

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pengertian Tanah

Istilah “tanah” dalam bidang mekanika tanah dimaksudkan untuk mencangkup semua bahan dari tanah lempung sampai kerakal; jadi semua endapan alam yang bersangkutan dengan Teknik sipil kecuali batuan. Batuan menjadi ilmu tersendiri, yaitu mekanika batuan (Wesley, 2012).

Tanah dibentuk oleh pelapukan fisika dan kimiawi pada batuan. Pelapukan fisika terdiri oleh dua jenis. Jenis pertama adalah penghancuran disebabkan terutama oleh pengaruh salju dan es. Jenis kedua adalah pengikisan, akibat air, angin, ataupun sungai es (*glacier*). Proses ini menghasilkan butir yang kecil sampai yang besar, namun komposisinya masih tetap sama dengan batuan asalnya. Butir lanau dan pasir biasanya terdiri atas satu jenis mineral saja. Butir lebih kasar terdiri atas beberapa jenis mineral, seperti halnya pada batuan asalnya. Perlu dimengerti bahwa pelapukan fisika tidak pernah menghasilkan tanah bersifat lempung sekalipun ukurannya sama kecilnya dengan butir lempung. Untuk menghasilkan lempung, harus ada juga pelapukan kimiawi (Wesley, 2012).

Pelapukan kimiawi adalah proses yang lebih rumit daripada pelapukan fisika. Pelapukan kimiawi memerlukan air serta oksigen dan karbon dioksida. Proses kimiawi ini mengubah mineral yang terkandung dalam batuan menjadi jenis mineral lain yang sangat berbeda sifatnya. Mineral baru ini disebut mineral lempung (*clay minerals*). Jenis mineral ini yang terkenal adalah kaolinite, illite dan montmorillonite. Mineral ini masih termasuk bahan yang disebut kristalin, dan besarnya umumnya lebih kecil dari 0,002 mm. Mineral lempung inilah yang menghasilkan sifat lempung yang khusus, yaitu kohesi serta plastisitas (Wesley, 2012).

Jenis mineral lempung yang dihasilkan pada suatu keadaan tertentu bergantung pada batuan asal dan lingkungan pelapukan. Faktor-faktor penting adalah iklim, topografi, dan nilai ph dari air yang merembes dalam

tanah. Misalnya, kaolinite dibentuk dari mineral feldspar akibat air dan karbon dioksida. Kwarsa adalah mineral yang paling tahan terhadap pelapukan, sehingga tanah yang berasal dari granit biasanya mengandung banyak butir kasar yang terdiri atas kwarsa, (tercampur dengan butir lain yang lebih halus). Pelapukan kimiawi paling keras pada ildim panas dan basah. Pada iklim semacam ini pelapukan dapat berlangsung sampai sangat dalam. Di Indonesia pelapukan masih berlangsung sampai sedalam puluhan meter. Cara pelapukan sebetulnya kurang penting diketahui dengan teliti; yang penting adalah sifat tanah yang dihasilkan oleh proses pelapukan (Wesley, 2012).

Selain pelapukan fisika dan kimiawi, ada faktor lain yang terlibat dalam cara pembentukan tanah. Faktor terpenting adalah pengangkutan butir tanah dan kemudian pengendapannya di lain tempat seperti laut atau danau. Tanah yang terbentuk langsung akibat pelapukan kimiawi disebut tanah residu (*residual soil*). Tanah ini tetap pada tempat pembentukannya di atas batuan asalnya. Hujan menyebabkan erosi dan tanah diangkut melalui sungai sampai mencapai laut atau danau. Di sini terjadi pengendapan lapisan demi lapisan pada dasar laut atau danau. Proses ini dapat berlangsung selama ribuan atau jutaan tahun. Tanah ini disebut tanah endapan (*sedimentary soil*) atau tanah yang terangkut (*transported soil*). (Wesley, 2012).

B. Klasifikasi Tanah

Istilah pasir, lempung, lanau, atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batas ukuran butiran butiran yang telah ditentukan. Akan tetapi, istilah yang sama juga digunakan untuk menggambarkan sifat tanah yang khusus. Sebagai contoh, lempung adalah jenis tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedang pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan tidak plastis (Hardiyatmo, 2012).

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tapi mempunyai sifat yang serupa ke dalam

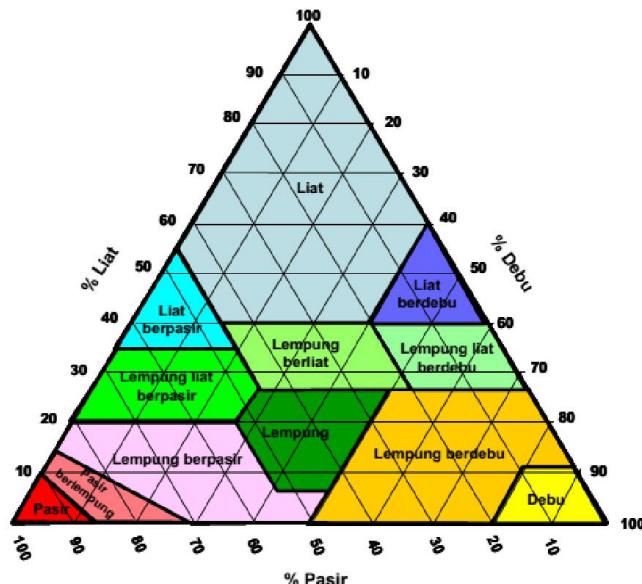
kelompok-kelompok dan subkelompok-subkelompok berdasarkan pemakaianya. Sistem klasifikasi memberikan suatu bahasa yang mudah untuk menjelaskan secara singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan yang terinci. Sebagian besar sistem klasifikasi tanah yang telah dikembangkan untuk tujuan rekayasa didasarkan pada sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran dan plastisitas. Walaupun saat ini terdapat berbagai sistem klasifikasi tanah, tetapi tidak ada satupun dari sistem-sistem tersebut yang benar-benar memberikan penjelasan yang tegas mengenai segala kemungkinan pemakaianya. Hal ini disebabkan karena sifat-sifat tanah yang sangat bervariasi (Das, 1995).

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. Tabel 3.1 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 (Das, 1995).

a. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Ukuran Butir

Menurut Das (1995) dalam bukunya ada 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 1 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 1. Klasifikasi berdasarkan tekstur oleh Departemen Amerika Serikat (USDA).

(Sumber: Kurnia, dkk 2006)

b. Sistem Klasifikasi Kesatuan Tanah (*Unified soil classification system*)

Sistem ini pada mulanya diperkenalkan oleh *Casagrande* (1942) untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang yang dilaksanakan oleh *The Army Corps of Engineers*.

Sistem klasifikasi berdasarkan hasil-hasil percobaan laboratorium yang paling banyak dipakai secara meluas adalah sistem klasifikasi kesatuan tanah. Percobaan laboratorium yang dipakai adalah analisis ukuran butir dan batas-batas Atterberg. Semua tanah diberi dua huruf penunjuk berdasarkan hasil-hasil percobaan ini. 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 contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal **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 contoh 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 untuk klasifikasi *USCS*, adalah:

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

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

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

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

Tanah berbutir kasar ditandai dengan simbol kelompok seperti : *GW*, *GP*, *GM*, *GC*, *SW*, *SP*, *SM* dan *SC*. Untuk klasifikasi yang benar, perlu diperhatikan faktor-faktor berikut ini:

1. persentase butiran yang lolos ayakan No. 200 (ini adalah fraksi halus)
2. persentase fraksi kasar yang lolos ayakan No. 40
3. koefisien keseragaman (C_u) dan koefisien gradasi (C_c) untuk tanah dimana 0 – 12 % lolos ayakan No. 200
4. batas cair (LL) dan indeks plastisitas (IP) bagian tanah yang lolos ayakan No. 40 (untuk tanah dimana 5 % atau lebih lolos ayakan No. 200).

Bilamana persentase butiran yang lolos ayakan No. 200 adalah antara 5 sampai 12 %, symbol ganda seperti : *GW-GM*, *GP-GM*, *GW-GC*, *GP-GC*, *SW-SM*, *SW-SC*, *SP-SM* dan *SP-SC* diperlukan, secara rinci diberikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Sistem Klasifikasi USCS.

Divisi Utama	Simbol	Nama Umum		Kriteria Klasifikasi
Tanah berbutir kasar $\geq 50\%$ butiran tertahan saringan No. 200	GW	Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	Kerikil bersih (hanya kerikil)	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ 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
	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau	Kerikil dengan Butiran halus	Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$
	GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung		Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$
	SW	Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	Pasir bersih (hanya pasir)	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3
	SP	Pasir bergradasi-buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW
	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau		Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$
	SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung		Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$
	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung	Lanau dan lempung batas cair $\leq 50\%$	Klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus : Kurang dari 5% lolos saringan no.200: GM, 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
	CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (<i>lean clays</i>)		
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200	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		Diagram Plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan kasar. Batas <i>Atterberg</i> yang termasuk dalam daerah yang diarsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.
	CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (<i>fat clays</i>)		
	OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi		Batas Cair LL (%) Garis A : $PI = 0.73 (LL - 20)$
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi	PT	Peat (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 : Hardiyatmo, 2002

Adapun menurut Bowles (1991) dalam Septayani (2016), kelompok-kelompok tanah utama pada sistem klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS) diperlihatkan pada Tabel 2 berikut ini :

Tabel 2. Klasifikasi Tanah *Unified Soil Classification System* (USCS)

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

(Sumber : Bowles, 1991)

c. Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO

Klasifikasi tanah sistem ini dikembangkan pada tahun 1929 oleh *Public Road Administration Classification System*. Dengan beberapa kali perubahan, sekarang telah digunakan dan dianjurkan oleh *Committee on Classification of Materials for Subgrade and granular type Roads of the Highway Research Board* pada tahun 1945 (*ASTM* menggunakan kode D-3282 dan *AASHTO* dengan metode M 145).

Klasifikasi AASHTO yang sekarang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3. Dalam sistem ini, tanah diklasifikasikan ke dalam 7 (tujuh) kelompok besar, yaitu : A-1 sampai dengan A-7.

Tanah-tanah yang diklasifikasikan dalam kelompok A-1, A-2 dan A-3 merupakan tanah-tanah berbutir kasar dimana 35 % atau kurang butir-butir tersebut melalui ayakan No. 200.

Tanah-tanah dimana 35 % atau lebih yang melalui ayakan No. 200 diklasifikasikan dalam kelompok A-4, A-5, A-6 dan A-7. Pada umumnya tanah-tanah ini adalah lumpur dan lempung.

Klasifikasi sistem ini didasarkan atas kriteria-kriteria sebagai berikut :

- Ukuran butir.

Kerikil : butiran lolos ayakan dengan lubang 75 mm dan tertahan di atas ayakan No. 10 dengan lubang 2 mm.

Pasir : butiran melalui lolos ayakan No. 10 (2 mm) dan tertahan di atas ayakan No. 200 dengan lubang 0,074 mm.

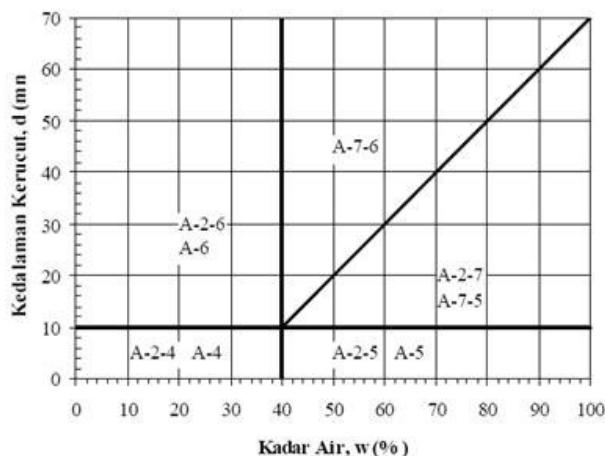
Lumpur dan lempung : butiran lolos ayakan No. 200.

b. Plastisitas.

Plastisitas merupakan kemampuan tanah menyesuaikan perubahan bentuk pada volume konstan tanpa retak – retak atau remuk. Bergantung pada kadar air, tanah dapat berbentuk cair, plastis, semi padat, atau padat.

Tingkat keplastisan suatu tanah umumnya ditunjukkan dari nilai indeks plastisitas, yaitu selisih nilai batas cair dan batas plastis suatu tanah. 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 sebesar 11 atau lebih



Gambar 2. Grafik Plastisitas untuk Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO
(Sumber: AASHTO M 145-91, 2004)

c. Batuan (*boulders*), yang ukurannya lebih besar dari 75 mm tidak digolongkan dalam klasifikasi ini.

Tabel 3. Klasifikasi tanah AASHTO

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)			
	A-1		A3	A2				A-4	A-5	A-6	A-7
Klasifikasi Kelompok	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	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
No. 40	≤ 30	≤ 50	≤ 51	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 36	≤ 36	≤ 36
No. 200	≤ 15	≤ 25	≤ 10								
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40	---		NP	≤ 41	≥ 41	≤ 40	≥ 40	≤ 40	≤ 41	≤ 40	≥ 41
batas cair (LL)	≤ 6			≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Indeks elastisitas (PI)											
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 dasar tanah	Baik sekali sampai baik							sedang sampai jelek			

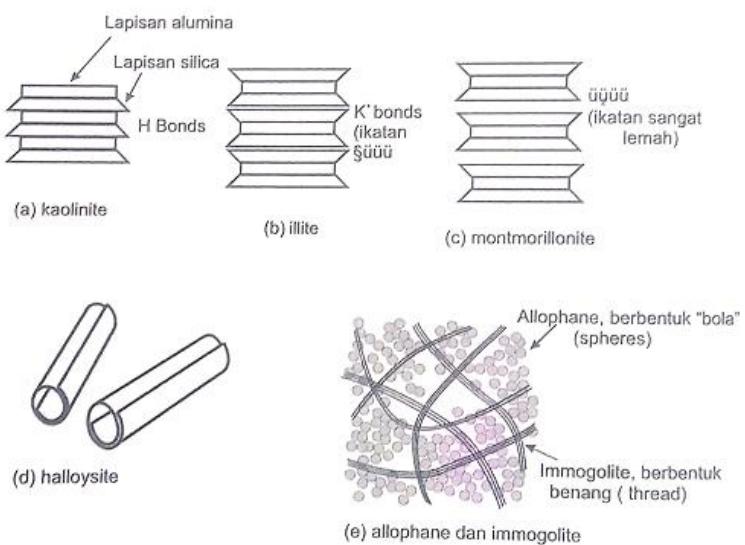
Keterangan : * Untuk A-7-5, $PI \leq LL - 30$
** Untuk A-7-6, $PI > LL - 30$

sumber : Das, 1995

Apabila sistem klasifikasi *AASHTO* dipakai untuk mengklasifikasikan tanah, maka data hasil uji dicocokkan dengan angka-angka yang diberikan dalam Tabel 1 dari kolom sebelah kiri ke kolom sebelah kanan hingga ditemukan angka-angka yang sesuai (Das, 1995).

C. Mineral Lempung

Mineral lempung merupakan suatu golongan butir tertentu yang menghasilkan sifat khusus pada tanah yang mengandung mineral lempung. Jenis mineral lempung yang paling terkenal adalah kaolinite, illite, dan montmorillonite. Struktur mineral ini disebut kristalin, yaitu molekulnya tersusun sehingga merupakan "kesatuan" dengan bentuk tertentu (seperti lapisan). Ada dua kesatuan khusus, yaitu "silica tetrahedron" dan "alumina octahedron". Kesatuan ini tersusun sehingga merupakan butir sangat kecil dengan bentuk seperti piring *plate-like*. Bentuknya diperlihatkan secara skematis pada Gambar 3. (Wesley, 2012).



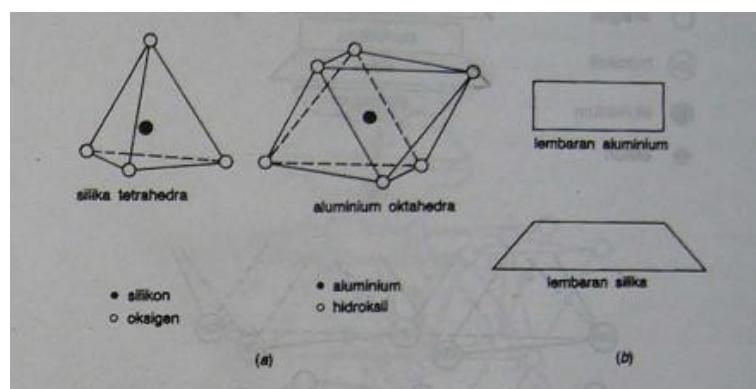
Gambar 3. Gambar skematis mineral lempung

(Sumber: Wesley, 2012)

Struktur butir kaolinite terdiri atas satu lapisan silika tetrahedron dan satu lapisan alumina oktahedron. Antara lapisan-lapisan ini terdapat ikatan agak kuat disebabkan oleh hidrogen. Butir *illite* terdiri atas satu lapisan alumina antara dua lapisan silika. Kesatuan baru ini diikat satu sama lain dengan ikatan potassium. Ikatan semacam ini kurang kuat. Struktur *montmorillonite* tidak jauh berbeda dengan struktur *illite*, tetapi ikatan antara lapisan berbeda, yaitu terdiri atas air serta "exchangeable cations" (Wesley, 2012).

Menurut Bambang, dkk. (2006) dalam Husain (2015), bahwa ditinjau dari mineralogi lempung terdiri dari berbagai macam penyusun mineral yang mempunyai ukuran sesuai dengan batasan yang ada.

Susunan kebanyakan tanah lempung terdiri dari silika tetrahedra dan aluminium oktahedra (Gambar 4.a). Silika dan aluminium secara parsial dapat digantikan oleh elemen yang lain dalam kesatuannya. keadaan ini dikenal sebagai substitusi isomorph. Kombinasi susunan dari kesatuan dalam bentuk susunan lempeng simbol diperlihatkan dalam (Gambar 4.b) Bermacam-macam lempung terbentuk oleh kombinasi tumpukan dari susunan lempeng dasarnya dengan bentuk yang berbeda-beda.



Gambar 4. Mineral-mineral lempung

(sumber: Hardiyatmo, 2003)

Menurut Das (1995) tanah lempung merupakan tanah dengan ukuran mikrokopis sampai dengan sub mikrokopis yang berasal dari pelapukan unsur-unsur kimiawi penyusun batuan. Tanah lempung sangat keras dalam

keadaan kering dan bersifat plastis pada kadar air sedang. Pada kadar air lebih tinggi lempung bersifat lengket (kohesif) dan sangat lunak. Berdasarkan klasifikasi tanah menurut AASHTO, tanah lempung memiliki ukuran butiran lebih kecil dari 0,002 mm.

D. Stabilisasi Tanah

Menurut (Utami, 2016) Stabilisasi tanah adalah suatu cara yang digunakan untuk mengubah atau memperbaiki sifat tanah dasar sehingga diharapkan tanah dasar tersebut mutunya dapat lebih baik dan dapat meningkatkan kemampuan daya dukung tanah dasar terhadap konstruksi yang akan dibangun diatasnya.

Apabila suatu tanah yang terdapat dilapangan bersifat sangat lepas atau sangat mudah tertekan dan apabila mempunyai indeks konsistensi yang tidak sesuai, permaebilitasnya yang terlalu tinggi, atau sifat lain yang tidak sesuai untuk suatu proyek pembangunan, maka tanah tersebut harus distabilisasi sehingga dapat memenuhi syarat-syarat teknis yang perlukan (Utami, 2016)

Menurut (Utami, 2016) pula tujuan utama yang akan dicapai dari stabilisasi tanah itu sendiri adalah meningkatkan kemampuan daya dukung tanah dalam menahan beban serta untuk meningkatkan kestabilan tanah.

Stabilisasi tanah dapat terdiri dari salah satu tindakan berikut:

1. Secara dinamis yaitu pematatan tanah dengan alat pematat.
2. Perbaikan gradasi dengan cara menambah tanah pada fraksi tertentu yang dianggap kurang, sehingga tercapai gradasi yang rapat. Fraksi yang kurang biasanya adalah fraksi yang berbutir kasar, cara yang dilakukan adalah mencampur tanah dengan fraksi butir kasar seperti pasir, dan kerikil atau pasir saja.
3. Stabilisasi kimiawi, yaitu menambahkan bahan kimia tertentu, sehingga terjadi reaksi kimia. Bahan yang biasanya digunakan antara lain: Portland semen, kapur tohor, atau bahan kimia lainnya. Stabilisasi ini dilakukan dengan dua cara yaitu: mencampur tanah dengan bahan kimia kemudian

diaduk dan dipadatkan. Cara dua adalah memasukkan bahan kimia kedalam tanah *Grouting* sehingga bahan kimia bereaksi dengan tanah.

4. Pembongkaran dan penggantian tanah yang jelek. Pada tanah yang jelek akan mengandung bahan organik sehingga terjadi pembusukan, apabila terkena beban akan mengalami penurunan yang tidak sama. Perbaikan tanah dilakukan dengan mengganti tanah jelek tersebut dengan tanah berkualitas baik, misalnya dengan tanah yang memiliki CBR yang lebih sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

E. Penurunan Tanah

Istilah penurunan menunjukkan amblesnya suatu bangunan akibat kompresi dan deformasi lapisan tanah di bawah bangunan. Penurunan (*settlement*) akan terjadi jika suatu lapisan tanah mengalami pembebanan. Penurunan juga dipengaruhi oleh sebaran tanah lunak atau lempung yang terdapat di bawah permukaan pada dataran aluvial. Penurunan akibat beban adalah jumlah total penurunan segera (*immediate settlement*) dan penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) (Hermansyah, 2018).

Tanah mempunyai sifat kemampatan yang sangat besar jika dibandingkan bahan konstruksi seperti baja atau beton. Hal ini disebabkan tanah mempunyai rongga pori yang besar, sehingga apabila dibebani melalui fondasi maka akan mengakibatkan perubahan struktur tanah *deformasi* dan terjadi penurunan fondasi. Jika penurunan yang terjadi terlalu besar maka dapat mengakibatkan kerusakan pada konstruksi di atasnya. Berbeda dengan bahan-bahan konstruksi yang lain, karakteristik tanah ini didominasi oleh karakteristik mekanisnya seperti kekuatan geser dan permeabilitas (kemampuan mengalirkan air) (Hermansyah, 2018).

Penambahan bangunan di atas permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab lainnya yang sangat terkait dengan

keadaan tanah yang bersangkutan. Proses pemampatan ini pada akhirnya menyebabkan terjadinya penurunan permukaan tanah (Das, 1995).

Selain itu *settlement* dapat terjadi ketika:

1. Adanya gaya berat dari beban yang ditimbulkan oleh endapan dan juga ditambah dengan air menyebabkan kelenturan pada lapisan kerak bumi.
2. Aktivitas internal yang menyebabkan naiknya temperatute kerak bumi dan kemudian mengembang menyebabkan kenaikan pada permukaan pada permukaan tanah. Setelah itu proses erosi dan pendinginan kembali menyebabkan penurunan muka tanah.
3. Karakteristik deformasi dari lapisan tanah yang berkaitan dengan tekanan-tekanan yang ada.

F. Konsolidasi (Consolidation Settlement)

Pada dasarnya setiap material akan mengalami deformasi bila mengalami perubahan tekanan. Demikian pula tanah akan mengalami deformasi (*deformation*) jika mengalami perubahan tekanan (*pressure*). Deformasi, dalam hal ini penurunan, yang terjadi dapat disebabkan oleh distorsi (perubahan bentuk tanpa dibarengi perubahan volume), elastisitas tanah, atau penurunan konsolidasi yang diakibatkan oleh keluarnya air dari dalam pori tanah (Budi, 2011).

Penurunan yang disebabkan oleh perubahan bentuk dan elastisitas tanah terjadi relatif bersamaan dengan waktu pemberian tekanan *immediate settlement*. Sedangkan penurunan yang diakibatkan oleh keluarnya air dari dalam pori tanah memerlukan waktu yang relatif lebih lama, dan sangat tergantung dari permeabilitas tanah. Proses keluarnya air dari dalam pori tanah dalam keadaan jenuh tersebut disebut konsolidasi, dan proses tersebut mengakibatkan perubahan volume tanah (penurunan) (Budi, 2011).

Pada tanah yang memiliki butiran halus (*fine grained soils*) seperti tanah lempung, kecepatan keluarnya air dari pori tanah sangat kecil dibandingkan dengan kecepatan keluarnya air dari tanah yang berbutir kasar (*coarse grained soils*) seperti tanah lanau atau pasir (Budi, 2011).

Pada kondisi tanah jenuh, besarnya penurunan akibat konsolidasi berhubungan langsung dengan banyaknya air yang keluar dari pori tanah, sedangkan kecepatan keluarnya air mempengaruhi kecepatan atau lamanya waktu yang diperlukan untuk proses penurunan (Budi, 2011).

Pada prinsipnya, pengujian konsolidasi dimaksudkan untuk mencari korelasi antara penambahan tekanan, waktu, dan besarnya perubahan volume contoh tanah (atau perubahan angka pori, e), sehingga hasilnya dapat dipergunakan untuk memperkirakan besar dan lamanya penurunan bangunan (Budi, 2011).

Bilamana suatu lapisan tanah lempung jenuh yang mampu memampat (*compressible*) diberi penambahan tegangan, maka penurunan (*settlement*) akan terjadi dengan segera. Koefisien rembesan lempung adalah sangat kecil dibandingkan dengan koefisien rembesan pasir sehingga penambahan tekanan air pori yang disebabkan oleh pembebahan akan berkurang secara lambat laun dalam waktu yang sangat lama. Jadi untuk tanah lempung-lembek perubahan volume yang disebabkan oleh keluarnya air dari dalam pori (yaitu konsolidasi) akan terjadi sesudah penurunan segera. Penurunan konsolidasi tersebut biasanya jauh lebih besar dan lebih lama serta lama dibandingkan dengan penurunan segera (Das, 1995).

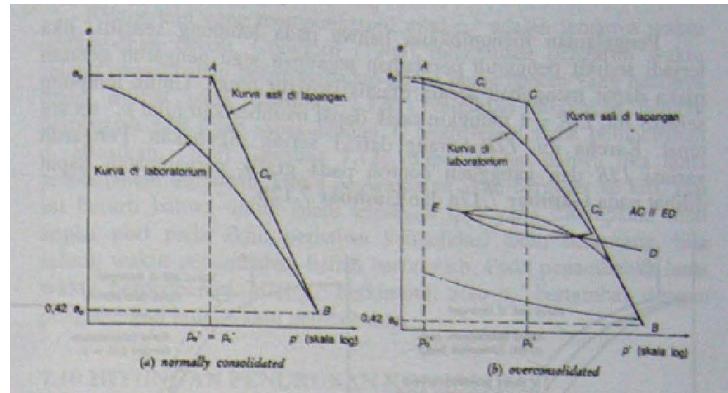
Bahan dan alat dalam pengujian konsolidasi berdasarkan ASTM D 2435-96 adalah sebagai berikut :

1. Bahan-bahan:
 - a. Sampel tanah asli (*undisturbed sample*) yang diambil melalui tabung contoh atau tabung uji CBR lapangan.
 - b. Air bersih secukupnya.
2. Peralatan yang digunakan:
 - a. *Frame* alat konsolidasi dan Consolidometer
 - b. Cincin (cetakan) benda uji.
 - c. *Extruder*.
 - d. Batu pori dan bola baja.
 - e. Piringan (plat penekan).

- f. *Stopwatch*.
- g. *Dial gauge* deformasi ketelitian 0,01 mm.
- h. Timbangan dengan ketelitian 0,01 gram.
- i. Pisau pemotong
- j. Cawan
- k. Oven

Istilah *normally consolidated* dan *overconsolidated* digunakan untuk menggambarkan suatu sifat penting dari tanah lempung. Lapisan tanah lempung biasanya terjadi dari proses pengendapan. Selama proses pengendapan, lempung mengalami konsolidasi atau penurunan, akibat tekanan tanah yang berada di atasnya. Lapisan-lapisan tanah yang berada di atas ini suatu ketika mungkin kemudian hilang akibat proses alam. Hal ini berarti tanah lapisan bagian bawah pada suatu saat dalam sejarah geologinya pernah mengalami konsolidasi akibat dari tekanan yang lebih besar dari tekanan yang bekerja sekarang. Tanah semacam ini disebut tanah *overconsolidated* (OC) atau terkonsolidasi berlebihan. Kondisi lain, bila tegangan efektif yang bekerja pada suatu titik di dalam tanah pada waktu sekarang merupakan tegangan maksimumnya (atau tanah tidak pernah mengalami tekanan yang lebih besar dari tekanan pada waktu sekarang), maka lempung disebut pada kondisi *normally consolidated* (NC) atau terkonsolidasi normal (Hardiyatmo, 2002).

Jadi, lempung pada kondisi *normally consolidated*, bila tekanan prakonsolidasi *preconsolidation presure* (p_c') sama dengan tekanan overburden efektif (p_o'). Sedang lempung pada kondisi *overconsolidated*, jika tekanan prakonsolidasi lebih besar dari tekanan overburden efektif yang ada pada waktu sekarang ($p_c' > p_o'$). (Hardiyatmo, 2002).



Gambar 5. (a) *normally consolidated* (NC) (b) *overconsolidated* (OC)

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

Untuk lempung tertentu, penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan-persamaan berikut ini:

Bila didefinisikan:

$$P_1' = P_0' + \Delta p$$

1. Penurunan untuk lempung *normally consolidated* ($p_c' = p_0'$) dengan tegangan efektif sebesar p_1' ,

$$S_c = C_c \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{P_1'}{P_0'}$$

2. Untuk lempung *overconsolidated* ($p_c' > p_0'$) penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan yang bergantung nilai p_1' ,

 - a. Bila $p_1' < p_c'$

$$S_c = C_r \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{P_1'}{P_0'}$$

- b. Bila $p_1' > p_c'$

$$S_c = C_r \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{P_c'}{P_0'} + C_c \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{P_1'}{P_c'}$$

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'}$$

pada kurva penambahan beban atau pada $p' > p_c'$

$$C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'}$$

pada kurva penambahan beban atau pada $p' < p_c'$

dengan:

Cr = indeks pemampatan kembali

Cc = indeks pemampatan

H = teballapisan 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

Dalam pembangunan konstruksi sipil sering dijumpai permasalahan pada jenis tanah lunak, antara lain daya dukung tanah yang rendah dan penurunan (*settlement*) yang besar jika diberi beban. Hal ini disebabkan karena tanah lunak umumnya memiliki kuat geser dan permeabilitas yang rendah serta kompresibilitas yang besar. Karena tanah lunak memiliki permeabilitas yang rendah maka waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi lebih lama. Pada saat konsolidasi, tegangan tanah pada saat awal pembebangan ditanggung sepenuhnya oleh tegangan air pori. Kemudian secara perlahan tegangan ini ditransfer ke tegangan efektif tanah, sehingga tanah mengalami peningkatan kekuatan dan daya dukung tanah. Dengan demikian, jika suatu konstruksi akan dibangun di atas tanah lunak, maka untuk menghindari penurunan yang besar pada bangunan tersebut dan memperoleh daya dukung tanah yang cukup baik maka proses konstruksi sebaiknya dilakukan setelah tanah telah terkonsolidasi secara sempurna.

G. Pengujian Kadar Air

Besarnya kandungan air yang terdapat di dalam suatu contoh tanah yang sering disebut kadar air, w. (*moisture content* atau *water content*) dinyatakan dalam prosentase terhadap berat tanah dalam keadaan kering, sehingga:

$$w_1 = \frac{w_w}{w_s} \times 100 \%$$

di mana:

w_c = kadar air (*water content*)

w_w = berat air

w_s = berat tanah dalam keadaan kering (*oven dry*)

ASTM D-2216-71 memberikan batasan tentang berat minimum contoh tanah yang harus dipergunakan dalam pengujian untuk mendapatkan kadar air yang representatif. Besarnya berat minimum tersebut tergantung dari ukuran butiran seperti terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Volume Minimum Berat Contoh Tanah Basah

Ukuran butir tanah (lebih dari 10%)	Berat minimum contoh tanah basah
2 mm (ayakan No. 10 ASTM)	100 – 200 gr
4.75 mm (ayakan No. 10 ASTM)	300 – 500 gr
19 mm	500 – 1000 gr
38 mm	1500 – 3000 gr
76 mm	5000 – 10000 gr

Prosedur pengujian kadar air dengan Metode Pengeringan dengan Oven atau Pembakaran memakai Alkohol:

1. Menimbang beberapa cawan alumunium kosong (bersih dan kering), kemudian mencatat beratnya masing-masing menurut kode yang tercantum di cawan (W_1)
2. Memasukkan contoh tanah basah ke dalam cawan alumunium dan menimbangnya (W_2)
3. Memasukkan cawan yang berisi tanah ke dalam oven yang mempunyai temperatur $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ dan membiarkannya selama 24 jam. Jika dipakai metode pembakaran, menuangkan alkohol atau spiritus kedalam tanah lalu membakar dan membiarkannya sampai tanah menjadi kering
4. Mengeluarkan cawan yang berisi contoh tanah dari oven (atau tanah yg telah dibakar), kemudian mendinginkannya beberapa saat dan menimbangnya (W_3)
5. Menghitung kadar air tanah dengan perumusan:

$$w_c = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1} \times 100 \%$$

H. Pengujian Batas Atterberg

1. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas cair (Liquid limit) didefnisikan sebagai kadar air (water content) yang terkandung di dalam tanah pada perbatasan antara fase cair dan fase plastis. Metode pengujian batas cair secara lebih detail dapat dilihat pada ASTM D 4318 (1998).

Prosedur pengujian Batas Cair (*Liquid Limit*):

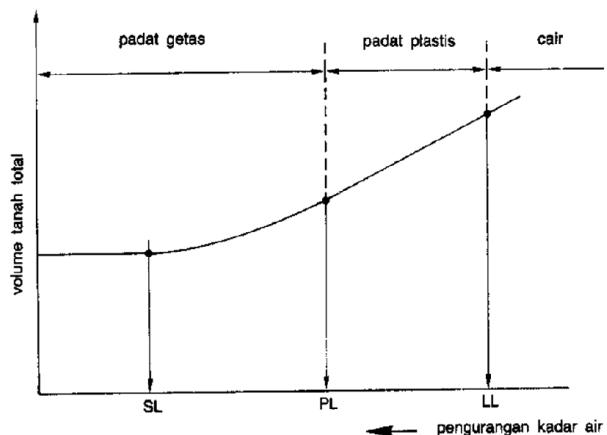
- a. Mengambil 4 atau 5 buah cawan aluminium (kosong, bersih, dan kering) dan menimbang masing-masing berat dan kodennya.
- b. Memasukkan contoh tanah ke dalam mangkok pengaduk dan menambahkan air sedikit demi sedikit sambil mengaduknya memakai spatula sampai adonan merata dan terlihat "plastis".
- c. Menuangkan adonan tanah ke dalam kontainer alat Casagrande dan meratakannya hingga ketebalan tanah kurang lebih 1 cm.
- d. Membuat alur atau coakan (*grooving*) pada adonan di dalam container (menggerakkan grooving tool dari arah pukul 12 ke arah pukul 6). Pada saat membuat alur, alat pembuat coakan (*grooving tool*) harus tegak lurus dengan dasar kontainer
- e. Menggerakkan tuas putar berlawanan arah jarum jam dengan kecepatan 2 putaran (ketukan) per detik dan menghitung jumlah putaran sampai kedua dinding alur adonan tanah di dalam container menutup sepanjang 1.27 cm (1/2 inch)
- f. Mengambil contoh tanah dan memasukkannya ke dalam salah satu cawan alumunium yang sudah diketahui beratnya dan menitimbangnya.
- g. Memasukkan cawan dan tanah ke dalam oven yang mempunyai temperatur $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, dan mendiamkannya selama 24 jam.
- h. Mengulangi langkah ke-2 sampai dengan langkah ke-7 pada contoh tanah yang mempunyai kadar air berbeda-beda, sehingga mendapatkan contoh adonan yang menutup sepanjang 1.27 cm pada jumlah putaran kurang dari 25 dan lebih dari 25 putaran masing-masing dua buah. Sedapat

mungkin jumlah putaran antara 20 sampai 35. Apabila alur pada adonan sudah menutup sebelum 20 putaran maka tanah terlalu basah, sebaliknya apabila alur belum menutup setelah 35 putaran, maka tanah terlalu kering, sehingga harus mengulang kedua percobaan tersebut.

- i. Mengambil semua cawan dari oven, mendinginkan dan menimbangnya.
Mencatat data percobaan ke dalam bentuk tabel.
- j. Batas cair tanah ditentukan berdasarkan besarnya kadar air, dimana alur menutup sepanjang 1.27 cm (112 inch) pada putaran ke 25. Oleh karena sulit untuk mendapatkan adonan yang tepat pada batas cairnya, maka kadar air ditentukan dengan cara menggambar grafik hubungan antara jumlah putaran (ketukan) dengan kadar air.

Perhitungan :

- a. Nilai batas plastis (PL) adalah kadar air rata-rata dari ketiga benda uji.
- b. Indeks Plastisitas (PI) adalah harga rata-rata dari ketiga sampel tanah yang diuji, dengan rumus: $PI = LL - PL$



Gambar 6. Hubungan volume tanah dengan kadar air dalam batas
at terberg
(Sumber : Das, 1995)

2. Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Batas plastis (ASTM D-4318, 1998) didefinisikan sebagai kadar air di dalam tanah pada fase antara plastis dan semi padat. seperti telah

diuraikan sebelumnya, apabila kadar air di dalam tanah berkurang, maka tanah menjadi lebih keras dan memiliki kemampuan untuk menahan perubahan bentuk. Perubahan tanah dari cair menjadi padat tersebut akan melalui fase yang dinamakan semi padat.

Prosedur penguiian:

- a. Membersihkan cawan alumunium dan menimbang beserta tutupnya, kemudian mencatat beratnya
- b. Mengambil tanah (yang agak kering) dan meletakkan di dalam mangkok
- c. Menambahkan air ke dalam contoh tanah dan mengaduk dengan spatula sampai merata
- d. Mengambil contoh tanah kira-kira setengah ruas ujung jari kelingking dan meremas-remasnya sehingga berbentuk seperti bola (kelereng)
- e. Meletakkan bola tanah tersebut di atas kaca datar dan menggulungnya atau menggelintir (*rotled*) menggunakan telapak tangan berulangkali sampai tanah berbentuk silinder dengan diameter 3 mm
- f. Mengamati tekstur tanah dengan seksama. Memasukkan tanah apabila contoh tanah yang berbentuk silinder dengan diameter 3 mm tersebut terlihat mulai retak ke dalam cawan alumunium dan menutup cawan dengan rapat agar kadar air tidak berubah
- g. Jika tanah yang di gulung sampai diameter 3 mm belum terlihat retak, maka tanah terlalu basah dan sebaliknya bila tanah sudah retak sebelum mencapai diameter 3 mm, maka tanah terlalu kering
- h. Mengulangi lagi proses ke 3 sampai dengan 7, sampai mendapatkan silinder tanah yang mulai retak pada diameter 3 mm sebanyak 4 - 5 sampel
- i. Menimbang contoh tanah dan cawan, kemudian memasukkannya ke dalam oven selama 24 jam pada temperatur $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

- j. Mengeluarkan contoh tanah dari oven dan menimbang cawan yang berisi tanah kering
 - k. Batas plastis ditentukan berdasarkan kadar air, dimana contoh tanah yang digulung (*rolled*) sampai diameter 3 mm mulai retak
3. Batas Susut (Shrinkage Limit, SL)

Batas susut ASTM D-427 (1998) diindikasikan sebagai kadar air dimana pengurangan kadar air pada tanah tidak lagi mempengaruhi volume total tanah. Seperti telah disebutkan sebelumnya, suatu contoh tanah akan menyusut sebanding dengan volume air di dalam pori tanah yang menguap. Namun terdapat suatu batas dimana berkurangnya air di dalam pori tanah tidak mengurangi volume tanah' Batas tersebut adalah batas susut.

Prosedur pengujian batas susut:

- a. Menyiapkan contoh tanah sekitar 30-gram dalam keadaan kering udara (*air-dried*)
- b. Menempatkan contoh tanah pada mangkok porselain, menambahkan air dan mengaduk sampai merata seperti pasta. Kadar air pada pasta tanah tersebut harus lebih besar dari batas cairnya (LL).
- c. Menimbang berat tabung shrinkage dalam keadaan kosong dan kering (W)
- d. Menentukan volume tabung shrinkage dengan cara sebagai berikut
 - 1) Menempatkan tabung shrinkage kosong di dalam mangkok porselain
 - 2) Menuangkan air raksa kedalam tabung *shrinkage* sampai penuh
 - 3) Menekan permukaan tabung *shrinkage* yang berisi air raksa dengan kaca datar
 - 4) Menuangkan air raksa dari dalam tabung shrinkage kedalam gelas ukur dan menentukan volumenya (V)
- e. Memasukkan pasta tanah ke dalam tabung shrinkage sedikit demi sedikit, usahakan tidak ada gelembung udara yang terperangkap di

dalam pasta tanah dengan cara mengetuk-ketukan tabung shrinkage ke meja.

- f. Meratakan permukaan pasta tanah setinggi tabung shrinkage dan membersihkan pasta tanah yang menempel di bagian luar tabung
- g. Menimbang dengan segera tabung shrinkage yang berisi pasta tanah (W_1)
- h. Membiarkan pasta tanah pada kondisi suhu ruang beberapa jam, atau 12 jam agar pasta kering dan kemudian memasukkan ke dalam oven pada temperatur $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ selama 24 jam
- i. Mengeluarkan tabung shrinkage dan tanah kering dari oven, mendinginkannya pada suhu ruang beberapa saat dan menimbangnya (W_r). Kemudian melepaskan pasta tanah yang sudah kering (seharusnya menggumpal menjadi satu) dari tabung *shrinkage*
- j. Menempatkan gelas kaca di dalam mangkok porselain, menuangkan air raksa kedalam gelas sampai penuh, dan menekan permukaan air raksa dengan memakai kaca datar yang berpaku
- k. Membersihkan tumpahan air raksa dari gelas kaca yang tertampung di mangkok poselain
- l. Memasukkan pasta tanah kering ke dalam gelas yang berisi air raksa (tanah akan mengapung), dan menekan pasta tanah kering dengan kaca datar yang berpaku, sehingga pasta tanah kering terbenam dan air raksa tumpah
- m. Memasukkan air raksa yang tumpah dari gelas ke dalam gelas ukur dan menghitung volumenya (V_o)
- n. Batas susut dapat dihitung dengan perumusan:

$$SL = w_c = \frac{V - V_o}{W_o} \times 100 \%$$

Dimana

w_c = kadar air pada pasta tanah

$$W_o = \text{berat kering pasta tanah} (W_2 - W)$$

I. Pengujian Berat Volume (Unit Weight)

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat volume tanah basah dalam keadaan asli (*undisturbed sample*), yaitu perbandingan antara berat tanah dengan volume tanah. Pengujian berdasarkan ASTM D 2167.

Bahan-bahan: Sampel tanah

Peralatan:

1. Ring contoh.
2. Pisau.
3. Timbangan dengan ketelitian 0,01 gram.

Perhitungan:

1. Berat ring (W_c).
2. Volume ring bagian dalam (V).
3. Berat ring dan tanah (W_{cs}).
4. Berat tanah (W) = $W_{cs} - W_c$.

$$\text{Berat Volume } (\gamma) = \frac{W}{V} \text{ (gr/cm}^3 \text{ atau t/m}^3\text{)}$$

J. Pengujian Berat Jenis

Berdasarkan SNI 1964:2008 dalam pengujian berat jenis menggunakan standar prosedur uji yaitu tanah lolos saringan 4,75 mm (No. 4) menggunakan alat piknometer. Apabila tanah mengandung partikel lebih besar saringan 4,75 mm (No. 4), maka bagian yang tertahan saringan 4,75 mm (No. 4) diuji sesuai dengan SNI 03-1969-1990. Apabila tanah merupakan gabungan dari partikel yang lebih besar dan lebih kecil dari saringan 4,75 mm (No. 4), maka contoh tanah harus dipisahkan menggunakan saringan 4,75 mm (No. 4).

Nilai berat jenis tanah yang diperoleh harus dirata-ratakan dari kedua nilai berat jenis tersebut. Apabila nilai berat jenis tanah digunakan dalam perhitungan yang berkaitan dengan pengujian hidrometer (SNI 03-3423-

1994), pengujian berat jenis harus dilakukan terhadap tanah lolos saringan 2,00 mm (No. 10).

Cara pengujian berat jenis adalah:

1. Mengeringkan benda uji dalam oven pada temperatur $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam, setelah itu mendinginkannya ke dalam desikator;
2. Mencuci piknometer atau botol ukur dengan air suling, kemudian mengeringkan dan selanjutnya menimbangnya (W_1 gram);
3. Masukkan benda uji ke dalam piknometer atau botol ukur yang digunakan, kemudian timbang (W_2 gram);
4. Menambahkan air suling ke dalam piknometer atau botol ukur yang berisi benda uji, sehingga piknometer atau botol ukur terisi dua pertiganya;
5. Mendiamkan benda uji untuk benda uji yang mengandung lempung dengan cara merendamnya selama 24 jam atau lebih;
6. Memanaskan piknometer atau botol ukur yang berisi rendaman benda uji dengan hati-hati selama 10 menit atau lebih sehingga udara dalam benda uji ke luar seluruhnya.
7. Memiringkan sekali-kali piknometer atau botol ukur untuk mempercepat proses pengeluaran udara
8. Pengeluaran udara dapat dilakukan dengan menggunakan pompa hampa udara, dengan tekanan 13,33 kpa (100 mm Hg);
9. Merendam piknometer atau botol ukur dalam bak perendam, sampai temperaturnya tetap. Menambahkan air suling secukupnya sampai penuh. Kemudian mengeringkan bagian luarnya, lalu menimbangnya (W_3 gram);
10. Mengukur temperatur isi piknometer atau botol ukur, untuk mendapatkan faktor koreksi (K);
11. Menentukan isi piknometer atau botol ukur jika belum diketahui, dengan cara sebagai berikut:
 - a. Mengkosongkan dan membersihkan piknometer atau botol ukur yang akan digunakan;

- b. Mengisi piknometer atau botol ukur dengan air suling yang temperaturnya sama, kemudian mengeringkan dan menimbangnya (W₄ gram).

Perhitungan

$$GS = \frac{W2 - W1}{(W4 - W1) - (W3 - W2)}$$

dimana:

Gs = Berat jenis

W₁ = Berat *piconometer* (gram)

W₂ = Berat *piconometer*, dan tanah kering (gram)

W₃ = Berat *piconometer*, tanah, dan air (gram)

W₄ = Berat *piconometer*, dan air bersih (gram)

Tabel 5. Berat jenis tanah

Macam tanah	Berat jenis
Kerikil	2,65 - 2,68
Pasir	2,65 - 2,68
Lanau tak organik	2,62 - 2,68
Lempung organik	2,58 - 2,65
Lempung tak organik	2,68 - 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 - 1,80

Sumber : Hardiyatmo, 2002

K. Pengujian Pemadatan Tanah

Pemadatan adalah suatu proses dimana udara pada pori-pori tanah dikeluarkan dengan suatu cara mekanis (digilas/ditumbuk). Pada proses pemadatan untuk setiap daya pemadatan tertentu, kepadatan yang tercapai tergantung pada banyaknya air di dalam tanah tersebut, yaitu kadar airnya. Apabila kadar air rendah mempunyai sifat keras atau kaku sehingga sukar dipadatkan (Dermawan, 2012).

Bilamana kadar airnya ditambah maka air itu akan berlaku sebagai pelumas sehingga tanah akan lebih mudah dipadatkan. Pada kadar air yang

lebih tinggi lagi kepadatannya akan turun karena pori -pori tanah menjadi penuh terisi air yang tidak dapat lagi dikeluarkan dengan cara memadatkan (Dermawan, 2012).

Tanah sebagai material bangunan pada konstruksi konstruksi tanggul, bendungan tanah, dasar jalan, harus dipadatkan untuk memperbaiki sifat-sifat dari tanah yang dapat memberi akibat buruk pada konstruksi.

Perubahan-perubahan yang terjadi bila tanah dipadatkan adalah:

1. Volume udara dalam pori-pori tanah berkurang sehingga tanah menjadi lebih padat.
2. Kekuatan geser dan daya dukung tanah meningkat.
3. Kompresibilitas tanah berkurang.
4. Permeabilitas tanah berkurang.
5. Lebih tahan terhadap erosi.

Pemadatan tanah bertujuan untuk menentukan kepadatan maksimum tanah dengan cara tumbukan yaitu dengan mengetahui hubungan antara kadar air dengan kepadatan tanah. Pengujian ini menggunakan standar ASTM D-1557. Adapun langkah kerja pengujian pemadatan tanah, antara lain:

Cara pengujian berat jenis adalah:

1. Menyiapkan contoh tanah yang akan diuji ± 25 kg dan membersihkan tanah tersebut dari akar-akar dan kotoran lain.
2. Menjemur tanah sampai kering udara (air drained), atau mengeringkan dalam oven dengan suhu 60°C .
3. Menghancurkan gumpalan-gumpalan tanah dengan palu karet agar butir tanah tidak ikut hancur.
4. Mengayak contoh tanah kering dalam keadaan lepas dengan ayakan no 4, kemuduan gunakan hasil ayakan tersebut.
5. Menyemprot air pada tanah hasil ayakan sebanyak ± 3 kg untuk mendapat hasil contoh tanah dengan kebasahan merata sehingga bisa dikepal tapi masih mudah lepas (hancur).

6. Membersihkan mold yang akan dipergunakan, menimbang beratnya dan mengukur volumenya (biasanya volume mold = 1/30 cu-ft). Kemudian mengisikan contoh tanah ke dalam mold setelah 1" - 2" (modified) atau 2" - 4" (standard).
7. Menumbuk dengan hammer sebanyak 25 kali pada tempat yang berlainan. Hammer yang dipergunakan disesuaikan dengan cara percobaan.
8. Mengisi lagi untuk lapis berikutnya dan tumbuk sebanyak 25 kali.
9. Pengisian diteruskan sampai 5 lapisan untuk modified atau 3 lapisan untuk standard. Pada penumbukan lapisan terakhir harus mempergunakan sambungan tabung (collar) pada mold agar pada waktu penumbukan hammer tidak meleset keluar.
10. Membuka sambungan tabung di atasnya dan ratakan permukaan tanahnya dengan pisau.
11. Menimbang mold dan contoh tanah.
12. Mengeluarkan tanah dengan bantuan dongkrak dan diambil bagian atas (A), tengah (T), dan bawah (B) masing-masing \pm 30-gram kemudian mengovenanya selama 24 jam.
13. Menimbang container + tanah kering setelah 24 jam.
14. Dengan mengambil harga rata-rata dari kadar air ketiganya didapat nilai kadar airnya.
15. Percobaan dilakukan sebanyak minimum 5 kali dengan setiap kali menambah kadar airnya sehingga dapat dibuat grafik berat isi kering terhadap kadar air.

Perhitungan:

1. Kadar Air :
 - a. Berat cawan + berat tanah basah = W_1 (gr)
 - b. Berat cawan + berat tanah kering = W_2 (gr)
 - c. Berat air = $W_1 - W_2$ (gr)
 - d. Berat cawan = W_c (gr)
 - e. Berat tanah kering = $W_2 - W_c$ (gr)

$$f. \text{ Kadar air (w)} = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_C} \times 100$$

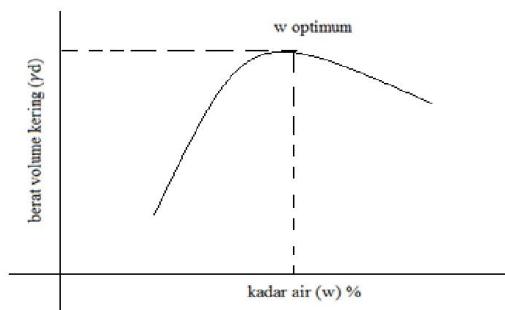
2. Berat Isi

- Berat *mold* = W_m (gr)
- Berat *mold* + sampel = W_{ms} (gr)
- Berat tanah (W) = $W_{ms} - W_m$ (gr)
- Volume *mold* = V (cm³)
- Berat volume = W/V (gr/cm³)
- Kadar air (w)
- Berat volume kering (γ_d)

$$\gamma_d \times \frac{\gamma}{1+w} \times 100 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$

- Berat volume *zero air void* (γ_z)

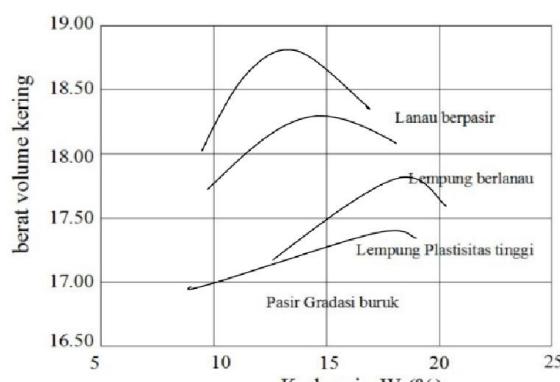
$$\gamma_z \times \frac{G_s \times \gamma_w}{1 + G_s \times w} \times 100 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$$



Gambar 7. Grafik hubungan berat volume kering dengan kadar air

(Sumber: ASTM D-698)

Kadar air yang memberikan berat kering yang maksimal disebut kadar air optimum. Untuk tanah berbutir halus dalam mendapatkan kadar air optimum digunakan batas plastisnya. Kurva hubungan antara kadar air (w) sebagai absis dan berat volume tanah kering sebagai ordinat, puncak kurva sebagai nilai (γ_d maksimum), kurva yang digunakan adalah kurva dari uji pemedatan tanah *proctor standart*. Dari titik puncak ditarik garis vertikal memotong absis, pada titik ini adalah kadar air optimum seperti yang terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Bentuk umum grafik pemedatan 4 jenis tanah

(Sumber: ASTM D-698)

L. Pengujian Analisa Hydrometer (Distribusi Ukuran Butir)

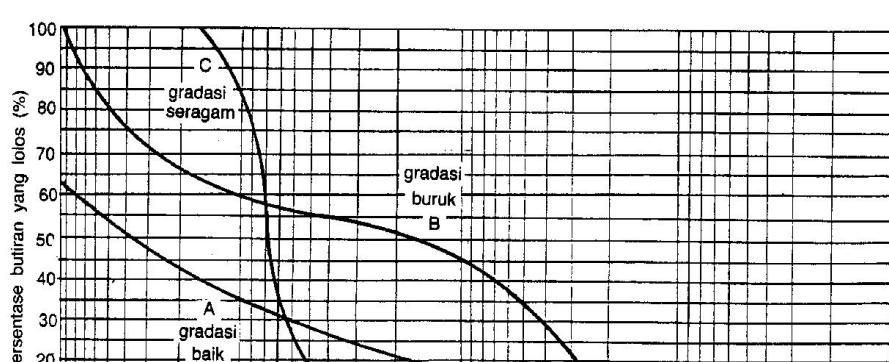
Analisa Hydrometer adalah cara tidak langsung yang dipakai untuk menentukan distribusi butiran tanah yang mempunyai ukuran kurang dari 0.075 mm. Metode ini didasarkan pada perumusan stokes, yang mengkorelasikan diameter butiran tanah dengan kecepatan penurunan butiran tanah di dalam cairan.

Stokes menyatakan bahwa kecepatan pengendapan (v) suatu butiran tanah di dalam suatu cairan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} \times D^2$$

$$D = \sqrt{\frac{30\eta}{(G_s - 1)\gamma_w}} \times \sqrt{\frac{L(cm)}{t(menit)}}$$

dimana: v = Kecepatan mengendap
 η = Kekentalan air
 γ_w = Berat volume air
 γ_s = Berat volume partikel tanah
 D = Diameter Partikel
 G_s = Berat jenis tanah
 K = Fungsi dari G_s yang tergantung temperatur uji
 t = Waktu pengendapan



Gambar 9. Grafik pembagian ukuran butir
(Sumber : Hardiyatmo, 2012)

M. Pengujian *California Bearing Ratio*

Lapisan tanah yang akan dipakai sebagai lapisan sub-base atau sub-grade suatu konstruksi jalan pada umumnya memerlukan proses pemasangan agar mampu menerima beban sesuai dengan yang direncanakan. Salah satu cara untuk mengukur kekokohan (bearing) lapisan tanah adalah pengujian California Bearing Ratio (CBR).

Prinsip dasar dari pengujian CBR adalah membandingkan besarnya beban (gaya) yang diperlukan untuk menekan torak dengan luas penampang 3 inch² ke dalam lapisan perkerasan sedalam 0.1-inch (2.54 mm) atau 0.2-inch (5.08 mm) dengan beban standar. Oleh karena itu, kekokohan lapisan perkerasan dinyatakan dalam "kekokohan relatif" atau persen kekokohan. Besarnya beban standar untuk penetrasi 0.1-inch adalah 3000 lbs (pound) atau sekitar 1.350 kg, sedangkan besarnya beban standar untuk penetrasi 0.2-inch adalah 4500 lbs atau sekitar 2025 kg.

Satu hal yang perlu diingat bahwa pengujian CBR hanya mengukur kekokohan relatif dari lapisan permukaan tanah, karena diameter penampang torak yang dipergunakan hanya sekitar 4.96 cm, sehingga daerah (volume) lapisan tanah di bawah torak yang terpengaruh tekanan (*stress bulb*) hanya di permukaan.

Terdapat 3 cara dalam pengujian CBR yaitu :

1. Pemeriksaan CBR Laboratorium mengacu pada ASTM- 1883-73.
2. Pemeriksaan CBR lapangan atau CBR *in place* atau *field in place*.
3. Pemeriksaan CBR lapangan rendaman atau *undisturbed soaked* CBR.

Penentuan nilai CBR yang biasa digunakan untuk menghitung kekuatan fondasi jalan adalah penetrasi 0,1" dan penetrasi 0,2", yaitu dengan rumus sebagai berikut :

1. Nilai CBR penetrasi 0,1" = $\frac{A}{1000} \times 100\%$
2. Nilai CBR penetrasi 0,2" = $\frac{B}{1500} \times 100\%$

Keterangan :

A pembacaan *dial* pada saat penetrasi 0,1" dengan satuan psi

B pembacaan *dial* pada saat penetrasi 0,2" dengan satuan psi

Untuk menilai kekuatan dasar atau bahan lain yang hendak dipakai untuk menentukan tebal lapisan perkerasan dipergunakan percobaan CBR. Nilai CBR ini digunakan untuk menilai kekuatan yang juga dipakai sebagai dasar untuk penentuan tebal lapisan dari suatu perkerasan. Kekuatan tanah dasar tentu banyak tergantung pada kadar airnya. Makin tinggi kadar airnya, makin kecil kekuatan CBR dari tanah tersebut.

Walaupun demikian, hal itu tidak berarti bahwa sebaiknya tanah dasar di padatkan dengan kadar air rendah untuk mendapatkan nilai CBR yang tinggi, karena kadar air tidak konstan pada nilai rendah itu. Setelah pembuatan jalan, maka air akan dapat meresap kedalam tanah dasar sehingga kekuatan CBR turun sampai kadar air mencapai nilai yang constant. Kadar air yang stabil inilah yang disebut kadar air keseimbangan.

N. Pengujian Tekan Bebas (*Unconfined Compression Test*)

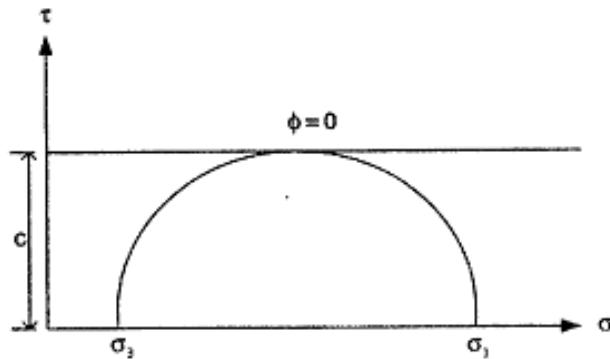
Kuat kokoh tekan tanah lempung yang tidak terkekang (*unconfined*) qu didefinisikan sebagai gaya per satuan luas contoh tanah (*spesimen*). Kokoh tekan tanah adalah kemampuan contoh tanah untuk menerima tekanan maksimum sebelum spesimen hancur (atau pada regangan aksial maksimum sebesar 20%) (Budi, 2011).

Pengujian kokoh tekan *unconfined* adalah metode yang paling sederhana mudah, dan murah untuk menentukan kekuatan geser tanah lempung. Pengujian tersebut hanya cocok untuk tanah lempung jenuh, karena contoh tanah harus bisa dibentuk sesuai ukuran tanpa merusak susunan partikelnya, dan besarnya sudut geser dalam tanah (ϕ) dipastikan sama dengan nol (Budi, 2011).

Besarnya kohesi, yang sering dinotasikan sebagai S_u (*undrained shear strength*) dapat dihitung dari:

$$S_u = \frac{q_u}{\phi \tau}$$

di mana S_u adalah kuat geser tanah (τ) menurut Mohr-Coulomb yang dapat dilihat pada Gambar 10. Pada $\sigma_1 = q_u$ dan $\phi = 0$



Gambar 10. Diagram Mohr Coulomb

(Sumber: Budi, 2011)

Untuk menjamin agar parameter kohesi tanah lempung yang diperoleh dalam keadaan undrained (c_u), maka kecepatan penekanan harus cukup besar sehingga air di dalam pori tanah tidak sempat mengalir keluar pada saat pengujian.

Tipikal kekuatan geser tanah dipresentasikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Tipikal kekuatan geser tanah

Konsistensi tanah lempung	Kekuatan geser tanah (kg/cm ²)
Sangat lunak	< 0.12
Lunak	0.12 – 0.24

Medium	0.24 – 0.48
Kaku	0.48 – 0.96
Sangat kaku	0.96 – 1.92
Keras	> 1.92

Sumber: Budi, 2011

Prosedur pengujian tekan bebas:

1. Mengeluarkan contoh tanah yang tidak terganggu (undisturbed) dari tabung (atau buat remolded sample), dan membentuk sesuai ukuran yang diinginkan dengan cara diiris (trimmed). Pada umumnya spesimen berbentuk silinder dengan diameter setengah dari tingginya
2. Mengukur dimensi spesimen dengan menggunakan jangka sorong
3. Menimbang spesimen dalam keadaan basah
4. Menempatkan spesimen dalam mesin penekan dan atur torak penekan sehingga menempel pada spesimen. Kemudian mengatur dial penurunan sehingga posisi nol pada saat torak penekan tepat menempel spesimen
5. Menjalankan mesin penekan, mencatat dial penurunan dan dial gaya yang terjadi pada saat yang bersamaan
6. Penekanan dihentikan setelah spesimen hancur (ditunjukkan oleh turunnya gaya yang terjadi)
7. Mengambil spesimen, menimbang, dan memasukkan kedalam oven selama 24 jam pada temperatur 105°C
8. Mengambil spesimen kering dari dalam oven dan timbang
9. Menghitung kokoh tekan tanah (q_u)