

MEKANIKA TANAH

Tiopan H M Gultom
Christian Gerald Daniel



pena persada

PENERBIT CV. PENA PERSADA

MEKANIKA TANAH

Penulis:

Tiopan H M Gultom
Christian Gerald Daniel

ISBN : 978-623-315-553-3

Design Cover :

Retnani Nur Brilliant

Layout :

Eka Safitry

Penerbit CV. Pena Persada

Redaksi :

Jl. Gerilya No. 292 Purwokerto Selatan, Kab. Banyumas
Jawa Tengah

Email : penerbit.penapersada@gmail.com

Website : penapersada.com Phone : (0281) 7771388

Anggota IKAPI

All right reserved

Cetakan pertama : 2021

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang
memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa
izin penerbit

KATA PENGANTAR

Puji syukur pada Tuhan Yang Maha Esa, buku mekanika tanah ini dapat diselesaikan. Buku ini berisi materi kuliah untuk Mekanika Tanah, dikumpulkan bahan dari beberapa literatur dan juga menggunakan dokumentasi dari pelaksanaan laboratorium mekanika tanah.

Buku ini juga dilengkapi dengan beragam soal-soal di tiap BAB. Semoga buku ini dapat berguna bagi mahasiswa yang mendalami ilmu meknika tanah. Kritik dan saran untuk penyempurnaan dari tulisan ini masih sangat diharapkan.

Terima kasih untuk pak Christian Gerald yang telah membantu sehingga tersusunnya materi ajar ini, kepada anak-anak dan rekan-rekan kerja yang tak bisa disebutkan satu persatu.

Bekasi, 2021

Penulis.

DAFTAR ISI

MEKANIKA TANAH	i
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xii
BAB I KLASIFIKASI DAN IDENTIFIKASI PROPERTI TANAH	1
A. Siklus Batuan dan Asal Usul Tanah (B. M. Das 2013)	1
B. Agricultural and Engineering Soil (Smith 1998)	5
C. Definisi Teknik (engineering definition) (Smith 1998)	7
1. Batuan Beku	7
2. Batuan sedimen	7
D. Lempung (clay) (Smith 1998)	7
E. Klasifikasi Tanah (Smith 1998)	8
1. Klasifikasi Tanah di Lapangan (Smith 1998)	8
2. Klasifikasi Tanah di Labolatorium	9
F. Characterization of Soils Based on Particle Size (Budhu, Soil Mechanics and Foundations 2010)	14
G. Comparison of Coarse-Grained and Fine-Grained Soils for Engeneering Use (Budhu, Soil Mechanics and Foundations 2010)	16
H. Common Types of Soil (Smith 1998)	17
BAB II STRUKTUR TANAH	23
A. Sifat Dasar Tanah	23
1. Asal Usul Tanah	23
2. Sifat Plastis dan Kompaksi Tanah	23
B. Weight - Volume Relationship	24
1. Komposisi Tanah	24

2. Hubungan Berat Volume	25
C. Hubungan Antara Berat Volume, Angka Pori, Kadar Air, dan Berat Spesifik	28
D. Hubungan Antara Berat Volume, Porositas, dan Kadar Air	30
E. Various Unit - Weight Relationship	31
F. Kerapatan Relatif	33
G. Struktur Tanah	35
BAB III KONSISTENSI TANAH BUTIRAN HALUS	38
A. Consistency States of Fine-Grained Soils	38
B. Batas Cair	39
C. Batas Plastis	44
D. Batas Susut	47
E. Soil Classification Schemes	50
1. American Society for Testing and Materials and the United Soil Classification System (ASTM - USCS)	51
2. AASHTO Soil Classification System	51
BAB IV KOMPAKSI TANAH	57
A. Kegunaan dari Kompaksi	58
B. Theoretical Maximum Dry	58
C. Proctor Compaction Test: ASTM 698 dan ASTM 1557	60
D. Interpretation of Proctor Test Result	63
E. Field Compaction	73
F. Compaction Quality Control	75
1. Sand Cone: ASTM 1556	76
2. Balloon Test: ASTM D 2167	79
3. Nuclear Density Meter: ASTM 2922 & ASTM 5195	80
BAB V THE MOVEMENT OF WATER	86
A. Introduction	86
B. Prinsip Aliran dalam Media Berpori	86

C. Permeabilitas	89
1. Koefisien Permeabilitas	89
2. Uji Laboratorium Permeabilitas	89
3. In Situ Permeability Test	92
D. Aliran Air pada Tanah Tak Jenuh	96
E. Hubungan Empiris untuk Koefisien Rembesan	96
F. Aliran Air Secara Paralel Terhadap Lapisan Tanah	97
G. Aliran Air Normal Terhadap Tanah	98
H. Equivalent Hydraulic Conductivity	99
I. Aliran Air Secara Dua Dimensi pada Tanah	99
J. Flownet Sketching	99
1. Kriteria untuk Menggambar Flownet	99
2. Jaringan Aliran untuk Tanah Isotropik	100
K. Interpretasi dari Flownet	100
L. Contoh Soal	102
BAB VI KONSEP TEGANGAN EFEKTIF DAN TEGANGAN	
 MASSA TANAH	105
A. Pengertian	105
B. Tegangan Akibat Massa Tanah Itu Sendiri	105
1. Konsep Tegangan Efektif	105
2. Tekanan Pori Negatif Akibat Kenaikan Kapiler	107
C. State of Stress at a Point Due to External Forces	109
1. Model Konseptual Konsolidasi	109
2. Kasus Tanah Jenuh Sebagian	112
BAB VII COMPRESSIBILITY OF SOIL	115
A. Introduction	115
B. Konsep Dasar	115
C. Settlement of Free Draining Coarse Grained Soil	117
D. Settlement of Non-Free Draining Soils	119
E. Tes Konsolidasi Satu Dimensi	120

1. Jalur Drainase	121
2. Pembebanan Segera	122
3. Konsolidasi Primer	122
4. Perubahan Tegangan Efektif	122
5. Effects of Loading History	123
6. Penentuan Berbagai Parameter Konsolidasi	124
F. Hubungan antara Laboratorium dengan Lapangan	129
G. Calculation of Primary Consolidation Settlement	130
H. Secondary Compression	133
I. Settlement of Thick Soil Layers	133
J. Teori Konsolidasi Satu Dimensi	135
K. Typical Values of Consolidation Settlement	136
L. Monitoring Soil Settlement	137
BAB VIII PENYELIDIKAN TANAH	141
A. Pendahuluan	141
B. Tujuan Penyelidikan Tanah	141
C. Fase Dalam Penyelidikan Tanah	142
D. Program Eksplorasi Tanah	145
1. Metode Eksplorasi Tanah	146
2. Identifikasi Tanah di Lapangan	157
3. Jumlah dan Kedalaman Lubang Bor (Boreholes)	160
4. Pengambilan Sampel Tanah	162
5. Kondisi Air Tanah	163
6. Jenis - Jenis Pengujian In Situ atau Pengujian Lapangan	165
E. Pengujian Laboratorium Tanah	178
F. Jenis Pengujian Laboratorium	179
G. Laporan Tanah	180
DAFTAR PUSTAKA	182

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Lingkungan Terbentuknya Tanah.....	3
Gambar 1. 2 Macam-Macam Batuan	5
Gambar 1. 3 Klasifikasi dan sifat fisik tanah	6
Gambar 1. 4 Tanah Liat atau Lempung	8
Gambar 1. 5 Tumpukan Ayakan yang Digunakan di Laboratorium.....	10
Gambar 1. 6 Distribusi Ukuran Partikel Tanah	10
Gambar 1. 7 Alat Hidrometer yang Digunakan di Laboratorium Mekanika Tanah	12
Gambar 1. 8 Tabel Sistem Klasifikasi Tanah Versi USDA, <i>International, Unified, AASHTO dan Modified Wentworth</i>	14
Gambar 1. 9 <i>London Clay</i>	18
Gambar 1. 10 Tanah Liat Batu	18
Gambar 1. 11 <i>Moraines</i>	18
Gambar 1. 12 Tanah Lempung.....	19
Gambar 1. 13 Tanah Berpasir	20
Gambar 1. 14 Tanah Liat	20
Gambar 1. 15 Tanah Lanau.....	21
Gambar 1. 16 Tanah Gambut	21
Gambar 1. 17 Tanah Kapur.....	22
Gambar 2. 1 Struktur Tanah yang Berisi Butiran Padat (S), Air (W), dan Udara (A).....	24
Gambar 2. 2 Hubungan Antar Volume dan Massa Dalam Diagram Fase.....	25
Gambar 2. 3 Fase Diagram Tanah dengan Volume Partikel = 1	29
Gambar 2. 4 Ilustrasi Struktur Tanah Butir-Tunggal.....	36
Gambar 2. 5 Ilustrasi Struktur Tanah Sarang-Lebah.....	36
Gambar 2. 6 Ilustrasi Struktur Tanah Kohesif	36
Gambar 3. 1 <i>Consistency States</i>	38
Gambar 3. 2 Tes <i>Liquid Limit</i> : (a) Alat Untuk Uji <i>Liquid Limit</i> ; (b) Alat Pemutar Datar; (c) Alat Pengukur; (d) Tanah Sebelum di Tes; (e) Tanah Setelah di Tes.....	40
Gambar 3. 3 Alat Tes <i>Liquid Limit</i>	41

Gambar 3. 4 Menunjukkan Tepian Tanah pada Perangkat Cair: (a) Sebelum Pengujian; (b) Setelah Pengujian	41
Gambar 3. 5 Kurva Aliran untuk Penentuan Batas Cair Lumpur Lanau.....	42
Gambar 3. 6 (a) Fall Cone Test (b) Sebidang Penetrasi Kadar Air vs Cone untuk Penentuan Batas Cair	44
Gambar 3. 7 Penggulungan Massa Tanah Pada Pelat Kaca Tanah untuk Menentukan Batas Plastis (Cr. Braja M. Das, Henderson, Nevada)	45
Gambar 3. 8 Batas Cair Dan Plastik untuk Pencegah Tanah Liatambridge Gault-Ditambang Dengan Uji Kerucut.....	45
Gambar 3. 9 Definisi Batas Susut	48
Gambar 3. 10 Tes Batas Penyusutan: (a) Pat Tanah Sebelum Pengeringan; (b) Tanah Setelah Pengeringan	48
Gambar 3. 11 <i>Flowchart</i> Klasifikasi Tanah Berbutir Kasar, >50% Tertahan di Ayakan No. 200	52
Gambar 3. 12 <i>Flowchart</i> Klasifikasi Tanah Berbutir Halus.....	54
Gambar 4. 1 Grafik Berat Volume Kering Teoritis dan Kadar Air.....	59
Gambar 4. 2 <i>Standard Proctor Compaction Test</i>	60
Gambar 4. 3 Kurva Hasil Kompaksi dan Zero Air Voids.....	62
Gambar 4. 4 Pengaruh Pemadatan pada Struktur Tanah Lempung	64
Gambar 4. 5 Grafik Berat Volume Kering dan Kadar Air	65
Gambar 4. 6 Empat Tipe Kurva Pemadatan Menurut Lee dan Suedkamp (1972).....	65
Gambar 4. 7 Ilustrasi dari Spesifikasi Kompaksi di Lapangan	68
Gambar 4. 8 Hasil Percobaan <i>Proctor</i> (Kadar Air, Maksimum Dan Minimum Berat Jenis Tanah Kering)	71
Gambar 4. 9 Berat Volume Kering dan Kadar Air.....	73
Gambar 4. 10 Peralatan dengan <i>Static Vertical Force</i>	74
Gambar 4. 11 Gambar <i>Sand Cone</i>	76
Gambar 4. 12 Alat tes balon.....	79
Gambar 4. 13 <i>Nuclear Density Meter</i>	81
Gambar 4. 14 Grafik Contoh Soal Uji <i>Proctor</i>	82

Gambar 4. 15 Hasil uji <i>proctor</i> (berat volume kering dan kadar air)	83
Gambar 5. 1 Prinsip Aliran dalam Media Berpori.....	87
Gambar 5. 2 Nilai Koefisien Permeabilitas (m/s).....	89
Gambar 5. 3 Uji Rembesan dengan Cara Tinggi Konstan	90
Gambar 5. 4 Uji Rembesan dengan Cara Tinggi Jatuh	92
Gambar 5. 5 Uji Pemompaan dari Suatu Sumur Uji dalam Lapisan Tembus Air yang Didasari oleh Lapisan Kedap Air.....	93
Gambar 5. 6 Uji Pemompaan dari Suatu Sumur Uji yang Dibuat Sampai dengan Lapisan Tembus Air yang Diapit oleh Lapisan Kedap Air (Akifer Tertekan).....	94
Gambar 5. 7 Penentuan Koefisien dari Suatu Lubang Yang Dibuat dengan Alat Bor Auger.	95
Gambar 5. 8 Aliran Air Secara Paralel Terhadap Lapisan Tanah.....	97
Gambar 5. 9 Aliran Air Secara Vertikal Terhadap Tanah Berlapis.....	98
Gambar 5. 10 Contoh Soal <i>Flownet</i>	102
Gambar 6. 1 Contoh Soal Tegangan Efektif	106
Gambar 6. 2 Pipa Kapiler Kecil	108
Gambar 6. 3 Model Konseptual Konsolidasi.....	109
Gambar 7. 1 Tanah Ketika Diberikan Suatu Gaya.....	116
Gambar 7. 2 Grafik Perbandingan Tekanan dan Angka Pori	117
Gambar 7. 3 Grafik penurunan pada tanah berbutir halus.....	120
Gambar 7. 4 Alat Uji Konsolidasi Satu Dimensi	121
Gambar 7. 5 Grafik Tegangan – Angka Pori Semi Logaritma	124
Gambar 7. 6 Grafik Tegangan – Angka Pori Semi Logaritma	125
Gambar 7. 7 Grafik Akar Waktu – <i>Displacement Gauge Reading</i> ...	126
Gambar 7. 8 Grafik Waktu – <i>Displacement Gauge Reading</i> Semi Logaritma.....	127
Gambar 7. 9 Grafik e vs $\log \sigma'z$ Semi Logaritma	128
Gambar 7. 10 Grafik $e - t$ Semi Logaritma.....	129
Gambar 7. 11 Contoh Soal Konsolidasi Primer.....	131
Gambar 7. 12 Contoh Perhitungan Konsolidasi Primer	132

Gambar 8. 1 Ground Penetrating Radar (GPR).....	148
Gambar 8. 2 Pengujian Pergerakan Gelombang Seismik Secara (a) Refleksi dan (b) Refraksi.....	148
Gambar 8. 3 Profil Tanah pada MASW dalam Pengujian Seismik.....	149
Gambar 8. 4 Pengaturan pada Pengujian Seismik <i>Crosshole</i>	150
Gambar 8. 5 Pengujian Seismik <i>Downhole</i>	151
Gambar 8. 6 Profil Tanah pada Pengujian Resistivitas Listrik.....	152
Gambar 8. 7 Tes Pit	154
Gambar 8. 8 <i>Hand Auger</i>	154
Gambar 8. 9 <i>Power Auger</i>	155
Gambar 8. 10 Alat <i>Wash Boring</i>	155
Gambar 8. 11 Alat <i>Rotary Drill</i>	156
Gambar 8. 12 Alat <i>split spoon sampler</i>	156
Gambar 8. 13 Alat <i>Sonic Drilling</i>	157
Gambar 8. 14 Bentuk <i>Angular, Subangular, Rounded, dan</i> <i>Subrounded</i>	158
Gambar 8. 15 Bentuk <i>Flaky</i>	158
Gambar 8. 16 <i>Abutment</i> dan <i>Pier</i> Jembatan	162
Gambar 8. 17 <i>Cut Slope</i>	162
Gambar 8. 18 (a) Tabung Berdinding Tipis dan (b) <i>Split-Tube</i> <i>Sampler</i>	163
Gambar 8. 19 Akuifer Tertekan, Tidak Tertekan, Setengah Tertekan, <i>Aquiclude, dan Aquitard.</i>	165
Gambar 8. 20 Akuifer Tertekan dan Tidak Tertekan	165
Gambar 8. 21 Pengujian <i>Vane Shear Test (VST)</i>	166
Gambar 8. 22 Contoh Hasil Pengujian <i>Vane Shear Test</i>	167
Gambar 8. 23 Contoh Laporan Hasil SPT	172
Gambar 8. 24 <i>Plot</i> Nilai N dalam Menentukan Daya Kompaksi Tanah	173
Gambar 8. 25 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Resistansi Ujung Kerucut dan Rasio Gesekan.....	174
Gambar 8. 26 Contoh Hasil dari <i>Piezocoone (1 Mpa = 20.88 ksf)</i>	175
Gambar 8. 27 (a) CPT, (b) CPT listrik, (c) <i>Piezocoone</i> , (d) Pengaturan di Lapangan.....	175
Gambar 8. 28 Perkiraan Resistansi Kerucut Komposit	176
Gambar 8. 29 Pengujian Menggunakan <i>Pressuremeter</i>	177
Gambar 8. 30 <i>Flat Plate Dilatometer</i>	178

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Aturan dalam Proses Klasifikasi Tanah	9
Tabel 1. 2 <i>Soil Types, Description, and Average Grain Sized According to ASTM D 2487</i>	16
Tabel 2. 1 Berbagai Relasi dalam Menghitung Berat Isi Basah	31
Tabel 2. 2 Berbagai Relasi dalam Menghitung Berat Isi Kering	31
Tabel 2. 3 Berbagai Relasi dalam Menghitung Berat Isi Jenuh	32
Tabel 2. 4 Berbagai nilai e , w_{sat} , γ_d , untuk beberapa tanah dalam kondisi natural	33
Tabel 2. 5 Klasifikasi tanah berdasarkan Kerapatan Relatif.....	34
Tabel 3. 1 Nilai-Nilai Khas Batas Cair, Batas Plastis, dan Aktivitas Beberapa Mineral Lempung	46
Tabel 3. 2 Tabel Batas Susut Tanah Lempung	50
Tabel 3. 3 Tipe Tanah, Ukuran Butiran Rata - Rata, dan Deskripsi Berdasarkan AASHTO	52
Tabel 3. 4 a Klasifikasi AASHTO	54
Tabel 3. 5 Lanjutan Klasifikasi AASHTO	55
Tabel 4. 1 Hubungan Kadar Air dengan Berat Jenis	70
Tabel 4. 2 Hasil dari tes <i>proctor</i>	72
Tabel 4. 3 Perhitungan kadar air dan berat volume kering	72
Tabel 4. 4 Perbandingan Tipe Kompaksi Tergantung Jenis Tanah.....	75
Tabel 4. 5 Perbandingan <i>quality control</i> kompaksi.....	81
Tabel 7. 1 Perhitungan Penurunan Konsolidasi Primer	132
Tabel 7. 2 Tabel Nilai C_c Dan C_r yang Umum Dijumpai	136
Tabel 7. 3 Hubungan Empiris C_c dan C_r	137
Tabel 7. 4 Nilai C_v yang Umum Dijumpai.....	137
Tabel 7. 5 Tabel Alat Pengukuran Penurunan dan Jenis Penurunan	138
Tabel 8. 1 Pedoman Jumlah Minimum Lubang Bor Untuk Bangunan dan Subdivisi.....	160
Tabel 8. 2 Panduan Jumlah Minimum dan Kedalaman Minimum Pada Struktur	161
Tabel 8. 3 Faktor Koreksi C_R , C_S , C_B , dan C_E	169

Tabel 8. 4 Daya Kompaksi Tanah Berbutir Kasar Berdasarkan Nilai N	170
Tabel 8. 5 Konsistensi Tanah Berbutir Halus dalam Keadaan Jenuh Berdasarkan SPT	170
Tabel 8. 6 Tabel Nilai Rata - Rata Kedalaman	172
Tabel 8. 7 Pengujian-Pengujian Laboratorium untuk Menentukan Sifat Secara Fisik	179

MEKANIKA TANAH

BAB I

KLASIFIKASI DAN IDENTIFIKASI PROPERTI TANAH

A. Siklus Batuan dan Asal Usul Tanah (B. M. Das 2013)

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan organik yang telah melapuk (padat) yang disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel padat tersebut.

Berdasarkan asal-usulnya, Batuan dapat dibagi menjadi 3 tipe yaitu Batuan beku (*Igneous rocks*), Batuan sedimen (*Sedimentary rock*), dan batuan metamorf (*metamorphic rocks*).

Batuan beku terbentuk dari membekunya magma cair yang terdesak ke bagian dalam pada mantel bumi). Sesudah tersembul ke permukaan melewati kahan-rekahan pada kulit bumi (*fissure eruption*) atau melalui gunung berapi (*volcanic eruption*), sebagian dari magma cair tersebut mendingin di permukaan bumi dan membatu. Terkadang magma tersebut berhenti sebelum sampai ke permukaan bumi dan mendingin didalam kulit bumi dan membentuk batuan beku yang disebut plutonic rocks (*intrusive rocks*). Batuan beku yang telah beku tersebut pada suatu saat dapat timbul dikarenakan adanya proses erosi yang terus menerus terhadap lapisan batuan dan tanah yang terletak diatas batuan beku tersebut.

Prinsip Reaksi Bowen (1992) menggambarkan urutan terbentuknya mineral batuan akibat mendinginnya magma, cairan magma yang mendingin tersebut ukuran kristal berangsur membesar dan sebagian mengendap (pada suhu tinggi). Kristal batuan yang tetap tinggal dalam larutan magma cair kemudian bereaksi dengan kristal-kristal terlarut

yang lain dan membentuk mineral baru pada temperatur yang lebih rendah. Proses tersebut berlangsung terus sampai massa batuan cair tersebut membeku menjadi padat. Bowen menggolongkan reaksi pembentukan tersebut menjadi dua bagian:

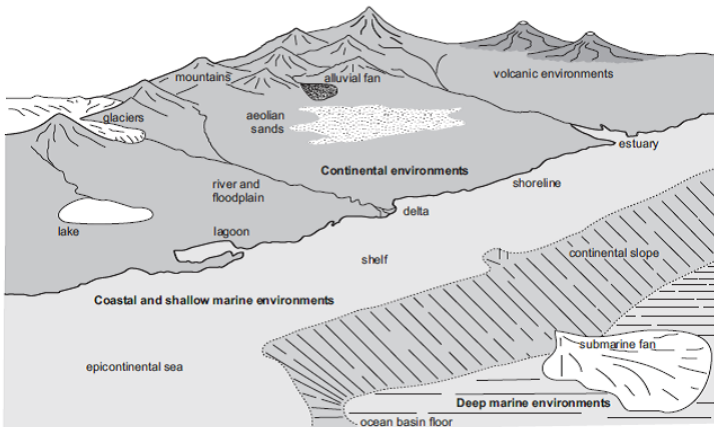
1. Rangkaian reaksi ferromagnesium tidak menerus, dimana mineral batuan tersebut berbeda komposisi kimia dan struktur kristalnya.
2. Rangkaian reaksi feldspar plagioclase menerus, dimana komposisi mineralnya berbeda namun memiliki struktur kristal yang sama.

Pelapukan adalah suatu proses terurainya batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil akibat proses mekanis dan kimia. Pelapukan mekanis dapat disebabkan oleh memuai dan menyusutnya batuan akibat perubahan panas dan dingin yang terus menerus (cuaca, matahari dan lain-lain) yang akhirnya dapat menyebabkan hancurnya batuan tersebut sama sekali. Bila temperature udara turun dibawah titik beku, air tersebut menjadi es dan volumenya memuai. Unsur-unsur fisik lainnya yang juga menyebabkan pecahnya batuan adalah es gletser (*glacier ice*), angin, air yang mengalir dikali atau sungai, dan gelombang air laut. Proses mekanis ini batuan yang besar akan terpecah-pecah menjadi bagian kecil-kecil tanpa terjadi perubahan dalam komposisi kimia dan mineral tersebut.

Tanah-tanah yang terbawa ketempat lain dapat diklarifikasikan menjadi beberapa kelompok, tergantung dari jenis pengangkut dan cara pengendapan (deposisi)-nya ditempat yang baru, sebagai berikut:

1. Tanah glacial = Terbentuk karena transportasi dan deposisi oleh gletser (sungai es)
2. Tanah alluvial = Terbentuk karena terangkut oleh air yang mengalir dan terdeposisi disepanjang aliran (Sungai).
3. Tanah lacustrine = Terbentuk karena deposisi di danau-danau yang terang.
4. Tanah marine =Terbentuk karena deposisi di laut.

5. Tanah acolian = Terbentuk karena terangkut dan terdeposisi oleh angin.
6. Tanah colluvial = Terbentuk oleh pergerakan tanah dari tempat asalnya karena gravitasi seperti yang terjadi pada saat tanah longsor.



Gambar 1. 1 Lingkungan Terbentuknya Tanah

Deposit dari tanah kerikil, pasir, lanau, dan lempung hasil pelapukan dapat menjadi lebih padat karena adanya tekanan lapisan tanah di atasnya dan adanya proses sedimentasi antar butiran oleh unsur-unsur sementasi seperti oksida besi, kalsit, *dolomite*, dan *quartz*. Unsur-unsur sementasi tersebut biasanya terbawa dalam larutan air tanah. Unsur-unsur tersebut mengisi ruang diantara buritan dan kemudian membentuk batuan sedimen, batuan tersebut disebut batuan sedimen detrital. *Conglomerate*, *breccia*, *sandstone*, *mudstone*, dan *shale* adalah contoh-contoh dari tipe batuan sedimen detrital tersebut.

Batuan sedimen dapat juga terbentuk melalui proses kimia, dan batuan yang terjadi karena cara ini diklasifikasikan sebagai batuan sedimen kimia. Batu kapur (*limestone*), gamping, *dolomite*, gipsum, *anhydrite*, dan lain lain termasuk dalam golongan ini gambar 1.2. Batu kapur (*limestone*) terbentuk terutama oleh kalsium karbonat yang berasal dari

senyawa kalsit (*calcite*) yang mengendap karena kegiatan organisme (di lautan) dan juga karena proses anorganik. *Dolomite* adalah kalsium-magnesium karbonat [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]. Batuan *dolomite* ini dapat terbentuk dari deposisi kimia bahan campuran karbonat atau dapat juga dari reaksi antara magnesium didalam air dengan batu kapur. Gypsum dan anhydrite adalah hasil dari penguapan air laut yang menghasilkan bahan endapan (terlarut) CaSO_4 . Kedua jenis batuan terakhir dinamakan dengan evaporites (hasil evaporasi=penguapan). Selain itu batuan garam juga berasal dari cara evaporites yang berasal dari air laut yang menguap.

Batuan sedimen mungkin juga mengalami pelapukan dan membentuk tanah-tanah sedimen (endapan), atau terkena proses metamorf dan berubah menjadi batuan metamorf.

Proses metamorf adalah proses perubahan komposisi dan tekstur dari batuan akibat panas dan tekanan tanpa pernah menjadi cair. Dalam proses metamorf, mineral-mineral baru terbentuk dan butir mineralnya terkena geseran sehingga membentuk tekstur batu metamorf yang berlapis-lapis. Granit, diorite, dan gabbro berubah menjadi gneiss pada proses metamorf tingkat tinggi. Shales dan mudstone berubah menjadi slates dan phylites pada peristiwa metamorf tingkat rendah. Schist adalah sejenis batuan metamorf yang memiliki tekstur berlapis dan dapat dilihat pada teksturnya ada bentuk kepingan atau lempengan dari mineral mika.

Batu marmer (pualam) terbentuk dari calcite dan dolomite yang mengalami proses kristalisasi ulang, butiran mineral marmer umumnya lebih besar dari zat pencampurnya. Quartzite adalah sejenis batuan metamorf yang terbentuk dari sandstone yang kaya akan mineral quartz. Bahan silika kemudian memasuki pori-pori batuan dan ruang diantara butiran pasir dan quartz, dan menjadi unsur sementasi diantara butiran. Quartzite adalah salah satu batuan yang sangat keras.

Pada tekanan dan panas yang besar sekali, batuan metamorf dapat mencari kembali menjadi magma dan mengalami proses batuan berulang kembali.



Gambar 1. 2 Macam-Macam Batuan

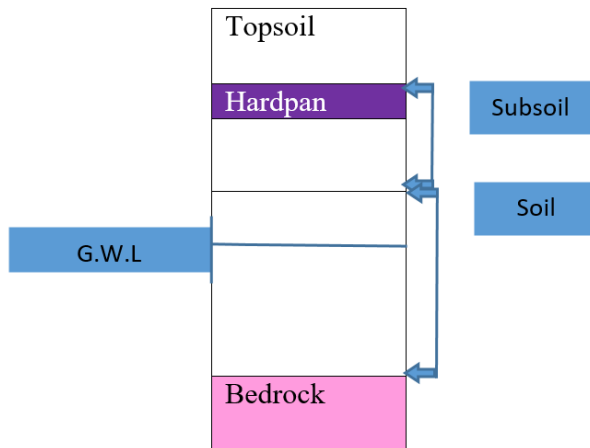
B. *Agricultural and Engineering Soil (Smith 1998)*

Di bidang teknik sipil, hampir semua proyek dibangun di atas, atau ke tanah. Apakah proyek itu struktur, jalan, terowongan, atau jembatan, sifat tanah di lokasi itu sangat penting bagi insinyur sipil. Rekayasa geoteknik adalah istilah yang diberikan kepada cabang teknik yang berkaitan dengan aspek-aspek yang berkaitan dengan tanah. Mekanika tanah adalah subjek dalam cabang ini yang melihat perilaku tanah dalam teknik sipil.

Insinyur geoteknis bukanlah satu-satunya profesional yang tertarik pada tanah; Fisikawan tanah, insinyur pertanian, petani dan tukang kebun semua tertarik pada jenis tanah yang mereka gunakan. Para pekerja ini, bagaimanapun, sebagian besar berkaitan dengan tanah lapisan organik yang ditemukan di permukaan tanah. Sebaliknya, insinyur geoteknis terutama tertarik pada tanah teknik yang ditemukan di bawah lapisan tanah atas.

Ini adalah sifat-sifat rekayasa dan perilaku tanah-tanah ini yang menjadi perhatian mereka.

1. Lapisan atas tanah organik, biasanya tidak lebih dari 500 mm, di mana humus sering ditemukan.
2. Subbagian tanah kerak bumi dipengaruhi oleh pengaruh cuaca saat ini, dan berbaring di antara lapisan tanah atas dan tanah yang tidak tersentuh di bawahnya.
3. *Hardpan* dalam iklim lembab asam humat dapat terbentuk oleh air hujan yang menyebabkan dekomposisi humus. Asam ini melepaskan zat besi dan alumina oksida ke lapisan bawah di mana mereka bertindak sebagai agen sementasi untuk membentuk bahan keras seperti batu. Hardpan sulit untuk digali dan, karena tidak melunak saat basah, memiliki ketahanan tinggi terhadap metode pengeboran tanah normal. Lapisan hardpan kadang-kadang ditemukan di persimpangan tanah lapisan atas dan tanah lapisan bawah.



Gambar 1. 3 Klasifikasi dan sifat fisik tanah

4. *Soil*. Endapan geologis lunak membentang dari lapisan tanah ke batuan dasar. Di beberapa tanah ada sejumlah sementasi antara butir yang mempengaruhi sifat fisik tanah. Jika sementasi ini menghasilkan material sekeras

batu, maka material tersebut digambarkan sebagai batuan. Aturan kasarnya adalah bahwa jika materialnya bisa digali dengan tangan atau perkakas tangan, maka itu adalah tanah.

5. *Ground Water* merupakan reservoir air bawah tanah. Permukaan atas air ini dapat terjadi pada setiap kedalaman dan dikenal sebagai muka air atau muka air tanah (GWL)

C. Definisi Teknik (*engineering definition*) (Smith 1998)

Dalam kelas geologi semua *item* yang berada dalam kerak bumi, dalam bentuk endapan keras ataupun lunak, Insinyur sipil membaginya menjadi dua yaitu batu dan tanah. Berdasarkan asal usulnya batu dibagi menjadi 3 tipe dasar yaitu, batuan beku (*igneous rock*), batuan sedimen (*sedimentary rock*), dan batuan metamorf (*metamorphic rock*)

1. Batuan Beku

Terbentuk dari membekunya magma cair yang terdesak ke bagian yang dalam sekali pada mantel bumi

2. Batuan sedimen

Berasal dari hasil pelapukan kerikil, pasir, lanau, dan lempung. Dapat menjadi keras karena adanya tekanan lapisan tanah dan adanya proses sementasi oleh unsur-unsur seperti oksidasi besi, kalsit.

D. Lempung (*clay*) (Smith 1998)

Sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis yang terbentuk lempeng-lempeng pipih dan merupakan partikel-partikel dari mika, mineral-mineral lempung (*clay mineral*), dan mineral sangat halus lainnya



Gambar 1. 4 Tanah Liat atau Lempung

E. Klasifikasi Tanah (Smith 1998)

Klasifikasi tanah memungkinkan para ilmuwan, terutama insiyur, untuk menempatkan tanah ke dalam salah satu dari beberapa group, berdasarkan pada sifat materialnya serta karakteristik dari tanah itu sendiri. Kelompok klasifikasi tersebut kemudian digunakan sebagai referensi.

Klasifikasi tanah dapat dilakukan di laboratorium atau di lapangan. Klasifikasi tanah yang dilakukan di lapangan biasanya hanya dengan mengandalkan kemampuan mengenali jenis tanah dengan melihat atau menyentuhnya. Sedangkan klasifikasi tanah yang dilakukan di laboratorium mencakup beberapa tes khusus.

1. Klasifikasi Tanah di Lapangan (Smith 1998)

Krikil, pasir, dan gambut mudah untuk dikenali. Tetapi, kesulitan mulai muncul saat penentuan apakah tanah tersebut masuk ke dalam tanah lanau, tanah berpasir atau tanah liat. Berikut adalah tabel yang berisikan beberapa peraturan untuk memudahkan dalam proses pengklasifikasian:

Tabel 1. 1 Aturan dalam Proses Klasifikasi Tanah

Tanah berpasir	Tanah Lanau	Tanah Lempung
Partikel individu terlihat	Beberapa partikel terlihat	Tidak ada partikel yang terlihat
Menunjukkan <i>dilatancy</i>	Menunjukkan <i>dilatancy</i>	Tidak menunjukkan <i>dilatancy</i>
Mudah dihancurkan	Mudah dihancurkan	Sulit untuk dihancurkan
Terasa berpasir	Terasa kasar	Terasa halus
Tidak plastis	Sedikit plastis	Plastis

Definisi:

Dilatancy: perubahan volume yang diamati ketika material mengalami deformasi geser. *Dilatancy test* dapat dilakukan dengan mengambil seongkang tanah dan digengam dengan telapak tangan. Jika saat ditekan terlihat air surut artinya tanah tersebut masuk ke dalam kategori tanah berpasir atau tanah lanau.

Plastis: Plastisitas adalah kemampuan butir-butir tanah untuk mengalami perubahan bentuk tanpa terjadi perubahan volume atau pecah.

Tanah lanau dan lempung organik biasanya memiliki warna abu-abu gelap atau biru kehitaman, serta mengeluarkan bau yang khas terutama pada sampel baru.

Kondisi tanah lempung sangat bergantung pada tingkat konsolidasinya. Pada suatu keadaan tanah lempung yang terkonsolidasi secara normal dapat dibentuk hanya dengan menggunakan tangan. Pada keadaan lainnya tanah lempung yang mengalami konsolidasi berlebihan tidak dapat dibentuk.

2. Klasifikasi Tanah di Labolatorium

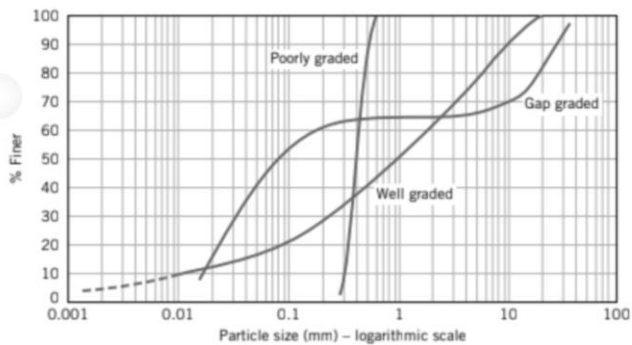
a. Ukuran Butiran dari Tanah Berbutir Kasar (Budhu, Soil Mechanics and Foundations 2010)

Distribusi ukuran partikel atau besar diameter rata-rata untuk tanah berbutir kasar - krikil dan pasir - diperoleh dengan menyaring tanah yang memiliki berat tertentu, menggunakan tumpukan ayakan yang di

susun berdasarkan ukuran diameter ayakan tersebut dari yang paling besar sampai yang paling kecil.



Gambar 1. 5 Tumpukan Ayakan yang Digunakan di Laboratorium



Gambar 1. 6 Distribusi Ukuran Partikel Tanah

Setiap ayakan diberi nama berdasarkan angka yang sesuai dengan banyaknya lubang per-*inch* atau besarnya ukuran lubang. Ayakan dengan lubang yang besar (25.4 mm sampai 6.35 mm) dinamai dengan besarnya ukuran lubang, sedangkan ayakan dengan

lubang yang kecil dinamai dengan angka. Diameter dari partikel pada saat proses penyaringan, biasanya disebut analisis ayakan, adalah ukuran maksimum dari sebuah partikel yang akan melewati lubang pada ayakan tertentu. Tanah kering yang akan diuji, mulai dituangkan dari ayakan yang paling atas atau ayakan dengan diameter terbesar, kemudian tumpukan ayakan tersebut di letakan pada mesin pengayak dan di getarkan. Setelah itu dengan perlahan, lepaskan satu per satu ayakan dari tumpukan ayakan. Tanah yang tertahan pada setiap ayakan ditimbang, dan dihitung persentasenya. Setelah menghitung persen tertahan pada setiap ayakan, dibuatlah grafik antara persen tertahan kumulatif dengan ukuran diameter masing-masing ayakan dengan skala logaritma seperti pada gambar 1.6. Grafik yang terbentuk disebut grafik distribusi ukuran partikel. Insiyur telah menemukan bahwa lebih mudah menggunakan skala logaritma untuk ukuran partikel karena perberdaan ukuran partikel dalam tanah dari yang paling besar ke yang paling kecil bisa lebih besar dari 10^4 .

Misalkan W_i adalah berat tanah yang tertahan pada ayakan ke- i (dilihat dari atas) dan W adalah berat tanah total, maka presentase tanah yang tertahan dapat dihitung dengan rumus:

$$\% \text{ tertahan di ayakan ke } - i = \frac{W_i}{W} \times 100$$

Persen tertahan kumulatif bisa dihitung dengan rumus:

$$\% \text{ tertahan kumulatif} = 100 - \sum_{i=1}^i \% \text{ tertahan di ayakan ke } - i$$

Untuk perhitungan ini bisa menggunakan massa dengan satuan gram atau kilogram daripada menggunakan berat.

b. Ukuran Butiran dari Tanah Berbutir Halus (Budhu, Soil Mechanics and Foundations 2010)

Proses penyaringan tidak dapat digunakan untuk tanah berbutir halus - lanau dan lempung - karena ukuran butirannya sangat kecil. Metode yang umum dilakukan di laboratorium untuk mengetahui distribusi ukuran partikel tanah berbutir halus adalah tes hidrometer. Tes hidrometer dilakukan dengan cara mencampur sebagian kecil dari tanah berbutir halus menjadi suatu larutan dan meneliti bagaimana larutan tersebut mengendap. Partikel yang besar akan mengendap lebih cepat dan diikuti dengan partikel yang lebih kecil. Ketika hidrometer diletakkan di dalam larutan, hidrometer akan tenggelam sampai gaya apung cukup untuk menyeimbangkan berat dari hidrometer.



Gambar 1. 7 Alat Hidrometer yang Digunakan di Laboratorium Mekanika Tanah

Tinggi hidrometer yang menonjol keluar dari larutan menunjukkan kerapatan. Jadi, sangat memungkinkan untuk mengkalibrasi hidrometer untuk mengetahui kerapatan larutan di waktu-waktu tertentu. Kalibrasi dari hidrometer dipengaruhi oleh suhu dan berat jenis dari tanah yang ada di dalam larutan.

Biasanya tes hidrometer dilakukan dengan mengambil tanah kering berbutir halus dengan jumlah yang sedikit (kira-kira 50 gram). Kemudian tanah tersebut di masukan ke dalam gelas ukur berukuran 1 liter dan ditambahkan air sampai volume larutan mencapai 1 liter. Sebelum gelas ukur diletakan di tempat dengan temperature yang konstan, gelas ukur berisi tanah dan air dikocok hingga tercampur sempurna. Hidrometer diletakan di dalam gelas ukur dan waktu mulai berjalan. Pada waktu-waktu tertentu, hidrometer dibaca. Diameter (cm) dari partikel pada waktu t_D (detik) dihitung menggunakan hokum Stoke, yaitu:

$$D = \sqrt{\frac{18\mu z}{(G_s - 1)\rho_w g t_D}}$$

Dimana μ adalah viskositas dari air (0.01 gram/cm.s at 20°C), z adalah kedalaman (cm), ρ_w adalah massa jenis dari air (1 gram/cm³), g adalah percepatan gravitasi (981 cm/s² dan G_s adlah berat jenis dari tanah. Tanah umumnya memiliki berat jenis sebesar 2.7.

Dalam pengaplikasian dari hukum Srokes, partikel di asumsikan jatuh bebas tanpa bertumbukan. Tetapi partikel mineral dari tanah itu seperti platel dan tumbukan antar partikel saat proses pengendapan tidak dapat dihindari. Selain itu, hukum Stokes juga hanya berlaku untuk aliran laminar dengan *Reynolds*

number lebih kecil dari 1. Hasil uji hidrometer cukup untuk memenuhi kebutuhan insinyur geoteknik. Untuk hasil yang lebih akurat dalam penentuan distribusi ukuran partikel tanah berbutir halus, metode lain yang lebih canggih tersedia (contohnya *light scattering method*). Garis putus-putus yang terlihat pada gambar 1.6 menunjukkan distribusi ukuran partikel untuk tanah berbutir halus.

F. *Characterization of Soils Based on Particle Size (Budhu, Soil Mechanics and Foundations 2010)*

Kurva pemeringkatan digunakan untuk klasifikasi tanah dari tanah. Berbagai sistem klasifikasi telah berevolusi selama bertahun-tahun untuk menggambarkan tanah berdasarkan distribusi ukuran partikelnya. Setiap sistem dikembangkan untuk tujuan rekayasa spesifik.

USDA	FINE EARTH											ROCK FRAGMENTS						
	Clay		Silt			Sand						Gravel			6" 150	10" 250	150 380	24" 600
	fine	co.	fine	co.	v.f.	f.	med.	co.	v.	co.	fine	medium	coarse	Cob- bles	stones	boulders		
millimeters:	0.0002	.002	.075	.425	.075	.150	.300	.600	1.18	2.0	4.75	9.5	19	76	250	600		
U.S. Standard Sieve No. (opening):			20	40	60	100	200	40	10	5	10	20	40	(3/4)	(3)	(10)	(24)	
International	Clay		Silt			Sand						Gravel			Stones			
millimeters:	.002 mm		.075 mm			.075 mm						2 mm			20 mm			
U.S. Standard Sieve No. (opening):						10						(3/4)			(3)			
Unified	Silt or Clay		Sand						Gravel			Cobbles	Boulders					
millimeters:			.074						2 mm			76	300 mm					
U.S. Standard Sieve No. (opening):			200						10			(3/4)	(3)					
AASHTO	Clay		Silt			Sand						Gravel or Stones			Broken Rock (angular), or Boulders (rounded)			
millimeters:	.005 mm		.074			2 mm						9.5			75 mm			
U.S. Standard Sieve No. (opening):			200			10						(3/8)			(3)			
Modified Wentworth	phi #:																	
millimeters:	.00025																	
U.S. Standard Sieve No.:	230 120 60 35 18 10 5																	

Gambar 1. 8 Tabel Sistem Klasifikasi Tanah Versi *USDA, International, Unified, AASHTO dan Modified Wentworth*

Beberapa sistem klasifikasi yang umum digunakan dalam mekanika tanah yakni sistem klasifikasi *United Standard Classification of Soil (USCS)*, *American Society for Testing and Materials (ASTM)* (modifikasi) dari sistem USCS), Asosiasi Pejabat Jalan Raya dan Transportasi Negara Amerika (*AASHTO*), dan *British Standards (BS)*.

Segmen ini sendiri menggunakan sistem ASTM. Tanah akan dipisahkan menjadi dua kategori. Salah satu kategori adalah tanah berbutir kasar yang digambarkan jika lebih dari 50% tanah lebih besar dari 0,075 mm (No. 200 saringan). Kategori lainnya adalah tanah berbutir halus yang digambarkan jika lebih dari 50% tanah lebih dari 0,075 mm. Tanah berbutir kasar dibagi lagi menjadi kerikil dan pasir, sementara berbutir halus tanah dibagi menjadi lanau dan lempung. Setiap jenis tanah – kerikil, pasir, lanau, dan tanah liat – diidentifikasi oleh ukuran bijian- bijian, seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.8. Tanah liat memiliki ukuran partikel kurang dari 0,002 mm. Tanah biasanya terdiri dari berbagai campuran ukuran partikel.

Pemilihan tanah untuk penggunaan tertentu mungkin tergantung pada bermacam-macam partikel yang dikandungnya. Dua koefisien telah ditentukan untuk memberikan panduan tentang pembedaan tanah berdasarkan distribusi partikel. Salah satunya adalah ukuran numerik keseragaman, yang disebut koefisien keseragaman C_u didefinisikan sebagai

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

di mana D_{60} adalah diameter partikel tanah yang 60% partikelnya lebih halus, dan D_{10} adalah diameter partikel tanah yang 10% partikelnya lebih halus. Kedua diameter ini diperoleh dari kurva analisa saringan. Sedangkan D_{30} adalah diameter partikel tanah yang 30% partikelnya lebih halus.

Tabel 1. 2 *Soil Types, Description, and Average Grain Sized According to ASTM D 2487*

<i>Soil type</i>	<i>Description</i>	<i>Average grain size</i>
<i>Gravel</i>	<i>Rounded and/or angular bulky hard rock, coarsely divided</i>	<i>Coarse: 75 mm to 19 mm Fine: 19mm to 4.75 mm</i>
<i>Sand</i>	<i>Rounded and/or angular hard rock finely divided</i>	<i>Coarse: 4.75mm to 2.0 mm (no. 10) Medium: 2.0 mm to 0.425 mm (no. 40) Fine: 0.425 mm to 0.075 mm (no. 200)</i>
<i>Silt</i>	<i>Particle size between clay and sand. Exhibit little or no strength when dried</i>	<i>0.075 mm to 0.002 mm</i>
<i>Clay</i>	<i>Particles are smooth and mostly clay minerals. Exhibit significant strength when dried: water reduces strength</i>	<i><0.002 mm</i>

G. Comparison of Coarse-Grained and Fine-Grained Soils for Engeneering Use (Budhu, Soil Mechanics and Foundations 2010)

Tanah berbutir kasar memiliki kapasitas penahan beban yang baik dan kualitas drainase yang baik, serta kekuatannya dan karakteristik perubahan volume tidak dipengaruhi secara signifikan oleh perubahan kondisi kelembaban di bawah pembebanan statis. Mereka praktis tidak bisa dimampatkan ketika padat, tetapi perubahan volume yang signifikan dapat terjadi ketika mereka longgar. Getaran menonjolkan perubahan volume pada tanah yang kasar dan berbutir kasar dengan mengatur ulang kain tanah menjadi konfigurasi padat.

Tanah berbutir halus memiliki kapasitas dukung beban yang buruk dibandingkan dengan tanah berbutir kasar. Sifat-sifat teknik tanah berbutir kasar dikontrol terutama oleh ukuran butir partikel dan susunan strukturalnya. Rekayasa sifat-sifat tanah berbutir halus dikendalikan oleh faktor mineralogi dan bukan ukuran butir. Lapisan tipis dari tanah berbutir halus, bahkan di dalam endapan tanah berbutir kasar, telah banyak bertanggung jawab kegagalan geoteknis, dan karena itu Anda perlu memberi perhatian khusus pada tanah berbutir halus.

Pada kali ini, kami akan membahas tanah sebagai bahan konstruksi dan fondasi. Kami tidak akan memperlihatkan tanah yang mengandung bahan organik atau bahan induk dari tanah, batu. Berikut merupakan Poin pentingnya yaitu:

1. Tanah berbutir halus memiliki area permukaan yang jauh lebih besar daripada tanah berbutir kasar dan bertanggung jawab atas perbedaan fisik dan mekanis utama antara tanah berbutir kasar dan berserat halus.
2. Sifat rekayasa dari tanah berbutir halus tergantung terutama pada faktor mineralogi.
3. Tanah berbutir kasar memiliki kapasitas penahan beban yang baik dan kualitas drainase yang baik kekuatan dan karakteristik perubahan volume tidak secara signifikan dipengaruhi oleh perubahan kelembaban kondisi.
4. Tanah berbutir halus memiliki kapasitas dukung beban yang buruk dan kualitas drainase yang buruk kekuatan dan karakteristik perubahan volume secara signifikan dipengaruhi oleh perubahan kelembaban kondisi.

H. *Common Types of Soil (Smith 1998)*

Tanah biasanya merupakan campuran seperti tanah liat berlumpur, lanau berpasir, dan lain-lain. Nama lokal sering digunakan untuk jenis tanah yang terjadi di suatu wilayah tertentu contoh London clay.



Gambar 1. 9 *London Clay*

Tanah liat batu adalah campuran tidak teratur dan tidak teratur dari batu-batu besar, cobbles, kerikil, pasir, lanau dan tanah liat asal glasial. meskipun namanya tanah liat batu tetapi bukanlah tanah liat murni.



Gambar 1. 10 Tanah Liat Batu

Moraines adalah kerikil dan endapan pasir yang berasal dari glasial.



Gambar 1. 11 *Moraines*

Lempung adalah campuran pasir, lanau dan tanah liat yang digabungkan untuk menghindari efek negatif dari masing-masing jenis. Tanah ini subur, mudah dikerjakan dan menyediakan drainase yang baik. Tergantung pada komposisi utama mereka, mereka bisa berupa lempung berpasir atau lempung. Karena tanah adalah keseimbangan sempurna dari partikel tanah, mereka dianggap sebagai teman tukang kebun terbaik, tetapi masih mendapat manfaat dari penambahan bahan organik tambahan.



Gambar 1. 12 Tanah Lempung

"*Fill*" adalah tanah yang digali dari area "*Borrow*" yang digunakan untuk mengisi lubang atau untuk pembangunan struktur timbunan tanah, seperti bendungan atau tanggul.

Tanah berpasir adalah tanah ringan, hangat, kering dan cenderung bersifat asam dan rendah nutrisi. Tanah berpasir sering dikenal sebagai tanah ringan karena tingginya proporsi pasir dan sedikit tanah liat (tanah liat lebih berat dari pasir). Tanah ini memiliki drainase air yang cepat dan mudah digunakan. Mereka lebih cepat melakukan pemanasan di musim semi daripada tanah liat tetapi cenderung mengering di musim panas dan menderita nutrisi rendah yang tersapu oleh hujan.



Gambar 1. 13 Tanah Berpasir

Tanah liat adalah tanah berat yang mendapat manfaat dari nutrisi tinggi. Tanah liat tetap basah dan dingin di musim dingin dan mengering di musim panas. Tanah-tanah ini terbuat dari lebih dari 25 persen tanah liat, dan karena ruang-ruang yang ditemukan di antara partikel-partikel tanah liat, tanah-tanah liat memiliki jumlah air yang tinggi. Tanah ini mengering perlahan dan membutuhkan waktu lebih lama untuk pemanasan di musim panas.



Gambar 1. 14 Tanah Liat

Tanah lanau adalah tanah yang ringan dan lembab dengan peringkat kesuburan tinggi. Karena tanah lanau berkompromi dengan partikel berukuran sedang, mereka dikeringkan dengan baik dan menahan kelembapan dengan baik.



Gambar 1. 15 Tanah Lanau

Tanah gambut adalah tanah yang kaya akan bahan organik dan mempertahankan kelembaban dalam jumlah besar. Jenis tanah ini sangat jarang ditemukan di kebun dan sering diimpor ke kebun untuk memberikan dasar tanah yang optimal untuk penanaman.



Gambar 1. 16 Tanah Gambut

Tanah kapur adalah tanah yang sangat basa karena kalsium karbonat atau kapur dalam strukturnya. Karena tanah ini bersifat basa, mereka tidak akan mendukung pertumbuhan tanaman ericaceous yang membutuhkan tanah masam untuk tumbuh.



Gambar 1. 17 Tanah Kapur

SOAL BAB 1

1. Jelaskan proses pembentukan tanah
2. Jelaskan tiga jenis mineral pembentuk tanah lempung
3. Jelaskan mengapa tanah lempung dapat bersifat ekspansif
4. Jelaskan perbedaan klasifikasi tanah lempung, lanau, pasir dan kerikil
5. Jelaskan signifikansi dari analisis saringan metode basah, serta perbedaannya dengan uji hydrometer.

BAB II

STRUKTUR TANAH

A. Sifat Dasar Tanah

1. Asal Usul Tanah

Tanah berasal dari batu yang terpecah/terkikis menjadi partikel-partikel yang kecil yang dikarenakan factor alam maupun buatan. Batu bisa terpecah/terkikis dikarenakan 2 hal, yaitu pengikisan fisik dan pengikisan kimiawi. Pengikisan fisik bisa terjadi karena gaya luar yang bekerja terhadap permukaan batu sehingga dengan perlahan mengikis batu ataupun karena perubahan suhu ekstrim yang menyebabkan pemuaian dan penyusutan yang relatif cepat sehingga atraksi antara batu melemah. Pengikisan kimiawi bisa terjadi karena adanya senyawa kimia yang dapat merubah komposisi mineral dari pada batu tersebut. Hasil pengikisan fisik adalah tanah dengan mineral yang sama seperti mineral pada batu aslinya, sedangkan hasil dari pengikisan kimiawi adalah tanah dengan mineral baru, sesuai reaksi kimiawi antara mineral batunya dan kimia yang mengikisnya.

2. Sifat Plastis dan Kompaksi Tanah

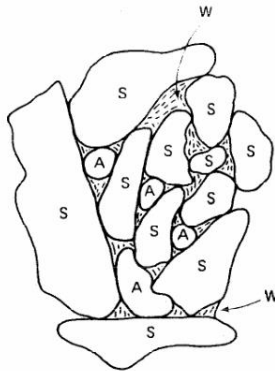
Tanah memiliki 2 sifat dasar, yaitu sifat plastis dan kompaksi. Sifat Plastis adalah sifat tanah dimana tanah dapat mengalami deformasi permanen. Sifat plastis sebuah tanah dapat dipengaruhi dengan kadar air sebuah tanah. Setiap tanah memiliki batas plastis yang dapat diukur dengan pengujian di lab. Sifat plastis sebuah tanah harus diketahui untuk mengukur risiko sebuah tanah dapat berdeformasi pada saat dan setelah pembangunan sebuah struktur. Tanah juga memiliki sifat kompaksi, dimana tanah dapat dipadatkan, sehingga memiliki rasio berat-volume yang lebih besar. Banyaknya sebuah tanah dapat dipadatkan juga dapat diukur dengan tes konsolidasi dan

uji kompaksi dimana uji konsolidasi melihat seberapa banyak tanah tersebut dapat dipadatkan saat diberikan beban terhadap waktu sedangkan uji kompaksi mengukur seberapa optimum sebuah tanah dapat dipakai. Mengetahui seberapa sebuah tanah bisa dipadatkan sangat penting karena makin tanahnya padat, maka makin stabil sebuah tanah, sehingga tanah tersebut tidak berubah elevasi saat maupun setelah pembangunan sebuah struktur.

B. *Weight - Volume Relationship*

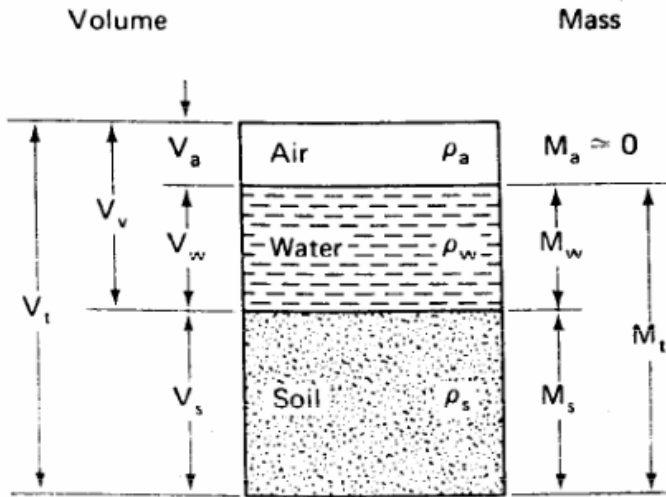
1. Komposisi Tanah

Tanah umumnya terdiri dari 3 hal, yaitu partikel padat, partikel air, dan partikel udara, seperti pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Struktur Tanah yang Berisi Butiran Padat (S), Air (W), dan Udara (A)

Volume pori terdiri dari volume air dan volume udara, serta berat udara dianggap 0 karena tidak signifikan. Jika secara imajinatif, komposisi tanah dapat diatur secara rapi, maka akan didapatkan diagram tanah serta hubungan massa dan volumennya seperti di bawah ini.



Gambar 2. 2 Hubungan Antar Volume dan Massa Dalam Diagram Fase

2. Hubungan Berat Volume

Dengan melihat komposisi tanah, didapatkan beberapa rasio yang sangat penting dalam perhitungan mekanika tanah.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1)$$

Angka pori (e) adalah rasio volume pori (V_v) terhadap volume tanah kering (V_s). Angka pori biasa dalam bentuk desimal dan walaupun bisa berkisaran antara 0 dan ∞ , pasir memiliki angka pori sekitar 0.4 - 1.0 sedangkan tanah liat memiliki angka pori sekitar 0.3 - 1.5.

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (2)$$

Porositas (n) adalah rasio antara volume pori (V_v) dengan volume tanah (V). Porositas biasa ditampilkan dalam persentase dengan kisaran angka antara 0% - 100%. Dengan menggabungkan angka pori dan porositas, bisa ditarik konklusi sebagai berikut:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (3)$$

dan

$$e = \frac{n}{n-1} \quad (4)$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (5)$$

Derajat kejenuhan (S) adalah rasio dari volume air dalam tanah (V_w) dan volume pori (V_v). Derajat kejenuhan biasa ditampilkan dalam bentuk persentase. Derajat kejenuhan berfungsi untuk melihat seberapa air memenuhi pori di dalam sebuah tanah. Jika derajat kejenuhan 0% maka tanah itu kering, tapi jika 100%, maka tanah itu jenuh.

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100\% \quad (6)$$

Kadar air (w) adalah rasio antara massa air dalam tanah (M_w) dengan massa tanah kering (M_s). Biasa ditampilkan sebagai persentase.

Ada juga perbandingan antara massa dan volume, atau massa jenis. Beberapa diantaranya adalah:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M_s + M_w}{V} \quad (7)$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (8)$$

$$\rho_w = \frac{M_w}{V_w} \quad (9)$$

Dimana:

ρ = massa jenis tanah

ρ_s = massa jenis tanah kering

ρ_w = massa jenis air

Dan ada juga:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (10)$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + M_w}{V} (V_a = 0, S = 100\%) \quad (11)$$

$$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w \quad (12)$$

Dimana:

ρ_d = massa jenis tanah kering dibandingkan volume tanah

ρ_{sat} = massa jenis tanah saat jenuh

ρ' = massa jenis tanah yang tenggelam

Untuk perhitungan, bisa juga dipakai berat jenis yang didefinisikan:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} \quad (13)$$

Dimana:

γ = berat jenis tanah

W = berat tanah

W_s = berat tanah kering

W_w = berat air

V = volume tanah

Dengan relasi antara berat jenis dan massa jenis adalah:

$$\gamma = \rho * g \quad (14)$$

Dimana:

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

dan

$$\gamma = \frac{W_s}{V_s} \quad (15)$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{W_s}{V} \quad (17)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V} (V_a = 0, S = 100\%) \quad (18)$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (19)$$

Dimana:

γ_d = berat jenis tanah kering dibandingkan volume tanah

γ_{sat} = berat jenis tanah saat jenuh

γ' = berat jenis tanah yang tenggelam

C. Hubungan Antara Berat Volume, Angka Pori, Kadar Air, dan Berat Spesifik

Apabila volume butirannya sama dengan 1 maka volume dari pori sama dengan angka pori.

Berat butiran padat dan air dapat dinyatakan sebagai:

$$W_s = G_s \gamma_w \quad (20)$$

$$W_w = \omega W_s = \omega G_s \gamma_w \quad (21)$$

Dimana:

G_s = berat spesifik butiran padat

ω = kadar air

Dengan menggunakan definisi berat volume dan berat volume kering dapat dituliskan:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s \gamma_w + \omega G_s \gamma_w}{1 + e} = \frac{(1 + \omega) G_s \gamma_w}{1 + e} \quad (22)$$

Dan

$$\gamma d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \quad (23)$$

Volume yang ditempati air adalah:

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{\omega G_s \gamma_w}{\gamma_w} = \omega G_s \quad (24)$$

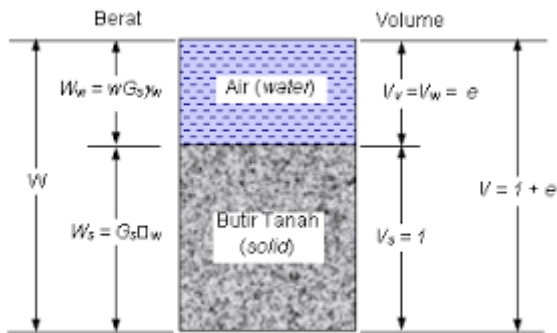
Dari persamaan ini maka derajat kejenuhan dapat ditulis:

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\omega G_s}{e} \quad (25)$$

Apabila contoh tanah tersebut ruang porinya terisi penuh oleh air maka derajat kejenuhannya = 100%

Berat volume tanah yang jenuh air dapat ditentukan dengan cara yang sama seperti menentukan berat volume.

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s \gamma_w + e \gamma_w}{1+e} = \frac{(G_s + e) \gamma_w}{1+e} \quad (26)$$



Gambar 2. 3 Fase Diagram Tanah dengan Volume Partikel = 1

D. Hubungan Antara Berat Volume, Porositas, dan Kadar Air

Ketika $V = 1$ maka:

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Dalam hal ini nilai $n =$ nilai V_v , sehingga $V_s = 1 - n$.

Berat butiran padat (W_s) dan berat air (W_w) dapat dinyatakan sebagai:

$$W_s = G_s \gamma_w (1 - n) \quad (27)$$

$$W_w = \omega G_s = \omega G_s \gamma_w (1 - n) \quad (28)$$

Jadi berat volume kering dapat didefinisikan:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s \gamma_w (1 - n)}{1} = G_s \gamma_w (1 - n) \quad (29)$$

Berat volume tanah dapat didefinisikan:

$$\gamma = G_s \gamma_w (1 - n)(1 + \omega) \quad (30)$$

Ketika tanah tersebut adalah tanah yang jenuh air maka:

$$\gamma_{sat} = [(1 - n)G_s + n] \gamma_w \quad (31)$$

Kadar air dapat dinyatakan sebagai:

$$\omega = \frac{n}{(1 - n)G_s} \quad (32)$$

E. Various Unit - Weight Relationship

Tabel 2. 1 Berbagai Relasi dalam Menghitung Berat Isi Basah

Moist unit weight (γ)	
Given	Relationship
w, G_s, e	$\frac{(1 + w)G_s\gamma_w}{1 + e}$
S, G_s, e	$\frac{(G_s + Se)\gamma_w}{1 + e}$
w, G_s, S	$\frac{(1 + w)G_s\gamma_w}{1 + \frac{wG_s}{S}}$
w, G_s, n	$G_s\gamma_w(1 - n)(1 + w)$
S, G_s, n	$G_s\gamma_w(1 - n) + nS\gamma_w$

Tabel 2. 2 Berbagai Relasi dalam Menghitung Berat Isi Kering

Dry unit weight (γ_d)	
Given	Relationship
γ, w	$\frac{\gamma}{1 + w}$
G_s, e	$\frac{G_s\gamma_w}{1 + e}$
G_s, n	$G_s\gamma_w(1 - n)$
G_s, w, S	$\frac{G_s\gamma_w}{1 + \left(\frac{wG_s}{S}\right)}$
e, w, S	$\frac{eS\gamma_w}{(1 + e)w}$
γ_{sat}, e	$\gamma_{\text{sat}} - \frac{e\gamma_w}{1 + e}$
γ_{sat}, n	$\gamma_{\text{sat}} - n\gamma_w$
γ_{sat}, G_s	$\frac{(\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w)G_s}{(G_s - 1)}$

Tabel 2. 3 Berbagai Relasi dalam Menghitung Berat Isi Jenuh

Saturated unit weight (γ_{sat})	
Given	Relationship
G_s, e	$\frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e}$
G_s, n	$[(1 - n)G_s + n]\gamma_w$
G_s, w_{sat}	$\left(\frac{1 + w_{sat}}{1 + w_{sat}G_s}\right)G_s\gamma_w$
e, w_{sat}	$\left(\frac{e}{w_{sat}}\right)\left(\frac{1 + w_{sat}}{1 + e}\right)\gamma_w$
n, w_{sat}	$n\left(\frac{1 + w_{sat}}{w_{sat}}\right)\gamma_w$
γ_d, e	$\gamma_d + \left(\frac{e}{1 + e}\right)\gamma_w$
γ_d, n	$\gamma_d + n\gamma_w$
γ_d, G_s	$\left(1 - \frac{1}{G_s}\right)\gamma_d + \gamma_w$
γ_d, w_{sat}	$\gamma_d(1 + w_{sat})$

Tabel 2. 4 Berbagai nilai e , w_{sat} , γ_d , untuk beberapa tanah dalam kondisi natural

Jenis Tanah	e	w_{sat} (%)	γ_d (kN/m ³)
Pasir seragam lepas	0,8	30	14,5
Pasir seragam padat	0,45	16	18
Pasir angular lepas	0,65	25	16
Pasir angular padat	0,4	15	19
Tanah liat kaku	0,6	21	17
Tanah liat lunak	0,9-1,4	30-50	11,5-14,5
<i>Loess</i>	0,9	25	13,5
Tanah liat organic lunak	2,5-3,2	90-120	6-8
Serbuk Glasial	0,3	10	21

F. Kerapatan Relatif

Kerapatan relatif menunjukkan rapat-lepasnya sebuah tanah yang berbutir pada lapangan pekerjaan dan didefinisikan sebagai

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

Dimana:

D_r = Kerapatan Relatif

e_{max} = angka pori pada tanah dalam kondisi paling lepas

e_{min} = angka pori pada tanah dalam kondisi paling padat

e = angka pori pada lapangan

Kerapatan relatif berkisar antara 0%, tanah yang sangat lepas, sampai 100%, tanah yang sangat padat. Klasifikasi tanah terhadap kerapatan relatif bisa dilihat di Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Klasifikasi tanah berdasarkan Kerapatan Relatif

Kerapatan Relatif (%)	Klasifikasi
0 - 15	Sangat Lepas
15 - 50	Lepas
50 - 70	Sedang
70 - 85	Padat
85 - 100	Sangat Padat

Kerapatan relatif bisa juga didefinisikan dengan porositas yakni:

$$D_r = \frac{(1 - n_{min})(n_{max} - n)}{(n_{max} - n_{min})(1 - n)}$$

Dimana:

n_{min} = porositas pada tanah dalam kondisi paling lepas

n_{max} = porositas pada tanah dalam kondisi paling padat

n = porositas pada lapangan

Dengan memakai definisi γ_d kerapatan relative juga bisa didefinisikan sebagai:

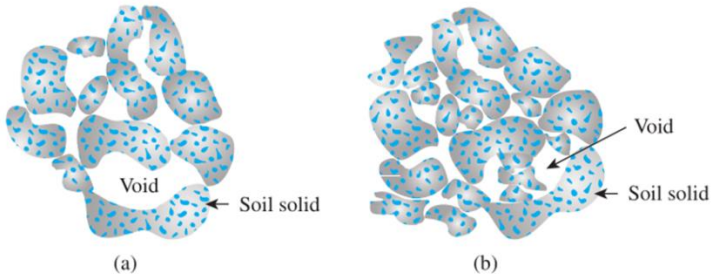
$$D_r = \frac{\left[\frac{1}{\gamma_{d(min)}} \right] - \left[\frac{1}{\gamma_d} \right]}{\left[\frac{1}{\gamma_{d(min)}} \right] - \left[\frac{1}{\gamma_{d(max)}} \right]} = \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{d(min)}}{\gamma_{d(max)} - \gamma_{d(min)}} \right] \left[\frac{\gamma_{d(max)}}{\gamma_d} \right]$$

Dimana:

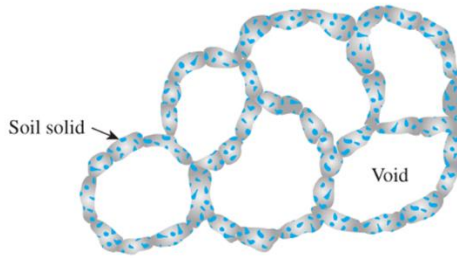
γ_d	= berat jenis tanah kering
$\gamma_{d(\min)}$	= berat jenis tanah kering pada kondisi paling lepas (saat e_{\max})
$\gamma_{d(\max)}$	= berat jenis tanah kering pada kondisi paling padat (saat e_{\min})

G. Struktur Tanah

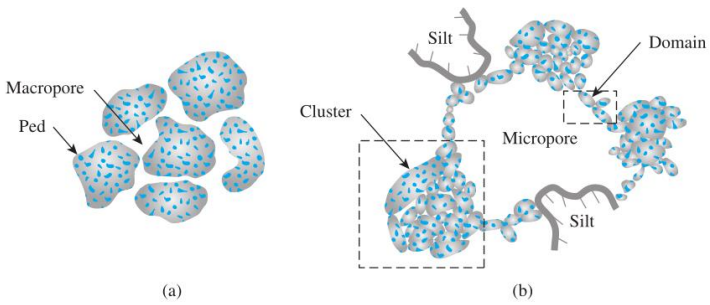
Struktur tanah di tentukan berdasarkan bentuk geometris dari tanah tersebut dan bisa dipengaruhi dengan bentuk, ukuran, dan komposisi mineral dari partikel tanah serta sifat dan komposisi air pada tanah. Secara umum, struktur tanah dibagi menjadi 2 klasifikasi, yakni tak berkohesi dan kohesif. Tanah tak berkohesi bisa dibagi lagi menjadi 2 kelompok besar, yakni butir-tunggal dan sarang-lebah. Dalam struktur tanah tak berkohesi, tidak ada gaya antar partikel sehingga hanya gaya geser antar partikel yang menyatukan tanah. Tanah butir-tunggal adalah tanah perkumpulan tanah yang berdempetan dan hanya ditahan oleh gaya gesek antar partikel, namun bias dipadatkan lagi dengan menggerakkan partikel tanah sehingga lebih teratur. Dalam butir-tunggal, angka pori bisa memiliki kisaran yang cukup luas. Tanah sarang-lebah, beda dengan butir tunggal, memiliki pori yang besar dalam tanah tersebut sehingga angka pori pada tanah ini cukup besar. Tanah kohesif memiliki gaya Tarik menarik antar partikel dan seringkali terjadi di tanah lempung, dimana lebih dari 50% dari partikel tanah lebih kecil dari 0,002. Dalam tanah berkohesi, partikel akan mengalami gaya Tarik-mendorong antar partikel sehingga yang saling menarik akan berkumpul dan yang saling mendorong akan membentuk sebuah pori. Partikel-partikel yang saling menarik dan berkumpul disebut domain, perkumpulan domain adalah cluster, dan perkumpulan cluster adalah ped. Domain dan cluster hanya bisa dilihat melalui mikroskop karena sangat kecil, namun ped bisa dilihat secara kasat mata.



Gambar 2. 4 Ilustrasi Struktur Tanah Butir-Tunggal



Gambar 2. 5 Ilustrasi Struktur Tanah Sarang-Lebah



Gambar 2. 6 Ilustrasi Struktur Tanah Kohesif

SOAL BAB 2

1. Apakah sebuah profil tanah dapat memiliki
2. Sebuah profil tanah memiliki properti sebagai berikut:
 $G_s = 2.74$
 $\gamma = 20.6 \text{ kN/m}^3$
 $\omega = 16.6\%$
Tentukan nilai: (i) berat isi kering, (ii) angka pori, (iii) porositas, (iv) derajat kejenuhan.
3. Diketahui berat kering in-situ suatu sampel tanah pasir adalah 1.72 Mg/m^3 . Jika diketahui nilai berat kering maksimum dan minimum tanah tersebut adalah 1.81 dan 1.54 Mg/m^3 , hitunglah nilai kepadatan relative dari tanah pasir tersebut.
4. Diketahui suatu sampel tanah berpasir memiliki nilai angka pori maksimum dan minimum sebesar 0.72 dan 0.46 . Jika diketahui $G_s = 2.68$ dan kadar air = 11% dan kepadatan relative = 82% , tentukan nilai berat isi basah tanah ini.
5. Diketahui nilai angka pori suatu sampel tanah dalam kondisi alaminya adalah 0.92 . Setelah proses pemadatan, diketahui nilai angka porinya mengalami perubahan menjadi 0.65 . Jika nilai kadar air tidak mengalami perubahan, maka tentukan: (i) persentase pengurangan total volume tanah akibat pemadatan, (ii) persentase perubahan nilai berat isi, dan (iii) persentase perubahan derajat kejenuhan.

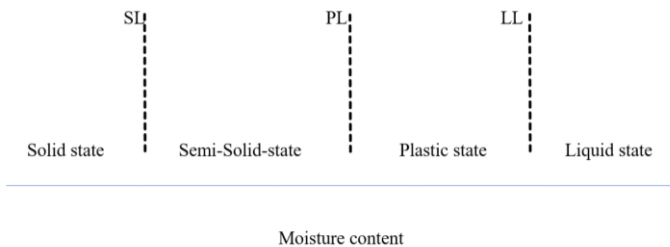
BAB III

KONSISTENSI TANAH

BUTIRAN HALUS

A. *Consistency States of Fine-Grained Soils*

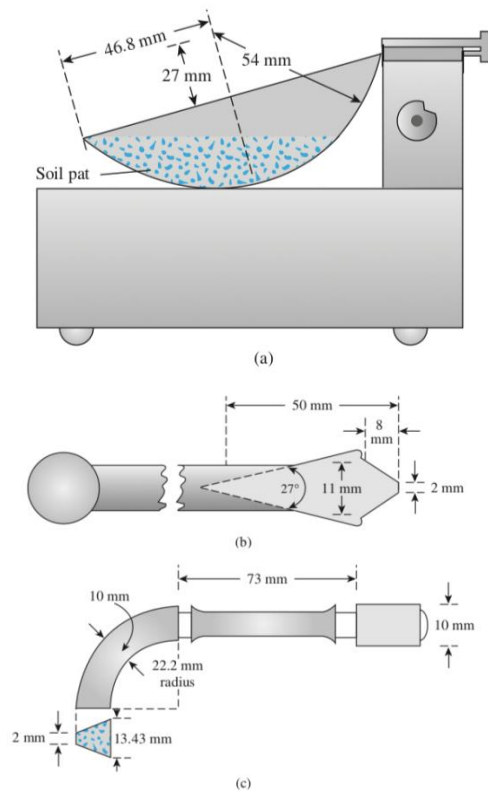
Perubahan volume dan aliran dari butiran halus tanah tergantung dari kadar air tanah tersebut. Pada saat kadar air tanah tinggi, tanah mempunyai sifat cair sedangkan pada saat kadar air rendah tanah mempunyai sifat padat. Jika tanah memiliki kadar air yang tidak tinggi dan juga rendah, maka tanah tersebut sedang mengalami perubahan dari sifat plastis menjadi semi padat seiring kadar air menurun. Kondisi fisik dari campuran tanah dan air ini selalu konsisten. Konsistensi adalah resistensi aliran yang berhubungan dengan gaya atraksi dari partikel dan lebih mudah untuk dilihat secara fisik dibandingkan dengan cara kuantitatif (Yong dan Warkentin, 1966). Gambar 3.1 menunjukkan perbedaan konsistensi campuran air dan tanah dengan butiran halus.

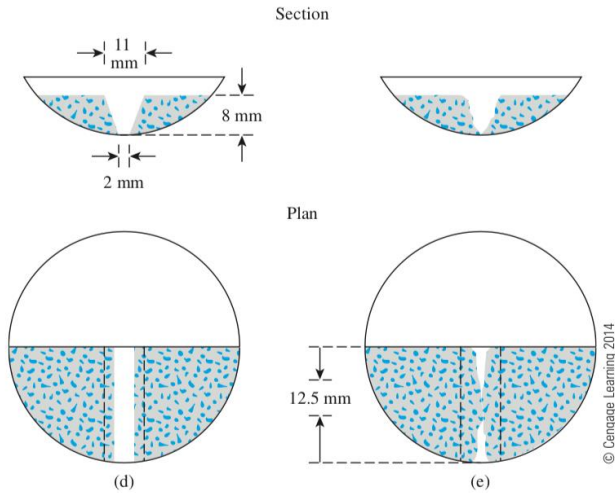


Gambar 3. 1 *Consistency States*

B. Batas Cair

Skema diagram tentang *liquid limit* atau batas cair ditunjukkan pada figur 3.2a. Hal ini membutuhkan sebuah *brass cup* dan dasar yang terbuat dari karet yang keras. *Brass cup* tersebut nantinya dijatuhkan dengan memutar tuasnya. Untuk melakukan percobaan ini, pertama-tama masukkan pasta tanah ke dalam *brass cup*. Kemudian tengah- pasta tanah tersebut dibelah/dilubangi seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2b dan 3.2c. Catat bahwa ada 2 peralatan *grooving* yang dipakai yaitu *flat grooving tools* (gambar 3.2b) dan juga *width grooving tools* (gambar 3.2c).





Gambar 3. 2 Tes *Liquid Limit* : (a) Alat Untuk Uji *Liquid Limit*; (b) Alat Pemutar Datar; (c) Alat Pengukur; (d) Tanah Sebelum di Tes; (e) Tanah Setelah di Tes

Dengan cara memutar tuas, potongan tanah akan terangkat dan kemudian dijatuhkan lagi dari ketinggian 10 mm atau setara dengan 3.94 in. kadar air dalam persentase dibutuhkan untuk menutupi belahan 12 mm dan setelah 25 kali ketukan didapatkan liquid limit dari tanah tersebut. Akan sedikit sulit untuk mengatur kadar air untuk dapat menutupi potongan tersebut dengan 25 ketukan. Jadi, dilakukan 3 kali tes dengan tanah yang sama, namun dengan kadar air yang diatur, jumlah ketukan, dan N yang dibutuhkan untuk mencapai penutupan antara 12 sampai dengan 35.

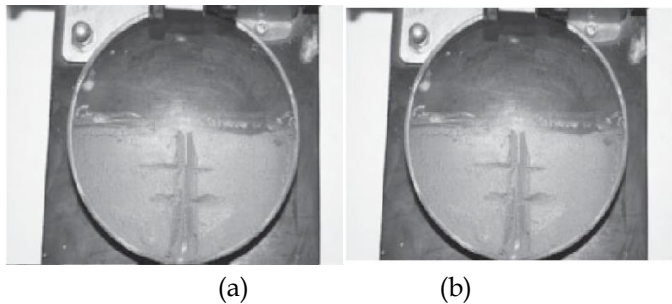
Gambar 3.3 menunjukkan tentang peralatan tes *liquid limit* dan juga *grooving tools*. Gambar 3.4 menunjukkan gambar pasta tanah sebelum dan setelah tes. Kadar air dalam persentase ini berhubungan dengan jumlah ketukan yang telah digambarkan dalam kertas semi logaritmik dalam Gambar 3.5. Hubungan dari kadar air antara log N adalah mendekati garis lurus. Garis ini dapat juga disebut sebagai *flow curve*. Kadar air yang korespondensi terhadap $N = 25$.

Dari *flow curve* tersebut didapatkan *liquid limit* dari tanah. Lekukan yang ada di garis juga dapat disebut sebagai *flow index*, sebagai berikut

$$I_F = \frac{w_1 - w_2}{\log\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}$$

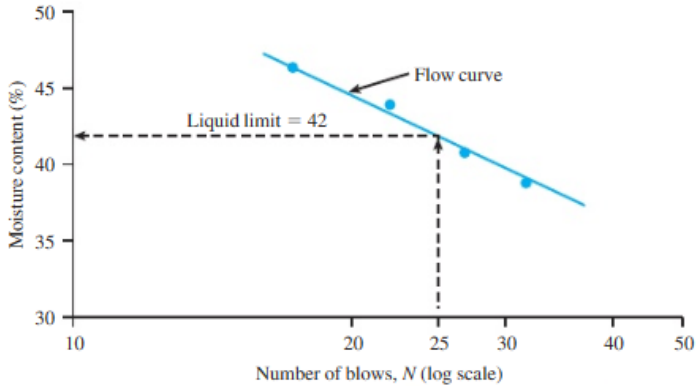


Gambar 3. 3 Alat Tes *Liquid Limit*



Gambar 3. 4 Menunjukkan Tepian Tanah pada Perangkat Cair: (a) Sebelum Pengujian; (b) Setelah Pengujian

[Catatan: Penutupan Setengah Inchi di (b) Ditandai untuk Klarifikasi]



Gambar 3. 5 Kurva Aliran untuk Penentuan Batas Cair Lumpur Lanau

Dimana:

I_F = indeks aliran

w_1 = kadar air tanah (dalam persen, sesuai dengan pukulan)

w_2 = kadar air

Note: Hasil dapat ditukar untuk menghasilkan nilai positif walaupun kemiringan garis aliran negatif.

Dengan demikian, persamaan garis aliran dapat ditulis dalam bentuk umum sebagai:

$$w = -I_F \log N + C$$

dimana C adalah konstan.

Dari analisis ratusan uji batas cair, Korps Insinyur Angkatan Darat AS (1949) di stasiun percobaan limbah air di Fixburg, Missisipi, mengusulkan persamaan empiris bentuk

$$LL = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \beta}$$

dimana

N = jumlah pukulan dalam perangkat batas cair untuk penutupan alur 12,5 mm

w_n = kadar air yang sesuai

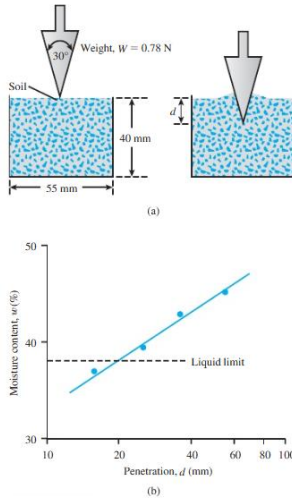
$\tan \beta$ = 0,121 (tetapi bukan berarti \tan tidak sama dengan 0,121 untuk semua tanah).

Pada Gambar 3.3 menjelaskan hasil yang baik untuk ketukan antara 20 sampai dengan 30. Untuk tes laboratorium secara rutin, dapat digunakan untuk mencari *liquid limit* pada saat satu tes berjalan pada tanah. Prosedur ini juga dapat disebut sebagai *one-point method* dan juga dirancang oleh ASTM. Alasan *one-point method* ini menghasilkan hasil yang memuaskan adalah kecilnya jarak jumlah kadar air yang dipakai.

Metode lain untuk mencari *liquid limit* yang populer di Eropa dan Asia itu adalah *fall-cone method* (British Standard-BS 1377). Di dalam tes ini, *liquid limit* disebut sebagai kadar air dimana kerucut yang sudah berstandar yang mempunyai sudut 30 dan beratnya 0.78 N (80 GF) yang akan dimasukkan sepanjang 20 mm selama 5 detik setelah diijinkan untuk menjatuhkan dari posisi permukaan tanah Gambar 3.6a menunjukkan gambar dari *fall-cone apparatus*. Dikarenakan sulitnya mencapai *liquid limit* dengan hanya 1 percobaan, maka dibutuhkan 4 tes atau lebih untuk dilakukan pada kadar air yang berbeda untuk melihat penetrasi dari *fall-cone* atau d . Sebuah grafik semi-logaritmik bisa digambarkan untuk menghubungkan kadar air dan penetrasi dari kerucut. Hasil grafik tersebut adalah garis lurus. Kadar air yang berkorespondensi pada $d = 20$ mm adalah *liquid limit* Gambar 3.6b. Dari Gambar 3.6b, *flow index* dapat dirumuskan sebagai

$$I_{FC} = \frac{w_2(\%) - w_1(\%)}{\log d_2 - \log d_1}$$

dimana w_1 , w_2 adalah kadar air pada penetrasi kerucut dan masing-masing.



Gambar 3. 6 (a) Fall Cone Test (b) Sebidang Penetrasi Kadar Air vs Cone untuk Penentuan Batas Cair

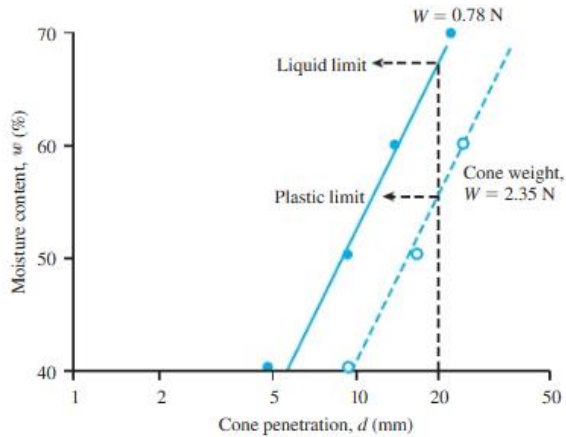
C. Batas Plastis

Batas plastis dapat didefinisikan sebagai kadar air dalam persentase dimana tanah hancur ketika digulung menjadi gulungan dengan diameter sebesar 4.2 mm atau 1/8 in. Tes batas plastis ini sangatlah simple dan juga dilakukan dengan cara menggulung tanah yang berukuran elips dengan menggunakan tangan di atas plat kaca. Prosedur uji batas plastis ini ditulis dalam ASTM D-4318.

Seperti dalam kasus penentuan batas cair, metode *fall cone* juga bisa digunakan untuk menentukan batas plastis tanah. Hal ini dapat dilakukan dengan kerucut yang sama tetapi mempunyai massa sebesar 2.35 N atau 240 gf. 3 sampai 4 tes dilakukan dalam kadar air yang bervariasi dan total penetrasi akan dihitung. Kadar air yang sesuai dengan penetrasi kerucut $d = 20$ mm adalah batas plastis. Dalam Gambar 3.8 ditunjukkan batas plastis dan cair yang dicari oleh *Cambridge Gault Clay* yang dicatat oleh Wroth dan Wood (1978).



Gambar 3. 7 Penggulungan Massa Tanah Pada Pelat Kaca Tanah untuk Menentukan Batas Plastis (Cr. Braja M. Das, Henderson, Nevada)



Gambar 3. 8 Batas Cair Dan Plastik untuk Pencegah Tanah Liatambridge Gault-Ditimbang Dengan Uji Kerucut

Index plastisitas adalah perbedaan antara batas cair dan batas cair dari tanah, atau

$$PI = LL - PL$$

Tabel di bawah ini memberikan rentang batas cair, batas plastis, dan aktivitas dari beberapa mineral tanah (Mitchell, 1976, Skempton, 1953).

Tabel 3. 1 Nilai-Nilai Khas Batas Cair, Batas Plastis, dan Aktivitas Beberapa Mineral Lempung

Mineral	Liquid limit, <i>LL</i>	Plastic limit, <i>PL</i>	Activity, <i>A</i>
Kaolinite	35–100	20–40	0.3–0.5
Illite	60–120	35–60	0.5–1.2
Montmorillonite	100–900	50–100	1.5–7.0
Halloysite (hydrated)	50–70	40–60	0.1–0.2
Halloysite (dehydrated)	40–55	30–45	0.4–0.6
Attapulgite	150–250	100–125	0.4–1.3
Allophane	200–250	120–150	0.4–1.3

Burmister (1949) classified the plasticity index in a qualitative manner as follows:

<i>PI</i>	Description
0	Nonplastic
1–5	Slightly plastic
5–10	Low plasticity
10–20	Medium plasticity
20–40	High plasticity
>40	Very high plasticity

Indeks plastisitas merupakan hal yang penting dalam mengklasifikasi tanah butiran tanah halus. Hal ini berdasarkan *Casagrande plasticity chart* (ditunjukkan pada Gambar 3.7) yang saat ini menjadi dasar untuk Sistem Klasifikasi Tanah Terpadu.

Sridharan, et al. (1999) menunjukkan bahwa indeks plastisitas dapat dikorelasikan dengan indeks aliran seperti yang diperoleh dari tes batas cair (Gambar 3.2). Sesuai dengan riset

$$PI (\%) = 4.12I_F (\%)$$

dan

$$PI (\%) = 0.74I_{FC} (\%)$$

Polidori (2007) mengatakan bahwa menyangkut 6 tanah inorganic dan masing-masing campuran dengan pasir silika halus, dirumuskan sebagai

$$PL = 0.04(LL) + 0.26(CF) + 10$$

dan

$$PI = 0.96(LL) - 0.26(CF) - 10$$

dimana CF = *clay fraction* (<2m) in %.

Hasil eksperimen Polidori (2007) menunjukkan hubungan baik untuk CF kira-kira sama dengan atau lebih besar dari 30%.

D. Batas Susut

Tanah menyusut pada saat air mulai menghilang dari tanah. Dengan berlangsungnya kehilangan air, suatu kondisi equilibrium akan tercapai yaitu pada saat kehilangan air tidak akan merubah volume dari tanah. Kadar air dalam persentase pada saat volume tanah tidak akan berubah lagi dapat disebut sebagai batas susut. Tes batas susut (ASTM *Test Designation* D-427) akan dilakukan dalam labotarium dengan menggunakan mangkok porselen yang mempunyai diameter 44 mm atau sekitar 1.75 in dan tinggi kira-kira 12.7 mm atau ½ in. Dalam mangkok tersebut akan dilapisi dengan minyak dan diisi tanah basah. Tanah yang berada diatas ujung mangkok akan diambil dengan menggunakan *straight edge*. Massa tanah basah di dalam mangkok akan dicatat. Tanah di dalam mangkok tersebut kemudiam akan dioven hingga kering. Volume dari tanah kering akan dihitung dari perpindahan merkuri. Dikarenakan mengendalikan merkuri sanat berbahaya, maka ASTM D-4943 menjelaskan sebuah metode dimana tanah yang kering oven dimasukkan kedalam pot yang berisikan wax. Kemudian, tanah yang sudah dilapisi wax tersebut akan didinginkan. Volume tanah itu dapat dihitung dengan memindahkan tanah tersebut ke dalam air. Untuk referensi Gambar 3.9, batas susut dapat dirumuskan sebagai

$$SL = w_i(\%) - \Delta w(\%)$$

Dimana

w_i = kadar air inisial saat tanah dimasukkan kedalam mangkok porselen

Δw = perubahan kadar air (diantara kadar air awal dan saat batas susut).

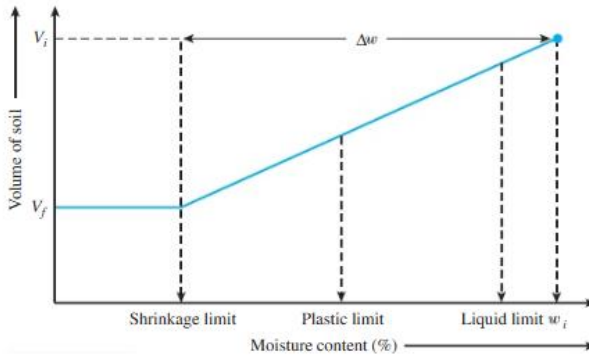
Namun,

$$w_i(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

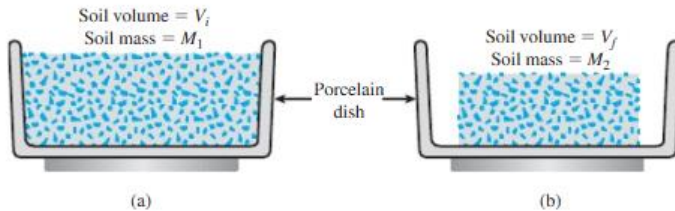
Dimana

M_1 = massa tanah basah pada saat awal percobaan (g)

M_2 = massa tanah kering (g) (lihat gambar 3.10)



Gambar 3. 9 Definisi Batas Susut



Gambar 3. 10 Tes Batas Penyusutan: (a) Pat Tanah Sebelum Pengeringan; (b) Tanah Setelah Pengeringan

Dan juga,

$$\Delta w (\%) = \frac{(V_i - V_f)\rho_w}{M_2} \times 100$$

Dimana

V_i = volume inisial dari tanah basah (pada saat di dalam mangkok, cm^3)

V_f = bolume saat tanah kering oven (cm^3)

ρ_w = massa jenis air (g/cm^3)

Lalu penggabungan persamaan - persamaan di atas memberikan

$$SL = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2} \right) (100) - \left(\frac{V_i - V_f}{M_2} \right) (\rho_w) (100)$$

Parameter lain yang dapat ditentukan dari tes batas penyusutan adalah rasio menyusut-usia, yang merupakan rasio perubahan volume tanah sebagai persentase dari volume kering untuk perubahan yang sesuai dalam kadar air.

$$SR = \frac{\left(\frac{\Delta V}{V_f} \right)}{\left(\frac{\Delta M}{M_2} \right)} = \frac{\left(\frac{\Delta V}{V_f} \right)}{\left(\frac{\Delta V \rho_w}{M_2} \right)} = \frac{M_2}{V_f \rho_w}$$

Dimana

ΔV = perubahan volume

ΔM = perubahan yang sesuai dalam massa air

Dapat juga ditunjukkan sebagai,

$$G_s = \frac{1}{\frac{1}{SR} - \left(\frac{SL}{100} \right)}$$

dimana G_s adalah berat jenis tanah padat

Berikut ini adalah tabel yang menunjukkan nilai batas susut yang umum dijumpai pada mineral lempung

Tabel 3. 2 Tabel Batas Susut Tanah Lempung

Mineral	Shrinkage limit
Montmorillonite	8.5–15
Illite	15–17
Kaolinite	25–29

E. *Soil Classification Schemes*

Skema klasifikasi menyediakan metode untuk mengidentifikasi tanah dalam kelompok tertentu yang kemungkinan akan menunjukkan karakteristik yang serupa. Klasifikasi tanah digunakan untuk menentukan jenis tanah tertentu yang paling cocok untuk aplikasi yang diberikan. Juga, skema klasifikasi dapat digunakan untuk membuat profil tanah sepanjang potongan melintang yang diinginkan dari massa tanah. Ada beberapa skema klasifikasi yang tersedia. Masing-masing dirancang untuk penggunaan khusus. Misalnya, Asosiasi Pejabat Jalan Raya dan Transportasi Negara Bagian Amerika (AASHTO) mengembangkan satu skema yang mengklasifikasikan tanah berdasarkan kegunaannya di jalan, dan Unified Soil Classification System (USCS) pada awalnya dikembangkan untuk digunakan dalam konstruksi lapangan terbang tetapi kemudian dimodifikasi untuk penggunaan umum. Masyarakat Amerika untuk Pengujian dan Materi selanjutnya menyempurnakan sistem USCS.

1. *American Society for Testing and Materials and the United Soil Classification System (ASTM - USCS)*

USCS menggunakan simbol untuk kelompok ukuran partikel seperti berikut:

- G = kerikil,
- S = pasir,
- M = lanau,
- C = tanah liat.

Simbol ini dikombinasikan dengan simbol lain yang menunjukkan karakteristik gradasi

- W untuk bertingkat baik
- P untuk bertingkat buruk

Berikut ini adalah simbol yang digunakan untuk menunjukkan karakteristik plastisitas

- H untuk tinggi
- L untuk rendah
- O menunjukkan keberadaan bahan organik.

Klasifikasi khas CL berarti tanah liat dengan plastisitas rendah, sedangkan SP berarti pasir dengan gradasi buruk.

ASTM-USCS meningkatkan USCS dengan mempertimbangkan tanah campuran. Tanah dikelompokkan berdasarkan simbol dan nama grup. Sebagai contoh, kita dapat memiliki tanah dengan simbol grup, SW-SM, dan nama grup, yang menggambarkan tanah, sebagai "*pasir bertingkat baik dengan lanau*" jika kandungan kerikilnya kurang dari 15%. Diagram alir untuk mengklasifikasikan tanah berdasarkan ASTM-USCS ditunjukkan pada Gambar 2.6a-c.

2. *AASHTO Soil Classification System*

Sistem klasifikasi tanah AASHTO digunakan untuk menentukan kesesuaian tanah untuk pekerjaan tanah, timbunan, dan bahan dasar jalan (tanah dasar – bahan alami di bawah perkerasan yang dibangun; subbase – lapisan tanah di atas tanah dasar; dan alas – lapisan)

Sistem AASHTO mengklasifikasikan tanah menjadi tujuh kelompok besar, A - 1 hingga A - 7. Tiga kelompok pertama, A - 1 hingga A - 3, adalah tanah butiran (butiran kasar), sedangkan empat kelompok terakhir, A - 4 hingga A - 7, adalah tanah lempung lanau (butiran halus). Tanah lanau dan tanah liat terletak di dalam bagan plastisitas.

Nilai indeks kelompok (GI) ditambahkan dalam tanda kurung ke kelompok utama untuk memberikan ukuran kualitas tanah sebagai bahan dasar jalan raya. Indeks grup dinyatakan sebagai

$$GI = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

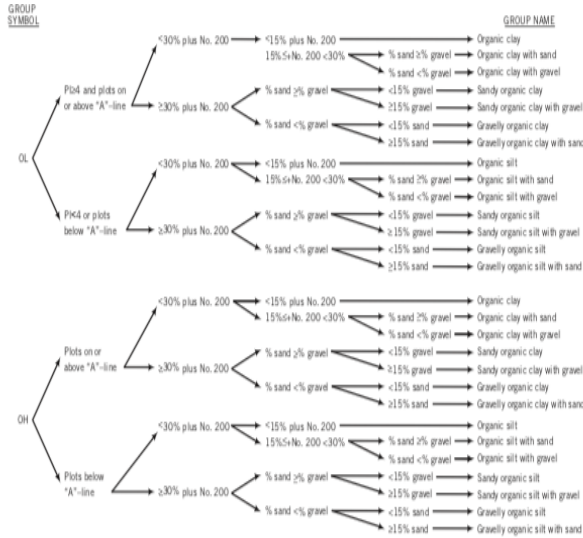
di mana F adalah persentase yang lolos dari saringan No. 200 dan ketentuan lainnya telah ditetapkan sebelumnya. Indeks GI dilaporkan ke bilangan bulat terdekat (2,4 dilaporkan sebagai 2; 2,5 dilaporkan sebagai 3), dan jika GI <0, itu ditetapkan ke 0.

GI untuk grup A - 1 - a, A - 1 - b, A - 2-4, A - 2-5, dan A - 3 adalah nol.

Untuk grup A - 2-6 dan A - 2-7, persamaan indeks grup parsial

$$GI = 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

digunakan. Semakin tinggi indeks grup, semakin rendah kualitas tanah sebagai bahan tanah dasar. GI sebaiknya tidak melebihi 20 untuk kelompok A - 4 hingga A - 7.



Gambar 3. 12 Flowchart Klasifikasi Tanah Berbutir Halus

(Sumber: Reprinted with permission from ASTM D 2487-10, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.)

Tabel 3. 4 a Klasifikasi AASHTO

General classification	Granular materials (35% or less passing No. 200)			Silt-clay materials (more than 35% passing No. 200)			
	A-1	A-3 ^a	A-2	A-4	A-5	A-6	A-7
Sieve analysis, % passing							
No. 10 (2.00 mm)	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425 μm)	50 max	51 min	...	...	...	...	...
No. 200 (75 μm)	25 max	10 max	35 max	35 min	36 min	35 min	35 max ^b
Characteristics of fraction passing No. 40 (425 μm)							
Liquid limit	...	...	^b	40 max	41 min	40 max	^b
Plasticity index	6 max	N.P.	^b	40 max	10 max	11 min	
General rating as subgrade	Excellent to good			Fair to poor			

Source: Reprinted with permission of American Association of State Highway and Transportation Officials.

^aThe placing of A-3 before A-2 is necessary in the "left to right elimination process" and does not indicate superiority of A-3 over A-2.

^bSee Table 2.9B for values.

Tabel 3. 5 Lanjutan Klasifikasi AASHTO

General classification	Granular materials (35% or less passing No. 200)						Silt-clay materials (more than 35% passing No. 200)			
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7
Group classification	A-1-a	A-1-b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5, A-7-6
Sieve analysis, % passing										
No. 10 (2.00mm)	50 max	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425 μ m)	30 max	50 max	51 min	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75 μ m)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min
Characteristics of fraction passing No. 40 (425 μ m)										
Liquid limit	...	...	40 max	41 max	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity index	6 max	N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min ^d
Usual types of significant constituent materials	Stone fragments, gravel and sand	Fine sand	Silty or clayey gravel and sand				Silty soils		Clayey soils	
General rating as subgrade	Excellent to good						Fair to poor			

Source: Reprinted with permission of American Association of State Highway and Transportation Officials.

SOAL BAB 3

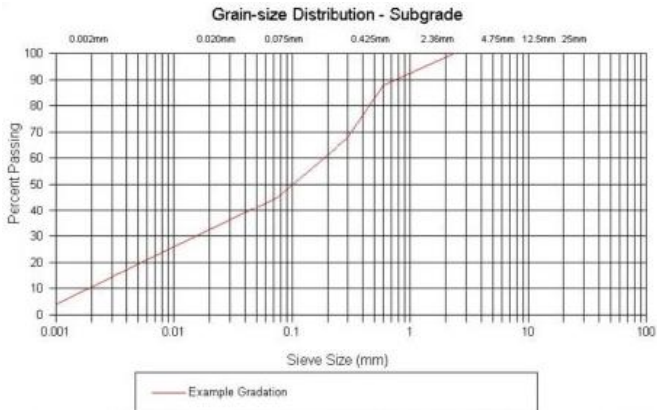
1. Diketahui hasil uji konsistensi tanah menggunakan alat Casagrande sebagai berikut:

NUMBER OF BLOWS, N	MOISTURE CONTENT (%)
13	33
18	27
29	22

Dari hasil uji batas plastis diketahui PL = 19.1%

Tentukan nilai (i) batas cair dan (ii) indeks plastisitas tanah lempung tersebut

2. Diketahui hasil uji analisis saringan dari sampel tanah pada nomor 1 sebagai berikut:



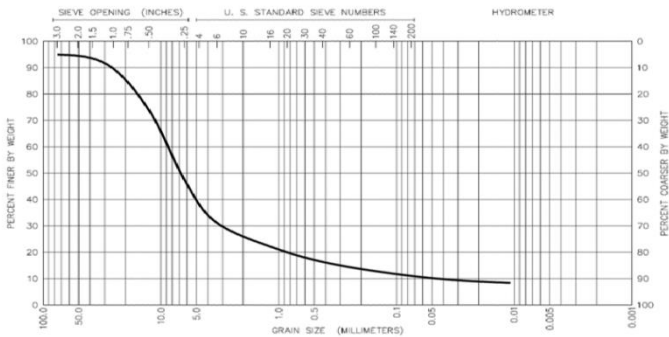
Tentukan jenis tanah tersebut berdasarkan standar USCS

3. Gunakan standar AASHTO untuk mengidentifikasi sampel tanah yang sama (no. 1 dan 2)
4. Diketahui hasil uji batas Atterberg suatu sampel tanah sebagai berikut:

Batas cair = 15%

Batas plastis = 8%

Serta gradasi yang muncul sebagai berikut:



Identifikasi jenis tanah ini berdasarkan standar AASHTO dan USCS

5. Berikan beberapa perbedaan system klasifikasi tanah berdasarkan standar USDA, AASHTO, dan USCS.

BAB IV

KOMPAKSI TANAH

Kompaksi tanah adalah pemadatan tanah dan mengurangi udara (angka pori) pada tanah dengan menggunakan energi mekanis. Pemadatan tanah dapat dilakukan dengan atau tanpa bantuan berupa penambahan air. Jika tanah banyak mengandung udara, maka bisa terjadi perubahan volume pada tanah seperti *swelling* dan *shrinkage*. Pada pembuatan timbunan tanah untuk jalan raya, dam tanah, dan banyak struktur teknik lainnya, tanah yang lepas (renggang) haruslah dipadatkan untuk meningkatkan berat volumenya. Pemadatan tersebut berfungsi untuk meningkatkan kekuatan tanah, sehingga dengan demikian meningkatkan daya dukung pondasi di atasnya. Dengan struktur tanah yang dipadatkan, akan membuat kontak antar partikel dalam struktur lebih intensif, sehingga tidak mudah mengalami deformasi serta meningkatkan nilai kekuatan dan/atau kekakuan dari struktur tanah yang dipadatkan tersebut. Pemadatan juga dapat mengurangi besarnya penurunan tanah yang tidak diinginkan dan meningkatkan kemantapan lereng timbunan (*embankments*).

Tingkat pemadatan tanah diukur dari berat volume kering tanah yang dipadatkan (γ_d). Bila air ditambahkan kepada suatu tanah yang sedang dipadatkan, air tersebut akan berfungsi sebagai unsur pembasah pada partikel - partikel tanah. Karena adanya air, partikel - partikel tanah tersebut akan lebih mudah bergerak dan bergeser satu sama lain dan membentuk kedudukan yang lebih rapat/padat.

Bila kadar air ditingkatkan terus menerus secara bertahap dengan usaha pemadatan yang konstan, maka berat volume kering juga akan meningkat secara bertahap hingga mencapai suatu nilai berat volume kering maksimum ($\gamma_{d \max}$). Setelah mencapai kadar air tertentu, penambahan kadar air

justru cenderung menurunkan berat volume kering dari tanah. Hal ini disebabkan karena air tersebut menempati ruang - ruang pori dalam tanah yang sebetulnya dapat ditempati oleh partikel - partikel padat dari tanah. Kadar air di mana harga berat volume kering maksimum tanah dicapai disebut kadar air optimum (w_{opt}).

A. Kegunaan dari Kompaksi

Ada beberapa manfaat dari kompaksi tanah yaitu meningkatkan kekuatan tanah dan meningkatkan daya dukung pondasi di atas tanah atau meningkatkan kemampuan menahan beban, hal ini sangat berguna terutama untuk pembuatan timbunan tanah di jalan raya, dam dan struktur lainnya. Kompaksi juga bisa mengurangi rembesan air yang berarti mengurangi penurunan tanah akibat tanah yang padat (Kemampumampatan tanah). Oleh karena tanah sudah di padatkan maka akan meningkatkan stabilitas tanah dan meningkatkan kemantapan lereng timbung yang berarti tanah tidak akan mudah terekspansi dan runtuh.

Pastinya kompaksi tidak akan berjalan sempurna setiap saat, maka kompaksi yang tidak baik akan menyebabkan stres dalam struktur oleh katena penurunan tootal dan diferensial yang berlebihan. Keretakan pada trotoar, lantai, dan basement akan terjadi oleh karena tanah yang di kompaksi dengan baik akan otomatis merusak struktur pada elemen struktur bawah tanah, pipa air, selokan serta saluran utilitas bawah tanah. Erosi tanah juga merupakan salah satu akibat dari kompaksi yang kurang baik, maka dari itu dampak dari kompaksi secara tidak maksimal akan berakibat fatal.

B. *Theoretical Maximum Dry*

Untuk mencari berat volume kering tanah (γ_d) dapat menggunakan persamaan berikut:

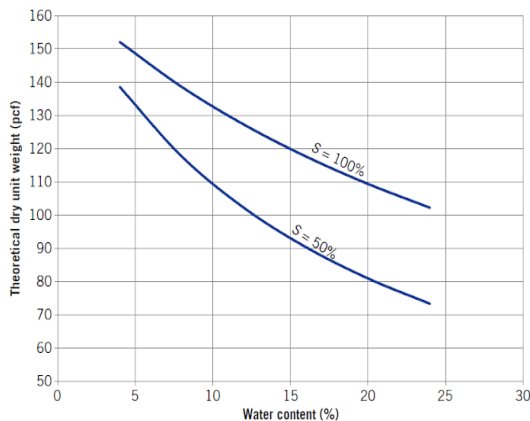
$$\gamma_d = \frac{G_s}{1 + e} \gamma_w \quad (1)$$

Secara teori, karena G_s dan γ_w konstan (perubahan berat volume air akibat perubahan suhu sangat kecil untuk aplikasi geoteknik sehingga dianggap konstan) maka berat volume kering dapat meningkat hanya jika angka pori (e) berkurang. Juga karena $e = w \cdot (G_s / S)$, kadar air harus dikurangi.

Untuk suatu kadar air tertentu, berat volume kering maksimum ($\gamma_{d \max}$) secara teoritis didapat bila pada pori - pori tanah sudah tidak ada udaranya lagi. Artinya derajat kejenuhan tanah (S) sama dengan 1 (100%) karena pori - pori tanah hanya berisi air. Untuk keadaan tanah jenuh 100%, $e = wG_s$, jadi:

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1 + w \cdot G_s} \gamma_w = \frac{\gamma_w}{w + (1/G_s)} \quad (2)$$

Kondisi saat tanah jenuh 100% disebut *zero air voids*. Kondisi *zero air voids* ini membentuk kurva yang berbeda dengan kurva yang mungkin terbentuk saat uji laboratorium. Hal ini disebabkan karena pada prakteknya, tidak mungkin didapatkan suatu kondisi dimana tanah benar - benar tidak mengandung udara sama sekali.



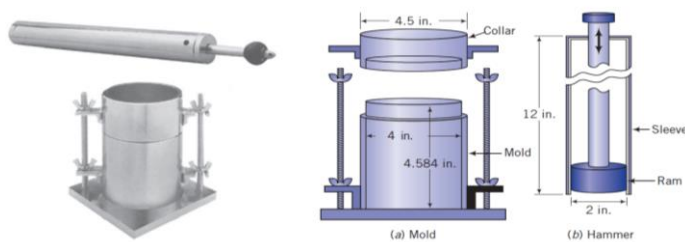
Gambar 4. 1 Grafik Berat Volume Kering Teoritis dan Kadar Air

Grafik di atas menunjukkan perbandingan penurunan γ_d akibat penambahan kadar air pada saat $S = 100\%$ dan pada saat $S = 50\%$.

C. *Proctor Compaction Test: ASTM 698 dan ASTM 1557*

Uji laboratorium yang umum dilakukan untuk mendapatkan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum adalah *Proctor Compaction Test* atau Uji Pemadatan *Proctor*. Uji pemadatan ini diberi nama sesuai dengan nama penemunya, Proctor. Pada tahun 1933, Proctor berhasil menemukan hubungan antara berat volume kering (γ_d) dengan kadar air (w) jika tanah diberikan suatu energi kompakatif tertentu.

Uji Pemadatan *Proctor* ini digunakan untuk memberikan energi mekanis (gaya tekan) pada tanah untuk menentukan berat volume kering maksimum dari tanah. Peralatan yang digunakan untuk pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 4.2.



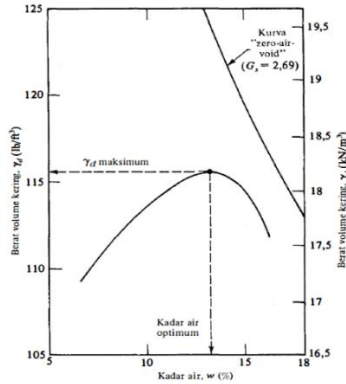
Gambar 4. 2 *Standard Proctor Compaction Test*

Uji pemadatan *proctor* dapat dibagi menjadi 2 yaitu uji *proctor* standar dan uji *proctor* yang telah dimodifikasi. Uji *proctor* yang telah dimodifikasi digunakan untuk pekerjaan yang melibatkan beban berat seperti landasan pesawat.

Dalam uji *proctor* standar, sampel tanah yang kering dicampur dengan air dan dipadatkan dalam cetakan silinder dengan diameter dalam sebesar 4 inci dan tinggi 4.584 inci. Volume dari cetakan *proctor* standar adalah $1/30 \text{ ft}^3$. Tanah dipadatkan dalam 3 lapisan dan setiap lapisan mendapatkan 25 pukulan dari pemukul 5.5 lb yang jatuh bebas dari ketinggian 12 inci. Energi yang diberikan dari pemukul adalah $12400 \text{ ft}\cdot\text{lb}/\text{ft}^3$.

Dalam uji *proctor* yang telah dimodifikasi, pemukul mempunyai massa sebesar 10 lb dan jatuh bebas dari ketinggian 18 inci. Tanah dipadatkan dalam 5 lapisan dengan 25 pukulan per lapisan. Cetakan yang digunakan sama dengan cetakan uji *proctor* standar. Energi yang dihasilkan dari pemadatan dalam uji ini adalah $56000 \text{ ft}\cdot\text{lb}/\text{ft}^3$, yaitu sekitar 4,5 kali lebih besar dari energi dalam uji *proctor* standar.

Pengujian dilakukan 4 kali atau lebih menggunakan kadar air yang berbeda - beda. Pengujian terakhir merupakan pengujian di saat tambahan air menyebabkan berat volume curah (*bulk unit weight*) dari tanah berkurang. Hasil ini dapat dinyatakan dalam grafik di mana absis merupakan kadar air dan ordinat merupakan berat volume kering. Grafik di bawah ini menunjukkan perbandingan kurva teoritis (*zero air voids*) dengan kurva yang didapatkan dari uji laboratorium pada tanah lempung berlanau:



Gambar 4. 3 Kurva Hasil Kompaksi dan Zero Air Voids

Kadar air saat berat volume maksimum ($\gamma_{d \max}$) tercapai disebut kadar air optimum (w_{opt}). Biasanya kadar air optimum dari pasir kurang dari 10%. Kadar air optimum dari tanah lempung umumnya lebih dari 10%.

Kondisi saat kadar air masih berada di bawah kadar air optimum disebut *dry of optimum*. Pada kondisi ini, udara keluar dari tanah dan air membantu penyusunan kembali butiran tanah menjadi bentuk yang lebih padat, akibatnya jumlah butiran tanah per volume (γ_d) dari tanah bertambah.

Kondisi saat kadar air berada di atas kadar air optimum disebut *wet of optimum*. Pada kondisi ini, kekuatan tekan tidak dapat mengeluarkan udara lagi dari tanah dan tambahan air menggantikan butiran tanah, sehingga mengurangi jumlah butiran tanah per volume. Akibatnya, berat volume kering (γ_d) nya berkurang.

Uji *proctor* yang dimodifikasi untuk beban berat memiliki $\gamma_{d \max}$ yang lebih besar dan w_{opt} yang lebih kecil dari uji *proctor* standar. Derajat kejenuhan yang didapat juga lebih rendah dibandingkan uji *proctor* standar.

Berat volume kering dari uji pematatan *proctor* dihitung dari persamaan berikut ini:

$$\gamma_d = \frac{W/V}{1+w} = \frac{30W}{1+w}$$

di mana satuan γ_d adalah pcf, W adalah berat dari tanah basah (lb), dan V adalah volume dari cetakan (konstan, yaitu 1/30 ft³), dan w adalah kadar air.

Derajat kejenuhan dapat dihitung dengan rumus:

$$S = \frac{wG_s}{(G_s\gamma_w/\gamma_d) - 1}$$

Jika G_s tidak diketahui, dapat digunakan nilai $G_s = 2,7$.

Berat volume kering maksimum ($\gamma_{d \text{ max}}$) tercapai saat tanah dalam kondisi tidak jenuh ($S < 1$).

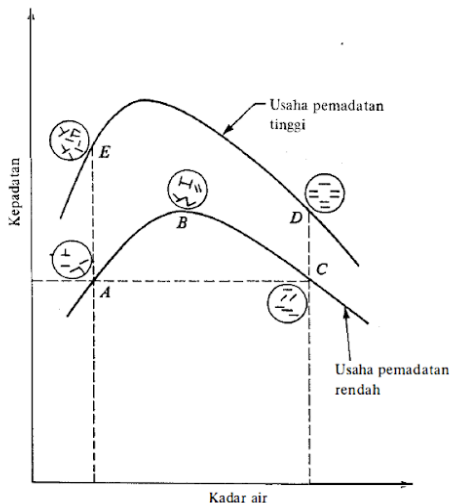
D. *Interpretation of Proctor Test Result*

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi pemadatan yaitu kadar air, jenis tanah, dan energi pemadatan. Ketiga faktor ini mempunyai pengaruh yang berbeda - beda terhadap hasil uji pemadatan *proctor*.

Faktor yang pertama adalah kadar air. Meningkatnya kadar air akan menyebabkan γ_d juga meningkat tetapi hal ini hanya terjadi hingga mencapai kadar air optimum (mencapai $\gamma_{d \text{ max}}$), setelah mencapai kadar air optimum maka penambahan kadar air akan menyebabkan γ_d berkurang.

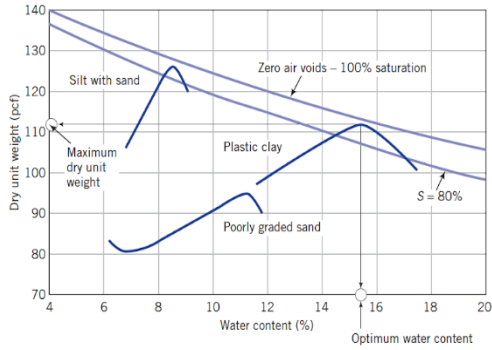
Selain itu kadar air juga mempengaruhi struktur tanah yang dikompaksi. Peristiwa ini diselidiki oleh Lambe (1958). Bila lempung (atau tanah berbutir halus) dipadatkan dengan kadar air *dry of optimum* (ditunjukkan oleh titik A pada grafik di bawah), tanah tersebut akan mempunyai struktur terflokulasi. Hal ini disebabkan karena pada kadar air yang rendah, lapisan ganda terdifusi di sekeliling partikel tanah lempung tersebut tidak dapat sepenuhnya berkembang, jadi gaya tolak - menolak antar partikel (gaya Van der Waals) juga berkurang. Bila kadar air ditambah (ditunjukkan oleh titik B pada grafik di bawah), maka lapisan ganda terdifusi di sekeliling partikel tanah akan mengembang, sehingga terjadi peningkatan gaya tolak - menolak antar partikel lempung dan akan menghasilkan tingkat flokulasi yang lebih kecil dan berat volume kering (γ_d) yang lebih besar. Bila dipadatkan dengan kadar air *wet of optimum* (kadar air terus ditingkatkan

dari titik B ke C), tanah tersebut akan mempunyai struktur terdispersi. Hal ini disebabkan karena lapisan ganda juga akan semakin mengembang dan gaya tolak - menolak antar partikel akan semakin meningkat.



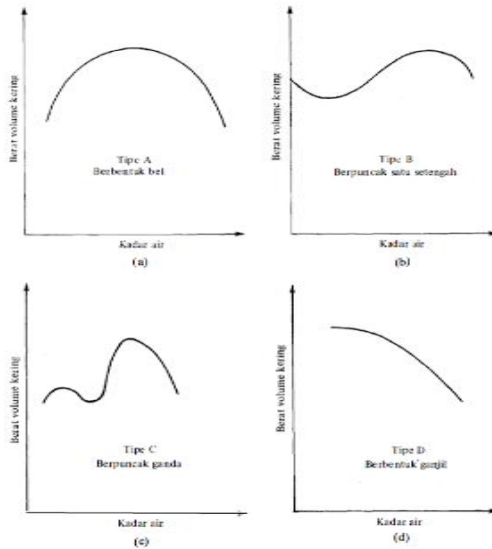
Gambar 4. 4 Pengaruh Pemadatan pada Struktur Tanah Lempung

Faktor yang kedua adalah jenis tanah. Jenis tanah yang berbeda bisa menghasilkan bentuk kurva yang berbeda - beda. Hal ini disebabkan karena setiap jenis tanah memiliki distribusi ukuran butiran, bentuk butiran, berat spesifik bagian padat tanah, dan jumlah serta jenis mineral lempung yang berbeda - beda. Berikut ini adalah grafik kadar air - berat volume kering untuk berbagai jenis tanah:



Gambar 4. 5 Grafik Berat Volume Kering dan Kadar Air

Lee dan Suedkamp (1972) telah mempelajari kurva - kurva pemadatan dari 35 jenis tanah. Mereka menyimpulkan bahwa kurva pemadatan tanah - tanah tersebut dapat dibedakan hanya menjadi empat tipe umum seperti yang ditunjukkan pada grafik di bawah.



Gambar 4. 6 Empat Tipe Kurva Pemadatan Menurut Lee dan Suedkamp (1972)

Kurva tipe A adalah kurva yang hanya mempunyai satu puncak. Tipe ini biasanya ditemukan pada tanah yang mempunyai batas cair antara 30 dan 70, biasanya dijumpai pada tanah lempung. Kurva tipe B adalah untuk tipe yang mempunyai satu setengah puncak, biasanya dijumpai pada pasir. Kurva tipe C adalah kurva dengan puncak ganda, biasanya dijumpai pada tanah dengan gradasi buruk. Kurva tipe B dan C juga dijumpai pada tanah - tanah dengan batas cair kurang dari 30. Kurva tipe D adalah tipe yang tidak punya puncak tertentu, biasanya disebut bentuk ganjil. Kurva tipe D umumnya dijumpai pada tanah dengan batas cair lebih besar daripada 70.

Tanah lempung umumnya memiliki bentuk kurva yang menyerupai bel. Tanah pasir umumnya mula - mula menunjukkan penurunan berat volume kering, lalu kemudian membentuk "punuk". Penurunan berat volume kering di awal kurva disebabkan karena pada kadar air yang rendah, ada tegangan kapiler yang menghalangi pergerakan bebas dari partikel - partikel tanah sehingga partikel sulit untuk menjadi lebih padat (γ_d berkurang). Lalu penambahan air lebih lanjut menyebabkan tegangan kapiler berkurang sehingga partikel menjadi mudah bergerak dan menjadi lebih padat (γ_d bertambah), kemudian setelah mencapai kadar air optimum air justru menempati pori di tanah yang seharusnya bisa ditempati oleh pasir sehingga kepadatan pun berkurang (γ_d berkurang), sehingga terbentuklah "punuk". Jenis tanah dengan batas cair kurang dari 30 dan tanah pasir berbutir halus yang bergradasi buruk dapat membentuk lebih dari satu "punuk" sebelum mencapai berat volume maksimum. Belum ada teori yang dapat dengan jelas menjelaskan fenomena perbedaan bentuk kurva ini, namun Olson mengungkapkan sebuah teori tentang peristiwa munculnya lebih dari satu "punuk" ini. Menurut Olson, daerah cekung pada kurva disebabkan karena tekanan air pori yang negatif. Terbentuk meniskus antara partikel tanah dengan air pori sehingga menyebabkan peningkatan tegangan efektif pada

permukaan dari air pori. Titik minimum antara 2 puncak terjadi ketika meniskus telah terbentuk dengan sempurna. Setelah titik ini, meniskus menjadi lebih datar dan tanah menjadi lebih terdispersi. Sehingga terjadi peningkatan γ_d hingga mencapai kadar air optimum kedua (puncak kedua).

Faktor ketiga adalah energi pemadatan. Besarnya energi pemadatan berbanding lurus dengan jumlah lapisan, jumlah tumbukan per lapisan, berat penumbuk, dan tinggi jatuh penumbuk. Bila usaha pemadatan per satuan volume tanah bertambah, harga berat volume kering maksimum tanah juga bertambah dan kadar air optimum berkurang.

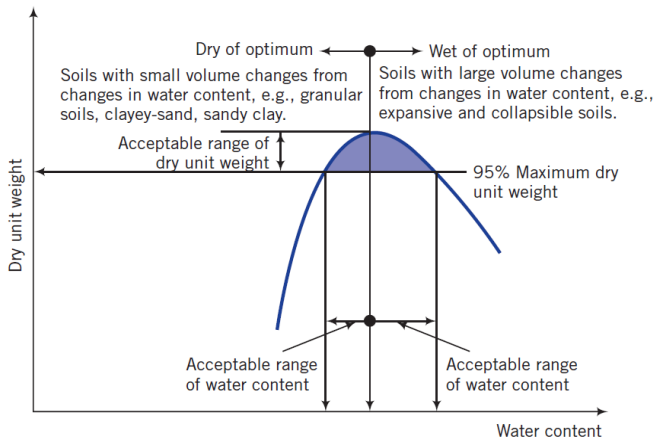
Selain itu, jika energi pemadatan yang digunakan lebih besar dari uji *proctor* standar maka kadar air (misalnya kadar air untuk mencapai 95% dari $\gamma_{d \max}$ pada uji *Proctor* standar) *dry of optimum* kemungkinan dapat berubah dan menghasilkan kompaksi dengan kadar air *wet of optimum*. Perubahan kadar air ini disebabkan karena konduktivitas hidrolis dari tanah yang dikompaksi *dry of optimum* lebih besar daripada konduktivitas hidrolis dari tanah yang dikompaksi *wet of optimum*. Energi pemadatan yang lebih besar dapat mengurangi konduktivitas hidrolis tanah. Oleh karena itu, sangatlah penting untuk mengontrol energi pemadatan yang digunakan pada saat pemadatan di lapangan untuk mendapatkan hasil sesuai dengan keinginan.

Energi kompaksi juga mempengaruhi kekuatan tanah. Kekuatan dari tanah yang dikompaksi dengan kondisi *dry of optimum* bertambah seiring dengan bertambahnya energi kompaksi. Kekuatan maksimum dicapai saat kadar air optimum (w_{opt}). Sedangkan untuk tanah berbutir halus yang dikompaksi hingga *wet of optimum*, perubahan dari kekuatan tanah saat kadar air optimum (w_{opt}) dengan kekuatan saat *wet of optimum* sangat kecil.

Hasil dari uji pemadatan *proctor* (kadar air optimum dan berat kering maksimum) sangat penting dalam suatu konstruksi. Dibutuhkan spesifikasi pemadatan yang tepat tergantung dari jenis tanahnya. Spesifikasi dari struktur seperti tanggul dan pondasi biasanya membutuhkan minimal

95% dari berat kering maksimum *Proctor*. Tingkat kompaksi seperti ini dapat diperoleh dalam dua macam kadar air, pertama adalah kadar air sebelum mencapai berat kering maksimum (*dry of optimum*), kedua adalah dengan kadar air setelah mencapai berat kering maksimum (*wet of optimum*).

Konstruksi pada umumnya mengkompaksi tanah hingga mencapai kondisi *dry of optimum* atau digunakan pada tanah yang mengalami perubahan volume kecil. Kompaksi hingga mencapai *wet of optimum* digunakan untuk tanah yang mengembang (*swelling*), pelapis dasar (*soil liner*) untuk tempat pembuangan limbah padat, dan pekerjaan yang melibatkan tanah dengan volume yang berubah - ubah.



Gambar 4. 7 Ilustrasi dari Spesifikasi Kompaksi di Lapangan

Saat tanah yang dikompaksi hingga mendekati $\gamma_{d \max}$ mendapatkan gaya geser (*shear*), tanah akan mengembang (mengalami dilatasi atau ekspansi) dan antar partikelnya menjadi lebih lepas. Biasanya ekspansi ini tidak seragam, beberapa bagian dari tanah menjadi lebih lepas daripada bagian - bagian yang lain. Akibatnya kecepatan aliran air di tanah akan meningkat karena air dapat lebih mudah masuk ke bagian - bagian tanah yang lepas, hal ini kemungkinan dapat menyebabkan kegagalan yang serius. Tanah yang dikompaksi seperti ini cenderung menunjukkan pengurangan kekuatan secara tiba - tiba ketika mendapat gaya geser. Di

lapangan, jika terjadi kegagalan maka kegagalan itu lebih baik terjadi secara perlahan dan bertahap dibandingkan terjadi tiba-tiba sehingga langkah-langkah penanganan dapat dilakukan.

Beberapa struktur seperti bendungan urugan memerlukan level kompaksi yang tepat, yaitu kompaksi yang menyebabkan tanah berperilaku elastis (*ductile*) dan dapat berdeformasi tanpa pecah atau hancur. Biasanya tanah seperti ini memerlukan kompaksi *wet of optimum* saat mencapai dibawah 95% dari $\gamma_{d \max}$ (kira-kira 80% - 90% dari $\gamma_{d \max}$).

Beberapa tipe tanah seperti pasir bergradasi buruk (SP) dan pasir-lanau bergradasi buruk (SP-SM) mungkin tidak menunjukkan $\gamma_{d \max}$ dan w_{opt} yang jelas dari uji Proctor standar. Tanah-tanah seperti ini dapat dikompaksi di lapangan dengan kadar air 50% - 75% dari tingkat saturasi yang biasanya digunakan.

Contoh Soal dan Pembahasan:

1. Dalam tes Proctor standar, berat basah dari tanah lempung berlanau dalam cetakan adalah 4 lb. Kadar airnya adalah 8%. Volume dari cetakan tes Proctor standar adalah 1/30 ft³. (a) Tentukan berat volume dan berat volume kering dan (b) Tentukan derajat kejenuhan jika $G_s = 2.7$

Pembahasan:

- (a) Tentukan berat volume terlebih dahulu

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{4}{(1/30)} = 120 \text{ pcf}$$

Tentukan berat volume kering

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} = \frac{120}{1+0.08} = 111 \text{ pcf}$$

Periksa apakah hasil masuk akal atau tidak:

Berdasarkan definisi, berat volume kering lebih kecil daripada berat volume. Hasil dari poin a dan b masuk akal dan sesuai dengan definisi.

(b) Mencari derajat kejenuhan

$$S = \frac{wG_s}{(G_s\gamma_w/\gamma_d) - 1} = \frac{0.08 \times 2.7}{[(2.7 \times 62.4)/111] - 1} = 0.417 = 41.7\%$$

2. Hasil dari tes *Proctor* standar pada tanah lempung ditunjukkan dalam tabel berikut:

Water content (%)	6.2	8.1	9.8	11.5	12.3	13.2
Bulk unit weight (pcf)	107.6	119.1	124.2	130.6	129.9	128.0

- Tentukan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum
- Buatlah garis *zero air voids*
- Berapakah berat volume kering dan kadar air saat 95% kompaksi standar, *dry of optimum*?
- Tentukan derajat kejenuhan saat kepadatan kering maksimum ($G_s = 2,7$)

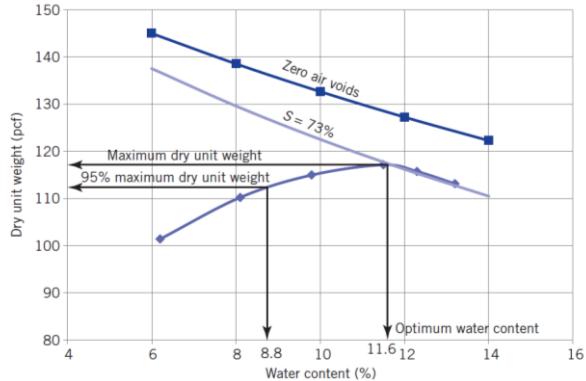
Pembahasan:

- Gunakan tabel atau program *spreadsheet* untuk menghitung γ_d :

Tabel 4. 1 Hubungan Kadar Air dengan Berat Jenis

Water content, w(%)	Bulk unit weight, γ (pcf)	Dry unit weight, $\gamma_d \gamma_d = \gamma/(1 + w)$ (pcf)	Zero air voids	
			Water content, w (%)	Dry unit weight $\gamma_d = G_s\gamma_w/(wG_s + 1)$ (pcf)
6.2	107.6	101.4	6	145.0
8.1	119.1	110.2	8	138.6
9.8	126.2	114.9	10	132.7
11.5	130.6	117.1	12	127.3
12.3	129.9	115.7	14	122.3
13.2	128.0	113.1		

- Buatlah grafik kadar air – berat volume kering dan *zero air voids* berdasarkan Tabel 4.1



Gambar 4. 8 Hasil Percobaan *Proctor* (Kadar Air, Maksimum Dan Minimum Berat Jenis Tanah Kering)

- Berdasarkan grafik tersebut, carilah berat volume kering maksimum dan kadar air optimum
 $\gamma_d \text{ max} = 118 \text{ pcf}$ $w_{\text{opt}} = 11.5\%$
- Hitung dan gambarkanlah 95% berat volume kering maksimum di grafik 4.7
 Saat 95% kompaksi:
 $\gamma_d = 118 \times 0.95 = 112 \text{ pcf}$ dan $w = 8.8\%$ (diperoleh dari grafik)
- Hitung derajat kejenuhan saat berat volume kering maksimum

$$S = \frac{wG_s}{(G_s\gamma_w/\gamma_d) - 1} = \frac{0.115 \times 2.7}{(2.7 \times 62.4/118) - 1} = 0.726 \approx 73\%$$

3. Hasil dari tes *Proctor* standar pada tanah yang diklasifikasikan sebagai CL - ML dalam kelompok lempung berlanau dapat dilihat dalam tabel berikut. Tentukan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum.

- Diameter cetakan = 4 in
- Tinggi cetakan = 4.584 in
- Volume cetakan = 1/30 ft³
- Berat cetakan (M) = 4.45 lb

Tabel 4. 2 Hasil dari tes *proctor*

Unit weight data		Water content data	
Weight of wet soil and mold (lbs)	Mass of can and wet soil (grams)	Mass of can and dry soil (grams)	Mass of can (grams)
M_{wm}	M_w	M_d	M_c
7.32	114.92	111.48	46.50
7.57	163.12	155.08	46.43
7.68	190.43	178.64	46.20
7.74	193.13	178.24	46.50
7.65	188.77	171.58	46.10

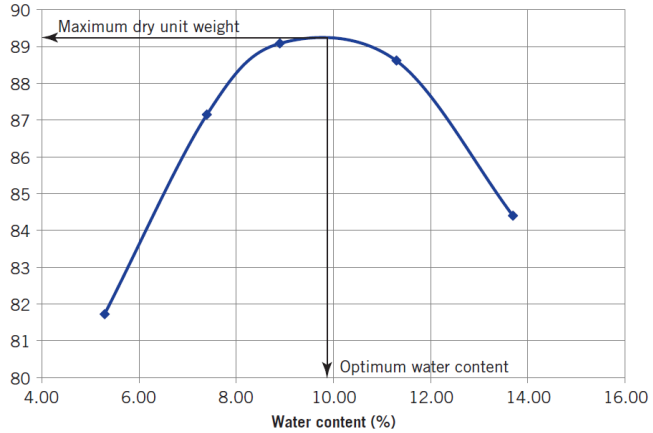
Pembahasan:

- Buatlah sebuah *spreadsheet* atau tabel untuk menghitung kadar air dan berat volume kering

Tabel 4. 3 Perhitungan kadar air dan berat volume kering

Water content calculations				Dry unit weight calculations		
Mass of can and wet soil (grams)	Mass of can and dry soil (grams)	Mass of can (grams)	Water Content	Weight of wet soil and mold (lb)	Weight of wet soil (lb)	Dry unit weight
M_w	M_d	M_c	w (%)	M_{wm}	$M_w = M_{wm} - M_c$	γ_d (pcf)
114.92	111.48	46.50	5.3	7.32	2.87	81.8
163.12	155.08	46.43	7.4	7.57	3.12	87.2
190.43	178.64	46.20	8.9	7.68	3.23	89.0
193.13	178.24	46.50	11.3	7.74	3.29	88.7
188.77	171.58	46.10	13.7	7.65	3.20	84.4

$$\text{Berat volume kering} = \frac{\text{Berat basah tanah}}{\text{Volume cetakan} \times (1 + \text{kadar air})} = 30 \times \frac{\text{Berat basah tanah}}{(1 + \text{kadar air})}$$



Gambar 4. 9 Berat Volume Kering dan Kadar Air

- Dari grafik, diperoleh berat volume kering maksimum = 89.3 pcf dan kadar air optimum = 10%

E. *Field Compaction*

Untuk kompaksi tanah di lapangan, ada banyak peralatan mekanikal yang dapat digunakan. Kompaksi di lapangan dapat dilakukan dengan 2 macam gaya mekanik, yaitu gaya statis (*Static Vertical Force*) dan getaran vertikal (*Vibratory Vertical Force*).

Static Vertical Force atau gaya vertikal statis di aplikasikan dengan berat mati yang memberi tekanan ke massa tanah. Beberapa contoh dari peralatan yang dapat memberikan gaya vertikal statis adalah *sheepsfoot rollers*, *grid rollers*, *rubber-tired rollers*, *drum rollers*, *loaders*, dan *scrapers*. Gambar di bawah merupakan peralatan yang memberi gaya statik vertikal. Kiri atas adalah *sheepfoot rollers*, kanan atas adalah *grid rollers*, dan tengah bawah adalah *drum rollers*.



Gambar 4. 10 Peralatan dengan *Static Vertical Force*

Vibratory Vertical Force atau gaya getaran vertikal diterapkan dengan sistem mesin yang mempunyai berat yang berputar atau mekanisme piston yang memberi ledakan cepat terhadap permukaan tanah. Tanah tersebut di kompaksi dengan tekanan dan terjadi penataan ulang struktur tanah karena benturan dan getaran. Tipe alat vibrasi yang sering ditemukan adalah *vibrating plate compactors*, *vibrating rollers*, dan *vibrating sheepsfoot rollers*. *Vibrating sheepsfoot* dan *impact rammers* termasuk jenis *impact compactors*.

Tanah yang di kompaksi per-lapisan disebut sebagai *lifts*. Ketebalan *lifts* jarang sekali melebihi 12 inch. Tanah berbutir kasar biasanya terkompaksi dengan *lifts* sekitar 10 sampai 12 inch, sedangkan tanah berbutir halus biasanya terkompaksi dengan *lifts* sekitar 6 inch. Tegangan yang diberi oleh *compactor* menurun sesuai dengan kedalaman *lifts*-nya, terutama *compactor* statik. Karena hal tersebut, bagian atas dari *lift* itu mempunyai tegangan yang lebih tinggi daripada yang dibawah dan mendapatkan *compaction degree* yang tinggi. Karena hal itu, *lift* dengan ketebalan yang lebih kecil lebih direferensikan untuk kompaksi seragam. Perbandingan

dari banyaknya tipe (*heavy*) *field compactors* dan tanah yang cocok bisa dilihat di bawah ini.

Tabel 4. 4 Perbandingan Tipe Kompaksi Tergantung Jenis Tanah

Compaction type						
		Static		Dynamic		
		Pressure with kneading	Kneading with pressure	Vibration	Impact	
Material	Lift Thickness (in.)	Static sheeps-foot grid roller; scraper	Scraper; rubber-tired roller; loader; grid roller	Vibrating plate compactor; vibrating roller; vibrating sheepfoot roller	Vibrating sheepfoot rammer	Compactability
Gravel	12±	Not applicable	Very Good	Good	Poor	Very easy
Sand	10±	Not applicable	Good	Excellent	Poor	Easy
Silt	6±	Good	Excellent	Poor	Good	Difficult
Clay	6±	Very Good	Good	No	Excellent	Very Difficult

Untuk alat yang lebih kecil dan lebih ringan seperti *vibratory plates* dan *wacker hammers*, harus menggunakan *lifts* dengan tebal lebih dari 6 in.

Pada prakteknya di lapangan, sebaiknya banyaknya kompaksi yang diinginkan ditentukan terlebih dahulu berdasarkan tes *Proctor* yang relevan kemudian kontraktor yang akan memilih peralatan yang sesuai. Sehingga kontraktor harus mempunyai pengalaman yang dibutuhkan untuk memilih peralatan yang tepat.

F. *Compaction Quality Control*

Insinyur geoteknik perlu memeriksa apakah hasil kompaksi sudah sesuai spesifikasi atau belum. Untuk memeriksanya maka diperlukan derajat dari kompaksi atau

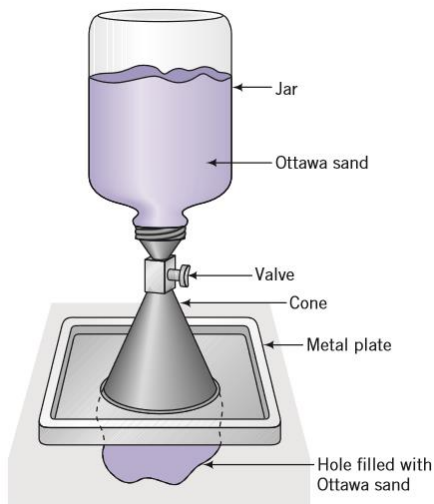
degree of compaction (DC), disebut juga *relative compaction*, yaitu sebuah rasio antara berat jenis yang dihitung dengan berat jenis yang diinginkan. *Degree of compaction* tidak berkaitan dengan *relative density*.

$$DC = \frac{\text{Measured dry unit weight}}{\text{Desired dry unit weight}}$$

Ada banyak variasi alat yang dapat digunakan untuk meneliti bilangan kompaksi yang di dapatkan di lapangan. Tiga alat yang paling sering digunakan adalah (1) *sand cone*, (2) *balloon*, dan terakhir (3) *nuclear density meter*.

1. *Sand Cone*: ASTM 1556

Sand cone adalah sebuah alat dengan botol kaca atau plastik dan corong yang terlekat di bagian leher botol tersebut.



Gambar 4. 11 Gambar *Sand Cone*

Berikut ini adalah prosedur untuk melakukan uji *sand cone*:

- a. Isi botol tersebut dengan pasir standar (pasir yang sudah diketahui kepadatannya) setelah itu cari tahu lah berat dari alat *sand cone* dengan botolnya yang terisi pasir (W_1). *American Society for Testing and Materials* (ASTM) menyarankan pasir Ottawa sebagai standar.
- b. Tentukan berapa berat pasir yang dibutuhkan untuk mengisi botol tersebut sampai penuh (W_2)
- c. Gali lubang kecil di tanah dan tentukan berapa berat tanah yang digali tersebut (W_3)
- d. Tentukan kadar air dari hasil galian tanah tersebut (w).
- e. Isi lubang tersebut dengan pasir standar dengan membalikan alat *sand cone* diatas lubang dan membuka katupnya.
- f. Tentukan berat pasir yang masuk ke lubang tersebut dengan melihat sisa dari pasir tersebut (W_4).
- g. Hitunglah berat jenis tanah dengan rumus ini:

$$\text{Weight of sand to fill hole} = W_s = W_1 - (W_2 + W_4)$$

$$\text{Volume of hole} = V = \frac{W_s}{(\gamma_d)_{\text{Ottawa sand}}}$$

$$\text{Weight of dry soil} = W_d = \frac{W_3}{1+w}$$

$$\text{Dry unit weight} = \gamma_d = \frac{W_d}{V}$$

Contoh Soal:

Berikut ini adalah data hasil uji *Sandcone* yang telah dilakukan

Data uji Sand Cone

Berat cetakan	9.19 lb
Berat cetakan dan pasir	12.34 lb
Volume cetakan	0.0335 ft ³

Kalibrasi sand cone

Berat alat <i>sand cone</i> dengan botol terisi pasir	12.03 lb
Berat alat <i>sand cone</i> dengan pasir yang tersisa	8.26 lb

Hasil sand cone

Berat alat <i>sand cone</i> dengan botol terisi pasir	16.25 lb
Berat tanah yang di gali	4.85 lb
Berat alat <i>sand cone</i> dengan pasir yang tersisa	8.62 lb
Kadar air tanah yang di gali	9.2 %

- Tentukan berat volume keringnya
- Berat volume kering maksimum dari uji *Proctor* standar adalah 115.6 pcf dengan kadar air optimum 10.8%. Spesifikasi membutuhkan minimum berat jenis 95% dari berat volume kering maksimum uji *Proctor* standar. Apakah spesifikasinya sudah sampai? Jika belum, bagaimana caranya supaya sampai?

Pembahasan:

Langkah 1: Buatlah tabel untuk menghitung

Berat Mold, W_1	9.19 lb
Berat mold dan pasir, W_{21}	2.34 lb
Volume mold, V_1	0.0335 ft ³
Berat volume kering dari sand cone, $\gamma_{dc} = (W_2 - W_1)/V_1$	93.9 pcf

Kalibrasi sand cone

Berat alat <i>sand cone</i> dengan botol terisi pasir, W_a	12.03 lb
Berat alat <i>sand cone</i> dengan pasir yang tersisa, W_b	8.26 lb
Berat pasir yang terisi di <i>cone</i> , W_2	3.76 lb

Hasil sand cone

Berat alat <i>sand cone</i> dengan botol terisi pasir, W_1	16.25 lb
Berat tanah yang di gali, W_3	4.85 lb
Berat pasir untuk mengisi lubang, $W_s = W_1 - (W_2 + W_4)$	3.87 lb
Berat alat <i>sand cone</i> dengan pasir yang tersisa, W_4	8.62 lb
Volume dari lubang, $V = W_s / \gamma_{dc}$	0.0412 ft ³
Kadar air tanah yang di gali, w	9.2 %
Berat tanah kering, $W_d = W_3 / (1 + w)$	4.44 lb
Berat volume kering tanah, W_d / V	107.9 pcf

Langkah 2: Samakan spesifikasi hasil dari *sand cone*
Berat volume kering minimum (γ_d) = $0.95 \times 115.6 = 108.8$ pcf
Hasil dari *sand cone* kita adalah 107.9 pcf. Derajat kompaksinya adalah: $DC = 107.9/109.8 = 98\%$ dan kadar airnya mendekati kadar air optimum, karena hal ini spesifikasinya tidak dicapai.

Langkah 3: Memikirkan cara untuk mencapai spesifikasi
Kadar air di lapangan adalah 9.2 % tapi pada uji *Proctor* standar kadar air optimumnya adalah 10.8%. Tanah tersebut dikompaksi secara *dry of optimum*. Maka dari itu, air harus ditambahkan ke tanah dan di kompaksi ulang. Harus hati - hati karena tanah tidak boleh mempunyai kadar air lebih dari 10.8%. Setelah itu berat jenisnya harus di cek ulang dan kompaksi ulang harus dilakukan.

2. *Balloon Test: ASTM D 2167*

Alat tes balon terdiri dari silinder yang di dalam silinder berisi balon. Silinder diisi dengan air.



Gambar 4. 12 Alat tes balon

Prosedur dari tes balon ini adalah sebagai berikut:

- a. Isi silinder dengan air ($V1$)
- b. Gali lubang kecil di tengah tanah dan ukur massa tanah yang sudah dilubangi (W)
- c. Tentukan kadar air dari tanah yang sudah di lubangi (ω)
- d. Gunakan pompa untuk memompa balon supaya mengisi lubang dari tanah.
- e. Hitung air tersisa yang ada di silinder ($V2$)
- f. Hitung berat unit dari tanah dengan rumus:

$$\gamma = \frac{W}{V1 - V2}, \gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w}$$

Tes balon ini jarang dipakai.

3. Nuclear Density Meter: ASTM 2922 & ASTM 5195

Alat pengukur massa jenis nuklir (Gambar 4.9) adalah alat serba guna yang bisa dengan cepat mendapatkan nilai dari berat unit dan kadar air dari tanah tanpa merusak tanah tersebut. partikel tanah menyebabkan radiasi untuk menyebarkan yang akan di tangkap oleh tube detektor, dan jumlah tanah yang menyebar juga dihitung. Tanah yang menyebar berbanding terbalik dengan berat unit dari tanah. Jika ada air di dalam tanah, maka kandungan hydrogen di air akan menyebarkan *neutron*, dan angka penyebarannya akan sama dengan kadar air. Ada 2 tipe cara menghitungnya yaitu yang pertama adalah Backscatter, yang berarti berapa banyak hamburan balik yang di deteksi oleh sinar *gamma* dan akan terdeteksi berat jenis tanah. Cara ini bisa menghitung kedalaman 2 sampai 8 inci. Tipe yang kedua adalah Transmisi langsung, yang di mana sinar yang ditangkap oleh detektor yang bisa langsung didapatkan berat jenis tanah. Cara ini bisa menghitung kedalaman 2 sampai 8 inci.



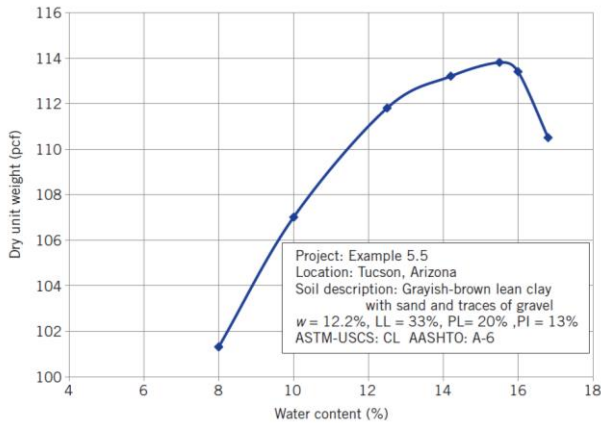
Gambar 4. 13 Nuclear Density Meter

Tabel 4. 5 Perbandingan *quality control* kompaksi

Material	Sand Cone	Balloon	Nuclear Density Meter
Keuntungan	Biaya rendah	Biaya rendah hingga sedang	Cepat
	Akurat	Lebih sedikit langkah kerja dibandingkan dengan <i>sandcone</i> Sampel besar	Langsung menghitung berat jenis dan kadar air
Kerugian	Lambat banyak langkah yang harus di kerjakan	Lambat	Biaya tinggi
	Standar pasir di lubang harus diambil	Perlu berhati-hati karena balon bisa pecah (Material yang berbatu cukup besar)	Sertifikasi radiasi diperlukan untuk menggunakan alat ini untuk operasional
	Berat jenis harus di hitung	Berat jenis harus dihitung	Kadar air bisa eror secara signifikan
	Sulit untuk mengontrol berat jenis pasir di lubang.	Sulit untuk mendapatkan ukuran lubang yang akurat	Memerlukan preparasi
	Mungkin adanya rongga di bawah plat	Mungkin adanya rongga di bawah plat	Radiasi hamburan balik bisa saja berbahaya
	Lobang bisa berubah jumlahnya jika ada gerakan	Lobang bisa berubah jumlahnya jika ada gerakan	

Contoh Soal:

Hasil dari Uji *Proctor* Standar untuk tanah lempung yang diklasifikasikan sebagai CL (lempung kurus dengan pasir dan sedikit kerikil) akan digunakan sebagai inti dari bendungan urugan seperti yang terlihat pada grafik berikut



Gambar 4. 14 Grafik Contoh Soal Uji *Proctor*

Tentukan:

- Kriteria kompaksi (spesifikasi kompaksi) untuk pekerjaan di lapangan. Keretakan akibat penyusutan harus dibuat seminimal mungkin
- Rekomendasikan alat kompaksi di lapangan yang dapat digunakan untuk memenuhi kriteria kompaksi

Pembahasan:

Karena tanah yang digunakan adalah lempung dengan plastisitas yang rendah dan ada sedikit kerikil, maka dapat diasumsikan bahwa tidak akan terjadi perubahan volume yang signifikan dari perubahan kadar air jika dibandingkan dengan tanah lempung CH.

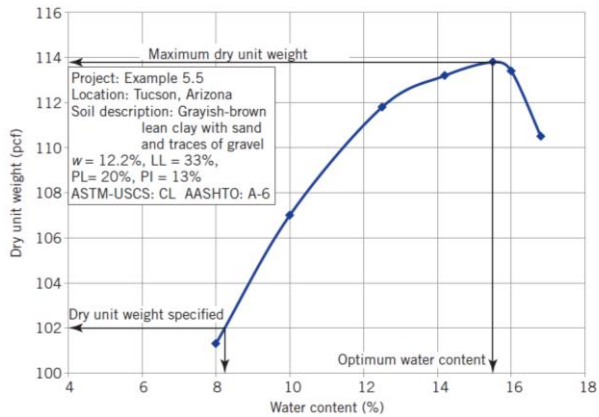
- Tentukan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum

$$\gamma_{d \max} = 113.8 \text{ pcf}$$

$$w_{\text{opt}} = 15.5\%$$

- Tentukan berat volume kering dan kadar air untuk di lapangan

Untuk di lapangan, kita perlu menggunakan 90% dari berat volume kering maksimum untuk dikompaksi secara *dry of optimum*. Sebenarnya standarnya adalah menggunakan 95% dari berat volume kering maksimum, tetapi untuk mengurangi kemungkinan keretakan, derajat kompaksi yang lebih rendah boleh digunakan.



Gambar 4. 15 Hasil uji *proctor* (berat volume kering dan kadar air)

$$\gamma_d = 0.9 \times 113.8 \approx 102 \text{ pcf (minimum)}$$

$w = 8.2\%$ (ada toleransi 8.2% - 8.5% untuk menjaga agar kompaksi dekat dengan 90%)

- Tentukan metode kompaksi di lapangan
Tanah yang digunakan adalah tanah lempung. Berdasarkan tabel 4.1 maka kita dapat menggunakan *sheepsfoot grid roller* yang dinilai "*very good*" atau menggunakan *vibrating sheepsfoot rammer* yang dinilai "*excellent*"

SOAL BAB 4

1. Jelaskan beberapa tujuan pemadatan tanah
2. Diketahui hasil uji kompaksi Proctor sebagai berikut (*specific gravity* = 2.67):

No. sample	Kadar air (%)	Massa (gr)
1	12.8	2010
2	14.5	2092
3	15.6	2114
4	16.8	2100
5	19.2	2055

Gambarkan kurva pemadatannya, serta tentukan nilai kadar air serta berat isi kering optimumnya. Gambarkan juga kurva yang sama dengan nilai kadar udara 0, 5 dan 10%. Diketahui volume mould sebesar 1 liter.

3. Hasil uji pemadatan standard Proctor sebagai berikut:

No. sample	Kadar air (%)	γ (kN/m ³)
1	17	21
2	15	21.5
3	12	22
4	10	22.5
5	8	21
6	7	20

Gambarkan diagram pemadatan, dan tentukan kadar air optimum serta berat volume kering maksimum

4. Setelah pemadatan timbunan sesuai spesifikasi pada nomor sebelumnya, contoh tanah di tempat tersebut diuji kepadatannya menggunakan alat sand cone. Dari pengujian didapatkan:

- Berat pasir yang dituang untuk memenuhi lubang dan corong kerucut = 860gr
- Berat pasir untuk mengisi corong = 324gr
- Berat volume pasir uji = 1.82 gr/cm³
- Berat tanah basah yang digali dari lubang = 638gr
- Kadar air di tempat = 22%

Tentukan berat volume kering lapangan, dan derajat kepadatan tanah di lapangan dibandingkan hasil uji Proctor.

5. Anda sebagai seorang sub-kontraktor dipercayakan untuk melakukan proses pemadatan tanah untuk suatu proyek konstruksi jalan. Untuk proses pemadatan itu, anda memerlukan tanah timbunan dengan volume 100 000 m³, setelah dipadatkan. Tanah timbunan tersebut akan diambil dari *borrow area* (tempat pengambilan bahan timbunan), dengan karakteristik tanah sebagai berikut:

Berat volume basah = 18.1 kN/m³

Kadar air = 8.2%

Specific gravity = 2.67

Jika diketahui bahwa syarat kepadatan timbunan tersebut adalah: berat volume kering = 15 kN/m³ dan kadar air = 10%

Tentukan:

- a. Volume tanah dari *borrow area* yang harus disediakan
- b. Derajat kejenuhan tanah timbunan

BAB V

THE MOVEMENT OF WATER

A. *Introduction*

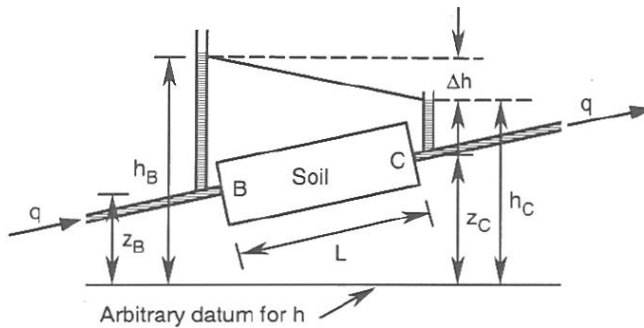
Dalam bab ini kita akan membicarakan aliran air antara pori - pori tanah yang saling berhubungan baik dalam satu maupun dua dimensi. Aliran air tanah melalui bahan berpori terbatas atau tidak terbatas dapat direpresentasikan sebagai aliran yang seragam dalam suatu bidang. Istilah aliran rembesan digunakan untuk mendeskripsikan pergerakan air melalui atau dibawah struktur tanah ke sumur, saluran air dan reservoir. Berdasarkan angka reynold yang didefinisikan dalam mekanika fluida, apabila angka tersebut kurang dari satu maka bentuk alirannya adalah laminar dan hukum Darcy dinyatakan benar. Pendekatan secara teoritis dan numerical telah dikembangkan dan diterapkan berdasarkan praktek yang dilakukan untuk menggambarkan aliran rembesan dalam tanah. Hal ini kemudian diikuti dengan melakukan metode uji untuk mendapatkan koefisien permeabilitas yang mengontrol kecepatan dan volume air yang mengalir per satuan waktu.

B. **Prinsip Aliran dalam Media Berpori**

Menurut persamaan Bernoulli, tinggi tiap energi total pada suatu titik di dalam air yang mengalir dapat dinyatakan sebagai penjumlahan dari tinggi tekanan, tinggi kecepatan dan tinggi elevasi. Yang kemudian berdasarkan definisi tersebut dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$h = \frac{p}{\gamma w} + \frac{v^2}{2g} + z$$

dimana:
 h = tinggi energi total
 p = tekanan
 v = kecepatan
 g = percepatan gravitasi
 γ_w = berat volume air



Gambar 5. 1 Prinsip Aliran dalam Media Berpori

Dalam mekanika tanah tinggi kecepatan dapat diabaikan karena kecepatan rembesan air sangat kecil sehingga tinggi energi total pada suatu titik dapat dinyatakan sebagai:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + Z$$

Gradien hidrolik dengan panjang L adalah sebuah parameter yang tak berdimensi dan dapat didefinisikan sebagai perbandingan kehilangan energi pada tanah dalam 2 titik dengan panjang tanah tersebut. Kemudian dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{(h_C - h_B)}{L}$$

Dimana

i = gradien hidrolik

L = jarak antara titik C dan B

Darcy memperkenalkan suatu persamaan sederhana yang digunakan untuk menghitung kecepatan aliran air yang mengalir dalam tanah yang jenuh, dinyatakan sebagai:

$$v = ki$$

k dinyatakan sebagai nilai koefisien rembesan dari tanah yang diuji.

Jumlah air yang mengalir per satuan waktu atau laju alirannya (*flow rate*) dapat dinyatakan dalam:

$$q = Av = Aki$$

Koefisien rembesan memiliki dimensi panjang per satuan waktu dan berkurang sesuai dengan penurunan ukuran partikelnya sendiri. Perkiraan kecepatan rembesan yang melalui pori tanah sebenarnya lebih besar dari v , kemudian dinyatakan dalam persamaan:

$$q = vA = AvV_s$$

dimana:

A_v = Luas pori penampang melintang contoh tanah

V_s = Kecepatan rembesan yang melalui pori-pori tanah

Dengan mengalikan dengan persamaan yang memiliki L maka:

$$A \times L \times v = Av \times L \times V_s$$

$$V \times v = V_s \times Vv$$

$$V = \frac{v}{n}$$

$$V_s = \frac{v(1 + e)}{e}$$

dimana:

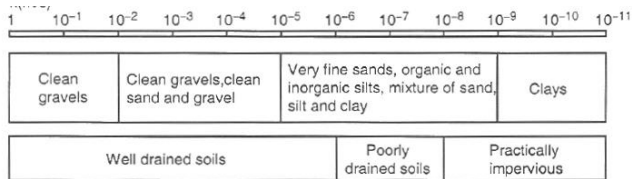
n = porositas

e = angka pori

C. Permeabilitas

1. Koefisien Permeabilitas

Koefisien permeabilitas k berdasarkan dengan eksperimen besarnya bervariasi dimulai dari 1 m/s untuk kerikil dan kurang dari 10^{-9} untuk tanah liat. Besarnya nilai k bergantung pada ukuran partikel, bentuk dan struktur tanah itu sendiri. Ketebalan lapisan air berpengaruh terhadap nilai k sesuai dengan perubahan suhu yang terjadi.



Gambar 5. 2 Nilai Koefisien Permeabilitas (m/s)

Sebuah persamaan empiris yang dibuat oleh Hazen menghubungkan koefisien permeabilitas dari butiran-butiran tanah dengan distribusi ukurannya:

$$k = CD10^2$$

Dimana k merupakan koefisien permeabilitas dengan satuan m/s, C adalah koefisien yang berkisar 0.005 untuk lanau dan pasir yang bergradasi baik sampai 0.012 untuk pasir yang seragam, D_{10} adalah tanah yang distribusi ukurannya bersesuaian dengan 10% lolos ayakan.

2. Uji Laboratorium Permeabilitas

Ada 2 jenis tes yang dilakukan di laboratorium untuk menentukan besarnya koefisien permeabilitas pada suatu tanah yaitu uji tinggi konstan dan uji tinggi jatuh.

a. Uji Tinggi Konstan

Uji tinggi konstan lebih cocok digunakan untuk tanah berbutir dengan koefisien rembesan lebih kecil dari 10^{-7} m/s.

Pada tipe percobaan ini, pemberian air di dalam pipa masuk dan pipa keluar dijaga sehingga perbedaan tingginya selalu konstan selama percobaan. Setelah kecepatan air yang melalui contoh tanah menjadi konstan, air dikumpulkan dalam gelas ukur selama suatu waktu yang diketahui. Volume total dari air yang dikumpulkan tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$Q = Avt = A(ki)t$$

dimana:

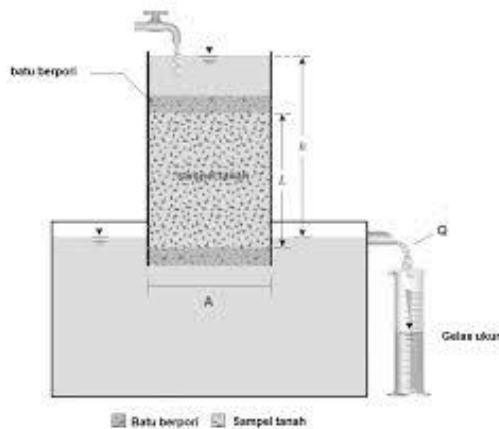
Q = Volume air yang dikumpulkan

A = Luas penampang melintang contoh tanah

t = waktu yang digunakan untuk mengumpulkan air
atau

$$i = \frac{h}{L}$$

dimana L adalah panjang contoh tanah.



Gambar 5. 3 Uji Rembesan dengan Cara Tinggi Konstan

Ketika kedua persamaan tersebut digabungkan akan menghasilkan:

$$Q = A \left(k \frac{h}{L} \right) t$$

b. Uji Tinggi Jatuh

Metode ini digunakan untuk tanah yang berbutir halus seperti lanau dan tanah liat dengan koefisien permeabilitas 10^{-7} sampai dengan 10^{-9} m/s. Air dalam pipa tegak yang dipasang diatas contoh tanah mengalir melalui contoh tanah. Pada mulanya perbedaan tinggi air pada waktu $t = 0$ adalah h_1 kemudian air dibiarkan mengalir melalui contoh tanah hingga perbedaan tinggi air pada waktu tertentu (t) adalah h_2 .

Jumlah air yang mengalir melalui contoh tanah pada suatu waktu t dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q = k \frac{h}{L} A = -a \frac{dh}{dt}$$

dimana

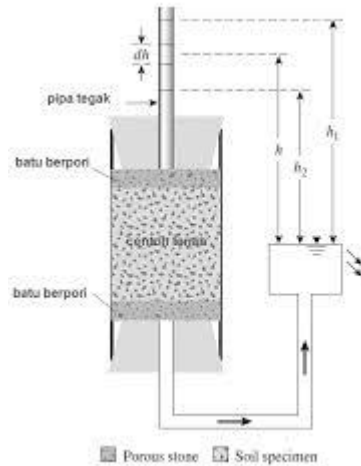
q = jumlah air yang mengalir melalui contoh tanah per satuan waktu

a = luas penampang pipa tegak

A = luas penampang melintang contoh tanah

Dengan melakukan integrasi pada persamaan yang kontinu ini maka kita akan medapatkan:

$$\int_0^t \frac{kA}{aL} dt = \int_{h_1}^{h_2} -\frac{dh}{h} \rightarrow k = 2,303 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2}$$



Gambar 5. 4 Uji Rembesan dengan Cara Tinggi Jatuh

3. *In Situ Permeability Test*

Tes permeabilitas secara in situ membutuhkan tes konstruksi dan observasi yang mana keduanya sangat mahal. Test permeabilitas secara in situ biasanya berdasarkan uji tinggi konstan dan uji tinggi jatuh.

a. Dengan cara pemompaan di sumur

Di dalam percobaan, air dipompa keluar dari sumur uji yang mempunyai mantel silinder berlubang dengan kecepatan tetap. Gambar 5.4 menunjukkan suatu lapisan tanah tembus air, yang koefisien rembesannya akan ditentukan, dimana di sebelah bawah dibatasi oleh suatu lapisan kedap air. Ketinggian air di dalam sumur uji dan sumur observasi diteliti secara terus menerus sejak pemompaan dilakukan hingga keadaan tunak (*steady state*) dicapai. Keadaan tunak tercapai bilamana ketinggian air di dalam sumur uji dan sumur observasi menjadi tunak. Jumlah air tanah yang mengalir ke dalam sumur uji per satuan waktu (debit = q) adalah sama dengan jumlah air yang dipompa keluar dari sumur uji per satuan waktu; keadaan ini dapat dituliskan sebagai:

$$q = k \frac{dh}{dr} 2\pi r \cdot h$$

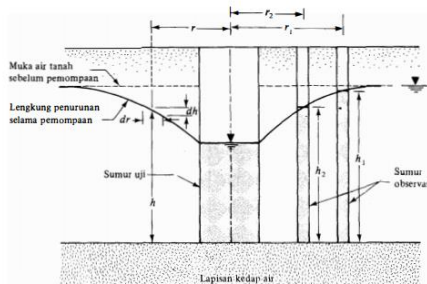
Atau:

$$\int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = \left(\frac{2\pi k}{q} \right) \int_{h_2}^{h_1} h \cdot dh$$

Jadi,

$$k = \frac{2,303q \log_{10} \frac{r_1}{r_2}}{\pi(h_1^2 - h_2^2)}$$

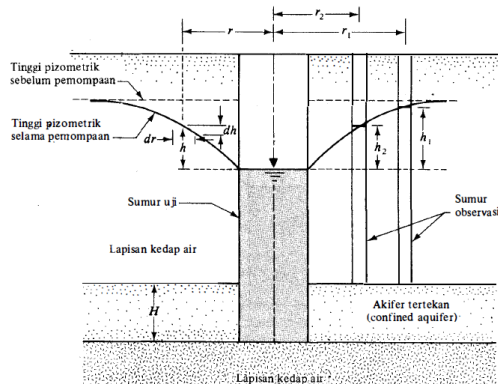
Dari pengukuran di lapangan apabila q , r_1 , r_2 , h_1 , dan h_2 diketahui, koefisien rembesan dapat dihitung berdasarkan persamaan (5.17).



Gambar 5. 5 Uji Pemompaan dari Suatu Sumur Uji dalam Lapisan Tembus Air yang Didasari oleh Lapisan Kedap Air

Koefisien rembesan rata-rata untuk suatu *confined aquifer* (lapisan penyimpanan air yang diapit oleh lapisan kedap air) dapat juga ditentukan dengan cara memompa air keluar dari sumur uji, dimana mantel silinder berlubangnya dipasang sampai ke lapisan akifer dan dengan menghitung ketinggian air di dalam sumur observasi yang dipasang dengan jarak

yang berbeda-beda dari sumur uji. Pemompaan dilakukan dengan debit yang tetap hingga keadaan tunak dicapai.



Gambar 5. 6 Uji Pemompaan dari Suatu Sumur Uji yang Dibuat Sampai dengan Lapisan Tembus Air yang Diapit oleh Lapisan Kedap Air (Akifer Tertekan)

Karena hanya dapat mengalir ke dalam sumur uji melalui akifer dengan ketebalan H, maka persamaan debit air yang dipompa keluar dari sumur dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q = k \frac{dh}{dr} 2\pi r \cdot H$$

Atau

$$\int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = \int_{h_2}^{h_1} \left(\frac{2\pi k H}{q} \right) dh$$

Koefisien rembesan yang searah dengan aliran dapat dituliskan sebagai berikut:

$$k = \frac{q \log_{10} \frac{r_1}{r_2}}{2,727H(h_1 - h_2)}$$

b. Koefisien Rembesan dari Lubang Auger

Tipe uji ini biasa disebut sebagai *slug test*. Lubang dibuat di lapangan sampai dengan kedalaman L di bawah muka air tanah. Pertama-tama air ditimba keluar dari lubang. Keadaan ini akan menyebabkan adanya aliran air tanah ke dalam lubang melalui keliling dan dasar lubang. Penambahan tinggi air di dalam lubang auger dan waktunya dicatat. Koefisien rembesan dapat ditentukan dari data tersebut dengan cara:

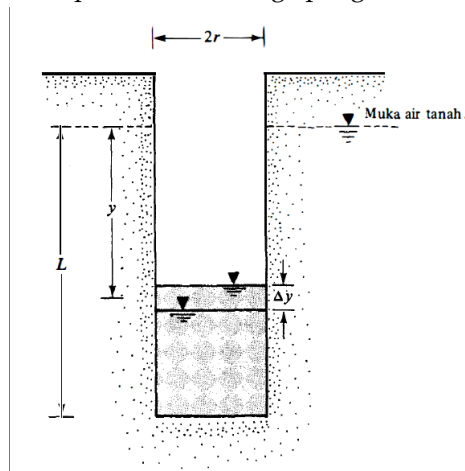
$$k = \frac{40}{\left(20 + \frac{L}{r}\right) \left(2 - \frac{y}{L}\right)} \frac{r \Delta y}{y \Delta t}$$

dimana:

r = jari - jari lubang auger (m)

y = harga rata - rata dari jarak antara tinggi air di dalam lubang auger dengan muka air tanah selama interval waktu Δt (menit),

Penentuan koefisien rembesan dari lubang auger biasanya tidak dapat memberikan hasil yang teliti namun dapat memberi harga pangkat dari k .



Gambar 5. 7 Penentuan Koefisien dari Suatu Lubang Yang Dibuat dengan Alat Bor Auger.

D. Aliran Air pada Tanah Tak Jenuh

Konduktivitas hidrolis berkaitan dengan air yang dalam pori. Aliran air yang melalui tanah tak jenuh bergantung pada tingkat kejenuhan tanah itu sendiri. Saat tanah itu jenuh maka air akan mengalir secara lambat namun setelah tanah itu menjadi tak jenuh maka aliran air akan terjadi dengan cepat.

E. Hubungan Empiris untuk Koefisien Rembesan

Untuk tanah pasir dengan ukuran butir yang merata (koefisien keseragamannya kecil), Hazen (1930) memperkenalkan hubungan empirisnya yaitu:

$$k = cD_{10}^2$$

Dimana:

k dalam satuan cm/s

c = konstanta bervariasi dari 0,4-1,4

D_{10} = ukuran efektif dalam satuan mm

Persamaan di atas didasarkan pada penyelidikan yang dilakukan oleh Hazen pada tanah pasir bersih yang lepas, apabila ada sedikit campuran lempung dan lanau maka harga koefisien akan berubah.

Kemudian Casagrande mengajukan rumus sederhana untuk menghitung koefisien rembesan dari pasir bersih yang halus sampai dengan yang agak kasar sebagai berikut:

$$k = 1,4 e^2 k_{0,85}$$

Dimana:

k = koefisien rembesan pada angka pori e

$k_{0,85}$ = koefisien rembesan pada angka pori 0,85

Dengan memakai persamaan Kozeny-Carman, didapat:

$$k = C_1 \frac{e^3}{1 + e}$$

Dimana:

C_1 = Konstanta

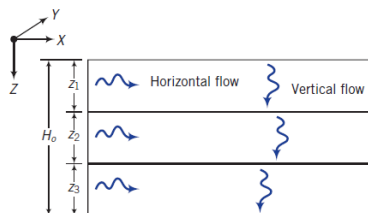
Berdasarkan observasi Samarasinghe, Huang dan Drnevich menyarankan bahwa koefisien rembesan dari tanah lempung yang terkonsolidasi secara normal dapat diberikan dengan persamaan berikut:

$$k = C_3 \frac{e^n}{1 + e}$$

Dimana C_3 dan n adalah konstanta-konstanta yang ditentukan dari hasil percobaan.

F. Aliran Air Secara Paralel Terhadap Lapisan Tanah

Ketika arah alirannya paralel terhadap tanah maka gradien hidroliknya sama untuk setiap titiknya.



Gambar 5. 8 Aliran Air Secara Paralel Terhadap Lapisan Tanah

Untuk rembesan air yang mengarah pada arah x total dari aliran air yang melalui lapisan tanah dapat dihitung:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

$$A k_x i = A_1 k_{x1} i + A_2 k_{x2} i + \dots + A_n k_{xn} i$$

Dimana $A = z \times l = (z_1+z_2+\dots+z_n) l$. Substitusi nilai A ke dalam persamaan 5.20 menjadi:

$$kx = (Z_1kx_1 + Z_2kx_2 + \dots + Z_nkx_n)/z$$

G. Aliran Air Normal Terhadap Tanah

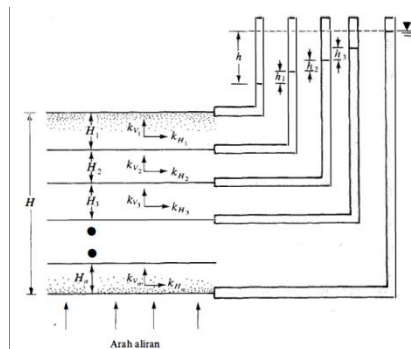
Untuk aliran air normal ke lapisan tanah kehilangan tinggi pada setiap lapisan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta H = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n$$

Dimana ΔH adalah total dari pengurangan tinggi sedangkan Δh_1 sampai Δh_n adalah pengurangan tinggi pada setiap lapisan. Apabila kecepatannya dianggap sama maka konduktivitas hidrolis secara vertikal dapat dinyatakan sebagai:

$$k_{z(eq)} = \frac{H_0}{\frac{Z_1}{kZ_1} + \frac{Z_2}{kZ_2} + \dots + \frac{Z_n}{kZ_n}}$$

Dimana k_{z1} sampai dengan k_{zn} adalah konduktivitas hidrolis secara vertikal pada lapisan tanah pertama hingga lapisan ke- n . Besarnya $k_{z(eq)}$ biasanya lebih kecil dibandingkan dengan $k_{x(eq)}$.



Gambar 5. 9 Aliran Air Secara Vertikal Terhadap Tanah Berlapis

H. *Equivalent Hydraulic Conductivity*

Persamaan equivalent untuk konduktivitas hidrolis secara normal dan paralel dapat dituliskan berdasarkan rumus berikut:

$$k_{eq} = \sqrt{k_{x(eq)}k_{z(eq)}}$$

I. **Aliran Air Secara Dua Dimensi pada Tanah**

Aliran air secara dua dimensi pada tanah dinyatakan dalam sebuah persamaan yang dibuat oleh Laplace:

$$k_x \frac{d^2 H}{dx^2} + k_z \frac{d^2 H}{dz^2} = 0$$

Persamaan yang dibuat oleh Laplace menunjukkan bahwa gradien hidrolis yang berubah dalam satu arah adalah sama dengan perubahan pada arah lainnya. Untuk tanah yang isotropik, k_x dan k_z sama sehingga persamaannya menjadi:

$$\frac{d^2 H}{dx^2} + \frac{d^2 H}{dz^2} = 0$$

J. *Flownet Sketching*

1. **Kriteria untuk Menggambar *Flownet***

Untuk menggambar sebuah *flownet* maka ada beberapa kriteria yang perlu diperhatikan:

1. Kondisi batas (*boundary condition*) harus dipenuhi
2. Garis aliran harus memotong garis ekuipotensial pada sudut kanan
3. Area antara garis aliran dan garis ekuipotensial harus berbentuk bujur sangkar
4. Kuantitas aliran melalui setiap saluran air harus konstan
5. Kehilangan energi antara setiap garis ekuipotensial berturut-turut adalah konstan

6. Garis aliran yang satu tidak dapat berpotongan dengan garis aliran lainnya
7. Garis ekuipotensial tidak dapat memotong garis ekuipotensial lainnya
8. Beberapa garis aliran dan garis ekuipotensial yang tak terbatas dapat ditarik untuk memenuhi persamaan dari Laplace

2. Jaringan Aliran untuk Tanah Isotropik

Cara menggambar jaringan aliran untuk tanah isotropik yaitu:

- a. Gambarkan struktur dan massa tanah ke skala yang sesuai
- b. Identifikasi batas yang dapat dilewati air dan yang tidak dapat dilewati air. Pada permukaan tanah ada lapisan tidak kedap air karena air dapat mengalir sepanjang permukaan lapisan ini.
- c. Buat sketsa serangkaian garis (empat atau lima) kemudian buat sketsa angka yang sesuai garis ekuipotensial sedemikian rupa sehingga area antara garis ekuipotensial dan garis aliran berbentuk bujur sangkar yang melengkung.

K. Interpretasi dari *Flownet*

1. Laju aliran (*flow rate*)

Total penurunan energi dapat dihitung dengan rumus:

$$\Delta h = \frac{\Delta H}{N_d}$$

Dimana ΔH adalah perbedaan tinggi pada bagian hulu dan hilir, N_d adalah jumlah garis ekuipotensial dikurang 1. Berdasarkan hukum Darcy laju aliran dinyatakan sebagai:

$$\Delta h = k\Delta H \frac{N_f}{N_d}$$

Dimana N_f adalah jumlah garis aliran dikurang 1.

2. Gradien hidrolik

Gradien hidrolik dapat dihitung melalui:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Dimana L merupakan panjang aliran air dimana kehilangan tekanan terjadi. Gradien hidrolik maksimum terjadi saat L minimum.

3. Titik Kritis Gradien Hidrolik

Gradien hidrolik kritis dapat dihitung melalui persamaan:

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{e}$$

Dimana G_s merupakan *specific gravity* dari tanah itu sendiri dan e adalah angka pori.

4. Distribusi Tekanan Air Pori

Besarnya energi dalam distribusi tekanan air pori pada berbagai titik j dalam *flownet* adalah:

$$(h_p)_f = \Delta H - (N_d)_f \Delta h - h_z$$

Dan tekanan air pori:

$$U_f = (h_p)_f \gamma_w$$

5. Uplift Forces

Gaya angkat per satuan panjang dapat ditemukan dengan menghitung tekanan air sepanjang titik diskrit dan kemudian menemukan area dibawah diagram distribusi tekanan air pori dengan persamaan:

$$P_w = \sum_{j=1}^n U_j \Delta x_j$$

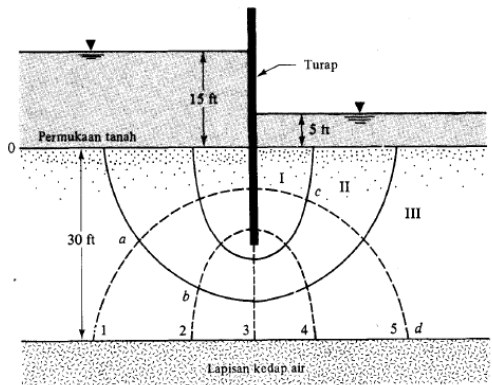
Dimana P_w adalah gaya angkat per satuan panjang, U_j adalah rata-rata tekanan air pori dalam interval Δx dan n adalah nilai dari interval. Berdasarkan hukum Simpson untuk menghitung besarnya P_w dapat menggunakan rumus:

$$P_w = \frac{\Delta x}{3} (u_1 + u_n + 2 \sum_{\substack{j=3 \\ \text{odd}}}^n u_j + 4 \sum_{\substack{i=2 \\ \text{even}}}^n u_j)$$

L. Contoh Soal

Suatu jaringan aliran dari air di sekitar sebuah jajaran turap di dalam lapisan tembus air ditunjukkan dalam gambar berikut. Diketahui $k_x = k_z = k = 5 \times 10^{-3}$ cm/detik. Tentukan:

1. Berapa tinggi (di atas permukaan tanah) air akan naik apabila pizometer diletakkan pada titik - titik a, b, c, dan d
2. Jumlah rembesan air yang melalui saluran air II per satuan lebar (tegak lurus bidang gambar) per satuan waktu.
3. Jumlah rembesan total yang melalui lapisan tembus air per satuan lebar.



Gambar 5. 10 Contoh Soal *Flownet*

Penyelesaian:

- a. Diketahui $N_f = 3$, $N_d = 6$, perbedaan tinggi energi antara hulu dan hilir adalah 10 ft. Jadi kehilangan energi antara dua garis ekuipotensial adalah $10/6 = 1,667$ ft.

Untuk titik a:

$$(15 - 1 \times 1,667) = 13,333 \text{ ft dari permukaan tanah}$$

Untuk titik b:

$$(15 - 2 \times 1,667) = 11,667 \text{ ft di atas permukaan tanah}$$

Untuk titik c:

$$(15 - 3 \times 1,667) = 9,667 \text{ ft di atas permukaan tanah}$$

Untuk titik d:

$$(15 - 4 \times 1,667) = 7,667 \text{ ft di atas permukaan tanah}$$

b. $\Delta q = k \frac{H}{N_d}$

$$k = 5 \times 10^{-3} \times 0,03281 \text{ ft/detik} = 1,64 \times 10^{-4} \text{ ft/detik}$$

$$\Delta q = (1,64 \times 10^{-4})(1,667) = 2,73 \times 10^{-4} \text{ ft}^3/\text{detik/ft}$$

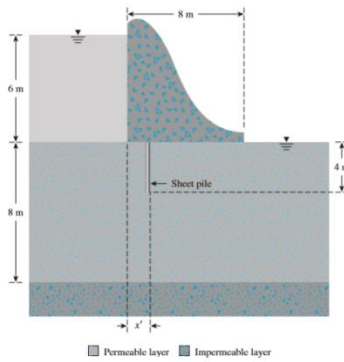
c. $q = k \frac{HN_f}{N_d} = (1,64 \times 10^{-4})(1,667)3 = 8,2 \times 10^{-4} \text{ ft}^3/\text{detik/ft}$

SOAL BAB 5

1. Buatlah derivasi dari persamaan gradien hidrolis (i) yang digunakan untuk menghitung aliran air dalam tanah.
2. Suatu lokasi tanah kosong terdiri dari 2 jenis tanah berbeda yang kemudian diinspeksi di laboratorium. Hasil pengujian permeabilitas pada kedua sample tanah tersebut sebagai berikut:
 - a. **Lapis tanah 1:** Luas penampang specimen = 177 cm^2 , tinggi sample uji = 30 cm. Beda tinggi energi = 50 cm (konstan), volume air yang ditampung setelah 5 menit = 350 cm^3 .
 - b. **Lapis tanah 2:** Luas penampang specimen = 1000 mm^2 , tinggi specimen = 200 mm, luas penampang pipa = 40 mm^2 . Beda tinggi awal = 500 mm. Beda tinggi ($t=180$ detik) = 300 mm

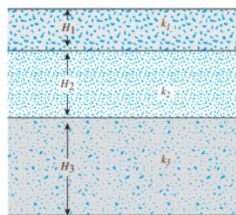
Tentukan nilai koefisien permeabilitas kedua jenis tanah tersebut!

3. Tentukan nilai koefisien permeabilitas equivalent arah vertical dan horizontal! Diketahui ketebalan masing-masing lapisan tanah ini adalah 4 m.
4. Jika diatas lokasi tanah tersebut dibangun suatu struktur penahan air dengan konfigurasi seperti dibawah ini.



Nilai k yang dapat digunakan adalah rata-rata dari nilai k equivalent pada soal sebelumnya. Dianggap nilai k tersebut sama untuk arah x dan z . Tentukan debit air rembesan pada struktur ini, dalam satuan $m^3/hari/m$. Nilai $x' = 1$ m.

5. Diketahui suatu profil tanah di bawah ini.



Jika diketahui:

- $H_1 = 1\text{ m}$, $k_1 = 10^{-4}$ cm/det
- $H_2 = 1\text{ m}$, $k_2 = 2.8 \times 10^{-2}$ cm/det
- $H_3 = 2\text{ m}$, $k_3 = 3.5 \times 10^{-5}$ cm/det

Tentukan rasio dari $k_{H(eq)} / k_{V(eq)}$

BAB VI

KONSEP TEGANGAN EFEKTIF DAN TEGANGAN MASSA TANAH

A. Pengertian

Berat tanah yang terendam air (jenuh) disebut berat tanah efektif, sedangkan tegangan yang terjadi akibat berat tanah efektif di dalam tanah disebut tegangan efektif. Tegangan efektif merupakan tegangan yang mempengaruhi kuat geser dan perubahan volume atau penurunan tanah (konsolidasi). penurunan muka air tanah akan menyebabkan semakin tingginya tegangan efektif, kenaikan tegangan efektif akan membuat tanah semakin padat. tegangan efektif juga dipengaruhi oleh adanya rembesan air yang melaluinya dan bertambah besar atau kecil tergantung pada arah rembesan air tersebut.

B. Tegangan Akibat Massa Tanah Itu Sendiri

1. Konsep Tegangan Efektif

Konsep tegangan efektif pertama kali ditemukan oleh Karl Terzaghi pada tahun 1936. Prinsip tegangan efektif menurut Terzaghi hanya berlaku pada tanah jenuh sempurna, yaitu:

- Tegangan normal total (σ) pada suatu bidang di dalam massa tanah, yaitu tegangan akibat berat tanah total termasuk air dalam ruang pori.
- Tegangan normal efektif σ' , yaitu tegangan yang dihasilkan dari beban berat butiran tanah per satuan luas bidangnya.
- Tekanan pori (u) yaitu tekanan air yang mengisi rongga (void) di dalam butiran padat.

Tekanan air Pori dirumuskan:

$$u = \gamma_w \cdot h$$

dimana

γ_w adalah berat volume air

h adalah jarak antara muka air dan permukaan tanah

Maka dapat disimpulkan:

$$\sigma' = \sigma - u$$

$$\sigma = \gamma_{sat} \cdot h$$

$$u = \gamma_w \cdot h$$

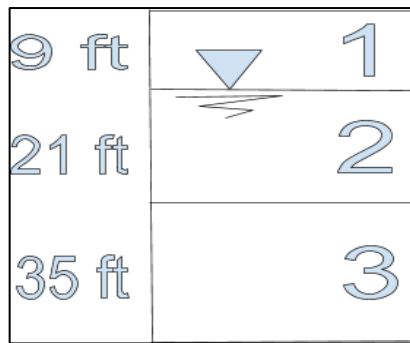
dimana

γ_{sat} = berat jenis tanah jenuh air [kN/m^3]

γ_w = berat jenis air [kN/m^3]

h = jarak antara muka air dan permukaan tanah

Contoh soal:



Gambar 6. 1 Contoh Soal Tegangan Efektif

$$\gamma_{1\text{dry}} = 100\text{lb}/\text{ft}^3$$

$$\gamma_{2\text{sat}} = 122\text{lb}/\text{ft}^3$$

$$\gamma_{3\text{sat}} = 128\text{lb}/\text{ft}^3$$

Penyelesaian:

$$\sigma_1 = 9 \times 100 = 900\text{lb}/\text{ft}^3$$

$$\sigma_2 = \sigma_1 + 122 \times 21 = 3462\text{lb}/\text{ft}^3$$

$$\sigma_3 = \sigma_2 + 355 \times 128 = 8070\text{lb}/\text{ft}^3$$

$$u_1 = 0$$

$$u_2 = 21 \times 62,4 = 1320,4 \text{ lb}/ft^3$$

$$u_3 = u_2 + 35 \times 62,4 = 3556,8 \text{ lb}/ft^3$$

Tegangan efektif

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u_1 = 900 - 0 = 900 \text{ lb}/ft^3$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 - u_2 = 3462 - 1310,4 = 2151,6 \text{ lb}/ft^3$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u_3 = 8070 - 3556,8 = 4513,2 \text{ lb}/ft^3$$

Kesimpulan dari hasil perhitungan diatas adalah semakin besar kedalaman air maka semakin besar pula tegangan normal dan tekanan pori yang dihasilkan sehingga mempengaruhi besar tegangan efektif. dengan kata lain, kedalaman air berbanding lurus dengan tegangan normal, tekanan pori dan tegangan efektif.

2. Tekanan Pori Negatif Akibat Kenaikan Kapiler

Kenaikan kapiler dihasilkan dari kombinasi kekuatan tegangan permukaan dan gaya antar molekul antara fase cair dan fase padat. Mengingat bahwa tekanan pada level permukaan air adalah nol, semua air diatas level tersebut pasti memiliki tekanan negatif. Pada fase padat, tekanan pori negatif mempengaruhi kenaikan tegangan efektif dan bervariasi dengan derajat kejenuhan dan diperoleh dari proses pengeringan ataupun pembasahan. Kejadian tersebut dapat didemonstrasikan dengan mencelupkan sebuah pipa kapiler berdiameter kecil ke dalam air seperti pada Gambar 6.2 air kapiler tersebut memiliki hidrolis yang berkelanjutan dengan permukaan air dan mengalami kenaikan ke ketinggian tertentu dimana terdapat keadaan seimbang antara berat tiang air dan resultan gaya vertikal dari gaya tekan permukaan. Ketinggian dari pipa kapiler h_c dirumuskan:

$$h_c = \frac{(4T \cos \theta)}{\gamma_w d}$$

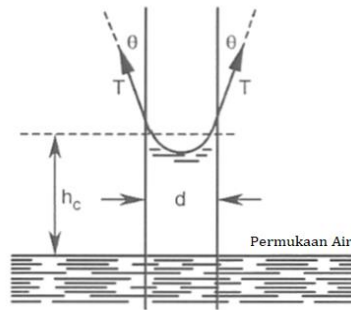
dimana

T = tekanan permukaan (0.074 N/m pada suhu 20° C)

θ = sudut tekanan permukaan dengan sumbu vertikal

d = diameter pipa

γ_w = berat jenis air



Gambar 6. 2 Pipa Kapiler Kecil

Walaupun konsep kenaikan air kapiler yang didemonstrasikan dengan pipa kapiler yang ideal dapat dipakai untuk tanah, tapi perlu diperhatikan bahwa pipa kapiler yang terbentuk didalam tanah mempunyai luas penampang yang bervariasi. hasil dari ketidak-seragaman kenaikan air kapiler dapat dilihat apabila suatu tanah berpasir yang kering di dalam silinder diletakkan bersentuhan dengan air. Setelah tanah dan air bersentuhan untuk beberapa saat, variasi derajat kejenuhan dengan tinggi tabung tanah akibat kenaikan air kapiler secara kasar dapat ditunjukkan dalam sampai dengan ketinggian h_2 , air dapat menempati pori-pori yang terbesar; maka dari itu, derajat kejenuhan tanah di daerah tersebut adalah 100%. Diluar h_2 , air hanya dapat menempati pori yang terkecil; oleh karena itu, derajat kejenuhan adalah lebih kecil dari 100%. Hazen (1930) memberikan perumusan untuk menentukan tinggi kenaikan air kapiler secara pendekatan, yaitu:

$$h_1 = \frac{C}{eD_{10}}$$

dimana:

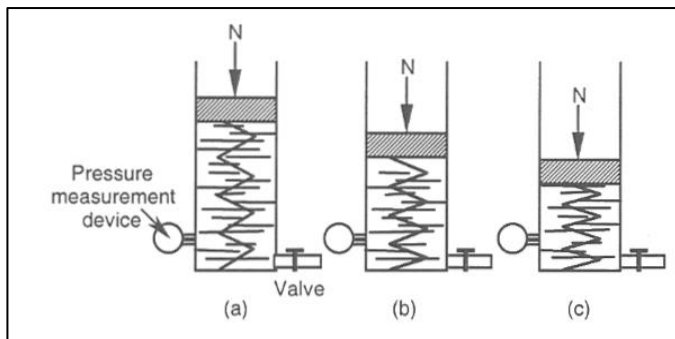
D_{10} = ukuran efektif (mm)

e = angka pori

C = konstanta yang bervariasi dalam 10 mm^2 sampai dengan 50 mm^2

C. State of Stress at a Point Due to External Forces

1. Model Konseptual Konsolidasi



Gambar 6. 3 Model Konseptual Konsolidasi

Beban eksternal (beban luar) akan meningkatkan tegangan dalam segala arah dalam tanah jenuh. peningkatan tegangan bergantung pada lokasi beban tersebut dan estimasi dari distribusi tegangannya. Pada tanah, ketika kita memberikan beban luar maka tekanan porinya akan meningkat dan peningkatannya hampir sama dengan beban luar yang diberikan dan mengakibatkan air didalamnya akan bergerak menuju ke tanah yang lebih kering sehingga lama kelamaan air yang keluar tersebut akan menyebabkan berkurangnya volume tanah tersebut karena rongga yang tadinya diisi oleh air sudah tidak ada. Tanah lama kelamaan akan menjadi lebih padat karena rongganya semakin kecil dan akan mengalami penurunan atau konsolidasi.

Silinder dengan pegas dan piston diisi oleh air sampai penuh seperti (Gambar 6.3 a), katupnya merupakan satu-satunya jalan keluar air. kemudian diberi gaya normal N pada piston tetapi air di dalamnya menolak gaya tersebut karena airnya tidak dapat keluar sehingga tidak dapat ditekan sehingga tidak akan mengalami deformasi. Tetapi ketika katup air dibuka dalam kurun waktu tertentu maka air yang diberi tekanan akan keluar melalui katup seperti (Gambar 6.3 b). Hasilnya pegasnya akan akan turun sesuai dengan gaya vertikal N yang diberikan dan juga penolakan dari tekanan air dan pegasnya. Jika katup air dibiarkan terus terbuka sampai airnya habis maka pegas akan mengambil alih semua tekanan yang diberikan oleh gaya N terhadap pistonnya. Pada tanah, katup air merepresentasikan rongga dalam partikel tanah dan pegas merepresentasikan tanah itu sendiri dan gaya N merepresentasikan tekanan luar berupa struktur bangunan.

Suatu lapisan tanah jenuh jika diberi penambahan beban, angka tekanan air pori akan naik secara mendadak. Pada tanah berpasir yang mudah dilalui air (*permeable*), air dapat mengalir dengan cepat sehingga pengaliran air ke pori ke luar sebagai akibat dari kenaikan tekanan air pori dapat terjadi dengan cepat. Keluarnya air menyebabkan berkurangnya volume tanah sehingga menyebabkan penurunan permukaan tanah (konsolidasi). Karena air dalam tanah berpasir dapat mengalir ke luar dengan cepat, maka penurunan segera dan penurunan konsolidasi terjadi secara bersamaan. Pada tanah lempung jenuh jika diberi penambahan tegangan, maka penurunan (*settlement*) akan terjadi dengan segera. Tetapi koefisien rembesan lempung sangat kecil jika dibandingkan dengan koefisien rembesan pada tanah berpasir, sehingga penambahan tekanan air pori akibat penambahan beban akan terjadi secara pelan atau lambat dalam waktu yang cukup lama. Jadi pada tanah lempung perubahan volume karena keluarnya air dari dalam pori (konsolidasi) akan terjadi sesudah penurunan segera. Penurunan konsolidasi tersebut

biasanya jauh lebih besar dan lambat dibandingkan dengan penurunan segera.

Contoh Soal:

Lapisan tanah liat setebal 4 m ditimpa oleh lapisan pasir setinggi 5 m, yang atasnya adalah permukaan tanah. tanah liat menutupi lapisan kedap air. awalnya muka air berada di permukaan tanah tetapi diturunkan 4 meter dengan pemompaan. Hitunglah σ'_v pada lapisan atas dan lapisan dasar tanah liat sebelum dan setelah pemompaan.

Untuk Pasir:

$$e = 0,45$$

$$G_s = 2,6$$

$$S_r (\text{pasir, setelah pemompaan}) = 50\%$$

Untuk Tanah liat:

$$e = 1,0$$

$$G_s = 2,7$$

Penyelesaian:

Hitung massa jenis pasir saat $S_r = 50\%$ dan 100%

Untuk $V = 1 \text{ m}^3$,

$$V_s = 1/(1+e) = 1/(1 + 0,45) = 0,690 \text{ m}^3 ,$$

$$V_v = e/(1+e) = 0,45/(1 + 0,45) = 0,31 \text{ m}^3 ,$$

$$\rho_{50\% \text{sat}} = 0,690 \times 2,6 + 0,310 \times 0,5 \times 1,0 = 1,949 \text{ Mg/m}^3.$$

$$\rho_{\text{sat}} = 0,690 \times 2,6 + 0,310 \times 1,0 = 2,104 \text{ Mg/m}^3.$$

menggunakan perhitungan yang sama $e = 1$, $\rho_{\text{sat}} (\text{clay}) = 1,850 \text{ Mg/m}^3$.

Pada lapisan atas tanah liat sebelum pemompaan:

$$\sigma_v = 2,104 \times 9,81 \times 5,0 = 103,2 \text{ kPa},$$

$$u = 1,0 \times 9,81 \times 5,0 = 49,0 \text{ kPa},$$

$$\sigma'_v = 103,2 - 49 = 54,2 \text{ kPa}.$$

Pada lapisan dasar tanah liat sebelum pemompaan:

$$\sigma_v = 103,2 + 1,850 \times 9,81 \times 4,0 = 175,8 \text{ kPa,}$$

$$u = 1,0 \times 9,81 \times 9,0 = 88,3 \text{ kPa,}$$

$$\sigma'_v = 175,8 - 88,3 = 87,5 \text{ kPa.}$$

Pada lapisan atas tanah liat setelah pemompaan:

$$\sigma_v = 1,949 \times 9,81 \times 4,0 + 2,104 \times 9,81 \times 1,0 = 97,1 \text{ kPa,}$$

$$u = 1,0 \times 9,81 \times 1,0 = 9,8 \text{ kPa,}$$

$$\sigma'_v = 97,1 - 9,8 = 87,3 \text{ kPa.}$$

Pada lapisan dasar tanah liat setelah pemompaan:

$$\sigma_v = 97,1 + 1,850 \times 9,81 \times 4,0 = 169,7 \text{ kPa,}$$

$$u = 1,0 \times 9,81 \times 5,0 = 49,0 \text{ kPa,}$$

$$\sigma'_v = 169,7 - 49,0 = 120,7 \text{ kPa.}$$

$$\Delta\sigma'_v \text{ (lapisan atas)} = 87,3 - 54,2 = 33,1 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma'_v \text{ (lapisan bawah)} = 120,7 - 87,5 = 33,2 \text{ kPa}$$

Peningkatan pada tegangan vertikal efektif sepanjang lapisan tanah liat adalah sama.

2. Kasus Tanah Jenuh Sebagian

$$\sigma = \sigma' + Ua - X(Ua - Uw)$$

Ua = Tekanan udara pori

Uw = Tekanan air pori

X = Parameter (bergantung pada derajat kejenuhan)

Dari persamaan tersebut didapatkan:

$$\sigma = \sigma' + XUw + Ua(1 - X) \rightarrow u = XUw + Ua(1 - X)$$

X adalah tempat (rongga) yang ditempati oleh air sedangkan (1-X) adalah tempat (rongga) yang ditempati oleh udara. Nilai X bisa didapatkan melalui eksperimen, tetapi terdapat hubungan antara derajat kejenuhan dan nilai X, seperti pada persamaan berikut:

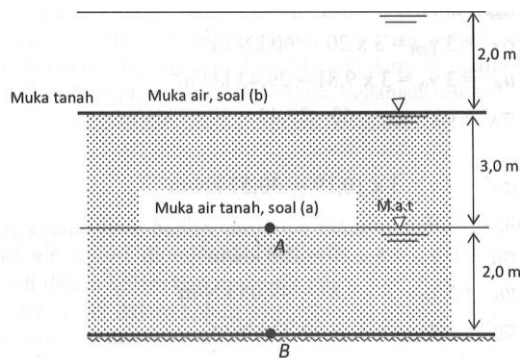
Sr=0, X=0 dan jika Sr=1, X=1

Dengan asumsi pori air dan pori udara menyatu karena adanya tegangan dari permukaan dan tekanan pori air lebih rendah daripada tekanan pori udara. Karena itu ketepatan persamaan di atas (2.9) sangat bergantung pada derajat kejenuhan. Semakin tinggi derajat kejenuhan hingga berada pada titik basah di kelembaban optimum maka akan semakin tepat hasilnya.

Fredlund (1973, 1979) dan Fredlund & Morgenstern (1977) meneliti tentang tekanan yang ada pada tanah tak jenuh dengan asumsi ada 4 fase yaitu: padatan, pori air, pori udara, dan penyatuan antara air dan udara. Tiga variabel tekanan, $\sigma - U_a$, $\sigma - U_w$ dan dengan memasukkan variabel satu ke variabel dua didapatkan $U_a - U_w$. Tiga variabel tersebut untuk menunjukkan 3 tekanan dalam sistem 3 dimensi. Parameter kekuatan pada dari tanah tak jenuh didefinisikan secara berbeda dengan tanah jenuh pada mekanika tanah.

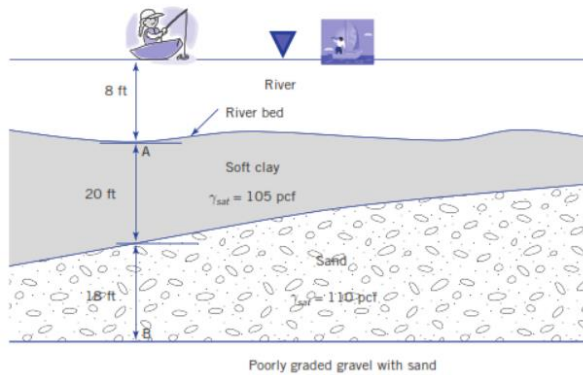
SOAL BAB 6

1. Diketahui suatu profil 3 lapis tanah homogen seperti pada gambar berikut.



Jika diketahui nilai berat isi jenuh dan berat isi basah, hitunglah dan gambarkan grafik (i) tegangan tanah total, (ii) tegangan muka air, serta (iii) tegangan efektif jika

- diketahui muka air tanah terletak pada 3m di bawah permukaan tanah (kode soal a)
2. Ulangi pengerjaan ini, dengan muka air tanah terletak tepat pada permukaan tanah (kode soal b)
 3. Diketahui suatu profil tanah di bawah ini.



Gambarkan diagram tegangan total, muka air, dan efektif pada titik A hingga B.

4. Jika muka air pada soal 3 mengalami (a) kenaikan sebesar 2ft atau (b) penurunan sebesar 2ft. Jelaskan efeknya terhadap perubahan tegangan efektif sepanjang titik AB dan khususnya pada titik B.
5. Jelaskan efek rembesan air terhadap perubahan tegangan pada tanah.

BAB VII

COMPRESSIBILITY OF SOIL

A. *Introduction*

Pada kenyataan / realita, kita tidak mungkin bisa mencegah ataupun menghindari penurunan suatu tanah atau biasa disebut dengan *Soil Settlement*. Meski kita tidak dapat mencegah terjadinya fenomena tersebut, kita dapat memperkirakan seberapa besar terjadinya penurunan dari tanah tersebut ketika diberikan suatu beban. Oleh karena itu, dalam *Civil Engineering* dibutuhkan pengetahuan mengenai penurunan tanah ketika tanah diberikan suatu beban / tekanan.

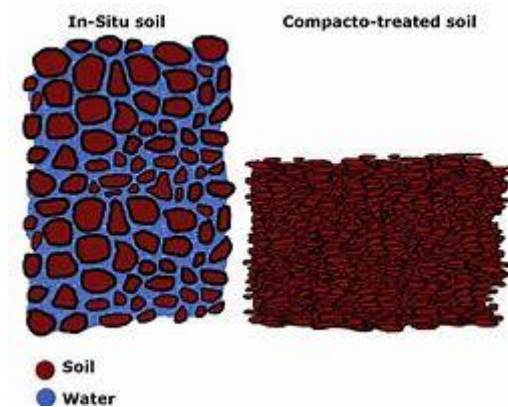
Ketika belajar mengenai materi ini, hal-hal yang akan dipelajari yaitu mengenai:

1. Jenis *Settlement* atau penurunan yang dapat terjadi pada tanah.
2. Perbedaan penurunan yang terjadi ketika beban diberikan terhadap tanah berbutir kasar (*coarse grained soil*) dan ketika beban diberikan terhadap tanah berbutir halus (*fine grained soil*).
3. Pemahaman dasar mengenai konsolidasi tanah terhadap beban / muatan vertikal.
4. Perhitungan jumlah penurunan tanah dan waktu penurunannya.

B. *Konsep Dasar*

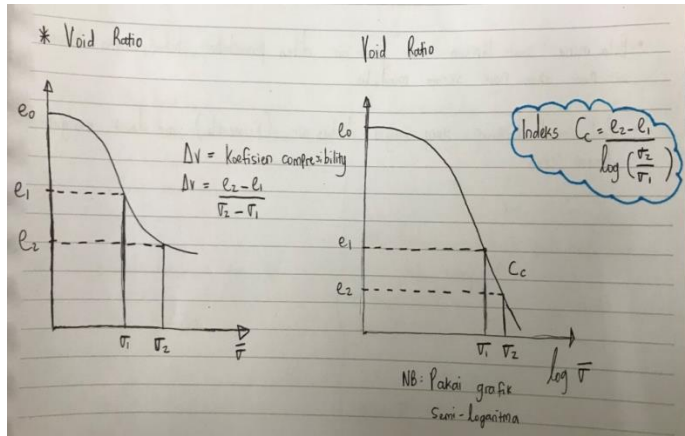
Ketika suatu tanah diberikan muatan / gaya atau dalam kasus *Civil Engineering* kita bisa ibaratkan gaya tersebut sebagai struktur yang berdiri diatas tanah, maka tanah akan mengalami deformasi dan juga tanah akan mengalami kenaikan tegangan sehingga elevasi tanah mengalami penurunan. Deformasi ialah perubahan sebuah

benda dari keadaan semula menjadi mengalami perubahan. Selain itu, dikarenakan beban / *loads* yang diberikan terhadap tanah, terjadi pula relokasi partikel dari tanah itu sendiri dan juga berkurangnya volume tanah yang diakibatkan dari keluarnya air pori dari tanah ketika tanah tertekan oleh suatu gaya. Total dari deformasi vertikal yang dihasilkan dari resultan gaya yang diberikan terhadap tanah itulah yang disebut dengan *settlement*. Semakin berat beban yang diberikan terhadap tanah, tanah akan semakin bergerak kebawah. Dan pada saat yang bersamaan, ketika beban tersebut berkurang, bisa terjadi pergerakan tanah keatas (*swelling*).



Gambar 7. 1 Tanah Ketika Diberikan Suatu Gaya

Dijelaskan oleh gambar diatas, ketika suatu sampel tanah atau tanah yang kita punya pertama-tama terdiri dari udara, air, dan butiran tanah. Lalu ketika tanah tersebut diberikan suatu tekanan atau gaya, maka yang terjadi ialah udara dan air yang tadinya ada pada tanah tersebut menjadi keluar akibat dari tekanan yang diberikan (terkompres). Oleh karena itu tentunya kemampuanampatan tanah (*Compresibility of soil*) ini berhubungan dengan yang namanya *void ratio* atau sering kita dengar dengan angka pori yang dinotasikan dengan huruf "e."



Gambar 7. 2 Grafik Perbandingan Tekanan dan Angka Pori

Dari grafik diatas kita bisa menyatakan bahwa semakin tanah diberikan tekanan maka angka pori (e) akan semakin rendah.

Selain itu kita juga mengenal istilah tambahan tekanan air pori (*excess porewater pressure*) yang dilambangkan dengan Δu . Jika kita mengasumsikan tanah memiliki tekanan air pori awal u_0 dan tekanan air pori setelah tanah diberi beban dilambangkan dengan u_1 , maka $\Delta u = u_1 - u_0$. Jika Δu hilang, maka penurunan primer berhenti dan dilanjutkan dengan penurunan sekunder.

C. *Settlement of Free Draining Coarse Grained Soil*

Tanah berbutir kasar (pasir kasar dan kerikil dengan butiran halus < 5%) umumnya memiliki kualitas drainase yang baik. Artinya koefisien permeabilitasnya tinggi dan air mudah lolos dari tanah. Penurunan pada tanah berbutir kasar yang lolos air terjadi dalam jangka waktu yang pendek. Hal ini disebabkan karena air mudah merembes keluar, sehingga Δu (tambahan tekanan air pori akibat adanya beban pada tanah) dapat berkurang dengan mudah dan hilang dengan cepat. Oleh karena itu penurunan pada tanah seperti ini terjadi dengan cepat, biasanya hanya terjadi pada saat konstruksi.

Untuk melakukan perhitungan penurunan bebas pada tanah kasar, tanah dianggap sebagai bahan yang elastis sehingga tidak ada hambatan pada saat penurunan. Tekanan yang diberikan merupakan tekanan merata (q_s) dengan bentuk persegi panjang. Dengan ini, penurunan dari tanah bisa dihitung dengan menggunakan rumus ini (Giroud, 1968)

$$\rho_e = \frac{q_s B (1 - (v')^2)}{E'} I_s$$

ρ_e adalah penurunan elastis tanah, E' adalah Modulus Young berdasarkan tegangan efektif, v' merupakan *Poisson's ratio* berdasarkan tegangan efektif, B adalah lebar pondasi, L adalah panjang pondasi, q_s adalah beban merata, sedangkan I_s (*I square*) adalah faktor penurunan yang merupakan sebuah fungsi matematis dari rasio panjang dan lebar. Untuk mendapatkan nilai dari I_s :

$$\text{Titik tengah dari persegi Panjang } (I_s) = 0.62 \ln \left(\frac{L}{B} \right) + 1.12$$

$$\text{Titik pojok dari persegi Panjang } (I_s) = 0.31 \ln \left(\frac{L}{B} \right) + 0.56$$

Penurunan tanah juga bisa dihitung pada saat beban merata yang diberikan berbentuk lingkaran, dalam lingkaran nilai (B) merupakan diameter dari lingkaran tersebut dan nilai dari I_{cl} (*I circle*) adalah:

$$\text{Titik tengah dari lingkaran } (I_{cl}) = 1$$

$$\text{Titik pojok dari lingkaran } (I_{cl}) = \frac{2}{\pi}$$

Didalam aplikasi kehidupan nyata, tanah harus dimodifikasi karena tanah mempunyai sifat elastis yang berbeda beda dan ada beberapa yang keras dan tidak elastis. Hal terpenting dari perhitungan penurunan tanah ada pada modulus young. Tetapi didalam tanah yang bersifat kasar, sangat susah untuk mendapatkan nilai dari modulus tersebut

dengan akurat. Itulah mengapa didalam perhitungan ini, nilai dari Modulus young sudah ditetapkan.

Contoh soal:

Sebuah balok diletakkan di dalam plat beton yang mempunyai area 2 ft x 2 ft yang berfungsi sebagai fondasi. Fondasi tersebut mempunyai pasir dipermukaan dengan $E'_{sec} = 800\,000$ psf dan $\nu' = 0.35$. Tekanan vertical balok dan beban dari balok tersebut adalah 15 000 lbs. Hitunglah penurunan tanah pada tengah dari fondasi tersebut.

a) Hitung I_s dari titik tengah plat beton,

$$I_s = 0.62 \ln(L/B) + 1.12 = 0.62 \ln(2/2) + 1.12 = 1.12$$

b) Masukkan kedalam Rumus =

$$\frac{15000 / (2 \times 2) \times 2(1 - 0.35^2)}{800000} \times 1.12 = 0.0092 \text{ ft} = 0.11 \text{ in}$$

D. *Settlement of Non-Free Draining Soils*

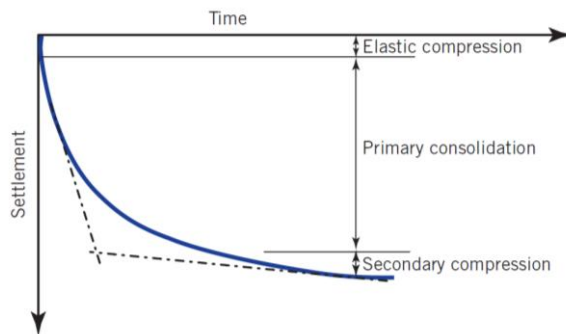
Tanah berbutir halus (pasir halus dan pasir sedang dengan butiran halus > 10%) umumnya memiliki kualitas drainase yang buruk. Artinya koefisien permeabilitas dari tanah ini rendah, sehingga air tidak mudah merembes atau lolos. Hal ini menyebabkan jika tanah diberi beban, maka Δu akan butuh waktu yang lama untuk hilang. Sehingga penurunan tanah membutuhkan waktu yang juga lama. Penurunan tanah yang bergantung pada waktu inilah yang disebut dengan konsolidasi.

Ada 2 macam penurunan (*settlement*) yang bisa terjadi pada tanah berbutir halus. Pertama, penurunan akibat drainase alami air dalam tanah karena adanya gradien hidrolis (*self-weight consolidation*). Kedua, penurunan akibat pemberian beban pada tanah

Penurunan pada tanah jenis ini mengalami 3 tahap yaitu:

1. Penurunan elastis (jangka pendek, terjadi pada waktu konstruksi, ini sama dengan jenis penurunan yang terjadi pada tanah berbutir kasar)

2. Konsolidasi primer (jangka panjang, terjadi setelah konstruksi)
3. Konsolidasi sekunder (jangka panjang, terjadi pada tahap akhir dari konsolidasi primer dan seterusnya)

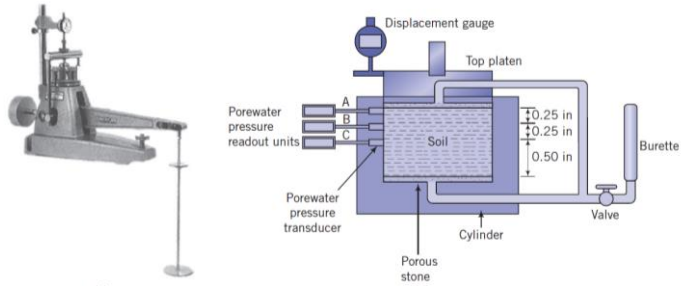


Gambar 7. 3 Grafik penurunan pada tanah berbutir halus

E. Tes Konsolidasi Satu Dimensi

Uji konsolidasi di laboratorium disebut uji konsolidasi satu dimensi. Hal ini disebabkan karena tegangan vertikal memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan tegangan lateral. Tegangan lateral yang dialami tanah sangatlah kecil sehingga dapat diabaikan. Oleh karena itu uji konsolidasi di laboratorium dibuat sedemikian rupa agar hanya meninjau satu dimensi (vertikal).

Uji konsolidasi satu dimensi ini dilakukan berdasarkan ASTM D 2435. Uji laboratorium ini dilakukan pada tanah berbutir halus. Sampel tanah diletakkan di dalam cetakan berbentuk silinder dan diapit oleh dua batu pori di bagian atas dan bagian bawah. Silinder ini ditutup dengan *ring* baja yang kaku. Di bagian atas cetakan terdapat plat baja yang berfungsi memberikan beban pada tanah. Selain itu, terdapat sebuah katup yang memungkinkan air yang tertekan keluar mengalir ke sebuah wadah penampung.



Gambar 7. 4 Alat Uji Konsolidasi Satu Dimensi

Penambahan beban terus menerus dilakukan selama pengujian. Penurunan tanah dibaca dan diperhatikan melalui pengukur (*displacement gauge*) dalam selang waktu tertentu. Pada akhir pengujian ada 3 data yang didapat:

1. Tinggi mula - mula dari tanah, H_0
2. Tinggi akhir dari tanah pada waktu - waktu tertentu (*time - settlement*)
3. Kadar air

Pada uji laboratorium ini ada beberapa parameter yang bisa kita dapatkan untuk menentukan berapa penurunan dari tanah yang di uji. Diantaranya jalur drainase, *overconsolidation ratio*, angka pori, *compression index*, *recompression index*, modulus perubahan volume, koefisien konsolidasi, dan tegangan efektif prakonsolidasi maksimum.

1. Jalur Drainase

Jalur drainase didefinisikan sebagai jalur vertikal terpanjang yang ditempuh oleh partikel air untuk keluar dari tanah. Jalur drainase dilambangkan dengan H_{dr} dan dihitung dengan rumus sebagai berikut

$$H_{dr} = \frac{H_0 + H_f}{4}$$

dimana H_0 adalah tinggi sampel tanah mula - mula dan H_f adalah tinggi akhir sampel tanah. Rumus ini hanya berlaku jika drainase dapat terjadi dari atas dan bawah

(drainase tergantung dari ada tidaknya batu pori). Jika drainase hanya terjadi di salah satu sisi maka $H_{dr} = (H_0 + H_f)/2$.

2. Pembebanan Segera

Apabila katup yang membuat air dapat mengalir keluar dari tanah ditutup dan tanah diberi beban sebesar P , maka tidak akan terjadi perubahan volume karena air tidak ada yang keluar. Artinya partikel padat dari tanah tidak mendapatkan tegangan efektif. Pembebanan ditanggung oleh tekanan air pori. Sehingga pada kondisi ini perubahan tekanan pori awal sama dengan perubahan tegangan vertikal ($\Delta u_0 = \Delta \sigma_0$).

3. Konsolidasi Primer

Konsolidasi primer barulah terjadi ketika katup air dibuka. Sehingga memungkinkan air mengalir keluar. Total volume dari tanah berkurang seiring dengan berjalannya waktu. Perubahan volume ditunjukkan dari perubahan tinggi tanah (ΔH) yang dapat dilihat melalui pembacaan *displacement gauge*.

Perubahan tinggi (ΔH) terhadap waktu (t) tidaklah linear. Perubahan tinggi tanah terjadi cukup besar di permulaan percobaan. Kondisi pada permulaan inilah yang disebut sebagai konsolidasi primer. Semakin lama percobaan dilakukan, maka perubahan tinggi yang terjadi juga akan semakin berkurang.

4. Perubahan Tegangan Efektif

Tegangan efektif vertikal ($\Delta \sigma'_z$) yang diberikan dari beban bersifat konstan pada pengujian. Maka berdasarkan rumus tegangan efektif ($\Delta \sigma'_z = \Delta \sigma_z - \Delta u$), saat Δu terus berkurang maka $\Delta \sigma_z$ akan bertambah. Oleh karena itu pada saat penurunan terjadi (Δu terus menerus berkurang), tegangan yang dialami oleh butiran padat tanah ($\Delta \sigma_z$) akan bertambah.

5. *Effects of Loading History*

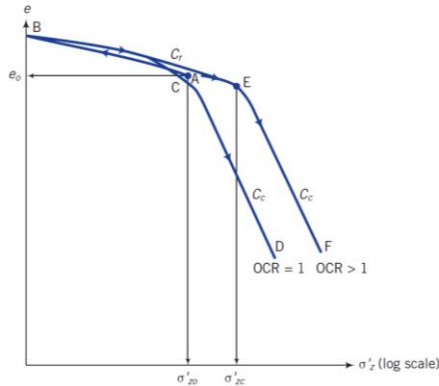
Suatu tanah di lapangan pada suatu kedalaman tertentu telah mengalami “tegangan efektif maksimum” (tekanan prakonsolidasi) akibat berat tanah yang ada di atasnya dalam sejarah geologisnya. Tegangan efektif maksimum yang sudah dialami ini mungkin sama dengan atau lebih kecil dari tegangan yang dialami pada saat pengambilan contoh tanah. Berkurangnya tegangan di lapangan tersebut mungkin disebabkan oleh proses geologi alamiah yang disebabkan oleh makhluk hidup.

Oleh karena itu dibuatlah sebuah rasio tak berdimensi yang disebut *Overconsolidation Ratio* (OCR). OCR dirumuskan sebagai berikut:

$$OCR = \frac{\sigma_{zc}}{\sigma_{zo}}$$

dimana σ_{zc} adalah tegangan prakonsolidasi dan σ_{zo} adalah tegangan vertikal efektif pada saat tanah diselidiki. OCR = 1 disebut konsolidasi normal, OCR > 1 disebut overkonsolidasi, dan OCR < 1 disebut *under consolidation*.

Pada saat pengambilan sampel, misalkan tegangan vertikal efektif yang dialami oleh tanah dilambangkan dengan A seperti tergambar pada Gambar 7.5. Untuk mengambil sampel maka kita perlu mengangkat tanah yang berada di atasnya. Ketika tanah di atasnya di angkat, sampel tanah akan sedikit mengalami *swelling* sehingga grafik bergerak dari A ke B.



Gambar 7. 5 Grafik Tegangan - Angka Pori Semi Logaritma

Jika kita membebani ulang (*reload*) tanah, misalnya dengan memberi pondasi, bangunan, *sheet pile* maka akan terbentuk kurva baru dari B ke D ($OCR = 1$). Sednagkan jika $OCR > 1$, akan terbentuk kurva baru dari B ke F.

6. Penentuan Berbagai Parameter Konsolidasi

1. Angka pori

$$e_{fin} = wG_s$$

$$e_o = \frac{e_{fin} + [(\Delta H)_{fin}/H_o]}{1 - [(\Delta H)_{fin}/H_o]}$$

$$e_i = e_o - \frac{(\Delta H)_i}{H_o} (1 + e_o)$$

e_{fin} = angka pori akhir

e_o = angka pori awal

e_i = angka pori untuk setiap t

H_{fin} = tinggi akhir sampel

H_o = tinggi awal sampel

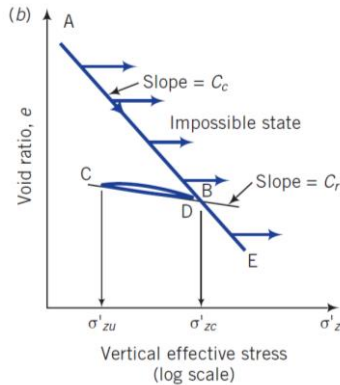
ΔH_{fin} = $H_{fin} - H_o$

2. Compression Index

Indeks kompresi dilambangkan dengan C_c dan dapat dinyatakan dengan rumus

$$C_c = -\frac{e_2 - e_1}{\log[(\sigma'_z)_2/(\sigma'_z)_1]} \quad (\text{no units})$$

dimana e_1 dan e_2 adalah dua titik yang berada di kurva konsolidasi normal (AB) pada Gambar 7.6.



Gambar 7. 6 Grafik Tegangan – Angka Pori Semi Logaritma

3. Recompression Index

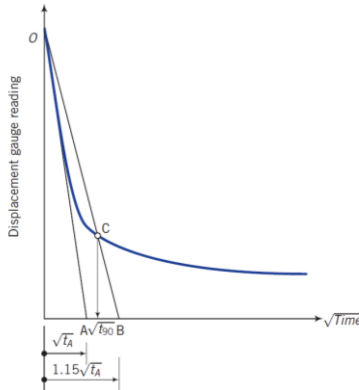
Indeks rekompresi dilambangkan dengan C_r dan dapat dihitung dengan rumus

$$C_r = -\frac{e_4 - e_3}{\log[(\sigma'_z)_4/(\sigma'_z)_3]} \quad (\text{no units})$$

dimana e_3 dan e_4 adalah dua titik yang berada di kurva rekompresi (CD) pada Gambar 7.6.

4. Coefficient of Consolidation

Koefisien konsolidasi dilambangkan dengan C_v dan dapat dihitung dengan dua metode yaitu *root time method* dan *log time method*.



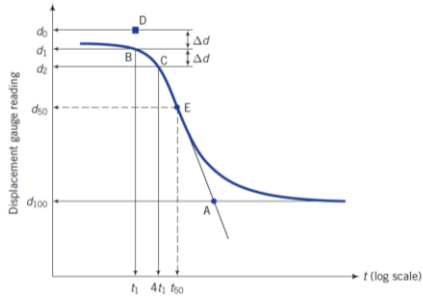
Gambar 7. 7 Grafik Akar Waktu – *Displacement Gauge Reading*

Langkah – langkah untuk menentukan koefisien kompresibilitas dengan *root square method* (metode akar waktu) adalah sebagai berikut:

- Buatlah grafik *displacement gauge reading* – akar waktu
- Gambarlah garis lurus terbaik melalui bagian awal dari kurva hingga memotong sumbu y di titik O dan memotong sumbu x di titik A
- Catatlah waktu di titik A, dapat dilambangkan dengan $\sqrt{t_A}$
- Tandai titik B yang berjarak $1.15 \sqrt{t_A}$ dari titik (0,0)
- Tarik garis lurus yang menghubungkan OB hingga memotong kurva di titik C. Absis titik C menunjukkan waktu saat konsolidasi sudah terjadi 90% ($\sqrt{t_{90}}$)
- Koefisien kompresibilitas dapat dicari dengan rumus di bawah ini, dimana H_{dr} adalah jarak drainase

$$C_v = \frac{0.848H_{dr}^2}{t_{90}}$$

Sedangkan untuk mencari koefisien kompresibilitas dengan metode logaritma membutuhkan Gambar 7.8.



Gambar 7.8 Grafik Waktu – *Displacement Gauge Reading* Semi Logaritma

Langkah – langkah untuk menentukan koefisien kompresibilitas dengan metode logaritma adalah sebagai berikut:

- Tarik garis lurus dari bagian konsolidasi primer dan bagian konsolidasi sekunder hingga kedua garis berpotongan di titik A. Ordinat dari A adalah d_{100} , yaitu *displacement gauge reading* saat konsolidasi primer sudah terjadi 100%.
- Perbaiki bagian awal dari kurva sehingga berbentuk parabola. Pilih waktu t_1 di titik B, dekat dengan titik awal dari kurva dan pilih t_2 di titik C sedemikian rupa sehingga $t_2 = 4t_1$.
- Hitung perbedaan dari *displacement gauge reading* yaitu $\Delta d = d_2 - d_1$ antara t_2 dan t_1 . Kemudian buatlah titik D yang berjarak vertikal Δd dari titik B. Ordinat dari titik D adalah pembacaan awal *displacement gauge* yang sudah dikoreksi, d_0 , yaitu permulaan dari konsolidasi primer.
- Hitunglah ordinat dari konsolidasi saat 50% yaitu dengan cara $d_{50} = (d_{100} + d_0)/2$. Gambarlah garis horizontal yang melalui titik ini hingga berpotongan

di kurva pada titik E. Absis dari titik E adalah waktu terjadinya konsolidasi 50%, t_{50} .

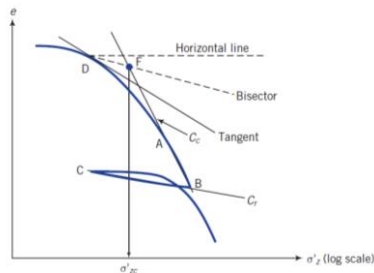
- e. Selanjutnya koefisien kompresibilitas dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut

$$C_v = \frac{0.197H_{dr}^2}{t_{50}}$$

5. Tegangan Efektif Maksimum Tanah

Tegangan efektif maksimum tanah atau dilambangkan dengan σ'_{zc} dibutuhkan untuk menghitung OCR (*Overconsolidation Ratio*)

Casagrande (1956) menyarankan suatu cara yang mudah untuk menentukan besarnya tegangan ini dari grafik e versus $\log \sigma'_z$ digambar dari hasil percobaan di laboratorium. Prosedurnya adalah sebagai berikut:



Gambar 7. 9 Grafik e vs $\log \sigma'_z$ Semi Logaritma

- Dengan melakukan pengamatan secara visual, tentukan titik D di mana Gambar 7.9 mempunyai jari - jari kelengkungan yang paling minimum.
- Gambar garis horizontal yang melalui titik D.
- Gambar garis singgung (*tangent*) kurva yang melalui titik D.
- Gambar garis bagi sudut (*bisect*) yang membagi sudut antara garis horizontal dengan garis singgung sama besar.

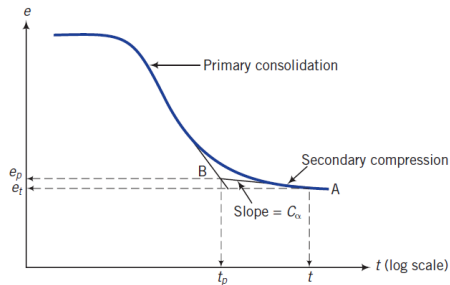
- e. Tarik garis perpanjangan bagian dari kurva yang merupakan garis lurus. Garis ini ditarik hingga memotong garis *bisect* di titik F.
- f. Absis dari titik F adalah tegangan efektif maksimum tanah.

6. *Secondary Compression Index*

Indeks kompresibilitas sekunder dilambangkan dengan C_α dan dapat dinyatakan dalam rumus

$$C_\alpha = -\frac{(e_t - e_p)}{\log(t/t_p)} = \frac{|\Delta e|}{\log(t/t_p)}, \quad t > t_p$$

di mana titik P adalah perpotongan antara garis lurus yang ditarik dari bagian konsolidasi sekunder dan garis lurus yang ditarik dari bagian konsolidasi primer seperti yang ditunjukkan dalam grafik 7.6



Gambar 7. 10 Grafik e - t Semi Logaritma

F. Hubungan antara Laboratorium dengan Lapangan

Faktor waktu (T_v) yang terjadi di lapangan pada saat melakukan konsolidasi dapat menjadi suatu faktor yang berguna untuk memperkirakan penyelesaian konsolidasi dari hasil uji di laboratorium. Jika dua lapisan tanah liat yang sama memiliki yang tingkat konsolidasi yang sama, maka

faktor waktu dan koefisien konsolidasi mereka adalah sama. Oleh karena itu dapat digunakan rumus sebagai berikut,

$$T_v = \frac{(Cvt)_{\text{Lab}}}{(H^2 dr)_{\text{Lab}}} = \frac{(Cvt)_{\text{lapangan}}}{(H^2 dr)_{\text{lapangan}}}$$

Sehingga jika di sederhanakan,

$$\frac{t_{\text{lapangan}}}{t_{\text{lab}}} = \frac{(H^2 dr)_{\text{lapangan}}}{(H^2 dr)_{\text{lab}}}$$

G. Calculation of Primary Consolidation Settlement

Penurunan konsolidasi primer (dilambangkan ρ_{pc}) merupakan penurunan tanah yang terjadi karena adanya perubahan volume tanah yang disebabkan oleh keluarnya air pori dari tanah. Penurunan primer ini akan terus berlangsung selama periode keluarnya air pori dari tanah. Perhitungan konsolidasi primer dapat dibagi menjadi 2 kondisi:

1. Konsolidasi Normal (OCR = 1)

$$\rho_{pc} = H_o \frac{\Delta e}{1+e_o} = \frac{H_o}{1+e_o} C_c \log \frac{\sigma'_{fin}}{\sigma'_{zo}}$$

$$\Delta e = C_c \log (\sigma'_{fin} / \sigma'_{zo})$$

$$\sigma'_{fin} = \sigma'_{zo} + \Delta \sigma_z$$

dimana σ'_{zo} adalah tegangan vertikal efektif yang dialami tanah pada saat diteliti dan $\Delta \sigma_z$ adalah penambahan tegangan vertikal akibat bangunan yang akan dibangun di atas tanah

2. Tanah Terlalu Terkonsolidasi (OCR > 1)

Jika $\sigma_{fin} < \sigma_{zo}$ maka berlaku rumus:

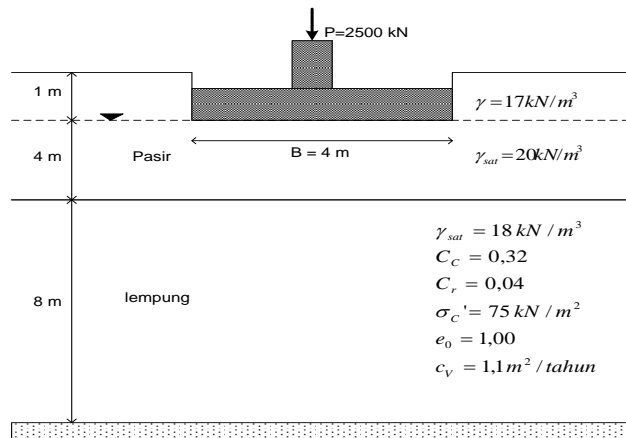
$$\rho_{pc} = \frac{H_o}{1+e_o} C_r \log \frac{\sigma_{fin}}{\sigma_{zo}}$$

Jika $\sigma_{fin} > \sigma_{zo}$ maka berlaku rumus:

$$\rho_{pc} = \frac{H_0}{1+e_0} \left[C_r \log \frac{\sigma_{zc}}{\sigma_{zo}} + C_c \log \frac{\sigma_{fin}}{\sigma_{zc}} \right]$$

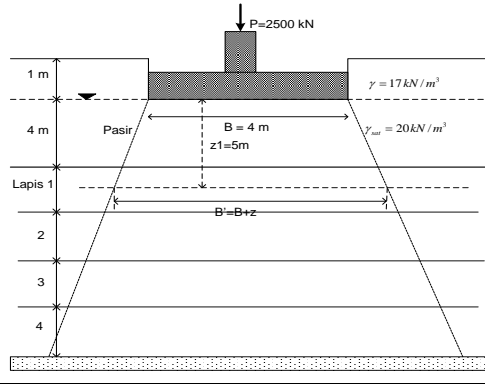
Contoh Soal:

Uji konsolidasi di lab terhadap contoh tanah setebal 25mm dimana air pori keluar dari atas dn bawah sampel menunjukkan konsolidasi terjadi 50% dalam waktu 11 menit. Pondasi empat persegi panjang 4 m x 5 m, memikul beban $P = 2500$ kN, terletak pada lapisan tanah seperti tergambar. Berapa waktu yang dibutuhkan di lapangan bila lapisan lempung tsb setebal 4m dimana aliran hanya arah ke atas untuk mencapai 50% dan 70%? Hitung penurunan pondasi akibat konsolidasi primer lapisan lempung! Hitung penurunan yang terjadi 3 tahun setelah pembebanan!



Gambar 7. 11 Contoh Soal Konsolidasi Primer

Menghitung penurunan konsolidasi primer:



Gambar 7. 12 Contoh Perhitungan Konsolidasi Primer

Tabel 7. 1 Perhitungan Penurunan Konsolidasi Primer

Lapis	z (m)	B'=B+z (m)	L'=L+z (m)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ_0' (kPa)	$\sigma_1'=\sigma_0'+\Delta\sigma$ (kPa)	Sc (mm)
1	5	9	10	27,78	48	75,78	9,19
2	7	11	12	18,94	64	82,94	16,74
3	9	13	14	13,74	80	93,74	22,03
4	11	15	16	10,42	96	106,42	14,32
						$\Sigma sc = 62,28$ mm	

Menghitung penurunan konsolidasi setelah 3 tahun:

Bila lapisan di bawah lempung adalah lolos air maka kondisi drainasi ganda, $d = \frac{1}{2} \cdot 8 = 4 \text{ m}$

$$T_v = \frac{1,1 \times 3}{4^2} = 0,206$$

derajat konsolidasi, $U = 0,51$

Penurunan konsolidasi setelah 3 tahun:

$$s = U \times sc = 0,51 \times 62,28 = 31,76 \text{ mm}$$

H. *Secondary Compression*

Penurunan konsolidasi sekunder adalah penurunan yang terjadi setelah tekanan air pori sudah tidak lagi keluar. Penurunan ini tetap bisa terjadi karena adanya pemampatan bersifat plastis pada butir – butir tanah. Penurunan sekunder dilambangkan dengan ρ_{sc} dan dapat ditulis dalam rumus

$$\rho_{sc} = \frac{H_o}{1+e_p} C_c \log \left[\frac{t}{t_{tp}} \right]$$

Penurunan yang diakibatkan oleh konsolidasi sekunder sangat penting untuk semua jenis tanah organik dan anorganik yang sangat mampumampat (*compressible*). Untuk lempung anorganik yang terlalu terkonsolidasi, indeks pemampatan sekunder sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

I. *Settlement of Thick Soil Layers*

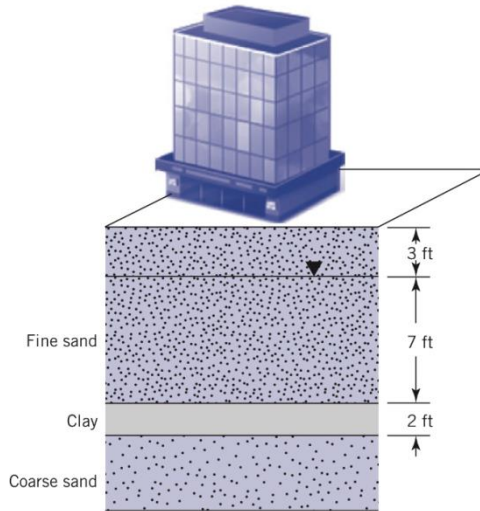
Agar akurat, ketika perhitungan dilakukan pada tanah dengan lapisan yang tebal ($H_o > 5$ ft), tanah harus dibagi – bagi menjadi sub-lapisan (*sublayer*) dan mencari penurunan dari masing – masing lapisan. Penurunan masing – masing lapisan ini dijumlahkan untuk mendapatkan total penurunan konsolidasi primer.

Alternatif lain adalah dengan menghitung menggunakan metode rata – rata harmonik dari peningkatan tegangan vertikal yang dapat dinyatakan dengan rumus

$$\Delta\sigma_z = \frac{n(\Delta\sigma_z)_1 + (n-1)(\Delta\sigma_z)_2 + (n-2)(\Delta\sigma_z)_3 + \dots + (\Delta\sigma_z)_n}{n + (n-1) + (n-2) + \dots + 1} \quad (13)$$

di mana n menyatakan nomor dari sublapisan dan indeks 1, 2, ... n, menyatakan lapisan pertama, lapisan kedua, dan seterusnya.

Contoh soal:



$$e_0 \text{ (pasir/sand)} = 0.76$$

$$w \text{ (lempung/clay)} = 34\%$$

$$H_o = 2\text{ft}$$

$$\Delta\sigma_z = 3000\text{psf}$$

$$C_c = 0.3$$

$$G_s = 2.7$$

Jawab:

Step 1: Calculate σ'_{z0} and e_o at the center of the clay layer.

$$\text{Sand: } \gamma_{sat} = \left(\frac{G_s + e}{1 + e} \right) \gamma_w = \left(\frac{2.7 + 0.76}{1 + 0.76} \right) 62.4 = 122.7 \text{ lb/ft}^3$$

$$\text{Clay: } e_o = w G_s = 2.7 \times 0.34 = 0.918$$

$$\gamma_{sat} = \left(\frac{G_s + e}{1 + e} \right) \gamma_w = \left(\frac{2.7 + 0.918}{1 + 0.918} \right) 62.4 = 117.7 \text{ lb/ft}^3$$

$$\text{Porewater pressure at center of clay is } u_o = 8 \times 62.4 = 499.2 \text{ psf}$$

The vertical effective stress at the mid-depth of the clay layer is

$$\sigma_{z0} = (122.7 \times 10) + (117.7 \times 1) = 1344.7 \text{ psf}$$

$$\sigma'_{z0} = \sigma_{z0} - u_o = 1344.7 - 499.2 = 845.5 \text{ psf}$$

Step 2: Calculate the increase of stress at the mid-depth of the clay layer.

You do not need to calculate $\Delta\sigma_z$ for this problem. It is given as $\Delta\sigma_z = 3000 \text{ psf}$.

Step 3: Calculate σ'_{fm} .

$$\sigma'_{fm} = \sigma'_{z0} + \Delta\sigma_z = 845.5 + 3000 = 3845.5 \text{ psf}$$

Step 4: Calculate the primary consolidation settlement.

$$\rho_{pc} = \frac{H_o}{1 + e_o} C_c \log \frac{\sigma'_{fm}}{\sigma'_{z0}} = \frac{2}{1 + 0.918} \times 0.3 \log \frac{3845.5}{845.5} = 0.206 \text{ ft} \approx 2.5 \text{ in.}$$

J. Teori Konsolidasi Satu Dimensi

Teori konsolidasi satu dimensi dikembangkan tahun 1925 untuk memahami konsolidasi satu dimensi dari tanah berbutir halus. Persamaan konsolidasi satu dimensi memungkinkan kita untuk memprediksi perubahan tekanan air berlebih pada berbagai kedalaman di dalam tanah seiring waktu. Kita perlu mengetahui tekanan berlebih pada waktu yang diinginkan karena kita ingin menentukan tegangan efektif vertikal untuk menghitung penyelesaian konsolidasi primer,

Beberapa implikasi utama dari teori konsolidasi satu dimensi adalah sebagai berikut:

1. Tanah isotropik, homogen, dan jenuh. Dengan tidak adanya gas terlarut, tanah di bawah permukaan air tanah umumnya jenuh. Tanah adalah bahan anisotropik (bahan yang memiliki sifat berbeda di arah yang berbeda dan memberikan hambatan berbeda untuk mengalir dan memuat ke arah ini) dan jarang homogen.
2. Partikel-partikel tanah dan air yang tidak tertahankan. Butir-butir tanah dan air tidak mengeras atau membesar.
3. Aliran air vertikal. Arah aliran air hanya vertikal. Dalam tanah nyata, aliran air yang melaluinya tidak sama di semua arah karena tanah adalah bahan anisotropik.
4. Validitas hukum Darcy. hukum Darcy menyatakan bahwa kecepatan aliran sebanding dengan gradien hidrolik.
5. Regangan (*strain*) kecil. *Strain* (perubahan panjang dibagi dengan panjang asli) yang diberikan sangat kecil ($\approx <0,001\%$ untuk aplikasi praktis). Asumsi konsolidasi satu dimensi mengarah ke nol regangan lateral ($\epsilon_x = \epsilon_y = 0$)

Berikut ini adalah persamaan diferensial parsial ditentukan untuk konsolidasi satu dimensi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Solusi dari persamaan ini memberikan variasi tekanan air berlebih dengan waktu dan kedalaman pada serangkaian batas kondisi tertentu. Dalam kasus distribusi seragam, tekanan awal air berlebih di mana drainase ganda terjadi, solusinya ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\frac{\Delta u_z}{\Delta u_o} = \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{m-1}}{2m-1} \cos \left[(2m-1) \frac{\pi}{2} \left(\frac{H_{dr} - z}{H_{dr}} \right) \right] \exp \left[-(2m-1)^2 \frac{\pi^2}{4} T_v \right] \right\}$$

Keterangan:

- M = bilangan bulat positif
- Δu_z = tekanan air berlebih setiap waktu(t), pada kedalaman z,
- Δu_o = tekanan air berlebih (tekanan air berlebih pada waktu t = 0)
- H_{dr} = panjang jalur drainase
- T_v = faktor waktu

K. *Typical Values of Consolidation Settlement*

Berikut ini adalah beberapa hubungan nilai dari parameter uji Konsolidasi yang umum dijumpai.

Tabel 7. 2 Tabel Nilai C_c Dan C_r yang Umum Dijumpai

$C_c = 0.1$ to 0.8
$C_r = 0.015$ to 0.35 ; also, $C_r \approx C_c/5$ to $C_c/10$
$C_{\alpha}/C_c = 0.03$ to 0.08

Tabel 7. 3 Hubungan Empiris C_c dan C_r

Empirical relationships	Reference
$C_c = 0.009(LL - 10)$	Terzaghi and Peck, 1948
$C_c = 1.35PI$ (remolded clays)	Schofield and Wroth, 1968
$C_c = 0.40(e_o - 0.25)$	Azzouz et al., 1976
$C_c = 0.01(w - 5)$	Azzouz et al., 1976
$C_c = 0.37(e_o + 0.003LL - 0.34)$	Azzouz et al., 1976
$C_r = 0.15(e_o + 0.007)$	Azzouz et al., 1976
$C_r = 0.003(w + 7)$	Azzouz et al., 1976
$C_r = 0.126(e_o + 0.003LL - 0.06)$	Azzouz et al., 1976
$C_r = 0.000463LL G_s$	Nagaraj and Murthy, 1985

Note: w is the natural water content (%), LL is the liquid limit (%), e_o is the initial void ratio, and PI is the plasticity index.

Tabel 7. 4 Nilai C_v yang Umum Dijumpai

Soil	(ft ² /yr)
Boston blue clay (CL)	130 ± 65
Organic silt (OH)	7.5–30
Glacial lake clays (CL)	22–29
Chicago silty clay (CL)	29
Swedish medium sensitive clays (CL-CH)	
1. laboratory	1–2
2. field	2–10
San Francisco Bay mud (CL)	7.5–13
Mexico City clay (MH)	3–5

Source: Modified from Carter and Bentley (1991).

L. *Monitoring Soil Settlement*

Penurunan yang dihitung dengan uji konsolidasi satu dimensi maupun teori konsolidasi satu dimensi hanya merupakan sebuah perkiraan. Ada banyak ketidakpastian dalam perhitungan penurunan yang disebabkan karena keterbatasan teori dan kurangnya pengetahuan tentang berapa persisnya besar tegangan yang ditanggung oleh tanah.

Ada banyak alat yang digunakan untuk mengukur penurunan tanah. Mulai dari metode survei tanah konvensional hingga *remote sensing*. *Remote sensing* dengan menggunakan satelit mulai menjadi populer karena dapat mengukur penurunan pada area besar. Salah satu teknik

remote sensing disebut *interferometric synthetic aperture radar* (InSAR), teknologi ini memanfaatkan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan ke tanah. Selain itu ada juga teknologi *global positioning system* (GPS). Berikut ini adalah tabel alat pengukuran konsolidasi yang tepat tergantung jenis penurunan yang terjadi

Tabel 7. 5 Tabel Alat Pengukuran Penurunan dan Jenis Penurunan

Type Alat	Jenis Penurunan
<i>Surface Mounted Monuments</i>	Penurunan secara vertikal dan horizontal pada permukaan tanah
<i>Settlement Plate</i>	Penurunan vertikal pada kedalaman yang sudah ditetapkan
<i>Inclinometer</i>	Penurunan horizontal pada kedalaman tertentu
<i>Extensometer</i>	Penurunan vertikal pada kedalaman tertentu

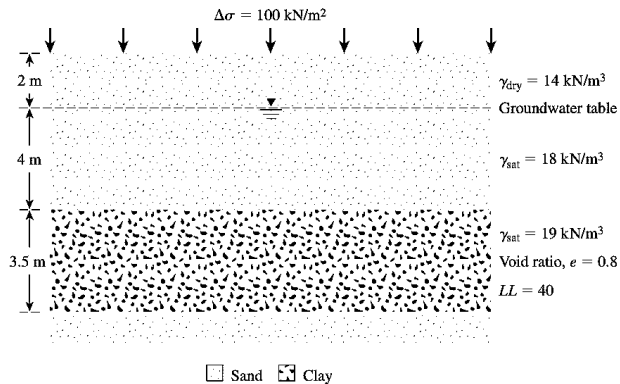
SOAL BAB 7

- Turunkan persamaan untuk mendapatkan nilai penurunan tanah dari uji konsolidasi di laboratorium.
- Hasil uji konsolidasi sampel tanah lempung sebagai berikut:

Pressure (kPa)	e
25	0.93
50	0.92
100	0.88
200	0.81

400	0.69
800	0.61
1600	0.52
800	0.535
400	0.555
200	0.57

- Hitunglah nilai tegangan prakonsolidasi
 - Hitunglah nilai C_s dan C_c .
- Diketahui suatu profil tanah sebagai berikut:



Hitunglah besar penurunan tanah akibat konsolidasi jika:

- Tanah tersebut terkonsolidasi normal
- Diketahui nilai tegangan prakonsolidasi = 150 kPa
- Diketahui nilai tegangan prakonsolidasi = 200 kPa.

Gunakan nilai $C_s = 0.2 C_c$

- Uji konsolidasi menggunakan oedometer dilakukan untuk menganalisis tanah contoh lapangan. Jika diketahui diameter awal sample adalah 63.5 mm dan tinggi awal

sebesar 25.4mm, serta drainase diperbolehkan melalui bagian atas dan bawah sample. Hasil pengujian dapat dilihat pada table berikut.

Time (min)	Change in height (cm)
0	0
0.25	0.118
1	0.138
4	0.192
9	0.24
16	0.287
36	0.354
64	0.374
100	0.381
1440	0.385

Hitunglah nilai koefisien konsolidasi menggunakan metode Casagrande dan Taylor.

5. Jelaskan metode yang dapat digunakan untuk menanggulangi efek konsolidasi pada tanah

BAB VIII

PENYELIDIKAN TANAH

A. Pendahuluan

Tanah memiliki karakteristik yang seringkali berbeda antara lokasi yang satu dengan yang lain. Hasilnya kekuatan yang dihasilkannya juga berbeda-beda. Faktor ini yang kemudian akan mempengaruhi proses dan biaya pengerjaan teknik sipil. Oleh karena itu, penyelidikan tanah menjadi salah satu proses yang diperlukan dalam sebuah konstruksi. Menurut Budhu (2015), selama proses penyelidikan tanah, tanah diidentifikasi, diamati, dan diperbaiki kondisinya. Dengan menjalankan proses ini, karakteristik tanah akan dapat diketahui. Selain itu, proses ini juga berguna sebagai upaya mengantisipasi terjadinya fenomena alam, seperti gempa bumi, aktivitas gunung berapi, dan air tanah, Namun, seringkali proses ini diabaikan, sementara banyak peristiwa kegagalan struktur disebabkan oleh faktor ini.

Umumnya, penyelidikan tanah hanya dilakukan di satu bagian lokasi konstruksi, bukan dilakukan secara menyeluruh karena dapat mengakibatkan biaya yang mahal. Oleh karena itu, diperlukan estimasi dan penilaian berdasarkan penyelidikan yang terbatas tersebut. Sebab, hal ini penting dalam menentukan kekuatan struktur yang direncanakan, dimana faktor ini juga bergantung pada hasil pengujian dilokasi dan laboratorium.

B. Tujuan Penyelidikan Tanah

Penyelidikan terhadap tanah sangat penting dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai desain dan konstruksi, penilaian terhadap lingkungan, dan uji tuntas proyek. Menurut Budhu (2015), uji tuntas proyek adalah proses mengevaluasi sebuah proyek prospektif untuk memfasilitasi

keputusan-keputusan bisnis dari pemiliknya. Tujuan dari dilakukannya penyelidikan ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengevaluasi kesesuaian umum dari lokasi untuk proyek yang diusulkan.
2. Memungkinkan desain yang memadai dan ekonomis yang dapat dibuat.
3. Untuk membuka dan membuat ketentuan terhadap kesulitan-kesulitan yang dapat terjadi selama konstruksi karena keadaan tanah atau keadaan kondisi lokal lainnya.

C. Fase Dalam Penyelidikan Tanah

Menurut Budhu (2015), struktur yang sensitif terhadap terjadinya penurunan seperti pondasi mesin dan bangunan dengan penggunaan yang tinggi pastinya membutuhkan penyelidikan tanah yang lebih menyeluruh daripada pondasi sebuah rumah. Umumnya, jika insinyur yang mengatur penyelidikan tanah familier terhadap lokasi yang ditinjau, ia akan melakukan proses penyelidikan tanah yang lebih sederhana, guna untuk mengkonfirmasi pengalamannya. Namun, kunjungan ke lokasi tetap merupakan suatu kewajiban dalam proses penyelidikan tanah. Proses penyelidikan tanah dibagi menjadi tiga komponen berdasarkan atas waktu pelaksanaannya, yaitu sebagai berikut:

1. Dilakukan sebelum proses perancangan.
2. Dilakukan pada proses perancangan.
3. Dilakukan pada proses konstruksi.

Komponen kedua dan ketiga berguna untuk memprediksi peristiwa yang mungkin akan terjadi, namun hal tersebut tidak dapat dipastikan. Di dalam komponen pertama, pelaksanaan dilakukan lebih luas dan dibagi dalam beberapa fase, yaitu sebagai berikut:

1. Fase I

Tahap ini disebut juga sebagai “*desk study*”. Studi ini membutuhkan kumpulan-kumpulan informasi, antara lain:

- a. Rencana lokasi.
- b. Tipe, ukuran, dan kegunaan struktur.
- c. Kondisi pembebanan.
- d. Laporan geologis terbaru mengenai lokasi tersebut.
- e. Peta, yang terdiri dari peta topografi, potret dari udara (*aerial*), potret diam (foto), potret citra satelit, dan peta geologis.
- f. Kliping-kliping surat kabar.

Internet dapat digunakan dalam fase ini dalam memperoleh informasi mengenai keadaan geologis, kontur, ketinggian tanah, iklim, penggunaan tanah, foto *aerial*, seismisitas regional, dan hidrologi, contohnya: <http://www.usgs.gov> dan *Google Earth*. Selain itu, GIS (*Geographic Information System*) juga dapat digunakan dalam menyediakan informasi mengenai kerangka ruang (*spatial framework*), yaitu mengandung foto *aerial*, akses jalan, bangunan, kontur, dan lain-lain. Informasi tersebut disediakan dalam bentuk peta dan simbol yang telah dibentuk dengan ketentuan-ketentuan yang berlaku dalam membuat model dengan GIS.

2. Fase II

Tahap ini terdiri dari pengambilan data yang diperoleh secara langsung dengan melakukan kunjungan ke lokasi. Tahap ini berguna untuk membandingkan informasi yang telah tersedia pada fase 1 dengan keadaan topografi dan geologi lokasi saat ini, dimana informasi yang diperoleh dalam fase ini antara lain:

- Potret-potret lokasi tinjauan dan sekitarnya.
- Akses ke lokasi tinjauan bagi pekerja dan alat-alat perlengkapan.

- Sketsa dari seluruh pagar, pos utilitas, jalan masuk, jalan setapak, sistem drainase, dan sebagainya.
- Utilitas pelayanan yang tersedia, seperti air dan listrik.
- Sketsa topografi termasuk seluruh struktur yang telah ada, lubang, timbunan, tekanan tanah, kolam, dan sebagainya.
- Mencatat informasi mengenai bangunan-bangunan yang berada pada lokasi tinjauan atau sekitarnya. Informasi tersebut terdiri atas retakan-retakan luar dan dalam, segala kemiringan yang dapat terlihat, jenis konstruksi (misalnya, batu bata atau bangunan plesteran berbingkai), kerusakan akibat es atau beku (pada daerah empat musim), jamur, dan fitur-fitur yang tidak umum.

3. Fase III

Merupakan proses eksplorasi tanah yang terperinci dengan tujuan sebagai berikut:

- Untuk menentukan struktur geologis, dimana perlu untuk terkandung ketebalan urutan dan tingkat strata tanah.
- Untuk menentukan kondisi air tanah.
- Untuk memperoleh sampel-sampel yang terganggu atau tidak terganggu untuk pengujian-pengujian laboratorium.
- Untuk mengadakan pengujian in situ (misalnya: *Standard Penetration Test* atau SPT).

4. Fase IV

Merupakan proses pengujian laboratorium yang bertujuan antara lain:

- Untuk mengklasifikasikan tanah.
- Untuk menentukan kekuatan tanah, besaran tegangan dan regangan pada keadaan gagal, hubungan tegangan-regangan, permeabilitas, daya kompaksi, dan parameter penyelesaian. Namun, tidak semua dari hal-hal ini diperlukan dalam sebuah proyek tergantung dari informasi yang diperoleh pada fase-fase sebelumnya.

5. Fase V

Terdiri dari proses penulisan laporan. Laporan tersebut harus mengandung deskripsi tanah lokasi yang lengkap, metode-metode eksplorasi, stratigrafi tanah, metode dan hasil pengujian in situ dan laboratorium, dan letak dari air tanah. Laporan tersebut juga mengandung informasi mengenai segala tanah dengan karakteristik yang tidak umum, lapisan air, dan segala kondisi tanah dan air tanah seperti kerentanan es (untuk daerah dengan 4 musim) atau daerah genangan air yang mungkin dapat menjadi suatu masalah selama konstruksi.

D. Program Eksplorasi Tanah

Program eksplorasi tanah sebagian besar telah dilakukan selama kunjungan lokasi tinjauan (fase II). Kemudian, dilakukan eksplorasi tanah yang terperinci pada fase III, dimana mengandung antara lain:

1. Menentukan kebutuhan dan tingkat eksplorasi geofisik.
2. Menentukan lokasi setiap *borehole* atau lubang bor dan/atau tes pit.
3. Memberi tanda berupa penomoran pada setiap *borehole* dan/atau tes pit.
4. Merencanakan kedalaman setiap *borehole* dan/atau tes pit.
5. Metode-metode dan prosedur-prosedur dalam melaksanakan pengeboran yang tepat.
6. Instruksi pengambilan sampel untuk setidaknya lubang pengeboran pertama. Instruksi pengambilan sampel tersebut harus termasuk jumlah sampel dan lokasi yang memungkinkan.
7. Menentukan kebutuhan dan jenis pengujian-pengujian in situ.
8. Persyaratan untuk pengamatan air tanah.

1. Metode Eksplorasi Tanah

Berdasarkan Budhu (2015), teknik eksplorasi tanah terbagi menjadi 2 jenis, yaitu metoda geofisik (*geophysical methods*) dan metoda pemboran (*destructive methods*), dimana eksplorasi tanah dapat dilakukan melalui salah satu metode atau lebih dari masing-masing jenis eksplorasi.

a. Metode Geofisik (*Geophysical Methods*)

Metoda geofisik terdiri-dari metode-metode yang tidak merusak tanah atau sangat kecil, tetapi tidak dapat digunakan untuk mengambil sampel tanah. Metode-metode tersebut ialah:

b. *Ground-penetrating radar (GPR) atau georadar.*

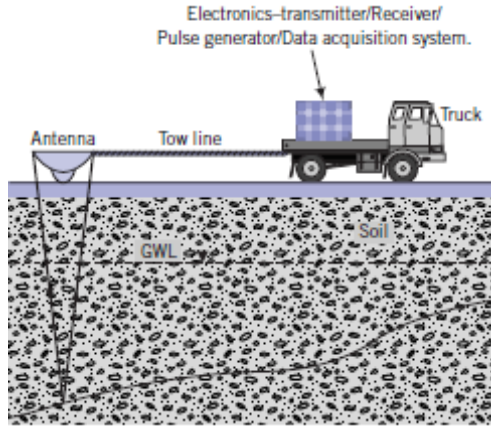
GPR merupakan metode yang menggunakan frekuensi elektromagnetik yang tinggi (10 - 1000 MHz) untuk memetakan tanah dan strukturnya. Dalam bentuk pulsa radar yang berasal dari sebuah generator pulsa, antenna memancarkan frekuensi elektromagnetik tersebut ke dalam tanah. Setelah mengenai sebuah objek, maka pulsa akan terpantul dan akan diterima kembali oleh antenna (Gambar 8.1). Dengan terantulnya pulsa-pulsa tersebut, akan dihasilkan gambar profil tanah dan letak objek-objek yang berada di dalam tanah secara kontinu. Walaupun cepat untuk dilaksanakan, metode ini tidak dapat digunakan pada tanah yang memiliki sifat konduktif listrik yang tinggi, seperti tanah lempung dan lanau basah.

c. *Seismik Surveys*

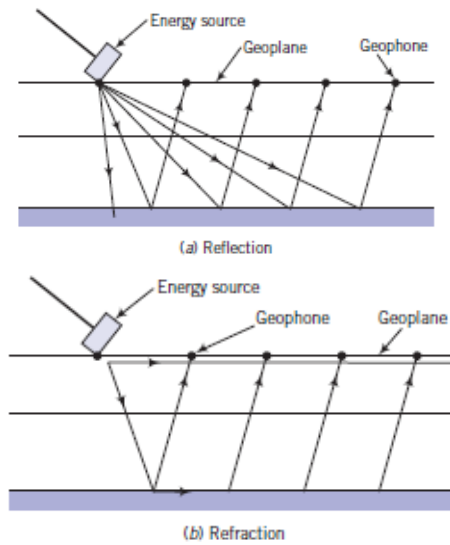
Teknik ini dapat menyediakan informasi mengenai stratigrafi dengan memanfaatkan kecepatan perambatan gelombang seismik, yaitu berupa gelombang tekanan (*P waves*), dimana kecepatan perambatan gelombang tersebut dipengaruhi oleh ketebalan dan sifat elastis dari material tanah. Ketika gelombang seismik mencapai perbatasan antara dua

media elastis, energi gelombang tersebut akan dikembalikan secara refleksi, refraksi, dan difraksi.

- Uji refleksi seismik. Pengujian ini memanfaatkan waktu Bergeraknya gelombang yang dipengaruhi oleh kedalaman, ukuran, dan bentuk dari pertemuan dua media elastis dibawah permukaan tanah, yang kemudian gelombang akan mengalami refleksi. Gelombang hasil refleksi ini akan ditangkap oleh alat-alat *Geophone*, yaitu alat yang sensitif terhadap pergerakan dan akan mengubah pergerakan tersebut ke dalam bentuk sinyal listrik. Sudut yang dihasilkan gelombang refleksi tersebut akan menentukan betapa kontras kepadatan material tersebut. Pengujian ini digunakan ketika dibutuhkan resolusi profil tanah yang tinggi, terutama pada kedalaman yang besar (< 150 ft).
- Uji refraksi seismik. Pengujian refraksi seismik umumnya sama dengan pengujian refleksi seismik. Perbedaannya adalah dalam pengujian ini, gelombang refraksi diukur dan alat-alat *geophone* diletakkan dengan jarak yang lebih jauh. Alat *geophone* yang terletak dibagian akhir berguna untuk merekam gelombang seismik yang cenderung bergerak horizontal sehingga pada umumnya pengujian ini hanya merekam *P waves* awal. Pengujian ini umumnya digunakan untuk mengetahui kedalaman dan ketebalan dari sebuah profil tanah, serta juga untuk mengetahui keberadaan objek-objek yang terkubur di dalam tanah.



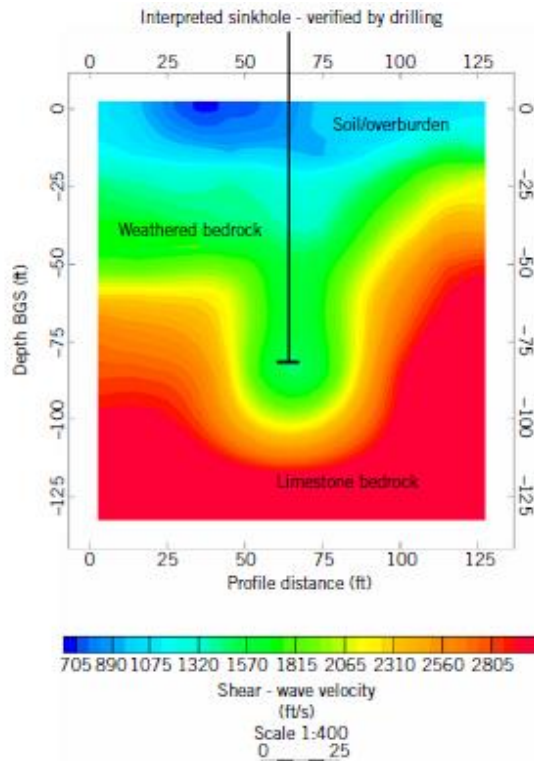
Gambar 8. 1 Ground Penetrating Radar (GPR)



Gambar 8. 2 Pengujian Pergerakan Gelombang Seismik Secara (a) Refleksi dan (b) Refraksi

- Pengujian dengan pergerakan gelombang difraksi tidak digunakan dalam menentukan karakteristik tanah, sebab gelombang akan mengalami penghamburan sehingga sulit ditangkap oleh *geophone*.

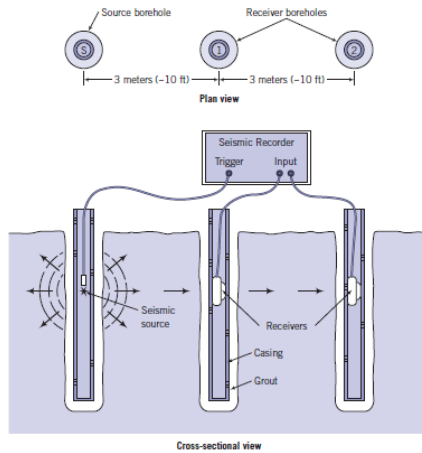
Untuk menghasilkan gelombang yang digunakan untuk pengujian ini, maka pada penyelidikan tanah yang dangkal, tanah ditumbuk-tumbuk dengan menggunakan palu godam, sedangkan untuk penyelidikan tanah yang dalam, digunakan ledakan kecil untuk menghasilkan gelombang pada tanah. Hasil dari pergerakan gelombang ini kemudian dipetakan dengan menggunakan *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW), yaitu untuk memetakan perubahan-perubahan pada material-material yang berkecepatan rendah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.3.



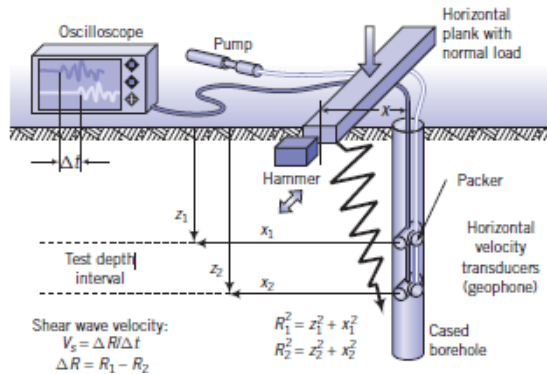
Gambar 8. 3 Profil Tanah pada MASW dalam Pengujian Seismik

Selain itu, untuk mengetahui kekakuan dari lapisan tanah, digunakanlah pengujian seismik *crosshole*. Pengujian ini menggunakan sumber seismik yang diletakkan pada satu lubang bor dan *geophone* yang diletakkan pada lubang bor yang berdekatan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.4. Pengujian ini berguna untuk menentukan kekakuan tanah dengan cara menghitung kecepatan P dan S (*shear*) *wave* dari seismik yang diterima *geophone*.

Sementara itu, untuk mengetahui lapisan-lapisan yang terdapat pada tanah dan kekuatan pada setiap lapisan tersebut, dilakukan pengujian seismik *downhole*. Pada pengujian ini, sumber seismik diletakkan di permukaan tanah, sedangkan *geophone* berada di lubang bor. Perhatikan Gambar 8.5.



Gambar 8. 4 Pengaturan pada Pengujian Seismik *Crosshole*

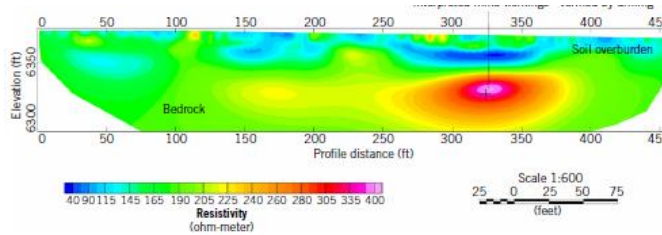


Gambar 8. 5 Pengujian Seismik *Downhole*

Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi dan kualifikasi kedalaman air tanah, mendeteksi keberadaan tanah lempung (*clay*), dan mengukur konduktivitas air tanah. Hal ini dikarenakan metode ini berguna untuk mengetahui resistivitas tanah dalam satuan ohm-centimeter (ohm-cm) yang dipengaruhi oleh perubahan pada kadar air dan suhu, sehingga menghasilkan kesimpulan bahwa meningkatnya kadar air mengakibatkan terjadinya reduksi resistivitas tanah.

Dalam metode ini, empat buah elektrode diletakkan pada tanah dalam satu garis dengan jarak yang sama. Umumnya jarak antar elektrode adalah 2.5, 5, 10, 20, dan 40 ft untuk penyelidikan tanah dangkal. Sedangkan untuk penyelidikan tanah yang dalam, jarak umum yang digunakan adalah 2.5, 10, 20, 50, 100, 300, dan 500 ft. Selanjutnya, Arus AC ditetapkan pada dua elektrode luar, kemudian tegangan AC pada dua elektrode dalam dihitung. Nilai hambatan (*resistance*) kemudian dapat ditentukan dengan membagi tegangan yang diperoleh dengan nilai arusnya. Pada pengujian ini, air diberikan pada lubang elektrode seiring ketika elektrode didorong ke dalam tanah untuk meningkatkan kontak listrik dan umumnya metode ini hanya dilakukan di satu lokasi dengan jarak antar

elektrode yang berbeda-beda agar dapat diketahui profil resistivitasnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.6.



Gambar 8. 6 Profil Tanah pada Pengujian Resistivitas Listrik

Metode-metode geofisik lainnya dalam geoteknik menurut Budhu (2015):

- *Gamma density* atau gamma-gamma, menentukan kepadatan elektron dan dapat digunakan untuk memperkirakan kepadatan total tanah dan porositasnya.
- Porositas neutron menentukan kepadatan hidrogen. Hal ini digunakan untuk memperkirakan porositas dibawah lapisan air tanah.
- *Sonic-VDL* menentukan kecepatan seismik. Hal ini berguna untuk menentukan kekakuan tanah dan mendeteksi ketinggian batuan dasar (*bedrock*).
- *Microgravity* digunakan untuk mendeteksi kepadatan di bawah permukaan tanah dan untuk mendeteksi rongga-rongga. Gravimeter digunakan dalam metode ini pada jarak tertentu dipermukaan tanah untuk mendeteksi perubahan kecil pada gravitasi. Perubahan ini disebut dengan anomali gravitasi dan berhubungan dengan perubahan kepadatan tanah. Metode ini tidak membutuhkan biaya yang besar tetapi sebagian besar informasi disediakan secara kualitatif.
- *Frequency Domain Electromagnetics (FDE)* adalah metode bidang gelombang kontinu yang berguna

untuk memetakan variasi lateral sebuah struktur di bawah permukaan tanah dengan menggunakan pemancar pada satu frekuensi. Konduktivitas listrik tanah ditentukan dengan menghitung besar dan fase pada arus elektromagnetik.

- *Very Low Frequency Electromagnetics* (VLFE) menggunakan metode yang relatif sama dengan FDE, perbedaannya adalah metode ini mendeteksi peningkatan konduktivitas tanah dengan menghitung distorsinya pada gelombang berfrekuensi sangat rendah. Metode ini berguna untuk mendeteksi retakan.
- *Time domain electromagnetics* (TDE) menentukan laju peluruhan pulsa arus dari waktu ke waktu untuk menentukan variasi konduktivitas tanah dan variasi derajat kejenuhan sesuai dengan kedalamannya.

d. Metode Destruktif (*Destructive Methods*)

Menurut Budhu (2015), metode ini membutuhkan perusakan pada massa tanah, bahkan hingga kedalaman yang besar, dimana metode ini berguna untuk inspeksi massa tanah, pemulihan sampel tanah, dan untuk pengujian in situ (pengujian destruktif). Metode-metode tersebut ialah sebagai berikut:

➤ *Trial pits* atau tes pit.

Metode ini cepat dan tidak mahal untuk dilakukan, sebab tanah hanya digali menggunakan sekop ataupun *backhoe*, dengan tujuan untuk menyediakan gambaran jelas mengenai stratigrafi tanah (mengenai perlapisan tanah tersebut dengan kedalaman hingga 4-5 m).



Gambar 8. 7 Tes Pit

(sumber: www.geoinvestigate.co.uk)

➤ *Hand* atau *power augers*.

Merupakan alat pembuat lubang sekitar 4 in. (100 mm) - 10 in. (250 mm) untuk menginspeksi tanah dan pengambilan sampel tanah yang tidak terganggu pada saat pelaksanaan (beberapa gangguan mungkin tidak dapat dihindari), dengan syarat tidak dapat digunakan pada bebatuan, *stiff clays*, pasir kering, atau *caliche soils*. Selain itu, kedalaman maksimal yang dapat dicapai *hand augers* (menggunakan tangan) adalah 6 m dan pada *power augers* (menggunakan truk) adalah 15 m.



Gambar 8. 8 *Hand Auger*

(sumber: www.amazon.com)

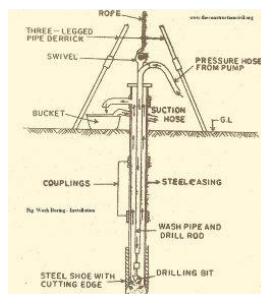


Gambar 8. 9 *Power Auger*

(sumber: www.cmeco.com)

➤ *Wash Boring*

Metode ini dapat digunakan pada medan yang sulit dengan perlengkapan yang tidak mahal, tetapi hanya dapat mencapai maksimum 30 m. Cara kerjanya adalah air dipompa melalui pipa yang dapat dilengkapi dengan mata bor (*drill bit*) untuk menghilangkan tanah pada lubang bor. Berdasarkan Terzaghi & Peck (1967), dengan metode ini, jenis tanah dapat ditentukan dengan mengamati warna dan kondisi umum campuran tanah dan air yang keluar melalui lubang bor.



Gambar 8. 10 *Alat Wash Boring*

(sumber: www.theconstructioncivil.org)

➤ *Rotaty Rigs*

Alat untuk membuat lubang bor dengan batang bor dan mata bor diputar secara mekanik sehingga sampel tanah dapat diambil. Metode ini dapat digunakan hingga kedalaman 7.500 m dan dapat digunakan untuk mengebor batu



Gambar 8. 11 Alat *Rotary Drill*

➤ *Direct Push.*

Metode ini lebih cepat pelaksanaanya daripada *rotary drill* dan juga menghasilkan limbah pengeboran yang minimal. Metode ini terdiri dari sebuah tabung tipe *split-spoon* berdiameter 30 - 150 mm dan panjang 1.5 - 5 m, serta dilengkapi dengan tutupan plastik yang didorong untuk mengambil sampel tanah.



Gambar 8. 12 Alat *split spoon sampler*

(sumber: www.indiamart.com)

➤ *Sonic drilling.*

Metode ini lebih cepat pelaksanaannya daripada *rotary drill* dengan limbah pengeboran yang minimal. Metode ini menggunakan getaran mekanis pada frekuensi sekitar 50-150 Hz untuk menghancurkan tanah atau inti batu (material keras) yang berdiameter 100-200 mm.



Gambar 8. 13 Alat *Sonic Drilling*

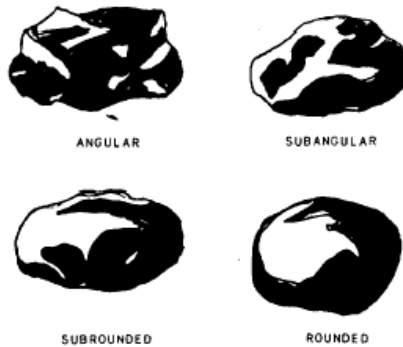
(sumber: www.boartlongyear.com)

2. Identifikasi Tanah di Lapangan

Identifikasi tanah umumnya ditentukan oleh beberapa hal berikut:

- Warna: berhubungan dengan kandungan mineral dan tekstur tanah.
 - Abu-abu dan kebiru-biruan: tanah yang tidak teroksidasi.
 - Putih dan krem: tanah berkapur.
 - Merah dan kuning: tanah yang teroksidasi.
 - Hitam dan coklat tua: tanah yang mengandung bahan organik.
- Kelembapan: Rupa tanah dibedakan menjadi basah, kering, dan lembap berdasarkan kandungan air.

- Struktur:
 - Homogen: Seluruh warna dan tekstur terasa sama.
 - Tidak homogen: warna dan tektur bervariasi.
- Bentuk: *angular*, *subangular*, *rounded*, *subrounded*, atau *flaky*.



Gambar 8. 14 Bentuk *Angular*, *Subangular*, *Rounded*, dan *Subrounded*

(sumber: www.tpbu.com)



Gambar 8. 15 Bentuk *Flaky*

(sumber: www.mtransport.com)

- Pelapukan: segar (*fresh*), busuk (*composed*), atau lapuk (*weathered*).
- Karbonat: tambahkan sedikit asam klorida dan lihat apakah muncul gelembung-gelembung kecil. Jika ya, maka tanah tersebut mengandung karbonat.

- Bau:
 - Tanah organik mengeluarkan bau yang kuat seiring dengan bertambahnya panas.
 - Tanah anorganik mengeluarkan bau yang tidak sedap seiring dengan bertambahnya air.
- Rasa (raba): gunakan tangan untuk membedakan pasir (*sand*), lanau (*silts*) dan tanah lempung (*clays*).
 - Pasir terasa berbutir (*gritty*).
 - Lanau terasa kasar (mirip dengan amplas halus).
 - Tanah lempung terasa halus dan berminyak. Jenis ini lengket ditangan dan menjadi bubuk saat dikeringkan.
- Konsistensi:
 - Sangat kaku: tekanan jari hampir tidak mengubah bentuk tanah, tetapi akan retak dibawah tekanan yang signifikan.
 - Kaku: Tekanan jari mengubah bentuk tanah.
 - Kuat: Tanah dapat dibentuk-bentuk dengan tekanan jari yang kuat.
 - Lembut: Mudah dibentuk-bentuk menggunakan tangan.
 - Sangat lembut: Tanah keluar diantara jari-jari ketika digenggam.
- *Dilatancy*: Taruh tanah digenggaman tangan dan goyangkan secara horizontal. Kemudian lemparkan ke tangan yang lain. Jika permukaanya terlihat seperti bubur dan mengeluarkan air, maka kemungkinan tanah tersebut mengandung lumpur yang besar.
- *Packing*: tanah berbutir kasar dideskripsikan sebagai:
 - Sangat lepas: hancur akibat sedikit gangguan, struktur terbuka.
 - Lepas: hancur akibat gangguan, struktur terbuka.
 - Padat sedang: tidak berubah bentuk jika tangan menekan dengan kuat.
 - Padat: hampir tidak berdeformasi ketika ditekan dengan kaki atau di injak-injak.

- Sangat padat: sulit untuk berubah bentuk dengan tekanan kaki.

3. Jumlah dan Kedalaman Lubang Bor (*Boreholes*)

Umumnya, jumlah dan kedalaman lubang bor ditentukan berdasarkan karakteristik geologis, beban dan struktur yang berada pada tanah. Jika beban pada lokasi tinjauan diketahui, setidaknya satu lubang bor dilakukan dibeban yang paling maksimal. Berdasarkan Budhu (2015), jumlah lubang bor minimum untuk bangunan dan subdivisi diatur didalam

Tabel 8. 1 Pedoman Jumlah Minimum Lubang Bor Untuk Bangunan dan Subdivisi

Bangunan		Subdivisi	
Area (m ²)	Jumlah minimum lubang bor	Area (m ²)	Jumlah minimum lubang bor
< 100	2	< 4000	2
250	3	8000	3
500	4	20,000	4
1000	5	40,000	5
2000	6	80,000	7
5000	7	400,000	15
6000	8		
8000	9		
10,000	10		

Mengenai kedalaman lubang bor, berikut terdapat beberapa panduan dalam menentukannya berdasarkan Budhu (2015):

- Pada tanah yang mudah dibentuk seperti tanah lempung, pengeboran dilakukan 1 hingga 3 kali lebar pondasi dibawah kedalaman *embedment* (struktur yang tertanam di tanah) ataupun hingga peningkatan

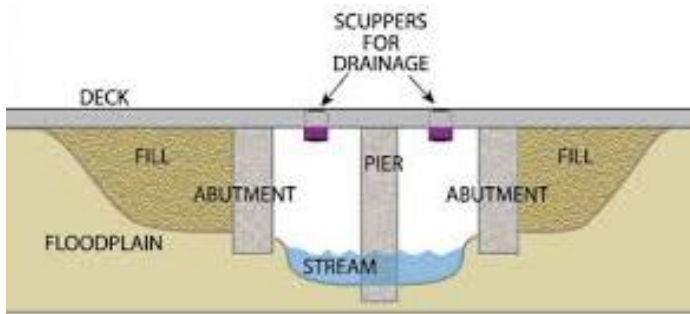
tegangan (*stress*) akibat beban pondasi yang terberat kurang dari 10% (gunakan yang paling dalam).

- Pada tanah lempung yang sangat kaku dan tanah berbutir kasar yang padat, pengeboran dilakukan 5-6 m untuk membuktikan ketebalan lapisan tersebut cukup.
- Pada batuan, pengeboran dilakukan setidaknya 3 m.
- Pengeboran harus dilakukan di bawah segala timbunan (termasuk timbunan halus dibawah struktur).
- Kedalaman minimum lubang bor adalah 6 m kecuali ditemukan lapisan batuan dasar (*bedrock*) atau material yang sangat padat.

Berdasarkan Budhu (2015), panduan umum dalam menentukan jumlah minimum dan kedalaman minimum lubang bor pada struktur tanah yang umum diatur dalam

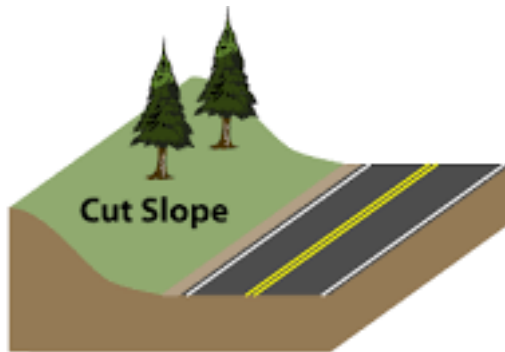
Tabel 8. 2 Panduan Jumlah Minimum dan Kedalaman Minimum Pada Struktur

Struktur	Jumlah Minimum Lubang Bor	Kedalaman Minimum
Pondasi dangkal pada bangunan	1, tetapi umumnya diletakkan pada titik simpul <i>grids</i> dari ukuran yang bervariasi dari 15m x 15m hingga 40m x 40m.	5 m atau 1B - 3B, dimana B adalah lebar pondasi.
Pondasi yang dalam pada bangunan	Sama dengan pondasi dangkal	25 - 30 m. Jika mencapai batuan dasar, bor hingga 3 m ke dalamnya.
Jembatan	<i>Abudment</i> : 2 <i>Piers</i> : 2 (lihat Gambar 8.16)	25 - 30 m. Jika mencapai batuan dasar, bor hingga 3 m ke dalamnya.
Dinding penahan (<i>retaining walls</i>)	Panjang < 30 m: 1 Panjang > 30 m: 1setiap 30 m, atau 1 hingga 2 kali tinggi dinding.	1 - 2 kali tinggi dinding. Jika dinding berada di batuan dasar, bor dilakukan 3 m ke dalamnya.
<i>Cut slopes</i> (Gambar 8.17)	Sepanjang panjang kemiringan: 1 setiap 60 m atau 1 setiap 120 m jika tanah tidak bervariasi secara signifikan. Pada kemiringan: 3.	6 m di bawah <i>cut slope</i> dasar.
Tanggul, jalan raya, dan jalan tol.	1 setiap 60 m atau 1 setiap 120 m jika tanah tidak bervariasi secara signifikan.	Lebih besar dari 2 x tinggi atau 6 m.



Gambar 8. 16 Abutment dan Pier Jembatan

(sumber: www.watercraft.ohiodnr.gov)



Gambar 8. 17 Cut Slope

(sumber: www.sddc.army.mil)

4. Pengambilan Sampel Tanah

Dalam mengambil sampel tanah, sebuah tabung dengan ujung terbuka yang berdinding tipis bernama *Shelby tube* atau *sampling tube* didorong ke dalam tanah, lalu kemudian ditarik kembali keluar dari tanah sehingga diperoleh tanah di dalam *sampling tube* yang berguna dalam pengamatan dan pengujian laboratorium. Ukuran dari *sampling tube* ini menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi besarnya gangguan pengambilan sampel tanah dan rasio pemulihan tanah.

$$R = \frac{L}{z}$$

Dimana:

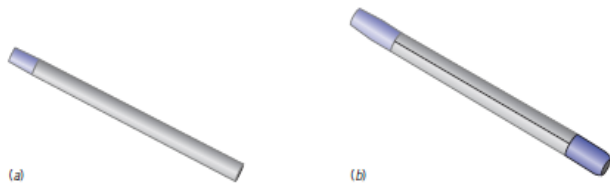
R: rasio pemulihan.

L: panjang *sampling tube*.

Z: kedalaman *sampling tube* pada tanah.

Dengan meningkatnya tinggi tabung, sehingga mengakibatkan menebalnya dinding tabung akan menyebabkan semakin besarnya rasio pemulihan tanah dan gangguan tersebut. Berikut adalah contoh dari *sampling tube* yang umum menurut Budhu (2015):

- *Piston sampler*. Diameter 50 mm atau 100 mm, ketebalan 1.75 mm (tipis), panjang 600 - 1000 mm. Berguna untuk tanah berbutir halus, khususnya tanah lempung halus.
- *Split-spoon sampler*. Diameter dalam sebesar 35 mm dan diameter luar sebesar 51 mm. Terpisah menjadi dua bagian yang disatukan dengan sebuah penutup.



Gambar 8. 18 (a) Tabung Berdinding Tipis dan (b) *Split-Tube Sampler*

5. Kondisi Air Tanah

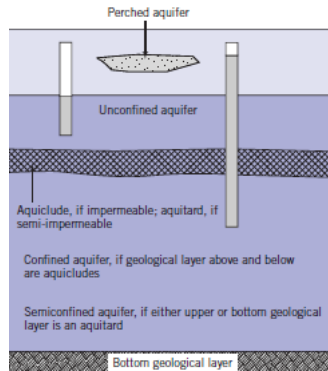
Berdasarkan Budhu (2015), lapisan air tanah (simbol: ▼ atau ∇) adalah lapisan di bawah permukaan tanah, dimana rongga-rongga pada tanah tersebut terisi penuh dengan air atau jenuh air (*saturated*). Bagian atas lapisan air tanah, disebut dengan permukaan bebas, berada di bawah tekanan atmosfer. Banyak kesalahan konstruksi timbul akibat kelalaian dalam mengidentifikasi

lapisan air tanah, dimana lapisan tersebut selalu mengalami fluktuasi tergantung dari kondisi lingkungan, aktivitas manusia (mengambil air tanah dari sumur), dan kondisi geologis. Oleh karena itu, estimasi kemungkinan fluktuasi kenaikan air tanah juga diperlukan.

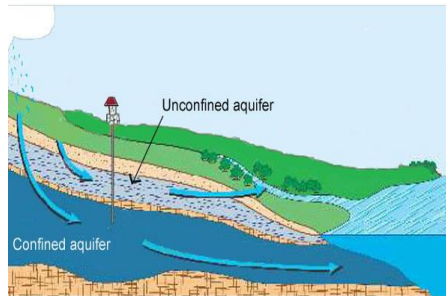
Tanah yang menahan air tanah tersebut disebut dengan Akuifer. Tanah ini terdiri dari 3 jenis, yaitu *unconfined* (tidak tertekan), *confined* (tertekan), *semiconfined* (setengah tertekan), seperti yang terlihat pada Gambar 8.19. Pada akuifer *unconfined*, lapisan air tanah dapat mengalami fluktuasi ke atas dan bawah, tergantung dari ketersediaan air. Sementara itu, akuifer *confined* cenderung untuk menahan air tanah sehingga aliran air tanah lebih lambat, dimana terdapat suatu bentukan geologis yang berada di atas dan bawahnya sehingga memisahkannya dengan akuifer *unconfined*. Berdasarkan Budhu (2015), penetrasi pada salah satu bentukan geologis ini, biasanya yang terletak diatas, akan menyebabkan kenaikan air tanah. Bentukan geologis tersebut disebut sebagai:

- *Aquicludes*, jika bersifat impermeabel.
- *Aquitard*, jika bersifat semi-impermeabel.

Selain itu, tanah juga terkadang memiliki kumpulan air tanah yang terperangkap dalam bentukan geologis tidak jenuh atau disebut dengan akuifer melayang atau *perched aquifers* dan air tanah yang terkandung disebut dengan *perched water tables*. Menurut Budhu (2015), tanpa pengidentifikasian dan laporan mengenai akuifer melayang dapat mengakibatkan ketidakstabilan pada tanah.



Gambar 8. 19 Akuifer Tertekan, Tidak Tertekan, Setengah Tertekan, *Aquiclude*, dan *Aquitard*.



Gambar 8. 20 Akuifer Tertekan dan Tidak Tertekan

(sumber: www.studyblue.com)

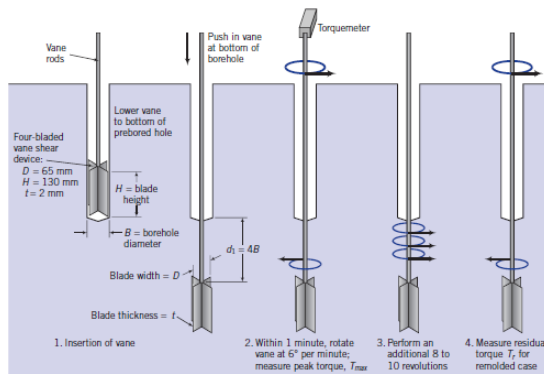
6. Jenis - Jenis Pengujian In Situ atau Pengujian Lapangan

Berdasarkan Budhu (2015), pengujian in situ yang paling umum dilakukan adalah menggunakan *Vane Shear Test (VST)*, *Standard Penetration Test (SPT)*, *Cone Penetrometer Test (CPT)*, *Pressuremeter Test (PMT)*, dan *Flate Plate Dilatometer (DMT)* karena alat-alat tersebut tidak terlalu mahal jika dibandingkan dengan pengujian laboratorium dan menghasilkan profil tanah yang kontinu atau semi-kontinu (khususnya VST, SPT, dan CPT).

a. **Vane Shear Test: ASTM D 2573**

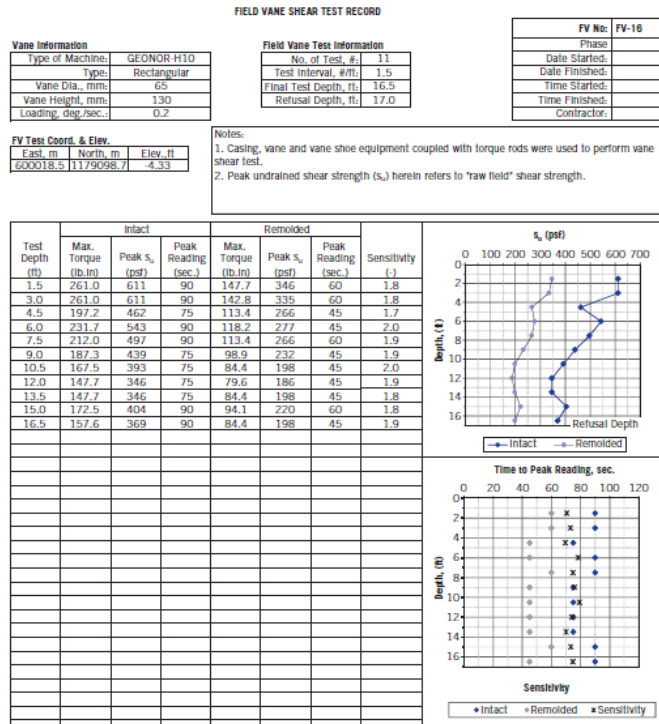
Pengujian ini cepat untuk dilakukan, murah, dan alatnya mudah untuk ditemukan. Alat tersebut ialah empat bilah logam tipis (menghadap setiap 90°) yang tersambung ke suatu batang (Gambar 8.21). Ketebalan logam tipis tersebut tidak boleh melebihi 5% dari diameternya karena dapat menyebabkan pemadatan tanah. Alat ini dimasukkan ke dalam lubang bor, kemudian diputar (torsi) pada kecepatan 6° per menit dengan alat kepala torsi yang berada di atas permukaan tanah. Setelah mencapai torsi maksimum (T_{max}), alat tersebut diputar sekitar 8-10 putaran untuk mendapatkan torsi residual (T_{res}). Nilai dari rasio T_{max} terhadap T_{res} digunakan sebagai nilai sensitivitas tanah, dimana mempunyai pengertian sebagai berkurangnya kekuatan geser akibat adanya gangguan pada tanah (Budhu, 2015).

$$S_t = \frac{T_{max}}{T_{res}}$$



Gambar 8. 21 Pengujian *Vane Shear Test* (VST)

Hasil dari pengujian ini dinyatakan dalam bentuk laporan pengaruh *vane shear strength* terhadap kedalamannya, seperti yang terlihat pada Gambar 8.22.



Gambar 8. 22 Contoh Hasil Pengujian *Vane Shear Test*

b. Standard Penetration Test: ASTM D 1586

Pengujian ini berguna untuk menentukan perubahan stratigrafi dan mengetahui letak batuan dasar. Tanah yang diambil dalam pengujian ini juga dapat digunakan pada pengujian laboratorium. Walaupun mudah dan cepat, SPT tidak dapat digunakan untuk kerikil kasar, batuan besar, lempung lunak, lanau, dan tanah campuran yang mengandung batuan besar, *cobbles*, lempung dan lanau. Selain itu, SPT harus dilakukan bersamaan dengan pengujian yang lain, misalnya *cone penetration test*.

Dalam pelaksanaannya, pengujian ini menggunakan batang dengan *split-spoon sampler* yang dimasukkan ke dalam lubang bor. Kemudian *sampler* dipukul menggunakan *drop hammer* dengan berat 63,5 kg dan tinggi jatuh 760 mm, hingga 6 in. (152 mm) ke dalam tanah. Selanjutnya, *sampler* dipukul lagi hingga mencapai kedalaman 2 x 6 in. dari 6 in. yang pertama. Jumlah pukulan yang kedua tersebut (N) disebut dengan *standard penetration number*. Nilai N dinyatakan dalam bentuk rasio energi batang 60%, yaitu 60% rasio energi yang dikirim ke *split-spoon sampler* terhadap energi jatuh *hammer*. Nilai N tersebut dilambangkan sebagai N_{60} .

$$N_{60} = N \left(\frac{ER_r}{60} \right) = NC_E$$

ER_r adalah rasio energi dan C_E adalah 60% faktor koreksi rasio energi batang. Selain itu, nilai N juga dapat dinyatakan dalam bentuk $N_{1,60}$ yang memperhatikan panjang batang, jenis *sampler*, diameter lubang bor, dan peralatan.

$$N_{1,60} = C_{RSBEN}N$$

C_{RSBEN} dihitung dengan persamaan berikut:

$$C_{RSBEN} = C_R C_S C_B C_E C_N$$

C_R adalah faktor koreksi untuk panjang batang, C_S adalah faktor koreksi untuk jenis *sampler*, C_B adalah faktor koreksi untuk diameter lubang bor, C_E adalah faktor koreksi untuk *hammer*, dan C_N adalah faktor koreksi untuk tekanan *overburden* (akibat beban). Nilai dari C_R , C_S , C_B , C_E , C_N diberikan dalam tabel berikut:

Tabel 8. 3 Faktor Koreksi C_R , C_S , C_B , dan C_E

Jenis faktor koreksi	Jenis	Faktor koreksi
C_R	L (panjang batang) \leq 12ft	$C_R = 0.8$
	12ft < L \leq 20ft	$C_R = 0,015L + 0.61$
	20ft < L \leq 65ft	$C_R = 0.000037L^2 + 0.005L + 0.83$
	L \geq 65ft	$C_R = 1$
C_S	<i>Standard sampler</i>	$C_S = 1.0$
	<i>US Sampler without liner</i>	$C_S = 1.2$
C_B	Diameter 2.5 - 4.5 in.	$C_B = 1.0$
	Diameter 6 in.	$C_B = 1.05$
	Diameter 8 in.	$C_B = 1.15$
C_E	<i>Safety hammer (rope, without Japanese "throw" release)</i>	$C_E = 0.7 - 1.2$
	<i>Donut hammer (rope, without Japanese "throw" release)</i>	$C_E = 0.5 - 1.0$
	<i>Donut hammer (rope, with Japanese "throw" release)</i>	$C_E = 1.1 - 1.4$
	<i>Automatic trip hammer (donut or safety type)</i>	$C_E = 0.8 - 1.4$

Sedangkan, C_N diperoleh dengan rumus berikut:

$$C_N = \sqrt{\frac{2000}{\sigma'_{z0}}}$$

σ'_{z0} adalah tegangan efektif overburden yang dinyatakan dalam bentuk *pounds per square foot* (psf) sehingga seharusnya nilai $C_N \leq 2$.

Nilai N yang diperoleh juga dapat digunakan sebagai penilaian awal karakteristik tanah, seperti daya kompaksi tanah berbutir kasar (Tabel 8.4) dan konsistensi tanah berbutir halus (Tabel 8.5)

Tabel 8. 4 Daya Kompaksi Tanah Berbutir Kasar Berdasarkan Nilai N

N	γ (pcf)	Dr (%)	Daya kompaksi
0 - 4	64 - 90	0 - 20	Sangat lepas
4 - 10	90 - 102	20 - 40	Lepas
10 - 30	102 - 120	40 - 70	Sedang
30 - 50	120 - 135	70 - 85	Padat
>50	>135	>85	Sangat padat

Tabel 8. 5 Konsistensi Tanah Berbutir Halus dalam Keadaan Jenuh Berdasarkan SPT

Deskripsi	N
Sangat lunak	0 - 2
Lunak	2 - 4
Setengah kaku	4 - 8
Kaku	8 - 15
Sangat kaku	15 - 30
Keras	>30

Contoh Soal 8.1: Menghitung Nilai SPT

Jumlah pukulan pada sebuah SPT pada kedalaman 20 ft di tanah berbutir kasar setiap 6 in. adalah 8, 12, dan 15. Sebuah *donut automatic trip hammer* dan sebuah *standard sampler* digunakan pada lubang bor berdiameter 6 in. Tegangan efektif overburdennya adalah 1800 psf.

- Tentukan nilai N .
- Koreksi nilai N ke nilai N_{60} .
- Koreksi nilai N ke nilai $N_{1,60}$.

(d) Buat deskripsi awal daya kompaksi tanah tersebut.

(e) Perkirakan *bulk unit weight* tanah tersebut.

Jawaban:

(a) $N = 12 + 15 = 27$

(b) Lihat Tabel 8.3, $C_E = 0.8 - 1.4$ untuk *donut automatic trip hammer*, asumsikan $C_E = 1$.

$$N_{60} = NC_E = 27 \times 1 = 27$$

Lihat Konsistensi Tanah Berbutir Halus dalam Keadaan Jenuh Berdasarkan SPT.

(c) $C_R = 0,015L + 0.61$ untuk $\leq 20\text{ft}$; $C_S = 1.0$ untuk *standard sampler*; $C_B = 1.05$ untuk diameter 6 in.

$$C_R = 0.015 \times 20 \times 0.61 = 0.91$$

$$C_N = \sqrt{\frac{2000}{\sigma'_{zo}}} = \sqrt{\frac{2000}{1800}} = 1.05$$

$$N_{1,60} = C_{RSBEN} N = 0.91 \times 1.0 \times 1.05 \times 1 \times 1.05 \times 27 = 27$$

(d) Lihat Tabel 8.4, tanah tersebut memiliki daya kompaksi sedang untuk $N = 27$.

(e) Lihat Tabel 8.4,

$$\gamma = 120 - \frac{(30 - 27)}{(30 - 10)} \times (120 - 102) = 117,3 \text{ pcf}$$

Atau dengan cara

$$\gamma = 102 - \frac{(27 - 10)}{(30 - 10)} \times (120 - 102) = 117,3 \text{ pcf}$$

Contoh Soal 8.2: Memperkirakan Daya Kompaksi dari Nilai SPT

Gambarkan dan perkirakan daya kompaksi tanah berdasarkan laporan hasil SPT pada Gambar 8.23.

												BORING LOG: SHEET 1 of 3 NCS PROJECT #:					
PROJECT: CLIENT: CLIENT PROJECT:												CONTRACTOR: DRILLER: INSPECTOR:					
COORDINATES N: E: LOCATION: Tucson, Arizona						REF. ALIGNMENT: STATION: OFFSET:						RIG TYPE: 8" O.D. HSA DRILLING METHOD: 8" O.D. HSA HAMMER TYPE: Auto Hammer					
COMMENTS:												SURFACE ELEV.: 2342.4 TOTAL DEPTH: 81.5 START DATE: 10/26/2005 TIME: 07:20 AM FINISH DATE: 10/26/2005 TIME: 11:45 AM					
												GROUNDWATER DATA					
Type/Symbol	Casing	Split Spoon	Ring Sample	Split Spoon	Cuttings	Core Barrel	Date	Time	Water Depth (ft)	Casing Depth (ft)	HWL Depth (ft)	Symbol					
I.D.		S	R	S2	CU	C	10/26/05	06:00 AM	25.0	25.0	25.0	W					
O.D.		2"	3"	1.5"	-	-											
Length		18"	18"	18"	-	-											
Hammer WT.	140 lbs.		Drill Rod Size														
Hammer Fall	30 in.		I.D. (O.D.)														
DEPTH BELOW SURFACE (FT)	ELEVATION (FT)	GRAPHIC	SOIL SAMPLE			BLOWS			N-VALUE	RECOVERY (IN)	VISUAL MATERIAL CLASSIFICATION AND REMARKS	MOISTURE, %	DRY UNIT WEIGHT (PCF)	SAMPLES SENT TO LAB			
			TYPE	NUMBER	SYMBOL	DEPTH (FT)	0-6 INCH	6-12 INCH							12-18 INCH		
					FROM	TO											
2340			R	1		5	6	6	7	13	POORLY GRADED SAND WITH SILT (III), medium dense, moist, brown, fine SAND, few non plastic fines, drywall, brown glass, brick and other debris present, weak cementation, strong reaction with HCl. (SP-SM)						
5																	
2335			S	2		10	11.5	2	3	5	POORLY GRADED SAND (III), loose, moist, brown, fine SAND, trace non plastic fines, weak cementation, no reaction with HCl. (SP)						
10																	
2330			S	3		15	16.5	3	4	6	CLAYEY SAND (native), medium dense, brown to dark brown, fine SAND, some medium plastic fines, weak cementation, no reaction with HCl. (SC)						
15																	
2325			S	4		20	21.5	23	34	33	WELL-GRADED GRAVEL WITH SAND, very dense, moist, brown, fine to coarse GRAVEL, some fine to coarse sand, trace non plastic fines, sub-angular particles, no cementation, no reaction to HCl. (GW)						
20																	
2320											WELL-GRADED SAND WITH CLAY, medium dense, wet, brown, fine to coarse						

Gambar 8. 23 Contoh Laporan Hasil SPT

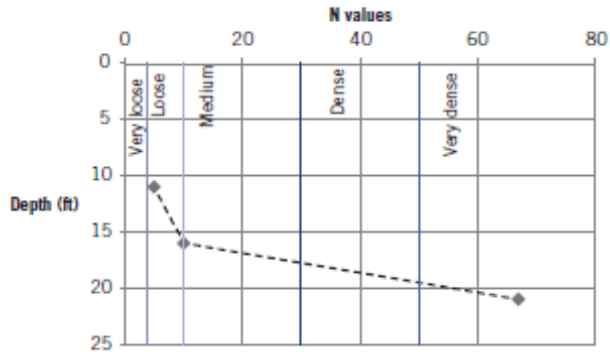
Jawaban:

(a) Buat tabel nilai rata-rata kedalaman dalam satuan ft dan N.

Tabel 8. 6 Tabel Nilai Rata - Rata Kedalaman

Rata-rata kedalaman (ft)	N
11	5
16	10
21	67

(b) *Plot* nilai-nilai tersebut



Gambar 8. 24 *Plot* Nilai N dalam Menentukan Daya Kompaksi Tanah

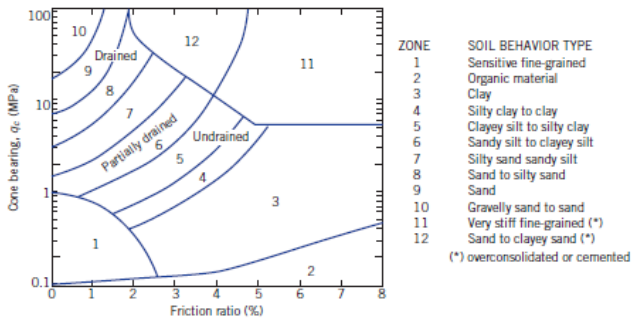
Dari Gambar 8.24, dapat diketahui daya kompaksi tanah berdasarkan kedalamannya. Contohnya, daya kompaksi tanah tersebut pada kedalaman 11 – 16 ft berkategori lepas.

c. Cone Penetrometer Test: ASTM D 5778

Cone penetrometer test berguna untuk memperkirakan kuat geser tanah, kuat seismik tanah terhadap beban dan karakteristik konsolidasi tanah dengan kemungkinan kesalahan kecil. Alat yang digunakan berdiameter 36 mm dengan luas alas 10 cm² yang dilengkapi kerucut bersudut 60° yang tersambung ke suatu batang (Gambar 8.27a). Lengan tersebut memiliki luas permukaan 150 cm² yang membungkus batang diatas bagian kerucut. Alat ini didorong ke dalam tanah dengan kecepatan 2 cm/detik. Dengan demikian, diperoleh nilai resistansi ujung kerucut (q_c) dan gesekan pada sisi *cone penetrometer* (f_s) secara terpisah sehingga dapat diperoleh rasio gesekan:

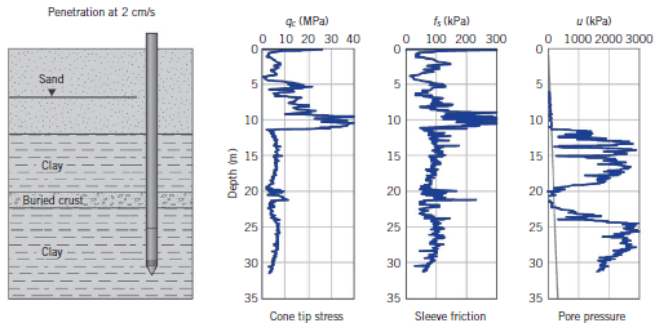
$$R_f = 100\% \times \frac{f_s}{q_c}$$

Nilai-nilai tersebut berguna dalam menentukan stratigrafi tanah dengan menggunakan grafik klasifikasi pada Gambar 8.25. Klasifikasi ini hanya dapat digunakan pada kedalaman tidak lebih dari 30,48 m.

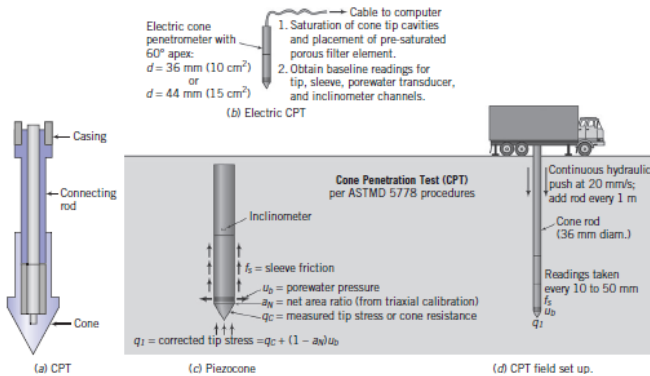


Gambar 8. 25 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Resistansi Ujung Kerucut dan Rasio Gesekan

Selain itu, terdapat juga *Piezicone* (uCPT atau CPTu) yang merupakan alat CPT listrik (Gambar 8.27b) yang mempunyai bagian berpori untuk menentukan tekanan pori air (Gambar 8.27c). *Load cell*, yaitu alat yang mengirimkan sinyal listrik jika diberi beban (Ralph Closs dkk., 2013), umumnya digunakan untuk menentukan gaya penetrasinya. Contoh hasil dari *piezicone* dapat dilihat pada Gambar 8.26.



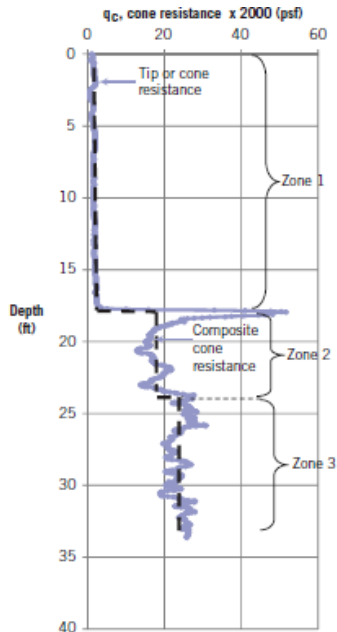
Gambar 8. 26 Contoh Hasil dari *Piezocone* ($1 \text{ Mpa} = 20.88 \text{ ksf}$)



Gambar 8. 27 (a) CPT, (b) CPT listrik, (c) *Piezocone*, (d) Pengaturan di Lapangan

Ada juga CPT dengan kerucut 175eismic (SCPT), dengan *geophone* berada di dalam kerucut yang berguna untuk menerima gelombang-gelombang seismik dari pukulan *hammer* di permukaan tanah. Selain itu, terdapat juga CPT dengan kerucut *vision* (VisCPT atau VisCPTu) yang mempunyai kamera kecil sehingga dapat dilihat tanah disekitar kerucut. Dengan kamera tersebut, tekstur dari tanah dapat diketahui dan dapat digunakan untuk mengetahui letak tanah yang *liquefiable* (mencair).

Dalam CPT, resistansi kerucut dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu tingkat tegangan tanah, kepadatan tanah, stratigrafi, kandungan mineral, jenis tanah, dan susunan partikel tanah. Pada tanah komposit, nilai resistansi kerucut ini digambarkan seperti pada Gambar 8.28 dimana setiap lapisan tanah diasumsikan sebagai resistansi kerucut yang sama.

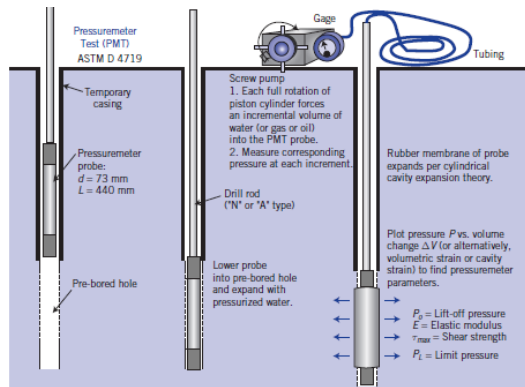


Gambar 8. 28 Perkiraan Resistansi Kerucut Komposit

d. Pressuremeter: ASTM D 4719 - 87

Alat *Menard Pressuremeter* diletakkan pada lubang bor dengan kedalaman yang telah ditentukan, kemudian tekanan diberikan pada sel pengukur di alat tersebut. Peningkatan pemberian tekanan akan menyebabkan ekspansi rongga silinder (Gambar 8.29). Hubungan antara tekanan dengan perubahan volume tersebut akan membentuk sebuah kurva sehingga modulus elastisitas, tegangan horizontal, dan sudut

gesekan dapat diperkirakan. Namun, jika dibandingkan dengan CPT, alat ini lebih mahal dan lebih sulit untuk ditemukan. Selain itu kondisi drainase juga tidak dapat diketahui sehingga sulit untuk menentukan kepastian nilai dari modulus geser dan kekuatan geser.

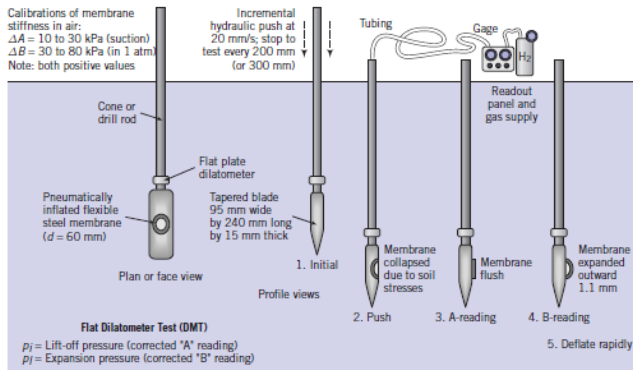


Gambar 8. 29 Pengujian Menggunakan *Pressuremeter*

e. *Flate Plate Dilatometer (DMT)*

Pengujian ini berguna dalam menentukan kekuatan geser tak terdrainase, tekanan lateral bumi, rasio *overconsolidation*, dan modulus elastisitas. Alat yang digunakan terdiri dari bilah runcing dengan lebar 95 mm, tebal 15 mm, dan panjang 240 mm (Gambar 8.30). Terdapat selaput baja fleksibel berdiameter 60 mm pada permukaan bilah yang akan mendorong tanah (dengan arah selaput tersebut menghadap) ketika selaput tersebut mengembang (*inflated*). Bilah tersebut dipasang pada batang bor dan didorong ke dalam tanah dengan kecepatan 2 cm/detik. Selaput ini kemudian diberi tekanan pneumatic (udara) sehingga selaput tersebut terdorong keluar, kemudian mendorong tanah hingga 1.1 mm, dan akhirnya selaput

kembali kepada keadaan semula. Pengujian ini cocok untuk jenis pasir dan tanah lempung.



Gambar 8. 30 Flat Plate Dilatometer

E. Pengujian Laboratorium Tanah

Sampel tanah untuk pengujian laboratorium biasanya diambil dari lapangan untuk menggolongkan sifat fisik dan sifat mekanik dari tanah (menyangkut kekuatan dan penyusutan tanah). Parameter inilah yang digunakan untuk merancang pondasi dan untuk menentukan kegunaan dari tanah sebagai bahan konstruksi. Sampel yang tidak normal biasanya digunakan untuk inspeksi visual dan untuk menentukan sifat fisik, penyebaran ukuran butir tanah dan juga bentuknya. Hasil pengujian, terkhususnya yang berhubungan dengan sifat mekanik tanah sangat dipengaruhi oleh cara pengambilan sampel, pengangkutan sampel ke lab, dan persiapan sampel pada saat lab. Perhatian dan ketelitian sangat diperlukan untuk tetap menjaga keutuhan dari sampel tanah yang ingin diuji. *Wax* sering digunakan untuk melapisi tanah dan juga untuk mencegah kekurangan kelembapan pada tanah.

F. Jenis Pengujian Laboratorium

Pengujian-pengujian laboratorium diperlukan untuk mengklasifikasi jenis tanah dan untuk menentukan parameter kekuatan tanah, penurunan tanah, dan kekakuan tanah untuk perancangan dan pembangunan bangunan. Sampel-sampel pengujian laboratorium selalu mengalami gangguan dan derajat gangguan tersebut bisa mempengaruhi hasil pengujian secara signifikan. Perhatian dan ketelitian yang cukup diperlukan untuk mengurangi gangguan yang mungkin terjadi saat pengujian. Pengujian laboratorium dapat dibagi menjadi dua yaitu pengujian untuk menentukan sifat fisik tanah dan juga pengujian untuk menentukan sifat mekanik tanah.

Tabel 8. 7 Pengujian-Pengujian Laboratorium untuk Menentukan Sifat Secara Fisik

Sifat Fisik	ASTM	Tujuan Pengujian	Parameter	Kegunaan
Berat jenis	D 854	Menentukan berat jenis tanah	G_s	Untuk menentukan kepadatan tanah (<i>unit weight</i>)
Penentuan ukuran butiran	D 422 D 1140	Menentukan distribusi ukuran butiran	D_{10}, D_{50} $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}}$	Klasifikasi tanah
Kadar air	D 2216	Menentukan kadar air tanah	w	Informasi kualitatif mengenai kekuatan dan deformasi tanah
Pengujian indeks	D 4318	Menentukan kadar air ketika tanah mengalami perubahan fase	PL, LL, PI, SL, LL	Klasifikasi tanah; informasi kualitatif mengenai kekuatan dan penurunan tanah
Kompaksi	D 698 D 1557	Menentukan berat isi kering maksimum dan kadar air optimum	$(\gamma_d)_{max}, w_{opt}$	Spesifikasi kompaksi dilapangan
Permeabilitas	D 2434	Menentukan konduktivitas hidrolik	k	Memperkirakan aliran air dan kekuatan rembesan; analisis stabilitas
Berat isi kering maksimum dan minimum	D 4253 D 4254	Menentukan berat isi kering maksimum dan minimum tanah berbutir kasar	e_{max} e_{min}	Klasifikasi tanah

Pengujian untuk menentukan sifat mekanik tanah:

1. *Direct shear* (DS) – ASTM D 3080
Jenis tanah: berbutir kasar. Parameter: ϕ'_{csr} , ϕ'_{pr} , dan α_p .
Keuntungan: mudah, cepat, dan mudah ditemukan alatnya. Kerugian: tanah gagal pada bidang kegagalan yang telah ditentukan, distribusi tegangan yang tidak seragam, regangan tidak dapat ditentukan, dan tidak dapat menentukan keadaan tegangan.
2. *Triaxial* (T) – ASTM D 4767, D 2850, D 2166
Jenis tanah: semua jenis. Parameter: ϕ'_{csr} , ϕ'_{pr} , S_{ur} , E_r , dan G .
Keuntungan: mudah dilakukan, alatnya mudah ditemukan, dua tegangan (tegangan *axial* dan *radial*) dapat dikontrol tersendiri, dan drainase eksternal dapat dikontrol. Kerugian: Sumbu utama hanya dapat dirotasi 90° dengan cepat, dan distribusi tegangan yang tidak seragam.
3. Konsolidasi satu dimensi – ASTM D 2435, D 4186, D 5333, D 454
Jenis tanah: berbutir halus. Parameter: C_{cr} , C_{rr} , C_{ω} , C_v , σ'_{zcr} , dan m_v . Keuntungan: mudah dan alatnya mudah ditemukan. Kerugian: satu dimensi.
4. *Direct simple shear* (DSS)
Jenis tanah: semua jenis. Parameter: ϕ'_{csr} , ϕ'_{pr} , S_{ur} , dan G .
Keuntungan: sumbu utama berotasi sewaktu pengujian dan penentuan kondisi lapangan yang sangat mendekati. Kerugian: distribusi tegangan dan regangan yang tidak seragam dan alatnya sulit ditemukan.

G. Laporan Tanah

Laporan penelitian yang jelas, ringkas, dan akurat perlu untuk dipersiapkan. Laporan penelitian itu setidaknya harus terdiri dari:

1. Sebuah berkas (surat) yang mengotorisasi penelitian.
2. Ringkasan dari pekerjaan yang sudah diselesaikan (sekitar satu halaman).
3. Lokasi dimana pekerjaan itu dilakukan.

4. Deskripsi tentang lokasi tersebut.
5. Rincian dari jenis penelitian yang digunakan, tanah dan informasi air tanahnya termasuk hasil penelitian di laboratorium, asumsi yang digunakan, keterbatasan yang diizinkan, serta kemungkinan kesulitan yang mungkin terjadi ketika dilaksanakan pembangunan.
6. Analisis dan perkiraan berdasarkan data yang telah didapat.
7. Rekomendasi untuk perancangan dan pembangunan bangunan di tempat tersebut.

SOAL BAB 8

1. Jelaskan tujuan dari proses penyelidikan tanah.
2. Jelaskan keuntungan dan kerugian dari penyelidikan tanah dengan metode test pit dan pengeboran tanah.
3. Bandingkan antara metode static cone penetrometer dengan standard penetration test.
4. Jelaskan limitasi dari pengujian sondir pada tanah

DAFTAR PUSTAKA

- Arora, K. R. 1992. *Soil Mechanics and Foundation Engineering in S.I. Units*. New Delhi: Standard Publishers Distributors.
- Aysen, A. 2010. *Soil Mechanics: Basic Concepts and Engineering Applications*. Florida: 2010.
- Budhu, Muni. 2010. *Soil Mechanics and Foundations*. New Jersey: Wiley.
- . 2015. *Soil Mechanics Fundamentals*. Chichester: John Wiley & Sons.
- . 2015. *Soil Mechanics Fundamentals: Imperial Version*. Hoboken: Wiley Blackwell.
- Civil, The Construction. n.d. *The Construction Civil*. Accessed April 21, 2019. <http://www.theconstructioncivil.org>.
- Craig, R.F. & Knappett, J.A. 2012. *Craig's Soil Mechanics*. London: Spons Press by Taylor and Francis.
- Das, Braja M., Khaled Sobhan. 2013. *Principles of Geotechnical Engineering*. Stamford: Cengage Learning.
- Das, Braja M., Noor Endah, and Indrasurya B. Mochtar. 1995. *Mekanika Tanah*. Jakarta: Erlangga.
- Geoinvestigate. n.d. *Site Investigation & Geotechnical Surveys*. Accessed April 21, 2019. <http://www.geoinvestigate.co.uk>.
- Government, USGS. n.d. *U.S. Geological Survey*. Accessed April 21, 2019. <https://www.usgs.gov>.
- Hardiyatmo, H.C. 2002. *Mekanika Tanah 1*. Jogjakarta: UGM Press
- Holtz, Robert D., William D. Kovacs. 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Lee, Peter Y., and Richard J. Suedkamp. 1972. Accessed Maret 24, 2019. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1972/381/381-001.pdf>.
- McCarthy, D.F. 2014. *Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics*. 7th ed. Essex: Pearson Education Limited
- Smith, Ian. 1998. *Elements of Soil Mechanics*. New Jersey: Blackwell Science.

- Terzaghi, Karl, Ralph B. 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*.
New York: John Wiley & Sons.
- Zeiler, Mickael. 1999. *Modeling Our World - ESRI Guide to
Geodatabase Design*. Redlands: ESRI Press.