

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan umum Tanah

Tanah definisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersedimentasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut (Das,1985). Tanah adalah kumpulan-kumpulan dari bagian-bagian yang padat dan tidak terikat antara satu dengan yang lain (diantaranya mungkin material organik) rongga-rongga diantara material tersebut berisi udara dan air (Verhoef,1994).

Dalam pandangan Teknik Sipil tanah merupakan himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relative lepas (*loose*), yang terletak di atas batu dasar (*bedrock*). Ikatan butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida-oksida yang mengendap diantara partikel-partikel. Ruang-ruang diantara partikel dapat berisi air, udara, ataupun keduanya (Hardiyatmo. 1996). Ikatan yang lemah antara partikel-partikel tanah disebabkan oleh karbonat dan oksida yang tersenyawa diantara partikel-partikel tersebut, atau dapat juga disebabkan oleh adanya material organik. Bila hasil dari pelapukan tersebut berada pada tempat semula maka bagian ini disebut sebagai tanah sisa (*residu soil*). Hasil pelapukan terangkut ke tempat lain dan mengendap di beberapa tempat yang berlainan disebut tanah bawaan (*transportation soil*).

Kebanyakan jenis tanah terdiri dari banyak campuran atau lebih dari satu macam partikel (Hardiyatmo, 2002). Tanah lempung belum tentu terdiri dari partikel lempung saja akan tetapi dapat bercampur dengan butiran ukuran lanau maupun pasir dan mungkin juga terdapat campuran bahan organik. Ukuran partikel tanah tersebut dapat bervariasi dari lebih besar dari 100 mm sampai dengan yang lebih kecil dari 0,001 mm

Menurut Bowles (1989 dalam Made, 2011) tanah adalah campuran partikel-partikel yang terdiri dari salah satu atau seluruh jenis berikut :

1. Berangkal (*boulders*), merupakan potongan batu yang besar, biasanya lebih besar dari 250 mm sampai 300 mm. Untuk kisaran antara 150 mm sampai 250 mm, fragmen batuan ini disebut kerakal (*cobbles*).
2. Kerikil (*gravel*), partikel batuan yang berukuran 5 mm sampai 150 mm.
3. Pasir (*sand*), partikel batuan yang berukuran 0,074 mm sampai 5 mm, berkisar dari kasar (3-5 mm) sampai halus (kurang dari 1 mm).
4. Lanau (*silt*), partikel batuan berukuran dari 0,002 mm sampai 0,074 mm. Lanau dan lempung dalam jumlah besar ditemukan dalam deposit yang disedimentasikan ke dalam danau atau di dekat garis pantai pada muara sungai.
5. Lempung (*clay*), partikel mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel-partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi pada tanah yang kohesif.
6. Koloid (*colloids*), partikel mineral yang “diam” yang berukuran lebih kecil dari 0,001 mm.

Kerikil, pasir lanau, dan lempung adalah istilah-istilah umum dipakai untuk menyatakan tanah. Kerikil dan pasir dikenal sebagai tanah berbutir kasar, sedangkan lanau dan lempung dikenal sebagai tanah halus. Material butir kasar adalah fragmen mineral yang dapat diidentifikasi terutama berdasarkan ukuran partikel. Apabila diameter partikelnya melebihi 5 mm diklasifikasikan sebagai kerikil. Apabila butiran tanah dapat dilihat dengan mata telanjang diameter partikelnya kurang dari 5 mm diklasifikasikan sebagai pasir nama ini biasanya dimodifikasi lebih lanjut sebagai kasar, sedang, dan halus.

Lanau adalah bahan yang merupakan peralihan antara lempung dan pasir halus. Perbedaan antara lempung dan lanau tidak dapat didasarkan pada ukuran partikelnya, karena sifat-sifat fisis penting dari kedua material ini hanya berkaitan secara tidak langsung terhadap ukuran partikel. Penentuan antara lanau dan lempung dilakukan atas dasar hasil percobaan batas atterberg atau dilatasi karena keduanya bersifat mikroskopis. Menurut Bowles (1989) system klasifikasi tanah yang paling dikenal dikalangan para ahli teknik tanah dan fondasi adalah klasifikasi tanah sistem *Unified (Unified Soil Classification System)*. Sistem *Unified* membagi tanah atas tiga kelompok utama:

1. Tanah berbutir kasar merupakan tanah yang lebih dari 50% bahannya tertahan pada ayakan No.200 (0,075mm) yang dibagi atas kerikil dan pasir.
2. Tanah berbutir halus merupakan tanah yang lebih dari 50% bahannya lewat ayakan No. 200 (0,075 mm) yang dibagi menjadi lanau, lempung, serta lanau dan lempung organik.
3. Tanah sangat organik merupakan tanah gambut.

Tabel 2.1. Batasan-Batasan Ukuran Golongan Tanah

Nama Golongan	Ukuran Butiran (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
<i>Massachusetts Institute of Technology (MIT)</i>	> 2	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002
<i>U.S Departement of Agriculture (USDA)</i>	> 2	2 - 0,05	0,05 - 0,002	< 0,002
<i>American Association of State Highway abd Transportation Officials (ASSHTIO)</i>	76,2 - 2	2 - 0,075	0,075 - 0,002	< 0,002
<i>Unified Soil Clasification System (U.S. Army Crops of Engineers, U.S. Burean of Reclamaton)</i>	76,2 - 2	4,75 - 0,075	Halus (yaitu lanau dan lempung)	

Sumber: Braja M Das, *Mekanika Tanah, Jilid I, Erlangga, Jakarta 1998, Hal. 7*

2.2 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tetapi mempunyai sifat yang serupa ke dalam kelompok - kelompok dan subkelompok-subkelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem klasifikasi memberikan suatu bahasa yang mudah untuk menjelaskan secara singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan yang terinci (Das, 1998). Sistem klasifikasi tanah yang dikembangkan untuk tujuan rekayasa umumnya didasarkan pada sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti gradasi butiran tanah dan nilai-nilai batas Atterberg sabagai petunjuk

kondisi plastisitas tanah, hal ini dikarenakan tanah tidak tersedimentasi, sehingga partikel-partikel tanah mudah untuk dipisah-pisahkan.

Klasifikasi tanah digunakan untuk memperkirakan atau mengelompokkan tanah berdasarkan sifat-sifat tanah di lapangan. Secara umum klasifikasi tanah menggunakan data dari pengujian *properties* di laboratorium untuk dapat menentukan karakteristik fisik tanahnya. Karakteristik tersebut digunakan untuk menentukan kelompok klasifikasinya yang didasarkan atas ukuran partikel yang diperoleh dari pengujian analisis saringan dan plastisitasnya (Hardiyatmo, 2011). Sistem klasifikasi bukan merupakan sistem identifikasi untuk menentukan sifat-sifat mekanis dan geoteknis tanah. Karenanya, klasifikasi tanah bukanlah satu-satunya cara yang digunakan sebagai dasar untuk perencanaan dan perancangan konstruksi. Klasifikasi tekstur ini dikembangkan oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat (*U.S. Department of Agriculture*) dan deskripsi batas-batas susunan butir tanah di bawah sistem USDA. Kemudian dikembangkan lebih lanjut dan digunakan untuk pekerjaan jalan raya yang lebih dikenal dengan klasifikasi tanah berdasarkan persentase susunan butir tanah oleh *U.S. Public Roads Administration*.

2.2.1 Klasifikasi tanah sistem AASHTO

Klasifikasi tanah sistem AASHTO (*American Association of State Highway Transportation Official*) dikembangkan pada tahun 1929 sebagai Public Road Administration Classification System. Kemudian sistem ini mengalami beberapa perbaikan, sampai saat ini versi yang berlaku adalah yang diajukan oleh *Committee on Classification of Materials for Subgrade and Granular Type Road of the Highway Research Board* pada tahun 1945. Sistem klasifikasi AASHTO berguna untuk menentukan kualitas tanah guna pekerjaan jalan yaitu lapis dasar (*subbase*) dan tanah dasar (*subgrade*). Karena sistem ini ditujukan untuk pekerjaan jalan tersebut, maka penggunaan sistem ini dalam prakteknya harus dipertimbangkan terhadap maksud aslinya. Sistem ini membagi tanah ke dalam 7 kelompok utama yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah yang diklasifikasikan ke dalam A-1 sampai A-3 adalah tanah berbutir yang 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan no. 200. Sedangkan tanah A-4 sampai A-7 adalah tanah yang lebih dari 35% butirannya lolos ayakan no. 200.

Butiran dalam kelompok A-4 sampai dengan A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung. Sistem klasifikasi ini didasarkan pada kriteria di bawah ini:

1) Ukuran Butir

Kerikil : bagian tanah yang lolos ayakan diameter 75 mm (3 in) dan yang tertahan pada ayakan No. 10 (2 mm).

Pasir : bagian tanah yang lolos ayakan No. 10 (2 mm) dan yang tertahan pada ayakan No. 200 (0.075 mm).

Lanau dan lempung : bagian tanah yang lolos ayakan No. 200.

2) Plastisitas

Nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung dipakai bilamana bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis indeks plastisnya 11 atau lebih.

3) Apabila batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) di temukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu. Tetapi, persentase dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

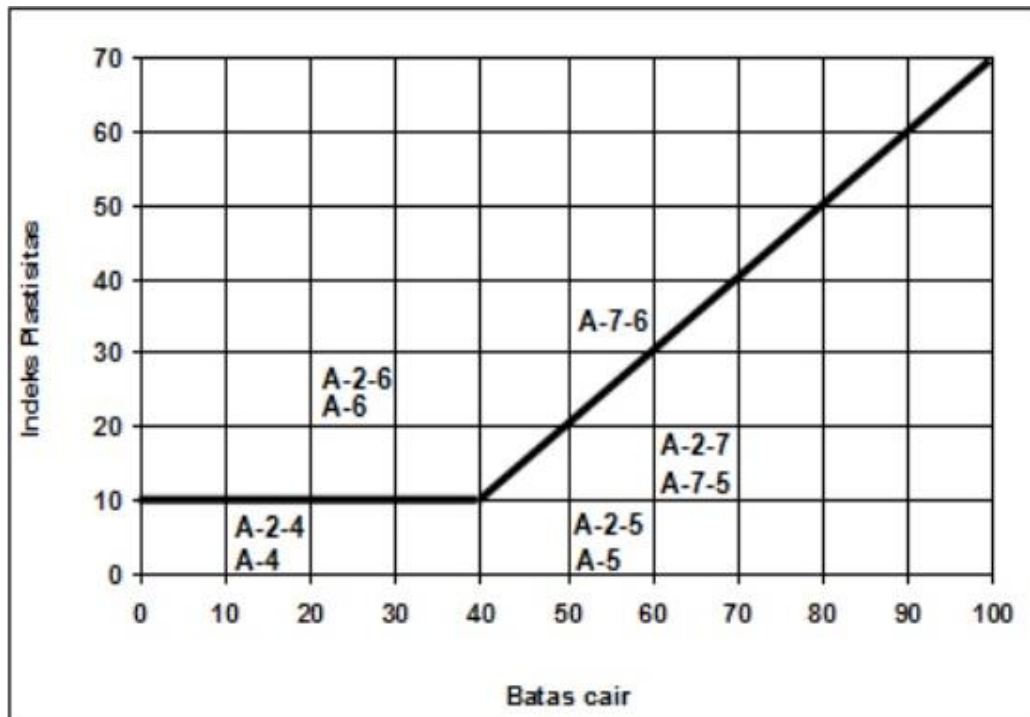
Tabel 2.2 Sistem Klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Office*)

Klasifikasi Umum	Tanah berbutir (35 % atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)							Tanah lanau - lempung (lebih dari 35 % dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)			
Klasifikasi Kelompok	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5* A-7-6**
Analisis ayakan (% lolos)											
No. 10	50 maks	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
No. 40	30 maks	50 maks	51 min	---	---	---	---	---	---	---	---
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 yang lolos ayakan No. 40											
Batas Cair (LL)	---		---	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indek Plastisitas (PI)	6 maks		NP	10 maks	10 maks	11 min	11 min	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Baik sekali sampai baik							sedang sampai jelek			

Keterangan : * Untuk A-7-5, PL > 30

** Untuk A-7-6, PL < 30

Apabila sistem klasifikasi AASHTO digunakan untuk mengklasifikan tanah, makadata dari hasil uji dicocokkan dengan angka-angka yang diberikan dalam tabel 2.2 dari kolom sebelah kiri ke kolom sebelah kanan hingga ditemukan angka-angka yang sesuai. Gambar 2.1 menunjukkan suatu gambar dari senjang batas cair dan indeks plastisitas untuk tanah yang masuk dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6 dan A-7.



Gambar 2.1. Rentang Dari LL dan PI Untuk Tanah Dalam Kelompok A-2 sampai A-7

Untuk mengevaluasi mutu (kualitas) dari suatu tanah sebagai bahan lapisan tanah dasar (*subgrade*) dari suatu jalan raya, suatu angka yang dinamakan indeks grup (*group indeks*, GI) juga diperlukan selain kelompok dan subkelompok dari tanah yang bersangkutan. indeks grup dapat dihitung dengan memakai persamaan seperti dibawah ini:

$$GI = (F - 35) [0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F - 15) (PI - 10) \quad (2.1)$$

Keterangan:

F = Persentase butiran yang lolos ayakan No. 200

LL = Batas cair (*liquid limit*)

PI = Indeks plastisitas

Suku pertama persamaan di atas yaitu $(F - 35) [0,2 + 0,005(LL - 40)]$, adalah bagian dari indeks grup yang ditentukan dari batas cair (LL). Suku yang kedua yaitu $0,01(F - 15) (PI - 10)$, adalah bagian dari indeks grup yang ditentukan dari indeks plastisitas (PI). Berikut ini adalah aturan untuk menentukan harga dari indeks grup:

- Apabila persamaan di atas menghasilkan GI yang negatif, maka harga GI dianggap nol.
- Indeks grup yang dihitung dengan menggunakan persamaan di atas dibulatkan ke angka yang paling dekat.
- Tidak ada batas atas untuk indeks grup.
- Indeks grup untuk tanah yang masuk dalam kelompok A-1a, A-1b, A-2-4, A-2-5 dan A-3 selalu sama dengan nol.
- Untuk tanah yang masuk kelompok A-2-6 dan A-2-7, hanya bagian dari indeks grup untuk PI saja yang digunakan, yaitu:

$$GI = 0,01 (F - 15) (PI - 10) \quad (2.2)$$

Pada umumnya, kualitas tanah yang digunakan untuk bahan tanah dasar dapat dinyatakan sebagai kebalikan dari harga indeks grup.

2.2.2 Klasifikasi tanah sistem USCS

Sistem klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*) pada mulanya diperkenalkan oleh Prof. Arthur Cassagrande pada tahun 1942 untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang selama Perang Dunia II. Sistem ini disempurnakan oleh *United Bureau of Reclamation* pada tahun 1952. Sistem klasifikasi tanah ini yang paling banyak dipakai untuk pekerjaan teknik fondasi seperti bendungan, bangunan dan konstruksi yang sejenis. Sistem ini biasa digunakan untuk desain lapangan udara dan untuk spesifikasi pekerjaan tanah untuk jalan. Klasifikasi berdasarkan *Unified System* (Das, 1995), tanah dikelompokkan menjadi:

- Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soils*) yang terdiri atas kerikil dengan simbol G (*gravel*) dan pasir dengan simbol S (*sand*) yang mana kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200 ($F_{200} < 50$). Sifat teknis tanah ini ditentukan oleh ukuran butir dan gradasi butirnya.

- b. Tanah berbutir halus (*fine-grained soils*) yang mana lebih dari 50% tanah lolos saringan No. 200 ($F_{200} \geq 50$). Tanah ini ditentukan oleh sifat plastisitas tanahnya, sehingga pengelompokannya berdasar plastisitas dan ukuran butirnya. Tanah berbutir halus terbagi atas lanau dengan simbol M (*silt*), lempung dengan simbol C (*clay*), serta lanau dan lempung organik dengan simbol O, bergantung pada tanah itu terletak pada grafik plastisitas. Tanda L untuk plastisitas rendah dan H untuk plastisitas tinggi.
- c. Tanah organik (Gambut/Humus), secara laboratorium dapat ditentukan jika perbedaan batas cair tanah contoh yang belum dioven dengan yang telah dioven sebesar $> 25\%$.
Faktor-faktor yang perlu diperhatikan dalam klasifikasi USCS sebagai berikut :
 - a. Persentase lolos ayakan No. 200 dan lolos ayakan No. 4
 - b. Koefisien keseragaman (C_u) dan koefisien gradasi (C_c)
 - c. Batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI).

Menurut Bowles (1991 dalam Hasnia, 2011) kelompok – kelompok tanah utama sistem klasifikasi Unified dapat dilihat pada tabel berikut ini :**Tabel 2.3** Klasifikasi Tanah *Unified Soil Classification System* (USCS)

Jenis Tanah	Prefiks	Sub Kelompok	Sufiks
Kerikil	G	Gradasi baik	W
		Gradasi buruk	P
Pasir	S	Berlanau	M
		Berlempung	C
Lanau	M		
Lempung	C	LL < 50 %	L
Organik	O	LL > 50 %	H
Gambut	Pt		

Sumber : Bowles (1991, dalam Hasnia, 2011).

Keterangan :

G = Untuk kerikil (*Gravel*) atau tanah berkerikil (*Gravelly Soil*)

S = Untuk pasir (*Sand*) atau tanah berpasir (*Sandy soil*)

M = Untuk lanau anorganik (*inorganic silt*)

C = Untuk lempung inorganik (*inorganic clay*)

O = Untuk lanau dan lempung organik

Pt = Untuk gambut (*peat*) dan tanah dengan kandungan organik tinggi

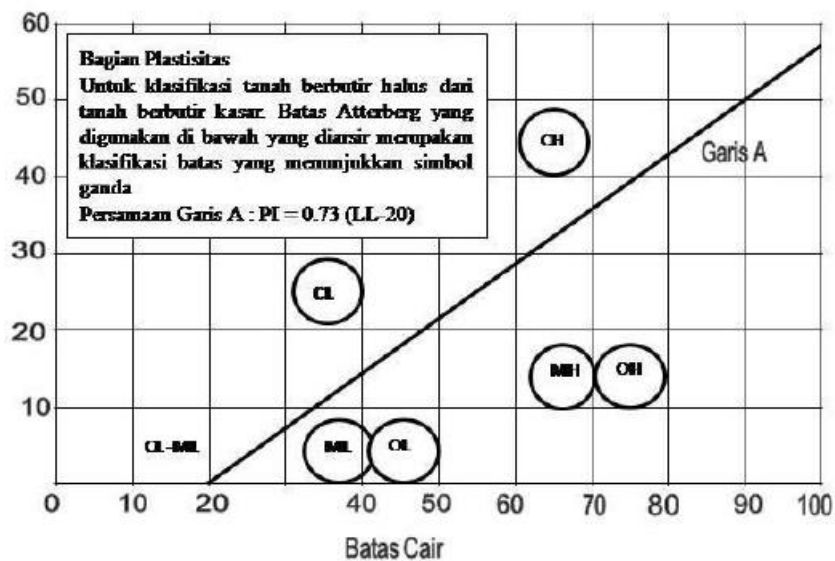
W = Untuk gradasi baik (*well graded*)

P = Gradasi buruk (*poorly graded*)

L = Plastisitas rendah (*low plasticity*)

H = Plastisitas tinggi (*high plasticity*)

LL = Batas Cair (*Liquid Limit*)

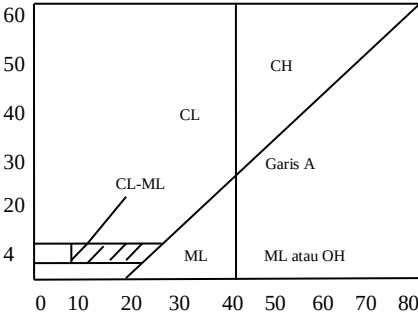


Gambar 2.2 Grafik Plastisitas USCS

Lanau adalah tanah berbutir halus yang mempunyai batas cair dan indeks plastisitas terletak dibawah garis A dan lempung berada diatas garis A. Lempung organis adalah pengecualian dari peraturan diatas karena batas cair dan indeks plastisitasnya berada dibawah garis A. Lanau, lempung dan tanah organis dibagi lagi menjadi batas cair yang rendah (L) dan tinggi (H). Garis pembagi antara batas cair yang rendah dan tinggi ditentukan pada angka 50 seperti:

1. Kelompok ML dan MH adalah tanah yang diklasifikasikan sebagai lanau pasir, lanau lempung atau lanau organis dengan plastisitas relatif rendah. Juga termasuk tanah jenis butiran lepas, tanah yang mengandung mika juga beberapa jenis lempung *kaolinite* dan *illite*.
2. Kelompok CH dan CL terutama adalah lempung organik. Kelompok CH adalah lempung dengan plastisitas sedang sampai tinggi mencakup lempung gemuk. Lempung dengan plastisitas rendah yang diklasifikasikan CL biasanya adalah lempung kurus, lempung kepasiran atau lempung lanau.
3. Kelompok OL dan OH adalah tanah yang ditunjukkan sifat-sifatnya dengan adanya bahan organik. Lempung dan lanau organik termasuk dalam kelompok ini dan mereka mempunyai plastisitas pada kelompok ML dan MH.

Tabel 2.4 Sistem Klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*)

Divisi Utama			Simbol	Nama Umum	Kriteria Klasifikasi	
Tanah berbutir kasar $\geq 50\%$ butiran tertahan saringan No. 200	Kerikil $50\% \geq$ fraksi kasar tertahan saringan No. 4	Kerikil bersih (hanya kerikil)	GW	Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3	
			GP	Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW	
		Kerikil dengan Butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau	Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$	Bila batas <i>Atterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung	Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$	
	Pasir $\geq 50\%$ fraksi kasar lolos saringan No. 4	Pasir bersih (hanya pasir)	SW	Pasir bergradasi-baik , pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3	
			SP	Pasir bergradasi-buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW	
		Pasir dengan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$	Bila batas <i>Atterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung	Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$	
		Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200	Lanau dan lempung batas cair $\leq 50\%$	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung	Diagram Plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan kasar. Batas <i>Atterberg</i> yang termasuk dalam daerah yang di arsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.  Batas Cair LL (%) Garis A : $PI = 0.73 (LL - 20)$
				CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung “kurus” (<i>lean clays</i>)	
OL	Lanau-organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah					
Lanau dan lempung batas cair $\geq 50\%$	MH		Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis			
	CH		Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung “gemuk” (<i>fat clays</i>)			
	OH		Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi			
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi			PT	<i>Peat</i> (gambut), <i>muck</i> , dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488	

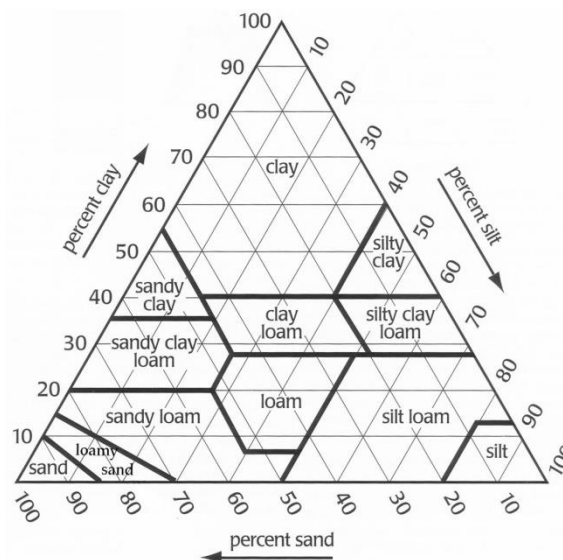
Sumber : HaryChristady,1992.

2.2.3 Klasifikasi berdasarkan tekstur oleh USDA

Dalam arti umum, yang dimaksud dengan tekstur tanah adalah keadaan permukaan tanah yang bersangkutan. Tekstur tanah dipengaruhi oleh ukuran tiap-tiap butir yang ada di dalam tanah. Sistem ini membagi tanah dalam beberapa kelompok: kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), dan lempung (*clay*), atas dasar ukuran butir-butirnya. Pada umumnya, tanah asli merupakan campuran dari butir-butir yang mempunyai ukuran yang berbeda-beda. Dalam sistem klasifikasi tanah berdasarkan tekstur, tanah diberi nama atas dasar komponen utama yang dikandungnya, misalnya lempung berpasir (*sandy clay*), lempung berlanau (*silty clay*), dan seterusnya.

Beberapa sistem klasifikasi berdasarkan tekstur tanah telah dikembangkan sejak dulu oleh berbagai organisasi guna memenuhi kebutuhan mereka sendiri, beberapa dari sistem-sistem tersebut masih tetap dipakai sampai saat ini. Gambar 2.3 menunjukkan sistem klasifikasi berdasarkan tekstur tanah yang dikembangkan oleh Departemen Pertanian Amerika (USDA). Sistem ini didasarkan pada ukuran batas dari butiran tanah seperti yang diterangkan oleh sistem USDA, yaitu:

- Pasir: butiran dengan diameter 2,0 sampai dengan 0,05 mm
- Lanau: butiran dengan diameter 0,05 sampai dengan 0,002 mm
- Lempung: butiran dengan diameter lebih kecil dari 0,002 mm



Gambar 2.3 Klasifikasi Berdasarkan USDA

2.3 Tanah Timbunan

Tanah timbunan dibagi dalam dua macam sesuai dengan maksud penggunaannya yaitu:

2.3.1 Timbunan Biasa

Timbunan biasa adalah timbunan yang digunakan untuk pencapaian elevasi akhir *subgrade* yang disyaratkan dalam gambar perencanaan tanpa maksud khusus lainnya. Timbunan biasa ini juga digunakan untuk penggantian material eksisting *subgrade* yang tidak memenuhi syarat.

Bahan urugan biasa harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut:

- a. Timbunan yang diklasifikasikan sebagai timbunan biasa harus terdiri dari tanah yang disetujui oleh Pengawas yang memenuhi syarat untuk digunakan dalam pekerjaan permanen.
- b. Bahan yang dipilih tidak termasuk tanah yang plastisitasnya tinggi, yang diklasifikasi sebagai A-7-6 dari persyaratan AASHTO M-145 atau sebagai CH dalam sistem klasifikasi “*Unified* atau *Casagrande*”. Sebagai tambahan, timbunan ini harus memiliki CBR yang tak kurang dari 6 %, bila diuji dengan AASHTO T 193.
- c. Tanah yang pengembangannya tinggi yang memiliki nilai aktif lebih besar dari 1,25 bila diuji dengan AASHTO T-258, tidak boleh digunakan sebagai bahan urugan. Nilai aktif diukur sebagai perbandingan antara Indeks Plastisitas (PI) – (AASHTO T-90) dan persentase ukuran lempung (AASHTO T-88).

2.3.2 Timbunan Pilihan

Timbunan pilihan adalah timbunan yang digunakan untuk pencapaian elevasi akhir *subgrade* yang disyaratkan dalam gambar perencanaan dengan maksud khusus lainnya, misalnya untuk mengurangi tebal lapisan fondasi bawah, untuk memperkecil gaya lateral tekanan tanah dibelakang dinding penahan tanah badan jalan. Bahan timbunan pilihan harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut :

- a. Timbunan hanya boleh diklasifikasikan sebagai “Timbunan Pilihan” bila digunakan pada lokasi atau untuk maksud yang telah ditentukan atau disetujui secara tertulis oleh Pengawas.
- b. Timbunan yang diklasifikasikan sebagai timbunan pilihan harus terdiri dari bahan tanah berpasir (*sandy clay*) atau padas yang memenuhi persyaratan dan sebagai tambahan harus memiliki sifat tertentu tergantung dari maksud penggunaannya. Dalam segala hal, seluruh timbunan pilihan harus memiliki CBR paling sedikit 10 %, bila diuji sesuai dengan AASHTO T-193.

2.4 Hidrasi

Partikel mineral lempung biasanya bermuatan negatif sehingga partikel lempung hampir selalu mengalami hidrasi, yaitu dikelilingi oleh lapisan-lapisan molekul air dalam jumlah yang besar.

Partikel mineral selalu mengalami hidrasi, hal ini dikarenakan lempung biasanya bermuatan negatif, yaitu partikel dikelilingi oleh lapisan-lapisan molekul air yang disebut sebagai air teradsorpsi. Lapisan ini umumnya memiliki tebal dua molekul. Lapisan ini sering mempunyai tebal dua molekul dan disebut lapisan difusi, lapisan difusi ganda atau lapisan ganda adalah lapisan yang dapat menarik molekul air atau kation yang disekitarnya. Lapisan ini akan hilang pada temperatur yang lebih tinggi dari 60° sampai 100° C dan akan mengurangi plastisitas alamiah, tetapi sebagian air juga dapat menghilang cukup dengan pengeringan udara saja.

2.5 Pengaruh Air

Fase air yang berada di dalam struktur tanah lempung adalah air yang tidak murni secara kimiawi. Pada pengujian di laboratorium untuk batas-batas Atterberg, ASTM menentukan bahwa air suling ditambahkan sesuai dengan keperluan. Air berfungsi sebagai penentu sifat plastisitas dari lempung. Satu molekul air memiliki muatan positif dan muatan negatif pada ujung yang berbeda (dipolar).

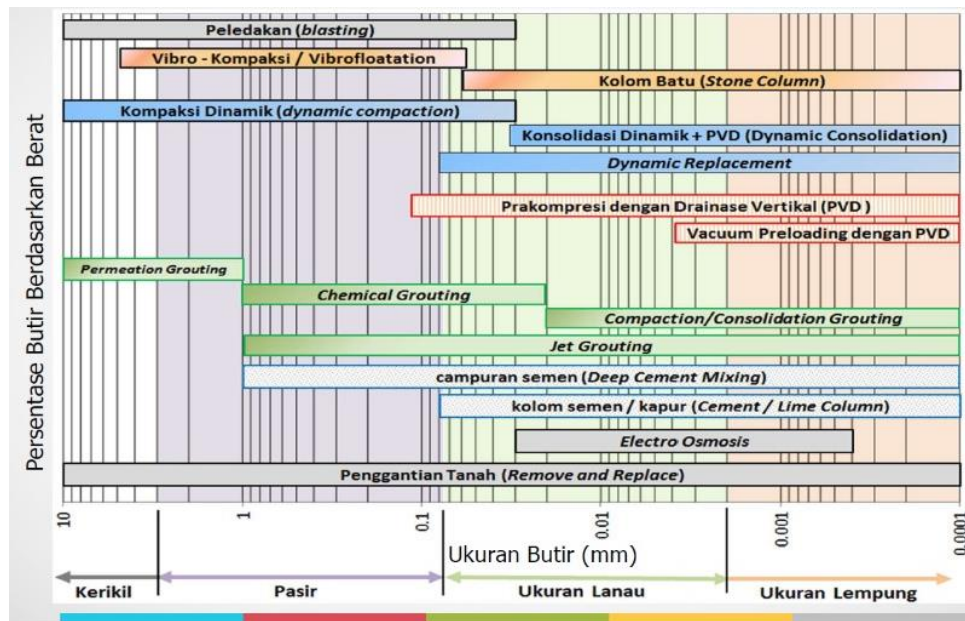
2.6 Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah merupakan usaha untuk merubah atau untuk memperbaiki sifat-sifat teknis tanah agar memenuhi persyaratan teknis tertentu (Hardiyatmo, 2010). Stabilisasi tanah adalah suatu metode rekayasa tanah yang bertujuan untuk meningkatkan atau mempertahankan sifat-sifat tertentu pada tanah, agar selalu memenuhi persyaratan teknis yang dibutuhkan. Dalam hal ini berbagai syarat teknis yang dibutuhkan dalam mengoptimalkan kinerja konstruksi, antara lain : daya dukung tanah, kuat geser tanah, penurunan (*settlement*), dan lain sebagainya, yang mana syarat teknis tersebut selalu dikaitkan dengan jenis dan fungsi konstruksi yang dibangun/dibuat.

Ada beberapa tindakan yang dilakukan untuk menstabilisasikan tanah yaitu, meningkatkan kerapatan tanah, menambah material yang tidak aktif sehingga meningkatkan kohesi dan atau tahanan gesek yang timbul, menambah bahan untuk menyebabkan perubahan-perubahan kimiawi dan atau fisik pada tanah, menurunkan muka air tanah (*drainase tanah*) dan mengganti tanah yang buruk (bowles, 1991).

Dalam buku ajar stabilisasi tanah oleh Darwis (2001), stabilisasi tanah adalah suatu metode yang digunakan untuk meningkatkan kemampuan daya dukung suatu lapisan tanah dengan cara memberikan perlakuan (*treatment*) khusus terhadap lapisan tanah tersebut. Dengan demikian dapat diketahui bahwa tujuan dari stabilisasi tanah adalah minimal memenuhi satu dari empat sasaran berikut ini:

1. Untuk memperbaiki (meningkatkan) daya dukung tanah.
2. Untuk memperbaiki (memperkecil) penurunan lapisan tanah.
3. Untuk memperbaiki (menurunkan) permeabilitas dan *swelling* potensial tanah.
4. Untuk menjaga (mempertahankan) potensi tanah yang ada (*existing strength*).



Gambar 2.4 Jenis-jenis Metode Perbaikan Tanah

Sumber: SNI-8460-2017

Dari keempat sasaran dari suatu proses stabilisasi yang diuraikan di atas, sangat jarang dapat dicapai secara bersamaan. Akan tetapi harus selalu diupayakan agar dapat tercapai perbaikan parameter yang diinginkan, tanpa mengakibatkan pengrusakan parameter lainnya. Menurut *Bowles* (1986), beberapa tindakan yang dilakukan untuk menstabilisasikan tanah adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan kerapatan tanah.
2. Menambah material yang tidak aktif sehingga meningkatkan kohesi dan/atau tahanan gesek yang timbul.
3. Menambah bahan untuk menyebabkan perubahan-perubahan kimiawi dan/atau fisis pada tanah.
4. Menurunkan muka air tanah (drainase tanah).
5. Mengganti tanah yang buruk.

Untuk mencapai tujuan tersebut, proses stabilisasi ini dapat dilakukan dengan cara paling sederhana seperti pemadatan, hingga menggunakan teknik yang lebih efektif dan juga memerlukan dana yang cukup besar, yakni dengan mencampur tanah dengan pasir atau semen, *grouting* atau injeksi semen, abu terbang, pemanasan dan lain sebagainya.

Dalam perекayasaаn konstruksi bangunan teknik sipil, sering ditemukan lapisan tanah yang memiliki daya dukung rendah (*low strength*), yang sangat mempengaruhi berbagai tahapan rancangan bangunan konstruksi, baik dalam perencanaan (*design*), tahap pelaksanaan (*perform*), maupun tahap operasional dan pemeliharaan (*operational and maintenance*). Stabilisasi tanah dapat dilakukan dalam empat cara umum yaitu:

1. Stabilisasi mekanik

Stabilisasi mekanis dilakukan dengan cara pemadatan menggunakan alat berat atau mesin gilas untuk diterapkan di lapangan menurut panguriseng (2001) stabilisasi mekanis yaitu stabilisasi dengan menggunakan material sisipan ke lapisan tanah, sehingga dapat memperbaiki fisik tanah sesuai dengan alasan dilakukannya stabilisasi. Metode ini umumnya dilakukan pada tanah berbutir kasar yang memiliki fraksi tanah lolos saringan no.200 ASTM paling banyak 25%.

2. Stabilisasi kimiawi

Stabilisasi kimiawi dilakukan dengan menambahkan bahan stabilisasi untuk memperbaiki sifat tanah dengan cara mencampurkan tanah dan bahan stabilisasi dengan kadar tertentu, kemudian dihamparkan dan dipadatkan. Pencampuran dilakukan untuk mengubah gradasi, plastisitas tanah dan *workability*.

stabilisasi tanah dilakukan untuk mengubah sifat-sifat dari material yang ada dan kurang baik menjadi material yang memiliki sifat yang baik sehingga stabilisasi ini dapat memenuhi kebutuhan perencanaan konstruksi yang diinginkan.

3. Stabilisasi secara hidrolisis

Cara ini dilakukan dengan memanfaatkan lembaran plastik sebagai drainase vertikal yang panjang dan mempunyai kantung yang merupakan kombinasi antara *polypropylene* dan lapisan pembungkus dari bahan geotekstil atau yang umumnya dinamai *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). PVD merupakan metode umum yang digunakan untuk memampatkan lapisan tanah lunak dengan kapasitas daya dukung dasar yang rendah. PVD mampu meningkatkan kekuatan tanah yang diperoleh dari pemadatan tanah halus, dimana

stabilitas adalah faktor yang harus diperhatikan. Jika dilihat dari sudut pandang yang berbeda, dibandingkan dengan *sand drain*, PVD lebih ekonomis dan mengurangi gangguan yang dapat mengurangi stabilitas tanah serta pemasangan yang lebih mudah.

4. Stabilisasi dengan bahan tambahan

Cara ini dilakukan dengan menambahkan bahan tertentu pada tanah agar dapat memenuhi syarat. Bahan yang ditambahkan biasanya dari pabrik dan zat kimia dicampurkan dengan perbandingan tepat sehingga meningkatkan sifat tanah dan membuatnya lebih kuat serta memenuhi syarat.

Ukuran Partikel	Lebih dari 25% lolos 0.425 mm			Kurang dari 25% lolos 0.425 mm		
Plastisitas	$PI \leq 10$	$10 \leq PI \leq 20$	$PI \geq 20$	$PI \leq 6, WPI < 60$	$PI \leq 10$	$PI > 10$
Tipe Pengikat						
Semen dan semen campuran*						
Kapur						
Bitumen						
Campuran aspal/ semen						
Berbutir						
Polimer						
Bahan Kimia Lain**						

Keterangan:

umumnya sesuai		diragukan atau memerlukan bahan pengikat		umumnya tidak sesuai	
----------------	---	--	--	----------------------	---

* Penggunaan beberapa pengikat bahan kimia sebagai bahan tambahan dapat memperpanjang efektivitas pengikat bersemen (*cementitious*). Bahan kimia adalah bahan tambahan semen atau *additive* sesuai buku petunjuk beton.

** Hanya diambil sebagai panduan. Rujuk literatur lain untuk informasi lainnya pada tanah berbutir halus atau plastisitas lebih tinggi.

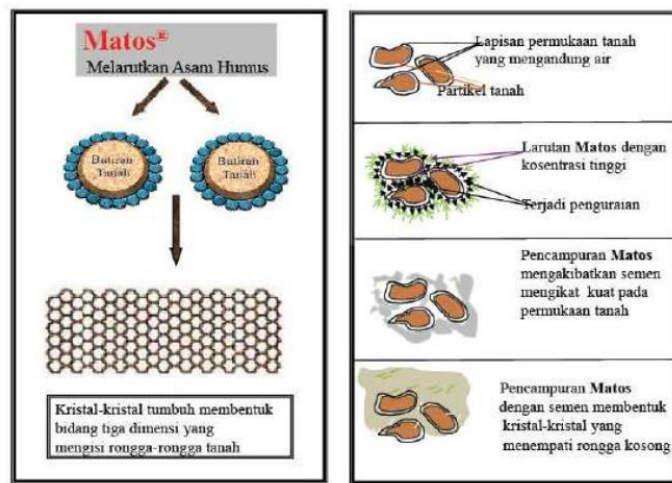
Gambar 2.5 Pemilihan Metode Stabilisasi

Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan, Halaman: 8-4

2.7 Matos Soil Stabilizer

Matos merupakan bubuk halus yang terdiri dari komposisi mineral aditif anorganik yang berfungsi untuk memperkuat dan menstabilkan tanah secara fisik dan kimia. Matos membantu menyuplai lebih banyak ion pengganti dan membentuk senyawa asam alumunium *silica* sehingga membentuk struktur sarang lebah 3 dimensi di antara partikel-partikel tanah. Dan membentuk rongga-rongga

mikron yang bisa menyerap air (porositas), sehingga tidak akan terjadi pembentukan *sulfuric acid* yang menyebabkan terjadinya keretakan (Matos.co.id).



Gambar 2.6 Ilustrasi Proses Pengikatan Matos

Adapun bentuk serbuk Matos dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Serbuk Matos

Dalam penggunaannya di lapangan Matos *soil stabilizer* tidak bis bekerja sendiri, tetapi selalu dipadukan dengan unsur-unsur lainnya. Oleh karena itu kita harus memahami beberapa prinsip dalam penggunaan matos dengan uraiannya sebagai berikut:

- a. Membuat campuran tanah + semen, kemudian dihamparkan secara merata.

- b. Membuat larutan matos, dengan cara campurkan bubuk matos kedalam air dan diaduk hingga merata.
- c. Selanjutnya menyiramkan larutan matos pada hamparan tanah-semen, setelah itu dapat dilakukan pemadatan dengan *Tire Roller*.

Berikut merupakan beberapa keunggulan dalam menggunakan Matos *soil stabilizer*:

1. Meningkatkan parameter daya dukung tanah (pengganti LPA dan LPB), sekaligus stabilisasi tanah dasar badan jalan).
2. Jalan menjadi tidak lembek/becek Jalan menjadi tidak lembek/becek saat musim hujan dan tidak berdebu di musim kering.
3. Jalan dapat dilalui pada hari ke 4 (*curing time* 4 – 14 hari), tergantung tanah dan cuaca.
4. Sesudah *curing time*, semakin sering terendam air semakin baik, tanah yang distabilisasi akan menjadi lebih keras.
5. Tidak *brittle* , karena mampu memanfaatkan kadar air di udara secara optimum (dikembangkan di Indonesia), bahan Soil Stabilizer lainnya umumnya dikembangkan di daerah sub tropis.
6. Memperkecil permeabilitas tanah sehingga dapat digunakan sebagai lapis kedap air (substitusi *geosynthetic* dan beton).
7. Memaksimalkan fungsi bahan stabilitas lain seperti semen PC dan kapur.
8. Meminimalkan *settlement* karena elastisitas (E) MATOS[®] antara E_{tanah} dan E_{beton} .

Prosedur aplikasi Matos sangat sederhana, pertama tanah yang akan dicampur dengan Matos dikeruk dan diaduk hingga mencapai adukan yang homogen. Proses ini juga dapat menghancurkan butiran-butiran yang besar menjadi lebih kecil, dan menjadikan tanah yang terlalu lembab menjadi lebih kering. Matos kemudian ditambahkan ke tanah dan diaduk kembali untuk memastikan campuran telah tercampur menyeluruh. Air ditambahkan ke dalam campuran sesuai dengan hitungan untuk mencapai *Optimum Moisture Content* (OMC) dan menjadikan proses kimiawi berjalan. Pemadatan adalah salah satu aspek penting yang harus dilakukan secara menyeluruh dan dengan peralatan yang sesuai untuk memastikan pemadatan maksimal tercapai.

Bahkan sebelum aplikasi selesai, hasil sudah mulai bisa dilihat. Dengan penambahan Matos, kepadatan tanah juga bertambah. Namun proses tersebut masih dalam tahap awal. Dalam 24 jam pertama reaksi Matos dengan tanah sudah berlangsung, dan dalam 7 hari pertama sebagian besar reaksi kimia telah selesai. Namun karena sifat Matos dan berdasarkan fakta hidrasi, reaksi kimia akan terus berlangsung selama periode 365 hari.

Sebelum aplikasi di lapangan dilakukan kita harus memperhatikan beberapa aspek, survey awal harus diperoleh. Survey tersebut meliputi kondisi iklim, jumlah lalu lintas yang direncanakan, beban, dan survey tanah. Berdasarkan hasil survey tersebut kita dapat membuat rancangan jalan yang sesuai.

2.8 Kapur

Kapur adalah kalsium oksida (CaO) yang dibuat batuan karbonat yang dipanaskan pada suhu sangat tinggi. Kapur tersebut umumnya berasal dari batu kapur (*limestone*) atau dolomite. Biasanya kapur relatif terbentuk di laut dalam kondisi bebatuan yang mengandung lempengan pelat kalsium (*coccoliths*) yang dibentuk oleh mikroorganisme *coccolithophores*. Penambahan kapur dalam tanah merubah tekstur tanah. Tanah lempung berkelakuan mendekati lanau atau pasir, akibat penggumpalan partikel. Pencampuran tanah dengan kapur memperlihatkan pengurangan secara signifikan partikel berukuran lempung asli.

Stabilisasi tanah kapur adalah usaha untuk memperbaiki sifat fisik tanah serta memudahkan dalam pelaksanaan pekerjaan dan menambah ketahanan terhadap pengaruh cuaca dengan mencampurkan kapur pada tanah.

Menurut SNI 03-4147-1996, jenis-jenis kapur dibagi menjadi 4 macam.

1. Kapur tipe I yaitu kapur yang mengandung kalsium hidrat tinggi dengan kadar magnesium oksida (MgO) paling tinggi 4%
2. Kapur tipe II yaitu kapur magnesium atau dolomite yang mengandung magnesium oksida lebih dari 4% dan maksimum 36 % berat
3. Kapur tohor (CaO), yaitu hasil pembakaran batu kapur pada suhu $+90^{\circ}\text{F}$ dengan komposisi sebagian besar kalsium karbonat (CaCO_3)
4. Kapur padam, yaitu kapur dari hasil pemadaman kapur tohor dengan air, sehingga terbentuk hidrat $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Ada pun contoh serbuk kapur tipe 3 yaitu CaCO_3 pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Serbuk Kapur

Perancangan campuran kapur adalah untuk merubah sifat-sifat tanah pada kadar kapur minimal yang dapat mempertahankan daya tahannya sampai ke tingkat tertentu yang diinginkan. Untuk hal ini, metode perancangan campuran ditujukan pada (Rollings dan Rollings, 1996):

1. Tujuan yang akan dicapai: reduksi indeks plastisitas (PI), perubahan tekstur tanah, reduksi pengembangan, kenaikan kekuatan, atau kenaikan kekuatan jangka panjang.
2. Keawetan atau daya tahan (*durability*): kemampuan untuk memelihara sifat-sifatnya pada waktu yang dibutuhkan.
3. Ekonomis: kadar kapur minimum untuk tercapainya tujuan dan memelihara keawetan yang dibutuhkan.

Prosedur perancangan campuran meliputi: persiapan benda uji, kondisi pemeraman, prosedur pengujian dan kriteria perancangan campuran. Untuk mengevaluasi campuran tanah-kapur, maka diperlukan pengujian-pengujian. Tipe-tipe pengujian bergantung pada maksud penggunaannya. Jika pencampuran yang dimaksudkan untuk mengurangi plastisitas tanah, maka uji laboratorium dapat dilakukan pada contoh tanah yang dicampur kapur yang kadarnya tidak begitu banyak. Uji plastisitas dilakukan segera sesudah pencampuran dengan kapur, dan sesudah periode pembasahan duna memberikan waktu pada kapur bereaksi dengan tanah.

Tabel 2.5 Kadar Kapur* Yang Disarankan Ingles Dan Metcalf (1972)

Macam tanah	Kadar kapur untuk “modifikasi”	Kadar kapur untuk “stabilisasi”
Batu kerikil halus ⁺	2 – 4%	Tidak dianjurkan
Kerikil berlempung gradasi baik	1 – 3%	Sampai 3%
Pasir ⁺⁺	Tidak dianjurkan	Tidak dianjurkan
Lempung berpasir	Tidak dianjurkan	Sampai 5%
Lempung berlanau	1 – 3%	2 – 4%
Lempung gemuk (<i>heavy clay</i>)	1 – 3%	3 – 4%
Lempung sangat gemuk (<i>very heavy clay</i>)	1 – 3%	3 - 8%
Tanah organik	Tidak dianjurkan	Tidak dianjurkan

* kapur terhidrasi $\text{Ca}(\text{OH})_2$, persen terhadap kering.

⁺ kapur hanya efektif, jika butiran halus tanahnya plastis

⁺⁺ lapur digunakan dalam stabilisasi bitumen untuk menambah kohesi: kapur tohor dalam material

Prosedur perancangan campuran tanah-kapur dimulai dengan memperkirakan banyaknya lempung, yang kemudian diikuti dengan detail pengujian yang diperlukan. Tabel 2.5 menunjukkan kisaran kadar kapur yang disarankan oleh Igles dan Metcalf (1972) untuk berbagai jenis tanah. Untuk keperluan pelaksanaan dalam praktek, sebagai petunjuk praktis, maka dapat digunakan 1% kapur untuk setiap 10% kadar lempung yang terkandung di dalam tanah (persen terhadap berat kering tanah).

Prosedur perancangan campuran tanah-kapur di Indonesia terdapat di SNI 03-3437-1994. Untuk maksud membandingkan, berikut ini juga dipelajari prosedur perancangan campuran tanah-kapur yang telah ada di luar negeri.

- Prosedur menurut SNI 03-3437-1994

Menurut SNI 03-3437-1994, perancangan kadar kapur dalam campuran harus memenuhi ketentuan berikut:

1. Kadar kapur yang akan digunakan dalam campuran tanah-kapur adalah 2 – 5%. Kadar kapur dihitung terhadap berat kering tanah.
2. Dengan berbagai nilai persentase kadar kapur, lakukan serangkaian uji pemadatan standar di laboratorium. Tentukan nilai kadar air optimum dan berat volume kering maksimum dari masing-masing persentase kadar kapur tersebut.
3. Lakukan uji tekan bebas dan uji CBR pada nilai-nilai kadar air optimum dan berat volume kering maksimum tersebut, dengan jumlah berbeda uji masing-masing 3 buah.
4. Efisiensi alat di laboratorium adalah 100%.
Langkah-langkah perancangan stabilisasi tanah-kapur adalah sebagai berikut:
 - 1) Lakukan serangkaian uji laboratorium dari tanah yang akan distabilisasi: uji untuk penentuan klasifikasi tanah, uji pemadatan (SNI 1742-1989-F), uji tekan bebas (AASHTO T-88-81) dan uji CBR (SNI 1744-1989-F).
 - 2) Buatlah campuran tanah-kapur sesuai komposisi yang direncanakan. Sebelum dicetak menjadi benda uji, campuran dimasukkan dalam kantong plastik.
 - 3) Dari uji distribusi butiran dan batas-batas atterberg (*LL*, *PL*, *SL*, *PI*). Tentukan klasifikasi campuran tanah-kapur.
 - 4) Lakukan uji pemadatan standar pada campuran tanah-kapur dan tentukan kadar air optimum dan berat volume kering maksimumnya.
 - 5) Laksanakan pemeraman benda uji yang akan di uji tekan bebas dengan cara dibungkus plastik dan disimpan dalam almari pemeraman pada temperature ruang yang konstan.
 - 6) Lakukan uji tekan bebas sesuai dengan metode pengujian yang berlaku.
 - 7) Siapkan campuran tanah-kapur untuk uji CBR menurut SNI 1744-1989-F, dengan jumlah tumbukan 56 kali pukulan.
 - 8) Lakukan uji CBR menurut SNI 1744-1989-F, setelah campuran diperam selama 3 hari dalam kantong plastik, serta direndam selama 4 hari.

- 9) Gambarkan grafik hubungan antara persen kapur dan nilai rata-rata kuat tekan bebas (q_u) atau CBR. Tentukan nilai kadar kapur yang memenuhi syarat nilai kuat tekan bebas dan CBR yang ditentukan.

SNI 1744-1989-F, juga mensyaratkan:

- 1) Jika kadar air tanah yang akan distabilisasi lebih besar dari 50%, maka digunakan kapur tipe kapur tohor (kapur kembang) (CaO).
- 2) Untuk perbaikan lapis pondasi, maka jika tanahnya kohesif digunakan ujitekan bebas, dan jika tanahnya granuler (berbutir) digunakan uji CBR.
- 3) Kapur yang digunakan untuk stabilisasi harus memenuhi ketentuan dalam table 2.7
- 4) Air yang digunakan harus bersih, tidak mengandung asam, alkali, nahan organic, minyak, sulfat dan khlorida melebihi nilai-nilai yang dianjurkan dalam Tabel 2.6

Table 2.6 Ketentuan Air Untuk Stabilisasi (SNI 1744-1989-F)

Macam pengujian	Nilai ijin	Cara pengujian
pH	4,5 – 8,5	AASHTO T 26 – 79
Bahan organic	Maksimum 2000 ppm	AASHTO T 26 - 79
Minyak mineral	<2% berat kapur	SNI 06-2502-1991
Ion sulfat (Na_2SO_4)	<10.000 ppm	SNI 06-2426-1991
Ion khlor (NaCl)	<20.000 ppm	SNI 06-2431-1991

Tabel 2.7 Ketentuan Kapur (SNI 1744-1989-F)

Unsur	Kapur	
	Kapur tohor/kapur kembang, CaO	Kapur padam Ca(OH)_2
Magnesium dan kalsium oksida	>92%	>95%
Karbondoksida	<3% <10%	<5% <7%
Kehalusan butir	-	< 12% (2micron)

2.9 Lapis Fondasi

Lapis fondasi adalah bagian perkerasan yang terletak antara lapis permukaan dengan lapis fondasi bawah (atau dengan tanah dasar bila tidak menggunakan lapis fondasi bawah). Fungsi lapis pondasi antara lain:

1. Sebagai bagian perkerasan yang menahan beban roda,
2. Sebagai perletakan terhadap lapis permukaan.

Bahan-bahan untuk lapis fondasi umumnya harus cukup kuat dan awet sehingga dapat menahan beban-beban roda. Sebelum menentukan suatu bahan untuk digunakan sebagai bahan pondasi, hendaknya dilakukan pengujian untuk mengetahui daya dukung bahan tersebut sesuai spesifikasi yang berlaku. Berbagai macam bahan alam / bahan setempat ($CBR > 50\%$, $PI < 4\%$) dapat digunakan sebagai bahan lapis fondasi, antara lain : batu pecah, kerikil pecah dan stabilisasi tanah dengan semen atau kapur.

Tabel 2.8 Garadasi Lapis Pondasi Agregat

Ukuran Ayakan		Persen Berat Yang Lolos			
		Lapis Fondasi Agregat			Lapis Drainase
ASTM	(mm)	Kelas A	Kelas B	Kelas S	
2"	50		100		
1 ½"	37,5	100	88 – 95	100	100
1"	25,0	79 – 85	70 – 85	77 – 89	71 – 87
¾"	19,0				58 – 74
½"	12,5				44 – 60
3/8"	9,50	44 – 58	30 – 65	41 – 66	34 – 50
No.4	4,75	29 – 44	25 – 55	26 – 54	19 – 31
No.8	2,36				8 – 16
No.10	2,0	17 – 30	15 – 40	15 – 42	
No.16	1,18				0 – 4
No.40	0,425	7 – 17	8 – 20	7 – 26	
No.200	0,075	2 – 8	2 – 8	4 – 16	

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2010)

Tabel 2.9 Sifat-sifat Lapis Pondasi Agregat

Sifat-sifat	Lapisan Fondasi Agregat			Lapis Drainase
	Kelas A	Kelas B	Kelas S	
Abrasi dari agregat Kasar (SNI 2417:2008)	0 - 40 %	0 – 40 %	0 – 40 %	0 – 40 %
Butiran pecah, tertahan ayakan No.4 (SNI 7619:2012)	95/90 ¹⁾	55/50²⁾	55/50 ²⁾	80/75 ³⁾
Batas Cair (SNI 1967:2008)	0 – 25	0 – 35	0 – 35	-
Indeks Plastisitas (SNI 1966:2008)	0 – 6	4 – 10	4 - 15	-
Hasil kali Indeks Plastisitas dengan % Lolos Ayakan No.200	Maks. 25	-	-	-
Gumpalan Lempung dan Butiran-butiran Mudah Pecah (SNI 4141:2015)	0 – 5 %	0 – 5 %	0 – 5 %	0 – 5 %
CBR rendaman (SNI 1744:2012)	Min.90 %	Min.60 %	Min.50 %	-
Perbandingan Persen Lolos Ayakan No.200 dan No.40	Maks.2/3	Maks.2/3	-	-
Koefisien Keseragaman: $C_v = D_{60}/D_{10}$	-	-	-	> 3,5

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2010)

2.10 Pengujian Sifat Mekanis Tanah

Dalam penelitian ini pengujian laboratorium dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat mekanis dari tanah asli yang digunakan dalam penelitian ini. Hal ini dilakukan untuk dapat mengetahui karakteristik serta sifat-sifat tanah yang akan diuji. Adapun pengujian-pengujian di laboratorium yang dilakukan untuk memperoleh nilai serta sifat mekanis tanah diantaranya adalah:

2.10.1 Pemadatan tanah (ASTM-D1557)

Pemadatan tanah (*Compaction*) adalah suatu proses dimana udara pada pori-pori tanah dikeluarkan dengan cara mekanis (digilas/ditumbuk) sehingga partikel-partikel tanah menjadi rapat. Dengan kata lain, pemadatan tanah adalah densifikasi tanah yang jenuh dengan penurunan volume rongga udara, sedangkan volume padatan dan kadar air tetap pada dasarnya sama. Hal ini merupakan cara yang paling jelas dan sederhana untuk memperbaiki stabilitas dan kekuatan dukung tanah.

Maksud pemadatan tanah menurut Hardiyatmo (1992), antara lain :

1. Mempertinggi kuat geser tanah
2. Mengurangi sifat mudah mampat (kompresibilitas)
3. Mengurangi permeabilitas
4. Mengurangi perubahan volume sebagai akibat perubahan kadar air dan lainnya.

Pada tahun 1933, Proctor menemukan dasar-dasar pemadatan tanah, dimana terdapat 4 (empat) variabel yang digunakan dalam fungsi *Compaction*, yaitu:

- a. Usaha pemadatan
- b. Jenis tanah
- c. Kadar air tanah
- d. Berat isi kering basah (Bowles, 1991).

Tujuan tersebut dapat tercapai dengan pemilihan tanah bahan timbunan, cara pemadatan, pemilihan mesin pemadat dan jumlah lintasan yang sesuai. Tingkat kepadatan tanah diukur dari nilai berat volume keringnya (γ_d).

Tanah granuler dipandang paling mudah penanganannya untuk pekerjaan lapangan. Material ini mampu memberikan kuat geser yang tinggi dengan sedikit perubahan volume sesudah dipadatkan. Permeabilitas tanah granuler yang tinggi dapat menguntungkan maupun merugikan.

Tanah lanau yang dipadatkan umumnya akan stabil dan mampu memberikan kuat geser yang cukup dan sedikit kecenderungan perubahan volume. Tapi, tanah lanau sangat sulit dipadatkan bila keadaan basah karena permeabilitas rendah.

Tanah lempung yang dipadatkan dengan cara yang benar akan dapat memberikan kuat geser tinggi. Stabilitas terhadap sifat kembang-susut tergantung dari jenis kandungan mineralnya. Sebagai contoh, lempung montmorillonite akan mempunyai kecenderungan yang lebih besar terhadap perubahan volume dibanding dengan lempung kaolinite. Lempung padat mempunyai permeabilitas yang rendah dan tanah ini tidak dapat dipadatkan dengan baik pada waktu sangat basah (jenuh). Bekerja dengan tanah lempung yang sangat basah akan mengalami banyak kesulitan.

Peristiwa bertambahnya berat volume kering oleh beban dinamis disebut pemadatan. Oleh akibat beban dinamis, butir-butir tanah merapat satu sama lain sebagai akibat berkurangnya rongga udara. Ada perbedaan yang mendasar antara peristiwa pemadatan dan peristiwa konsolidasi tanah. Konsolidasi adalah pengurangan pelan-pelan volume pori yang berakibat bertambahnya berat volume kering akibat beban statis yang bekerja dalam periode tertentu. Sebagai contoh, pengurangan volume pori tanah jenuh air akibat berat tanah timbunan atau karena beban struktur di atasnya. Dalam tanah kohesif yang jenuh, proses konsolidasi akan diikuti oleh pengurangan volume tanahnya. Pada pemadatan dengan dinamis, proses bertambahnya berat volume kering tanah sebagai akibat pemadatan partikel yang diikuti oleh pengurangan volume udara dengan volume air tetap tidak berubah. Saat air ditambahkan pada pemadatan, air ini melunakkan partikel-partikel tanah. Partikel-partikel tanah mnggelincir satu sama lain dan bergerak pada posisi yang lebih rapat.

Pada awal pemadatan berat volume kering bertambah ketika kadar air bertambah. Pada kadar air nol ($w = 0$), berat volume tanah basah (γ_b) sama dengan berat volume tanah kering (γ_d), atau

$$\gamma_b (w = 0) = \gamma_d = \gamma_1 \quad (2.3)$$

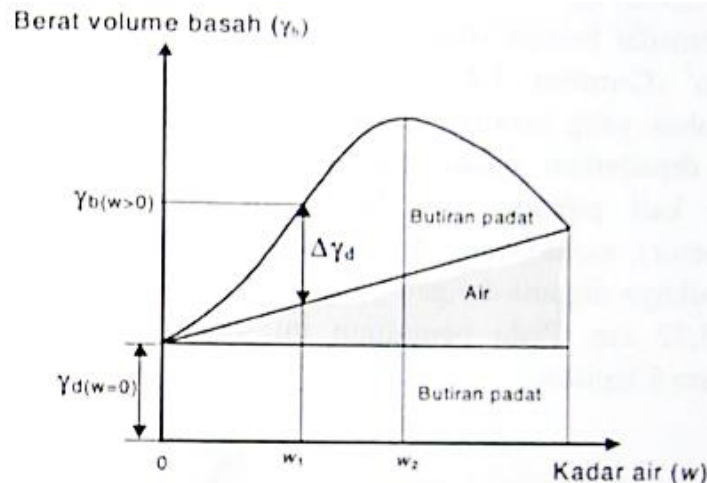
Ketika kadar air berangsur-angsur ditambah dan usaha pemadatan yang sama digunakan pada saat pemadatan, berat butiran tanah per volume satuan juga bertambah. Misalnya, pada saat kadar air sama dengan w_1 , maka berat volume basah (γ_b) menjadi:

$$\gamma_b = \gamma_2 \quad (2.4)$$

Berat volume kering (γ_d) pada kadar air tersebut:

$$\gamma_d (w = w_1) = \gamma_d (w = 0) + \Delta\gamma_d \quad (2.5)$$

Pada kadar air lebih besar dari kadar air tertentu, yaitu $w = w_2$ (saat kadar air optimum) kenaikan kadar air justru mengurangi berat volume keringnya. Hal ini karena, air mengisi rongga pori yang sebelumnya diisi oleh butiran padat. Kadar air saat berat volume kering mencapai maksimum (γ_{dmak}) disebut kadar air optimum (w_{opt}).



Gambar 2.9 Prinsip-prinsip Pemadatan

Untuk menentukan hubungan kadar air dan berat volume, dan untuk mengevaluasi tanah agar memenuhi persyaratan kepadatan maka umumnya dilakukan uji pemadatan.

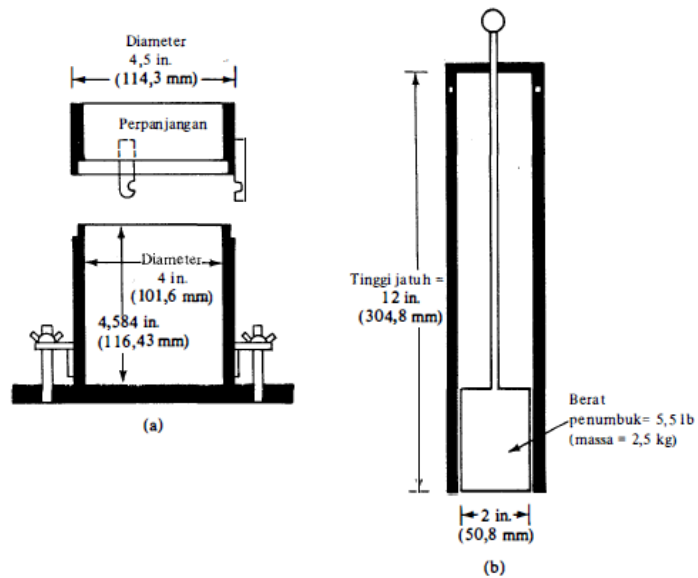
Proctor (1933) telah mengamati bahwa ada hubungan yang pasti antara kadar air dan berat volume kering tanah padat. Untuk berbagai jenis tanah pada umumnya, terdapat satu nilai kadar air optimum tertentu untuk mencapai berat volume kering maksimumnya. Hubungan berat volume kering (γ_d) dengan berat volume basah (γ_b) dan kadar air (w), dinyatakan dalam persamaan:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1+w} \quad (2.6)$$

Berat volume kering setelah pemadatan bergantung pada jenis tanah, kadar air dan usaha yang diberikan oleh alat penumbuknya. Karakteristik kepadatan tanah dapat dinilai dari pengujian standar laboratorium yang disebut uji *proctor*. Ada dua macam pemadatan laboratorium yang biasa digunakan untuk menentukan kadar air optimum dan berat isi kering maksimum yaitu sebagai berikut:

a. Pemadatan *Standard*

Dalam percobaan ini, tanah dipadatkan dalam *mould* yang volumenya $1/30 \text{ ft}^3$ dengan memakai alat penumbuk seberat 5,5 lbs atau 2,5 kg yang dijatuhkan setinggi 30,5 cm (1 ft), tanah dipadatkan 3 (tiga) lapisan dengan masing-masing lapisan 25 kali tumbukan.



Gambar 2.10 Alat Pengujian Kepadatan Tanah (*Proctor Standard Test*):

(a) Cetakan, (b) Penumbuk

(Sumber: Das, 1991)

Tabel 2.10 Spesifikasi percobaan Pemadatan *Standard*

Deskripsi	Ukuran	ASTM D-698		AASHTO T-99	
		Metoda A	Metoda B	Metoda C	Metoda D
Tabung					
Isi	ft ³	1/30	1/13,33	1/30	1/13,33
	cm ³	943,90	2124,30	943,90	2124,30
Tinggi	in	4,58	4,58	4,58	4,58
	mm	116,33	116,33	116,33	116,33
Diameter	in	4	6	4	6
	mm	101,60	152,40	101,60	152,40
Berat palu	lb	5,5	5,5	5,5	5,5
	kg	2,5	2,5	2,5	2,5
Tinggi jatuh palu	in	12	12	12	12
	mm	304,80	304,80	304,80	304,80
Jumlah lapis tanah		3	3	3	3
Jumlah pukulan / lapis		25	56	25	56
Tanah yang dicoba lolos / lewat ayakan		No.4	No.4	3/4 inch	3/4 inch

Sumber: G. Djatmiko Soedarmo, *Mekanika Tanah 1*, 1993

b. Pemadatan *Modified*

Pada pemadatan *modified*, *mould* yang digunakan masih tetap sama dengan pemadatan *standard*, hanya berat alat penumbuknya yang berbeda yaitu 10 lbs atau 4,5 kg. Pada pengujian ini, tanah di dalam *mould* ditumbuk dalam 5 lapisan.

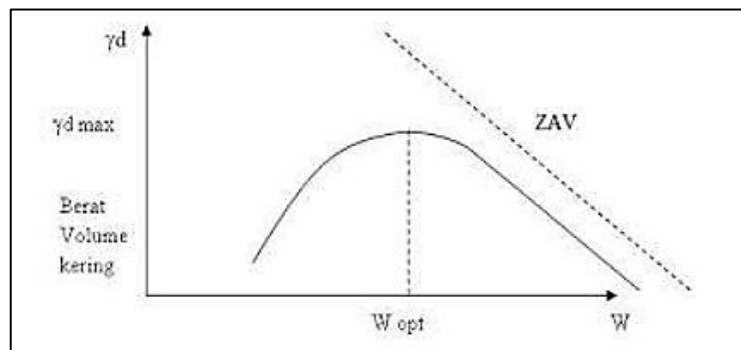
Tabel 2.11 Spesifikasi Percobaan Pemadatan *Modified*

Deskripsi	Ukuran	ASTM D-1557		AASHTO T-180	
		Metoda A	Metoda B	Metoda C	Metoda D
<i>Mould</i>					
Isi	ft ³	1/30	1/13,33	1/30	1/13,33
	cm ³	943,90	2124,30	943,90	2124,30
Tinggi	in	4,58	4,58	4,58	4,58
	mm	116,33	116,33	116,33	116,33
Diameter	in	4	6	4	6
	mm	101,60	152,40	101,60	152,40
Berat palu	lb	5,5	5,5	5,5	5,5
	kg	4,54	4,54	4,54	4,54
Tinggi jatuh palu	in	18	18	18	18
	mm	457,20	457,20	457,20	457,20
Jumlah lapis tanah		3	3	3	3
Jumlah pukulan / lapis		25	56	25	56
Tanah yang dicoba lolos / lewat ayakan		No.4	No.4	3/4 inch	3/4 inch

Sumber: G. Djatmiko Soedarmo, *Mekanika Tanah 1*, 1993

Dalam uji kepadatan, percobaan diulang paling sedikit 5 kali dengan kadar air tiap percobaan divariasikan. Kemudian, digambarkan sebuah grafik hubungan kadar air dan berat volume keringnya (lihat gambar 2.9). Kurva yang dihasilkan dari pengujian memperlihatkan nilai kadar air yang terbaik (W_{opt}) untuk mencapai berat volume kering terbesar atau kepadatan maksimum. Pada nilai kadar air rendah, untuk kebanyakan tanah, tanah cenderung bersifat kaku dan sulit dipadatkan. Setelah kadar air ditambah, tanah menjadi lebih lunak. Pada kadar air yang tinggi, berat volume kering berkurang. Bila seluruh udara di dalam tanah dapat dipaksa keluar pada waktu pemadatan, tanah akan berada dalam

kedudukan jenuh dan nilai berat volume kering akan menjadi maksimum. Akan tetapi dalam praktek, kondisi ini sulit dicapai (Hary C.H, Mekanika Tanah I, 2002).



Gambar 2.11 Hubungan Antara Kadar Air dan Berat Isi Kering Tanah (Hardiyatmo, 1992)

Tabel 2.12 Daftar metode pemadatan

Penjelasan	Metode A	Metode B	Metode C	Metode D
Diameter cetakan (mm)	101,6	152,4	101,6	152,4
Tinggi cetakan (mm)	116,33	116,33	116,33	116,33
Volume tetakan (m ³)	943,9	2124,3	943,9	2124,3
Massa penumbuk (kg)	4,54	4,54	4,54	4,54
Tinggi jatuh penumbuk (mm)	457,2	457,2	457,2	457,2
Jumlah lapis	5	5	5	5
Jumlah tumbukan per lapis	25	56	25	56
Bahan lolos saringan	No.4 (4,75 mm)	No.4 (4,75 mm)	19,00 mm (3/4")	19,00 mm (3/4")

2.10.2 California Bearing Ratio (CBR) (ASTM D1883-21)

California Highway-Division di Amerika Serikat menggunakan istilah California Bearing Ratio (CBR) untuk menyatakan daya dukung tanah. Istilah ini menunjukkan suatu perbandingan (rasio) dari gaya perlawanan penetrasi dari tanah terhadap penetrasi sebuah piston yang ditekan secara kontinyu dengan gaya perlawanan penetrasi serupa pada contoh tanah standar berupa batu pecah di California. Rasio tersebut diambil pada penetrasi 2.5 dan 5 mm (0.1 dan 0.2 inch) dengan ketentuan angka tertinggi yang digunakan. Gaya perlawanan penetrasi adalah gaya yang diperlukan untuk menahan penetrasi konstan dari suatu piston ke dalam tanah.

Metode perencanaan perkerasan jalan yang digunakan sekarang yaitu dengan metode empiris, yang biasa dikenal CBR (California Bearing Ratio). Metode ini dikembangkan oleh California State Highway Departement sebagai cara untuk menilai kekuatan tanah dasar jalan (subgrade). Nilai CBR akan digunakan untuk menentukan tebal lapisan perkerasan. Untuk menentukan tebal lapis perkerasan dari nilai CBR digunakan grafik-grafik yang dikembangkan untuk berbagai muatan roda kendaraan dengan intensitas lalu lintas.

Kekuatan tanah diuji dengan uji CBR sesuai dengan SNI-1744-2012. Nilai kekuatan tanah tersebut digunakan sebagai acuan perlu tidaknya distabilisasi setelah dibandingkan dengan yang disyaratkan dalam spesifikasinya. Pengujian CBR adalah perbandingan antara beban penetrasi suatu bahan terhadap bahan standar dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. Nilai CBR dihitung pada penetrasi sebesar 0,1 inch dan penetrasi sebesar 0,2 inch dan selanjutnya hasil kedua perhitungan tersebut dibandingkan sesuai dengan SNI 03-1744-2012 kemudian diambil hasil terbesar.

Nilai CBR adalah perbandingan (dalam persen) antara tekanan yang diperlukan untuk menembus tanah dengan piston berpenampang bulat seluas 3 $inch^2$ dengan kecepatan 0,05 $inch$ per menit terhadap tekanan yang diperlukan untuk menembus bahan *standard* tertentu. Tujuan dilakukan pengujian CBR ini adalah untuk mengetahui nilai CBR pada variasi kadar air pemadatan. Untuk menentukan kekuatan lapisan tanah dasar dengan cara percobaan CBR diperoleh nilai yang kemudian dipakai untuk menentukan tebal perkerasan yang diperlukan di atas lapisan yang nilai CBR nya tertentu (Wesley, 1977). Dalam menguji nilai CBR tanah dapat dilakukan di laboratorium. Tanah dasar (*subgrade*) pada kontruksi jalan baru merupakan tanah asli, tanah timbunan, atau tanah galian yang sudah dipadatkan sampai mencapai kepadatan 95% dari kepadatan maksimum. Dengan demikian daya dukung tanah dasar tersebut merupakan nilai kemampuan lapisan tanah memikul beban setelah tersebut tanah dipadatkan. CBR ini disebut CBR rencana titik dan karena disiapkan di laboratorium, disebut CBR laboratorium. Semakin tinggi nilai CBR tanah (*subgrade*) maka lapisan perkerasan di atasnya akan semakin tipis dan semakin kecil nilai CBR (daya

dukung tanah rendah), maka akan semakin tebal lapisan perkerasan di atasnya sesuai beban yang akan dipikulnya. Ada dua macam pengukuran CBR yaitu:

1. Nilai CBR untuk tekanan penetrasi pada 0,254 cm (0,1”) terhadap penetrasi *standard* besarnya 70,37 kg/cm² (1000 psi).

$$\text{Nilai CBR} = (\text{PI}/70,37) \times 100 \% (\text{PI, dalam kg / cm}^2). \quad (2.7)$$
2. Nilai CBR untuk tekanan penetrasi pada penetrasi 0,508 cm (0,2”) terhadap penetrasi *standard* yang besarnya 105,56 kg/cm² (1500 psi)

$$\text{Nilai CBR} = (\text{PI}/105,56) \times 100 \% (\text{PI, dalam kg / cm}^2). \quad (2.8)$$

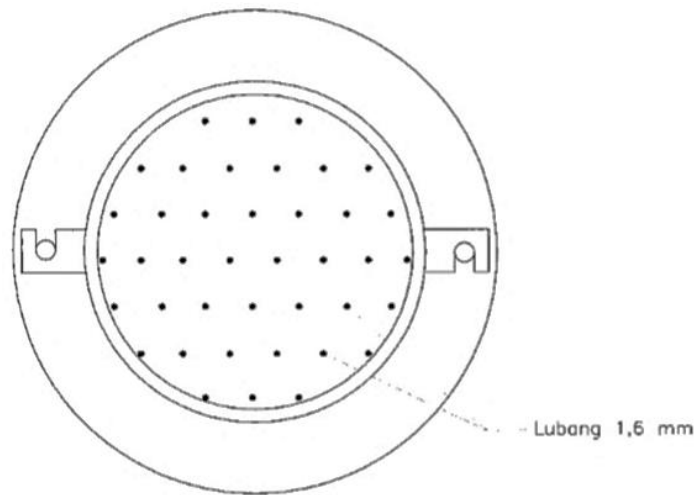
Dari kedua hitungan tersebut digunakan nilai terbesar. CBR laboratorium dapat dibedakan atas dua macam yaitu:

1. CBR laboratorium rendaman (*soaked design CBR*)
2. CBR laboratorium tanpa rendaman (*unsoaked design CBR*)

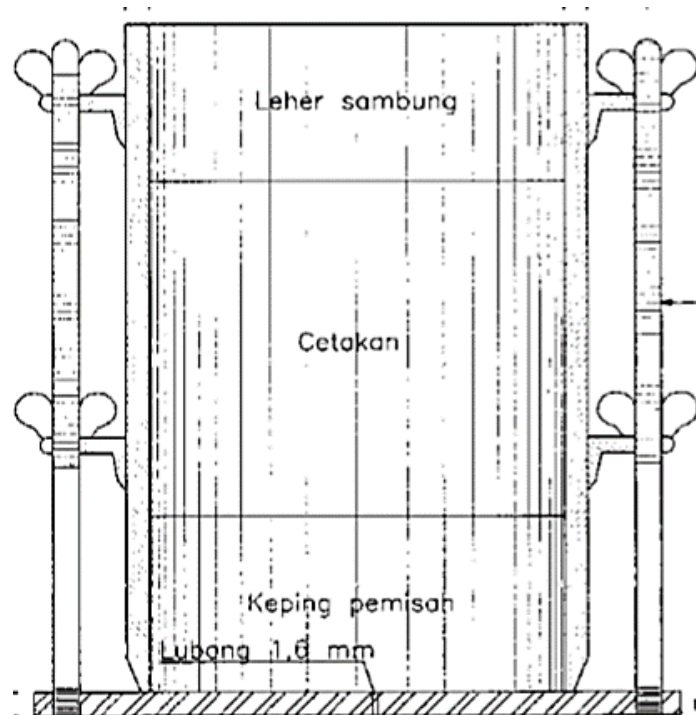
Pada pengujian CBR laboratorium rendaman pelaksanaannya lebih sulit karena membutuhkan waktu dan biaya relatif lebih besar dibandingkan CBR laboratorium tanpa rendaman. Sedangkan dari hasil pengujian CBR laboratorium tanpa rendaman sejauh ini selalu menghasilkan daya dukung tanah lebih besar dibandingkan dengan CBR laboratorium rendaman. Nilai CBR sangat bergantung pada proses pemadatan. Selain digunakan untuk menilai kekuatan tanah dasar atau bahan lain yang hendak dipakai, CBR juga digunakan sebagai dasar untuk menentukan tebal lapisan dari suatu perkerasan serta untuk menilai *subgrade* yang dipadatkan hingga mencapai kepadatan kering maksimum dan memben tuk profil sesuai yang direncanakan.

Tabel 2.13 Standar Lapisan Perkerasan Jalan Raya

CBR (%)	<i>General Rating</i>	Kegunaan
0-3	<i>Very Poor</i>	<i>Sub-grade</i>
3-7	<i>Poor to Fair</i>	<i>Sub-grade</i>
7-20	<i>Fair</i>	<i>Sub-base</i>
20-50	<i>Good</i>	<i>Base of Sub-base</i>
>50	<i>Excellent</i>	<i>Base</i>

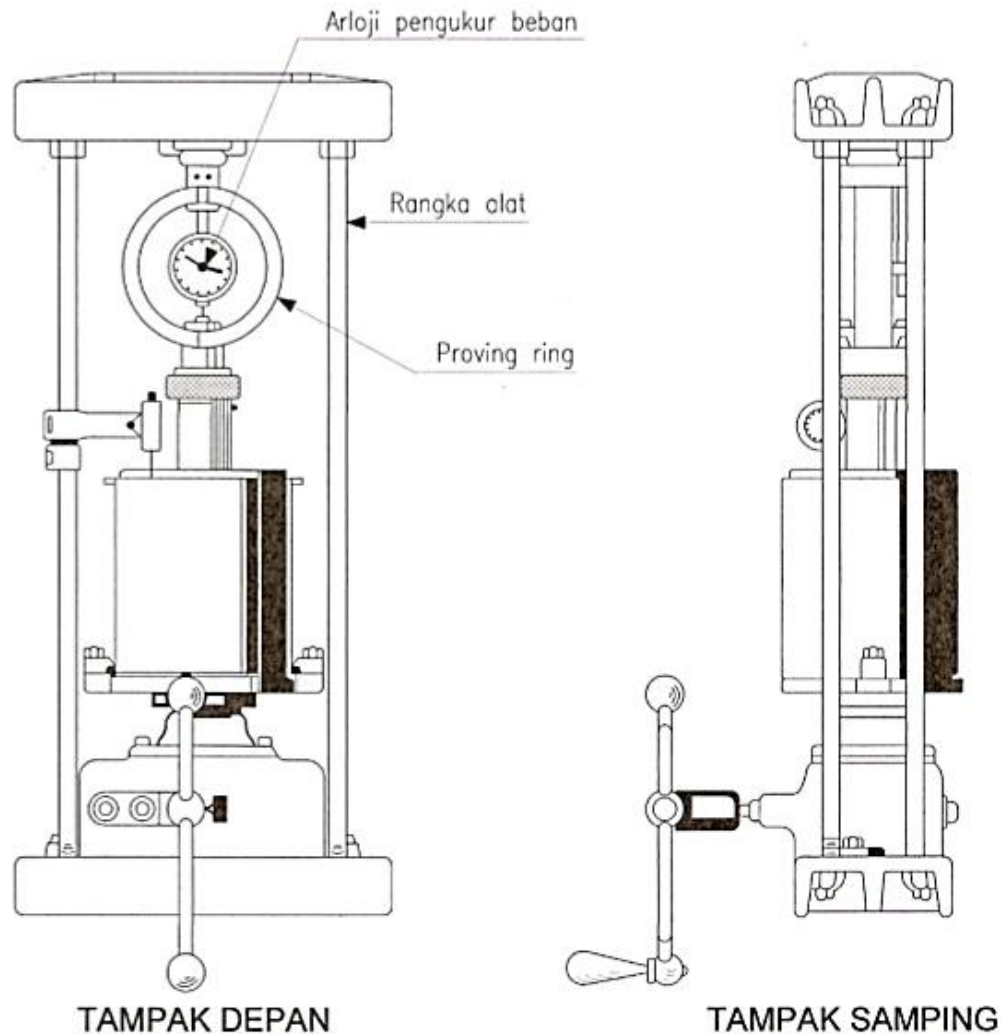


Tampak atas



Tampak Depan

Gambar 2.12 Cetakan CBR Dengan Leher Sambung



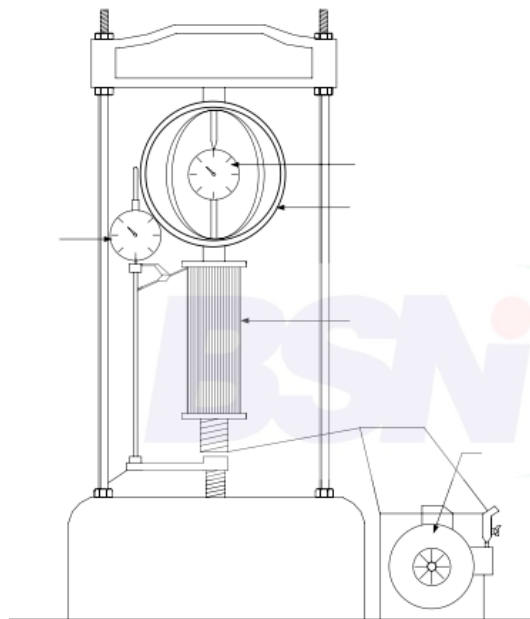
Gambar 2.13 Alat Uji Penetrasi CBR Laboratorium

2.10.3 Pengujian *Unconfined Compressive Strength* (UCS) (ASTM D2166)

Tanah merupakan suatu bagian yang sangat menentukan dalam perencanaan suatu konstruksi, karena menentukan kestabilan konstruksi tersebut. Kekuatan tanah tersebut tidak sama untuk tempat-tempat yang berbeda, sehingga hal ini mengharuskan para perencana untuk memperhatikan kondisi tanah sebagai suatu elemen kestabilan konstruksi yang sangat menentukan keadaan konstruksi pada masa penggunaannya.

Kekuatan suatu tanah dipengaruhi oleh faktor-faktor yang sangat kompleks dari parameter-parameter yang didapatkan dari suatu pemeriksaan yang mendalam. Pemeriksaan ini dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat tanah tersebut, yang meliputi sifat fisis dan mekanis tanah.

Pengujian uji tekan bebas ini dimaksudkan untuk menentukan besarnya kekuatan tekan bebas contoh tanah dan batuan yang bersifat kohesif dalam keadaan asli maupun buatan (*remoulded*). Kuat tekan bebas (q_u) adalah harga tegangan aksial maksimum yang dapat ditahan oleh benda uji silindris sebelum mengalami keruntuhan geser atau pada saat renggangan aksial mencapai 20%. Derajat kepekaan/ sensitivitas (S_t) adalah rasio antara kuat tekan bebas dalam kondisi asli (*undisturbed*) dan dalam kondisi teremas (*remolded*). Untuk menentukan kekuatan tanah pada percobaan ini dapat ditentukan dengan memasukkan benda uji sedikit demi sedikit kedalam tabung yang diberi oli sambil ditekan-tekan jari lalu dikeluarkan dan diletakkan dibawah mesin tekan dan untuk selanjutnya dilakukan pembacaan pada jarum dial dan jarum proving ring sampai benda uji mengalami keruntuhan.



Gambar 2.14 Alat Uji Penetrasi *Unconfined Compressive Strength*

Tabel 2.14 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Nilai Kuat Tekan Bebas

Sifat Tanah	<i>Unconfined Compressive Strength</i> (kg/cm ²)
<i>Very Soft</i>	< 0,25
<i>Soft</i>	0,25 - 0,50
<i>Firm / Medium</i>	0,50 - 1,00
<i>Stiff</i>	1,00 - 2,00
<i>Very Stiff</i>	2,00 - 4,00
<i>Hard</i>	> 4,00

Sumber: Das, 1988

Adapun perhitungan yang akan dilakukan dalam pengujian *Unconfined Compressive Strength* adalah sebagai berikut

1. Menghitung regangan aksial (ε_1)

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (2.9)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \text{regangan aksial (mm)} \\ \Delta H &= \text{perubahan tinggi benda uji (mm)} \\ H_0 &= \text{tinggi benda uji semula (mm)} \end{aligned}$$

2. Menghitung luas terkoreksi (A_c)

$$A_c = \frac{A_0 \times 10^{-6}}{(1 - \varepsilon_1)} \quad (2.10)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} A_c &= \text{luas penampang rata-rata atau luas terkoreksi (m}^2\text{)} \\ A_0 &= \text{luas penampang rata-rata benda uji semula (mm}^2\text{)} \\ \varepsilon_1 &= \text{regangan aksial, dinyatakan dalam desimal} \end{aligned}$$

3. Menghitung Tegangan (σ_c)

$$\sigma_c = \frac{P}{A_c} \quad (2.11)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \text{tegangan (kN/m}^2\text{)} \\ P &= \text{beban yang diberikan (kN)} \\ A_c &= \text{luas penampang rata-rata atau luas terkoreksi (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

4. Menghitung Sensitifitas (S_T)

$$S_T = \frac{qu (asli)}{qu (remoulded)} \quad (2.12)$$

Dalam praktek untuk mengusahakan agar kuat geser *undrained* yang diperoleh dari hasil uji tekan bebas mendekati sama dengan hasil uji triaksial pada kondisi keruntuhan, beberapa hal harus dipenuhi, antara lain (Holtz dan Kovacs, 1981):

1. Benda uji harus 100% jenuh, kalau tidak, akan terjadi desakan udara di dalam ruang pori yang menyebabkan angka pori (e) berkurang sehingga kekuatan benda uji bertambah.

2. Benda uji tidak boleh mengandung retakan atau kerusakan yang lain. Dengan kata lain benda uji harus utuh dan merupakan lempung homogen.
3. Tanah harus terdiri dari butiran sangat halus. Hal ini berarti bahwa penentuan kuat geser tanah dari uji tekan bebas hanya cocok untuk tanah lempung.
4. Proses pengujian harus berlangsung dengan cepat sampai contoh tanah mencapai keruntuhan. Jika waktu yang dibutuhkan dalam pengujian terlalu lama, penguapan dan pengeringan benda uji akan menambah tekanan kekang dan dapat menghasilkan kuat geser yang lebih tinggi. Waktu yang cocok biasanya sekitar 5 sampai 15 menit.

Uji kuat tekan bebas merupakan cara memperoleh kuat geser tanah kohesif yang cepat dan ekonomis. Namun, uji ini tidak dapat dilaksanakan pada tanah pasir. Contoh tanah yang dapat digunakan adalah yang berasal dari tanah asli (*undisturbed sample*) maupun untuk tanah yang dibuat di laboratorium.

2.10.4 Geser Langsung (ASTM D3080-11)

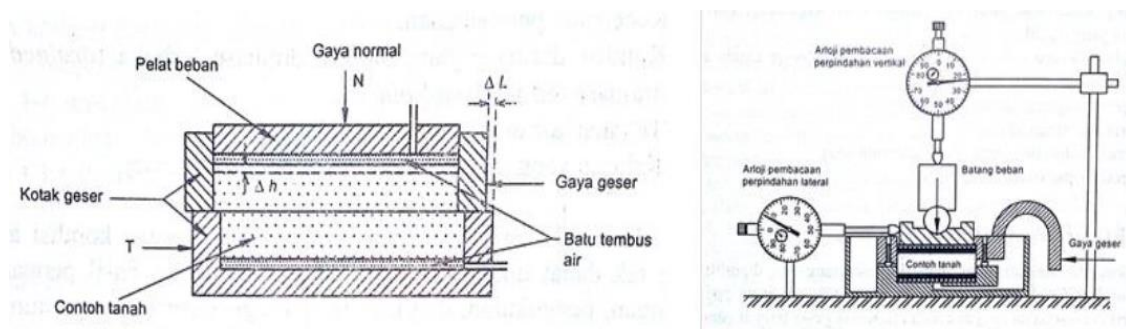
Parameter kuat geser tanah ditentukan dari uji-uji di laboratorium pada benda uji yang diambil dari lapangan yaitu dari hasil pengeboran tanah yang dianggap mewakili. Tanah yang diambil dari lapangan harus diusahakan tidak berubah kondisinya, terutama pada contoh tanah asli (*undisturbed*), dimana masalahnya adalah harus menjaga kadar air dan susunan tanah di lapangannya supaya tidak berubah. Pengaruh kerusakan contoh benda uji akan berakibat fatal terutama pada pengujian tanah lempung.

Kekuatan geser suatu tanah tergantung pada tahanan geser antara butir-butir tanah dan kohesi pada permukaan butir tanah. Nilai kekuatan geser tanah ini berubah-ubah sesuai dengan jenis dan kondisi tanah. Nilai ini digunakan untuk menghitung daya dukung tanah (*bearing capacity*), tekanan tanah terhadap dinding penahan (*earth pressure*) dan kestabilan lereng (*slope stability*).

Pengujian ini dimaksudkan untuk memperoleh tahanan geser tanah pada tegangan normal tertentu. Tujuannya adalah untuk mendapatkan kuat geser tanah. Suatu beban yang dikerjakan pada suatu masa tanah akan selalu menghasilkan tegangan dengan intensitas yang berbeda-beda di dalam zona berbentuk bola lampu di bawah beban tersebut (Bowles, 1993).

Kuat geser tanah sebagai perlawanan internal tanah terhadap persatuan luas terhadap keruntuhan atau pengerasan sepanjang bidang geser dalam tanah yang dimaksud (Das, 1994).

Diagram sistematis dari alat uji geser langsung diperlihatkan pada Gambar 2.6, peralatan pengujian meliputi kotak geser dari besi, yang berfungsi sebagai tempat benda uji. Kotak geser tempat benda uji dapat berbentuk bujursangkar maupun lingkaran, dengan luas kira-kira $19,35 \text{ cm}^2$ sampai $25,8 \text{ cm}^2$ dengan tinggi $2,54 \text{ cm}$ (1"). Kotak terpisah menjadi 2 bagian yang sama. Tegangan normal pada benda uji diberikan dari atas kotak geser. Gaya geser diterapkan pada setengah bagian atau dari kotak geser, untuk memberikan geseran pada tengah-tengah benda uji.



Gambar 2.15 Alat Pengujian Geser Langsung

Pada benda uji yang kering, kedua batu tembus air (*porous*) tidak diperlukan. Selama pengujian, perpindahan (ΔL) akibat gaya geser dari setengah bagian atau kotak geser dan perubahan tebal (Δh) benda uji dicatat.

Alat uji geser langsung dapat berbentuk bujur sangkar. Kotak pengujian dapat bervariasi dari yang luasnya $100 \times 100 \text{ mm}^2$ sampai $300 \times 300 \text{ mm}^2$. Kotak geser dengan ukuran yang besar digunakan untuk uji tanah dengan butiran yang berdiameter lebih besar.

Terdapat beberapa batasan atau kekurangan dalam uji geser langsung, antara lain:

1. Tanah benda uji dipaksa untuk mengalami keruntuhan (*failure*) pada bidang yang telah ditentukan sebelumnya.
2. Distribusi tegangan pada bidang kegagalan tidak *uniform*.
3. Tekanan air pori tidak dapat diukur.

4. Deformasi yang diterapkan pada benda uji hanya terbatas pada gerakan maksimum sebesar alat geser langsung dapat digerakkan.
5. Pola tegangan pada kenyataannya adalah sangat kompleks dan arah dari bidang-bidang tegangan utama berotasi ketika regangan geser ditambah.
6. Drainase tidak dapat dikontrol, kecuali hanya dapat ditentukan kecepatan penggeserannya.
7. Luas bidang kontak antara tanah di kedua setengah bagian kotak geser berkurang ketika pengujian berlangsung. Koreksi mengenai kondisi ini diberikan oleh Petley (1966). Tetapi pengaruhnya sangat kecil pada hasil pengujian, hingga dapat diabaikan.

Menurut teori Mohr (1910) kondisi keruntuhan suatu bahan terjadi akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Hubungan fungsi antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya, dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\tau = f(\sigma) \quad (2.13)$$

Dimana :

τ = Tegangan Geser pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan (failure)

σ = Tegangan Normal

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan (Hary Cristady, 2002). Coulomb (1776) mendefinisikan $f(\sigma)$ seperti pada persamaan sebagai berikut:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \Phi \quad (2.14)$$

Dengan:

T = Kuat geser tanah (kg/m^2)

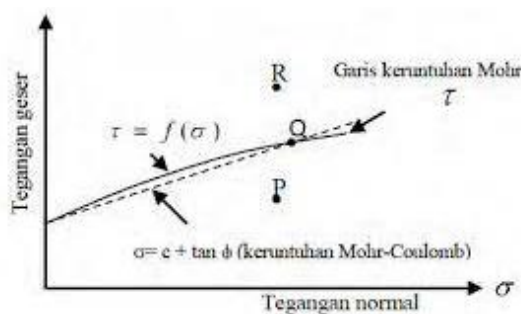
C = Kohesi tanah (kg/m^2)

Φ = Sudut gesek dalam tanah (derajat)

Σ = Tegangan normal pada bidang runtuh (kg/m^2)

Garis keruntuhan (failure envelope) menurut Coulomb (1776) berbentuk garis lengkung seperti pada gambar 2.16 dimana untuk sebagian besar masalah-masalah mekanika tanah, garis tersebut cukup didekati dengan sebuah garis lurus yang menunjukkan hubungan linear antara tegangan normal dan kekuatan geser

(Das,1995). Tanah, seperti halnya bahan padat, akan runtuh karena tarikan maupun geseran. Tegangan tarik dapat menyebabkan retakan pada suatu keadaan praktis yang penting. Walaupun demikian, sebagian besar masalah dalam teknik sipil dikarenakan hanya memperhatikan tahanan terhadap keruntuhan oleh geseran



Gambar 2.16 Garis Keruntuhan Menurut Mohr dan Hukum Keruntuhan Mohr – Coulomb (Hary Cristady, 2002)

Jika tegangan-tegangan baru mencapai titik P, keruntuhan tanah akibat geser tidak akan terjadi. Keruntuhan geser akan terjadi jika tegangan-tegangan mencapai titik Q yang terletak pada garis selubung kegagalan (failure envelope). Kedudukan tegangan yang ditunjukkan oleh titik R tidak akan pernah terjadi, karena sebelum tegangan yang terjadi mencapai titik R, bahan sudah mengalami keruntuhan. Tegangan-tegangan efektif yang terjadi di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh tekanan air pori.

2.10.5 Konsolidasi (ASTM D4186)

Tanah merupakan suatu material yang berpori besar, bila suatu lapisan tanah mengalami pembebanan akibat beban di atasnya, maka tanah di dibawah beban yang bekerja tersebut akan mengalami kenaikan tegangan, eksese dari kenaikan tegangan ini adalah terjadinya penurunan elevasi tanah dasar (*settlement*). Pembebanan ini mengakibatkan adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel tanah, dan keluarnya air pori dari tanah yang disertai berkurangnya volume tanah. Hal inilah yang mengakibatkan terjadinya penurunan tanah.

Konsolidasi adalah suatu proses pengecilan volume secara perlahan-lahan pada tanah jenuh sempurna dengan permeabilitas rendah akibat pengaliran

sebagian air pori. Dengan kata lain, pengertian konsolidasi adalah proses terperasnya air tanah akibat bekerjanya beban, yang terjadi sebagai fungsi waktu karena kecilnya permeabilitas tanah (Simatupang, 2016).

Konsolidasi tanah dapat dibagi menjadi konsolidasi primer dan konsolidasi sekunder, dimana konsolidasi sekunder terjadi setelah proses konsolidasi primer selesai. Pada konsolidasi primer, tekanan air pori akan berkurang akibat keluarnya air dari pori-pori tanah, kemudian dilanjutkan dengan konsolidasi sekunder dengan tekanan air pori konstan (Rahayu, 2012).

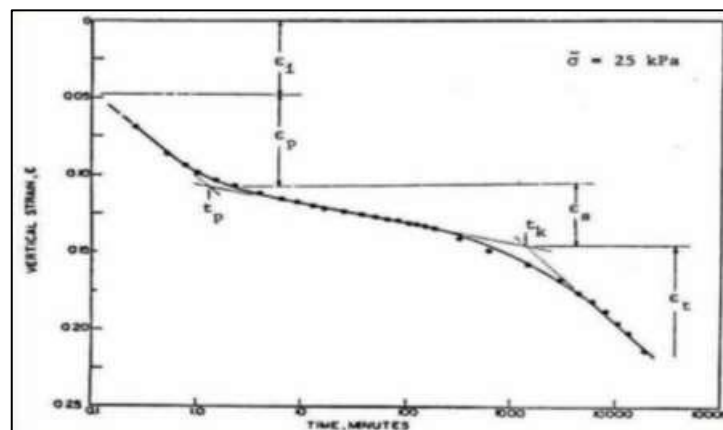
Perpindahan permukaan tanah secara vertikal yang berhubungan dengan perubahan volume tanah pada suatu tingkat pada saat proses konsolidasi terjadi disebut sebagai penurunan konsolidasi. Secara umum, penurunan dapat diklasifikasikan menjadi 3 tahap, yaitu:

1. *Immediate Settlement* (penurunan seketika), diakibatkan dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air, tanpa adanya perubahan kadar air. Umumnya, penurunan ini diturunkan dari teori elastisitas. *Immediate settlement* ini biasanya terjadi selama proses konstruksi berlangsung. Parameter tanah yang dibutuhkan untuk perhitungan adalah *undrained modulus* dengan uji coba tanah yang diperlukan seperti SPT, Sondir (*dutch cone penetration test*), dan *Pressuremeter test*.
2. *Primary Consolidation Settlement* (penurunan konsolidasi primer), yaitu penurunan yang disebabkan perubahan volume tanah selama periode keluarnya air pori dari tanah. Pada penurunan ini, tegangan air pori secara kontinyu berpindah ke dalam tegangan efektif sebagai akibat dari keluarnya air pori. Penurunan konsolidasi ini umumnya terjadi pada lapisan tanah kohesif (*clay* / lempung).
3. *Secondary Consolidation Settlement* (penurunan konsolidasi sekunder), adalah penurunan setelah tekanan air pori hilang seluruhnya. Hal ini lebih disebabkan oleh proses pemampatan akibat penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah.

Pemampatan tanah gambut dapat diamati dengan melihat kurva regangan terhadap log waktu. Komponen-komponen pemampatan tanah gambut terdiri dari (Nursawemi *et al.*, 2015):

- regangan seketika (*instantaneous strain*, ϵ_i) Terjadi dengan segera setelah beban diberikan karena tertekannya rongga udara.
- Regangan primer (*primary strain*, ϵ_p) Terjadi pada waktu yang relatif singkat sampai waktu t_p dengan kecepatan pemampatan yang tinggi karena disipasi tekanan air pori, hal ini biasanya terjadi 10 menit.
- Regangan sekunder (*secondary strain*, ϵ_s) Terjadi setelah regangan primer berakhir dengan waktu yang relatif lama dimulai waktu (t_p) sampai batas waktu (t_k) dimana perubahan regangan linier.
- Regangan tersier (*tertiary strain*, ϵ_t) Dimulai setelah waktu t_k dimana perubahan regangan mulai tidak linier lagi. Regangan tersier berlangsung terus untuk waktu yang takterhingga sampai seluruh proses pemampatan berakhir.

Adapun hubungan antara regangan dengan log waktu dapat dilihat pada Gambar 2.17 di bawah ini



Gambar 2.17 Kurva Rengangan – Log Waktu Pada Tanah Gambut Dengan Beban 25 Kpa (Soepandji dan Bharata, 1996)

Untuk tekanan efektif yang besar (25 kPa sampai dengan 400 kPa), penelitian yang telah dilakukan oleh Soepandji dan Bharata menunjukkan hubungan vertikal dengan waktu terlihat pada Gambar 2.17 Respon tekanan air pori akibat peningkatan tekanan efektif dapat ditunjukkan pula dengan berkurangnya daya rembes secara cepat.

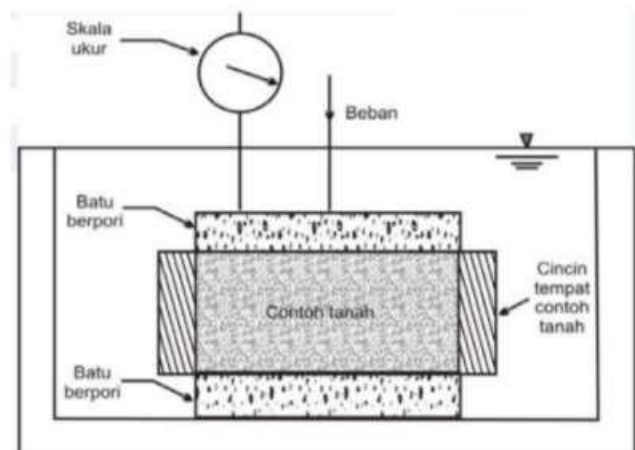
Uji konsolidasi satu dimensi yang biasa digunakan untuk memprediksi penurunan tanah yang dikenalkan oleh Terzaghi. Uji tersebut menjelaskan bahwa

deformasi dan arah aliran yang terjadi hanya pada satu arah yaitu hanya pada arah vertikal. Pengujian konsolidasi tanah di laboratorium, biasanya digunakan alat konsolidasi (*Consolidated apparatus atau oedometer*). Oedometer pertama kali diciptakan oleh Terzaghi (1936).



Gambar 2.18 Alat Konsolidasi

(Dokumentasi Laboratorium Mekanika Tanah FT UNTAN, 2022)



Gambar 2.19 Sketsa Konsolidometer (Oedometer)

Pada Gambar 2.19 diatas memperlihatkan prinsip alat konsolidasi oedometer, contoh tanah pada percobaan konsolidasi dimasukkan ke dalam suatu cincin dan diapit oleh batu berpori pada sisi atas dan bawah cincin. Kemudian, cincin tersebut diletakkan ke dalam sel konsolidasi yang diisi oleh air agar tidak

kering. Setelah sel konsolidasi dipasang pada alat, contoh tanah diberikan beban vertikal dengan berat tertentu dan penurunan yang terjadi diukur dengan arloji petunjuk. Pembebanan pada contoh tanah diberikan secara bertahap (sedikit demi sedikit), setiap beban dibiarkan sampai penurunan berhenti. Umumnya diberikan waktu 24 jam untuk tujuan ini, dan penurunan diukur serta dicatat selama 24 jam. Besarnya penurunan yang terjadi pada setiap tegangan diambil dari pembacaan arloji (BSN, 2011).

2.11 Penelitian yang pernah dilakukan

Beberapa peneliti telah melakukan berbagai penelitian tentang upaya stabilisasi tanah dengan stabilisator yang beraneka ragam seperti: kapur, semen, kombinasi semen dan abu terbang, GEOSTA, aspal dan lain-lain. alasan penggunaan bahan tersebut adalah kesesuaiannya dengan jenis tanah, mudah didapat, murah harganya, dan tidak mencemari lingkungan. Penelitian tersebut dapat dijadikan sebagai referensi untuk penelitian lebih lanjut dengan variasi dan pemeraman yang berbeda. Beberapa hasil penelitiannya adalah sebagai berikut:

1. Arif (2017) meneliti tentang Stabilisasi Tanah Lunak dengan abu ampas tebu, fly ash, kapur dan semen terhadap sifat mekanis tanah. Penelitian ini menggunakan metodologi Pemadatan, *California Bearing Ratio* (CBR), *Unconfined Compression Test* (UCT), Konsolidasi dan Triaksial. Hasil diperoleh bahwa tanah asli memiliki kandungan serat sebesar 52,4% dan bahan organik 8,1%, mengacu pada sistem klasifikasi USDA tanah asli ini termasuk kedalam campuran tanah liat dan lempung berlanau. Dari pengujian ini dapat bahwa nilai daya dukung tanah dan kuat geser pada masing-masing campuran mengalami peningkatan dari kondisi tanah asli, campuran maksimal terjadi pada campuran desain A-3 50% tanah asli dan 50% bahan *additive* (5% kapur + 2,5% ampas tebu + 17,5% *fly ash* + 25% semen).
2. Roesyanto et.al. (2019) meneliti tanah lempung dan kapur karbonat sebagai bahan stabilisasi. Penelitian ini menggunakan metodologi *California Bearing Ratio* (CBR) dan *Unconfined Compression Test* (UCT). Hasil penelitian diperoleh bahwa klasifikasi tanah asli menurut AASHTO tergolong A-7-6 (9) dan menurut USCS tergolong CL (*Clay* –

Low Plasticity). Sampel tanah asli memiliki kadar air 34,43%; berat spesifik 2,65; batas cair 47,33%; batas plastis 17,45% dan indeks plastisitas 29,88%. Nilai California Bearing Ratio (CBR) laboratorium tidak terendam (*unsoaked*) pada tanah asli sebesar 6,29% dan nilai *Unconfined Compression Test* (UCT) untuk tanah asli sebesar 1,42 kg/cm². Sedangkan nilai CBR tidak terendam (*unsoaked*) untuk semua variasi yang mencapai nilai optimum ada pada variasi 12% CaCO₃ sebesar 11,46%. Nilai kuat tekan bebas UCT untuk semua variasi yang mencapai nilai optimum ada pada variasi 12% CaCO₃ sebesar 3,12 kg/cm².

3. Ahmad (2018) Stabilisasi Tanah Lempung yang Dicampur Zat *Additive* Kapur dan Matos Ditinjau Dari Waktu Perendaman. Dari penelitian yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Lampung diketahui bahwa tanah yang berasal dari daerah Sidorejo, Kecamatan Sidomulyo Lampung Selatan diklasifikasikan ke dalam A-7-5 yaitu tanah lempung yang memiliki nilai daya dukung tanah sebesar 7%. Setelah dilakukan perbaikan tanah dengan zat *additive* kapur dengan kadar optimum yaitu 12% dan *stabilizer* matos sebanyak 1 kg/m³ yang kemudian dilakukan uji CBR rendaman dengan durasi rendaman 4, 5, 14 dan 28 hari diperoleh nilai CBR sebesar 24% pada 4 hari, 22% pada 5 hari, 15,6% pada 14 hari dan 9% pada 28 hari.