

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Tinjauan Umum

Dalam pengertian teknik secara umum, tanah didefinisikan sebagai himpunan mineral, bahan organik dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*) (Hardiyatmo, 2002). Sedangkan Das (1988) mendefinisikan tanah sebagai bahan yang terdiri dari agregat mineral-mineral padat yang tidak terikat secara kimia antara satu sama lain dari bahan-bahan organik yang telah melapuk berpartikel padat disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut.

3.2 Ukuran Butiran Tanah

Istilah kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), dan lempung (*clay*) tergantung dari ukuran partikel paling dominan pada tanah tersebut. Ukuran butiran tanah sangat bervariasi. Untuk menggambarkan tanah berdasarkan ukuran partikel penyusunnya, beberapa organisasi telah mengembangkan batasan-batasan ukuran jenis tanah seperti ditunjukkan pada tabel 2.1.

Pengklasifikasian tanah berdasarkan ukuran butiran tanah pada kenyataannya tidak selalu menunjukkan sifat-sifat fisik tanah, karena selain dipengaruhi oleh distribusi butiran tanah juga dipengaruhi oleh jenis mineralnya. Misalnya kandungan

mineral lempung akan mempengaruhi sifat plastis dan kohesi tanah, sehingga diperlukan sistem klasifikasi tanah berdasarkan ukuran butiran dan plastisitas tanah.

3.3 Sistem Klasifikasi Tanah

Jenis-jenis tanah diklasifikasikan menurut sifatnya ke dalam kelompok dan sub kelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem klasifikasi yang umum digunakan dalam rekayasa teknik sipil adalah sistem klasifikasi *AASHTO* dan sistem klasifikasi *Unified (USCS)*. Kedua sistem tersebut didasarkan atas analisa butiran dan keplastisan tanah.

3.3.1 Sistem Klasifikasi *AASHTO*

Sistem klasifikasi *AASHTO* yang diperlihatkan dalam tabel 3.2 dikembangkan pada tahun 1929 dan mengalami beberapa kali revisi hingga tahun 1945 yang dipergunakan hingga sekarang. Sistem ini didasarkan pada kriteria berikut ini.

- a. Ukuran butir, dibagi menjadi kerikil, pasir, lanau, dan lempung.

Kerikil : bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm dan tertahan pada ayakan diameter 2 mm.

Pasir : bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 2 mm dan tertahan pada ayakan diameter 0,075 mm.

Lanau & Lempung : bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 0,075 mm.

- b. Plastisitas, nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas (IP) sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung dipakai bila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas

sebesar 11 atau lebih.

Tabel 3.1 Batasan-batasan Ukuran Golongan Tanah

(Sumber: Braja M. Das, 1995).

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

- c. Apabila batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan dalam contoh tanah yang akan diuji maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu, tetapi persentasi dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

3.3.2 Sistem Klasifikasi *Unified (USCS)*

Sistem ini diperkenalkan oleh Cassagrande pada tahun 1942, kemudian disempurnakan lagi tahun 1952 atas kerjasama *United States Bureau of Reclamation*. Saat ini sistem *USCS* banyak dipakai oleh para ahli Rekayasa Teknik Sipil.

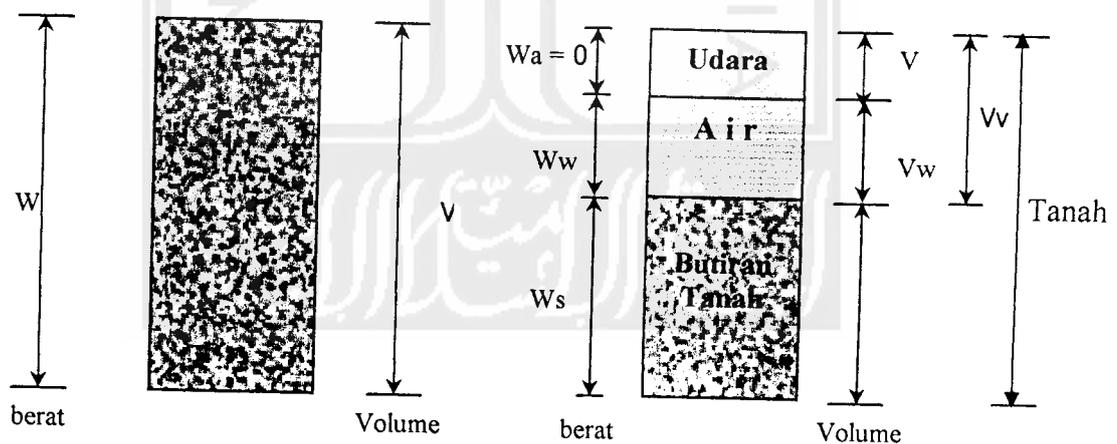
Sistem *Unified* membagi tanah dalam dua kelompok besar, yaitu tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus.

3.4 Tanah Lempung

Menurut Dunn dkk. (1992) pada umumnya, tanah lempung adalah tanah yang memiliki ukuran partikel kurang dari 0.002 mm dengan sifat sangat kompresibel, daya dukung ultimit rendah serta mempunyai permeabilitas sangat rendah. Selain ukuran partikel, tanah lempung juga dapat dikenali dari penampilan fisik dan kelakuannya terhadap air (*shrinkage*, *swelling*, plastisitas dan dispersi) (Supriyanto dan Astika, 2002).

3.5 Sifat-sifat Umum Tanah

Secara sederhana tanah disusun atas tiga bagian yang terdiri dari butiran tanah, rongga tanah (pori-pori), dan air dalam pori. Komposisi dari ketiga bagian tersebut diperlihatkan pada gambar 3.2. Ketiga bagian tanah tersebut memberikan beberapa pengertian penting yang menggambarkan sifat-sifat tanah sebagai berikut :



Gambar 3.2 Diagram fase tanah (sumber : H.C. Hardiyatmo, 2002).

a. Kadar air (w)

Yaitu perbandingan berat air dan berat padat tanah, dinyatakan dalam persen atau desimal.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (3.1)$$

Keterangan :

w = kadar air (%)

W_w = berat air (gram)

W_s = berat padat tanah (gram)

b. Berat volume kering (γ_k)

Yaitu perbandingan berat volume padat tanah dengan volume total tanah dan dinyatakan dalam persen atau desimal.

$$\gamma_k = \frac{W_s}{V} \quad (3.2)$$

Keterangan :

γ_k = berat volume tanah kering (gram/cm³)

W_s = berat padat tanah (gram)

V = volume total tanah (cm³)

c. Angka pori (e)

Yaitu perbandingan antara volume pori tanah dengan volume padat tanah, dinyatakan dalam persen atau desimal.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.3)$$

Keterangan :

e = Angka pori (% atau desimal)

Vv = volume pori tanah (cm³)

Vs = volume padat tanah (cm³)

d. Berat jenis (*Specific Gravity*)

Yaitu perbandingan antara volume butiran tanah dengan berat volume air, dinyatakan dalam persen atau desimal.

$$G_s = \frac{1}{\left[\frac{1}{SR} - \frac{SL}{100} \right]} \quad (3.4)$$

Keterangan :

Gs = berat jenis (% atau desimal)

SL = batas susut (desimal)

SR = angka susut (desimal)

e. Konsistensi tanah

Untuk tanah kohesif (tanah yang mengandung mineral lempung), kadar air dalam tanah sangat berpengaruh terhadap konsistensi tanah. Keadaan tanah, akibat perubahan kadar air dapat berupa padat, semi padat, plastis dan cair. Batas-batas keadaan tersebut disebut batas-batas Atterberg yang ditunjukkan pada gambar 3.3.

3.6 Sifat-sifat Rekayasa Mineral Lempung

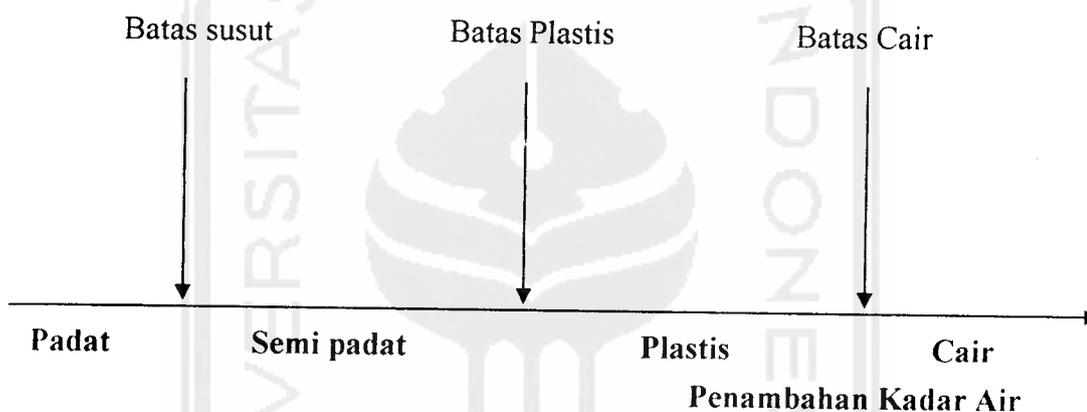
Berkenaan dengan kegunaan mineral lempung dalam Rekayasa Teknik Sipil maka pada sub bab ini akan dijelaskan secara singkat sifat-sifat mineralnya.

3.6.1 Batas-batas Atterberg

Batas-batas konsistensi tanah menurut Atterberg meliputi lima keadaan konsistensi tanah berikut.

a. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas Cair (*LL*) didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara kadar keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis.



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

b. Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Batas Plastis (*PL*) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung.

c. Batas susut (*Shrinkage Limit*)

Batas Susut (*SL*) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanahnya.

d. Batas Lengket (*Stiky Limit*)

Batas Lengket adalah kadar air dimana tanah kehilangan sifat adhesinya dan tidak lengket lagi pada benda lainnya.

e. Batas Kohesi (*Cohesion Limit*)

Batas Kohesi adalah kadar air dimana tanah kehilangan sifat kohesinya, yaitu gaya lekatan antar butiran-butiran tanah.

Dari lima keadaan konsistensi tanah, tiga diantaranya sangat penting dalam Rekayasa Teknik Sipil, yaitu batas plastis, batas cair, dan batas susut. Konsistensi yang diturunkan dari tiga keadaan tersebut, yaitu :

1. Indeks plastisitas (*Plasticity Index*), PI

Adalah rentang kadar air dimana tanah bersifat plastis. Indeks plastisitas (PI) dihitung sebagai berikut

$$PI = LL - PL \quad (3.5)$$

Keterangan :

PI = indeks plastisitas (% atau desimal)

PL = batas plastis (% atau desimal)

LL = batas cair (% atau desimal)

Indeks Plastisitas merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis. Karena itu, indeks plastis menunjukkan sifat keplastisitan tanahnya.

Jika tanah mempunyai interval kadar air daerah plastis yang kecil, maka keadaan ini disebut dengan tanah kurus. Kebalikannya, jika tanah mempunyai interval kadar air daerah plastis yang besar disebut tanah gemuk. Batas-batas

Atterberg dari mineral lempung terdapat dalam tabel 3.4.

2. Indeks Kecairan (*Liquidity Index*),

Indeks kecairan (LI) ditentukan melalui hubungan :

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL} \quad (3.6)$$

Keterangan :

LI = indeks kecairan (% atau desimal)

w = kadar air (% atau desimal)

PL = batas plastis (% atau desimal)

LL = batas cair (% atau desimal)

Indeks kecairan berguna untuk menentukan keadaan tanah di lapangan. Apabila kadar air aslinya (w), batas plastis dan indeks plastisitas diketahui maka :

Jika $0 < LI < 1$ tanah bersifat plastis,

Jika $LI \geq 1$ tanah berada dalam keadaan cair,

Jika $LI \leq 0$ tanah berada dalam keadaan padat.

3.6.2 Kemampatan (Kompresibilitas)

Tanah mempunyai sifat kemampatan yang besar jika dibanding bahan bangunan yang lain seperti baja dan beton. Walaupun kemampatan butiran tanah dan air relatif kecil, tetapi karena tanah mempunyai pori-pori yang besar maka kemampatan dapat diakibatkan oleh penyusutan pori-pori tanah.

Pada saat beban bekerja pada tanah, susunan butir-butir tanah berubah sehingga pori-pori menyusut. Akibat penyusutan pori-pori tersebut, air pori dipaksa keluar dari

ruang pori. Pada tanah berpasir yang bersifat permeabel, pengaliran air pori berlangsung cepat sehingga proses pemampatan segera selesai. Tetapi untuk tanah berbutir halus (lempung) yang mempunyai koefisien permeabilitas kecil, proses pengaliran air pori berlangsung sangat lambat, akibatnya proses pemampatan memakan waktu yang lama. Gejala demikian disebut konsolidasi.

Tabel 3.2 Batas-batas Atterberg dari Mineral Lempung

(Lambe & Whitman, 1978).

Mineral	Ion Penukar	LL (%)	PL (%)	PI (%)	SL (%)
<i>Montmorillonite</i>	Na	710	54	656	9,9
	K	660	98	562	9,3
	Ca	510	81	429	10,5
	Mg	410	60	350	14,7
	Fe	290	75	215	10,3
	Fe a	140	73	67	-
<i>Illite</i>	Na	120	53	67	15,4
	K	120	60	60	17,5
	Ca	100	45	55	16,8
	Mg	95	46	49	14,7
	Fe	110	49	61	15,3
	Fe a	79	46	33	-
<i>Kaolinite</i>	Na	53	32	21	26,8
	K	49	29	20	-
	Ca	38	27	11	24,5
	Mg	54	31	23	28,7
	Fe	59	37	22	29,2
	Fe a	56	35	21	-
<i>Attapulgite</i>	H	270	150	120	7,6

3.6.3 Penurunan

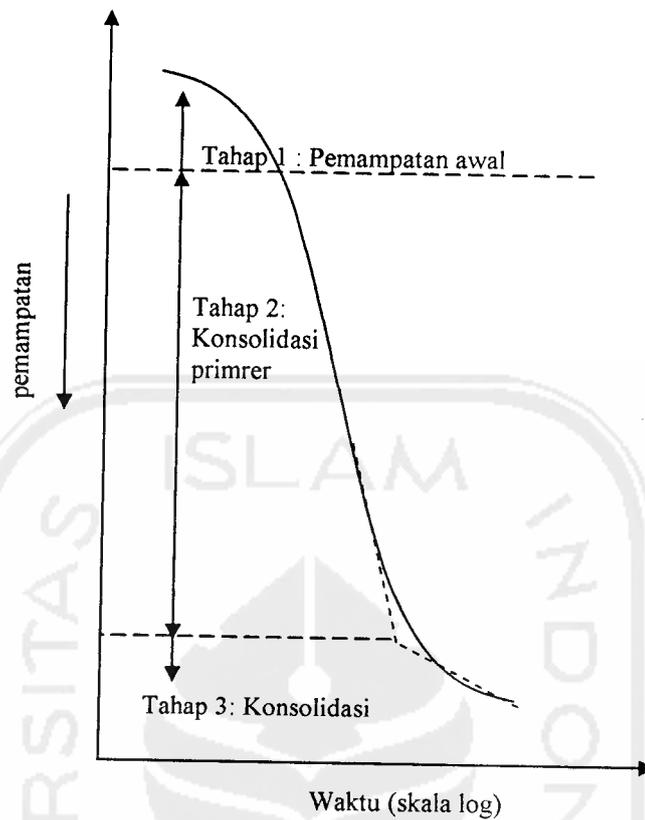
Secara umum, penurunan pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat

dibagi dalam dua kelompok besar, yaitu :

1. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat keluarnya air yang menempati pori-pori tanah.
2. Penurunan segera (*immediate settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Perhitungan penurunan segera umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas.

Bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara pemampatan dan waktu adalah seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3.4. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa ada tiga tahapan yang berbeda yaitu :

- Tahap 1 : Pemampatan awal (*initial compression*), yang pada umumnya disebabkan oleh pembebanan awal (*preloading*).
- Tahap 2 : Konsolidasi primer (*primary consolidation*), yaitu periode selama tekanan air pori secara lambat laun dipindahkan kedalam tegangan efektif, sebagai akibat dari keluarnya air dari pori-pori tanah.
- Tahap 3 : Konsolidasi sekunder (*secondary consolidation*) yang terjadi setelah tekanan air pori hilang seluruhnya. Pemampatan yang terjadi di sini adalah disebabkan oleh penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah.



Gambar 3.4 Grafik waktu lawan pemampatan selama konsolidasi untuk suatu penambahan beban yang diberikan. (Sumber : B.M. Das, 1988)

Penurunan yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan formula :

1. Untuk lempung *normally consolidated*,

$$S_c = C_c \frac{H}{1+e_o} \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \quad (3.7)$$

2. Untuk lempung *Overconsolidated*,

- a. Bila $p_o' + \Delta p < p_c'$:

$$S_c = C_r \frac{H}{1+e_o} \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \quad (3.8)$$

b. Bila $p_o' + \Delta p > p_c'$:

$$S_c = C_r \frac{H}{1+e_o} \log \frac{p_c'}{p_o'} + C_c \frac{H}{1+e_o} \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_c'} \quad (3.9)$$

Keterangan :

C_r = indeks pemampatan kembali

C_c = indeks pemampatan

H = tebal lapisan tanah (m)

p_c' = tekanan prakonsolidasi (t/m^2)

e_o = angka pori awal (desimal)

Δp = penambahan tegangan (t/m^2)

P_o' = tekanan *overburden* efektif mula-mula (t/m^2)

3.6.4 Kekuatan Geser

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan (H.C. Hardiyatmo, 1992). Dengan dasar penelitian ini, kuat geser berhubungan erat dengan kondisi keruntuhan tanah. Nilai kuat geser tanah sukar ditentukan secara pasti (Bowles, 1993), karena sangat tergantung pada banyak faktor seperti :

- keadaan tanah (angka pori, ukuran, dan bentuk butir),
- jenis tanah (kerikil, pasir, lempung, dan komposisinya),
- kadar air,
- jenis beban dan tingkatnya, seperti beban dinamis dan beban stastis, dan
- anisotropois tanah, yaitu sifat tanah yang tidak sama arah lateral dan vertikal.

Teori kuat geser tanah yang sekarang banyak dipakai adalah teori yang dikemukakan oleh Coulomb (1776). Coulomb menyatakan bahwa kuat geser tanah dapat dibagi dalam nilai yang tergantung pada tahanan geser antar butiran tanah dan kohesi pada permukaan butiran itu. Secara numerik kekuatan geser menurut Coulomb dinyatakan dalam persamaan :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3.10)$$

Keterangan :

- τ = kuat geser tanah (kg/cm^2)
- c = kohesi tanah (kg/cm^2)
- σ = tegangan normal pada bidang tanah (kg/cm^2)
- ϕ = sudut gesek dalam ($^\circ$)

3.7 Pemadatan

Pemadatan sering didefinisikan sebagai usaha meningkatkan berat volume kering dengan cara dinamis. Pemadatan tanah dapat berpengaruh terhadap kualitas tanah yaitu :

1. mempertinggi kuat geser tanah,
2. mengurangi sifat mudah mampat,
3. mengurangi permeabilitas, dan
4. mengurangi perubahan volume sebagai akibat pengurangan kandungan air maksimum yang dapat mengisi pori-pori.

Hubungan antara berat volume kering (γ_k), berat volume basah (γ_b) dan kadar

air (w), dinyatakan dalam persamaan :

$$\gamma_k = \frac{\gamma_b}{1 + w} \quad (3.11)$$

Keterangan :

γ_k = volume kering (gram/cm³)

γ_b = berat volume basah (gram/cm³)

w = kadar air (%)

Tabel 3.3 Hubungan kekuatan tekan bebas (q_u) dengan konsistensinya.

No	Kondisi Tanah Lempung	q_u (kg/cm ²)
1	Lempung keras	> 4,00
2	Lempung sangat kaku	2,00 – 4,00
3	Lempung kaku	1,00 – 2,00
4	Lempung sedang	0,50 – 1,00
5	Lempung lunak	0,25 – 0,50
6	Lempung sangat lunak	< 0,25

Sumber : Mekanika Tanah I, H.C. Hardiyatmo, 2002.

3.8 Klasifikasi Sifat Tanah Lempung Berdasarkan Kuat Tekan Bebas

Nilai kuat tekan bebas (q_u) beberapa jenis tanah lempung oleh Hardiyatmo diklasifikasikan untuk memudahkan membedakan jenis lempung berdasarkan sifat kekerasannya, sebagaimana dapat dilihat pada tabel 3.4.

3.9 Stabilisasi Tanah

Tidak semua tanah asli yang kita dapati di lapangan memenuhi kriteria yang

sesuai dengan kelayakan secara teknis untuk digunakan langsung. Oleh karena itu, perlu pengolahan kembali agar bisa digunakan sebagai pendukung konstruksi atau bahan konstruksi. Khusus pada semua usaha memperbaiki sifat fisik maupun sifat-sifat teknis tanah (*propeties engineering*) sebagai pendukung konstruksi disebut stabilisasi.

Menurut Bowles (1986), stabilisasi dapat terdiri dari salah satu tindakan berikut:

1. menambah kerapatan tanah,
2. menambah material yang tidak aktif sehingga mempertinggi kohesi dan / atau tahanan geser,
3. menambah material untuk menyebabkan perubahan-perubahan kimiawi dan fisik dari material tanah,
4. menurunkan muka air tanah (*dewatering*)

Terdapat dua metode utama untuk menstabilisasi tanah yaitu :

1. stabilisasi mekanis (*mechanical stabilization*)

yaitu upaya pengaturan gradasi butiiran tanah secara proporsional yang diikuti dengan proses pemadatan untuk mendapatkan kepadatan maksimum. Bowles (1988) mengatakan bahwa cara pemadatan ini dapat ditempuh dengan cara menggunakan peralatan mekanis (misal : *sheep-foot roller*), benda-benda berat dijatuhkan, eksplosif, *preloading*, pembekuan, pemanasan dan lain-lain.

2. stabilisasi kimia (*chemical stabilization*)

yaitu stabilisasi dengan menggunakan cara penambahan bahan kimia padat, cair maupun *gel* pada tanah sehingga mengakibatkan perbaikan sifat-sifat fisik dan

mekanis dari tanah tersebut. Metode ini menggunakan cara mencampurkan tanah dengan semen, aspal, kapur, bentonit, atau bahan kimia lainnya (Cernica, 1995).

3.10 Stabilisasi Tanah Lempung

Stabilisasi tanah adalah usaha perbaikan sifat-sifat mekanis tanah sehingga dapat memenuhi persyaratan tertentu sesuai manfaat yang diharapkan. Untuk tanah berlempung pada umumnya stabilisasi tanah dapat dilakukan dengan salah satu atau kombinasi dari metode berikut :

a. Stabilisasi mekanis

Stabilisasi mekanis merupakan stabilisasi yang dilakukan dengan meningkatkan kerapatan tanah. Metode yang dilakukan adalah dengan pemadatan, baik dengan mesin gilas, ledakan atau tumbuikan, dan sebagainya.

b. Stabilisasi dengan bahan aditif

Tujuan stabilisasi dengan bahan aditif adalah untuk memperbaiki gradasi. Hal ini dapat dilakukan secara fisik dengan mencampur tanah dengan tanah yang mempunyai ukuran yang berbeda, misalnya mencampur pasir pada tanah lempung atau mencampur lempung pada tanah berpasir.

Metode lain untuk stabilisasi dengan bahan aditif ini adalah mencampur tanah dengan bahan yang mengikat, seperti semen, kapur, limbah karbit, limbah tekstil atau dengan limbah tekstil lainnya. Metode ini sering dipakai untuk stabilisasi tanah lempung, karena selain bersifat mengikat bahan tersebut juga dapat memperbaiki sifat-sifat lempung seperti plastisitas, kekuatan dan daya serap air.

Bahan yang paling sering digunakan untuk stabilisasi tanah lempung adalah ka-

pur dan semen. Kapur sangat baik digunakan untuk tanah kohesif, sedangkan semen sangat cocok untuk tanah berpasir atau kerikil yang mengandung tanah berbutir halus.

3.11 Limbah Padat Industri Tekstil (*Sludge*)

Proses pengolahan tekstil pada pabrik tekstil PT. SAMITEX adalah perajutan, pewarnaan, pencapan, penyempurnaan dan garmen. Pada proses pewarnaan dan penyempurnaan dihasilkan limbah yang kemudian diproses untuk dinetralisir. Hasil proses netralisir tersebut berbentuk lumpur yang kemudian dikeringkan yang menghasilkan limbah padat (*sludge*) yang terbentuk padatan halus.

Lumpur ini merupakan endapan dari proses pengolahan limbah yang ada sehingga pada lumpur ini merupakan kumpulan bahan-bahan pencemar yang sangat berbahaya, sehingga direkomendasikan sebagai limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) yang tidak boleh dibuang begitu saja tanpa pengolahan. Lumpur tersebut juga banyak mengandung Crom, Brom, Besi dan unsur logam lainnya yang dikategorikan berbahaya. Unsur-unsur logam berbahaya tersebut berasal dari bahan pewarnaan pada proses produksi dan berasal dari bahan koagulan yang dipergunakan untuk pengolahan limbah cair.

Berdasarkan pemeriksaan dengan parameter fisika dan kimia yang dilakukan oleh balai Teknik Kesehatan Lingkungan (BTKL) Departemen Kesehatan Jogjakarta tahun 2002, *sludge* mengandung komposisi kimia berupa Magnesium (Mg) 12.150 mg/kg, Kalsium (Ca) 140.000 mg/kg, Natrium (Na) 4.293,475 mg/kg, Kalium (K) 448,375 mg/kg, dan Kesadahan (CaCO_3) 400.000 mg/kg (Supriyanto dan Astika,

2002).

3.12 Batu Zeolit

Banyak cara untuk mengolah limbah tersebut, salah satunya adalah teknologi fitrifikasi. Pengolahan dengan metode fitrifikasi ini adalah dengan menggunakan prinsip pengungkungan (*immobilisasi*) atau pengikatan ion-ion logam yang ada dalam lumpur tersebut ke dalam bahan pembentuk keramik (Supriyanto dan Astika, 2002).

Bahan tambah yang dipergunakan pada penelitian ini dipilih zeolit alam lokal. Disebutkan dalam laporan penelitian Supriyanto dan Astika (2002) penggunaan zeolit ini didasarkan keuntungan yang dimilikinya, diantaranya :

1. jumlah di alam melimpah,
2. mineral zeolit berkristal sangat halus,
3. relatif sangat ringan, dan
4. mampu menjerat unsur-unsur logam berat karena mengandung SiO_2 dan Al_2O_3 yang cukup tinggi.

3.13 Pengujian Proktor Standar

Sampel diambil dari tanah yang lolos saringan no. 4 belum dicampur dengan limbah sebanyak 10 buah masing-masing 2 kg. Pada setiap bagian tanah dicampur air dengan dua kali variasi sebanyak 100 cc, 200 cc, 300 cc, 400, cc dan 500 cc, kemudian disimpan selama 24 jam. Setelah itu baru tiap contoh tanah dimasukkan ke cetakan silinder sebanyak tiga lapisan, kemudian ditumbuk sebanyak 25 kali pada

tiap lapis. Hal ini juga dilakukan pada tanah yang sudah dicampur dengan *sludge* dan zeolit.

3.14 Pengujian Kuat Tekan Bebas

Tabel 3.4 Campuran untuk pengujian kuat tekan bebas.

Waktu pemeraman	Persentasi kadar campuran				
	0 %	3 %	5 %	7 %	9 %
0	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2
9	2	2	2	2	2
12	2	2	2	2	2

Keterangan :

- Pada pengujian tanpa pemeraman sampel yang digunakan 2 buah untuk uji kuat tekan bebas.
- Pada pengujian dengan pemeraman (*curing time*) sampel yang digunakan hanya sampel yang memiliki karakteristik campuran optimum.
- Cara penambahan zat aditif pada sampel berdasarkan persentasi yang telah ditentukan dengan acuan formula :

$$W_{\text{camp}} = W_k \times N \quad (3.12)$$

Keterangan :

W_{camp} = berat aditif (gram)

W_k = berat tanah kering (gram)

N = jumlah persentasi campuran aditif (desimal).

- penambahan air pada tanah sampel hingga mencapai kadar air yang diinginkan

menggunakan formula (Panduan Praktikum Mekanika Tanah FTSP UII, 2000) :

$$\text{Penambahan air} = W_k \times \left(\frac{100 + B}{100 + A} - 1 \right) \quad (\text{cc}) \quad (3.13)$$

Keterangan :

W_k = berat tanah kering (gram)

B = kadar air rencana (%)

A = Kadar air tanah mula-mula (%)

3.15 Pengujian Sifat Fisik Tanah Lempung

Pengujian yang dilakukan meliputi kadar air tanah asli (*disturb*), berat jenis, batas-batas Atterberg, analisa saringan dan analisa hidrometer, kadar air optimum, dan berat volume kering.

3.16 Pengujian Sifat Mekanik Tanah Lempung

Pengujian yang dilakukan meliputi uji kuat tekan bebas (*unconfined compressive test*) yang merupakan pengujian tanah dengan kondisi tak terkonsolidasi tak teralirakan (*unconsolidated undrained*). Pengujian dilakukan pada sampel tanah tak terganggu (*undisturbed*) dan sampel tanah yang telah distabilisasi. Kriteria perbandingan sampel tanah, panjang terhadap diameter (L/D) adalah $2 < L/D < 3$. pada peneliitian ini digunakan rasio $L/D=2$. Ukuran sampel digunakan ukuran diameter 38,0 mm dan tinggi 76,0 mm. Kecepatan deformasi dikontrol antara 0,5 sampai 2,0 persen per menit.

Jika tanah telah mencapai keruntuhan atau jika regangan telah mencapai 20%

meski tanah belum runtuh maka pengujian dihentikan. Menurut Braja M. Das (1995), dari pengujian ini besarnya kuat tekan bebas dapat diperoleh dengan persamaan :

$$q_u = \frac{P}{A} \quad (3.14)$$

Keterangan :

q_u = kuat tekan bebas (kg/cm^2)

P = beban maksimum (kg)

A = luas tampang sampel tanah (cm^2)

Pengujian tekan bebas dilakukan untuk tanah asli yang diolah kembali (*remolded*) tanah stabilisasi pada umur pemeraman 0, 3, 6, 9, dan 12 hari. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh penambahan limbah terhadap tanah asli, sedangkan pemeraman bertujuan untuk mengetahui pengaruh perawatan kering terhadap peningkatan kekuatan tanah stabilisasi.

Pemeraman itu dilakukan dengan cara sampel tanah yang telah dipadatkan dengan pemadat standar dan telah dibentuk sesuai ukuran, dibungkus plastik dengan rapat dan kedap air.

3.17 Uji Konsolidasi Satu Dimensi

Prosedur uji konsolidasi pertama kali dikenalkan oleh Terzaghi. Pengujian dilakukan di dalam sebuah konsolidometer. Skema konsolidometer ditunjukkan dalam gambar 5.1. Contoh tanah diletakan di dalam cincin logam dengan dua buah batu berpori yang diletakan di atas dan di bawah contoh tanah tersebut ukuran contoh tanah yang digunakan adalah diameter 2,5 inci (63,5 mm) dan tebal 1 inci (2,54 mm).

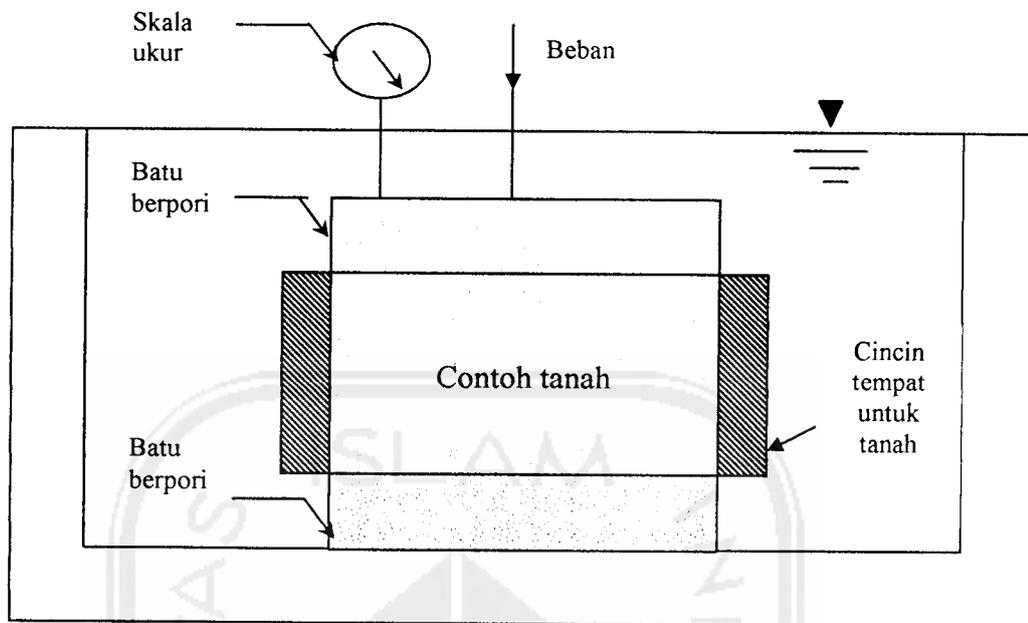
Metode pengujian adalah metode *Rapid* merupakan suatu metode pengujian konsolidasi dengan cara membaca dial hanya cukup sampai hitungan menit yang ke-100 untuk tiap penambahan bebannya. Benda uji diberi tekanan sebesar 0,25, 0,50, 1, 2, 4 dan 8 kg/cm². setelah pembebanan mencapai tekanan 8 kg/cm² dicatat pengembangan (rebound) yang terjadi setelah konsolidasi dengan mengurangi tekanan sebesar 2 kg/cm² baru kemudian diakhiri dengan tekanan 0,25 kg/cm² dan 0 kg/cm² dengan pengurangan tekanan dilakukan tiap 100 menit. Pembacaan rebound dilakukan di awal dan menit ke-100 saja.

Indeks kompresi C_c dihitung dengan menggunakan rumus :

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{p_2}{p_1}} \quad (3.15)$$

Keterangan :

- C_c = indeks kompresi (desimal)
- e_1 = angka pori awal (desimal)
- e_2 = angka pori kedua (desimal)
- p_1 = tegangan efektif pada angka pori = e_1 (kg/cm²)
- p_2 = tegangan efektif pada angka pori = e_2 (kg/cm²)



Gambar 3.5 Konsolidometer.(B.M. Das, 1988)