

PROPOSAL PENELITIAN TESIS
PENDEKATAN MEKANIKA TANAH TAK JENUH
PADA KASUS KONSTRUKSI TIMBUNAN
JALAN DENGAN KADAR AIR TINGGI DAN
CURAH HUJAN TINGGI, STUDI KASUS
JALAN TOL BOCIMI STA 18+900



Oleh:
Lea Marsela
2016831010

Pembimbing 1:

Prof. Paulus P. Rahardjo, Ph.D

Pembimbing 2:

Dr. Rinda KarlinaSari Indrayana, MT

Kepada
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
KONSETRSI GEOTEKNIK
2021

ABSTRAK

ABSTRACT

PRAKATA

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
PRAKATA	iii
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN.....	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
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 Mekanika Tanah Tak Jenuh.....	5
2.1.1 Sejarah Singkat.....	5
2.1.2 Tak Jenuh dan Jenuh.....	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 Tanah Tak Jenuh	11
2.3.1 <i>Volume Change</i>	11
2.3.2 Kuat Geser	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 Konduktivitas hidraulik	21
2.7.1 <i>Constant Head</i>	23
2.7.2 <i>Constant Flow Method</i>	24
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 Tak Jenuh.....	46
3.1.1 Aliran Satu Dimensi pada Tanah Tak Jenuh	46
3.1.2 Solusi Persamaan Diferensial Parsial Aliran Satu Dimensi	49
3.1.3 Aliran Dua Dimensi Pada Tanah Tak Jenuh	52
3.1.4 Solusi Persamaan Diferensial Parsial Aliran Dua Dimensi.....	54
3.2 Metode Elemen Hingga.....	56
3.5.1 Model Elemen.....	57
3.5.2 Fungsi Pendekatan.....	58
3.5.3 Hubungan Gradien, <i>Suction</i> dan Kecepatan Aliran.....	59
3.5.4 Menentukan Persamaan Elemen dan Solusi Besaran Primer ..	59
3.5.5 Besaran Sekunder	61
3.3 Fungsi Estimasi SWCC	61
3.4 Fungsi Estimasi Konduktivitas hidraulik- <i>Suction</i>	63
3.5 Program Geostudio.....	64
3.5.1 Set Geometri Layar.....	66
3.5.2 Input Parameter.....	67
3.5.3 Kondisi Batas.....	68
3.5.4 Pemodelan	70
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	71
DAFTAR PUSTAKA.....	73
LAMPIRAN	78

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 1. FASE TANAH TAK JENUH (D. G. FREDLUND AND RAHARDJO 1993).....	7
GAMBAR 2. KATEGORI MEKANIKA TANAH (D. G. FREDLUND AND RAHARDJO 1993)	
.....	8
GAMBAR 3. KONSTITUTIF ANGKA PORI UNTUK TANAH TAK JENUH (D. G. FREDLUND AND RAHARDJO 1993).....	11
GAMBAR 4. MOHR-COLOUMB FAILURE ENVELOPE UNTUK TANAH TAK JENUH (D. G. FREDLUND AND RAHARDJO 1993)	12
GAMBAR 5. TOTAL SUCTION DAN KOMPONEN MATRIC SUCTION DAN OSMOTIC SUCTION (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012).....	13
GAMBAR 6. MODEL FISIK DAN FENOMENA KAPILARITAS (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012)	14
GAMBAR 7. (A) OSMOTIC SUCTION TERHADAP MOLARITAS NaCl DAN (B) OSMOTIC SUCTION TERHADAP KONSENTRASI GARAM PER LITER NaCl (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012)	16
GAMBAR 8. ALAT JET-FILL (SOILMOISTURE EQUIPMENT CORPORATION 1985)....	17
GAMBAR 9. ALAT CONVENTIONAL TENSIOMETER (SUMBER: D. G. FREDLUND, H. HARIANTO, 2001)	17
GAMBAR 10. ALAT SMALL TIP TENSIOMETER (SOILMOISTURE EQUIPMENT CORPORATION 1985).....	18
GAMBAR 11. THERMAL CONDUCTIVITY SENSOR (PHENE, HOFFMAN, AND RAWLINS 1971)	18
GAMBAR 12. CARA KERJA PIRINGAN KERAMIK/HAEC (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012).....	19
GAMBAR 13. FASE PADA ELEMEN TANAH (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012)	19
GAMBAR 14. KURVA HUBUNGAN $w-\theta$ DENGAN SATURASI (SUMBER: BERDASARKAN PERSAMAAN Eq. 12)	20

GAMBAR 15. CONTOH SWCC UNTUK BEBERAPA TANAH BELANDA (KOOREVAAR, MENELIK, AND DIRKSEN 1983).....	21
GAMBAR 16. CONTOH SISTEM PENGUKURAN KONDUKTIVITAS HIDRAULIK TAK JENUH DENGAN METODE CONSTANT HEAD (LU AND J. LIKOS 2004)	23
GAMBAR 17. HASIL UJI DAN ANALISA CONSTANT HEAD HYDRAULIC CONDUCTIVITY (LU AND J. LIKOS 2004).....	24
GAMBAR 18. FUNGSI KONDUKTIVITAS HIDRAULIK UNTUK MATERIAL (LU AND J. LIKOS 2004).....	24
GAMBAR 19. SKEMA UJI CONSTANT FLOW (OLSEN ET AL. 1994).....	25
GAMBAR 20. KURVA DATA HASIL UJI METODE CONSTANT FLOW (LU AND J. LIKOS 2004)	25
GAMBAR 21. KURVA HASIL KONDUKTIVITAS HIDRAULIK HASIL PENGUJIAN CONSTANT FLOW (LU AND J. LIKOS 2004)	26
GAMBAR 22. SKEMA CENTRIFUGE (J R NIMMO, RUBIN, AND HAMMERMEISTER 1987; JOHN R NIMMO, AKSTIN, AND MELLO 1992)	26
GAMBAR 23. KURVA KONDUKTIVITAS HIDRAULIK-VWC UJI CENTRIFUGE UNTUK PASIR OAKLEY (J R NIMMO, RUBIN, AND HAMMERMEISTER 1987; JOHN R NIMMO, AKSTIN, AND MELLO 1992).....	27
GAMBAR 24. KURVA SWCC HASIL UJI CENTRIFUGE (J R NIMMO, RUBIN, AND HAMMERMEISTER 1987; JOHN R NIMMO, AKSTIN, AND MELLO 1992). 28	28
GAMBAR 25. FUNGSI KONDUKTIVITAS HIDRAULIK-VWC UJI CENTRIFUGE DENGAN VARIASI KEDALAMAN (ASTM D6527 2001).....	28
GAMBAR 26. ILUSTRASI UJI HORIZONTAL INFILTRATION (KLUTE AND DIRKSEN 1986)	29
GAMBAR 27. KURVA BOLTZMANN VARIABLE-VWC (KLUTE AND DIRKSEN 1986)31	31
GAMBAR 28. PLOT DATA BOLTZMAN VARIABLE-VWC DARI UJI HORIZONTAL INFILTRATION (LU AND J. LIKOS 2004)	32
GAMBAR 29. KURVA VWC-HYDRAULIC DIFFUSIVITY DARI DATA UJI TABEL 5 (LU AND J. LIKOS 2004).....	32
GAMBAR 30. SKEMA METODE OUTFLOW (BENSON AND GRIBB 1997).....	33
GAMBAR 31. PRESSURE PLATE EXTRACTOR (TINJUM, BENSON, AND BLOTH 1997) 34	34

GAMBAR 32. PERBANDINGAN DATA KONDUKTIVITAS HIDRAULIK DENGAN UJI STEADY STATE DAN MULTI-STEP (GARDNER 1956)	34
GAMBAR 33. KONDUKTIVITAS HIDRAULIK DARI UJI MULTI-STEP OUTFLOW (KUNZE AND KIRKHAM 1962)	35
GAMBAR 34. KURVA DIFFUSIVITY DIUKUR DENGAN ONE-STEP OUTFLOW (PASSIOURA 1976)	35
GAMBAR 35. KURVA KONDUKTIVITAS HIDRAULIK DARI PASIR DUNE DENGAN UJI ONE-STEP OUTFLOW DAN HORIZONTAL INFILTRATION METHOD (STEPHENS 1992)	35
GAMBAR 36. ILUSTRASI METODE OUTFLOW DENGAN TEMPE PRESSURE CELL (T. W. GREEN ET AL. 1998).....	36
GAMBAR 37. SKEMA UJI MULTI-STEP DENGAN MODIFIKASI TEMPE PRESSURE CELL (ECHING, HOPMANS, AND WENDROTH 1994B)	37
GAMBAR 38. KURVA KONDUKTIVITAS HIDRAULIK (A) YOLO SILT LOAM (B) PANOCHE LOAM (C) HANFORD SANDY LOAM (D) OSO FLACO FINE SAND (ECHING, HOPMANS, AND WENDROTH 1994B)	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 (SALEHZADEH AND DEMOND 1994).....	38
GAMBAR 41. SKEMA KONDISI LOKASI UJI INSTANTANEOUS PROFILE METHOD (BENSON AND 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 (LU AND J. LIKOS 2004).....	40
GAMBAR 44. HYSTERESIS DALAM KONDUKTIVITAS HIDRAULIK TAK JENUH UNTUK WENATCHEE SILTY CLAY (MEERDINK, BENSON, AND KHIRE 1996).....	41
GAMBAR 45. DIAGRAM PROSES TERBENTUKNYA TANAH (WESLEY 2009)	42
GAMBAR 46. CONTOH HASIL UJI KOMPAKSI (WESLEY 2009)	43

GAMBAR 47. ILUSTRASI KONDISI HIDROSTATIK DAN ALIRAN STEADY STATE PADA ZONA TEKANAN AIR PORI NEGATIF (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012)	46
GAMBAR 48. KONDISI ALIRAN SATU DIMENSI PADA ELEMEN TANAH (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012)	47
GAMBAR 49. ILUSTRASI BEDA HINGGA (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012)	49
GAMBAR 50. PEMODELAN KONDISI STEADY STATE DAN SYARAT BATAS (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012)	51
GAMBAR 51. KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI PADA ELEMEN TANAH (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012)	52
GAMBAR 52. (A) KONDISI HETEROGENEOUS, ISOTROPIK (B) KONDISI HETEROGENEOUS, ANISOTROPIC (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012)	52
GAMBAR 53. TITIK NODAL METODE BEDA HINGGA (MAHMUD 1996).....	56
GAMBAR 54. PASCAL'S TRIANGLE	58
GAMBAR 55. CONTOH GRAFIK SWCC (D G FREDLUND 2019)	62
GAMBAR 56. TIPIKAL KURVA SWCC DAN KONDUKTIVITAS HIDRAULIK UNTUK TANAH PASIR DAN LANAU KELEMPUNGAN (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012).....	63
GAMBAR 57. METODE STATISTIK UNTUK PERMEABILITAS TAK JENUH (D G FREDLUND, XING, AND HUANG 1994)	64
GAMBAR 58. TAMPILAN AWAL PROGRAM GEOSTUDIO.....	65
GAMBAR 59. DAFTAR PROGRAM DARI GEOSTUDIO	65
GAMBAR 60. PENGATURAN SKALA	66
GAMBAR 61. PENGATURAN TAMPILAN.....	66
GAMBAR 62. TAMPILAN UNTUK MEMILIH INPUT PARAMETER VWC	67
GAMBAR 63. INPUT PARAMETER UNTUK SWCC	67
GAMBAR 64. TAMPILAN UNTUK MEMILIH INPUT KONDUKTIVITAS HIDRAULIK	68
GAMBAR 65. INPUT PARAMETER KONDUKTIVITAS HIDRAULIK	68
GAMBAR 66. TAMPILAN UNTUK MEMILIH FUNGSI KONDISI BATAS	69

GAMBAR 67. TAMPILAN MEMASUKAN FUNGSI KONDISI BATAS	69
GAMBAR 68. TAMPILAN MENENTUKAN JENIS KONDISI BATAS.....	70
GAMBAR 69. TAMPILAN MEMASUKAN KOORDINAT TITIK NODAL.....	70
GAMBAR 70. TAMPILAN MENGGAMBUNGKAN TITIK NODAL MENJADI GARIS.....	71
GAMBAR 71. TAMPILAN MENENTUKAN KLUSTER DARI DATA TITIK NODAL.....	71
GAMBAR 72. DIAGRAM ALIR PENELITIAN	72
GAMBAR 73. PERKIRAAN WAKTU PELAKSANAAN PENELITIAN	72

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

DAFTAR TABEL

TABEL 1. PERBEDAAN JENUH DENGAN TAK JENUH (SUMBER: HTTPS://BLOGS.NTU.EDU.SG/USMSUL/UNSATURATED-SOIL-MECHANICS/)(RAHARDJO 2021).....	6
TABEL 2. KOMBINASI STRESS STATE VARIABLES (D. G. FREDLUND AND RAHARDJO 1993)	10
TABEL 3. CONTOH KADAR GARAM DALAM AIR (D G FREDLUND, RAHARDJO, AND FREDLUND 2012)	15
TABEL 4. JENIS CARA PENGUKURAN SUCTION (PAN, QING, AND LI 2010).....	16
TABEL 5. DATA HASIL ANALISA UJI HORIZONTAL INFILTRATION (NIELSEN ET AL. 1964)	31
TABEL 6. DAFTAR SOLUSI ANALITIK UNTUK PERSAMAAN LAPLACE.....	54
TABEL 7. DAFTAR SOLUSI PENDEKATAN UNTUK PERSAMAAN LAPLACE	54
TABEL 8. JENIS ELEMEN (BATHE 2006)	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 tak jenuh, didalam teori tersebut didapatkan hubungan parameter konduktivitas hidraulik terhadap *suction* serta hubungan parameter *volumetric water content* terhadap *suction*.

Kemajuan dari mekanika tanah tak jenuh juga sudah bisa dikombinasikan dengan metode elemen hingga. 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. Memperoleh informasi mengenai karakteristik timbunan dengan kondisi curah hujan yang ada.
2. Melakukan analisa kondisi timbunan secara khusus pada lokasi STA 18+900.
3. Melakukan kajian kondisi curah hujan terhadap efek infiltrasi dan rembesan.
4. Mempelajari efek infiltrasi terhadap kondisi timbunan multi lapis material.
5. Mempelajari perilaku kurva VWC-*Suction* dan *Hydraulic Conductivity-Suction* dari material tersebut.

6. Melakukan analisa kurva *VWC-Suction* dan *Hydraulic Conductivity-Suction*.

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Memastikan keamanan timbunan jalan terhadap dampak hujan setempat berdasarkan pendekatan mekanika tanah tak jenuh.
2. Memberikan kontribusi terhadap permasalahan geoteknik tanah timbunan dari perspektif baru.

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+900, 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 mekanika tanah tak jenuh, pembahasan mengenai *soil water characteristic curve*, konduktivitas hidraulik, *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 metodologi 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 Mekanika Tanah Tak Jenuh

2.1.1 Sejarah Singkat

Sejarah singkat perkembangan mekanika tanah tak jenuh 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 mekanika tanah jenuh, dipertimbangkannya mekanika tanah tak jenuh, ada dua paper yang ditampilkan berkenaan dengan kapilaritas tanah oleh Ostahev (1936) dan diusulkannya dua alat untuk mengukur tekanan kapiler dan ketinggian kapiler dari air pada tanah oleh Boulichev (1936).

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

Ditempat lain yaitu di Imperial College, London, dilakukan penelitian mengenai mekanika tanah tak jenuh yang konteksnya mirip dengan tanah jenuh. Para peneliti tersebut diantaranya: Bishop, Alpan, Blight dan Donald (1960), dan Black, Croney (1957).

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

2.1.2 Tak Jenuh dan Jenuh

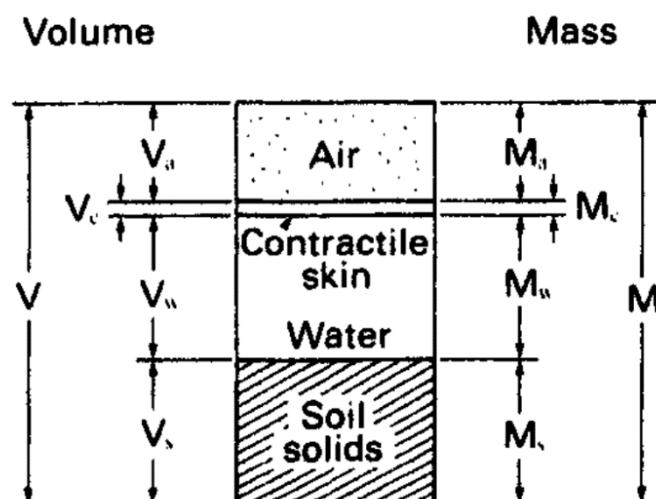
Pada umumnya, pemodelan material dengan perilaku yang tidak konsisten dan mempunyai fase lebih dari dua akan sulit dimodelkan dan tidak praktis secara teknis. Perbedaan mendasar antara tanah jenuh dan tanah tak jenuh adalah pada perilaku dasar. Untuk tanah tak jenuh mempunyai lebih dari dua fase dan 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 jenuh dengan tak jenuh (sumber: <https://blogs.ntu.edu.sg/usmsul/unsaturated-soil-mechanics/>)(Rahardjo 2021)

Principle or equation	Saturated soil	Unsaturated soil
Stress state variables	$(\sigma - u_w)$	(3) $(\sigma - u_a)$ and $(u_a - u_w)$ (4)
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)	$v_w = -k_w (\partial h_w / \partial y)$ $h_w = y + (u_w / \rho_w g)$	(7) $v_w = -k_w (u_a - u_w) (\partial h_w / \partial y)$ $h_w = y + (u_w / \rho_w g)$ (8)
Unsteady state seepage	$k_x \left(\frac{\partial^2 h_w}{\partial x^2} \right) + k_y \left(\frac{\partial^2 h_w}{\partial y^2} \right) = m_1 \rho_w g \frac{\partial h_w}{\partial t}$	(9) $\frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) = m_2^w \rho_w g \frac{\partial h_w}{\partial t}$ (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) $F_m = \frac{\sum \left[c' f R + \left\{ N - u_w \beta \frac{\tan\phi^b}{\tan\phi'} \right\} R \tan\phi' \right]}{\sum Wx - \sum Nf}$ (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)

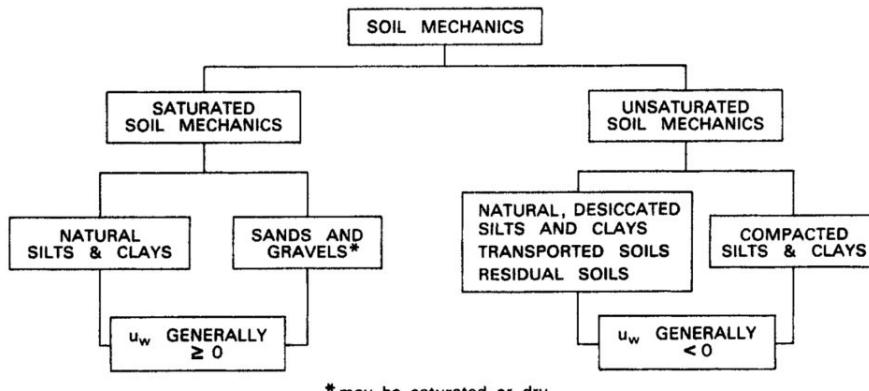
Adanya proses pekerjaan galian dan timbunan pada material tanah akan menyebabkan material tanah berada pada kondisi tak jenuh. Kondisi ini yang menyebabkan ketidakakuratan bila hanya memodelkan material menjadi tanah jenuh.

Tanah tak jenuh 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 kontraktif 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 tanah tak jenuh (D. G. Fredlund and Rahardjo 1993)

Cuaca memainkan peranan penting dalam pembentukan kondisi material tanah apakah jenuh atau tak jenuh 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 mekanika tanah (D. G. Fredlund and Rahardjo 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

Terzaghi (1936) memberikan gambaran bahwa *stress state variable* menentukan perilaku daripada tanah jenuh. 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 tanah jenuh 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 tanah tak jenuh, telah banyak diusulkan oleh para peneliti untuk menghitung besanya tegangan efektif antara lain Croney (1958) 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:

χ_m	= effective stress parameter for matric suction
h_m	= matric suction
χ_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 tanah tak jenuh serta memasukan beberapa kemungkinan kombinasi yang dapat digunakan, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kombinasi *Stress State Variables* (D. G. Fredlund and Rahardjo 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, σ	$(\sigma - u_a)$ and $(\sigma - u_w)$

Perkembangan selanjutnya, penggunaan konsep tegangan efektif untuk tanah tak jenuh menggunakan persamaan Bishop (1959) dengan menggantikan parameter χ (chi) dengan parameter S (derajat saturasi).

2.3 Hukum Konstitutif Untuk Tanah Tak Jenuh

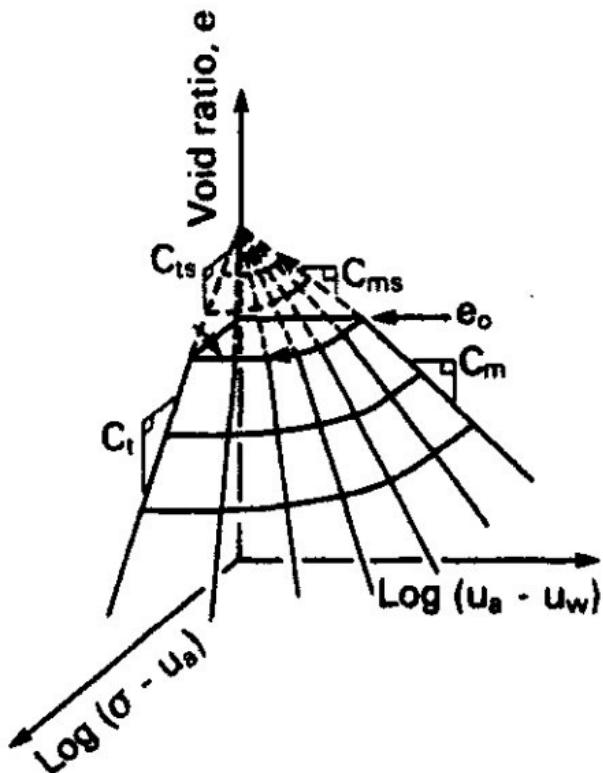
2.3.1 Volume Change

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 tanah tak jenuh (D. G. Fredlund and Rahardjo 1993)

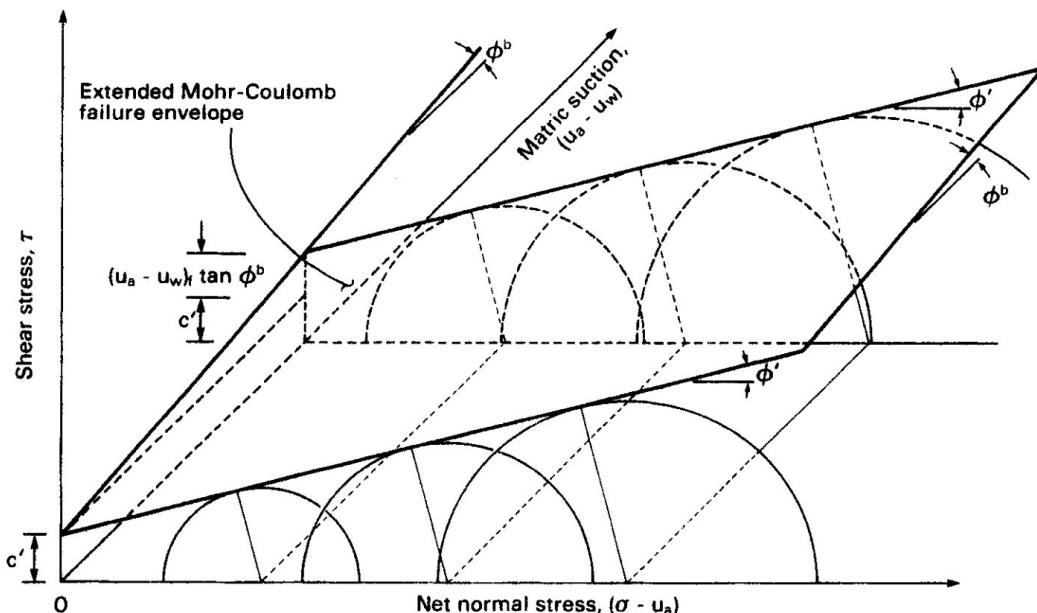
2.3.2 Kuat Geser

Bentuk linear persamaan tegangan geser untuk tanah tak jenuh dirumuskan oleh Fredlund et al (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
- ϕ^b = angle indicating the rate of increase in shear strength with respect to a change in matric suction
- ϕ' = 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 tanah tak jenuh (D. G. Fredlund and Rahardjo 1993)

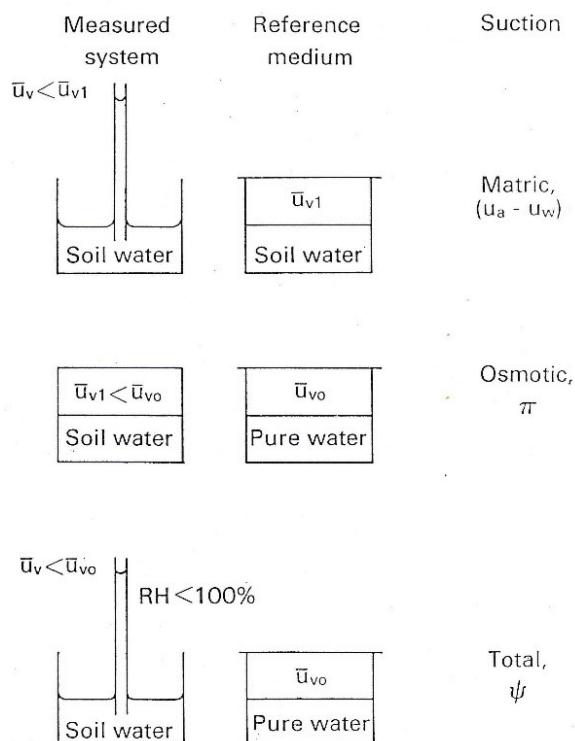
2.4 Suction

Suction dalam istilah lain disebut juga tekanan air pori negatif 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 (D G Fredlund, Rahardjo, and 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:

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

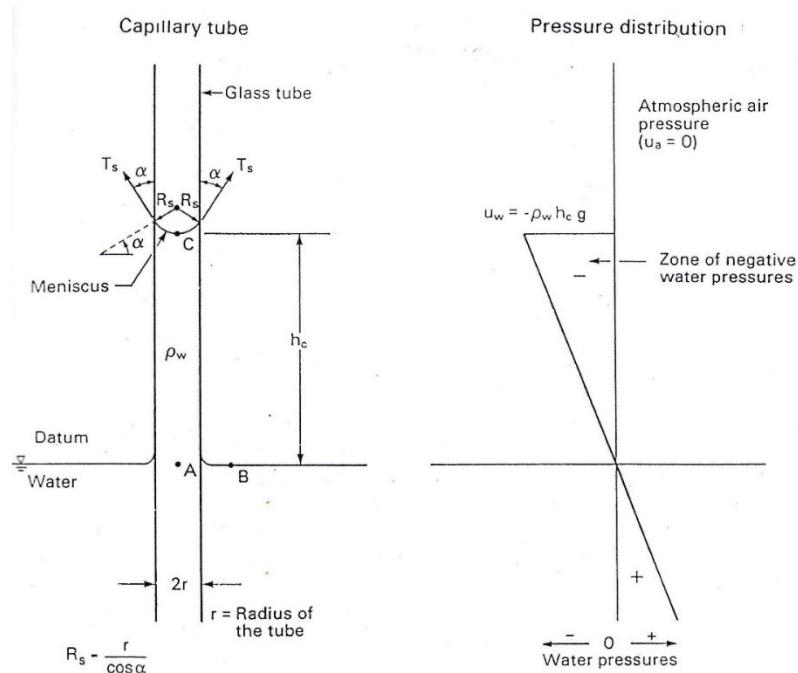
Eq. 7

dimana:

- $u_a - u_w$ = *matric suction*, kPa,
- u_a = *pore-air pressure*, kPa,
- u_w = *pore-water pressure*, kPa,
- π = *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 (θ) dan berbanding terbalik dengan diameter (d).

$$u_a - u_w = \frac{4T_s \cos\alpha}{d} \quad \text{Eq. 8}$$



Gambar 6. Model fisik dan fenomena kapilaritas (D G Fredlund, Rahardjo, and Fredlund 2012)

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 (D G Fredlund, Rahardjo, and Fredlund 2012)

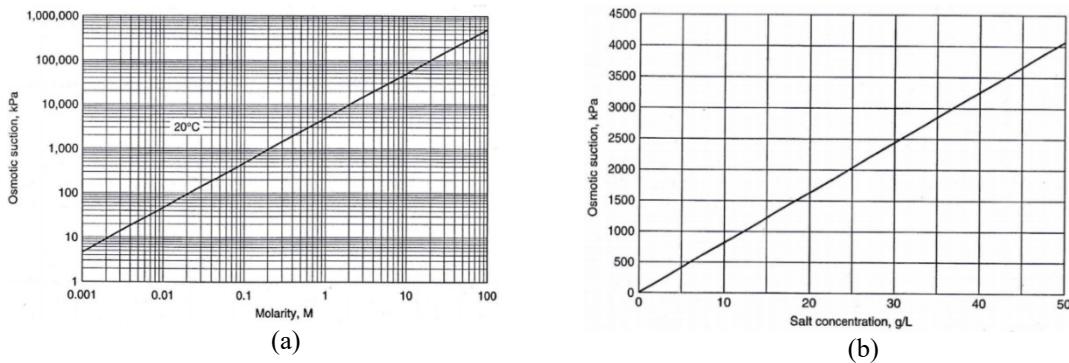
Water Source	Concen- tration, s (g/g), %	Concen- tration, s_s (g/L)	Electrical Conductivity (mmhos/cm)
Distilled water	0.0	0.0	5.5×10^{-8}
Freshwater	0.02	0.2	0.005 – 0.05
Ocean water	3.5	36	48
Semisaline water	8.0	88	
Potash brine	20	250	
Dead-sea water	22	270	

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:

- π = *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 (D G Fredlund, Rahardjo, and Fredlund 2012)

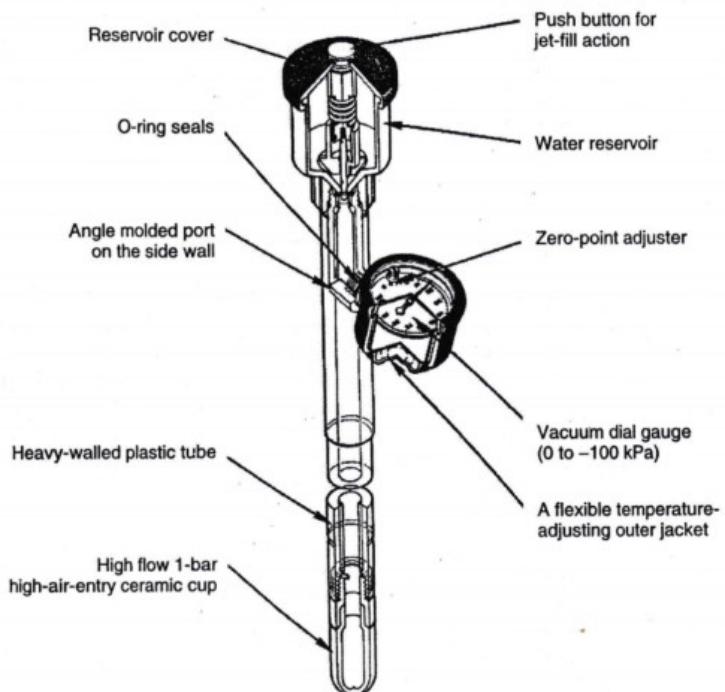
2.4.1 Mengukur *Matric Suction*

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.

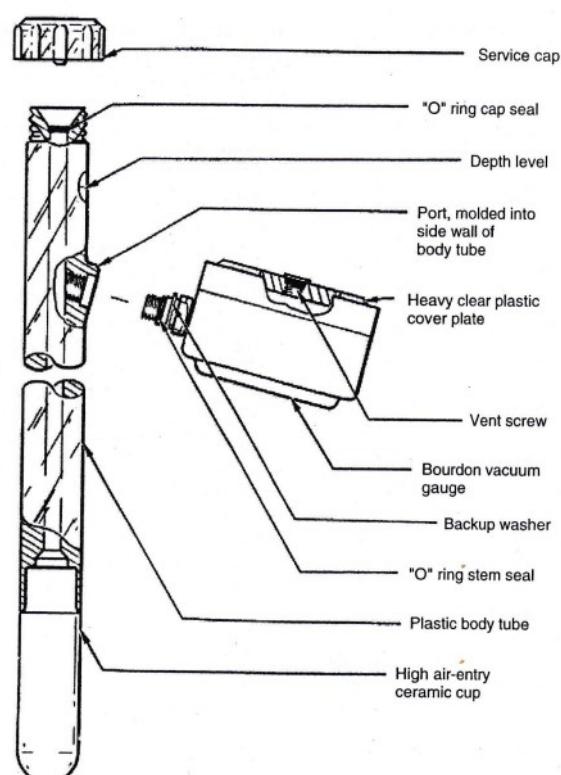
Tabel 4. Jenis cara pengukuran *suction* (Pan, Qing, and Li 2010)

		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

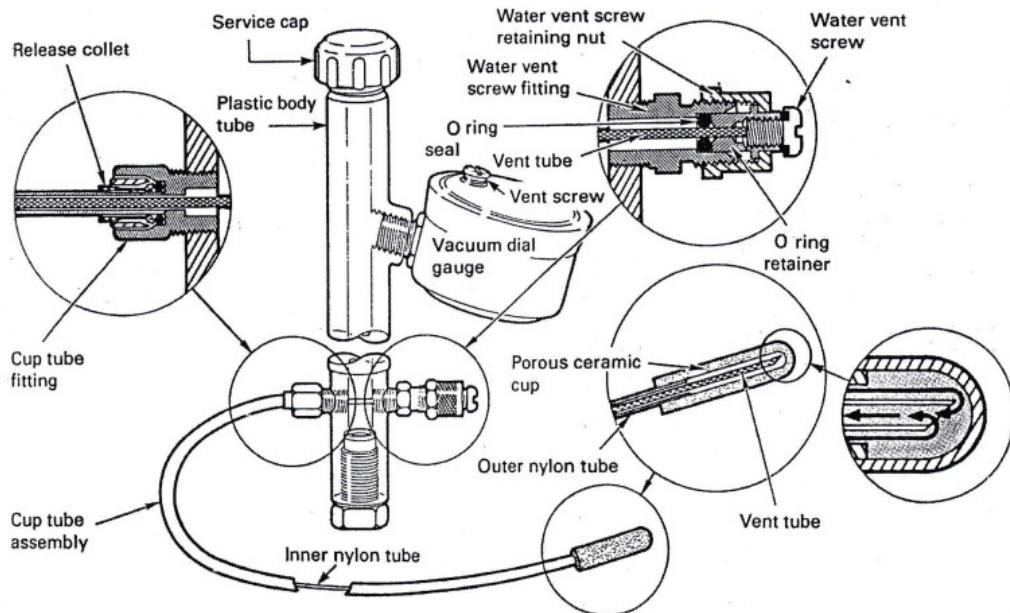
Beberapa ilustrasi peralatan yang digunakan untuk mengukur *suction*:



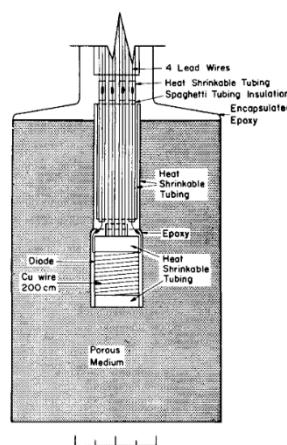
Gambar 8. Alat *Jet-fill* (Soilmoisture Equipment Corporation 1985)



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



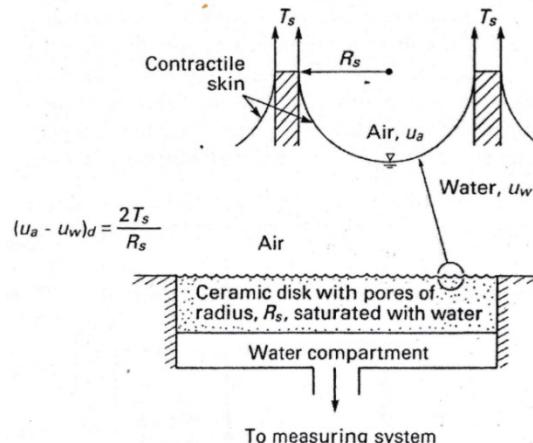
Gambar 10. Alat *Small tip tensiometer* (Soilmoisture Equipment Corporation 1985)



Gambar 11. *Thermal conductivity sensor* (Phene, Hoffman, and Rawlins 1971)

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 (D G Fredlund, Rahardjo, and Fredlund 2012)

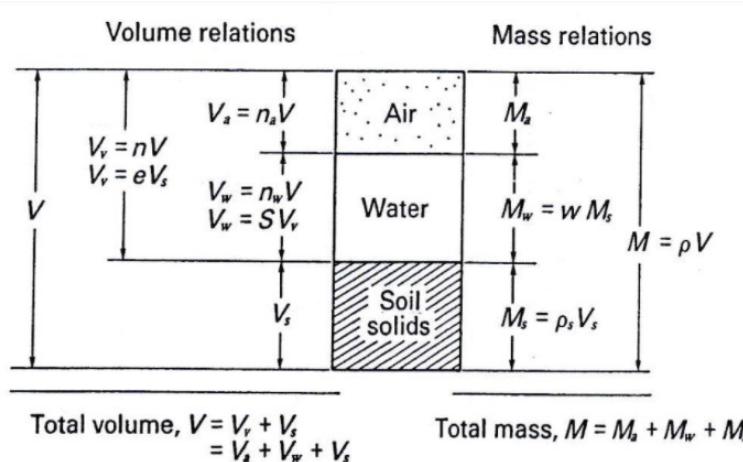
2.5 Volumetric Water Content

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 ditulis dalam persamaan yang mengandung nilai dari porositas (n) dan saturasi (S).

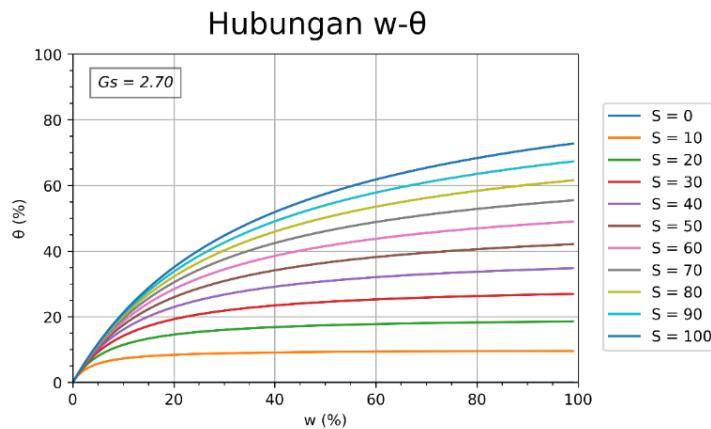
$$\theta = S \cdot n \quad \text{Eq. 11}$$



Gambar 13. Fase pada elemen tanah (D G Fredlund, Rahardjo, and 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:

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

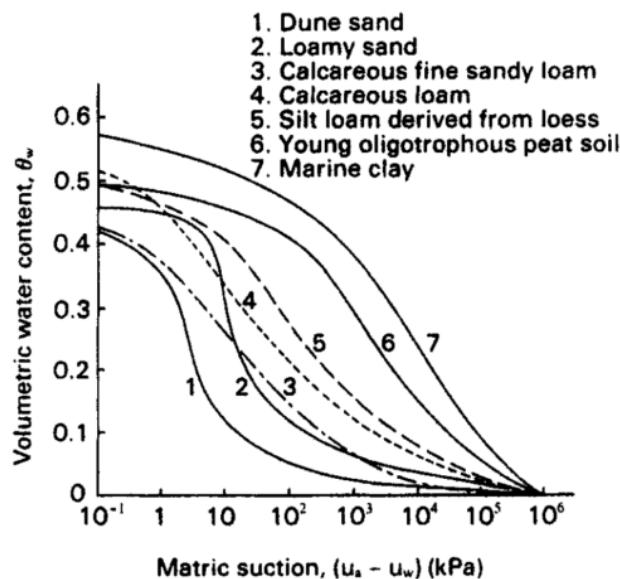


Gambar 14. Kurva hubungan $w-\theta$ dengan Saturasi (sumber: berdasarkan persamaan *Eq. 12*)

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 (Koorevaar, Menelik, and Dirksen 1983)

2.7 Konduktivitas hidraulik

Isitlah yang dipakai adalah konduktifitas 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 konduktifitas aspek yang diperhatikan adalah berat isi material, gravitasi dan *dynamic viscosity*. Satuan untuk permeabilitas adalah satuan panjang kuadrat (m^2) dan untuk konduktifitas dalam satuan panjang dibagi dengan waktu (m/s). Hubungan antara permeabilitas dan konduktifitas ada pada persamaan Eq. 13.

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

dimana:

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

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 gradien hidraulik yang tetap untuk setiap besaran *matric suction* yang spesifik. Dengan kata lain, pengukuran dilakukan pada setiap besaran *matric suction* yang ditentukan. Selanjutnya konduktivitas hidraulik dihitung berdasarkan hukum Darcy. Kebalikan dengan *steady state*, pada *unsteady state*, konduktivitas hidraulik 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 konduktivitas hidraulik yang masuk kedalam kategori *steady state*:

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

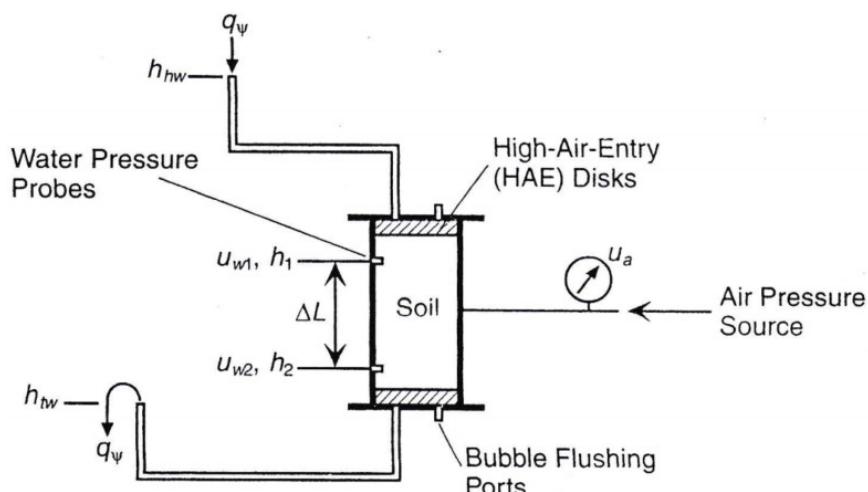
Untuk metode yang masuk kedalam kategori *unsteady state* adalah:

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

2.7.1 Constant Head

Salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk mengukur konduktivitas hidraulik tak jenuh 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 konduktivitas hidraulik tak jenuh dengan metode *constant head* (Lu and 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:

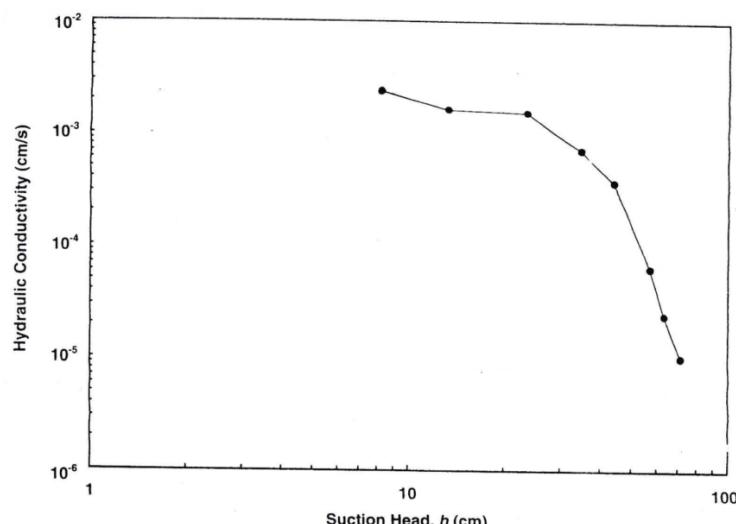
- Q = *volumetric flow rate*, cm^3/s
- A = *area of the specimen*, cm^2
- ΔL = *hydraulic gradient*, cm
- Δh_s = *the internal head loss*, cm

Sebagai contoh, data yang dihasilkan dari pengujian konduktivitas hidraulik seperti dapat terlihat pada Gambar 17.

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

Gambar 17. Hasil uji dan analisa *constant head hydraulic conductivity* (Lu and J. Likos 2004)

Secara visual akan terlihat seperti Gambar 18.



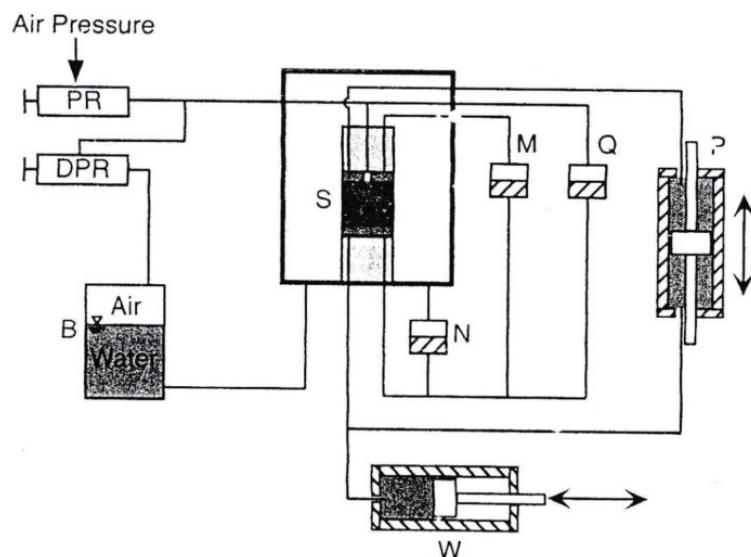
Gambar 18. Fungsi konduktivitas hidraulik untuk material (Lu and J. Likos 2004)

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

2.7.2 Constant Flow Method

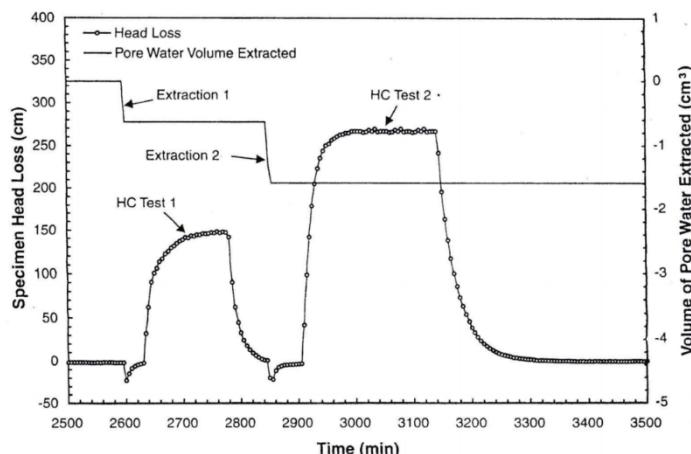
Metode *constant flow* hampir serupa dengan metode dari *constant head* yang dilaksanakan pengujinya di laboratorium. Hanya saja *flow rate* tidak diukur tetapi

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.

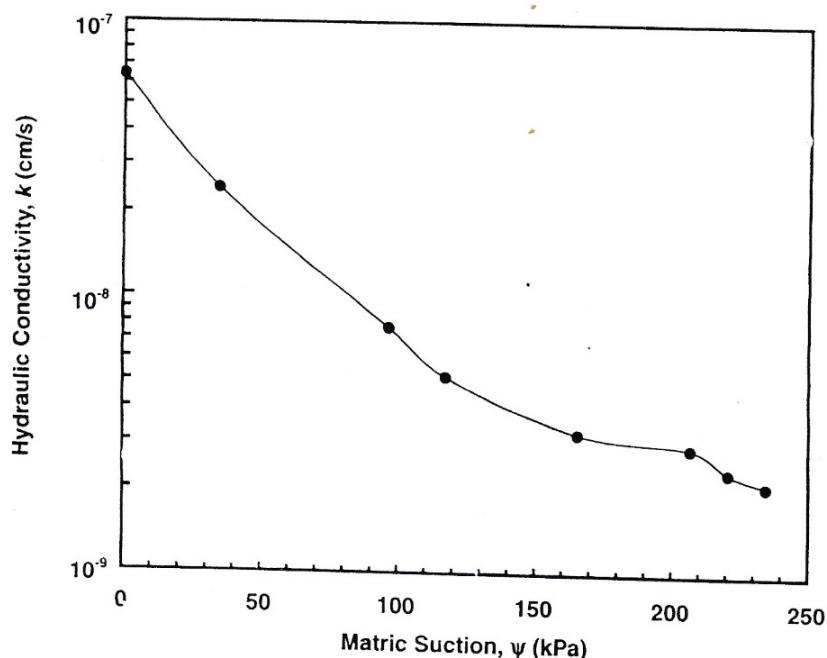


Gambar 19. Skema uji *constant flow* (Olsen et al. 1994)

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



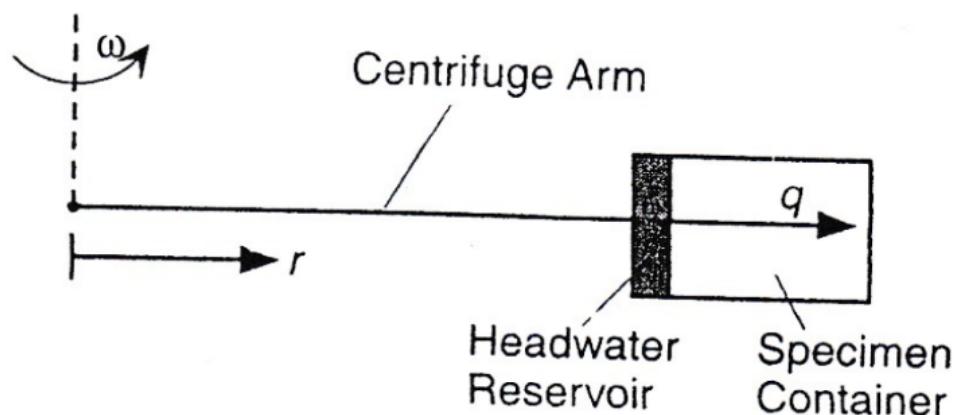
Gambar 20. Kurva data hasil uji metode *constant flow* (Lu and J. Likos 2004)



Gambar 21. Kurva hasil konduktivitas hidraulik hasil pengujian *constant flow* (Lu and J. Likos 2004)

2.7.3 Centrifuge

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 horizontal pada kecepatan sudut (ω). Gaya gravitasi *centrifuge* dengan jarak sejauh r dari titik sumbu sampai dengan container yang berisi sampel adalah sebesar $\omega^2 r$.



Gambar 22. Skema *centrifuge* (J R Nimmo, Rubin, and Hammermeister 1987; John R Nimmo, Akstin, and Mello 1992)

Diasumsikan besarnya gravitasi bumi diabaikan bila dibandingkan dengan gravitasi *centrifuge*, lalu dengan sendirinya air akan mengalir menuju dan melewati sampel dengan kondisi satu dimensi.

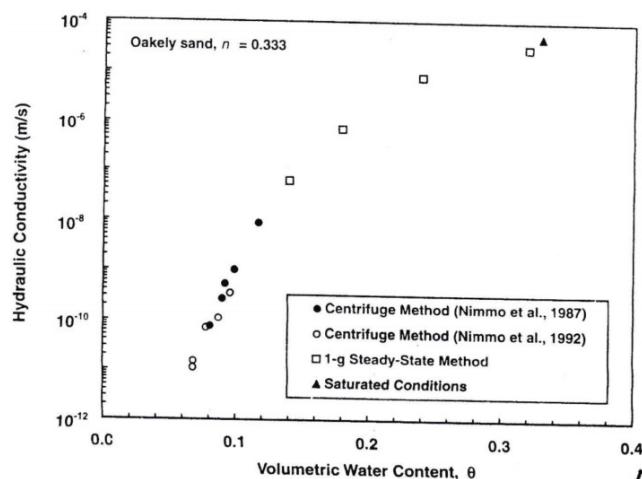
Besarnya konduktivitas hidraulik adalah:

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

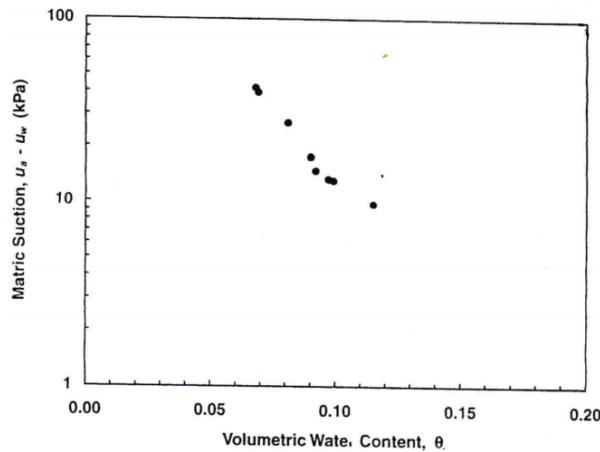
dimana:

- q = flow rate, cm^3/s
- r = radius, cm
- ρ_w = density of fluid, gr/cm^3
- ω = angular velocity, s^{-1}

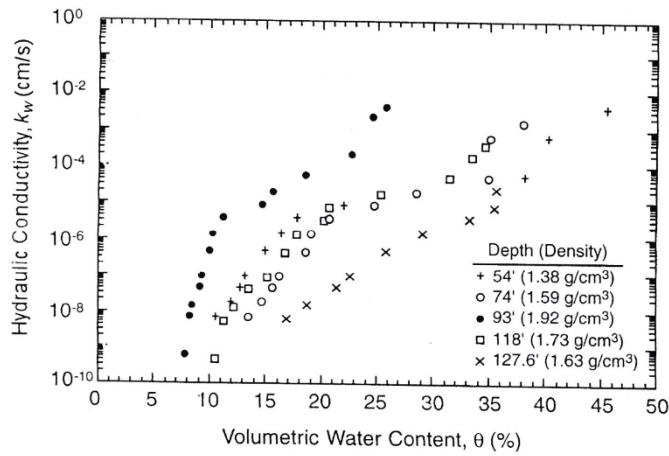
beberapa hasil pengujian dari metode *centrifuge* didapat dari beberapa sumber, dapat dilihat pada Gambar 23 untuk hasil pengujian pada material pasir Oakley oleh Nimmo et al (1987)(1992). Gambar 24 memperlihatkan kurva SWCC pada material yang sama dengan pengukuran dilakukan dengan metode *tensiometer*.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



Gambar 23. Kurva konduktivitas hidraulik-VWC uji *centrifuge* untuk pasir Oakley (J R Nimmo, Rubin, and Hammermeister 1987; John R Nimmo, Akstin, and Mello 1992)



Gambar 24. Kurva SWCC hasil uji *centrifuge* (J R Nimmo, Rubin, and Hammermeister 1987; John R Nimmo, Akstin, and Mello 1992)



Gambar 25. Fungsi konduktivitas hidraulik-VWC uji *centrifuge* dengan variasi kedalaman (ASTM D6527 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 konduktivitas hidraulik terhadap *specific moisture capacity* ($C(\theta)$).

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

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*.

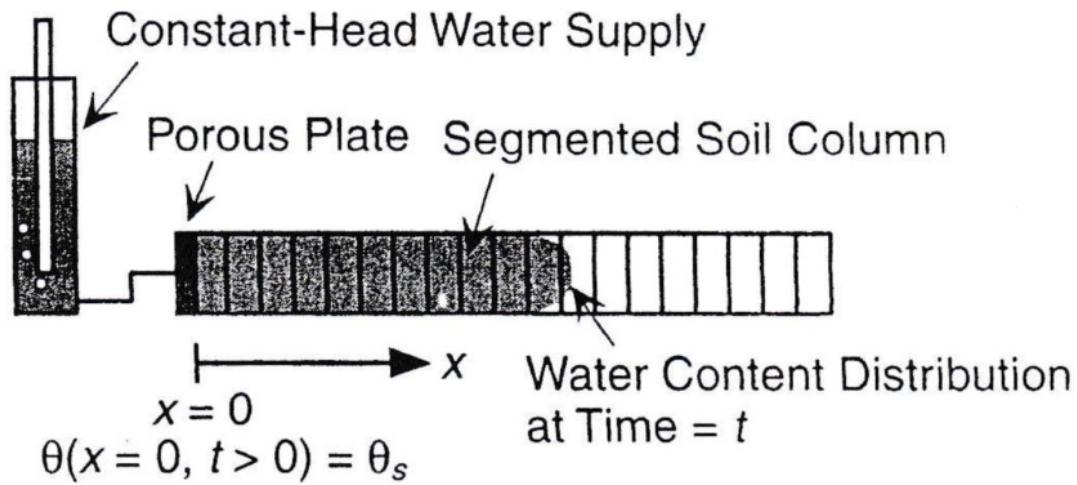
$$C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \quad Eq. 17$$

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 (1956). Semenjak 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* (Klute and Dirksen 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:

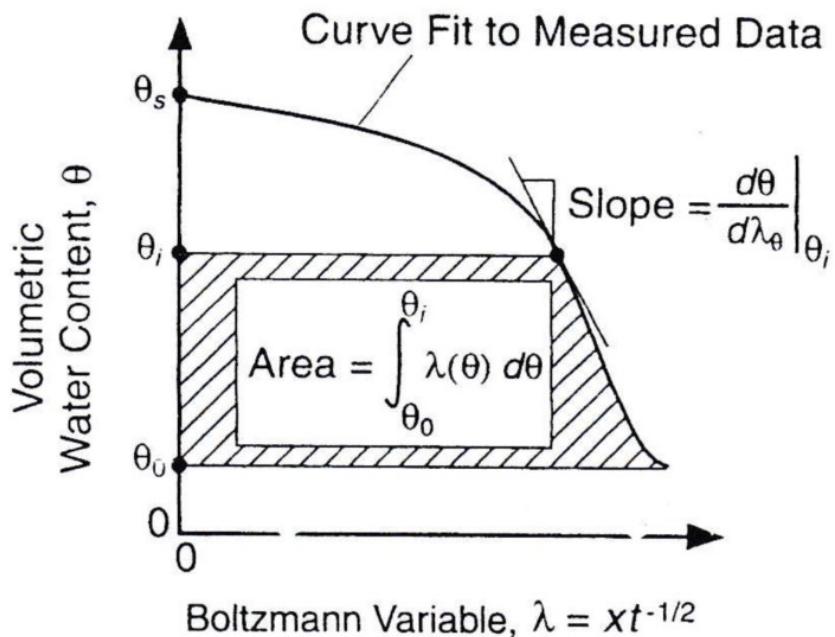
$$\theta(x, 0) = \theta_0 \quad \theta(0, t) = \theta_s$$

Solusi persamaan Eq. 19 dapat diselesaikan dengan bantuan *Boltzmann variable* (Eq. 21) dengan mengubahnya menjadi bentuk persamaan differensial biasa seperti persamaan Eq. 20.

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

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

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



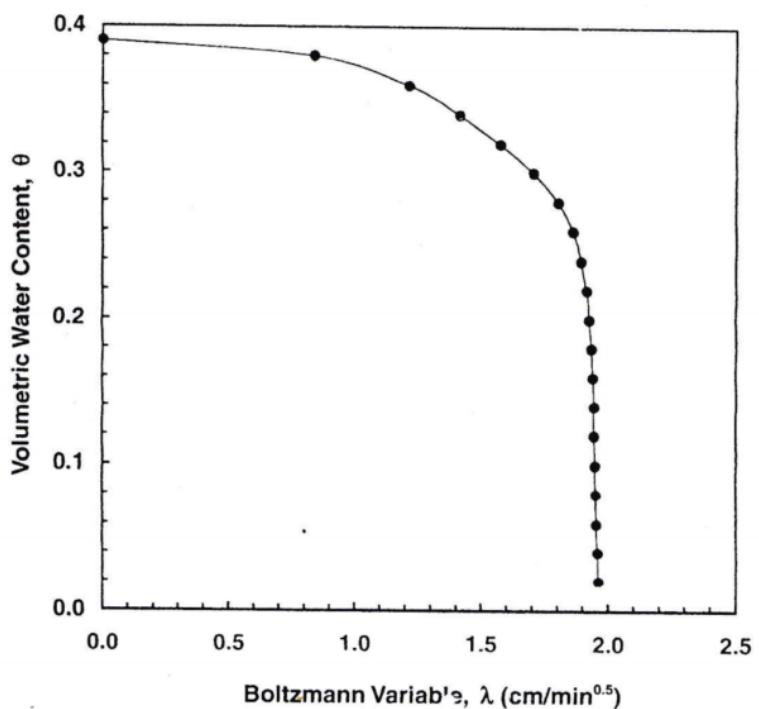
Gambar 27. Kurva Boltzmann variable-VWC (Klute and Dirksen 1986)

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

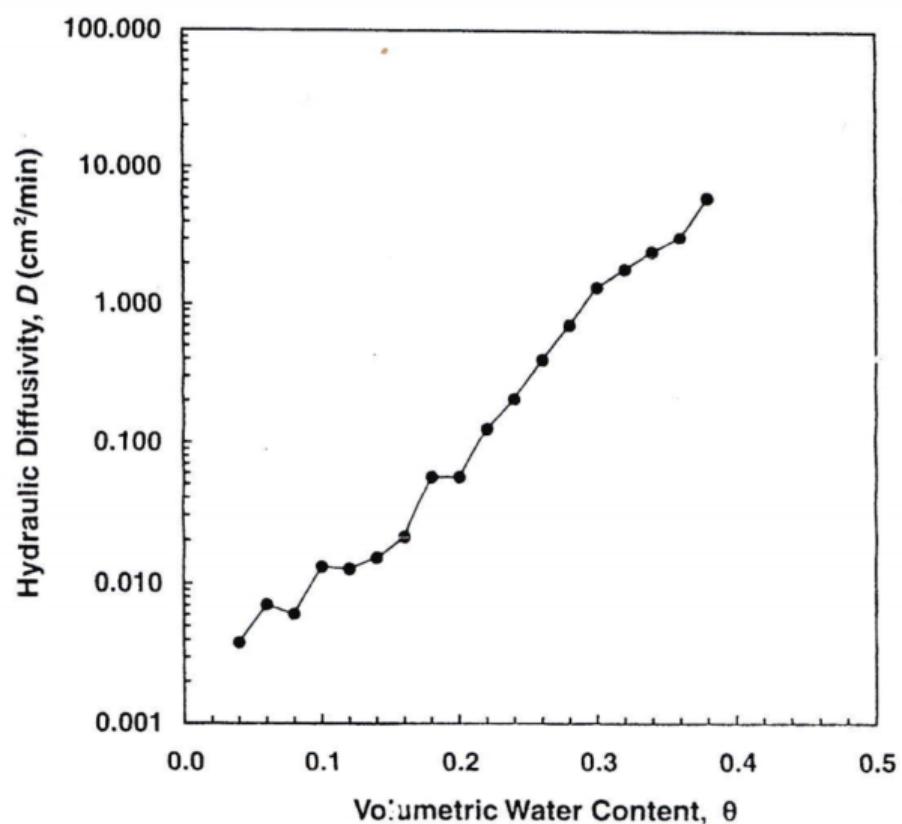
Tabel 5. Data hasil analisa uji *horizontal infiltration* (Nielsen et al. 1964)

x (cm)	θ_i	λ_i (cm/min ^{0.5})	A_i	ΣA_i	S_i	$D(\theta_i)$ (cm ² /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 (Lu and J. Likos 2004)



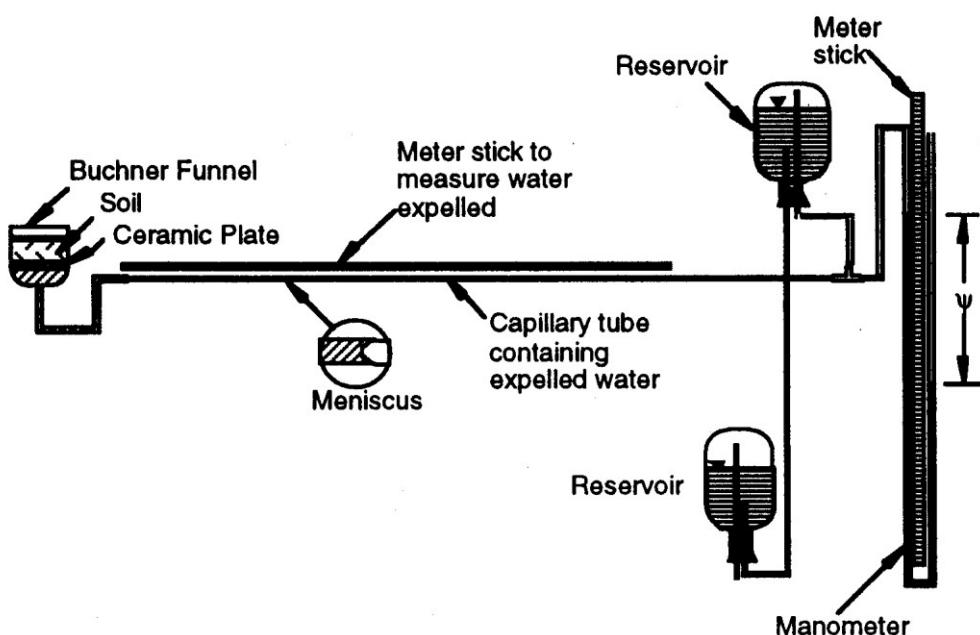
Gambar 29. Kurva VWC-hydraulic diffusivity dari data uji Tabel 5 (Lu and J. Likos 2004)

2.7.6 Outflow Methods

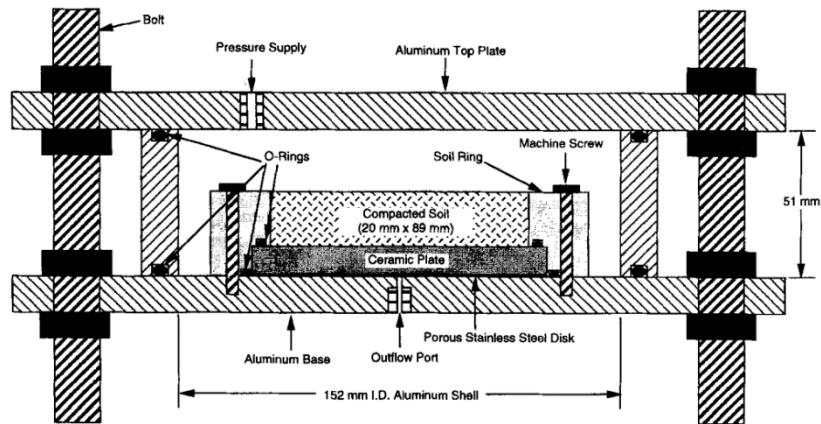
Metode *outflow* termasuk kedalam jenis pengujian *unsteady state* dan secara luas banyak dipakai untuk mengukur parameter konduktivitas hidraulik tak jenuh. Pengujian ini relatif lebih cepat dibandingkan dengan cara *steady state* dan mempunyai keunggulan dalam hal kontrol dibandingkan juga dengan pengujian 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*.

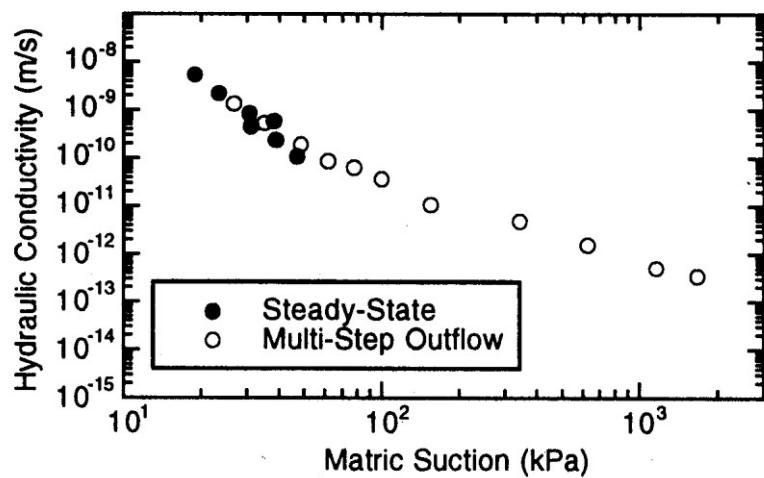
Multi-step method pertama kali diperkenalkan oleh Gardner (1956). Ini adalah metode *outflow* yang pertama. Keunggulan dari metode ini adalah waktu yang diperlukan untuk melakukan pengujian ini cukup cepat dengan peralatan yang relatif lebih sederhana. Kekurangannya adalah hasil nya tidak konsisten sehingga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



Gambar 30. Skema metode *outflow* (Benson and Gribb 1997)

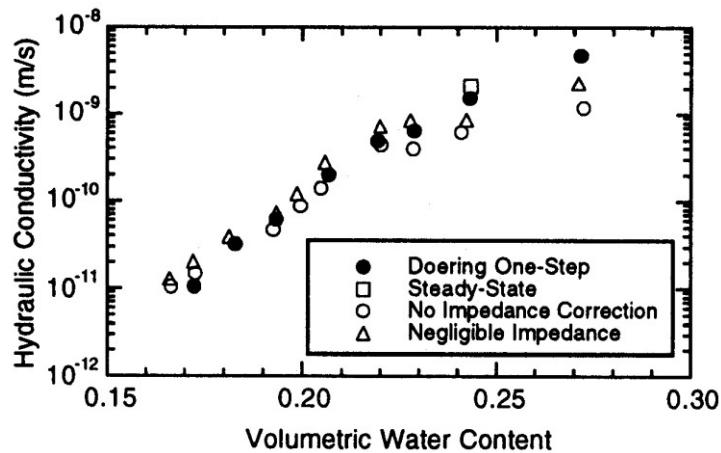


Gambar 31. Pressure plate extractor (Tinjum, Benson, and Blotz 1997)

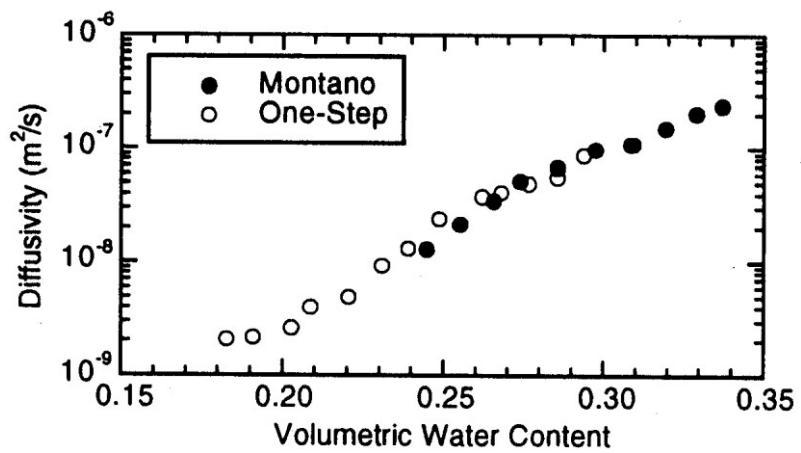


Gambar 32. Perbandingan data konduktivitas hidraulik dengan uji *steady state* dan *multi-step* (Gardner 1956)

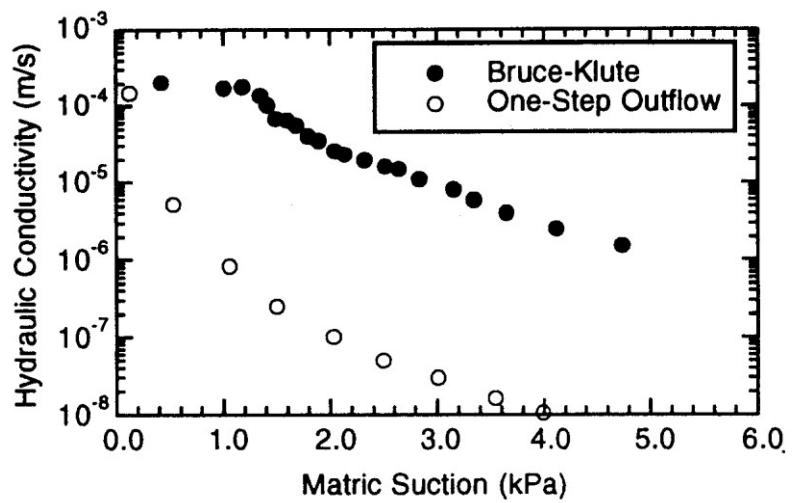
One-step method, menggunakan langkah pengujian yang tidak sedikit untuk pengukuran *matric suction* dan *outflow* harus dipantau. Yang memperkenalkan metode ini adalah Doering (1965). Keunggulan dari metode ini adalah waktu pengujian yang lebih cepat dibandingkan metode *multi-step*. Kekurangannya adalah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



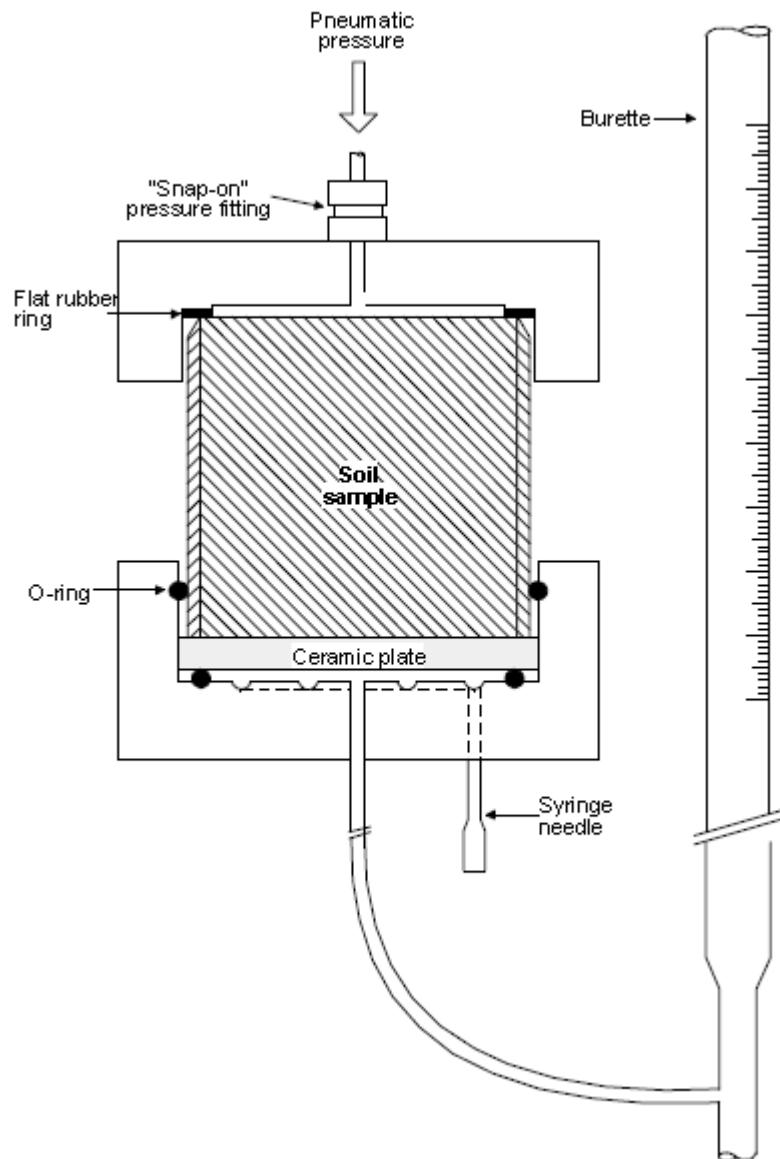
Gambar 33. Konduktivitas hidraulik dari uji *multi-step outflow* (Kunze and Kirkham 1962)



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

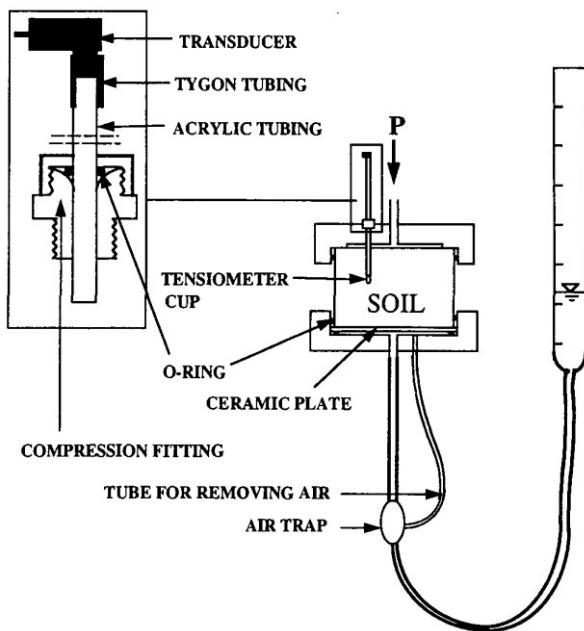


Gambar 35. Kurva konduktivitas hidraulik dari pasir Dune dengan uji *one-step outflow* dan *horizontal infiltration method* (Stephens 1992)

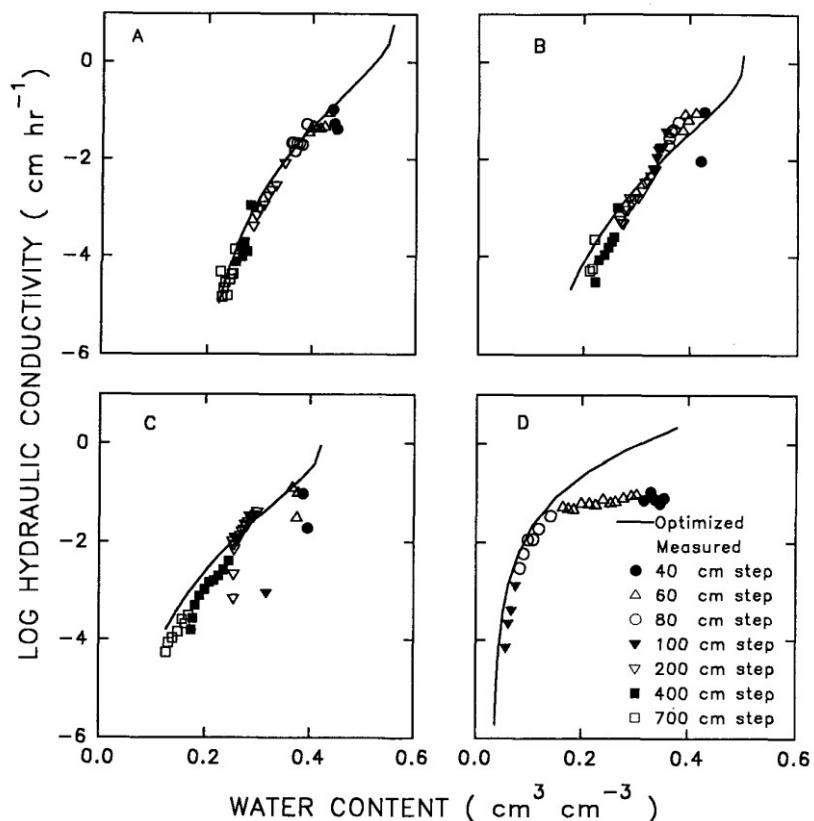


Gambar 36. Ilustrasi metode *outflow* dengan *Tempe pressure cell* (T. W. Green et al. 1998)

Multi-step direct method, diperkenalkan oleh Eching et al (1994a). Kelebihan dari metode ini adalah besarnya konduktivitas hidraulik langsung didapatkan tanpa perlu menghitung nilai *diffusivity*. Selain itu, SWCC bisa diperoleh dari uji ini.

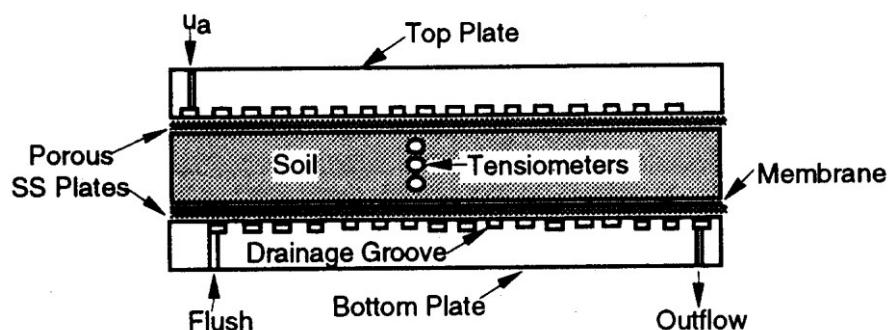


Gambar 37. Skema uji *multi-step* dengan modifikasi *Tempe pressure cell* (Eching, Hopmans, and Wendoroth 1994b)

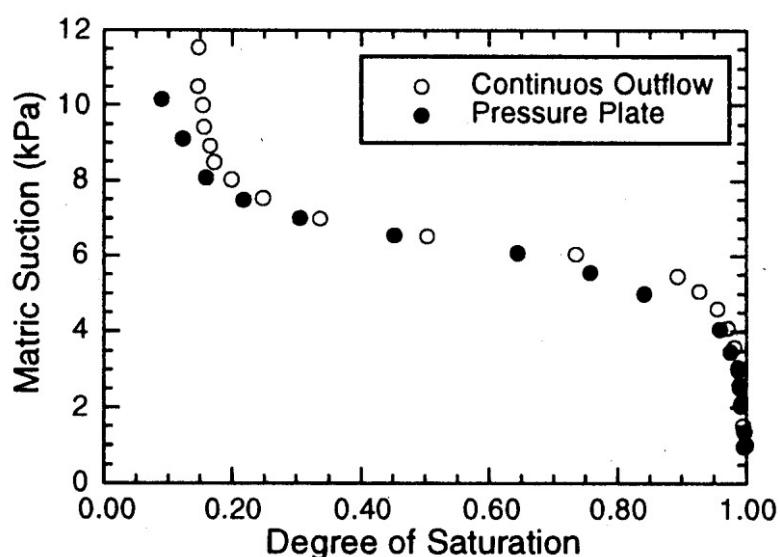


Gambar 38. Kurva konduktivitas hidraulik (A) *Yolo silt loam* (B) *Panoche loam* (C) *Hanford sandy loam* (D) *Oso Flaco fine sand* (Eching, Hopmans, and Wendoroth 1994b)

Continous outflow method diperkenalkan oleh Salehzadeh dan Demond (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 konduktivitas hidraulik and SWCC langsung diukur. Sayangnya, pada paper yang dibuat oleh Salehzadeh dan Demond tidak menampilkan secara langsung data dari konduktivitas hidraulik 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)

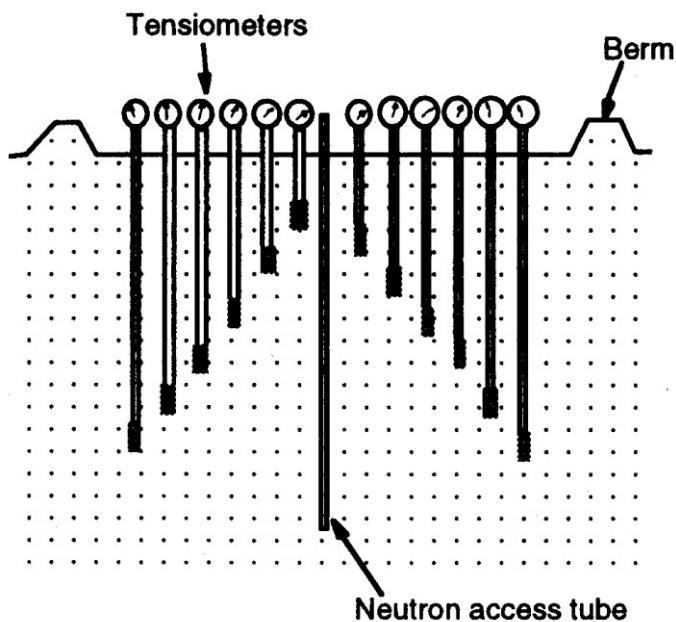


Gambar 40. SWCC dari uji metode *continous outflow* dan 100 kPa *pressure plate extractor* (Salehzadeh and Demond 1994)

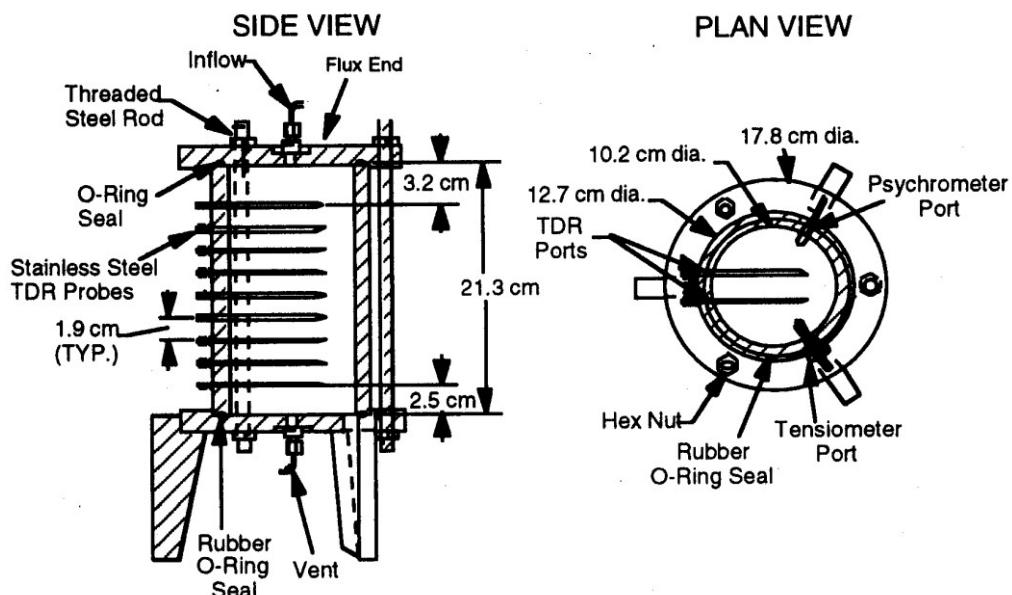
2.7.7 Instantaneous Profile Methods

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.

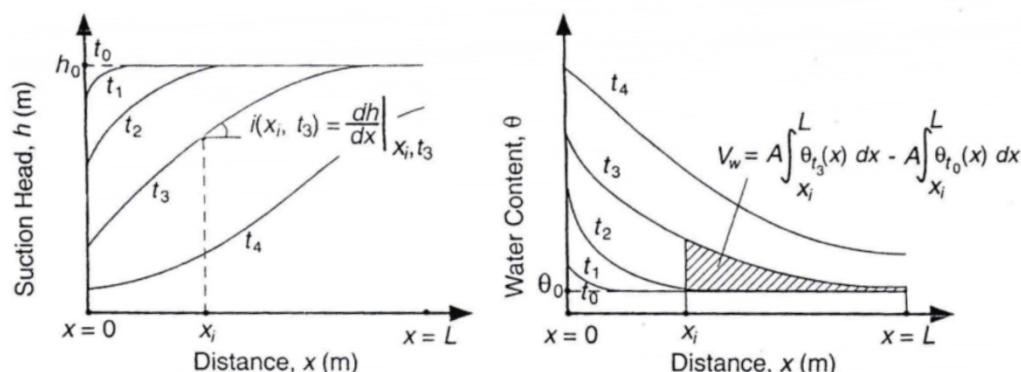
Setelah profil didapatkan (Gambar 43), dapat dilanjutkan untuk memulai analisa untuk mendapatkan besarnya konduktivitas hidraulik.



Gambar 41. Skema kondisi lokasi uji *instantaneous profile method* (Benson and 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* (Lu and 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* (ΔV_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).

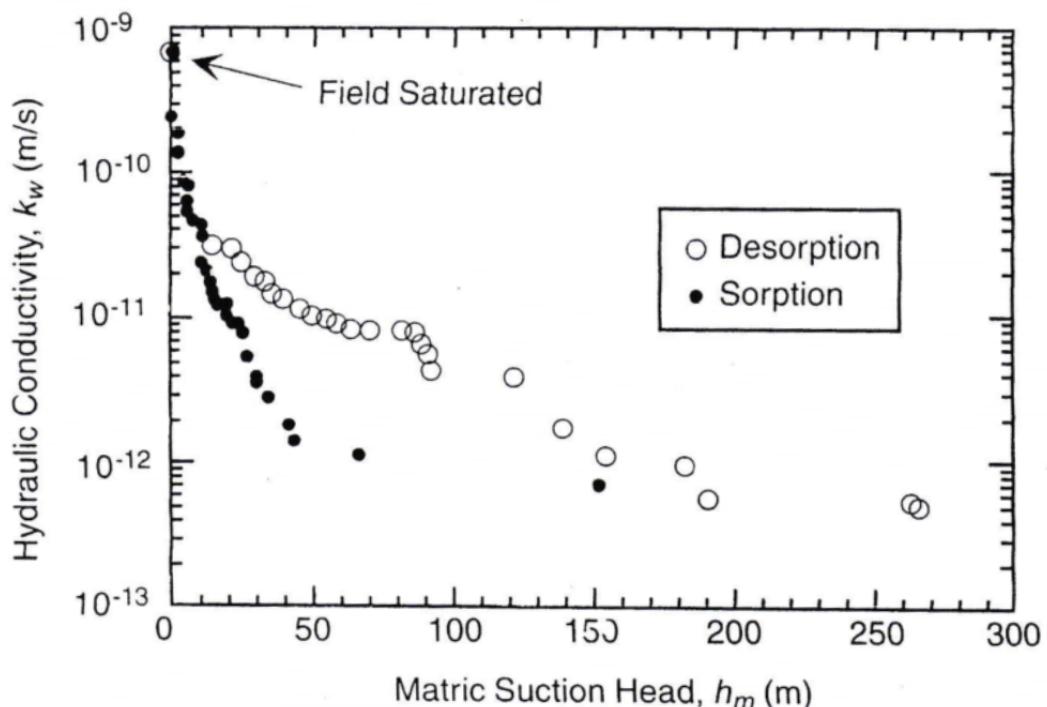
$$i(x, t) = \frac{\partial h}{\partial x} \quad Eq. 22$$

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

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

Persamaan Eq. 25 adalah besarnya konduktivitas hidraulik (k).

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



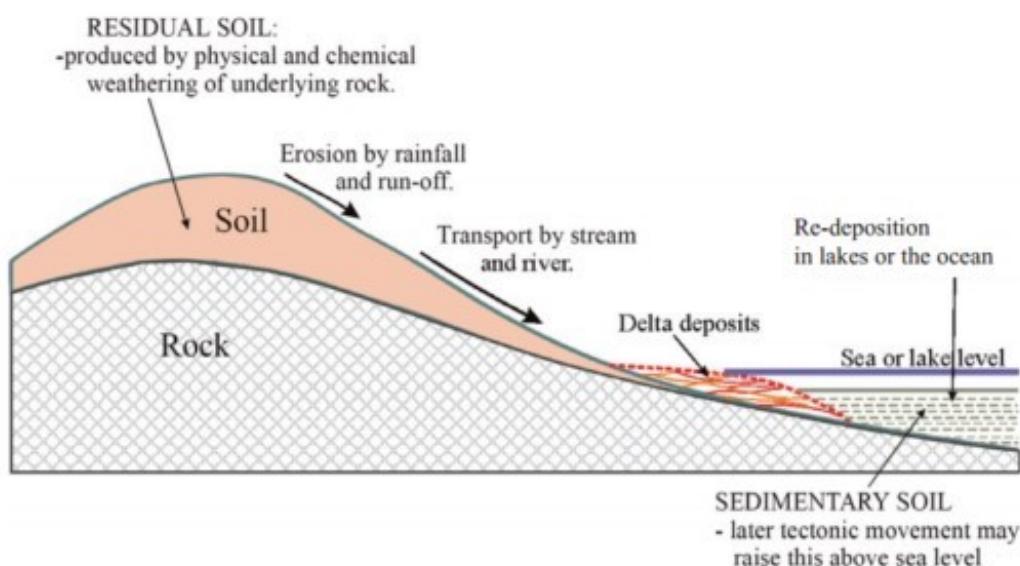
Gambar 44. *Hysteresis* dalam konduktivitas hidraulik tak jenuh untuk Wenatchee silty clay
(Meerdink, Benson, and Khire 1996)

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 (SiO_2) yang termasuk kedalam jenis batuan beku.



Gambar 45. Diagram proses terbentuknya tanah (Wesley 2009)

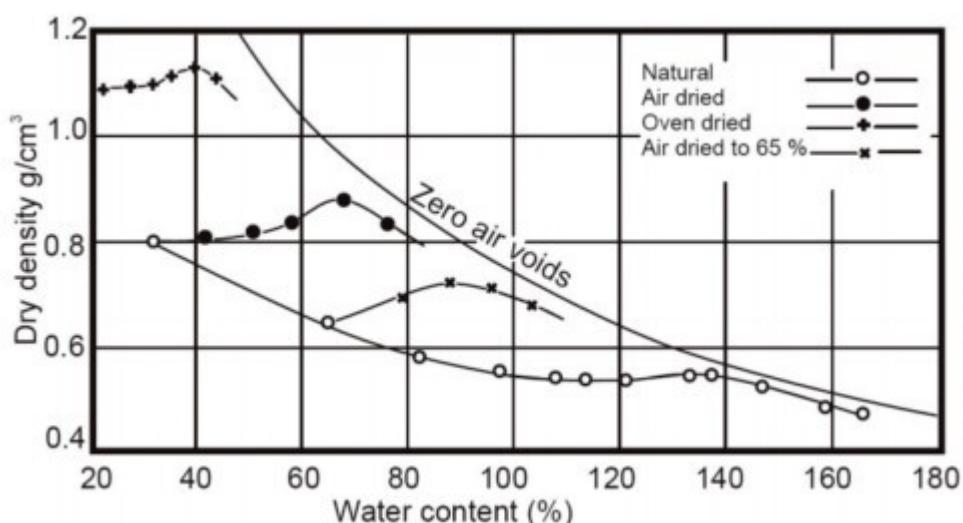
Proses yang terjadi selanjutnya adalah sebagian material ada yang mengalami proses pelapukan ditempat atau dikenal dengan istilah residual dan bagian lainnya mengalami perpindahan lalu mengalami proses endapan, biasa material ini dikenal dengan tanah sedimen.

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, Ferrari, and Laloui 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 (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.

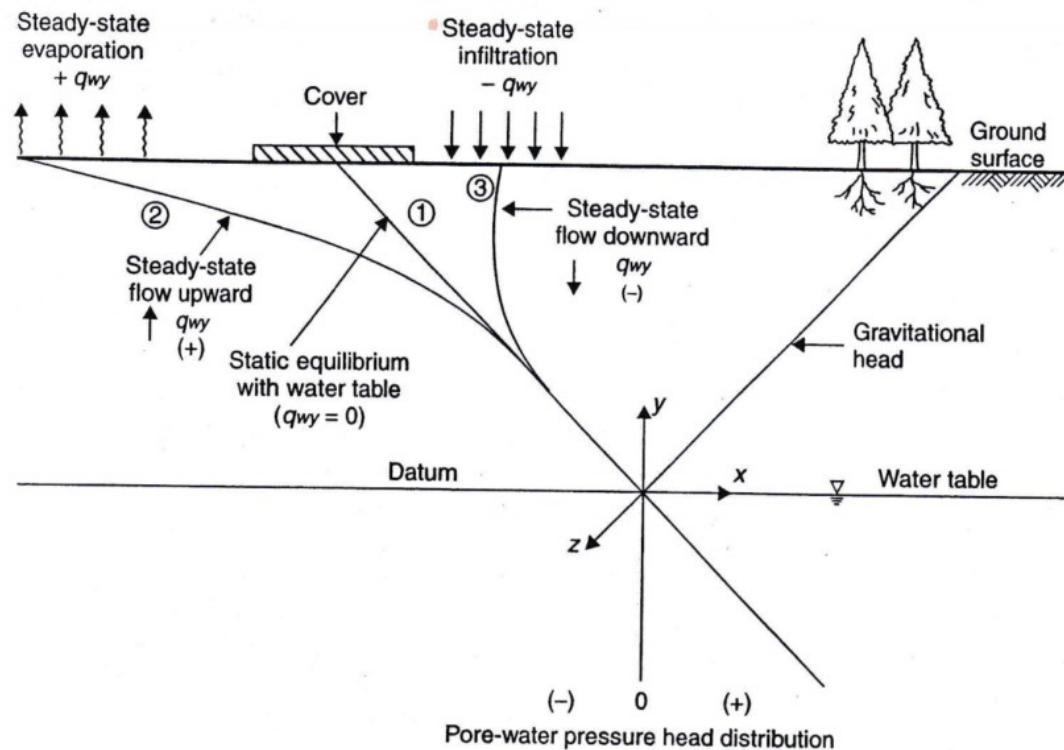
BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Aliran Pada Tanah Tak Jenuh

3.1.1 Aliran Satu Dimensi pada Tanah Tak Jenuh

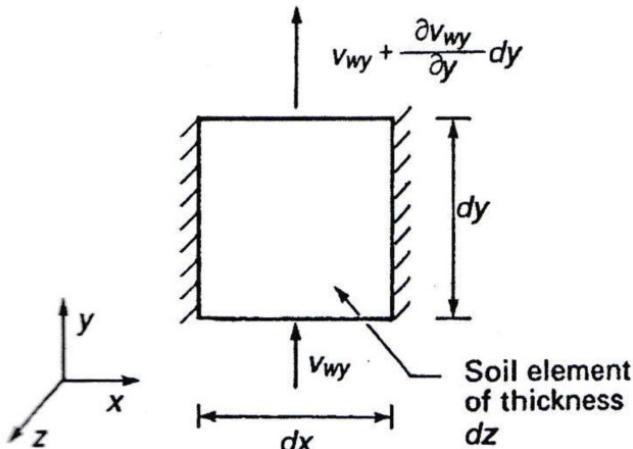
Pada situasi tertentu, aliran air didominasi hanya pada salah satu arah saja. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 47. Garis linear nomor 1 menunjukkan besarnya tekanan air pori negatif sampai batas muka air tanah dan ini disebut kondisi equilibrium, dengan kata lain *hydraulic head* ($=\text{gravitational head} + \text{negative pore water pressure head}$) bernilai nol, lalu gradien hidraulika 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 tekanan air pori negatif (D G Fredlund, Rahardjo, and 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 tekanan air pori negatif akan berubah bertambah negatif karena efek evaporasi. Kondisi sebaliknya terjadi pada garis nomor 3, karena adanya infiltrasi yang menyebabkan tekanan air pori negatif berkurang atau bergerak relatif kearah kanan.

Secara matematis, kondisi ini dapat dituliskan sebagai berikut:



Gambar 48. Kondisi aliran satu dimensi pada elemen tanah (D G Fredlund, Rahardjo, and 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 (1856) untuk kondisi tak jenuh 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 tak jenuh 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:

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

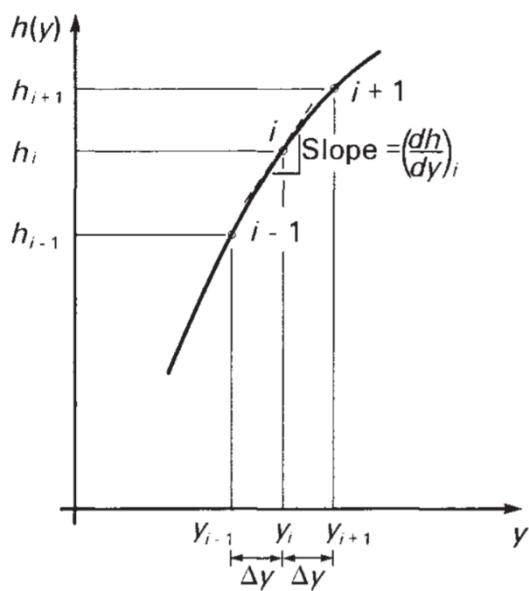
Pada kondisi tanah jenuh, besarnya koefisien permeabilitas akan hanya mempunyai satu nilai saja dan bisa ditulis dengan notasi k_s . Persamaan Eq. 30, untuk nilai k_{wy} dapat disubtitusi dengan nilai k_s , persamaan ini ditulis ulang menjadi persamaan Eq. 31.

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

3.1.2 Solusi Persamaan Diferensial Parsial Aliran Satu Dimensi

Persamaan diferensial untuk aliran satu dimensi pada tanah tak jenuh lebih kompleks dibandingkan pada tanah jenuh, 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 tak jenuh, maka persamaan diferensial parsial bisa diselesikan dengan cara solusi numerik seperti metode beda hingga.

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 (1715) 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 (D G Fredlund, Rahardjo, and 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 Eq. 30, bentuk akhir menjadi persamaan Eq. 34.

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

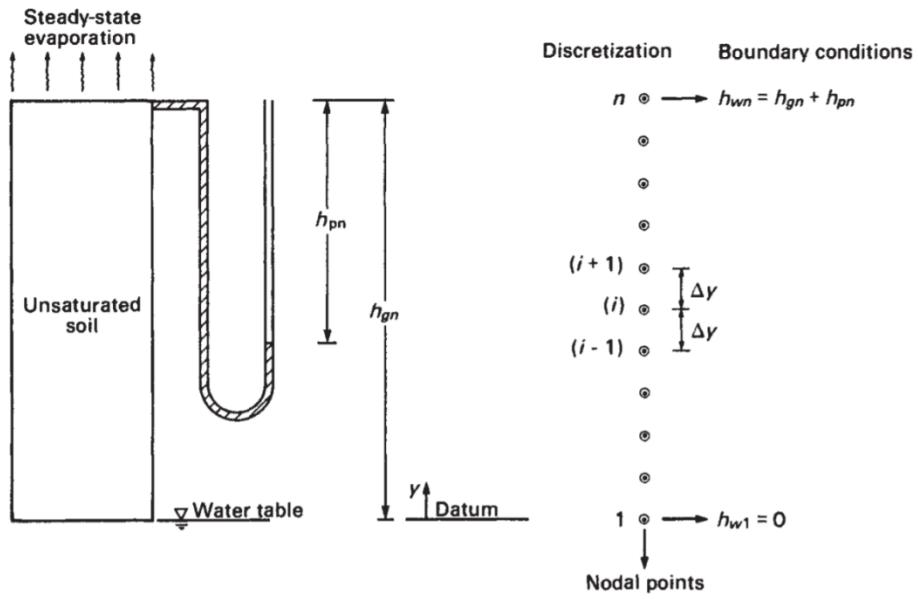
dimana:

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

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 (D G Fredlund, Rahardjo, and 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 digambarkan melalui persamaan Eq. 37.

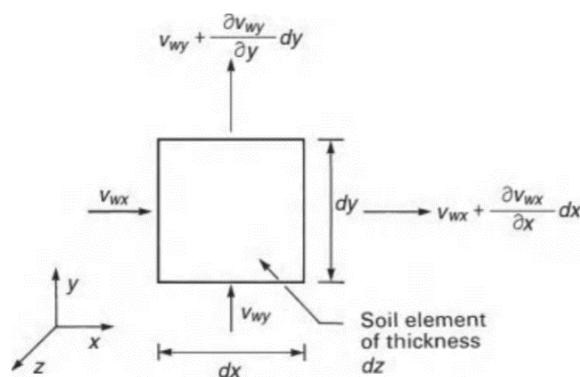
$$h_{w(i+1)} = h_{w(i-1)} - \frac{2 \cdot \Delta y}{A \cdot k_{wy(i)}} \cdot q_{wy} \quad Eq. 37$$

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 Eq. 38.

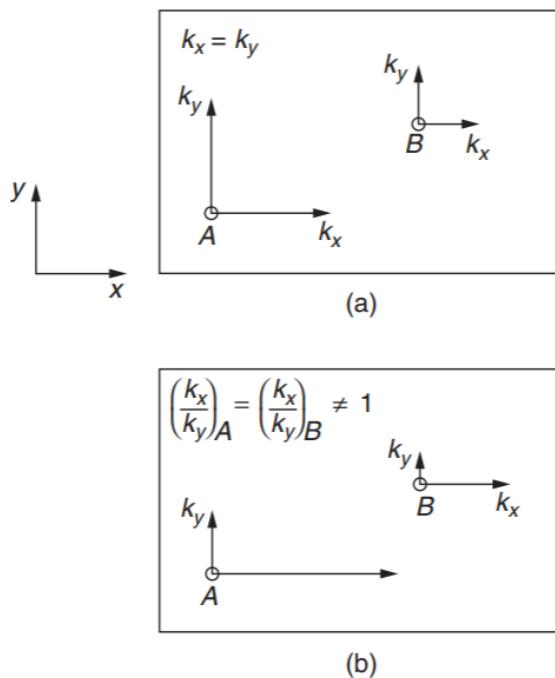
$$h_{w(i)} = h_{w(i-1)} - \left\{ \frac{4k_{wy(i)} + k_{wy(i+1)} - k_{wy(i-1)}}{8k_{wy(i)}^2} \right\} \cdot \frac{2\Delta y}{A} \cdot q_{wy} \quad Eq. 38$$

3.1.3 Aliran Dua Dimensi Pada Tanah Tak Jenuh

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 jenuh dan tak jenuh 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 (D G Fredlund, Rahardjo, and Fredlund 2012)



Gambar 52. (a) Kondisi *heterogeneous*, isotropik (b) kondisi *heterogeneous*, *anisotropic* (D G Fredlund, Rahardjo, and 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 (1856) untuk kondisi tak jenuh, 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* (Van der Veer 1978). Ketiga kategori tidak akan dibahas dengan secara mendalam tetapi sebagai bahan referensi.

Tabel 6. Daftar solusi analitik untuk persamaan Laplace

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

Tabel 7. Daftar solusi pendekatan untuk persamaan Laplace

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

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 h_w 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.

$$\begin{aligned} F(x) &= a_1x^2 + b_1x + c_1 \\ G(y) &= a_2y^2 + b_2y + c_2 \end{aligned} \quad Eq. 47$$

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.

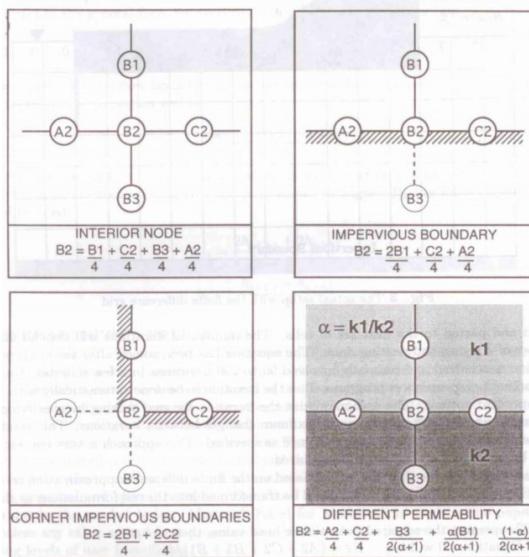
$$\frac{d^2h_w}{dx^2} = \frac{h_{i-1,j} - 2 \cdot h_{ij} + h_{i+1,j}}{\Delta x^2} \quad Eq. 49$$

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

Untuk memudahkan perhitungan, diambil besarnya Δx sama dengan Δy . 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 (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 Courant (1943) menggabungkan semua penelitian tersebut menjadi sebuah fungsi khusus untuk elemen segitiga dua dimensi. Lalu perkembangan selanjutnya dilanjutkan oleh peneliti-peneliti setelah Courant, sampai akhirnya Clough (1960) 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 and Abel 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

3.5.1 Model Elemen

Dalam hal analisa aliran menggunakan metode elemen hingga, sebelum mendapatkan besaran primer yaitu tekanan air pori negatif. 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:

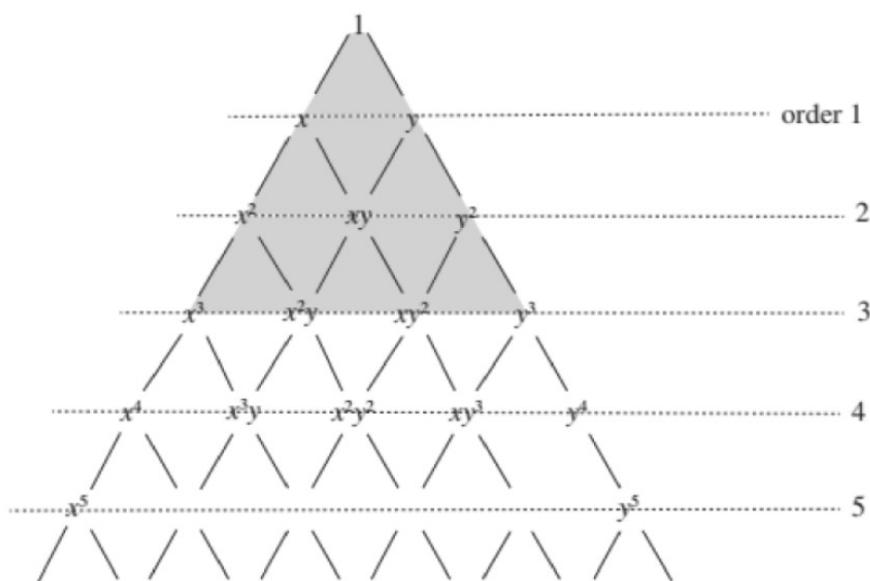
Tabel 8. Jenis Elemen (Bathe 2006)

Nama Elemen	Bentuk Elemen
Segitiga	
Quadrilateral	

3.5.2 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:

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y \quad Eq. 52$$

dimana:

- α = 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 α , 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.

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

3.5.3 Hubungan Gradien, *Suction* dan Kecepatan Aliran

Untuk menentukan kecepatan aliran, digunakan hukum Darcy (1856) dengan persamaan:

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

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

3.5.4 Menentukan Persamaan Elemen dan Solusi Besaran Primer

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

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

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:

λ	= $\rho \cdot g \cdot m_2^w$
m_2^w	= <i>water storage modulus</i> , kPa ⁻¹

Persamaan Eq. 58, diselesaikan dengan cara menentukan dahulu nilai h_w pada saat $t=0$ selanjutnya bisa didapatkan nilai h_w pada saat $t+\Delta t$, 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 mendapatkan besaran primernya, 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

3.5.5 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 diskretisasi 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 (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:

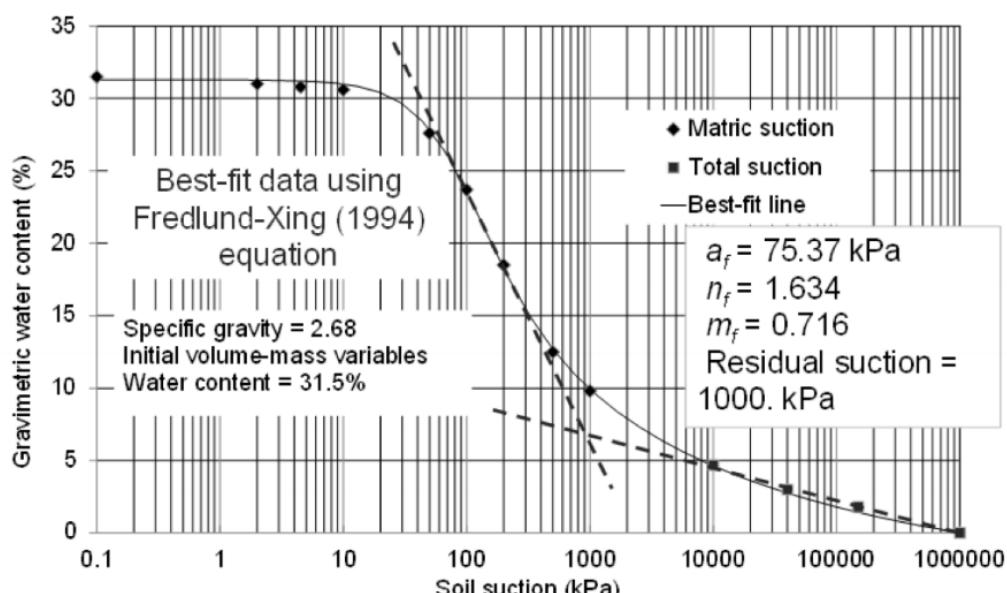
- $\langle \quad \rangle$ = Macaulay brackets
- S_a = saturation with the capillary component
- S_c = saturation with the adhesive component
- n = porositas

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:

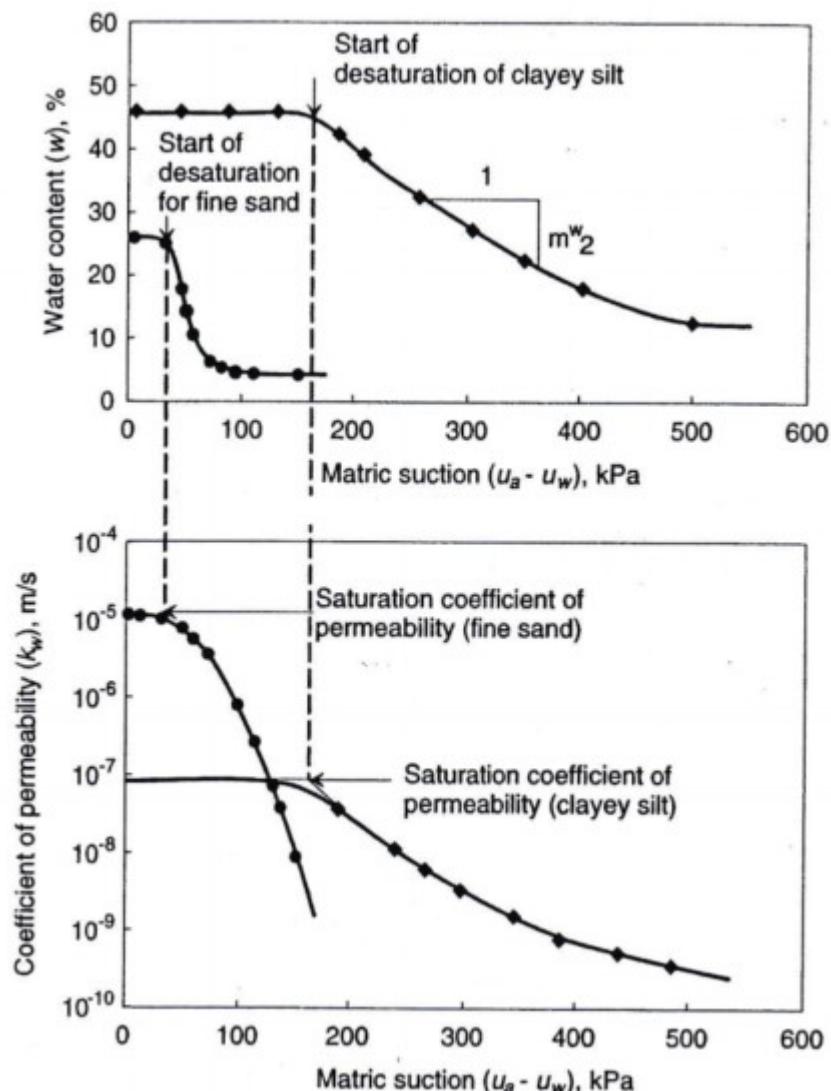
- a_f, n_f, m_f = fitting parameter
- θ_s = saturated volumetric water content
- Ψ = suction, kPa
- $C(\psi)$ = correction factor
- e = natural number (2.71828...)
- n = porositas



Gambar 55. Contoh grafik SWCC (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 Konduktivitas hidraulik-Suction



Gambar 56. Tipikal kurva SWCC dan konduktivitas hidraulik untuk tanah pasir dan lanau kelempungan (D G Fredlund, Rahardjo, and Fredlund 2012)

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

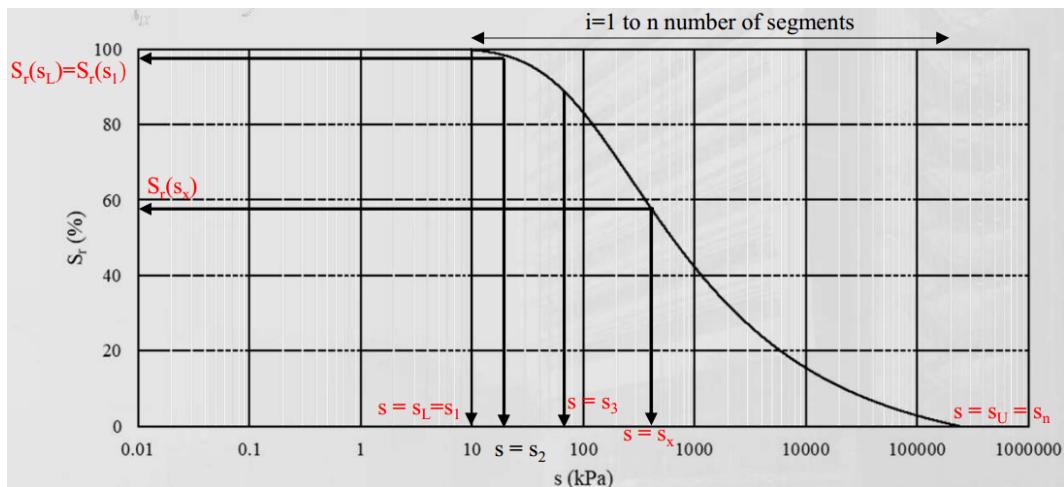
Metode yang disarankan oleh program geostudio (2012) untuk digunakan pada saat melakukan prediksi fungsi konduktivitas hidraulik adalah: Green dan Corey (1971), Van Genuchten (1980) dan Fredlund et al (1994). Untuk dua metode terakhir,

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 ($= k / k_{saturated}$)

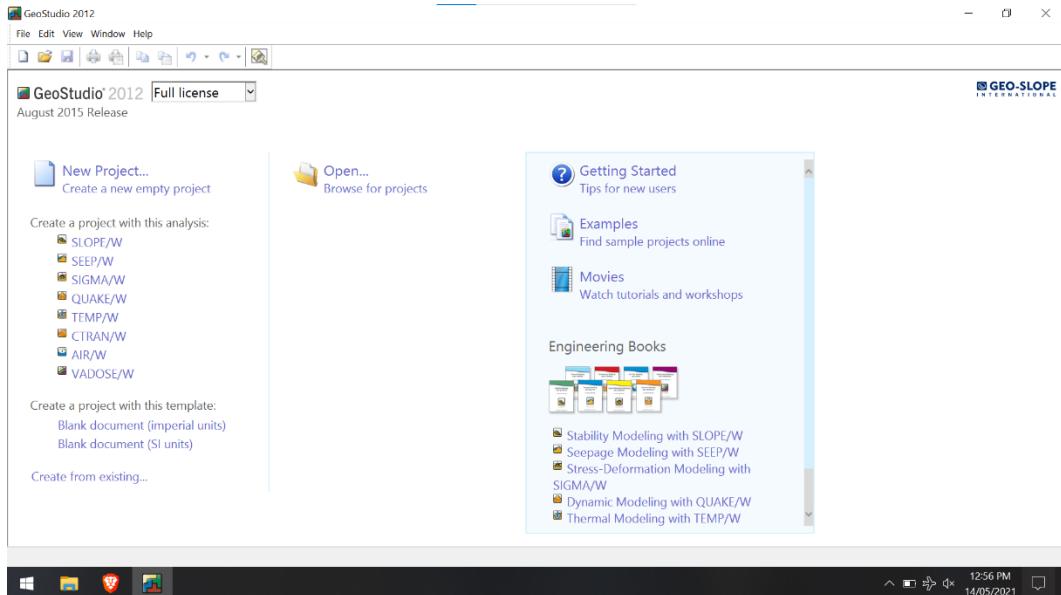


Gambar 57. Metode statistik untuk permeabilitas tak jenuh (D G Fredlund, Xing, and Huang 1994)

3.5 Program Geostudio

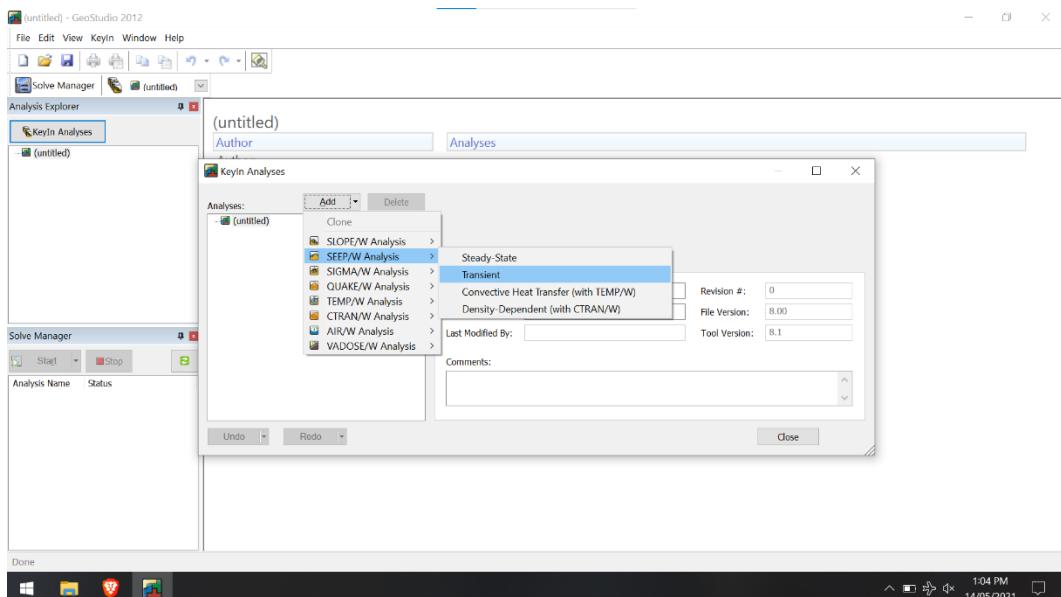
Geostudio adalah program untuk memodelkan kestabilan lereng, deformasi, perpindahan massa dan panas dengan media tanah dan batuan. Program ini terdiri dari beberapa sub-program yang terintegrasi dengan sesuai dengan permasalahan yang hendak dimodelkan, seperti: permasalahan kestabilan lereng dapat dimodelkan dengan Slope/W yang berdasarkan metode *limit equilibrium*, sedangkan untuk pemodelan aliran air pada kondisi jenuh dan tak jenuh dapat dimodelkan dengan Seep/W yang menggunakan metode elemen hingga, begitu juga

dengan permasalahan lainnya dapat dilihat dari berbagai sumber. Keuntungan dengan menggunakan program geostudio adalah pemodelan geometri cukup dilakukan sekali saja, selanjutnya dapat diaplikasikan untuk semua sub program.



Gambar 58. Tampilan awal program Geostudio

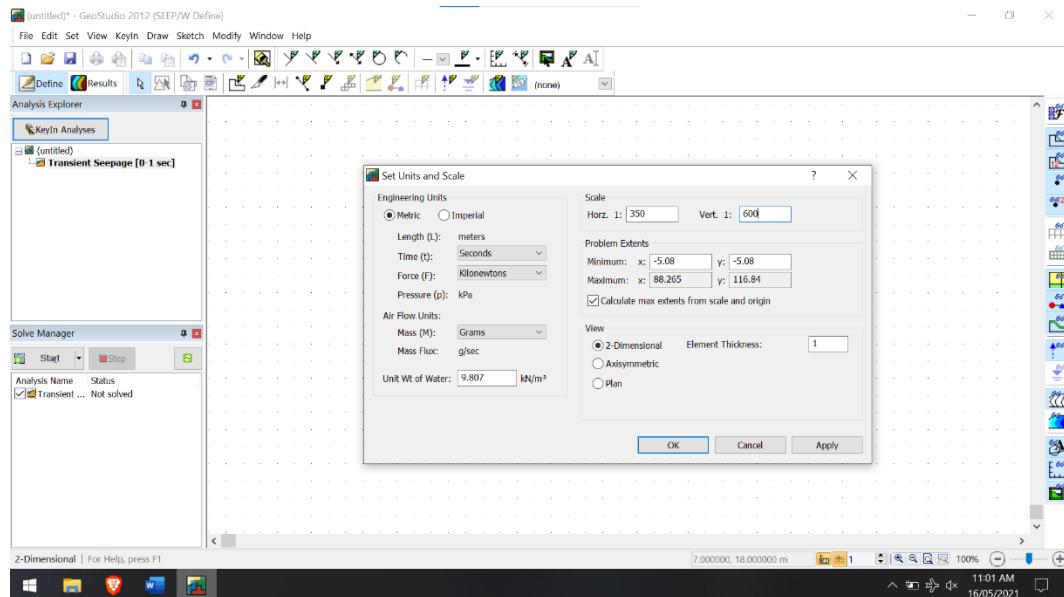
Langkah utama dari program geostudio adalah: menentukan program yang akan digunakan, set geometri tampilan, input parameter, menentukan kondisi batas, memasukan model dan selanjutnya melakukan analisa.



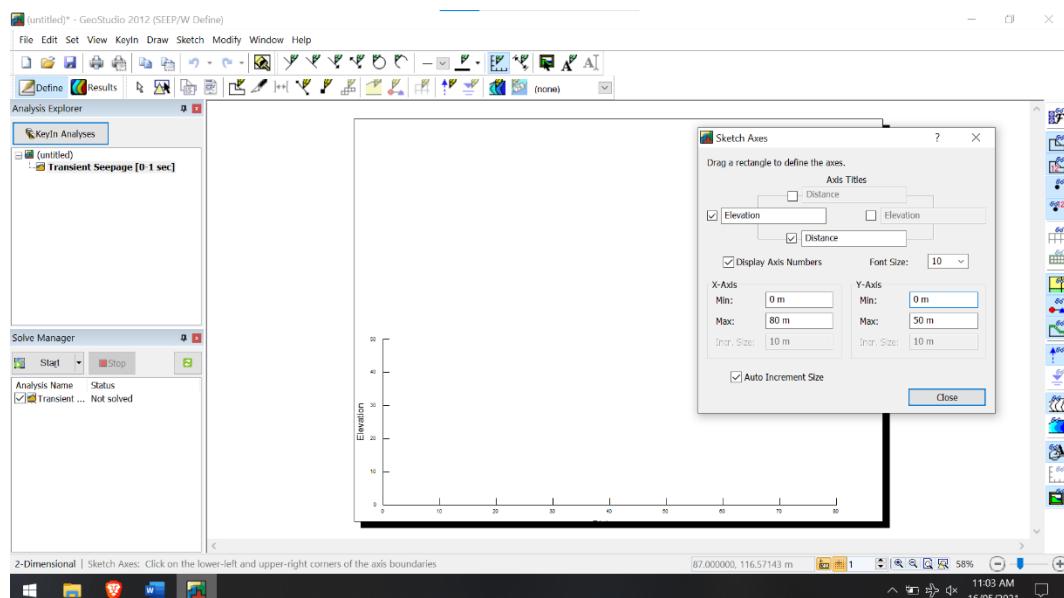
Gambar 59. Daftar program dari geostudio

3.5.1 Set Geometri Layar

Saat menjalankan program, setelah menentukan program yang akan digunakan, langkah awal yang perlu dilakukan adalah mengatur tampilan layar (Gambar 61), skala yang digunakan (Gambar 60) serta satuan yang dipilih sehingga mudah dalam proses input dan tampilan akan maksimal ketika akan dicetak.



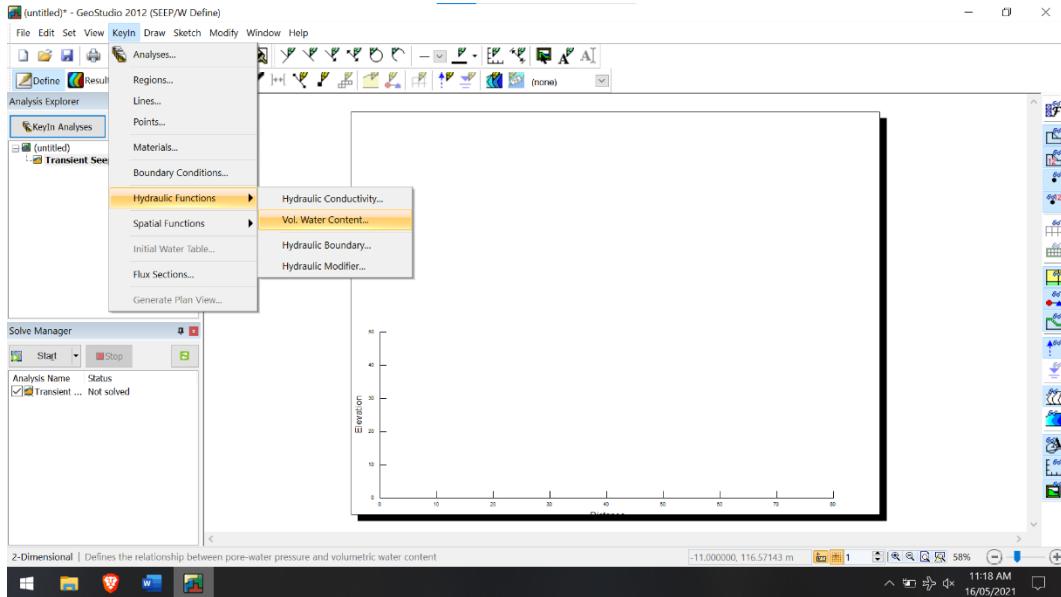
Gambar 60. Pengaturan skala



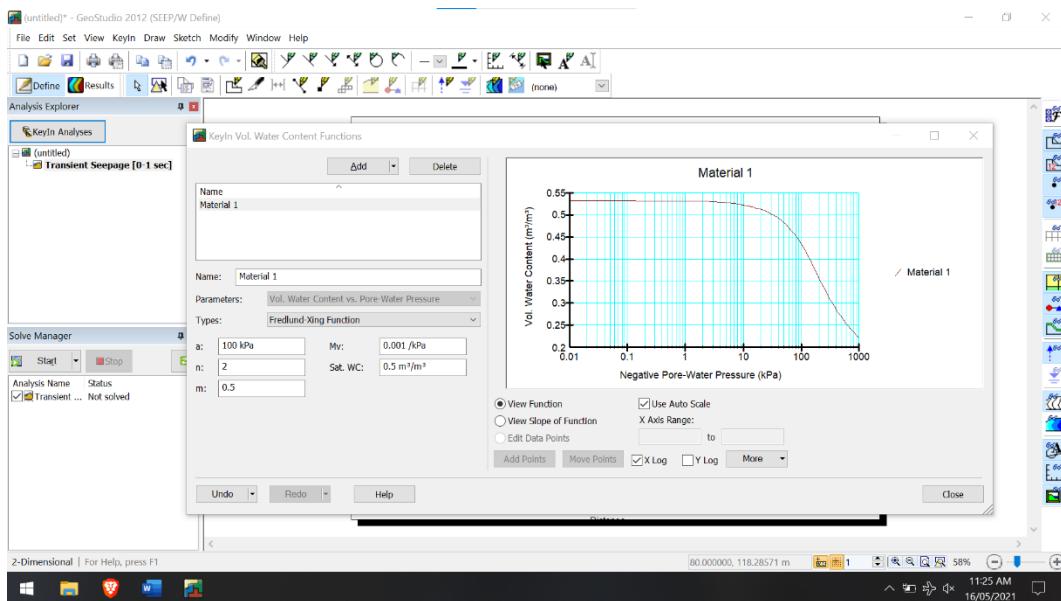
Gambar 61. Pengaturan tampilan

3.5.2 Input Parameter

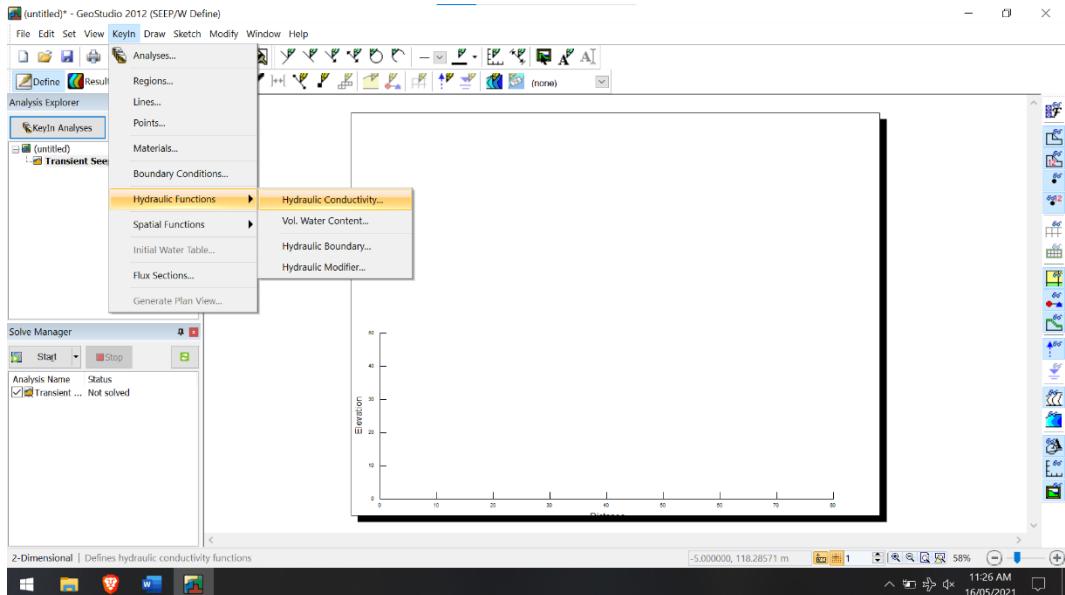
Contoh input parameter dengan menggunakan program Seep/W. Input yang hendak dimasukan adalah parameter *volumetric water content* yaitu untuk tanah dengan kondisi tak jenuh (Gambar 62) dan memasukan fungsi lain yang diperlukan yaitu hubungan konduktivitas hidraulik berdasarkan persamaan yang dipilih (Gambar 65).



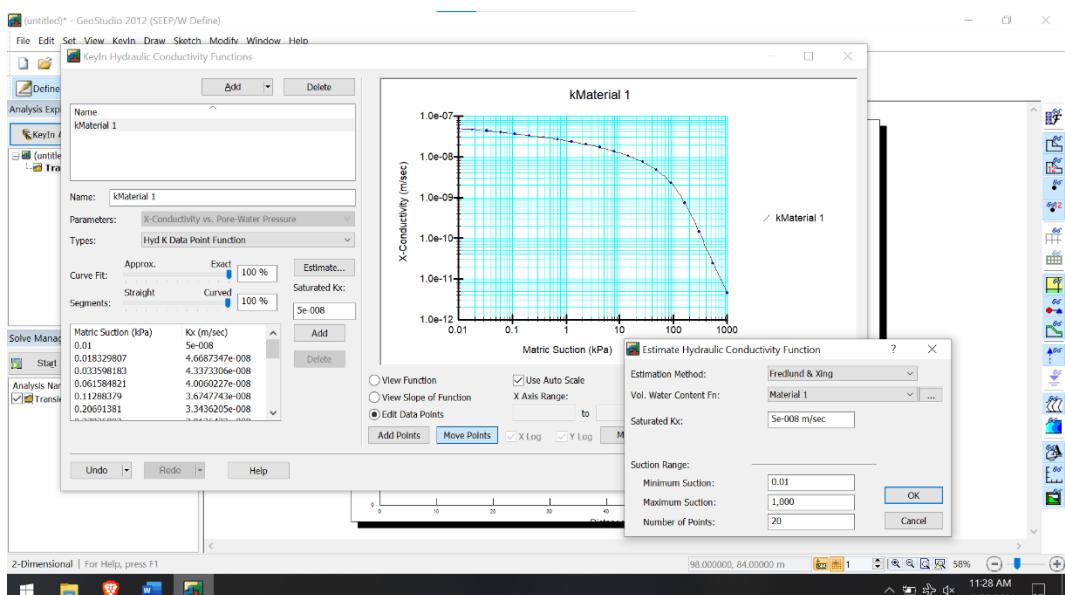
Gambar 62. Tampilan untuk memilih input parameter VWC



Gambar 63. Input parameter untuk SWCC



Gambar 64. Tampilan untuk memilih input konduktivitas hidraulik

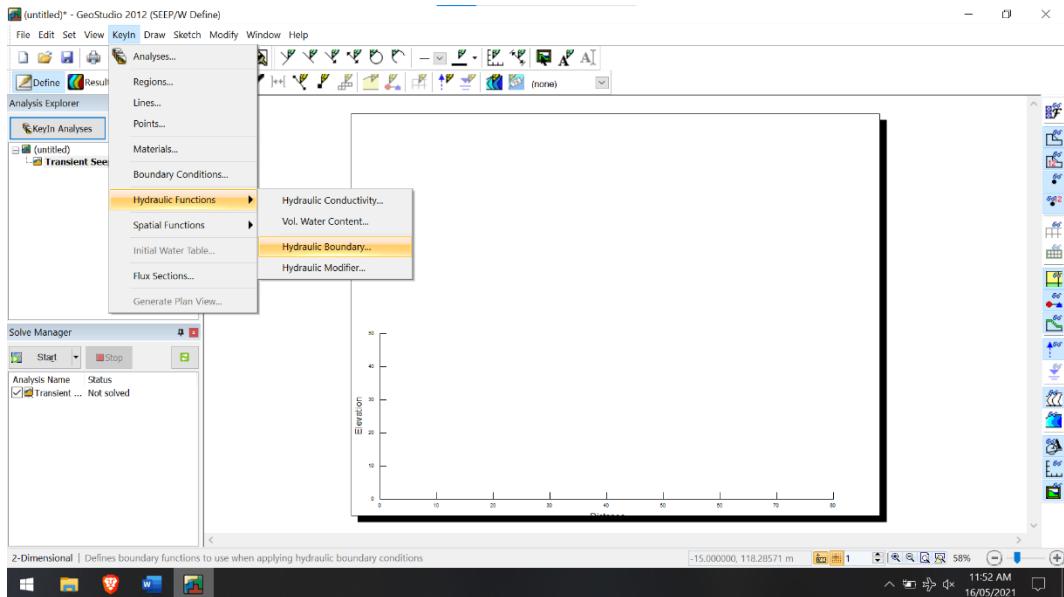


Gambar 65. Input parameter konduktivitas hidraulik

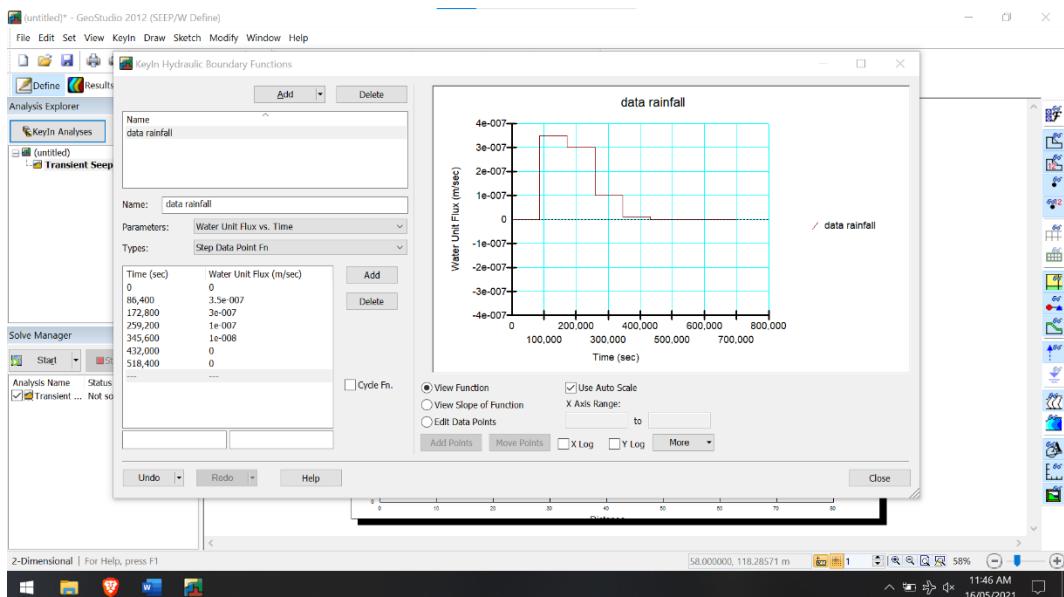
3.5.3 Kondisi Batas

Penentuan kondisi batas harus disesuaikan dengan kondisi yang ada agar hasil keluaran analisa dapat diterima dengan baik. Sebelum dipasang kepada model yang ada, perlu ditentukan dahulu nilai atau fungsi yang dari kondisi batas tersebut. Pilihan menu untuk menamai kondisi batas dapat dilihat pada Gambar 66. Pada

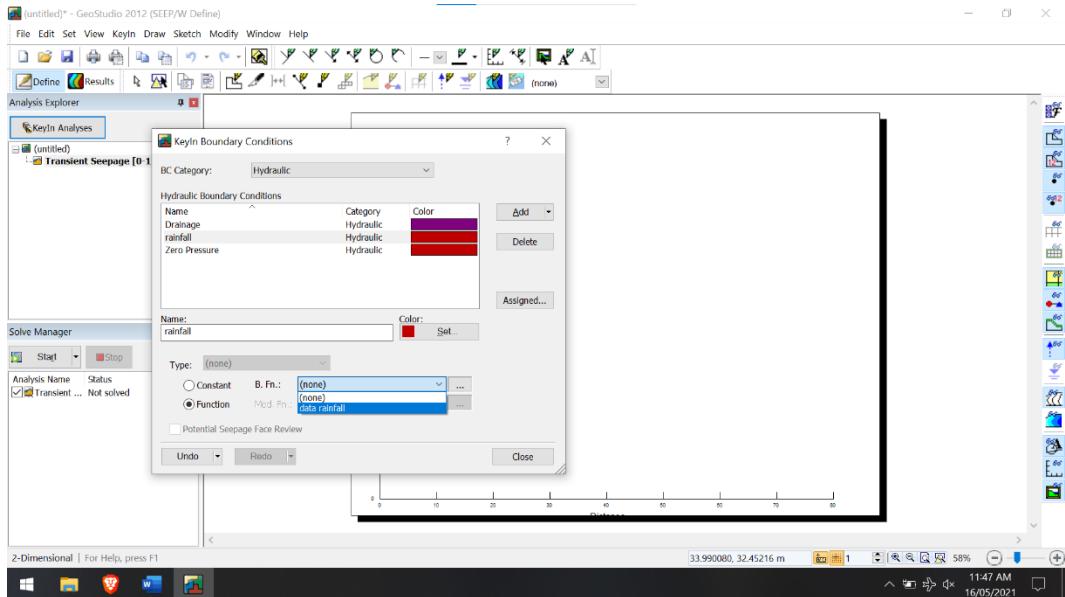
Gambar 67 adalah contoh untuk memasukan data curah hujan sebagai kondisi batas. Sementara pada Gambar 68 adalah pilihan untuk menentukan jenis kondisi batas, yang mana akan dipakai saat akan memasangkannya pada model yang akan dianalisa.



Gambar 66. Tampilan untuk memilih fungsi kondisi batas



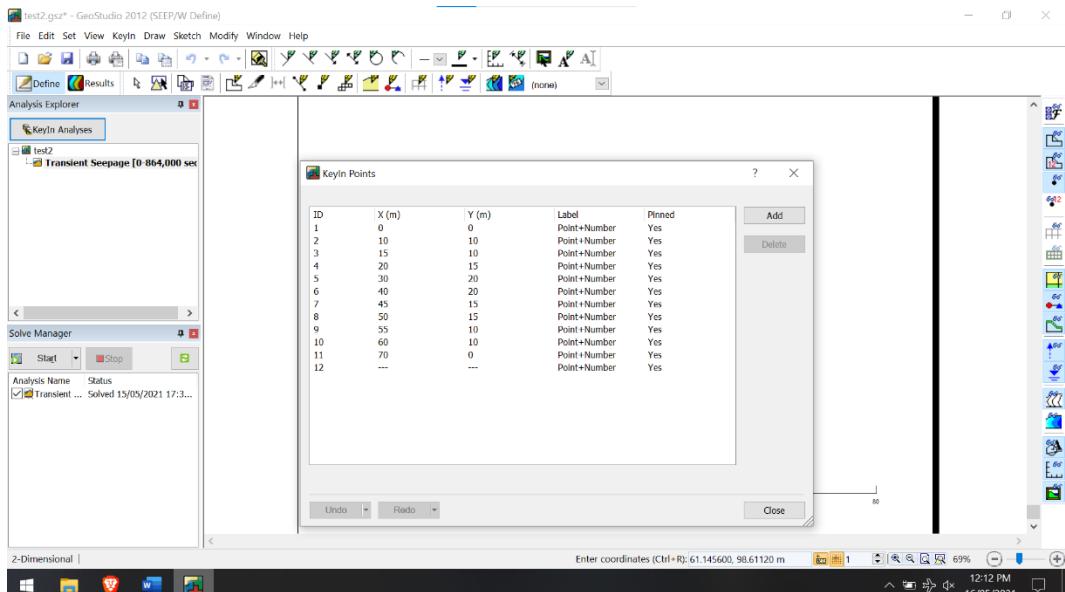
Gambar 67. Tampilan memasukan fungsi kondisi batas



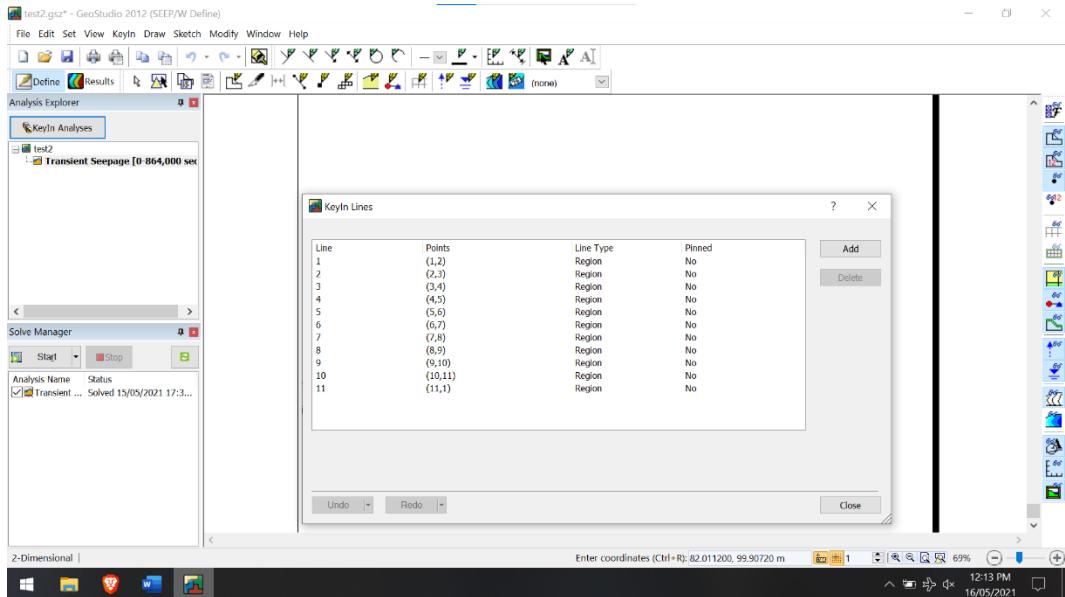
Gambar 68. Tampilan menentukan jenis kondisi batas

3.5.4 Pemodelan

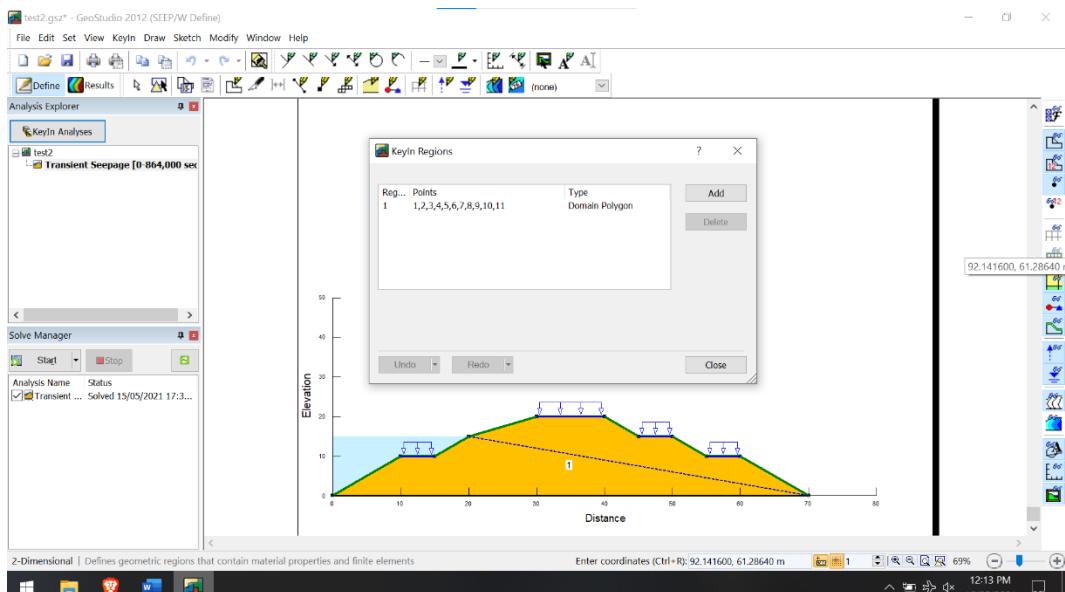
Hal yang diperlukan untuk menggambarkan model adalah titik nodal, garis penghubung serta menentukan kluster agar model dapat dibuat. Setelah pembuatan model dan batas kondisi ditentukan selanjutkan dilakukan proses perhitungan.



Gambar 69. Tampilan memasukan koordinat titik nodal



Gambar 70. Tampilan menggabungkan titik nodal menjadi garis

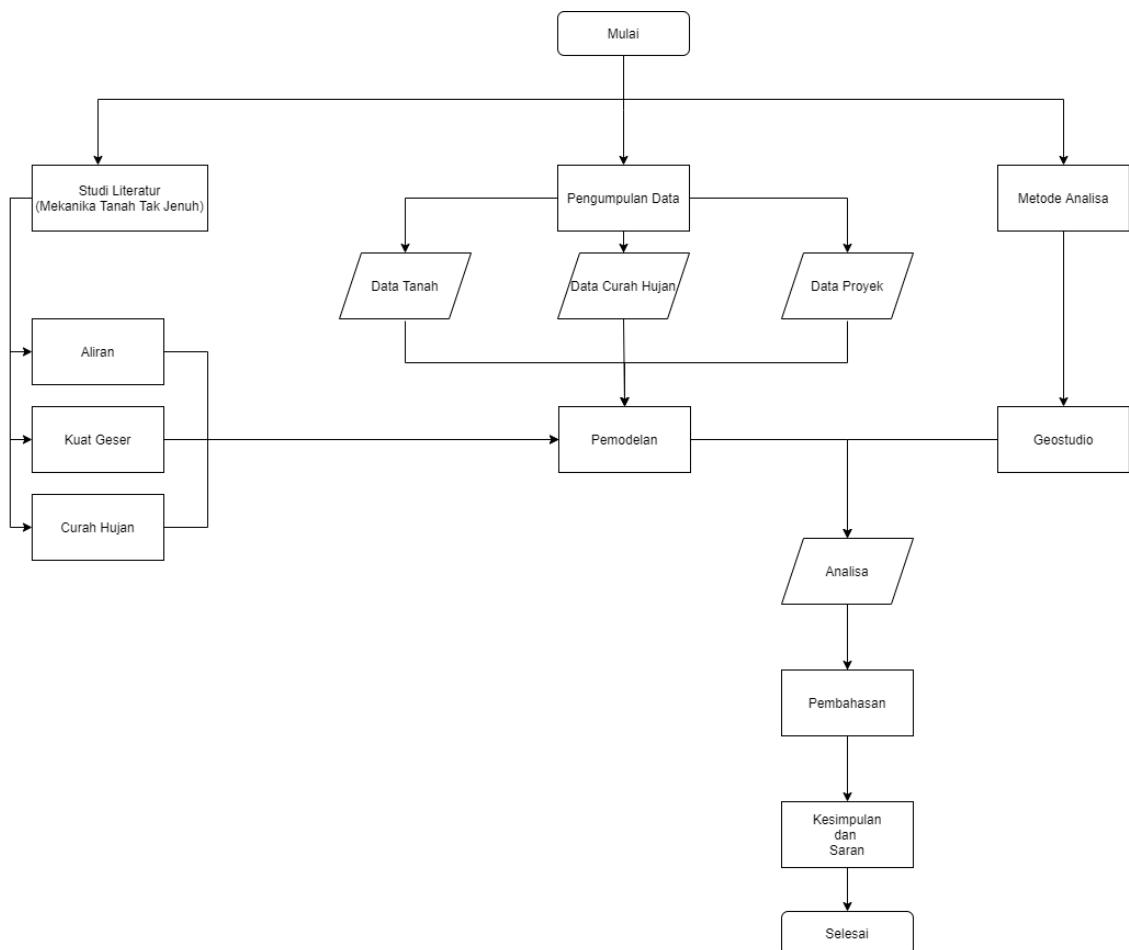


Gambar 71. Tampilan menentukan kluster dari data titik nodal

3.6 Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar diagram alir yang akan dilakukan selama proses penelitian dapat dilihat pada Gambar 72. Studi literatur mengenai mekanika tanah tak jenuh yang dipengaruhi adanya aliran serta mempengaruhi kuat geser yang semuanya bermula akibat adanya curah hujan. Berikutnya, mencari contoh untuk dapat dilakukan

analisa sebagai studi kasus dengan cara mengumpulkan data penyelidikan tanah, data curah hujan dan data proyek untuk dijadikan model analisa dengan bantuan program Gesotudio. Selanjutnya pembahasan dilakukan sebelumnya akhirnya didapatkan kesimpulan serta saran sebagai masukan. Gambar 73 memperlihatkan perkiraan waktu yang diperlukan selama penelitian berlangsung.



Gambar 72. Diagram Alir Penelitian

No.	Uraian Pekerjaan	Perkiraan Waktu Pelaksanaan (bulan)					
		1	2	3	4	5	6
1	Studi Literatur						
2	Pengumpulan data						
3	Pemodelan						
4	Analisa						
5	Pembahasan						
6	Kesimpulan dan saran						

Gambar 73. Perkiraan waktu pelaksanaan penelitian

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D6527. 2001. *Standard Test Method for Determining Unsaturated and Saturated Hydraulic Conductivity in Porous Media by Steady-State Centrifugation.*
- Aubertin, M., M. Mbonimpa, B. Bussière, and R. P. Chapuis. 2003. "A Model to Predict the Water Retention Curve from Basic Geotechnical Properties." *Canadian Geotechnical Journal* 40 (6): 1104–1122. doi:10.1139/t03-054.
- BARDEN, LAING, and GEORGE PAVLAKIS. 1971. "Air and Water Permeability of Compacted Unsaturated Cohesive Soil." *Journal of Soil Science* 22 (3): 302–318. doi:10.1111/j.1365-2389.1971.tb01618.x.
- Bathe, Klaus-Jürgen. 2006. *Finite Element Procedures*. Klaus-Jurgen Bathe.
- Benson, C.H., and M.M. Gribb. 1997. "Measuring Unsaturated Hydraulic Conductivity in the Laboratory and Field." In *Geotechnical Special Publication*.
- Bishop, A. W, I Alpan, G. H Blight, and I. B Donald. 1960. "Factors Controlling the Strength of Partly Saturated Cohesive Soils." In *Proceedings of the ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*.
- Bishop, A.W. 1959. "The Principle of Effective Stress." *Teknik Ukeblad* 39.
- Black, W. P. M and Croney, D. 1957. "Pore Water Pressure and Moisture Content Studies under Expérimental Pavements" 2: 94–103.
- Boulichev, V. 1936. "Apparatus for Testing Compressibility and Cap- Illary Properties of Soils." *Proc. 1st Int. Con\$ Soil Mech. Found. Eng* 2: 37–38.
- Bruce, R. R., and A. Klute. 1956. "The Measurement of Soil Moisture Diffusivity1." *Soil Science Society of America Journal* 20 (4): 458. doi:10.2136/sssaj1956.03615995002000040004x.
- Cassel, D K, A W Warrick, D R Nielsen, and J W Biggar. 1968. *Soil"Water Diffusivity Values Based Upon Time Dependent Soil-Water Content Distributions I.*
- Clothier, B E, D R Scotter, and A E Green. 1983. *Diffusivity and One-Dimensional Absorption Experiments 1.*
- Clough, R W. 1960. *The Finite Element Method in Plane Stress Analysis*. American Society of Civil Engineers.
<https://books.google.co.id/books?id=rfwFHQAACAAJ>.
- Corey, A. T. 1957. "Measurement of Water and Air Permeability in Unsaturated Soil." *Soil Science Society of America Journal* 21 (1): 7–10.

doi:10.2136/sssaj1957.03615995002100010003x.

- Courant, R. 1943. "Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations." *Bulletin of the American Mathematical Society*. doi:10.1090/S0002-9904-1943-07818-4.
- Croney, D, J D Coleman, and W P M Black. 1958. "Movement and Distribution of Water in Soil in Relation to Highway Design and Performance." *Water and Its Conduction in Soils, Highway Res Board, Special Report, Washington, DC*, no. 40.
- Darcy, Henry. 1856. "Histoire Des Foundataines Publique de Dijon." *Paris: Dalmont*, 590–594.
- Desai, Chandrakant S, and John F Abel. 1972. *Introduction to the Finite Element Method : A Numerical Method for Engineering Analysis*. New York (N.Y.) : Van Nostrand Reinhold. <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:001274785>.
- DOERING, E J. 1965. "SOIL-WATER DIFFUSIVITY BY THE ONE-STEP METHOD." *Soil Science* 99 (5). https://journals.lww.com/soilsci/Fulltext/1965/05000/SOIL_WATER_DIFFUSIVITY_BY_THE_ONE_STEP_METHOD.5.aspx.
- Eching, S. O., J. W. Hopmans, and O. Wendroth. 1994a. "Unsaturated Hydraulic Conductivity from Transient Multistep Outflow and Soil Water Pressure Data." *Soil Science Society of America Journal* 58 (3): 687–695. doi:10.2136/sssaj1994.03615995005800030008x.
- Eching, S O, J W Hopmans, and O Wendroth. 1994b. *Unsaturated Hydraulic Conductivity from Transient Multistep Outflow and Soil Water Pressure Data*.
- Eichenberger, John, Alessio Ferrari, and Lyesse Laloui. 2013. "Early Warning Thresholds for Partially Saturated Slopes in Volcanic Ashes." *Computers and Geotechnics* 49 (April). Elsevier: 79–89. doi:10.1016/j.compgeo.2012.11.002.
- Fredlund, D. G. 1979. "Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils." *Can Geotech J* 16 (1): 121–139. doi:10.1139/t79-011.
- Fredlund, D. G., and H. Rahardjo. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 12. doi:10.1016/0267-7261(93)90011-f.
- Fredlund, D. G, N. R Morgenstern, and R. A Widger. 1978. "The Shear Strength of Unsaturated Soils." *Canadian Geotechnical Journal* 321: 313–321.
- Fredlund, D G. 2019. "INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND Determination of Unsaturated Soil Property Functions for Engineering Practice."

- Fredlund, D G, Harianto Rahardjo, and M D Fredlund. 2012. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781118280492.
- Fredlund, D G, and A Xing. 1994. "Equations for the Soil-Water Characteristic 'Curve'." *J. Geotech Eng Div* 120 (5). doi:10.1061/(ASCE)1084-0606(1994)120:5(371).
- Fredlund, D G, Anqing Xing, and Shangyan Huang. 1994. *Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the ?Oil-Water Characteristic Curve*. J. Vol. 31. www.nrcresearchpress.com.
- Fredlund, Delwyn G., and Norbert R. Morgenstern. 1977. "STRESS STATE VARIABLES FOR UNSATURATED SOILS." *ASCE J Geotech Eng Div* 103 (5). doi:10.1061/(ASCE)1084-0606(1977)103:5(371).
- G.D. Aitchison. 1964. "Engineering Concepts of Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils." In *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*, 7–21.
- Gardner, W. R. 1956. "Calculation of Capillary Conductivity from Pressure Plate Outflow Data." *Soil Science Society of America Journal* 20 (3). doi:10.2136/sssaj1956.03615995002000030006x.
- GEO-SLOPE International Ltd. 2012. "Seepage Modeling with SEEP / W 2015." *Geostudio Helpfile*, no. July: 199. http://www.geo-slope.com.
- Green, R E, and J C Corey. 1971. *Calculation of Hydraulic Conductivity: A Further Evaluation of Some Predictive Methods I*.
- Green, T W, Z Paydar, H P Cresswell, and R J Drinkwater. 1998. *LABORATORY OUTFLOW TECHNIQUE FOR MEASUREMENT OF SOIL WATER DIFFUSIVITY AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY*.
- Hogentogler, A and Baber., E., S. 1941. "Discussion in Soil Water Phenomena," Proc. Hwy. Research Board." *Proc. Hwy. Research Board* 21: 452–465.
- Huang, Shangyan, D. G. Fredlund, and S. L. Barbour. 1998. "Measurement of the Coefficient of Permeability for a Deformable Unsaturated Soil Using a Triaxial Permeameter." *Canadian Geotechnical Journal* 35 (3): 426–432. doi:10.1139/t98-011.
- Jackson, Ray D. 1964. *Water Vapor Diffusion in Relatively Dry Soil: I. Theoretical Considerations and Sorption Experiments I*.
- Klute, A. 1972. "The Determination of the Hydraulic Conductivity and Diffusivity of Unsaturated Soils." *Soil Science*. doi:10.1097/00010694-197204000-00006.
- Klute, A., and C. Dirksen. 1986. "Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods." *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods* 9 (9): 687–734. doi:10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28.

- Koorevaar, P, G Menelik, and C Dirksen. 1983. *Element of Soil Physics*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Kunze, Raymond J., and Don Kirkham. 1962. "Simplified Accounting for Membrane Impedance in Capillary Conductivity Determinations." *Soil Science Society of America Journal* 26 (5): 421. doi:10.2136/sssaj1962.03615995002600050006x.
- Lu, Ning, and William J. Likos. 2004. *Unsaturated Soil Mechanics. Vadose Zone Journal*. Vol. 4. doi:10.2136/vzj2005.0002br.
- Mahmud, Mahadzer. 1996. "Spreadsheet Solutions To Laplace's Equation: Seepage And Flow Net." In .
- Matyas, E. L., and H. S. Radhakrishna. 1968. "Volume Change Characteristics of Partially Saturated Soils." *Geotechnique* 18 (4). doi:10.1680/geot.1968.18.4.432.
- Meerdink, J S, C H Benson, and M V Khire. 1996. *UNSATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF Two COMPACTED BARRIER SOILS*.
- Nielsen, D R, J Davidson, J Biggar, and R J Miller. 1964. "Water Movement through Panoche Clay Loam Soil." In .
- Nimmo, J R, J Rubin, and D P Hammermeister. 1987. *Unsaturated Flow in a Centrifugal Field' Measurement of Hydraulic Conductivity and Testing of Darcy's Law. WATER RESOURCES RESEARCH*. Vol. 23.
- Nimmo, John R, Katherine C Akstin, and Karen A Mello. 1992. *IMPROVED APPARATUS FOR MEASURING HYDRAULIC CONDUCTIVITY AT LOW WATER CONTENT. SOIL SCI. SOC. AM. J.* Vol. 56.
- Olsen, Harold W, Arthur T Willden, Nicholas J Kiusalaas, Karl R Nelson, and Eileen P Poeter. 1994. "Volume-Controlled Hydrologic Property Measurements in Triaxial Systems." <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70017424>.
- Ostahev, A. 1936. "The Law of Distribution of Moisture in Soils and Methods for the Study of Same." *Proc. 1st Int. Conf Soil Mech. Found. Eng* 1: 227–228.
- Pan, Hu, Yang Qing, and Pei-Yong Li. 2010. *Direct and Indirect Measurement of Soil Suction in the Laboratory*.
- Passioura, J B. 1976. *Determining Soil Water Diffusivities from One-Step Outflow Experiments. Aust. J. Soil Rex.* Vol. 15.
- Phene, C. J., G. J. Hoffman, and S. L. Rawlins. 1971. "Measuring Soil Matric Potential in Situ by Sensing Heat Dissipation within a Porous Body: I. Theory and Sensor Construction." *Soil Science Society of America Journal* 35 (1): 27–33. doi:10.2136/sssaj1971.03615995003500010015x.
- Rahardjo, Hariant. 2021. "Stress State Variables." <Https://Ntu->

*Sp.Primo.Exlibrisgroup.Com/Discovery/Delivery/65NTU_INST:65NTU_INS
T/12239566030005146?Lang=en.* Accessed May 18. https://ntu-sp.primo.exlibrisgroup.com/discovery/delivery/65NTU_INST:65NTU_INST/12239566030005146?lang=en.

- Richards, B. G. 1966. "The Significance of Moisture Flow and Equilibria in Unsaturated Soils in Relation to the Design of Engineering Structures Built on Shallow Foundations in Australia." In *Symposium on Permeability and Capillarity*. Atlantic City, N.J: American Society for Testing and Materials.
- Rose, D A. 1968. "Water Movement in Porous Materials {III}. Evaporation of Water from Soil." *Journal of Physics D: Applied Physics* 1 (12). {IOP} Publishing: 1779–1791. doi:10.1088/0022-3727/1/12/327.
- Salehzadeh, A., and A. H. Demond. 1994. "Apparatus for the Rapid Automated Measurement of Unsaturated Soil Transport Properties." *Water Resources Research* 30 (10): 2679–2690. doi:10.1029/94WR01495.
- Soilmoisture Equipment Corporation. 1985. *Commercial Publications*. Santa Barbara, CA.
- Stephens, D B. 1992. "A Comparison of the Calculated and Measured Unsaturated Hydraulic Conductivity of Two Uniform Soils in New Mexico." *Proc. International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*.
- Taylor, Brook. 1715. *Methodus Incrementorum Directa & Inversa / Auctore Brook Taylor. Methodus Incrementorum Directa & Inversa*. Londini: Typis Pearsonianis: prostant apud Gul. Innys.
- Terzaghi, K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. New York, NY.
- Terzaghi, Karl. 1936. "The Shear Resistance of Saturated Soils." *Proceedings for the 1st. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge* 1: 54–56.
- Tinjum, James M., Craig H. Benson, and Lisa R. Blotz. 1997. "Soil-Water Characteristic Curves for Compacted Clays." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123 (11). doi:10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:11(1060).
- Van der Veer, P. 1978. "Calculation Methods for Two-Dimensional Groundwater Flow." *Rijkswaterstaat Commun.*, no. 28, 1978, 172pp.
- van Genuchten, M. Th. 1980. "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils." *Soil Science Society of America Journal* 44 (5): 892–898.
doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- Wesley, Laurie. 2009. "Behaviour and Geotechnical Properties of Residual Soils and Allophane Clays." *Obras y Proyectos* 6: 5–10.

LAMPIRAN