

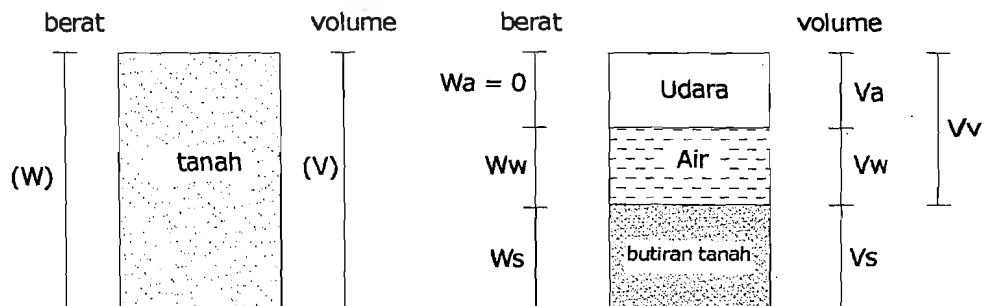
BAB III LANDASAN TEORI

3.1 Tinjauan Umum

Tanah adalah akumulasi partikel mineral yang tidak mempunyai atau lemah ikatan antar partikelnya, yang terbentuk karena pelapukan dari batuan. Diantara partikel-partikel tanah terdapat ruang kosong yang disebut pori-pori (*void space*) yang berisi air dan/atau udara. Ikatan yang lemah antara partikel-partikel tanah disebabkan oleh pengaruh karbonat atau oksida yang tersenyawa di antara partikel-partikel tersebut, atau dapat juga disebabkan oleh adanya material organik. (R.F Craig, 1989).

Tanah juga dapat diartikan sebagai suatu agregat butir-butir mineral dengan bagian-bagian organik dan non organik. Terjadinya lapisan tanah adalah merupakan proses sedimentasi/pengendapan partikel-partikel hasil pelapukan batuan baik secara alamiah, mekanis dan kimiawi. Selain itu tanah merupakan komposisi dari dua atau tiga fase yang berbeda, seperti yang terlihat pada gambar 3.1 yaitu :

1. Tanah yang benar-benar kering, terdiri dari dua fase yang disebut partikel padat dan udara pengisi pori, yang disebut dengan udara pori.
2. Tanah yang jenuh sempurna (*fully saturated*) terdiri dari dua fase yaitu partikel padat dan air pori.
3. Tanah jenuh sebagian terdiri dari tiga fase yaitu partikel padat, udara pori dan air pori.



Gambar 3.1 Diagram Fase Tanah (H.C. Hardiyatmo, 2002)

Keterangan : W_s = berat butiran padat

W_w = berat air

V_s = volume butiran padat

V_w = volume air

V_a = volume udara

V_v = volume pori

Dari ketiga bagian tanah tersebut memberikan beberapa pengertian penting yang menggambarkan sifat-sifat mekanis tanah :

a). Angka Pori atau *Void Ratio* (e)

Yaitu perbandingan antara volume pori (V_v) dengan volume partikel padat (V_s).

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_s} \dots\dots\dots(3.1)$$

Keterangan : e = Angka Pori (% atau desimal)

V_v = Volume Pori (cm^3)

V_s = Volume Partikel Pada (cm^3)

b). Kadar Air atau *Water Content* (w)

Yaitu Perbandingan antara berat air (W_w) dengan berat butiran padat (W_s).

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \dots\dots\dots(3.2)$$

Keterangan : w = Kadar Air (%)

W_w = Berat Air (gram)

W_s = Berat Padat Tanah (gram)

c). Berat Volume Tanah atau *Unit Weight* (γ)

Yaitu perbandingan antara berat tanah dan volume tanah.

$$\gamma = \frac{W_w + W_s}{V} \text{ (gr/ cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(3.3)$$

d). Berat Volume Butiran Padat atau *Unit Weight Of Particles* (γ_s)

Yaitu perbandingan antara berat butiran padat dengan Volume butiran padat.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \text{ (gr/ cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(3.4)$$

e). Berat Volume Air atau *Unit Weight Of Water* (γ_w)

Yaitu perbandingan antara berat air dengan Volume air.

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \text{ (gr/ cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(3.5)$$

f). Berat volume Kering atau *Dry Density* (γ_d)

Yaitu perbandingan berat butiran padat dengan volume total tanah.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \text{ (gr/ cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(3.6)$$

g). Berat Volume Basah (γ_b)

Yaitu Perbandingan antara berat total tanah dengan volume total tanah.

$$\gamma_b = \frac{W_s + W_w + W_a}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} \text{ (gr/ cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(3.7)$$

h). Berat Jenis atau *Specific Gravity* (G_s)

Yaitu Perbandingan antara volume butiran padat (V_s) dengan berat volume air.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} \dots\dots\dots(3.8)$$

Keterangan : G_s - Berat Jenis (% atau desimal)

γ_s - Berat Volume Tanah (cm^3)

γ_w = Berat Volume Air (cm^3)

3.2 Klasifikasi Tanah

Seperti yang kita ketahui bersama bahwa sifat dan jenis tanah di alam ini sangat bervariasi. Hal ini ditentukan oleh perbandingan banyaknya fraksi-fraksi (kerikil, pasir, lanau dan lempung) serta gradasinya. Selain itu hal tersebut juga ditentukan oleh sifat plastisitas butir halus, dan secara umum tanah dapat diklasifikasikan sebagai berikut ini.

- 1). Tanah Kohesif yaitu tanah berbutir halus seperti : lempung dan lanau.
- 2). Tanah Tidak Kohesif yaitu tanah berbutir kasar seperti : pasir dan kerikil.

Kualifikasi tanah berdasarkan diameter butirannya dapat dilihat pada tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Klasifikasi Tanah

Jenis tanah	Batas-batas ukuran
Berangkal (Boulder)	> 8 inci
Kerakal	3 – 8 inci
Kerikil (Gravel)	2 – 3 inci
Pasir Kasar (Course Sand)	0,6 – 2 mm
Pasir sedang (Medium sand)	0,2 – 0,6 mm
Pasir Halus (Fine Sand)	0,06 – 0,2 mm
Lanau (Silt)	0,002 – 0,06 mm
Lempung (Clay)	< 0,002 mm

Sumber : L.D. Wesley (1977)

Braja M. Das (1995), membagi ukuran golongan tanah dari beberapa sistem klasifikasi yang ada, seperti yang terlihat pada tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Batasan-batasan Ukuran Golongan Tanah

Nama Golongan	Ukuran Butiran (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
<i>American Society for Testing Material (ASTM)</i>	75 – 4,75	4,75 – 0,0075	0,075 – 0,005	0,005 – 0,001
<i>Massachusetts Institute of Technologi (MIT)</i>	2	2 – 0,006	0,006 – 0,002	< 0,002
<i>US Departement of Agriculture (USDA)</i>	2	2 – 0,005	0,005 – 0,002	< 0,002
<i>American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)</i>	76,2 – 2	2 – 0,075	0,075 – 0,002	< 0,002
<i>Unified Soils Classification System (USCS)</i>	76,2 - 475	4,75 – 0,075	Halus (Lanau dan Lempung) < 0,0075	

Klasifikasi tanah menurut Atterberg didasarkan atas Indeks Plastisitas (IP) tanah. Indeks Plastisitas (IP) merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis. Jika tanah mempunyai Indeks Plastisitas tinggi, maka tanah

mengandung banyak butiran lempung. Jika Indeks Plastisitas rendah, maka tanah seperti lanau dengan sedikit pengurangan kadar air berakibat tanah menjadi kering. Batasan mengenai Indeks Plastisitas, sifat, macam tanah dan kohesi menurut Atterberg adalah sebagai berikut ini.

Tabel 3.3 Sistem klasifikasi sifat, macam tanah dan kohesi menurut Atterberg

IP	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Non plastis	Pasir	Non kohesif
< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7 – 17	Plastisitas sedang	Lanau berlempung	Kohesif
> 17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

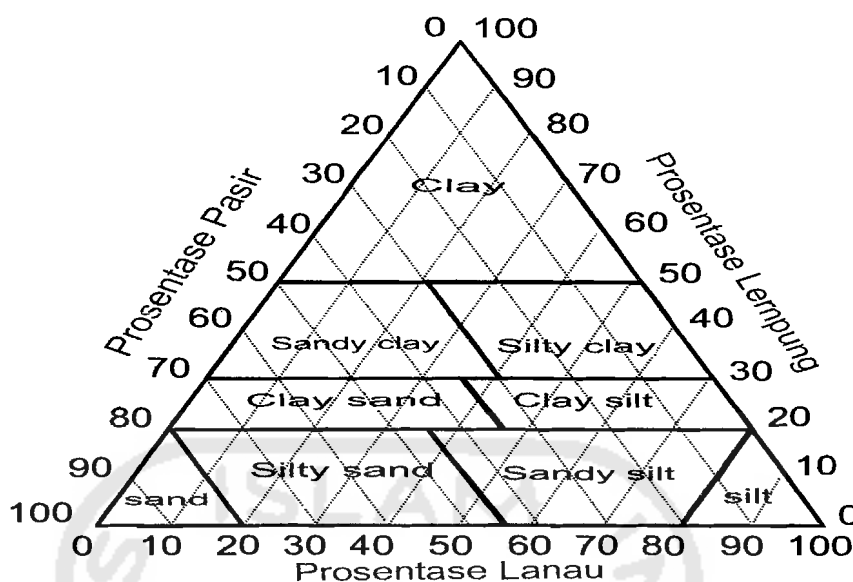
(Sumber : Mekanika tanah, H.C Hardiyatmo, 1992)

Sistem klasifikasi yang sering digunakan dalam rekayasa sipil adalah sistem klasifikasi USCS (*Unified Soils Classification System*), sistem klasifikasi AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) dan sistem klasifikasi *Unified*.

3.2.1 Sistem Klasifikasi USCS

Menurut sistem ini, tanah (*soils*) terdiri dari berbagai ukuran partikel pasir, lanau dan lempung. Klasifikasi tanah dilakukan untuk membedakan klasifikasi teksturnya berdasarkan persentase distribusi ukuran partikelnya. Sistem klasifikasi USCS, menentukan bahwa *pasir* adalah partikel dengan diameter antara 2 - 0,05 mm, *lanau* adalah partikel dengan diameter antara 0,05 – 0,002 mm, dan *lempung* adalah partikel dengan diameter < 0,002 mm.

Gambar 3.2 berikut ini adalah gambar Grafik Segitiga Klasifikasi Tekstur yang digunakan untuk menentukan klasifikasi tekstur tanah yang tepat.



Gambar 3.2 Klasifikasi tanah sistem USCS

3.2.2 Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem AASHTO mengklasifikasikan tanah sebagai bahan *subgrade* untuk konstruksi jalan. Sistem ini membagi tanah menjadi tujuh kelompok dengan simbol A-1 sampai A-7. Untuk jenis tanah A-1 sampai A-3 adalah tanah berbutir (*granular*) dengan tidak lebih 35% bahan melalui saringan no. 200, sedangkan tanah yang lebih dari 35% lolos saringan no. 200 diklasifikasikan kedalam A-4 sampai A-7. seperti yang terlihat pada tabel 3.4. Untuk lebih memperinci sifat tanah, bagi bahan yang mengandung tanah butir halus, pada simbol (sub) kelompok ditambah pengenal yang disebut Indeks Kelompok. Makin besar indeks kelompok, tanahnya makin jelek. Indeks kelompok dihitung dengan persamaan :

$$GI = (F - 35) [0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F - 15)(PI - 10) \dots\dots\dots(3.9)$$

dengan :

GI = Indeks kelompok

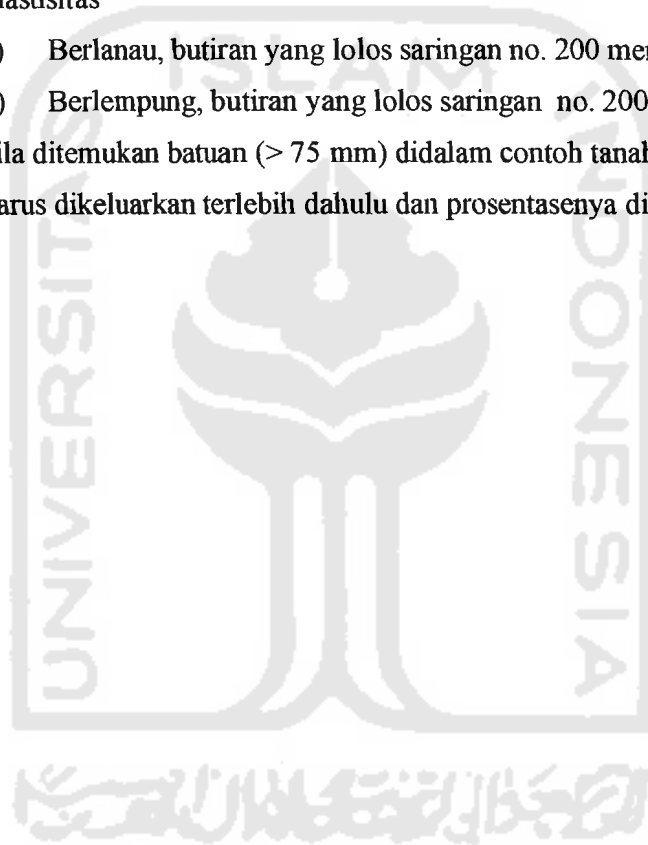
F = Persentase butir yang lolos ayakan No. 200

LL = Batas cair

PI = Indeks plastisitas

Parameter yang digunakan untuk mengklasifikasi tanah pada sistem ini.

1. Analisis ukuran Butir
 - a) Kerikil, butiran tanah yang lolos saringan diameter 75 mm dan tertahan saringan no.10 (2 mm).
 - b) Pasir, butiran tanah yang lolos saringan no. 10 (2 mm) dan tertahan saringan no. 200 (0,074 mm).
 - c) Lanau dan lempung, butiran tanah yang lolos saringan no. 200
2. Plastisitas
 - a) Berlanau, butiran yang lolos saringan no. 200 mempunyai $PI \leq 10$
 - b) Berlempung, butiran yang lolos saringan no. 200 mempunyai $PI \geq 11$
3. Bila ditemukan batuan (> 75 mm) didalam contoh tanah, maka batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu dan prosentasenya dicatat.



Tabel 3.4 Sistem Klasifikasi Tanah AASHTO

Klasifikasi Umum	material granuler (< 35% lolos saringan no. 200)							Bahan-bahan Lanau-Lempung (> 35% lolos saringan no. 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Klasifikasi kelompok	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Analisis Saringan (% lolos)											
2,00 mm (no.10)	50 maks	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,425 mm (no. 40)	30 maks	50 maks	51 maks	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075 mm (no. 200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	36 min	36 min
Sifat fraksi lolos saringan no. 40											
Batas cair (LL)	-	-	-	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks Plastis (PI)	6 maks	N.P	N.P	10 maks	10 maks	10 maks	11 min	10 maks	10 maks	10 maks	11 min
Indeks kelompok (G)	0	0	0	0	0	4 maks	4 maks	8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe material yang pokok pada umumnya	Pecahan batu, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik							Sedang sampai buruk			

Sumber : Bowles, J.E, 1986

Catatan :

Kelompok A-7 dibagi atas A-7-5 dan A-7-6 bergantung pada batas plastisnya (PL)

Untuk PL > 30, Klasifikasinya A-7-5

Untuk PL < 30, Klasifikasinya A-7-6

N.P = Non Plastis

3.2.3 Sistem Klasifikasi Unified

Sistem *Unified* pada mulanya diperkenalkan oleh Cassagrande pada tahun 1942. Untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang pada Perang Dunia II. Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu :

1. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained-soil*), Yaitu tanah kerikil dan pasir dimana kurang dari 50% berat total tanah lolos ayakan no. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G atau S. G adalah untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil, dan S adalah untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir.
2. Tanah berbutir halus (*fine-grained-soil*), yaitu tanah dimana lebih dari 50% berat total tanah lolos ayakan no. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau organik dan lempung organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), *muck*, dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.

Simbol-simbol lain yang digunakan adalah :

W = *well graded* (tanah dengan gradasi baik)

P = *poorly graded* (tanah dengan gradasi buruk)

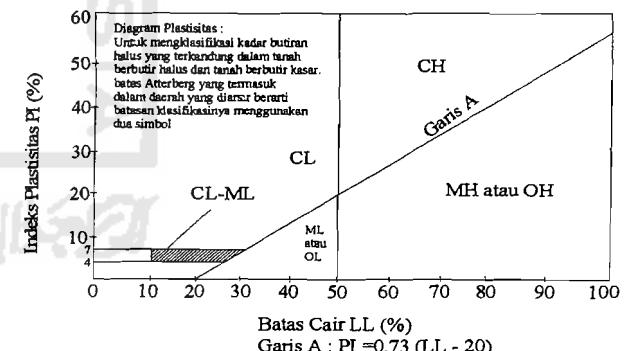
L = *low plasticity* (plastisitas rendah) ($LL < 50$)

H = *high plasticity* (plastisitas tinggi) ($LL > 50$)

Tanah berbutir kasar ditandai dengan simbol kelompok seperti : GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM, dan SC. Sedangkan untuk tanah berbutir halus dengan simbol ML, CL, OL, MH, CH, dan OH didapat dengan cara menggambar batas cair dan indeks plastisitas tanah yang bersangkutan pada bagan plastisitas seperti yang terlihat pada **tabel 3.5**. garis diagonal pada bagan plastisitas dinamakan garis *A* , dan garis ini diberikan dalam persamaan :

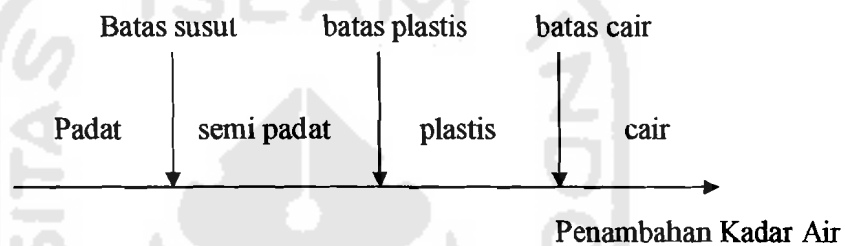
$$PI = 0,73 (LL - 20)$$

Tabel 3.5 Sistem Klasifikasi Tanah Unified

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis		Nama jenis		
tanah berbutir kasar 50% butiran tertahan saringan no. 200 (0,075 mm)	pasir lebih dari 50% fraksi kerikil 50% atau lebih dari kasar lolos saringan no. 4 (fraksi kasar tertahan saringan no. 4 (4,75 mm))	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil Gradasi baik dan campuran pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	Klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus, kurang dari 5% lolos saringan no. 200 : GW, GP, SW, SP, lebih dari 12% lolos saringan no. 200 : GM, GC, SM, SC, 5%-12% lolos saringan no. 200. batasan klasifikasi yang mempunyai simbol dobel	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4, C_c = \frac{(D_{20})^2}{D_{20} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3	
			GP	Kerikil Gradasi buruk dan campuran pasir kerikil, atau tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW	
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung		Batas-batas Atterberg dibawah garis A atau $PI < 4$	bila batas Atterberg berada didaerah arsir dari diagram
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung		batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	plastisitas, maka dipakai dobel simbol
	pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	SW	Pasir Gradasi baik, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6, C_c = \frac{(D_{20})^2}{D_{20} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3	
			SP	Pasir Gradasi buruk, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW	
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	SM	pasir berlanau, campuran pasir lanau		Batas-batas Atterberg dibawah garis A atau $PI < 4$	bila batas Atterberg berada didaerah arsir dari diagram
			SC	pasir berlempung, campuran pasir-lempung		batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	plastisitas, maka dipakai dobel simbol
			ML	lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung		 <p>Diagram Plastisitas : Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. batas Atterberg yang termasuk dalam daerah yang arsir berada batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol</p>	
			CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ("lean clays")			
OL	lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah						
MH	lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elasis.						
CH	lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ("fatclays")						
OH	lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi						
Tanah dengan kadar organik tinggi		Pt	Gambut ("peat") dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488			

3.3 Batas-Batas Konsistensi Tanah

Seorang ilmuwan dari Swedia bernama Atterberg mengembangkan suatu metode untuk menjelaskan sifat konsistensi berbutir halus pada kadar air yang bervariasi. Oleh karena itu batas-batas konsistensi tanah sering juga disebut dengan batas-batas Atterberg. Ilmuwan tersebut menjelaskan bilamana kadar airnya tinggi, campuran tanah dan air menjadi sangat lembek seperti cairan. Atas dasar air yang dikandung tanah, tanah dapat dipisahkan dalam empat keadaan yaitu padat, semi padat, plastis dan cair seperti pada gambar 3.3 berikut ini :



Gambar 3.3 Batas-batas Atterberg (H.C Hardiyatmo 2002)

Atterberg membagi batas-batas konsistensi tanah terdiri atas tiga keadaan yaitu :

1. Batas Cair atau *Liquid Limit* (LL)

Merupakan kadar air pada kondisi dimana tanah mulai berubah dari plastis menjadi cair atau sebaliknya dari cair menjadi plastis.

2. Batas Plastis atau *Plastic Limit* (PL)

Merupakan kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung.

$$PL = \left(\frac{W_p - W_k}{W_k} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (3.10)$$

PL = Batas plastis tanah

W_p = Berat tanah basah kondisi plastis

W_k = Berat tanah kering

3. Batas Susut atau *Shrinkage Limit* (SL)

Merupakan kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah. Batas susut dinyatakan dalam persamaan :

$$SL = \left(\frac{V_0 - 1}{W_0 - G_s} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (3.11)$$

Keterangan : SL = batas susut tanah

V_0 = volume benda uji kering

W_0 = berat benda uji kering

G_s = Berat jenis tanah

4. Indeks Plastisitas atau *plasticity index* (PI)

Merupakan selisih antara batas cair dan batas plastis tanah. Indeks plastisitas didapat berdasarkan rumus :

$$PI = LL - PL \dots\dots\dots (3.12)$$

Keterangan : PI = Indeks plastisitas

LL = Batas Cair

PL = Batas plastis

3.4 Tanah Lempung

Tanah lempung adalah tanah yang terdiri dari butir-butir yang sangat kecil dan menunjukkan sifat plastisitas dan kohesi. Kohesi menunjukkan kenyataan bahwa bagian-bagian itu melekat satu sama lainnya, Sedangkan plastisitas adalah sifat yang memungkinkan bentuk bahan itu dirubah-rubah tanpa perubahan isi atau tanpa kembali ke bentuk aslinya, dan tanpa terjadi retakan-retakan atau terpecah-pecah (L.D. Wesley, 1977).

Dalam keadaan kering tanah lempung sangat keras dan permeabilitasnya sangat rendah, pada kadar air yang lebih tinggi (basah) lempung tersebut bersifat lengket. Akibat dari perubahan kadar air tersebut, konsistensi dan volume tanah berubah mengembang bila kadar airnya naik dan menyusut bila kadar airnya

berkurang. Dengan kata lain lempung bersifat memiliki kembang susut akibat basah dan kering.

3.4.1 Mineral Tanah Lempung

Mineral lempung adalah susunan kelompok partikel yang terjadi karena pelapukan tanah akibat reaksi kimia, yang berukuran koloid dengan diameter ukuran butiran lebih kecil dari 0,002 mm (H.C. Hardiyatmo 1992). Sebagian besar mineral lempung mempunyai struktur berlapis yang berikatan satu sama lain berbentuk lembaran yang bentuk dasarnya berupa *tetrahedral silica oksigen* dan *oktahedral aluminat hidrat*. Berikut adalah beberapa jenis mineral lempung yang banyak dijumpai :

1. *Kaolinite*

Struktur mineral ini terdiri dari lapisan *tetrahedral silica* yang berganti-ganti dengan puncak yang tertanam di dalam satuan *oktahedral alumina (gibsit)*, yang disebut satuan dasar 1 : 1. Lempung *kaolinit* banyak dipakai untuk barang-barang tembikar dan keramik. Karena tidak mengandung besi didalamnya, sehingga tidak ada perubahan warna apabila dibakar pada panas yang tinggi. Mineral ini biasanya terdapat di daerah-daerah dengan curah hujan tinggi aktivitas kurang aktif.

2. *Illite*

Merupakan istilah umum untuk kelompok lempung yang pertama kalinya dijumpai di Illinois, USA. Mineral ini terdiri atas lapisan *gibsit oktahedral* yang terletak diantara 2 lapisan *silika tetrahedral* dan menghasilkan mineral 1 : 2 dimana beberapa posisi *silika* akan terisi oleh atom Aluminium. Jenis lempung ini biasa dijumpai pada daerah dengan curah hujan sedang dan beraktivitas sedang.

3. *Montmorillonite*

Montmorillonite adalah nama yang diberikan untuk lempung di Montmorillon, Perancis, 1847. mineral ini terdiri atas lapisan *gibsit oktahedral* yang terletak diantara 2 lapisan *silika tetrahedral*, dengan satuan 1 : 2. lempung jenis ini banyak terdapat pada daerah kering dan aktivitasnya paling aktif.

3.5 Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah dasar bertujuan untuk mengubah struktur tanah atau sifat tanah sehingga dapat memenuhi persyaratan dalam meningkatkan daya dukung tanah. Apabila suatu tanah yang terdapat dilapangan bersifat sangat lepas, sifat merembes tinggi, daya dukung sangat rendah atau sifat lain yang tidak diinginkan maka tanah tersebut harus distabilisasi. Stabilisasi tanah dapat dilakukan dengan salah satu cara berikut (Bowless,JE,1986) :

- 1). Menambah kerapatan tanah,
- 2). Menambah material yang tidak aktif sehingga mempertinggi kohesi dan atau tahanan geser yang timbul,
- 3). Menambah material untuk menyebabkan perubahan-perubahan kimiawi dan fisis dari material tanah.
- 4). Menurunkan muka air tanah.
- 5). Mengganti tanah-tanah yang buruk.

Dilapangan akan banyak dijumpai jenis tanah lempung yang mengembang (ekspansif). Pengembangan lempung ini terjadi ketika kadar air bertambah dari nilai referensinya. Penyusutan terjadi ketika kadar air berada dibawah nilai referensinya sampai kepada batas susut. Biasanya suatu tanah lempung dapat diperkirakan akan mempunyai perubahan volume yang besar (mengembang) apabila indeks plastis $I_p \geq 20$. Terdapat beberapa prosedur untuk menstabilkan (mengurangi perubahan volume) pada tanah jenis ini.

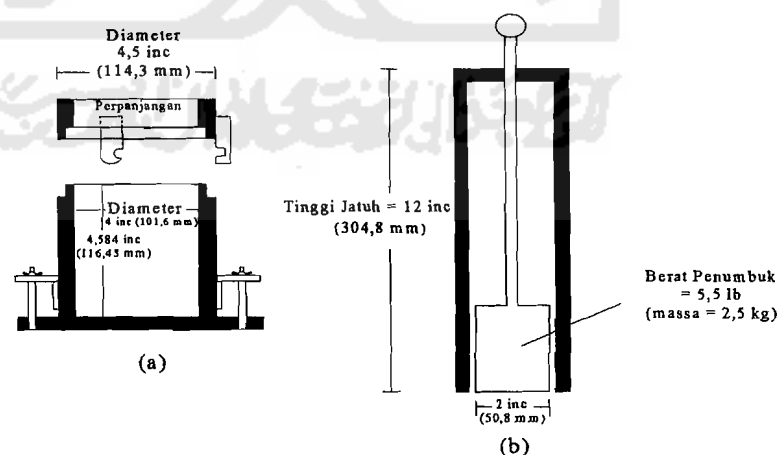
1. Tanah bahan pencampur seperti gamping yang terhidrasi (mati). Biasanya 2 sampai 4 % akan mengurangi I_p sampai kurang dari 20.
2. Padatkan tanah pada keadaan yang lebih basah dari optimum (3 sampai 4 persen). Ini menjamin terdapatnya struktur lempung yang cukup terpencair, dan pada saat yang sama menghasilkan kerapatan kering yang rendah.
3. Mengontrol perubahan kadar air dari nilai referensinya (w pada saat lempung itu akhirnya dipergunakan sebagai pendukung pondasi).

3.6 Pengujian Proktor Standar

Pemadatan yaitu proses naiknya kerapatan tanah dengan memperkecil jarak antara partikel sehingga terjadi pengurangan volume udara, yang bertujuan untuk memperbaiki karakteristik tanah seperti γ , e , c , ϕ dan sebagainya sehingga memberikan stabilitas pada struktur. Beberapa keuntungan yang didapat dari adanya pemadatan yaitu sebagai berikut :

- 1). Berkurangnya penurunan permukaan tanah yaitu gerakan vertikal di dalam masa tanah itu sendiri akibat berkurangnya angka pori.
- 2). Bertambahnya kekuatan tanah
- 3). Berkurangnya penyusutan dan volume akibat berkurangnya kadar air.

Pada akhir tahun 1920-an R.R Proctor mengembangkan spesifikasi pengendalian untuk pemadatan tanah jenis kohesif, yang pada prosedur dinamik yang standar dilaboratorium yang sering disebut uji Proktor Standar. Dilapangan, usaha pemadatan ini dihubungkan dengan jumlah gilasan dari mesin gilang, jumlah jatuhan dari benda yang dijatuhkan dan sebagainya. Sedangkan dilaboratorium usaha pemadatan dilakukan melalui alat penumbuk (*Rammer*). Selama pemadatan tumbukan, suatu palu dengan berat 24,5 N/ 5,5 lbs (ASTM D698) dijatuhkan dari ketinggian 305 mm (12 inc) sebanyak 25 kali tiap lapis pada 3 jumlah lapisan tanah yang telah lolos saringan no. 4 didalam suatu cetakan (*mold*) yang berdiameter 10,3 cm dan tinggi 12 cm untuk menghasilkan suatu contoh tanah dengan volume tertentu. seperti yang terlihat pada gambar 3.4 dibawah ini :



Gambar 3.4 Alat uji Proktor Standar : (a) cetakan, (b) penumbuk

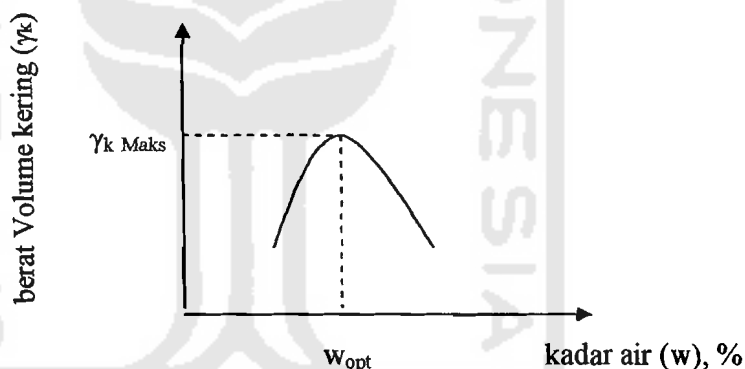
Pengujian ini bertujuan untuk mencari kadar air dan berat volume dan mencari hubungan antara keduanya. Apabila diketahui berat tanah basah didalam cetakan yang volumenya diketahui, maka berat volume tanah basah dapat langsung dihitung berdasarkan persamaan :

$$\gamma_b = \frac{W}{V} \dots\dots\dots(3.13)$$

Keterangan : γ_b = berat volume tanah basah
 W = berat tanah basah dalam cetakan
 V = volume cetakan

Sedangkan hubungan berat volume kering (γ_k) dengan berat volume basah (γ_b) dan kadar air (w), dinyatakan dalam persamaan :

$$\gamma_k = \frac{\gamma_b}{1 + w} \dots\dots\dots(3.14)$$



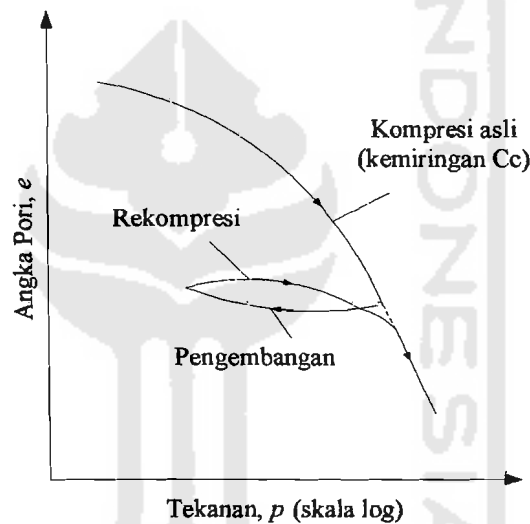
Gambar 3.5 Kurva hubungan kadar air dan berat volume kering
 (HC, Hardiyatmo, 1992)

Dari kurva diatas dapat dilihat nilai kadar air yang terbaik untuk mencapai berat volume kering terbesar atau kepadatan maksimum kadar air pada keadaan ini disebut kadar air optimum (*Optimum Moisture Content, OMC*)

3.7 Pengujian Konsolidasi

Konsolidasi adalah proses berkurangnya volume atau berkurangnya rongga pori dari tanah jenuh berpermeabilitas rendah akibat pembebanan, dimana prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terperasnya air pori keluar dari rongga tanah. (H.C. Hardiyatmo, 2002).

Dalam konsolidasi ada dua istilah yang dikenal, *overconsolidasi* yaitu suatu keadaan tanah yang pernah menerima pembebanan yang lebih besar daripada pembebanan yang ada sekarang. Sedangkan istilah yang kedua *normally consolidasi* yaitu tanah yang tidak atau belum pernah menerima beban yang lebih besar dari pembebanan sekarang.

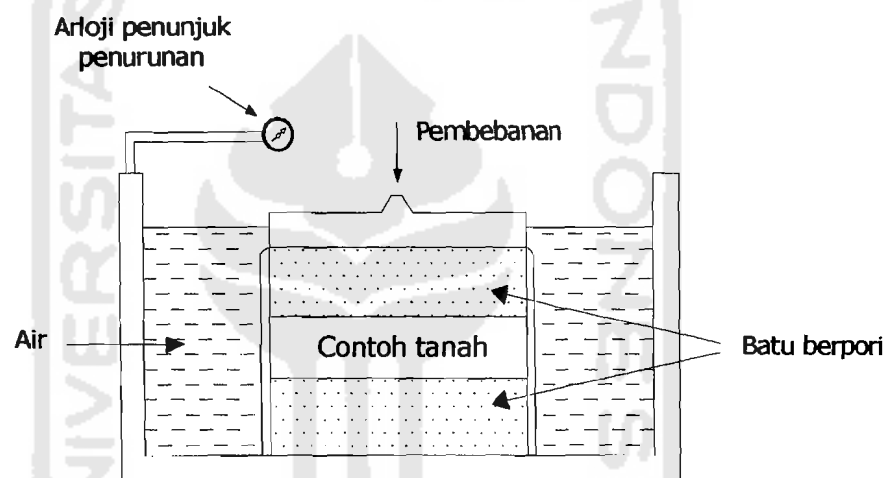


Gambar 3.6 Hubungan angka pori dan tekanan (R.F. Craig, 1989)

Dari gambar diatas *normally consolidasi* ditunjukkan oleh garis linear (atau hampir linear) dan disebut garis kompresi asli (*virgin compression line*). Sedangkan *overconsolidasi* ditunjukkan oleh garis rekompresi atau pengembangan, kurva rekompresi akhirnya bergabung lagi dengan garis kompresi asli.

Pengujian konsolidasi dilakukan di laboratorium dengan alat *konsolidometer* atau *oedometer*. Contoh tanah yang mewakili elemen tanah yang mudah mampat pada lapisan tanah yang diselidiki, dimasukkan kedalam cincin

besi. Bagian atas dan bawah benda uji dibatasi oleh batu tembus air (*porous stone*). Beban P diterapkan diatas benda uji, dan penurunan diukur dengan arloji pembacaan (*dial gauge*). Beban diterapkan dalam periode 24 jam, dengan benda uji selalu terendam air. Seperti yang terlihat pada gambar 3.6 Penambahan beban adalah dua kali beban sebelumnya, dengan urutan besar beban : 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 8; 16 kg/cm^2 . Akan tetapi beban maksimal yang digunakan bergantung pada berapa besarnya beban yang diantisipasi dilapangan. Untuk tiap penambahan beban selama pengujian, tegangan yang terjadi adalah berupa tegangan efektif. Pada saat pengujian selesai, berat kering tanah ditentukan dan hasil pengujian diplot pada grafik semi logaritmis, yaitu grafik antara waktu dan penurunan.



Gambar 3.7 Alat Konsolidometer (B.M Das, 1988)

Setelah mendapatkan grafik antara waktu dan penurunan untuk besar pembebanan yang berbeda-beda dari percobaan dilaboratorium, selanjutnya penting bagi kita untuk mempelajari perubahan angka pori terhadap tekanan. Urutan pelaksanaannya sebagai berikut :

1. Hitung tinggi butiran padat, H_s pada contoh tanah (Gambar 3.8)

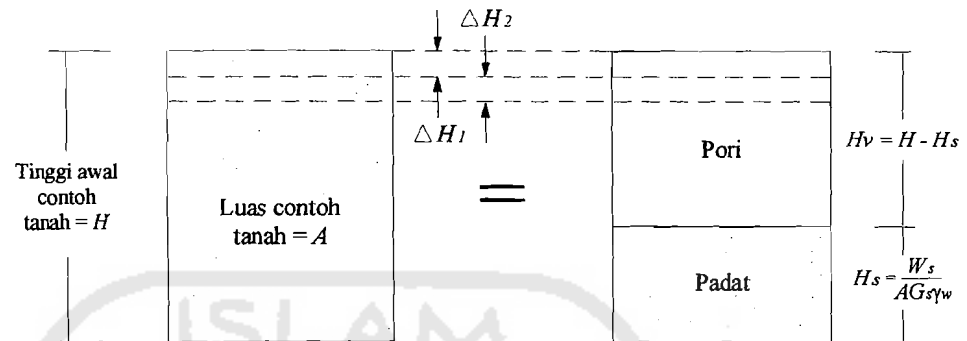
$$H_s = \frac{W_s}{AG_s \gamma_w} \dots \dots \dots (3.15)$$

Dimana : W_s = berat kering contoh tanah

A = luas penampang contoh tanah

G_s = berat spesifik contoh tanah

γ_w = berat volume air



Gambar 3.8 perubahan tinggi contoh tanah pada uji konsolidasi satu dimensi.

2. Hitung tinggi awal dari ruang pori, H_v

$$H_v = H - H_s \dots\dots\dots(3.16)$$

Dimana H = tinggi awal contoh tanah

3. Hitung angka pori awal, e_o , dari contoh tanah :

$$e_o = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v.A}{H_s.A} = \frac{H_v}{H_s} \dots\dots\dots(3.17)$$

4. Untuk penambahan beban pertama p_1 (beban total/luas penampang contoh tanah), yang menyebabkan penurunan ΔH_1 , hitung perubahan angka pori:

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s} \dots\dots\dots(3.18)$$

ΔH_1 didapatkan dari pembacaan awal dan akhir pada skala ukur untuk beban sebesar p_1

5. Hitung angka pori yang baru, e_1 setelah konsolidasi yang disebabkan oleh penambahan tekanan p_1 :

$$e_1 = e_o - \Delta e_1 \dots\dots\dots(3.19)$$

Untuk beban berikutnya, yaitu p_2 (*catatan* : p_2 sama dengan beban kumulatif persatuan luas contoh tanah), yang menyebabkan penambahan pemampatan sebesar ΔH_2 , angka pori e_2 pada saat akhir konsolidasi dapat dihitung sebagai berikut :

$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s} \dots \dots \dots (3.20)$$

Dengan melakukan cara yang sama, angka pori pada saat akhir konsolidasi untuk semua penambahan beban dapat diperoleh. Tekanan total (p) dan angka pori yang bersangkutan (e) pada akhir konsolidasi digambar pada kertas semi logaritma. Bentuk umum dari grafik e versus $\log p$ adalah seperti ditunjukkan dalam gambar 3.9. Dan setelah itu indeks pemampatan didapat.

Indeks pemampatan atau kompresi (C_c) adalah kemiringan dari bagian lurus grafik $e-\log p$, untuk dua titik yang terletak pada bagian lurus dari grafik dalam gambar 3.9 nilai C_c dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 - \log p_1} = \frac{\Delta e}{\log \left(\frac{p_2}{p_1} \right)} \dots \dots \dots (3.21)$$

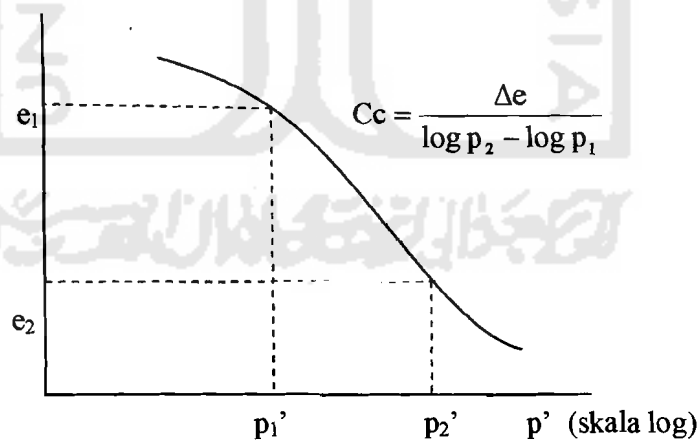
Keterangan : C_c = indeks pemampatan

e_1 = angka pori awal

e_2 = angka pori kedua

p_1 = tegangan efektif pada angka pori awal

p_2 = tegangan efektif pada angka pori kedua



Gambar 3.9 Indeks Pemampatan C_c (H.C. Hardiyatmo , 1994)

Kecepatan penurunan konsolidasi dapat dihitung dengan menggunakan koefisien konsolidasi (C_v). Kecepatan penurunan perlu diperhitungkan bila penurunan konsolidasi yang terjadi pada struktur diperkirakan besar. Bila penurunan sangat kecil, kecepatan penurunan tidak begitu penting diperhatikan.

Untuk suatu penambahan beban yang diberikan pada suatu contoh tanah, ada dua metode grafis yang umum dipakai untuk menentukan koefisien konsolidasi (C_v) dari uji konsolidasi satu dimensi di laboratorium. Metode pertama dinamakan metode logaritma waktu (*logarithm of time method*), yang diperkenalkan oleh Cassagrande dan Fadum (1940). Metode kedua dinamakan metode akar waktu (*square root of time method*), yang diperkenalkan oleh Taylor (1942).

Prosedur umum untuk mendapatkan harga C_v dengan metode akar waktu pada gambar 3.10 adalah sebagai berikut ini.

- Gambarkan grafik hubungan penurunan vs akar waktu dari data hasil uji konsolidasi pada beban tertentu yang diterapkan.
- Titik $U = 0\%$ diperoleh dengan memperpanjang garis dari bagian awal kurva yang lurus sehingga memotong ordinat di titik P dan memotong absis di titik Q . Anggapan kurva awal berupa garis lurus adalah konsisten dengan anggapan bahwa kurva awal berbentuk parabola
- Garis lurus PR di gambar dengan absis OR sama dengan 1,15 kali absis OQ . Perpotongan dari PR dan kurva merupakan titik R_{90} pada absis. Dari sini diperoleh $\sqrt{t_{90}}$.
- T_v untuk derajat konsolidasi $U = 90\%$ adalah 0,848. pada keadaan ini koefisien konsolidasi C_v dinyatakan oleh persamaan :

$$C_v = \frac{0,848 \cdot d^2}{t_{90}}$$

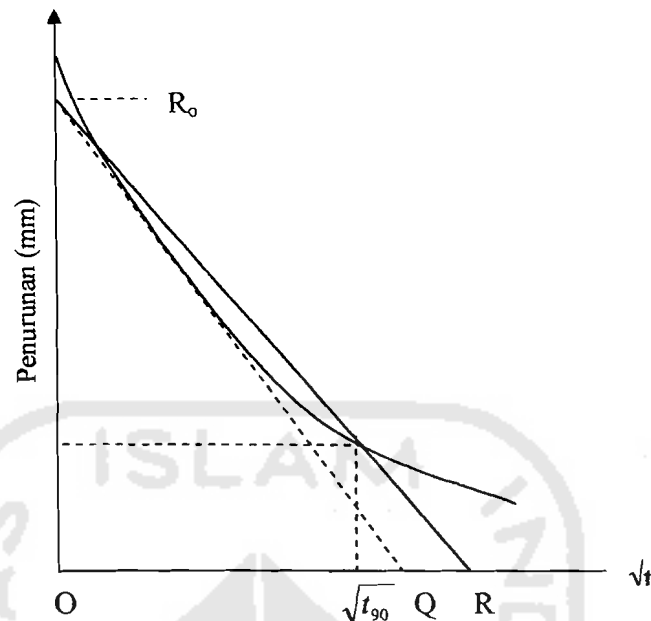
Dengan :

C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal

T_{90} = waktu untuk tercapainya konsolidasi 90 %

d = H untuk aliran satu arah

= $\frac{1}{2}$ H untuk aliran dua arah



Gambar 3.10 Metode Akar Waktu (Taylor, 1948)

3.8 Penurunan

Jika lapisan tanah dibebani, maka tanah akan mengalami regangan atau penurunan (*settlement*). Sebagian besar penurunan diakibatkan oleh pengurangan angka pori. Hampir semua jenis tanah akan berkurang angka porinya (e), bila beban vertikal bertambah dan akan bertambah angka porinya bila bebannya dikurangi. Tambahan tegangan di dalam tanah akibat beban fondasi bangunan akan selalu diikuti oleh regangan yang menghasilkan penurunan pada struktur.

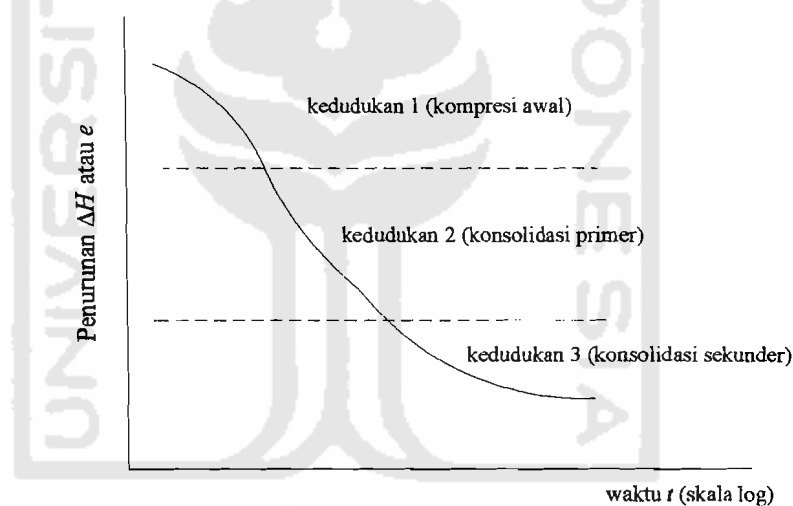
Ada beberapa sebab terjadinya penurunan akibat pembebanan yang bekerja di atas tanah :

1. Kegagalan atau keruntuhan geser akibat terlampauinya kapasitas dukung tanah.
2. Kerusakan atau terjadi defleksi yang besar pada fondasi.
3. Distorsi geser (*shear distortion*) dari tanah pendukungnya.
4. Turunnya tanah akibat perubahan angka pori.

Secara umum menurut Braja M. Das, 1988, penurunan (*settlement*) pada tanah disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam dua kelompok besar, yaitu

1. Penurunan segera (*immedite settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Penurunan segera banyak diperhatikan pada fondasi bangunan yang terletak pada tanah granuler atau tanah berbutir kasar
2. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah. Penurunan konsolidasi terbagi atas penurunan konsolidasi primer dan konsolidasi sekunder

Penurunan konsolidasi terjadi pada tanah berbutir halus yang terletak dibawah muka air tanah. Penurunan yang terjadi memerlukan waktu yang lamanya tergantung pada kondisi lapisan tanahnya. Seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 3.11 sifat khusus grafik hubungan ΔH atau e terhadap $\log t$
(H.C. Hardiyatmo, 2003)

Dari gambar diatas dapat dilihat penurunan konsolidasi terbagi dari tiga kedudukan atau tiga fase yaitu :

- a.) Fase awal, yaitu fase dimana penurunan terjadi dengan segera sesudah beban bekerja. Penurunan disini terjadi akibat proses penekanan udara keluar dari dalam pori tanahnya.

- b.) Fase konsolidasi primer atau konsolidasi hidrodinamis, yaitu penurunan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran air yang meninggalkan tanahnya akibat adanya tekanan.
- c.) Fase konsolidasi sekunder, merupakan proses lanjutan dari konsolidasi primer dimana prosesnya berjalan sangat lambat. Penurunannya jarang diperhitungkan karena pengaruhnya biasanya sangat kecil.

Untuk perhitungan penurunan konsolidasi primer ditinjau dari lapisan tanah lempung jenuh dengan dengan tebal H . Akibat adanya beban yang bekerja, lapisan tanah menerima tambahan tegangan sebesar Δp . Dianggap regangan arah lateral adalah nol. Pada akhir konsolidasi, terdapat tambahan tegangan efektif vertikal sebesar (Δp) . Sebagai akibat penambahan tegangan dari p_o' ke p_i' (dengan $p_i' = p_o' + \Delta p$) terjadi pengurangan angka pori dari e_o ke e_1 . pengurangan volume persatuan volume lempung dinyatakan oleh persamaan angka pori sebagai berikut :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H}{H} = \frac{e_o - e_1}{1 + e_o} = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \dots \dots \dots (3.22)$$

Dengan : V = volume awal

H = tebal lapisan tanah awal

ΔV = perubahan volume

ΔH = perubahan tebal

e_o = angka pori awal

e_1 = angka pori pada perubahan volume tertentu

Δe = perubahan angka pori

Karena regangan lateral nol, pengurangan volume per volume satuan sama dengan pengurangan tebal persatuan tebalnya, yaitu penurunan persatuan ketinggian atau panjangnya. besarnya penurunan lapisan tanah setebal H dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$S_c = \frac{e_o - e_1}{1 + e_o} H = \frac{\Delta e}{1 + e_o} H \dots \dots \dots (3.23)$$

Dengan S_c = penurunan konsolidasi primer total atau ultimit

Untuk lempung tertentu, penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan-persamaan berikut ini. Bila didefinisikan : $p_1' = p_o' + \Delta p$

- a. penurunan untuk lempung *normally consolidated* ($p_c' = p_o'$) dengan tegangan efektif sebesar p_1' ,

$$S_c = C_c \frac{H}{1 + e_o} \log \frac{p_1'}{p_o'} \dots\dots\dots(3.24)$$

- b. untuk lempung *overconsolidated* ($p_c' > p_o'$) penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan yang bergantung nilai p_1' :

1. Bila, $p_1' < p_c'$

$$S_c = C_r \frac{H}{1 + e_o} \log \frac{p_1'}{p_o'} \dots\dots\dots(3.25)$$

2. Bila, $p_1' > p_c'$

$$S_c = C_r \frac{H}{1 + e_o} \log \frac{p_c'}{p_o'} + C_c \frac{H}{1 + e_o} \log \frac{p_1'}{p_c'} \dots\dots\dots(3.26)$$

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log p} \text{ pada kurva penambahan beban atau pada } p' > p_c'$$

$$C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log p} \text{ pada kurva pelepasan beban atau pada } p' < p_c'$$

Dengan : C_r = indeks pemampatan kembali

C_c = indeks pemampatan

H = tebal lapisan tanah

p_c' = tekanan prakonsolidasi

e_o = angka pori awal

Δp = tambahan tegangan akibat beban fondasi

p_o' = tekanan *overburden* efektif mula-mula sebelum dibebani