suction	suction probe		hours
		time domain reflectometry	0-1500	minutes
Indirect suction measurement	Matric suction	electrical conductivity sensor	50-1500	hours
		thermal conductivity sensor	0-1500	6-50 hours
		in-contact filter paper	all	hours-days
	Osmotic suction	squeezing technique	0-1500	7-14 days
		psychrometer technique	100-10000	days
	Total suction	relative humidity sensor	100-8000	1 h
		chilled-mirror hygrometer	150-30000	hours-days
		non-contact filter paper	all	10 minutes
				7-14 days

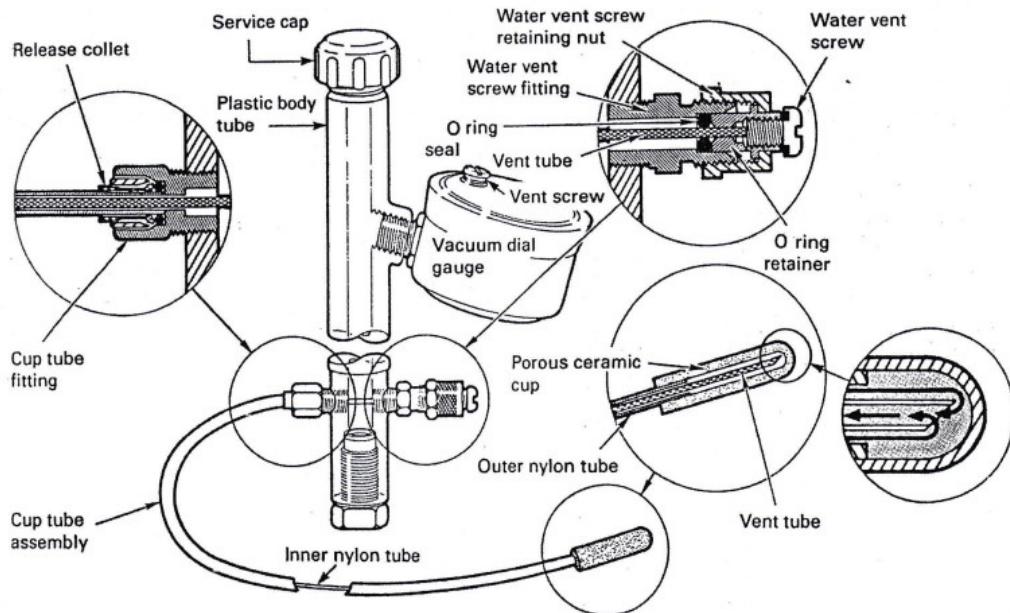
Beberapa ilustrasi peralatan yang digunakan untuk mengukur *suction*:



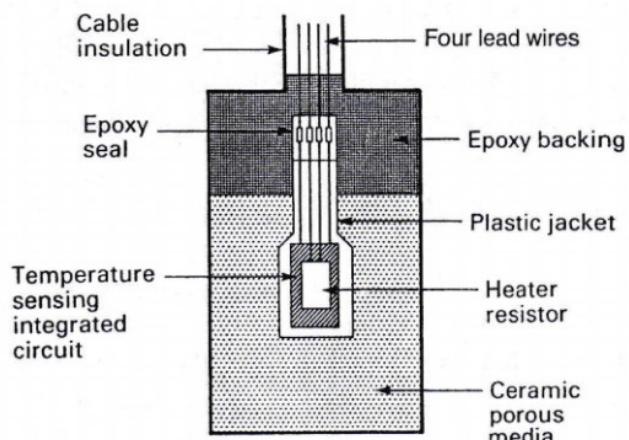
Gambar 8. Alat *Jet-fill* (sumber: D. G. Fredlund, H. Hariantto, 2001)



Gambar 9. Alat *Conventional Tensiometer* (sumber: D. G. Fredlund, H. Hariantto, 2001)



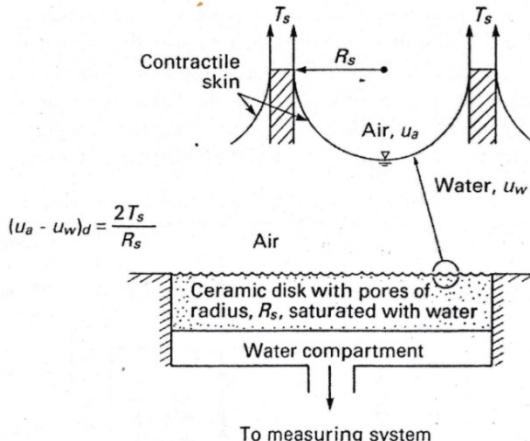
Gambar 10. Alat *Small tip tensiometer* (sumber: D. G. Fredlund, H. Harianto, 2001)



Gambar 11. *Thermal conductivity sensor* (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)

#### 2.4.2 High Air Entry Ceramic Disks

*High Air Entry Ceramic disks* mempunyai ukuran pori yang sangat kecil dan relatif mempunyai ukuran yang seragam. Piringan keramik ini berfungsi sebagai lapisan yang memisahkan air dan udara. Material pembuat piringan keramik berasal dari serbuk kaolin yang telah melalui proses pemanasan. Piringan keramik akan berfungsi dengan baik apabila dilakukan penjenuhan dengan air sehingga pada saat akan digunakan, udara tidak dapat masuk kedalam pori dari keramik tersebut.



Gambar 12. Cara kerja piringan keramik/HAEC (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)

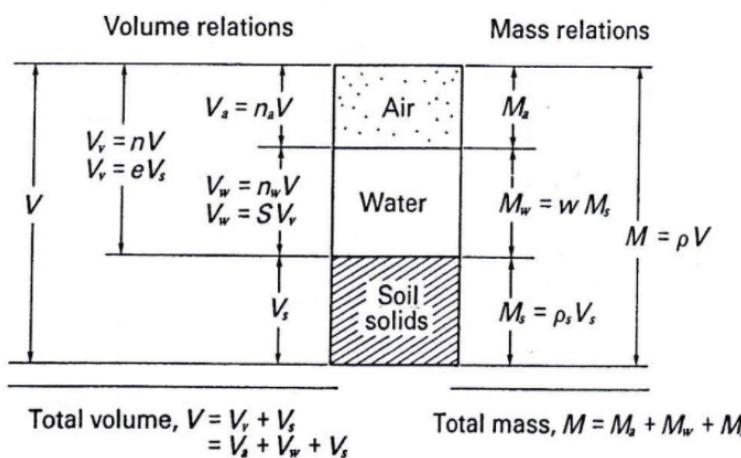
## 2.5 Volumetric Water Content

*Volumetric water content* didefinisikan sebagai perbandingan volume air ( $V_w$ ) terhadap volume total ( $V$ ) pada material tanah.

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad \text{Eq. 10}$$

*Volumetric water content* dapat pula dituliskan dalam persamaan yang mengandung nilai dari porositas ( $n$ ) dan saturasi ( $S$ ).

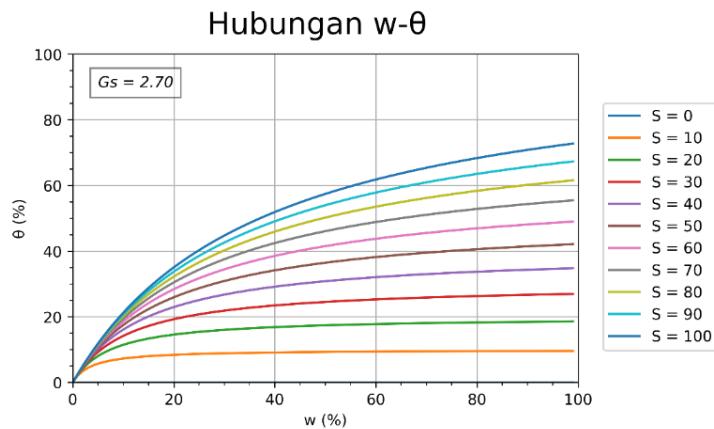
$$\theta = S \cdot n \quad \text{Eq. 11}$$



Gambar 13. Fase pada elemen tanah (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)

Untuk mengetahui hubungan *volumetric water content* dan *gravimetric water content* secara visual dapat dilihat pada Gambar 14. Hubungan ini memerlukan parameter lain seperti *specific gravity* ( $G_s$ ) serta saturasi ( $S$ ). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\theta = \frac{S \cdot w \cdot G_s}{(S + w \cdot G_s)} \quad Eq. 12$$

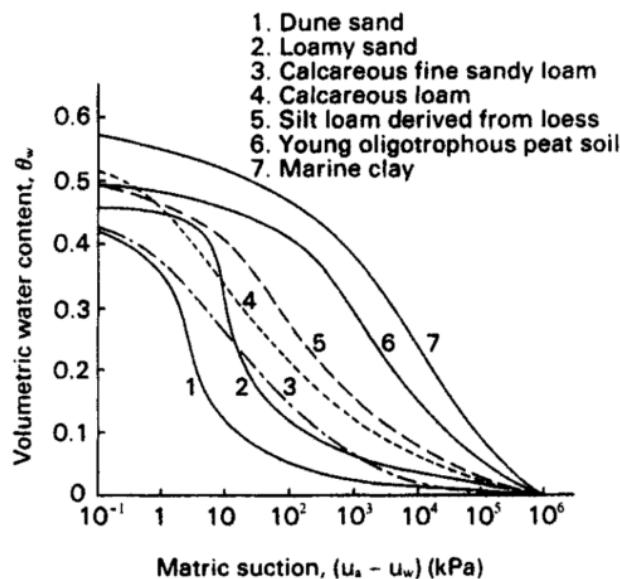


Gambar 14. Kurva hubungan  $w-\theta$  dengan variasi Saturasi

## 2.6 Soil Water Characteristic Curve

*Soil Water Characteristic Curve* atau disingkat SWCC mempunyai peranan yang sangat penting dalam menentukan fungsi parameter tanah tak jenuh. SWCC memberikan pengertian antara massa atau volume dari air didalam tanah terhadap keadaan energi dari fase air itu sendiri. Terbukti juga bahwa SWCC sebagai model interpretasi yang menggunakan prinsip model kapilaritas dapat memberikan gambaran dari distribusi air didalam pori tanah. Efek dari susunan pembentuk tanah, ukuran butir dan angka pori menjadi bagian dari interpretasi yang dapat diukur menjadi data SWCC.

Berikut adalah beberapa kurva SWCC yang sudah pernah diteliti dari berbagai macam jenis tanah.



Gambar 15. Contoh SWCC untuk beberapa tanah Belanda (sumber: Koorevar, Menelik dan Dirksen, 1983)

## 2.7 *Hydraulic Conductivity*

Isitlah yang dipakai adalah *conductivity* bukan permeabilitas karena ada prinsip dasar yang berbeda dari keduanya. Pada permeabilitas aspek yang dilihat hanya berupa ukuran butir atau pori dari suatu material yang akan melewati bahan tersebut. Sedangkan pada *conductivity* aspek yang diperhatikan adalah berat isi material, gravitasi dan *dynamic viscosity*. Satuan untuk permeabilitas adalah satuan panjang kuadrat ( $\text{m}^2$ ) dan untuk *conductivity* dalam satuan panjang dibagi dengan waktu ( $\text{m/s}$ ). Hubungan antara permeabilitas dan *conductivity* ada pada persamaan Eq. 13.

$$k = \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot K \quad \text{Eq. 13}$$

dimana:

- $k$  = *hydraulic conductivity*,  $\text{m/s}$
- $K$  = *permeability*,  $\text{m}^2$
- $P$  = berat isi,  $\text{kg/m}^3$
- $g$  = gravitasi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )
- $\mu$  = *dynamic viscosity*,  $\text{N.s/m}^2$

*Hydraulic conductivity* atau disebut konduktivitas hidraulik adalah suatu variabel yang menyatakan kecepatan aliran hidraulik didalam suatu material. Teknik untuk mengukur besarnya konduktivitas hidraulik pada tanah tak jenuh secara umum dapat dikelompokan kedalam dua kategori, pertama adalah tempat pengujian yang dilakukan di labortorium atau langsung di lapangan dan yang berikutnya adalah berdasarkan metode *steady state* dan *unsteady state/transient*.

*Steady state* dilakukan pada pengujian dengan memberikan aliran yang konstan atau *hydraulic gradient* yang tetap untuk setiap besaran *matric suction* yang spesifik. Dengan kata lain, pengukuran dilakukan pada setiap besaran *matric suction* yang ditentukan. Selanjutnya *hydraulic conductivity* dihitung berdasarkan hukum Darcy. Kebalikan dengan *steady state*, pada *unsteady state*, *hydraulic conductivity* dihitung dari baris data yang tidak stabil lalu dipecahkan secara analitis untuk menggambarkan *unsteady state flow* dengan menerapkan hukum Darcy untuk setiap data yang didapatkan sampai kondisi mencapai *steady*.

Kelebihan dari metode *unsteady* adalah waktu pengujian yang tidak terlalu lama untuk dilakukan, kondisi sebaliknya untuk *steady*. Pada bagian analisa yang dilakukan *unsteady* lebih rumit daripada analisa yang dilakukan pada kondisi *steady*.

Beberapa metode pengujian *hydraulic conductivity* yang masuk kedalam kategori *steady state*:

1. *Constant Head*.
2. *Constant flow*
3. *Centrifuge*

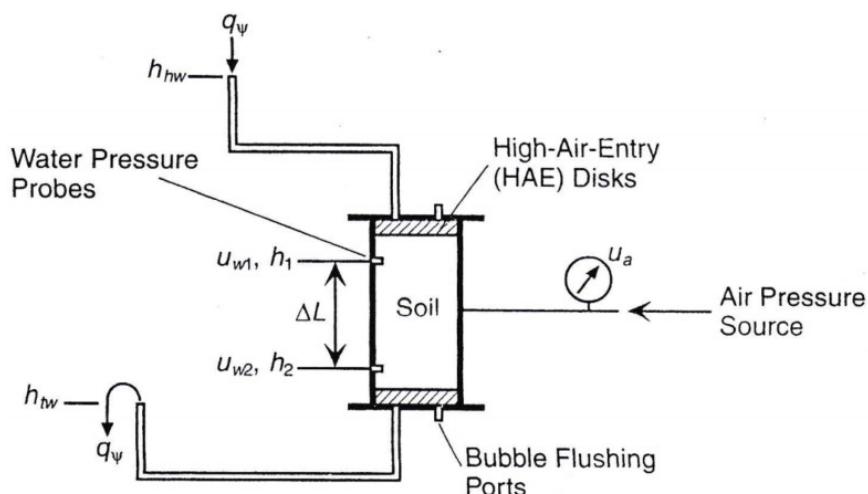
Untuk metode yang masuk kedalam kategori *unsteady state* adalah:

1. *Horizontal Infiltration*
2. *Outflow Method*
3. *Instantaneous Profile Method*

### 2.7.1 Constant Head

Salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk mengukur *unsaturated hydraulic conductivity* adalah metode *constant-head*. Hampir serupa dengan teknik pengukuran dengan *constant head* pada kondisi tanah jenuh, pengukuran dilakukan dengan mengatur agar *constant hydraulic* yang mengalir melalui sampel yang diuji, tetap dalam kondisi *steady state*.

Beberapa peneliti yang sudah pernah membuat penelitian mengenai pengujian ini adalah: Corey, 1957; Klute, 1972; Klute dan Dirksen, 1986; Barden dan Pavlakis, 1971; Huang et al., 1998. Beberapa sistem yang dikembangkan adalah untuk mengukur konduktivitas air, konduktivitas udara ataupun konduktivitas dari keduanya secara simultan.



Gambar 16. Contoh sistem pengukuran *unsaturated hydraulic conductivity* dengan metode *constant head* (sumber: Ning Lu, William J. Likos, 2004)

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai permeabilitas adalah:

$$k_w = \frac{Q}{A} \cdot \left( \frac{\Delta L}{\Delta h_s} \right) \quad Eq. 14$$

dimana:

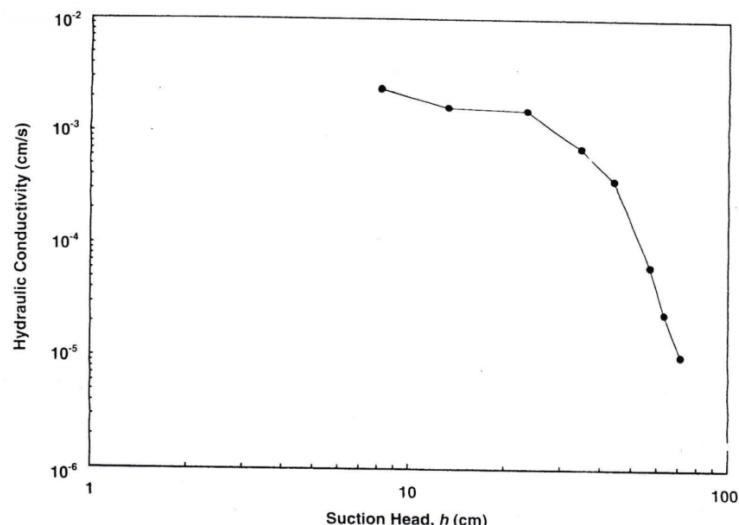
- $Q$  = *volumetric flow rate*,  $\text{cm}^3/\text{s}$
- $A$  = *area of the specimen*,  $\text{cm}^2$
- $\Delta L$  = *hydraulic gradient*,  $\text{cm}$
- $\Delta h_s$  = *the internal head loss*,  $\text{cm}$

Sebagai contoh, data yang dihasilkan dari pengujian *hydraulic conductivity* seperti dapat terlihat pada Gambar 17.

Test	(1) $h_1$ (cm)	(2) $h_2$ (cm)	(3) $Q$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	(4) $\Delta h$ (cm)	(5) $k$ ( $\text{cm}/\text{s}$ )	(6) $h_{\text{avg}}$ (cm)
1	-0.51	-15.81	$1.30 \times 10^{-1}$	15.30	$2.40 \times 10^{-3}$	8.16
2	-1.02	-25.50	$1.42 \times 10^{-1}$	24.48	$1.65 \times 10^{-3}$	13.26
3	-2.55	-44.37	$2.30 \times 10^{-1}$	41.82	$1.56 \times 10^{-3}$	23.46
4	-3.06	-66.30	$1.64 \times 10^{-1}$	63.24	$7.32 \times 10^{-4}$	34.68
5	-4.59	-83.13	$1.03 \times 10^{-1}$	78.54	$3.72 \times 10^{-4}$	43.86
6	-5.10	-109.14	$2.36 \times 10^{-2}$	104.04	$6.41 \times 10^{-5}$	57.12
7	-6.12	-120.36	$9.83 \times 10^{-3}$	114.24	$2.43 \times 10^{-5}$	63.24
8	-8.67	-134.13	$4.54 \times 10^{-3}$	125.46	$1.02 \times 10^{-5}$	71.40

Gambar 17. Hasil uji dan analisa *constant head hydraulic conductivity* (sumber: Ning Lu, William J. Likos, 2004)

Secara visual akan terlihat seperti Gambar 18.

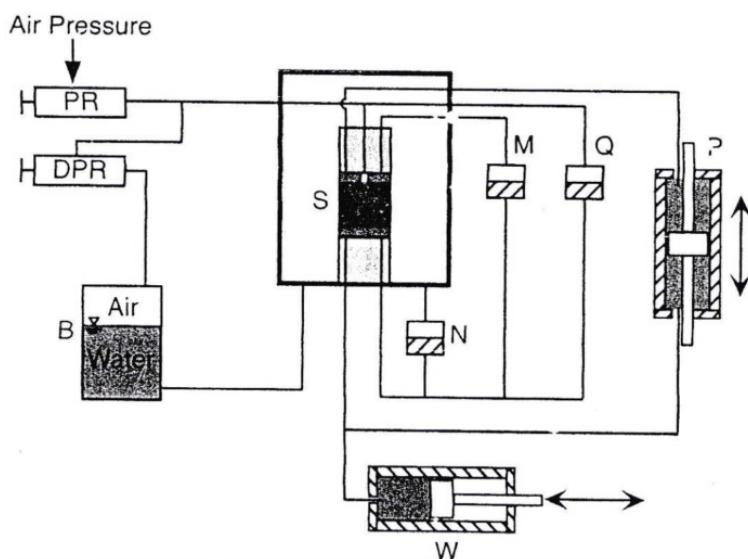


Gambar 18. Fungsi *hydraulic conductivity* untuk material pasir (sumber: Ning Lu, William J. Likos, 2004)

Untuk mendapatkan nilai *suction*, besarnya nilai  $h_{\text{avg}}$  pada Gambar 17 bagian kolom nomor-6 dikalikan dengan angka 0.0980665 dalam satuan kPa.

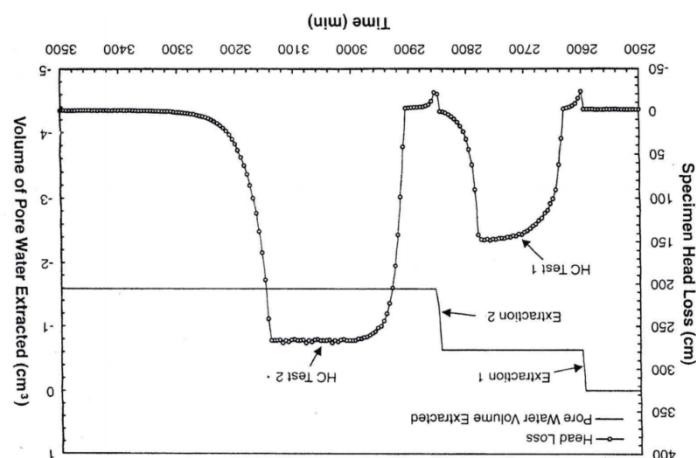
### 2.7.2 Constant Flow Method

Metode *constant flow* hampir serupa dengan metode dari *constant head* yang dilaksanakan pengujinya di laboratorium. Hanya saja *flow rate* tidak diukur tetapi dikontrol. Besarnya *flow rate* yang diberikan bisa sangat kecil, sekitar  $10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$  atau sekitar  $0.01 \text{ cm}^3/\text{hari}$ . Sehingga kesulitannya adalah berkaitan dengan *flow rate* yang rendah pada sampel yang mempunyai permeabilitas yang rendah, kondisi ini akan dihindari. *Flow rate* yang rendah ini bisa diberikan dengan bantuan pompa motor yang cukup akurat mengontrol pada saat pengujian berlangsung (Olsen et al., 1985, 1988). Skema sistem dapat dilihat pada Gambar 19.

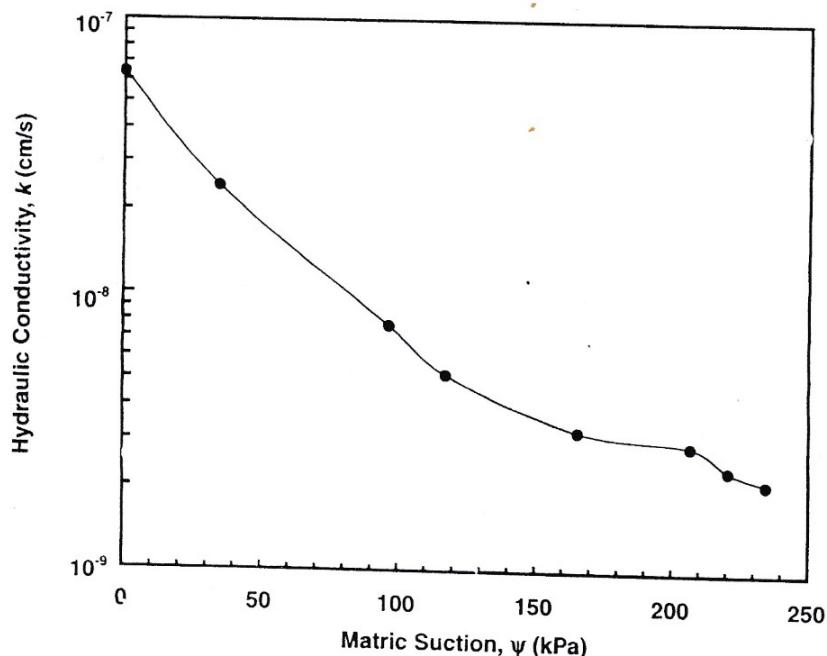


Gambar 19. Skema uji *constant flow* (sumber: Olsen et al., 1994)

Data hasil pembacaan yang sudah dalam bentuk grafik dapat dilihat pada Gambar 20, dan untuk hasil uji dapat dilihat pada Gambar 21.

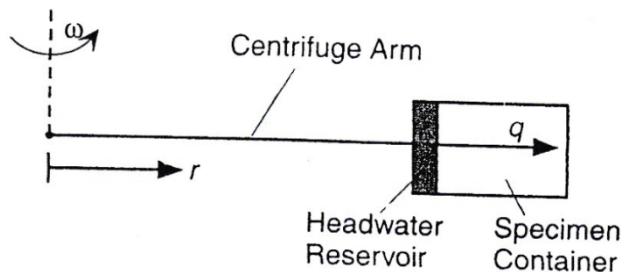


Gambar 20. Kurva data hasil uji metode *constant flow* (sumber: Ning Lu, William J. Likos, 2004)



Gambar 21. Kurva hasil *hydraulic conductivity* pengujian *constant flow* (sumber: sumber: Ning Lu, William J. Likos, 2004)

### 2.7.3 *Centrifuge*



Gambar 22. Skema *centrifuge* (sumber: sumber: Ning Lu, William J. Likos, 2004)

Gambar 22 menunjukkan prinsip kerja dari alat *centrifuge*. Secara singkat, pengujian dilakukan pada sampel berbentuk silinder yang ditempatkan pada kontainer khusus yang berada diujung dari lengan alat *centrifuge*. Lengan tersebut akan berputar secara horisontal pada kecepatan sudut ( $\omega$ ). Gaya gravitasi *centrifuge* dengan jarak sejauh  $r$  dari titik sumbu sampai dengan container yang berisi sampel adalah sebesar  $\omega^2 r$ . Diasumsikan besarnya gravitasi bumi diabaikan bila dibandingkan dengan gravitasi *centrifuge*, lalu dengan sendirinya air akan mengalir menuju dan melewati sampel dengan kondisi satu dimensi.

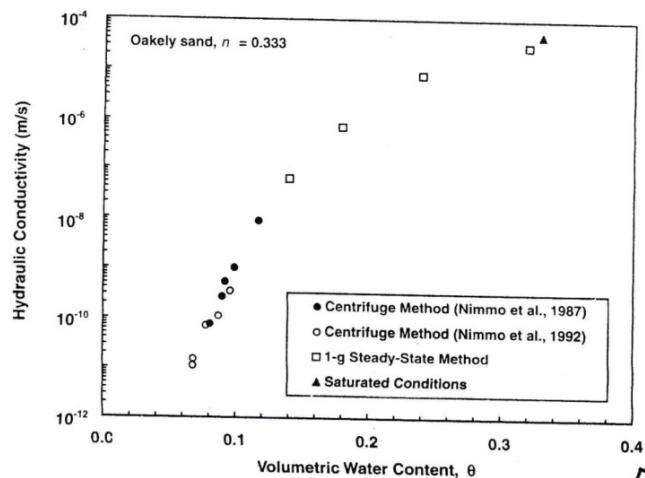
Besarnya *hydraulic conductivity* adalah:

$$k = \frac{q}{\rho_w \cdot \omega^2 \cdot r} \quad Eq. 15$$

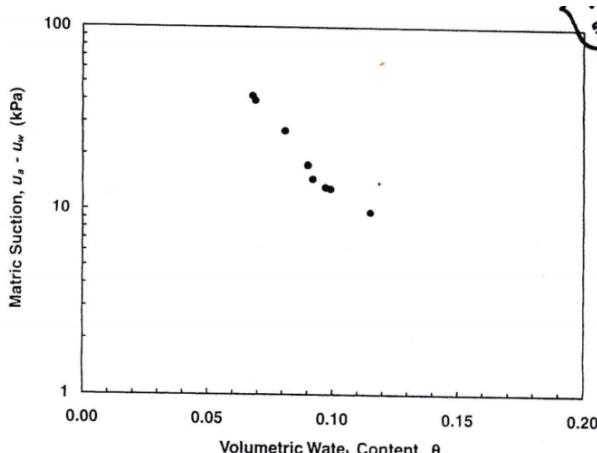
dimana:

- $q$  = flow rate,  $\text{cm}^3/\text{s}$
- $r$  = radius, cm
- $\rho_w$  = density of fluid,  $\text{gr}/\text{cm}^3$
- $\omega$  = angular velocity,  $\text{s}^{-1}$

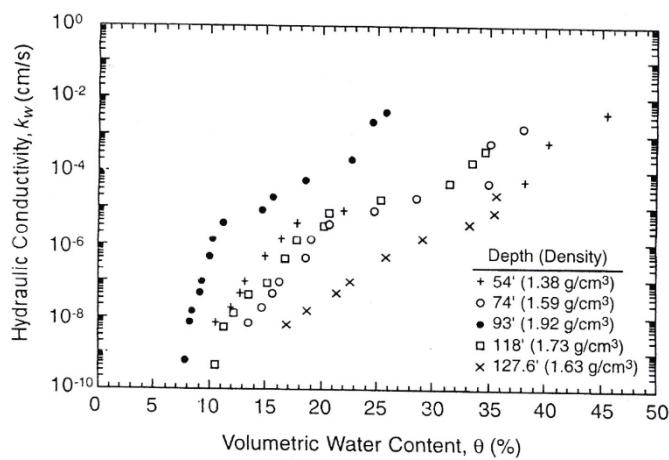
beberapa hasil pengujian dari metode *centrifuge* didapat dari beberapa sumber, dapat dilihat pada Gambar 23 untuk hasil pengujian pada material pasir Oakley (Nimmo et al., 1987, 1992). Gambar 24 memperlihatkan kurva SWCC pada material yang sama dengan pengukuran dilakukan dengan metode *tensiometer*. Untuk Gambar 25 adalah hasil pengujian dari SSC-UFA tahun 2001.



Gambar 23. Kurva *hydraulic conductivity-VWC* uji *centrifuge* untuk pasir Oakley (sumber: Nimmo et al., 1987, 1992)



Gambar 24. Kurva SWCC uji *centrifuge* (sumber: Nimmo et al., 1987, 1992)



Gambar 25. Fungsi *hydraulic conductivity-VWC* uji *centrifuge* dengan variasi kedalaman (sumber: ASTM D 6527, 2001)

#### 2.7.4 *Hydraulic Diffusivity*

Kondisi aliran air *unsteady state* pada material tanah dikarenakan adanya proses difusi, dimana adanya perpindahan air dari area yang mempunyai konsentrasi tinggi ke area yang mempunyai konsentrasi yang lebih rendah. Proses difusi ini sangat dipengaruhi oleh *hydraulic diffusivity*. Pada tanah tak jenuh parameter tersebut adalah fungsi dari kadar air. *Hydraulic diffusivity* didefinisikan sebagai perbandingan *hydraulic conductivity* terhadap *specific moisture capacity* ( $C(\theta)$ ).

$$D(\theta) = \frac{k(\theta)}{C(\theta)} \quad \text{Eq. 16}$$

*Specific moisture capacity* ( $C(\theta)$ ) didefinisikan sebagai kemiringan garis dari SWCC, dimana pada sumbu-X adalah nilai *suction* dan sumbu-Y adalah *volumetric water content*.

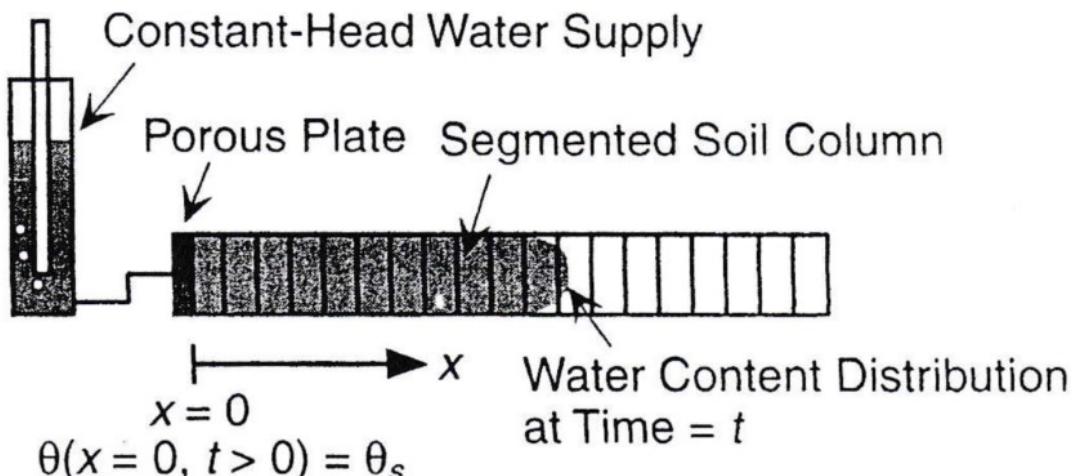
$$C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \quad Eq. 17$$

Untuk mendapatkan nilai dari *hydraulic diffusivity*, dengan menesubtitusikan persamaan Eq. 17 kedalam persamaan Eq. 16, maka akan mendapatkan persamaan Eq. 18.

$$k(\theta) = D(\theta) \left( \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right) \quad Eq. 18$$

### 2.7.5 Horizontal Infiltration Method

Metode ini pertama kali dikembangkan oleh Bruce dan Klute pada tahun 1956. Semenjak tahun itu banyak yang ikut mengembangkan metode ini seperti: Jackson (1964), Cassel et al (1968), Rose (1968) dan Clothier et al (1983) serta lainnya.



Gambar 26. Ilustrasi uji *horizontal infiltration* (sumber: Klute dan Dirksten, 1986)

Metode ini secara umum lebih cocok diaplikasikan pada material berbutir kasar dan keadaan sampel dapat dalam kondisi yang terganggu. Secara prinsip, metode ini akan mengamati aliran air secara horisontal, dimana material yang akan diamati

dibuat terpotong-potong tetapi tetap saling menempel, setelah keran dibuka, maka air dari tanki akan mulai mengalir menuju kearah kanan, sampai suatu saat keran tiba-tiba ditutup, maka kita bisa mengukur kadar air dari masing-masing segmen dan menggambarkan distribusinya. Secara prinsip hampir mirip dengan mengukur perambatan panas pada batang besi.

Persamaan yang akan didapat dari model ini adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad Eq. 19$$

Kondisi insial dan syarat batas adalah sebagai berikut:

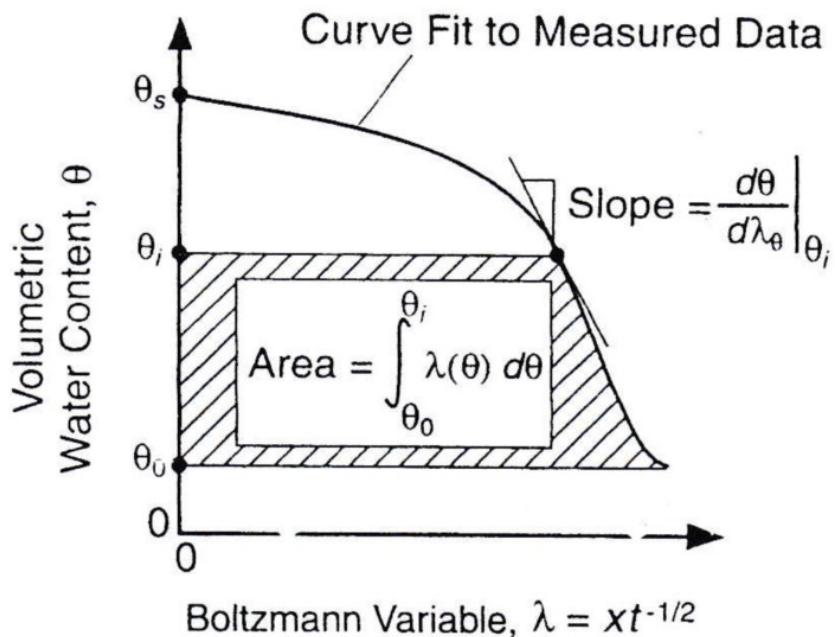
$$\theta(x, 0) = \theta_0 \quad \theta(0, t) = \theta_s$$

Solusi persamaan Eq. 19 dapat diselesaikan dengan bantuan *Boltzmann variable* atau *Similarity variable* persamaan Eq. 21, sehingga persamaan umum menjadi:

$$D(\theta) = \frac{-1}{2} \left( \frac{\partial \lambda(\theta)}{\partial \theta} \right) \int_{\theta_0}^{\theta_s} \lambda(\theta) d\theta \quad Eq. 20$$

$$\lambda(\theta) = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad Eq. 21$$

Konsep perhitungan yang digunakan setelah data pembacaan didapatkan adalah dengan memplotkan kedalam grafik seperti Gambar 27.



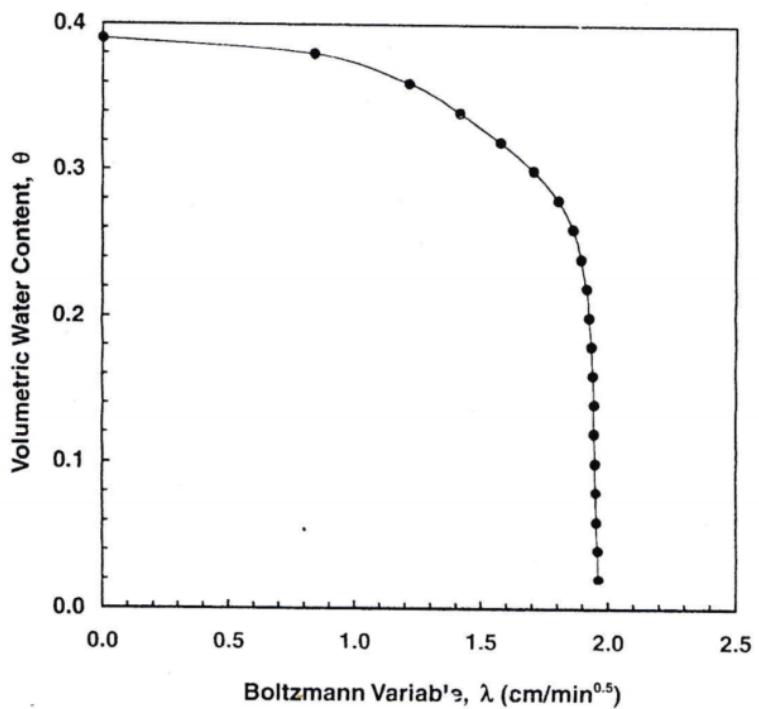
Gambar 27. Kurva Boltzmann variable-VWC (sumber: Klute dan Dirksten, 1986)

Contoh tabulasi data hasil pembacaan dengan metode *horizontal infiltration* dapat dilihat pada Tabel 5.

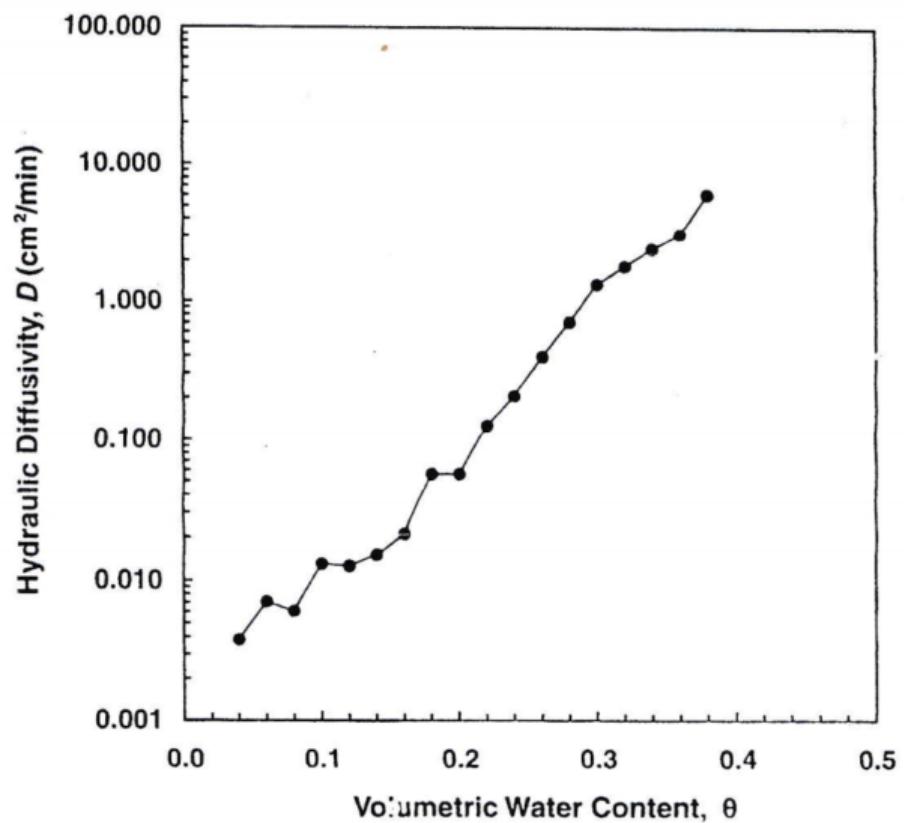
Tabel 5. Data hasil analisa uji *horizontal infiltration* (sumber: Ning Lu, William J. Likos, 2004)

$x$ (cm)	$\theta_i$	$\lambda_i$ (cm/min <sup>0.5</sup> )	$A_i$	$\Sigma A_i$	$S_i$	$D(\theta_i)$ (cm <sup>2</sup> /min)
76.00	0.02	1.962				
75.85	0.04	1.958	0.0392	0.0392	-5.1640	0.0038
75.71	0.06	1.955	0.0391	0.0783	-5.5328	0.0071
75.63	0.08	1.953	0.0391	0.1174	-9.6825	0.0061
75.50	0.10	1.949	0.0390	0.1564	-5.9584	0.0131
75.40	0.12	1.947	0.0390	0.1954	-7.7460	0.0126
75.30	0.14	1.944	0.0389	0.2343	-7.7460	0.0151
75.18	0.16	1.941	0.0389	0.2732	-6.4550	0.0212
74.90	0.18	1.934	0.0388	0.3119	-2.7664	0.0564
74.65	0.20	1.927	0.0386	0.3505	-3.0984	0.0566
74.15	0.22	1.915	0.0384	0.3889	-1.5492	0.1255
73.40	0.24	1.895	0.0381	0.4270	-1.0328	0.2067
72.08	0.26	1.861	0.0376	0.4646	-0.5868	0.3959
69.90	0.28	1.805	0.0367	0.5013	-0.3553	0.7054
66.05	0.30	1.705	0.0351	0.5364	-0.2012	1.3330
61.10	0.32	1.578	0.0328	0.5692	-0.1565	1.8187
54.80	0.34	1.415	0.0299	0.5991	-0.1230	2.4364
47.10	0.36	1.216	0.0263	0.6254	-0.1006	3.1086
32.50	0.38	0.839	0.0206	0.6460	-0.0531	6.0880

Source: From Nielson et al. (1964).



Gambar 28. Plot data Boltzman variable-VWC dari uji horizontal infiltration (sumber: Ning Lu, William J. Likos, 2004)



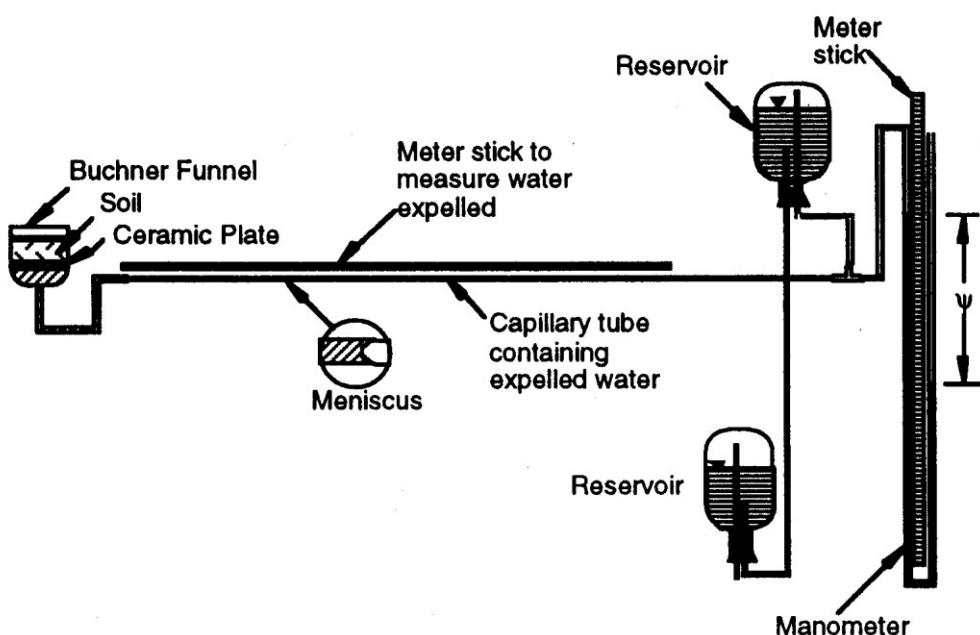
Gambar 29. Kurva VWC-hydraulic diffusivity dari data Tabel 5 (sumber: Ning Lu, William J. Likos, 2004)

### 2.7.6 Outflow Methods

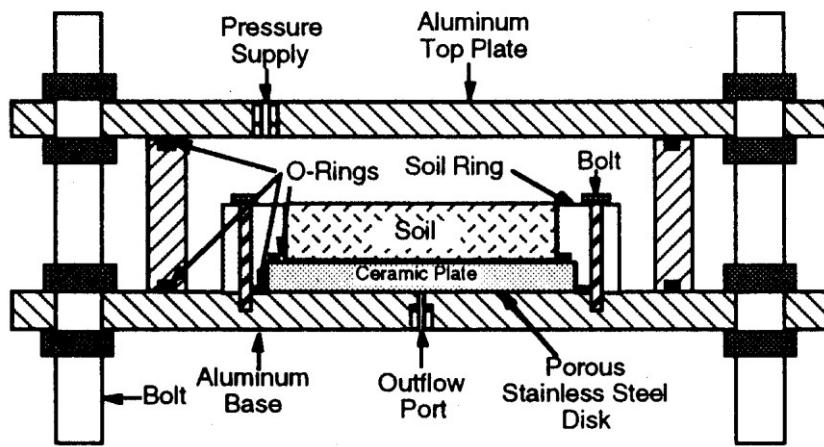
Metode *outflow* termasuk kedalam jenis pengujian *unsteady state* dan secara luas banyak dipakai untuk mengukur parameter *unsaturated hydraulic conductivity*. Pengujian ini relatif lebih cepat dibandingkan dengan cara *steady state* dan mempunyai keunggulan dalam hal kontrol dibandingkan juga dengan pengujian metode *unsteady* lainnya.

Dari segi peralatan, alat yang dipakai hampir sama dengan metode pengujian untuk mendapatkan SWCC, seperti Gambar 30 dan Gambar 31. Perlatan terdiri dari *porous plate* terbuat dari keramik ataupun bahan lainnya yang biasa dipakai dan bersifat *high air entry suction*. Jenis pengujian ini dapat dibagi menjadi empat jenis: *multi-step method*, *one-step*, *multi-step direct* dan *continuous*.

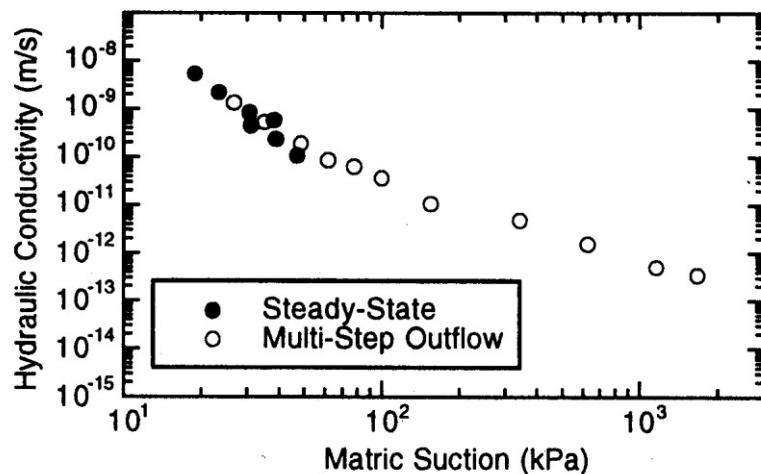
*Multi-step method* pertama kali diperkenalkan oleh Gardner tahun 1956. Ini adalah metode *outflow* yang pertama. Keunggulan dari metode ini adalah waktu yang diperlukan untuk melakukan pengujian ini cukup cepat dengan peralatan yang relatif lebih sederhana. Kekurangannya adalah hasil nya tidak konsisten sehingga perlu dilakukan pengujian pada jumlah sampel yang banyak.



Gambar 30. Skema metode *outflow* (sumber: Benson et al, 1993)

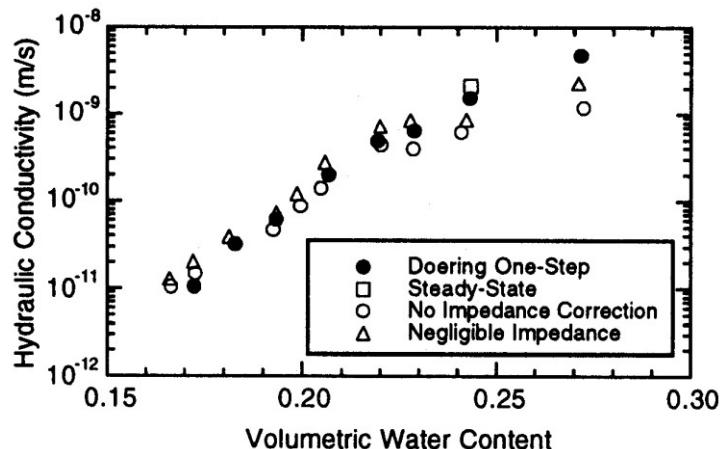


Gambar 31. Pressure plate extractor (sumber: Tinum et al, 1997)

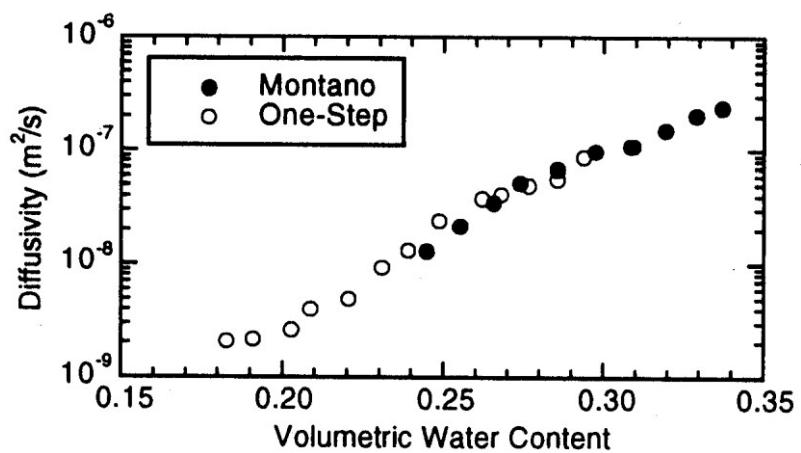


Gambar 32. Perbandingan data *hydraulic conductivity* dengan uji *steady state* dan *multi-step* (sumber: Gardner, 1956)

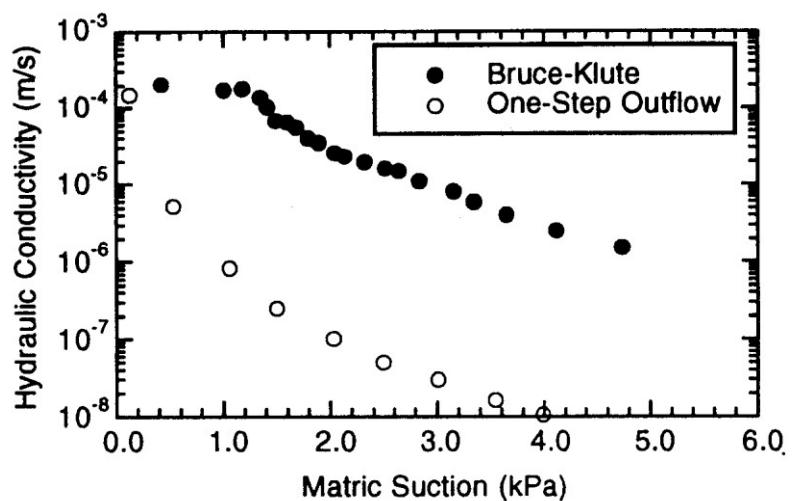
*One-step method*, menggunakan langkah pengujian yang tidak sedikit untuk pengukuran *matric suction* dan *outflow* harus dipantau. Yang memperkenalkan metode ini adalah Doering pada tahun 1965. Keunggulan dari metode ini adalah waktu pengujian yang lebih cepat dibandingkan metode *multi-step*. Kekurangannya adalah nilai *hydraulic gradient* pada saat awal memberikan nilai yang besar.



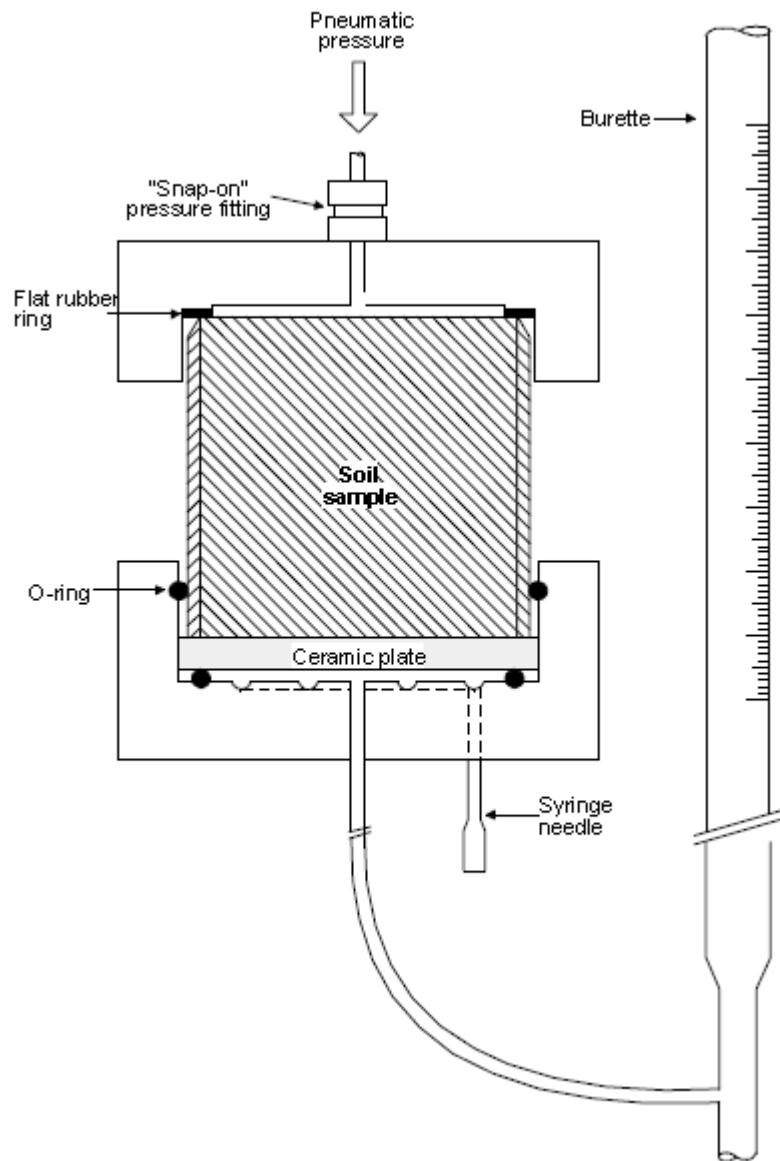
Gambar 33. *Hydraulic conductivity* dari uji *multi-step outflow* (sumber: Kunze dan Kirkham, 1962)



Gambar 34. Kurva *diffusivity* diukur dengan *one-step outflow* (sumber: Passioura, 1976)

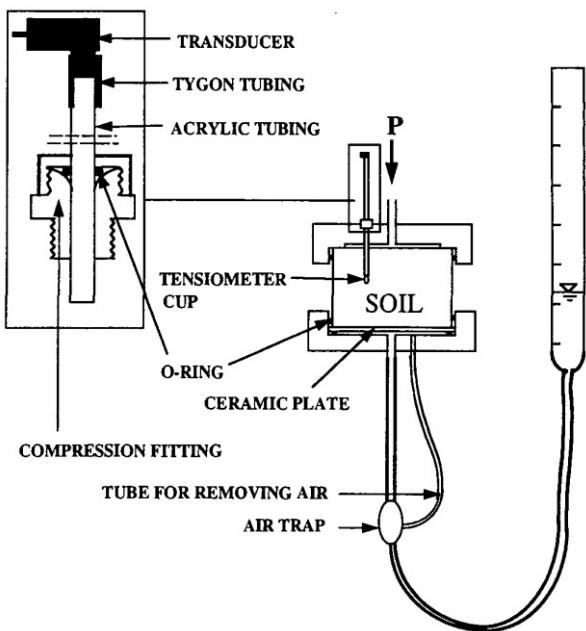


Gambar 35. Kurva *hydraulic conductivity* dari pasir Dune dengan uji *one-step outflow* dan *horizontal infiltration method* (sumber: Stephens 1989)

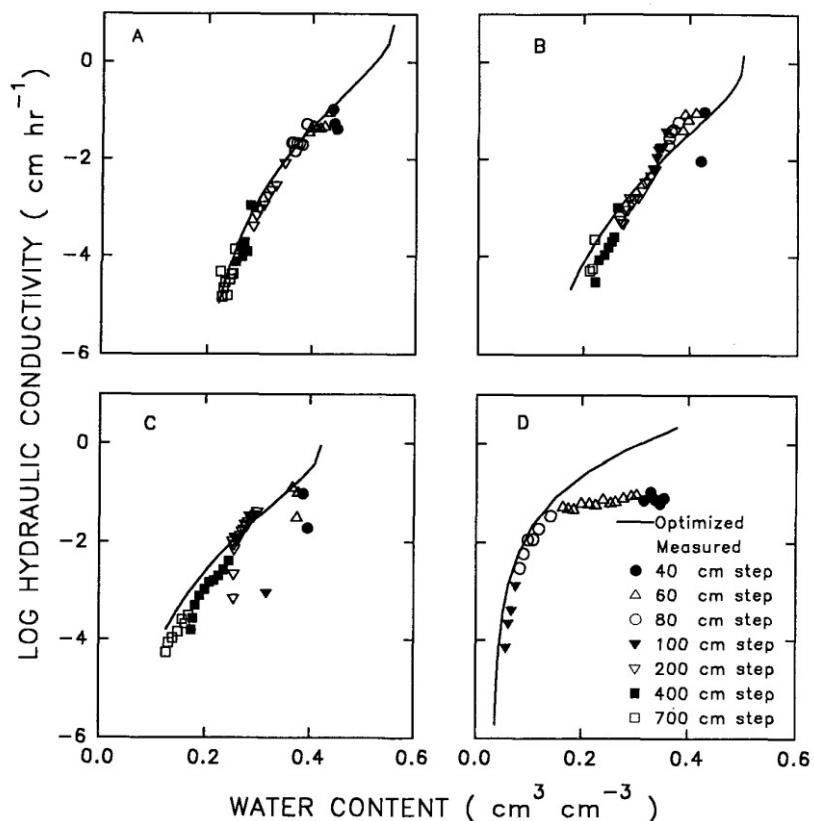


Gambar 36. Ilustrasi metode *outflow* dengan *Tempe pressure cell* (sumber: T. W. Green., Z. Paydar., H. P. Cresswell dan R. J. Drinkwater, 1998)

*Multi-step direct method*, diperkenalkan oleh Eching et al pada tahun 1994. Kelebihan dari metode ini adalah besarnya *hydraulic conductivity* langsung didapatkan tanpa perlu menghitung nilai *diffusivity*. Selain itu, SWCC bisa diperoleh dari uji ini.

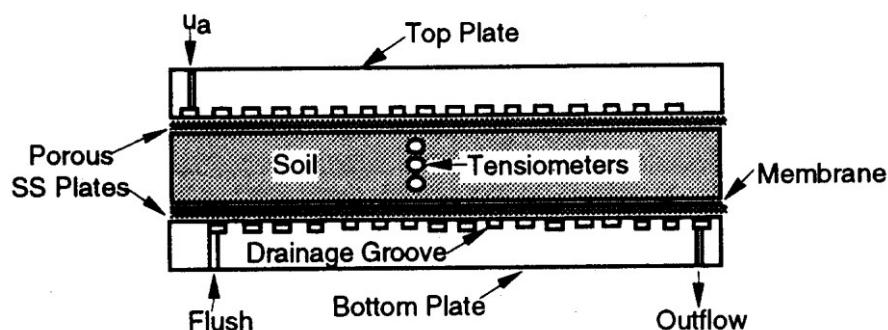


Gambar 37. Skema uji *multi-step* dengan modifikasi *Tempe pressure cell* (sumber: S. O. Eching., J. W. Hopmans., O. Wendroth, 1994)

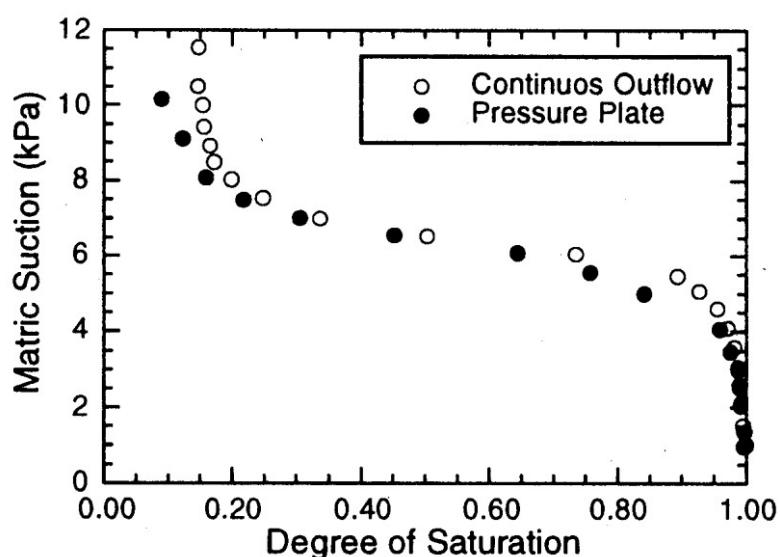


Gambar 38. Kurva *hydraulic conductivity* (A) *Yolo silt loam* (B) *Panoche loam* (C) *Hanford sandy loam* (D) *Oso Flaco fine sand* (sumber: S. O. Eching., J. W. Hopmans., O. Wendroth, 1994)

*Continous outflow method* diperkenalkan oleh Salehzadeh dan Demond pada tahun 1994. Metode ini hampir sama dengan *multi-step outflow method* kecuali pada nilai *matric suction* yang dirubah selama tahap pengujian. Kelebihan metode ini adalah cepat dan secara simultan besarnya *hydraulic conductivity* and SWCC langsung diukur. Sayangnya, pada paper yang dibuat oleh Salehzadeh dan Demond tidak menampilkan secara langsung data dari *hydraulic conductivity* terhadap *suction*. Kekurangannya adalah peralatan yang cukup mahal, tidak akurat pada kadar air yang tinggi dan perlu dikonfirmasi dengan metode lain untuk hasilnya.



Gambar 39. Cell yang dipakai oleh Salehzadeh dan Demond (1994)

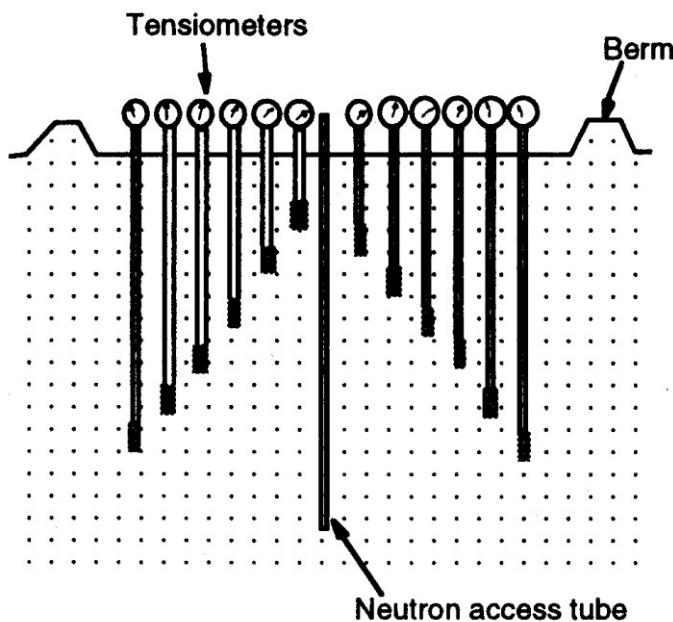


Gambar 40. SWCC dari uji metode *continous outflow* dan 100 kPa *pressure plate extractor* (sumber: Salehzadeh dan Demond, 1994)

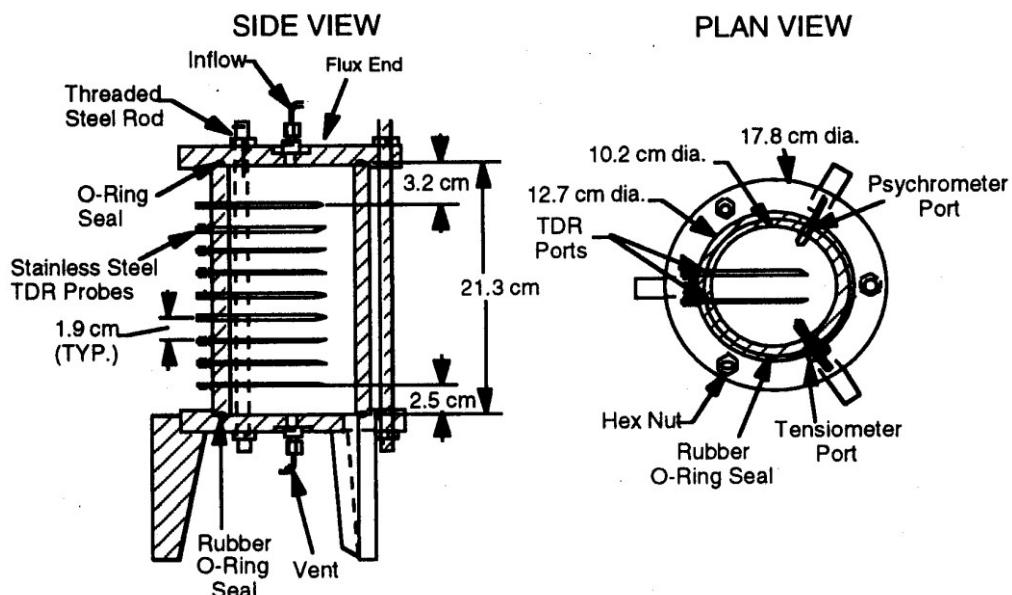
### 2.7.7 Instantaneous Profile Methods

Secara garis besar, metode ini termasuk dalam kondisi *unsteady flow*. Profil tanah yang hendak diuji dikondisikan seperti kolom tanah. Pada kolom tanah tersebut dipasang beberapa sensor untuk mengukur *volumetric water content* sepanjang kedalaman yang hendak diukur dengan sensor *Neutron access tube* untuk pengukuran *suction* dapat dibaca dengan memasang sensor TDR (*Time Domain Reflectometry*). Dari setiap bacaan yang dibaca oleh sensor, dapat dibuat profilnya masing-masing terhadap kedalaman.

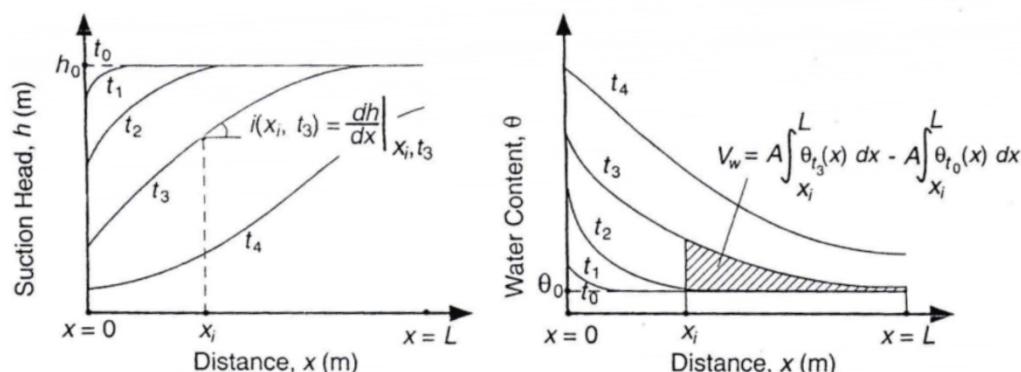
Setelah profil didapatkan (Gambar 43), dapat dilanjutkan untuk memulai analisa untuk mendapatkan besarnya *hydraulic conductivity*.



Gambar 41. Skema kondisi lokasi uji *instantaneous profile method* (sumber: Craig H. Benson., Molly M. Gribb, 1997)



Gambar 42. Permeameter yang digunakan Meerdink (1996) untuk uji *instantaneous profile*



Gambar 43. Konsep profil (kiri) *suction head* (kanan) *volumetric water content* dari hasil uji metode *instantaneous profile* (sumber: Ning Lu, William J. Likos, 2004)

Analisa yang dilakukan berdasarkan profil pada Gambar 43 adalah mencari nilai gradien untuk kedalaman tertentu dengan persamaan Eq. 22, langkah berikutnya menghitung perubahan *volumetric water content* ( $\Delta V_w$ ) menggunakan persamaan Eq. 23, perubahan *volumetric water content* adalah luas yang diarsir, ilustrasi ada pada Gambar 44. Untuk mencari besarnya *flow velocity* ( $v$ ) dihitung dari nilai perubahan *volumetric water content* dibagi dengan luas dan perubahan waktu (Eq. 24).

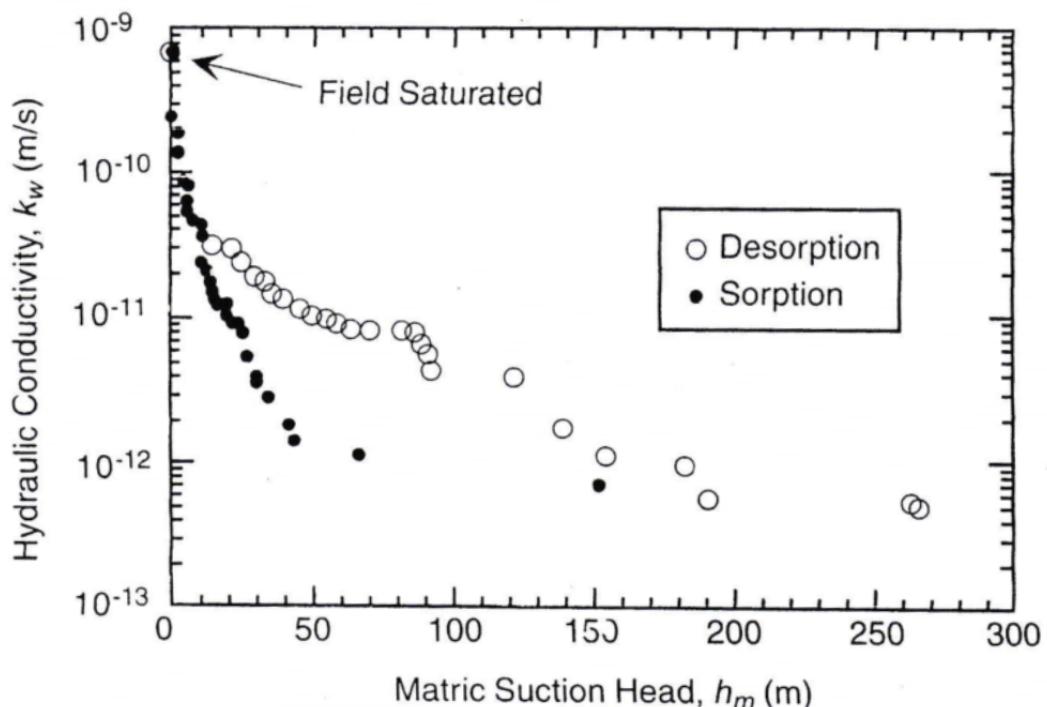
$$i(x, t) = \frac{\partial h}{\partial x} \quad Eq. 22$$

$$\Delta V_w = A \int_x^L \theta_{t=j}(x) dx - A \int_x^L \theta_{t=m}(x) dx \quad Eq. 23$$

$$v = \frac{\Delta V_w}{A \cdot \Delta t} \quad Eq. 24$$

Persamaan Eq. 25 adalah besarnya *hydraulic conductivity* (k).

$$k = \frac{v}{i} \quad Eq. 25$$



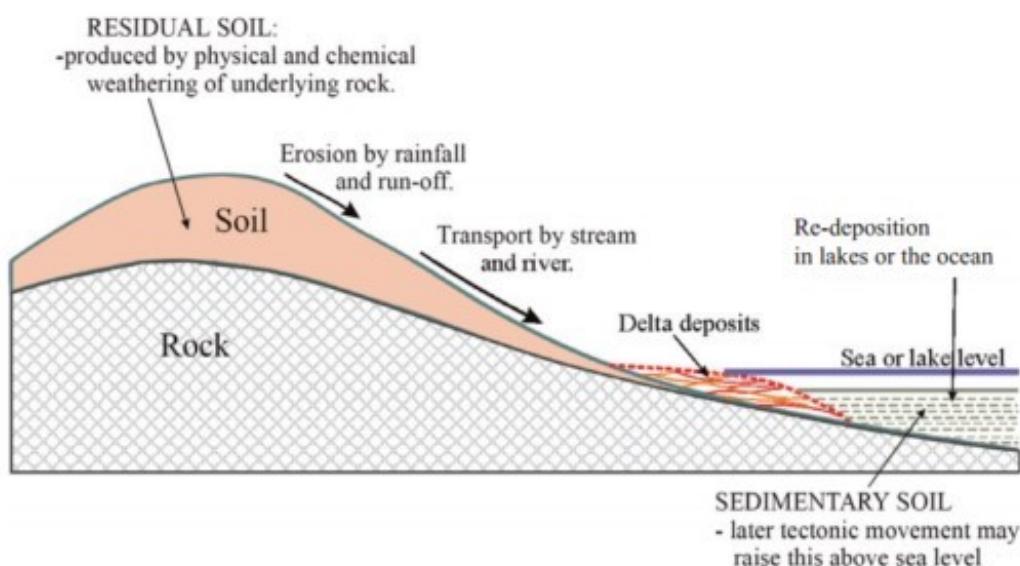
Gambar 44. *Hysteresis* dalam *unsaturated hydraulic conductivity* untuk Wenatchee silty clay  
(sumber: Meerdink et al, 1996)

## 2.8 Material Vulkanik

Sebelum gunung merapi meletus, material magma yang berada dibawah permukaan bumi akan mengalami kenaikan suhu akibat tekanan yang sangat tinggi. Apabila tekanannya sudah sangat tinggi maka magma akan mencari jalan untuk keluar dan biasanya keluar melalui gunung berapi, material akibat proses ini disebut material vulkanik, dapat dilihat pada Gambar 45. Material ini mengeluarkan tiga jenis bahan

yaitu berupa padatan, cairan dan gas. Bahan padatan dapat berupa pasir, debu dan abu vulkanik sedangkan bahan cairan dapat berupa lava dan lahar.

Lava yang keluar akan mengalir menuruni lereng menuju lembah, saat mengalir material yang dilewati akan ikut terbawa termasuk air yang ikut bercampur, campuran ini yang disebut dengan lahar. Salah satu batuan yang terbentuk dari material magma adalah batuan andesit dengan tingginya kandungan Silikon Dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) yang termasuk kedalam jenis batuan beku.



Gambar 45. Diagram proses terbentuknya tanah (sumber: Wesley 2009)

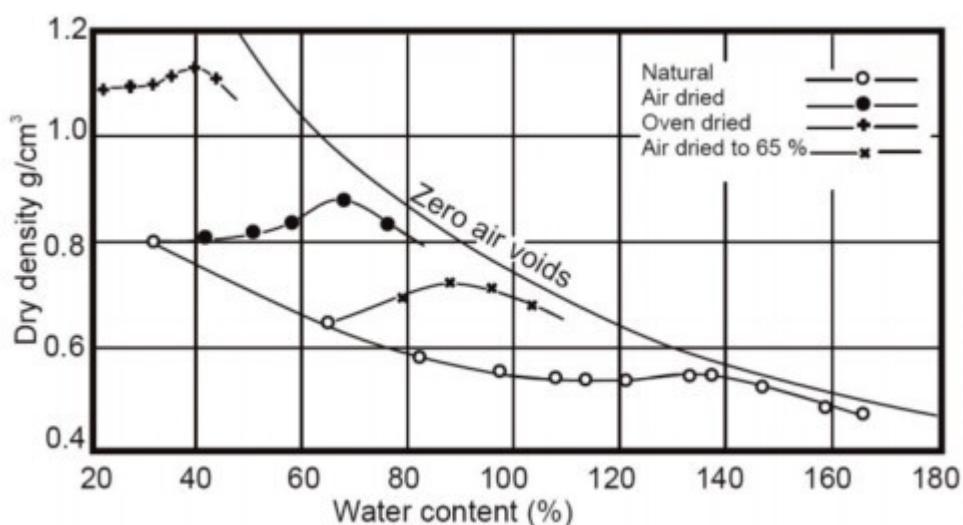
Proses yang terjadi selanjutnya adalah sebagian material ada yang mengalami proses pelapukan ditempat atau dikenal dengan istilah residual dan bagian lainnya mengalami perpindahan lalu mengalami proses endapan, biasa material ini dikenal dengan tanah sedimen.

### 2.8.1 Sifat Material Vulkanik

Material vulkanik menyelimuti permukaan daratan bumi sebesar 0.84% dan seringkali berada di area dimana aktifitas pembangunan sedang dilakukan. Sifat material ini mudah hancur ketika kondisi basah karena nilai porositas yang tinggi

dan bentuk struktur antar butir yang terbuka karena hasil dari endapan (Eichenberger et al., 2013).

Lebih jauh, dari data hasil pengujian konsolidasi didapatkan nilai pra-konsolidasi pada kurva angka pori terhadap skala log beban menunjukkan nilai yang tidak pasti. Sedangkan dari aspek data kuat geser, jarang sekali ditemukan besarnya kuat geser tak teralir dibawah 75 kPa, rata-rata besarnya kuat geser kisaran 100-200 kPa. Sedangkan untuk nilai sudut geser efektif berada diatas 30 derajat. Bila dilakukan pengujian dengan jenis uji kompaksi, ditemukan bahwa nilai variasi yang sangat besar untuk kadar air optimum pada area yang tidak jauh, dan sulitnya mendapatkan nilai maksimum dari berat isi kering.



Gambar 46. Contoh hasil uji kompaksi (sumber: Wesley, 2009)

## 2.9 Hujan

Proses perencanaan suatu lokasi konstruksi yang akan dibuat perlu dipertimbangkan terhadap aspek secara hidrologi. Salah satu poin dari aspek hidrologi adalah karakter curah hujan serta besarnya curah hujan yang sudah terjadi bahkan perkiraan curah hujan yang akan terjadi. Besarnya satuan curah hujan yang dipakai adalah dalam satuan milimeter. Artinya besarnya air yang turun untuk luasan satu meter persegi adalah sebanyak satu liter air.

Analisa yang biasa dilakukan terkait data curah hujan adalah menentukan besarnya curah hujan rencana. Tahapan yang diperhatikan dalam analisa tersebut adalah:

1. Menentukan beberapa lokasi stasiun curah hujan terdekat.
2. Uji validitas data curah hujan.
3. Menentukan curah hujan wilayah.
4. Melakukan analisa distribusi frekuensi dan hujan periode ulang.
5. Menguji kecocokan distribusi data

Perubahan lokasi stasiun hujan atau perubahan metode pengukuran dapat memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap jumlah hujan terukur, sehingga hal ini dapat menyebabkan kesalahan ataupun menyebabkan data hujan yang ditinjau menjadi tidak konsisten. Karena itu uji validitas data perlu dilakukan. Beberapa metode untuk uji validitas adalah: metode kurva masssa ganda, metode *Raps* dan lainnya.

Curah hujan wilayah dibutuhkan untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan air dan rancangan pengendalian banjir. Untuk menghitung hujan wilayah diperlukan data curah hujan dari stasiun yang ditinjau, data koordinat stasiun hujan atau peta stasiun hujan. Perhitungan curah hujan wilayah dapat dilakukan dengan beberapa metode, yaitu: metode rata-rata aljabar, metode *Polygon Thiessen*, metode *Isohyet*.

Tujuan dari analisa distribusi frekuensi data hidrologi adalah mencari hubungan antara besarnya kejadian ekstrim terhadap frekuensi kejadian dengan menggunakan distribusi probabilitas. Untuk hujan periode ulang, metode yang dipakai adalah: *Distribusi Normal*, *Distribusi Log Normal*, *Distribusi Log Pearson III*, *Distribusi Gumbel*.

Langkah terakhir yang dikerjakan untuk menentukan besarnya curah hujan rencana adalah melakukan uji kecocokan distribusi. Metode yang dipakai adalah: metode *Chi Kuadrat* dan *Smirnov-Kolmogorov*.

## 2.10 Kriteria Jenis Aliran

Sebelum menentukan analisa aliran sesuai dengan kasus yang dihadapi, perlu diketahui terlebih dahulu jenis alirannya. Dalam aliran fluida, terdapat beberapa jenis golongan, antara lain:

1. Aliran termampatkan (*incompressible*) dan tak termampatkan (*compressible*). Jenis aliran ini tergantung dengan jenis kerapatan massa dari fluidanya, Aliran termampatkan adalah kondisi aliran dimana rapat massa fluidanya berubah. Contoh adalah gas. Pada jenis fluida ini yang berlaku adalah hukum termodinamika
2. Aliran tunak (steady) dan tak tunak (unsteady) adalah kondisi dimana aliran tidak berubah terhadap waktu. Contohnya adalah aliran di sungai pada kondisi tidak ada perubahan aliran misal tidak ada hujan atau banjir. Untuk aliran tak tunak adalah sebaliknya.
3. Aliran seragam (uniform) dan tak seragam (non-uniform) adalah kondisi dimana komponen aliran tidak berubah terhadap jarak, tidak ada pengaruh pembendungan ataupun penyempitan dan pelebaran yang ekstrim.
4. Aliran laminar (laminar) dan turbulen (turbulent) adalah aliran yang dipengaruhi oleh gerak partikel atau distribusi kecepatannya.
5. Aliran yang dipengaruhi kekentalan (*viscous*) dan tidak dipengaruhi (*inviscid*) adalah jenis aliran yang dipengaruhi oleh viskositas. Karena viskositas menyebabkan adanya tegangan geser dan kehilangan energi.
6. Aliran rotasi dan aliran tak rotasi adalah aliran dimana dipengaruhi nilai rotasinya.
7. Aliran subkritis dan superkritis adalah aliran yang dibedakan berdasarkan berapa besar angka Froude, dimana angka Froude ini dipengaruhi oleh kecepatan aliran, gravitasi dan kedalaman aliran. Bila nilai Froude lebih besar dari satu, maka aliran disebut super kritis, untuk nilai Froude sama dengan satu, maka disebut aliran kritis dan untuk angka Froude dibawah satu maka disebut aliran sub-kritis.
8. Terakhir adalah aliran yang terpisahkan dan tidak terpisahkan.

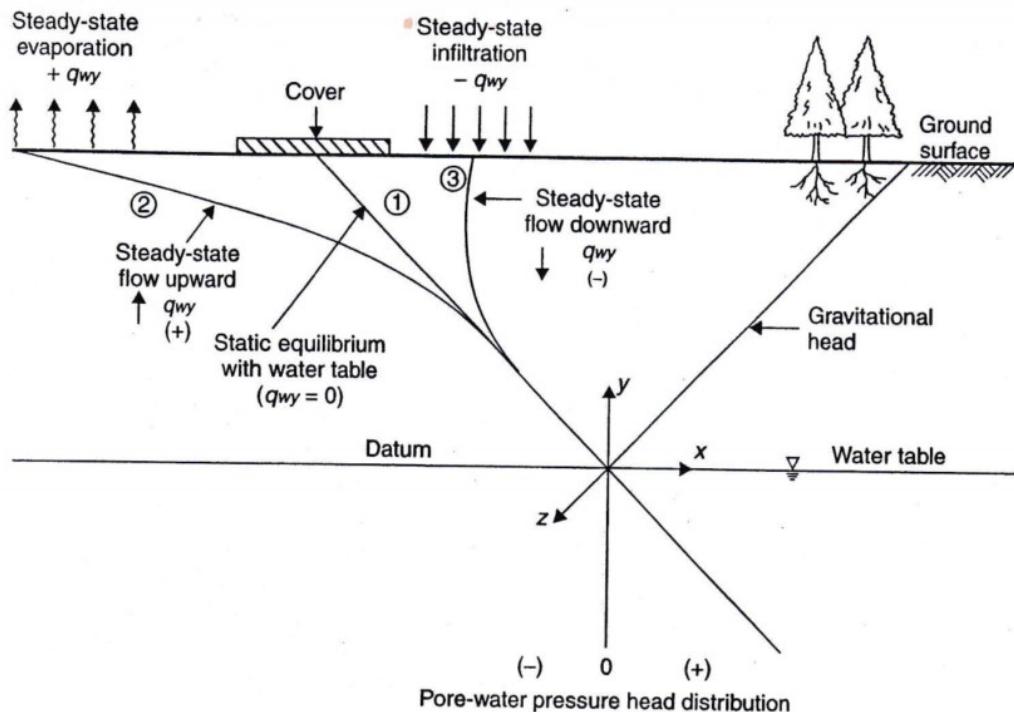
## BAB 3

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Aliran Pada Tanah *Unsaturated*

##### 3.1.1 Aliran Satu Dimensi pada Tanah *Unsaturated*

Pada situasi tertentu, aliran air didominasi hanya pada salah satu arah saja. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 47. Garis linear nomor 1 menunjukkan besarnya tekanan air pori negatif sampai batas muka air tanah dan ini disebut kondisi equilibrium, dengan kata lain *hydraulic head* ( $=\text{gravitational head} + \text{negative pore water pressure head}$ ) bernilai nol, lalu *hydraulic gradient* bernilai nol juga. Dalam kondisi demikian maka tidak akan terjadi aliran, tapi dengan catatan tidak ada infiltrasi ataupun evaporasi ( $q_{wy} = 0$ ).

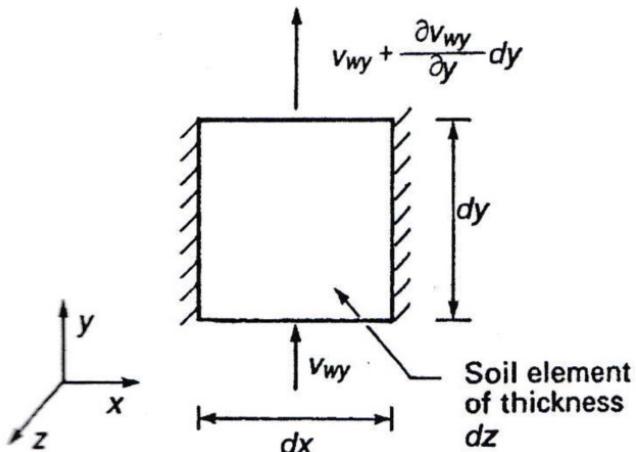


Gambar 47. Ilustrasi Kondisi Hidrostatik dan Aliran *Steady State* pada zona *negative pore water pressure* (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)

Masih pada gambar yang sama tapi fokus pada garis nomor 2, kondisi ini terjadi karena kondisi tanah permukaan berubah, mulai ada aktifitas galian sehingga nilai

*negative pore water pressure* akan berubah bertambah negatif karena efek evaporasi. Kondisi sebaliknya terjadi pada garis nomor 3, karena adanya infiltrasi yang menyebabkan *negative pore water pressure* berkurang atau bergerak relative kearah kanan.

Secara matematis, kondisi ini dapat ditulis sebagai berikut:



Gambar 48. Kondisi aliran satu dimensi pada elemen tanah (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)

Kesetimbangan elemen pada Gambar 48 adalah pada Eq. 26.

$$\left( v_{wy} + \frac{dv_{wy}}{dy} \cdot dy \right) \cdot dx \cdot dz - v_{wy} \cdot dx \cdot dz = 0 \quad Eq. 26$$

Disederhanakan menjadi:

$$\frac{dv_{wy}}{dy} \cdot dx \cdot dy \cdot dz = 0 \quad Eq. 27$$

Persamaan Darcy untuk kondisi *unsaturated* adalah:

$$v_{wy} = -k_{wy} \cdot (u_a - u_w) \cdot \frac{dh_w}{dy} \quad Eq. 28$$

Persamaan Eq. 28 disubtitusikan kedalam Eq. 27, persamaan aliran satu dimensi pada tanah *unsaturated* dapat dilihat pada persamaan Eq. 29:

$$\frac{d \left\{ -k_{wy}(u_a - u_w) \cdot \frac{dh_w}{dy} \right\}}{dy} \cdot dx \cdot dy \cdot dz = 0 \quad Eq. 29$$

dimana:

- |                      |   |
|----------------------|---|
| $k_{wy} (u_a - u_w)$ | = koefisien permeabilitas, fungsi <i>matric suction</i> , m/s |
| $dh_w/dy$            | = gradien hidraulika pada sumbu-y                             |
| $h_w$                | = <i>hydraulic head</i> , m                                   |

Persamaan Eq. 29 dapat digunakan untuk menggambarkan besarnya distribusi *hydraulic head* sepanjang sumbu arah-y. Karena nilai *matric suction* tidak konstan, maka besarnya koefisien permeabilitas akan bervariasi. Selanjutnya notasi  $k_{wy}(u_a - u_w)$  akan diganti saja dengan  $k_{wy}$  untuk mempermudah. Persamaan ini ditulis kembali dengan menyelesaikan operator diferensial, maka akan menjadi persamaan Eq. 30 dengan bentuk persamaan diferensial tidak linear.

$$k_{wy} \cdot \frac{d^2 h_w}{dy^2} + \frac{dk_{wy}}{dy} \cdot \frac{dh_w}{dy} = 0 \quad Eq. 30$$

dimana:

- |             |  |
|-------------|--|
| $k_{wy}/dy$ | = perubahan koefisien permeabilitas dalam arah sumbu-y |
|-------------|--|

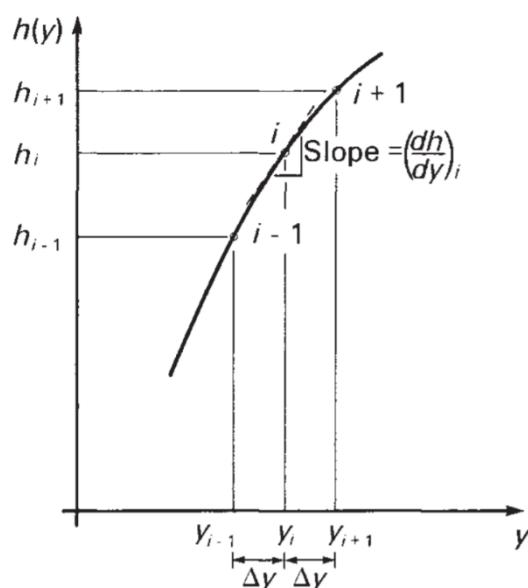
Pada kondisi tanah *saturated*, besarnya koefisien permeabilitas akan hanya mempunyai satu nilai saja dan bisa ditulis dengan notasi  $k_s$ . Persamaan Eq. 30, untuk nilai  $k_{wy}$  dapat disubtitusi dengan nilai  $k_s$ , persamaan ini ditulis ulang menjadi persamaan Eq. 31.

$$k_s \cdot \frac{d^2 h_w}{dy^2} + \frac{dk_s}{dy} \cdot \frac{dh_w}{dy} = 0 \quad Eq. 31$$

### 3.1.2 Solusi Persamaan Diferensial Parsial Aliran Satu Dimensi

Persamaan diferensial untuk aliran satu dimensi pada tanah *unsaturated* lebih kompleks dibandingkan pada tanah *saturated*, sehingga solusi numerik diperlukan untuk menyelesaiakannya. Pada persamaan Eq. 31 dengan memasukan nilai  $k_s$  yang konstan maka suku kedua akan menjadi nol, selanjunya persamaan akan menjadi persamaan diferensial linear dan dapat diselesikan dengan cara integral biasa. Untuk tanah *unsaturated*, maka persamaan diferensial parsial bisa diselesikan dengan cara solusi numerik seperti metode beda hingga / *finite difference method*.

Langkah pertama untuk metode hingga adalah dengan membuat titik simpul sepanjang aliran yang dimodelkan dengan jarak kedalaman yang sama. Setiap simpul mempunyai nilai *hydraulic head* yang akan dicari. Selanjutnya setiap titik simpul dibuat persamaanya berdasarkan prinsip Taylor series dengan mengabaikan orde tinggi, contohnya bisa *backward difference*, *central difference* dan *forward difference*. Setelah persamaan setiap titik nodal dibuat, selanjutnya dengan memasukan kondisi batas maka besarnya *hydraulic head* untuk setiap titik simpul dapat diselesailan.



Gambar 49. Ilustrasi Beda Hingga (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)

Persamaan nodal untuk turunan pertama (Eq. 32) dan turunan kedua (Eq. 33) berdasarkan backward-forward difference adalah:

$$\left(\frac{dh}{dy}\right)_i = \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2 \cdot \Delta y} \quad Eq. 32$$

$$\left(\frac{d^2h}{dy^2}\right)_i = \frac{h_{i+1} + h_{i-1} - 2 \cdot h_i}{\Delta y^2} \quad Eq. 33$$

Selanjutnya persamaan Eq. 32 dan Eq. 33 disubtitusikan kedalam persamaan sebelumnya Eq. 30.

$$k_{wy(i)} \cdot \left\{ \frac{(h_{w(i+1)} + h_{w(i-1)} - 2 \cdot h_{w(i)})}{\Delta y^2} \right\} \\ + \left\{ \frac{(k_{wy(i+1)} - k_{wy(i-1)})}{2 \Delta y} \right\} \cdot \left\{ \frac{(h_{w(i+1)} - h_{w(i-1)})}{2 \Delta y} \right\} \\ = 0 \quad Eq. 34$$

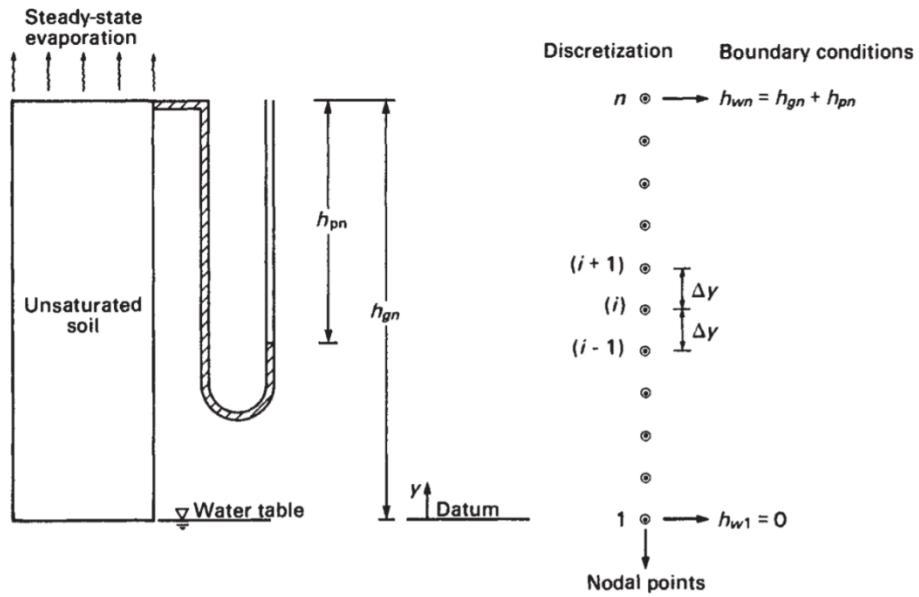
dimana:

$k_{wy(i)}$ , $k_{wy(i-1)}$ , $k_{wy(i+1)}$	= adalah koefisien permeabilitas dalam sumbu- y untuk titik i, i-1, i+1.
$h_{w(i)}$ , $h_{w(i-1)}$ , $h_{w(i+1)}$	= adalah <i>hydraulic head</i> dalam sumbu- y untuk titik i, i-1, i+1.

Bila persamaan Eq. 34 disederhanakan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$-\{8k_{wy(i)}\} \cdot h_{w(i)} + \{4k_{wy(i)} + k_{wy(i+1)} - k_{wy(i-1)}\} \cdot h_{w(i+1)} \\ + \{4k_{wy(i)} + k_{wy(i-1)} - k_{wy(i+1)}\} \cdot h_{w(i-1)} = 0 \quad Eq. 35$$

Kondisi batas dapat diberikan pada titik “n” dan nomor 1 dari model seperti Gambar 50. Untuk titik “n” bisa berupa aliran air seperti hujan dan titik nomor 1 berupa *hydraulic head* bernilai nol karena berbatasan dengan muka air tanah.



Gambar 50. Pemodelan kondisi *steady state* dan syarat batas (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)

Besarnya aliran air hujan untuk keperluan kondisi batas dapat dilihat pada persamaan Eq. 36.

$$q_{wy} = -k_{wy(i)} \left( \frac{h_{w(i+1)} - h_{w(i-1)}}{2 \cdot \Delta y} \right) \cdot A \quad Eq. 36$$

Selanjutnya besarnya *hydraulic head* akibat aliran air hujan adalah sebesar:

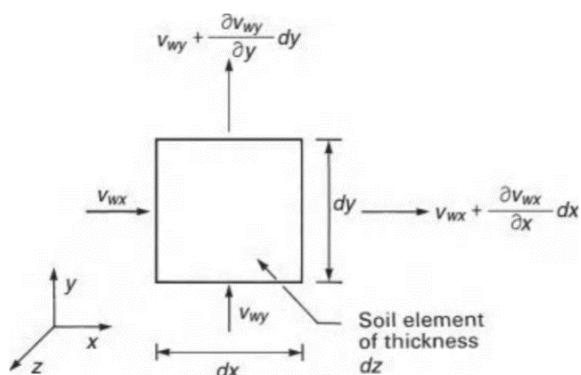
$$h_{w(i+1)} = h_{w(i-1)} - \frac{2 \cdot \Delta y}{A \cdot k_{wy(i)}} \cdot q_{wy} \quad Eq. 37$$

Selanjutnya nilai *hydraulic head* pada persamaan Eq. 37 disubtitusikan kedalam persamaan Eq. 35. Setelah itu disederhanakan, sehingga besarnya *hydraulic head* pada titik “i” dapat langsung dihitung dengan persamaan

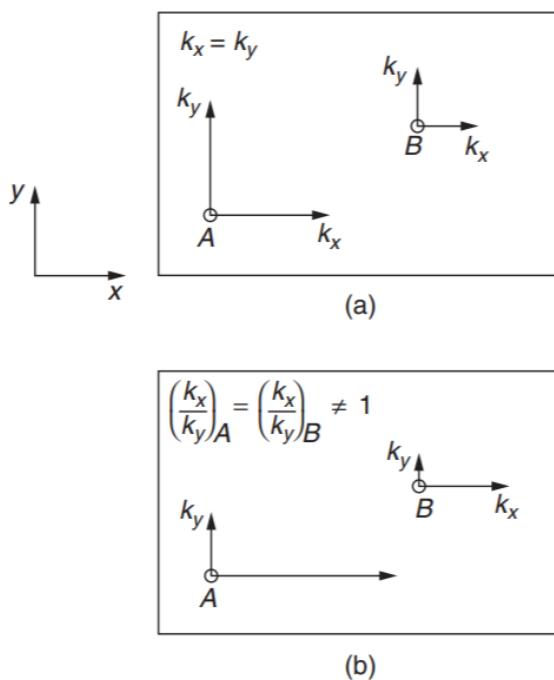
$$h_{w(i)} = h_{w(i-1)} - \left\{ \frac{4k_{wy(i)} + k_{wy(i+1)} - k_{wy(i-1)}}{8k_{wy(i)}^2} \right\} \cdot \frac{2\Delta y}{A} \cdot q_{wy} \quad Eq. 38$$

### 3.1.3 Aliran Dua Dimensi Pada Tanah *Unsaturated*

Contoh nyata model aliran dua dimensi yang sering ditemui adalah bangunan bendungan air. Pada bidang dua dimensi, diasumsikan aliran tegak lurus bidang gambar diabaikan. Analisa aliran yang dimodelkan akan melewati bagian bendungan dengan kondisi *saturated* dan *unsaturated* secara bersamaan. Penurunan persamaan diferensial dapat memasukan kondisi *heterogeneous* dan *anisotropic*. Ilustrasi dari kondisi ini dapat dilihat pada Gambar 52.



Gambar 51. Kondisi aliran dua dimensi pada elemen tanah (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)



Gambar 52. (a) Kondisi *heterogeneous*, isotropik (b) kondisi *heterogeneous*, *anisotropic* (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)

Secara matematis kondisi aliran dua dimensi pada Gambar 51 dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \left( v_{wx} + \frac{dv_{wx}}{dx} \cdot dx - v_{wx} \right) \cdot dy \cdot dz \\ & + \left( v_{wy} + \frac{dv_{wy}}{dy} \cdot dy - v_{wy} \right) \cdot dx \cdot dz = 0 \end{aligned} \quad Eq. 39$$

Disederhanakan menjadi:

$$\left( \frac{dv_{wx}}{dx} + \frac{dv_{wy}}{dy} \right) = 0 \quad Eq. 40$$

Dengan memasukan hukum Darcy untuk kondisi *unsaturated*, akan didapatkan persamaan diferensial parsial tidak linear untuk kondisi *heterogeneous* dan *anisotropic* secara umum untuk kondisi aliran dua dimensi sebagai berikut:

$$\frac{d \left\{ k_{wx} (u_a - u_w) \cdot \frac{dh_w}{dx} \right\}}{dx} + \frac{d \left\{ k_{wy} (u_a - u_w) \cdot \frac{dh_w}{dy} \right\}}{dy} = 0 \quad Eq. 41$$

Agar menjadi lebih jelas, persamaan Eq. 41 didiferensialkan terhadap bidang sumbu x-y, dan kembali ditulis sebagai berikut:

$$k_{wx} \cdot \frac{d^2 h_w}{dx^2} + k_{wy} \cdot \frac{d^2 h_w}{dy^2} + \frac{dk_{wx}}{dx} \cdot \frac{dh_w}{dx} + \frac{dk_{wy}}{dy} \cdot \frac{dh_w}{dy} = 0 \quad Eq. 42$$

Bila kasus yang ditemukan adalah kondisi *heterogenous* dan *isotropic*, maka nilai koefisien permeabilitas mempunyai nilai yang sama dan notasinya cukup ditulis menjadi  $k_w$  saja.

$$k_w \cdot \left( \frac{d^2 h_w}{dx^2} + \frac{d^2 h_w}{dy^2} \right) + \frac{dk_w}{dx} \cdot \frac{dh_w}{dx} + \frac{dk_w}{dy} \cdot \frac{dh_w}{dy} = 0 \quad Eq. 43$$

### 3.1.4 Solusi Persamaan Diferensial Parsial Aliran Dua Dimensi

Solusi yang dapat dilakukan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial, adalah: solusi eksak atau analitikal dan solusi pendekatan secara numerik. Secara khusus, untuk solusi eksak dapat dibagi menjadi tiga kategori: *direct methods*, *indirect methods* dan metode berdasarkan *complex function theory* (P. van der Veer, 1978). Ketiga kategori tidak akan dibahas dengan secara mendalam tetapi sebagai bahan referensi.

Tabel 6. Daftar solusi analitikal untuk persamaan Laplacian

Direct Methods	Indirect Methods	Complex Function Theory
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Direct Integration</li> <li>- Separation of Variables</li> <li>- Integral Transforms</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Superposition</li> <li>- Green's Functions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metode Pavlovskii</li> <li>- Metode Vedernikov-Pavlovskii</li> <li>- Metode Hodograph</li> </ul>

Tabel 7. Daftar solusi pendekatan untuk persamaan Laplacian

Approximative Methods
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Method of Fragments</li> <li>- Graphical Flow Method</li> <li>- Finite Difference Method</li> <li>- Finite Element Method</li> </ul>

Contoh solusi dari *metode separation of variables* untuk aliran dua dimensi dengan kondisi homogeneous adalah sebagai berikut:

$$\frac{d^2 h_w}{dx^2} + \frac{d^2 h_w}{dy^2} = 0 \quad Eq. 44$$

Lalu dimisalkan persamaan dari  $\phi$  adalah:

$$h_w = F(x) + G(y) \quad Eq. 45$$

Maka persamaan Eq. 44 akan menjadi:

$$\frac{d^2F(x)}{dx^2} + \frac{d^2G(y)}{dy^2} = 0 \quad Eq. 46$$

Karena fungsi persamaan F(x) dan G(y) tergantung dari x dan y dan hanya bisa diselesaikan jika F''(x) dan G''(y) bernilai konstan. Maka dengan teknik integral langsung akan didapatkan persamaan Eq. 47.

$$F(x) = a_1x^2 + b_1x + c_1 \\ G(y) = a_2y^2 + b_2y + c_2 \quad Eq. 47$$

Langkah berikutnya persamaan Eq. 47 disubtitusikan kedalam persamaan Eq. 46, dan didapat hubungan nilai  $a_1 = -a_2$ , supaya lebih sederhana diambil  $c = c_1 + c_2$ .

Persamaan umumnya Eq. 48, dengan konstanta a, b1, b2 dan c adalah konstanta yang didapatkan dari kondisi batas dan nilai x serta y adalah koordinat.

$$h_w = a(x^2 - y^2) + b_1x + b_2y + c \quad Eq. 48$$

Jikalau Eq. 44 dengan menggunakan metode beda hingga untuk dua dimensi, prinsip yang dipakai menggunakan persamaan Eq. 33.

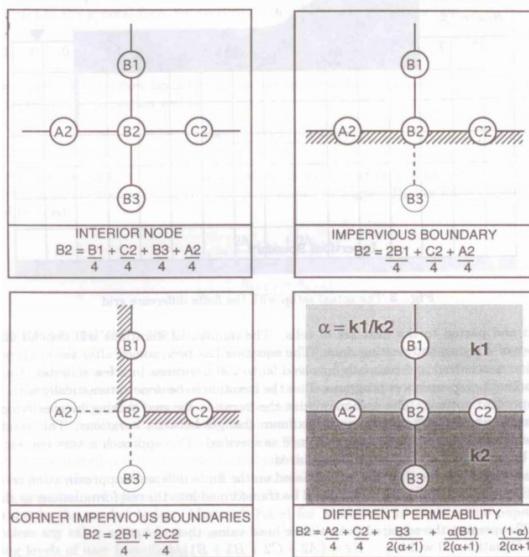
$$\frac{d^2h_w}{dx^2} = \frac{h_{i-1,j} - 2 \cdot h_{ij} + h_{i+1,j}}{\Delta x^2} \quad Eq. 49$$

$$\frac{d^2h_w}{dy^2} = \frac{h_{ij-1} - 2 \cdot h_{ij} + h_{ij+1}}{\Delta y^2} \quad Eq. 50$$

Untuk memudahkan perhitungan, diambil besarnya  $\Delta x$  sama dengan  $\Delta y$ . Didapatkan persamaan umum untuk seluruh titik lokasi diluar titik pada batas kondisi dengan keadaan *homogeneous* dapat dilihat pada persamaan Eq. 51.

$$h_{w(i,j)} = \frac{h_{w(i,j-1)} + h_{w(i,j+1)} + h_{w(i+1,j)} + h_{w(i-1,j)}}{4} \quad Eq. 51$$

Ilustrasi mengenai titik nodal secara umum dapat dilihat pada Gambar 53, beserta dengan kondisi nodal pada lokasi kondisi batas.



Gambar 53. Titik nodal metode beda hingga (sumber: Mahadzer Mahmud, 1996)

### 3.2 Metode Elemen Hingga

Sebenarnya metode elemen hingga sudah dikembangkan sejak lama oleh para peneliti ilmu mekanika, matematika dan fisika secara terpisah. Hingga akhirnya pada tahun 1943, Courant menggambangkan semua penelitian tersebut menjadi sebuah fungsi khusus untuk elemen segitiga dua dimensi. Lalu perkembangan selanjutnya dilanjutkan oleh peneliti-peneliti setelah Courant, sampai pada tahun 1960, Clough mulai memperkenalkan kata “*Finite Element Method*”.

Secara singkat, cara kerja metode elemen hingga adalah mencari solusi pada suatu masalah dengan cara membagi suatu sistem menjadi elemen-elemen yang lebih kecil dengan ukuran yang dibatasi. Lalu masing-masing elemen akan dicarikan solusinya berdasarkan konsep energi. Setelah didapat solusi dari setiap elemen, langkah selanjutnya adalah menggabungkan dan mengintegrasikan menjadi solusi global.

Beberapa langkah umum (Desai, 1972) yang dilakukan selama mengerjakan analisa dengan metode elemen hingga, antara lain:

1. Diskretisasi dan memilih konfigurasi elemen
2. Memilih model atau fungsi pendekatan
3. Menentukan hubungan untuk kasus yang akan diselesaikan
4. Menurunkan persamaan elemen
5. Menggabungkan persamaan elemen menjadi persamaan global
6. Menentukan syarat batas dan menyelesaikan besaran primer
7. Menyelesaikan besaran sekunder
8. Interpretasi hasil

### 3.2.1 Model Elemen

Dalam hal analisa aliran menggunakan metode elemen hingga, sebelum mendapatkan besaran primer yaitu *negative pore water pressure/suction*. Terlebih dahulu harus memilih elemen apa yang akan dipakai untuk digabungkan nantinya.

Beberapa contoh elemen dua dimensi yang sudah banyak dibahas dan dipakai dalam program komputer komersial antara lain:

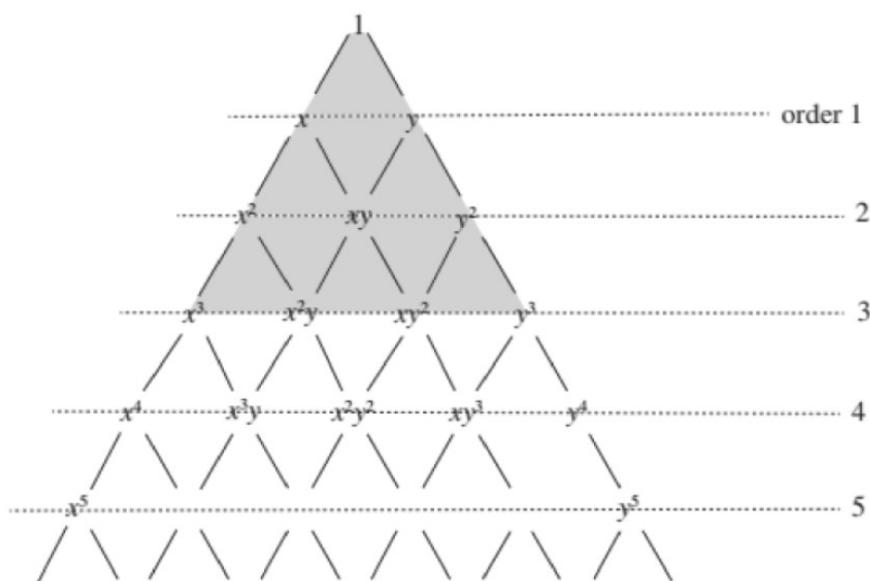
Tabel 8. Jenis Elemen

Nama Elemen	Bentuk Elemen
Segitiga	
Quadrilateral	

### 3.2.2 Fungsi Pendekatan

Fungsi pendekatan untuk masing-masing bentuk elemen akan berbeda tergantung dari jumlah titik nodal dan derajat kebebasan dari tiap titik nodal pada elemen tersebut. Biasanya fungsi pendekatan yang dipakai akan berupa polinomial agar mudah saat melakukan diferensial dan memindahkannya kedalam bentuk matrix.

Pedoman yang dipakai saat menentukan persamaan polinomial adalah segitiga Pascal, Gambar 54.



Gambar 54. Pascal's Triangle

Contoh penggunaan untuk elemen segitiga yang mempunyai jumlah titik nodal sebanyak tiga dengan masing-masing nodal ada dua derajat kebebasan, maka dalam satu sumbu ada tiga variable yang tidak diketahui, sehingga fungsi pendekatan untuk setiap titik yang dipakai adalah:

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y$$

*Eq. 52*

dimana:

- $\alpha$  = konstanta yang harus dicari
- $x$  = koordinat pada sumbu-x
- $y$  = koordinat pada sumbu-y

Contoh lain untuk elemen quadrilateral yang mempunyai nodal sebanyak empat titik dengan masing-masing titik ada dua derajat kebebasan, sehingga dalam satu arah sumbu akan terdapat empat variabel yang tidak diketahui, maka fungsi pendekatan yang dipakai adalah:

$$\mathbf{u} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha \cdot x \cdot y \quad Eq. 53$$

Untuk setiap fungsi pendekatan yang ditentukan, berikutnya dicari variabel  $\alpha$ , untuk selanjutnya dirubah bentuknya persamaannya menjadi persamaan Eq. 54, dimana  $N_i$  adalah fungsi bentuk (*shape factor*) yang dapat digunakan untuk melakukan interpolasi setiap varibel yang berada didaerah daripada elemen tersebut, seperti: koordinat, regangan, tegangan, beban dst.

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \mathbf{u}_i \quad Eq. 54$$

### 3.2.3 Hubungan Gradien, *Suction* dan Kecepatan Aliran

Untuk menentukan kecepatan aliran, digunakan hukum Darcy dengan persamaan:

$$v = k \cdot i \quad Eq. 55$$

Tetapi untuk kondisi tanah *unsaturated*, digunakan nilai permeabilitas dalam fungsi *suction* ( $k = k(u_a - u_w)$ ). Sedangkan variabel ( $i$ ) adalah gradien aliran.

### 3.2.4 Menentukan Persamaan Elemen dan Solusi Besaran Primer

Persamaan elemen didapatkan dengan menggunakan konsep persamaan energi dengan menerapkan prinsip energi potensial minimum dengan memasukan fungsi variasi (metode Rayleight-Ritz) dan harus memenuhi prinsip kontinuitas serta *essential boundary condition*.

$$\pi = \int \int \int \left( \frac{1}{2} \right) \cdot \left\{ k_{wx} \cdot \left( \frac{dh_w}{dx} \right)^2 + k_{wy} \cdot \left( \frac{dh_w}{dy} \right)^2 \right\} dA - \int q \cdot h_w \cdot dS_p \quad Eq. 56$$

Bila diselesaikan dengan menggunakan prinsip stasioner akan didapatkan persamaan Eq. 57. Persamaan ini adalah untuk kondisi *steady state*.

$$\int [B]^T \cdot [k_w] \cdot [B] \cdot dA \cdot \{h_w\} - \int [N]^T \cdot v_w \cdot dS_p \quad Eq. 57$$

dimana:

$[B]$	= turunan dari matrix N
$[k_w]$	= matrix koefisien permeabilitas
$[N]$	= matrix fungsi bentuk
$\{h_w\}$	= vektor <i>hydraulic heads</i>
$v_w$	= aliran tambahan dari luar dengan arah tegak lurus batas elemen
$S_p$	= keliling dari elemen

Pada kondisi *transient* atau *unsteady state*, persamaan dapat dilihat pada Eq. 58, selain memasukan faktor waktu, ada faktor *water storage functions*.

$$\int [B]^T \cdot [k_w] \cdot [B] \cdot dA \cdot \{h_w\} + \int [N]^T \cdot \lambda \cdot [N] \cdot dA \cdot \frac{\partial \{h_w\}}{\partial t} - \int [N]^T \cdot v_w \cdot dS_p = 0 \quad Eq. 58$$

dimana:

$\lambda$	= $\rho \cdot g \cdot m_2^w$
$m_2^w$	= <i>water storage modulus</i> , kPa <sup>-1</sup>

Persamaan Eq. 58, diselesaikan dengan cara metode beda hingga seperti terlihat pada persamaan Eq. 59, ini diperlukan karena ada kondisi yang tidak stabil antara besarnya *hydraulic head* terhadap satuan waktu dari setiap *boundary flux* yang ditentukan. Setelah didapatkan kondisi yang stabil langkah selanjutnya persamaan diselesaikan untuk didapatkan besaran primernya ( $h_w$ ). Dimana  $[D]$  adalah stiffness matrix  $([B]^T \cdot [k_w] \cdot [B] \cdot A)$

$$\left( [D]^T + 2 \cdot \frac{[E]}{\Delta t} \right) \cdot \{h_w\}_{t+\Delta t} = \left( 2 \cdot \frac{[E]}{\Delta t} - [D] \right) \cdot \{h_w\}_t + 2 \cdot [F] \quad Eq. 59$$

dimana:

- [D] = stiffness matrix  $[B]^T [k_w] [B] A$
- [E] = capacitance matrix
- [F] = flux vector

### 3.2.5 Besaran Sekunder

Setelah besaran primer didapatkan yaitu berupa *hydraulic head*, Langkah selanjutnya yang dicari adalah besaran sekunder berupa kecepatan aliran, persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} v_{wx} \\ v_{wy} \end{Bmatrix} = [k_w] \cdot [B] \cdot [h_w] \quad Eq. 60$$

Untuk mencari besarnya debit aliran, perlu ditentukan terlebih dahulu penampang yang tegak lurus terhadap arah kecepatan aliran yang dihitung pada titik koordinat Gauss, dimana ini adalah titik optimal dari setiap elemen lokal yang dibuat pada saat proses diskritisasi yang gunanya adalah untuk memudahkan proses integral secara numerik pada langkah menentukan persamaan elemen. Setelah setiap besaran sekunder dihasilkan, Langkah selanjutnya dilakukan interpretasi sesuai dengan kebutuhan.

### 3.3 Fungsi Estimasi SWCC

Fungsi estimasi yang sering digunakan untuk menentukan kurva SWCC adalah dengan menggunakan fungsi dari Modified Kovacs Model yang sudah ditulis ulang oleh Aubertin et al pada tahun 2003, persamaan Eq. 61. Detil persamaan dapat dilihat pada halaman lampiran. Fungsi dari Modified Kovacs lebih mudah dipakai karena menggunakan korelasi dari data hasil uji ukuran butir (*grain size*) untuk material berbutir kasar dan data batas cair (*liquid limit*) untuk material butir halus.

$$\theta = n * [S_c + ((1 - S_a) + 1)(1 - S_c)] \quad Eq. 61$$

dimana:

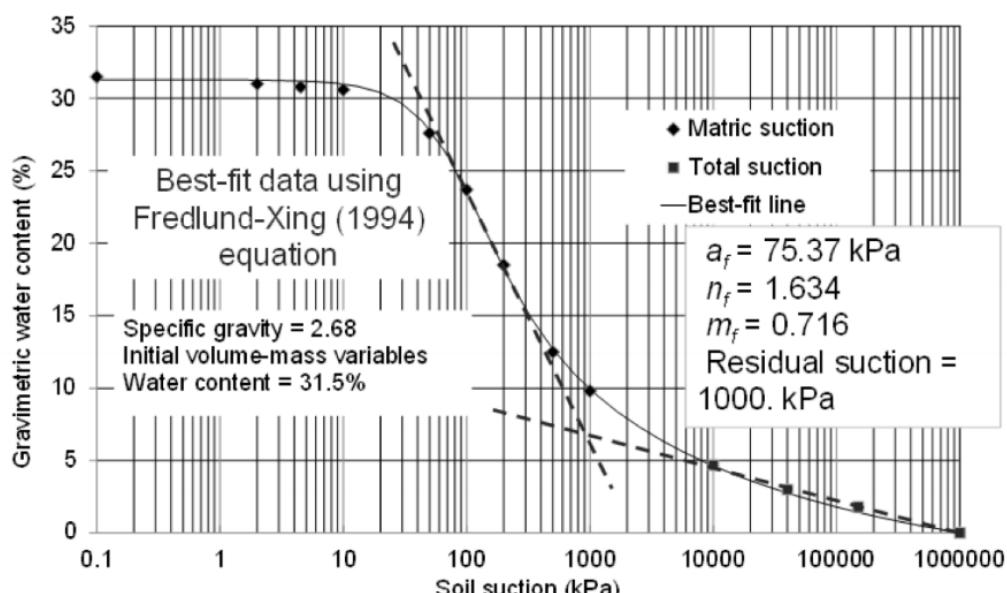
- $\langle \quad \rangle$  = Macaulay brackets
- $S_a$  = saturation with the capillary component
- $S_c$  = saturation with the adhesive component
- n = porositas

Alternatif persamaan lain yang dapat dipakai adalah menggunakan persamaan Fredlund-Xing (1994), persamaan Eq. 62.

$$\theta = C(\psi) \cdot \frac{\theta_s}{\left( \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right] \right)^{m_f}} \quad Eq. 62$$

dimana:

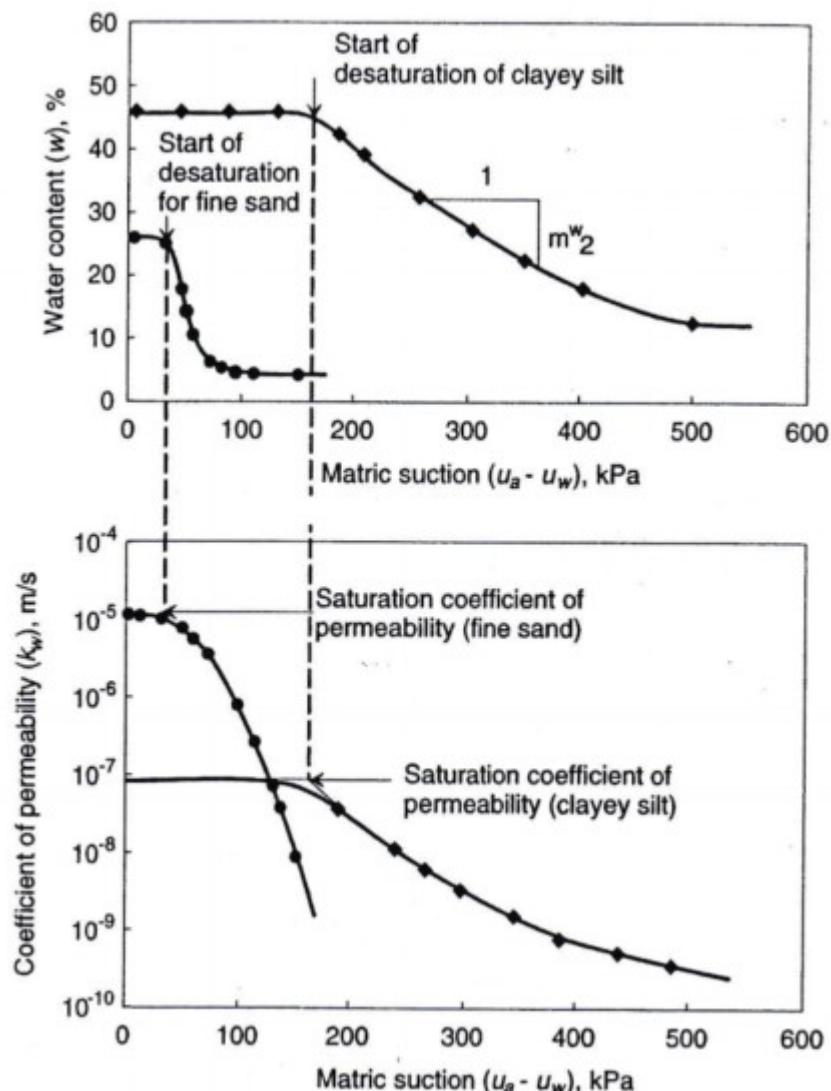
- $a_f, n_f, m_f$  = fitting parameter
- $\theta_s$  = saturated volumetric water content
- $\Psi$  = suction, kPa
- $C(\psi)$  = correction factor
- e = natural number (2.71828...)
- n = porositas



Gambar 55. Contoh grafik SWCC (sumber: D. G. Fredlund, 2019)

Selain kedua persamaan diatas yang sudah disebutkan ada beberapa lagi persamaan yang dapat dilihat dari berbagai sumber literatur.

### 3.4 Fungsi Estimasi *Hydraulic Conductivity-Suction*



Gambar 56. Tipikal kurva SWCC dan *hydraulic conductivity* untuk tanah pasir dan lanau kelempungan (sumber: D. G. Fredlund, H. Fredlund, M. D. Fredlund, 2012)

Dapat dilihat pada Gambar 56 adalah tipikal bentuk kurva SWCC dan hubungannya dengan nilai *hydraulic conductivity* untuk material jenis pasir dan lanau kelempungan.

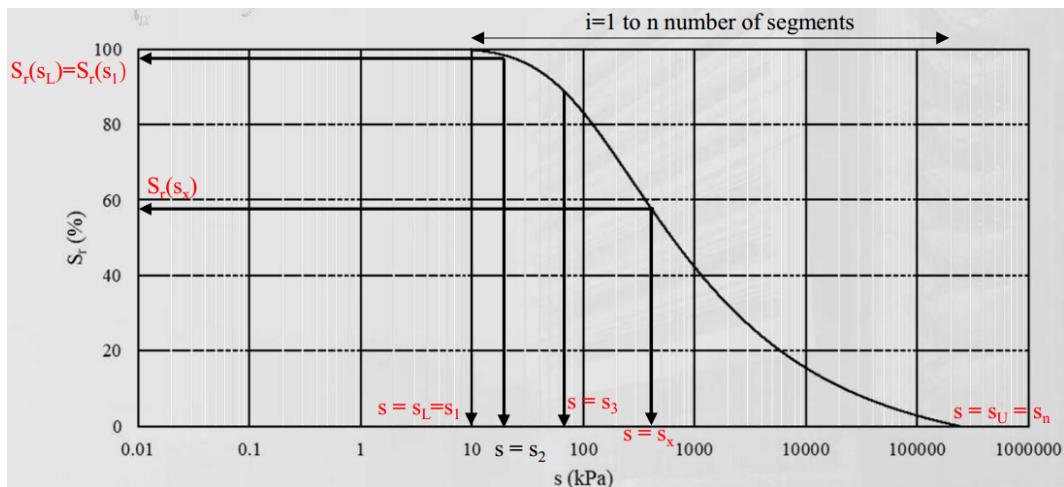
Metode yang disarankan oleh Fredlund et al (1994) untuk digunakan saat hendak memprediksi fungsi *hydraulic conductivity* adalah: Green dan Corey (1971), Van Genuchten (1980) dan Fredlund et al (1994). Untuk dua metode terakhir, parameter

didalam persamaannya mengandung parameter yang didapat dari fungsi kurva SWCC yang sudah ditentukan sebelumnya. Dan untuk detil persamaan dapat dilihat pada lembar lampiran.

$$k_r(s) = \left[ \frac{\int_s^{s_u} \left( \frac{S_r(y) - S_r(s)}{y^2} \cdot S'_r(y) dy \right)}{\int_{s_L}^{s_u} \left( \frac{S_r(y) - S_r(s_L)}{y^2} \cdot S'_r(y) dy \right)} \right] \quad Eq. 63$$

dimana:

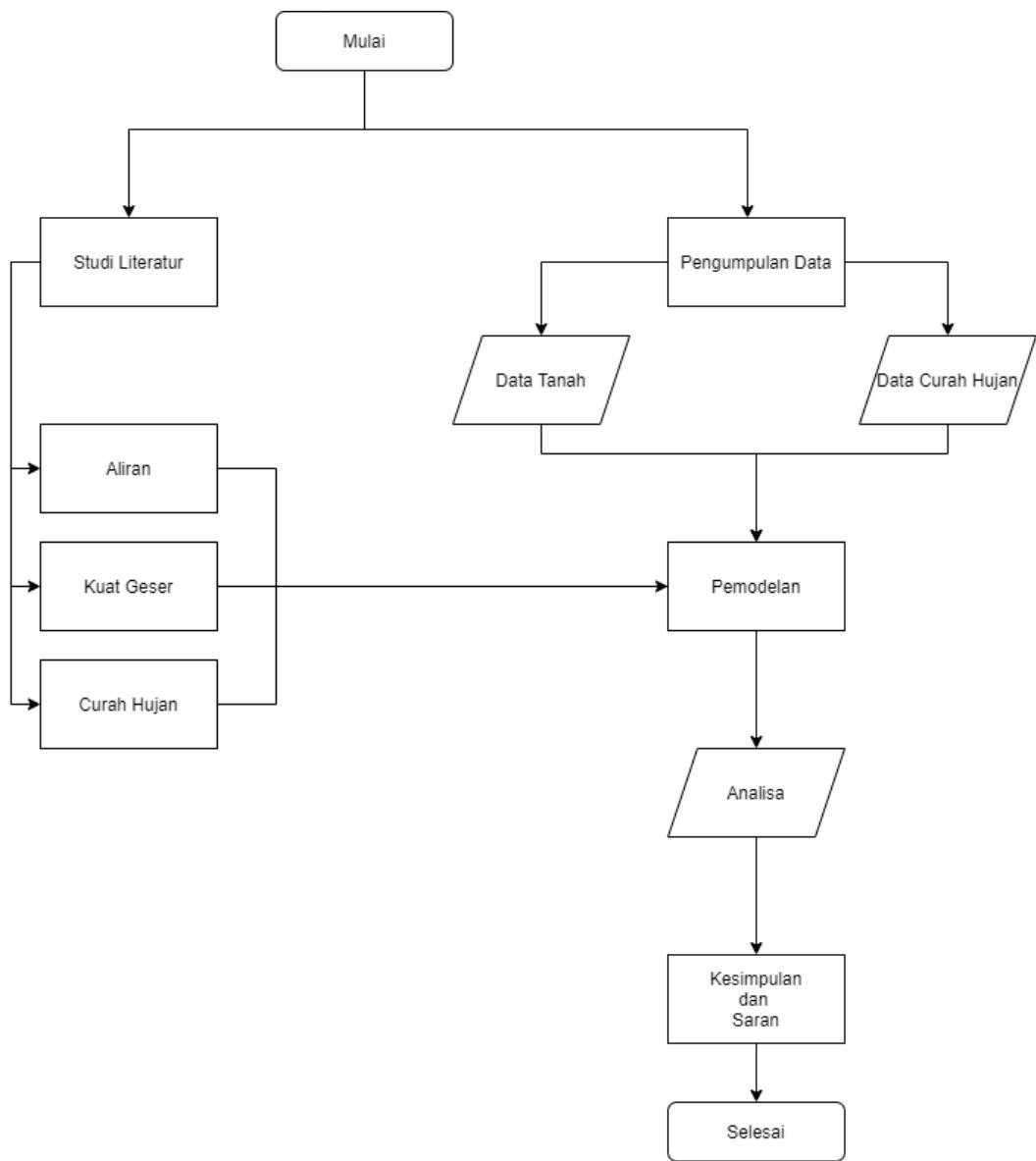
- $s$  = suction
- $y$  = dummy variable
- $S_r$  = saturation
- $S_L$  = suction at lower limit
- $S_U$  = suction at upper limit
- $S'_r$  = derivative of the degree of saturation
- $k_r$  = relative coefficient of permeability ( $= k / k_{saturated}$ )



Gambar 57. Metode statistik untuk permeabilitas *unsaturated* (Martin Wijaya, 2020)

### 3.5 Metode Pengolahan Data

Alur langkah yang akan dilakukan selama proses penelitian, secara garis besar dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 58, sebagai berikut:



Gambar 58. Diagram Alir Penelitian

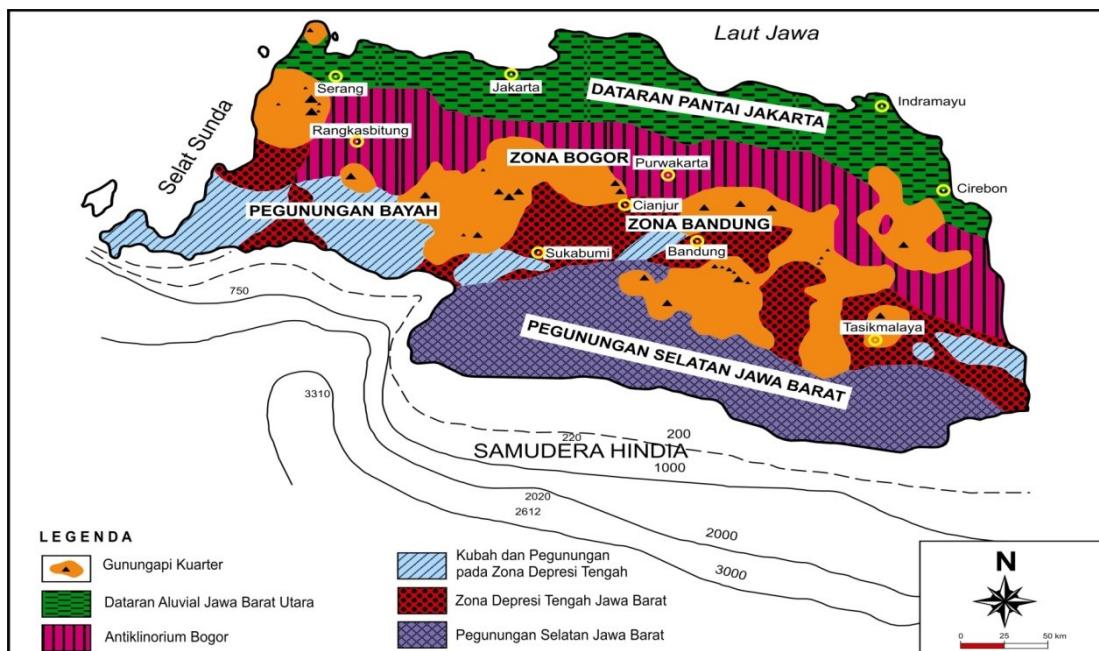
## BAB 4

### STUDI KASUS

#### 4.1 Kondisi Geologi

Secara fisiografi, Van Bemmelen (1949) membagi daerah Jawa Barat dalam empat zona, diantaranya:

1. Zona Dataran Pantai Jakarta (*Alluvial Plains of Northern West Java*)
2. Zona Bogor (*Bogor Anticlinorium*)
3. Zona Bandung (*Central Depression of West Java*)
4. Zona Pegunungan Selatan Jawa Barat (*Southern Mountains of West Java*)



Gambar 59. Peta Fisiografi Jawa Barat (sumber: Martojojo, 1984)

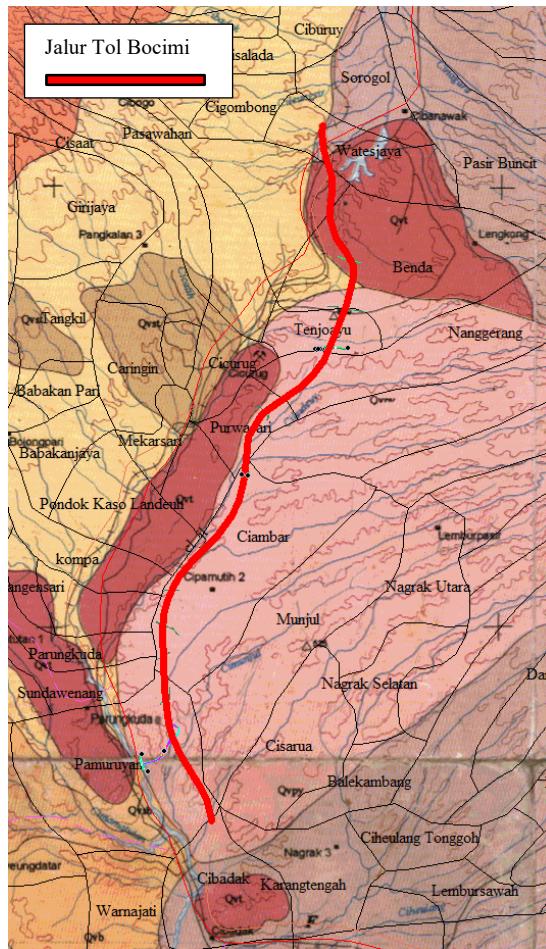
Deskripsi dari masing-masing zona menurut Van Bemmelen (1949) antara lain:

1. Zona Dataran Pantai Jakarta, daerah ini dimulai dari ujung barat Pulau Jawa, lalu memanjang ke timur mengikuti pantai utara Jawa Barat ke kota Cirebon yang umumnya mempunyai morfologi dataran, ditutupi oleh endapan sungai dan beberapa oleh endapan lahar gunung api muda.

2. Zona Bogor terletak disebelah selatan dari dataran Pantai Jakarta, memanjang hingga barat sampai timur melalui Kota Bogor, Purwakarta lalu menerus ke Bumiayu di Jawa Tengah dengan lebar maksimum sekitar 40 km. Zona Bogor ini umumnya memiliki morfologi perbukitan. Perbukitan ini memanjang dari barat sampai timur di sekitar Kota Bogor, sedangkan daerah bagian timur Purwakarta ini memblok ke selatan, membentuk suatu perlengkungan di sekitar willyah Kadipaten. Selain perbukitan beberapa intrusi membentuk morfologi lain yang berupa ketinggian terjal.
3. Zona Bandung merupakan depresi diantara gunung-gunung (*intermontage depression*). Zona ini melengkung dari Pelabuhan Ratu mengikuti Lembah Cimandiri menerus hingga ke timur melalui Kota Bandung dan berakhir di Segara Anakan di muara sungai Citanduy, dengan lebar antara 20-40 m. Dalam zona Kota Bandung, terdapat beberapa tinggian-tinggian yang terdiri dari endapan sedimen tua yang muncul di antara endapan volkanik.
4. Zona Pegunungan Selatan Jawa Barat. Pada batas zona ini dengan zona Bandung pada beberapa tempat sangat mudah diketahui, misalnya Lembah Cimandiri. Di lembah ini batas tersebut merupakan perbedaan morfologi yang sangat mencolok dari perbukitan bergelombang yang langsung berbatasan dengan Dataran Tinggi Pegunungan Selatan.

Untuk lokasi jalan Tol Bocimi Seksi 2 yang menghubungkan Cigombong dan Cibadak melintas pada area fisiografi Zona Bogor. Berdasarkan peta geologi Gambar 60, formasi yang dilewati adalah *Qvpy* dan *Qvt*. Dengan melihat Gambar 61 yang dibuat oleh A. C Effendi, dkk pada tahun 1998, dapat dilihat stratigrafi dominan untuk umur batuan adalah kuarter. Kesimpulan berdasarkan ketiga gambar tersebut adalah sudah sesuai bahwa yang berada diarea tersebut adalah material vulkanik dan alluvium.

Formasi *Qvpy* adalah batuan yang terbentuk pada umur kuarter terbentuk dari vulkanik gunung Pangrango usia muda atau endapan lahar lebih muda bersusun andesit. Untuk *Qvt* batuan yang terbentuk pada umur kuarter terbentuk dari vulkanik gunung Pangrango tufa atau tufa berbatu apung.



Gambar 60. Peta Geologi Area Bogor (sumber: A.C. Effendi dkk, 1998), *superimpose* peta desa dan peta jalan

Age	NW Java Basin		Bogor Trough			Southern Mountains
	Sanggabuana	Rajamandala	Tambakan & volc.	Volcanic		
Quaternary	Alluvium	Voic. & alluvium	Not exposed			Volcanic
Pliocene	Cisubuh	Subang	Cilanang			Bentang
Miocene	Klapanunggal	Cantayan	Saguling	Not exposed		Bojonglopan
	Upper Cibulan	Jatiluhur	Citarum	Citarum		Jampang
	Baturaja	Not Exposed	Rajamandala	Rajamandala	Batusih	
Oligocene	Talangakar		Not exposed		Bayah	Bayah
Eocene	Jatibarang				Ciletuh	Ciemas
Pre-Tertiary	Meta-sediment Acid igneous				Melange	

Gambar 61. Stratigrafi Area Bogor (sumber: Sujanto dan Sumantri, 1977; Martodjojo, 2003; Suyono et al, 2005)

## **4.2 Karakteristik Tanah**

Kosong.

## **4.3 Analisa**

Kosong.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

**Kosong**

## **DAFTAR PUSTAKA**

(Placeholder1)

(Placeholder2)

## LAMPIRAN

contoh