BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah Lempung

Tanah lempung merupakan tanah dengan ukuran mikrokonis sampai dengan sub mikrokonis yang berasal dari pelapukan unsur-unsur kimiawi penyusun batuan. Tanah lempung sangat keras dalam keadaan kering, dan tak mudah terkelupas hanya dengan jari tangan. Permeabilitas lempung sangat rendah, bersifat plastis pada kadar air sedang (Terzaghi, 1987).

Hardiyatmo,1999 menjelaskan bahwa sifat-sifat tanah lempung pada umumnya adalah sebagai berikut:

1. Ukuran butir halus (kurang dari 0,002 mm)
2. Permeabilitas rendah
3. Kenaikan air kapiler tinggi
4. Sangat kohesif
5. Kadar kembang susut yang tinggi
6. Proses konsolidasi lambat

Dalam klasifikasi tanah secara umum, menurut *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), *U.S. Department of Agriculture* (USDA), dan *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), lempung merupakan partikel yang memiliki ukuran butiran <0,002 mm. Berdasarkan *American Standard Testing and Materials* (ASTM), ukuran partikel lempung adalah antara 0,002-0,005 mm. Sedangkan berdasarkan *Unified Soil Classification System* (USCS), lempung diklasifikasikan sebagagi partikel yang memiliki ukuran butiran <0,0075 mm. Namun demikian, dibeberapa kasus partikel berukuran antara 0,002 mm sampai 0,005 mm masih digolongkan sebagai partikel lempung (ASTM-D-653). Disini tanah diklasifikasikan sebagai lempung hanya berdasarkan ukuran saja, namun belum tentu tanah dengan ukuran partikel lempung tersebut juga mengandung mineral- mineral lempung. Informasi tentang klasifikasi tanah berdasarkan ukuran butirannya disajikan dalam Tabel 2.1 dibawah ini.

Tabel 2.1. Penggolongan Tanah Oleh Beberapa Lembaga Berdasarkan Ukuran Butir

Nama Golongan	Ukuran Butiran (mm)			
	Kerikil	**Pasir**	**Lanau**	**Lempung**
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2-0,06	0,06-0,002	<0,002
U.S. Department od Agriculture (USDA)	>2	2-0,05	0,05-0,002	<0,002
American Association of State Highway and Transportation Offical (AASHTO)	76,2-2	2-0,075	0,075-0,002	<0,002
Unified Soil Classification System (USCS)	76,2-4,75	4,75-0,075	<0,0075	

2.1.1 Mineral dalam Tanah Lempung

Pada umumnya, terdapat kira-kira 15 macam mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung (Kerr, 1959). Dalam klasifikasi mineral tersebut dikelompokkan menjadi: *montmorillonite, illite, kaolinite,* dan *polygorskite*. Mineral-mineral tersebut memiliki struktur lapisan serta ion penghubung yang berbeda sehingga tingkat plastisitas dan potensi pengembangan yang dihasilkan juga berbeda.

Kaolinite adalah mineral yang terdapat dalam lempung primer. *Kaolinite* tidak memberikan sifat mengembang karena ion hidrogen di dalamnya mampu menahan molekul-molekul air masuk ke dalamnya. Selain itu, *kaolinite* hanya memiliki permukaan luar sehingga permukaan spesifiknya sangat kecil dan tidak mampu menyerap air dalam jumlah banyak (Rachman Sutanto, 2005). Permukaan spesifik dapat dilihat pada Tabel 2.2 dibawah ini.

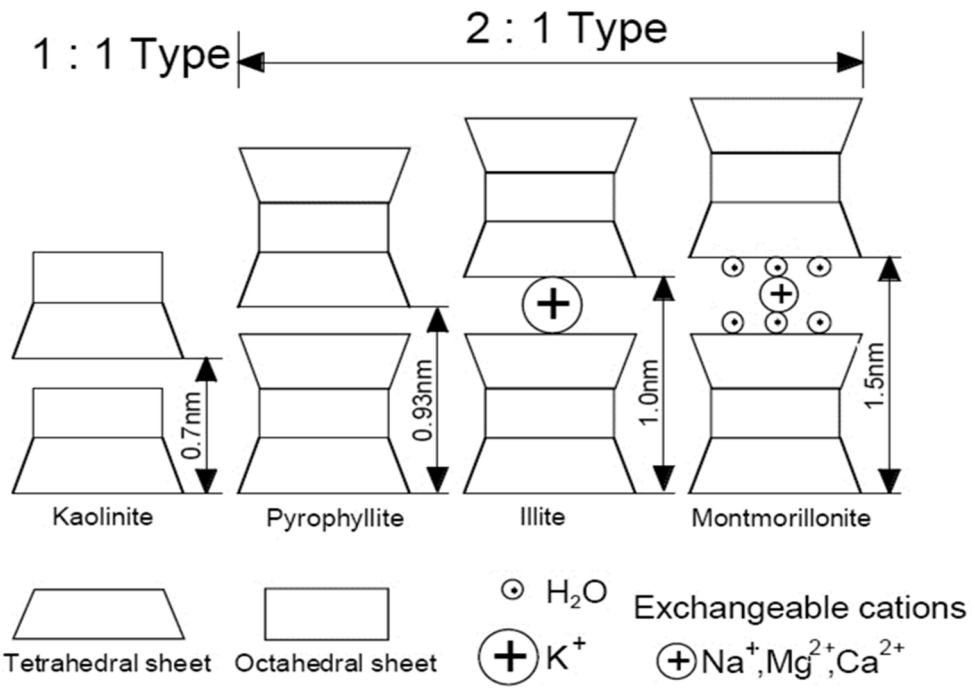
Tabel 2.2. Tebal Tipikal, Diameter Tipikal, dan Permukaan Spesifik Mineral Lempung

Mineral	Tebal Tipikal (nm)	Diameter Tipikal (nm)	Permukaan Spesifik (km²/kg)
Montmorillonite	3	100-1000	0.8
Illite	30	10000	0.08
Kaolinite	50-2000	300-4000	0.015

(Sumber: Yong dan Warkentin, 1975)

Illite adalah mineral yang terdapat dalam lempung sekunder. *Illite* dapat memberikan sifat pengembangan tetapi tidak mengembang secara signifikan karena ion kalium di dalamnya merupakan ion yang tidak dapat terganti dan penyerapan airnya terbatas.

Montmorillonite adalah mineral yang terdapat dalam lempung sekunder juga. *Montmorillonite* memiliki sifat pengembangan yang tinggi karena ion H_2O di dalamnya mudah lepas ketika berinteraksi dengan air sehingga molekul air dapat masuk dan mengakibatkan tanah mudah mengembang. Untuk mengetahui lebih jelasnya mengenai mineral-mineral pada tanah lempung dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Tipe Mineral Silikat dalam Lempung

Dari mineral-mineral tersebut, tanah lempung dapat dibagi menjadi dua menurut mineral pembentuknya, yaitu tanah lempung ekspansif dan tanah lempung non ekspansif. Tanah lempung ekspansif tersusun dari mineral lempung yang mempunyai karakter kembang dan susut yang besar apabila terjadi perubahan kadar air seperti pada kelompok *montmorillonite*. Kelompok ini menjadikan tanah lempung tidak stabil jika berhubungan dengan air. Perbedaan keduanya dapat terlihat secara kasat mata, pada saat musim kemarau, tanah lempung ekspansif mengalami retak- retak poligonal yang tidak beraturan pada permukaan tanah dan retakan tersebut menyebabkan rongga yang cukup dalam. Sebaliknya, pada tanah lempung non ekspansif hanya mengalami retak-retak pada permukaan tanpa ronggo-rongga yang dalam.

2.1.2 Pengertian Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif merupakan tanah yang memiliki potensi kembang-susut yang besar pada saat bereaksi dengan air. Jika pada suatu saat terjadi perubahan kadar air, maka sistem muatan listrik dalam air higroskopis (yang terkandung dalam massa tanah) akan berubah karena terjadi penambahan muatan positif atau negatif. Dengan demikian penambahan kadar air dalam tanah ekspansif pada hakekatnya akan menambah jumlah sistem muatan listrik dalam satu satuan tanah tersebut. Hal inilah yang menyebabkan tanah ekspansif memiliki potensi kembang-susut yang besar. (*R.F.Craig, 1986*).

Selain itu tanah lempung ekspansif mineralnya didominasi oleh mineral *montmorillonite.* Mineral *montmorillonite* mudah menyerap air dalam jumlah banyak bila dibandingkan dengan mineral lainnya karena memiliki permukaan spesifik yang besar. Selain itu, ion H_2O dalam *montmorillonite* mudah lepas sehingga ketika tanah dalam kondisi basah, molekul air dapat masuk ke dalam sela antarlapisan. Akibatnya, tanah mudah mengembang dan mengakibatkan daya dukungnya rendah.

2.1.3 Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

Cara-cara yang biasa digunakan untuk mengidentifikasi tanah ekspansif menurut Chen (1975) dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu Identifikasi Mineralogi, Cara tidak langsung (*single index method*), Cara langsung.

a. Identifikasi Mineralogi

Identifikasi mineralogi berguna untuk mengidentifikasi potensi kembang-susut tanah lempung. Dengan adanya identifikasi mineralogi ini dapat membedakan mineral yang satu dengan yang lain.

b. Cara Tidak Langsung *(Single Index Method)*

Hasil uji sejumlah indeks dasar tanah dapat digunakan untuk mengevaluasi potensi ekspansif atau tidak pada suatu contoh tanah. Uji indeks dasar adalah uji batas-batas Atterberg, linear shrinkage test (uji susut linier), uji mengembang bebas dan uji kandungan koloid. Chen (1975) berpendapat bahwa potensi mengembang tanah ekspansif sangat erat hubungannya dengan indeks plastisitas sehingga Chen membuat klasifikasi potensi pengembangan pada tanah lempung berdasarkan indeks plastisitas, seperti yang tercantum dalam Tabel 2.3 dibawah ini.

Table 2.3 Kriteria Pengembangan Berdasarkan IP

Plasticity Index (%)	Swelling Potensial
0 – 15	Low
10 – 35	Medium
35 – 55	High
> 55	Very High

(Sumber: Chen, 1975)

Pada sebuah parameter yag disebut aktivitas menurut Skemptom (1953), yang tercantum dalam Persamaan (2.1) berikut:

$$Activity\ (A) = \frac{PI}{c} \quad \text{.....} \quad (2.1)$$

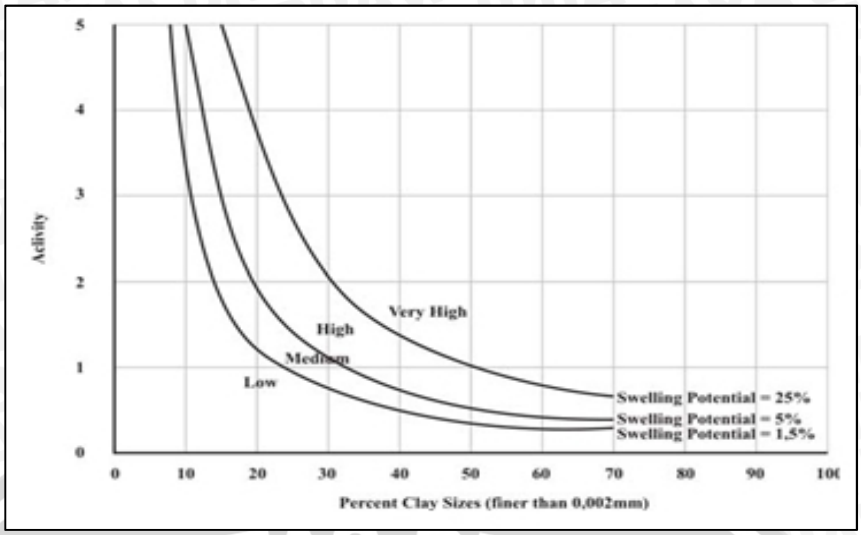
Dimana:

A = Aktivitas

PI = Indeks Plastisitas

c = Persentase lolos < 0,002 mm

Hasil dari perhitungan *activity* kemudian di plot pada Gambar 2.2 untuk mengetahui *swelling potensial* berada pada tingkat mana.



Gambar 2.2 Tingkat *activity* pada *swelling potensial* (Seed et al., 1962)

Dalam Kriteria Raman, penggolongan tanah ekspansif berdasarkan batas-batas *Atterberg* dapat menggunakan dua parameter, yaitu PI *(Plasticity Index)* dan SI *(Shrinkage Index)* seperti yang tercantum dalam Tabel 2.4 dibawah ini.

Tabel 2.4 Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan IP dan SI

Plasticity Index (%)	Shrinkage Index (%)	Degree Of Expansion
< 12	< 15	Low
12 - 23	15 – 30	Medium
23 – 30	30 – 40	High
> 30	> 40	Very High

(Sumber: Raman, 1967)

Menurut Chen (1975) yang dikutip dari Altmeyer (1955), membuat acuan mengenai hubungan derajat mengembang tanah lempung dengan nilai persentase susut linear dan persentase batas susut Atterberg, seperti yang tercantum pada Tabel 2.5 dibawah ini.

Tabel 2.5 Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan Linear Shrinkage dan Shrinkage Limit

Linear Shrinkage	SL (%)	Probable Swell	Degree Of Ekspansion
< 5	> 12	< 0.5	Non Critical
5 – 8	10 – 12	0.5 – 1.5	Marginal
> 8	< 10	< 1.5	Critical

(Sumber: Altmeyer, 1955)

c. Cara Langsung

Cara pengukuran langsung ini merupakan metode terbaik, yaitu dengan cara menentukan potensi pengembangan dan tekanan pengembangan dari tanah ekspansif dengan menggunakan *Oedometer Terzaghi*. Sampel tanah yang berbentuk silinder tipis diletakkan ke dalam konsolidometer yang dilapisi dengan lapisan pori pada sisi atas dan sisi bawah yang dimana kemudian diberi beban sesuai yang diinginkan. Besarnya pengembangan contoh tanah dibaca beberapa saat setelah dibasahi dengan air. Besarnya pengembangan yang terjadi adalah pengembangan tanah dibagi dengan tebal awal contoh tanah.

Adapun cara pengukuran tekanan pengambangan yang umum digunakan ada dua cara, yaitu cara pertama, pengukuran dengan beban tetap sehingga mencapai prosentase mengembang tertinggi, kemudian sampel tanah diberi tekanan untuk kembali ke ketebalan semula. Sedangkan cara kedua, yaitu sampel tanah direndam di dalam air dengan mempertahankan volume atau mencegah adanya pengembangan dengan cara menambah beban diatasnya setiap saat. Metode ini biasanya disebut dengan *constant volume method.*

2.2 Stabilisasi Tanah

Dalam suatu pekerjaan konstruksi terdapat kondisi tanah yang tidak memenuhi kualitas persyaratan fisik maupun teknis. Karena itu perlu dilakukan usaha perbaikan sifat-sifat tanah untuk memenuhi persyaratan yang ditentukan. Usaha perbaikan sifat-sifat tanah ini disebut stabilisasi tanah (*Bowles*, 1986). 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.

Stabilisasi pada tanah dapat dilakukan secara stabilisasi mekanik, stabilisasi fisik dan stabilisasi kimia.

- Stabilisasi mekanik adalah stabilisasi yang dilakukan dengan cara mengubah sifat mekanik tanah seperti kuat geser tanah, kohesi, konsolidasi dan modulus elastisitas tanah (kekenyalan tanah), contohnya dengan menggunakan mesin

gilas (roller), benda berat yang dijatuhkan (pounder), ledakan (explosive), tekanan statis, tekstur dan pembekuan.

- Stabilisasi fisik adalah stabilisasi yang dilakukan dengan cara mengubah karateristik tanah. Dalam hal ini tanah harus uji gradasi butiran, batas konsistensi tanah serta kandungan mineral tanah, contohnya dengan cara pemanasan (heating), pendinginan (cooling) dan menggunakan arus listrik.
- Stabilisasi kimia adalah stabilisasi yang dilakukan dengan cara menambahkan zat aditif pada tanah sehingga mengakibatkan terjadinya perubahan sifat-sifat tanah. Zat aditif yang sering digunakan diantaranya : semen, kapur, abu batu bara, abu ampas tebu dll.

Upaya stabilisasi tanah lempung sudah banyak dilakukan dengan stabilisator yang beraneka ragam seperti : kapur, semen, kombinasi semen dan abu terbang, GEOSTA, aspal dan lain-lain. Alasan penggunaan bahan-bahan tersebut adalah kesesuaiannya dengan jenis tanah, mudah didapat, murah harganya, dan tidak mencemari lingkungan.

Kizdi (1979) melaporkan bahwa dengan menambah semen baik kedalam tanah lempung maupun kedalam tanah pasir akan meningkatkan kepadatan maksimum tanah tersebut sebesar kurang lebih 10%. Namun demikian, jika diterapkan pada tanah lanau kepadatannya justru menurun. Menurutnya, semen menurunkan indeks plastisitas tanah kohesif yang disebabkan oleh peningkatan batas plastis serta penurunan batas cairnya.

Idrus (1991) melakukan penelitian mengenai stabilisasi tanah lempung dengan menggunakan kapur sebagai bahan kimia. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut: kepadatan kering maksimum (standar Proctor) meningkat sebesar 30% dari kepadatan semula (tanah asli), dengan kadar kapur optimum pada 8,5%. Disamping itu, pada pengujian tekan bebas menunjukkan bahwa kuat geser tak terdrainase (Su) dari tanah lempung meningkat sebesar 25% dari kuat geser tanah asli. Nilai CBR tanah juga mengalami kenaikan sebesar 25%.

Hapsoro (1996), melakukan penelitian mengenai stabilisasi tanah lempung dengan menggunakan campura abu terbang dan GEOSTA. Kadar abu terbang dibuat tetap sebesar 13% sdari berat tanah, sedangkan kadar GEOSTA bervariasi sampai dengan 15% (0,1,5,8,10,15). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar GEOSTA terbaik (optimum) berada pada 8%. Pada kadar optimum tersebutm, kuat geser tanah

meningkat sebesar 25% dan kepadatan kering maksimum meningkat 28%, yang diikuti oleh penurunan kadar air optimum.

Hatmoko (2003) melaporkan bahwa abu ampas tebu: menurunkan indeks plastisitas, meningkatkan kepadatan, dan meningkatkan nilai CBR tanah lempung. Kadar optimum abu ampas tebu terhadap tanah dalam keadaan kering sebesar 12,5%. Pada kadar abu ampas tebu tersebut, kenaikan nilai CBR cukup signifikans, namun demikian kenaikan kuat tekan bebasnya tidak cukup berarti.

2.2.1 Abu Ampas Tebu (*Baggase Ash*) sebagai Bahan Stabilisator Tanah Lempung

Abu Ampas Tebu (*Baggase Ash*) adalah limbah padat pabrik gula dan merupakan hasil perubahan secara kimiawi dari proses pembakaran ampas tebu murni yang digunakan sebagai bahan bakar untuk memanaskan boiler dengan suhu mencapai 550˚C-600˚C dan lama pembakaran setiap 4-8 jam. Setelah rentan waktu tersebut dilakukan pengangkutan atau pengeluaran abu dari dalam boiler, karena jika dibiarkan tanpa dibersihkan akan terjadi penumpukan yang akan mengganggu proses pembakaran ampas tebu berikutnya. (Mukmin Batubara, 2009).

Abu Ampas Tebu (*Baggase Ash*) merupakan kategori limbah yang mempunyai nilai guna tinggi jika dimanfaatkan dengan baik, khususnya sebagai campuran dalam upaya stabilisasi tanah. Abu ampas tebu (*Baggase Ash*) mampu mengisi rongga-rongga yang ditinggalkan diantara butiran-butiran agregat yang mengisi campuran suatu struktur jalan termasuk struktur terbawah yaitu *sub base.* Selain itu, abu ampas tebu juga memiliki sifat sementasi yang berfungsi meningkatkan kekesatan antar butiran tanah dan sifat pozzolan seperti semen sebagai pengikat.

Dari hasil analisis yang dilakukan oleh Laboratorium UPT Layanan Analisa dan Pengukuran yang direkomendasikan oleh Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Brawijaya Malang, beberapa unsur yang terkandung di dalam abu ampas tebu antara lain Si, Al, Fe, Ca, dan Mg. Prosentase masing-masing unsur ditunjukkan dalam Tabel 2.6 dibawah ini.

Tabel 2.6. Hasil Analisis Kandungan dalam Abu Ampas Tebu

No.	Parameter	Hasil Analisis	Metode Analisis		
		Kadar	Satuan	Pereaksi	Metode
1.	Si	25,07 +0,02	%	Aquaregia	Gravimetri
2.	Al	0,11 + 0,00	%	Aquaregia-Aluminon	Spektrofotometri
3.	Fe	0,13 + 0,00	%	HNO_3	AAS
4.	Ca	0,15 + 0,00	%	HNO_3	AAS
5.	Mg	0,76 + 0,00	%	HNO_3	AAS

(Sumber: Laboratorium UPT Layanan Analisa dan Pengukuran, Malang)

Penambahan abu ampas tebu dengan kandungan kadar SiO_2, Al_2O_3, P_2O_5, KzO dan Fe_2O_3 pada tanah lempung ekspansif dimaksudkan agar terbentuk reaksi *pozzonic,* yaitu reaksi antara kalsium yang terdapat pada abu ampas tebu dengan alumina dan silikat yang terdapat pada tanah sehingga menghasilkan massa yang keras dan kaku. Dan dengan kandungan senyawa besi yang ada pada abu ampas tebu akan menurunkan temperatur peleburan tanah lempung ekspansif.

2.2.2 Kapur sebagai Bahan Stabilisator Tanah Lempung

Kapur adalah bahan yang terbuat dari batu sedimen, yang membentuk bebatuan dan terdiri dari mineral kalsium. Biasanya kapur relative terbentuk di laut dalam dengan kondisi bebatuan yang mengandung lempengan kalsium plates *(coccoliths)* yang dibentuk oleh mikroorganisme *coccolithophores*.

Kapur merupakan bahan yang sering dijumpai dibanyak tempat dan mudah didapatkan serta memiliki kandungan kalsium yang tinggi. Sehingga kapur sangat berpotensi dalam proses stabilisasi tanah yang kurang baik, terutama tanah lempung ekspansif. Pada umumnya, penambahan kapur dalam tanah lempung/tanah berbutir halus oleh adanya air menurut (Rollings, 1996) dan (Hardiyatmo, 2010) akan menyebabkan 2 reaksi yaitu : reaksi pertukaran kation dan flokulasi serta reaksi pozzolanik antara tanah lempung dan kapur. Menurut (Hardiyanto, 2010) tujuan utama penggunaan kapur untuk stabilisasi

tanah adalah untuk memodifikasi sifat-sifat tanah lempung dan kapur yang ditujukan untuk stabilisasi tanah secara permanen.

Kapur yang digunakan pada penelitian ini menggunakan kapur yang sudah *passive* (mati). Proses mematikan kapur *(slaking)* dilakukan dengan pembakaran yang dilaksanakan dalam dapur (oven) vertikal atau dapur berputar pada suhu 800° – 1200°C. Kalsium-karbonat terurai menjadi kalsiumoksida dan karbondioksida dengan reaksi kimia sebagai berikut:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad \text{.....(2.2)}$$

Karbondioksida mengalami penguapan dan kalsiumoksida yang terjadi disebut kapur tohor, dan jika berhubungan dengan air berubah menjadi kalsiumhidroksida disertai kehilangan panas, reaksi kimianya adalah:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Panas \quad \text{.....(2.3)}$$

Hasil dari reaksi diatas adalah kapur mati (kalsiumhidroksida).

2.3 Uji Laboratorium

Menurut Shirley (1994), jenis percobaan di laboratorium dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

1. Sifat fisik tanah (*Index Properties*): yaitu sifat tanah dalam keadaan asli yang digunakan utuk menentukan jenis tanah.
2. Sifat mekanis tanah (*Engineering Properties*): yaitu sifat tanah jika memperoleh pembebanan dan digunakan sebagai parameter dalam perencanaan pondasi.

Sifat fisik tanah meliputi pemeriksaan kadar air tanah, berat jenis tanah, batas *atterberg*, analisa saringan, dan berat isi tanah. Sedangkan sifat mekanis tanah meliputi beberapa pemeriksaan, namun dalam penelitian ini hanya difokuskan pada pemadatan standar, uji CBR dan uji *swelling*.

2.3.1 Kadar Air Tanah (*Water Content*)

Kadar air tanah didefinisikan sebagai perbandingan antara berat air (W_w) dengan berat butiran padat (W_s). Pemeriksaan kadar air tanah (*Water Content*) dilakukan untuk menentukan perbandingan berat air yang terkandung dalam

tanah dengan berat kering tanah dinyatakan dalam prosen (%). Jika dituliskan ke dalam sebuah persamaan maka akan tampak pada persamaan 2.4 berikut:

$$w = \frac{(W_2 - W_3)}{(W_3 - W_1)} x100\% \quad \text{.....(2.4)}$$

Dengan keterangan:

W_1 = berat cawan (gram)

W_2 = berat cawan + tanah basah (gram)

W_3 = berat cawan + tanah kering (gram)

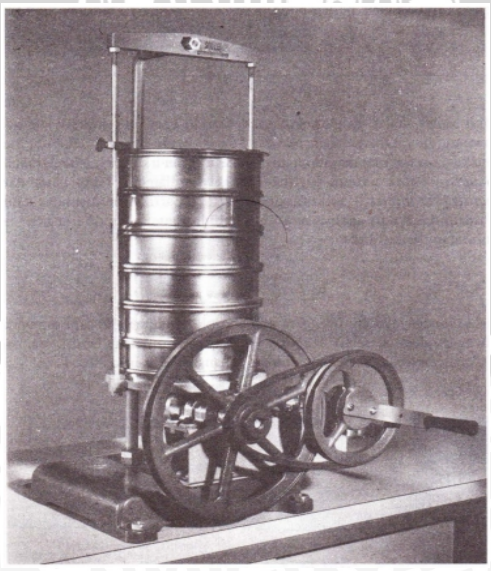
w = kadar air (%)

2.3.2 Analisis Saringan

Analisis itu bertujuan untuk penentuan variasi ukuran partikel-partikel yang ada pada tanah dengan ukuran partikel berdiameter lebih besar dari 0,075 mm. Uji ini dilakukan dengan mengayak dan menggetarkan sampel tanah melalui satu set ayakan, dimana lubang-lubang ayakan tersebut makin kecil secara berurutan. Untuk visual gambar dan ukuran-ukuran ayakan ayakan dapat dilihat pada Gambar 2.3 dan Tabel 2.7. Cara perhitungan prosentase tanah baik yang tertahan maupun yang lolos saringan adalah dengan Persamaan 2.5 dan Persamaan 2.6 berikut:

% Tertahan = (Berat tanah tertahan / berat tanah kering) x 100 % ..... (2.5)

% Lolos = 100% - % Tertahan.....(2.6)



Gambar 2.3 Uji Analisis Saringan
(Sumber: Braja M. Das. 1988:18)

Tabel 2.7 Ukuran-ukuran ayakan standar Amerika Serikat

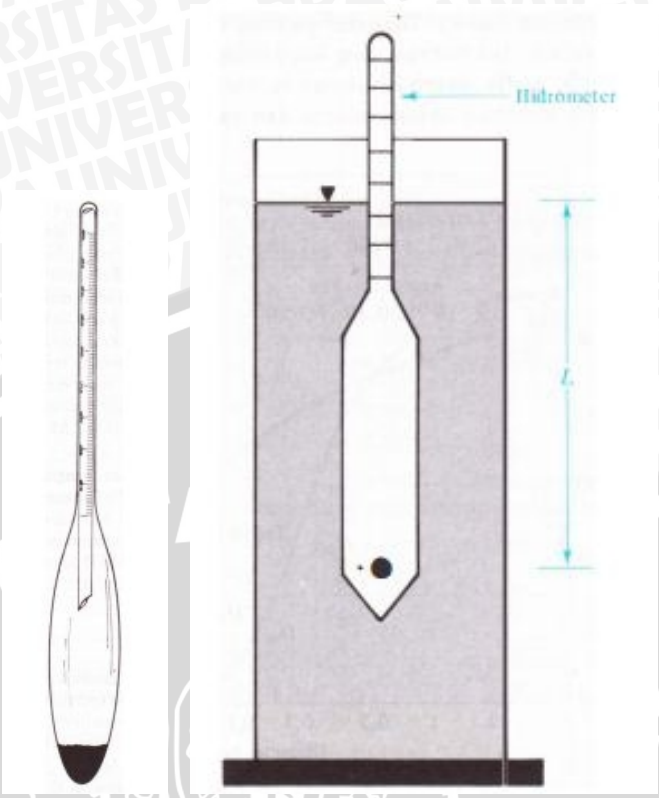
No. Saringan	Ukuran Lubang (mm)	No Saringan	Ukuran Lubang (mm)
4	4,75	60	0,25
6	3,35	80	0,18
8	2,36	100	0,15
10	2	140	0,106
16	1,18	170	0,088
20	0,85	200	0,075
30	0,6	270	0,053
40	0,425	Pan	
50	0,3		

Selain sebagai penetuan variasi ukuran partikel, ada tiga parameter dasar yang dapat ditentukan dari hasil kurva analisis saringan yang dapat digunakan untuk mengklasifikasikan tanah berbutir kasar, yaitu: ukuran efektif, koefisien keseragaman dan koefisien gradasi.

2.3.3 Analisis Hidrometer

Analisis hidrometer digunakan untuk menentukan distribusi ukuran butiran tanah dimana sampel tanah tersebut merupakan butiran tanah yang lolos saringan no. 200. Analisis hidrometer didasarkan pada prinsip sedimentasi (pengendapan) butir-butir tanah dalam air. Bila suatu sampel tanah dilarutkan dalam air, pertikel-partikel tanah akan mengendap dengan kecepatan yang berbeda-beda tergantung pada bentuk, ukuran, dan beratnya.

Di laboratorium, pengujian hidrometer dilakukan dalam silinder pengendap yang terbuat dari gelas dan memakai 50 gram contoh tanah yang kering oven (dikeringkan dalam oven). Silinder pengendap tersebut mempunyai tinggi 18 inci (=457,2 mm) dan diameter 2,5 inci (63,5 mm). Silinder tersebut diberi tanda yang menunjukkan volume sebesar 1000 ml (Braja M. Das, 1985). Untuk mengetahui skema gambar pengujian hydrometer dapat dilihat pada Gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Skema Pengujian Hidrometer
(Sumber : Braja M. Das, 1995:21)

2.3.4 GS (*Specific Gravity*)

Spesific Gravity didefinisikan sebagai perbandingan antara berat volume butiran padat dengan berat volume air pada temperatur tertentu, biasanya diambil pada temperature suhu kamar ±30°C. Untuk persamaan perbandingannya dapat dilihat pada Persamaan 2.3 berikut:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma} \quad \text{..... (2.7)}$$

Dengan keterangan:

G_s = *Spesific Gravity*

γ_s = berat volume butiran padat (gr/cm^3)

γ_w = berat volume air (gr/cm^3)

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan berat jenis tanah yang mempunyai butiran lolos saringan no.4 dengan picnometer. Nilai-nilai berat jenis dari berbagai jenis tanah ditunjukkan dalam Tabel 2.8 dibawah ini.

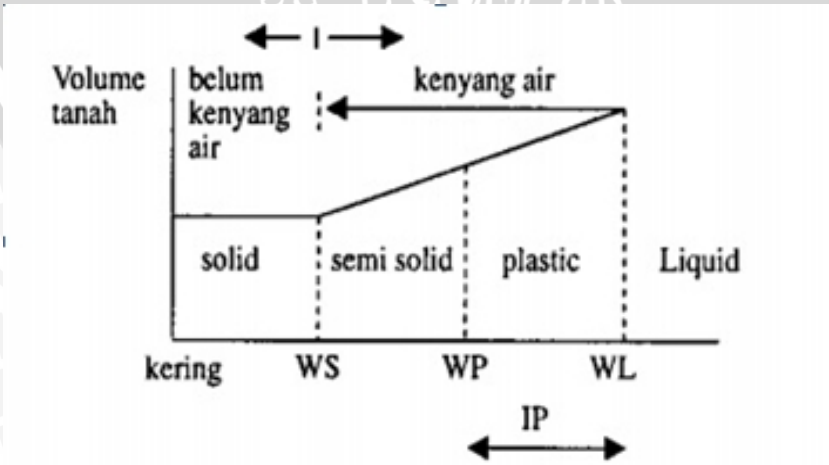
Tabel 2.8 Berat Jenis Tanah

Macam Tanah	Berat Jenis (Gs)
Kerikil	2.65 - 2.68
Pasir	2.65 - 2.68
Lanau Organik	2.62 - 2.68
Lempung Organik	2.58 - 2.65
Lempung Anorganik	2.68 - 2.75
Humus	1.37
Gambut	1.25 - 1.80

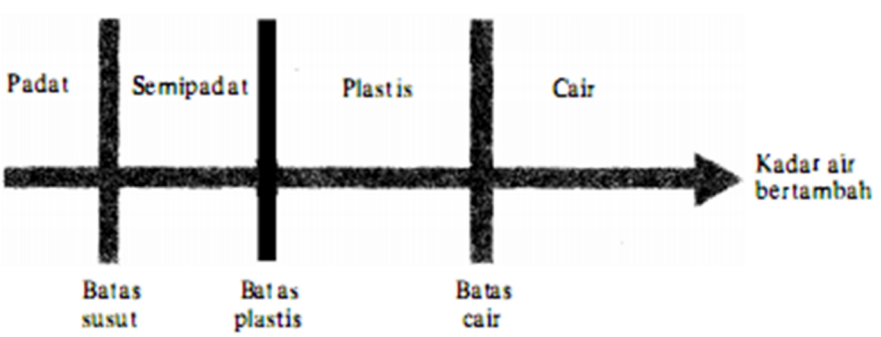
(Sumber: Hardiyatmo 1999:4)

2.3.5 Atterberg Limit

Kedudukan fisik tanah berbutir halus pada kadar air tertentu disebut konsistensi. Kadar air pada kondisi transisi diatas pada masing-masing konsistensi disebut batas-batas Atterberg. Panjang daerah interval kadar air tanah pada kondisi plastis disebut indeks plastisitas (IP), dimana IP merupakan selisih batas cair dan batas plastis. Setiap tanah memiliki batas cair, batas plastis, dan batas susut yang berbeda antara yang satu dengan yang lain. Menurut Atterberg batas-batas konsistensi tanah berbutir halus tersebut adalah batas cair, batas plastis, batas susut. Batas konsistensi tanah ini didasarkan kepada kadar air dapat dilihat pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6 dibawah ini.

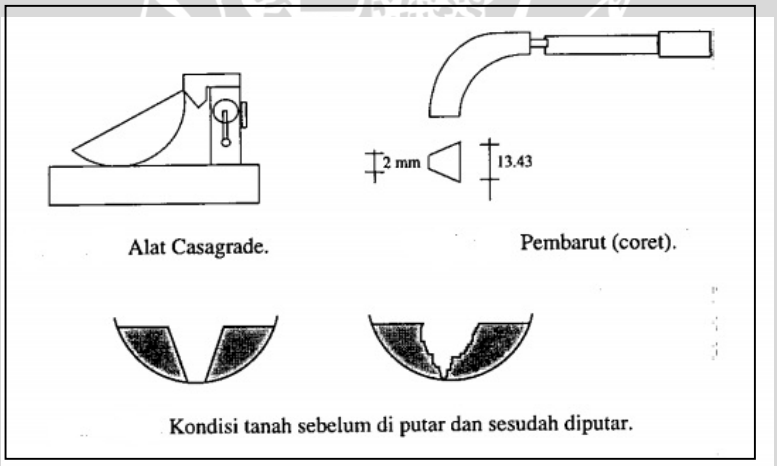


Gambar 2.5 Skema hubungan kadar air, volume, dan konsistensi
(Sumber: Budi Santosa dkk, 1998)



Gambar 2.6 Batas-batas *Atterberg*
(Sumber: Braja M. Das. 1988:43)

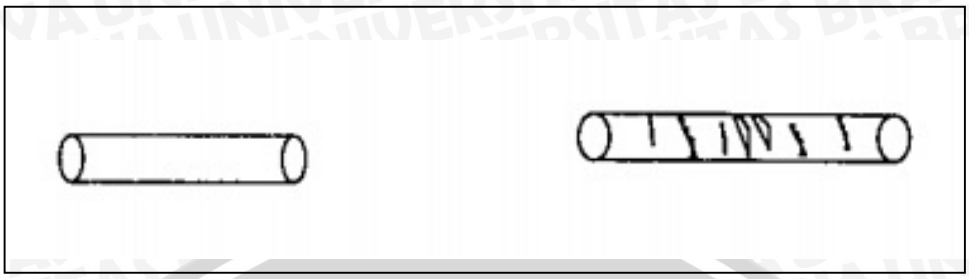
Batas cair (liquid limit) adalah kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis (yaitu batas atas atau daerah plastis). Cara menentukannya adalah dengan menggunakan alat Cassagrande. Biasanya percobaan ini dilakukan terhadap beberapa contoh tanah dengan kadar air berbeda dan banyaknya pukulan dihitung untuk masing-masing kadar air. Dengan demikian dapat dibuat grafik kadar air terhadap banyaknya pukulan. Dari grafik ini dapat dibaca kadar air pada pukulan tertentu. Untuk skema dari uji batas cair dapat dilihat pada Gambar 2.7 dibawah ini.



Gambar 2.7 Skema Uji Batas Cair
(Sumber: Budi Santosa dkk, 1998)

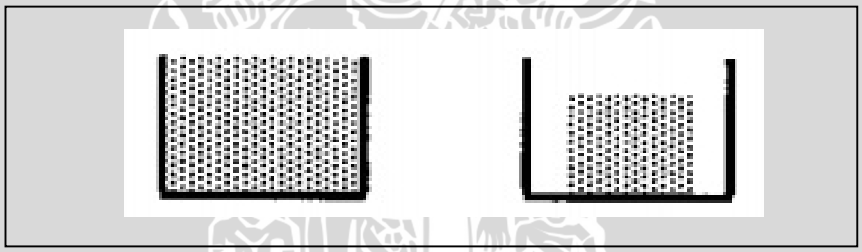
Batas plastis (plastic limit) adalah kadar air pada batas bawah daerah plastis atau kadar air minimum dimana tanah dapat digulung-gulung sampai diameter 3,1 mm (1/8 inchi) seperti terlihat pada Gambar 2.8. Kadar air ini ditentukan dengan menggiling tanah pada plat kaca hingga diameter dari batang

yang dibentuk mencapai 1/8 inchi. Bilamana tanah mulai pecah pada saat diameternya 1/8 inchi, maka kadar air tanah itu adalah batas plastis.



Gambar 2.8 Gulungan Tanah pada Uji Batas Plastis
(Sumber: Budi Santosa dkk, 1998)

Batas susut menunjukkan kadar air atau batas dimana tanah dalam keadaan jenuh yang sudah kering tidak akan menyusut lagi, meskipun dikeringkan terus atau batas dimana sesudah kehilangan kadar air selanjutnya tidak menyebabkan penyusutan volume tanah seperti tertera pada Gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2.9 Perbedaan Volume Tanah Sebelum dan Sesudah di Oven
(Sumber: Budi Santosa dkk, 1998)

Suatu tanah akan mengalami penyusutan bila kadar air secara perlahan-lahan hilang dari dalam tanah. Dengan kehilangan air terus menerus akan mencapai suatu tingkat keseimbangan atau telah mencapai batas susutnya. Batas susut dapat dihitung dengan Persamaan 2.8 sebagai berikut:

$$SL = \left[\left(\frac{Berat\ Air}{Berat\ Tanah\ Kering}\right) - \left(\frac{Volume\ Air\ (\gamma_w)}{Berat\ Tanah\ Kering}\right)\right] x100\% \text{.....(2.8)}$$

Dimana : γ_w = berat jenis air (gr/cm^3)

Indeks plastisitas adalah selisih batas cair dan batas plastis (Interval kadar air pada kondisi tanah masih bersifat plastis) seperti pada Persamaan 2.9, karena itu menunjukkan sifat keplastisan tanah.

PI = LL – PL……(2.9)

dimana : PI = Plastis Indeks (%)

LL = Liquid Limit (%)

PL = Plastis Limit (%)

Batasan mengenai indeks plastisitas, sifat, macam tanah dan kohesi diberikan oleh Atterberg dalam Tabel 2.9 berikut:

Tabel 2.9 Nilai Indeks Plastisitas dan Macam Tanah

PL	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non Kohesif
< 7	Plastisitas Rendah	Lanau	Kohesif Sebagian
7 s/d 17	Plastisitas Sedang	Lanau Berlanau	Kohesif Sebagian
> 7	Plastisitas Tinggi	Lempung	Kohesif Sebagian

2.3.6 Pendekatan Empiris untuk Indeks Pemampatan (C_c)

Segala sesuatu yang dibangun di atas tanah, harus kita pelajari terlebih dahulu jenis dan sifat tanah di lokasi pembangunan agar kita mengenali tanah ditempat pelaksanaan pembangunan. Tujuannya adalah untuk menentukan kapasitas daya dukung tanah, mengetahui kedalaman muka air tanah, memprediksi besarnya penurunan (konsolidasi) yang terjadi, dan lain sebagainya. Akibat banyaknya waktu dan pengeluaran dalam melakukan uji konsolidasi untuk mendapatkan indeks-indeks tekanan, maka sering diinginkan untuk memperoleh nilai-nilai perkiraan dengan menggunakan indeks-indeks tanah lainnya yang lebih mudah untuk ditentukan. Rumus pendekatan empiris untuk mengetahui nilai Cc digunakan untuk memperkirakan penurunan pondasi secara kasar sebelum pengujian laboratorium dilakukan (Joseph E. Bowless, 1986).

Compression index (Cc) ialah angka yang menentukan kemampuan contoh tanah untuk mengalami pemampatan yang dipakai untuk menghitung penurunan.

Beberapa perumusan untuk menghitung indeks pemampatan banyak tersedia saat ini. Perumusan-perumusan tersebut telah dikembangkan dengan cara menguji bermacam-macam jenis lempung. Sebagian dari hubungan tersebut ada pada Tabel 2.10 dibawah ini.

Tabel 2.10 Hubungan untuk Indeks Pemampatan Cc

Persamaan	Acuan	Daerah pemakaian
Cc = 0,007 (LL-7)	Skempton	Lempung yang terbentuk kembali (remolded)
Cc = 0,01 WN		Lempung Chicago
Cc = 1,15 (e_o-0,27)	Nishida	Semua lempung
Cc = 0,30 (e_o-0,27)	Hough	Tanah kohesif anorganik;lanau, lempung berlanau, lempung
Cc = 0,0115 WN		Tanah organik, gambut, lanau organik, dan lempung
Cc = 0,0046 (LL-9)		Lempung Brazilia
Cc = 0,75 (e_o-0,5)		Tanah dengan plastisitas rendah
Cc = 0,208 e_o + 0,0083		Lempung Chicago
Cc = 0,156 e_o + 0,0107		Semua lempung

(Sumber: Braja M. Das, 1995)

*Menurut Rendon-Herrero (1980)

Catatan : e_o = angka pori tanah di lapangan

WN= kadar air di lapangan

Untuk lempung yang struktur tanahnya tak terganggu atau belum rusak *(undisturbed)* Terzaghi dan Peck (1867) menyarankan pemakaian persamaan empiris berikut untuk menghitung indeks pemampatan:

Cc = 0,009 (LL-10) ……...(2.10)

Untuk lempung yang terbentuk kembali *(remolded)*, sebagai berikut:

Cc = 0,007 (LL-10) ……...(2.11)

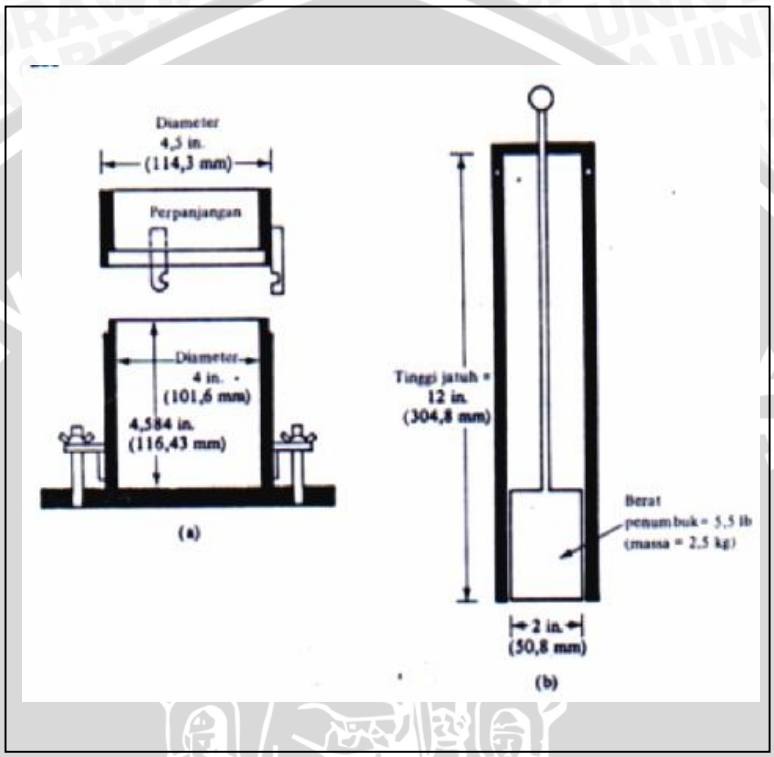
Dimana LL adalah batas cair tanah.

2.3.7 Pemadatan (*Compaction Test)*

Pemadatan merupakan usaha untuk mempertinggi kerapatan tanah dengan pemakaian energi mekanis untuk menghasikan pemampatan partikel. Energi pemadatan di lapangan dapat diperoleh dengan mesin gilas, alat pemadat getaran, dan benda berat yang dijatuhkan. Sedangkan di laboratorium, pemadatan dilakukan dengan cara menggunakan daya impak, alat penekan, atau tekaan statis dengan menggunakan mesin piston dan tekanan. Tujuan pemadatan antara lain:

- Memperkuat geser tanah.
- Mengurangi sifat kompresibilitas.
- Mengurangi permeabilitas.
- Mengurangi perubahan volume sebagai akibat perubahan kadar air dan yang lainnya.

Tingkat kepadatan tanah diukur dari nilai berat volume keringnya (γ_d), berat volume kering tidak berubah oleh adanya kenaikan kadar air. Hal ini dikarenakan kepadatan atau berat volume kering dinyatakan oleh $\gamma_d = W_s/V$, bila berat butiran (W_s) dan volume total (V) tetap, maka γ_d juga tetap (Hardiyatmo 2010, 78). Alat pemadat yang digunakan berupa silinder *mould* yang mempunyai volume 9,44 x 10^{-4} m^3 seperti pada Gambar 2.10 dibawah ini.



Gambar 2.10 Alat Standar Proctor : (a) Cetakan; (b) Penumbuk;
(Sumber: Das, Mekanika Tanah, Jilid 1, hal 236)

Untuk setiap tanah yang dipadatkan, berat volume basah (γ) dari tanah dapat dihitung dengan Persamaan 2.12 berikut:

$$\gamma = \frac{W}{V_{(m)}} \quad \text{.....(2.12)}$$

Dengan keterangan:

γ = Berat volume tanah basah (gram/cm^3)

W = Berat tanah yang dipadatkan di dalam cetakan (gram)

$V_{(m)}$ = Volume cetakan (cm^3)

Dengan kadar air yang telah diketahui, berat volume kering (γ_d) dari tanah tersebut dapat dihitung dengan Persamaan 2.13 berikut:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\frac{w}{100}} \quad \text{.....(2.13)}$$

Dengan keterangan:

γ_d = Berat volume tanah kering (gram/cm^3)

w = Kadar air

Harga γ_d dapat digambarkan terhadap kadar air untuk mendapatkan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum.

Untuk prosedur pelakasaan uji pemadatan standar, telah dirinci di dalam ASTM *Test Designation* D-698 dan di dalam AASHTO *Test Designation* T-99. Untuk kadar air tententu, berat volume kering maksimum secara teoritis didapat bila por-pori dalam tanah sudah tidak ada udaranya lagi, yaitu tanah pada keadaan derajat kejenuhan maksimum. Jadi, berat volume kering maksimum pada suatu kadar air tertentu dengan kondisi *zero air void* dengan keadaan tanah yang sudah jenuh dapat dihitung dengan Persamaan 2.14 berikut:

$$\gamma_{zav} = \frac{\gamma_w}{1+w.G_s} \quad \text{.....(2.14)}$$

Dengan keterangan:

γ_{zav} = Berat volume pada kondisi *zero air void* (gram/cm^3)

γ_w = Berat volume air (gram/cm^3)

G_s = Berat spesifik butiran padat tanah

w = Kadar air

2.3.8 Uji CBR (*California Bearing Ratio*)

California Bearing Ratio adalah rasio dari gaya perlawanan penetrasi (*penetration resistance*) dari tanah terhadap penetrasi sebuah piston yang ditekan secara kontinu dengan gaya perlawanan penetrasi serupa pada contoh tanah standart berupa batu pecah di California. Rasio tersebut diambil pada penetrasi

2,5 dan 5,0 mm (0,1 dan 0,2 in) dengan ketentuan angka tertinggi yang digunakan. Gaya perlawanan penetrasi adalah gaya yang diperlukan untuk menahan penetrasi konstan dari suatu piston ke dalam tanah. Hasil pengujian dapat diperoleh dengan mengukur besarnya beban pada penetrasi tertentu. Penetrasi dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.15 dan Persamaan 2.16 berikut:

- Penetrasi 0,1" (2,5 mm)

$$\boldsymbol{CBR = \frac{P_1}{3\,x\,1000}\,x\,100\%} \quad \text{..... (2.15)}$$

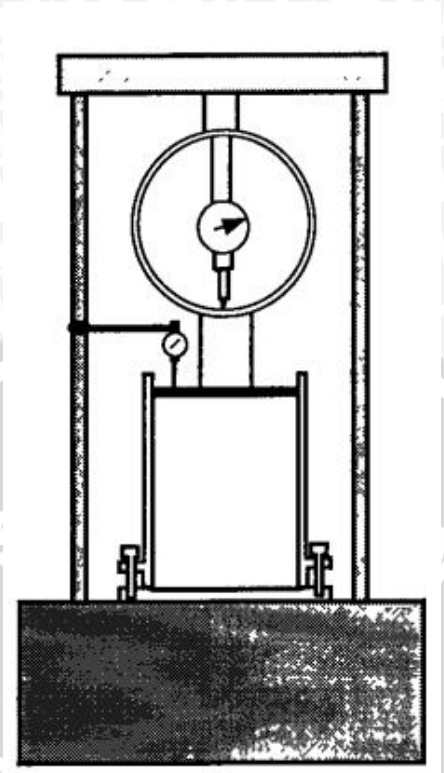
- Penetrasi 0,2" (5 mm)

$$\boldsymbol{CBR = \frac{P_2}{3\,x\,1500}\,x\,100\%} \quad \text{..... (2.16)}$$

Persamaan diatas dikeluarkan oleh California Highway Departemen dan US Army Corps of Engineer, 1929 dalam Rollings and Rollings, J. R (1996).

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai daya dukung tanah dalam keadaan padat maksimum. Dimana hasil percobaan tersebut dapat digambarkan pada suatu grafik untuk mendapatkan tebal perkerasan dari suatu nilai CBR tertentu. Percobaan CBR mempunyai dasar teoritis dan grafik tabel perkerasan terhadap nilai CBR.

Percobaan CBR dilakukan dengan menggunakan dongkrak mekanis yang dimana sebuah piston penetrasi ditekan agar masuk ke tanah dengan kecepatan 0,05 inchi/menit. Luas piston itu 3 inchi^2 . Untuk menentukan beban yang bekerja pada piston dipakai sebuah *proving ring* yang terpasang antara piston dan dongkrak. Untuk alat uji CBR dapat dilihat pada Gambar 2.11. Pada nilai penetrasi tertentu beban yang bekerja pada piston tercatat sehingga kemudian dapat dibuat grafik beban terhadap penetrasi. Harga CBR dihitung pada harga penetrasi 0,1 dan 0,2 inchi, dengan cara membagi beban pada penetrasi ini masing-masing dengan beban sebesar 3000 dan 4500 pound (Wesley 1997, 171). Beban ini adalah beban standard yang diperoleh dari percobaan terhadap standard material yang dianggap mempunyai CBR-100%. Jadi harga CBR adalah perbandingan antara kekuatan tanah yang bersangkutan dengan kekuatan bahan agregat yang dianggap standard (Wesley 1997, 174).



Gambar 2.11 Alat uji CBR
(Sumber : Budi Santosa dkk, 1998:58)

CBR laboratorium diukur dalam 2 kondisi, yaitu pada kondisi tidak terendam disebut CBR *Unsoaked* dan pada kondisi terendam atau disebut CBR *Soaked*. Pada umumnya harga CBR *Soaked* lebih rendah dari CBR *Unsoaked*. Namum demikian kondisi *Soaked* adalah kondisi yang sering dialami dimana tanah mengalami kondisi terburuk di lapangan sehingga di dalam perhitungan konstruksi bangunan, yang digunakan sebagai dasar perhitungan adalah harga CBR *Soaked* karena dalam kenyataannya air selalu mempengaruhi konstruksi bangunan. Pengujian CBR Terendam (*soaked*) dilakukan pada sampel tanah dalam keadaan jenuh air dengan cara merendam tanah dan cetakan (*mold*) di dalam air selama dua hari sehingga sampel tanah mengalami pengembangan maksimum seperti kondisi yang terjadi di lapangan.

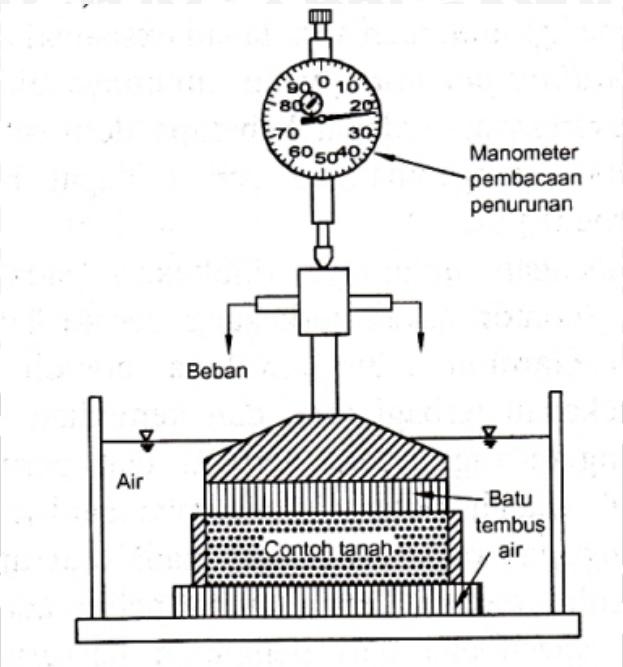
2.3.9 Uji Pengembangan (*Swelling*)

Swelling adalah pembesaran volume tanah ekspansif akibat bertambahnya kadar air. Potensi pembesaran volume ini tergantung pada komposisi mineral, peningkatan kadar air, indeks plastisitas, kadar lempung dan tekanan tanah penutup.

Proses pengembangan (swelling) dan penyusutan (Shrinking) tanah sebagian besar adalah akibat peristiwa kapiler atau perubahan kadar air pada tanah tersebut. Tanah-tanah yang banyak mengandung lempung mengalami perubahan volume ketika kadar air berubah. Pengurangan kadar air yang diikuti oleh kenaikan tegangan efektif menyebabkan volume tanah menyusut dan sebaliknya penambahan kadar air menyebabkan pengembangan. Besarnya pengembangan atau penyusutan tidak merata dari suatu titik ke titik lainnya sehingga menimbulkan diffential movement. Perubahan itulah yang berbahaya untuk konstruksi di atasnya. Tingkat pengembangan secara umum bergantung pada beberapa faktor, yaitu :

1. Tipe dan jumlah mineral di dalam tanah
2. Kadar air
3. Susunan tanah
4. Konsentrasi garam dalam air pori
5. Sementasi
6. Adanya bahan organik lain, dll.

Uji *swelling* dilakukan di silinder berbahan logam. Waktu yang dibutuhkan untuk pengujian dipertimbangkan terhadap waktu yang dibutuhkan air untuk masuk ke dalam tanah, karena tanah ekspansif tidak segera mengembang ketika berinteraksi dengan air seperti terlihat pada Gambar 2.12. Beberapa penelitian melakukan pengujian ini selama 2 jam dan menunggu sampai kecepatan mengembang mencapai kecepatan tertentu (0,001”/jam), sehingga memerlukan waktu beberapa hari.



Gambar 2.12 Alat uji pengembangan
(Sumber :*Coduto,1994*)

2.3.9.1 Pengujian Prosentase Mengembang

Pemeriksaan ini untuk menentukan nilai *swell* atau pengembangan akibat beban vertikal. Hal ini terjadi akibat air yang meresap ke pori-pori mengisi rongga-rongga udara sehingga tejadi perubahan isi dari dalam pori tanah yang diakibatkan adanya perubahan tekanan vertikal yang bekerja pada tanah tersebut.

2.3.9.2 Pengujian Tekanan Pengembangan

Tekanan ke tanah sangat mempengaruhi pengembangan tanah. Tekanan pengembangan yang mencegah tanah mengembang disebut tekanan pengembangan (*swelling preasure*). Chen (1988) dan beberapa peneliti berpendapat bahwa tekanan pengembangan tidak bergantung pada kadar air awal, derajat kejenuhan awal, tingkat ketebalan tanah, dan bervariasi hanya dengan berat volume kering dan oleh karena itu hal ini merupakan fundamental sifat-sifat fisik tanah ekspansif.

Untuk sampel tanah asli (*undisturbed*), Chen (1988) mendefinisikan tekanan pengembangan sebagai tekanan yang dibutuhkan untuk mencegah tanah mengembang pada berat volume kering di tempat.

Untuk tanah yang dibentuk kembali (*remolded*) pada 100% kepadatan relatif, tekanan pengembangan adalah tekanan yang dibutuhkan untuk memelihara berat volume kering tersebut (Hary C. Hardiyatmo, 2010).

Garcia-Iturbe, Martines, dan Polin (1980) dalam makalahnya mengemukakan hubungan antara potensi mengembang dengan tekanan mengembang, seperti ditampilkan pada Tabel 2.11, dapat dilihat bagaimana potensi mengembang suatu sampel tanah berdasarkan tekanan mengembangnya. Untuk nilai *swelling pressure* dibawah 2 memiliki *swelling potential* yang rendah sedangkan untuk *swelling pressure* yang memiliki nilai di atas 7 memiliki *swelling potential* yang sangat tinggi.

Tabel 2.11 Hubungan Potensi Mengembang Dengan Tekanan Mengembang

Swelling Potential	Swelling Pressure
Low	<2
Medium	2-4
High	4-7
Very High	>7

(Sumber: Garcia – Iturbe, 1980)

2.3.9.3 Pengembangan Bebas (*Free Swell*)

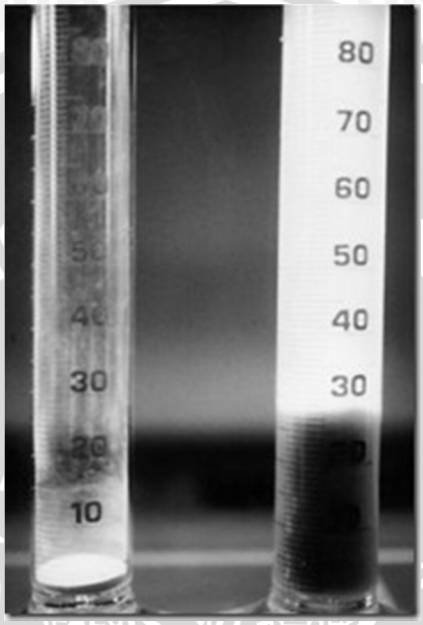
Uji Free Swell diperkenalkan oleh Holtz (1956) sebagaimana dikutip Chen (1975), yaitu dengan cara memasukkan tanah lempung kering yang telah diketahui volumenya kemudian dimasukkan kedalam gelas ukur yang diisi air tanpa pembebanan. Pengamatan dilakukan setelah lempung mengendap.

Perbedaan tinggi air atau volume awal pengamatan dengan akhir pengamatan menunjukkan perubahan volume material tanah. Persentase Free Swell adalah perbandingan perubahan volume tanah dengan volume tanah awal pengamatan.

Uji pengembangan bebas didefinisikan sebagai peningkatan volume tanah dari bentuk bubuk kering longgar ketika dituangkan kedalam air seperti pada Gambar 2.13, dan dinyatakan dalam prosentasi

dari volume aslinya. Besar pengembangan bebas dapat diketahui dengan Persamaan 2.17 berikut:

$$Free\ Swell = \frac{\text{Volume akhir} - \text{Volume awal}}{\text{Volume awal}} x100\% \quad \text{.....(2.17)}$$



Gambar 2.13. Uji Swelling Bebas
(Sumber :civilblog.org)

Tanah dengan nilai pengembangan kurang dari 50% tidak mungkin untuk menunjukkan sifat ekspansif. Nilai 100% atau lebih yang berhubungan dengan tanah bisa mengembang jauh ketika dibasahi, terutama dibawah beban ringan. Tanah dengan potensi pengembangan yang tinggi seperti bentonit mungkin memiliki nilai pengembangan bebas hingga 200%.