

DAFTAR ISI

Kata Pengantar	i
Prakata	ii
Daftar Gambar	iii
Daftar Tabel	iv
Daftar Isi	v
 BAB V	 PEMADATAN TANAH
5.1	Pendahuluan 1
5.2.	Prinsip Umum Pemadatan 2
5.3.	Uji Proktor Standar 4
5.4.	Uji Proktor Dimodifikasi 6
5.5.	Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pemadatan 9
5.6.	Pemadatan di Lapangan 13
5.7.	Spesifikasi untuk Pemadatan di Lapangan 16
5.8.	Penentuan Berat Volume Akibat Pemadatan di Lapangan 17
	a. Percobaan Kerucut Pasir 17
	b. Kepadatan Lapangan dengan Rubber Balon 21
	c. Penggunaan Alat Ukur Kepadatan Nuklir 22
 BAB VI.	 KONSOLIDASI DAN PENURUNAN 23
6.1.	Istilah Normally Consolidated dan Over Consolidated 24
6.2.	Pengukuran Konsolidasi 25
6.3.	Besarnya Penurunan 26
6.4.	Hasil Percobaan Konsolidasi 26
6.5.	Perhitungan Tegangan 32
6.6.	Kecepatan Penurunan 34
6.7.	Perbandingan Penurunan yang Dihitung dengan Penurunan yang Terjadi diLapangan 42
6.8.	Contoh Perhitungan Penurunan 42
 BAB VII	 STABILITAS LERENG 48
7.1.	Pendahuluan 48
7.2.	Jenis-jenis Lereng 49
7.3.	Klasifikasi Longsor 51
7.4.	Analisa Terjadinya Logsor 53
7.5.	Kekuatan Geser Tanah dan Hubungannya Dengan Kemantapan Lereng 54
7.6.	Angka Keamanan 57
7.7.	Analisa Stabilitas Lereng 58
	7.7.1. Metode Fellinius 59
	7.7.2. Metode Analisa Bishop Disederhanakan 62
	7.7.3. Metode Janbu 65
7.8.	Cara-cara Menstabilkan Lereng 69

V. PEMADATAN TANAH (Soil Compaction)

5.1. PENDAHULUAN

Pada pembuatan timbunan tanah untuk jalan raya, dam tanah, dan banyak struktur teknik lainnya, tanah yang lepas (renggang) harus dipadatkan untuk meningkatkan berat volumenya.

Pemadatan berfungsi untuk :

1. Meningkatkan kekuatan tanah
2. Memperkecil pengaruh air terhadap tanah tersebut
3. Memperkecil penurunan (settlement)

Pemadatan adalah suatu proses dimana udara dalam pori tanah dikeluarkan dengan salah satu cara mekanis.

Proses pemadatan berlainan sama sekali dengan proses konsolidasi, sehingga dua hal ini tidak boleh dikacaukan.

Cara mekanis pemadatan dilapangan biasanya dipakai cara menggilas, sedangkan dilaboratorium dipakai cara menumbuk.

5.2. PRINSIP UMUM PEMADATAN

Tingkat pemadatan tanah diukur dari berat volume kering tanah yang dipadatkan. Untuk setiap hasil pemadatan, kepadatan yang dicapai sangat tergantung kepada banyaknya air dalam tanah (kadar airnya).

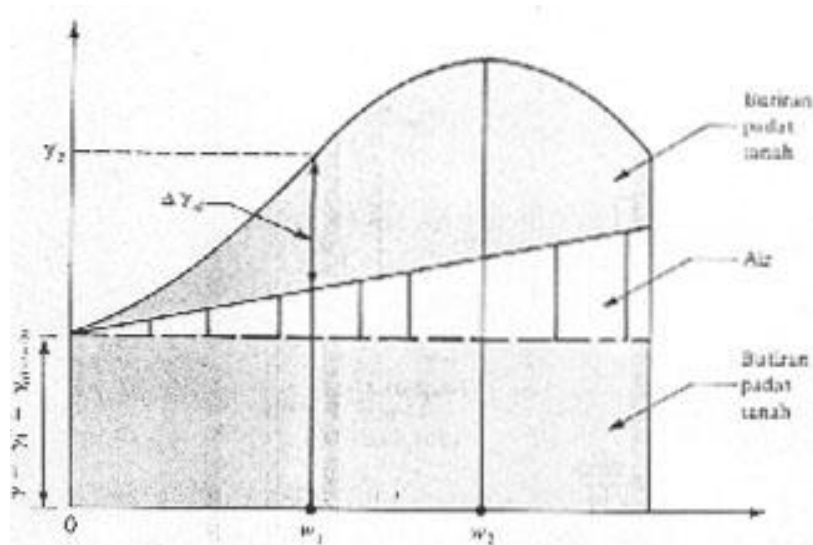
Bila kadar air suatu tanah rendah, maka tanah itu keras atau kaku dan sukar dipadatkan.

Bilamana kadar air ditambah maka air itu akan berlaku sebagai unsur pembasah (pelumas) yang membuat partikel tanah mudah bergerak dan bergeseran satu sama lain dan membentuk kedudukan yang lebih rapat, sehingga tanah tersebut akan lebih mudah dipadatkan dan ruang kosong antar butir menjadi lebih kecil.

Setelah mencapai kadar air tertentu $w = w_2$ (lihat Gambar 1) apabila airnya ditambah lagi maka berat volume kering tanah akan turun lagi karena pori-pori tanah yang sebetulnya dapat diisi oleh butiran tanah, menjadi penuh terisi air yang tidak dapat dikeluarkan dengan cara pemadatan

Kadar air dimana harga berat volume kering maksimum tanah dicapai disebut *kadar air optimum* (w_{op}).

Percobaan-percobaan di laboratorium yang umum dilakukan untuk mendapatkan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum adalah *Uji Pemadatan Proktor* (*Proctor Compaction Tests*), sesuai dengan nama penemunya, Proctor, 1933.



Gambar 1 : Prinsip pemadatan.

Untuk kadar air $w = 0$ berat volume basah dari tanah (γ) adalah sama dengan berat volume keringnya (γ_d), atau

$$\gamma = \gamma_{d(w=0)} = \gamma_1$$

Misalnya pada $w = w_1$, berat volume basah dari tanah sama dengan : $\gamma = \gamma_2$, sehingga berat volume keringnya adalah :

$$\gamma_{d(w=w_1)} = \gamma_{d(w=0)} + \Delta\gamma_d$$

Apabila w ditambah sampai mencapai w_2 , maka akan didapatkan harga berat volume kering maksimum ($\gamma_{d \max}$) dan kadar air optimum (w_{op})

Apabila w ditambah lagi, maka berat volume kering akan berkurang, karena pori-pori tanah sudah terisi oleh air sehingga sukar dipadatkan.

5.3. Uji Proktor Standard (Standard Proctor Test)

(AASHTO T-99-74 / ASTM D-698-70)

Kegunaan : Untuk menentukan hubungan antara kadar air dan kepadatan tanah sehingga dapat diketahui berat volume kering maksimum ($\gamma_{d \text{ max}}$) dan kadar air maksimum (w_{op})

Peralatan yang digunakan :

- cetakan dengan $D = 102\text{mm}$ dan tinggi $11,5\text{cm}$.
- Alat tumbuk tangan dengan $D = 50,8\text{mm}$ dan berat $2,5\text{kg}$ serta tinggi jatuh 30cm dengan selubung yang mempunyai paling tidak 4 buah lubang udara dengan $D = 9,5\text{mm}$
- Alat pengeluar contoh
- Timbangan kapasitas $11,5 \text{ kg}$ dengan ketelitian 5 gram
- Oven pengering
- Alat perata dari besi dengan panjang 25 cm
- Saringan 50 mm , 19 mm dan $4,75\text{mm}$
- Talam, alat pengaduk dan sendok

Prosedur Pelaksanaan :

- Contoh tanah dikeringkan sehingga menjadi gembur kemudian ditumbuk dengan palu karet seberat 15 kg .
- Tanah yang sudah gembur disaring dengan saringan No.4.
- Benda uji (tanah) dibagi menjadi 6 bagian dan tiap-tiap bagian dicampur air yang sudah ditentukan dan diaduk sampai rata.
- Penambahan air diatur sehingga didapat benda uji sbb :
 - 3 contoh dengan kadar air kurang lebih dibawah $w_{optimum}$
 - 3 contoh dengan kadar air kurang lebih diatas $w_{optimum}$
 - Perbedaan kadar air benda uji masing-masing $1 - 3 \%$
- Masing-masing benda uji dimasukkan dalam kantong plastik dan disimpan selama 12 jam atau sampai tanah jenuh

- Timbang cetakan dan alasnya dengan ketelitian 5 gram.
- Cetakan leher dan keeping dijadikan satu dan tempatkan pada alas yang kokoh.
- Ambil salah satu dari contoh tanah diaduk dan dipadatkan dengan cara
 - o Pemadatan dilakukan dengan alat penumbuk standard 2,5 kg dengan tinggi jatuh 30,5 cm.
 - o Tanah dipadatkan dalam 3 lapisan dan tiap lapisan dipadatkan dengan 25 tumbukan.
- Potong kelebihan tanah dari bagian keliling leher dengan pisau dan lepaskan leher sambung
- Pergunakan alat perata untuk meratakan kelebihan tanah sehingga betul-betul rata dengan permukaan cetakan
- Timbang cetakan berisi benda uji dengan ketelitian 5 gram.
- Keluarkan benda uji tersebut dan ambil sebagian kecil untuk pemeriksaan kadar airnya.

Perhitungan :

a. Berat isi basah : $\gamma = \frac{B_2 - B_1}{V}$

Dimana : B_1 = berat cetakan (mold),

B_2 = berat tanah + cetakan,

V = volume cetakan

b. Berat isi kering : $\gamma_d = \frac{\gamma \cdot 100}{(100 + w)}$

dimana : w = kadar air tanah sesudah dipadatkan

5.4. Uji Proktor Dimodifikasi (Modified Proctor Test)

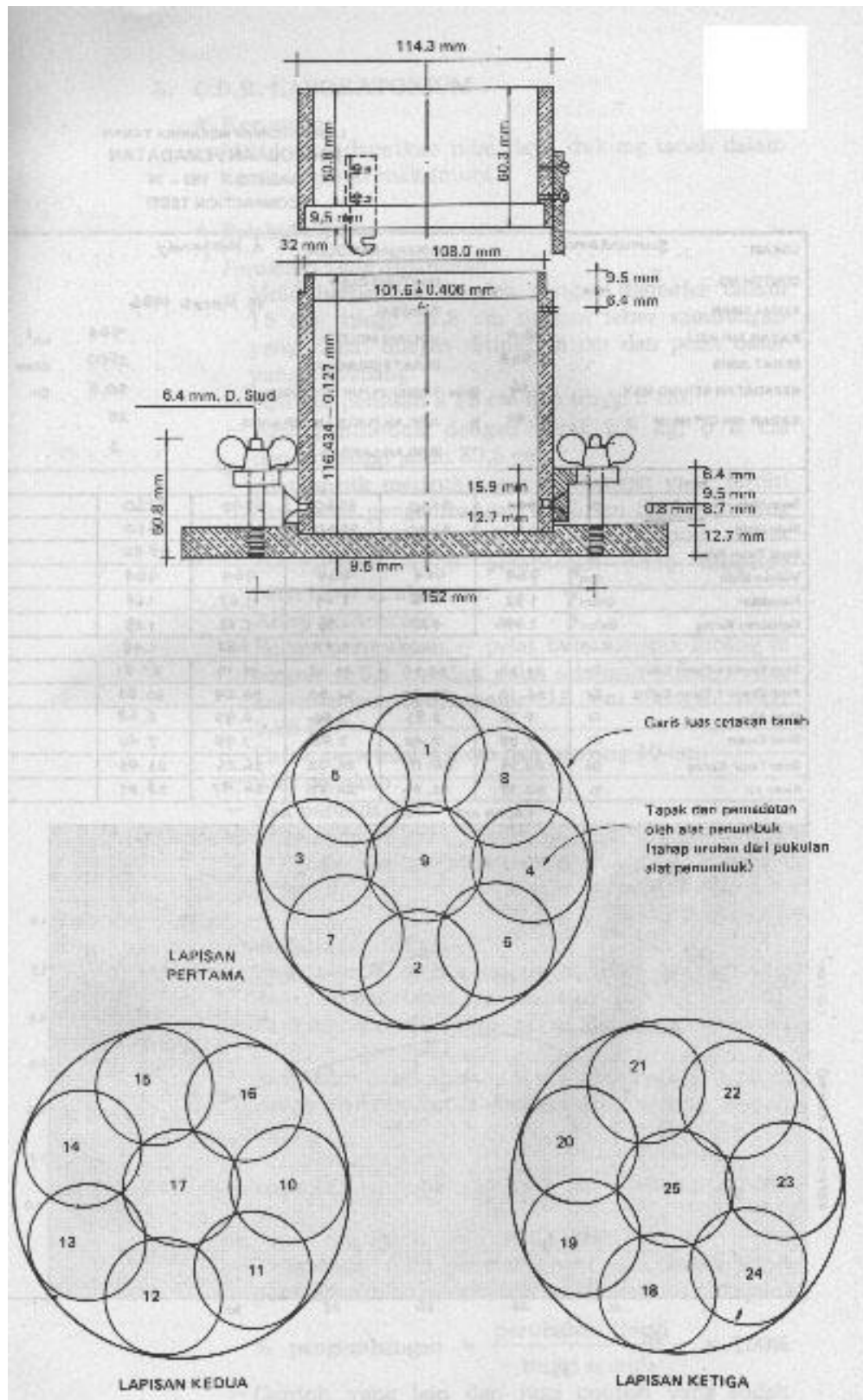
(AASHTO T-180-74 / PB-0112-76)

Kegunaan : Untuk menentukan hubungan antara kadar air dan kepadatan tanah sehingga dapat diketahui berat volume kering maksimum ($\gamma_{d \text{ max}}$) dan kadar air maksimum (w_{op})

Perbedaanya dengan uji proctor standard :

- Alat tumbuk D = 50,8 mm dengan berat 4,5 kg dan tinggi jatuh 45,7 cm
- Siapkan contoh tanah sebanyak 20 kg
- Tanah dipadatkan dengan alat pemadat 4,5 kg dan tinggi jatuh 45,7 cm dalam 5 lapisan, dimana tiap lapisan ditumbuk sebanyak 25 kali.
-

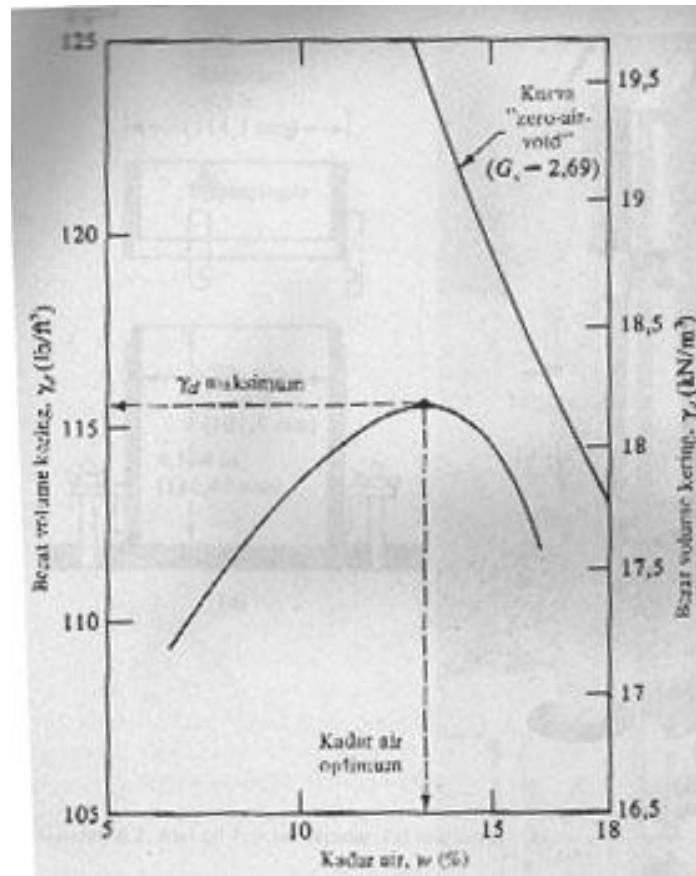
Perhitungan sama dengan uji proctor standard.



Gambar 2 : Cara melakukan penumbukan



Gambar 3 : Pemadatan tanah dengan alat penumbuk proktor



Gambar 4 : Hasil Uji Proktor Standard untuk Lempung berlanau

5.5. Faktor-faktor yang mempengaruhi pemadatan

a. Pengaruh kadar air

Kadar air mempunyai pengaruh yang besar terhadap tingkat kepadatan yang dicapai suatu tanah seperti dijelaskan sebelumnya.

b. Pengaruh jenis tanah

Jenis tanah yang diwakili oleh distribusi ukuran butiran, bentuk butiran, berat spesifik bagian padat tanah, dan jumlah serta jenis mineral lempung yang ada pada tanah, mempunyai pengaruh besar terhadap harga berat volume kering (γ_d)

c. Pengaruh energi pemadatan

Energi yang dibutuhkan untuk pemadatan (E) pada uji proctor standard sebagai berikut :

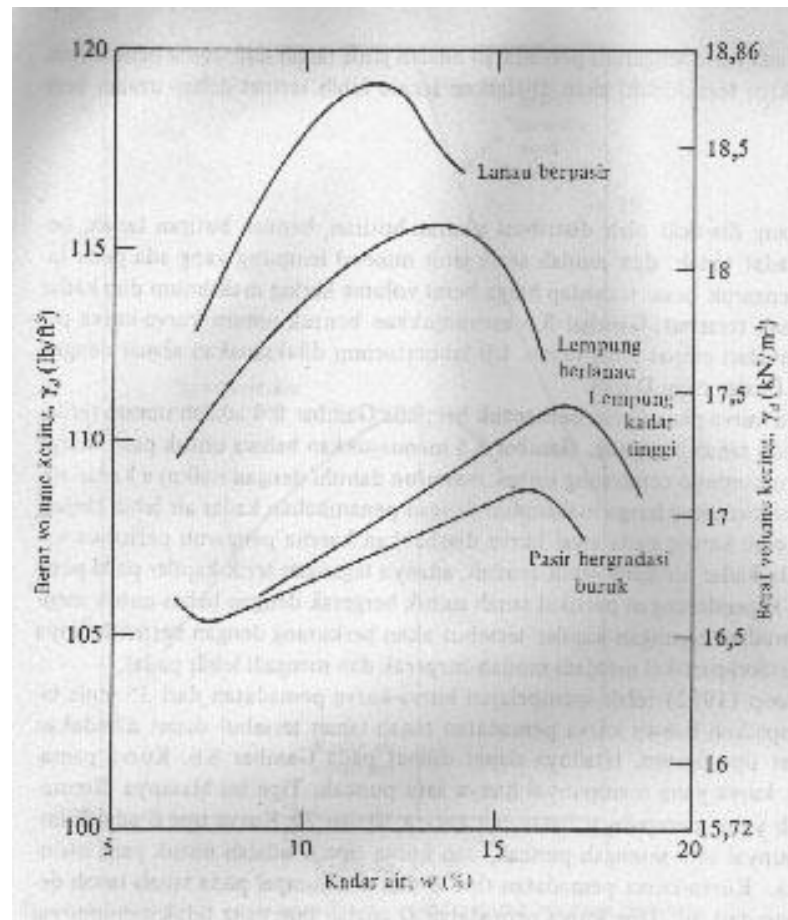
$$E = \frac{\left(\begin{matrix} \text{jumlah} \\ \text{tumbukan} \\ \text{perlapis} \end{matrix} \right) \times \left(\begin{matrix} \text{jumlah} \\ \text{lapisan} \end{matrix} \right) \times \left(\begin{matrix} \text{berat} \\ \text{penumbuk} \end{matrix} \right) \times \left(\begin{matrix} \text{tinggi} \\ \text{jatuh} \\ \text{penumbuk} \end{matrix} \right)}{\text{volumecetakan}}$$

Atau :

$$E = \frac{(25)(3)(5,5)(1)}{(1/30)} = 12.375 \text{ ft-lb/ft}^3$$

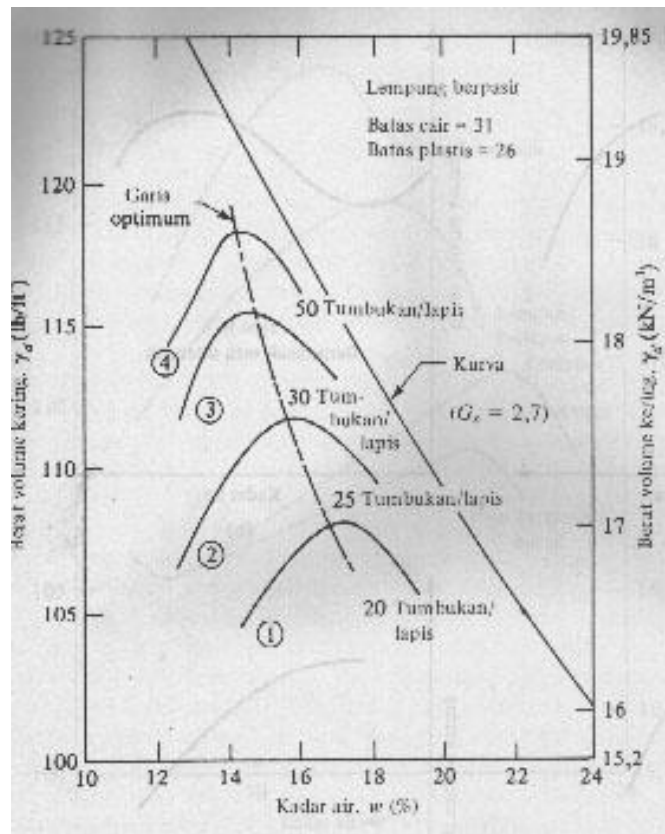
Bila usaha pemadatan per satuan volume tanah berubah, kurva pemadatan juga akan berubah. Hal ini dapat dilihat pada Gambar : 6 . Gambar tersebut menunjukkan empat buah kurva pemadatan untuk tanah lempung berpasir. Cetakan dan penumbuk seperti pada Proktor standard, tetapi jumlah tumbukan perlapis bervariasi mulai dari 20 sampai 50 tumbukan perlapis.

Dengan menggunakan persamaan diatas, energi pemadatan persatuan volume untuk masing-masing percobaan dapat dihitung.



Gambar 5 : Bentuk umum kurva pemadatan untuk empat jenis tanah (ASTM D-698)

Perhatikan bahwa kurva pemadatan bentuk bel pada Gambar 4 adalah umum terdapat pada hampir semua tanah lempung. Gambar 5 menunjukkan bahwa untuk pasir, harga berat volume kering umumnya cenderung untuk menurun dahulu dengan naiknya kadar air. Penurunan ini dipengaruhi peristiwa kapiler pada tanah, tegangan tarik kapiler mencegah kecenderungan partikel tanah untuk bergerak bebas untuk menjadi lebih padat.



Gambar 6 : Pengaruh energi pemadatan pada pemadatan lempung berpasir

Nomor kurva pada Gambar 6	Jumlah tumbukan per lapisan	Energi pemadatan (ft-lb/ft ³)
1	20	9.900
2	25	12.375
3	30	14.850
4	50	24.750

Dari Tabel diatas dan Gambar 6 terlihat bahwa :

1. Bila energi pemadatan ditambah, harga berat volume kering maksimum tanah hasil pemadatan juga bertambah
2. Bila energi pemadatan bertambah, harga kadar air optimum berkurang

5.6. PEMADATAN DI LAPANGAN

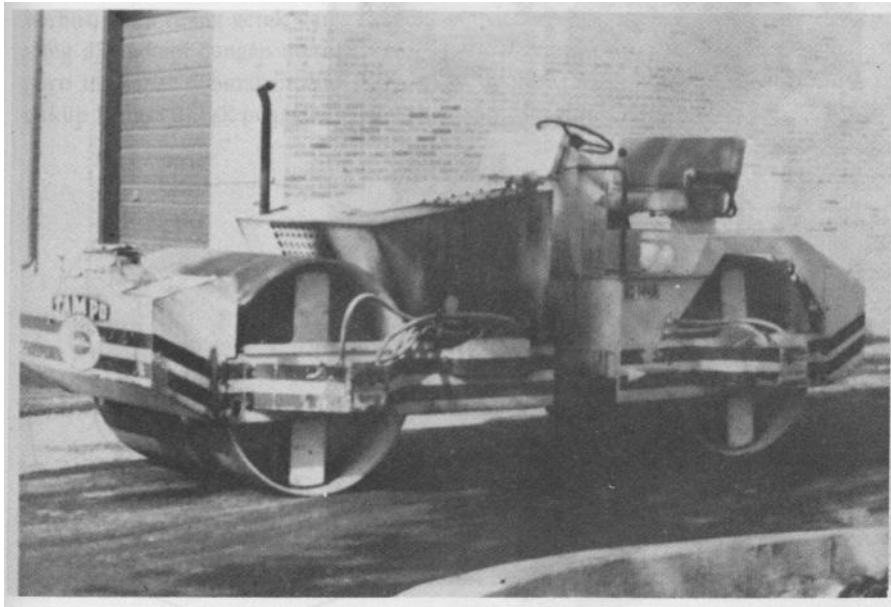
Hampir semua pemadatan di lapangan dilakukan dengan penggilas (rollers). Jenis penggilas paling umum dipakai adalah :

- a. Penggilas kaki kambing
- b. Penggilas besi berpermukaan halus (atau penggilas bentuk drum)
- c. Penggilas ban karet (angin)
- d. Penggilas getar



Gambar 7 : Penggilas kaki kambing

Penggilas kaki kambing (Gambar 7) adalah berupa silinder (drum) yang mempunyai banyak kaki-kaki yang menjulur keluar dari drum. Kaki-kaki ini mempunyai luas proyeksi penampang sekitar 25 sampai 85 cm². Alat ini sangat efektif untuk memadatkan tanah lempung. Tekanan kontak di ujung kaki-kaki kambing dapat mencapai antara 200 sampai 1000 psi (1380 sampai 6900 kN/m²).



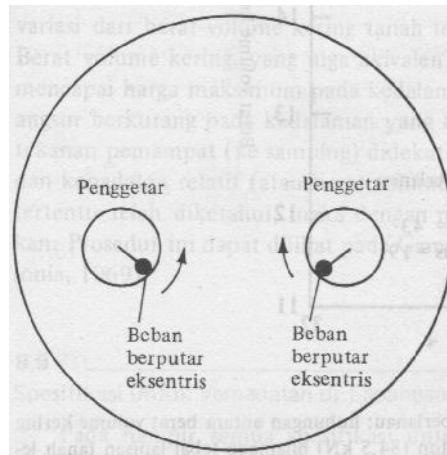
Gambar 8 : Penggilas besi berpermukaan halus

Penggilas besi berpermukaan halus (Gambar 8) cocok untuk meratakan permukaan tanah dasar (subgrades) dan untuk pekerjaan penggilasan akhir pada timbunan tanah pasir atau lempung. Penggilas tipe ini dapat memadatkan 100% luas permukaan tanah yang dilalui rodanya dengan tekanan kontak antara tanah dan roda sebesar antara 45 sampai 55 psi (antara 310 sampai 380 kN/m²). Penggilas tipe ini tidak cocok untuk untuk pekerjaan yang menginginkan tingkat pemadatan yang tinggi pada lapisan yang tebal.



Gambar 9 : Penggilas ban karet

Penggilas ban karet (Gambar 9) dalam banyak hal masih lebih baik daripada penggilas besi berpermukaan halus. Penggilas ini pada dasarnya merupakan sebuah kereta bermuatan berat dan beroda karet yang tersusun dalam beberapa baris. Tekanan kontak dibawah ban berkisar antara 85 sampai 100 psi (585 sampai 690 kN/m²), dan baris-baris ban tersebut memadatkan antara 70 sampai 80% luasan tanah yang dilalui penggilas. Penggilas ban karet ini dapat digunakan pada pemadatan tanah-tanah pasir dan lempung. Pemadatan dicapai dari kombinasi antara tekanan dan pemadatan dengan meremas-remas (kneading action).



Gambar 10 : Prinsip penggilas getar

Penggilas getar sangat bermanfaat untuk pemadatan tanah berbutir (pasir, kerikil dsb). Alat getar dapat saja dipasang pada penggilas besi berpermukaan halus, penggilas ban karet atau pada penggilas kaki kambing untuk menghasilkan getaran pada tanah. Pada Gambar 10 ditunjukkan prinsip dari penggilas getar. Getaran dihasilkan dari berputarnya suatu beban yang tidak sentries.

Beberapa factor yang mempengaruhi tingkat kepadatan dilapangan adalah : jenis tanah, kadar air, tebal lapisan tanah yang dipadatkan, intensitas tekanan yang dihasilkan oleh alat pemadat, dan besar luasan muka tanah dimana tekanan tersebut bekerja.

5.7. Spesifikasi untuk Pemadatan di Lapangan

Pada hampir semua spesifikasi untuk pekerjaan tanah, kontraktor diharuskan untuk mencapai suatu kepadatan lapangan yang berupa berat volume kering (γ_d) sebesar 90 sampai 95% berat volume kering maksimum tanah tersebut ($\gamma_{d\max}$).

Berat volume kering maksimum itu didapatkan dari hasil percobaan dengan uji Proktor standar atau Proktor dimodifikasi di laboratorium.

Spesifikasi dari pemadatan relatif R (relative compaction) dapat ditulis sbb :

$$R(\%) = \frac{\gamma_{d(lap)}}{\gamma_{(max)lab}} \times 100$$

Pada pemadatan tanah berbutir spesifikasi pemadatan kadang-kadang diberikan dalam bentuk istilah kerapatan relatif D_r (relative density) atau kepadatan relatif.

5.8. Penentuan Berat Volume Akibat Pemadatan di Lapangan

Pada waktu pekerjaan pemadatan sedang berlangsung, tentunya perlu diketahui apakah berat volume yang ditentukan dalam spesifikasi dapat dicapai atau tidak. Macam-macam metode untuk menentukan berat volume di lapangan akibat pemadatan adalah :

- a. Metode Kerucut Pasir (Sand Cone Method)
- b. Metode balon karet (rubber ballon method)
- c. Menggunakan alat ukur kepadatan nuklir

a. Percobaan Kerucut Pasir (Sand Cone Test) (ASTM D 1556-64, AASHTO T 191-61)

Kerucut pasir (sand cone) terdiri atas sebuah botol plastik atau kaca dengan sebuah kerucut logam dipasang di atasnya (Gambar 11). Botol plastik dan kerucut ini diisi dengan pasir Ottawa kering bergradasi buruk. Berat dari tabung, kerucut logam, dan pasir yang mengisi botol adalah tertentu = W_1 . Di lapangan sebuah lubang kecil digali pada permukaan tanah yang sudah dipadatkan. Apabila berat tanah basah yang digali dari lubang tersebut dapat ditentukan = W_2 dan kadar air tanah galian itu dapat dicari, maka berat tanah kering = W_3 dapat dicari sbb :

Setelah lubang tersebut digali dan tanah hasil galian ditimbang seluruhnya, kerucut dengan botol berisi pasir diletakkan di atas lubang itu. Pasirnya dibiarkan

mengalir keluar dari botol mengisi seluruh lubang dan kerucut. Sesudah itu berat dari tabung, kerucut, dan sisa pasir dalam botol ditimbang = W_4 . Jadi

$$W_5 = W_1 - W_4$$

Dimana W_5 = berat dari pasir yang mengisi lubang dan kerucut volume dari lubang yang digali dapat ditentukan sbb :

dimana : W_c = berat pasir yang mengisi kerucut saja

$\gamma_{d(\text{pasir})}$ = berat volume kering dari pasir Ottawa yang dipakai

Harga-harga W_c dan $\gamma_{d(\text{pasir})}$ ditentukan dengan kalibrasi yang dilakukan di laboratorium.

Jadi berat volume kering hasil pemadatan lapangan sekarang dapat ditentukan sbb :

$$\gamma_d = \frac{\text{berat kering dari tanah yang digali}}{\text{volume lubang}} = \frac{W_3}{V}$$

Kegunaan : Untuk mendapatkan nilai kepadatan tanah di lapangan

Prosedur pelaksanaan :

-a. Tentukan volume corong logam sbb

- Timbang berat corong logam dan semua perlengkapannya (W_1)
- Letakkan corong dengan lobang di atas dan buka kerannya
- Isi dengan air sampai keluar dari keran
- Tutup kerannya dan buang air yang kelebihan
- Timbang corong logam dan perlengkapannya yang sudah terisi air (W_2)
- Berat air = volume botol ($W_2 - W_1$)

b. Tentukan berat isi pasir sbb

- Letakkan corong logam dengan logam diatas
- Tutup keran dan isi corong dengan pasir
- Buka keran dan jaga supaya corong selalu terisi pasir minimal setengahnya dan isi sampai corong logam terisi penuh
- Tutup keran dan buang kelebihan pasir
- Timbang alat dan pasir (W_3)
- Berat pasir $W_3 - W_1$

- Berat isi pasir $\frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1}$
- Tentukan jumlah pasir yang dibutuhkan untuk mengisi corong dengan penuh sbb :

Tempatkan alat pada tempat yang datar

- Timbang botol dan pasir (W_4)
- Isi alat dengan pasir sampai penuh sampai pasir berhenti mengalir
- Tutup keran dan timbang botol dan sisa pasir (W_5)
- Pasir yang dibutuhkan untuk mengisi corong dengan penuh : ($W_4 - W_5$)
- Siapkan permukaan tanah yang akan diuji dengan membuat rata permukaan tanah setempat
- Tempatkan alat di atas permukaan yang sudah rata dan beri tanda pada lubang pelat.
- Angkat alat tersebut dan buat lubang pada tanda dengan hati-hati
- Tempatkan lagi alat pada tempat semula dan buka keran dan biarkan pasir mengalir sampai berhenti, kemudian tutup kerannya
- Timbang berat tanah hasil galian (W_7)
- Timbang berat alat dan pasir (W_6)
- Ambil bekas tanah galian secukupnya dan periksa kadar airnya (w)

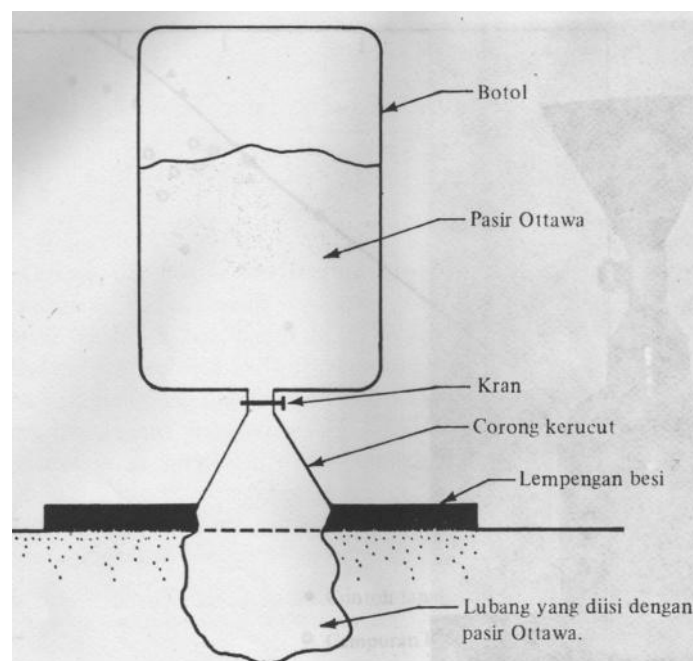
Perhitungan :

$$\gamma = \frac{W_7}{W_4 - W_6 - W_5}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{100 + w} \times 100\%$$



Gambar 11 : Botol gelas yang dihubungkan dengan kerucut pasir (sand cone)



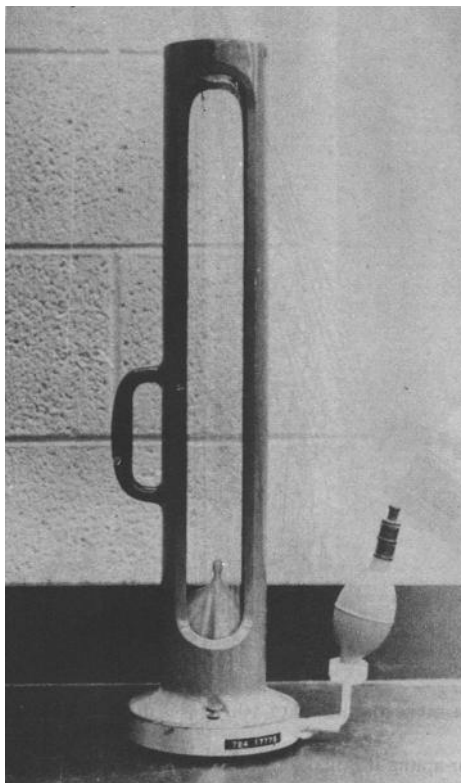
Gambar 12 : Menentukan berat volume tanah di lapangan Dengan uji kerucut pasir (sand cone)

b. Kepadatan lapangan dengan rubber ballon

(ASTM D – 2167, AASHTO T – 205 – 64)

Prosedur pelaksana metode balon karet sama dengan metode kerucut pasir, yaitu sebuah lubang uji digali dan tanah asli diambil dari lubang tersebut dan ditimbang beratnya. Tetapi volume lubang ditentukan dengan memasang balon karet berisi air pada lubang tersebut. Air ini berasal dari suatu bejana yang sudah terkalibrasi, sehingga volume air yang mengisi lubang sama dengan volume lubang dapat langsung dibaca. Berat volume kering dari tanah yang dipadatkan dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\gamma_d = \frac{\text{berat kering dari tanah yang digali}}{\text{volume lubang}} = \frac{W_3}{V}$$



Gambar 13 : Bejana air yang sudah terkalibrasi dengan balon karet

c. Penggunaan Alat Ukur Kepadatan Nuklir

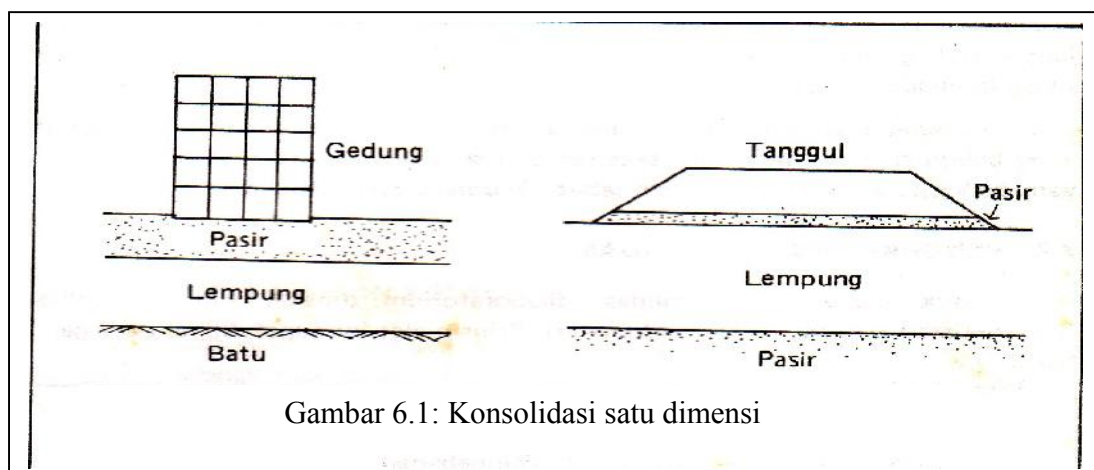
Alat ukur kepadatan nuklir sekarang telah digunakan pada beberapa proyek besar untuk menentukan berat volume kering dari tanah yang dipadatkan. Alat ini dapat dioperasikan di dalam sebuah lubang galian atau pada permukaan tanah. Alat ini dapat mengukur berat tanah basah persatuan volume dan juga berat air yang ada pada suatu satuan volume tanah. Berat volume kering dari tanah dapat ditentukan dengan cara mengurangi berat tanah basah dengan berat air per satuan volume tanah.. Gambar 14 memperlihatkan foto sebuah alat ukur kepadatan nuklir



Gambar 14 : Alat ukur kepadatan nuklir

VI. KONSOLIDASI DAN PENURUNAN. (*Consolidation and settlement*).

Apabila suatu lapisan tanah mendapat tambahan beban di atasnya, maka air pori akan mengalir dari lapisan tersebut dan isinya (volume) akan menjadi lebih kecil, yaitu akan terjadi konsolidasi. Pada umumnya konsolidasi ini akan berlangsung dalam suatu jurusan saja, yaitu jurusan vertical, karena lapisan yang kena tambahan beban itu tidak dapat bergerak dalam jurusan horizontal (ditahan oleh tanah sekelilingnya). Keadaan-keadaan demikian dapat dilihat pada gambar K.1



Dalam keadaan seperti ini pengaliran air juga akan berjalan terutama dalam jurusan vertical saja. Ini disebut “one-dimensional consolidation” (konsolidasi satu jurusan) dan perhitungan konsolidasi hampir selalu berdasar teori. “one-dimensional consolidation” itu.

Pada waktu konsolidasi berlangsung, gedung atau bangunan diatas lapisan tersebut akan menurun (settle). Dalam bidang teknik sipil ada dua hal yang perlu diketahui mengenai penurunan itu, yaitu :

a) ***Besarnya penurunan yang akan terjadi***

b) ***Kecepatan penurunan ini***

Apabila tanah terdiri dari lempung maka penurunan akan agak besar sedangkan kalau tanah terdiri dari pasir penurunan akan lebih kecil.

Karena itu lempung dikatakan mempunyai “high compressibility” dan pasir mempunyai “low compressibility”. Penurunan pada lempung biasanya makan waktu yang lama, karena daya rembesan air sangat rendah. Sebaliknya penurunan pada pasir berjalan dengan cepat sehingga pada waktu pembangunan di atas pasir sudah selesai maka penurunan juga dapat dianggap sudah selesai. Oleh hal-hal ini maka biasanya hanya penurunan pada lapisan lempung yang diperhatikan, dan teori konsolidasi yang diterangkan disini hanya dimaksudkan untuk tanah lempung.

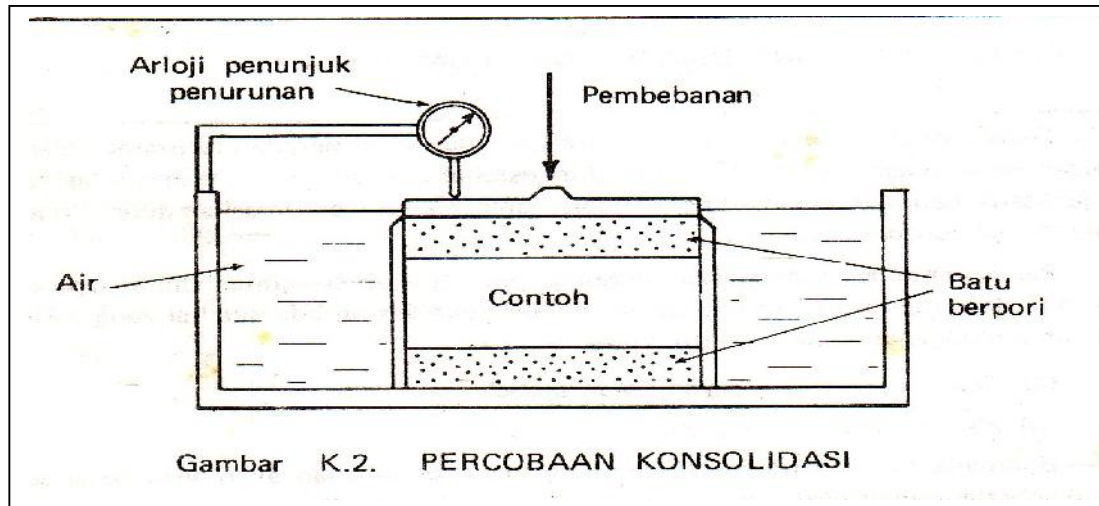
6.1. ISTILAH “NORMALLY CONSOLIDATED” DAN “OVER CONSOLIDATED”

Kedua istilah ini dipakai untuk menggambarkan suatu sifat yang penting dari lapisan lempung endapan (sedimentary clays). Lapisan semacam ini setelah pengendapannya akan mengalami konsolidasi dan penurunan akibat tekanan dari lapisan-lapisan yang kemudian mengendap di atasnya. Lapisan-lapisan yang di atas ini lama kelamaan mungkin menjadi hilang lagi karena sebab sebab geologi, misal erosi air (atau es). Ini berarti lapisan lapisan bawah pada suatu saat dalam sejarah geologinya pernah mengalami konsolidasi akibat tekanan yang lebih tinggi dari pada tekanan yang berlaku di atasnya pada masa sekarang.

Lapisan lapisan semacam ini disebut “***overconsolidated***”. Sedangkan lapisan yang belum pernah mengalami tekanan di atasnya lebih tinggi dari pada tekanan yang berlaku pada masa sekarang disebut “***normally consolidated***”

6.2. PENGUKURAN KONSOLIDASI

Untuk mengukur konsolidasi di laboratorium dipakai alat konsolidasi (consolidated apparatus oedometer). Prinsip alat ini dapat dilihat pada gambar K.2



Contoh tanah untuk percobaan ini dimasukkan ke dalam suatu cincin dengan batu berpori (porous stones) yang dipasang di bawah dan di atasnya.

Kemudian cincin dengan batu berpori ini ditaruh dalam sel konsolidasi (consolidation cell) yang berisi air supaya tanah tidak menjadi kering. Setelah dipasang dalam alat contoh diberi beban vertical yang tertentu dan penurunan diukur dengan arloji penunjuk (dialgauge). Tekanan tersebut dibiarkan berlaku sampai penurunan selesai. Sesudah itu contoh diberi tambahan beban, selanjutnya juga dibiarkan berlaku sampai penurunan berhenti dan seterusnya. Biasanya beban ditambah setiap 24 jam dengan memakai harga tegangan yang berikut.

0,25 ; 0,5 ; 1,0 ; 2,0 ; 4,0 ; 8,0 ; kg/cm^2

Setelah mencapai 8 kg/cm^2 beban dikurangi lagi sampai 0,25 kg/cm^2 untuk mendapat "**rebound curve**" pada setiap pembebanan pembacaan penurunan dilakukan pada jangka-jangka waktu tertentu. Dengan demikian baik besarnya penurunan maupun kecepatannya dapat diketahui.

6.3. BESARNYA PENURUNAN

Besarnya penurunan yang terjadi pada setiap tegangan diambil dari pembacaan-pembacaan arloji penunjuk yang terakhir untuk tegangan tersebut. Angka-angka penurunan ini dipakai untuk membuat grafik penurunan terhadap tegangan sebagai abses (dengan skala logaritmes) dan angka pori sebagai ordinat (dengan skala biasa) Tetapi pembacaan-pembacaan penurunan dapat dipakai langsung sebagai ordinat dan metode ini masih sering dipakai di Indonesia.

6.4. HASIL PERCOBAAN KONSOLIDASI

a). pada contoh tidak asli , yang dicampur air sehingga menjadi cair (Slurry sample). Bayangkanlah suatu contoh semacam ini yang ditambah beban di atasnya sedikit, demi sedikit dengan memperbolehkan konsolidasi berjalan sampai selesai pada setiap penambahan beban. Tebalnya contoh ini akan menurun akibat konsolidasi itu, dan besarnya penurunan ini dapat ditentukan pada setiap saat dari pembacaan arloji penunjuk.

Dari pembacaan-pembacaan ini angka pori juga dapat dihitung asal kadar air contoh semula diketahui. Dengan demikian dapat dibuat grafik penurunan (dan angka pori – terhadap tegangan seperti terlihat pada gambar K.3.

Jika tegangan ditambah sampai mencapai P_0 maka kita akan mendapatkan garis AB . Garis AB ini biasanya hampir lurus disebut “virgin consolidation curve” (garis konsolidasi asli). Pada waktu lapisan-lapisan lempung mengendap di lapangan, suatu proses yang sama akan berjalan. Dan apabila tegangan dan penurunan ditentukan maka akan diperoleh grafik seperti garis AB. Juga.

Apabila tegangan sekarang dikurangi lagi menjadi P_1 maka tebalnya contoh akan menjadi lebih besar sedikit , menurut garis BC. Demikian juga di lapangan, kalau setelah proses pengendapan berhenti , dan tegangan di atas menjadi lebih kecil lagi, tanah akan mengikut garis BC itu. Jikalau sekarang tegangan di tambah kembali sampai menjadi besar P , maka kita akan mendapatkan garis

CDE. Garis DE merupakan garis terusan dari AB, yaitu ABE adalah garis konsolidasi asli. Persamaan (equations) yang biasanya dipakai untuk garis AE ini adalah sebagai berikut :

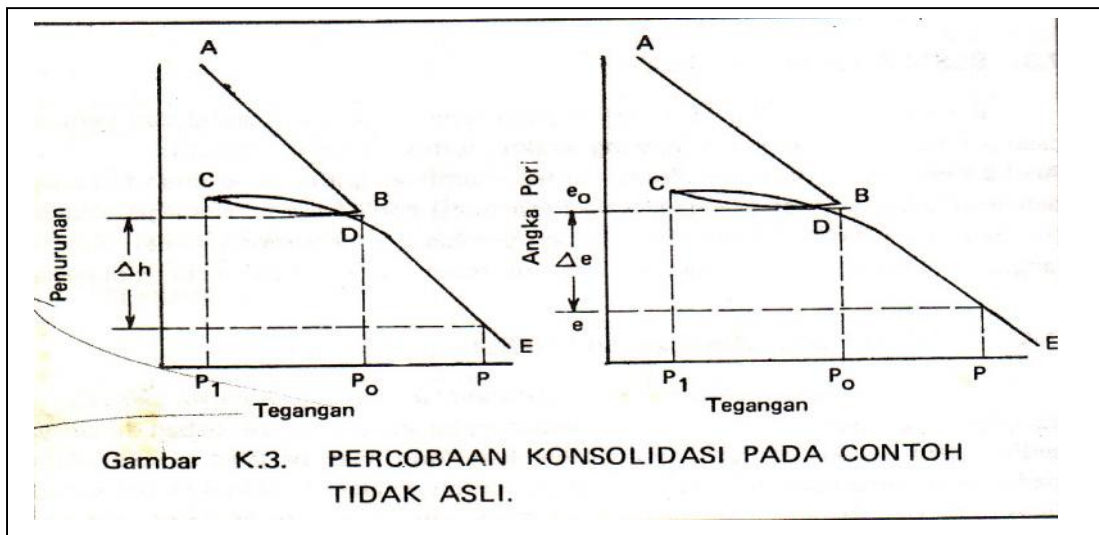
- a) Untuk grafik yang dibuat dengan mempergunakan penurunan sebagai ordinat

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{1}{c} \log e \frac{P}{P_o}$$

Dimana Δh = penurunan akibat tambahan tegangan dari P_o menjadi P

h = tebalnya contoh

c = konstanta



$$C_c = \frac{e_o - e}{\log 10 \frac{p}{p_o}}$$

$$\text{Yaitu } e_o - e = c_c \log \frac{p}{10 p_o}$$

Dimana e_o = angka pori pada tegangan P_o

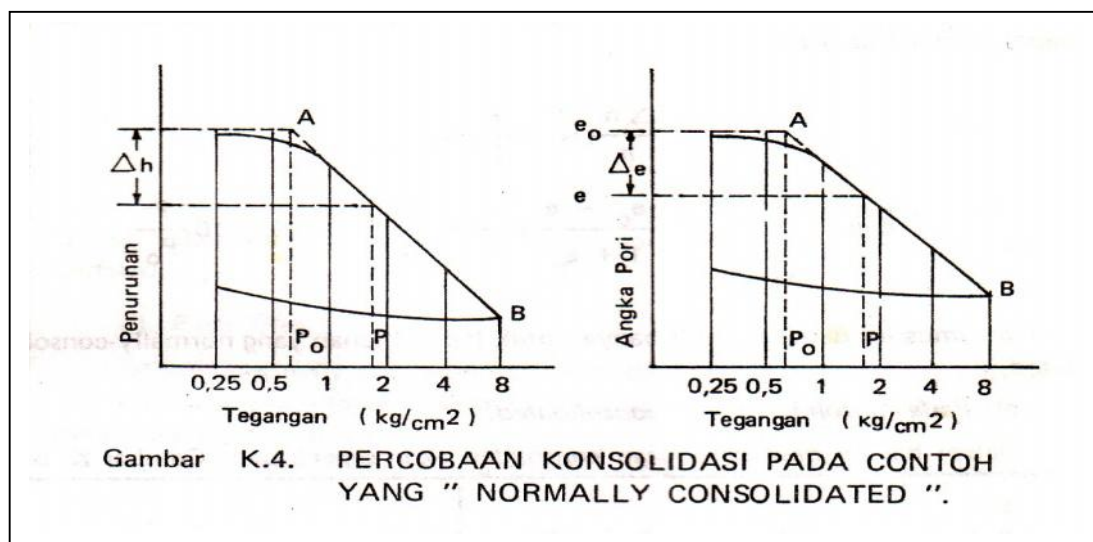
e = angka pori pada tegangan P

c_c = compression index

b). pada contoh yang normally consolidated.

Bilamana dilakukan percobaan konsolidasi pada contoh semacam ini, maka akan diperoleh hasil seperti terlihat pada gambar K.4

Tegangan P_o adalah tegangan efektif yang berlaku di atas tanah ini di lapangan dan angka pori e_o adalah angka pori aslinya. Dengan demikian titik A menunjukkan



Keadaan tanah setempat. Sebelum tegangan mencapai harga P_o penurunan di laboratorium kecil, tetapi kalau tegangan sudah menjadi P_o maka penurunan akan menjadi besar. Jikalau contoh yang dipakai benar-benar contoh asli (undisturbed), maka setelah tegangan P_o dilampaui, penurunan akan berlangsung menurut garis konsolidasi asli (virgin consolidation curve), yaitu garis AB.

Dengan grafik seperti ini kita dapat menghitung besarnya penurunan yang akan terjadi di lapangan . Misalnya , kalau tegangan setempat naik dari P_o menjadi P besarnya penurunan (atau perubahan angka pori) dapat dibaca langsung dari grafik . Yaitu penurunan persatuan tebal akan sebesar

$$\frac{\Delta h}{h} \text{ atau } \frac{e_o - e}{1 + e_o}$$

Dimana Δh = penurunan akibat tambahan tenaga dari P_o menjadi P

h = tebalnya contoh di laboratorium

e_o = angka pori pada tegangan P_o yaitu angka pori aslinya

e = angka pori pada tegangan P

Dengan demikian penurunan (s) pada lapisan setebal H adalah sebesar

$$S = \frac{\Delta h}{h} H$$

$$S = \frac{e_o - e}{1 + e_o} H = \frac{\Delta e}{1 + e_o} H$$

Dimana $\Delta e = e - e_o$

Karena penurunan dalam hal ini ialah garis konsolidasi asli maka kedua rumus ini dapat dirubah menjadi :

$$s = \frac{\Delta h}{h} H = \frac{H}{C} \log e \frac{P}{P_o}$$

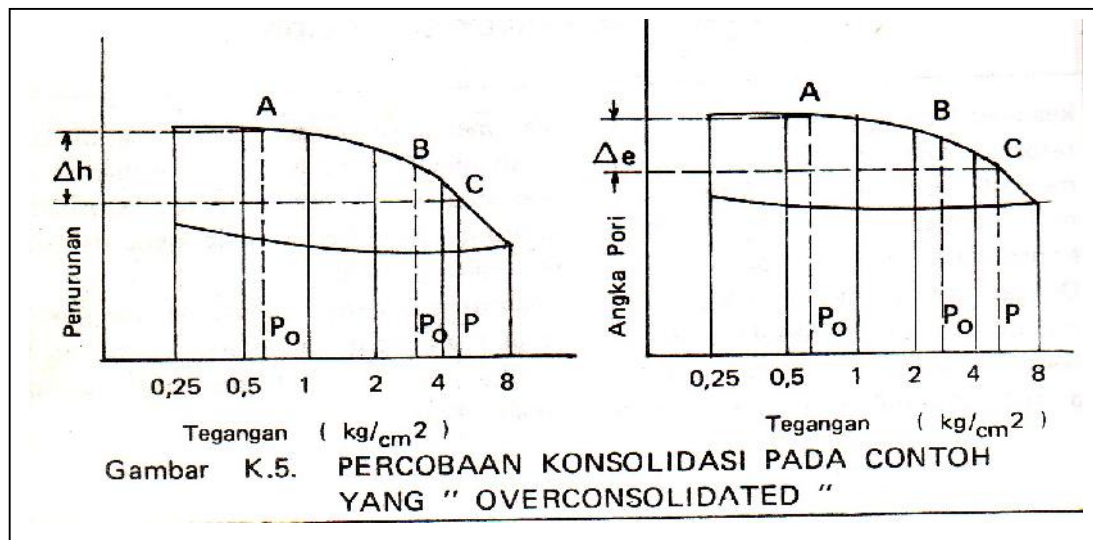
dan

$$s = \frac{e_o - e}{1 + e_o} H = \frac{H}{1 + e_o} C_c \log_{10} \frac{P}{P_o}$$

Kedua rumus ini dapat dipakai hanya untuk lapisan tanah yang *normally-consolidated*.

c. Pada contoh yang over-consolidated

Dalam hal ini hasil percobaan konsolidasi akan seperti pada gambar K. 5



Tegangan P_0 adalah tegangan efektif yang berlaku sekarang di atas contoh ini di lapangan. Pada suatu ketika pada masa lampau tanah ini pernah mengalami tekanan sebesar P_0 . Tekanan P_0 disebut “overconsolidation” atau “preconsolidation” pressure. Tempat lengkungan maksimum dari grafik ini terdapat kira-kira pada tekanan P_0 . Jika tegangan di lapangan naik dari P_0 menjadi P maka penurunan akan terjadi menurut garis ABC. Besarnya penurunan pada lapisan setebal H akan sebesar

$$\frac{\Delta h}{h} H = \frac{e_0 - 0}{1 + e_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H$$

Dalam hal ini besarnya $\frac{\Delta h}{h}$ tidak lagi dapat disamakan dengan $\frac{i}{c} \log \frac{P}{P_0}$ karena

rumus $\frac{\Delta h}{h} = \log e \frac{P}{P_0}$ hanya berlaku untuk garis konsolidasi asli, yaitu tidak berlaku

dari titik A sampai titik C. Cara yang paling mudah untuk menghitung penurunan dalam hal ini ialah dengan mengambil besarnya Δh atau Δe langsung dari grafik antara P_0 dan P , kemudian memasukkan dalam rumus

$$s = \frac{\Delta h}{h} H$$

$$s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H$$

Teranglah dari gambar K.4 dan K.5 bahwa penurunan pada lapisan “over consolidated” akan lebih kecil penurunan pada lapisan yang “normally consolidated”.

d. Pada “Residual Soil”

Istilah “normally consolidated” tidak dapat dipakai secara tepat untuk “residual soil” karena pembentukannya tidak seperti cara pembentukan lapisan endapan (sedimentary soils).

“Residual soil” adalah tanah yang berasal dari lapisan dibawahnya, yaitu pembentukannya berlangsung ditempat asalnya dan tanah tersebut tidak mengalami pemindahan atau pengendapan. Dapat dikatakan bahwa residual soil adalah normally consolidated dengan arti belum pernah mengalami tekanan diatasnya lebih tinggi daripada yang berlaku pada waktu ini. Tetapi cara pembentukannya (yaitu chemical weathering) mengakibatkan residual soils mempunyai sifat seolah-olah over consolidated. Grafik penurunan untuk tanah semacam ini sering menunjukkan bahwa lengkungan maksimum terdapat pada tegangan yang lebih tinggi daripada tegangan diatas tanah setempat.

Karena itu untuk menghitung penurunan pada residual soils sebaiknya dipakai rumus-rumus :

$$s = \frac{\Delta h}{h} H$$

atau

$$s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H$$

6.5. Perhitungan Tegangan :

Untuk dapat menghitung besarnya kita harus mengetahui tegangan semula (P_0) pada lapisan yang bersangkutan dan tegangan sesudah pembangunan selesai (P). Cara menghitung kedua tegangan ini adalah sebagai berikut :

a. P_0 (tegangan efektif semula)

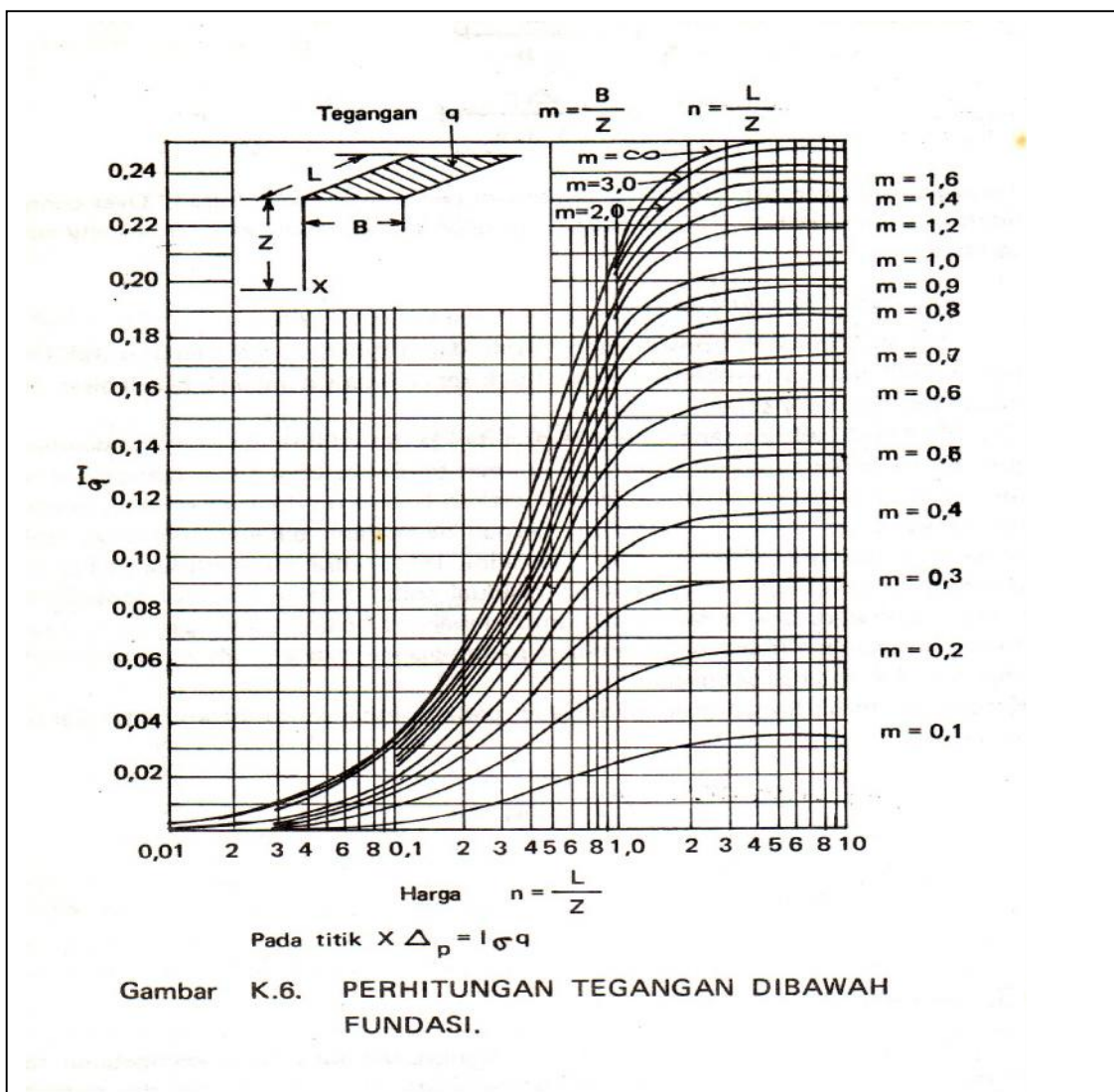
Tegangan ini adalah akibat berat tanah sendiri dan dapat dihitung langsung, asalkan kita mengetahui berat isi tanah dan dalamnya muka air tanah.

b. P (tegangan efektif setelah pembangunan selesai)

$$\text{Tegangan } P = P_0 + \Delta P$$

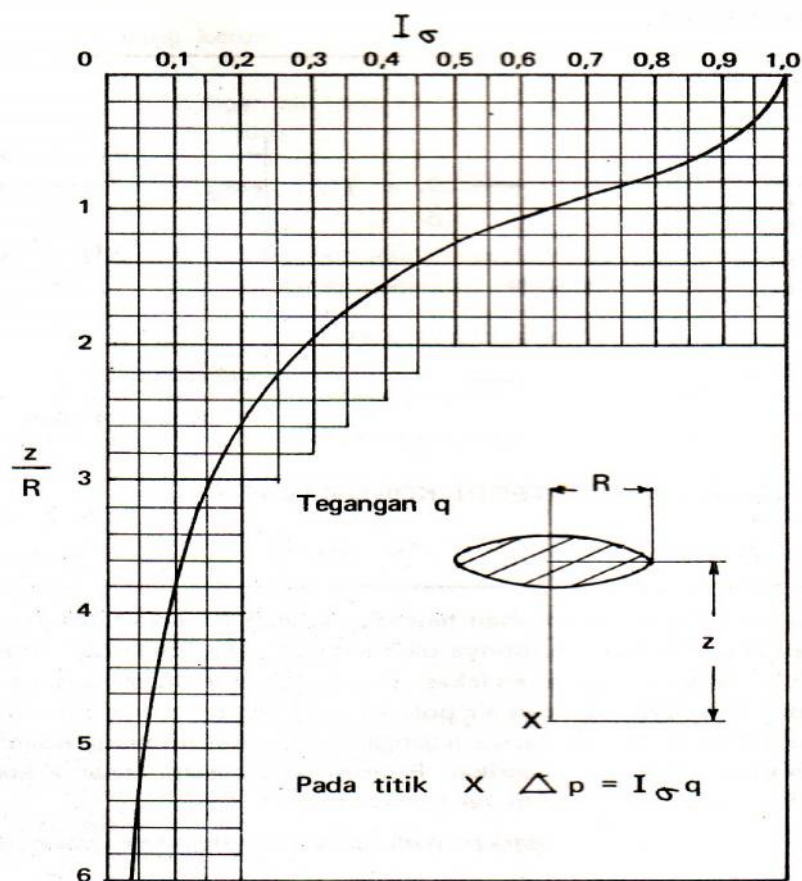
Dimana ΔP adalah tambahan tegangan akibat adanya bangunan.

Besarnya ΔP biasanya dihitung dengan memakai teori elastic



Ada berbagai macam grafik serta tabel-tabel untuk keperluan ini. Pada gambar K6. Dan K.7 terdapat grafik untuk menghitung tekanan dibawah fundasi bulat dan fundasi persegi.

Harga P_0 dan P pada suatu lapisan tidak konstan; harganya tergantung kepada dalamnya. Karena itu untuk menghitung penurunan biasanya perlu membagi lapisan yang bersangkutan dalam beberapa lapisan yang cukup tipis, sehingga harga-harga P_0 P cukup tepat



Gambar K.7. PERHITUNGAN TEGANGAN DIBAWAH FUNDASI BULAT.

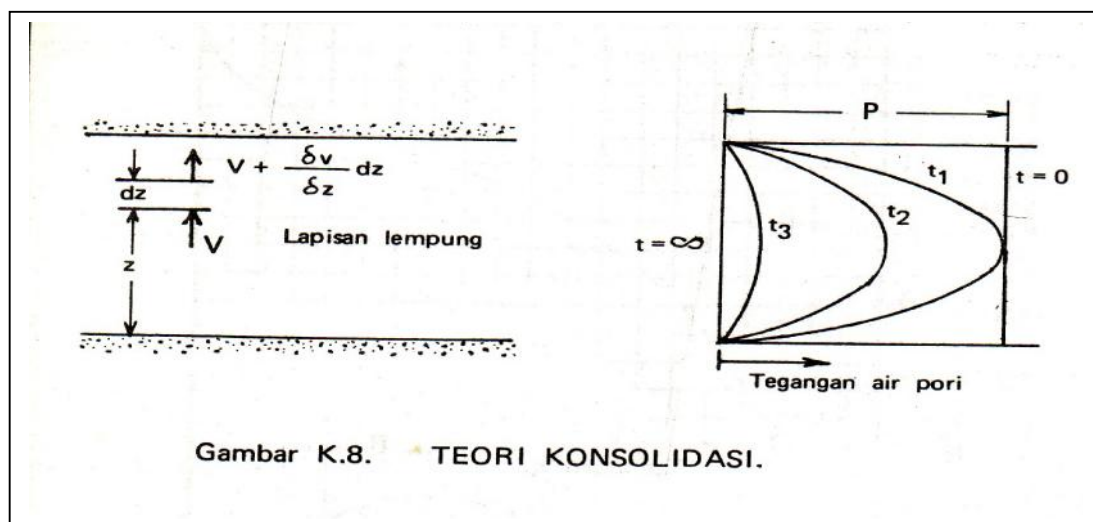
6.6. Kecepatan Penurunan

Sampai disini hanyalah besarnya penurunan yang dibicarakan. Selain besarnya penurunan kita juga ingin mengetahui kecepatannya, yaitu apakah akan lekas selesai atau akan terus berjalan bertahun-tahun lamanya :

Kecepatan penurunan tergantung kepada dua faktor, yaitu ;

1. Daya rembesan air tanah (permeability). Ini yang menentukan kecepatan air mengalir dari tanah.
2. Compressibility tanah. Ini yang menentukan banyaknya air yang harus mengalir.

Bayangkanlah suatu lapisan lempung diantara lapisan pasir, seperti terlihat pada gambar K.8.



Apabila lapisan ini diberi tambahan tegangan sebesar P maka tegangan ini pada saat diberikan akan dipikul seluruhnya oleh air pori, yaitu tegangan air pori akan naik menjadi P . Pengaliran air akan lekas mulai berjalan sehingga tegangan air pori akan menurun. Besarnya tegangan air pori pada waktu t_1 , t_2 , t_3 akan terlihat seperti dalam gambar K.8. Akhirnya tegangan air pori akan menjadi sama seperti sebelum tambahan tegangan diberikan. Rumus yang berlaku selama konsolidasi berlangsung adalah rumus Terzaghi yang terkenal itu.

Rumus Terzaghi itu berdasarkan pada beberapa anggapan (assumptions) sebagai berikut :

1. Derajat kejenuhan tanah 100%.
2. Tidak terjadi perubahan isi pada air atau butir tanah.
3. Konsolidasi, yaitu pengaliran air serta perubahan isi berlangsung pada satu jurusan saja, yaitu jurusan vertikal.
4. Rumus Darcy berlaku.
5. Tegangan total dan tegangan air pori dibagi rata pada setiap bidang horizontal.

Umpamakanlah suatu elemen yang sedang mengalami konsolidasi, pada jarak Z dari batas lapisan tersebut, seperti terlihat pada gambar K.8. Elemen ini mempunyai satuan luas dan tebal dz .

Dengan demikian isi elemen = dz

Air sedang mengalir melalui elemen ini seperti terlihat pada gambar. Karena sedang berlangsung konsolidasi (yaitu perubahan isi) maka kecepatan air yang keluar dari elemen tidak sama dengan kecepatan air yang masuk.

Kecepatan air yang masuk = V

$$\text{Kecepatan air yang keluar} = V + \frac{\delta_v}{\delta_z} dz$$

Jadi kecepatan kehilangan air (rate of loss of water) dari elemen adalah selisih antara kedua angka ini, yaitu :

$$\left(V + \frac{\delta_v}{\delta_z} dz \right) - (V) = \frac{\delta_v}{\delta_z} dz$$

Banyaknya air yang hilang dari elemen adalah sama dengan perubahan isi elemen dan kecepatan kehilangan air adalah sama dengan kecepatan perubahan isi.

$$\text{Jadi kecepatan perubahan isi (rate of volume discharge)} = \frac{\delta_v}{\delta_z} dz .$$

Bilamana tegangan air pori pada elemen diambil sebesar u (sama dengan ketinggian air sebesar $\frac{u}{\gamma_w}$), maka gradien hidraulik.

$$i = \frac{\delta}{\delta_z} \left(\frac{u}{\gamma_w} \right) = \frac{1 \delta_u}{\gamma_w \delta_z}$$

Kecepatan air dapat dihitung dengan rumus Darcy yaitu $V = ki$ dimana

V = kecepatan

k = permeability (daya rembesan air)

i = gradien hidrolik

$$\text{Jadi } V = \frac{k \delta_u}{\gamma_w \delta_z}$$

$$\begin{aligned} \text{Dan kecepatan perubahan isi} &= \frac{\delta}{\delta_z} \frac{(k \delta_u)}{\gamma_w \delta_z} dz \\ &= \frac{k}{\gamma_w} \frac{\delta_u^2}{\delta_z^2} dz \end{aligned}$$

Perubahan isi ini disebabkan karena perubahan tegangan efektif pada elemen tersebut. Hubungan antara perubahan isi tanah dengan perubahan efektif adalah menurut persamaan

$$\text{Dimana } \frac{\Delta V}{V} = -m_v P'$$

ΔV = perubahan isi

V = isi

P' = perubahan tegangan efektif

Dalam hal ini perubahan isi = $-m_v P' \times dz$

$$\text{Sehingga kecepatan perubahan isi} = \frac{\delta}{\delta_t} (m_v P' \times dz)$$

$$= -m_v \frac{\delta_{P'}}{\delta_t} dz \quad (t = \text{waktu})$$

Tetapi $P' = P - u$

Dimana P = tegangan total

u = tegangan air pori

dalam hal ini P adalah konstan sehingga

$$\frac{\delta_{p'}}{\delta_t} = -\frac{\delta_u}{\delta_t}$$

$$\text{dan kecepatan perubahan isi} = -m_v \frac{\delta_{p'}}{\delta_y} dz$$

$$= m_v \frac{\delta_u}{\delta_t} dz$$

$$\text{Yaitu } m_v \frac{\delta_u}{\delta_t} dz = \frac{k \delta_u^2}{\gamma_w \delta_z^2} dz$$

$$\text{Jadi } \frac{\delta_u}{\delta_t} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \frac{\delta_u^2}{\delta_z^2} \left(\frac{k}{m_v \gamma_w} = C_v \right)$$

$$\text{Yaitu } \frac{\delta_u}{\delta_t} = C_v \frac{\delta_u^2}{\delta_z^2}$$

Inilah rumus Terzaghi yang sudah lama merupakan dasar untuk perhitungan kecepatan penurunan.

C_v disebut “**coefficient of consolidation**” biasanya dalam cm²/sec. Selama konsolidasi berlangsung maka harga m_v dan k menjadi lebih kecil dengan akibat bahwa besarnya C_v tidak banyak mengalami perubahan.

Dari hasil persamaan Terzaghi ini kita dapat mengetahui besarnya u pada setiap titik pada setiap waktu dalam lapisan tersebut. Pada umumnya bukan besarnya u (tegangan air pori) yang perlu diketahui untuk perhitungan penurunan pada jangka waktu tertentu, atau yang disebut derajat konsolidasi (degree of consolidation).

$$\text{Derajat konsolidasi } U = \frac{\text{Penurunan pada waktu } \dots t}{\text{Penurunan setelah selesai } (t = \infty)}$$

Harga U juga dapat diperoleh dari rumus Terzaghi, yaitu $U = t(z,t) \cdot f(z,t)$ ini adalah suatu deretan (series) tetapi dapat diperkirakan dengan persamaan yang berikut :

$$U \leq 50\% ; U^2 = \frac{4}{\pi} \frac{C_v t}{H^2} \quad H = \text{jalan air terpanjang (longest drainage path)}$$

$$U \geq 50\% ; U = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 C_v t}{4 H^2}}$$

Biasanya $\frac{C_v t}{H^2}$ disebut time factor dan diberi huruf T, yaitu

$$T = \frac{C_v t}{H^2}$$

Dari persamaan diatas dapat dihitung harga-harga U dan T sebagai berikut:

U (%)	20	40	60	80	90
T	0,031	0,126	0,287	0,565	0,848

Jadi kalau kita ingin menghitung waktu yang diperlukan sampai penurunan 90% selesai maka kita ambil harga T untuk U = 90%

Yaitu $t_{90} = 0,848 = \frac{C_v t_{90}}{H^2}$

Dimana t_{90} = waktu sampai penurunan 90% selesai

H = jalan air terpanjang. (kalau terdapat lapisan pasir diatas dan dibawah lapisan lempung ts, maka H adalah separuhnya tebal lapisan)

$$\text{jadi } t_{90} = \frac{0,848 H^2}{C_v}$$

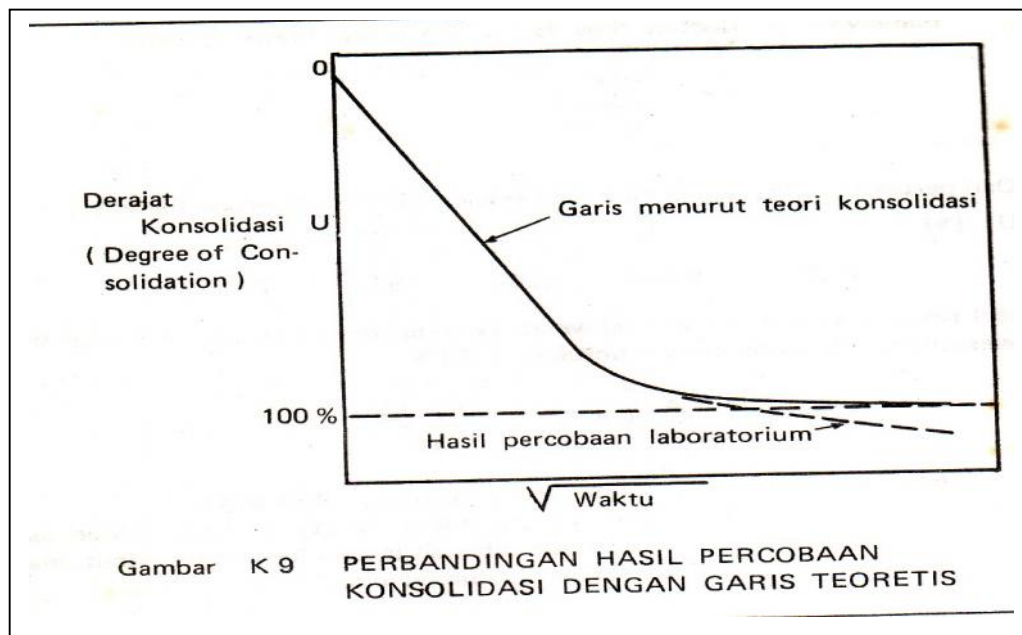
ternyata dari rumus ini bahwa penurunan adalah sebanding dengan pangkat dua tebal lapisan dan berbanding terbalik dengan "coefficient of consolidation".

Perbandingan Hasil Percobaan Laboratorium dengan Teori Konsolidasi

Pada gambar K.9 terlihat grafik derajat konsolidasi terhadap akar dua waktu. Dengan demikian garis teoritis sampai kira-kira U = 70% adalah garis yang lurus. Setelah itu garis teoritis ini menyimpang dari garis lurus tersebut sehingga menyinggung garis U = 100% pada waktu yang tak terhingga. Garis dari hasil percobaan di laboratorium juga terlihat pada gambar K.9.

Garis ini mengikuti garis teoritis sampai suatu waktu tertentu, setelah itu garis laboratorium menyimpang dari garis teoritis seperti pada gambar.

Sebabnya terjadi demikian ialah karena pada percobaan laboratorium (juga di lapangan) penurunan tetap berjalan sesudah tidak ada lagi tegangan air pori. Teori konsolidasi Terzaghi berdasarkan pada anggapan bahwa penurunan adalah semata-mata akibat pengaliran air dari tanah dan kecepatan penurunan ditentukan oleh proses pengaliran air itu. Karena itu penurunan di laboratorium atau di lapangan dapat dianggap terdiri dari dua bagian :



1. *Primary Settlement* : ini adalah penurunan yang berjalan akibat pengaliran air dari tanah. Dengan demikian “primary settlement” adalah akibat perubahan tegangan efektif.
2. *Secondary Settlement* : ini berarti settlement yang masih berjalan setelah primary settlement selesai, yaitu setelah tidak terdapat lagi tegangan air pori.

Dengan demikian “secondary settlement” berlangsung pada tegangan efektif yang konstan. “secondary settlement” umumnya kecil dibandingkan dengan “primary settlement” sehingga besarnya tidak perlu diperhatikan dalam perhitungan penurunan.

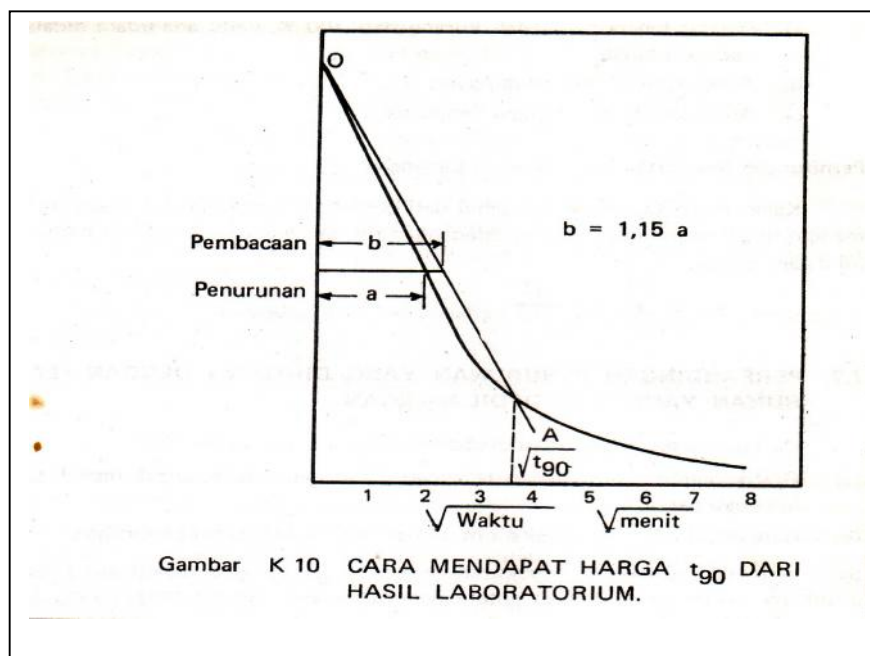
Penentuan Harga C_v Pada Percobaan Konsolidasi

Seperti diterangkan diatas, percobaan konsolidasi dilakukan dengan menambahkan beban pada setiap 24 jam.

Setiap kali beban ditambah, pembacaan penurunan diambil pada jangka-jangka waktu 0,25, 1, 4, 9, 16 menit dan seterusnya, sesudah beban diberikan.

Dengan demikian kita dapat membuat grafik penurunan terhadap akar dua waktu, seperti terlihat pada gambar K.10.

Grafik ini dipakai untuk menghitung harga C_v (coefficient of consolidation). Harga C_v ini harus kita hitung dari bagian grafik laboratorium yang mengikuti garis teoritis. Pada umumnya garis dari percobaan tidak menyimpang dari garis teoritis sebelum tercapai 90% dari “primary consolidation”.



Karena itu, harga t_{90} (yaitu waktu sampai primary consolidation 90% selesai) ini biasanya dipakai untuk menghitung C_v . Cara mendapat t_{90} dapat dilihat pada gambar K.10. Garis OA digambar dengan mengambil jarak $b = 1,15a$. Titik perpotongan OA ini dengan garis laboratorium adalah t_{90} .

$$\text{Dari rumus } t_{90} = \frac{0,848 H^2}{C_v}$$

Menghitung C_v

$$\text{Yaitu } C_v = \frac{0,848 H^2}{t_{90}} \quad (2H = \text{tebal contoh pada waktu } t_{90} \text{ ditentukan}).$$

Dengan jalan demikian kita mendapat satu harga C_v pada setiap pembebanan. Pada umumnya harga-harga C_v ini tidak banyak berbeda-beda. Pada gambar K.10, harga-harga yang dimasukkan sebagai ordinate boleh langsung dipakai pembacaan arloji penunjuk penurunan, yaitu tidak perlu dijadikan penurunan atau derajat penurunan, karena bentuk grafik masih tetap sama.

Ada kalanya garis konsolidasi dari percobaan laboratorium (bilamana dibuat grafik seperti pada gambar K.10) tidak menunjukkan bagian yang lurus. Ini dapat disebabkan oleh beberapa hal seperti :

- a. Derajat kejenuhan tanah kurang dari 100%, yaitu ada udara di dalam pori-pori tanah.
- b. Tanah banyak mengandung air.
- c. Alat yang dipakai kurang sempurna.

Perhitungan Kecepatan Penurunan Dilapangan :

Kalau harga C_v sudah diketahui dari percobaan laboratorium, maka untuk menghitung kecepatan penurunan dilapangan tinggal saja kita masukkan harga

$$C_v \text{ ini dalam rumus } t = \frac{TH^2}{C_v}$$

6.7. Perbandingan Penurunan yang Dihitung dengan Penurunan yang terjadi Dilapangan

Dari percobaan konsolidasi di laboratorium kita mendapat :

- a) Grafik penurunan terhadap tegangan, yang mana dipakai untuk menghitung besarnya penurunan.
- b) Harga C_v yang mana dipakai untuk menghitung kecepatan penurunan.

Sudah seringkali diadakan pengukuran penurunan di lapangan, berbagai negara, untuk mendapat perbandingan antara penurunan yang terjadi dengan yang dihitung terlebih dahulu.

Hasil-hasil pengukuran ini menunjukkan bahwa pada umumnya besarnya penurunan di lapangan kira-kira sesuai atau lebih kecil dari pada angka yang dihitung.

Ketidak sesuaiannya penurunan dapat disebabkan hal-hal berikut :

1. Contoh tanah tidak benar-benar asli.
2. Alat konsolidasi kurang sempurna.
3. Tegangan yang dihitung menurut teori elastis kurang tepat.

Kecepatan penurunan di lapangan ternyata agak lebih cepat daripada yang dihitung ini disebabkan :

1. Harga C_v yang diukur di laboratorium lebih kecil daripada yang berlaku di lapangan. Ini mungkin karena tanah setempat tidak seragam dan mengandung retakan-retakan atau lapisan-lapisan pasir.
2. Pengaliran air di lapangan tidak berjalan pada jurusan vertikal saja. Terutama kalau lapisan lempung mengandung lapisan-lapisan pasir yang tipis atau permeability dalam jurusan horzontal lebih besar daripada permeability dalam jurusan vertikal.

6.8. Contoh Perhitungan Penurunan

Sebagai contoh cara menghitung penurunan kita ambil keadaan seperti terlihat pada gambar K.11, yaitu fundasi plaat di atas lapisan lempung. Di bawah lapisan lempung, pada kedalaman 18 meter, terdapat lapisan pasir. Dalamnya fundasi adalah 1 meter dan muka air tanah terdapat pada kedalaman 3,0 m. Lapisan lempung ini kita anggap seragam dan hasil rata-rata dari percobaan konsolidasi pada tanah tersebut adalah seperti terlihat pada gambar K.12.

Perhitungan penurunan kita lakukan secara bertahap sebagai berikut :

- a) Lapisan ini dibagi menjadi beberapa lapisan yang lebih tipis, dalam hal ini kita ambil tiga lapisan, masing-masing setebal 5 meter, 6 meter dan 6 meter. Pembagian ini perlu untuk memperhitungkan variasi nilai P_0 (tegangan semula) dan P_1 (tegangan akhir) pada lapisan lempung ini, hal ini bukan karena sifat-sifat tanah tidak seragam.
- b) Nilai P_0 dihitung pada pertengahan masing-masing lapisan. Misalnya pada lapisan 1 :

$$P_0 = (350 \times 1,7 - 50 \times 1,0) \times \frac{1}{1000} \text{ kg/cm}^2 = 0,545 \text{ kg/cm}$$

- c) Nilai Δ_p dihitung pada pertengahan masing-masing lapisan dan di bawah titik tengah-tengah fondasi tersebut. Ini dapat dilakukan dengan mempergunakan grafik yang terdapat pada gambar K.6. Dengan grafik ini kita dapat menentukan teg vertikal dibawah sudut suatu fondasi, sehingga untuk mendapatkan tegangan dibawah titik tengah, kita anggap fondasi terdiri dari empat bag yg sama besar. Jadi disini $B = 5 \text{ cm}$ dan $L = 20 \text{ cm}$.

Misalnya pada lapisan 1 :

$$Z = 2,5 \text{ m, sehingga } m = \frac{B}{Z} = 2 \qquad n = \frac{L}{Z} = 8$$

Jadi gambar K.6 kita mendapat $I_\sigma = 0,24$

Nilai Δ_p akibat seperempat luas fondasi = $I_{\sigma q}$

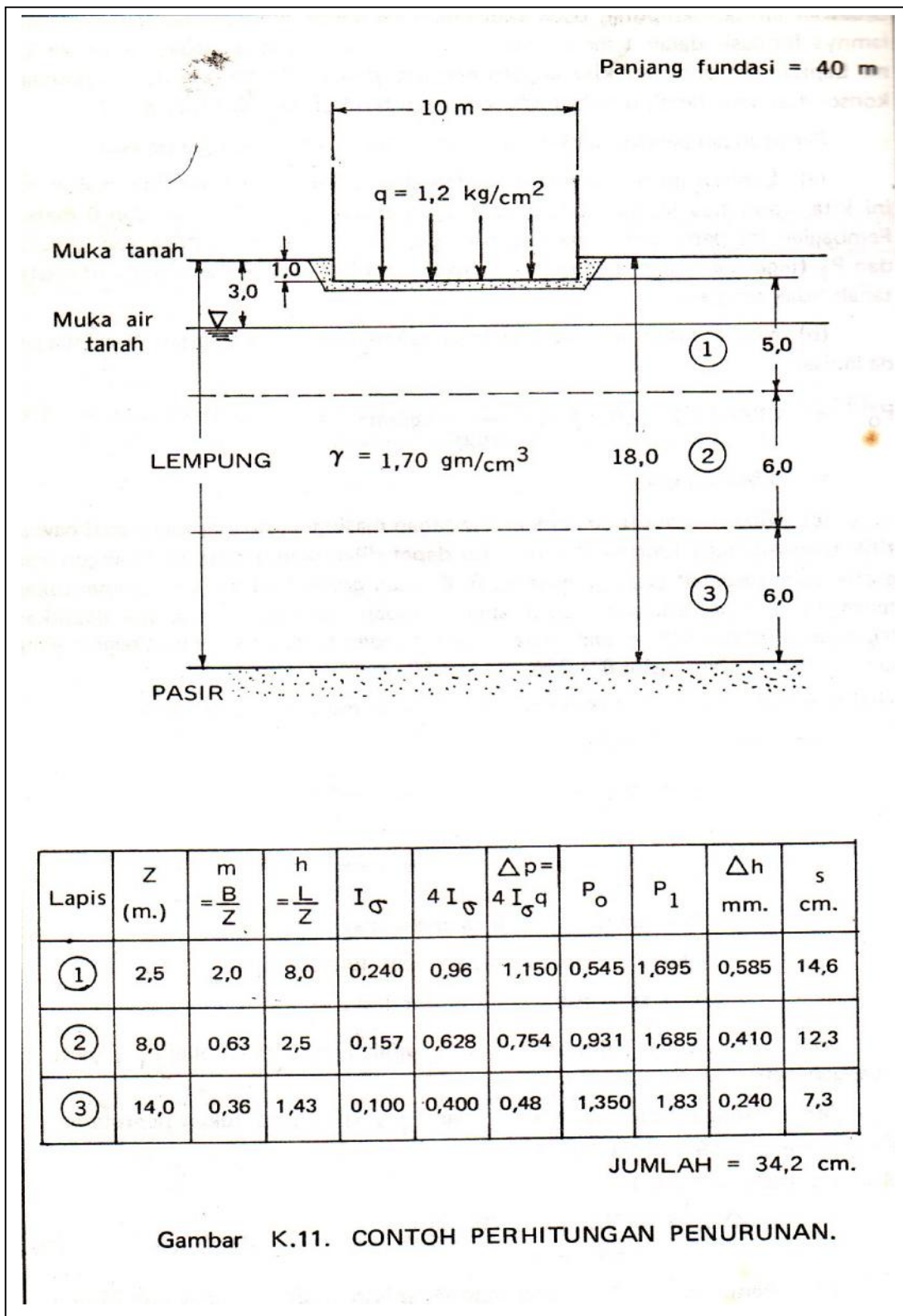
Sehingga untuk seluruh fondasi $\Delta_p = 4 I_{\sigma q}$

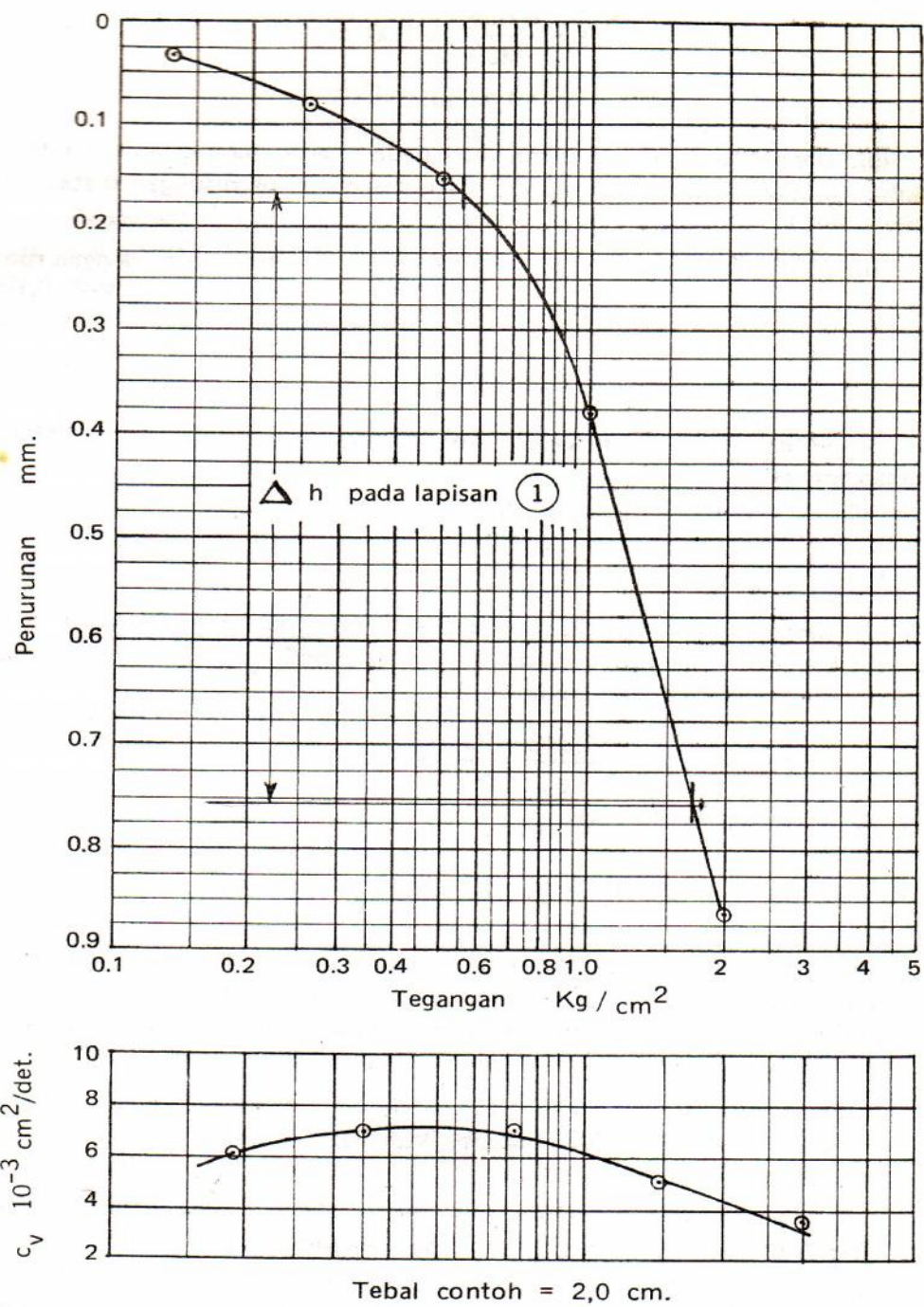
- d) Nilai Δ_p ini ditambah pada P_0 adalah merupakan nilai P_1 , yaitu tegangan setelah bangunan didirikan.
- e) Dengan memakai nilai P_0 dan P_1 , kita menentukan penurunan Δ_h pada masing-masing lapisan.

Misalnya pada lapisan 1 : $\Delta_h = 0,755 - 0,170 \text{ mm} = 0,585 \text{ mm}$

- f) Penurunan pada masing-masing lapisan sekarang dapat kita hitung dengan rumus

$$s = \frac{\Delta h}{h} H$$





Gambar K.12. CONTOH PERHITUNGAN PENURUNAN.

Pada lapisan 1 misalnya :

$$s = \frac{0,585}{20} \times 500 \text{ cm}$$

$$= 14,6 \text{ cm}$$

g) Dengan menjumlah penurunan pada masing-masing lapisan kita mendapatkan jumlah penurunan yang kita cari, dalam hal perhitungan di atas sebesar 34 cm.

h) Waktu yang diperlukan untuk penurunanan ini kita hitung dengan rumus :

$$t = \frac{TH^2}{C_v}$$

Untuk menentukan jangka waktu sampai penurunan 90% selesai, kita gunakan rumus :

$$t_{90} = \frac{0,848 H^2}{C_v}$$

Dalam hal ini H adalah sebesar separuh tebal lapisan, karena air dapat mengalir ke atas dan ke bawah, yaitu $H = 8,5 \text{ m} = 850 \text{ cm}$. Nilai C_v kita ambil sebesar $6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{detik}$, sehingga

$$t_{90} = \frac{0,848 \times (850)^2}{6 \times 10^{-3}} \text{ detik}$$

$$= 3,2 \text{ tahun}$$

Ada beberapa hal yang perlu kita ingat mengenai perhitungan tadi, yaitu sebagai berikut :

01. Hasil perhitungan dapat dijadikan lebih tepat dengan memakai lebih dari tiga lapisan. Makin tipis lapisan yang diambil berarti makin teliti perhitungan ini. Untuk perhitungan sehari-hari, dengan mengambil tiga atau empat lapisan akan memberi hasil yang cukup tepat.
02. Penurunan yang kita hitung tadi ialah penurunan pada pertengahan fondasi. Dengan cara yang serupa kita dapat menghitung penurunan pada sudut atau tepi fondasi.

Penurunan yang sebenarnya terjadi akan tergantung pada kekakuan (rigidity) bangunan yang bersangkutan. Apabila bangunan benar-benar kaku, maka penurunan pada setiap bagian fondasi akan sama dan akan sebesar nilai rata-rata dari penurunan yang dihitung pada pertengahan dan pada tepi.

03. Penentuan jangka waktu berdasarkan pada anggapan bahwa pengaliran air berjalan pada jurusan vertikal saja. Sebenarnya air juga akan mengalir pada arah horizontal sehingga kecepatan konsolidasi akan lebih cepat dari pada yang dihitung dengan cara tadi.

VII. STABILITAS LERENG

7.1. Pendahuluan

Gaya-gaya gravitasi dan rembesan air (seepage) cenderung menyebabkan ketidakstabilan pada lereng alami (natural slope), pada lereng yang dibentuk dengan cara penggalian, dan pada lereng tanggul serta bendungan tanah (earth dams). Tipe keruntuhan lereng yang paling penting adalah kelongsoran rotasi (rotational slip) bentuk permukaan longsor pada potongannya dapat berupa busur lingkaran (circular) atau kurva bukan lingkaran. Pada umumnya kelongsoran lingkaran berhubungan dengan kondisi tanah yang homogen dan kelongsoran tidak lingkaran berhubungan dengan tanah yang tidak homogen. Kelongsoran translasi (translational slip) dan kelongsoran gabungan (compound slip) terjadi bila bentuk permukaan runtuh dipengaruhi oleh adanya kekuatan geser yang berbeda pada tanah yang berbatasan. Kelongsoran translasi cenderung terjadi bila lapisan tanah yang berbatasan berada pada kedalaman yang relatif dangkal di bawah permukaan lereng, dimana permukaan runtuhnya akan berbentuk bidang dan hampir sejajar lereng. Kelongsoran gabungan biasanya terjadi bila lapisan tanah yang berbatasan berada pada kedalaman yang lebih besar, dan permukaan runtuhnya terdiri dari bagian-bagian lengkung dan bidang.

Di dalam praktek metode keseimbangan batas (limiting equilibrium method) digunakan dalam menganalisis stabilitas lereng. Dianggap bahwa keruntuhan (failure) terjadi pada titik sepanjang permukaan runtuh yang diasumsikan maupun yang diketahui. Kekuatan geser dengan dibutuhkan untuk mempertahankan kondisi keseimbangan batas dibandingkan kekuatan geser yang ada pada tanah, dan akan memberikan faktor keamanan rata-rata sepanjang permukaan runtuh. Masalah tersebut dianggap dua dimensi, kondisi regangan bidang diasumsikan. Telah diperlihatkan bahwa analisis dua dimensi memberikan hasil yang aman untuk suatu keruntuhan pada permukaan tiga dimensi.

7.2 Jenis – Jenis Lereng

Dalam bidang teknik sipil ada dua jenis lereng yang perlu di perhatikan :

1. Lereng alam (*Natural Slopes*)

Lereng alam terbentuk karena proses alam. Material yang membentuk lereng memiliki kecenderungan tergelincir dibawa beratnya sendiri dan gaya-gaya luar yang ditahan oleh kuat geser tanah dan material tersebut. Gangguan terhadap kestabilan bilamana terjadi tahanan geser tanah tidak dapat mengimbangi gaya-gaya yang menyebabkan gelincir pada bidang longsor. Lereng alam yang telah stabil selama bertahun-tahun dapat saja mengalami longsor akibat hal-hal berikut :

- a. Gangguan luar akibat pemotongan atau timbunan baru.
- b. Gempa.
- c. Kenaikan tekanan air pori (akibat naiknya muka air tanah) karena hujan yang berkepanjangan, pembangunan dan pengisian waduk, gangguan pada sistem drainase dan lain-lain.
- d. Penurunan kuat geser tanah secara progresif akibat deformasi sepanjang bidang yang berpotensi longsor.
- e. Proses pelapukan.

Pada lereng alam aspek kritis yang perlu dipelajari adalah kondisi geologi dan topografi, kemiringan lereng, jenis lapisan tanah, kuat geser, aliran air bawah tanah dan kecepatan pelapukan.

2. Lereng buatan (*Man made Slopes*)

Lereng buatan dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu ;

- a. Lereng buatan tanah asli / lereng galian.

Lereng ini dibuat dari tanah asli dengan memotong dengan kemiringan tertentu. Untuk pembuatan jalan atau saluran air untuk irigasi. Kestabilan pemotongan ditentukan oleh kondisi geologi, sifat teknis tanah, tekanan air akibat rembesan dan cara pemotongan.

- b. Lereng buatan tanah yang dipadatkan / lereng timbunan.

Tanah dipadatkan untuk tanggul-tanggul jalan raya, bendungan, badan jalan kereta api. Sifat teknis tanah timbunan dipengaruhi oleh cara penimbunan dan derajat kepadatan tanah.

Untuk lereng timbunan dibedakan menjadi beberapa kondisi :

a) Timbunan tanah tak berkoheisi diatas lapisan tanah kokoh.

Kestabilan dari lereng timbunan tak berkoheisi tergantung kepada :

- Sudut geser dalam dari bahan timbunan.
- Kemiringan lereng.
- Tekanan air pori.

Tekanan air pori akibat rembesan melalui timbunan akan menurunkan kestabilan lereng.

b) Timbunan tanah kohesi diatas lapisan tanah kokoh.

Kestabilan lereng dari timbunan tanah kohesif seperti lempung, pasir kelempungan, dan lanau kelempungan tergantung kepada :

- Kuat geser tanah timbunan.
- Berat isi tanah timbunan.
- Tinggi tanah timbunan.
- Kemiringan lereng.
- Tekanan air pori.

c) Timbunan yang dilaksanakan diatas tanah lembek.

Kestabilan lereng timbunan yang dilaksanakan diatas tanah lembek tergantung kepada :

- Kuat geser tanah timbunan.
- Berat isi tanah timbunan.
- Tinggi timbunan.
- Kemiringan lereng.
- Kuat geser tanah dasar.
- Tekanan air pori.

7.3 Klasifikasi Longsor

Suatu keruntuhan teknis yang paling umum adalah longsornya suatu galian atau timbunan. Apabila terjadi suatu longsor dalam tanah lempung, seringkali didapat merupakan sepanjang suatu busur lingkaran. Busur lingkaran ini dapat memotong permukaan lereng, melalui titik kaki lereng (*toe*) atau memotong dasar lereng (*deep seated*) dan menyebabkan peningkatan pada dasar.

Longsor dapat diklasifikasikan berdasarkan kriteria sebagai berikut :

- a. Berdasarkan kecepatan pergerakan:
 - Cepat
 - Sedang
 - Lambat
- b. Berdasarkan bentuk bidang longsor :
 - Lingkaran
 - Datar
 - Taji
- c. Berdasarkan jenis material :
 - Es
 - Batu
 - Tanah

Sharpe (1938) telah mengklasifikasikan longsor berdasar material dan kecepatan pergerakan tanah dengan siklus geomorfologi serta faktor cuaca.

Sedangkan Savarenski dari Soviet (1939) membagi kelongsoran kedalam tiga kelompok sebagai berikut :

1. Longsor *Aseqvent*

Longsor *Aseqvent* terjadi pada tanah kohesif yang homogen dan bidang longsornya hampir mendekati lingkaran.

2. Longsor *Conseqvent*

Longsor *Conseqvent* terjadi bilamana bergerak diatas bidang-bidang lapis atau sesar (*joint*).

3. Longsor *Inseqvent*

Pada longsor *Insequent* tanah biasanya bergerak secara transversal terhadap lapisan dan umumnya memiliki ukuran yang luas serta bidang runtuhnya panjang menembus kedalam tanah.

Untuk klasifikasi yang didasarkan pada mekanisme pergerakan dan morfologi dengan beberapa pertimbangan mengenai kecepatan pergerakan dan tipe tanah kedalam tiga kelompok yaitu : rangkak, fenomena tanah membeku/mengeras atau *frozenground* dan longsor.

Nemcok, Pasek dan Rybar dari Cekoslowakia (1972) telah mengusulkan untuk memperbaiki klasifikasi dan terminologi longsor berdasarkan mekanisme dan kecepatan pergerakan. Pengelompokannya berdasarkan empat kategori dasar yaitu ;

1. Rangkak (*creep*)

Rangkak (*creep*) meliputi berbagai macam pergerakan yang lambat dari rangkak talud sampai pergerakan lereng gunung akibat gravitasi dalam jangka waktu yang panjang atau lama.

2. Aliran (*flowing*)

Bila tanah yang terbawa longsor banyak mengandung air, maka perilaku longsor seperti aliran. Contoh : aliran tanah (*earthflow*) atau aliran lumpur (*mudflow*).

3. Gelincir (*sliding*)

Untuk pergerakan tanah yang relatif cepat sepanjang bidang longsor yang tertentu dikelompokkan kedalam kategori ini.

4. Tanggal (*fall*)

Pergerakan batuan padat/pejal (*solid*) yang cepat dengan sifat utamanya tanggal bebas (*free fall*).

Tanah longsor bergerak pada suatu bidang tertentu. Bidang ini disebut bidang gelincir (*slip surface*) atau bidang geser (*shear surface*). Berdasarkan sifat Bergeraknya tanah, longsor dibagi menjadi :

1. Longsoran rotasi

Longsoran rotasi adalah longsoran dalam bentuk bidang gelincir mendekati busur lingkaran yang bersifat berputar. Longsoran jenis ini

dapat terjadi pada batuan maupun pada tanah. Pada kondisi tanah homogen, longsoran rotasi ini dapat berupa busur lingkaran, tetapi dalam kenyataannya sering dipengaruhi oleh adanya diskontinuitas oleh adanya sesar, lapisan lembek dan lain-lain.

2. Longsoran translasi

Tanah longsor yang terjadi pada bidang gelincir yang hampir tegak lurus dan sejajar dengan muka tanah yang bersifat bergerak dalam suatu jurusan. Tanah longsor semacam ini biasanya terjadi bilamana terdapat lapisan agak keras yang sejajar dengan permukaan lereng. Longsoran rotasi ini dapat bersifat menerus dan luas dan dapat juga dalam blok.

7.4 Analisa Terjadinya Longsor

Untuk ketepatan suatu analisa keamanan dan pengamanan suatu lereng terhadap bahaya longsor perlu dilakukan diagnosa terhadap faktor-faktor kelongsoran. Dari pengamatan, maka perlu diketahui lebih rinci penyebab terjadinya suatu longsor, antara lain ;

- a. Perubahan lereng suatu tebing, secara alami karena erosi dan lain-lain atau secara disengaja akan mengganggu kestabilan lereng tersebut, karena secara logis dapat dikatakan semakin terjal suatu lereng akan semakin besar kemungkinan untuk longsor.
- b. Perubahan tinggi suatu tebing, secara alami karena erosi dan lain-lain atau disengaja juga akan merubah suatu lereng. Semakin tinggi lereng akan semakin besar longsornya.
- c. Peningkatan beban permukaan, ini akan meningkatkan tegangan dalam tanah termasuk meningkatnya tegangan air pori. Hal ini akan menurunkan stabilitas lereng dan sering terjadinya karena adanya pembangunan didaerah tebing seperti : jalan, gedung dan lain-lain.
- d. Perubahan kadar air baik karena air hujan maupun resapan air tempat lain dalam tanah. Ini akan segera meningkatkan kadar air dan menurunkan kekuatan geser dalam lapisan tanah.

- e. Aliran air tanah akan mempercepat terjadinya longsor, karena air bekerja sebagai pelumas. Bidang kontak antara butiran melemah karena air dapat menurunkan tingkat kelekatan butir.
- f. Pengaruh getaran, berupa gempa, ledakan dan getaran mesin dapat mengganggu kekuatan geser dalam tanah.
- g. Penggundulan daerah tebing akan menyebabkan perubahan kandungan air tanah dalam rongga dan akan menurunkan stabilitas tanah. Faktor air sangat berpengaruh terhadap keseimbangan dalam tanah. Disamping itu, kestabilan lapisan permukaan tanah juga tergantung adanya penggundulan.
- h. Pengaruh pelapukan secara mekanis dan kimia akan merubah sifat kekuatan tanah dan batuan hingga mengganggu stabilitas lereng.

**Tabel 2.2 : Hubungan Sudut Lereng Dan Jumlah Keruntuhan
(Zock dan Bednair 1975)**

Sudut Lereng (Derajat)	Jumlah Keruntuhan
12-14	2
15-18	12
19-20	10
21-22	46
23-24	58
25-26	73
27-28	76
29-30	36
31-33	32
>33	7

Sumber : Mekanika Tanah 2, (Ir. G. Djatmiko S, Ir. S. J. Edy Purnomo; 1997)

7.5 Kekuatan Geser Tanah Dan Hubungannya Dengan Kemantapan Lereng

Jika tanah dibebani maka akan mengakibatkan tegangan geser bertambah besar. Apabila tegangan geser mencapai harga batas, maka massa tanah akan mengalami deformasi dan akan runtuh. Keruntuhan tersebut dapat mengakibatkan

longsoran timbunan tanah. Keruntuhan geser dalam tanah adalah akibat gerak relatif antara butir-butir massa tanah. Tekanan efektif merupakan gaya persatuan luas yang dipikul oleh butir-butir tanah. Perubahan volume dan kekuatan tanah tergantung pada tekanan efektif didalam massa tanah. Makin tinggi tegangan efektif suatu tanah makin padat tanah tersebut. Jadi kekuatan geser tanah ditentukan untuk mengukur kemampuan tanah menahan tekanan tanpa terjadi keruntuhan.

Kekuatan geser tanah dapat dianggap terdiri dari tiga komponen sebagai berikut :

1. Geseran struktur karena perubahan jalinan antara butir-butir masa tanah.
2. Geseran dalam kearah perubahan letak antara butir-butir tanah sendiri dan titik-titik kontak yang sebanding dengan tegangan efektif yang bekerja pada bidang geser.
3. Kohesi atau adhesi antara permukaan butir-butir tanah yang tergantung pada jenis dan tanahnya.

Kekuatan geser tanah dapat dinyatakan secara umum dengan persamaan Coulomb-Hvorslev sebagai berikut :

$$s = c' + \sigma' \tan \phi' \dots\dots\dots (2.1)$$

$$s = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

s = Kekuatan geser tanah (kg/cm^2)

c' = Kohesi tanah dalam kondisi tekanan efektif (kg/cm^2)

σ' = Tekanan efektif (kg/cm^2)

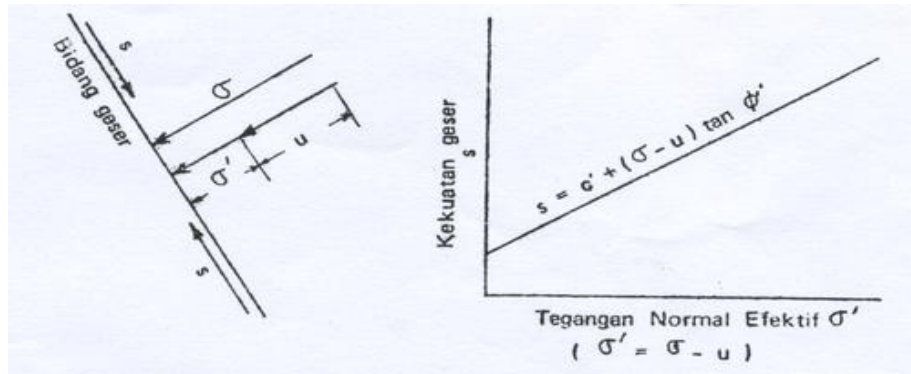
$$= \sigma - u$$

σ = Tegangan normal pada bidang geser (kg/cm^2)

u = Tekanan air pori (kg/cm^2)

ϕ' = Sudut geser dalam tanah kondisi efektif ($^\circ$)

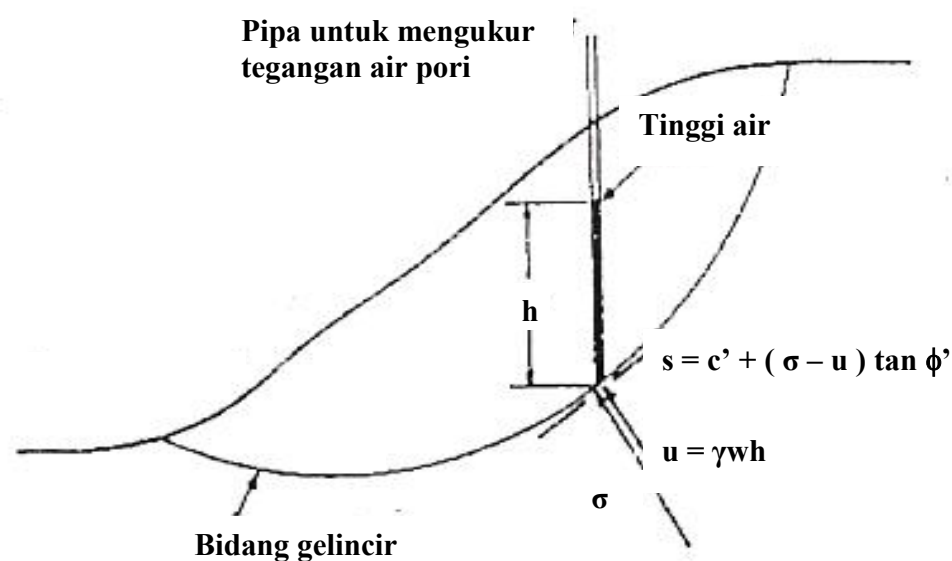
Hubungan antara kekuatan geser (s), kohesi (c) dan tekanan efektif (σ') tampak seperti gambar 2.1.



Gambar 7.1 : Kekuatan geser tanah

Dengan mempergunakan rumus ini kita dapat menentukan kekuatan geser tanah pada bidang manapun dalam lereng yang bersangkutan, asal nilai c dan σ' telah kita ketahui.

Tanah longsor dapat terjadi pada suatu bidang yang berbentuk busur lingkaran. Untuk mengetahui kekuatan gesernya, maka diambil contoh tanah asli dari tempat tersebut dan mengukur c dan ϕ di laboratorium. Nilai tegangan air pori (u) dapat ditentukan dengan memasang pipa dan mengukur tinggi air didalamnya, seperti terlihat dalam gambar 2.2



Gambar 2.2 : Kekuatan geser pada bidang longsor

Pada suatu tempat tertentu dalam lereng nilai c dan ϕ dapat dianggap konstan, demikian juga σ . Tetapi tegangan air pori tidak dianggap konstan. Pada musim kering mungkin tidak ada tegangan air pori, sedangkan pada musim hujan tegangan air pori bisa menjadi tinggi, makin besar tegangan air pori berarti semakin kecil kekuatan gesernya dan sebaliknya. Oleh karena itu tanah longsor biasanya terjadi pada waktu musim hujan, pada waktu tegangan air pori tinggi.

7.6 Angka Keamanan

Untuk menentukan angka keamanan terhadap kekuatan tanah pada umumnya dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$Fs = \frac{\tau_f}{\tau_d} \dots\dots\dots (7.3)$$

Dimana :

Fs = Angka Keamanan terhadap kekuatan tanah

τ_f = Kekuatan geser rata-rata dari tanah (kg/cm^2)

τ_d = Tegangan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor (kg/cm^2)

Kekuatan geser tanah terdiri dari dua komponen yaitu kohesi dan geseran, dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut :

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \dots\dots\dots (7.4.a)$$

Dimana :

c = Kohesi (kg/cm^2)

ϕ = Sudut geser dalam tanah (°)

σ = Tegangan normal rata-rata pada permukaan bidang longsor (kg/cm^2)

Dengan cara yang sama, tegangan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \phi_d \dots\dots\dots(7.4.b)$$

Dimana :

τ_d = Tegangan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor (kg/cm²)

c_d = Kohesi yang bekerja sepanjang bidang longsor (kg/cm²)

ϕ_d = Sudut geser yang bekerja sepanjang bidang longsor (°)

σ = Tegangan normal rata-rata pada permukaan bidang longsor (kg/cm²)

Dengan memasukkan persamaan (7.4.a) dan (7.4.b) kedalam persamaan (7.3) didapatkan :

$$F_s = \frac{c + \sigma \tan \phi}{c_d + \sigma \tan \phi_d} \dots\dots\dots(7.5)$$

Dengan demikian angka keamanan terhadap kohesi F_c dan angka keamanan terhadap sudut geser F_ϕ dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$F_c = \frac{c}{c_d} \dots\dots\dots(7.6)$$

dan

$$F_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \dots\dots\dots(7.7)$$

Bila :

$$\frac{c}{c_d} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \dots\dots\dots(7.8)$$

Maka $F_s = F_c = F_\phi$

Jika $F_s = 1$ maka talud adalah dalam keadaan akan longsor, dan umumnya harga $F_s = 1,5$ untuk angka keamanan terhadap kekuatan geser dapat digunakan untuk merencanakan stabilitas talud.

7.7 Analisa Stabilitas Lereng

Analisa kemantapan lereng menggunakan metode irisan, yang mengasumsikan permukaan runtuh potensial pada potongan berbentuk lingkaran

dengan pusat O dan jari-jari r. Massa tanah dipermukaan runtuh coba-coba dibagi oleh bidang-bidang vertikal menjadi sejumlah irisan. Analisa datanya dilakukan berdasarkan hasil penyelidikan lapangan dan uji laboratorium, dan macam-macam penyelesaian stabilitas lereng dengan menggunakan metode irisan ada banyak macamnya. Disini penulis menganalisa stabilitas lereng di daerah Sendang Mulyo Semarang dengan menggunakan metode Fellinius, Bishop dan Janbu.

7.7.1 Metode Fellinius

Analisa stabilitas lereng cara Fellinius (1927) menganggap gaya-gaya yang bekerja pada sisi kanan kiri dari sembarang irisan mempunyai resultan nol pada arah tegak lurus bidang longsornya. Dengan anggapan ini, keseimbangan arah vertikal gaya-gaya yang bekerja dengan memperhatikan tekanan pori adalah :

$$N_i + u_i = W_i \cos \theta_i \dots\dots\dots(7.9)$$

atau

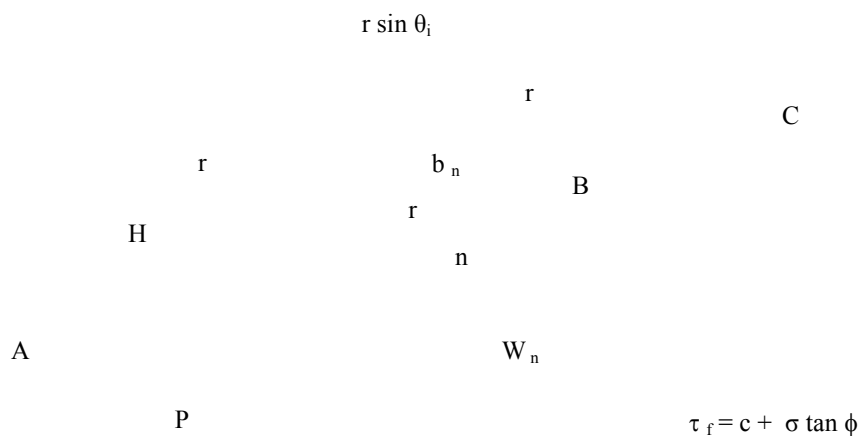
$$N_i = W_i \cos \theta_i - u_i$$

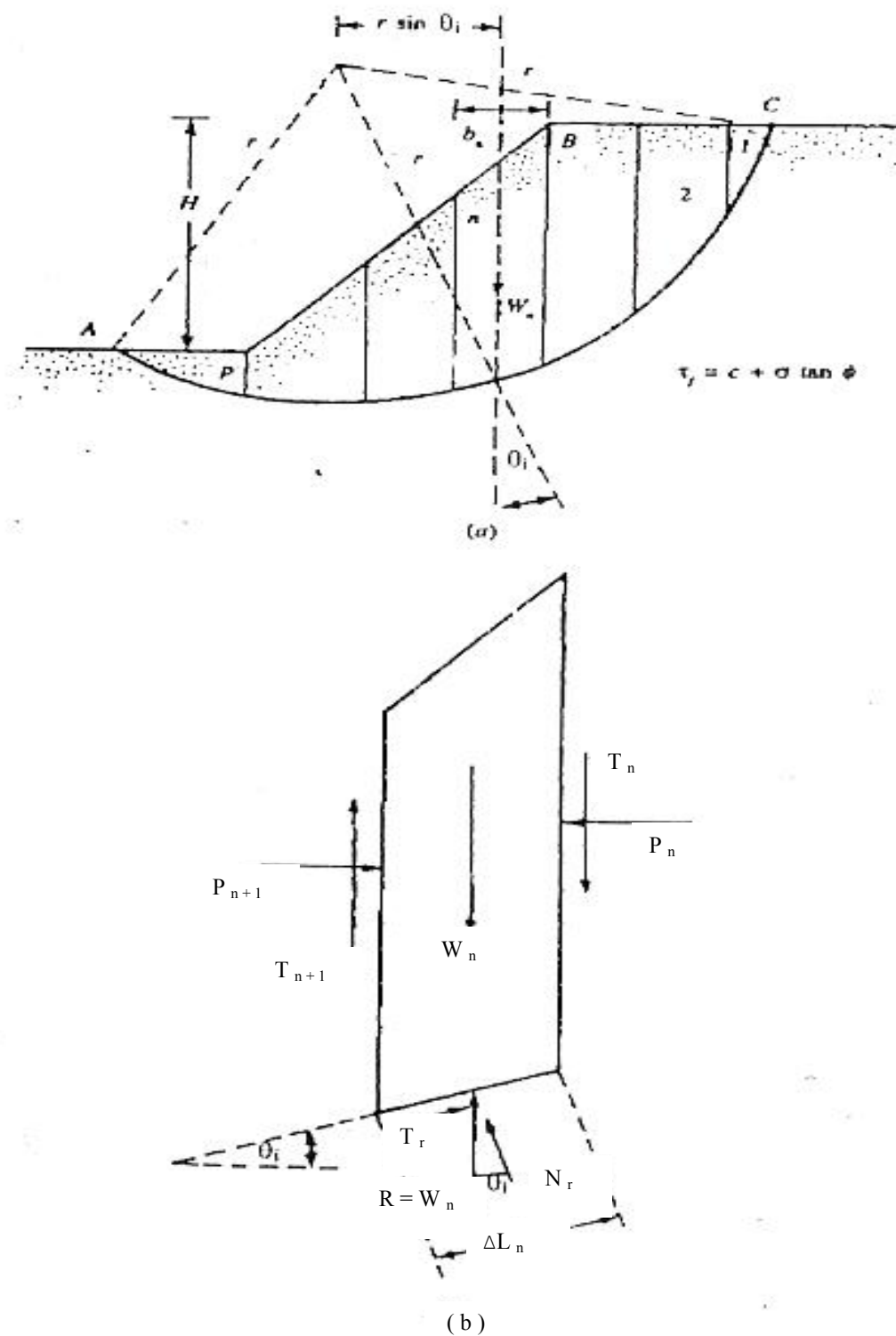
Dimana :

N_i = Gaya yang diterima (kg)

u_i = Tekanan air pori pada irisan ke-i (kg/cm^2)

W_i = Berat masa tanah irisan ke-i (kg)





Gambar 7.3 : Analisis stabilitas dengan metode Fellenius, (a) permukaan bidang yang dicoba, (b) gaya yang bekerja pada irisan nomor n.

Faktor keamanan didefinisikan sebagai :

$$F = \frac{\text{Jumlah momen dari tahanan geser sepanjang bidang longsor}}{\text{Jumlah momen dari berat masa tanah yang longsor}}$$

$$F = \frac{\sum Mr}{\sum Md} \dots\dots\dots(7.10)$$

Lengan momen dari berat masa tanah irisan adalah $R \sin \theta$, maka :

$$\sum Md = R \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i \dots\dots\dots(7.11)$$

Dimana :

R = Jari-jari lingkaran bidang longsor (m)

n = Jumlah irisan

W_i = Berat masa tanah irisan ke-I (kg)

θ_i = Sudut yang didefinisikan dalam gambar (°)

Dengan cara yang sama, momen yang menahan tanah yang akan longsor adalah :

$$\sum Mr = R \sum_{i=1}^{i=n} (c_{ai} + N_i \tan \phi) \dots\dots\dots(7.12)$$

Karena itu, persamaan untuk faktor amannya menjadi :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (c_{ai} + N_i \tan \phi)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \dots\dots\dots(7.13)$$

Bila terdapat air pada lerengnya, tekanan air pori pada bidang longsor tidak berpengaruh pada M_d , karena resultan gaya akibat tekanan air pori lewat titik pusat lingkaran. Substitusi persamaan (2.9) ke persamaan (2.12), diperoleh :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} c_{ai} + (W_i \cos \theta - u_{ai}) \tan \phi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta} \dots\dots\dots(7.14)$$

Dimana :

F = Faktor keamanan

W_i = Berat irisan tanah ke-I (kg)

c = Kohesi tanah (kg/cm^2)

u_i = Tekanan air pori pada irisan ke-I (kg/cm^2)

ϕ = Sudut geser dalam tanah ($^\circ$)

θ_i = Sudut yang didefinisikan ($^\circ$)

a_i = Panjang bagian lingkaran pada irisan ke-I (m)

Jika terdapat gaya-gaya selain berat lereng tanahnya sendiri, seperti beban bangunan diatas lereng, maka momen akibat beban ini diperhitungkan sebagai M_d .

Metode Fellinius memberikan faktor aman yang relatif lebih rendah dari cara hitungan yang lebih teliti. Batas-batas nilai kesalahan dapat mencapai kira-kira 5 % sampai 40 % tergantung dari faktor aman, sudut pusat lingkaran yang dipilih, dan besarnya tekanan air pori. Walaupun analisisnya ditinjau dalam tinjauan tegangan total, kesalahannya masih merupakan fungsi dari faktor aman dan sudut pusat dari lingkarannya (Whitman dan Baily, 1967). Cara ini lebih banyak digunakan dalam prakteknya. Karena, cara hitungannya yang sederhana dan kesalahan yang terjadi pada sisi aman.

7.7.2 Metode analisa Bishop disederhanakan (*Simplified Bishop Method*)

Metode irisan yang disederhanakan diberikan oleh Bishop (1955). Metode ini menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi irisan mempunyai resultan-resultan gaya nol pada arah vertikal.

Persamaan kuat geser dalam tinjauan tegangan efektif yang dapat dikerahkan tanah, hingga tercapainya kondisi keseimbangan batas dengan memperhatikan faktor aman adalah :

$$\tau = \frac{c'}{F} + (\sigma - u) \frac{\tan \phi'}{F} \dots \dots \dots (7.15)$$

Dimana :

τ = Kekuatan geser tanah (kg/cm^2)

σ = Tegangan normal total pada bidang longsor (kg/cm^2)

u = Tekanan air pori (kg/cm^2)

c' = Kohesi tanah efektif (kg/cm^2)

ϕ = Sudut geser dalam tanah ($^\circ$)

F = Faktor keamanan

Untuk irisan ke- i , nilai $T_i = \tau a_i$, yaitu nilai gaya geser yang berkembang pada bidang longsor untuk keseimbangan batas karena itu :

$$T_i = \frac{c' a_i}{F} + (N_i - u_i a_i) \frac{\tan \phi'}{F} \dots\dots\dots(7.16)$$

Kondisi keseimbangan momen dengan pusat rotasi O antara berat massa tanah yang akan longsor dengan gaya geser total yang dikerahkan tanah pada dasar bidang longsor, dinyatakan oleh persamaan.

$$\sum W_i x_i = \sum T_i R \dots\dots\dots(7.17)$$

dengan x_i adalah jarak W_i ke pusat rotasi O.

Dari persamaan (2.15) dan (2.17) dapat diperoleh :

$$F = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} [c' a_i + (N_i - u_i a_i) \tan \phi]}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i x_i} \dots\dots\dots(7.18)$$

Pada kondisi keseimbangan vertikal, jika $X_1 = X_i$ dan $X_r = X_{i+1}$:

$$N_i \cos \theta_i + T_i \sin \theta_i = W_i + X_i - X_{i+1}$$

$$N_i = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - T_i \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \dots\dots\dots(7.19)$$

Dimana $N_i' = N_i - u_i a_i$.

Substitusi persamaan (7.16) ke persamaan (7.19), didapat persamaan :

$$N_i = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - u_i a_i \cos \theta_i - c' a_i \sin \theta_i / F}{\cos \theta_i + \sin \theta_i \tan \phi / F} \dots\dots\dots(7.20)$$

Substitusi persamaan (7.20) ke persamaan (7.18) diperoleh :

$$F = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} \left(c' a_i + \tan \phi \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - u_i a_i \cos \theta_i - c' a_i \sin \theta_i / F}{\cos \theta_i + \sin \theta_i \tan \phi / F} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i X_i} \quad (7.21)$$

Untuk penyederhanaan anggap $X_i - X_{i+1} = 0$ dan dengan mengambil

$$X_i = R \sin \theta_i \quad (7.22)$$

$$b_i = a_i \cos \theta_i \quad (7.23)$$

Substitusi persamaan (7.22) dan persamaan (7.23) ke persamaan (7.21) diperoleh persamaan faktor aman :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi] \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (7.24)$$

Dimana :

F = faktor aman

c' = kohesi tanah efektif (kg/cm^2)

ϕ = sudut geser dalam tanah ($^\circ$)

b_i = lebar irisan ke-i (m)

W_i = berat irisan tanah ke-i (kg)

θ_i = sudut yang didefinisikan dalam gambar ($^\circ$)

u_i = tekanan air pori pada irisan ke-i (kg/cm^2)

Rasio tekanan pori (*pore pressure ratio*) didefinisikan sebagai :

$$r_u = \frac{ub}{W} = \frac{u}{\gamma_h} \quad (7.25)$$

Dimana :

r_u = nilai banding tekanan pori

u = tekanan air pori (kg/cm^2)

b = lebar irisan (m)

γ = berat volume tanah (kg/cm^3)

h = tinggi irisan rata-rata (m)

Dari substitusi persamaan (7.25) ke persamaan (7.24) bentuk lain dari persamaan faktor aman untuk analisis stabilitas lereng cara Bishop adalah :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + W_i (1 - r_u) \tan \phi] \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \dots\dots\dots(7.26)$$

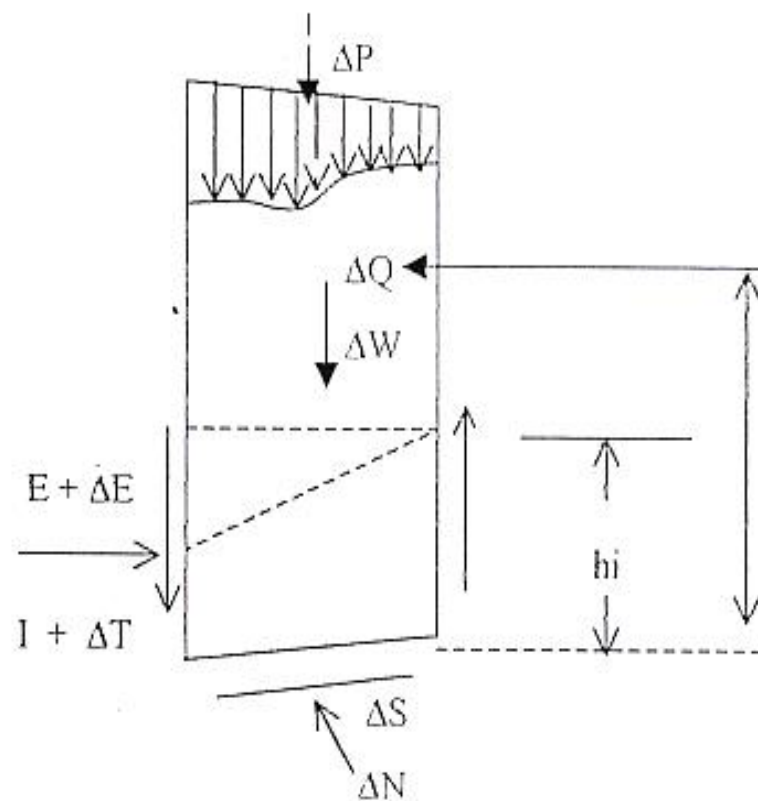
Persamaan faktor aman Bishop ini lebih sulit pemakaiannya dibandingkan dengan metode Fellinius. Lagi pula membutuhkan cara coba-coba, karena nilai faktor aman F nampak pada kedua sisi persamaannya. Akan tetapi cara ini lebih terbukti menghasilkan nilai faktor aman yang mendekati hasil hitungan dengan cara lain yang lebih teliti.

7.7.3 Metode Janbu

Metode Janbu digunakan untuk memecahkan dua faktor persamaan keamanan :

1. Keseimbangan momen.
2. Keseimbangan horizontal.

Gaya-gaya yang bekerja pada pembatasan irisan tunggal ditetapkan oleh Janbu dalam Gambar 7.4.



Gambar 7.4 : Gaya-gaya yang bekerja pada irisan tunggal cara Janbu

Anggapan dasar yang dibuat adalah :

- ❖ Keadaan regangan dalam bidang terjadi.
- ❖ Tegangan geser seimbang sepanjang permukaan geser diberikan oleh rumus :

$$\tau = \frac{\tau_f}{F}$$

Dengan τ_f sebagai kekuatan geser dan F sebagai faktor keamanan. Perhatikan bahwa F dipertimbangkan sebagai tetap sepanjang seluruh permukaan geser. Ini sebenarnya sama dengan faktor keamanan keseluruhan sepanjang permukaan runtuh.

Persamaan yang digunakan Janbu adalah sebagai berikut :

$$\Sigma Wx = \Sigma(Sa + Pf) + 0.5\gamma_w d^2 al \dots\dots\dots(7.27)$$

Dimana :

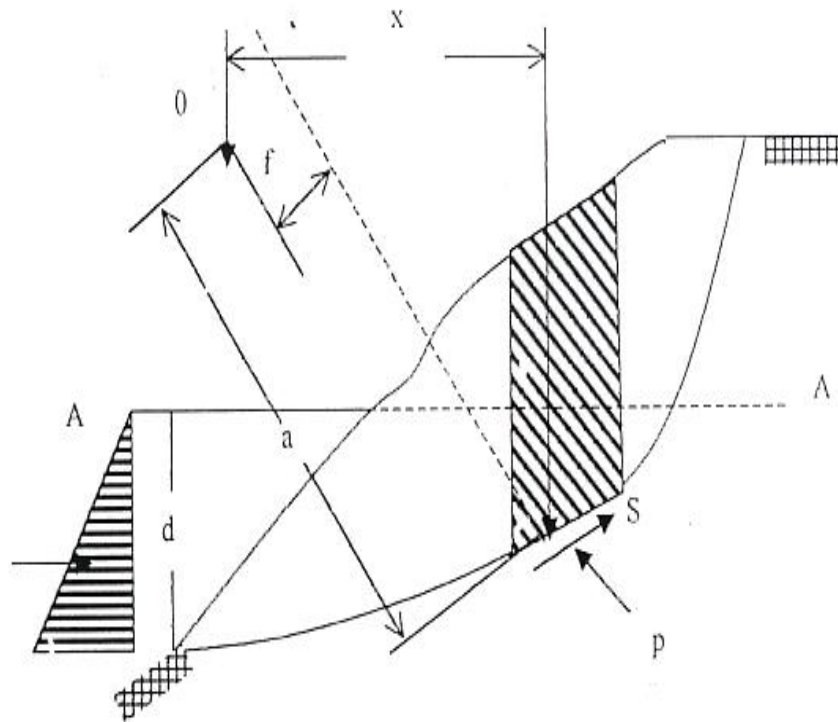
$$\Sigma(Wa + Wb + zb\gamma_w)x = 1 / F \Sigma(cl + P' \tan \phi)a + \Sigma Pf + 0.5\gamma_w d^2 al \dots\dots(7.28)$$

dan menjadi :

$$F = \frac{\Sigma(cl + P' \tan \phi)a}{\Sigma(Wa + Wb + zb\gamma_w)x - \Sigma Pf - 0.5\gamma_w d^2 al} \dots\dots\dots(7.29)$$

kemudian persamaan air pori dimasukkan :

$$\Sigma zb\gamma_w x - 0.5\gamma_w d^2 al = \Sigma z l \gamma_w f = \Sigma(P - P_1)f \dots\dots\dots(7.30)$$



Gambar 7.5 : Metode Janbu

Dari persamaan (7.29) menjadi :

$$F = \frac{\Sigma(cl + P' \tan \phi)a}{\Sigma(Wa + Wb)x - \Sigma P_1 f} \dots\dots\dots(7.31)$$

Persamaan ini dapat dihitung apabila P' dan P_1 diketahui, dan kemudian persamaan menjadi :

$$Wa + Wb + \Delta Tn + zb\gamma_w = zl\gamma_w \cos \alpha + (P' + ul) \cos \alpha + 1/F (cl + P' \tan \phi) \sin \alpha \dots\dots\dots(7.32)$$

Persamaan menjadi :

$$P = \frac{Wa + Wb + \Delta Tn - ub - (c/F)b \tan \alpha}{m\alpha} \dots\dots\dots(7.33)$$

Lalu :

$$P_1 = P' + ul = \frac{Wa + Wb + \Delta Tn + (1/F)(ub \tan \phi - cb) \tan \alpha}{m\alpha} \dots\dots\dots(7.34)$$

Substitusi persamaan (2.32) dan (2.33) ke persamaan (2.31) didapatkan :

$$F = \frac{\Sigma[cb + (Wa + Wb + \Delta Tn - ub) \tan \phi](a / m\alpha)}{\Sigma(Wa + Wb)x - \Sigma[Wa + Wb + \Delta Tn + (ub \tan \phi - cb) \tan \alpha / F](f / m\alpha)} \dots\dots\dots(7.34)$$

Diketahui :

$$m\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{F} \dots\dots\dots(7.35)$$

Dimana :

F = Faktor aman

c = Kohesi tanah (kg/cm²)

b = Lebar irisan (cm²)

Wa = Berat irisan tanah ke-a (kg)

Wb = Berat irisan tanah ke-b (kg)

ΔTn = Gaya yang diterima (kg)

ub = Tekanan air pori pada irisan ke-b (kg/cm²)

Persamaan ini harus dikerjakan secara teliti dan angka faktor keamanan di kanan dan di kiri persamaan harus sama atau dicari selisih seminimum mungkin.

7.8 Cara-cara Menstabilkan Lereng

Sering dihadapi persoalan bagaimana cara memperbaiki atau menstabilkan suatu daerah dimana telah terjadi kelongsoran atau mungkin akan terjadi kelongsoran.

Pada prinsipnya cara yang dipakai untuk menjadikan lereng supaya lebih aman dapat dibagi dalam dua golongan yaitu :

1. Memperkecil gaya penggerak atau momen penggerak.

Gaya atau momen penggerak dapat diperkecil hanya dengan cara merubah bentuk lereng yang bersangkutan. Untuk itu ada dua cara :

- a. Membuat lereng lebih datar, yaitu mengurangi sudut kemiringan.
- b. Memperkecil ketinggian lereng.

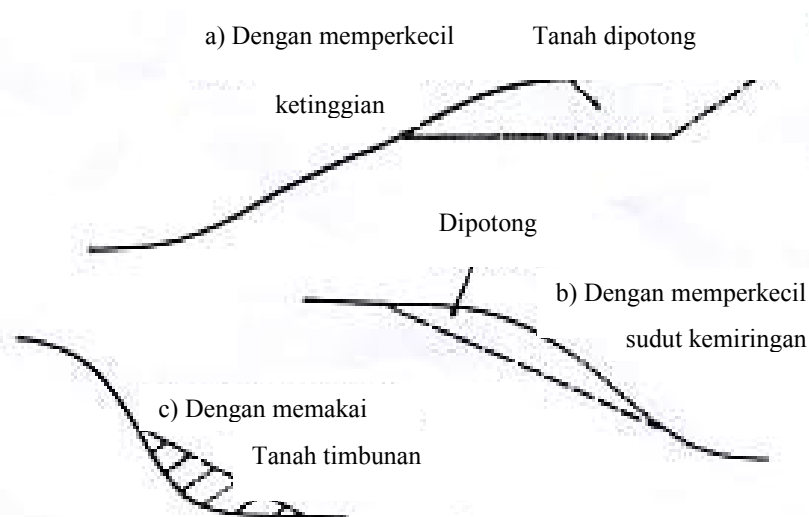
Umumnya cara ini hanya dapat dipakai pada lereng yang ketinggiannya terbatas, yaitu dalam hal kelongsoran bersifat rotasi (*rational slide*). Cara ini tentu kurang cocok untuk lereng yang tinggi, dimana kelongsoran bersifat translasi (*translational slide*).

2. Memperbesar gaya melawan atau momen melawan.

Gaya melawan atau momen melawan dapat ditambah dengan beberapa cara, yang paling sering dipakai ialah sebagai berikut :

- a. Dengan memakai *counterweight* yaitu tanah timbunan pada kaki lereng.

Dengan menambah tanah timbunan pada kaki lereng, maka momen melawan bertambah besar dibandingkan dengan momen penggerak dan faktor keamanan menjadi lebih besar. Cara ini mudah dilaksanakan asal ada tempat pada kaki lereng yang dipakai untuk keperluan ini. Cara ini hanya dapat dipakai untuk kelongsoran yang *rational*.



Gambar 7.6 : Cara Menstabilkan Lereng Dengan Memperkecil Gaya Penggerak

- b. Dengan mengurangi tegangan air pori di dalam lereng.

Dengan membuat selokan secara teratur (*drainage*) pada lereng, dapat mengurangi tegangan air pori pada tanah. Dengan demikian kekuatan geser tanah akan naik dan gaya melawan kelongsoran akan ikut naik. Selokan tersebut dibuat pada arah memanjang lereng (bukan arah melintang) dan pada dasar selokan dipasang pipa, dengan sambungannya terbuka supaya air dapat masuk. Diatas pipa tersebut, selokan diisi dengan batu-batuan dan kerikil. Sebaiknya selokan-selokan ini dibuat lebih dalam daripada bidang gelincir, tetapi ini tidak merupakan syarat mutlak. Cara ini masih dapat berhasil biarpun selokan tidak dapat digali sedalam bidang gelincir. Jarak antar setiap selokan sebaiknya dibuat sebesar empat kali dalamnya, yaitu $L = 4D$.

Dimana L = jarak antar selokan

D = dalam selokan

Cara ini dapat dipakai baik pada kelongsoran bersifat *rotational* maupun pada yang bersifat *translational*. Sering didapat bahwa *translational slide* hanyalah cara ini saja yang dapat digunakan.

- c. Dengan cara mekanis, yaitu dengan memasang tiang atau dengan membuat dinding penahan.

Cara mekanis, yaitu dengan membuat dinding penahan atau dengan memancang tiang, hanya dapat dipakai pada lereng atau kelongsoran yang agak kecil. Umumnya pada lereng yang tinggi, tekanan dari tanah yang longsor sangat besar sekali dibandingkan dengan gaya yang dapat ditahan oleh dinding atau tiang, sehingga dinding atau tiang tersebut tidak akan berpengaruh.

Tentu tiang atau dinding hanya akan berguna bilamana diletakkan (atau bekerja) pada sesuatu yang keras atau teguh,

misalnya lapisan batuan dibawah tanah yang longsor. Dinding atau tiang yang dipasang pada tanah yang masih dapat bergerak tentu tidak akan berpengaruh.

Selain dinding atau tiang kita juga dapat memakai konstruksi yang lain, diantaranya adalah

1. Turap

Pemasangan turap (*sheet piling*) sering dipakai dalam pekerjaan-pekerjaan sementara, seperti penahan tebing galian dan bendungan elak. Kecuali itu, turap banyak digunakan untuk struktur penahan tanah pada pelabuhan-pelabuhan. Pemakaian turap, antara lain dimaksudkan untuk mencegah kelongsoran tanah disekitar galian maupun untuk mencegah rembesan. Adapun beberapa jenis turap yang banyak dipakai adalah :

a. Baja

Turap baja pada umumnya digunakan pada tanah tak berkorosif, karena hal ini untuk menghindari terjadinya proses pengkaratan. Selain itu turap baja juga dapat digunakan di tanah lunak.

b. Beton

Turap beton memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan turap baja maupun turap kayu. Kerena turap beton dapat digunakan di tanah keras dan korosif.

c. Kayu

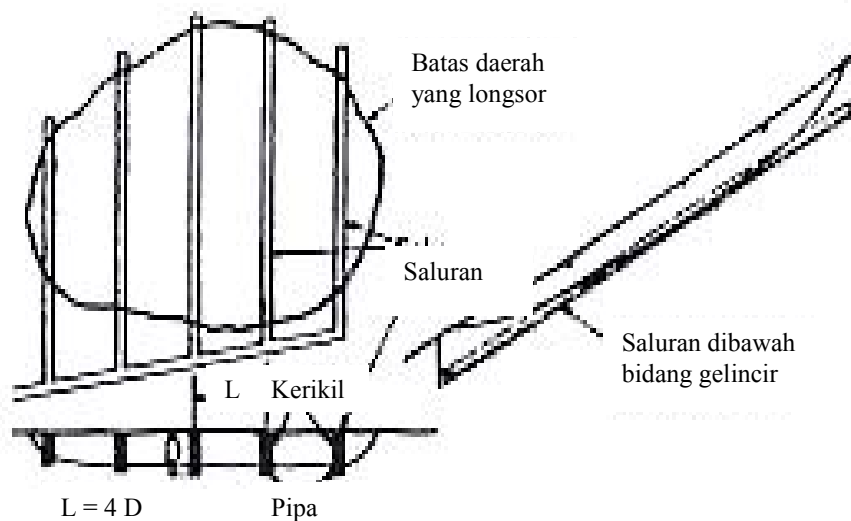
Turap kayu dapat digunakan pada tanah lunak dan korosif. Tetapi pada turap kayu memiliki ketinggian yang terbatas, mengingat kayu-kayu tiang pancang yang dijual dipasaran hanya memiliki panjang beberapa meter saja, dan juga kayu yang terlalu panjang akan mempersulit dalam sistem transportasi.

2. Terasering

Sistem terasering pada umumnya digunakan pada kondisi lereng yang sangat tinggi, dimana pada lereng tersebut dibagi menjadi beberapa segmen dengan kemiringan tertentu. Sehingga stabilitas dari lereng tersebut terjamin.

d. Dengan cara injeksi.

- Kadang-kadang lereng dapat dijadikan lebih stabil dengan memakai cara injeksi. Yaitu bahan kimia atau semen dipompakan melalui pipa supaya masuk kedalam lereng yang bersangkutan. Cara ini hanya dapat dipakai bilamana lereng terdiri dari tanah dengan daya rembesan yang tinggi. Bahan injeksi tidak dapat dimasukkan kedalam lereng yang terdiri dari lempung atau lanau karena daya rembesan terlalu kecil. Oleh karena itu cara ini sangat terbatas gunanya.



Gambar 7.7 : Cara Menstabilkan Lereng Dengan Mengurangi Tegangan Air Pori

VIII. EKPLOITASI LAPISAN TANAH

Pada bab terdahulu, kita telah menelaah sifat-sifat dasar tanah dan perilakunya akibat tegangan dan regangan dalam keadaan ideal. Pada kenyataannya di lapangan, deposit tanah alamiah tidaklah homogen, elastis, ataupun isotropis. Di beberapa tempat, lapisan-lapisan dari suatu deposit tanah mungkin berbeda sekali dari satu tempat ke tempat yang lain, sekalipun hanya berjarak horisontal sekitar 5 sampai 10 m saja. Untuk perencanaan suatu pondasi, kita perlu mengetahui dahulu susunan lapisan tanah yang sebenarnya pada suatu tempat, kita juga perlu mengetahui hasil pengujian laboratorium dari sampel tanah yang diambil dari berbagai kedalaman lapisan tanah, dan mungkin kalau ada perlu diketahui pula hasil pengamatan lapangan yang dilakukan sewaktu pembangunan gedung-gedung atau bangunan-bangunan lain yang didirikan dalam kondisi tanah yang serupa. Untuk hampir semua bangunan-bangunan besar, eksplorasi mencukupi. Adapun tujuan eksplorasi (penyelidikan) lapisan tanah pada umumnya mencakup maksud-maksud berikut :

- a. Untuk menentukan kondisi alamiah dan lapisan-lapisan tanah dilokasi yang ditinjau.
- b. Untuk mendapatkan sampel tanah asli (undisturbed) dan tidak asli (disturbed), dengan maksud untuk mencari jati diri (mengidentifikasi), tanah tersebut secara visual dan melakukan pengujian laboratorium yang perlu.
- c. Untuk menentukan kadalaman tanah keras, bila memang memungkinkan dijumpai sampai kedalaman maksimum yang dirasa perlu.
- d. Untuk melakukan uji lapangan (in-situ field test) seperti uji rembesan, uji geser vane, dan uji penetrasi yang baku.
- e. Untuk mengamati kondisi pengaliran air (tanah) ke dan dari lokasi tanah tersebut, dan
- f. Untuk mempelajari kemungkinan timbulnya masalah khusus perilaku bangunan yang sudah ada di sekitar lokasi tersebut.

Pada bab ini, kita akan membahas secara ringkas teknik eksplorasi lapisan tanah. Pembaca juga kami sarankan untuk mengacu pada buku *Manual on Foundation* dari AASHTO (the American Association of State Highway dan Transportatuon Officials), tahun 1967, untuk tambahan informasi.

8.1. PERANCANAAN EKPLORASI TANAH

Program eksplorasi tanah pada suatu bangunan secara umum dapat dibagi menjadi empat kategori utama, yaitu :

1. *Memisahkan informasi yang telah ada dari bangunan yang akan di dirikan*

Informasi ini meliputi tipe bangunan dan penggunaanya di masa depan, ketentuan peraturan bangunan lokal, dan informasi tentang kolom bangunan berikut dinding-dinding pendukung beban. Bila eksplorasi tersebut adalah untuk pondasi jembatan, kita harus mengetahui lebih dahulu panjang bentang jembatan dan perkiraan beban yang harus dipikul oleh masing-masing pilar dan pangkal jembatan (abutment)

2. *Mengumpulkan informasi yang telah ada untuk kondisi tanah dasar setempat*

Program eksplorasi tanah akan menghasilkan penghematan yang besar bila para geolog yang mengepalai proyek tersebut lebih dahulu melakukan telaah yang cermat terhadap informasi yang telah ada tentang kondisi tanah ditempat tersebut. Informasi yang berguna dapat diperoleh dari beberapa sumber seperti :

- a. Peta sigi (survey) geologis
- b. Peta agronomi yang di buat oleh Depaetment Pertanian
- c. Manual tanah yang diterbitkan oleh bagian jalan raya
- d. Laporan-laporan yang sudah ada tentang hasil eksploitasi tanah dari bangunan-bangunan di sekitar lokasi tersebut

Informasi-informasi yang diperoleh dari sumber-sumber di atas akan dapat memberikan gambaran yang lebih “dalam” tentang jenis-jenis tanah dan masalah-masalah yang mungkin akan dijumpai pada saat pengeboran tanah yang sesungguhnya.

3. *Peninjauan lapangan ke tempat lokasi proyek yang direncanakan*

Geolog yang bersangkutan seyogyanya malakukan inspeksi visual terhadap lokasi dan daerah sekitarnya. Dalam banyak kasus, informasi yang diperoleh

dari peninjauan lapangan seperti ini akan banyak berguna dalam perencanaan kelak. Jenis tumbuhan di daerah lokasi, misalnya dapat memberikan gambaran tentang jenis tanah dasar yang akan dijumpai. Kemudahan mencapai tempat itu dan kondisi *drainase* daerah tersebut juga segera dapat diketahui. Pembuatan potongan tanah secara terbuka (open cut) dapat memberikan gambaran tentang bentuk lapisan-lapisan tanah di tempat itu. Retakan yang terjadi pada dinding bangunan di sekitar tempat itu mungkin dapat menunjukkan adanya penurunan tanah (settlement) akibat tanah lempung yang lembek atau adanya tanah lempung yang “mengembang”.

4. Peninjauan lapangan terinci

Termasuk dalam tahap ini adalah pelaksanaan beberapa uji pengeboran di lokasi dan pengumpulan sampel tanah asli, dan tidak asli dari berbagai kedalaman untuk diinspeksi langsung atau untuk diuji di laboratorium. Tidak ada rumus atau pedoman yang pasti dan cepat untuk menentukan jumlah titik

Tabel 8.1 Jarak Lubang Pengeboran

Proyek	Jarak Pengeboran	
	(ft)	(m)
Bangunan satu lantai	75 – 100	23 – 30
Bangunan bertingkat banyak	50 – 75	15 – 23
Jalan raya	750 – 1000	230 – 305
Dam tanah	75 – 150	23 – 46
Daerah perumahan (real estate)	200 -300	61 - 32

pengeboran atau kedalaman tanah di mana pengeboran harus dilakukan. Pada umumnya untuk bangunan, sekurang-kurangnya satu pengeboran pada bangunan dapat dilaksanakan sebagai permulaan. Uji pengeboran tambahan dapat saja dilakukan tergantung dari seragam atau tidaknya kondisi tanah di tempat itu. Pada Tabel 81 diberikan ancar-ancar jarak antar lubang bor untuk perencanaan.

Uji pengeboran lapangan seharusnya dilaksanakan melalui seluruh lapisan tanah yang “jelek” dan sampai mencapai tanah yang kokoh. Sowers

and Sowers (1970) telah memberikan perkiraan kasar untuk kedalaman pengeboran yang minimum (kecuali kalau lapisan tanah keras/cadas dijumpai pada kedalaman yang lebih dangkal) untuk gedung bertingkat banyak. Perkiraan kedalaman tersebut adalah seperti persamaan berikut :

Bangunan ringan dari baja dan bangunan ramping dari beton

$$Z_b \text{ (ft)} = 10S^{0,7} \quad (13-1a)$$

$$Z_b \text{ (m)} = 3S^{0,7} \quad (13-1b)$$

Bangunan besar dari baja atau bangunan lebar dari beton

$$Z_b \text{ (ft)} = 20S^{0,7} \quad (13-2a)$$

$$Z_b \text{ (m)} = 6S^{0,7} \quad (13-2b)$$

Pada persamaan (13-1) dan (13-2), Z_b adalah perkiraan kedalaman pengeboran, dan S adalah jumlah lantai/tingkat bangunan.

The American Society of Civil Engineers (1972) telah menetapkan pedoman “kasaran” untuk memperkirakan kedalaman pengeboran, untuk eksploitasi tanah dari bangunan gedung-gedung. Pedoman tersebut adalah sebagai berikut :

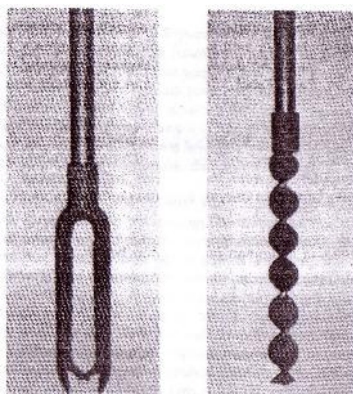
- a. Memperkirakan besarnya kenaikan tegangan bersih Δp , berikut variasinya dengan kedalaman yang mungkin terjadi akibat didirikannya bangunan tersebut. Kemudian, menentukan kedalaman tanah D_1 , dimana harga Δp hanya tinggal 10% saja dari beban rata-rata dari bangunan per satuan luas.
- b. Menggambar (plot) kurva variasi tegangan vertikal efektif (σ') dalam lapisan tanah sebagai fungsi kedalaman. Kemudian membandingkan kurva tadi dengan kurva variasi kenaikan tegangan (Δp) dengan kedalaman yang diperoleh dari langkah a di atas. Selanjutnya, menentukan D_2 dengan $\Delta p = 0,05 \sigma'$.
- c. Memperkirakan harga terkecil antara D_1 dan D_2 untuk kedalaman uji pengeboran minimum.

Bila eksplorasi tanah tersebut untuk bangunan dam dan talud (embankment), maka kedalaman pengeboran harus ditetapkan antara setengah sampai dua kali tinggi timbunan dam atau talud tersebut.

Cara-cara umum untuk melaksanakan uji pengeboran di lapangan dan prosedur untuk mengumpulkan sampel tanah akan kita bahas pada uraian berikut :

8.2. METODE PENGEBORAN

Ada beberapa metode untuk melaksanakan uji pengeboran di lapangan. Salah satu cara yang paling sederhana adalah dengan menggunakan *auger*. Pada gambar 13-1 ditunjukkan dua tipe *auger* tangan yang dapat kita gunakan untuk membuat lubang bor sampai kedalaman antara 10-15 ft (≈ 3 sampai 5 m). Kedua alat tersebut dapat digunakan untuk pekerjaan eksplorasi tanah untuk jalan raya dan bangunan-bangunan kecil. Informasi tentang tipe tanah yang ada pada berbagai kedalaman, dapat diperoleh dengan bangunan kecil. Informasi tentang tipe tanah yang ada berbagai kedalaman, dapat diperoleh dengan melihat lengkung jenis tanah yang tertinggal sepanjang *auger* tersebut. Sampel tanah yang kita peroleh, dengan cara ini adalah tidak asli (disturbed), tetapi sampel-sampel tersebut dapat kita gunakan dalam uji di laboratorium seperti analisa butiran dan batas-batas Atterberg.



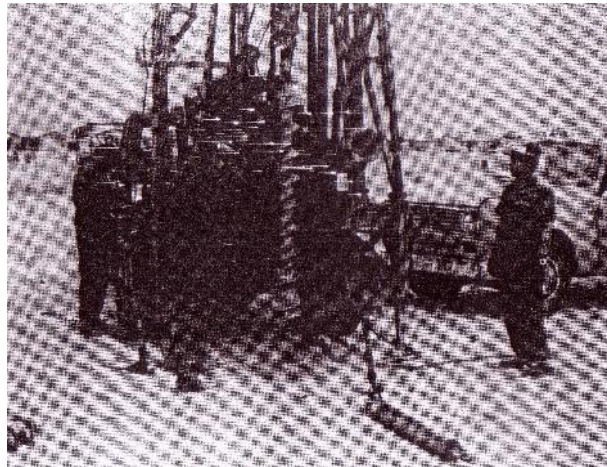
Gambar 13-1 Auger tanah: (a) auger Iwan: (b) auger kapal

Bila lubang bor hendak diteruskan lebih dalam lagi, maka metode yang paling sering digunakan ialah dengan *auger* berulir menerus (continous flight auger). Auger ini bertenaga mesin. Tenaga untuk mengebor dihasilkan oleh

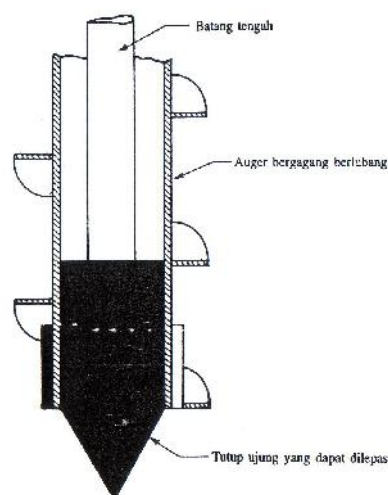
sebuah kerangka pengebor (drilling rig) yang ditumpangkan di atas traktor atau truk. Auger berulir menerus ini tersedia di pasar dengan ukuran 3-5 ft (1-1,5 m). Pada saat melaksanakan pengeboran, bagian demi bagian dapat disambung-sambung dan lubang bor dengan sendirinya bertambah dalam. Auger berulir menerus ini dapat berupa alat bergagang solid ataupun bergagang berlubang. Yang umum dipakai untuk alat yang bergagang solid adalah yang berukuran diameter luar $2\frac{5}{8}$ in (66,68 mm), $2\frac{1}{4}$ in (82,55 mm), 4 in (101,6 mm), $4\frac{1}{2}$ in (114,3 mm). Untuk alat yang bergagang berlubang, ukuran diameter luar dan dalam adalah sebagai berikut :

Diameter dalam		Diameter luar	
(in)	(mm)	(in)	(mm)
2,5	63,5	6,25	158,75
2,75	69,85	7	177,8
3	76,2	8	203,2
3,5	88,9	9	228,6
4	101,6	10	254

Auger berulir mampu membawa tanah yang lepas dari dasar lubang bor ke permukaan tanah. Operator dapat mendeteksi adanya perubahan kecepatan dan suara pada saat pengeboran. Gambar 8.2 menunjukkan kegiatan pengeboran dengan auger berulir. Bila kita menggunakan auger bergagang solid, auger ini harus dicabut ke atas secara berkala untuk mendapatkan sampel tanah dan juga untuk melakukan pengujian yang lain seperti uji penetrasi yang baku. Auger bergagang berlubang mempunyai keunggulan yang nyata, yaitu auger tersebut tidak harus sering dicabut untuk pengambilan



Gambar 13-2 Pengeboran tanah dengan auger berulir (dari Danny R. Anderson, El Paso, Texas)

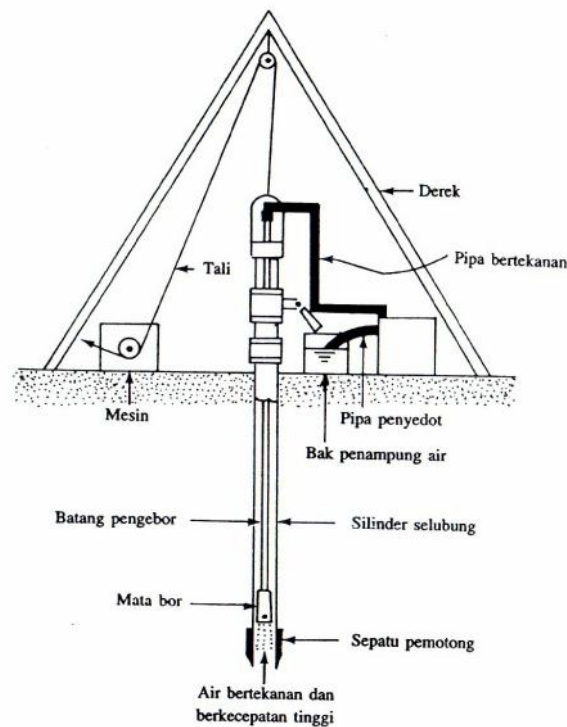


Gambar 13-3 Gambar potongan dari auger bergagang berlubang dengan tutup ujung yang dapat dilepas.

sampel tanah atau untuk pengujian lainnya. Seperti yang kita lihat pada gambar 13-3, bagian luar auger bertindak sebagai selubung (casing). Sebuah tutup yang dapat dicabut ke atas dipasang di dasar auger dengan bantuan sebuah batang tengah. Pada saat pengeboran, tutup tersebut dapat ditarik ke atas sedangkan auger dibiarkan tetap di tempat, dan kemudian pengambilan sampel tanah dan uji

penetrasi yang baku dapat dilakukan lewat lubang di tengah auger tersebut. Bila auger bergagang berlubang tersebut digunakan pada tanah-tanah barpasir di bawah permukaan air, ada kemungkinan bahwa pasir akan terdorong oleh tekanan hidrostatik beberapa puluh cm ke dalam lubang auger begitu saat tutup diambil. Kalau kondisinya demikian, tutup tersebut tidak perlu digunakan, dan sebaiknya air di dalam lubang auger harus dijaga selalu lebih tinggi dari permukaan air tanah.

Pengeboran sistem putar (rotary drilling) ialah suatu cara pengeboran menggunakan mata bor (drilling bit) yang berputar cepat, yang dipasang pada ujung bawah batang bor, dan bekerja untuk memotong dan menghancurkan tanah disekitarnya dalam prosesnya membuat lubang bor lebih dalam lagi. Pada saat ini, ada beberapa tipe mata bor yang tersedia untuk tujuan tersebut. Bor putar dapat digunakan di pasir lempung, atau batuan (kecuali kalau batumannya sangat pecah-pecah). Air atau lumpur bantu pengeboran (drilling mud) dapat dipaksakan (ditahan) ke bawah melalui lubang tengah dan mengalir melalui celah diantara mata bor, dan pada saat air atau lumpur tadi kembali ke atas (lewat luar bor), air tersebut akan membawa bahan-bahan tanah hasil pengeboran tadi ke permukaan. Lumpur bantu pengeboran (drilling mud), berwujud lumpur agak cair dibuat dari campuran antara bentonite dan air. Bentonite adalah lempung montmorillonite yang terbentuk dari hasil pelapukan abu vulkanis. Dengan cara ini, lubang bor dengan diameter berkisar antara 2 sampai 8 in (50,8 sampai 203,2 mm) dapat dengan mudah dibuat.



Gambar 13-4 Pemboran sistem cuci

Pengeboran sistem cuci (wash boring) adalah satu cara lain untuk mengebor tanah. Pada metode ini, silinder selubung baja (casing) dengan panjang kira-kira 6 sampai 10 ft (2 sampai 3 m) dimasukkan (ditumbuk/dipukul) ke dalam tanah. Tanah di dalam selubung tersebut kemudian dikeluarkan dengan bantuan “mata pengeruk” (shopping bit) yang dipasang di ujung batang bor. Kemudian air dipaksa masuk melewati batang bor, dan air tersebut mengalir dengan kecepatan tinggi melewati lubang diantara batang bor (Gambar13-4). Air ini bersama dengan partikel-partikel tanah hasil pengeboran, kemudian mengalir keluar ke permukaan tanah via lubang bor (antara selubung dengan batang bor) dan dengan tumpah di atas puncak selubung lewat sebuah sambungan T. Air “pencuci” ini dikumpulkan kembali dalam suatu bak. Selubung baja (casing) dapat disambung-sambung dengan selubung lainnya bila lubang bor bertambah dalam. Selubung

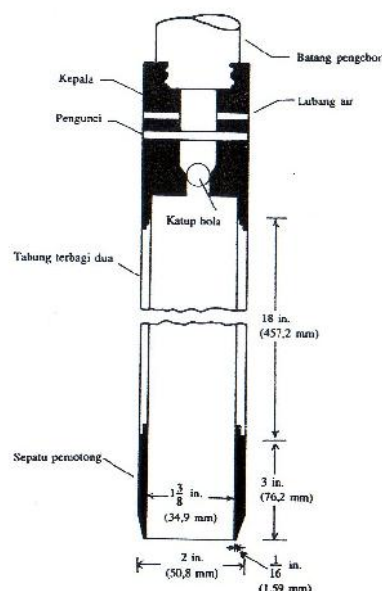
tambahan tidak diperlukan bila lubang bor dapat tetap terbuka tanpa bantuan selubung (tanah di dinding lubang tidak “ambrol” ke dalam lubang).

Pengeboran sistem tumbuk (percussion drilling) juga dapat kita gunakan untuk memperdalam bidang bor, terutama pada tanah-tanah yang keras dan batuan. Dengan cara ini, sebuah mata bor yang berat dan kokoh dapat ditumbukkan untuk menghancurkan tanah keras. Selubung baja mungkin juga diperlukan pada sistem pengeboan ini. Tanah yang sudah hancur kemudian dibasuh keluar lubang dengan cara pengaliran air (seperti pada pengeboran sistem cuci).

8.3. METODE PENGAMBILAN SAMPEL TANAH

Sejauh ini, kita telah menguraikan bermacam-macam cara untuk membuat lubang bor di tanah. Selama pengeboran, sampel tanah dikumpulkan dari berbagai kedalaman untuk dianalisis lebih lanjut. Pada bagian ini kita akan membahas secara ringkas beberapa metode untuk pengambilan sampel tanah.

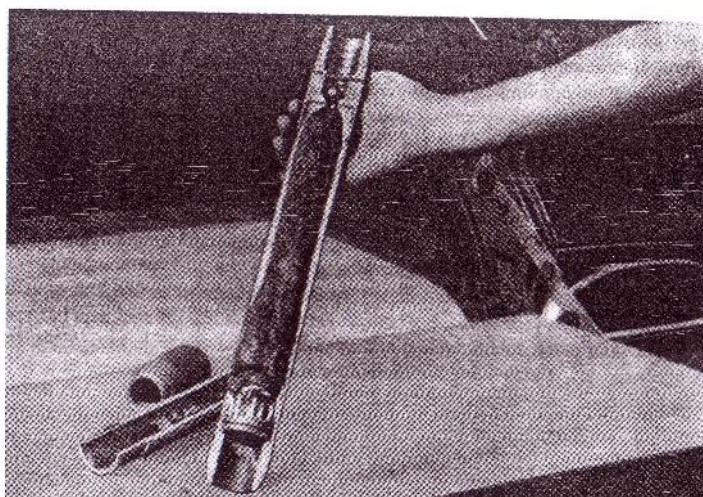
Pengambilan Sampel Tanah dengan Alat Split Spoon Standar (Tabung Bela-Dua-Dua).



Gambar 13-5 Gambar penampang sebuah alat split spoon standar

Pada gambar 13-5 ditunjukkan sebuah penampang (diagram) alat split spoon untuk mengambil sampel tanah. alat tersebut terdiri dari sebuah sepatu pemotong besi di bagian bawah, sebuah tabung baja (yang dapat terbelah dua secara memanjang) ditengah-tengah, dan penyambung dipuncaknya. Tabung baja yang ditengah mempunyai diameter dalam $1 \frac{3}{8}$ in (34,93 mm) diameter luar 2 in (50,8 mm). Pada gambar 13-6 ditunjukkan potret dari berbagai komponen sebuah alat split spoon yang telah “dibongkar”.

Bila lubang bor telah mencapai kedalaman yang diinginkan, alat bor diangkat ke atas, alat pengambil sampel tanah (sampler) split spoon kemudian dipasangkan ke ujung batang pengebor dan diturunkan kembali ke dasar lubang bor. Alat sampler tersebut kemudian di paksa menembus tanah di dasar lubang bor dengan cara dipukul sistem penumbuk. Penumbukan dilakukan pada puncak batang bor. Biasanya palu penumbuk mempunyai berat 140 lb lebih (622,72 N). Pada setiap pukulan, palu penumbuk dijatuhkan dari ketinggian 30 in (0,762 m).



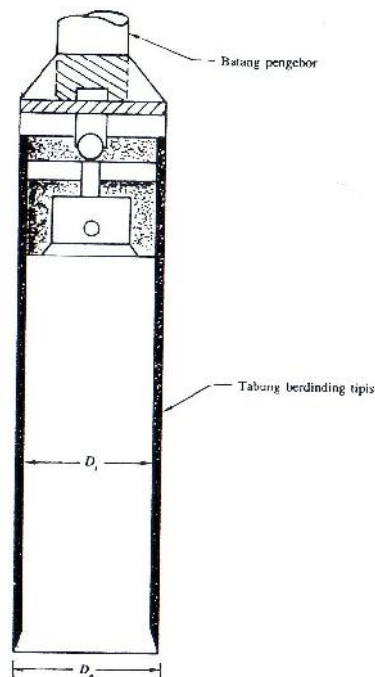
Gambar 13-6 Alat sampler split spoon yang telah dibongkar
(diambil dari Soil test, Inc. Evanston, Illinois)

Disamping itu, kita harus mencatat jumlah pukulan yang diperlukan untuk menancapkan alat sampler setiap interval 6 in (152,4 mm) dan pencatatan dilakukan sebanyak tiga kali untuk tiga kali interval 6 in. Harga-harga yang didapat untuk pencatatan dua interval 6 in (152,4 mm) yang terakhir disebut sebagai angka penetrasi yang baku, N (dari tanah di lapisan tersebut). Interpretasi angka penetrasi baku ini akan diberikan pada sub bab 13-5. Setelah penumbukan mencapai 18 in (3 x 6 in), alat sampler tersebut dicabut dan kemudian sepatu besi dan penyambung dilepas. Sampel tanah yang “tertangkap” di dalam tabung gelas untuk pemeriksaan lebih lanjut di laboratorium.

Pengambilan angka penetrasi baku dan pengambilan sampel tanah dengan split spoon biasanya dilakukan setiap selang kedalaman 5 ft ($\approx 1,5$ m).

Pengambilan Sampel Tanah dengan Tabung Berdinding Tipis

Cara ini dilakukan untuk mendapatkan sampel tanah yang lebih asli (lebih menyerupai kondisi aslinya di lapangan dan tidak banyak kerusakan oleh metode sampling tanah). Tabung berdinding tipis terbuat dari tabung tipis tanpa sambungan yang biasanya disebut sebagai *shelby tube* (Gambar 13-7). Untuk mengambil sampel tanah pada suatu kedalaman lubang bor, alat pengebor harus lebih dahulu ditarik keluar lubang. Kemudian tabung sampler berdinding tipis disambungkan pada ujung batang pengebor dan kemudian diturunkan ke dasar lubang bor. Setelah itu, secara hidrolis batang ditekan masuk ke dalam tanah, dan kemudian ditarik ke atas lagi. Tabung sampler dengan tanah “tertangkap” di dalamnya, kemudian ditutup rapat dan dibawa ke laboratorium untuk diuji. Tabung sampler berdinding tipis yang paling umum digunakan ialah yang mempunyai diameter luar 2 in (50,8 mm) dan 3 in (76,2 mm).



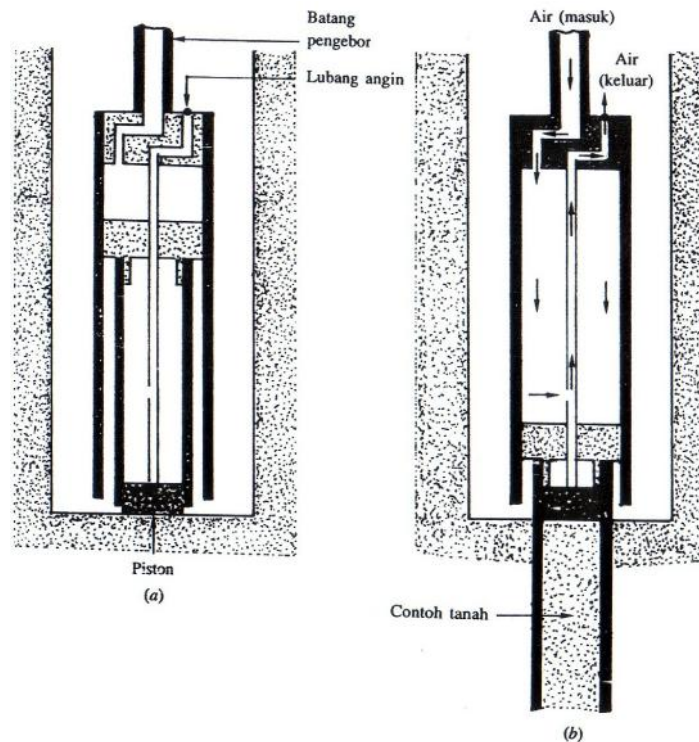
Gambar 13-7 Alat pengambil contoh tanah (sampler) berdinding tipis

Pengambilan Sampel Tanah dengan Alat Piston

Alat pengambil sampel berbentuk piston sangat berguna terutama bila kita memerlukan sampel tanah yang sempurna dan mempunyai tingkat keaslian yang tinggi (highly undisturbed). Biaya pengambilan sampel tanah dengan cara ini tentunya lebih mahal.

Ada beberapa tipe alat pengambil sampel berbentuk piston, tetapi bentuk yang dibuat oleh Osterberg (1952) adalah yang paling menguntungkan (lihat Gambar 13-8a dan b). Bentuk Osterberg tersebut terdiri dari sebuah tabung berdinding tipis dilengkapi dengan piston. Mulanya, piston berada pada posisi terbawah dan tabung tipis tertutup ujungnya oleh piston tersebut. Alat tadi lalu diturunkan ke dasar tanah, sedangkan piston tetap ditempat. Tekanan udara dalam tabung “dibuang” melalui sebuah lubang pada batang piston (Gambar 13-8b). Kegunaan piston ini untuk mencegah distorsi dari sampel tanah, dan untuk menghindarkan pemantapan tanah yang berlebihan di dalam piston atau

menghindari adanya tanah yang kelebihan. Sampel tanah yang didapat dengan cara kondisinya selalu lebih asli dibanding dengan yang diambil dengan Shelby tube.



Gambar 13-8 Alat pengambil contoh tanah (sampler) bentuk piston: (a) Alat sampler diturunkan ke dasar lubang bor (b) Tekanan udara keluar melewati lubang pada batang piston.

8.4. KERUSAKAN PADA SAMPEL TANAH (*SAMPLE DISTURBANCE*)

Tingkat kerusakan pada sampel tanah yang didapat dari berbagai metode dapat dinyatakan dalam istilah *Rasio Luasan*, A_r , atau

$$A_r (\%) = \frac{D_o^2 - D_i^2}{D_i^2} \times 100 (\%) \quad (13-3)$$

dengan D_o : diameter luar tabung sampler

D_i : diameter dalam tabung sampler

Sebuah sampel tanah dianggap asli (undisturbed) bila ratio luasan tabung sampler kurang dari atau maksimum 10%. Di bawah diberikan perhitungan untuk A_r dari sebuah alat *split spoon standar* dan sebuah shelby tube berdiameter 2 in (50,8 mm)

Untuk alat split spoon standar: $D_i = 1,38$ in, dan $D_0 = 2$ in

$$\text{Didapat } A_r (\%) = \frac{2^2 - (1,38)^2}{(1,38)^2} \times 100 = 110\%$$

Untuk alat Shelby tube diameter 2 in: $D_i = 1,875$ in, dan $D_0 = 2$ in

$$\text{Didapat } A_r (\%) = \frac{2^2 - (1,875)^2}{(1,875)^2} \times 100 = 13,7\%$$

Perhitungan di atas menunjukkan bahwa sampel tanah yang kita peroleh dari alat split spoon sangat tidak asli (tingkat kerusakan tinggi). Rasio luasan (A_r) dari alat shelby tube berdiameter 2 in. Sedikit lebih besar dari 10%. Untuk keperluan praktis, sampel tanahnya dapat dianggap sebagai sampel tanah asli (tingkat kerusakan rendah). Perlu diperhatikan bahwa biaya pengambilan tanah akan naik sejalan dengan bertambahnya diameter sampel tanah yang didapat.

Tanah yang tidak asli tetapi cukup representatif dari sampel tanah yang diambil dengan alat split spoon dapat digunakan di laboratorium untuk pengujian analisis butiran, batas cair, batas plastis, dan batas kerut. akan tetapi, sampel tanah tersebut tidak dapat digunakan untuk uji seperti konsolidasi, triaksial, dan tekanan tak tersekap. Untuk pengujian belakangan tersebut, perlu sampel tanah yang asli.

8.5. HUBUNGAN-HUBUNGAN UNTUK UJI PENETRASI BAKU (STANDART PENETRATION TEST)

Prosedur untuk melakukan uji penetrasi baku telah kita bahas pada bab terdahulu. Angka penetrasi baku (N) adalah angka yang lazim dipakai untuk menghubungkan parameter fisik dari tanah. Pada bab terdahulu, kita juga telah memberikan gambaran secara kualitatif tentang kekerasan tanah lempung berdasarkan harga kekuatan komperensifnya (q_u), (lihat tabel 9-2). Harga *unconfined comprestive streght* dari tanah lempung juga dapat diperkirakan berdasarkan angka penetrasi bakunya (N). Tabel 13-2 akan menyajikan perkiraan

hubungan antara harga N dari suatu tanah lempung pada suatu kedalaman tertentu dengan kondisi kekerasan dan harga “unconfined compressive strength” –nya.

TABEL 13-1 Perkiraan korelasi antara angka penetrasi standar dengan kekerasan tanah lempung.

Angka Penetrasi Standar N	Kekerasan	Kekuatan Unconfined Compression, q_u (ton/ft ²)
0	.....	0
	Sangat lembek	
2	.....	0,25
	Lembek	
4	.....	0,5
	Agak kaku	
8	.....	1
	Kaku	
16	.....	2
	Sangat Kaku	
32	.....	4
	Keras	
>32	.....	>4

Catatan: 1 ton/ft² = 95,75 kN/m²

Pada tanah berbutir, angka penetrasi baku sangat tergantung dari besarnya tegangan vertikal efektif, σ^1 pada lapisan tanah yang ditinjau. Hal ini dapat diterangkan dengan bantuan Gambar 13-9 di mana dimisalkan suatu kondisi ideal dari lapisan pasir yang homogen. Pada kedalaman h_1 , tegangan vertikal efektif adalah

$$\sigma' = \sigma'_1 = \gamma h_1 \quad (13-4)$$

dengan γ = berat volume tanah tersebut,

dengan cara yang sama, pada kedalaman h_2

$$\sigma' = \sigma'_2 = \gamma h_2 \quad (13-5)$$

Walaupun pasirnya adalah homogen, kita mendapatkan berat volume γ yang sama, dan akibatnya berlaku juga untuk harga kerapatan relatif (D_r) serta

sudut geser dalam (ϕ) harga γ , D_r dan ϕ akan sama di seluruh lapisan – harga tekanan vertikal efektif pada kedalaman h_2 (pada saat harga tekanan lateral lebih tinggi dari pada di h_1) yang lebih tinggi akan menghasilkan angka penetrasi baku yang lebih tinggi pula. Fakta ini secara jelas didemonstrasikan oleh Gibbs dan Holtz (1957). Hasil temuan mereka dapat dilihat pada Gambar 13-10. Sebagai contoh, kita dapat melihat bahwa pada $D_r \approx 80\%$, angka penetrasi baku (N) ialah kira-kira 12 untuk $\sigma' = 0 \text{ lb/ft}^2$. Harga N akan meningkat menjadi 50 (untuk $D_r = 80\%$) bila $\sigma' = 40 \text{ lb/ft}^2$ (276 kN/m^2). Untuk alasan ini, kita perlu melakukan konversi angka penetrasi baku yang kita peroleh dari berbagai kedalaman angka yang sesuai bila yang bekerja hanya tekanan vertikal tertentu. Preck, Hanson, dan Thornburn (1974) telah menyodorkan hubungan empiris untuk mengkonversikan harga-harga angka penetrasi baku yang dapat dari lapangan dengan angka penetrasi baku pada harga tekanan vertikal efektif tertentu, yaitu $\sigma' = 1 \text{ ton/ft}^2$ ($95,6 \text{ kN/m}^2$).

$$N' = C_N N_F = 0,77 N_F \log \left(\frac{20}{\sigma'} \right) \text{ (untuk } \sigma' > 0,25 \text{ ton/ft}^2 \text{)} \quad (13-6)$$

dengan

N' = angka penetrasi baku sesudah dikoreksi

N_F = angka penetrasi baku dari hasil lapangan

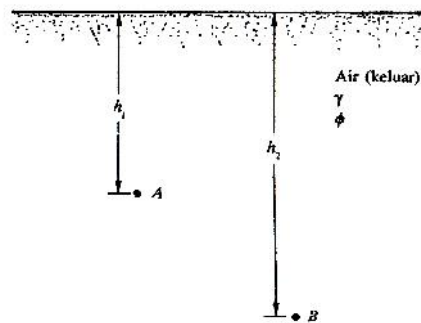
C_N = faktor koreksi

Satuan σ' adalah ton/ft^2 ($1 \text{ ton/ft}^2 = 95,6 \text{ kN/m}^2$)

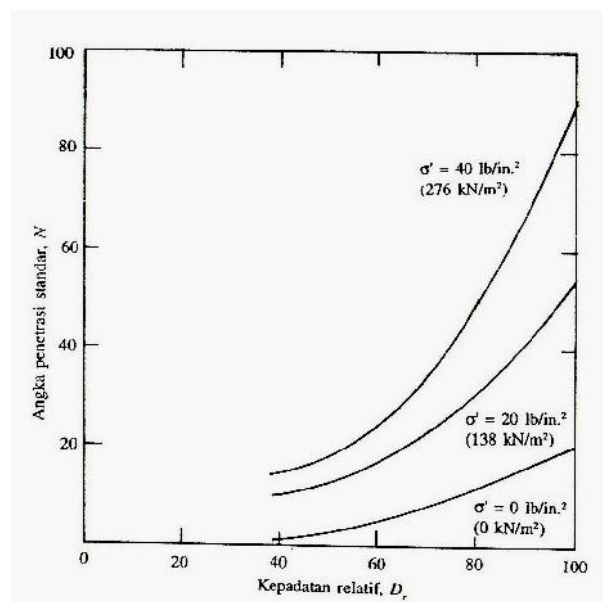
Dalam satuan SI (Standart International), persamaan di atas diubah menjadi

$$N' = 0,77 N_F \log \left(\frac{20}{0,0105\sigma'} \right) \text{ (untuk } \sigma' > 23,9 \text{ kN/m}^2 \text{)} \quad (13-7)$$

Satuan σ' pada Persamaan (13-7) adalah dalam kN/m^2



Gambar 13-9 Pengaruh dari tekanan tabah efektif terhadap angka penetrasi standar



Gambar 13-10 Hasil dari studi oleh Gibbs dan Holtz, perubahan N akibat perbedaan D_r dan σ'

Pada gambar 13-11 diberikan grafik N/N_F , terhadap tekanan vertikal efektif. Dalam tabel 13-3, kita dapat melihat perkiraan korelasi antara angka penetrasi baku, kerapatan relatif, dan sudut geser dalam dari tanah pasir.

Angka penetrasi baku sangat berguna sebagai pedoman dalam eksplorasi tanah dan untuk memperkirakan kondisi lapisan tanah, asal saja angka tersebut

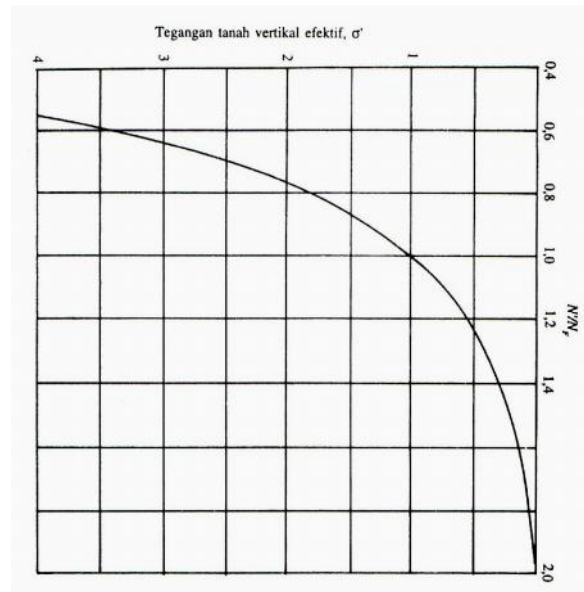
dapat diinterpretasikan dengan benar. Perlu diperhatikan bahwa semua persamaan dan hubungan tentang angka penetrasi baku tadi hanyalah perkiraan saja (tidak eksak). Karena tanah pada kenyataannya tidaklah homogen, maka harga N yang diperoleh di lapangan mungkin akan sangat bervariasi. Bila lapisan tanah juga terdiri dari batu-batu besar dan kerikil, tentu saja harga angka penetrasi bakunya mungkin saja tidak mewakili dan tidak benar.

TABEL 13-3 Perkiraan hubungan antara angka penetrasi standart yang sudah dikoreksi, sudut geser dalam, dan kepadatan relatif dari tanah pasir

Angka Penetrasi Standart yang Sudah Dikoreksi, N	Kepadatan Relatif D_r (%)	Sudut Geser Dalam ϕ (derajat)
0 – 5	0 – 5	26 – 30
5 – 10	5 – 30	28 – 35
10 - 30	30 - 60	35 - 42
30 - 50	60 - 65	38 - 46

8.6. UJI LAPANGAN LAINNYA

Bergantung pada jenis proyek dan kerumitan variasi tanahnya, beberapa jenis uji lapangan (in-situ) dapat dilaksanakan selama waktu eksploitasi. Sifat-sifat tanah yang dievaluasi dari uji di lapangan dalam banyak hal justru memberikan hasil yang lebih representatif. Ini terutama untuk mengeliminasi kerusakan sampel tanah (disturbance) yang diakibatkan eksplorasi tanah tersebut. Berikut ini diberikan beberapa jenis uji lapangan yang lazim dilakukan



Gambar 13-11 Perubahan dari N'/N_F akibat perubahan tegangan tanah vertikal efektif dari Peck, Hanson, dan Thombum, 1974).

Uji Geser Vane

Prinsip dasar uji geser vane adalah bila pada saat pemboran kita menentukan tanah lempung, maka harga kekuatan geser *undrained*-nya (undrained shear strenght) tanah lempung tadi (C_u) dapat kita temukan dengan melakukan uji geser vane di dalam lubang bor. Cara ini dapat memberikan informasi yang berharga tentang kekuatan tanah lempung tersebut pada kondisi aslinya.

Uji Tekanan Meter (*Pressuremeter*) pada Lubang Bor

Alat pressuremeter adalah alat yang dikembangkan oleh Menard pada tahun 1965 untuk mengukur modulus tegangan-regangan di lapangan (in-situ). Alat ini pada dasarnya terdiri dari sebuah sel tekanan dan dua buah sel penjaga (penahan) seperti terlihat pada gambar 13-12. Uji ini dilaksanakan dengan cara memompa sel tekanan di dalam lubang bor dan mengukur pengembangan volumenya. *Pressuremeter* tipe Menard ini bekerja menurut teori ekspansi dari silinder tebal tak berhingga dalam tanah. Pada gambar 13-13 ditunjukkan

kondisi variasi volume sel tekanan tersebut dengan perubahan tekanan dalam sel.

Pada gambar tersebut, zona I merupakan keadaan pada saat pembebanan ulang, yaitu keadaan dimana tanah di keliling lubang bor ditekan kembali ke kedudukan awalnya – suatu kedudukan tanah sebelum pengeboran. Zona III mewakili zona daerah platis. Untuk zona pseudo-elastis berlaku

$$E = 2(1 + \mu) V_0 \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

dengan:

E = modulus Young dari tanah tersebut

μ = ratio Poisson

V_0 = volume sel mula-mula pada tekanan sel P_0 (yaitu tekanan sel pada awal daei zona II).

Menard menyarankan bahwa harga $\mu = 0,33$ dan bila digunakan pada Persamaan (13-8) didapat

$$E = 2,66 V_0 \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

Berdasarkan teori elastis, hubungan antara modulus Young dengan modulus geser dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E = 2 (1 + \mu) G \quad (13-10)$$

dengan:

G = modulus geser dari tanah

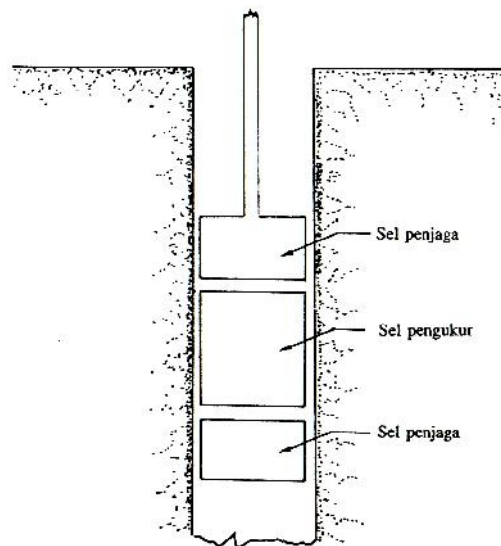
jadi, dengan menggabungkan Persamaan (13-8) dan (13-10) didapat

$$G = V_0 \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (13-11)$$

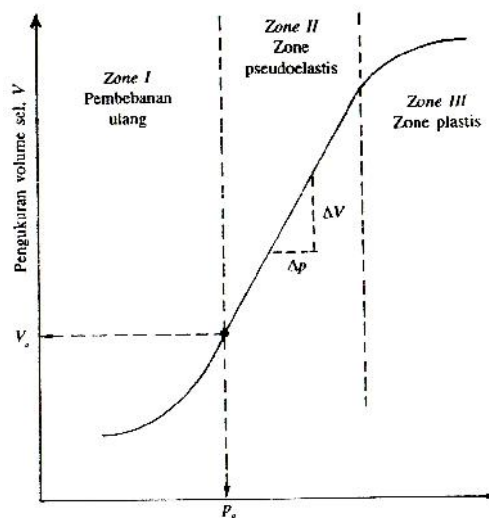
Hasil uji dengan pressuremeter ini dapat digunakan untuk menentukan koefisien tekanan tanah *at - rest*, K_o . Koefisien ini didapat dari besarnya rasio antara P_0 dan σ' (σ' = tegangan vertikal efektif pada kedalaman yang ditinjau), atau

$$K_o = \frac{P_o}{\sigma'} \quad (13-12)$$

Harga P_o tadi (gambar 13-13) merupakan harga tekanan lateral di dalam lubang bor tersebut.



Gambar 13-12 Gambar potongan sebuah test pressuremeter



Gambar 13-13. Hubungan antara pengukuran tekanan dan pengukuran volume untuk pressuremeter tipe Menard.

Pengujian dengan pressuremeter ini sangat sensitif terhadap perbedaan kondisi lubang bor sebelum pengujian dilakukan.

Uji Penetrasi Kerucut (*Cone Penetration Test*) atau Sondir

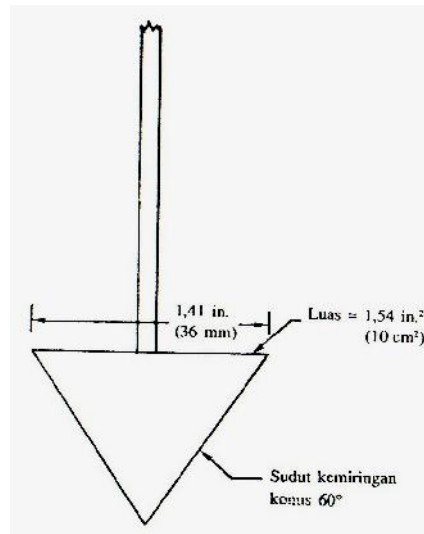
Alat kerucut penetrometer Belanda (= Sondir) adalah sebuah alat yang ujungnya berbentuk kerucut dengan sudut 60° dan dengan luasan ujung $1,54 \text{ in}^2$ (10 cm^2) (lihat gambar 13-14). Alat ini digunakan dengan cara ditekan ke dalam tanah terus-menerus dengan kecepatan tetap 20 mm/detik , sementara itu besarnya perlawanan tanah terhadap kerucut penetrasi (q_c) juga terus-menerus diukur. Dari alat penetrometer yang lazim dipakai, sebagian besar mempunyai selubung geser (biconus) yang dapat bergerak mengikuti kerucut penetrometer tersebut. Jadi, kita dapat membaca secara terpisah harga perlawanan ujung conus dan harga hambatan geser dari tanah. Selubung geser mempunyai luas muka sekitar $23,25 \text{ in}^2$ (150 cm^2).

Dimasa lampau, alat sondir lebih banyak digunakan di Eropa daripada di tempat lain. Salah satu keuntungan utama dari alat ini ialah bahwa tidak perlu diadakan pemboran tanah untuk penyelidikan tanah. Tetapi, tidak seperti uji penetrasi baku, dengan alat sondir. Sampel tanah tidak dapat diperoleh untuk penyelidikan langsung (observasi mata) atau untuk uji laboratorium.

TABEL 13-4 Perkiraan hubungan antara tahanan ujung conus (q_c) dengan angka penetrasi standar (N)

Bentuk tanah	q_c / N	
	$q_c = \text{kN/m}^2$	$q_c = \text{ton/ft}^2$
Pasir halus dan lanau	150 – 350	1,5 – 3,5
Pasir halus sampai dengan	350 – 500	3,5 – 5,0
Pasir kasar	500 – 750	5,0 – 7,5
Kerikil	750 - 1500	7,5 – 15,0

Pada tabel 13-4 diberikan perkiraan hubungan antara harga perlawanan ujung dari sondir (q_c) dan angka penetrasi baku (N) dari tanah berbutir. Oleh berbagai peneliti, harga q_c tersebut juga telah dikorelasikan terhadap harga modulus Young (E) dari tanah dasar. Schmertmann (1970) telah menyodorkan suatu rumusan sederhana untuk tanah pasir.



Gambar 13-14 Sebuah ujung alat sondir Belanda

$$E = 2q_c \quad (13-13)$$

Trofimenkov (1974) juga telah memberikan rumusan untuk modulus tegangan-regangan pada tanah pasir dan lempung sebagai berikut:

$$E = 3q_c \text{ (untuk tanah pasir)} \quad (13-14)$$

$$E = 7q_c \text{ (untuk tanah lempung)} \quad (13-15)$$

Hubungan-hubungan seperti pada Persamaan (13-13), (13-14), dan (13-15) dapat digunakan dalam perhitungan elastis dari pondasi

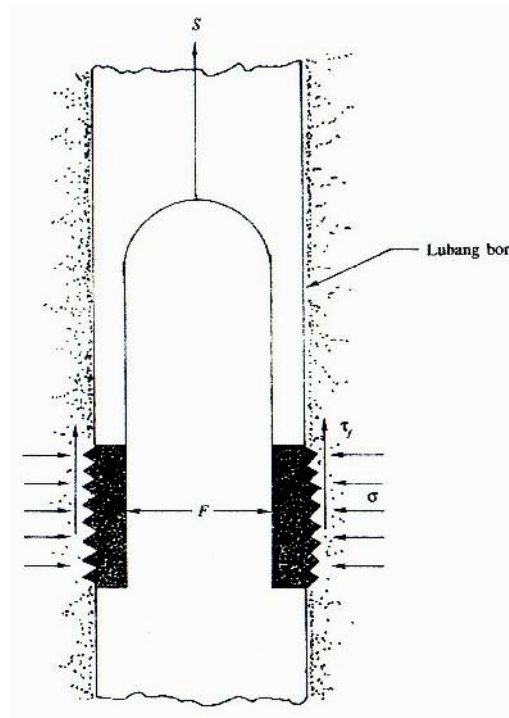
Uji Geser Lowa pada Lubang Bor

Uji geser lowa pada lubang bor adalah pengujian yang menggunakan sebuah alat mengukur besarnya kekuatan geser tanah pada suatu kedalaman pada waktu eksplorasi tanah (gambar 13-15). Suatu gaya normal terkontrol (F) dapat dikerjakan terhadap masing-masing pelat bergigi dari alat tersebut. Besarnya kegagalan geser dari tanah sekeliling pelat diketahui memberikan gaya vertikal S . Jadi, tegangan normal (σ) yang bekerja pada dinding lubang bor adalah

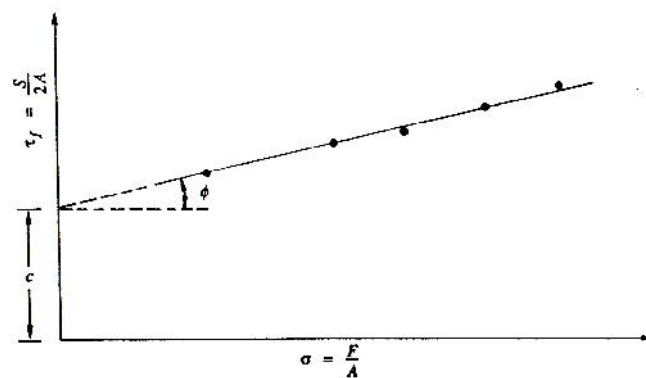
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (13-16)$$

dengan $A =$ luas masing-masing pelat yang berhubungan langsung dengan tanah dengan cara yang sama, harga kegagalan geser (τ_f) adalah

$$\tau_f = \frac{S}{2A}$$



Gambar 13-15 Task geser dengan alat bor lowa



Gambar 13-16 Variasi dari τ_f dan σ pada test bor lowa

Uji seperti ini dapat diulang dengan menambah besarnya gaya normal (F) beberapa kali tanpa mencabut alat geser tersebut dari dalam lubang bor. Hasil uji dapat digambarkan dalam bentuk grafik (gambar 13-16) untuk mendapatkan harga parameter kekuatan geser tanah (yaitu kohesi c dan sudut geser dalam ϕ). Harga kekuatan geser yang didapat dengan cara ini akan lebih menyerupai hasil uji consolidated drained.

8.7. PENGAMBILAN SAMPEL BATUAN (*ROCK CORING*)

Mungkin pada suatu saat kita perlu mengambil sampel batuan apabila lapisan batuan dasar (bedrock) dijumpai pada suatu kedalaman tertentu. Diperlukan pengambilan sampel batuan sampai tebal sekurang-kurangnya 10 ft (\approx 3 m). Bila lapangan batuan dasar telah cukup melapuk atau kondisi batuan tak beraturan, maka pengambilan sampel (rock barrel) disambungkan pada batang pengebor. Sebuah mata bor khusus juga dipasang di dasar tabung tersebut. Mata bor ini mempunyai bagian pemotong batuan yang dapat dari intan, tungsten, atau carbide. Pemboran dilakukan dengan cara bor-putar. air dialirkan melalui lubang tengah batang pengebor selama pelaksanaan pengeboran dan batuan yang hancur dibilas keluar dari lubang bor. Pada gambar 13-17 ditunjukkan gambar sebuah alat pengambilan sampel batuan (rock barrel) bertabung satu. Sampel batuan yang diperoleh dengan rock barrel bertabung satu ini mungkin dapat pecah-pecah akibat gaya torsi dari alat bor. Untuk menghindari masalah ini, kita menggunakan rock barrel bertabung ganda. Pada tabel 13-5 diberikan rincian dari berbagai tipe silinder selubung (casing) dan tabung pengambil sampel batuan, diameter dari mata bor, dan diameter dari sampel batuan yang diperoleh. Sampel batuan yang ukurannya lebih kecil daripada ukuran BX umumnya cenderung untuk hancur (pecah) pada waktu pemboran dilaksanakan.

TABEL 13-5 Rincian mengenai tabung pengambil contoh batuan, mata bor, dan contoh batuannya

Tanda untuk Sehubungan Tabung pengambil contoh	Diameter Luar dari Mata bor	Diameter Dari contoh batuan
EX	1 7/16	7/8
AX	1 7/8	1 1/8
BX	2 15/16	1 5/8
NX	2 15/16	2 1/8

Berdasarkan panjang dari sampel batuan yang didapat dari setiap pemboran, harga-harga berikut dapat dipakai sebagai pedoman mutu batuan tersebut.

- a. Ratio perolehan (recovery ratio) =

$$\frac{\text{Panjang sampel batuan yang diperoleh}}{\text{Panjang tabung pengambil sampel batuan}}$$

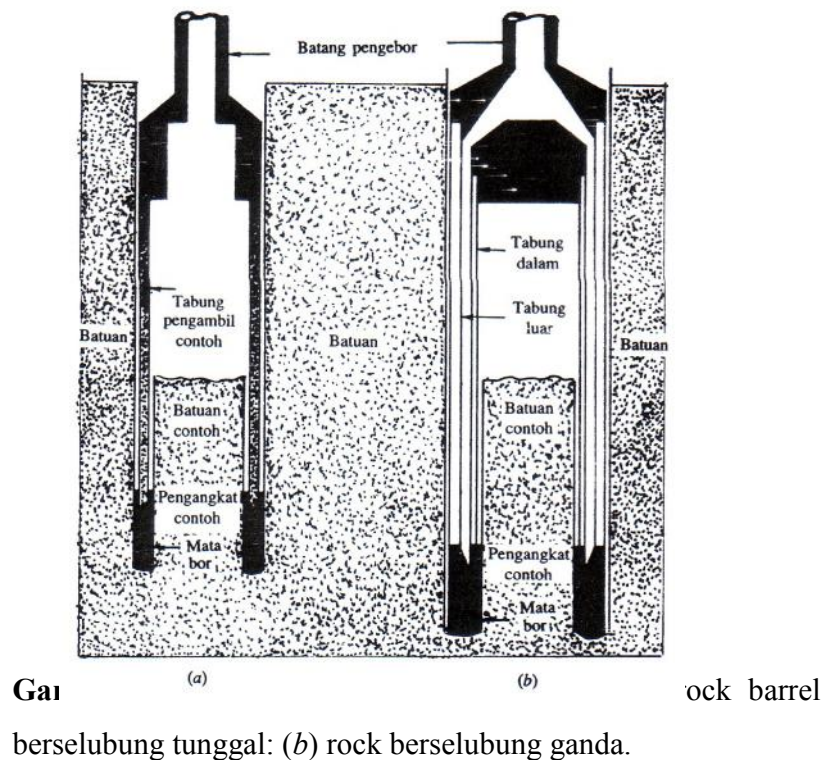
- b. Rock quality designation (*RQD*) =

$$\frac{\sum \text{panjang dari segmen-segmen batuan yang mempunyai}}{\text{Panjang sekurang-kurangnya 101,6 mm atau lebih}}$$

$$\frac{\text{Panjang dari tabung pengambil sampel batuan}}{\text{Panjang dari tabung pengambil sampel batuan}}$$

Bila ratio perolehan adalah 1,0, batuannya merupakan batuan utuh (intack rock). Batuan yang sangat terpecah-pecah (highly rock) biasanya memberikan ratio perolehan 0,5 atau kurang. Deere (1953) menyarankan sistem klasifikasi batuan di lapangan berdasarkan nilai *RQD* nya sebagai berikut:

<i>RQD</i>	Kualitas batuan
1- 0,9	Sangat baik
0,9-0,75	Baik
0,75-0,5	Lumayan
0,5-0,25	Buruk
0,25-0	Sangat baik



8.8. LAPORAN DARI EKSPLOITASI TANAH

Pada akhir program tanah, sampel tanah batuan yang diperoleh harus diamati baik secara visual ataupun secara laboratorium dengan melakukan beberapa pengujian. Kemudian laporan hasil eksplorasi tersebut harus disiapkan untuk digunakan kelak dalam perencanaan. Setiap laporan hasil eksplorasi tanah seyogyanya berisi hal-hal berikut:

- a. lingkup penyelidikan tanah.
- b. pemberian (description) umum tentang bangunan yang direncanakan di tempat eksplorasi tanah telah dilaksanakan.
- c. kondisi geologi dari lokasi bangunan tersebut.
- d. sarana pengaliran air (drainase) di lokasi tersebut.
- e. hasil pengeboran yang terinci.

- f. pemberian kondisi lapisan tanah yang ditentukan berdasarkan sampel tanah dan batuan yang diperoleh.
- g. letak muka air tanah yang diamati dari lubang bor.
- h. rincian tentang jenis pondasi-pondasi yang disarankan serta alternatif-alternatifnya.
- i. keterangan tentang masalah-masalah yang mungkin akan dijumpai nanti (selama perencanaan atau pelaksanaan bangunan) dan
- j. keterbatasan penyelidikan.

BORING LOG

PROJECT TITLE Pasar

LOCATION Intersection Hill Stret and Miner Street DATE June 7, 1983

BORING no. 4 TYPE OF BORING Anyar bergagang berlubang SROUND

ELEVATION 132,2 ft

KETERANGAN TANAH	KEDALAMAN NOMOR SAMPEL	ANGKA PENETRASI STANDAR	KADAR AIR W (%)	KETERANGAN
Tan sandy silt	1-			
	2-			
	3-			
Tanah lempung berlarut (CL), warna coklat muda	4-			
	5-			
	SS-1 6-	13	11	Batas cairan = 32
	7-			Badex plastis
	8-			
	9-	5	24	
	SS-2 10-			
	11-			
Muka air tanah 14 juni 1983	SS-1 12-			
	13-			
	14-			
	15-			
Lempung lunak (CL)	16-			
	17-	6	28	
	SS-3 18-			Q_u = kekuatan unconfined cmprression
	19-			
	20-			

	21- 22-	32		
Pasir padat dan kerikil akhir dari pemboran pada 22 ft				

Gambar 13-18 Bentuk yang lazim dari sebuah laporan pemboran (boring log)

Di samping itu, para pembuat laporan tadi perlu melengkapi laporan tanah tersebut dengan gambar-gambar sebagai berikut:

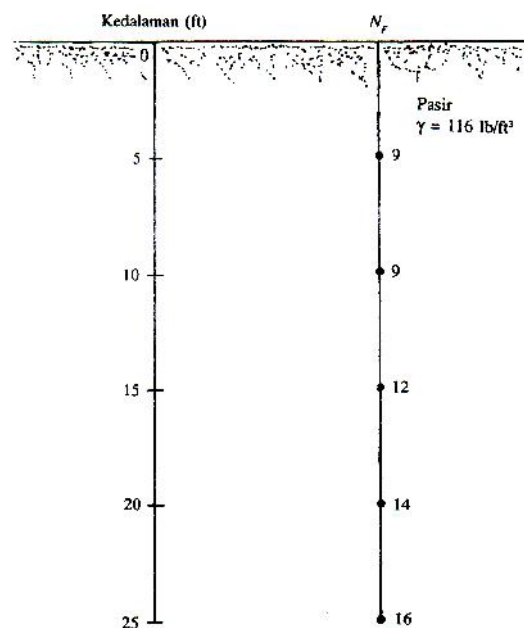
- peta lokasi tapak
- peta lokasi titik-titik bor terhadap denah bangunan yang direncanakan
- hasil bor menurut kedalaman tanah (boring log)
- hasil uji laboratorium, dan
- hasil-hasil khusus lainnya yang dianggap perlu

Gambar *boring log* di no. c di atas merupakan gambar yang terinci dari setiap lubang bor. Pada gambar 13-18 ditunjukkan contoh sebuah *boring log*.

SOAL-SOAL

- 13-1 Tentukan ratio dari sebuah tabung shelby yang mempunyai diameter luar 114 mm dan diameter dalam 111 mm.
- 13-2 Ulangi soal 13-1 di atas bila diameter luar = 3 in, dan diameter dalam 2,875 in
- 13-3 Harga angka penetrasi baku (N) dari suatu tanah lempung pada suatu kedalaman adalah 11. Berikut perkiraan harga kekuatan tekanan tanah tak tersekapnya ($q_u = \text{unconfined compression strength}$)

- 13-4 Pada gambar P 13-4 dilihatkan angka-angka penetrasi baku pada sebuah lapisan tanah pasir. Tentukan harga angka penetrasi baku yang telah dikoreksi untuk masing-masing kedalaman tersebut. (lihat Gambar P13-4)
- 13-5 a. Dari hasil pada soal 13-4 tentukan perkiraan besarnya harga N' (angka penetrasi baku yang telah dikoreksi) untuk pembangunan pondasi dangkal (pada masing-masing kedalaman tersebut).
- b. Coba lihat Gambar 11-30. Bila dimensi pondasi adalah 5 x 5 ft (bentuk bujur sangkar), berapa besar beban yang diizinkan pada kolom di atas pondasi tersebut? sebagai catatan, dasar pondasi diletakkan pada kedalaman 5 ft dari permukaan tanah. Penurunan tanah (settlement) maksimum yang diizinkan adalah 1,0 inch.



Gambar P13-4

- 13-6 Harga undrained shear strength (kekuatan geser undrained) suatu tanah lempung yang diperoleh dari uji geser vane (uji dilakukan langsung dilapangan) adalah 44 kN/m². Harga indeks plastis tanah lempung tersebut adalah 22. Berapa kira-kira

- besarnya harga yang sudah dikorelasi dari c_u untuk keperluan perencanaan di tanah tersebut? (**Catatan** : gunakan harga yang telah dikoreksi menurut Bjerrum).
- 13-7 Harga rata-rata perlawanan ujung conus pada kedalaman tertentu di tanah pasir adalah 205 kN/m^2 . Tentukan perkiraan harga modulus Young tanah tersebut pada kedalaman ini.
- 13-8 Pada waktu pelaksanaan eksplorasi tanah digunakan alat pengambil sepanjang 4,5 ft. Bila panjang batuan yang “tertangkap” hanya 3,2 ft. Tentukan rasio perolehan batuan tersebut.

NOTASI

Simbol-simbol berikut telah digunakan dalam bab ini

Symbol	Keterangan
A	luas
A'	konstanta
A_r	rasio luas
C_N	faktor koreksi untuk angka penetrasi baku
c	kohesi
c_u	kekuatan geser <i>undrained</i> (undrained shear strength) dari tanah lempung
D	kedalaman
D_i, D_o	diameter dalam dan diameter luar dari tabung sampler
D_r	kepadatan relatif
E	modulus Young
F	gaya normal
G	modulus geser
hl	kedalaman
K_o	koefisien tekanan tanah horizontal pada kondisi “at-rest”
N	angka penetrasi baku
N'	angka penetrasi baku setelah dikoreksi
N_F	angka penetrasi baku dari pengukuran lapangan
P_o	tekanan
q_c	perlawanan conus

q_u	kekuatan tekanan tak tersekap (unconfined compr. strength)
RQD	rock quality designation
S	gaya geser
S_b	jumlah tingkat (lantai) gedung
V_o	volume
Z_b	kedalaman bor

Yunani

γ	berat volume tanah
Δp	perubahan tekanan, juga kenaikan tegangan dalam tanah
ΔV	perubahan volume
μ	ratio Poisson
σ	tegangan normal
σ'	tegangan vertikal efektif
τ	kekuatan geser
Φ	sudut geser dalam dari tanah

Referensi

- American Association of State Highway and Transportation Officials (1967). *Manual of Foundation Investigation*, National Press Building, Washington, D.C.
- American society of Civil Engineers (1972). "Subsurface Investigation for Design and Construction of Foundations of Buildings, Part I, " *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.98, No.SMS, 481-490.
- Deere, D.U. (1963). Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes, " *Felsmechanik und Ingeniergeologie*", Vol.1, No.1, 16-22.
- Gibbs, H.J, and Holtz, W.G. (1957) . "Research on Determining the Density of Sand by Spoon Penetration Testing," *Proceedings*, 4th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1,35-39, london.
- Menard, L. (1965). "Rules for Conclusion of Bearing Capacity and Foundation Settlement Based on Pressuremeter Tests, " *Processing*, 6th International

- Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, montreal, Canada, Vol.2, 295-299.
- Osterberg, J.O. (1952). "New Piston-Type Sampler, *Engineering News Solutuion*, April 24.
- Pectk, R.B, Hanson, W.E, and Thornburn, T.H. (1974). *Foundation Engineering*, 2nd end, wiley, New York.
- Schmertmann, J.H. (1970). "Static Cone to Compute static Settlement Over Sand, "Journal of the Soil Mechanics and Foundations Devision, ASCE, Vol.96, No.SM3, 1011-1043.
- Sowers, G.B, and Sowers, G.F. (1970). *Introductory Soil Mechanics and Foundations*, Macmillan, New York.
- Suhardjito Pradoto, (1989). "Teknik Pondasi". Lab. Geoteknik PAU. ITB.
- Suyono Sosrodarsono, (1988). "Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi". Terjemahan, Pradnya Paramita Jakarta
- Trofimenkov, J.G. (1974). "General Reports: Estern Europe, *Proseedings*, European Symposium of Penetration Testing, Stockholm, Swedan, Vol.2.1, 24-39.

Supplementary Reference for Further Study

- American Association of State Highway and Tranportation Officials (1978). *Standart Specifications for Tranportation Materials and Methods of Sampling and Testing*, Part II, Washington, D.C.
- Brown, R.E. (1977). "Drill Rod Influence on Standard Penetration Test, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.103, No.GT11, 1332-1336
- Hvorslev, M.J. (1949). *Subsoil Exploration and Sampleng of Soils for Civil Engineering Purposes*, Waterways Experiment Station, Vicksuvs, Mississipi.
- Marcuson, W.F, III and Bieganousky, W.A. (1977). "SPT and Relative Density of Coarse Sands, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT11, 1295-1310

Lampiran

Faktor-faktor Konversi**A.1 Faktor konversi dari satuan Inggris ke satuan SI**

Panjang	1 ft	= 0,3048 m
	1 ft	= 30,48 cm
	1 ft	= 304,8 mm
	1 in.	= 0,0254 m
	1 in.	= 2,54 cm
	1 in.	= 25,4 mm
Luas	1 ft ²	= 929,03 x 10 ⁻⁴ m ²
	1 ft ²	= 929,03 cm ²
	1 ft ²	= 929,03 x 10 ² mm ²
	1 in. ²	= 6,452 cm ²
	1 in. ²	= 645,16 cm ²
Volume	1 ft ³	= 28,317 x 10 ⁻³ m ³
	1 ft ³	= 28,317 cm ³

	$1 \text{ in.}^3 = 16,387 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
	$1 \text{ in.}^3 = 16,387 \text{ cm}^3$
Modulus	$1 \text{ in.}^3 = 0,16387 \times 10^5 \text{ mm}^3$
Bagian	$1 \text{ in.}^3 = 0,16387 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
Koefisien	$1 \text{ ft/menit} = 0,3048 \text{ m/menit}$
	$1 \text{ ft/menit} = 30,48 \text{ cm/menit}$
	$1 \text{ ft/menit} = 304,8 \text{ mm/menit}$
	$1 \text{ ft/detik} = 0,3048 \text{ m/detik}$
	$1 \text{ ft/detik} = 304,8 \text{ mm/detik}$
	$1 \text{ in./menit} = 0,0254 \text{ m/menit}$
	$1 \text{ in./detik} = 2,54 \text{ cm/detik}$
	$1 \text{ in./detik} = 25,4 \text{ mm/menit}$
Koefisien	$1 \text{ in.}^{-2}/\text{detik} = 6,452 \text{ cm}^3/\text{detik}$
Konsolidasi	$1 \text{ in.}^{-2}/\text{detik} = 20,346 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{tahun}$
	$1 \text{ ft}^2/\text{detik} = 929,03 \text{ cm}^2/\text{detik}$
Gaya	$1 \text{ lb} = 4,448 \text{ N}$
	$1 \text{ lb} = 4,448 \times 10^{-3} \text{ N}$
	$1 \text{ lb} = 0,4536 \text{ kgf}$
	$1 \text{ kip} = 4,448 \text{ kN}$
	$1 \text{ U.S. ton} = 8,896 \text{ kN}$
	$1 \text{ lb} = 0,4536 \times 10^{-3} \text{ ton metrik}$
	$1 \text{ lb/ft} = 14,593 \text{ N/m}$
Tegangan	$1 \text{ lb/ft}^2 = 47,88 \text{ N/m}^2$
	$1 \text{ lb/ft}^2 = 0,04788 \text{ kN/m}^2$
	$1 \text{ U.S. ton/ft}^2 = 95,76 \text{ kN/m}^2$
	$1 \text{ kip/ft}^2 = 47,88 \text{ kN/m}^2$
	$1 \text{ lb/in.}^2 = 6,895 \text{ kN/m}^2$
Berat Volume	$1 \text{ lb/ft}^3 = 0,1572 \text{ kN/m}^3$

	1 lb/in. ³	= 271,43 kN/m ³
Momen	1 lb-ft	= 1,3558 N . m
	1 lb-in.	= 0,11298 N . m
Energi	1 ft-lb	= 1,3558 N . m
Momen	1 in. ⁴	= 0,4162 x 10 ⁶ mm ⁴
Inersia	1 in. ⁴	= 0,4162 x 10 ⁻⁶ m ⁴

A.2 Faktor konversi dari satuan SI ke satuan Inggris

Panjang	1 m	= 3,281 ft
	1 cm	= 3,281 x 10 ⁻² ft
	1 mm	= 3,281 x 10 ⁻³ ft
	1 m	= 39,37 in.
	1 cm	= 0,3937 in.
	1 mm	= 0,03937 in.
Luas	1 m ²	= 10,764 ft ²
	1 cm ²	= 10,764 x 10 ⁻⁴ ft ²
	1 mm ²	= 10,764 x 10 ⁻⁶ ft ²
	1 m ²	= 1550 in. ²
	1 cm ²	= 0,155 in. ²
	1 mm ²	= 0,155 x 10 ⁻² in. ²
Volume	1 m ³	= 35,32 ft ³
	1 cm ³	= 35,32 x 10 ⁻⁴ ft ³
	1 m ³	= 610.23,4 in. ³
	1 cm ³	= 0,061023 in. ³
Gaya	1 N	= 0,2248 lb
	1 kN	= 224,8 lb
	1 kgf	= 2,2046 lb
	1 kN	= 0,2248 kip
	1 kN	= 0,1124 U.S. ton

$$\begin{aligned} 1 \text{ metric ton} &= 2204,6 \text{ lb} \\ 1 \text{ N/m} &= 0,0685 \text{ lb/ft} \end{aligned}$$