

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Sifat Umum Tanah

Tanah dapat didefinisikan sebagai material yang terdiri dari semua bahan, organik dan anorganik, yang ada diatas lapisan batuan tetap. Tanah terdiri dari campuran butir-butir padat yang diantaranya ada rongga-rongganya. Rongga-rongga tersebut umumnya merupakan campuran antara air dan udara. Berdasarkan asalnya, tanah dapat diklasifikasikan secara luas menjadi tanah organik dan anorganik. Tanah organik adalah campuran yang mengandung bagian-bagian yang cukup berarti berasal dari pelapukan dan sisa tanaman dan kadang-kadang dari kumpulan kerangka dan kulit organisme kecil. Tanah anorganik berasal dari pelapukan batuan secara kimia ataupun fisis. (Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa, Karl Terzaghi, 1987).

Tanah mempunyai sifat untuk meningkatkan kepadatan dan kekakuan gesernya apabila mendapatkan tekanan. Pada percobaan pemadatan tanah dapat diketahui berapa proses kadar air yang diperlukan untuk mencapai kepadatan maksimum sehingga pada kepadatan tersebut tercapai kekuatan tanah yang maksimum. Kadar air dalam keadaan tersebut adalah keadaan air optimum. (Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi, Suryono Sosrodarsono, 1990).

Secara sederhana tanah disusun atas 3 bagian, yang terdiri dari :

1. Pori atau ruang kosong (*voids*), yang merupakan ruang-ruang terbuka antara butir – butir tanah dengan berbagai ukuran,
2. Butir – butir tanah, yang mungkin makroskopis atau mikroskopis dalam ukurannya.
3. Kelembaban tanah, yang akan menyebabkan tanah terlihat basah, lembab, ataupun kering. Air dalam pori mungkin ada dalam kuantitas yang cukup untuk memenuhi ruang kosong atau hanya sebagian saja.

(Sifat – Sifat Fisis Dan Geoteknis Tanah, Joseph E. Bowles, 1986)

3.2 Batas-batas Konsistensi (Batas-batas Atterberg)

Suatu hal yang penting pada tanah berbutir halus adalah sifat plastisitasnya. Plastisitas disebabkan oleh adanya partikel mineral lempung dalam tanah. Istilah plastisitas digambarkan sebagai kemampuan tanah dalam menyesuaikan perubahan bentuk pada volume yang konstan tanpa retak-retak atau remuk. Tergantung pada kadar airnya, tanah mungkin berbentuk cair, plastis, semi padat, atau padat. Kedudukan kadar air transisi bervariasi pada berbagai jenis tanah. Kedudukan fisik tanah berbutir halus pada kadar air tertentu disebut konsistensi. Seorang ahli tanah Swedia, A. Atterberg yang bekerja dalam bidang keramik dan pertanian mengusulkan lima keadaan konsistensi tanah, disini akan dijelaskan tentang batas cair, batas plastis, dan batas susut.

3.2.1 Batas Cair (*liquid Limit*)

Batas cair didefinisikan sebagai kadar air pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis, dimana untuk nilai-nilai diatasnya tanah akan bersifat sebagai cairan kental (campuran tanah tanpa air tanpa kuat geser yang dapat diukur).

3.2.2 Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Batas plastis (PL) didefinisikan sebagai kadar air dimana tanah dengan diameter 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung

$$PL = \left(\frac{W_p - W_k}{W_k} \right) \times 100 \% \dots \dots \dots (3.1)$$

PL : Batas plastis tanah

W_p : Berat tanah basah kondisi plastis

W_k : Berat tanah kering

3.2.3 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 dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanahnya.

Batas susut dinyatakan dalam persamaan:

$$SL = \left(\frac{V_o}{W_o} - \frac{1}{G_s} \right) \times 100 \% \dots \dots \dots (3.2)$$

SL : Batas susut tanah

V_o : Volume benda uji kering

W_o : Berat benda uji kering

G_s : Berat jenis tanah

3.2.4 Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*)

Indeks plastisitas (PI) adalah selisih batas cair dan batas plastis. Indeks plastisitas akan merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis. Karena itu, indeks plastis menunjukkan sifat keplastisan tanahnya. Jika tanah mempunyai interval kadar air didaerah plastis yang kecil, maka keadaan ini disebut dengan tanah kurus. Kebalikannya, jika tanah mempunyai interval kadar air daerah plastis yang besar disebut tanah gemuk.

$$PI = LL - PL \dots \dots \dots (3.3)$$

PI : Indeks plastis

LL : Batas cair

PL : Batas plastis

Tabel 3.1 Nilai Indeks Plastisitas dan Macam Tanah

PI	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non Plastis
< 7	Plastisitas Rendah	Lanau	Kohesif Sebagian
7 – 17	Plastisitas Sedang	Lempung Berlanau	Kohesif
> 17	Plastisitas Tinggi	Lempung	Kohesif

(Sumber : Mekanika Tanah, Hary Christady Hardiyatmo, 1992)

3.3 Komposisi Tanah

Tanah merupakan campuran dari partikel-partikel yang terdiri dari salah satu atau seluruh jenis berikut :

1. Berangkal (*boulders*), yaitu batuan yang besar. Biasanya berukuran 150 mm sampai 250 mm, fragmen batuan ini dapat disebut kerakal.
2. Kerikil (*gravel*), yaitu partikel batuan yang berukuran 5 mm sampai 150 mm.
3. Pasir (*sand*), yaitu partikel batuan yang berukuran 0,0074 mm sampai 5 mm. Untuk gradasi kasar 5 mm sampai 3 mm hingga gradasi halus kurang dari 1 mm.
4. Lanau (*silt*), yaitu partikel batuan berukuran 0,002 mm sampai 0,0074 mm. Deposit loose dihasilkan oleh angin yang mengangkut partikel lanau tersebut ke lokasi.
5. Lempung (*clay*), yaitu partikel mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel-partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi di dalam tanah yang kohesif.
6. Koloid (*colloids*), yaitu partikel mineral tanah yang paling kecil berukuran lebih kecil dari 0,001 mm. (Sifat – Sifat Fisis Dan Geoteknis Tanah, Joseph E. B, 1986).

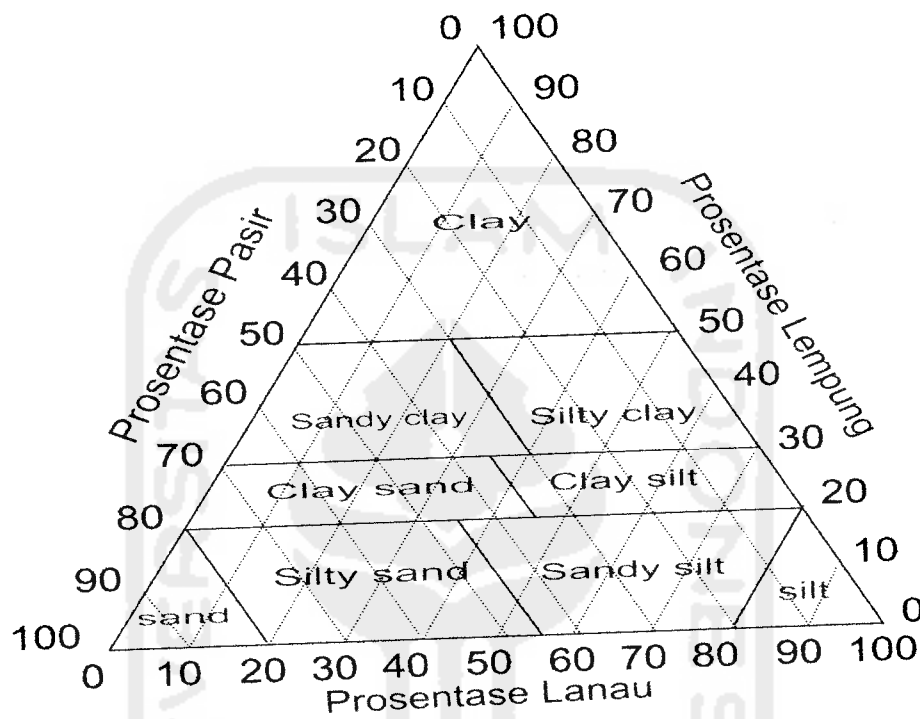
3.4 Sistem Klasifikasi Tanah

3.4.1 Klasifikasi tanah berdasarkan USCS

Tekstur tanah dipengaruhi oleh ukuran tiap-tiap butir yang ada dalam tanah. Pada umumnya tanah asli merupakan campuran dari butir-butir yang mempunyai ukuran yang berbeda-beda. Dalam klasifikasi tanah berdasarkan tekstur, tanah diberi nama atas dasar komponen utama yang dikandungnya, misal lempung berpasir (*sandy clay*), lempung berlanau (*silty clay*) dan seterusnya.

Gambar 3.1 menunjukkan system klasifikasi tanah berdasarkan tekstur, system ini didasarkan pada ukuran batas dari ukuran tanah, yaitu:

1. Pasir : butiran dengan diameter 2,0 sampai 0,05 mm
2. Lanau : butiran dengan diameter 0,05 sampai 0,002 mm
3. Lempung : butiran dengan diameter lebih kecil dar 0,002 mm



Gambar 3.1 Klasifikasi Tanah USCS

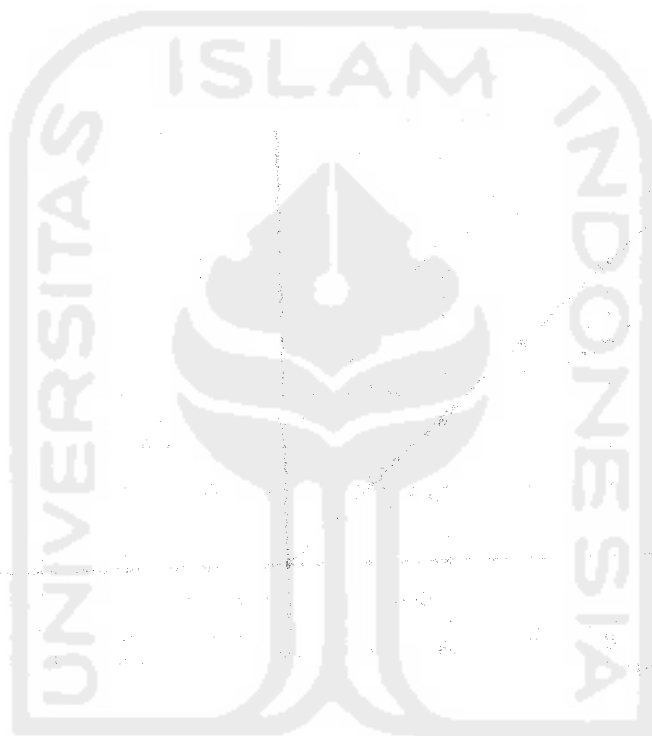
3.4.2 Sistem Klasifikasi AASTHO

Sistem Klasifikasi AASTHO 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 0,0075 mm.

- Lanau & Lempung : bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 0,0075 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.



(Sumber: Mekanika Tanah, Braja M. Das 1988)

Gambar 3.2 Rentang (range) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A- 6, dan A-7 (Mekanika Tanah, Braja M. Das – Jilid 1)

- 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.

Tabel 3.2 Sistem klasifikasi tanah AASHTO

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

Catatan:

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

Untuk PL > 30, Klasifikasinya A-7-5;

Untuk PL < 30, klasifikasinya A-7-6.

Np = nonplastis

(Sumber: Mekanika Tanah, Braja M. Das 1988)

3.4.3 Sistem Klasifikasi *Unfied*

Sistem ini diperkenalkan oleh Cassagrande pada tahun 1942, kemudian disempurnakan lagi tahun 1952 atas kerjasama *Unified States Bureau of Reclamation*. Saat ini sistem *USCS* banyak dipakai oleh para ahli Rekayasa Teknik Sipil. Sistem *Unified* membagi tanah dalam 2 kelompok, yaitu tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus.

- a. Tanah berbutir kasar (*coarse grained – soil*), yaitu tanah kerikil dan pasir yang kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos saringan No.200. Simbol kelompok ini adalah G (untuk tanah berkerikil) dan S (untuk tanah berpasir). Selain itu juga dinyatakan gradasi tanah dengan simbol W (untuk tanah bergradasi baik) dan P (untuk tanah bergradasi buruk).
- b. Tanah berbutir halus (*fine – grained – soil*), yaitu tanah yang lebih dari 50% berat contoh tanahnya lolos dari saringan No.200, simbol kelompok ini adalah C (untuk lempung anorganik, clay) dan O (untuk lanau organik), Plastisitas dinyatakan dalam L (plastisitas rendah) dan H (plastisitas tinggi).

3.5 Analisis Ukuran Butiran

Sifat-sifat tanah sangat bergantung pada ukuran butirannya. Besarnya butiran dijadikan dasar untuk pemberian nama dan klasifikasi tanahnya.

Analisis ukuran butiran tanah adalah penentuan persentase berat butiran pada satu unit saringan, dengan ukuran diameter lubang tertentu.

3.5.1 Tanah Berbutir Kasar

Distribusi ukuran butir dari tanah berbutir kasar dapat ditentukan dengan cara menyaringnya. Tanah benda uji disaring lewat satu unit saringan standar untuk pengujian tanah. Berat tanah yang tinggal pada masing-masing saringan ditimbang dan persentase terhadap berat kumulatif pada tiap saringan dihitung.

3.5.2 Tanah Berbutir Halus

Distribusi ukuran butiran terdiri dari tanah berbutir halus atau bagian berbutir halus dari tanah berbutir kasar, dapat ditentukan dengan cara sedimentasi.

1. Susunan Tanah Lempung

Pelapukan akibat reaksi kimia menghasilkan susunan kelompok partikel berukuran koloid dengan diameter butiran lebih kecil dari 0,002 m, yang disebut mineral lempung. Partikel lempung dapat berbentuk seperti lembaran yang mempunyai permukaan khusus. Karena itu, tanah lempung mempunyai sifat sangat dipengaruhi oleh gaya-gaya permukaan. Umumnya terdapat kira-kira 15 macam mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung (Kerr, 1959). Diantaranya adalah terdiri dari kelompok-kelompok : *montmorillonite*, *illite*, *kaolinite*, dan *polygorskite*.

Susunan kebanyakan tanah lempung terdiri dari silica tetrahedral dan aluminium oktahedra.

2 Sifat- sifat tanah Lempung

Tanah lempung mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

1. Mempunyai indeks plastisitas lebih besar dari 7 (Tabel 3.1).
2. Berukuran koloid (lebih kecil dari 0,002 mm).
3. Termasuk tanah berbutir halus (lolos saringan no.200 lebih dari 50%).

Untuk memperjelas sifat tanah lempung maka dibuat Tabel 3.3 :

Tabel 3.3 Sifat Tanah Lempung

Tipe tanah	Sifat	Uji lapangan
• Lempung	<ul style="list-style-type: none"> • Sangat lunak • Lunak • Keras • Kaku • Sangat kaku 	<ul style="list-style-type: none"> • Meleleh diantara jari-jari tangan ketika diperas. • Dapat diperas dengan mudah. • Dapat diperas dengan tekanan jari yang kuat. • Tidak dapat diremas dengan jari, tapi dapat digencet dengan ibu jari. • Dapat digencet dengan kuku ibu jari.

(Sumber: Mekanika Tanah 1, R.F CRAIG, 1989)

Tabel 3.4 Berat Jenis dari Beberapa Jenis Tanah

Jenis tanah	Berat Jenis (Gs)
Krikil	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, 1992

3.6 Konsolidasi

3.6.1 Teori Konsolidasi

Konsolidasi adalah proses berkurangnya volume atau berkurangnya rongga pori dari tanah jenuh yang permeabilitas rendah akibat pembebanan, dimana prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terperasnya air pori keluar dari rongga tanahnya.

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data tanah tentang sifat pemampatan, perubahan volume dan proses keluarnya air dari tanah karena adanya tekanan vertikal pada tanah tersebut guna mengetahui kecepatan dan besar penurunan kususnya pada tanah lempung.

Dalam pengujian ini dikenal dengan dua istilah konsolidasi, *Over Consolidasi*, yaitu suatu keadaan tanah yang pernah menerima pembebanan yang lebih besar daripada pembebanan yang ada sekarang. Sedangkan istilah yang kedua *Normally Consolidasi*, yaitu tanah yang tidak atau belum pernah menerima beban yang lebih besar dari pembebanan sekarang.

Teori Konsolidasi Terzaghi membuat asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Tanah adalah, dan tetap akan jenuh ($S=100$ persen). Penurunan konsolidasi dapat diperoleh buat tanah yang tidak jenuh, tetapi ramalan waktu terjadinya penurunan sangat tidak dapat dipercaya.
2. Air dan butir-butir tanah tidak dapat ditekan.
3. Terdapat hubungan linear diantara tekanan yang bekerja dan perubahan volume [$a_v = \Delta e / \Delta p$, seperti didefinisikan dalam persamaan]
4. Koefisien permeabilitas k merupakan suatu konstanta. Ini mungkin benar dilapangan, tetapi pada laboratorium mungkin akan terdapat kesalahan-kesalahan yang besar yang berhubungan dengan asumsi yang cenderung untuk menghasilkan kesalahan dalam menentukan waktu penurunan terjadi.
5. Hukum Darcy dianggap berlaku ($v = ki$)
6. Terdapat temperatur yang konstan. Perubahan temperatur dari sekitar 10–100° C (masing-masing merupakan temperatur lapangan dan laboratorium) menghasilkan sekitar 30% perubahan dan viskositas air. Penting bahwa

percobaan dilaboratorium dilakukan pada temperatur yang diketahui besarnya, paling baik sama dengan temperatur dilapangan.

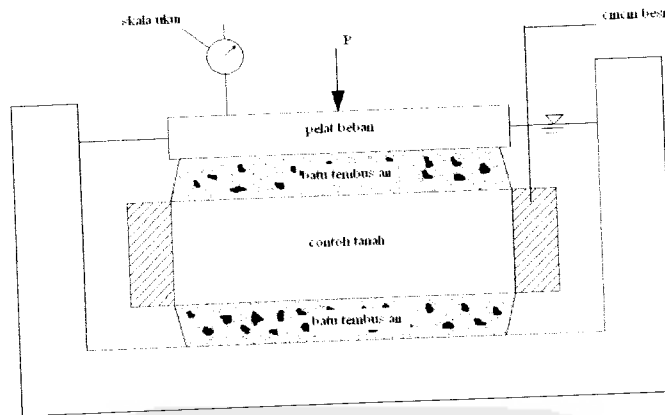
7. Konsolidasi merupakan konsolidasi satu dimensi (vertikal), sehingga tidak terdapat aliran air lateral ataupun pergerakan tanah. Ini benar-benar terjadi dalam percobaan dilaboratorium dan pada umumnya juga berlaku dilapangan.

Contoh-contoh merupakan contoh tidak terganggu. Ini merupakan masalah utama sebab bagaimanapun telitinya contoh itu diambil, ia sebenarnya telah tidak terbebani lagi oleh tanah yang berada di atasnya, pada kadaan dilapangan. Disamping itu muka air statis tekanan pori akan hilang. Dalam tanah-tanah yang peka, kesalahan-kesalahan besar mungkin akan diperbuat, dalam tanah-tanah lainnya pengaruhnya mungkin akan lebih kurang. Interpretasi data yang teliti akan dapat mengurangi kesalahan pengambilan contoh tersebut.

3.6.2 Pengujian Konsolidasi

Semua tanah yang mengalami tegangan akan mendapat regangan di dalam kerangka tanah tersebut. Regangan ini disebabkan oleh gulingan, geseran atau menggelincir dan terkadang juga kehancuran partikel tanah pada titik-titik kontak serta distorsi elastis. Akumulasi statistik dari deformasi pada arah yang ditinjau ini merupakan suatu regangan. Regangan-regangan pada tanah berbutir kasar dan berbutir halus yang jenuh (dan hampir jenuh) akan menghasilkan regangan-regangan yang tergantung pada waktu. Penurunan yang dihasilkan akan tergantung kepada waktu disebut *konsolidasi*.

Pengujian konsolidasi biasanya dilakukan dengan alat *Oedometer* atau *konsolidometer*. Gambar skematik alat ini dapat dilihat pada gambar 3.3. Beban P ditetapkan pada benda uji tersebut dan penurunan diukur dengan arloji pembacaa (*dial gauge*). Beban ditetapkan dalam periode 24 jam, dengan benda uji tetap terendam dalam air.



Gambar 3.3 Gambar skema alat pengujian konsolidasi (Hardiyatmo, 1994)

Penelitian Leonard (1962) menunjukkan bahwa hasil terbaik diperoleh jika penambahan beban adalah dua kali beban sebelumnya, dengan urutan besar beban : 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 8; 16 Kg/cm². setelah mencapai 16 kg/cm² beban dikurangi sampai 0,25 Kg/cm² untuk mendapatkan *rebound curve*. Pada setiap pembacaan penurunan dilakukan pada jangka waktu tertentu. Dengan demikian baik besarnya penurunan maupun kecepatannya dapat diketahui.

Data yang langsung diperoleh dari suatu percobaan konsolidasi dicantumkan dalam bentuk penurunan

Indeks pemampatan (C_c) adalah kemiringan dari bagian lurus grafik $e-\log p'$. untuk dua titik yang terletak pada bagian lurus dari grafik dalam gambar 3.6, nilai C_c dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2' - \log p_1'} = \frac{\Delta e}{\log(p_2' / p_1')} \dots\dots\dots(3.4)$$

Untuk tanah *normally consolidated*, Terzaghi dan Peck (1967) (Hardiyatmo, 1994) memberikan hubungan angka kompresi C_c sebagai berikut :

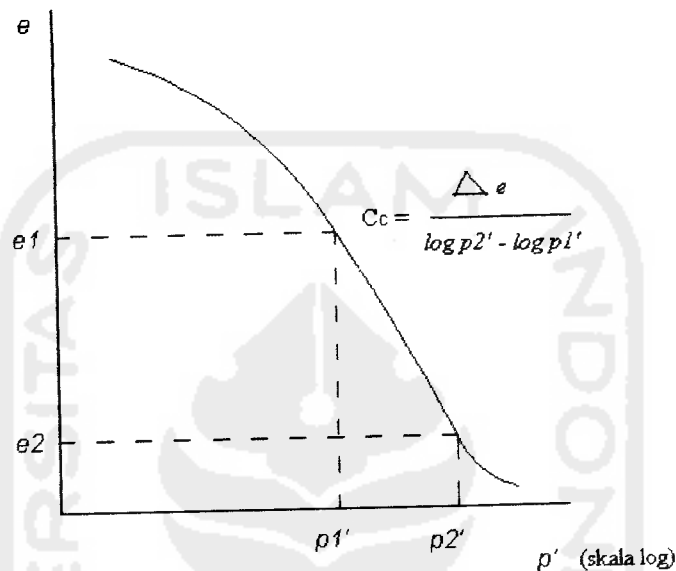
$$C_c = 0,009 (LL - 10) \dots\dots\dots(3.5)$$

Dengan LL adalah batas cair (*liquid limit*). Persamaan ini dapat digunakan untuk tanah lempung tak organik yang mempunyai sensitivitas

rendah sedang dengan kesalahan 30% (rumus ini seharusnya tidak digunakan untuk sensitivitas lebih besar dari 4).

Terzaghi dan Peck juga memberikan hubungan yang sama untuk tanah lempung dibentuk kembali (*remold*).

$$C_c = 0,007 (LL - 10) \dots\dots\dots(3.6)$$



Gambar 3.4 Indeks Pemampatan C_c (Hardiyatmo, 1994)

Analisis konsolidasi di hitung dengan persamaan :

Tinggi efektif (tebal bagian padat) dihitung dengan persamaan :

$$H_t = \frac{w_k}{A \cdot G_s} \dots\dots\dots(3.7)$$

Angka pori awal (e_0) dihitung dengan persamaan :

$$e_0 = \frac{H_0 - H_t}{H_t} = \frac{\Delta H}{H_t} \dots\dots\dots(3.8)$$

Angka pori pada saat pembebanan dihitung dengan persamaan :

$$e_1 = \frac{H_1 - H_t}{H_t} \text{ atau } e_1 = e_0 - \Delta e \dots\dots\dots(3.9)$$

Derajat kejenuhan sebelum dan sesudah pengujian :

$$S_r = \frac{w_k \cdot G_s}{e} \cdot 100\% \dots\dots\dots(3.10)$$

Koefisien konsolidasi dihitung dengan persamaan :

$$C_v = \frac{0,848 (d/2)^2}{t_{90}} \dots\dots\dots(3.11)$$

Tebal rata-rata :

$$d = \frac{1}{2}(H_1 + H_2) \dots\dots\dots(3.12)$$

Keterangan :

- w_k = berat kering
- G_s = berat jenis
- H_0 = tebal sampel mula-mula
- H_1 = tebal sampel pada awal setiap beban
- H_2 = tebal sampel pada akhir pembebanan

3.7 Penurunan

Apabila lapisan tanah mengalami pembebanan maka lapisan tanah akan mengalami regangan atau penurunan (settlement). Regangan yang terjadi dalam tanah ini disebabkan oleh berubahnya susunan tanah maupun oleh pengurangan rongga pori/ air di dalam tanah tersebut. Jumlah dari regangan sepanjang kedalaman lapisan merupakan penurunan total tanahnya. Penurunan akibat beban adalah jumlah total dari penurunan segera (immediate settlement) dan penurunan konsolidasi (consolidation settlement).

Penurunan yang terjadi pada tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus yang kering atau tidak jenuh terjadi dengan segera sesudah penerapan bebannya.

Penurunan pada kondisi ini disebut penurunan segera. Penurunan segera merupakan bentuk penurunan elastis. Dalam prakteknya, sangat sulit memperkirakan besarnya penurunan. Hal ini tidak hanya karena tanah dalam kondisi alamnya tidak homogen dan anisotropis dengan modulus elastis yang bertambah kedalamannya, tetapi juga terdapat kesukaran dalam mengevaluasi kondisi tegangan dan regangan yang terjadi di lapisannya. Penurunan segera banyak diperhatikan pada pondasi bangunan yang terletak pada tanah granuler atau tanah berbutir kasar.

Penurunan konsolidasi terjadi pada tanah berbutir halus yang terletak di bawah muka air tanah. Penurunan yang terjadi memerlukan waktu yang lamanya tergantung pada kondisi lapisan tanahnya.

Penurunan konsolidasi dapat dibagi dalam 3 fase, yaitu :

- a) Fase awal, yaitu fase dimana penurunan terjadi dengan segera sesudah beban bekerja. Penurunan disini terjadi akibat proses penekanan udara keluar dari dalam pori tanahnya.
- b) Fase konsolidasi primer atau konsolidasi hidrodinamis, yaitu penurunan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran air yang meninggalkan tanahnya akibat adanya tekanan.
- c) Fase konsolidasi sekunder, merupakan proses lanjutan dari konsolidasi primer dimana prosesnya berjalan sangat lambat. Penurunannya jarang diperhitungkan karena pengaruhnya biasanya sangat kecil.

Sebagian besar penurunan diakibatkan pengurangan angka pori. Hampir semua jenis tanah akan berkurang angka porinya (e) bila beban vertikal bertambah dan akan bertambah angka porinya bila bebannya dikurangi.

Ada beberapa sebab terjadinya penurunan akibat pembebanan yang bekerja diatas tanah :

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

Penurunan total adalah jumlah dari penurunan segera (immediate settlement) dan penurunan konsolidasi (consolidation settlement). Penurunan konsolidasi masih dapat dibedakan lagi menjadi penurunan akibat konsolidasi primer dan penurunan konsolidasi sekunder. Bila dinyatakan dalam bentuk persamaan, penurunan total adalah :

$$S = S_i + S_c + S_s \dots \dots \dots (3.13)$$

Dengan:

S = penurunan total

S_i = penurunan segera

S_c = penurunan akibat konsolidasi primer

S_s = penurunan akibat konsolidasi sekunder

3.7.1 Penurunan Segera (Immediate Settlement)

Pada kenyataannya, lapisan tanah yang mampat tidak mempunyai ketebalan tak terhingga. Lapisan tanah yang diendapkan secara alamiah terbentuk secara berlapis-lapis dengan sifat yang berbeda-beda di atas lapisan yang keras. Dalam lapisan ini, kuat geser dan modulus, biasanya bertambah bila kedalaman bertambah. Gibson (1967) telah mengamati bahwa variasi modulus dengan kedalaman mempunyai pengaruh yang kecil terhadap distribusi tegangannya, tetapi mempunyai pengaruh yang berarti pada perubahan bentuk permukaannya.

Untuk area pembebanan berbentuk segi empat yang terletak pada lapisan tanah dengan tebal H yang terletak pada lapisan yang keras (gambar 3.5), penurunan yang terjadi dapat dihitung dengan rumus berikut,

$$S_i = \frac{qB}{E} I_p \dots \dots \dots (3.14)$$

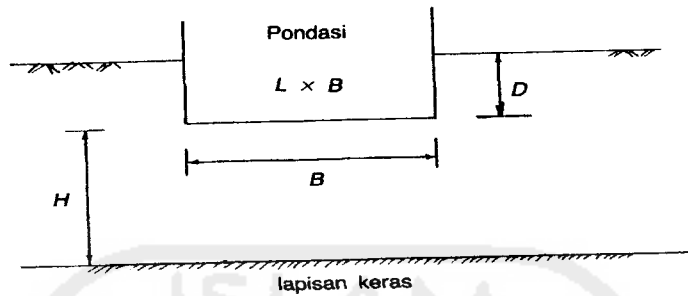
Dengan :

$$I_p = (1 - \mu^2) F_1 + (1 - \mu - 2\mu^2) F_2$$

F_1 dan F_2 = koefisien

Penurunan segera pada sembarang titik dapat diberikan oleh persamaan :

$$S_i = \frac{q}{E} (I_{p1} B_1 + I_{p2} B_2 + I_{p3} B_3 + I_{p4} B_4) \dots\dots\dots (3.15)$$



Gambar 3.5 Penurunan rata-rata untuk beban terbagi rata berbentuk empat persegi panjang fleksibel pada kedalaman D

3.7.2 Penurunan Konsolidasi Primer

Penurunan akibat konsolidasi primer diberikan menurut persamaan di bawah ini :

$$S_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H \dots\dots\dots (3.16)$$

Untuk lempung normally consolidated maka nilai perubahan angka pori :

$$\Delta e = C_c \log \frac{P'_0 + \Delta p}{P'_0}$$

Untuk lempung over consolidated, nilai perubahan angka pori (Δe) dipertimbangkan dengan dua kondisi yaitu :

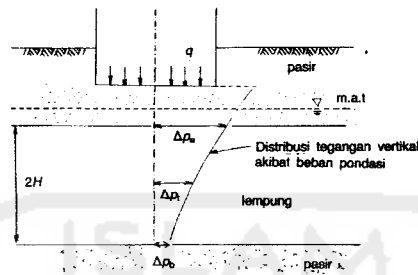
1. Jika $P'_1 < P'_c$, maka $\Delta e = C_c \log \frac{P'_1}{P'_0} = C_r \log \frac{P'_0 + \Delta p}{P'_0} \dots\dots\dots (3.17)$

Dengan $P'_1 = P'_0 + \Delta p$

2. Jika $P'_0 < P'_c < P'_1$, maka $\Delta e = C_r \log \frac{P'_c}{P'_0} + C_c \log \frac{P'_0 + \Delta p}{P'_c} \dots\dots\dots (3.18)$

Dimana P'_c adalah tekanan prakonsolidasi

Jika beban bekerja diatas luasan terbatas, tambahan tekanan akibat beban yang bekerja akan berkurang dengan penambahan kedalamannya. Selanjutnya untu menghitung penurunan konsolidasi dengan memperhatikan grafik hubungan e dan $\log p$, dapat digunakan cara sebagai berikut :



Gambar 3. 6. Hitungan penurunan konsolidasi primer cara 1

Cara 1 :

1. hitung tekanan overburden efektif rata-rata (P'_0) pada lapisan lempung.
2. Hitung tambahan tegangan akibat beban yang bekerja pada puncak, tengah, dasar lapisan lempungnya dengan teori yang ada. Nilai tambahan tegangan rata-rata dalam lapisan lempung dapat diestimasikan dengan cara Simpson,

$$\Delta p = \frac{1}{6}(\Delta p_a + 4\Delta p_t + \Delta p_b)$$

dimana :

Δp : tambahan tegangan efektif setelah beban bekerja

Δp_a : tambahan tegangan pada bagian atas lapisan

Δp_t : tambahan tegangan pada bagian tengah lapisan

Δp_b : tambahan tegangan pada bagian bawah lapisan

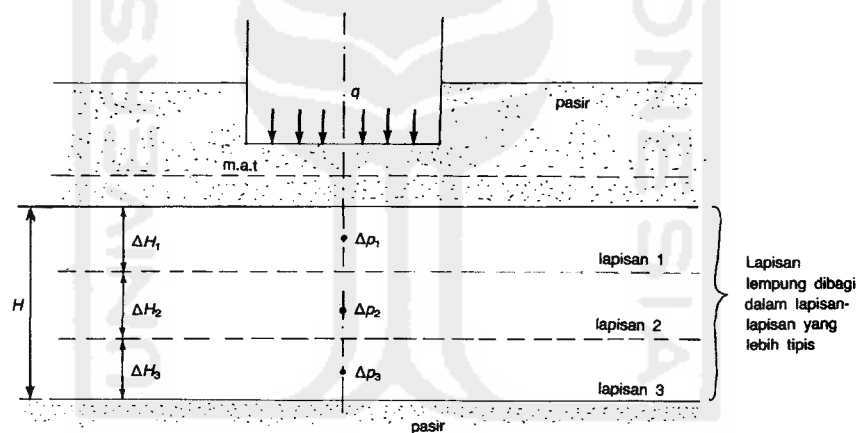
3. Gunakan P'_0 dan Δp hasil hitungan diatas, untuk memperoleh nilai Δe dengan persamaan yang cocok dengan kondisi persamaan-persamaan diatas.
4. Hitung besarnya penurunan dengan menggunakan persamaan

$$S_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H \dots\dots\dots (3.19)$$

Cara 2 :

1. Dibagi lapisan lempung ke dalam n lapisan (Gambar 3.3)
2. Hitung besar tegangan efektif, P_o' pada tiap tengah-tengah lapisan.
3. Hitung tambahan tegangan pada tengah-tengah tiap lapisan (Δp_i) akibat beban yang bekerja.
4. Hitung Δe_i untuk tiap lapisan dari persamaan diatas yang cocok dengan kondisi lapisannya.
5. Hitung besarnya penurunan total pada seluruh lapisan,

$$S_c = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta S_c = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta e_i}{1 + e_0} \Delta H_i$$



Gambar 3.7 Hitungan penurunan konsolidasi primer cara 2

3.7.3 Penurunan Konsolidasi Sekunder

Penurunan konsolidasi sekunder terjadi setelah penurunan konsolidasi primer berhenti. Besarnya penurunan konsolidasi sekunder merupakan fungsi waktu dan kemiringan kurva fase konsolidasi sekunder $C\alpha$. persamaan kemiringan $C\alpha$ diperoleh dari persamaan :

$$C\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} \dots\dots\dots (3.20)$$

nilai $C\alpha$ ditentukan dari grafik angka pori terhadap log waktu. Selanjutnya penurunan akibat konsolidasi sekunder dihitung dari persamaan :

$$S_s = H \frac{C\alpha}{1 + e_p} \log \frac{t_2}{t_1} \dots\dots\dots (3.21)$$

dengan :

S_s = Penurunan konsolidasi sekunder

H = tebal benda uji awal atau tebal lapisan lempung

Δe = perubahan angka pori uji dilaboratorium dari t_1 ke t_2

$t_2 = t_1 + \Delta t$

t_1 = saat waktu setelah konsolidasi primer selesai

e_p = angka pori saat konsolidasi primer selesai

3.8 CBR (*California Bearing Ratio*)

Pengujian CBR dimaksudkan untuk menentukan kekuatan tanah atau campuran agregat yang dipadatkan pada kadar air tertentu. Uji ini dikembangkan oleh California State Highway Departement, Amerika Serikat, 1930. CBR (*California Bearing Ratio*) adalah perbandingan antara beban penetrasi suatu bahan (dapat berupa tanah maupun material perkerasan jalan) dengan bahan standar dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. Biasanya pengujian CBR dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan material perkerasan jalan raya.

Prinsip pengujian CBR adalah dengan menembus sampel tanah dengan kepadatan tertentu dalam suatu tabung dengan menggunakan alat penekan standar. Alat penembus atau penetrasi yang digunakan adalah sebuah piston berpenampang bulat dengan luas 3 in² dan kecepatan konstan sebesar 0,05 in per menit dan diukur beban yang diperlukan.

$$CBR = \frac{\text{Beban hasil penetrasi}}{\text{Beban terhadap bahan standar}} \times 100\% \dots\dots\dots(3.22)$$

Tabel 3.5 Hubungan antara nilai penetrasi dengan beban standar untuk pemeriksaan CBR

Penetrasi		Beban		Tekanan (lb/m ²)
(in)	(mm)	(kN)	(lbs)	
0.1	2	11,5	3000	1000
	2,5	13,24		
	4	17,6		
0.2	5	19,96	4500	1500
	6	22,2		
	8	26,3		
	10	30,3		
	12	33,5		

Sumber : Praktikum Mekanika Tanah, 1990

Untuk mendapatkan design CBR, Harus memperhitungkan dua faktor yaitu :

- Kadar air tanah serta berat isi kering pada waktu dipadatkan.
- Perubahan pada kadar air yang mungkin akan terjadi setelah pemadatan selesai.

Test CBR dapat dilakukan dengan 2 (dua) macam yaitu :

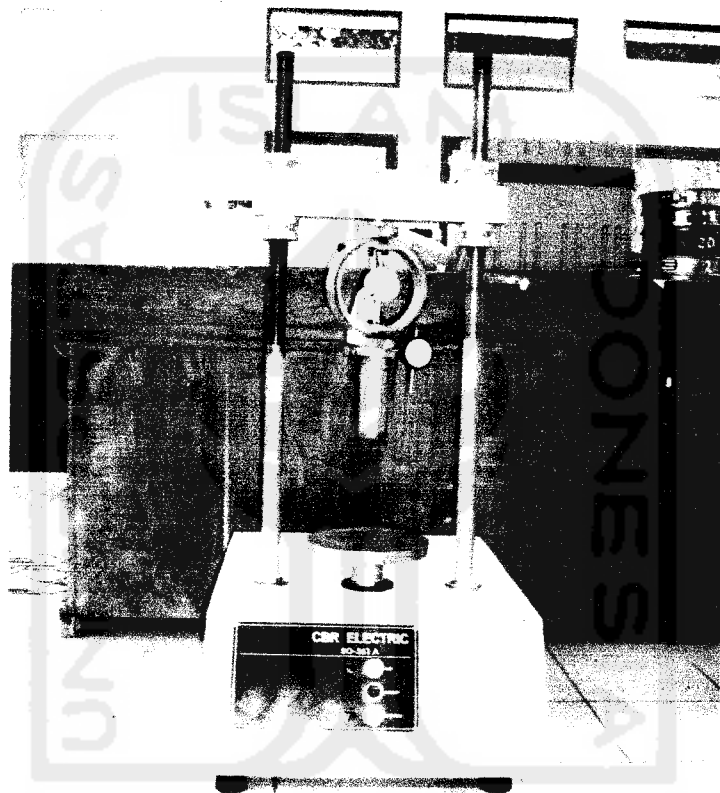
- Percobaan CBR di laboratorium
- Percobaan CBR di lapangan.

3.8.1 Percobaan CBR di laboratorium

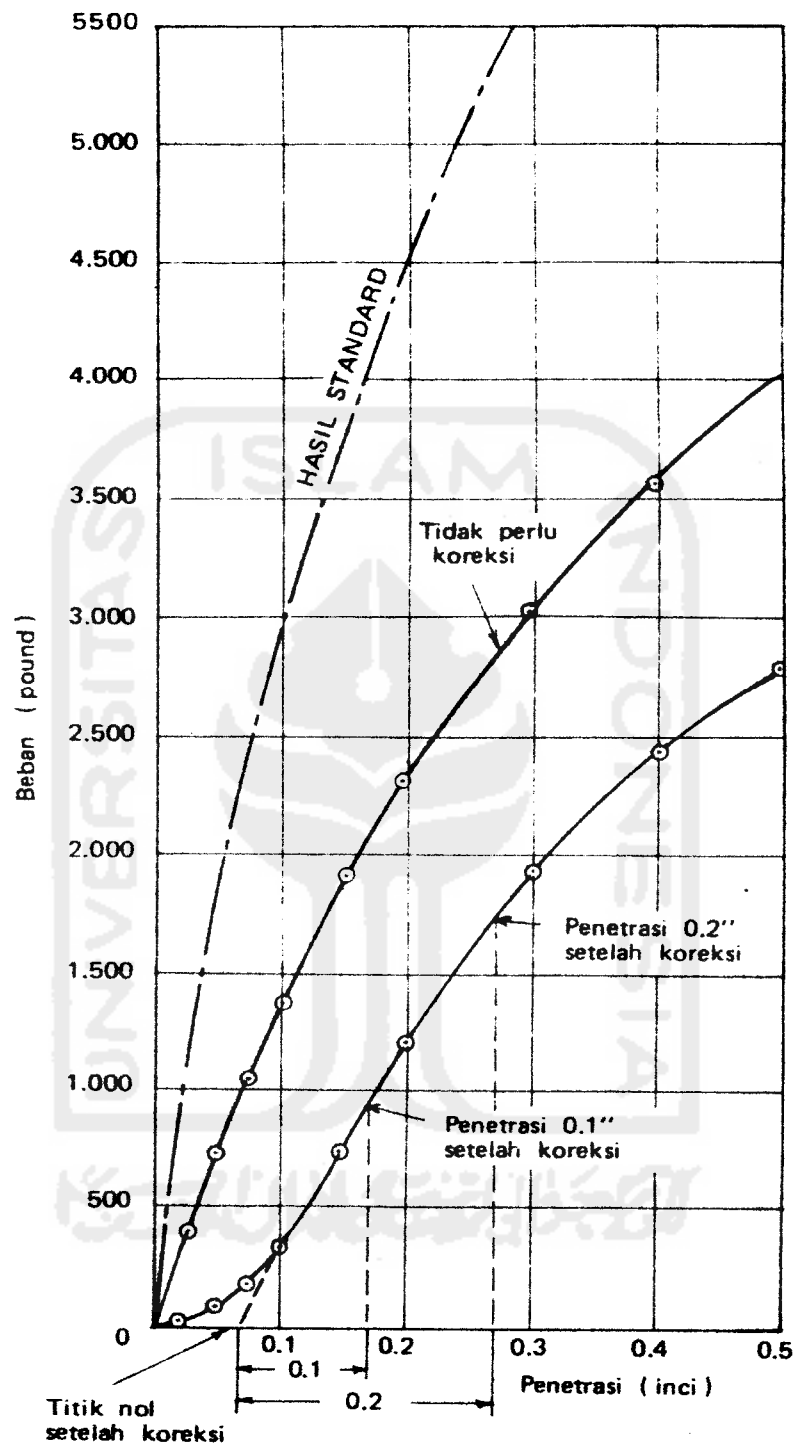
CBR laboratorium biasanya digunakan antara lain untuk perencanaan pembangunan jalan baru dan lapangan terbang. Untuk menentukan nilai CBR laboratorium harus disesuaikan dengan peralatan dan data hasil pengujian *compaction standard modified* dibuat mendekati \pm kadar air optimum.

Dengan mempergunakan dongkrak mekanis sebuah piston penetrasi ditekan supaya masuk tanah dengan kecepatan 0,05 inci per menit. Luas piston tersebut adalah 3 inci persegi. Untuk menentukan beban yang bekerja pada piston ini dipakai sebuah “*proving ring*” yang di terpasang antara piston dan dongkrak.

Pada nilai-nilai tertentu, beban yang bekerja pada piston tercatat sehingga kemudian dapat dibuat grafik beban terhadap penetrasi. Gambar 3.8 dan gambar 3.9 dibawah ini adalah merupakan gambar alat uji dan gambar grafik hubungan antara beban terhadap penetrasi pada pengujian CBR laboratorium.



Gambar 3.8 Alat uji CBR laboratorium



Gambar 3.9 Grafik hubungan beban dan penetrasi hasil uji CBR laboratorium.