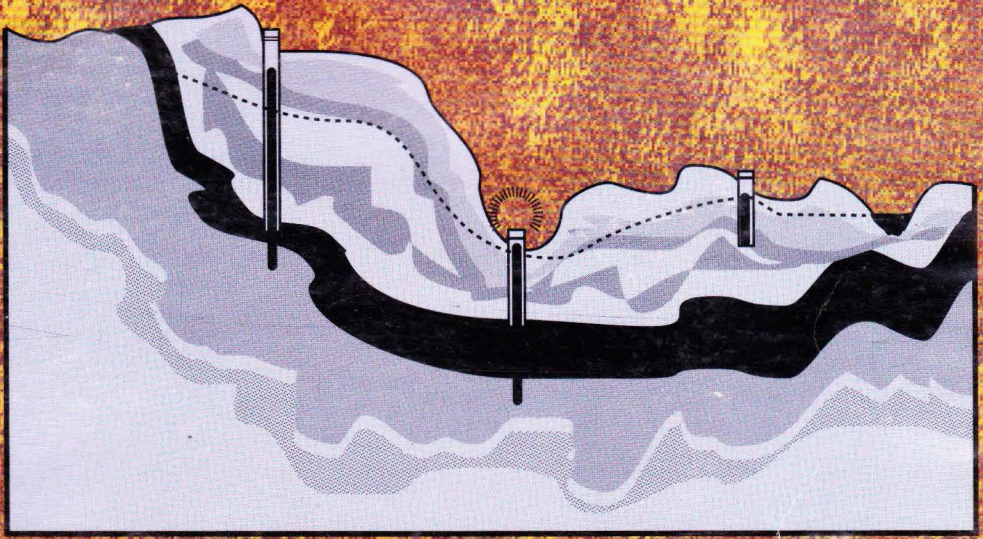




Ir. G. DJATMIKO SOEDARMO
Ir. S. J. EDY PURNOMO



MEKANIKA TANAH

1

MEKANIKA TANAH

1

Ir. G. Djatmiko Soedarmo
Ir. S. J. Edy Purnomo



PENERBIT KANISIUS

Kata Pengantar

Dengan mengucapkan puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan kurnia-Nya kepada saya, maka saya bertekad dan tergerak hati saya untuk menyusun buku Mekanika Tanah ini yang terbagi menjadi dua jilid, dengan harapan semoga dapat berguna bagi para pemakainya. Pembahasan dan bahasa Indonesia yang digunakan sangat sederhana yang disertai dengan bahasa Inggris sebagai penjelas sesuai dengan aslinya.

Oleh karena itu saya berharap mudah-mudahan penerbitan ulang nanti akan dapat diadakan perubahan-perubahan dan penyempurnaan seperlunya sesuai dengan perkembangan ilmu Mekanika Tanah.

Penerbitan pertama ini merupakan kenang-kenangan pribadi penulis bagi keluarga dan istri tercinta dalam memperingati ulang pernikahan yang ke-39.

Dalam penerbitan pertama ini tidak lupa saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada yang telah membantu saya khususnya kepada:

1. Ananda Ir. Agustinus Didi Purwodarminto yang telah membantu menggambar.
2. Ananda Drs. Ec. Yohanes Paulus Heri Sugiartono yang telah membantu mengetik naskah buku ini.

Semoga penerbitan pertama ini dapat memenuhi harapan dan berguna bagi mereka yang memerlukan dan berminat mau.

Malang, 16 Juni 1993.

Penulis

Daftar Isi

KATA PENGANTAR	5
DAFTAR ISI	7
KATA PENDAHULUAN	9
BAB I Sifat-sifat elementer tanah	11
1.1. Pendahuluan	11
1.2. Sejarah perkembangan mekanika tanah	11
1.3. Ruang lingkup mekanika tanah	12
BAB II Sifat-sifat umum tanah	15
2.1. Definisi	15
2.2. Hubungan-hubungan antara jumlah butir, air dan udara dalam tanah	16
2.3. Hubungan-hubungan fungsional	21
2.4. Batas-batas kekentalan/konsistensi tanah	32
2.5. Percobaan-percobaan di laboratorium	36
BAB III Klasifikasi tanah	59
3.1. Pendahuluan	59
3.2. Sistem klasifikasi tanah	60
3.3. Karakteristik dasar tanah	75
3.4. Percobaan-percobaan di laboratorium	80

BAB IV	Stabilisasi dan pemadatan tanah	101
4.1.	Pendahuluan	101
4.2.	Stabilisasi tanah	101
4.3.	Macam-macam stabilisasi lapisan tanah dasar	102
4.4.	Pemadatan tanah	116
4.5.	Teori pemadatan	117
4.6.	Percobaan-percobaan pemadatan	117
4.7.	Pelaksanaan pemadatan di lapangan	142
BAB V	Metoda rasio daya dukung California	145
5.1.	Pendahuluan	145
5.2.	Definisi	145
5.3.	Percobaan-percobaan C.B.R.	147
5.4.	Jenis-jenis C.B.R.	153
5.5.	Beberapa cara menaksir dan menentukan nilai C.B.R.	155
BAB VI	Hidrolika tanah	166
6.1.	Air tanah	166
6.2.	Air kapiler	174
6.3.	Kondisi-kondisi tekanan dalam tanah	179
6.4.	Permeabilitas dan rembesan	188
6.5.	Rembesan melalui beberapa lapisan endapan tanah	226
6.6	Gaya rembesan.....	230
6.7.	Pengaruh gaya rembesan terhadap stabilitas tanah	231
6.8.	Faktor keamanan terhadap bahaya pengapungan	232
6.9.	Piping dalam tanah karena aliran sekitar turap	236
6.10.	Teori rangkak (creep) untuk rembesan di bawah bendungan	237
6.11.	Perencanaan konstruksi berdasar teori Bligh	243
6.12.	Rumus-rumus dasar pengaliran dalam tanah	250
6.13.	Jaring-jaring aliran (<i>Flow nets</i>)	257
DAFTAR PUSTAKA	301
DAFTAR KONVERSI	303

Kata Pendahuluan

Setiap kurun waktu mempunyai ciri-ciri khas sendiri, baik dalam bidang sosial, sejarah, ekonomi, teknologi dan lain-lain. Sejalan dengan pesatnya perkembangan teknologi, lebih-lebih di bidang komputer, bidang studi teknik sipil juga mengalami pertumbuhan yang cukup pesat. Sebagai contoh telah diciptakannya Fondasi Sistem Cakar Ayam oleh almarhum Prof. Dr. Ir. Sediyatmo, sambungan tiang dengan pasak JHS oleh Ir. Johan Hasiholan Simanjuntak, Fondasi Sarang Laba-laba oleh Ir. R. Soetjipto dan Ir. Riyantori serta Landasan Putar Bebas Hambatan 80 (LPBH 80) oleh Ir. Tjokorda Raka Sukawati yang digunakan untuk memutar balok penyangga jembatan layang jalan raya Cawang – Tanjung Priok yang oleh Bapak Presiden Soeharto disebut Jembatan Sosrobahu.

Kita patut merasa bangga sebagai bangsa Indonesia bahwa kita telah memiliki putra-putra yang sudah berkarya besar demikian demi kejayaan nusa dan bangsa Indonesia. Tergugah oleh karya-karya tersebut, tergeraklah hati saya yang sudah lama terpendam untuk menulis buku Mekanika Tanah yang tersusun secara sederhana ini. Dengan penulisan ini telah mendorong saya untuk lebih banyak belajar dan mendalami Ilmu Mekanika Tanah yang mulai berkembang pada abad ke-20.

Seperti kita ketahui bahwa Ilmu Mekanika Tanah mulai terkenal dan berkembang setelah Bapak Mekanika Tanah Dr. Ir. Karl Von Terzaghi dan pakar-pakar Ilmu Mekanika Tanah lainnya berhasil menemukan teori-teori baru dan menerapkannya dalam praktek.

Ilmu Mekanika Tanah merupakan ilmu dasar khusus teknik sipil, oleh karena itu untuk mendalami Ilmu Mekanika Tanah memerlukan ketekunan dan keuletan serta minat khusus.

Dengan terbentuknya Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI), maka pakar-pakar Ilmu Mekanika Tanah melalui Himpunan tersebut dapat saling memberi informasi langsung maupun tidak langsung melalui seminar, simposium, lokakarya dan lain-lain untuk mendalami, menekuni dan mengembangkan Ilmu Mekanika Tanah di Indonesia.

Semoga hal ini dapat terwujud demi kemajuan Bangsa dan Negara Republik Indonesia tercinta ini.

Malang, 16 Juni 1993.

Bab I

Sifat-sifat Elementer

1.1. PENDAHULUAN

Tanah dan rekayasa tanah.

Dalam ilmu mekanika tanah yang disebut "*tanah*" ialah *semua endapan alam yang berhubungan dengan teknik sipil, kecuali batuan tetap*. Batuan tetap menjadi ilmu tersendiri yaitu mekanika batuan (*rock mechanics*). Endapan alam tersebut mencakup semua bahan, dari tanah lempung (*clay*) sampai berangkal (*boulder*). Rekayasa tanah, mekanika tanah atau geoteknik merupakan salah satu ilmu termuda perkembangannya dalam teknik sipil.

Pada tahun 1948 Karl Von Terzaghi seorang sarjana teknik sipil Jerman/Austria berpendapat bahwa: *Mekanika tanah adalah pengetahuan yang menerapkan kaidah mekanika dan hidrolika untuk memecahkan persoalan-persoalan teknik sipil yang berhubungan dengan endapan dan kumpulan butir-butir padat yang terurai/tidak terpadu (uncosolidated) yang dihasilkan oleh proses penghancuran (disintegration) secara alami dan kimiawi batubatuan*. Oleh karena itu, Terzaghi disebut sebagai Bapak mekanika tanah, karena jasanya memelopori pengembangan ilmu mekanika tanah. Beliau lahir di Praha pada tanggal 2 Oktober 1883 dan meninggal dunia pada tanggal 25 Oktober 1963 di Winchester, Massachusetts U.S.A.

1.2. SEJARAH PERKEMBANGAN MEKANIKA TANAH

Pengetahuan tentang penggunaan tanah sudah ada sejak zaman pra sejarah. Manusia pada zaman itu mulai membangun dinding-dinding rumah tempat tinggal dan jalan untuk transportasi yang memakai tanah.

Kemudian pada zaman primitif orang menggunakan tanah sebagai bahan untuk fondasi dan konstruksi lainnya yang tidak dibakar. Pengetahuan tentang tanah sebagai fondasi dan jalan diperoleh dengan cara coba-coba (*trial and error*).

Baru pada permulaan abad ke-17 sarjana teknik militer Perancis turut menyumbangkan ilmunya dalam mekanika tanah secara empiris dan analitis perihal tekanan tanah pada dinding penahan untuk perencanaan benteng-benteng/kubu-kubu pertahanan. Pada tahun 1715 Perancis mendirikan Departemen Jalan dan Jembatan; dan pada tahun 1747 mulai membuka sekolah jalan dan jembatan yang terkenal di seluruh dunia saat itu, (*Ecole des ponts et chaussees*). Yang terbesar andilnya ialah Charles Augustin Coulomb 1776 yang telah memancang tonggak teori tekanan tanah pada zamannya. Selanjutnya ilmu mekanika tanah mulai berkembang dan terus berkembang hingga kini.

Sarjana-sarjana yang telah berjasa dan terkenal dalam ilmu mekanika tanah antara lain:

- | | |
|--|---------------|
| a. Charles Augustin Coulomb (Perancis) | (1736 – 1806) |
| b. Jean Victor Poncelet (Perancis) | (1788 – 1867) |
| c. William J. Macqorn Rankine | (1820 – 1872) |
| d. Karl Culmann | (1821 – 1881) |
| e. Otto Mohr | (1835 – 1918) |
| f. J.V. Boussinesq | (1842 – 1929) |
| g. Karl Von Terzaghi | (1883 – 1963) |
| h. Rebhan | 1971 |
| i. Nathan M. Newmark | 1885 |
| j. Muller-Breslau | 1906 |
| k. A. Atterberg (Swedia) | 1911 |
| l. Fellenius, W. (Swedia) | 1913 |
| m. Leo Casagrande dan Krey | 1918 |

dan masih banyak lagi yang tidak kami sebutkan di sini.

1.3. RUANG LINGKUP MEKANIKA TANAH

Ruang lingkup mekanika tanah sangat luas. Sarjana-sarjana teknik sipil mempunyai banyak masalah-masalah penting dengan tanah. Antara lain menguji tanah dan mengklasifikasi serta mengetahui sifat-sifat tanah

alami dan macam-macamnya. Ilmu Mekanika Tanah khususnya dapat membantu memecahkan problema-problema dalam teknik sipil antara lain:

1. Perencanaan dan pelaksanaan fondasi.

Fondasi merupakan unsur penting untuk semua bangunan teknik sipil. Setiap bangunan: Gedung, jembatan, jalan raya, terowongan, kanal atau bendungan dibangun di atas permukaan tanah. Dalam hal ini perlu mengetahui daya dukung tanah, pola distribusi tegangan dalam tanah di bawah daerah pembebanan, kemungkinan penurunan fondasi, pengaruh/dampak air tanah dan getaran dan lain-lain.

Macam-macam bentuk fondasi yang sesuai antara lain:

- a. Fondasi dangkal
- b. Fondasi tiang
- c. Fondasi sumuran dll.

Yang tergantung dari tanah dasar, beban dan air tanah yang terdapat pada tanah tersebut. Pengetahuan tentang penyusutan dan pengembangan tanah di bawah fondasi tersebut juga sangat perlu.

2. Perencanaan perkerasan.

Perkerasan lentur maupun perkerasan kaku dalam pelaksanaannya tergantung tanah dasar yang bersangkutan. Tebal perkerasan dan komponennya tergantung sifat-sifat tanah dasar yang akan ditetapkan sebelum perencanaan dibuat. Pengetahuan tentang teknik perbaikan tanah seperti kekuatan dan stabilitas tanah sangat banyak membantu dalam melaksanakan perkerasan pada tanah jelek. Untuk mengetahui kekuatan tanah biasanya digunakan data-data: C.B.R., pemadatan dan daya dukung.

3. Perencanaan bangunan di bawah tanah dan dinding penahan.

Perencanaan dan pembangunan bangunan di bawah tanah dan dinding penahan merupakan tahap penting untuk teknik sipil. Contoh bangunan di bawah tanah termasuk di antaranya: Terowongan, gedung di bawah tanah, bangunan drainase dan jaringan pipa. Contoh dinding penahan antara lain: dinding penahan tanah gravitasi, sekat penahan tanah berjangkar dan bendungan pengelak. Pengetahuan tentang interaksi struktur tanah dan pembebanan tanah sangat penting untuk perencanaan tersebut.

4. Perencanaan penggalian dan penimbunan.

Jika permukaan tanah tidak datar, komponen berat tanah condong bergerak ke bawah dan mungkin stabilitas struktur tanah terganggu. Pengetahuan tentang kuat geser dan hubungan sifat-sifat tanah perlu untuk merencanakan kemiringan dan tinggi timbunan atau galian.

Kemungkinan rembesan air tanah akan mengurangi kekuatan tanah ketika sedang dilakukan penggalian. Kadang-kadang mungkin perlu mengeringkan air tanah untuk mempertahankan kekuatan tanah yang ada dan mengurangi gaya rembesan. Untuk menjaga keruntuhan tanah galian juga diperlukan dinding penguat lateral atau turap-turap pada kedalaman galian tertentu.

5. Perencanaan bendungan tanah.

Untuk membangun bendungan tanah memerlukan sangat banyak pengetahuan mekanika tanah. Hal-hal yang perlu diketahui ialah sifat-sifat tanah alami antara lain: Indeks kepadatan, sifat-sifat plastisitas dan berat spesifik, distribusi ukuran butir (gradasi) tanah, rembesan, konsolidasi dan sifat-sifat pemadatan serta parameter kuat geser dalam kondisi bermacam-macam pengeringan tanah.

Menentukan kadar air optimum dan berat isi kering maksimum pada proses pemadatan, sangat penting bagi aspek perencanaan.

Sifat-sifat konsolidasi membantu meramalkan penurunan bendungan dengan konsekuensi mereduksi tegangan air pori. Pengaruh rembesan penting diketahui untuk mengamankan kemantapan lereng tubuh bendungan.

Setelah kita ketahui perilaku atau sifat-sifat tanah tersebut, barulah kita dapat mengambil keputusan apakah bangunan tersebut layak dibangun atau tidak tanpa penambahan biaya, misalnya dengan perbaikan tanah dan konstruksi-konstruksi khusus. Sebab dengan adanya perbaikan tanah, konstruksi khusus akan menambah besarnya biaya.

Bab II

Sifat-sifat Umum Tanah

2.1. DEFINISI

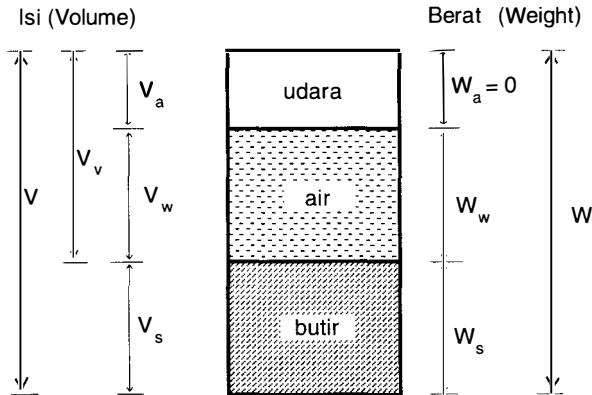
Definisi dan istilah-istilah yang dipakai adalah sbb.:

Sebutan		Notasi	Definisi
Bhs. Indonesia	Bhs. Inggris		
Berat isi tanah	<i>Unit weight or density</i>	γ	Perbandingan antara berat
Berat isi butir	<i>Unit weight of particles</i>	γ_s	Perbandingan antara berat butir dengan isi butir
Berat isi air	<i>Unit weight of water</i>	γ_w	Perbandingan antara berat air dengan isi air
Berat isi tanah jenuh air	<i>Saturated density</i>	γ_{sat}	Perbandingan antara berat tanah jenuh air dengan isi tanah seluruhnya
Berat isi tanah bawah	<i>Submerged density</i>	γ_{sub}	Perbandingan antara berat butir tanah basah dengan isi tanah seluruhnya
Berat isi tanah kering	<i>Dry density</i>	γ_d	Perbandingan antara berat butir tanah kering dengan isi tanah seluruhnya
Berat jenis/berat spesifik	<i>Specific gravity</i>	G / G_s	Perbandingan antara berat isi butir tanah dengan berat isi air

Kadar air	<i>Moisture/water content</i>	m/w	Perbandingan antara berat air dengan berat butir tanah
Angka pori	<i>Void ratio</i>	e	Perbandingan antara isi pori dengan isi tanah seluruhnya
Porositas	<i>Porosity</i>	n	Perbandingan antara isi pori dengan isi tanah' seluruhnya
Derajat kejenuhan	<i>Degree of saturation</i>	S_r	Perbandingan antara isi air massa tanah dengan isi pori seluruhnya
Persentase pori udara	<i>Percentage air voids</i>	n_a	Perbandingan antara isi pori udara dengan isi tanah seluruhnya
Kadar udara	<i>Air content</i>	a_c	Perbandingan antara isi pori udara dengan isi pori
Indeks kepadatan atau kepadatan relatif atau derajat kepadatan	<i>Density index or relative density or degree of density</i>	I_D/D_r	Perbandingan antara selisih angka pori maksimum dan angka pori alami dengan selisih angka pori maksimum dan angka pori minimum

2.2. HUBUNGAN-HUBUNGAN ANTARA JUMLAH BUTIR, AIR DAN UDARA DALAM TANAH

Untuk mendapatkan hubungan antara berat isi, kadar air, angka pori dan lain-lain, maka kita anggap bahwa massa tanah tersebut dalam sistem tiga tingakt yaitu: Udara, air dan butir-butir padat seperti tertera pada gambar 2.1.



Gb. 2.1. Penampang struktur tanah dalam sistem tiga tingkat.

Dalam hal ini:

- V = Isi (*Volume*)
- V_a = Isi udara (*Volume of air*)
- V_w = Isi air (*Volume of water*)
- V_v = Isi pori/rongga (*Volume of void*)
- V_s = Isi butir-butir padat (*Volume of solid*)
- W = Berat (*Weight*)
- W_a = Berat udara (*Weight of air*)
- W_w = Berat air (*Weight of water*)
- W_s = Berat butir-butir padat (*Weight of solid*)

Dari gambaran tersebut dapat diperoleh rumus-rumus sbb.:

2.2.1. Kadar air (*Moisture content/water content*)

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.1.a)$$

Kadar air dinyatakan dalam persen.

$$w = \frac{e \cdot S_r}{G} \dots\dots\dots (2.1.b)$$

$$w = \frac{e \cdot S_r}{W_s} \dots\dots\dots (2.1.c)$$

2.2.2. Angka pori (*Void ratio*)

$$e = \frac{V_v}{V_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.2.a)$$

Angka pori dinyatakan dalam persen.

$$e = \frac{\gamma_w \cdot G(1+w)}{\gamma} - 1 \dots\dots\dots (2.2.b)$$

2.2.3. Porositas (*Porosity*)

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \dots\dots\dots (2.3.a)$$

Porositas dinyatakan dalam persen.

$$n = \frac{e}{1+e} \dots\dots\dots (2.3.b)$$

2.2.4. Derajat kejenuhan (*Degree of saturation*)

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \dots\dots\dots (2.4)$$

Derajat kejenuhan dinyatakan dalam persen.

2.2.5. Berat isi tanah alami/asli (*Natural density*)

$$\gamma = \frac{W}{V} \dots\dots\dots (2.5.)$$

2.2.6. Berat isi tanah kering (*Dry density*)

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \dots\dots\dots (2.6.a.)$$

$$\gamma_d = \frac{100\gamma}{100+w} \dots\dots\dots (2.6.b)$$

w = dalam persen.

$$\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1+e} \dots\dots\dots (2.6.c)$$

2.2.7. Berat isi tanah jenuh (*Saturated density*)

$$\gamma_{sat.} = \frac{W_w + W_s}{V} \dots\dots\dots (2.7.a)$$

$$\gamma_{sat.} = \frac{W}{V} \dots\dots\dots (2.7.b)$$

2.2.8. Berat isi tanah basah (*Submerged/wet density*)

$$\gamma_{sub} = \gamma^l = \gamma_{sat} - \gamma_w \dots\dots\dots (2.8.)$$

2.2.9. Indeks kepadatan atau kepadatan relatif

$$I_D = D_r = \frac{e_{maks.} - e}{e_{maks.} - e_{min.}} \dots\dots\dots (2.9.a)$$

Biasanya dinyatakan dalam persen.

Dalam hal ini:

e = angka pori alami endapan/deposit

$e_{maks.}$ = angka pori terbesar yang dapat dicapai di laboratorium oleh contoh tanah tersebut (angka pori dalam keadaan paling tidak padat)

$e_{min.}$ = angka pori terkecil yang dapat dicapai di laboratorium oleh contoh tanah tersebut (angka pori dalam keadaan paling padat).

Harga $I_D = D_r = 0$, apabila $e = e_{maks.}$

Harga $I_D = D_r = 1$, apabila $e = e_{min.}$

$$I_D = D_r = \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{dmin.}}{\gamma_{dmaks.} - \gamma_{dmin.}} \right] \left[\frac{\gamma_{dmaks.}}{\gamma_d} \right] \dots\dots\dots (2.9.b)$$

Dalam hal ini:

γ_d = berat isi tanah kering

$\gamma_{dmaks.}$ = berat isi tanah kering maksimum kondisi padat

$\gamma_{dmin.}$ = berat isi tanah kering minimum kondisi lepas.

Harga $I_D = D_r = 0$, apabila $\gamma_d = \gamma_{dmin.}$

Harga $I_D = D_r = 1$, apabila $\gamma_d = \gamma_{dmaks.}$

Tabel 2.1. Deskripsi kualitas endapatan tanah berbutir.

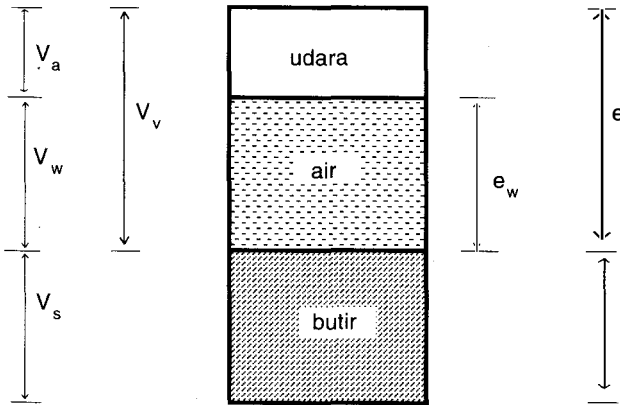
Kepadatan relatif (%)	Deskripsi endapatan tanah
0 – 15	Sangat lepas
15 – 50	Lepas
50 – 70	Sedang
70 – 85	Padat
85 – 100	Sangat padat

Tabel 2.2. Angka pori, kadar air dan berat isi tanah kering untuk berapa jenis tanah dalam keadaan.

Jenis tanah	Angka pori e	Kadar air alami dalam keadaan jenuh %	Berat isi tanah kering γ_d	
			lb/ft ³	kN/m ³
Pasir lepas seragam	0,80	30	92	14,50
Pasir padat seragam	0,45	16	116	18
Pasir kelanauan lepas berbutir tajam/bersudut	0,65	25	102	16
Lempung kaku	0,60	21	108	17
Lempung lunak	0,90 – 1,40	30 – 50	73 – 93	11,50 – 14,50
Loess	0,90	25	86	13,50
Lempung organik lunak	2,50 – 3,20	90 – 120	38 – 51	6 – 8
Tanah glasial	0,30	10	134	21

2.3. HUBUNGAN-HUBUNGAN FUNGSIONAL

1. Hubungan antara: e , G , w dan S_r .



$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{e_w}{e}$$

$$e_w = e \cdot S_r$$

e_w = angka pori air

Dalam keadaan jenuh:

$$e_w = e$$

Gb. 2.2. Penampang struktur tanah dalam sistem tiga tingkat.

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{e_w \cdot \gamma_w}{1 \cdot \gamma_s}$$

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \text{ atau } \gamma_s = G \cdot \gamma_w$$

$$w = \frac{e_w \cdot \gamma_w}{G \cdot \gamma_w} = \frac{e_w}{G}$$

$$w = \frac{e \cdot S_r}{G}$$

$$e = \frac{w \cdot G}{S_r}$$

Dalam keadaan jenuh (saturated):

$$S_r = 100\% = 1 \text{ dan } w = w_{\text{sat}}$$

$$w_{\text{sat}} = \frac{e}{G}$$

$$e = w_{\text{sat}} \cdot G$$

2. Hubungan antara n_a , e dan S_r

$$n_a = \frac{V_a}{V} \times 100\% \quad n_a = \text{persentase pori udara}$$

Lihat gambar 2.2.

$$V_a = V_v - V_w = e - e_w$$

$$V = V_a + V_v = 1 + e$$

$$n_a = \frac{e - e_w}{1 + e} \quad e_w = e \cdot S_r$$

$$n_a = \frac{e(1 - S_r)}{1 + e}$$

3. Hubungan antara n_a , a_c dan n .

$$a_c = \frac{V_a}{V_v} \quad a_c = \text{kadar udara (air content)}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \quad v = \frac{V_v}{n}$$

$$n_a = \frac{V_a}{V} = \frac{n V_a}{V_v}$$

$$n_a = n \cdot a_c$$

4. Hubungan antara γ_d , G dan e atau n .

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

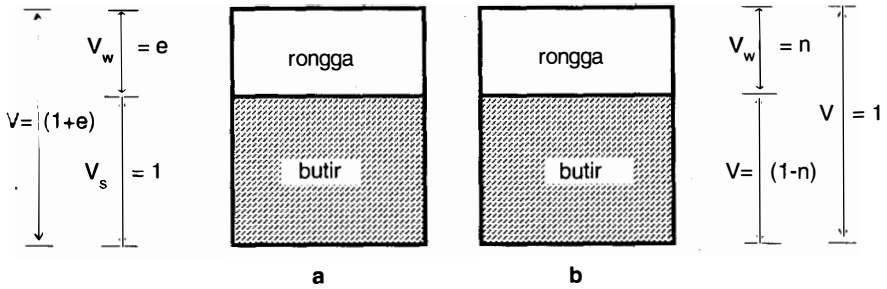
$$\gamma_d = \frac{\gamma_s \cdot V_s}{V} \rightarrow W_s = 1 \text{ dan } V = (1 + e)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s \cdot 1}{1 + e} \rightarrow \gamma_s = G \cdot \gamma_w$$

$$\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + e} \rightarrow e = \frac{G \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

$$\gamma_d = \frac{G}{1 + e}$$

$$\gamma_w = 1$$



Gb.2.3. Penampang struktur tanah dalam sistem dua tingkat.

Lihat (gambar 2.3.(b)).

$$V_s = (1 - n) \text{ dan } V = 1$$

$$\gamma_s = G \cdot \gamma_w$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s \cdot V_s}{V}$$

$$\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w (1-n)}{1}$$

$$\gamma_d = G \cdot \gamma_w (1-n) \rightarrow \gamma_w = 1$$

$$\gamma_d = G (1 - n)$$

5. Hubungan antara γ_{sat} , G dan e atau n .

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{\gamma_s V_s + \gamma_w V_w}{V}$$

Lihat gambar 2.3. (a).

$$V_s = 1, \quad V_w = e \text{ dan } V = 1 + e$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s \cdot 1 + \gamma_w \cdot e}{1 + e} = \frac{G \cdot \gamma + \gamma_w \cdot e}{1 + e}$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{(G + e) \cdot \gamma_w}{1 + e} \rightarrow \gamma_w = 1$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{G + e}{1 + e}$$

Lihat gambar 2.3.(b).

$$V_s = (1 - n), V_w = n \text{ dan } V = 1$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s V_s + \gamma_w V_w}{V} = \frac{\gamma_s (1 - n) + \gamma_w \cdot n}{1}$$

$$\gamma_{\text{sat}} = G \gamma_w (1 - n) + \gamma_w \cdot n \quad \gamma_w = 1$$

$$\gamma_{\text{sat}} = G(1 - n) + n$$

6. Hubungan antara γ , G , e dan S_r .

$$\gamma = \frac{w}{v} = \frac{\gamma_s V_s + \gamma_w V_w}{V}$$

Lihat gambar 2.3.(a).

$$V_s = 1, V_w = e_w \text{ dan } V = (1 + e)$$

$$\gamma = \frac{\gamma_s \cdot 1 + \gamma_w \gamma_w}{1 + e} \quad \gamma_s = G \cdot \gamma_w \text{ dan } e_w = e \cdot S_r$$

$$= \frac{G \cdot \gamma_w + \gamma_w \cdot e \cdot S_r}{1 + e} \quad \gamma_w = 1$$

$$= \frac{G + e \cdot S_r}{1 + e}$$

Apabila tanah dalam keadaan jenuh : $S_r = 100\% = 1$, maka

$$\gamma = \gamma_{\text{sat}} = \frac{G + e}{1 + e}$$

Apabila tanah dalam keadaan kering: $S_r = 0$, maka

$$\gamma = \gamma_d = \frac{G}{1 + e}$$

7. Hubungan antara γ' (γ_{sub}), G dan e .

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad \gamma' = \gamma_{\text{sub}} = \text{berat isi tanah (submerged density)}$$

$$\gamma' = \frac{(G + e)\gamma_w}{1 + e} - \gamma_w$$

$$\gamma' = \frac{(G+e)\gamma_w - 1(1+e)\cdot\gamma_w}{1+e}$$

$$\gamma' = \frac{G\gamma_w + e\cdot\gamma_w - \gamma_w - e\cdot\gamma_w}{1+e}$$

$$\gamma' = \frac{(G-1)\gamma_w}{1+e}$$

$$\gamma' = \frac{G-1}{1+e}$$

8. Hubungan antara γ_d , γ dan w .

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

$$1+w = 1 + \frac{W_w}{W_s}$$

$$1+w = \frac{W_s + W_w}{W_s} = \frac{W}{W_s}$$

$$W_s = \frac{W}{1+w}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W}{V(1+w)} \qquad \frac{W}{V} = \gamma$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \qquad w = \text{dalam bilangan pecahan (bukan dinyatakan dalam \%)}$$

9. Hubungan antara γ , γ_d dan n .
Lihat gambar 2.2.

$$(W_s)_{\text{sub}} = V_s \cdot \gamma_s - V_s \cdot \gamma_w$$

$$(W_s)_{\text{sub}} = 1 \cdot \gamma_s - 1 \cdot \gamma_w = \gamma_s - \gamma_w$$

$$(W_s)_{\text{sub}} = G \cdot \gamma_w - \gamma_w = (G-1)\gamma_w$$

$$\gamma = \frac{(W_s)_{\text{sub}}}{V} \quad V = 1 + e$$

$$\gamma = \frac{(G-1)\gamma_w}{1+e} = \frac{G \cdot \gamma_w}{1+e} - \frac{\gamma_w}{1+e}$$

$$\frac{G \cdot \gamma_w}{1+e} = \gamma_d \quad \text{dan} \quad \frac{1}{1+e} = 1-n$$

$$\gamma = \gamma_d - (1-n)\gamma_w$$

$$\gamma = \gamma_d - (1-n)$$

10. Hubungan antara γ , γ_{sat} , γ_d dan S_r .

$$\gamma = \frac{(G + e \cdot S_r)\gamma_w}{1+e}$$

$$\gamma = \frac{G \cdot \gamma_w}{1+e} + S_r \frac{e \cdot \gamma_w}{1+e}$$

$$\gamma = \gamma_d + S_r \left[\frac{(G+e)\gamma_w}{1+e} - \frac{G \cdot \gamma_w}{1+e} \right]$$

$$\gamma = \gamma_d + S_r (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_d)$$

11. Hubungan antara γ_d , G , w dan S_r .

$$\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1+e} \quad e = \frac{w \cdot G}{S_r}$$

$$\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + \frac{w \cdot G}{S_r}}$$

$$\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w \cdot S_r}{S_r + w \cdot G}$$

$$\gamma_d = \frac{G \cdot S_r}{S_r + w \cdot G}$$

Apabila tanah dalam keadaan jenuh: $S_r = 100\% = 1$, maka:

$$\gamma_d = \frac{G}{1 + w_{\text{sat}} \cdot G}$$

12. Hubungan antara γ_d , G , w dan n_a .

$$V = V_a + V_w + V_s$$

$$V = V_a + \frac{W_w}{\gamma_w} + \frac{W_s}{\gamma_s}$$

----- : V

$$1 = \frac{V_a}{V} + \frac{w \cdot W_s}{\gamma_w \cdot V} + \frac{W_s}{\gamma_s \cdot V}$$

$$\frac{W_s}{V} = \gamma_d$$

$$1 = \frac{V_a}{V} + \frac{w \cdot \gamma_d}{\gamma_w} + \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

$$\gamma_s = G \cdot \gamma_w$$

$$1 - \frac{V_a}{V} = \frac{w \cdot \gamma_d}{\gamma_w} + \frac{\gamma_d}{G \cdot \gamma_d}$$

$$1 - n_a = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \left(w + \frac{1}{G} \right)$$

$$\gamma_d = \frac{(1 - n_a) \gamma_w}{\gamma_w + \frac{1}{G}}$$

$$\gamma_d = \frac{(1 - n_a) G \cdot \gamma_w}{1 + w \cdot G}$$

$$\gamma_d = \frac{(1 - n_a) G}{1 + w \cdot G}$$

Contoh-contoh soal:

1. Suatu contoh tanah mempunyai porositas = 25% dan berat spesifik $G = 2,60$.

Tentukan:

- Berat isi tanah kering
- Berat isi tanah, jika : $S_r = 0,60$
- Derajat kejenuhan contoh tanah tersebut, jika kadar air = 10%
- Berat isi tanah basah efektif (*submerged density*).

Jawaban:

$$a. \gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + e} \qquad \gamma_w = 1 \text{ gram/cm}^3$$

$$\gamma_d = \frac{(2,60)(1)}{1 + e}$$

$$n = 25\% = 0,25$$

$$e = \frac{n}{1 - n} = \frac{0,25}{1 - 0,25} = 0,333$$

$$\gamma_d = \frac{2,60}{1 + 0,333} = 1,95 \text{ gr / cm}^3$$

$$b. S_r = 0,60$$

$$\gamma = \frac{G + e \cdot S_r}{1 + e}$$

$$\gamma = \frac{2,60 + (0,333)(0,60)}{1 + 0,333}$$

$$\gamma = 2,10 \text{ gr/cm}^3$$

$$c. e = \frac{w \cdot G}{S_r} \qquad w = 10\% = 0,10$$

$$S_r = \frac{w \cdot G}{e} = \frac{(0,10)(2,60)}{0,333} = 0,78$$

atau

$$S_r = 0,78 \times 100\% = 78\%$$

$$d. \gamma_{\text{sub}} = \frac{(G-1)\gamma_w}{1+e}$$

$$\gamma_{\text{sub}} = \frac{(2,60-1)(1)}{1+0,333} = 1,20 \text{ gr / cm}^3$$

2. Suatu contoh tanah asli mempunyai isi = 100 cm³ dengan berat = 200 gram. Setelah dikeringkan di dalam oven selama 24 jam, beratnya berkurang menjadi = 160 gram. Apabila berat spesifik G = 2,68, diminta untuk menghitung:
- Kadar air
 - Angka pori
 - Derajat kejenuhan tanah tersebut.

Jawaban:

- a. Berat tanah asli $W_s = 200$ gram
 Berat tanah kering $W_d = 160$ gram
 Berat air $W_w = W_s - W_d = 200 - 160 = 40$ gram

$$\text{Kadar air } w = \frac{W_w}{W_d}$$

$$w = \frac{40}{160} = 0,25 \quad \text{atau} \quad w = 0,25 \times 100\% = 25\%$$

$$b. \gamma = \frac{W_s}{V} = \frac{200}{100} = 2,00 \text{ gr / cm}^3$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} = \frac{2,00}{1+0,25} = 1,60 \text{ gr / cm}^3$$

atau

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V} = \frac{160}{100} = 1,60 \text{ gr / cm}^3$$

$$e = \frac{G \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{(2,68)(1)}{1,60} - 1 = 0,675$$

$$c. S_r = \frac{w \cdot G}{e} = \frac{(0,25)(2,68)}{0,675} = 0,993 \text{ atau } 99,30\%$$

3. Suatu endapan pasir di lapangan mempunyai porositas 34%. Untuk memperoleh indeks kepadatan/kepadatan relatif, pasir tersebut dikeringkan dan dipadatkan di dalam tabung dengan isi = 1.000 cm³. Dalam keadaan terlepas sebelum dipadatkan beratnya = 1.610 gram dan setelah dipadatkan di dalam tabung yang sama beratnya menjadi = 1.980 gr. Tentukan indeks kepadatannya, jika diketahui berat spesifik pasir tersebut G = 2,67.

Jawaban:

$$n = 34\% = 0,34$$

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0,34}{1-0,34} = \frac{0,34}{0,66} = 0,515$$

$$(\gamma_d)_{\text{maks}} = \frac{(W_d)_{\text{maks}}}{V} = \frac{1,980}{1,000} = 1,98 \text{ gr / cm}^3$$

$$(\gamma_d)_{\text{min}} = \frac{(W_d)_{\text{min}}}{V} = \frac{1,610}{1,000} = 1,61 \text{ gr / cm}^3$$

$$e_{\text{min}} = \frac{G \cdot \gamma_w}{(\gamma_d)_{\text{maks}}} - 1 = \frac{(2,67)(1)}{1,98} - 1 = 0,348$$

$$e_{\text{maks}} = \frac{G \cdot \gamma_w}{(\gamma_d)_{\text{min}}} - 1 = \frac{(2,67)(1)}{1,61} - 1 = 0,658$$

$$I_D = \frac{e_{\text{maks}} - e}{e_{\text{maks}} - e_{\text{min}}} = \frac{0,658 - 0,515}{0,658 - 0,348} = \frac{0,143}{0,310} = 0,4613$$

$$I_D = 0,4613 \times 100\% = 46,13\%$$

Soal-soal latihan:

1. Suatu contoh tanah mempunyai data-data sebagai berikut:

- Angka pori = 0,60
- Kadar air = 15%
- Berat spesifik = 2,60

Hitung:

- a. Porositas
 - b. Berat isi tanah basah
 - c. Berat isi tanah kering
 - d. Derajat kejenuhan.
2. Suatu timbunan dipadatkan dengan kadar air = 12% yang ditentukan dengan pertolongan tabung penggali (*core cutter*). Berat tabung kosong = 1.285 gram dan berat tabung berisi tanah penuh = 3.195 gram, isi tabung = 1.000 cm³.

Diminta untuk menghitung:

- a. Berat isi tanah asli
 - b. Berat isi tanah kering
 - c. Derajat kejenuhan tanah timbunan tersebut.
- Jika tanah timbunan menjadi jenuh ketika hujan, berapakah besar kadar air dan berat isi tanah jenuh tersebut? Diketahui berat spesifik = 2,70.
3. Suatu endapan tanah asli mempunyai berat lagi = 1,88 gr/cm³ dan kadar air = 5%. Tentukan jumlah air yang harus ditambahkan 1 m³ tanah agar kadar airnya menjadi 15%. Anggap angka pori dibiarkan tetap. Berapakah derajat kejenuhannya jika berat spesifik $G = 2,67$.
4. Berat isi pasir alami = 1,89 gr/cm³ dan kadar airnya 8%. Untuk menentukan indeks kepadatan pasir tersebut, pasir dikeringkan dan dimasukkan ke dalam tabung dengan isi = 300 cm³. Dalam keadaan lepas beratnya = 480 gram dan setelah dipadatkan dalam tabung yang sama beratnya menjadi 570 gram. Jika berat spesifik butiran $G = 2,66$, maka diminta untuk menghitung indeks kepadatan pasir tersebut.
5. Suatu tanah jenuh mempunyai berat isi kering = 16,2 kN/m³ jika kadar air = 20%, maka tentukan:
- a. Berat isi tanah jenuh
 - b. Berat spesifik tanah
 - c. Angka pori.

6. Diketahui data-data tanah sebagai berikut:
- Porositas = 0,45
 - Berat spesifik butir-butir tanah = 2,68
 - Kadar air = 10%
- Tentukan banyaknya air yang perlu ditambahkan untuk $10/m^3$ agar tanah menjadi jenuh.
7. Dalam kondisi alami tanah lengas/lembab mempunyai isi = $9,34 \text{ cm}^3$ dan berat = 18112 gr. Setelah dioven berat keringnya = 15667 gr. Jika berat spesifik $G = 2,71$, maka di minta untuk menghitung:
- a. Kadar air
 - b. Berat isi lengas/lembab
 - c. Berat isi kering
 - d. Angka pori
 - e. Porositas
 - f. Derajat kejenuhan tanah tersebut.

2.4. BATAS-BATAS KEKENTALAN/KONSISTENSI TANAH

(Batas-batas Atterberg/*Atterberg's limit*)

Batas-batas kekentalan tanah terdiri dari:

1. Batas cair (*Liquid Limit = L.L.*)
2. Batas plastis/kenyal (*Plastic Limit = P.L.*)
3. Batas menyusut/mengerut (*Shrinkage Limit = S.L.*)
4. Batas lekat (*Sticky point limit = $S_p.L$*)

Untuk mengetahui tingkat keadaan batas-batas tersebut butir-butir 1 sd. 3, kita ambil contoh tanah berbutir halus (lempung atau lanau) yang dicampur dengan air sehingga mencapai keadaan cair. Apabila campuran ini dibiarkan mengering perlahan-lahan (tanpa dioven atau dipanaskan), maka tanah tersebut akan melalui beberapa tingkat keadaan tertentu dari keadaan cair sampai padat.

Dua hal yang paling penting ialah batas cair dan batas plastis yang disebut batas-batas Atterberg (*Atterberg's Limit*)

Basah Makin kering Kering

	Keadaan		
Cair (Liquid)	plastis (Plastic)	Semi plastis (Semi plastic)	Padat (Solid)
↓	↓	↓	
Batas cair (Liquid Limit)	Batas plastis (Plastic Limit)	Batas menyusut (Shrinkage Limit)	

Definisi:

1. Batas cair (*Liquid Limit*) = $L.L./w_L$
 Batas cair adalah kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis.
2. Batas plastis (*Plastic Limit*) = $P.L./w_p$
 Batas plastis adalah kadar air suatu contoh tanah antara keadaan plastis dan semi plastis.
3. Indeks plastis (*Plasticity index*) = IP/PI
 Selisih antara batas cair dan batas plastis, di mana tanah tersebut dalam keadaan plastis disebut Indeks plastis (*Plasticity index*).

$$PI = L.L. - P.L. \dots\dots\dots (2.10.a)$$
 atau

$$PI = w_L - w_p \dots\dots\dots (2.10.b)$$
4. Indeks kecairan (*Liquidity index*) = LI/I_L
 Kadar air tanah dalam keadaan asli biasanya terletak antara batas plastis dan cair.
 Suatu angka kadang-kadang dipakai sebagai petunjuk akan keadaan tanah di tempat aslinya yang disebut "*Indeks kecairan*".
 Indeks kecairan ialah perbandingan antara selisih kadar air tanah asli dan batas plastis dengan selisih batas cair dan batas plastis.

$$L.I. = \frac{w - P.L.}{L.L. - P.L.} = \frac{w - P.L.}{PI} \dots\dots\dots (2.11.a)$$

atau

$$L.I. = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w - w_p}{PI} \dots\dots\dots (2.11.b)$$

Dalam hal ini:

w = kadar air tanah asli.

Nilai LI pada umumnya berkisar antara 0 sampai 1.

Jika LI kecil mendekati nol, maka tanah itu kemungkinan besar agak keras.

Jika LI besar mendekati satu, kemungkinan besar tanah tersebut lembek.

Kegunaan batas-batas Atterberg

Batas cair dan batas plastis tidak secara langsung memberi angka-angka yang dapat dipakai dalam perhitungan perencanaan. Yang kita peroleh dari percobaan batas-batas Atterberg ini adalah suatu gambaran secara garis besar sifat-sifat tanah yang bersangkutan.

Tanah yang batas cairnya tinggi biasanya mempunyai sifat teknik yang buruk, yaitu kekuatannya/daya dukungnya rendah, pemampatannya (compressibility) tinggi dan sulit memadatkannya.

5. Kekentalan relatif (*Relative consistency*) = R_c atau indeks kekentalan (*Consistency index*) = I_c

Kekentalan relatif menyatakan perbandingan antara selisih batas cair dan kadar air tanah asli terhadap indeks plastis.

$$R_c = \frac{L.L. - w}{P.I.} \dots\dots\dots (2.12.a)$$

atau

$$R_c = \frac{w_L - w}{P.I.} \dots\dots\dots (2.12.b)$$

6. Indeks pengaliran (*Flow index*) = I_f

Indeks pengaliran adalah kemiringan lengkung aliran, yang menyatakan perbandingan antara selisih kadar air dengan selisih logaritma jumlah ketukan/pukulan pada percobaan batas cair.

$$I_f = \frac{w_1 - w_2}{\log N_2 - \log N_1} \dots\dots\dots (2.13.)$$

Dalam hal ini:

w_1 = kadar air pada jumlah ketukan/pukulan percobaan 1

w_2 = kadar air pada jumlah ketukan/pukulan percobaan 2

N_1 = jumlah ketukan/pukulan percobaan 1

N_2 = jumlah ketukan/pukulan percobaan 2

7. Indeks kekasaran (*Thoughtness index*) = I_t
Menyatakan perbandingan antara indeks plastis dengan indeks pengaliran.

$$I_t = \frac{P.I.}{I_f} \dots\dots\dots (2.14.)$$

8. Batas menyusut/mengerut adalah batas di mana tanah dalam keadaan jenuh yang sudah kering tidak akan menyusut lagi, meskipun dikeringkan terus.

$$S_L = \frac{(W - W_s) - (V - V_s)\gamma_w}{W_s} \dots\dots\dots (2.15.a)$$

Dalam hal ini:

- S_L = batas menyusut
- W = berat tanah mula-mula/basah
- W_s = berat tanah kering
- V = isi tanah mula-mula/batas
- V_s = isi tanah kering

Atau:

$$S_L = M (\%) - \left[\frac{(V - V_o)\gamma_w}{W_o} \times 100\% \right] \dots\dots\dots (2.15.b)$$

Dalam hal ini:

- M = kadar air
- V = isi tanah mula-mula/basah
- V_o = isi tanah kering
- W_o = berat tanah kering
- γ_w = berat isi air

Atau:

- M = kadar air
- V = isi tanah mula-mula/basah

- V_o = isi tanah kering
- W_o = berat tanah kering
- γ_w = berat isi air

Dapat juga dinyatakan dengan persamaan sbb.:

$$S_L = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\% \right] - \left[\frac{(V_i - V_f) \gamma_w}{m_2} \times 100\% \right] \dots \dots \dots (2.15.c)$$

Dalam hal ini:

- M_1 = massa tanah basah sebelum percobaan
- m_2 = massa tanah kering
- V_i = isi tanah basah
- V_f = isi tanah kering

Untuk mendapatkan harga-harga: Kadar air, berat isi tanah, bert spesifik, batas cair, batas plastis dan batas menyusut, biasanya dilakukan dengan percobaan-percobaan di Laboratorium dan di lapangan.

2.5. PERCOBAAN-PERCOBAAN DI LABORATORIUM

1. Kadar air

Standar yang berlaku:

- Bina Marga : PB – 0117 – 76
- ASTM : D – 2216 – 71
- AASHTO : T – 265 – 79

a. Tujuan:

Untuk mengetahui berapa besar kadar air yang terkandung di dalam tanah tersebut.

b. Alat-alat yang digunakan:

- 1) Oven listrik dengan suhu 110°C
- 2) Neraca dengan ketelitian 0,01 gram
- 3) Mangkuk atau cawan penimbang tanah
- 4) Desiccator/alat pendingin.

c. Cara melakukan percobaan

- 1) Mangkuk bernomor dalam keadaan bersih dan kering ditimbang beratnya: TW = gram.

- 2) Ambil sebagian contoh tanah yang akan dicari kadar airnya dan dimasukkan ke dalam mangkuk tersebut. Kemudian segera ditimbang beratnya pada neraca dan diperoleh berat tanah + mangkuk: $WW = \dots\dots\dots$ gram.
- 3) Setelah diketahui berat tanah basah + mangkuk, kemudian tanah basah + mangkuk tersebut dimasukkan ke dalam oven listrik dengan suhu $110^{\circ}/c$ selama kurang lebih 24 jam.
- 4) Setelah dioven, mangkuk berisi tanah tersebut dimasukkan ke dalam desiccator beberapa saat.
- 5) Bila mangkuk berisi tanah tersebut sudah dingin, ditimbang beratnya sehingga diperoleh berat tanah kering + mangkuk: $DW = \dots\dots\dots$ gram.
- 6) Percobaan dilakukan minimum sebanyak tiga percobaan agar diperoleh harga rata-ratanya. Hasil-hasil percobaan tersebut dicatat di dalam blanko yang sudah tersedia.

d. *Analisis perhitungan:*

Dari data-data tersebut, maka kadar air tanah dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$w = \frac{WW - DW}{DW - TW} \times 100\%$$

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.16.)$$

w dinyatakan dalam persen

Dalam hal ini:

WW = berat tanah basah (Wet weight of sample) + mangkuk

DW = berat tanah kering (Dry weight of sample) + mangkuk

TW = berat mangkuk (Weight of tube)

W_w = berat air (Weight of water)

W_s = berat butir (Weight of solid)

e. *Contoh perhitungan:*

Dalam contoh ini ada tiga percobaan

Mangkuk No. 1	Mangkuk No. 2	Mangkuk No. 3
$MW = 36,0565$	$WW = 34,2756$ gr	$WW = 31,3456$ gr
$DW = 31,4580$	$DW = 30,1458$ gr	$DW = 26,3075$ gr
$TW = 21,9346$	$TW = 20,0075$ gr	$TW = 15,5965$ gr

Perhitungan:

$$W_1 = \frac{WW - DW}{DW - TW} \times 100\% = \frac{36,0565 - 31,4580}{31,4880 - 21,9346} \times 100\%$$

$$W_1 = 48,2863\%$$

Analoog:

$$w_2 = 40,7346\%$$

$$w_3 = 47,0367\%$$

Kadar air tanah rata-rata:

$$w_{\text{rata-rata}} = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3}$$

$$w_{\text{rata-rata}} = \frac{48,2863 + 40,7346 + 47,0367}{3}$$

$$w_{\text{rata-rata}} = 45,3525\%$$

2. Berat spesifik/berat jenis tanah (*Specific gravity of soil*).

Standar yang berlaku:

Bina Marga : PB - 0108 - 76

ASTM : D - 854 - 72

AASHTO : T - 100 - 82

Tujuan:

Untuk mengetahui berat spesifik/berat jenis tanah yang bersangkutan.

b. *Definisi:*

Berat spesifik/berat jenis tanah menyatakan perbandingan antara berat isi tanah dengan berat isi air murni pada suhu 4°C.

c. *Alat-alat yang digunakan:*

Dalam percobaan ini digunakan 4 kali percobaan.

- 1) Empat buah picnometer dengan isi masing-masing 100 cc.
- 2) Termometer (kapasitas 100°C, ketelitian 1°C)
- 3) Oven listrik (suhu 110°C)
- 4) Desiccator
- 5) Neraca lengkap (kapasitas 200 gr, ketelitian 0,01 gr.)
- 6) Piring penguap (evaporation dish) diameter 15 cm

- 7) Ayakan No. 10 dengan lubang 2,00 mm
- 8) Kompor listrik 500 watt
- 9) Air suling (destillated water/aquadest) \pm 500 cc.

d. *Cara melakukan percobaan:*

- 1) Mempersiapkan contoh tanah.
 1. Contoh tanah diambil dari tanah aslinya, diayak dengan ayakan No. 10.
 2. Untuk memudahkan pengayakan, sebaiknya contoh tanah dijemur beberapa saat di panas matahari atau di oven, kemudian ditumbuk halus.
 3. Contoh tanah yang telah diayak, dikeringkan di dalam oven listrik selama 24 jam.
- 2) Empat buah picnometer beserta tutupnya ditimbang dalam keadaan kosong dan bersih $W_f = \dots$ gram.
- 3) Picnometer diisi dengan air murni sampai penuh dan ditutup, kemudian ditimbang beratnya: $W'_a \dots$ gram.
- 4) Contoh tanah yang telah disiapkan dimasukkan ke dalam picnometer \pm 15 gram. Picnometer dan contoh tanah di dalamnya ditimbang beratnya $W_t = \text{gr}$.
- 5) Picnometer yang berisi contoh tanah diisi air sampai kira-kira setengah isinya.
- 6) Udara yang masih ada di dalam tanah tersebut dikeluarkan dengan memanaskan picnometer tanpa tutup di dalam piring penguap di atas kompor listrik. Selama pemanasan, picnometer harus sering digoyang-goyangkan, hal ini dimaksudkan agar gelembung-gelembung udara di dalam tanah tersebut cepat keluar.
- 7) Setelah tidak ada lagi udara di dalam tanah, maka picnometer diambil dari air rebusan dan dimasukkan ke dalam tempat yang bersuhu tetap serta dibiarkan menjadi dingin sehingga mencapai suhu yang sama dengan suhu udara luar.
- 8) Kemudian ke dalam picnometer ditambahkan air murni sehingga penuh. Setelah tanah mengendap, picnometer ditutup (waktu menutup air harus sampai keluar dari lubang tutup picnometer). Kemudian permukaan luar picnometer dikeringkan dengan teliti dan ditimbang beratnya $W_b = \dots$ gram dan suhu pada saat penimbangan diukur = $T^\circ\text{C}$.

9) Hasil pengamatan dicatat di dalam formulir data yang telah disiapkan.

e. *Analisis perhitungan:*

1) Berat picnometer penuh air pada suhu T°C:

$$W_a = \frac{\text{B.J. air pada } T^\circ\text{C}}{\text{B.J. air pada } T^\circ\text{C}} \times (W'_a - W_f) + W_f \dots\dots\dots (2.17.)$$

2) B.J. tanah pada suhu T°C:

$$G (T^\circ\text{C}) = \frac{W_o}{W_o + (W_a + W_b)} \dots\dots\dots (2.18.)$$

Dalam hal ini:

W_o = berat tanah kering (*Weight of dry soil*)

W_a = berat picnometer + air (*weight of picnometer and water*)

W_b = berat picnometer + tanah + air (*weight of picnometer + soil + water*)

3) biasanya B.J. tanah dihitung pada suhu standar 15°C, maka harga G (T°C) perlu dikalikan dengan faktor koreksi (K), sehingga:

$$G (15^\circ\text{C}) = K \times G (T^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (2.19.)$$

Harga-harga K dan berat spesifik/berat jenis air dapat dilihat pada Tabel 2.4.

f. *Contoh perhitungan:*

Percobaan 1 :

Data-data :

– $W_f = 36,7053 \text{ gr.}$ – $W_t = 51,6895 \text{ gr.}$

– $W_a = 138,5245 \text{ gr.}$

– $W_b = 147,6580 \text{ gr.}$

– $T^\circ\text{C} = 25^\circ\text{C} \longrightarrow$ (Lihat tabel 2.3.)

– $W_o = W_t - W_f = (51,6895 - 36,7053) \text{ gr} = 14,9842 \text{ gr.}$

– $W_a = \frac{G \text{ air pada } T^\circ\text{C}}{G \text{ air pada } T^\circ\text{C}} \times (W'_a - W_f) + W_f$

– $T^\circ\text{C} = 26^\circ\text{C} \longrightarrow$ (Lihat tabel 2.3.)

- $W_a = \frac{0,9968}{0,9971} \times (138,5245 - 36,7053) + 36,7053$
- $W_a = 138,4939 \text{ gr.}$
- $G (26^\circ\text{C}) = \frac{W_o}{W_o + (W_a - W_b)}$
- $G (26^\circ\text{C}) = \frac{14,9842}{14,9842 + (138,4939 - 147,6580)}$
- $G (26^\circ\text{C}) = 2,5746$
- $G (15^\circ\text{C}) = K \times G (26^\circ\text{C})$
- Harga K lihat tabel 2.4.
- $G_1 (15^\circ\text{C}) = 0,9977 \times 2,5746 = 2,5687$
- Analoog untuk percobaan-percobaan: 2, 3 dan 4
 $G_2 = 2,5650, \quad G_3 = 2,5642, \quad G_4 = 2,5556$
- Berat spesifik/berat jenis rata-rata 15°C :

$$G_{\text{rata-rata}} = \frac{2,5687 + 2,5650 + 2,5642 + 2,5556}{4}$$

$$= 2,5634 \sim 2,56$$

Tabel 2.3. Berat spesifik/berat jenis air.

$^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9999	0.9999
10	0.9997	0.9996	0.9995	0.9994	0.9993	0.9992	0.9991	0.9990	0.9988	0.9984
20	0.9982	0.9980	0.9978	0.9976	0.9973	0.9971	0.9968	0.9965	0.9963	0.9960
30	0.9957	0.9954	0.9951	0.9947	0.9944	0.9941	0.9937	0.9934	0.9930	0.9926
40	0.9922	0.9919	0.9915	0.9911	0.9907	0.9902	0.9898	0.9894	0.9890	0.9885
50	0.9881	0.9876	0.9872	0.9867	0.9862	0.9857	0.9852	0.9848	0.9842	0.9838
60	0.9832	0.9827	0.9822	0.9817	0.9811	0.9806	0.9800	0.9795	0.9789	0.9784
70	0.9778	0.9772	0.9767	0.9761	0.9755	0.9749	0.9743	0.9737	0.9731	0.9724
80	0.9718	0.9712	0.9706	0.9699	0.9693	0.9686	0.9680	0.9673	0.9667	0.9660
90	0.9653	0.9647	0.9640	0.9633	0.9626	0.9619	0.9612	0.9605	0.9598	0.9591

Tabel 2.4. Faktor koreksi suhu air (K).

Suhu °C	G air	K	Suhu °C	G air	K
0	0,9999	1,0008	21	0,9980	0,9989
1	0,9999	1,0008	22	0,9978	0,9987
2	1,0000	1,0009	23	0,9976	0,9984
3	1,0000	1,0009	24	0,9973	0,9982
4	1,0000	1,0009	25	0,9971	0,9979
5	1,0000	1,0009	26	0,9968	0,9977
6	1,0000	1,0009	27	0,9965	0,9974
7	0,9999	1,0008	28	0,9963	0,9971
8	0,9999	1,0008	29	0,9960	0,9968
9	0,9998	1,0007	30	0,9957	0,9965
10	0,9997	1,0006	31	0,9954	0,9963
11	0,9996	1,0005	32	0,9951	0,9960
12	0,9995	1,0004	33	0,9947	0,9965
13	0,9994	1,0003	34	0,9944	0,9953
14	0,9993	1,0002	35	0,9941	0,9950
15	0,9991	1,0000	36	0,9937	0,9946
16	0,9990	1,0001	37	0,9934	0,9943
17	0,9988	0,9997	38	0,9930	0,9939
18	0,9986	0,9995	39	0,9926	0,9935
19	0,9984	0,9993	40	0,9922	0,9931
20	0,9982	0,9991			

$$K = \frac{G \cdot \text{air } T^{\circ}\text{C}}{G \cdot \text{air } 15^{\circ}\text{C}}$$

3. Percobaan batas cair

a. *Tujuan:*

Untuk mengetahui batas cair suatu tanah, apakah tanah memerlukan tambahan air atau dikeringkan.

b. *Definisi:*

Batas cair adalah kadar air suatu contoh tanah pada batas antara cair dan plastis, yaitu kadar air pada tanah mulai merapat pada percobaan dengan alat Casagrande setelah diputar sebanyak 25 kali.

c. *Alat-alat yang digunakan:*

- 1) Ayakan No. 40 dengan lubang 0,42 mm
- 2) Cawan/mangkuk besar
- 3) Pisau pengaduk/spatula
- 4) Alat Casagrande
- 5) Pisau pembelah tanah/colet (*Grooving tools*)
- 6) Desiccator
- 7) Oven listrik suhu 110°C
- 8) Neraca
- 9) Mangkuk tempat contoh tanah.

d. *Cara melakukan percobaan:*

- 1) Tanah yang melalui ayakan No. 40 dicampur dengan air di dalam cawan dan diaduk hingga homogeen/merata betul serta jenuh.
- 2) Diambil sebagian contoh tanah tersebut dan diletakkan di dalam cawan Casagrande. Contoh tanah diratakan, kemudian tengahnya dibelah dengan colet sehingga terbelah dan membentuk seperti ujung colet.
- 3) Alat pemutar Casagrande diputar dengan kecepatan ± 2 putaran/detik dengan tinggi jatuh ± 1 sampai 2 cm. Banyaknya putaran dihitung sampai kedua sisi tanah yang terbelah tadi bertaut kembali.
- 4) Setelah selesai tanah diambil sebagian untuk dihitung kadar airnya.
- 5) Percobaan dilakukan minimal 4 kali dengan rincian: 2 kali di bawah dan 2 kali di atas 25 kali putaran.
- 6) Hasil percobaan tersebut digambar/diplot pada grafik, garis mendatar menunjukkan jumlah pukulan dengan skala log. dan garis tegak menunjukkan kadar air dengan skala linier.
- 7) Sebagai standar kadar air pada putaran 25 kali merupakan batas cair tanah tersebut.

e. *Analisis perhitungan:*

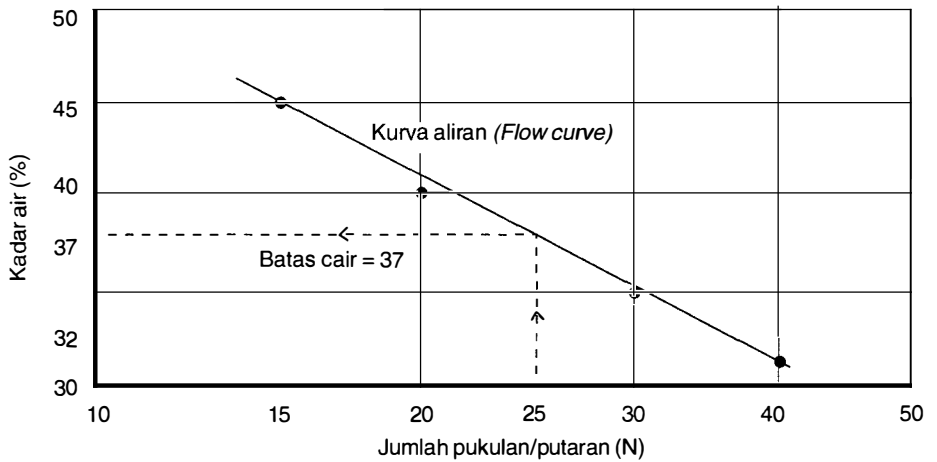
- 1) Jumlah pukulan dicatat pada formulir dalam kolom jumlah pukulan, misal percobaan 1 = 30 kali.
- 2) Kemudian dihitung kadar airnya.

f. *Contoh perhitungan:*

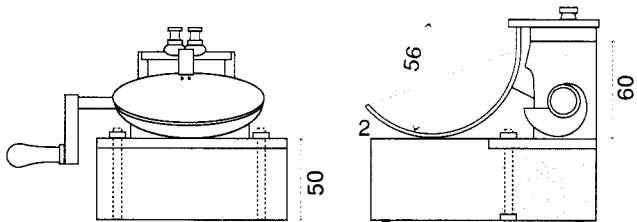
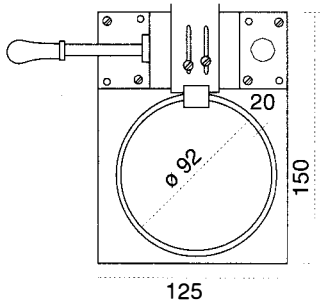
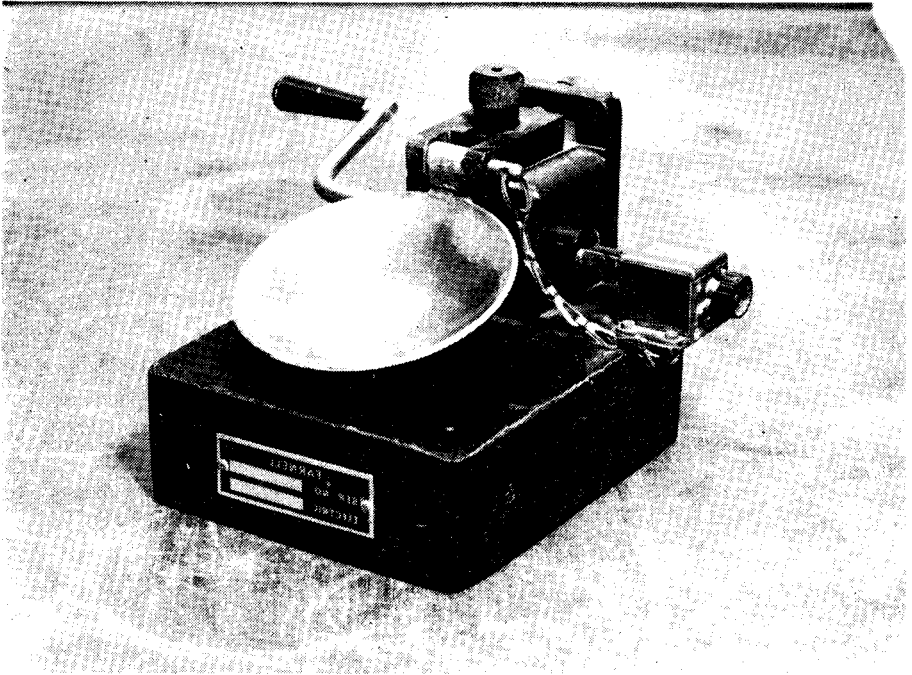
Data-data:

Jumlah pukulan/putaran N	Kadar air w (%)
$N_1 = 15$	45
$N_2 = 20$	40
$N_3 = 30$	35
$N_4 = 40$	32

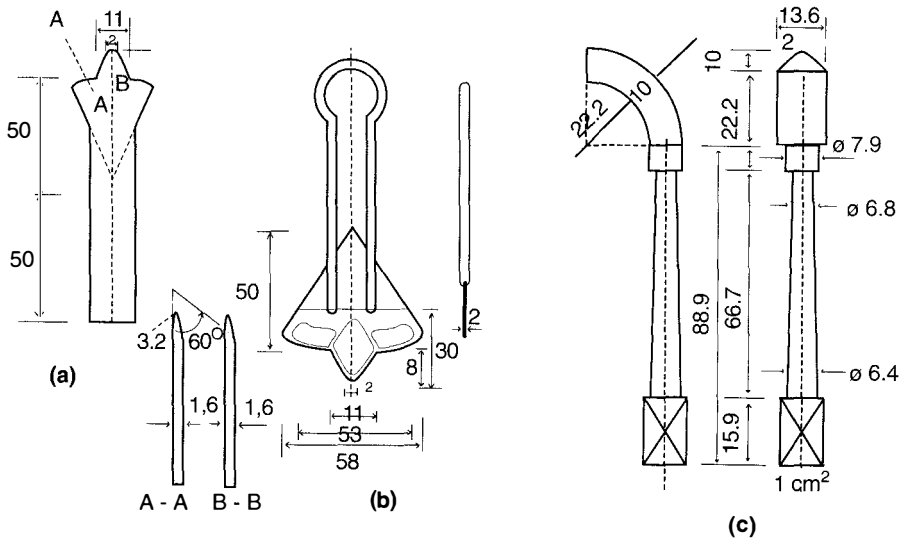
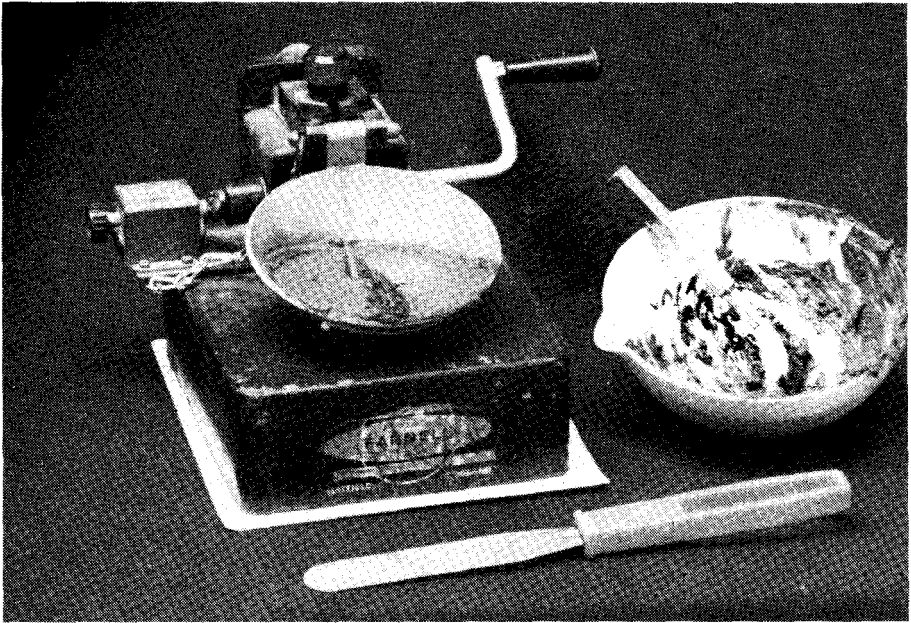
Batas cair : L.L. = 37%



Gb. 2.4. Kurva aliran perhitungan batas cair.

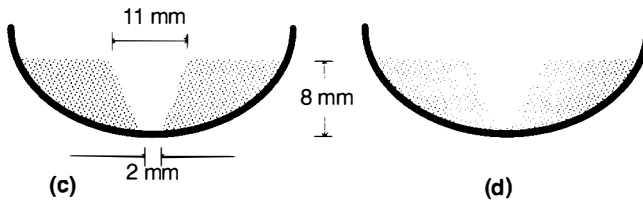
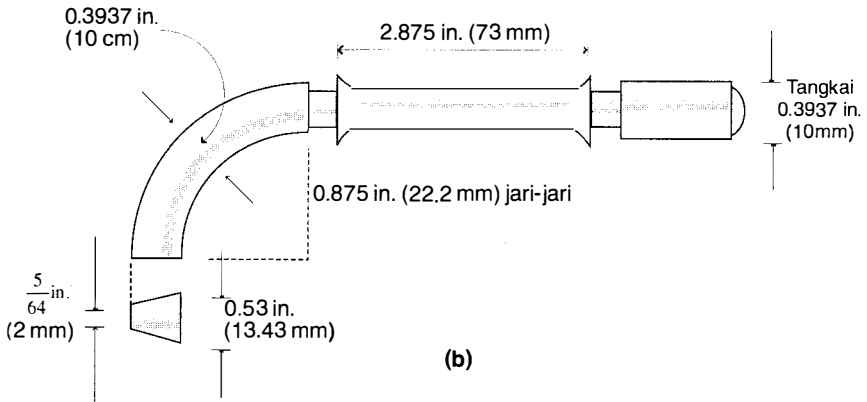
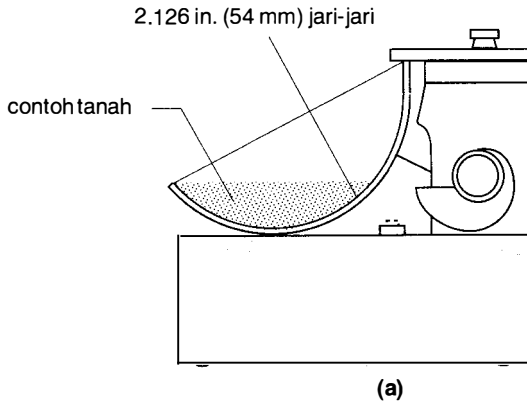


Gb. 2.5 Alat Casagrande.



Gb. 2.6. Alat Casagrande berisi tanah dan colet.

- (a) Colet tipe Casagrande
- (b) Colet tipe Hovanyi
- (c) Colet standar ASTM



Gb. 2.7. Alat Casagrande dan colet.

- (a) Penampungan melintang alat Casagrande
- (b) Colet standar ASTM
- (c) Penampang tanah setelah dicoret sebelum percobaan
- (d) Penampang tanah sesudah percobaan

4. Percobaan batas plastis

a. *Tujuan:*

Untuk mengetahui batas plastis suatu contoh tanah, yaitu batas antara keadaan plastis dan semi plastis.

b. *Definisi:*

Batas plastis menunjukkan kadar air pada waktu tanah tidak dapat digelintir menjadi gelintiran-gelintiran dengan diameter lebih kecil dari 3 mm, sehingga apabila gelintiran diteruskan, maka tanah akan putus-putus.

c. *Alat-alat yang digunakan:*

- 1) Ayakan No. 40
- 2) Mangkuk/Cawan
- 3) Colet/pisau
- 4) Neraca
- 5) Lempeng kaca tebal 5 mm
- 6) Mangkuk timbangan tanah
- 7) Desiccator
- 8) Oven listrik.

d. *Cara melakukan percobaan:*

- 1) Tanah yang melalui ayakan No. 40 atau tanah yang digunakan untuk percobaan batas cair diambil sebagian, diberi air dan diaduk hingga merata betul.
- 2) Kemudian ambil sebagian contoh tanah yang telah diberi air tersebut dan dibuat gelintiran di atas lempeng kaca dengan menggunakan telapak tangan.
- 3) Diusahakan waktu menambah air sedikit demi sedikit, sehingga tidak perlu menambah contoh tanah lagi, sebab khawatir tanah tersebut tidak homogeen.
- 4) Apabila batas gelintiran sudah dicapai, maka gelintiran-gelintiran tanah tersebut diambil dan dimasukkan ke dalam mangkuk timbangan untuk dihitung kadar airnya.

e. *Analisis perhitungan:*

Percobaan dilakukan minimum 3 kali dan diambil harga rata-ratanya.

f. *Contoh perhitungan:*

Data-data:

No. Percobaan	Kadar air (%)
1	31,691
2	31,351
3	30,890

$$P.L. = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3}$$

$$P.L. = \frac{31.691 + 31.351 + 30.890}{3}$$

$$P.L. = 31,31\%$$

$$P.I. = L.L. - P.L. = 37,00 - 31,31 = 5,69$$

Harga P.I. biasanya ditulis tanpa persen.

5. Percobaan batas menyusut

a. *Tujuan:*

Untuk mengetahui batas menyusut tanah.

b. *Definisi:*

Batas menyusut menunjukkan kadar air atau batas di mana tanah dalam keadaan jenuh yang sudah kering tidak akan menyusut lagi, meskipun dikeringkan terus.

c. *Alat-alat yang digunakan:*

- 1) Ayakan No. 40
- 2) Mangkuk/cawan
- 3) Colet/pisau
- 4) Pipet
- 5) Cetakan contoh tanah dari logam/plastik
- 6) Oven listrik
- 7) Desiccator
- 8) Neraca
- 9) Air raksa.

d. *Cara melakukan percobaan:*

Tanah yang akan digunakan diambil dari lubang percobaan dengan kedalaman $\pm 1,00$ meter.

Kemudian dikeringkan kering udara, dihancurkan dan diayak dengan ayakan No. 40.

Tanah yang lewat ayakan tersebut diambil sebagian dan diberi air sedikit demi sedikit sambil diaduk merata betul sehingga kira-kira di atas batas plastis.

Untuk menentukan air pencampur tersebut ditentukan sebagai berikut:

Tanah yang telah diaduk tersebut diletakkan di atas lempeng kaca sehingga tanah tersebut turun merata. Sesudah itu dari atas ditetesi air dengan pipet. Apabila dalam waktu 30 detik air tetesan itu meresap rata semua, berarti tambahan air cukup. Jika masih terdapat air pada permukaannya, berarti tambahan air terlalu banyak.

Tanah yang sudah jenuh tersebut dimasukkan ke dalam mangkuk cetakan sampai sepertiga tingginya dan diketuk-ketukkan di atas meja, agar permukaannya menjadi rata. Selanjutnya diisi lagi sepertiga tinggi dan sepertiga tinggi lagi terakhir dengan cara yang sama seperti yang disebut terdahulu.

Kelebihan tanah pada permukaannya diratakan dengan pisau dan tidak boleh terdapat lubang-lubang atau gelembung-gelembung udara pada contoh tanah tersebut.

Tanah dan mangkuk tersebut segera ditimbang beratnya, kemudian dikeringkan kering udara agar menyusutnya tidak terlalu cepat atau dapat juga dikeringkan dalam oven listrik hingga tanah tidak menyusut lagi. Hal ini dapat ditentukan dengan melihat perubahan warna tanah tersebut dari warna coklat tua (warna gelap) menjadi warna coklat lebih muda (warna terang/jernih).

Kemudian tanah dikeluarkan dari oven listrik dan didinginkan dalam desiccator serta ditimbang beratnya: $W_o = \dots$ gram.

Isi tanah basah diukur : $V = \dots$ cm³ dengan juga isi tanah kering: $V_o = \dots$ cm³ dengan cara memasukkan tanah kering ke dalam mangkuk yang berisi air raksa penuh yang isinya sudah tertentu. Tanah kering tersebut ditekan dengan plat kaca berpaku tiga dan air raksa akan tumpah/meluap keluar yang ditampung di dalam mangkuk besar dan tumpahan tersebut diukur dengan gelas ukur. Isi air raksa yang tumpah = isi tanah kering (V_o)

e. *Analisis perhitungan:*

Percobaan dilakukan minimal tiga kali dan diambil harga rata-ratanya.

Rumus yang digunakan:

$$S_L = M (\%) - \left[\frac{(V - V_o) \gamma_w}{W_o} \times 100\% \right] \dots\dots\dots (2.20.)$$

Dalam hal ini:

- S_L = batas menyusut (%)
- M = kadar air (%)
- V = isi tanah basah (cm^3)
- V_o = isi tanah kering (cm^3)
- W_o = berat tanah kering (gram).

f. *Contoh perhitungan:*

Data-data:

No. percobaan	Isi tanah basah cm^3	Isi tanah kering cm^3	Kadar air %	Berat tanah kering gram
1	20,10	12,80	61,53	20,503
2	19,55	12,85	62,26	24,398
3	19,40	12,78	60,34	23,450

Harga rata-rata:

$$M = \frac{61,53 + 62,26 + 60,34}{3} = 61,38\%$$

$$V = \frac{20,10 + 19,55 + 19,40}{3} = 19,68 \text{ cm}^3$$

$$V_o = \frac{12,80 + 12,85 + 12,78}{3} = 12,81 \text{ cm}^3$$

$$W_o = \frac{20,503 + 24,398 + 23,450}{3} = 22,78 \text{ gram}$$

$$S_L = 61,38\% - \frac{(19,68 - 12,81)(1)}{3} \times 100\%$$

$$S_L = 61,38\% - 30,15\% = 31,22\%$$

Percobaan batas-batas Atterberg ini dengan standar yang berlaku sebagai berikut:

Bina Marga : PB – 0109 – 76 DAN PB – 0110 – 76

ASTM : D 423 – 66, D 424 – 74 dan D 427 – 74

AASHTO : T 89 – 81, T 90 – 81 dan T 92 – 68

6. Percobaan berat isi

a. *Tujuan:*

Untuk mengetahui berat isi tanah.

b. *Definisi:*

c. *Alat-alat yang digunakan:*

- 1) Cincin uji diameter = 6 cm dan tinggi= 2 cm.
- 2) Pisau pemotong contoh tanah.
- 3) Neraca dengan ketelitian = 0,01 gram.

d. *Cara melakukan percobaan:*

- 1) Cincin uji dalam keadaan bersih ditimbang beratnya :
 $W_r = \dots\dots$ gram.
- 2) Contoh tanah disiapkan dengan menekan cincin uji pada tabung contoh sampai cincin tersisi penuh.
- 3) Ratakan kedua sisi permukaan tanah pada cincin dan bersihkan cincin bagian luar.
- 4) Timbang cincin yang berisi tanah tersebut: $W_{sr} = \dots\dots\dots$ gram.
- 5) Hitung isi tanah dengan mengukur ukuran gajian dalam cincin dengan ketelitian 0,01.
- 6) Hitung berat tanah: $W_s = W_{sr} - W_r = \dots\dots$ gram.

e. *Analisis perhitungan:*

Percobaan dilakukan minimum tiga percobaan dan dihitung harga rata-ratanya dengan persamaan sbb.:

$$\gamma = \frac{W_s}{V} = \dots\dots \text{ gr / cm}^3 \dots\dots\dots (2.21.)$$

Dalam hal ini:

- γ = berat isi tanah (gr/cm³)
- W_s = berat tanah (gram)
- V = Selisih tanah (cm³)

f. *Contoh perhitungan:*

Data-data:

No. contoh tanah : B.L. 5-4 Selorejo.

No. cincin : 1 2 3

Berat cincin : 64,20, 64,20, 64,20 gram

Isi cincin : 56,52, 56,52, 56,52 cm³

Berat tanah + cincin : 174,75 175,43 178,23 gram

Berat tanah basah/asli : 110,55 111,23 114,03 gram

Berat tanah basah rata-rata:

$$W_s = \frac{110,55 + 111,23 + 114,03}{3}$$

$$W_s = 111,94 \text{ gram}$$

Isi cincin/tanah rata-rata:

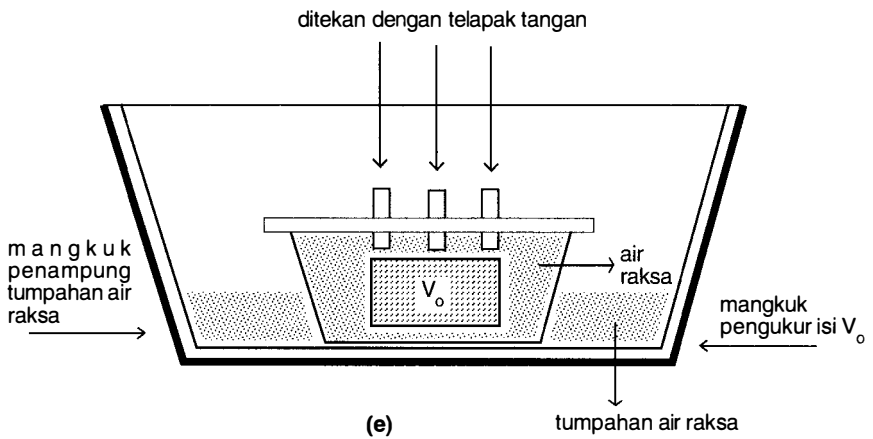
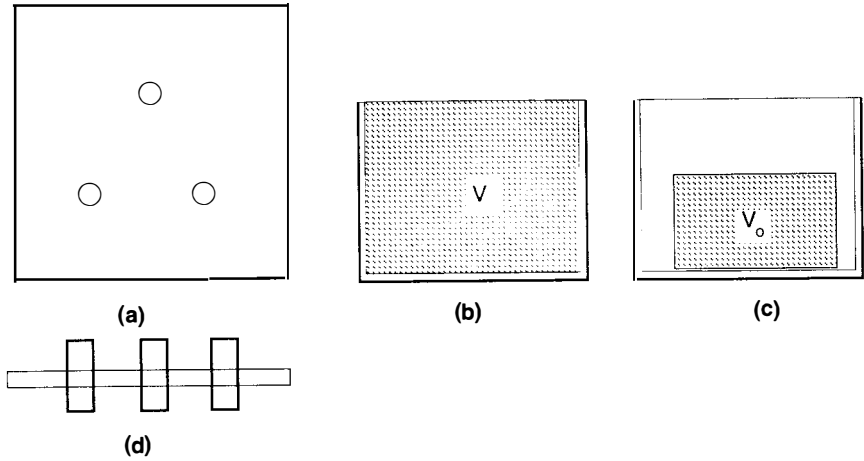
$$V = 56,52 \text{ cm}^2$$

Berat isi tanah basah/asli:

$$\gamma = \frac{W_s}{V} = \frac{111,94}{56,52} = 1,98 \text{ gr / cm}^3$$



Gb. 2.8. Percobaan batas plastis.



Gb. 2.9. Percobaan batas menyusut.

- (a) Plat kaca berpaku tiga
- (b) Contoh tanah basah dalam mangkuk
- (c) Contoh tanah kering dalam mangkuk
- (d) Penampang plat kaca
- (e) Mengkuk besar dan mangkuk pengukur isi V_0 serta plat kaca.

Contoh-contoh soal:

1. Pada suatu percobaan batas-batas kekentalan tanah di laboratorium diperoleh data sebagai berikut:

No. benda uji	1	2	3	4
Jumlah pukulan	10	22	29	35
Berat tanah basah + cawan (gram)	28,94	26,15	23,70	24,24
Berat tanah kering + cawan (gram)	23,47	22,22	20,71	21,23
Berat cawan (gram)	13,75	13,40	13,25	13,50

Batas plastis : PL = 23%

Kadar air alami : w = 32%

Berat spesifik/berat jenis : G = 2,65

Tentukan:

- | | |
|--------------------|-------------------------------|
| a. Batas cair | d. Kekentalan relatif |
| b. Indeks plastis | e. Angka pori pada batas cair |
| c. Indeks kecairan | f. Indeks pengaliran |

Penyelesaian:

$$a. w_1 = \frac{28,94 - 23,47}{23,47 - 13,75} \times 100\% = 56,28\%$$

$$w_2 = \frac{26,15 - 22,22}{22,22 - 13,40} \times 100\% = 44,56\%$$

$$w_3 = \frac{23,70 - 20,71}{20,71 - 13,25} \times 100\% = 40,10\%$$

$$w_4 = \frac{24,24 - 21,23}{21,23 - 13,50} \times 100\% = 38,94\%$$

Dari diagram hubungan kadar air dan jumlah pukulan Gb. 2.10. pada pukulan standar 25 kali pukulan diperoleh harga batas cair: LL = 43%

b. Indeks plastis : PI = LL - PL
PI = 43 - 23 = 20

c. Indeks kecairan: LI = $\frac{w - PL}{PI}$
LI = $\frac{32 - 23}{20} = 0,45$

d. Kekentalan relatif : $R_c = \frac{LL - w}{PI} = \frac{43 - 32}{20} = 0,55$

e. Angka pori pada batas cair :

$$e = w \cdot G \quad w = LL = 43\% = 0,43$$

$$e = (0,43) (2,65) = 1,14$$

f. Indeks pengaliran:

$$I_f = \frac{w_1 - w_2}{\log N_2 - \log N_1}$$

$$I_f = \frac{0,5628 - 0,4456}{\log 22 - \log 10}$$

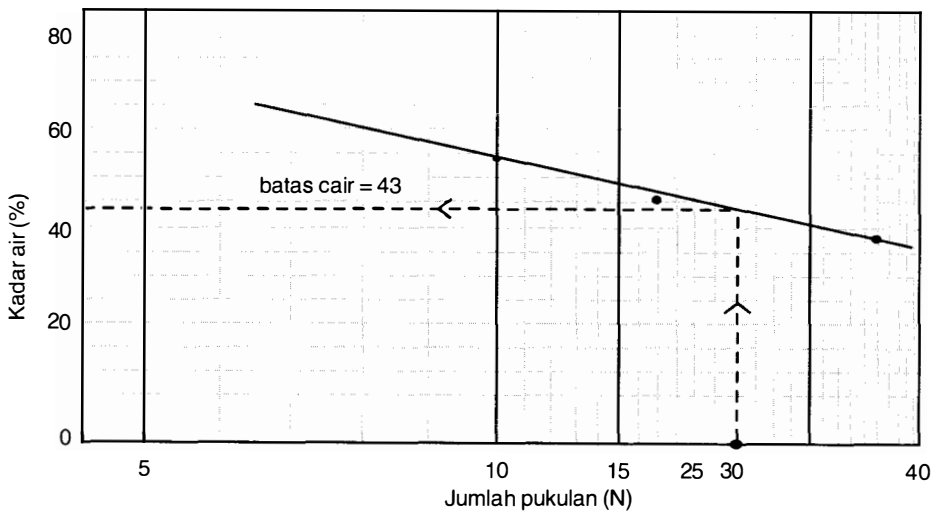
$$I_f = \frac{0,1172}{0,3424} = 0,342$$

2. Dalam suatu percobaan batas menyusut diperoleh data-data sebagai berikut:

- $m_1 = 44,60$ gram $V_i = 16,20$ cm³

- $m_2 = 32,80$ gram $V_f = 10,80$ cm³

Hitung batas menyusut tanah tersebut.



Gb. 2.10. Diagram hubungan antara kadar air dengan jumlah pukulan pada percobaan batas cair.

Penyelesaian:

$$S_L = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right] (100\%) - \left[\frac{(V_i - V_f) \gamma_w}{m_2} \right] (100\%)$$

$$S_L = \left[\frac{44,60 - 32,80}{32,80} \right] (100\%) - \left[\frac{16,20 - 10,80(1)}{32,80} \right] (100\%)$$

$$S_L = 35,97 - 16,46 = 19,50\%$$

Soal-soal latihan:

1. Diketahui data-data pada percobaan batas cair dan batas plastis sebagai berikut:

Jumlah pukulan (N)	Kadar air w (%)
15	42,00
20	40,80
28	39,10
36	37,90

Batas plastis: PL = 18,70%

Pertanyaan:

- a. Gambarkan kurva aliran percobaan batas cair dan hitung batas cairnya.
b. Berapa harga indeks plastisitas tanah tersebut?
2. Dari percobaan batas cair dan batas plastis diperoleh data sebagai berikut:

Jumlah pukulan (N)	Kadar air w (%)
17	42,10
22	39,20
27	36,20
32	34,10

Batas plastis : PL = 21,30%

Kadar air alami : w = 27,40%

Berat spesifik/berat jenis : G = 2,60

Pertanyaan:

- a. gambarkan kurva aliran percobaan batas cair dan hitung batas cair tanah tersebut
 - b. Berapakah indeks plastisitasnya?
 - c. Hitung indeks kecairannya
 - d. Hitung kekentalan relatifnya
 - e. Hitung indeks pengalirannya
 - f. Berapakah angka pori pada batas cair tanah tersebut?
3. Dalam suatu percobaan batas menyusut di laboratorium diperoleh data-data sebagai berikut:

- Berat tanah basah = 35,50 gram
- Isi tanah basah = 15,75 cm³

Setelah dikeringkan dalam oven listrik selama 24 jam beratnya tinggal = 20,25 gram. Untuk menentukan isi tanah kering, maka tanah kering tersebut dimasukkan ke dalam air raksa dengan menekan plat kaca berpaku tiga dan air raksa yang tumpah beratnya = 146,20 gram.

$$\text{Berat isi air raksa} = 13,60 \text{ gram/cm}^3$$

$$\text{Berat isi air} = 1,00 \text{ gram/cm}^3$$

Hitung batas menyusut tanah tersebut.

4. Suatu contoh tanah lempung akan digunakan untuk inti bendungan tipe urukan. Untuk keperluan tersebut, maka tanah lempung itu akan diuji batas menyusutnya. Dari percobaan batas menyusut diperoleh data-data sebagai berikut:

- Berat contoh tanah basah = 45,72 gram
- Isi contoh tanah basah = 22,80 cm³
- Berat contoh tanah kering = 26,12 gram
- Isi tanah kering = 15,40 cm³

Tentukan:

- a. Batas menyusut
- b. Angka pori
- c. Berat spesifik/berat jenis tanah lempung tersebut.

Bab III

Klasifikasi Tanah

3.1. PENDAHULUAN

Pada umumnya tanah diklasifikasikan sebagai tanah yang kohesif dan tidak kohesif atau sebagai tanah yang berbutir kasar dan halus. Seperti yang telah disebut dalam Bab I, bahwa istilah "Tanah" dipakai untuk mencakup semua bahan seperti: lempung, pasir, kerikil dan batu-batu yang besar.

Dari hasil penyelidikan di laboratorium dan/atau di lapangan, diketahui sifat-sifat alami dan teknis tanah-tanah tersebut serta dapat digunakan untuk mengevaluasi masalah-masalah tertentu dalam bidang teknik sipil, antara lain:

1. Menentukan rembesan, daya rembes dan kecepatan rembesan air yang melalui penampang tanah serta koefisien rembesannya.
2. Menentukan pemampatan tanah yang berdasarkan teori konsolidasi Terzaghi dan penurunan, maka dapat digunakan untuk mengevaluasi penurunan konstruksi.
3. Menentukan kuat geser tanah, untuk mengevaluasi kemantapan lereng bendungan, tanggul dan lain-lain.

Klasifikasi tanah sangat membantu perencana dalam memberikan pengarahan melalui cara empiris yang tersedia dari hasil pengalaman yang lalu. Namun tidak mutlak, karena perilaku tanah sukar diduga. Banyak kegagalan konstruksi disebabkan masalah tanah, seperti menara Pisa di Italia yang terkenal itu dan lain-lain.

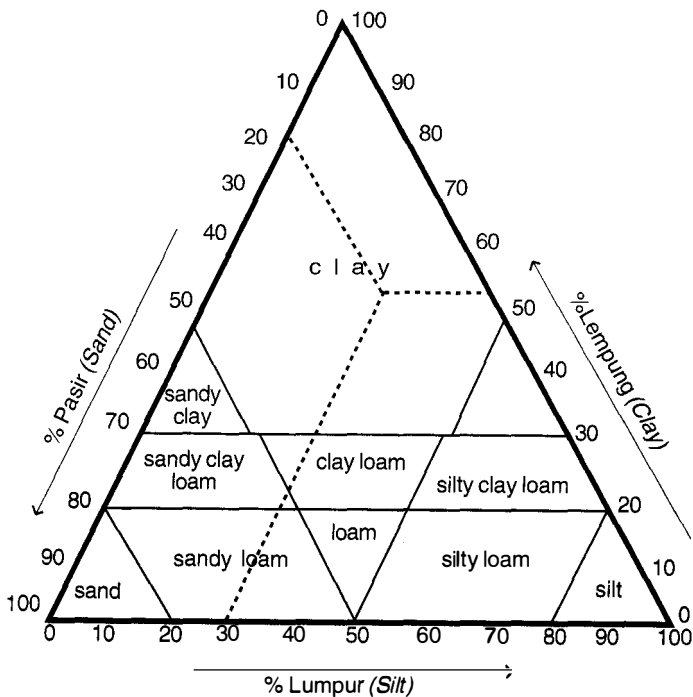
3.2. SISTEM KLASIFIKASI TANAH

Ada tiga macam sistem klasifikasi tanah, yaitu:

1. Sistem klasifikasi berdasarkan persentase susunan butir tanah (*Textural classification system*). Seperti diketahui bahwa di alam ini tanah terdiri dari susunan butir-butir antara lain: Pasir, lumpur dan lempung yang persentasenya berlainan.

Klasifikasi tekstur ini dikembangkan oleh departemen Pertanian Amerika Serikat (U.S. Department of Agriculture) dan deskripsi batas-batas susunan butir tanah di bawah sistem U.S.D.A. Kemudian dikembangkan lebih lanjut dan digunakan untuk pekerjaan jalan raya yang lebih dikenal dengan klasifikasi tanah berdasarkan persentase susunan butir tanah oleh U.S. Public Roads Administration.

Untuk lebih jelasnya lihat gambar 3.1.



Gb. 3.1. Diagram klasifikasi tekstur.

Contoh pemakaian:

Suatu contoh tanah terdiri dari campuran butir-butir: 20% pasir, 30% lumpur dan 50% lempung.

Termasuk jenis apa contoh tanah tersebut, jika diklasifikasikan dengan diagram tekstur?

Penyelesaian:

Ambil titik-titik: 20 pasir, 30 lumpur dan 50 lempung.

Dari titik-titik tersebut termasuk tanah lempung (*clay*) lihat gambar 3.1.

Jika susunan tanah terdiri dari: 20% kerikil, 10 pasir, 30% lumpur dan 40% lempung, maka penyelesaiannya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} - \text{ Pasir} &= \frac{\% \text{ pasir}}{100 - \% \text{ Kerikil}} \times 100\% = \frac{10}{100 - 20} \times 100\% = 12,50\% \\ - \text{ Lumpur} &= \frac{\% \text{ Lumpur}}{100 - \% \text{ Kerikil}} \times 100\% = \frac{30}{100 - 20} \times 100\% = 37,50\% \\ - \text{ Lempung} &= \frac{\% \text{ Lempung}}{100 - \% \text{ Kerikil}} \times 100\% = \frac{40}{100 - 20} \times 100\% = 50,00\% \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, maka akan dapat diketahui jenis tanahnya.

2. Klasifikasi sistem kesatuan tanah (*Unified soil classification system*). Sistem klasifikasi berdasarkan hasil-hasil percobaan laboratorium yang paling banyak dipakai secara meluas adalah sistem klasifikasi kesatuan tanah. Percobaan laboratorium yang dipakai adalah analisis ukuran butir dan batas-batas Atterberg. Semua tanah diberi dua huruf penunjuk berdasarkan hasil-hasil percobaan ini.

Ada dua golongan besar tanah-tanah yang berbutir kasar, < 50% melalui ayakan No. 200 dan tanah-tanah berbutir halus > 50% melalui ayakan No. 200.

Tanah-tanah berbutir halus kemudian diklasifikasikan atas dasar plastisitasnya dan kadar persenyawaan organik. Dalam hal ini ukuran butir bukan merupakan dasar yang menentukan pembagiannya.

Sistem ini yang pada awalnya dikembangkan untuk pembangunan lapangan terbang, diuraikan oleh Casagrande (1948). Ia telah dipakai sejak tahun 1942, tetapi diubah sedikit pada tahun 1952 agar dapat terpakai pada konstruksi bendungan dan konstruksi-konstruksi lainnya. Huruf-huruf yang dipakai untuk tanah-tanah berbutir halus adalah sebagai berikut:

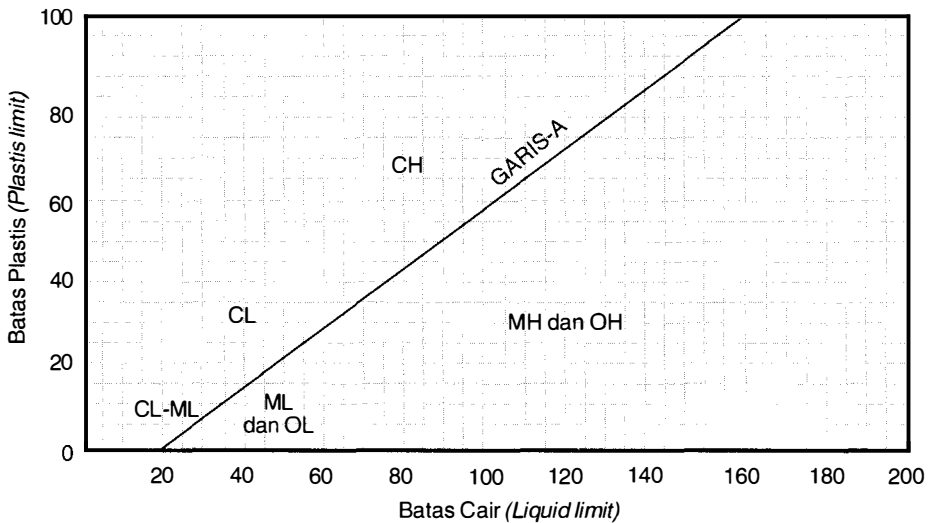
Huruf pertama:

- O = Organik (*organic*)
- C = Lempung (*clay*)
- M = Lumpur/lanau (*mud/silt*)

Huruf kedua:

- H = Bats cair tinggi (*High liquid limit*)
- L = Batas cair rendah (*Low liquid limit*)

Dengan mengkombinasikan huruf pertama dan kedua, maka enam kelompok yaitu: OH, OL, CH, CL, MH dan ML. Klasifikasi ke dalam golongan lanau dan lempung dilakukan dengan menggunakan *Diagram plastisitas (Plasticity chart)* seperti terlihat pada Gb. 3.2. Diagram ini merupakan grafik hubungan antara PI. dan L.L. Dalam hal ini digambarkan sebuah garis diagonal yang disebut garis A dan satu garis tegak lurus yang ditarik pada batas cair = 50%.



Huruf pertama

- M = lanau (*silt*)
- C = lempung (*clay*)
- O = organik

Huruf kedua

- L = batas cair rendah (*low LL*)
- H = batas cair tinggi (*high LL*)

Gb. 3.2. Diagram plastisitas.

Garis A adalah batas empiris antara lempung inorganik yang khas (CL dan CH) dengan lanau inorganik yang khas (ML dan MH) atau tanah organik (OL dan OH).

Garis tegak lurus pada batas cair 50 itu memisahkan lanau dan lempung yang batas cairnya tinggi (H). Di bagian bawah diagram, di bawah batas cair kira-kira 29 dan antara nilai P.I. sebesar 4 dan 7, sifat-sifat tanah menunjukkan gejala saling berhimpitan dan karena itulah garis A di daerah ini menjadi suatu daerah. Klasifikasi dualistis CL – ML dipakai untuk tanah-tanah yang berbeda di dalam daerah ini.

Tanah-tanah berbutir kasar dibagi menjadi pasir dan kerikil dan kemudian dibagi lagi menjadi: yang mengandung bahan halus dalam jumlah yang ada artinya dan yang bebas dari bahan-bahan halus.

Yang mengandung bahan-bahan halus kemudian diklasifikasikan menurut diagram plastisitas (menjadi golongan yang bersifat kelanauan atau bersifat kelempungan) dan yang bebas dari bahan-bahan halus menurut grafik lengkungan-gradasi dengan mempergunakan koefisien-koefisien derajat keseragaman dan koefisien-koefisien lengkungan. Huruf-huruf yang dipakai adalah:

Huruf pertama:

G = kerikil (*Gravel*)

S = pasir (*Sand*)

M = lanau (*Mud*)

C = lempung (*Clay*)

O = organik (*Organic*)

Huruf kedua:

W = bergradasi baik (*Well graded*)

P = bergradasi buruk (*Poor graded*)

W & P dari lengkung gradasi

M = Kelanauan (*Muddy*)

C = kelempungan (*Clayey*)

dari diagram plastisitas

L = batas cair rendah (*Low LL*)

H = batas cair tinggi (*High LL*)

Persamaan garis A : $PI = 0,73 (LL - 20)$

Batas cair rendah (L), jika: $LL < 50\%$

Batas cair tinggi (H), jika: $LL > 50\%$

3. Klasifikasi sistem AASHTO (*AASHTO classification system*).

Klasifikasi tanah sistem ini dikembangkan pada tahun 1929 oleh Public Road Administration Classification System. Dengan beberapa kali perubahan, sekarang telah digunakan dan dianjurkan oleh Committee

on Classification of Materials for Subgrade and granular type Roads of the Highway Research Board pada tahun 1945. (ASTM menggunakan kode D-3282 dan AASHTO dengan metoda M 145).

Klasifikasi AASHTO yang sekarang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.1. Dalam sistem ini, tanah diklasifikasikan ke dalam tujuh kelompok besar yaitu:

A-1 sampai dengan A-7.

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

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

Klasifikasi sistem ini didasarkan atas kriteria-kriteria sebagai berikut:

a. *Ukuran butir:*

Kerikil : Butiran melalui ayakan dengan lubang 75 mm dan tertinggal di atas ayakan No. 10 dengan lubang 2 mm.

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

Lumpur dan lempung : Butiran melalui ayakan No. 200

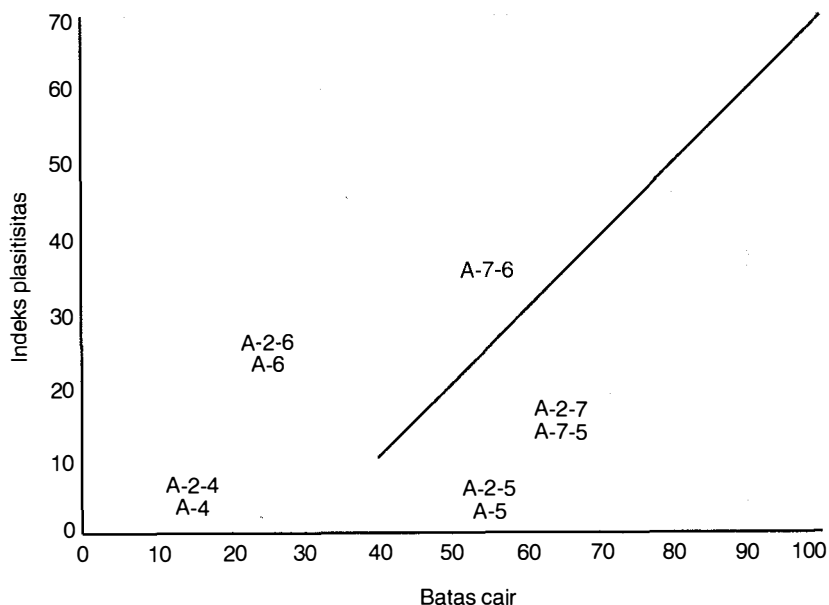
b. *Plastisitas:*

Disebut lumpur, jika butiran tanah mempunyai indeks plastisitas = 10 atau kurang.

Disebut lempung, jika butiran tanah mempunyai indeks plastisitas = 11 atau lebih.

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

Gambar 3.3. menunjukkan gambaran daerah yang berhubungan dengan batas cair dengan indeks plastisitas tanah yang termasuk dalam kelompok-kelompok: A-2, A-4, A-5, A-6 dan A-7.



Gb. 3.3. Daerah batas cair dan indeks plastisitas tanah-tanah kelompok A-2, A-4, A-5, A-6 & A-7.

Untuk menilai kualitas tanah sebagai bahan subgrade jalan raya dapat ditentukan dengan angka indeks kelompok (Group Index = GI) yang menentukan kelompok dan sub kelompok tanah.

Indeks kelompok dapat dihitung dengan persamaan:

$$GI = (F-35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01(F - 15)(PI - 10) \dots\dots (3.1.)$$

Dalam hal ini:

F = persentase butir yang lolos ayakan No. 200

LL = batas cair

PI = indeks plastisitas.

Bagian pertama persamaan (3.1.) dalam hal ini:

$(F-35) [0,2 + 0,005 (LL-40)]$ adalah bagian indeks kelompok tetap batas cair. Bagian kedua, dalam hal ini $0,01 (F-15) (PI-10)$ adalah bagian indeks kelompok tetap indeks plastisitas.

Berikut ini ketentuan-ketentuan untuk menentukan indeks kelompok:

- a. Jika persamaan (3.1.) menghasilkan harga GI negatif, maka diambil = 0.
- b. Indeks kelompok yang dihitung dari persamaan (3.1.) dibulatkan ke bilangan bulat yang terdekat, misalnya: GI = 3,40 dibulatkan menjadi = 3 dan GI = 3,50 dibulatkan menjadi = 4 dan ditempatkan dalam tanda kurung di belakang kelompok dan sub kelompok tanah, misalnya: A-2-6 (3).
Pada umumnya makin besar nilai indeks kelompoknya, makin kurang baik tanah tersebut untuk dipakai dalam pembangunan jalan raya, untuk tanah-tanah di dalam sub kelompok tersebut.
- c. Dalam hal ini tidak ada batas lebih tinggi untuk indeks kelompok.
- d. Indeks kelompok tanah digolongkan ke dalam kelompok-kelompok: A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 dan A-3 akan selalu nol.
- e. Jika menghitung indeks kelompok untuk tanah-tanah yang tergolong dalam kelompok-kelompok A-2-6 dan A-2-7, maka bagian indeks kelompok untuk PI dapat digunakan persamaan:
GI = 0,01 (F-15) (PI-10) (3.2.)

Tabel 3.1. Klasifikasi tanah sistem Unified*

Divisi		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria Klasifikasi
Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan no. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \text{ antara 1 dan 3}$
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.	
	Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung	
Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)		SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 60$ $C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \text{ atau 1 dan 3}$
		SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.	
	Pasir bersih kandungan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$
		SC	Pasir berlanau, campuran pasir-lempung	
*Klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus: Kurang dari 50% lolos saringan no. 200: GM, GP, SW, SP Lebih dari 12% lolos saringan no. 200: GM, GC, SM, SC 5% - 12% lolos saringan no. 200: Batasan Klasifikasi yang mempunyai simbol double				
				Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW
				Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW
				Bila batas Atterberg berada di daerah arsi dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol
				Bila batas Atterberg berada di daerah arsi dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol

Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50% atau kurang	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau bertempung	<p>Diagram plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas aterberg yang termasuk dalam daerah yang diarsir ber- arti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.</p> <p>Batas Cair LL (%) Garis A: $PI = 0,73 (LL - 20)$</p>
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai se- dang, lempung berkerkil, lem- pung berpasir, lempung ber- lanau, lempung kurus ('clean clays')	
	Lanau dan lem- pung batas cair > 50%	OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plas- tisitas rendah	
		MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis.	
		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ('fat clays')	
		OH	Lempung organik dengan plas- tisitas sedang sampai tinggi	
Tanah dengan organik tinggi		Gambut ('peat'), dan tanah lain dengan kandungan or- ganik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual da- pat dilihat ASTM Designation D-2488	

Tabel 3.2. Sistem klasifikasi tanah AASHTO.

Perhatikan bahwa A-8, gambut dan rawang ditentukan dengan klasifikasi visual dan tidak diperlihatkan dalam tabel.

Klasifikasi umum	Bahan-bahan (35% atau kurang melalui No. 200)							Bahan-bahan lanau-lempung (Lebih dari 35% melalui No. 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Klasifikasi kelompok	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5; A-7-6:
Analisis saringan: Persen melalui: No. 10 No. 40 No. 200	50 maks. 30 maks. 15 maks.	50 maks. 25 maks.	51 maks. 10 maks.	35 maks.	35 maks.	35 maks.	35 maks.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Karakteristik fraksi melalui No. 40 Batas cair: Indeks plastisitas	6 maks.		N.P.	40 maks. 10 maks.	41 min. 10 maks.	40 maks. 11 min.	41 maks. 10 maks.	40 maks. 10 maks.	41 min. 10 maks.	40 maks. 10 min.	41 maks. 11 min.
Indeks kelompok	0		0	0		4 maks.		8 maks.	12 maks.	16 maks.	20 maks.
Jenis-jenis bahan pendukung utama	Fragmen batuan, kerikil, dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir berianau atau berlempung				Tanah berianau		Tanah berlempung	
Tingkatan umum sebagian tanah dasar	Sangat baik baik sampai baik							sedang sampai buruk			

Untuk : A-7-5 : PI LL – 30 NP = Non plastis

Untuk : A-7-6 : PI LL – 30

Tabel 3.3. Perbandingan sistem Unified dengan sistem AASHTO (Liu, 1967).

Kelompok tanah sistem Unified	Kelompok tanah yang sebanding dalam sistem AASHTO		
	Sangat mungkin	Mungkin	Kemungkinan kecil
GW	A-1-a	–	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GP	A-1-a	A-1-b	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GM	A-1-b, A-2-4 A-2-5, A-2-7	A-2-6	A-4, A-5, A-6, a-7-5, A-7-6, A-1-a
GC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6	A-4, A-7-6, A-7-5
SW	A-1-b	A-1-a	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6 A-2-7
SP	A-3, A-1-b	A-1-a	A-2-4, A-2-5 A-2-6, A-2-7
SM	A-1-b, A-2-4 A-2-5, A-27	A-2-6, A-4 A-5	A-6, A-7-6 A-7-6, A-1-a
SC	A-2-6, A-2-7 A-4, A-7-6	A-2-4, A-6	A-7-5
ML	A-4, A-5	A-6, A-7-5	–
CL	A-6, A7-6	A-4	–
OL	A-4, A-5	A-6, A-7-5 A-7-6	–
MH	A-7-5, A-5	–	A-7-6
CH	A-7-6	A-7-5	–
OH	A-7-5, A-5	–	A-7-6
Pt	–	–	–

Tabel 3.4. Perbandingan sistem AASHTO dengan sistem Unified (Liu. 1967).

Kelompok tanah sistem Unified	Kelompok tanah yang sebanding dalam sistem Unified		
	Sangat mungkin	Mungkin	Kemungkinan kecil
A-1-a	GW, GP	SW, SP	GM, SM
A-1-b	SW, SP, GM, SM	GP	–
A-3	SP	–	SW, GP
A-2-4	GM, SM	GC, SC	GW, GP, SW, SP
A-2-5	GM, SM	–	GW, GP, SW, SP
A-2-6	GC, SC	GM, SM	GW, GP, SW, SP
A-2-7	GM, GC, SM, SC	–	GW, GP, SW, SP
A-4	ML, OL	CL, CM, SC	GM, GC
A-5	OH, MH, ML, OL	–	SM, GM,
A-6	CL	ML, OL, SC	GC, GM, SM
A-7-5	OH, MH	ML, OL, CH	GM, SM, GC, SC
A-7-6	CH, CL	ML, OL, SC	OH, MH, GC, GM, SM

Contoh-contoh soal:

1. Diketahui data-data klasifikasi untuk tiga macam tanah sebagai berikut:

Uraian	Tanah		
	A	B	C
Persentase yang melalui ayakan			
No. 4	42	72	95
10	33	55	90
40	20	48	83
100	18	42	71
200	14	38	55
Batas cair : LL (%)	35	39	55
Batas plastis : PL (%)	22	27	24
Pengamatan visual	Coklat gelap, sangat berkerkil	Coklat kekelabuan, sedikit berbatu	Biri kelabu, sedikit berkerkil

Tentukan klasifikasi tanah berdasarkan sistem klasifikasi kesatuan tanah.

Penyelesaian:

- 1) Untuk tanah A:
 - a. Kurang dari 50% melalui ayakan No. 4, maka tanah terutama terdiri dari kerikil = G.
 - b. Dengan meninjau kedudukan $LL = 35\%$ dan $PI = LL - PL$ $PI = 35 - 12 = 13$ lihat gambar 3.2. Diagram plastisitas, maka diperoleh CL.
 - c. Dari dua pengamatan sebelumnya dan deskripsi visual tanah ini, maka tanah A adalah: coklat gelap, kerikil berlempung (Gravel-Clayey) = GC.
- 2) Untuk tanah B:
 - a. Kurang dari 50% melalui ayakan No. 200, maka tanah adalah berbutir kasar (pasir atau kerikil).
 - b. Hitung persentase yang melalui ayakan No. 4 dan tertahan di atas ayakan No. 200 sebagai berikut:
$$72 - 38 = 34\% \text{ pasir}$$
$$100 - 72 = 28\% \text{ kerikil}$$
maka sudah tentu lebih dari setengah fraksinya adalah pasir:
 - c. Lebih dari 12% melalui ayakan No. 200 dan dari batas-batas Atterberg, tanah digambarkan di bawah garis A di mana $LL = 39$ dan $PI = 39$ dan $PI - 39 - 27 = 12$, maka diperoleh ML. Dengan memperhatikan bahwa persentase pasir dan kerikil hampir sama, maka tanah B adalah coklat kekelabuan, sangat berkerikil, pasir berlanau dengan sebagian kecil bahan organis, SM.
- 3) Untuk tanah C:
 - a. Dengan 55% melalui ayakan No. 200, maka tanah adalah berbutir halus.
 - b. Mempergunakan $LL = 55\%$ dan $PI = 55 - 24 = 31$, tanah digambarkan di atas garis A dan juga di atas garis dengan $LL > 50$, maka tanah C adalah biru kelabu, lempung berpasir, tanah gambut dengan sebagian kecil kerikil, CH.

2. Dengan menggunakan data-data soal No. 1. Buatlah klasifikasi ketiga macam tanah tersebut dengan menggunakan sistem klasifikasi AASHTO.

1) Klasifikasi tanah A:

- a. Dengan menggunakan tabel 3.2 dilihat dari arah kiri ke kanan, tanah akan masuk kelompok A-1 atau A-3 atau A-2 oleh karena hanya 14% yang melalui ayakan No. 200.
- b. Berdasarkan $PI = 13$ (lihat soal No. 1), kita tiadakan A-1 dan A-3.
- c. Dengan $LL = 35\%$ dan $PI = 13$, tanah dapat dimasukkan ke dalam klasifikasi A-2-6.
- d. Indeks kelompok dapat dihitung dengan persamaan (3.1.)
 $GI = (F-35) [0,2 + 0,005 (LL-40)] + 0,01 (F-15) (PI-10)$
 $F = 14\%$
 $LL = 35\%$
 $PI = 13$
 $GI = \text{bilangan negatif, dihitung} = 0$
- e. Dari pemeriksaan data analisis ayakan dan klasifikasi, tanah A adalah coklat tua, kerikil berpasir yang berlanau atau berlempong, (A-2-6(0)).

2) Klasifikasi tanah B:

- a. Dengan bergerak dari kiri ke kanan dalam tabel 3.2., maka tanah akan masuk kelompok A-4 atau A-5 atau A-6 atau A-7, karena ada 38% yang melalui ayakan No. 200.
- b. Berdasarkan $PI = 12$, maka tanah hanya dapat dimasukkan ke dalam kelompok A-6 atau A-7.
- c. Dengan $LL = 39\%$, maka tanah adalah A-6.
- d. Indeks kelompok:
 $F = 38\%$
 $LL = 39\%$
 $PI = 12$
 $GI = (F-35) 0,2 + 0,005 (LL-40) + 0,01 (F-15) (PI-10)$
 $GI = (38-35) 0,2 + 0,005 (39-40) + 0,01 (38-15) (12-10)$
 $GI = 0,585 + 0,460 = 1,045 \text{ dibulatkan} = 1.$
- e. Dengan memperhatikan hasil analisis ayakan dan data-data perhitungan tersebut, menunjukkan bahwa tanah B merupakan

tanah lanau berpasir atau lempung berpasir banyak mengandung kerikil dan bahan organis, coklat kelabu A-6 (1).

3) Klasifikasi tanah C:

- a. Dengan 55% melalui ayakan No. 200, tanah termasuk kelompok A-4, A-5, A-6 atau A-7.
- b. Dengan LL = 55% dan PI = 31, tanah adalah A-7-6 karena : PI LL – 30 (31 > 25). Lihat catatan kaki tabel 3.2.
- c. Indeks kelompok:
 $F = 55\%$
 $LL = 55\%$
 $PI = 31$
 $GI = (55-35)[0,2 + 0,005 (55-40)] + 0,01 (55-15)(31-10)$
 $GI = 5,50 + 8,40 = 13,90$ dibulatkan = 14.
- d. Dari hasil-hasil di atas, tanah C merupakan lempung berpasir dengan sejumlah kecil kerikil, berwarna biru kelabu, A-7-6 (14).

Soal-soal latihan:

- 1. Tentukan simbol tanah-tanah berikut ini, jika diketahui:
 - a. Batas cair = 40%; Batas plastis = 22%
 - b. Batas cair = 20%; Batas plastis = 14%
 Penyelesaian gunakan diagram plastisitas gambar 3.2.

2.

Uraian	Tanah				
	A	B	C	D	E
Persentase yang					
No. 4	49	76	82	97	–
10	35	67	71	92	98
40	26	40	33	85	91
100	20	36	22	76	75
200	14	27	4	54	62
Batas cair : LL (%)	32,6	41,3	NP	53,4	48,3
Batas plastis : PL (%)	21,5	22,3	31,6	28,1	
Pengamatan visual :	Coklat tua	Kuning coklat	Coklat muda	Kelabu tua dengan bau kayu	Coklat Kemerahan

Tentukan klasifikasi tanah A, B, D, dan E kelompok di atas dengan memakai sistem klasifikasi Unified.

3. Dengan menggunakan data-data seperti soal No. 2, tentukan klasifikasi seluruh tanah tersebut dengan menggunakan sistem klasifikasi AASHTO.

3.3. KARAKTERISTIK DASAR TANAH

1. Analisis pembagian butir, (*Grain size analysis*)

Analisis pembagian butir umumnya dibagi menjadi dua bagian yaitu:

- 1) Analisis ayakan (*Sieve analysis*)

Analisis pembagian butir umumnya dibagi menjadi dua bagian yaitu:

- 2) Analisis hidrometer (*Hydrometer analysis*) atau analisis endapan (*Sedimentation analysis*) atau analisis mekanis basah (*Wat mechanical analysis*). Analisis ini dipakai untuk tanah berbutir halus (*Finer part*), seperti lempung (*Clay*) dan lumpur (*Silt*).

- 1) Analisis ayakan

Tanah yang akan dianalisis dikeringkan dengan panas matahari atau dengan oven/alat pemanas. Kemudian dihaluskan dan diayak dengan ayakan yang tersusun dari bawah dengan lubang terkecil/terhalus sampai ke atas dengan lubang terbesar/terkasar.

Dari sisa-sisa tanah yang tertinggal di atas ayak dan yang lolos, maka dapat digambarkan dalam kurva pembagian butir dan dari kurva tersebut dapat ditentukan jenis tanahnya dan gradasinya.

Sehubungan dengan ini dapat diperoleh parameter-parameter sebagai berikut:

Ukuran efektif (*effective size*) = D_{10}

Koefisien keseragaman (*uniformity coefficient*):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots\dots\dots (3.3.)$$

Dalam hal ini:

C_u = koefisien keseragaman (*uniformity coefficient*)

D_{60} = ukuran butir yang sepadan dengan 60% melalui ayakan (yaitu lebih kecil daripada ukuran tersebut).

Koefisien gradasi (*coefficient of gradation*) atau koefisien lengkungan (*coefficient of curvature*):

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \dots\dots\dots (3.4.)$$

Dalam hal ini:

C_c = koefisien gradasi atau koefisien lengkungan

D_{30} = ukuran butir yang sepadan dengan 30% melalui ayakan (yaitu lebih kecil daripada ukuran tersebut).

2) Analisis hidrometer

Analisis hidrometer berdasarkan pada prinsip-prinsip sebagai berikut:

- a. Butiran-butiran dalam campuran air (suspensi) akan menurun dengan kecepatan tertentu yang tergantung ukuran butir-butirnya. Butir-butir yang berukuran sama akan menurun dengan kecepatan sama.

Kecepatan ini menurut Hukum Stokes adalah sebagai berikut:

$$V = \frac{2}{9} r^2 \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\eta} \dots\dots\dots (3.5.)$$

atau

$$V = \frac{1}{18} D^2 \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\eta} \dots\dots\dots (3.6.)$$

Dalam hal ini:

- r = jari-jari butir bulat (cm)
- D = diameter butir bulat (cm)
- γ_s = berat isi butir (gr/cm³)
- γ_w = berat isi air (gr/cm³)
- η = kekentalan air dinamis (gr-det/cm²)
- $\eta = \frac{\mu}{g}$
- μ = kekentalan mutlak/absolut (dyne-det/cm²) (poise)
- g = percepatan gravitasi (cm/det.²)

Jika suspensi tersebut menggunakan air dalam hal ini berat isi air : $\gamma_w = 1 \text{ gram/cm}^3$, maka:

$$\gamma_s = G \cdot \gamma_w = G \dots\dots\dots (3.7.)$$

masukkan persamaan (3.7.) ke dalam persamaan (3.6.):

$$V = \frac{1}{18} D^2 \frac{G-1}{\eta}$$

$$V = \frac{1}{18} (0,10D)^2 \frac{G-1}{\eta} \quad \begin{array}{l} D = 1 \text{ cm} = 10 \text{ mm} \\ D = 1 \text{ mm} = 0,10 \text{ cm} \end{array}$$

$$V = \frac{G-1}{1800 \eta} D^2$$

$$D = \sqrt{\frac{1.8000 \cdot \eta \cdot V}{G-1}} \quad (\text{mm}) \dots\dots\dots (3.8.)$$

Jika butir dengan diameter D (mm) turun setinggi H_e (cm) dalam waktu t menit, maka:

$$V = \frac{H_e}{60t} \quad (\text{cm/det.}) \dots\dots\dots (3.9.)$$

Dengan memasukkan harga V dari persamaan (3.9.) ke dalam persamaan (3.8.), maka akan diperoleh persamaan:

$$D = \sqrt{\frac{1800\eta H_e}{G-1 60t}}$$

$$D = \sqrt{\frac{30\eta}{G-1}} \sqrt{\frac{H_e}{t}}$$

$$D = 10^{-5} M \sqrt{\frac{H_e}{t}} \dots\dots\dots (3.10.)$$

Dalam hal ini:

$$M = 10^5 \sqrt{\frac{30 \eta}{G-1}}$$

H_e = tinggi penurunan/tinggi efektif

t = waktu penurunan

Untuk memudahkan perhitungan, maka oleh BC. Punmia telah dibuatkan tabel harga-harga faktor M dengan bermacam-macam suku dan berat spesifik. (Lihat tabel 3.5.)

Tabel 3.5. Harga-harga faktor MI

Temp. °C	μ (Poise)	Faktor M					
		G=2.50	G=2.60	G=2.65	G=2.70	G=2.75	G=2.80
15	001145	1528	1479	1458	1435	1414	1395
16	001116	1508	1460	1438	1417	1396	1377
17	001088	1490	1442	1420	1399	1379	1360
18	001060	1470	1423	1402	1381	1361	1342
19	001034	1452	1406	1384	1364	1344	1325
20	001009	1434	1389	1367	1347	1328	1309
21	000984	1417	1372	1351	1331	1311	1294
22	000961	1400	1355	1335	1315	1296	1278
23	000938	1383	1339	1313	1291	1280	1262
24	000916	1367	1323	1305	1284	1265	1248
25	000896	1351	1308	1288	1269	1251	1233
26	000875	1335	1293	1273	1254	1236	1219
27	000855	1321	1279	1259	1241	1224	1206
28	000836	1305	1264	1244	1226	1208	1191
29	000818	1291	1250	1231	1213	1192	1178
30	000800	1277	1236	1217	1199	1182	1165
31	000783	1264	1224	1205	1187	1170	1154
32	000767	1251	1211	1193	1175	1158	1142
33	000751	1238	1199	1180	1163	1146	1130
34	000736	1225	1186	1168	1151	1134	1118
35	000721	1212	1174	1156	1139	1120	1107
36	000706	1199	1161	1144	1127	1110	1095
37	000692	1188	1150	1133	1116	1100	1084
38	000679	1176	1139	1122	1105	1089	1074
39	000666	1165	1128	1110	1094	1079	1064
40	000654	1155	1118	1101	1084	1069	1055

Catatan: Untuk harga-harga yang tidak terdapat dalam tabel ini dapat digunakan interpolasi linier.

Tabel 3. 6. Kekentalan air (milipoise).

C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	17.94	17.32	16.74	16.19	15.68	15.19	14.73	14.29	13.87	13.48
10	13.10	12.74	12.39	12.06	11.75	11.45	11.16	10.88	10.60	10.34
20	10.09	9.84	9.61	9.38	9.16	8.95	8.75	8.55	8.36	8.18
30	8.00	7.83	7.67	7.51	7.36	7.31	7.06	6.92	6.79	6.66
40	6.54	6.42	6.30	6.18	6.08	5.97	5.87	5.77	5.68	5.58
50	5.29	5.40	5.32	5.24	5.15	5.07	4.99	4.92	4.84	4.77
60	4.70	4.63	4.56	4.50	4.43	4.37	4.31	4.24	4.19	4.13
70	4.07	4.02	3.96	3.91	3.86	3.81	3.76	3.71	3.66	3.62
80	3.57	3.53	3.48	3.44	3.40	3.36	3.32	3.28	3.24	3.20
90	3.17	3.13	3.10	3.06	3.03	2.99	2.96	2.93	2.90	2.87
100	2.84	2.82	2.79	2.76	2.73	2.70	2.67	2.64	2.62	2.59

- 1 dyne-det/cm² = 1 poise
- 1 gram-det/cm² = 980,7 poise
- 1 pound-det/ft² = 478,69 poise
- 1 poise = 1.000 milipoise

b. Berat spesifik/berat jenis suspensi tergantung konsentrasi butir-butir yang terkandung didalamnya. Jadi dengan cara mengukur berat jenis suspensi kita dapat menghitung banyaknya tanah yang ada di dalam campuran tersebut.

Misal kita anggap bahwa pada kedalaman efektif H_e setelah waktu t terdapat butir-butir tanah sebanyak : B = gram/cm³, maka isi butir tanah : V = B/G, dalam hal ini : G = berat jenis butir. Sehingga isi air setiap cm³ = 1-B/G. Setiap cm³ suspensi mempunyai jumlah berat =

$$B + 1 - \frac{B}{G} = 1 + B \left(\frac{G - 1}{G} \right)$$

Jadi berat jenis suspensi:

$$G_{\text{susp.}} = 1 + B \left(\frac{G - 1}{G} \right) = \text{pembacaan hidrometer}$$

sehingga:

$$R_h = 1 + B \left(\frac{G - 1}{G} \right) \dots\dots\dots (3.11.)$$

Dalam hal ini:

R_h = pembacaan hidrometer (*Reading of hydrometer*)

Jika yang dicari harga B, maka:

$$B = \frac{B}{G-1}(R_h - 1) \dots\dots\dots (3.12.)$$

Dengan hidrometer kita mengukur berat jenis campuran, sehingga kita dapat menghitung: B, yaitu berat tanah tiap cm^3 dengan ukuran lebih kecil daripada diameter D tadi.

Jumlah berat tanah dalam suspensi dengan ukuran lebih kecil daripada D ialah = 1.000 B kalau isi suspensi = 1.000 cm^3 .

Persentase seluruh contoh tanah yang termasuk dalam suspensi:

$$P = \frac{1.000 B}{W} \times 100\% \dots\dots\dots (3.13.)$$

Dalam hal ini:

P = persentase ukuran butir lebih kecil D

W = jumlah berat tanah dalam suspensi.

Dengan memasukkan pers. (3.12.) ke dalam pers. (3.13.), maka akan diperoleh:

$$P = \frac{1.000}{W} \left(\frac{G}{G-1} \right) (R_h - 1) \times 100\% \dots\dots\dots (3.14.)$$

3.4. PERCOBAAN-PERCOBAAN DI LABORATORIUM

1. Analisis ayakan

Standar yang berlaku:

Bina Marga : PB - 0201 - 76

ASTM : C - 136 - 46

AASHTO : T - 27 - 74

- a. *Tujuan:*
Untuk menentukan pembagian butir suatu contoh tanah.
- b. *Alat-alat yang digunakan:*
- 1) Satu set ayakan dengan ukuran lubang : 1,5", 1", 0,75", 0,375", No. 4 (4,750 mm), No. 8 (2,360 mm) No. 30 (0,600 mm). No. 50 (0,300 mm), No. 100 (0,150 mm) dan No. 200 (0,075 mm).
 - 2) Neraca dengan ketelitian 0,20% benda uji.
 - 3) Oven listrik 110°C.
 - 4) Mesin penggetar ayakan (*Sieve Shaker*).
 - 5) Alat pemisah contoh tanah.
 - 6) Talam.
 - 7) Kuas, sikat kuning, skop kecil dll.
- c. *Cara melakukan percobaan:*
- 1) Contoh tanah dikeringkan kering oven.
 - 2) Ayak contoh tanah dengan susunan ayakan dengan lubang paling besar di atas dan terkecil di bawah serta alas.
 - 3) Ayakan digoyang dengan tangan atau digetar dengan mesin penggetar selama 15 menit.
 - 4) Contoh tanah yang tertahan pada tiap-tiap ayakan ditimbang beratnya.
- d. *Analisis perhitungan:*
- 1) Hitung berat contoh tanah yang tertahan pada tiap-tiap ayakan dan dijumlah.
 - 2) Hitung persentase contoh tanah yang tertahan pada tiap-tiap ayakan dan dijumlah.
 - 3) Hitung persentase yang lolos pada tiap-tiap ayakan.
 - 4) Hasil-hasil tersebut digambar kertas grafik yang sudah disediakan.
Dari kurva yang diperoleh akan diketahui jenis tanahnya dan gradasinya.
- e. *Contoh perhitungan:*
Diketahui data contoh tanah sebesar – 450 gram akan dianalisis dengan analisis ayakan dan diperoleh hasil-hasil seperti tampak pada tabel di bawah ini.

Tentukan persentase berat yang tertinggal dan lolos pada tiap-tiap ayakan.

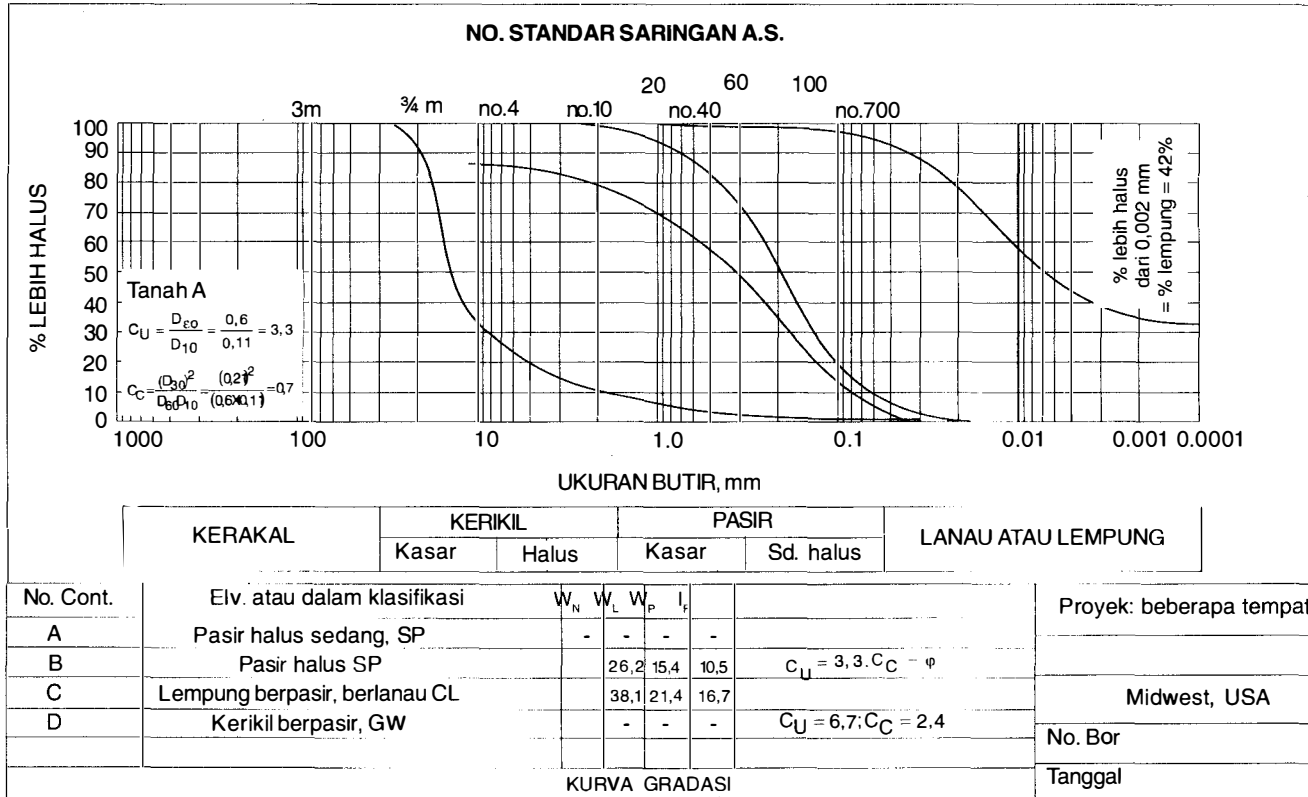
Perhitungan:

No. ayakan	Diameter (mm)	Massa tanah yang tertahan di atas tiap-tiap ayakan (gram)	Persentase tanah yang tertahan di atas tiap-tiap ayakan**)	Persentase tanah yang lolos *)
1	2	3	4	5
10	2,000	0	0	100,00
16	1,180	9,90	2,20	97,80
30	0,600	24,66	5,48	92,32
40	0,425	17,60	3,91	88,41
60	0,250	23,90	5,31	83,10
100	0,150	35,10	7,80	75,30
200	0,075	59,85	13,30	62,00
Pan	–	278,99	62,00	0

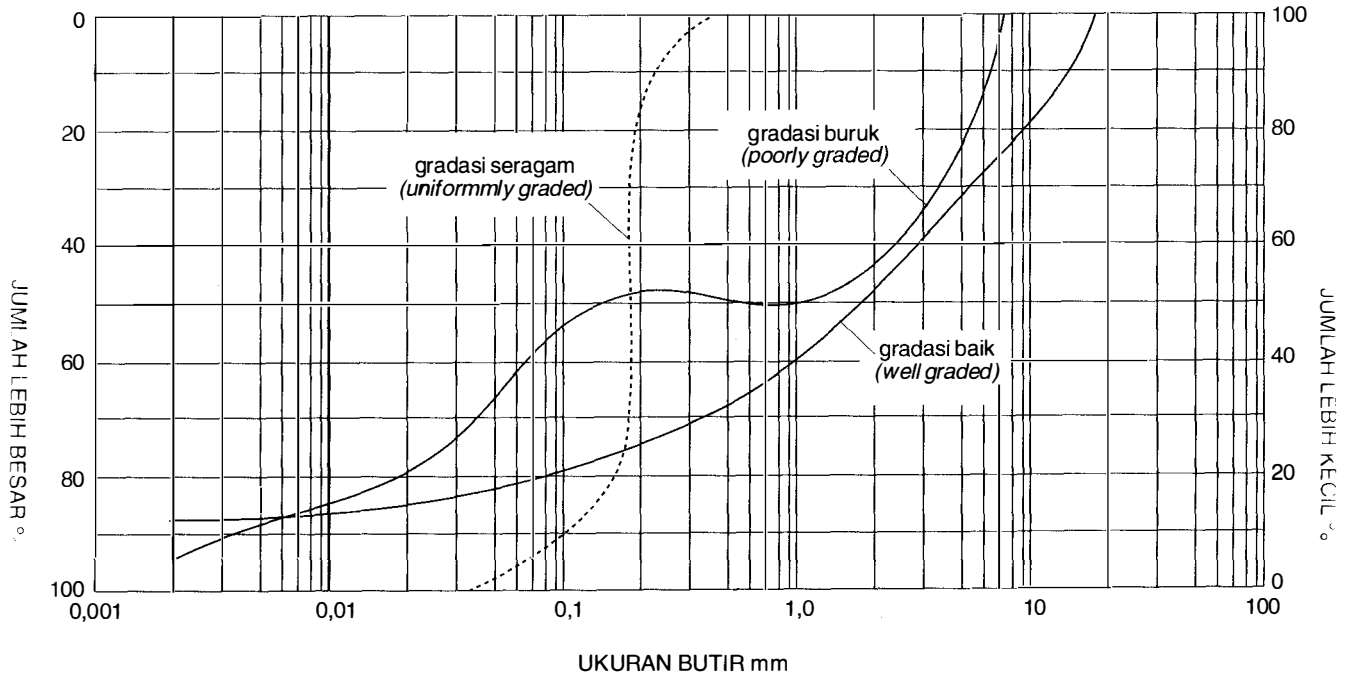
*) Ini disebut juga persentase yang lebih halus.

***) Kolom 4 = kolom 3 dibagi jumlah berat massa tanah x 100%

Hasil perhitungan ini kemudian digambarkan di kertas kurva gradasi.



Gb. 3.4. Kurva distribusi ukuran butir untuk beberapa jenis tanah dengan memakai penggambaran semilogaritmis. Di sini penggambaran dibuat dengan ukuran butir bertambah dari kanan ke kiri.



lempung (<i>clay</i>)	lanau (<i>silt</i>)	halus	sedang	kasar	kerikil (<i>gravel</i>)
		pasir (<i>sand</i>)			

Gb. 3.4a. Grafik Pembagian ukuran butir

Tabel 3.7 Saringan Standar untuk A.S. Inggris, Perancis, dan Jerman. Saringan A.S. semuanya tersedia dalam diameter 20 cm dan sebagian besar tersedia dalam diameter 30,5 cm.

A.S.†		Standar Inggris‡		Perancis§		Jerman DIN¶	
Ukuran atau no.	Lobang mm	No.	Lobang mm	No.	Lobang mm	Tanda, um	Lobang mm
Ukuran 4"	101,6						
3"	76,1						
2½"	64,0						
2"	50,8						
1¾"	45,3						
1½"	38,1						
1¼"	32,						25,0
1"	25,4						20,0
½"	19,0						18,0
5/8"	16,0						16,0
½"	12,7						12,5
3/8"	9,51						10,0
5/16"	8,00						8,0
¼".No. 3	6,35						6,3
No. 4**	4,76			38**	5,000		5,0
5	4,00			37	4,000		4,0
6	3,36	5**	3,353				
7	2,83	6	2,812	36	3,150		3,15
8	2,38	7	2,411	35	2,500		2,5
10	2,00	8	2,057	34	2,000		2,0
12	1,68	10	1,676	33	1,600		1,6
14	1,41	12	1,405	32	1,250		1,25
16	1,19	14	1,204				
18	1,00	16	1,003	31	1,000		1,0
20	0,841	18	0,853				

Lanjutan Tabel 3.7.

	25	0,707	22	,699	30	,800	800	,800
	30	0,595	25	,599	29	,630	630	,630
	35	0,500	36++	,422	27++	,400	400++	,400
	50	0,297	52	,295				
No.	60	0,250	60	,251	25	,250	250	,250
	70	0,210	72	,211	24	,200	200	,200
	80	0,177	85	,78	23	,160	160	,160
	100	0,149	100	,152				
	120	0,125	120	,124	22	,125	125	,125
	140	0,105	150	,104	21	,100	100	,100
	170	0,088	170	,089			90	,100
					20	,080	80	,080
	200	0,074	200	,076			71	,071
	230	0,063	240	,066	19	,063	63	,063
							56	,056
	270	0,053	300	,53	18	,050	50	,050
	325	0,004			17	,040	45	,045
	400	0,037					40	,040

† ASTM E-11-70 (Vol. 14,02).

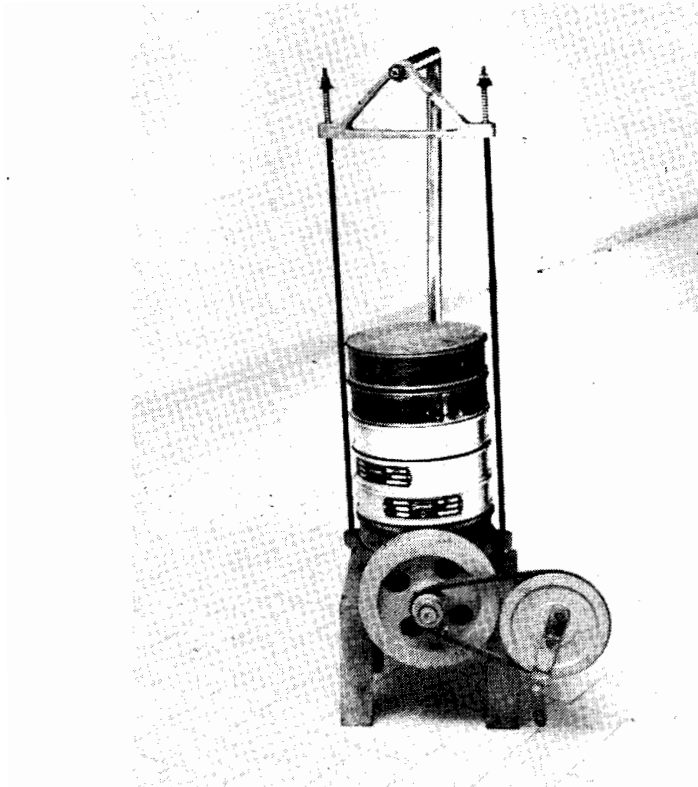
‡ British Standards Institution, London BS-410.

§ French Standard Specification, DIN 4188.

¶ German Standard Specification, DIN 4188.

** Untuk percobaan pemadatan standar.

†† Untuk batas-batas Atterberg.



Gb. 3.5. Mesin penggetar ayakan.
(Sieve shaker)

2. Analisis hidrometer

Standar yang berlaku:

Bina Marga : PB – 0105 – 76; PB – 0106 – 76

PB – 0107 – 76

ASTM : D 421-58 dan D 422-63

AASHTO : T 87-70 dan T 88-70

a. Tujuan:

Untuk menentukan pembagian ukuran butir tanah berbutir halus yang lolos ayakan No. 200.

b. *Alat-alat yang digunakan:*

- 1) Hidrometer dengan skala-skala konsentrasi (5 – 60 gram/liter) atau untuk pembacaan berat jenis campuran (0,995 – 1,030).
- 2) Tabung-tabung gelas ukuran kapasitas 1.000 cm³
- 3) Termometer kapasitas 0 – 50°C, dengan ketelitian 0,10°C.
- 4) Pengaduk mekanis (mixer) dan mangkuk dispersi.
- 5) Ayakan No. 10, No. 20, No. 40, No. 80, No. 100 dan No. 200.
- 6) Neraca kapasitas 200 gram, ketelitian 0,01 gram
- 7) Oven listrik dengan pengatur suhu sampai 110°C
- 8) Tabung gelas ukur dengan kapasitas 50 ml dan 100 ml.
- 9) Batang pengaduk.
- 10) Stop watch.

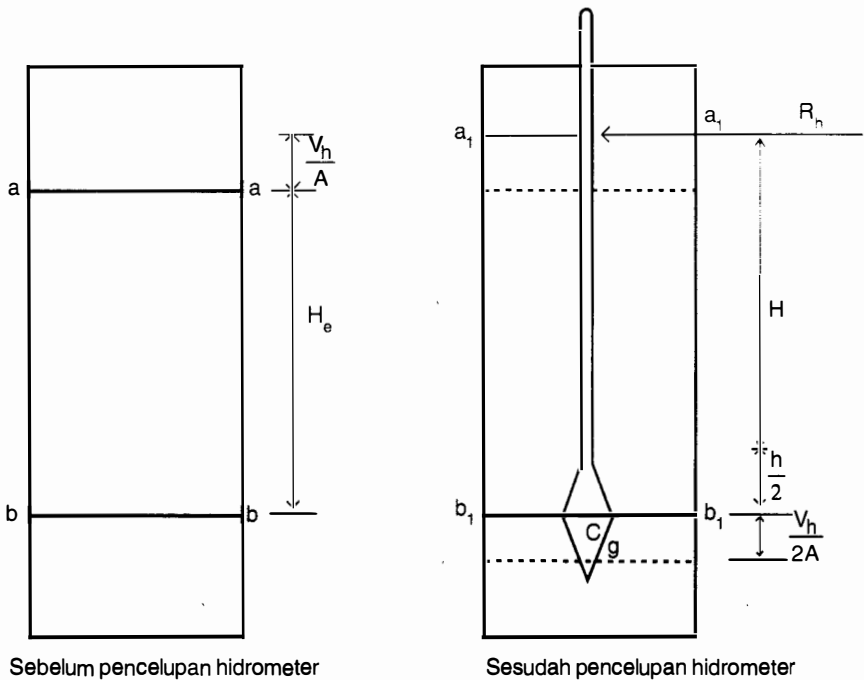
c. *Cara melakukan percobaan:*

- 1) Ambil contoh tanah yang lolos ayakan No. 10 sebanyak ± 50 gram, kemudian rendam dengan air murni sebanyak 200 cc (H₂O) selama 12 jam.
- 2) Setelah itu dicampur dengan 20 cc Na₂SiO₃ (Sodium silikat) atau Waterglass dan sodium metaposfat (Na_aPO₃) untuk menetralkan butiran, aduk sampai merata dan dibiarkan ke selama 24 jam.
- 3) Kemudian campuran dipindahkan ke dalam mangkuk pengaduk dan tambahkan air murni secukupnya. Aduk dengan pengaduk mekanis/listrik selama 15 menit.
- 4) Sesudah selesai, pindahkan suspensi/campuran ke dalam tabung gelas ukur dan tambahkan air murni sampai 1.000 cm³. Dengan menutup mulut tabung gelas ukur dengan telapak tangan suspensi dikocok dalam arah mendatar selama 1 menit.
- 5) Setelah dikocok, tabung diletakkan di atas meja dan masukkan hidrometer dengan hati-hati dan biarkan terapung bebas, lalu jalankan stop watch. Skala hidrometer dibaca pada interval waktu: 0,50, 1, 2 menit dan dicatat pembacaan-pembacaan itu sampai 0,50 gram/liter yang terdekat atau mendekati 0,001 berat jenis.

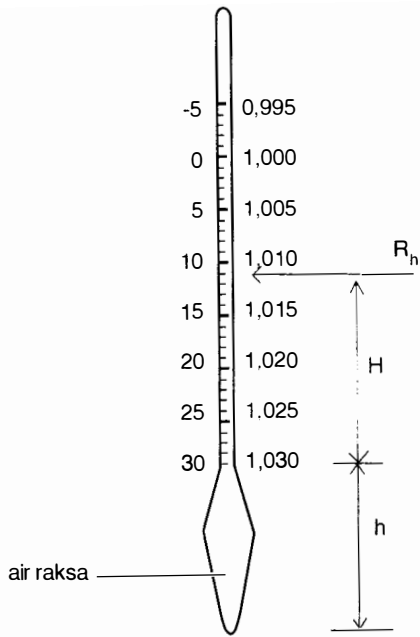
Sesudah pembacaan pada menit kedua, hidrometer diangkat hati-hati. Kemudian dicuci dengan air murni dan masukkan ke dalam tabung yang berisi air murni yang bersuhu sama seperti suhu tabung percobaan.

- 6) Hidrometer dimasukkan kembali dengan hati-hati ke dalam tabung berisi suspensi tadi dan lakukan pembacaan hidrometer pada interval waktu: 5, 15, 30 menit, 1, 4 dan 24 jam. Setiap selesai pembacaan, hidrometer dicuci dan dikembalikan ke dalam air murni. Proses memasukkan dan mengeluarkan hidrometer dilakukan masing-masing 10 detik.
- 7) Suhu suspensi diukur pada 15 menit pertama dan kemudian pada setiap pembacaan berikutnya.
- 8) Sesudah pembacaan terakhir, suspensi dipindahkan ke dalam ayakan No. 200 dan dicuci sampai air cucian jernih dan biarkan air yang mengalir terbang. Butiran yang tertinggal di atas ayakan No. 200 dikeringkan dan dilakukan pemeriksaan dengan analisis ayakan.

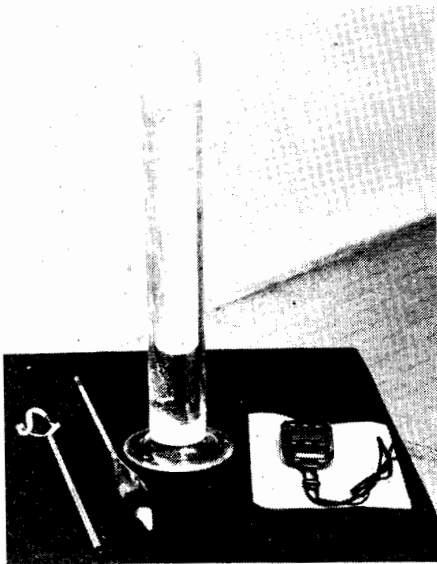
d. Kalibrasi pembacaan hidrometer.



Gb. 3.6. Tabung suspensi dan hidrometer.



Pembacaan skala hidrometer



Gb. 3.7. Perlengkapan hidrometer.

Tabung suspensi Gb. 3.6. (a) dengan luas penampang bagian dalam = A diisi suspensi. Misal kedudukan bidang a-a dan b-b tingginya = H_e = tinggi efektif, maka setelah hidrometer dimasukkan ke dalam tabung suspensi kedudukan bidang a-a akan naik menjadi $a_1 - a_1$ dan bidang b-b menjadi $b_1 - b_1$ Gb. 3.6. (b).

$$aa_1 = \frac{V_h}{A}$$

$$bb_1 = \frac{V_h}{2A}$$

$$H_e = \left(H + 0,50h + 0,50 \frac{V_h}{A} \right) - \frac{V_h}{A}$$

$$H_e = H + 0,50 h - 0,50 \frac{V_h}{A}$$

$$H_e = H + 0,50 \left(h - \frac{V_h}{A} \right) \dots\dots\dots (3.15.)$$

Dalam hal ini:

H_e = tinggi efektif/penurunan (*effective depth*)

H = tinggi leher sampai pembacaan hidrometer (R_h)

h = tinggi tabung berisi air raksa

V_h = isi hidrometer

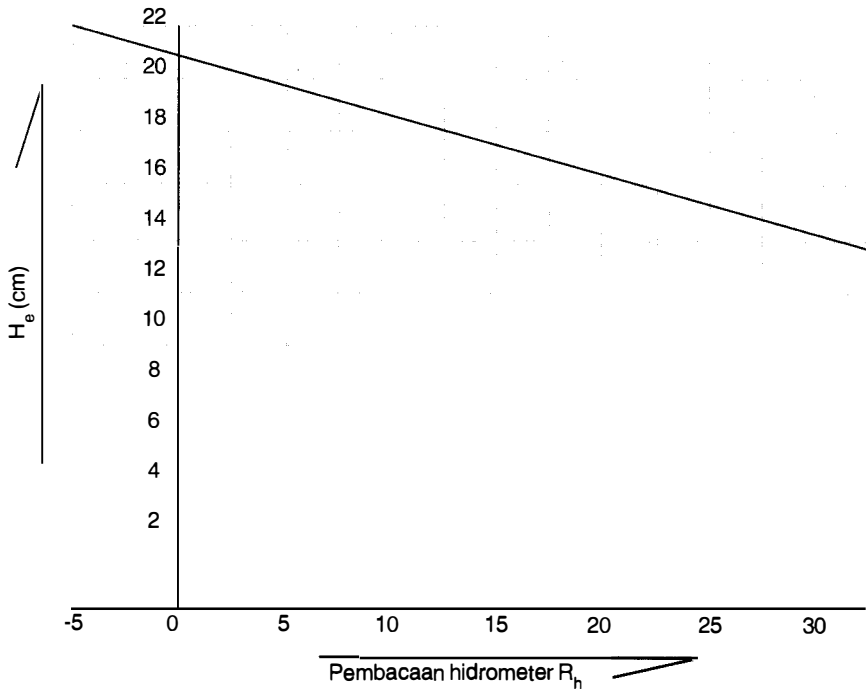
A = luas penampang bagian dalam tabung suspensi.

Contoh kalibrasi hidrometer.

- | | |
|---|--|
| 1. No. hidrometer: 25 | 1. Tabung pengendapan No. 5 |
| 2. Isi hidrometer : $V_h = 72 \text{ cm}^3$ | 2. Luas penampang: $A = 30 \text{ cm}^2$ |
| 3. Tinggi tabung : $h = 16,6 \text{ cm}$ | 3. Konstant: |

$$0,5 \left(h - \frac{V_h}{A} \right) = 7,1 \text{ cm}$$

Pembacaan hidrometer R_h	H (cm)	Tinggi efektif/penurunan H_e (cm)
30	1,80	8,90
25	3,69	10,70
20	5,40	12,50
15	7,30	14,40
10	9,20	16,30
5	11,10	18,20
0	13,00	20,10
-5	14,90	22,00



Gb. 3.8. Kurva kalibrasi hidrometer.

e. *Koreksi pembacaan hidrometer*

- 1) Berdasarkan ASTM, koreksi pembacaan hidrometer dipakai suhu standar = 20°C.
 Apabila dalam percobaan suhu suspensi tidak sama dengan 20°C, maka pada pembacaan hidrometer harus diberi faktor koreksi suhu = C_t .
 Jika suhu lebih besar 20°C diberi tanda + dan jika lebih kecil 20°C diberi tanda -
- 2) Oleh karena air meniscus ke atas (cekung), maka pembacaan hidrometer diberi faktor koreksi meniscus = C_m dan diberi tanda +
- 3) Faktor koreksi ketiga ialah koreksi gaya memencar butiran-butiran dalam suspensi = C_d dan diberi tanda -

f. *Analisis perhitungan:*

Setelah faktor koreksi diketahui dan pembacaan hidrometer setelah dikoreksi di hitung dengan persamaan:

$$R_{hc} = R_h \pm C_t + C_m - C_d \dots\dots\dots (3.16.)$$

Oleh karena faktor koreksi gaya memencar sulit ditentukan, maka faktor koreksi gaya memencar diabaikan, sehingga:

$$R_{hc} = R_h \pm C_t + C_m \dots\dots\dots (3.17.)$$

Dalam hal ini:

R_{hc} = Pembacaan hidrometer setelah dikoreksi

R_h = Pembacaan hidrometer dalam suspensi

C_t = Faktor koreksi suhu

C_m = Faktor koreksi meniscus

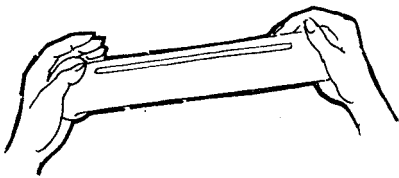
Harga-harga: C_t dapat dilihat pada tabel 3.8.

Tabel 3.8. Harga-harga faktor koreksi suhu C_t .

Suhu (°C)	C_t
15	- 1,10
17	- 0,90
18	- 0,70
19	- 0,50
20	0,00

Lanjutan Tabel 3.8.

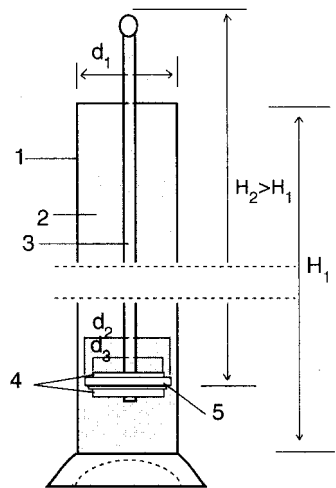
21	+ 0,20
22	+ 0,40
23	+ 0,70
24	+ 1,00
25	+ 1,30
26	+ 1,65
27	+ 2,00
28	+ 2,50
29	+ 3,05
30	+ 3,80



Dengan tangan

Keterangan:

1. tabung
2. suspensi
3. tangkai penarik
4. piringan logam
5. piringan karet keras



Dengan gerakan naik turun seperti pompa

Gb. 3.9. Pengaduk listrik dan pengocokan suspensi.

Contoh-contoh soal:

1. 500 gram tanah kering digunakan sebagai percobaan analisis ayakan. Berat tanah yang tertahan di atas tiap-tiap ayakan sebagai berikut:

Lubang ayakan (mm)	Berat tanah (gr)
2,000	10
1,400	18
1,000	60
0,500	135
0,250	145
0,125	56
0,075	45
Pan	31

Pertanyaan:

- Gambarkan hasil percobaan tersebut pada kurva distribusi ukuran butir
- Hitung persentase-persentase: Kerikil, pasir kasar, pasir sedang, pasir halus dan lanau
- Hitung koefisien kseragaman
- Hitung koefisien gradasi/kelengkungan.
- Berikan komentar jenis tanah tersebut.

Jawaban:

a.

Lubang ayakan (mm)	Diameter butir (mm)	Berat tanah tertahan (gr)	% tanah tertahan	Kumulatif tertahan %	% lebih halus P
-	-	-	-	-	100,00
2,000	2,000	10	2,00	2,00	98,00
1,400	1,400	18	3,60	5,60	94,40
1,000	1,000	60	12,00	17,60	82,40

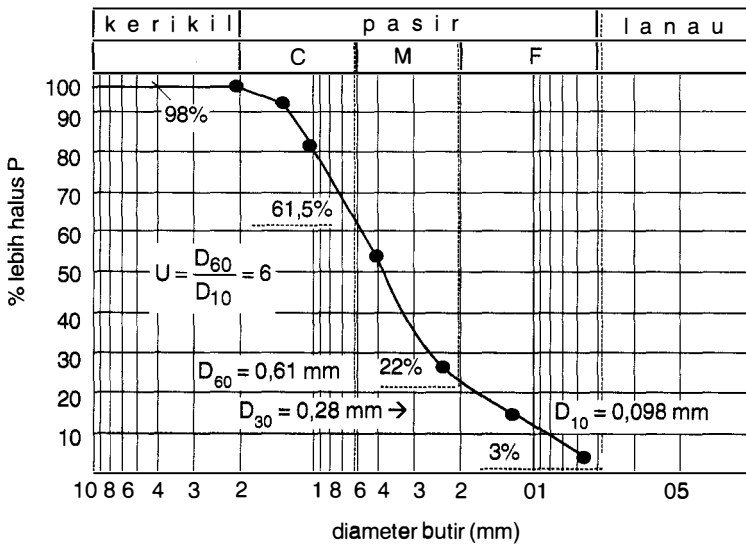
Lanjutan jawaban a.

0,500	0,500	135	27,00	44,60	55,40
0,250	0,250	145	29,00	73,60	26,40
0,125	0,125	56	11,20	84,80	15,20
0,075	0,075	45	9,00	93,80	6,20
Pan	-	31	6,20	100,00	0

- b. Persentase kerikil = 100,00 - 98,00 = 2,00%
 Persentase pasir kasar = 98,00 - 61,50 = 36,50%
 Persentase pasir sedang = 61,50 - 22,00 = 39,50%
 Persentase pasir halus = 22,00 - 3,00 = 19,00%
 Persentase lanau = 3,00 - 0,00 = 3,00%

c. Koefisien keseragaman:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,61}{0,098} = 6,22 \text{ dibulatkan} = 6$$



Gb. 3.10. Kurva distribusi ukuran butir.

d. Koefisien gradasi/kelengkungan:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(0,28)^2}{(0,098)(0,61)} = 1,31$$

e. Tanah tersebut mempunyai gradasi baik, karena harga $C_u = 6$ dan mempunyai gradasi baik, karena harga koefisien gradasi/kelengkungan: $C_c = 1,31 > 1$.

Catatan:

Tanah bergradasi baik jika : $C_c = 1$ sampai dengan 3

Untuk kerikil : $C_u > 4$

Untuk pasir : $C_u > 6$

2. 50 gram tanah kering oven digunakan untuk percobaan pengendapan dengan hidrometer. Pembacaan hidrometer dalam 1000 cc suspensi selama 30 detik $R_h = 24,50$. Koreksi meniscus air: $C_m = + 0,50$ dan pada saat percobaan suhu menunjukkan 20°C . Berat spesifik tanah $G = 2,75$ dan kekentalan air = $0,01009$ poise. Tentukan diameter terkecil dan persentase dengan ukuran butir lebih kecil D .

Jawaban:

Cara I:

$$R_h = 24,50 \quad C_t = 0$$

$$C_m = + 0,50$$

$$R_{hc} = 24,50 + 0,50 = 25,00$$

$$\eta = \frac{\mu}{g} = \frac{0,01009}{980} = 1,03 \times 10^{-5}$$

$$G = 2,75$$

$$\text{Untuk : } R_h = 25 \quad H_e = 10,70 \text{ (Lihat kalibrasi)}$$

$$D = \sqrt{\frac{30\eta H_e}{(G-1)t}} = \sqrt{\frac{30 \times 1,03 \times 10^{-5} \times 10,70}{(2,75 - 1)30}}$$

$$D = 0,00793 \text{ mm}$$

Cara II:

Gunakan tabel harga-harga faktor M dari tabel. 3.5. untuk G = 2,75 dan suhu = 20°C, diperoleh harga, M = 1328

$$D = 10^{-5} M \sqrt{\frac{H_e}{t}} = 10^{-5} \times 1328 \sqrt{\frac{10.70}{30}}$$

$$D = 0,00793$$

Soal-soal latihan:

1. 1.000 gram contoh tanah kering digunakan untuk percobaan analisis ayakan dan diperoleh hasil-hasil sebagai berikut:

No.	Lubang ayakan (mm)	Diameter butir D (mm)	Berat tanah tertinggal (gr)
1.	100,00	100,00	—
2.	63,00	63,00	—
3.	20,00	20,00	33
4.	10,00	10,00	49
5.	4,75	4,75	85
6.	2,00	2,00	140
7.	1,00	1,00	160
8.	0,60	0,60	142
9.	0,425	0,425	118
10.	0,30	0,30	82
11.	0,212	0,212	56
12.	0,15	0,15	35
13.	0,075	0,075	23
14.	Pan	—	77

Hitung persentase tanah yang tertinggal, kumulatif tertinggal dan lebih halus P.

2. Diketahui data-data analisis ayakan sebagai berikut:

Ayakan No.	Masa tanah tertinggal di atas tiap-tiap ayakan (gr)
4	0
10	21,60
20	49,50
40	102,60
60	89,10
100	95,60
200	60,40
Pan	31,20

Pertanyaan:

- Gambarkan hasil perhitungan tersebut dalam kurva distribusi ukuran butir
 - Hitung D_{10} , D_{30} dan D_{60} dari kurva distribusi ukuran butir
 - Hitung koefisien keseragaman : C_u
 - Hitung koefisien gradasi : C_c .
3. Suatu contoh tanah mempunyai data-data sebagai berikut:
- $D_{10} = 0,10$ mm
 $D_{30} = 0,41$ mm
 $D_{60} = 0,62$ mm
- Hitung koefisien keseragaman dan koefisien gradasi tanah tersebut.
4. Pertanyaan sama dengan soal No. 3, jika diketahui:
- $D_{10} = 0,082$ mm
 $D_{30} = 0,290$ mm
 $D_{60} = 0,510$ mm

5. Pertanyaan sama dengan soal No. 2, jika diketahui:

Ayakan No.	Massa tanah yang tertahan di atas tiap-tiap ayakan (gr)
4	0
6	30
10	48,70
20	127,30
40	96,80
60	76,60
100	55,20
200	43,40
Pan	22

6. 150 gram tanah kering dipakai untuk percobaan analisis hidrometer. Isi suspensi 1.000 cm^3 dan pembacaan hidrometer menunjukkan: 22,25, koreksi meniscus = + 0,45. Pada saat percobaan suhu menunjukkan = 27°C , berat spesifik = 2,65. Tentukan diameter terkecil dan persentase dengan ukuran butir lebih kecil D.

Bab IV

Stabilisasi dan Pemadatan Tanah

4.1. PENDAHULUAN

Berhubung sifat-sifat tanah di lapangan tidak selalu memenuhi harapan dalam merencanakan suatu konstruksi, maka apabila dijumpai tanah yang sifat-sifatnya sangat jelek, tanah tersebut harus distabilisasikan sehingga dapat memenuhi syarat-syarat teknis yang diperlukan.

1. Tujuan:

Untuk memperbaiki kondisi tanah tersebut, kemudian mengambil tindakan yang tepat terhadap masalah-masalah yang kita hadapi.

2. Stabilisasi dapat berupa tindakan-tindakan sbb.:

- a. Menambah kepadatan tanah
- b. Menambah material yang tidak aktif, sehingga mempertinggi kohesi dan/atau tahanan geser yang timbul
- c. Menambah material agar dapat mengadakan perubahan-perubahan alami dan kimiawi material tanah
- d. Merendahkan permukaan air tanah (*drainase*)
- e. Mengganti tanah-tanah yang buruk.

4.2. STABILISASI TANAH

Stabilisasi tanah dapat terdiri dari salah satu atau gabungan pekerjaan-pekerjaan berikut:

1. Mekanis:

Stabilisasi dengan berbagai macam peralatan mekanis seperti:

- a. Mesin gilas (*roller*)
- b. Benda-benda berat yang dijatuhkan (*pounder*)
- c. Peledakan dengan alat peledak (*Eksplorisif*)
- d. Tekanan statis

- e. Pembekuan
 - f. Pemanasan dll.
1. Bahan pencampur/tambahan (*additive*):
 - a. Kerikil untuk kohesif (lempung)
 - b. Lempung untuk tanah berbutir kasar
 - c. Pencampur kimiawi seperti:
 - Semen Portland (P.C.)
 - Gamping/kapur
 - Abu batu bara
 - Semen aspel dll.

4.3. MACAM-MACAM STABILISASI LAPISAN TANAH DASAR

1. Lapisan tanah dasar yang lunak:
 - 1) Umumnya lapisan tanah lunak adalah lempung atau lanau yang mempunyai harga percobaan penetrasi standar (*Standard Penetration Test = SPT*) N 4 atau tanah organis seperti gambut (*peat*) yang mempunyai kadar air alami (*natural water content*) yang sangat tinggi. Demikian pula tanah pasir lepas yang mempunyai harga N 10.
 - 2) Metoda stabilisasi lapisan tanah dasar yang lunak:
 - a. Perbaikan karakteristik geseran:
Tujuan untuk menghindari kerusakan tanah, deformasi geseran dan pengurangan tekanan tanah.
 - b. Perbaikan kemampatan:
Tujuan untuk memperpendek waktu penurunan, karena konsolidasi dan menghindarkan penurunan residual.
 - c. Pengurangan permeabilitas:
Bertujuan untuk menghindari bocoran dan sebagainya.
 - d. Perbaikan karakteristik:
Bertujuan untuk mengurangi getaran (*vibrasi*) dan menghindarkan pencairan (*liquefaction*)/tegangan air pori meningkat dan tegangan efektif berkurang sewaktu terjadi gempa bumi.
2. Lapisan tanah dasar yang lunak dan kohesif:
 - 1) Mengingat lapisan tanah dasar yang lunak dan kohesif itu rumit beserta karakteristik mekanisnya yang sulit, kadang-kadang peng-

galian untuk fondasi bangunan itu sulit dilaksanakan. Meskipun sudah diadakan tindakan pengamanan.

Jadi dalam menghadapi pelaksanaan di atas tanah yang lunak dan kohesif diperlukan suatu persiapan yang lengkap.

2) Metoda-metoda yang digunakan

A. Metoda perbaikan permukaan

- a. Metoda drainase permukaan (*surface drainage method*)
- b. Metoda alas pasir (*sand mat method*)
- c. Metoda bahan lembaran tipis (*sheed material method*)/*geo-textile*.

B. Metoda perpindahan (*displacement method*).

Metoda ini dapat dibagi dalam dua macam:

- a. Sesudah penggalian lapisan yang lunak dengan alat berat, bahan tanah yang baik dimasukkan dan dipadatkan.
- b. Tanah yang lunak itu didesak dengan beban timbunan tanah yang baik atau didesak dengan ledakan.

C. Metoda timbunan imbalan berat (*counter – weight fill method*).

Metoda ini terutama mengimbangi sisi tanggul supaya stabil, bilamana tidak diperoleh faktor keamanan yang diperlukan terhadap longsor selama penimbunan dilaksanakan.

D. Metoda pembebanan perlahan-lahan.

Metoda ini diterapkan bila kekuatan geser tanah tidak begitu besar dan cenderung akan runtuh jika timbunan dilaksanakan dengan cepat.

Untuk menghindari keruntuhan, maka pelaksanaan penimbunan harus diperlambat.

Ada dua metoda untuk memperlambat kecepatan pelaksanaan, yaitu:

- a. Metoda peningkatan tinggi timbunan secara bertahap.
- b. Metoda peningkatan tinggi timbunan secara kontinu dan berangsur-angsur.

E. Metoda pembebanan.

Untuk mengusahakan konsolidasi lapisan yang lunak dan memperbesar gaya geser.

Ada empat metoda yang perlu diketahui:

- a. Metoda pra pembebanan (*pre loading method*).
- b. Metoda beban tambahan (*surchage method*).
- c. Metoda penurunan muka air tanah.
- d. Metoda pembebanan tekanan atmosfer.

F. Metoda drainase vertikal.

Metoda ini sering diterapkan bersama-sama dengan metoda pembebanan perlahan-lahan atau pembebanan.

Beberapa macam metoda ini sering disebut sesuai dengan bahan yang dipakai, yaitu:

- a. Metoda drainase pasir (*sand drain method*).
- b. Metoda drainase sumbu kertas karton (*card board wick drain method*).
- c. Metoda drainase kertas plastik (*plastic board drain method*).

G. Metoda tiang pasir padat.

Dalam metoda ini, pasir ditekan ke-dalam lapisan lunak dengan pemadatan atau getaran, sehingga terbentuk tiang pasir padat.

H. Metoda tiang kapur.

Kapur ditempatkan dalam bentuk tiang di dalam tanah kohesif sama seperti pembuatan tiang pasir.

I. Metoda pencampuran lapisan dalam. (*Deep layer mixing treatment method*).

Pada metoda ini, kapur atau stabilisator semen dikocok-kocok dan dicampur dengan tanah kohesif pada kedalaman tanah tersebut untuk mengkonsolidasikan tanah yang bersangkutan.

Metoda ini belum lama dikembangkan.

3. Lapisan tanah dasar berpasir lepas.

1) Bilamana suatu gaya gempa bekerja pada tanah berpasir, maka sering tanah pasir itu mengalami peristiwa pencairan (*liquefaction*) yang dapat mengakibatkan kerusakan yang berat.

Karakteristik pencairan tanah yang terdiri dari tanah berpasir lepas dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut:

- a. Intensitas gempa bumi dan lamanya gempa bumi.
- b. Kerapatan pasir.
- c. Distribusi gradasi pasir.
- d. Beban pada pasir atau tekanan bebas (*confined pressure*) pasir.

- 2) Metoda-metoda yang digunakan:
 - a. Metoda tiang pasir padat.
 - b. Metoda vibroflotasi (*vibro floatation method*). Pada metoda ini, air disemprotkan ke dalam lapisan tanah dengan bantuan suatu vibrator silinder. Air yang disemprotkan dan bergetar itu dapat memadatkan tanah-tanah berpasir. Bersamaan dengan penyemprotan air juga dimasukkan kerikil yang akan mengisi rongga-rongga yang terjadi karena penyemprotan air.

4. Lapisan dangkal

- 1) Bilamana muda diperoleh bahan dengan kualitas yang baik, maka dapat dilaksanakan stabilisasi tanah dengan hanya merubah kadar air tanah asli atau dengan penggilasan dan tidak perlu mengadakan pekerjaan perbaikan khusus, seperti dengan penambahan bahan stabilisasi.

Tetapi kadang-kadang untuk mendapatkan stabilisasi yang tinggi, tanah asli yang terdapat di lapangan terpaksa diberi juga bahan stabilisasi.

Dewasa ini ada tiga metoda utama yang digunakan untuk mengadakan peningkatan stabilitas lapisan dangkal, yakni:

- a. Metoda fisik seperti pemadatan.
 - b. Metoda kimia seperti pencampuran atau penyuntikan (*grouting*) semen, kapur dan lain-lain.
 - c. Metoda pembekuan.
- 2) Macam-macam stabilisasi lapisan dangkal:

A. Dengan pemadatan.

Pemadatan adalah merupakan metoda dasar untuk stabilisasi tanah. Penerapan metoda-metoda lain tanpa kecuali selalu diikuti metoda pemadatan.

Tujuan pemadatan tanah umumnya untuk:

- a. Menaikkan kekuatannya.
- b. Memperkecil pemampatannya (*compressibility*) dan daya rembes airnya.
- c. Memperkecil pengaruh air terhadap tanah tersebut.

Ada dua cara untuk melakukan percobaan pemadatan, yaitu:

- a. Percobaan di laboratorium.
- b. Percobaan di lapangan.

Hal-hal yang perlu mendapatkan perhatian dalam pelaksanaan pemadatan tanah ialah:

- a. Menghamparkan bahan secara merata dan tipis.
- b. Mengatur kadar air bahan timbunan secara tepat.
- c. Memilih mesin pemadat yang sesuai untuk mendapatkan hasil yang baik.
- d. Menghindarkan lapangan pekerjaan dari penggenangan tau infiltrasi air hujan.

B. Dengan penyesuaian gradasi.

Tujuan stabilisasi ini untuk memperoleh kekuatan mekanis atau stabilitas jangka panjang.

Stabilisasi penyesuaian gradasi telah dikembangkan terutama untuk memperkuat lapisan dasar badan jalan atau landasan.

Dewasa ini telah terdapat beberapa metoda pencampuran bahan dari distribusi gradasi yang berlainan.

Tanah yang mempunyai campuran bagian gradasi yang cocok yang dapat dipadatkan sampai suatu kepadatan tinggi yang stabil, dalam praktek dapat diperkirakan mempunyai distribusi gradasi dengan persamaan:

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (4.1.)$$

Dalam hal ini:

P = Persentase berat butir-butir yang lebih kecil dari suatu ukuran butir d (%)

d = Ukuran butir sebarang

D = Ukuran maksimum butir.

Dengan kata lain, bahan-bahan tanah dengan bermacam-macam ukuran butir maksimum dapat dipadatkan sampai suatu keadaan kepadatan tinggi yang stabil dengan mengadakan penyesuaian distribusi gradasi yang sama dengan distribusi gradasi yang ditentukan dengan persamaan di atas.

Dalam praktek, meskipun distribusi gradasi tanah yang sebenarnya itu terletak di atas kurva persamaan di atas, suatu keadaan yang stabil masih dapat diperoleh, jika distribusi gradasi itu masih terletak dalam suatu batas deviasi di atas kurva tersebut. Tabel 4.1. memperlihatkan bahan-bahan untuk lapisan dasar badan jalan yang digunakan sebagai standar di Jepang.

Tabel 4.1. Gradasi dasar bahan kasar untuk subbase.

Ukuran ayakan (mm)	Persentase bagian yang melewati ayakan dalam berat (%)
40,00	95 – 100
20,00	60 – 100
2,50	20 – 50
0,074	2 – 10

Catatan:

Harga C.B.R. modifikasi campuran harus sama dengan 80 atau lebih.

Pl. bagian yang lewat ayakan 0,40 mm harus sama dengan 4 atau kurang.

Tabel 4.2. Spesifikasi tipe gradasi stabilisasi mekanis untuk lapisan bawah (*base*) dan permukaan (*surface*) menurut standar India.

Ukuran ayakan (mm)	Persentase yang melalui ayakan			Dasar atau permukaan
	Dasar		Permukaan	
	Ukuran maksimum		Ukuran maksimum	Ukuran maksimum
	40 mm	20 mm	20 mm	10 mm
40,00	100	–	–	–
20,00	80 – 100	100	100	–
10,00	55 – 80	80 – 100	80 – 100	100
4,75	40 – 60	50 – 75	65 – 85	80 – 100
2,00	30 – 50	35 – 60	45 – 70	50 – 80
1,18	–	–	35 – 60	40 – 65
0,600	15 – 30	15 – 35	–	–
0,300	–	–	20 – 40	20 – 40
0,075	5 – 15	5 – 15	10 – 25	10 – 25

Catatan:

1. Untuk lapisan dasar:

- a. L.L. tidak boleh lebih dari 25%
- b. P.I. tidak boleh lebih dari 6

2. Untuk lapisan permukaan:
 - a. L.L. tidak boleh lebih dari 35%
 - b. P.I. antara 4 dan 9.

C. Stabilisasi dengan kapur atau semen.

Kapur yang digunakan untuk stabilisasi lapisan yang dangkal, terutama mempunyai efek pada tanah kohesif, sedangkan semen mempunyai efek pada tanah kohesif, sedangkan semen mempunyai efek pada tanah berpasir atau kerikil yang mengandung sedikit tanah butir-butir halus.

Campuran bagian gradasi yang paling efektif dalam stabilisasi dengan menggunakan kapur adalah distribusi dengan kandungan 20 – 30% tanah kepasiran atau kerikil yang melalui ayakan 0,074 mm.

Kapur yang digunakan biasanya dalam bentuk tepung atau butiran dan hampir tidak pernah digunakan dalam bentuk campuran berair, kecuali dalam keadaan tertentu.

Bahan yang terdiri dari campuran semen dengan tanah alami disebut semen tanah (*soil cement*).

Biasanya stabilisasi dengan semen adalah stabilisasi yang menggunakan semen tanah.

Metoda pencampuran untuk stabilisasi dengan kapur atau semen ada tiga macam:

a. Metoda campuran terpusat.

Tanah dicampur dengan bahan stabilisasi pada suatu tempat, kemudian diangkut ke tempat pekerjaan. Untuk ini diperlukan mesin pencampur.

b. Metoda campuran dalam galian.

Bahan stabilisasi dicampur dengan tanah di lubang galian tanah lalu diangkut ke tempat pekerjaan. Bahan stabilisasi dapat dipancangkan ke dalam tanah dalam bentuk tiang, kemudian digali bersama-sama dan dicampur atau bahan stabilisasi itu ditaburkan di atas tanah sehingga pada penggalian terjadi pencampuran.

c. Metoda pencampuran di tempat pekerjaan.

Tanah dihamparkan di tempat pekerjaan, kemudian ditaburi bahan stabilisasi dan dicampur atau tanah yang akan distabilisasi itu digaruk dan dicampur dengan bahan stabilisasi.

D. Stabilisasi dengan grouting.

Pada metoda ini digunakan susu semen (*cement milk*) atau bahan stabilisasi kimia yang diterapkan terutama untuk:

- a. Memperkuat tanah fondasi.
- b. Membendung air rembesan.
- c. Mencegah deformasi tanah fondasi di sekeliling.
- d. Memperkuat bangunan-bangunan yang lama.

Untuk memperbaiki tanah fondasi pada lapisan yang dalam seperti tanah dasar laut yang terdiri dari tanah kohesif. Dewasa ini telah dikembangkan juga metoda yang menekan susu semen atau cairan kapur dengan menggunakan jet hidrolis tekanan tinggi yang dapat mencampur bahan-bahan ini dengan tanah asli.

Bahan grouting untuk stabilisasi dapat dibagi dalam tiga jenis bahan:

- 1) Bahan dengan partikel suspensi susu semen dan lain-lain (*bentonite*).
- 2) Larutan stabilisasi.
Bahan inorganik seperti *waterglass* dan kalsium chlorida serta bahan yang terdiri dari berbagai persenyawaan polimer tinggi.
- 3) Bahan semen suspensi antara 1) dan 2): *Waterglass*, susu semen dengan partikel suspensi.

Pada bahan dengan partikel suspensi 1), maka diperlukan agar ukuran butir bahan stabilisasi mengisi tanah fondasi. Ukuran butir tanah fondasi harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

$$\frac{D_{15}}{D_{85}} \geq 15 \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\frac{D_{10}}{D_{95}} \geq 8 \dots\dots\dots (4.3)$$

Dalam hal ini:

D_{15} dan D_{10} = Diameter 15% dan diameter 10% dari kurva gradasi tanah.

D_{85} dan D_{95} = Diameter 85% dan diameter 95% dari kurva gradasi bahan grouting.

Batas penerapan bahan grouting cair 2) tergantung kekentalan bahan grouting dan koefisien permeabilitas tanah fondasi yang bersangkutan. Suatu standar kasar yang digunakan adalah:

- a. Larutan waterglass yang tidak berair) $k = 10^{-1}$
- b. Kalsium chlorida) $a 10^{-2}$ cm/det.
- c. Waterglass yang diberi air)
- d. Bahan pengisi dari berbagai perse-) $k = \pm 10^{-4}$ cm/det.
nyawaan polimer tinggi

Batas penerapan bahan grouting semi suspensi 3) kira-kira antara 1) dan 2) dan standar percobaan (tentatif) menunjukkan bahwa koefisien permeabilitas tanah fondasi = $\pm 10^{-3}$ cm/det. Jumlah semen yang diperlukan untuk grouting:

$$J_s = \frac{A \times h \times \gamma_d}{100} \cdot \frac{p}{100+p} \text{ (ton) (4.4.)}$$

Dalam hal ini:

- J_s = jumlah semen yang diperlukan (ton)
- A = luas bidang tanah yang akan digROUTING (m^2)
- H = tebal tanah yang akan digROUTING (m)
- p = persentase semen (%)
- γ_d = berat isi tanah kering (t/m^3)

Apabila satu kantong/sak semen beratnya = 50 kg, maka jumlah semen yang dipakai:

$$n = \frac{J_s}{20} \rightarrow 1 \text{ ton} = 1.000 \text{ kg} = \frac{1.000}{50} = 20 \text{ sak.}$$

$$n = \frac{A \times H \times \gamma_d}{20} \cdot \frac{p}{100+p}$$

$$n = \frac{A \times H \times \gamma_d \times p}{5(100+p)} \text{ (4.5.)}$$

Jika satu sak semen beratnya = 40 kg, maka jumlah semen yang dipakai:

$$n = \frac{J_s}{20} \rightarrow 1 \text{ ton} = 1.000 \text{ kg} = \frac{1.000}{40} = 25 \text{ sak.}$$

$$n = \frac{A \times H \times \gamma_d}{100} \cdot \frac{p}{100 + p}$$

$$n = \frac{A \times H \times \gamma_d \times p}{4(100 + p)} \dots\dots\dots (4.6.)$$

Contoh soal:

Suatu lokasi akan dibangun untuk bendungan tipe urukan tanah dengan data-data sebagai berikut:

Luas daerah : A = 10.000 m²

Kedalaman : H = 25 m

Persentase semen : p = 10%

Berat isi tanah kering : γ_d = 1,80 t/m³

Berapa sak semen diperlukan untuk menggrouting tanah tersebut?

Jawaban:

1 sak = 50 kg

$$n = \frac{A \times H \times \gamma_d \times p}{5 (100 + P)}$$

$$n = \frac{10.000 \times 25 \times 1.80 \times 10}{5 (100 + 10)} = 8.182 \text{ sak.}$$

1 sak = 40 kg

$$n = \frac{A \times H \cdot \gamma_d \times p}{4(100 + 10)}$$

$$n = \frac{10.000 \times 25 \times 1.80 \times 10}{4 (100 + 10)} = 10.227 \text{ sak.}$$

E. Stabilitas dengan pembekuan.

Metoda ini menggunakan sekelompok pipa baja yang ditanam dalam tanah fondasi yang disebut pipa pembekuan. Pipa-pipa diisi dengan cairan bersuhu rendah, sehingga air pori dalam tanah fondasi di sekeliling pipa menjadi beku.

Hasil yang diperoleh dengan metoda ini sangat baik, sehingga metoda ini dapat diterapkan sebagai tindakan sementara untuk konstruksi terowongan di bawah dasar sungai atau kebocoran pada pipa air minum dan pipa pembuangan kotoran.

Metoda ini dapat juga diterapkan meskipun berada dalam keadaan lingkungan yang sangat buruk seperti aliran air tanah yang besar yang tidak dapat diselesaikan dengan metoda-metoda yang lain.

Bahan cairan dengan suhu rendah yang dimasukkan ke dalam pipa adalah larutan kalsium chlorida yang didinginkan sampai suhunya minus 20° ampai 30°C atau gas cairan dengan suhu rendah seperti nitrogen cair. Metoda yang menggunakan gas cair hanya diterapkan pada pekerjaan-pekerjaan yang kecil dengan isi pembekuan tanah kurang dari 200 m³.

5. Stabilisasi lempung mengembang.

Lempung yang mengembang sangat banyak terdapat di alam. Pengembangan lempung ini terjadi ketika kadar air bertambah dari nilai referensinya. Penyusutan terjadi ketika kadar air berada di bawah nilai referensinya sampai kepada batas susut. Biasanya suatu tanah lempung dapat diperkirakan akan mempunyai perubahan isi yang besar (mengembang), apabila Indeks Plastisitas: $PI > 20$.

Ada beberapa prosedur untuk mestabilkan (mengurangi perubahan isi) untuk jenis tanah ini:

- 1) Tambahkan bahan pencampur seperti gamping yang terhidrasi (mati)/kapur. Biasanya 2 sampai 4% akan mengurangi PI sampai kurang dari 20.
- 2) Padatkan tanah pada keadaan yang lebih basah dari optimum (3 – 4%). Ini menjamin terdapatnya struktur tanah lempung yang cukup terpencair dan pada saat yang sama menghasilkan kepadatan kering yang rendah. Terlihat bahwa kepadatan kering lempung yang mengembang merupakan parameter yang penting.
- 3) Mengontrol perubahan kadar air dari nilai referensinya (kadar air pada saat lempung itu akhirnya digunakan sebagai pendukung fondasi).

Kepentingan ekonomis yang bertalian dengan lempung mengembang ini tidak dapat diabaikan begitu saja, oleh karena material ini sangat banyak terdapat dan sering mengakibatkan kerusakan-kerusakan.

6. Stabilisasi dengan bahan buatan.

Menambah kekuatan tanah dengan mencampur rumput-rumput dan lumpur untuk membuat dinding dan membuat batu merah/batas sudah merupakan praktek yang cukup lama.

Pada saat ini praktek tersebut telah diperluas dengan *memakai tekstur-tekstur metal atau sintetis dalam bentuk lembaran*. Tekstur sintetis yang dipakai untuk tanah ini disebut *geotekstil (geotextile)*.

Tanah dengan lembar perkuatan itu disebut *tanah yang diperkuat (reinforced earth)*.

7. Stabilisasi tanah semen dan gamping abu batu bara.

Tanah semen (*Cement soil*) dan gamping abu batu bara (*Lime Fly Ash = L.F.A.*) sangat biasa dipakai dalam stabilisasi tanah. Prosedur-prosedur percobaan laboratorium ditentukan berdasarkan standar:

Untuk *Cement Soil*.

- 1) A.S.T.M. (American Society for Testing and Materials)
- 2) A.A.S.H.T.O. (American Association of State Highway and Transportation Officials)
- 3) P.C.A. 1959 (Portland Cement Association).

Untuk *Lime Fly Ash = L.F.A.* dipublikasikan oleh U.S. Department of Transportation (U.S.D.O.T. 1976).

Prosedur-prosedur ini dipakai di seluruh dunia dengan modifikasi-modifikasi tertentu yang disesuaikan dengan keadaan cuaca dan tanah.

Pada dasarnya kriteria stabilitas lapangan untuk kepadatan dan persentase campuran (semen, gamping, abu batu bara dsb.) yang berkaitan dengan berat kering tanah, ditetapkan di dalam laboratorium dengan aturan sebagai berikut:

- 1) Tentukan kurva pemadatan standar untuk referensi (yang dipakai/berhubungan).
- 2) Campurkan beberapa contoh padat dengan persentase campuran yang mungkin.

Persentase campuran tersebut biasanya berada dalam batas-batas sebagai berikut:

- a. *Semen* : 3 a 12% untuk tanah A-1 sd. A-4.
8 a 16% untuk tanah A-4 sd. A-7.
 - b. *L.F.A.* : 12 a 30% dengan persentase yang lebih buruk.
- 3) Buat kurva-kurva pemadatan untuk beberapa campuran dan dapatkan kadar air optimum (*Optimum Moisture Content = O.M.C.*).
 - 4) Siapkan beberapa contoh tambahan pada salah satu atau lebih dari satu persentase campuran yang dipilih dan dengan memakai *O.M.C.* yang berkaitan dengannya dapatkan contoh-contoh itu untuk mendapatkan kepadatan kering maksimum yang sebelumnya telah ditentukan.
 - 5) Uji contoh-contoh ini terhadap pembekuan, kekuatan dan sebagainya. Persentase campuran yang menghasilkan mutu terbaik secara keseluruhan akan dipakai untuk spesifikasi pekerjaan.

Percobaan kekuatan dapat dilakukan langsung terhadap contoh-contoh yang diambil dari acuan pemadatan standar dan disimpan atau dibasahi selama 2, 7 dan 28 hari.

Oleh karena perbandingan $\frac{L}{d}$ mendekati 1 untuk acuan pemadatan, beberapa organisasi/lembaga memadatkan contoh-contoh tanah di dalam acuan yang lebih kecil dengan kedalaman yang lebih besar untuk mendapatkan $\frac{L}{d}$ yang lebih besar ($L =$ tinggi/panjang acuan dan $d =$ diameter acuan).

Kekuatan relatif biasanya cukup memenuhi persyaratan, sehingga contoh-contoh yang dipadatkan di dalam acuan ini akan cukup sesuai untuk sebagian besar tanah dasar suatu pekerjaan jalan.

Apabila abu batu bara dipergunakan dengan gamping atau semen, biasanya ia dipertahankan pada perbandingan yang tetap. Sebagai misal campuran *L.F.A.* 30% dengan 1 bagian gamping terhadap 3 bagian abu batu bara.

Berat campuran ini dapat langsung dihitung dari perbandingan (apabila dipakai) dan persentase campuran sebagai berikut:

$$W_a + W_s = \gamma_d \dots\dots\dots (4.7.)$$

$$W_a = F \cdot W_s \dots\dots\dots (4.8.)$$

Pers. (4.8.) dimasukkan ke dalam pers. (4.7.), maka

$$F \cdot W_s + W_s = \gamma_d$$

$$W_s (F + 1) = \gamma_d$$

$$W_s = \frac{\gamma_d}{1 + F} \dots\dots\dots (4.9.)$$

Dari pers. (4.7.) diperoleh persamaan:

$$w_a = \gamma_d - W_s \dots\dots\dots (4.10.)$$

Masukkan persamaan (4.9.) ke dalam pers. (4.10.), maka

$$W_a = \gamma_d - \frac{\gamma_d}{1 + F}$$

$$W_a = \frac{\gamma_d + \gamma_d \cdot F - \gamma_d}{1 + F}$$

$$w_a = \frac{\gamma_d \cdot F}{1 + F} \dots\dots\dots (4.11.)$$

Dalam hal ini:

w_a = berat campuran

W_s = berat tanah

γ_d = berat isi/satuan kering tanah campuran

F = persentase campuran (dalam desimal).

Contoh soal:

Diketahui berat isi kering campuran tanah gamping abu batu bara = 2,00 t/m³, persentase berat campuran : F = 0,25 pada perbandingan 1 : 3.

Pertanyaan:

Berapa jumlah kantong gamping dan berat abu batu bara untuk menstabilkan jalan sepanjang 2 km. dengan lebar 12 m dan tebal 25 cm. (Tebal akhir setelah dipadatkan).

1 kantong gamping beratnya = 25 kg.

Jawaban:

$$W_a = \gamma_d - W_s = 2,00 - \frac{2,00}{1 + 0,25} = 0,40 \text{ ton / m}^3$$

Dengan perbandingan 1 : 3

$$\text{Gamping} = 0,25 \times 0,40 = 0,10 \text{ ton/m}^3$$

$$\text{Abu batu bara} = 0,275 \times 0,40 = 0,30 \text{ ton/m}^3$$

$$\text{volume jalan : } V = B \times L \times D$$

$$V = 12 \times 2.000 \times 0,25 = 6.000 \text{ m}^3$$

Jumlah gamping:

$$n = \frac{6.000 \times 0,10 \times 1.000}{25} = 24.000 \text{ kantong.}$$

Berat abu batu bara :

$$W_{FA} = 6.000 \times 0,30 = 1.800 \text{ ton.}$$

Soal-soal latihan:

1. Suatu stabilisasi gamping abu batu bara dibutuhkan untuk suatu tanah lempung gemuk yang dipakai sebagai tanah dasar suatu landasan lapangan terbang. Percobaan laboratorium telah menetapkan bahwa 20% campuran berat isi kering pada perbandingan gamping abu batu bara sebesar 1 : 3 akan memenuhi syarat. Berat isi kering campuran tanah yang dipadatkan – 18,20 kN/m³.
Pertanyaan: Berapa kantong gamping dan berapa ton abu bara dibutuhkan untuk landasan lapangan terbang yang berukuran: Panjang = 2.750 m, Lebar = 30 m, dan Tebal – 50 cm.
2. Berapa kantong semen yang dibutuhkan untuk menghasilkan dasar (base) jalan tanah semen dengan memakai 5% berat kering semen.
Jalan berukuran: Panjang = 15 km, Lebar = 10 m, dan Tebal = 30 cm yang dipadatkan untuk berat isi tanah kering 19,60 kN/m³.

4.4. PEMADATAN TANAH

Seperti telah diuraikan dalam stabilisasi tanah dengan pemadatan, maka pada dasarnya pemadatan merupakan usaha untuk mempertinggi kepadatan tanah dengan pemakaian energi mekanis untuk menghasilkan pemampatan partikel. Tanah dapat dikerjakan pada mulanya dengan pengeringan, penambahan air, agregat (butir-butir) tersebut dengan bahan-bahan stabilisasi seperti: Semen portland (PC), gamping, abu batu bara atau bahan lainnya.

Energi pemadatan di lapangan dapat diperoleh dari mesin gilas, alat-alat pemadatan getaran dan dari benda-benda berat yang dijatuhkan. Di dalam laboratorium digunakan alat-alat pemadatan tanah untuk percobaan (*Compaction soil test apparatus*).

Tujuan pemadatan ialah untuk memperbaiki sifat-sifat teknis massa tanah, yaitu:

1. Menaikkan kekuatannya.
2. Memperkecil pemampatannya dan daya rembes airnya.
3. Memperkecil pengaruh air terhadapnya.

4.5. TEORI PEMADATAN

Pemeriksaan spesifikasi untuk pemadatan kohesif telah dikembangkan oleh R.R. Proctor ketika sedang membangun bendungan-bendungan untuk Los Angeles Water District pada akhir tahun 1920-an. Metoda yang asli dilaporkan melalui seri-seri artikel di dalam *Engineering New Records* oleh Proctor tahun 1933. Prosedur dinamis laboratorium yang standar biasanya disebut percobaan *Proctor*.

Proctor mendefinisikan empat variabel pemadatan tanah, yaitu:

1. Usaha pemadatan (energi).
2. Jenis tanah (gradasi, kohesif atau tidak, ukuran butir dan sebagainya).
3. Kadar air.
4. Angka pori atau berat isi kering.

4.6. PERCOBAAN-PERCOBAAN PEMADATAN

Percobaan-percobaan pemadatan dapat dilakukan:

1. Di laboratorium.
2. Di lapangan.

1. Di laboratorium

Ada dua macam percobaan di laboratorium yang biasa dipakai untuk menentukan kadar air optimum (*Optimum Moisture Content = O.M.C.*) dan berat isi kering maksimum (*Maximum dry density = γ_d*).

Percobaan-percobaan tersebut ialah:

- A. Percobaan pemadatan standar (*Standar Compaction Test*).
- B. Percobaan pemadatan modifikasi (*Modified Compaction Test*).

Tabel 4.3. Ringkasan spesifikasi percobaan pemadatan standar.

Deskripsi	ASTM D-698		AASHTO T-99		
	Metoda A	Metoda B	Metoda C	Metoda D	
<i>Tabung:</i> Isi	ft ³	1/30	1/13,33	1/30	1/13,33
	cm ³	943,90	2124,30	943,90	2124,30
Tinggi	in	4,58	4,58	4,58	4,58
	mm	116,33	116,33	116,33	116,33
Diameter	in	4	6	4	6
	mm	101,60	152,40	101,60	152,40
Berat palu	lb	5,50	5,50	5,50	5,50
	kg	2,50	2,50	2,50	2,50
Tinggi jatuh palu	in	12	12	12	12
	mm	304,80	304,80	304,80	304,80
Jumlah lapis tanah		3	3	3	3
Jumlah pukulan tiap lapis		25	56	25	56
Tanah yang dicoba lolos/lewat ayakan		No. 4	No. 4	3/4 in	3/4 in

Faktor konversi:

- 1 lb massa = 0,4536 kg.
- 1 in = 25,40 mm.
- 1 ft³ = 28.316,80 cm³.

Tabel 4.4. Ringkasan spesifikasi percobaan pemadatan modifikasi.

Deskripsi	ASTM D-698		AASHTO T-99	
	Metoda A	Metoda B	Metoda C	Metoda D
<i>Tabung:</i>				
Isi	ft ³ 1/30 cm ³ 943,90	1/13,33 2124,30	1/30 943,90	1/13,33 2124,30
Tinggi	in 4,58 mm 116,33	4,58 116,33	4,58 116,33	4,58 116,33
Diameter	in 4 mm 101,60	6 152,40	4 101,60	6 152,40
Berat palu	lb 10 kg 4,54	10 4,54	10 4,54	10 4,54
Tinggi jatuh palu	in 18 mm 457,20	18 457,20	18 457,20	18 457,20
Jumlah lapis tanah	5	5	5	5
Jumlah pukulan tiap lapis	25	56	25	56
Tanah yang dicoba lolos/lewat ayakan	No. 4	No. 4	3/4 in	3/4 in

Tabel 4.5. Elemen-elemen percobaan pemadatan standar dan modifikasi

Uraian	Standar (ASTM D-698)	Modifikasi (ASTM D-1557)
Berat palu	24,50 N (5,50 lb)	44,50 N (10 lb)
Tinggi jatuh palu	304,80 mm (12 in)	457,20 mm (18 in)
Jumlah pukulan/lapis	25	25
Jumlah lapisan	3	3
Energi pemadatan (CE)	592,50 kJ/m ³ (12.375 lb.ft/ft ³)	2.693,25 kJ/m ³ (56.250 lb.ft/ft ³)

Energi pemadatan (Compaction Energy = CE).

$$C.E. = \frac{N \times n \times W_r \times H}{V_m} \dots\dots\dots (4.12.)$$

Dalam hal ini:

- N = jumlah pukulan/lapis
- n = jumlah lapisan
- W_r = berat palu
- H = tinggi jatuh palu
- V_m = isi tabung

Contoh:

Percobaan pemadatan standar

- Jumlah pukulan tiap lapis : N = 25
- Jumlah lapisan : n = 3
- Berat palu : W_r = 5,50 lb
- Tinggi jatuh palu : H = 12 in = 1 ft
- Isi tabung : V_m = 1/30 ft³

$$C.E. = \frac{25 \times 3 \times 5,50 \times 1}{1/30} = 12375 \text{ lb.ft / ft}^3$$

$$1 \text{ lb. ft/ft}^3 = 47,88 \text{ J/m}^3$$

$$C.E. = 12.375 \times 47,88 = 592.515 \text{ J/m}^3$$

$$C.E. = 592,515 \text{ kJ/m}^3 = 592,50 \text{ kJ/m}^3$$

Percobaan pemadatan modifikasi

- Jumlah pukulan tiap lapis : N = 25
- Jumlah lapisan : n = 5
- Berat palu : W_r = 10 lb
- Tinggi jatuh palu : H = 18 in = 1,50 ft
- Isi tabung : V_r = 1/30 ft³

$$C.E. = \frac{25 \times 5 \times 10 \times 1,50}{1/30} = 56.250 \text{ lb.ft / ft}^3$$

A. Percobaan pemadatan standar

Standar yang berlaku:

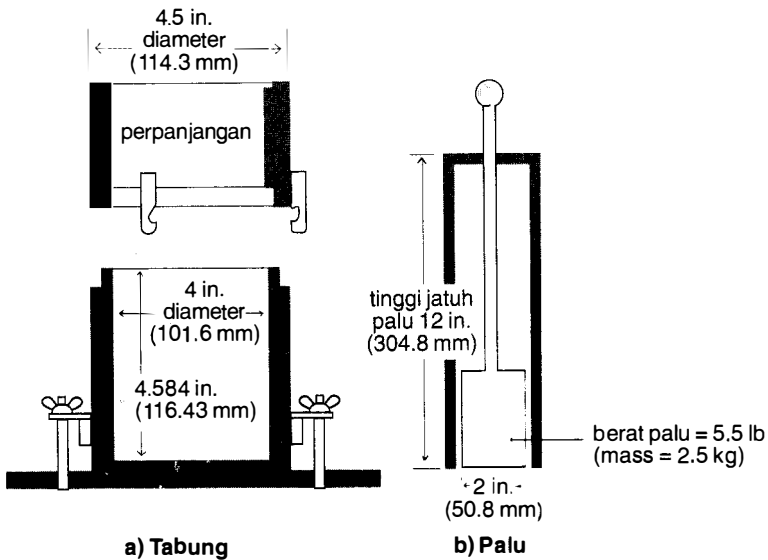
Bina Marga : PB - 0111 - 76
ASTM : D - 698 - 70
AASHTO : T - 99 - 74

a. Tujuan:

Untuk menentukan hubungan antara kadar air optimum (*Optimum Moisture Content* = O.M.C) dan berat isi kering maksimum dari kadar air dan berat isi kering yang diperoleh dari hasil percobaan tersebut.

b. Alat-alat yang digunakan:

1. Alat-alat pemadatan, 1 set
terdiri dari:
 - Tabung pemadat 1 bh.
 - Palu 1 bh.
2. Alat-alat untuk kadar air 1 set
3. Ayakan No. 4 1 bh.
4. Tempat tanah kapasitas = 3,50 kg. 6-8 bh.



Gb. 4.1. Alat-alat pemadatan.

- | | |
|---|-------|
| 5. Alat penambah air (<i>sprayer</i>) | 1 bh. |
| 6. Timbangan kapasitas 20 kg | 1 bh. |
| 7. Oven listrik (suhu 110°C) | 1 bh. |

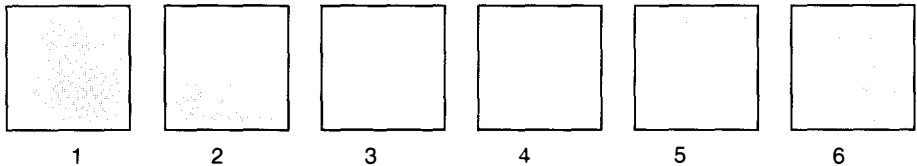
Spesifikasi:

Diameter luar tabung	:	$D_1 = 114,30 \text{ mm}$	(4,50 in)
Diameter dalam tabung	:	$D_r = 101,60 \text{ mm}$	(4,00 in)
Tinggi tabung	:	$h = 116,43 \text{ mm}$	(4,584 in)
Tinggi jatuh palu	:	$H = 304,80 \text{ mm}$	(12,00 in)
Diameter palu	:	$d = 50,80 \text{ mm}$	(2,00 in)
Berat palu	:	$W_r = 2,50 \text{ kg}$	(5,50 lb)

c. *Cara melakukan percobaan:*

Contoh tanah diambil sebanyak $\pm 15 \text{ kg}$, dikeringkan dan kemudian dihaluskan dengan penumbuk kayu. Selanjutnya diayak dengan ayakan No. 4. Tanah yang telah diayak dimasukkan ke dalam 6 – 8 buah pan masing-masing sama banyaknya. Dari 6 – 8 pan tanah tersebut dibuat masing-masing pan dengan kadar air yang berbeda-beda.

Misal: 2 buah pan ditambah air masing-masing 50 cc dan 100 cc, 3 buah pan lainnya dikeringkan masing-masing selama 30, 60 dan 90 menit di panas matahari, sedangkan 1 buah pan tanah asli.



Gb. 4.2. Contoh tanah dalam 2 buah pan.

1 ditambah air 50 cc, 2 ditambah air 100 cc, 3, 4 dan 5 dikeringkan selama 30, 60 dan 90 menit dan 6 tanah asli.

Pada waktu penambahan air digunakan *sprayer* dan sedikit demi sedikit sambil diaduk dengan merata. Kemudian tanah ditutup selama ± 20 menit. Demikian pula selama pengeringan harus selalu diaduk, agar tanah mengering merata. Untuk mempercepat pekerjaan, dikerjakan dahulu tanah asli kemudian lainnya.

Pemadatan dilakukan dalam tabung pemadatan dengan jalan memasukkan tanah ke dalamnya dan dipadatkan dengan palu dengan cara sebagai berikut:

Lapis pertama yang tingginya = 1/3 tinggi tabung ditumbuh sebanyak 25 kali, kemudian lapis kedua diisi lagi dengan tinggi yang sama juga ditumbuh sebanyak 25 kali dan lapis ketiga demikian juga seperti lapis pertama dan kedua.

Pada lapis ketiga (terakhir) ini tingginya dilebihi ± 2 cm dari tinggi tabung. Kemudian ring pengikat tabung bagian atas (perpanjangan) di lepas dan tanah yang tingginya dilebihi tadi diratakan dengan pisau.

Setelah percobaan selesai, tabung + tanah ditimbang bertanya = $W_m + W_s = \dots$ gram. Berat tabung biasanya ditimbang lebih dahulu atau biasanya sudah ditabelkan, misalnya berat tabung $W_m = \dots$ gram. Demikian isi tabung sudah tertentu.

d. *Analisis perhitungan:*

Berat isi tanah basah/asli (*Wet/natural density*) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\gamma_t = \frac{(W_s + W_m) - W_m}{V_m} \dots\dots\dots (4.13.)$$

$$\gamma_t = \frac{W_s}{V_m} \dots\dots\dots (4.14.)$$

Jika : $V_m = V_s$, maka

$$\gamma_t = \frac{W_s}{V_s} \dots\dots\dots (4.15.)$$

Dalam hal ini:

- γ_t = Berat isi tanah basah/asli
- W_s = Berat tanah basah/asli
- W_m = Berat tabung
- V_s = Isi tanah basah/asli
- V_m = Isi tabung

Dari bagian dalam tanah tersebut diambil sebagian untuk dihitung kadar airnya. Sesudah diketahui nilai kadar airnya,

maka berat isi kering tanah dapat dihitung dengan persamaan:

$$\gamma_d = \frac{100\gamma_t}{100 + w} \dots\dots\dots (4.16.)$$

w = dalam %

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + w} \dots\dots\dots (4.17.)$$

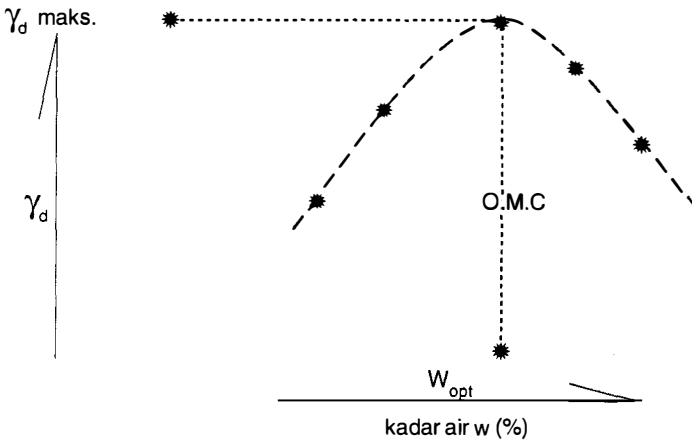
w = dalam desimal

Dalam hal ini:

γ_d = Berat isi tanah kering (dry density)

w = Kadar air.

Dalam hasil percobaan-percobaan tersebut dibuat sebuah kurva, yang menunjukkan hubungan antara kadar air dan berat isi tanah kering dan dari kurva tersebut akan diperoleh kadar air optimum (*Optimum Moisture Content = O.M.C.*) dan berat isi tanah kering maksimum (*Maximum dry density*)



Gb. 4.3. Kurva hasil percobaan pemadatan standar.
(Kurva hubungan kadar air dengan berat isi tanah kering).

e. *Contoh perhitungan:*

Pada suatu percobaan pemadatan standar diperoleh data-data sebagai berikut:

Berat isi basah (gr/cm^3): 1,99 1,97 1,96 1,94 1,95

Kadar air (%) : 13,45 15,25 15,80 15,80 12,80

Tentukan kadar air optimum dan berat isi tanah maksimum.

Penyelesaian:

Gunakan persamaan (4.16.):

$$\gamma_d = \frac{100\gamma_t}{100 + w}$$

Berat isi kering (gr/cm^3): 1,75 1,71 1,72 1,68 1,73

Kadar air optimum : $2_{\text{opt.}}$ (O.M.C.) = 13,45%

Berat isi kering maksimum $\gamma_{\text{dmaks.}} = 1,75 \text{ gr/cm}^3$.

B. *Percobaan pemadatan modifikasi*

Alat-alat yang digunakan hampir sama dengan butir A. Hanya berat palu, tinggi jatuh palu dan jumlah lapis tanah yang berbeda (Lihat tabel 4.4. dan 4.5.).

Demikian juga cara melakukan percobaan juga sama.

Garis angka pori udara sama dengan nol (*Zero Air Void lines* = Z.A.V.).

Hal ini terjadi apabila derajat kejenuhan (*Degree of saturation*) $S_r = 100\% = 1$, $V_a = 0$ dan $W_a = 0$.

$$V = V_a + V_w + V_s$$

$$V = 1$$

$$1 = V_a + \frac{W_w}{\gamma_w} + \frac{W_s}{\gamma_w \cdot G}$$

$$V_w = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

$$1 = V_a + \frac{W_w}{\gamma_w} + \frac{\gamma_d}{\gamma_w \cdot G}$$

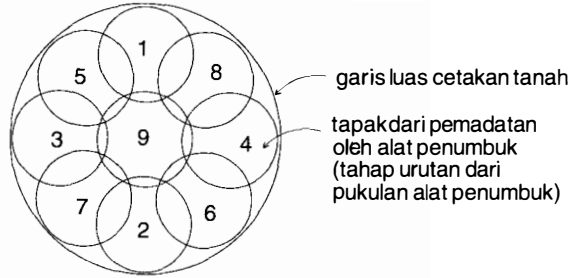
$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s} \rightarrow \gamma_s = \gamma_w \cdot G$$

$$1 = 0 + \frac{w \cdot \gamma_d}{\gamma_w} + \frac{\gamma_d}{\gamma_w \cdot G}$$

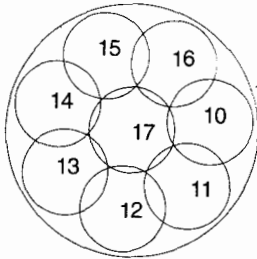
$$W_s = \gamma_d$$

$$1 = \gamma_d \left[\frac{w}{\gamma_w} + \frac{1}{\gamma_w \cdot G} \right]$$

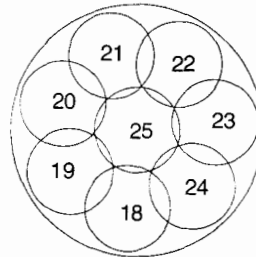
$$w = \frac{W_w}{W_s}$$



Tahap Pertama

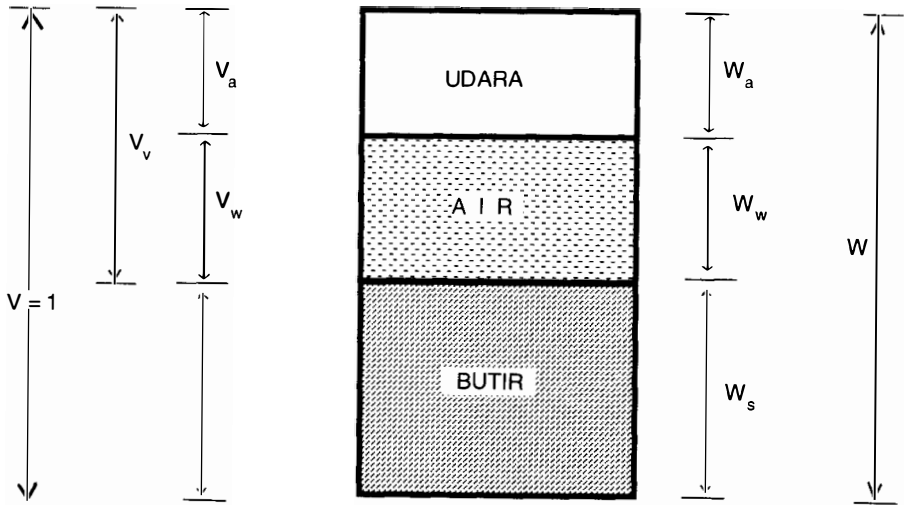


Tahap Kedua



Tahap Ketiga

Gb. 4.4. Cara melakukan penumbukan tiap lapisan



Gb. 4.5. Penampang struktur tanah dalam tiga tingkatan.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w \left[\frac{w \cdot G + 1}{1 + w \cdot G} \right]}{1 + \frac{w}{G}} \dots\dots\dots W_w = w \cdot \gamma_d \quad (4.18.)$$

$$\gamma_d = \frac{w}{w + \frac{1}{G}} = \gamma_{z.a.v.} \dots\dots\dots (4.19.)$$

Contoh-contoh soal:

1. Pada suatu percobaan pemadatan standar diperoleh data-data sebagai berikut:

Kadar air (%) : 7,70 11,50 14,60 17,50 19,50 21,20

Berat tanah basah (kg) : 1,70 1,89 2,03 1,99 1,96 1,92

Jika isi tabung yang digunakan untuk melakukan percobaan tersebut = 950 cc dan berat spesifik = 2,65, maka diminta untuk:

- a. Gambarkan kurva hasil percobaan tersebut
- b. Gambarkan pula kurva/garis-garis derajat kejenuhan 80% dan 100%.

Penyelesaian:

a. Menggunakan persamaan-persamaan (4.16.) atau (4.17.)

$$\gamma_d = \frac{100\gamma_t}{100 + w} \quad \text{atau} \quad \gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + w}$$

Perhitungan selanjutnya diselesaikan sebagai berikut:

Kadar air (%) : 7,70 11,50 14,60 17,50 19,70 21,20

Berat tanah : 1700 1890 2030 1990 1960 1920

basah (gr)

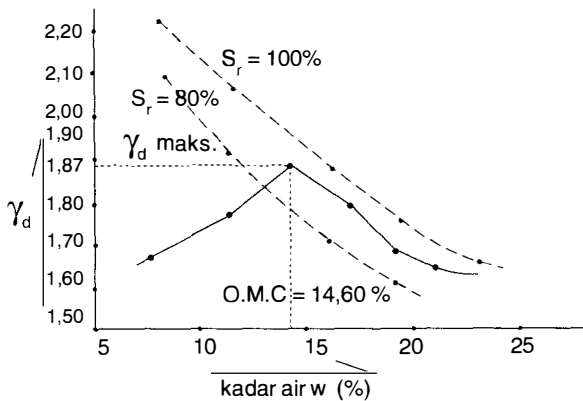
Berat isi : 1,79 1,99 2,14 2,10 2,06 2,02

basah (gr/cc)

Berat isi : 1,67 1,78 1,87 1,79 1,72 1,66

kering (gr/cc)

$$\text{Berat isi basah : } \gamma_t = \frac{W}{V_m}$$



Gb. 4.6. Kurva percobaan pematatan.

- b. Untuk menggambar garis-garis derajat kejenuhan:
 $S_r = 80\%$ dan $S_r = 100\%$, gunakan persamaan sbb.:

$$\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + \frac{W \cdot G}{S_r}}$$

Diketahui: $G = 2,65$

Ambil kadar air $w = 8\%, 12\%, 16\%, 20\%, 24\%$, maka γ_d dapat dihitung sebagai tabel berikut:

Kadar air w (%) :	8	12	16	20	24
γ_d (gr/cc) untuk $S_r = 80\%$:	2,08	1,89	1,72	1,59	1,47
γ_d (gr/cc) untuk $S_r = 100\%$:	2,18	2,00	1,85	1,72	1,62

Gambar lihat gb. 4.6.

2. Suatu timbunan tanah untuk membangun tanggul dengan data-data sebagai berikut:

- i. Tanah dari tempat galian:

Berat isi alami $\gamma = 1,75 \text{ gr/cm}^3$

Kadar air alami $W_n = 12\%$

- ii. Sesudah dipadatkan:

Berat isi $\gamma_c = 2,00 \text{ gr/cm}^3$

Kadar air $w = 18\%$

Jika tanah yang dipadatkan untuk timbunan = 100 m^3 , hitung:

- Jumlah tanah yang harus digali dari tempat galian
- Jumlah air yang ditambahkan.

Perhitungan:

- Tanah yang dipadatkan di timbunan dengan berat isi $\gamma_c = 2,00 \text{ gr/cm}^3 = 2,00 \text{ ton/m}^3$ dan kadar air $w = 18\%$ Untuk 100 m^3 tanah, maka:

Berat tanah yang dipadatkan: $W_c = 100 \times 2 = 200 \text{ ton}$. Berat tanah kering yang dipadatkan:

$$W_{dc} = \frac{W_c}{1+w} = \frac{200}{1+0,18} = 170 \text{ ton}$$

= berat tanah kering yang digali dari tempat galian.

Berat tanah basah digali:

$$W_{ws} = W_{dc} (1 + w_n) = 170 (1 + 0,12) = 190,40 \text{ ton.}$$

Isi tanah basah yang digali:

$$V = \frac{W_{ws}}{\gamma} = \frac{190,40}{1,75} = 108,80 \text{ m}^3$$

- Dalam Kondisi alami:

$$\text{Berat air} : W_{wn} = W_{dc} (1 + w_n) = 170 (1 + 0,12) = 20,40 \text{ ton}$$

Setelah dipadatkan:

$$\text{Berat air} : W_{wc} = W_{dc} (1 + w) = 170 (1 + 0,18) = 30,60 \text{ ton}$$

Jadi jumlah yang harus ditambahkan:

$$W_w = W_{wc} - W_{wn} = 30,60 - 20,40 = 10,20 \text{ ton.}$$

Soal-soal latihan:

- Suatu contoh tanah mempunyai berat spesifik: $G = 2,85$, dipadatkan dengan pepadatan standar dengan isi tabung = 945 cm^3 . Hasil-hasil pengamatan percobaan sebagai berikut:

No. pengamatan	1	2	3	4	5
Berat tanah basah(gr)	1650	1725	1775	1790	1775
Kadar air (%)	19,10	20,50	21,30	22,50	24,00

Berapakan nilai berat isi kering maksimum dan kadar air optimumnya? Hitung juga persentase kadar pori udara pada berat isi kering maksimum.

2. Suatu contoh tanah dipadatkan dengan kadar air = 15% dan derajat kejenuhan = 85%. Jika berat spesifik tanah = 2,65, maka diminta untuk menentukan berat isi kering tanah tersebut.
3. Sebuah silinder mempunyai isi = 600 cc diisi dengan tanah dan dipadatkan serta akan digunakan untuk mengisi sebuah konstruksi timbunan. Berat tanah yang diisikan ke dalam silinder = 1100 gram. Berat kering tanah = 910 gram.
Tentukan angka pori dan derajat kejenuhan tanah tersebut, jika berat spesifik tanah = 2,70
4. Tanah di tempat galian mempunyai berat isi kering = 1,70 t/m³ dengan kadar air = 12%. Jika isi tanah = 2000 m³ digali dari tempat galian tersebut dan dipadatkan pada suatu timbunan dengan kadar pori = 0,32, maka diminta untuk menghitung isi timbunan yang dapat dibangun.
5. Dalam percobaan pemadatan Proctor, untuk satu pengulangan, berat tanah basah kurang. Berat tanah kering oven 1800 gram. Isi tabung = 950 cc. Jika derajat kejenuhan tanah = 80%, tentukan:
 - a. Kadar air
 - b. Berat tanah asli.

2. Di lapangan

Apabila pekerjaan pemadatan dilakukan di lapangan, ini digunakan untuk mengetahui apakah berat isi yang diberikan dalam spesifikasi tercapai atau tidak. Prosedur standar untuk menentukan berat isi pemadatan di lapangan sebagai berikut:

- A. Metoda kerucut pasir (*sand cone method*).
- B. Metoda balon karet (*rubber balloon method*).
- C. Menggunakan densitas meter nuklir (*the use of a nuclear density meter*).

A. Metoda kerucut pasir.

Standar yang berlaku:

Bina Marga	:		
ASTM	:	D - 1556	- 64
ASSHTO	:	T - 191	- 61

a. Tujuan:

Untuk menentukan berat isi tanah dengan menggunakan penggantian pasir di dalam lubang galian tanah dengan kerucut pasir.

b. *Alat-alat yang digunakan:*

- | | |
|---|-------|
| 1. Alat-alat penggali lubang
(Sekop, linggis dll.) | 1 set |
| 2. Tabung kerucut pasir | 1 bh. |
| 3. Plat dasar pembentuk lubang | 1 bh. |
| 4. Timbangan | 1 set |
| 5. Alat-alat untuk kadar air | 1 set |

c. *Cara melakukan percobaan:*

1. Pengukuran isi botol (Jar).
 - a. Botol kosong ditimbang beratnya:
 $W_j = \dots\dots\dots$ gram.
 - b. Botol diisi air melalui corong dan di dalamnya tidak boleh terdapat gelembung-gelembung udara.
 - c. Selanjutnya kran ditutup dan kelebihan air di dalam corong dibuang.
Corong dilepas dan dilap dengan lap kering serta dikeringkan.
 - d. Botol penuh air tadi ditimbang beratnya : $W_{jw} = \dots$ gram, suhu dikur = $T^\circ\text{C}$.
 - e. Pekerjaan 1 sd. iv diulang minimum 3 kali untuk dihitung harga rata-ratanya.

Isi botol dapat dihitung dengan persamaan:

$$V_j = \frac{W_{jw} - W_j}{K \cdot \gamma_w \cdot T^\circ} (\text{cm}^3) \dots\dots\dots (4.20.)$$

Dalam hal ini:

- V_j = isi botol (*volume of jar*)
- W_{jw} = berat botol dan air (*weight of jar and water*)
- W_j = berat botol (*weight of jar*)
- K = koefisien koreksi air (Lihat tabel 2.4.)
- $\gamma_w \cdot T^\circ$ = berat isi air pada $T^\circ\text{C}$ (berat spesifik air) (Lihat tabel 2.3.)

2. Pengukuran berat isi pasir yang diuji.
 - a. Keringkan bagian dalam botol seluruhnya dan tutuplah krannya.

b. Isilah sampai pada bagian atas corong dengan pasir yang diuji. Kemudian kran dibuka dan isi botol serta corong dengan pasir.

Waktu mengisi botol dengan pasir, pasir harus selalu kira-kira setengah tinggi corong.

c. Setelah pengisian ini dan Bergeraknya pasir berhenti, botol dan corong berisi pasir tutup krannya. Sisa pasir di dalam corong dibuang dan berat botol berisi pasir ditimbang : $W_{js} = \dots$ gram.

d. Berat pasir di dalam botol dapat dihitung dengan persamaan:

$$W_s = W_{js} - W_j \dots\dots\dots (4.21.)$$

e. Berat isi pasir dapat dihitung dengan persamaan :

$$\gamma_{ts} = \frac{W_{js} - W_j}{V_j} = \frac{W_s}{V_j} \dots\dots\dots (4.22.)$$

Dalam hal ini:

W_{js} = berat botol + pasir (*weight of jar + sand*)

W_s = berat pasir (*weight of sand*)

γ_{ts} = berat isi pasir (*unit weight of sand*)

V_j = isi botol (*volume of jar*)

W_j = berat botol (*weight of jar*)

3. Pengukuran berat pasir yang terdapat pada corong.

a. Boto diisi dengan pasir (pengisian baru) ditimbang beratnya:

$$W_{js1} = \dots\dots\dots \text{ gram.}$$

b. Letakkan botol di atas sehelai plat dasar dengan corong di bawah (dalam keadaan terbalik)

c. Kemudian kran dibuka dan setelah pasir berhenti bergerak kran ditutup kembali.

d. Botol dan sisa pasir didalamnya ditimbang beratnya:

$$W_{js2} = \dots \text{ gram.}$$

e. Berat pasir di dalam corong dapat dihitung dengan persamaan:

$$W_{sf} = W_{js1} - W_{js2} \dots\dots\dots (4.23.)$$

Dalam hal ini:

W_{sf} = berat pasir di dalam corong (*weight of sand in funnel*)

4. Pengukuran berat isi/satuan tanah di lapangan.

Persiapan dan cara penggalian:

- a. Ratakan tanah dengan pisau.
- b. Letakkan plat dasar di atasnya melekat rata pada permukaan tanah.
- c. Galilah tanah sekitar lubang plat dasar dengan syarat isi galian harus sebagai berikut:

Tabel 4.6. Syarat isi galian tanah sekitar lubang.

Ukuran butir maksimum (mm)	Isi minimum untuk percobaan (cm ³)	Berat contoh untuk percobaan (gram)
0,42	1.700	100
12,70	1.900	250
25,40	2.100	500
50,80	2.800	1.000

Ambil tanah yang sudah digali dan masukkan ke dalam tabung. Contoh tanah ditutup agar kadar airnya tidak berubah.

5. Percobaan berat tanah yang digali dan isi lubang percobaan.
- a. Berat tanah yang digali : W_{ws} = gram.
 - b. Tanah yang digali diukur kadar airnya : w = %
 - c. W_{js} diperoleh dari 2.c.
 - d. Tempatkan botol di atas plat dasar dengan corong terbalik melekat pada lubang.
 - e. Buka kran, setelah Bergeraknya pasir berhenti, kran ditutup.

- f. Botol dengan sisa pasir ditimbang beratnya:
 $W_{js3} = \dots\dots\dots$ gram.
 Berat pasir yang dimasukkan ke dalam lubang dan co-
 rong:

$$W_{s4} = W_{js} - W_{js3} \dots\dots\dots (4.24.)$$

Berat pasir yang dimasukkan ke dalam lubang:

$$W_{s3} = W_{s4} - W_{sf} \dots\dots\dots (4.25.)$$

- g. Isi lubang percobaan:

$$V = \frac{W_{s4} - W_{sf}}{\gamma_{ts}} = \frac{W_{s3}}{\gamma_{ts}} \dots\dots\dots (4.26.)$$

- h. Berat isi tanah basah :

$$\gamma_t = \frac{W_{ws}}{V} \dots\dots\dots (4.27.)$$

- i. Berat isi tanah kering:

$$\gamma_d = \frac{100\gamma_t}{100 + w} \dots\dots\dots (4.28.)$$

Dalam hal ini:

W_{ws} = berat tanah basah (*wet weight of soil*).

- d. *Analisis perhitungan:*

Dengan menggunakan persamaan (4.20.) sampai dengan persamaan (4.28.), maka berat isi/kepadatan tanah kering dapat dihitung.

- e. *Contoh perhitungan:*

Dalam suatu percobaan kepadatan tanah di lapangan dengan menggunakan kerucut pasir, diperoleh data-data sebagai berikut:

- W_j = 998,50 gram
- W_{jw} = 5.118,20 gram
- T = 24°C
- W_{js} = 7.684 gram
- W_{js2} = 2.892 gram
- $W_w + W_m$ = 2.297 gram
- W_m = 359 gram
- w = 17,80 %
- W_{js3} = 1.037,83 gram

Tentukan berat isi kering tanah.

Perhitungan:

Lihat tabel : 2.4. dan 2.3. $T = 24^{\circ}\text{C}$

$K = 0,99982$ dan $g_{wT^{\circ}} = G = 0,9973$

$$V_i = \frac{W_{jw} - W_j}{K \cdot \gamma_{wT^{\circ}}} = \frac{5.118,20 - 998,50}{0,9982 \times 0,9973}$$

$$V_j = 4.138,30 \text{ cm}^3$$

$$W_s = W_{js} - W_j = 7.684 - 998,5 = 6.685,50 \text{ gr}$$

$$\gamma_{ts} = \frac{W_s}{V_j} = \frac{6.685,50}{4.138,30} = 1,62 \text{ gr / cm}^3$$

$$W_{sf} = W_{js} - W_{js2} = 7.684 - 2.892$$

$$W_{sf} = 4.792 \text{ gr.}$$

$$W_{ws} = (W_s + W_m) - W_m$$

$$W_{ws} = 2.297 - 359 = 1.938 \text{ gr.}$$

$$W_{s4} = W_{js} - W_{js3}$$

$$W_{s4} = 7.684 - 1.037,83 = 6.646,17 \text{ gr.}$$

$$W_{s3} = W_{s4} - W_{sf} = 6.646,17 - 4.792$$

$$W_{s3} = 1.854,17 \text{ gr.}$$

$$V = \frac{W_{s3}}{\gamma_{ts}} = \frac{1.854,17}{1,62} = 1.144,55 \text{ cm}^3$$

$$W_{sf} = W_{js} - W_{js2} = 7.684 - 2.893$$

$$\gamma_t = \frac{W_{ws}}{V} = \frac{1.938}{1.144,55} = 1,69 \text{ gr / cm}^3$$

$$\gamma_d = \frac{100\gamma_t}{100 + w} = \frac{100 \times 1,69}{100 + 17,80}$$

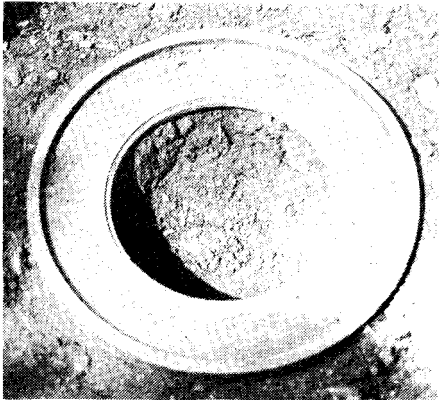
$$\gamma_d = 1,43 \text{ gr / cm}^3$$



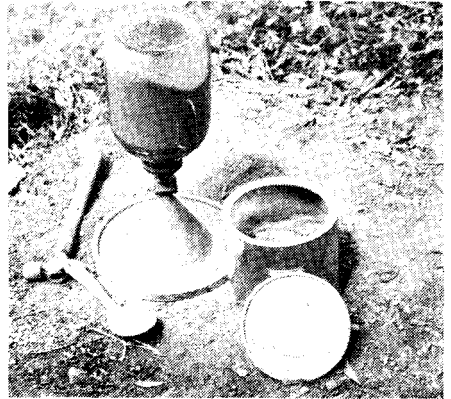
(a)



(b)



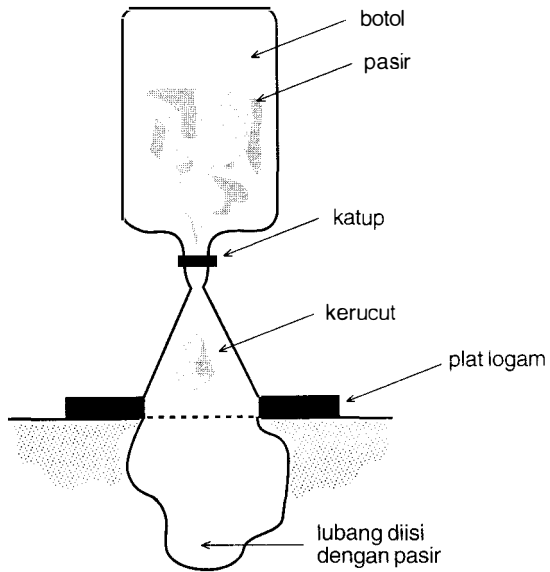
(c)



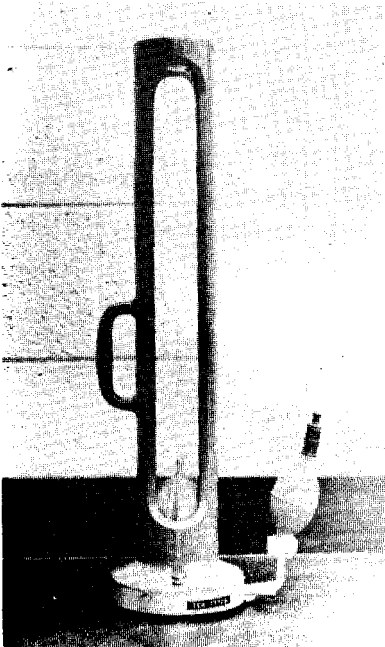
(d)

Gb. 4.7. Peralatan kerucut pasir dan pelaksanaan percobaan.

- (a) Peralatan kerucut pasir
- (b) Penggalan lubang pada plat dasar
- (c) Penempatan plat dasar
- (d) Kerucut pasir diletakkan terbalik di atas plat dasar.

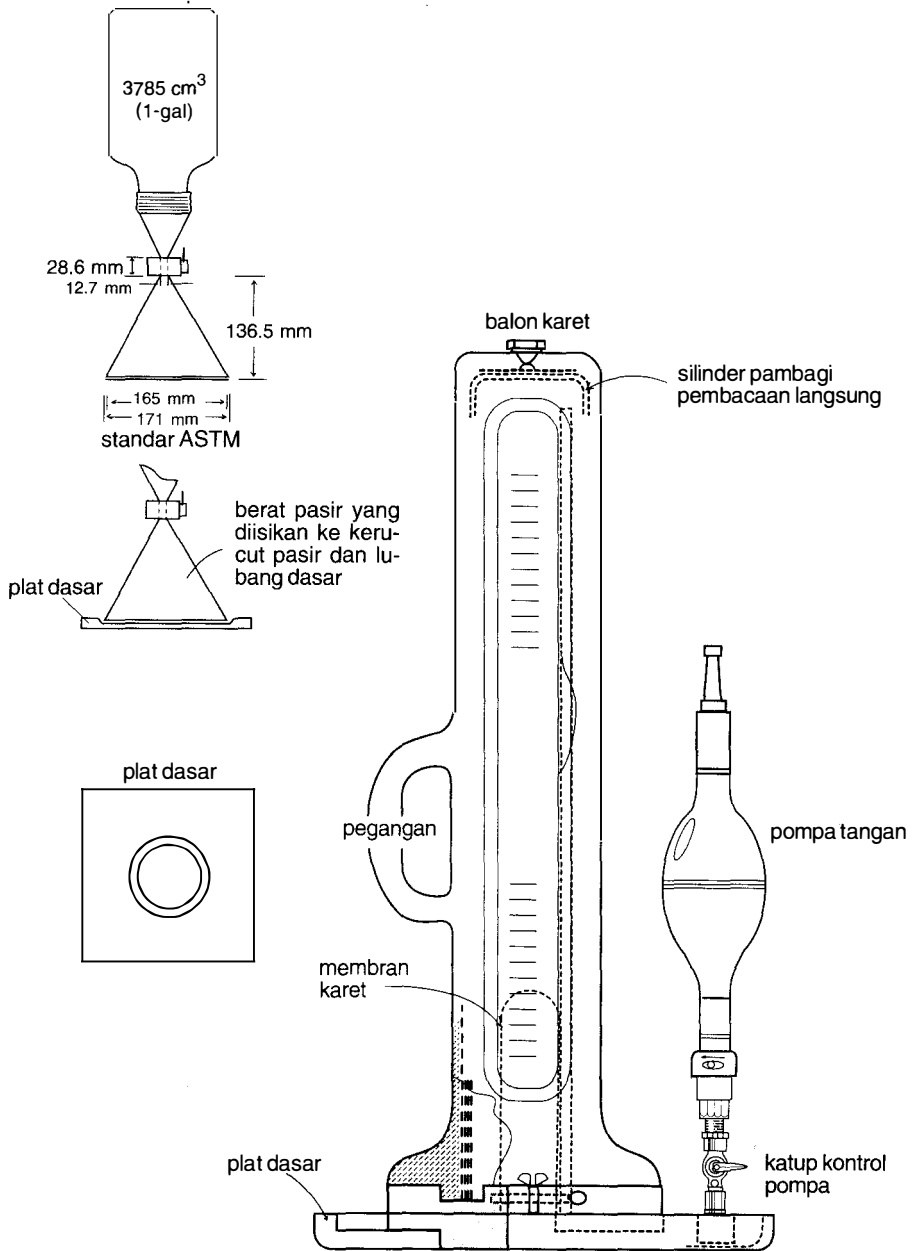


Gb. 4.8. Percobaan berat isi lapangan dengan metoda kerucut pasir.



Gb. 4.9. Peralatan metoda balon karet.

Sumber:
Mekanika Tanah Jilid 1, Braja M. Das,
 hlm. 261



Gb. 4.10. Detail-detail tipe peralatan kerucut pasir dan balon karet.

B. Metoda balon karet.

Standar yang berlaku :

Bina Marga : PB - 0104 - 76
ASTM ; D - 2167 - 66
AASHTO : T - 205 - 64

a. *Tujuan:*

Untuk menentukan kepadatan di lapangan suatu lapisan tanah yang telah dipadatkan atau suatu lapisan perkerasan.

b. *Alat-alat yang digunakan:*

1. Alat-alat penggali lubang 1 set
(Sekop, linggis, cangkul dll.)
2. Tabung kaca berskala dengan selubung besi (calibrated vessel) dan balon karet 1 set
berisi air menumpu di atas plat dasar.
3. Timbangan kapasitas 20 kg dengan ketelitian 2 set
1,0 gram dan kapasitas 1.600 gram dengan ketelitian 0,10 gram.
4. Alat-alat untuk kadar air 1 set

c. *Cara melakukan percobaan:*

1. Permukaan tanah yang akan diuji diratakan terlebih dahulu, sehingga plat dasar alat dapat menumpu rapat pada permukaan tanah.
2. Plat dasar dipasak dengan paku pada keempat sisinya, kemudian tabung kaca dipasang pada plat tersebut dan ditekan tegak lurus dari atas supaya stabil. Klep dibuka dan dengan menggunakan pompa tekan, air dipompa sampai balon dalam tabung rata ke bawah dan permukaan air tidak menunjukkan penurunan lagi, kemudian dilakukan pembacaan permulaan dan dicatat sebagai pembacaan mula. Dengan menggunakan pompa isap permukaan air dinaikkan kembali.
3. Pindahkan tabung kaca dari tempat percobaan dan galilah lubang tegak lurus di bawah alat tadi. Diameter galian = 10 cm sesuai dengan diameter lubang plat, sedangkan dalam galian kira-kira 8 sampai 10 cm.

4. Seluruh tanah hasil galian dimasukkan ke dalam kaleng atau plastik yang telah diketahui beratnya: $W_1 = \dots$ gram, kemudian berat tanah dan kaleng ditimbang beratnya: $W_2 = \dots$ gram.
5. Alat tabung kaca berskala dipasng kembali pada tempat semula kemudian dengan pompa tekan air dipompa sehingga balon karet akan masuk mengisi seluruh lubang galian dan permukaan air akan turun. Setelah permukaan tidak menunjukkan penurunan lagi dilakukan pembacaan dan dicatat.
Selisih pembacaan terhadap pembacaan mula sama dengan isi lubang.
6. Balon dinaikkan lagi ke atas dengan pompa isap dan permukaan air kembali seperti semula.
7. Ambil tanah bekas galian secukupnya sebagai benda uji untuk pemeriksaan kadar air..

d. *Analisis perhitungan:*

Berat tanah:

$$W_s = W_2 - W_1 \dots\dots\dots (4.29.)$$

Berat isi tanah basah:

$$\gamma_t = \frac{W_s}{V_h} \dots\dots\dots (4.30.)$$

Berat isi tanah kering:

$$\gamma_d = \frac{100\gamma_t}{100 + w} \dots\dots\dots (4.31.)$$

Derajat kepadatan di lapangan:

$$D = \frac{\gamma_{d\text{lap}}}{\gamma_{d\text{lab}}} \times 100\% \dots\dots\dots (4.32.)$$

Dalam hal ini:

V_h = isi lubang

$\gamma_{d\text{lab}}$ = berat isi tanah kering lapangan

$\gamma_{d\text{lab}}$ = berat isi tanah kering laboratorium

e. *Contoh perhitungan:*

Dari suatu percobaan kepadatan di lapangan dengan balon karet, diperoleh data-data sebagai berikut:

- Berat tanah + kaleng : $W_2 = 975$ gram
- Berat kelang : $W_1 = 385$ gram
- Pembacaan mula : $V_1 = 225$
- Pembacaan akhir : $V_2 = 510$
- Luas tabung : $A = 1$ cm²
- Kadar air : $w = 18,50\%$
- Berat isi tanah kering laboratorium : $\gamma_{dlab} = 1,84$ gr/cm³

Hitung:

- Berat isi tanah kering lapangan
- Derajat kepadatan di lapangan.

Perhitungan:

$$W_s = W_2 - W_1 = 975 - 385 = 590 \text{ gram}$$

$$V_h = (V_2 - V_1) A$$

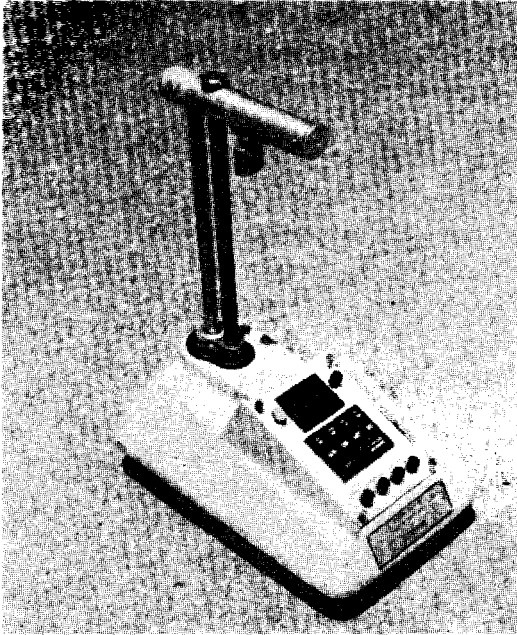
$$V_h = (510 - 225) (1) = 285 \text{ cm}^3$$

$$\gamma_t = \frac{W_s}{V_h} = \frac{590}{285} = 2,07 \text{ gr / cm}^3$$

$$\gamma_d = \frac{100\gamma_t}{100 + w} = \frac{100 \times 2,07}{100 + 18,50} = 1,75 \text{ gr / cm}^3$$

$$D = \frac{\gamma_{dlap}}{\gamma_{dlab}} \times 100\% = \frac{1,75}{1,84} \times 100\% = 95,11\%$$

- C. Metoda dengan menggunakan densitas meter nuklir. Densitas meter nuklir sekarang digunakan dalam beberapa proyek besar untuk menentukan berat isi tanah kering yang dipadatkan. Densitas meter dapat dioperasikan di dalam lubang atau di atas permukaan tanah. Alat tersebut mengukur berat isi tanah basah dan juga menunjukkan berat air di dalam isi tanah. Berat isi tanah kering yang dipadatkan dapat ditentukan dengan mengurangi berat isi tanah basah dengan berat air.



Gb. 4.11. Densitas meter nuklir.

Sumber:
Mekanika Tanah Jilid 1, Braja
M. Das, hlm. 262

4.7. PELAKSANAAN PEMADATAN DI LAPANGAN

Pelaksanaan pemadatan di lapangan untuk pekerjaan-pekerjaan ringan biasanya digunakan:

- a. Alat pemadat tangan
- b. Alat pemadat dengan mesin ringan.

Untuk pekerjaan-pekerjaan besar biasanya digunakan:

- a. Mesin gilas beroda halus (*Smooth wheel roller*).
Mesin gilas ini memberikan liputan 100% di bawah roda dengan tekanan kontak sampai sekitar 400 kPa.
Mesin ini dapat dipakai untuk semua jenis tanah, kecuali apabila terdapat batu-batu yang besar.
Mesin gilas ini terutama sesuai untuk tanah kohesif dengan atau tanpa perlengkapan penggetar dan mesin ini biasa disebut juga *mesin gilas beroda baja*.
- b. Mesin gilas beroda karet atau pneumatis (*Pneumatic tired roller*).
Mesin gilas ini memberikan liputan 80% dengan tekanan ban sampai sekitar 700 kPa. Beberapa baris roda yang terdiri dari empat sampai

enam ban yang berjarak dekat dengan jarak antara untuk roda depan dan belakang yang berselang-seling akan memberikan liputan yang lebih besar.

Alat ini dapat ditarik dengan traktor sebagai alat penggerak utama (*prime movers*), tetapi biasanya mempunyai mesin sendiri dan dapat dipakai untuk tanah kohesif maupun non kohesif.

c. Pemadat roda bersegmen (*Segment roller*).

Mesin ini menghasilkan liputan 60% dengan tekanan kontak sampai 1.000 kPa.

Alat ini digunakan untuk tanah pasir bercampur lempung atau tanah liat.

d. Mesin gilas tumbuk (*Tamping foot roller*).

Mesin ini menghasilkan liputan sebesar 40% dengan tekanan kontak 1.400 sampai sekitar 8.500 kPa yang tergantung kepada diameter alat gilasnya serta apakah tabung alat gilas tersebut diisi air atau pasir untuk menambah berat.

Alat ini hanya sesuai untuk tanah kohesif dan biasanya mempunyai mesin sendiri dengan empat roda (di muka dua dan di belakang dua).

e. Mesin gilas kaki domba (*Sheeps foot roller*).

Mesin gilas ini menghasilkan 8 sampai 12% liputan akibat proyeksi kaki domba yang hanya sedikit 3 sampai 8 cm². Tabung roda penggilas dapat diisi air atau pasir untuk pemberat tambahan. Tekanan kontak berkisar antara 1.400 sampai 7.000 kPa.

Mesin gilas ini biasanya ditarik traktor atau juga menggunakan mesin sendiri. Untuk yang ditarik, jika tenaga traktor penariknya cukup besar biasanya ditarik beberapa buah, berjajar ke samping satu garis atau kombinasi keduanya.

Berat mesin gilas ini antara 3 – 5 ton. tetapi ada juga yang beratnya 12 sampai dengan 30 ton.

Alat ini hanya dapat dipakai untuk tanah kohesif.

f. Mesin gilas tipe anyaman (*Mesh grid roller*).

Mesin ini menghasilkan liputan sebesar 50% dan tekanan kontak berkisar antara 1.400 sampai sekitar 6.000 kPa. Mesin gilas ini digunakan untuk tanah berbutir kasar.

g. Metoda konsolidasi dinamis (*Dynamic consolidation method*).

Metoda ini merupakan metoda perbaikan tanah yang dikembangkan oleh Menard pada tahun 1960 di Eropa. Prosedurnya adalah dengan cara menjatuhkan beban berat yang disebut "Pounder" berkali-kali. Hantaman beban dengan energi tinggi itu pada tanah berbutir menyebabkan suatu pencairan (*liquefaction*) praktis endapannya. Dengan demikian membiarkan massa mengalami penurunan ke suatu kondisi yang lebih padat. Sebaliknya, metoda yang sama jika diterapkan pada tanah lempung akan menyebabkan terdorongnya gelembung udara mikro akibat adanya lubang-lubang pori di sekitar titik jatuh pounder dan akhirnya dipulihkan lagi kekuatannya.

Saat ini metoda ini bisa dipakai pada berbagai jenis tanah, seperti: pasir lepas, lempung dan tanah reklamasi.

Dalam pelaksanaan metoda tersebut diperlukan permukaan tanah yang rata dan solid yang memungkinkan kran-kran berat bekerja dengan aman.

Pounder seberat 10 hingga 20 ton diangkat hingga ketinggian 10 – 30 meter, kemudian dijatuhkan.

Pounder dijatuhkan beberapa kali di lokasi yang sama, sebelum berpindah tempat lain yang berjarak 5 – 20 meter. Lubang-lubang yang terbentuk akibat jatuhnya pounder diukur, kemudian ditimbun kembali dengan tanah di sekitarnya. Akhirnya permukaan tanah dipadatkan dan diratakan. Hasilnya dibuktikan dengan pengukuran penurunan, percobaan pressuremeter di lokasi dan sebagainya.

Menurut Hachinohe, suatu tumbukan pounder yang sangat kuat akan menghasilkan getaran dengan frekuensi 2 – 12 Hz. Pengukuran di lapangan menunjukkan bahwa pada jarak 30 meter dari titik jatuh pounder, kecepatan gelombang yang ditimbulkan masih di bawah 5 cm/detik yang masih dapat diteloransi oleh kebanyakan struktur.

Bab V

Metoda Rasio Daya Dukung California (California Bearing Ratio = CBR Method)

5.1. PENDAHULUAN

Metoda ini mula-mula diciptakan oleh O.J. Porter, kemudian dikembangkan oleh California State Highway Departement, tetapi kemudian dikembangkan dan dimodifikasi oleh corps insinyur-insinyur tentara Amerika Serikat (*U.S. Army Corps of Engineers*). Metoda ini mengkombinasikan percobaan pembebanan penetrasi di laboratorium atau di lapangan dengan rencana empiris (*empirical design charts*) untuk menentukan tebal lapisan perkerasan. Hal ini digunakan sebagai metoda perencanaan perkerasan lentur (*flexible pavement*) jalan raya dan lapangan terbang. Tebal bagian perkerasan ditentukan oleh nilai C.B.R.

5.2. DEFINISI

C.B.R. didefinisikan sebagai berikut:

California Bearing Ratio merupakan suatu perbandingan antara beban percobaan (*test load*) dengan beban standar (*standard load*) dan dinyatakan dalam persentase.

Lebih jelas lagi dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\text{C.B.R.} = \frac{P_T}{P_S} \times 100\% \dots\dots\dots (5.1.)$$

Dalam hal ini:

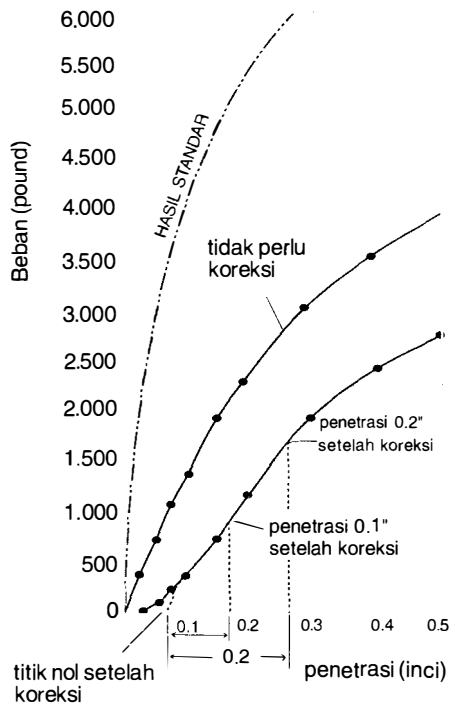
P_T = beban percobaan (*test load*)

P_S = beban standar (*standar load*)

Harga CBR. adalah nilai yang menyatakan kualitas tanah dasar dibandingkan dengan bahan standar berupa batu pecah yang mempunyai nilai CBR. sebesar 100% dalam memikul beban lalu lintas.

Tabel 5.1. Beban standar yang dipakai untuk percobaan CBR.

Penetrasi plunyer (in)	Beban standar (lb)	Penetrasi plunyer (mm)	Beban standar (kg)	Beban standar (kN)
0,10	3.000	2,50	1.370	13,50
0,20	4.500	5,00	2.055	20,00
0,30	5.700	7,50	2.630	25,50
0,40	6.900	10,00	3.180	31,00
0,50	7.800	12,50	3.600	35,00



Gb. 5.1. Hasil percobaan CBR

5.3. PERCOBAAN-PERCOBAAN C.B.R.

Percobaan-percobaan ini dapat dilakukan:

1. Di laboratorium
2. Di lapangan.

1. *Percobaan di laboratorium:*

Standar yang berlaku :

- Bina Marga : PB - 0113 - 76
 ASTM : D - 1883 - 73
 AASHTO : T - 193 - 81

a. *Tujuan:*

Untuk menentukan nilai daya dukung tanah dalam kepadatan maksimum.

b. *Alat-alat yang digunakan:*

Hampir sama dengan alat-alat percobaan pemadatan standar maupun modifikasi dengan spesifikasi seperti tabel berikut:

Tabel 5.2. Spesifikasi percobaan C.B.R.

Metoda	Jumlah Pukulan	Jumlah Lapisan	Berat palu (N)
D - 698 : 2 (Tanah berbutir (B) halus)	56	3	24,50
4 (Tanah berbutir (D) Kasar)	56	3	24,50
D - 1557 : 2 (Tanah berbutir (B) halus)	56	5	44,50
4 (Tanah berbutir (D) kasar)	56	5	44,50

Karena luas cetakan/tabung C.B.R. lebih luas dari luas tabung pemadatan, maka jumlah pukulan pada C.B.R. lebih banyak dari pukulan pada pemadatan. Diameter cetakan C.B.R. = 6 inci dan diameter cetakan pemadatan = 4 inci, maka jumlah pukulan CBR. dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$N_{\text{CBR}} = \frac{A_{\text{CBR}}}{A_{\text{Comp}}} \times N_{\text{Comp}} \dots\dots\dots (5.2.)$$

Dalam hal ini:

N_{CBR} = jumlah pukulan pada CBR

$N_{\text{Comp.}}$ = jumlah pukulan pada pemadatan

A_{CBR} = luas tabung CBR

$A_{\text{Comp.}}$ = luas tabung pemadatan

Perhitungan:

$$D_{\text{CBR}} = 6 \text{ inci}$$

$$D_{\text{Comp.}} = 4 \text{ inci}$$

$$A_{\text{CBR}} = \frac{1}{4} \pi D_{\text{CBR}}^2$$

$$A_{\text{comp.}} = \frac{1}{4} \pi D_{\text{Comp.}}^2$$

$$A_{\text{CBR}} = \frac{1}{4} \pi 6^2$$

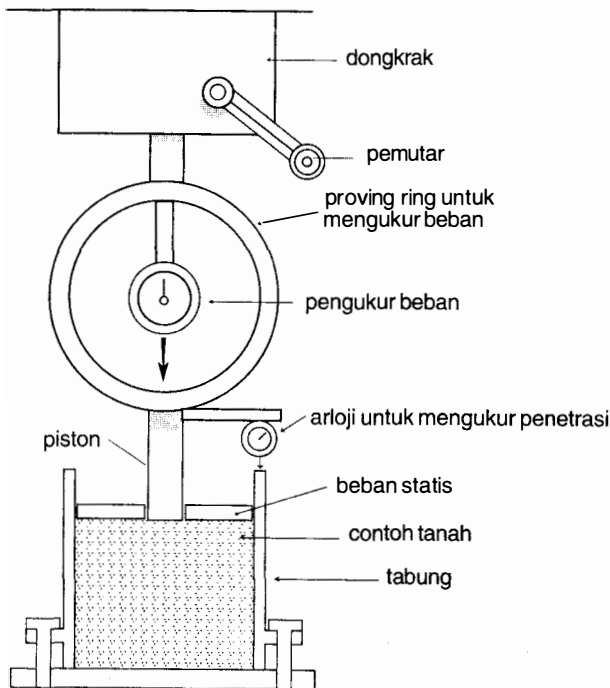
$$A_{\text{comp.}} = \frac{1}{4} \pi 4^2$$

$$N_{\text{CBR}} = ?$$

$$N_{\text{comp.}} = 25$$

$$N_{\text{CBR}} = \frac{\frac{1}{4} \pi 6^2}{\frac{1}{4} \pi 4^2} = 56.25 \sim 56$$

Alat percobaan CBR. dapat dilihat dalam gambar di bawah ini.



Gb. 5.2. Percobaan CBR Dilaboratorium.

c. *Cara melakukan percobaan:*

Percobaan C.B.R. biasanya menggunakan contoh tanah dalam kadar air optimum (O.M.C.) seperti ditentukan dalam percobaan pemadatan standar atau modifikasi.

Metoda yang digunakan dalam metoda 2 atau standar ASTM D – 70 atau D – 1557 – 70. Diameter tabung = 6 inci = 15 cm dan tinggi = 5 sampai 7 inci = 12,50 cm sampai 17,50 cm.

Dengan menggunakan dongkrak mekanis sebuah piston penetrasi ditekan supaya masuk ke dalam tanah dengan kecepatan tetap = 1,25 mm/menit dengan beban awal = 0,05 kN.

Pembebanan pada plunyer diamati pada penetrasi berturut-turut: 0,625; 1,250; 1,875; 2,500; 3,750; 5,000; 6,250 dan 7,500 mm.

Hasil pengamatan ini diplot dalam kertas kurva.

d. *Analisis perhitungan:*

Nilai C.B.R. dihitung pada harga penetrasi 2,500 dan 5,000 mm dengan beban standar = 13,50 kN dan 20,00 kN.

Setelah diadakan koreksi, maka dapat ditentukan nilai C.B.R.nya. Jika nilai C.B.R. dengan penetrasi = 5,000 mm lebih besar dari penetrasi 2,500 mm, maka penetrasi 5,000 mm diambil sebagai C.B.R. rencana (C.B.R. design).

Umumnya nilai C.B.R. dengan penetrasi 2,500 mm lebih besar dari penetrasi 5,000 mm.

e. *Contoh perhitungan:*

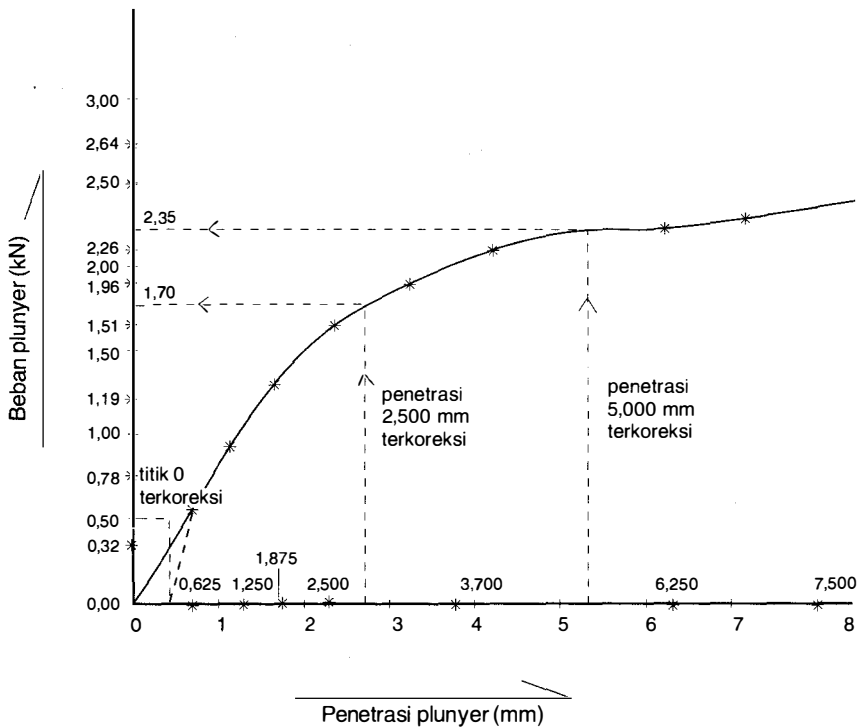
Dari suatu percobaan C.B.R. di laboratorium diperoleh data-data sebagai berikut:

Penetrasi (mm)	Beban plunyer (kN)
0,625	0,32
1,250	0,78
1,875	1,19
2,500	1,51
3,750	1,96
5,000	2,26
6,250	2,50
7,500	2,64

Tentukan nilai CBR.

Perhitungan:

Hasil-hasil tersebut diplot dalam kurva berikut.



Gb. 5.3. Kurva hasil percobaan CBR.

Setelah dikoreksi diperoleh hasil-hasil sebagai berikut:

Beban pada penetrasi = 2,500 mm

Beban plunyer : $P_T = 1,70$ kN

Beban standar : $P_S = 13,50$ kN

$$\text{CBR} = \frac{P_T}{P_S} \times 100\% = \frac{1,70}{13,50} \times 100\% = 12,59\%$$

Beban pada penetrasi = 5,000 mm

Beban plunyer : $P_T = 2,35$ kN

Beban standar : $P_S = 20,00$ kN

$$\text{CBR} = \frac{2,35}{20,00} \times 100\% = 11,75\%$$

$$\text{CBR tanah} = 12,59\%$$

2. *Percobaan di lapangan:*

C.B.R. asli

a. *Tujuan:*

Untuk menentukan nilai CBR. asli di lapangan sesuai dengan kondisi tanah saat itu. Biasanya digunakan untuk perencanaan tebal lapisan perkerasan yang lapisan tanah dasarnya sudah tidak akan dipadatkan lagi. Pemeriksaan dilakukan dalam kondisi kadar air tanah tinggi (musim penghujan) atau dalam kondisi terburuk yang mungkin terjadi. Untuk mengontrol apakah kepadatan yang diperoleh sudah sesuai dengan yang diinginkan. Tetapi ini tidak umum digunakan.

b. *Alat-alat yang digunakan:*

1. Truk dengan pembebanan
2. Piston penetrasi dari logam.
3. Timbangan.
4. Dongkrak hidrolis atau mekanik.
5. Arloji beban dan arloji cincin penguji lengkap dengan cincin pengujinya (*proving ring*).
6. Peralatan pelengkap lainnya antara lain: rol meter, kunci dan lain-lain.

c. *Cara melakukan percobaan:*

1. Di lapangan:
 - (a) Tanah digali di lokasi yang telah ditentukan dan kemudian dibuat deskripsi secara visual.
 - (b) Tabung diletakkan di permukaan tanah dan kemudian diberi beban melalui truk dengan dibantu dongkrak sebagai alat penekan.
 - (c) Contoh tanah diambil sebanyak 2 tabung.
 - (d) Contoh tanah dibersihkan dan ditutup rapat dan dibawa ke laboratorium.
 - (e) Satu contoh langsung diuji dan yang lain direndam selama 4 x 24 jam.

2. Di laboratorium
 - (a) Beban statis diletakkan pada bagian atas tabung untuk mencegah pengembangan tanah dalam tabung.
 - (b) Arloji penunjuk beban dan arloji penetrasi dipasang dan angka dinolkan.
 - (c) Pembebanan dimulai dengan beraturan sesuai dengan urutan waktu maupun kedalaman yang ada pada formulir data.
 - (d) Catat angka yang dibaca pada arloji pengukur pada formulir.

d. *Analisis perhitungan:*

Dari hasil-hasil percobaan tersebut diplot dikertas kurva dan diadakan koreksi bila diperlukan. Nilai CBR. dihitung pada penetrasi = 0,10 inci dan 0,20 inci dengan persamaan-persamaan:

$$CBR_{0,10} = \frac{X}{P_s} \times 100\% = \frac{X}{3.000} \times 100\% \dots\dots\dots (5.3.)$$

$$CBR_{0,20} = \frac{Y}{P_s} \times 100\% = \frac{Y}{4.500} \times 100\% \dots\dots\dots (5.4.)$$

Dalam hal ini:

- X = pembacaan pada kurva pada penetrasi 0,10 inci
- Y = pembacaan pada kurva pada penetrasi 0,20 inci
- P_S = beban standar (lihat tabel 5.1.)

e. *Contoh perhitungan:*

Dari suatu percobaan CBR. asli di lapangan diperoleh data-data sebagai berikut:

Dari plotting pada kurva setelah dikoreksi:

X = 382,50 lb dan Y = 506,25 lb.

Tentukan nilai CBR. tanah tersebut.

Perhitungan:

$$CBR_{0,10} = \frac{X}{3.000} \times 100\% = \frac{382,50}{3.000} \times 100\% = 12,75\%$$

$$CBR_{0,20} = \frac{Y}{4.500} \times 100\% = \frac{506,25}{4.500} \times 100\% = 11,25\%$$

Nilai CBR. tanah tersebut = 12,75%

CBR. lapangan.

- a. *Tujuan:*
Untuk mendapatkan nilai CBR langsung di lokasi.
- b. *Alat-alat yang digunakan:*
 1. Piston penetrasi dari logam.
 2. Cincin penguji dengan arloji pembacaan.
 3. Arloji pembacaan beban.
 4. Mesin penetrasi.
 5. Beban truk.
 6. Perlengkapan lainnya seperti CBR asli.
- c. *Cara melakukan percobaan:*
 1. Benda uji didapatkan langsung pada tanah dasar.
 2. Mula-mula diletakkan beban statis untuk mencegah mengembangnya tanah dan kehilangan kadar air benda uji.
 3. Piston dipasang pada benda uji.
 4. Arloji pembacaan beban dan arloji pembacaan penetrasi dibuat nol.
 5. Pembebanan dimulai dengan teratur.
 6. Pembacaan pembebanan pada penetrasi dicatat.
 7. Hasil pemeriksaan digambarkan dalam kertas kurva.
- d. Analisis perhitungan sama dengan CBR asli
- e. Contoh perhitungan prinsipnya sama.

5.4. JENIS-JENIS C.B.R.

Berdasarkan cara mendapatkan contoh tanahnya, CBR dapat dibagi menjadi:

1. CBR lapangan (*CBR in place* atau *field CBR*).
2. CBR lapangan rendaman (*Undisturbed soaked CBR*).
3. CBR laboratorium/CBR rencana titik (*Laboratory CBR/design CBR*).
1. CBR lapangan

Digunakan untuk:

- a. Memperoleh nilai CBR asli di lapangan, sesuai dengan kondisi tanah dasar saat itu.
Umum digunakan untuk perencanaan tebal perkerasan yang lapisan tanah dasarnya sudah tidak akan dipadatkan lagi. Pemeriksaan

dilakukan dalam kondisi kadar air tanah tinggi (musim penghujan) atau dalam kondisi terburuk yang mungkin terjadi.

- b. Memeriksa apakah kepadatan yang diperoleh sesuai dengan yang diinginkan.

Pemeriksaan untuk tujuan ini tidak umum digunakan, lebih sering menggunakan pemeriksaan yang lain seperti kerucut pasir (*sand cone*) dan lain-lain.

2. CBR lapangan rendaman

Digunakan untuk mendapatkan besarnya nilai CBR asli di lapangan pada keadaan jenuh air dan tanah mengalami pengembangan (*swell*) yang maksimum.

Hal ini sering digunakan untuk menentukan daya dukung tanah di daerah yang lapisan tanah dasarnya sudah tidak akan dipadatkan lagi, terletak di daerah yang badan jalannya sering terendam air pada musim penghujan dan kering pada musim kemarau. Sedangkan pemeriksaan dilakukan di musim kemarau.

Pemeriksaan dilakukan dengan pengambilan contoh tanah dalam tabung (*mould*) yang ditekan masuk ke dalam tanah mencapai kedalaman yang diinginkan. Tabung berisi contoh tanah dikeluarkan dan direndam dalam air selama \pm hari sambil diukur pengembangannya.

Setelah pengembangan tidak terjadi lagi, barulah dilakukan pemeriksaan besarnya CBR.

3. CBR laboratorium

Tanah dasar (*subgrade*) pada konstruksi jalan baru dapat berupa tanah asli, tanah timbunan atau tanah galian yang sudah dipadatkan sampai mencapai kepadatan 95% kepadatan maksimum. Dengan demikian daya dukung tanah dasar tersebut merupakan nilai kemampuan lapisan tanah memikul beban setelah tanah tersebut dipadatkan. Berarti nilai CBR-nya adalah nilai CBR yang diperoleh dari contoh tanah yang dibuatkan mewakili keadaan tanah tersebut setelah dipadatkan. CBR ini disebut CBR laboratorium, karena disiapkan di laboratorium atau disebut juga CBR rencana titik. CBR laboratorium dapat dibedakan atas 2 macam:

- a. CBR laboratorium rendaman (*Soaked laboratory CBR/soaked design CBR*).
- b. CBR laboratorium tanpa rendaman (*Unsoaked laboratory CBR/unsoaked design CBR*).

5.5. BEBERAPA CARA MENAKSIR DAN MENENTUKAN NILAI CBR.

1. Menaksir nilai CBR secara empiris

Pada tanah dasar rencana yang merupakan tanah dasar galian yang cukup dalam, pengambilan contoh tanah sebanyak yang diperlukan untuk pemeriksaan CBR sukar diperoleh.

Contoh tanah biasanya diperoleh dengan menggunakan bor. Untuk itu penentuan besarnya nilai CBR rencana dapat dilakukan dengan cara empiris yang hanya berdasarkan analisis pembagian butir dan sifat plastisitas tanah (berdasarkan klasifikasi ASSHTO dan Unified). Tetapi data CBR ini hanyalah data prakiraan yang selalu harus diamati pada tahap pelaksanaan.

2. CBR rencana rendaman

Berdasarkan hasil analisis pembagian butir dan sifat plastisitas tanah, CBR rencana rendaman (*Soaked design CBR*) dapat ditentukan dengan menggunakan rumus yang diambil dari N.A.A.S.R.A. (*National Association of Australian State Road Authority*) sebagai berikut:

$$a. \text{Log } C_s = 1,70 - 0,005 P_{0,425} + 0,002 P_{0,075} + \\ - L (0,02 + 0,0004 P_{0,075}) \dots\dots\dots (5.5.)$$

$$b. \text{Log } C_s = 1,90 - 0,004 P_{2,36} - 0,005 P_{0,425} + \\ + P_{0,075}/P_{0,425} (5,20 - 0,50 P_{0,075}/P_{0,425}) 10^{-3} \\ - 0,01 I \dots\dots\dots (5.6.)$$

Dalam hal ini:

C_s = CBR rendaman.

$P_{2,36}$ = persentase tanah lolos ayakan dengan lubang 2,36 mm

$P_{0,425}$ = persentase tanah lolos ayakan dengan lubang 0,425 mm

$P_{0,075}$ = persentase tanah lolos ayakan dengan lubang 0,075 mm

L = batas menyusut (shrinkage limit) tanah (%)

I = indeks plastisitas tanah (%)

Dari kedua persamaan tersebut dapat diperoleh CBR tanah dasar yang akan digunakan untuk perencanaan dengan persamaan:

$$C_{ss} = 0,25 (3 C_{smin.} + C_{smaks.}) \dots\dots\dots (5.7.)$$

Dalam hal ini:

C_{ss} = nilai CBR rendaman yang digunakan untuk perencanaan.

$C_{smin.}$ = nilai minimum yang diperoleh dari pers. (5.5.) dan (5.6.)

$C_{smaks.}$ = nilai maksimum yang diperoleh dari pers. (5.5.) dan (5.6.)

3. Menentukan nilai CBR lapangan dengan menggunakan data DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*)

Nilai CBR lapangan dapat juga diperoleh dengan menggunakan hasil pemeriksaan *Dynamic Cone Penetrometer* (D.C.P).

D.C.P mulai dipergunakan di Indonesia sejak tahun 1985/1986.

Pemeriksaan dengan D.C.P. menghasilkan data kekuatan tanah sampai kedalaman 90 cm di bawah tanah dasar.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat seperti tampak dalam gambar 5.4.

Penumbuk dengan berat = 20 lb (9,072 kg) dijatuhkan dari ketinggian = 20 inci (50,80 cm) dengan bebas melalui sebuah pipa berdiameter = 0,625 inci (15,875 mm) yang ditahan oleh landasan (anvil). Ujung pipa baja berbentuk kerucut dengan luas = 0,50 inci² (1,6129 cm²) dengan sudut puncak = 30° atau 60°. Di Indonesia umum digunakan sudut puncak = 30°. Hasil pemeriksaan dapat dinyatakan dengan:

a. Penetrabilitas Skala Penetrometer (*Scale of Penetrometer Penetrability* = SPP) yang menyatakan mudah atau tidaknya melakukan penetrasi ke dalam tanah.

Dinyatakan dalam: cm/tumbukan.

b. Tahanan Skala Penetrasi (*Scale of Penetration Resistance* = SPR) yang menyatakan sukar atau tidaknya melakukan penetrasi ke dalam tanah.

Dinyatakan dalam tumbukan/cm.

$$SPR = \frac{1}{SPP} \dots\dots\dots (5.8.)$$

Data lapangan umumnya dalam SPP, tetapi dalam analisis data digunakan SPR.

Korelasi dengan nilai CBR diperoleh dengan mempergunakan kertas transparan (tembus pandang) seperti gambar 5.5.

Kertas transparan tersebut digeser-geserkan dengan tetap menjaga sumbu kurva pada kedua gambar sejajar sehingga diperoleh garis kumulatif tumbukan gambar 5.6. berimpit dengan salah satu garis pada kertas transparan. Nilai yang ditunjukkan oleh garis tersebut merupakan nilai CBR lapangan pada kedalaman tersebut. Tetapi koreksi ini sebaiknya dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari hasil percobaan CBR dengan nilai DCP yang berdekatan dengan lokasi di mana CBR tersebut dilaksanakan.

4. Nilai CBR pada satu titik pengamatan

Seringkali jenis tanah dasar itu berbeda-beda sehubungan dengan perubahan kedalaman pada satu titik pengamatan. Untuk itu perlu ditentukan nilai CBR yang mewakili titik tersebut.

Japan Road Association (1976) memberikan rumusan sebagai berikut:

$$CBR_{\text{titik pengamatan}} = \left[\frac{h_1 \sqrt[3]{CBR_1} + \dots + h_n \sqrt[3]{CBR_n}}{100} \right]^3$$

Dalam hal ini:

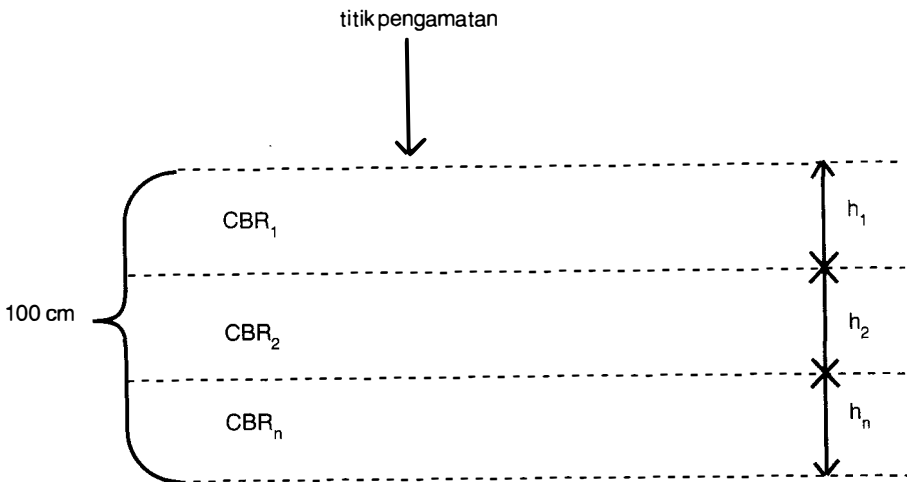
h_1 = tebal lapisan tanah ke-1

CBR_1 = nilai CBR pada lapisan tanah ke-1

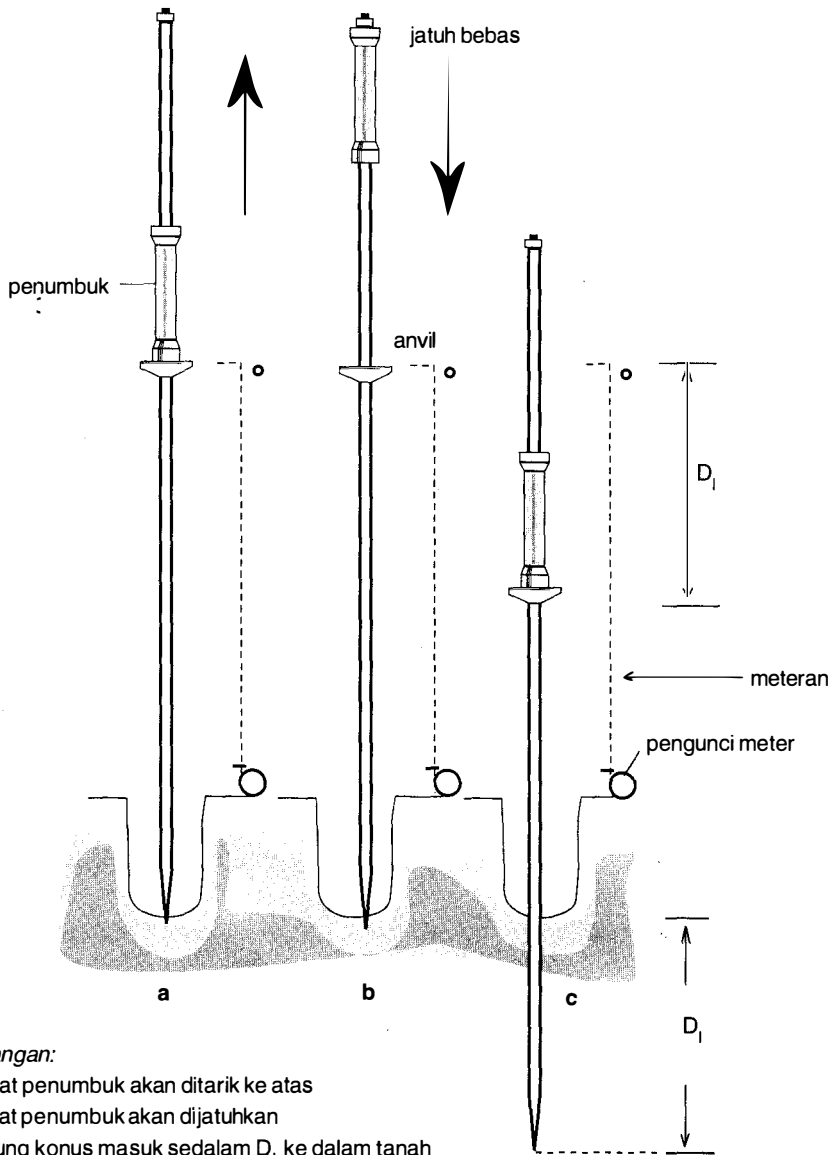
h_n = tebal lapisan tanah ke-n

CBR_n = nilai CBR pada lapisan tanah ke-n

100 = tebal total lapisan tanah yang diamati (cm)



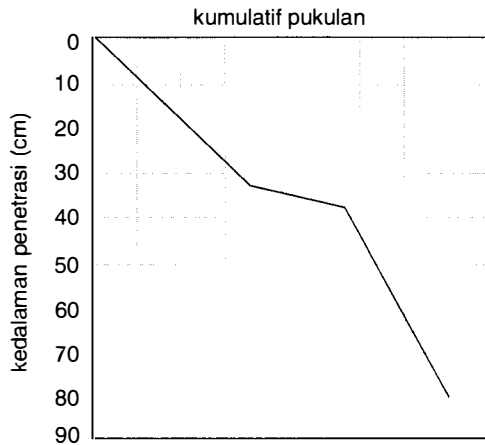
Gb. 5.4. Titik pengamatan pada beberapa lapisan tanah.



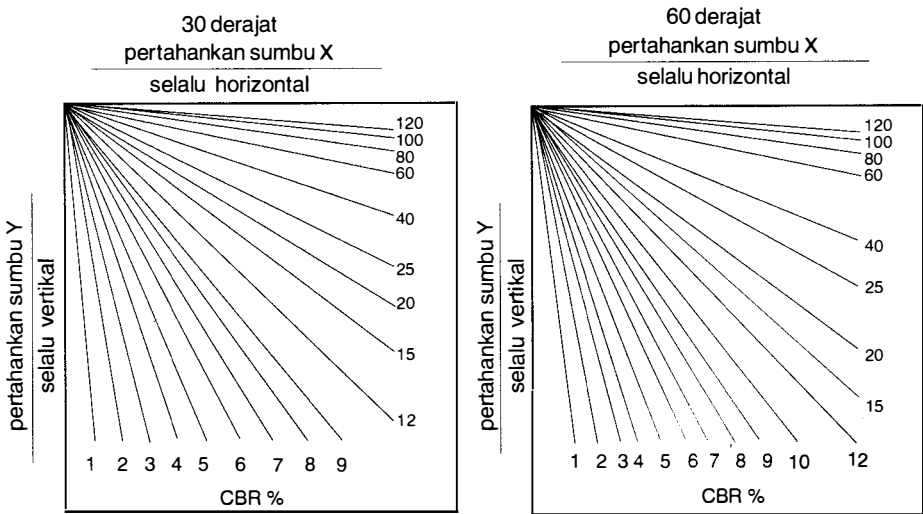
Keterangan:

- saat penumbuk akan ditarik ke atas
- saat penumbuk akan dijatuhkan
- ujung konus masuk sedalam D_1 ke dalam tanah

Gb. 5.5. Alat DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*)



Gb. 5.6. Grafik hasil pemeriksaan alat DCP



Gb. 5.7. Grafik korelasi antara DCP dan CBR lapangan

5. C.B.R. segmen jalan

Setiap segmen mempunyai nilai CBR yang mewakili daya dukung tanah dasar dan digunakan untuk perencanaan tebal lapisan perkerasan segmen tersebut.

Nilai CBR segmen dapat ditentukan dengan mempergunakan cara analitis atau grafis.

a. Cara analitis (*Japan Road Association*).

$$CBR_{\text{segmen}} = CBR_{\text{rata-rata}} - \frac{(CBR_{\text{maks.}} - CBR_{\text{min.}})}{R} \dots\dots\dots (5.10.)$$

Dalam hal ini:

Nilai R tergantung jumlah data yang terdapat dalam satu segmen. (Lihat tabel 5.3.)

Tabel 5.3. Nilai-nilai R untuk CBR segmen.

Jumlah titik pengamatan	Nilai R
2	1,41
3	1,91
4	2,24
5	2,48
6	2,67
7	2,83
8	2,96
9	3,08
> 10	3,18

b. Cara grafis (*Ditjen Bina Marga*).

Langkah-langkah pengerjaannya sebagai berikut:

- i. Tentukan nilai CBR yang terendah.
- ii. Tentukan beberapa banyak nilai CBR yang sama atau lebih besar dari masing-masing nilai CBR dan kemudian disusun secara tabelaris mulai dari nilai CBR terkecil sampai yang terbesar.
- iii. angka terbanyak diberi nilai 100%, angka yang lain merupakan persentase dari 100%.
- iv. Buat kurva hubungan antara harga CBR dan persentase jumlah tadi.
- v. Nilai CBR segmen adalah nilai pada keadaan 90%.

Contoh-contoh soal:

- Dari hasil pemeriksaan daya dukung tanah dasar sepanjang jalan tertentu, diperoleh nilai-nilai CBR sebagai berikut:
4, 2, 3, 4, 4, 6, 8, 4, 5, 6, 5, 7, 8, 6, 7, 9 dan 5%.
Tentukan nilai CBR segmen jalan tersebut dengan cara analitis dan grafis.

Perhitungan:

Memperhatikan nilai CBR yang diperoleh, sebaiknya ruas jalan tersebut dibagi menjadi dua segmen.

Segmen pertama dengan nilai CBR : 4,2,3,4,4,6,8 dan 4%

Segmen kedua dengan nilai CBR : 5,6,7,8,6,7,9 dan 5%.

a. *Cara analitis:*

$$CBR_{rata-2} = \frac{4 + 2 + 3 + 4 + 4 + 6 + 8 + 4}{8} \% = 4,375\%$$

$$CBR_{min.} = 2\%$$

Jumlah titik : n = 8

$$CBR_{maks.} = 8\%$$

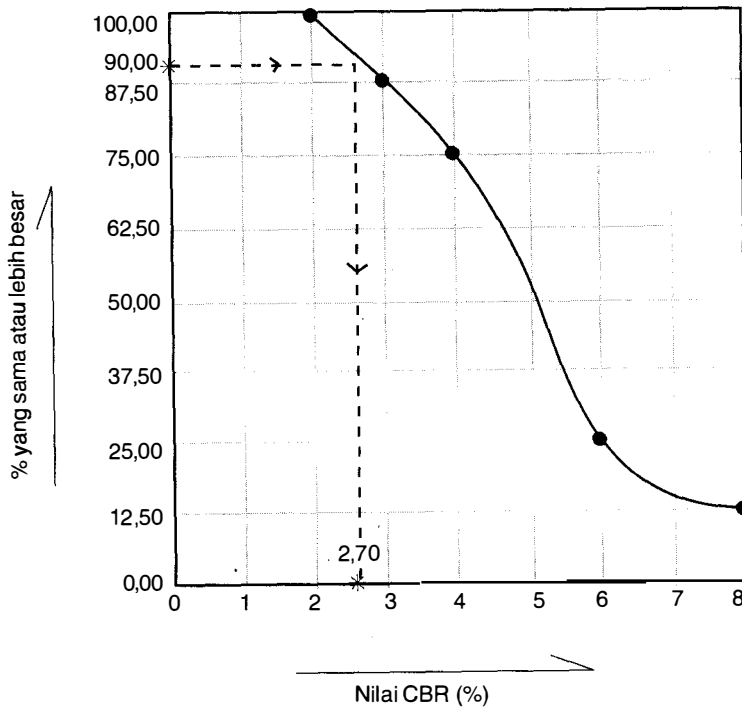
Lihat tabel. 5.3. R = 2,96

$$CBR_{segmen} = CBR_{rata-2} - \left(\frac{CBR_{maks.} - CBR_{min.}}{R} \right)$$

$$CBR_{segmen} = 4,375\% - \left(\frac{8\% - 2\%}{2,96} \right) = 2,348\%$$

b. *Cara grafis:*

Nilai CBR	Jumlah yang sama atau lebih besar	Persen yang sama atau lebih besar
2	8	8/8 x 100% = 100,00%
3	7	7/8 x 100% = 87,50%
4	6	6/8 x 100% = 75,00%
4	•	•
4	•	•
4	•	•
6	2	2/8 x 100% = 25,00%
8	1	1/8 x 100% = 12,50%



Gb. 5.8. Menentukan CBR segmen cara grafis.

Dari gambar 5.8. diperoleh nilai CBR segmen = 2,70%

Jadi nilai CBR segmen = 2,70%

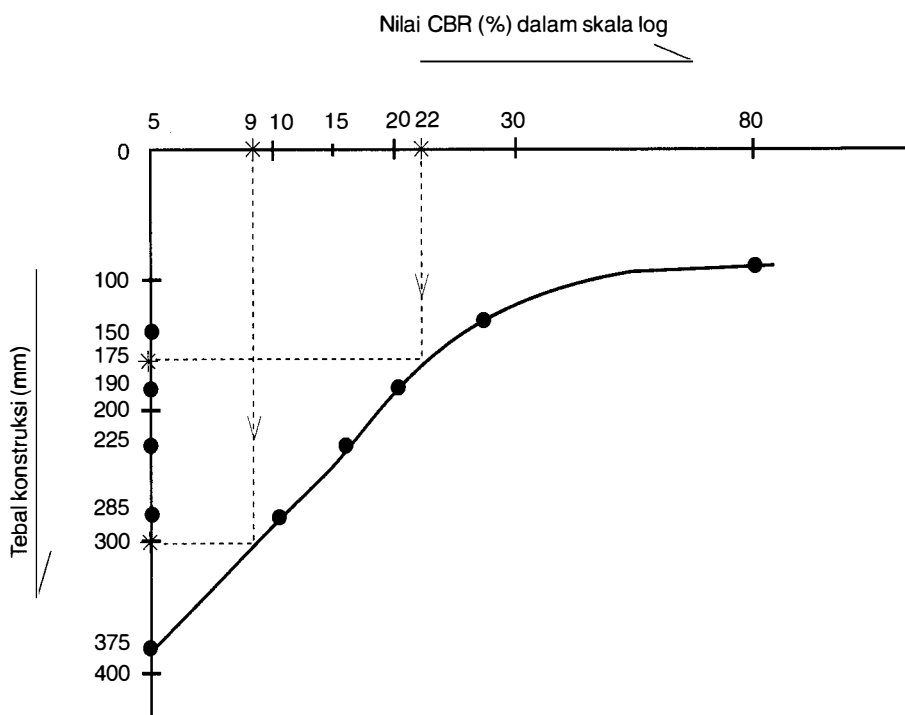
Analog untuk segmen kedua.

2. Tentukan masing-masing tebal lapisan perkerasan suatu jalan raya dengan pekerjaan lentur (*flexible pavement*) dan gambar sketsanya jika diketahui data-data sebagai berikut.

Lapisan:	Jenis tanah:	Nilai CBR (%):
Tanah dasar (<i>sub grade</i>)	Lempung berpasir (<i>sandy clay</i>)	9
Lapis fondasi bawah (<i>sub base</i>)	Pasir (<i>sand</i>)	22
Lapis fondasi atas (<i>base</i>)	Kerikil bergradasi baik (<i>well graded gravel</i>)	80

Tebal lapisan konstruksi (mm)	Nilai CBR (%)
375	5
285	10
225	15
190	20
150	30
100	80

Perhitungan:



Gb. 5.9. Kurva CBR untuk menentukan tebal konstruksi.

Dari hasil penggambaran pada kertas kurva gambar 5.9. diperoleh hasil-hasil sebagai berikut:

C.B.R. subgrade = 9%

Tebal total konstruksi perkererasan di atas subgrade = 300 mm

C.B.R. sub base = 22%

Tebal konstruksi di atas sub base = 175 mm.

C.B.R. base = 80%

Tebal konstruksi di atas base = 100 mm.

(Tebal permukaan/surface)

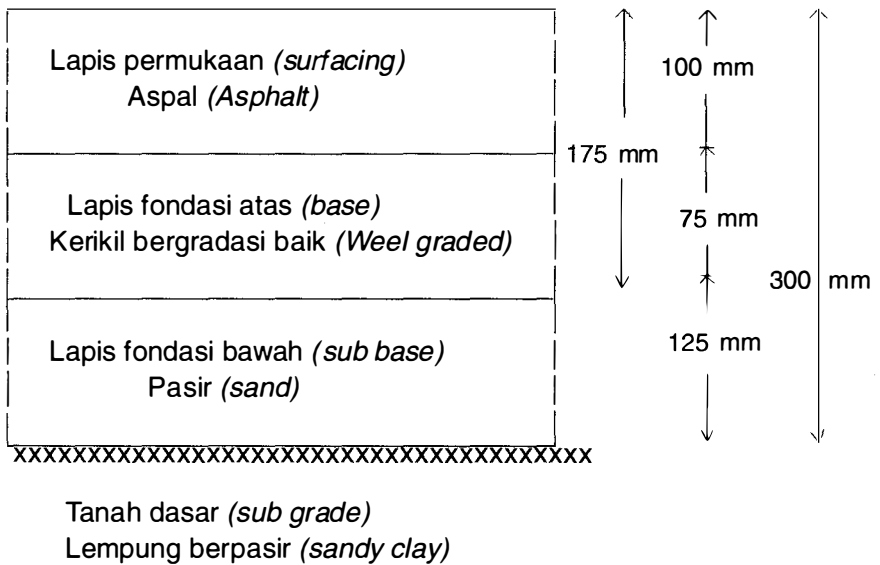
Tebal di atas sub base = tebal base + tebal permukaan

$$175 = \text{tebal base} + 100$$

Tebal base = (175 – 100) mm = 75 mm

Tebal sub base = tebal total – tebal di atas sub base

Tebal sub base = (300 – 175) mm = 125 mm.



Gb. 5.10. Penampang susunan tebal lapis perkerasan.

Soal-soal latihan:

1. Dalam suatu percobaan CBR. diperoleh data-data sbb.:

Penetrasi (mm)	Beban (kg)	Penetrasi (mm)	Beban (kg)
0,00	0,00	3,00	48,50
0,90	5,00	4,00	67,50
1,00	16,20	5,00	75,20
1,50	28,10	7,50	89,00
2,00	40,00	10,00	99,50
2,50	48,50	12,50	106,50

Jika : $P_{S2,50} = 1.370$ kg dan $P_{S5,00} = 2.055$ kg.

Diminta untuk menentukan nilai CBR. setelah dikoreksi.

2. Pertanyaan sama dengan soal No. 1, dengan data-data sebagai berikut:

Penetrasi (mm)	Beban (kg)	Penetrasi (mm)	Beban (kg)
0,00	0,00	3,00	58,00
0,50	4,00	4,00	70,00
1,00	14,00	5,00	77,50
1,50	30,00	7,50	93,20
2,00	41,00	10,00	102,50
2,50	50,00	12,50	110,80

3. Hitung secara analitis dan grafis data-data CBR_{segmen} berikut ini: 4,7,9,6,3,4,7,2,8,8,8,3,3,5,4,4, dan 6%.

Bab VI

Hidrolika Tanah

6.1. AIR TANAH

Air tanah (*groundwater*) merupakan sumber mineral terpenting yang dapat diambil dari bawah permukaan bumi. Sekitar 30% konsumsi air harian di dunia ini diperoleh dari air tanah, sisanya diperoleh dari air permukaan di sungai atau danau.

Insinyur geoteknik berkepentingan dengan air tanah, apabila hendak menyelesaikan persoalan-persoalan tentang: pengadaan air, drainase, galian, fondasi dan pengontrolan gerakan bumi. Oleh karena banyak proyek teknik yang mempunyai air tanah sebagai parameter yang penting, insinyur tadi harus mempunyai cukup pengertian mengenai adanya air tanah ini dan gerakannya.

Sumber air tanah yang terpenting ialah air hujan (*meteoric water*). Air terisap ke atmosfer lewat penguapan (evaporasi) dan didistribusikan secara meluas oleh hembusan angin.

Pengembangan mengembalikan air ini ke bumi sebagai hujan, salju, salju bawah (*sleet*), hujan es (*hail*), embun beku (*frost*) dan embun.

Bagian yang jatuh ke permukaan bumi terbagi-bagi lagi sebagai berikut:

1. Sekitar 70% dievaporasikan kembali ke atmosfer.
2. Sebagian mengalir ke sungai-sungai dan kemudian menuju ke danau dan lautan.
3. Sebagian dipakai untuk kehidupan tumbuh-tumbuhan dan hewan.
4. Sebagian merembes ke dalam tanah menjadi air tanah.

Akuifer

Bahan yang tembus air di mana air tanah mengalir disebut *lapisan pengandung air* atau *akuifer* (aquifer). Pasir atau pasir berkerikil merupakan lapisan yang sangat baik sebagai bahan untuk akuifer, oleh karena porositasnya yang besar dan permeabilitasnya. Tabel 6.1. menunjukkan nilai-nilai porositas (n) untuk beberapa tanah/batuan.

Perlu dicatat bahwa bahan dengan porositas yang tinggi belum tentu merupakan akuifer yang baik.

Tabel 6.1. Porositas beberapa jenis tanah/batuan (Leggett, 1962).

Jenis tanah/batuan	Porositas (n)
Tanah dan geluh (<i>loam</i>)	60
Kapur (<i>chalk</i>)	50
Pasir dan kerikil	25 – 35
Batu pasir	10 – 15
Batu gamping olitik (<i>oolitic</i>)	10
Batu gamping dan marmer	5
Batu tulis (<i>slate</i>) dan serpih	4
Granit	1,50
Batuan kristalin, umum	0,50

Batu gamping yang telah cukup mengalami pelapukan dan mempunyai lubang-lubang isap yang cukup banyak dapat merupakan sumber air tanah yang memuaskan. Kapur juga merupakan sumber yang baik, ia merupakan sumber air artesis yang pertama di Perancis dan menyediakan air untuk pemakaian domestik di bagian selatan Inggris Raya.

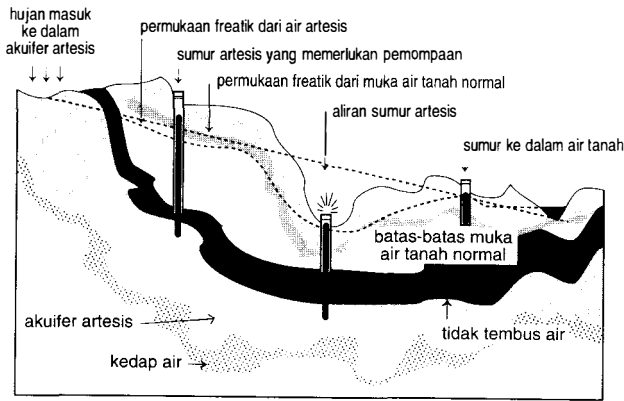
Pada umumnya batuan beku, metamorfik dan batuan endapan/sedimen yang lain merupakan akuifer yang buruk, kecuali kalau ia retak dan berongga yang cukup besar sehingga dapat menyediakan tempat penampungan air dan saluran.

Air artesis

Air artesis didapatkan dari akuifer yang berada dalam tekanan hidrostatik. Kondisi yang diperlukan untuk menghasilkan air artesis adalah sebagai berikut:

1. Air harus terdapat pada lapis yang tembus air yang sedemikian miringnya, sehingga satu ujung dapat menarik air dari permukaan tanah.
2. Akuifer ditutupi oleh lapis lempung yang tidak tembus air, serpih atau batuan padat lainnya.
3. Air tidak dapat keluar dari akuifer baik dari samping maupun dari ujung bawah.
4. Terdapat cukup tekanan dalam air yang terkekang tadi untuk mempertinggi muka air bebas di atas akuifer apabila disedot melalui sumur.

Untuk lebih jelasnya lihat gambar 6.1.



Gb. 6.1. Kondisi air artesis.

Tiga puluh sampai seratus tahun yang lalu banyak sekali terdapat sumur artesis di mana air melimpahi sumur pada permukaan tanah. Pada saat ini oleh karena pemakaian yang berlebihan atau ketidak acuhan terhadap sumber air itu dan/atau membiarkan limpahan air mengalir terus-menerus dari sumur-sumur tadi, maka sebagian besar akuifer tidak lagi berada dalam keadaan tertekan atau tekanannya sudah sedemikian rendahnya sehingga harus dipergunakan pompa untuk mendapatkan air itu. Ini merupakan kehilangan yang tak dapat diganti lagi dari suatu sumber. Oleh karena pengisian kembali akuifer-akuifer itu diperkirakan akan memakan waktu dari 150 sampai 1.000 tahun.

Erosi air tanah

Air tanah merupakan bahan pembuat erosi yang efektif, karena mengandung asam karbonat yang terdapat di dalam air hujan yang menghancurkan batuan karbonat seperti batu gamping, dolimit, marmer, garam batuan dan gipsum. Batu gamping yang sangat banyak terdapat biasanya mengalami erosi di bawah permukaan tanah.

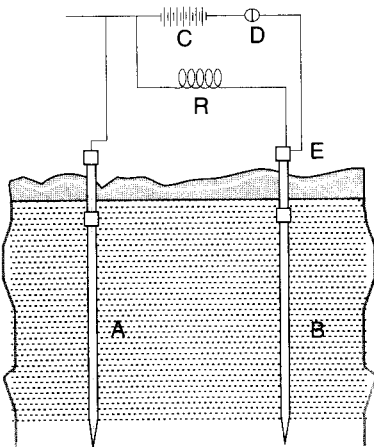
Apabila air masuk melalui retakan-retakan di dalam batuan, aksi kimiawi dan alami air akan memperbesar retak-retak itu. Batuan itu akan terisolir dalam blok-blok dan membentuk pula lubang drainase di mana air dialirkan. Gua gamping yang besar terbentuk dalam proses ini. Apabila lubang ini hanya terdapat setempat, permukaan tanah mungkin akan runtuh ke dalam,

sehingga terbentuklah lubang tanah (*sink*). Apabila jalan keluar tertutup, dapat terbentuk danau kecil dan kemudian terisi endapan. Daerah yang banyak mempunyai lubang tanah ini disebut daerah *krast*, yang diambil dari nama suatu daerah di Italia dan Yugoslavia yang mempunyai karakteristik di atas. Daerah *krast* harus sangat diperhatikan oleh karena penempatan fondasi pada suatu lubang tanah yang potensial atau pada lubang tanah yang terisi dengan endapan dapat menyebabkan suatu malapetaka. Lubangnya dengan kedalaman dari 3 sampai 6 meter, dapat tidak terkait dalam program eksplorasi tanah kecuali insinyur yang menangani proyek tersebut menyadari bahwa di areal proyek banyak terdapat lubang-lubang tadi.

Pengukuran kecepatan air tanah

Pengukuran kecepatan air tanah dapat diukur dengan ampere meter (ammeter) ciptaan Slichter yang kemudian terkenal dengan metoda Slichter. Jika battery B dihubungkan dengan rangkaian tersebut, maka pada ampere meter A akan dapat dibaca/diukur kecepatan air tanah yang mengalir dari C ke D.

Jadi prinsip kerjanya sama dengan listrik atau aliran air, yaitu arus mengalir dari tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah atau air mengalir dari tempat/permukaan yang lebih tinggi ke permukaan yang lebih rendah.



Keterangan:

- A = ampere meter.
- B = battery
- R = tahanan.
- E = titik yang dihubungkan dengan sumur yang rendah.
- C = pipa pada sumur yang tinggi yang berlaku sebagai elektroda.
- D = pipa pada sumur yang rendah juga berlaku sebagai elektroda.

Gb. 6.2. Ampere meter Slichter.

Kecepatan air yang merembes melalui tanah dalam waktu tertentu dapat dihitung berdasarkan hukum Darcy:

$$V = k \cdot i \dots\dots\dots (6.1.)$$

Banyaknya air yang merembes

$$Q = V \cdot A$$

$$Q = k \cdot i \cdot A \dots\dots\dots (6.2.)$$

Dalam hal ini:

- V = Kecepatan air yang merembes (m/det.)
- Q = banyaknya air yang merembes (m³/det.)
- k = koefisien rembesan (m/det.)
- i = Gradien hidrolik (tidak berdimensi)
- A = luas penampang tanah (m²).

Hazen memberikan rumusan sebagai berikut:

$$V = k \cdot e^2 \cdot i \left(\frac{t+10}{60} \right) \dots\dots\dots (6.3.)$$

$$Q = A \cdot V.$$

$$Q = A \cdot k \cdot e^2 \cdot i \cdot \left(\frac{t+10}{60} \right) \dots\dots\dots (6.4.)$$

Dalam hal ini:

- Q = banyaknya air yang merembes tiap satuan waktu.
- A = luas penampang tanah yang dirembesi air.
- i = gradien hidrolik.
- k = koefisien rembesan.
- e = ukuran efektif pasir menurut Hazen.
- t = suhu dalam derajat Fahrenheit.

Tabel 6.2. Kecepatan aliran air di dalam pasir pada berbagai variasi ukuran efektif butiran dan aliran maksimum. (Porositas 32%, suhu 50°F).

Diameter butir tanah (mm)	Kecepatan dalam feet/hari untuk gradien hidrolis		Jenis tanah
	1 : 1	100 ft/hari	
0,01	0,163	0,0038	Lumpur
0,04	2,620	0,0605	
0,05	4,080	0,0922	
0,09	13,200	0,2980	Pasir sangat halus
0,10	16,300	0,3690	
0,20	65,400	2,0900	Pasir halus
0,25	102,000	2,3100	
0,45	331,000	7,4700	Pasir sedang
0,50	408,000	9,2100	
0,95	1.470,000	33,2000	Pasir kasar
1,00	1.630,000	36,8000	
5,00	40800,000	921.0000	Kerikil halus

Tabel 6.3. Kecepatan aliran air tanah menurut Hazen (feet/hari), ukuran efektif pasir (mm)

Porositas	Sangat halus	Halus	Sedang	Kasar	Sangat kasar		Kerikil halus					Dikalikan dengan tabel berikut ini Tabel 6.4.
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00	1,50	2,00	3,00	
0,25	23,601	94,30	212	378	590	850	1.510	2.360	5.310	9.430	21.200	0,72
0,27	32,80	131	295	525	820	1.181	2.100	3.281	7.380	13.100	29.500	1,00
0,30	46,60	186	419	745	1.160	1.680	2.980	4.660	10.500	18.600	41.900	1,42
0,35	77,40	309	696	1.240	1.935	2.790	4.960	7.740	17.400	30.900	69.600	2,36
0,40	128	486	1.092	1.950	3.040	4.380	7.780	12.200	27.400	48.600	109.200	3,71

Tabel 6.4. Kecepatan aliran air tanah (gradien hidrolik 1 : 1 ; suhu T = 50°F dan porositas = 32% untuk rumus Slichter).

Ukuran efektif pasir (mm)	Slichter		Hazen	
	Inci/menit	Feet/hari	Meter/hari	Fett/hari
0,01	0,0014	0,16	0,10	0,328
0,02	0,0054	0,65	0,40	1,312
0,03	0,0122	1,46	0,90	2,953
0,04	0,0218	2,62	1,60	5,250
0,05	0,0330	4,08	2,50	8,200
0,06	0,0490	5,88	3,60	11,800
0,07	0,0667	8,00	4,90	16,100
0,08	0,0871	10,50	6,40	21,000
0,09	0,1103	13,20	8,10	26,600
<u>0,10</u>	0,1361	166,30	10,00	<u>32,808</u>
0,12	0,1961	23,50	14,40	47,200
0,14	0,2668	32,00	19,60	64,300
0,15	0,3063	36,80	22,50	73,800
0,16	0,3485	41,80	25,60	84,000
0,18	0,4412	52,90	32,40	106,000
<u>0,20</u>	0,5446	65,40	40,00	<u>131,000</u>
0,25	0,8509	102,00	62,50	205,000
<u>0,30</u>	1,2250	147,00	90,00	<u>295,000</u>
0,35	1,6700	200,00	122,50	402,000
<u>0,40</u>	2,1800	261,00	160,00	<u>525,000</u>
0,45	2,7600	331,00	202,50	665,000
<u>0,50</u>	3,4000	408,00	250,00	<u>820,000</u>
0,55	4,1200	507,00	302,50	992,000
<u>0,60</u>	4,9000	588,00	360,00	<u>1.181,000</u>
0,65	5,7500	690,00	422,50	1.385,000
0,70	6,6700	800,00	490,00	1.608,00
0,75	7,6600	919,00	562,50	1.845,000
<u>0,80</u>	8,7100	1.046,00	640,00	<u>2.100,000</u>

Lanjutan Tabel 6.4.

0,85	9,8400	1.180,00	722,50	2.370,000
0,90	11,000	1.324,00	810,00	2.660,000
0,95	12,300	1.470,00	902,50	2.960,000
<u>1,00</u>	13,600	1.630,00	1.000,00	<u>3.281,000</u>
<u>2,00</u>	54,500	6.535,00	4.000,00	<u>13.124,000</u>
<u>3,00</u>	122,00	14.700,00	9.000,00	<u>29.527,000</u>
4,00	218,00	26.136,00		
5,00	340,00	40.800,00		

Angka-angka yang diberi garis bawah berhubungan dengan tabel 6.3.

6.2. AIR KAPILER

Air kapiler adalah air tanah yang terletak di dalam celah dan ruang pori kapiler tanah. Air kapiler didesak dari celah-celah tanah karena daya kapiler. Aksi kapiler atau kapilaritas adalah suatu fenomena gerakan air di dalam celah-celah tanah karena daya kapiler. Pori-pori tanah yang sangat kecil membentuk tabung-tabung kapiler melalui air tanah naik ke atas permukaan air tanah. Daya kapiler tergantung dari berbagai macam faktor seperti: tegangan permukaan air, tekanan air yang berhubungan dengan tekanan atmosfer dan ukuran butir serta pori-pori tanah.

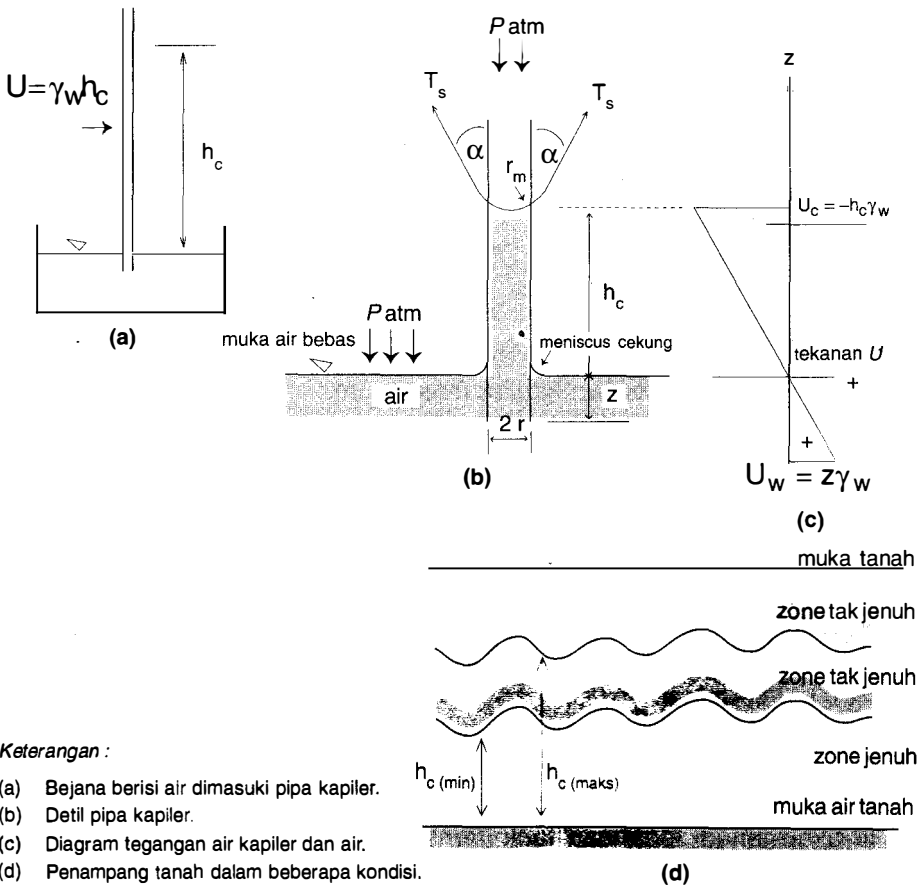
Tegangan permukaan

Tegangan permukaan air adalah sifat yang ada dipermukaan selaput air yang cenderung menahan penguncupan isi ke dalam bentuk yang memungkinkannya mempunyai luas minimum yang tidak dalam/dangkal. Tegangan permukaan = T_s (surface tension) kadang-kadang disebut sebagai koefisien tegangan permukaan kurang lebih = 76 dyne/cm. atau 0,0076 gr/cm. pada suhu 15°C. Koefisien tersebut tergantung dari sifat-sifat kimiawi cairan. Tegangan permukaan untuk zat cair yang lain pada umumnya seperti: aseton, benzene, bensin dan lain-lain pada suhu kamar 20°C kurang lebih 0,03 gr/cm. Jadi tegangan permukaan air dua kali lebih besar dari tegangan permukaan zat cair lainnya pada umumnya. Tegangan permukaan air raksa = 0,52 gr/cm.

Kenaikan kapiler

Celah-celah pori tanah dapat dipandang sebagai rangkaian tabung-tabung kapiler, memanjang tegak di atas permukaan air. Kenaikan air dalam tabung-tabung kapiler atau pori-pori halus tanah karena adanya tegangan permukaan yang menarik air ke atas terhadap gaya gravitasi. Tinggi kenaikan kapiler di atas permukaan air tanah (air bebas) tergantung dari diameter tabung/pipa kapiler dan harga tegangan permukaan.

Gambar 6.3. menunjukkan tabung kapiler dan penampang tanah sehubungan dengan air kapiler.



Keterangan :

- (a) Bejana berisi air dimasuki pipa kapiler.
- (b) Detil pipa kapiler.
- (c) Diagram tegangan air kapiler dan air.
- (d) Penampang tanah dalam beberapa kondisi.

Gb. 6.3. Kondisi air kapiler.

Jika diameter bagian dalam tabung = d , tinggi kenaikan air kapiler = h_c , komponen gaya vertikal tegangan permukaan yang tergantung dari sudut $\alpha = T_s \cos \alpha$.

Dalam keadaan air kapiler berhenti bergerak, maka berat air dalam kolom tabung:

$$W_w = 0,25\pi d^2 \times h_c \times \gamma_w \dots\dots\dots (i)$$

Jumlah gaya vertikal karena tegangan permukaan:

$$F_{T_s} = \pi d \times T_s \cos \alpha \dots\dots\dots (ii)$$

Dalam keadaan setimbang: Pers. (i) = Pers. (ii)

$$0,25\pi d^2 \times h_c \times \gamma_w = d \times T_s \cos \alpha$$

$$h_c = \frac{4 T_s \cos \alpha}{\gamma_w d} \dots\dots\dots (6.5.)$$

Jika sudut $\alpha = 0$, maka:

$$(h_c)_{maks.} = \frac{4 T_s}{\gamma_w d} \dots\dots\dots (6.6.)$$

Dalam hal ini:

$(h_c)_{maks.}$ = tinggi kenaikan kapiler maksimum.

T_s = tegangan permukaan.

d = diameter tabung.

γ_w = berat isi air.

α = sudut antara sisi tabung dengan tegangan permukaan.

Untuk air dalam kondisi rata-rata: $T_s = 0,076$ gram/cm. dan berat isi air : $\gamma_w = 1$ gram/cm³ serta d dalam satuan cm. maka:

$$(h_c)_{maks.} = \frac{4 \times 0,076}{1 \times d} = \frac{0,304}{d} \text{ cm} \dots\dots\dots (6.7.)$$

Tekanan kapiler

Hal ini terjadi di atas permukaan air tanah atau air bebas di dalam tabung, yaitu akan terjadi tegangan tarik (*tension*) dan di bawah permukaan air tanah atau air bebas akan terjadi tegangan tekan (*compression*). Lihat diagram distribusi tegangan. (Gambar 6.3. (c)).

Pada tinggi sebarang di atas permukaan air = h, maka tegangan/tekanan air yang terjadi : $u = -h \cdot \gamma_w$ (tanda – menandakan tarikan). Tekanan maksimum: $u_{maks.}$ tergantung jari-jari meniscus = r_m . Hubungan antara diameter $d = 2r$ dengan r_m ialah:

$$r = 0,5 d = r_m \cos \alpha$$

$$d = 2 r_m \cos \alpha \dots\dots\dots (6.8.)$$

Masukkan persamaan (6.8.) ke dalam pers. (6.5.), maka:

$$h_c = \frac{4T_s \cos \alpha}{\gamma_w \cdot 2r_m \cos \alpha} = \frac{2T_s}{\gamma_w \cdot r_m} \dots\dots\dots (6.9.)$$

$$u_c = h_c \cdot \gamma_w = \frac{2T_s}{\gamma_w \cdot r_m} \cdot \gamma_w$$

$$u_c = \frac{2T_s}{r_m} \dots\dots\dots (6.10.)$$

Jika : $\alpha = 0$ dan $r_m = 0,50 d$, maka:

$$(u_c)_{maks.} = \frac{4T_s}{d} \dots\dots\dots (6.11.)$$

Dalam hal ini:

u_c = tekanan kapiler (*capillary tension*)

Harga rata-rata tinggi kenaikan kapiler berbagai macam tanah dapat dilihat pada tabel 6.5.

Tabel 6.5. Tinggi kapiler berbagai macam tanah.

Jenis tanah	Fraksi (mm)	Tinggi kapiler h_c (cm)
Kerikil halus	2,000 sampai 1,000	2 sampai 10
Pasir kasar	1,000 sampai 0,500	10 sampai 15
Pasir sedang	0,500 sampai 0,250	15 sampai 30
Pasir halus	0,250 sampai 0,050	30 sampai 100
Lanau/lumpur	0,050 sampai 0,005	100 sampai 1.000
Lempung	0,005 sampai 0,0005	1.000 sampai 3.000
Koloida	lebih kecil 0,0005	lebih besar 3.000

Contoh-contoh soal:

1. Hitung tekanan kapiler maksimum, jika diameter tabung:
 $d = 0,05 \text{ mm}$.

Perhitungan:

Dari persamaan (6.7.)

$$(h_c)_{\text{maks.}} = \frac{0,304}{d} \rightarrow d = 0,05\text{mm} = 0,005\text{cm}$$

$$(h_c)_{\text{maks.}} = \frac{0,304}{0,005} = 60,80\text{cm}$$

Tekanan kapiler maksimum:

$$(u_c)_{\text{maks.}} = (h_c)_{\text{maks.}} \cdot \gamma_w$$

$$(u_c)_{\text{maks.}} = (60,80) (1) = 60,80 \text{ gr/cm}^2.$$

2. Hitung tinggi kapiler dalam tanah, jika : $D_{10} = 0,10 \text{ mm}$ dan angka pori:
 $e = 0,60$.

Perhitungan:

Jika angka pori : $e = 0,60$, maka isi ruang pori = isi butir = $0,60 D_{10}^3$.

Tetapi isi ruang pori juga = d^3

Jadi:

$$d^3 = 0,60 D_{10}^3$$

$$d = (0,60)^{1/3} D_{10}$$

$$d = 0,843 \times 0,10 = 0,0843 \text{ mm} = 0,00843 \text{ cm}.$$

$$h_c = \frac{0,304}{d} = \frac{0,304}{0,00843} = 36,06 \text{ cm}.$$

Soal-soal latihan:

1. Jika air dengan suhu 20°C ditambahkan ke pasir halus dan lanau, selisih tinggi kapiler antara kedua tanah tersebut = 25 cm . Jika tinggi kapiler pasir halus = 25 cm , hitung selisih ukuran pori-pori kedua tanah tersebut.

2. Berapakah tekanan absolut dalam kg/cm^2 air di bawah bidang meniscus tabung kapiler dengan diameter = 0,05 mm, jika diketahui sudut $\alpha = 10^\circ$ dan tekanan atmosfer = $1,02 \text{ kg/cm}^2$.
3. Tinggi kapiler tanah A dengan $D_{10} = 0,06 \text{ mm}$ adalah 60 cm. Tentukan tinggi kapiler tanah B dengan $D_{10} = 0,10 \text{ mm}$, anggap angka pori kedua tanah tersebut sama.

6.3. KONDISI-KONDISI TEKANAN DALAM TANAH

Tekanan efektif dan tekan netral/tekanan pori.

Yang dimaksud dengan tekanan total pada suatu bidang permukaan tanah adalah beban per satuan luas.

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (6.12.)$$

Dalam hal ini:

- σ = tekanan total
- P = beban total
- A = luas penampang permukaan tanah.

Tekanan tersebut mungkin karena:

- i. Berat sendiri tanah (berat jenuh, jika tanahnya jenuh)
- ii. Beban luar di atas tanah.

Tekanan total terdiri dari dua komponen yang berbeda:

- i. Tekanan efektif antar butir-butir tanah.
- ii. Tekanan netral/pori.

Jadi tekanan total dapat ditulis dengan persamaan:

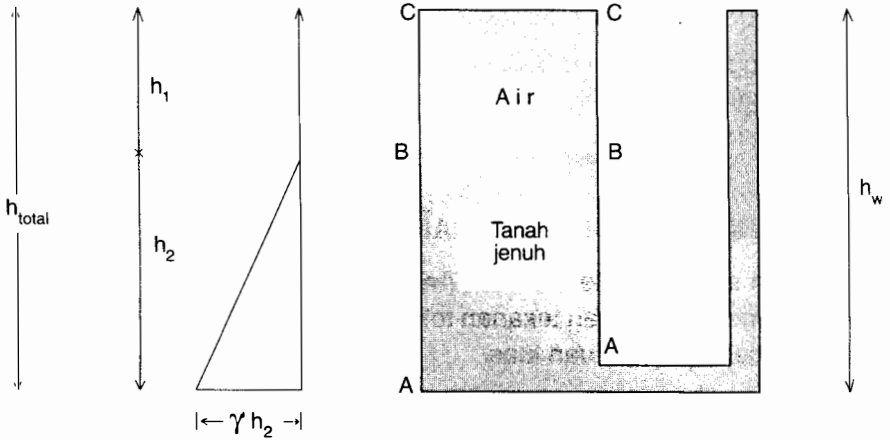
$$\sigma = \sigma_{ef.} + u \dots\dots\dots (6.13.)$$

$$\sigma_{ef.} = \sigma - u \dots\dots\dots (6.14.)$$

$$u = h_w \cdot \gamma_w \dots\dots\dots (6.15.)$$

Untuk mendapatkan nilai tekanan efektif, kita akan menganggap berbeda-beda kondisi air tanah.

1. Massa tanah basah/terendam



(a) Diagram distribusi tekanan efektif (b) Kondisi tanah basah dan pipa kapiler

Gb. 6.4. Penampang tanah yang terendam.

Kita tinjau masing-masing bidang batas:

Tekanan total pada bidang A – A.

$$\sigma = h_2 \cdot \gamma_{\text{sat.}} + h_1 \cdot \gamma_w \dots\dots\dots (i)$$

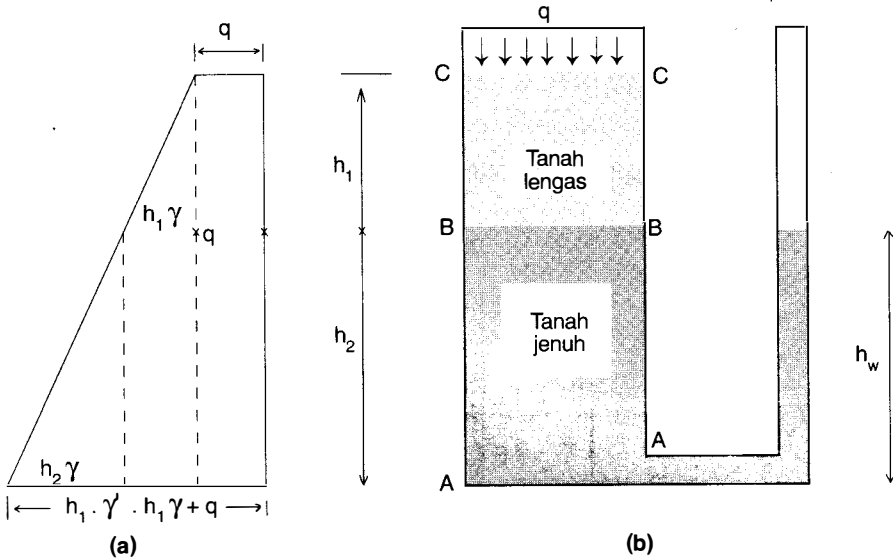
Tekanan pori:

$$u = h_w \cdot \gamma_w \dots\dots\dots (ii)$$

Tekanan efektif:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ef.}} &= \sigma - u \\ \sigma_{\text{ef.}} &= h_2 \cdot \gamma_{\text{sat.}} + h_1 \cdot \gamma_w - h_w \cdot \gamma_w \\ \sigma_{\text{ef.}} &= h_2 \cdot \gamma_{\text{sat.}} + h_1 \cdot \gamma_w - (h_1 + h_2) \gamma_w \\ \sigma_{\text{ef.}} &= h_2 (\gamma_{\text{sat.}} - \gamma_w) \\ \sigma_{\text{ef.}} &= h_2 \gamma' \dots\dots\dots (6.17.) \end{aligned}$$

2. Tanah lengas/lembab dan jenuh dengan beban merata



Gb. 6.5. Penampang tanah lengas dan jenuh.

Tekanan total pada bidang A – A.

$$\sigma = q + h_1 \cdot \gamma + h_2 \cdot \gamma_{sat}$$

$$u = h_w \cdot \gamma_w = h_2 \cdot \gamma_w$$

Tekanan efektif:

$$\sigma_{ef.} = \sigma - u$$

$$\sigma_{ef.} = q + h_1 \cdot \gamma + h_2 \cdot \gamma_{sat} - h_2 \cdot \gamma_w$$

$$\sigma_{ef.} = q + h_1 \cdot \gamma + h_2 (\gamma_{sat} - \gamma_w)$$

$$\sigma_{ef.} = q + h_1 \cdot \gamma + h_2 \cdot \gamma' \dots\dots\dots (6.18.)$$

Pada bidang B – B.

$$\sigma = 1 + h_1 \cdot \gamma$$

$$u = h_w \cdot \gamma_w = 0$$

Tekanan efektif:

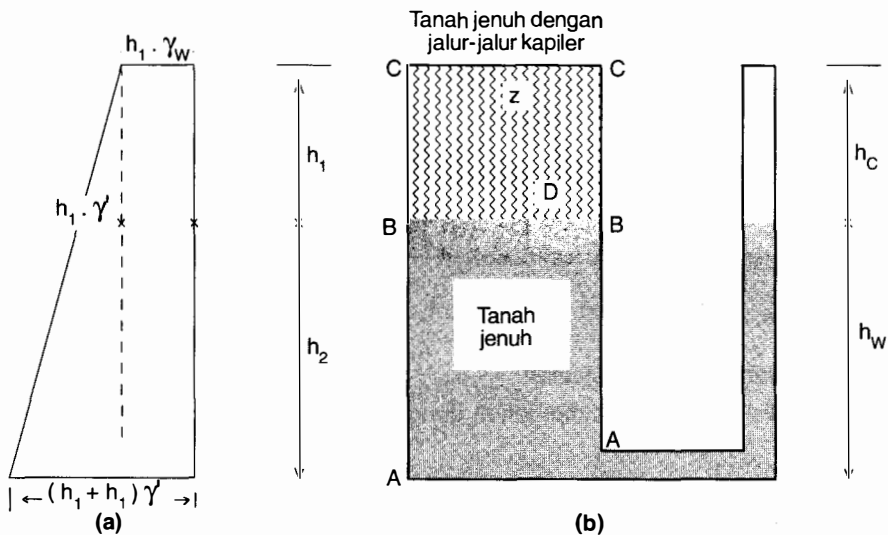
$$\sigma_{ef.} = \sigma - u$$

$$\sigma_{ef.} = \sigma = q + h_1 \cdot \gamma \dots\dots\dots (6.19.)$$

Pada bidang C – C

$$\sigma_{ef.} = \sigma = q \dots\dots\dots (6.20.)$$

3. Tanah jenuh dengan jalur-jalur kapiler



$$(h_1 + h_2) \gamma' + h_1 \cdot \gamma_w =$$

$$h_1 \cdot \gamma_{sat} + h_2 \cdot \gamma'$$

- (a) Diagram distribusi tekanan.
- (b) Kondisi tanah jenuh dengan jalur-jalur kapiler

Gb. 6.6. Penampang tanah jenuh dengan jalur-jalur kapiler.

Tanah setinggi h_1 jenuh oleh air kapiler.

Tekanan total pada bidang A – A.

$$\sigma = h_1 \cdot \gamma_{sat.} + h_2 \cdot \gamma_{sat.}$$

$$u = h_w \cdot \gamma_w = h_2 \cdot \gamma_w$$

Tekanan efektif:

$$\begin{aligned} \sigma_{ef.} &= \sigma - u \\ \sigma_{ef.} &= h_1 \cdot \gamma_{sat.} + h_2 \cdot \gamma_{sat.} - h_2 \cdot \gamma_w \\ \sigma_{ef.} &= h_1 \cdot \gamma_{sat.} + h_2 (\gamma_{sat.} - \gamma_w) \\ \sigma_{ef.} &= h_1 \cdot \gamma_{sat.} + h_2 \cdot \gamma' \dots\dots\dots (6.21.) \end{aligned}$$

Pada bidang B – B

$$\begin{aligned} \sigma &= h_1 \cdot \gamma_{sat.} \\ u &= h_w \cdot \gamma_w = 0 \\ \sigma_{ef.} &= \sigma - u \\ \sigma_{ef.} &= h_1 \cdot \gamma_{sat.} \dots\dots\dots (6.22.) \end{aligned}$$

Pada bidang C – C.

$$\sigma_{ef.} = h_1 \cdot \gamma_w \dots\dots\dots (6.23.)$$

Tekanan efektif ini juga disebut tekanan kapiler. Pengaruh kapiler se-tinggi h_1 analog dengan beban merata : $q = h_1 \cdot \gamma_w$ yang terletak di atas tanah jenuh.

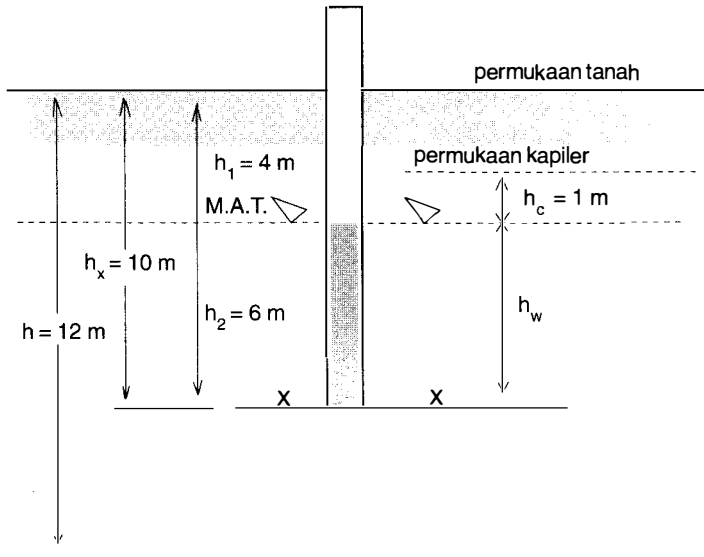
Pada titik D sebarang sedalam z di bawah bidang C – C maka:

$$\begin{aligned} \sigma &= z \cdot \gamma_{sat} \\ u &= -(h_1 - z) \gamma_w \\ \sigma_{ef.} &= \sigma - u \\ \sigma_{ef.} &= z \cdot \gamma_{sat.} + (h_1 - z) \gamma_w \\ \sigma_{ef.} &= z \cdot \gamma_{sat.} + h_1 \cdot \gamma_w - z \cdot \gamma_w \\ \sigma_{ef.} &= z (\gamma_{sat.} - \gamma_w) + h_1 \cdot \gamma_w \\ \sigma_{ef.} &= z \cdot \gamma' + h_1 \cdot \gamma_w \dots\dots\dots (6.24.) \end{aligned}$$

Contoh-contoh soal:

1. Muka air tanah terletak 4 meter di bawah permukaan tanah yang terdiri dari pasir halus sedalam 12 m. dengan angka pori rata-rata = 0,70. Di atas permukaan air pasir ini derajat kejenuhan = 50%. Tentukan besarnya tekan efektif pada kedalaman 10 m. dan berapa pula tekanan efektifnya, apabila tanah tersebut mempunyai tinggi kapiler 1 m. di atas permukaan air tanah. Berat spesifik : $G = 2,65$. Hitung juga kenaikan tekanan efektif karena daya kapiler tersebut.

Penyelesaian:



Gb. 6.7. Penampang tanah pasir halus.

$$h_1 = 4 \text{ m.}$$

$$\text{Tanah jenuh setinggi} = 12 - 4 = 8 \text{ m.}$$

$$h = h_x - h_1 = 10 - 4 = 6 \text{ m.}$$

$$\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + e} = \frac{2,65 \times 1}{1 + 0,70} = 1,56 \text{ gr / cm}^3$$

Untuk tanah pasir di atas muka air tanah:

$$w = \frac{e \cdot S_r}{G} = \frac{0,70 \times 0,50}{2,65} = 0,132$$

$$\gamma_1 = \gamma_d (1 + w) = 1,56 (1 + 0,132) = 1,77 \text{ gr/cm}^3$$

Untuk tanah pasir jenuh di bawah muka air tanah.

$$w_{\text{sat.}} = \frac{e}{G} = \frac{0,70}{2,65} = 0,264$$

$$\gamma_2 = \gamma_d (1 + w_{\text{sat.}}) = 1,56 (1 + 0,264)$$

$$\gamma_2 = 1,97 \text{ gr / cm}^3$$

$$\gamma_2^1 = \gamma_2 - \gamma_w = 1,97 - 1 = 0,97 \text{ gr / cm}^3$$

Tekanan efektif pada bidang x – x:

Cara I:

$$\begin{aligned}\sigma &= h_1 \cdot \gamma_1 + h_2 \cdot \gamma_2 \\ \sigma &= 400 \times 1,77 + 600 \times 1,97 = 1.890 \text{ gr/cm}^2 \\ \sigma &= 1,89 \text{ kg/cm}^2 \\ u &= h_w \cdot \gamma_w = 600 \times 1 = 600 \text{ gr/cm}^2 \\ u &= 0,60 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{\text{ef.}} &= \sigma - u = 1,89 - 0,60 = 1,29 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Cara II:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{ef.}} &= h_1 \cdot \gamma_1 + h_2 \cdot \gamma_2' \\ \sigma_{\text{ef.}} &= 400 \times 1,77 + 600 \times 0,97 = 1.290 \text{ gr/cm}^2 \\ \sigma_{\text{ef.}} &= 1,29 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Tekanan efektif setelah adanya kenaikan air kapiler setinggi: $h_c = 1$ meter.

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{ef.}} &= (h_1 - h_c)\gamma_1 + (h_2 + h_c)\gamma_2' + h_c \cdot \gamma_w \\ \sigma_{\text{ef.}} &= (400 - 100) 1,77 + (600 + 100) 0,97 + 100 \times 1 \\ \sigma_{\text{ef.}} &= 1.310 \text{ gr/cm}^2 = 1,31 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

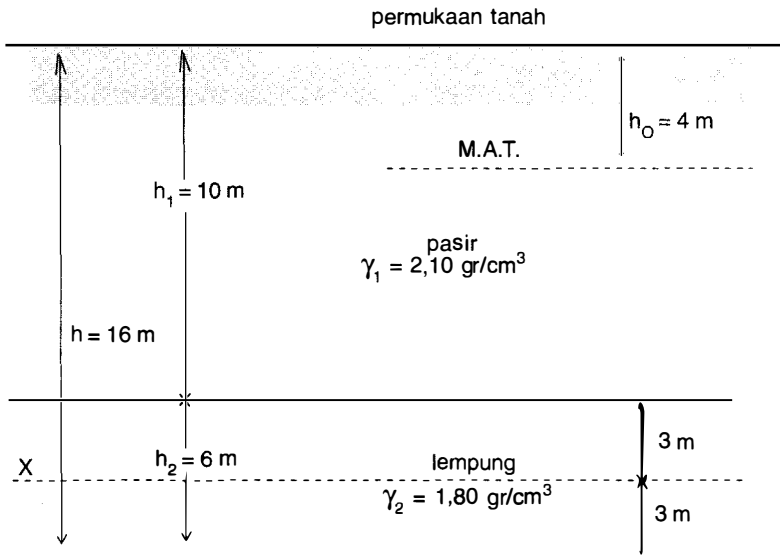
Kenaikan tekanan:

$$\Delta\sigma_{\text{ef.}} = 1,31 - 1,29 = 0,02 \text{ kg/cm}^2$$

2. Suatu endapan tanah terdiri dari lapisan pasir setebal 10 m dan di bawahnya lapisan lempung setebal 6 m. Permukaan air tanah terletak pada permukaan tanah.

Dengan menggunakan pemompaan drainase air tanah diturunkan sedalam 4 m dari permukaan tanah dan derajat kejenuhan menjadi 20%. Tentukan berapa besar kenaikan tekanan efektifnya pada tengah-tengah lapisan tanah lempung, apabila berat isi pasir = $2,10 \text{ gr/cm}^3$ dan berat isi tanah lempung $1,80 \text{ gr/cm}^3$ serta berat isi pasir kering = $1,70 \text{ gr/cm}^3$.

Penyelesaian:



Gb. 6.8. Penampang tanah pasir dan lempung.

Tekanan efektif pada tengah-tengah tanah lempung sebelum air tanah diturunkan.

$$\begin{aligned}\sigma &= h_1 \cdot \gamma_1 + 0,50 h_2 \cdot \gamma_2 \\ \sigma &= 1.000 \times 2,10 + 0,50 \times 600 \times 1,80 = 2.640 \text{ gr/cm}^2 \\ u &= (h_1 + 0,50 h_2) \gamma_w \\ &= (1.000 + 0,50 \times 600) (1) = 1.300 \text{ gr/cm}^2 \\ \sigma_{\text{ef.}} &= \sigma - u \\ \sigma_{\text{ef.}} &= 2.640 - 1.300 = 1.340 \text{ gr/cm}^2 = 1,34 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Tekanan efektif pada tengah-tengah tanah lempung sesudah air tanah diturunkan.

$$\begin{aligned}\gamma &= \gamma_d + S_r (\gamma_{\text{sat.}} - \gamma_d) \\ \gamma &= 1,70 + 0,20 (2,10 - 1,70) = 1,78 \text{ gr/cm}^3 \\ \sigma &= h_0 \cdot \gamma + (h_1 - h_0) \gamma_1 + 0,50 h_2 \cdot \gamma_2 \\ \sigma &= 400 \times 1,78 + (1.000 - 400) 2,10 + 0,50 \times 600 \times 1,80 \\ \sigma &= 2.512 \text{ gr/cm}^2 = 2,512 \text{ kg/cm}^2 \\ u &= h_w \cdot \gamma_w \quad h_w = h_1 - h_0 + 0,50 h_2 \\ u &= 900 \times 1 \quad h_w = 10 - 4 + 3 = 9 \text{ m} = 900 \text{ cm}\end{aligned}$$

$$u = 900 \text{ gr/cm}^2 = 0,90 \text{ kg/cm}^2$$

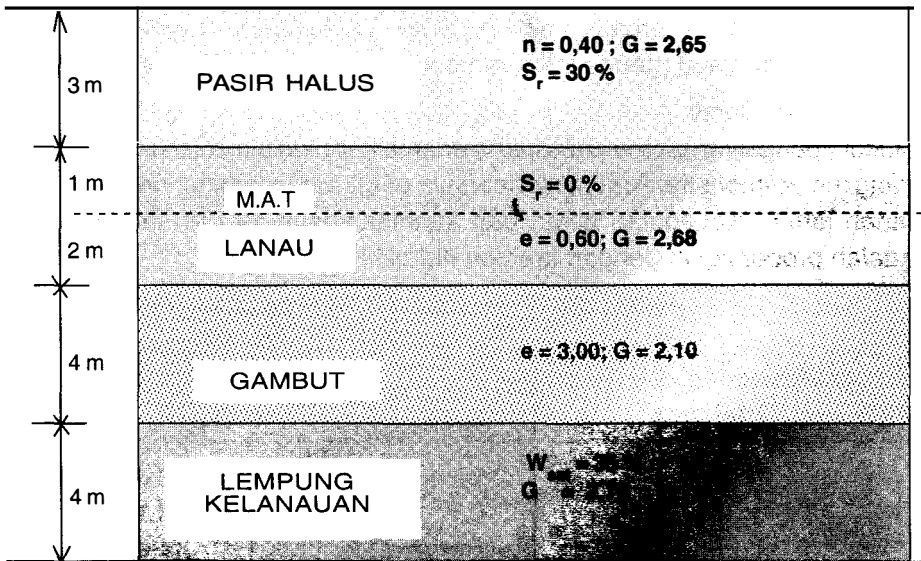
$$\sigma_{\text{ef.}} = 2,512 - 0,90 = 1,612 \text{ kg/cm}^2$$

Kenaikan tekanan efektif:

$$\Delta\sigma_{\text{ef.}} = 1,612 - 1,34 = 0,272 \text{ kg/cm}^2$$

Soal-soal latihan:

1. Permukaan air dalam endapan pasir setebal 8 m terletak pada kedalaman 3 di bawah permukaan tanah. Di atas permukaan air pasir dalam keadaan jenuh dengan air kapiler. Berat isi asli pasir = $2,00 \text{ gra/cm}^3$. Hitung tekanan efektif pada kedalaman: 1 m, 3 m dan 8 m di bawah permukaan tanah. Kemudian gambarkan diagram tekanan total, tekanan netral dan tekanan efektif sampai kedalaman 8 m tersebut.
2. Diketahui penampang tanah seperti tampak dalam gambar 6.9, hitung tekanan efektif pada kedalaman 12.



Gb. 6.9. Penampang empat lapis.

6.4. PERMEABILITAS DAN REMBESAN

1. Pendahuluan

→ *Permeabilitas* didefinisikan sebagai sifat bahan berongga yang memungkinkan air atau cairan lainnya untuk menembus atau merembes melalui hubungan antar pori. Bahan yang mempunyai pori-pori kontinu disebut *dapat tembus (permeable)*. Kerikil mempunyai sifat dapat tembus yang tinggi sedangkan lempung kaku mempunyai sifat dapat tembus yang rendah dan karena itu lempung disebut tidak dapat tembus (*impermeable*) untuk semua tujuan pekerjaan yang berhubungan dengan tanah tersebut.

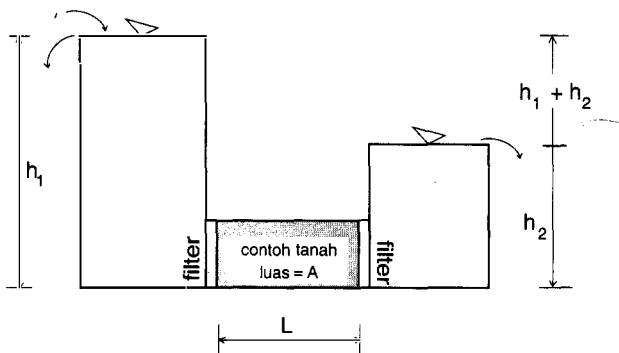
Untuk mempelajari rembesan air melalui tanah adalah penting untuk masalah-masalah teknik sipil ialah:

- Menentukan kecepatan penurunan lapisan tanah jenuh yang dapat dimampatkan.
- Menghitung rembesan melalui tubuh bendungan tanah dan kemantapan lereng.
- Menghitung gaya angkat ke atas (*uplift*) di bawah bangunan air dan keamanannya terhadap piping.
- Air tanah yang mengalir ke arah sumur-sumur dan drainase tanah.

2. Hukum Darcy

Hukum pengaliran air melalui tanah pertama kali dipelajari oleh Darcy (1856) yang mendemonstrasikan percobaannya untuk aliran laminer dalam kondisi tanah jenuh. Kecepatan aliran dan kuantitas/debit air per satuan waktu adalah proporsional dengan gradien hidrolik.

→



Gb. 6.10. Aliran air melalui tanah.

$$q = k \cdot i \cdot A \dots\dots\dots (6.24.)$$

atau

$$v = \frac{q}{A} = k \cdot i \dots\dots\dots (6.25.)$$

Dalam hal ini:

- q = kuantitas air per satuan waktu.
- k = koefisien permeabilitas Darcy.
- i = gradien hidrolik.
- A = luas penampang tanah.
- v = kecepatan aliran.

Jika contoh tanah panjang = L dan luas penampang = A, beda tinggi air = $h_1 - h_2$, maka gradien hidrolik:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} \dots\dots\dots (i)$$

Jika persamaan (i) dimasukkan ke dalam persamaan (6.24), maka persamaan (6.24.) menjadi:

$$q = k \frac{h_1 - h_2}{L} A \dots\dots\dots (6.26.)$$

Karena gradien hidrolik tidak berdimensi, maka: k mempunyai dimensi sama dengan v.

Tabel 6.6. Harga-harga k untuk berjenis-jenis tanah.

Jenis tanah	Koefisien permeabilitas (cm/det.)
Kerikil bersih	1,0
Pasir kasar bersih	1,0 - 10^{-2}
Pasir campuran lempung, lanau	10^{-2} - 5×10^{-2}
Pasir halus	5×10^{-2} - 10^{-3}
Pasir kelanauan	2×10^{-3} - 10^{-4}
Lanau	5×10^{-4} - 10^{-5}
Lempung	10^{-6} - 10^{-9}

3. Kecepatan debit dan kecepatan rembesan

Kecepatan aliran v adalah kecepatan debit/kuantitas air per satuan jumlah luas penampang tanah A .

Jumlah luas penampang terdiri dari luas butir A_s dan luas ruang pori A_v .

Karena aliran melalui pori merupakan kecepatan sebenarnya atau kecepatan aktual, maka kecepatannya lebih besar dari kecepatan aliran v . Kecepatan aktual ini disebut kecepatan rembesan v_s dan didefinisikan sebagai kecepatan rembesan debit tiap satuan luas penampang pori tegak lurus arah aliran.

Dari definisi kecepatan debit dan kecepatan rembesan dapat diperoleh persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$q = v \cdot A = v_s \cdot A_v$$

$$v_s = v \cdot \frac{A}{A_v}$$

$$\frac{A_v}{A} = \frac{V_v}{V} = n$$

$$v_s = v \cdot \frac{A}{A_v} = \frac{v}{n}$$

$$v_s = \frac{v}{n} = \frac{1+e}{e} v \dots\dots\dots (6.27.)$$

Kecepatan rembesan v_s sebanding dengan gradien hidrolis:

$$v_s = k_p \cdot i \dots\dots\dots (6.28.)$$

Dalam hal ini:

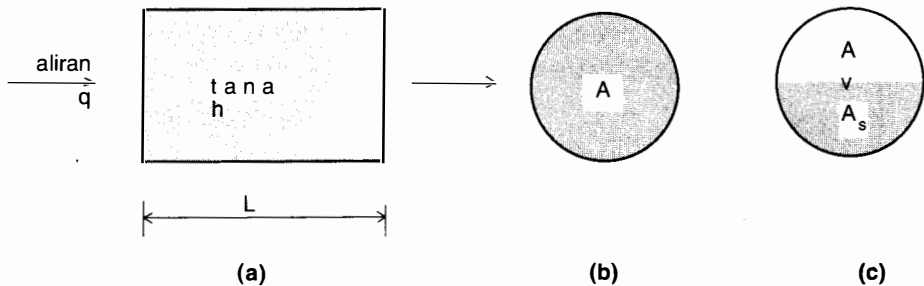
k_p = koefisien filtrasi/rembesan
(*coefficient of percolation*)

Dari hukum Darcy:

$$v = k \cdot i$$

$$\frac{V_s}{V} = \frac{k_p}{k} = \frac{1}{n}$$

$$k_p = \frac{k}{n} \dots\dots\dots (6.29.)$$



Gb. 6.11. Aliran dalam penampang tanah.

→

4. Menentukan koefisien permeabilitas

Koefisien permeabilitas dapat ditentukan dengan metoda sebagai berikut:

a. *Metoda laboratorium:*

- i. Percobaan permeabilitas dengan tinggi/tegangan tetap (*Constant head permeability test*).
- ii. Percobaan permeabilitas dengan tinggi/tegangan tidak tetap/menurun (*Falling head permeability test*).

b. *Metoda lapangan:*

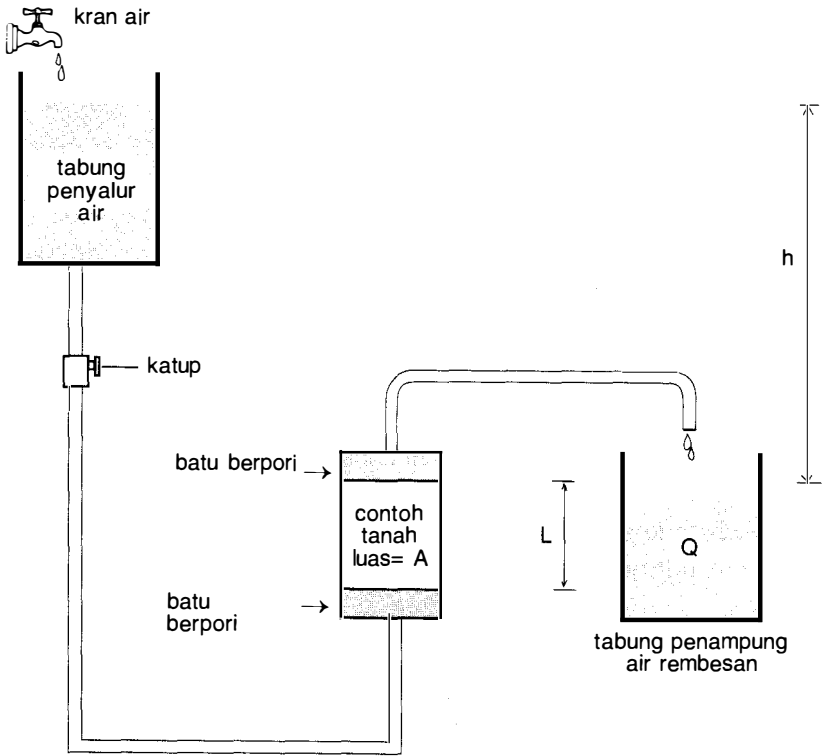
- i. Metoda lubang bor.
- ii. Metoda sumur percobaan.

c. *Metoda tidak langsung:*

- i. Perkiraan/perhitungan ukuran butir atau permukaan spesifik (*specific surface*).
- ii. Percobaan kapiler mendatar.
- iii. Percobaan data konsolidasi.

5. Percobaan permeabilitas dengan tinggi/tegangan tetap

$$Q = k \cdot i \cdot A \cdot t \dots\dots\dots (6.30.)$$



Gb. 6.12. Percobaan permeabilitas dengan tinggi tetap.

Dalam hal ini:

Q = jumlah air yang merembes dalam waktu t.

k = koefisien permeabilitas.

i = gradien hidrolis.

A = luas penampang contoh tanah.

t = waktu selama percobaan.

Apabila yang akan diselidiki koefisien permeabilitasnya, maka:

$$k = \frac{Q}{i \cdot A \cdot t}$$

$$\text{jika : } i = \frac{h}{L}$$

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \dots\dots\dots (6.31.)$$

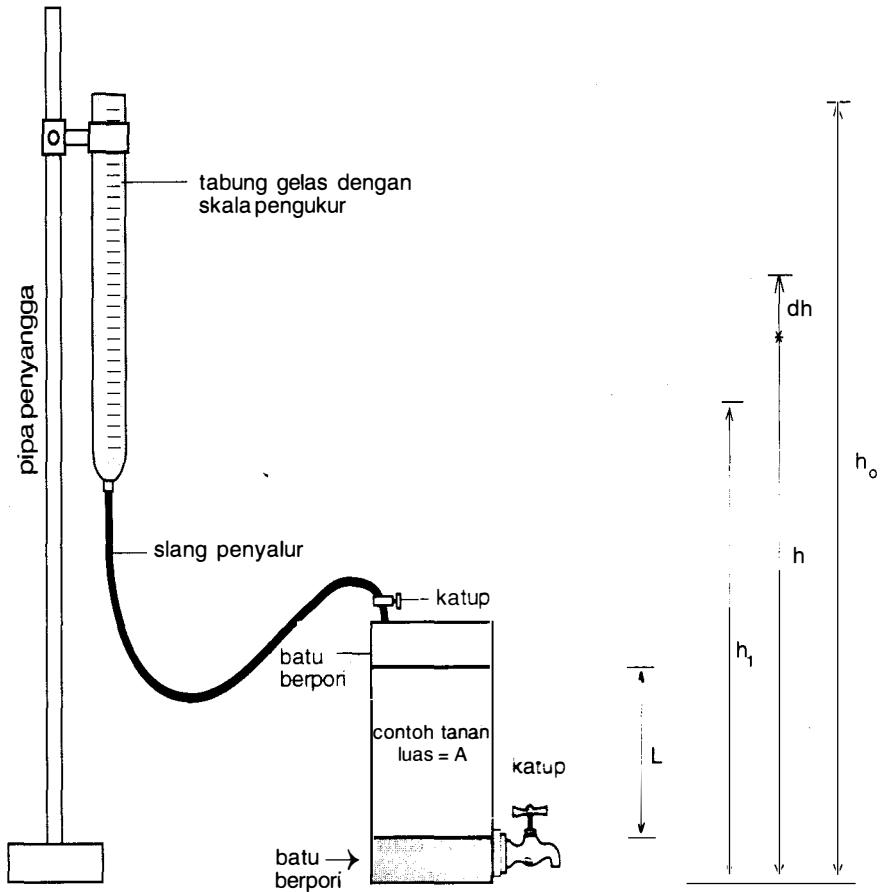
6. Percobaan permeabilitas dengan tinggi/tegangan tidak tetap/menurun
 Misal : Pada saat tinggi air di dalam tabung = h , air turun setinggi = dh dalam waktu = dt , maka berdasarkan hukum Darcy:

Pada tabung gelas pengukur:

$$dQ = - \frac{dh}{dt} \cdot a \dots\dots\dots (i)$$

Pada contoh tanah:

$$dQ = k \cdot i \cdot A \dots\dots\dots (ii)$$



Gb. 6.13. Percobaan permeabilitas dengan tinggi tidak tetap.

Persamaan (i) = persamaan (ii)

$$- \frac{dh}{dt} \cdot a = k \cdot i \cdot A \rightarrow i = \frac{h}{L}$$

$$- \frac{dh}{dt} \cdot a = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A$$

$$\frac{A \cdot k}{a \cdot L} \cdot dt = - \frac{dh}{dt}$$

$$\frac{A \cdot k}{a \cdot L} \int_{t_0}^{t_1} dt = - \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h}$$

$$\frac{A \cdot k \cdot (t_1 - t_0)}{a \cdot L} = \ln \frac{h_0}{h_1}$$

$$k = 2,30 \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \log \frac{h_0}{h_1} \dots \dots \dots (6.32.)$$

Dalam hal ini:

- k = koefisien permeabilitas.
- a = luas penampang tabung gelas pengukur.
- L = tinggi/panjang contoh tanah.
- A = luas penampang contoh tanah.
- t = lama waktu percobaan ($t_1 - t_0$)
- t_0 = waktu awal percobaan.
- t_1 = waktu akhir percobaan.

Sebagai standar koefisien permeabilitas dihitung pada suhu 20°C. Apabila pada saat percobaan suhunya tidak sama dengan 20°C, maka koefisien permeabilitas dihitung dengan persamaan:

$$k_{20^\circ\text{C}} = k_T \cdot \frac{u_T}{u_{20^\circ\text{C}}} \dots \dots \dots (6.33.)$$

Dalam hal ini:

- $k_{20^\circ\text{C}}$ = koefisien permeabilitas pada suhu standar.
 - k_T = koefisien permeabilitas pada suhu saat percobaan.
 - u_T = kekentalan air pada suhu saat percobaan.
 - $u_{20^\circ\text{C}}$ = kekentalan air pada suhu 20°C
- Harga-harga kekentalan air lihat tabel 3.6.

7. Percobaan-percobaan permeabilitas di laboratorium

Standar yang berlaku :

Bina Marga :

ASTM : D - 2434 - 68 (1974)

AASHTO : T - 215 - 70

a. Tujuan:

i. Untuk mengetahui bilangan/koefisien yang menyatakan besarnya daya rembesan air yaitu kemampuan tanah untuk dapat dirembesi air.

ii. Sedangkan yang dimaksud dengan daya rembesan/permeabilitas adalah kemungkinan adanya air yang merembes melalui suatu jenis tanah.

Apabila porositas tanah makin besar, maka makin besar pula air yang merembes pada tanah tersebut atau makin besar pula koefisien permeabilitas (k) dan (k) tergantung pada:

- a. bentuk dan ukuran butir
- b. angka pori
- c. suhu.

iii. Ada dua hal utama yang harus kita perhatikan, yaitu banyaknya air yang akan merembes dan tegangan air di dalam tanah akibat rembesan itu. Dalam percobaan bila ada cukup banyak air dapat merembes ke dalam contoh tanah dalam waktu tidak terlampau lama, maka percobaan ini dapat dilakukan dengan mengukur banyaknya air yang akan merembes yang disebut percobaan dengan tegangan tetap (*constant head permeability test*). Apabila daya rembes tanah sangat kecil, maka banyak air yang merembes ke dalam contoh tanah akan sangat sedikit, sehingga tidak dapat diukur dengan tepat. Dalam hal ini sebaiknya digunakan percobaan dengan tegangan air yang menurun (*falling head permeability test*).

b. Percobaan dengan tinggi/tegangan tetap

Alat-alat yang digunakan:

1. Penyalur air.
2. Termometer.

3. Permeameter dengan batu berpori dan penyumbat.
4. Bak penampung dengan permukaan/tinggi tetap.
5. Tabung penampung rembesan.

c. *Cara melaksanakan percobaan:*

1. Tempatkan tanah dalam permeameter dan timbang beratnya: $W = \dots\dots$ gram.
2. Ukur tinggi : $h = \dots$ cm. dan panjang contoh tanah : $L = \dots$ cm.
3. Setelah dibiarkan beberapa menit untuk mencapai kesetimbangan, tampung rembesan dan catat waktunya: $T_1 = \dots$ detik/ menit.
4. Setelah air yang ditampung cukup, catat pelimpahannya dan waktu pengamatannya: $t_2 = \dots$ detik.
5. Hitung selisih waktu: $t_2 - t_1 = t$ dan ukur Q .
6. Catat suhu setiap selang waktu tertentu sampai dengan akhir percobaan: $T^\circ\text{C}$.

d. *Analisis perhitungan:*

Percobaan dilakukan minimal tiga kali untuk dihitung harga rata-ratanya.

Setelah data-data diperoleh, maka perhitungan dapat dihitung dengan persamaan:

$$k_T = \frac{Q.L.}{A.h.t.}$$

$$k_{20^\circ\text{C}} = k_T \cdot \frac{u_T}{u_{20^\circ\text{C}}}$$

e. *Contoh perhitungan:*

Suatu percobaan dengan tegangan tetap diperoleh data-data seperti tabel di bawah ini. Hitung koefisien permeabilitas standar. Perhitungan diselesaikan secara tabelaris.

Tabel 6.7. Data dan pengamatan percobaan permeabilitas dengan tegangan tetap.

Contoh tanah No. A/46		
Kadar air = 14%	Berat spesifik = 2,68	
Berat isi = 1,72 gr/cm ³	Angka pori = 0,56	
1. Tinggi air (h)	(cm)	6
2. Panjang contoh tanah (L)	(cm)	6
3. Gradien hidrolik (i)	(.)	1
4. Luas penampang contoh tanah (A)	(cm ²)	50
5. Interval waktu (t)	(det.)	600
6. Kuantitas rembesan (Q)		
i. Percobaan I	(ml)	860
ii. Percobaan II	(ml)	855
iii. Percobaan III	(ml)	862
Rata-rata	(m)	859
7. Suhu pada saat percobaan (T)	(°C)	32
8. Koefisien permeabilitas (k_T)	(cm/det.)	$2,86 \times 10^{-2}$
9. Koefisien permeabilitas ($k_{20^\circ\text{C}}$)	(cm/det.)	$2,17 \times 10^{-2}$

Catatan: Kekentalan air lihat tabel. 3.6. untuk suhu 32°C.

f. *Percobaan dengan tinggi/tegangan tidak tetap/menurun*

Alat-alat yang digunakan:

1. Permeameter dengan batu berpori.
2. Penyangga dan pipa gelas berskala dan slang.
3. Termometer.
4. Stop watch.
5. Timbangan.
6. Tabung penampung rembesan.
7. Peralatan kadar air.
8. Core cutter untuk percobaan tanah utuh/tidak rusak (*undisturbed sample*).

g. *Cara melaksanakan percobaan:*

1. Pengambilan contoh tanah:
Contoh tanah yang diuji adalah contoh tanah yang tidak rusak, maka pengambilan tanah langsung dengan *core cutter* atau

tabung silinder permeabilitas yang khusus untuk percobaan permeabilitas.

2. Contoh tanah dalam keadaan asli dari core cutter dipasang pada tabung permeameter dan dilengkapi dengan batu berpori dan saringan.

Di antara batu berpori dan tanah dipasang kertas hisap/flui, agar tanah tidak menyumbat pori-pori batu berpori.

3. Dalam pemasangan dan penutupan tabung dilakukan dengan sempurna dan celah-celahnya ditutup/diisi cairan lilin agar tidak bocor.

Pipa penyalur air/slang plastik/karet disambungkan ke bagian atas tutup tabung permeameter dan air dapat mulai diisi melalui bagian atas lubang gelas ukuran dan katup dibuka.

4. Pembacaan dapat dimulai bila udara dalam pipa sudah tidak ada, untuk ini katup pembuang udara dibuka.
5. Pengamatan atau pembacaan diadakan pada waktu-waktu tertentu, misal pada tiap-tiap jam atau tergantung kecepatan air yang merembes.

Untuk tanah yang daya rembesnya kecil, pembacaan dilakukan sampai beberapa hari.

6. Tiap kali pembacaan waktu, tinggi air dan suhu dicatat dalam tabel yang sudah tersedia.

h. *Analisis perhitungan:*

Sama dengan tegangan tetap dan perhitungan menggunakan persamaan:

$$k_T = 2,30 \frac{a.L}{A.t} \log \frac{h_0}{h_1}$$

$$k_{20^\circ\text{C}} = k_T \frac{u_T}{u_{20^\circ\text{C}}}$$

i. *Contoh perhitungan:*

Data-data dan pengamatan percobaan permeabilitas dengan tegangan tidak tetap seperti tabel berikut. Hitung koefisien permeabilitas standar tanah tersebut.

Perhitungan sama dengan tegangan tetap secara tabelaris.

Tabel 6.8. Data dan pengamatan percobaan permeabilitas dengan tegangan tidak tetap.

Contoh tanah No. A/107		
Kadar air = 12%		Berat spesifik = 2,65
Berat isi = 1,85 gr/cm ³		Angka pori = 0,60
1. Luas penampang gelas pengukur (a)	(cm ²)	0,785
2. Luas penampang contoh tanah (A)	(cm ²)	50
3. Panjang contoh tanah (L)	(cm)	6
4. tinggi air mula-mula (h ₀)	(cm)	40
5. Tinggi air akhir (h ₁)	(cm)	20
6. Interval waktu (t)		
i. Percobaan I	(det.)	56
ii. Percobaan II	(det.)	57
iii. Percobaan III	(det.)	55
Rata-rata	(det.)	56
7. Suhu pada saat percobaan (T)	(°C)	30
8. Koefisien permeabilitas (k _T)	(cm/det.)	1,17 x 10 ⁻³
9. Koefisien permeabilitas (k _{20°C})	(cm/det.)	0,93 x 10 ⁻³

8. Metoda lapangan

i. Metoda lubang bor:

A. Metoda Lugeon.

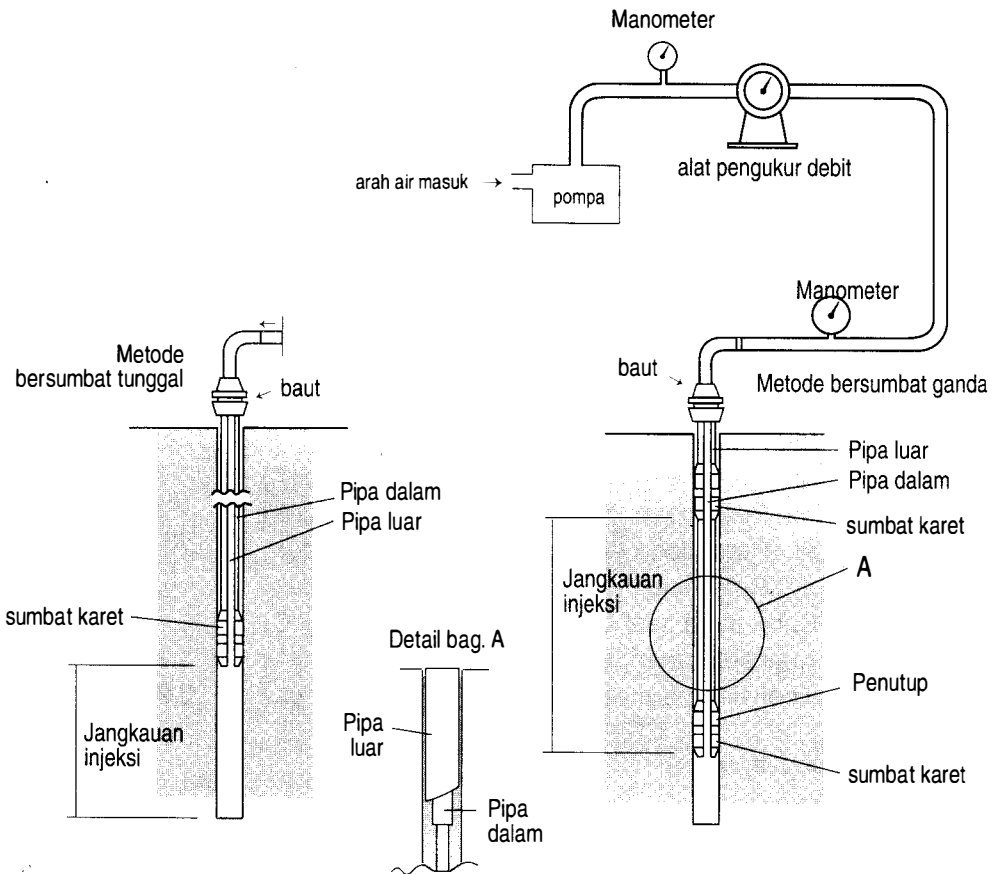
Metoda ini digunakan dengan lubang bor.

Pelaksanaannya relatif mudah dan koefisien permeabilitas yang dihasilkan akan dapat digunakan sebagai dasar pelaksanaan sementasi atau grouting.

Didasarkan pada jenis perlengkapan injeksi (*injection spindle*), maka dapat dibedakan dua tipe alat Lugeon, yaitu:

- 1) Alat pengujian permeabilitas bersumbat tunggal (*single packer type Lugeon test devices*).
- 2) Alat pengujian permeabilitas bersumbat ganda/kembar (*double packer type Lugeon test devices*).

Hasil pengujian metoda Lugeon yang dilakukan pada lubang bor berdiameter = 40 – 80 mm, maka 1 Lugeon = ± 10⁻⁵ cm/det.



Gb. 6.14. Alat pengujian Lugeon.

a. *Tujuan:*

Untuk mendapatkan koefisien permeabilitas langsung di lapangan.

b. *Alat-alat yang digunakan:*

1. Alat Lugeon bersumber tunggal atau ganda.
2. Pipa air berlubang.
3. Manometer tekanan.
4. Pompa air.
5. Meteran air.
6. Peralatan bor.

c. *Analisis perhitungan:*

Data-data yang diperoleh dalam percobaan dapat dihitung dengan persamaan:

$$k = \frac{Q}{2\pi LH} \ln \frac{L}{r} \dots\dots\dots (6.34.)$$

Untuk : $L \geq 10 r$

$$k = \frac{Q}{2\pi LH} \sinh^{-1} \frac{L}{2r} \dots\dots\dots (6.35.)$$

untuk: $10 r > L \geq r$

Dalam hal ini:

- k = koefisien permeabilitas.
- Q = kuantitas air rata-rata dalam lubang.
- L = panjang bagian yang diuji.
- H = perbedaan tinggi muka air.
- r = jari-jari lubang yang diuji.

Catatan:

Koefisien permeabilitas standar diukur pada suhu standar 20°C.

d. *Contoh perhitungan:*

Pada suatu percobaan dengan metoda Lugeon diperoleh data-data sebagai berikut:

Q = 0,02 liter/detik

L = 100 cm

H = 50 cm

r = 40 cm

Hitung koefisien permeabilitas tanah.

Perhitungan:

Q = 0,02 liter/det. = 20 cm³/detik.

L = 100 cm

H = 50 cm

r = 40 mm = 4 cm

$$k = \frac{20}{2 \times 3,14 \times 100 \times 50} \ln \frac{100}{4} = 2,05 \times 10^{-3} \text{ cm / det.}$$

B. Metoda lubang bor dengan penurunan air tanah

Metoda ini sangat mudah dilaksanakan, apabila pada lubang yang akan diuji, permukaan tanahnya tinggi. Sesudah permukaan air tanah dalam lubang bor mencapai elevasi yang sama dengan permukaan air tanah di sekitarnya, maka dilakukan pemompaan air dari dalam lubang bor keluar.

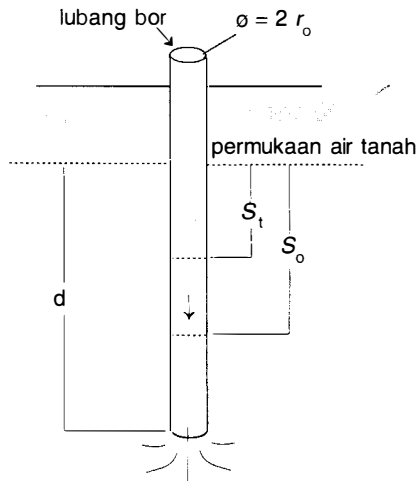
Jika penurunan permukaan air tanah dalam lubang bor yang berdiameter: $D = 2 r_0$ telah mencapai kedalaman tertentu = S_0 , maka pemompaan dihentikan. Selanjutnya agar dicatat setelah menunggu selama jangka waktu (t) yang biasanya dalam satuan jam, permukaan air tanah dalam lubang bor telah naik mencapai elevasi tertentu = S_t , maka koefisien permeabilitas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$k = \frac{2,30r_0}{4t} \log \frac{S_0}{S_t} \dots\dots\dots (6.36.)$$

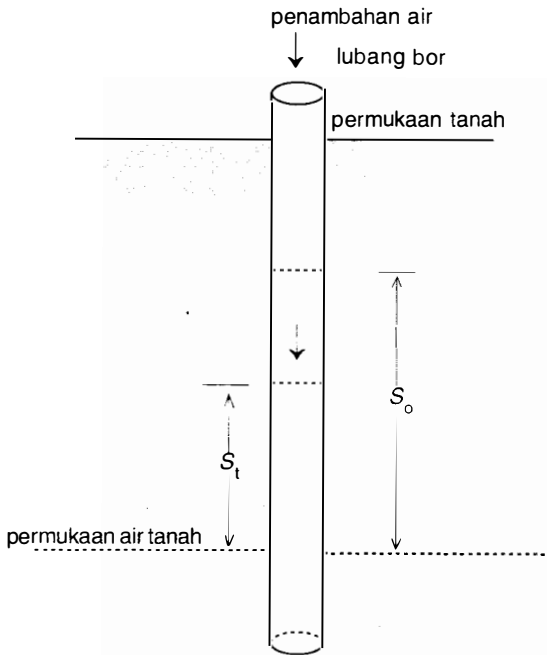
atau

$$k = \frac{2,30r_0^2}{E.t} \log \frac{S_0}{S_t} \dots\dots\dots (6.37.)$$

Harga-harga E lihat tabel 6.9.



Gb. 6.15. Pengujian permeabilitas menggunakan lubang bor.



Gb. 6.16. Percobaan lubang bor dengan penambahan air.

Untuk mendapatkan koefisien permeabilitas pada lapisan tanah di atas permukaan air tanah, maka pengujian dapat dilakukan dengan menuangkan air ke dalam lubang bor dan rumus-rumus (6.36.) dan (6.37.) dapat digunakan.

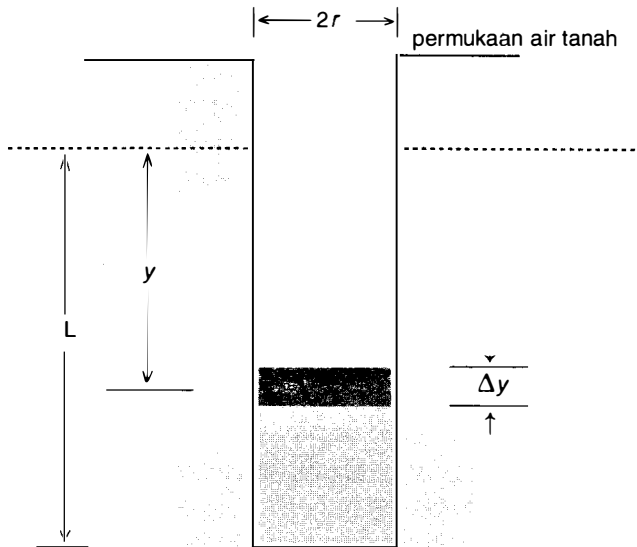
Dalam keadaan ini S_o = ketinggian permukaan air dalam lubang bor karena penuangan air ke dalamnya dan S_t = tinggi permukaan air selama jangka waktu (t) setelah air meresap ke dalam tanah.

Tabel 6.9. Harga E (cm).

$\frac{\text{Kedalaman}}{\text{Garistengah}} = \frac{d}{2r_0}$	Garis tengah tabung $2r_0$ (cm)						
	2,5	5,1	7,6	10,2	12,7	15,2	20,3
1						39,6	53,1
2					33,2	39,4	52,9
3				26,2	33,0	39,4	52,6
4			19,6	26,2	32,8	39,2	52,1
5			19,6	25,9	32,8	38,9	51,8
6		13,0	19,3	25,9	32,6	38,6	51,6
7		13,0	19,3	25,6	32,2	38,6	51,3
8		13,0	19,1	25,6	32,2	38,4	51,0
10		12,7	19,1	25,2	31,8	37,9	
12	6,4	12,7	18,8	24,9	31,5		
15	6,1	12,5	18,3	24,6			
25	5,8	11,7	17,3				
40	5,3	10,2					
60	4,8						
100	3,8						

- C. Metoda dengan lubang bor atau biasa disebut slug tests. Percobaan ini mula-mula dilakukan oleh Ernst (1950), demikian juga oleh Dum, Andrson dan Kufer (1980). Lubang dibor dengan diameter $D = 2r$ dengan kedalaman yang dikehendaki, kedudukan muka air tanah sampai dasar lubang = L . Kemudian air dalam lubang dipompa atau ditimba, sehingga kedalamannya mencapai = y dari permukaan air tanah. Selanjutnya pengamatan dilakukan, berapa kenaikan air dalam lubang bor selama Δt , misal kenaikan air = Δy , maka koefisien permeabilitas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$k = \frac{40}{\left(20 + \frac{L}{r}\right)\left(2 - \frac{y}{L}\right)} \cdot \frac{r \cdot \Delta y}{y \cdot \Delta t} \dots\dots\dots (6.38.)$$



Gb. 6.17. Menentukan koefisien permeabilitas dengan metoda lubang bor (*slug tests*)

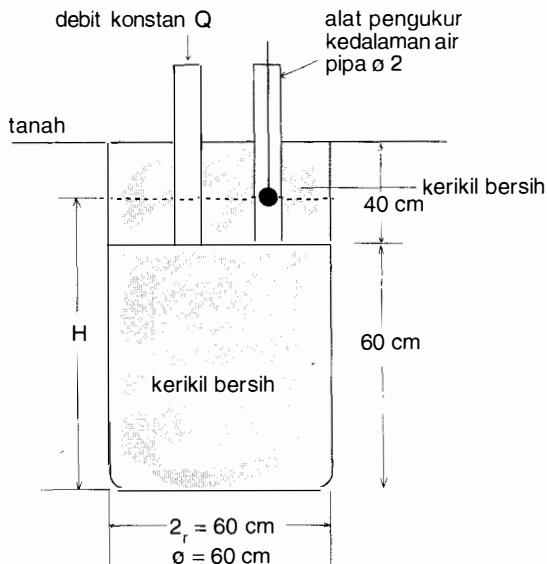
ii. *Metoda sumur percobaan:*

A. Percobaan dengan lubang silinder (*Cylindrical pit test*)

Dalam pelaksanaannya biasanya dipergunakan silinder besi yang panjangnya = 1 meter dengan diameter = 60 cm.

Silinder besi tersebut dibenamkan ke dalam lapisan tanah yang akan diuji (Gambar 6.17), kemudian tanah yang terdapat di dalam silinder besi dibuang dan diganti dengan kerikil bersih setinggi 60 cm. Kemudian di atas permukaan kerikil tersebut dipasang tegak 2 buah pipa berdiameter = 2" dan panjangnya = ± 50 cm dan selanjutnya pengisian kerikil diteruskan sampai penuh.

Akhirnya ke dalam sumur yang berisi kerikil tersebut dituangkan air, sehingga terjadi kejenuhan tanah yang merata. Sesudah terjadi penjenuhan selama 24 jam, maka pengukuran dapat dilakukan yaitu dengan mempertahankan permukaan air dalam sumur percobaan pada ketinggian tertentu dengan menuangkan



Gb. 6.18. Metode pengujian permeabilitas di lapangan.

air ke dalam sumur tersebut secara terus-menerus (kontinu) pada kapasitas tertentu. Kapasitas tersebut harus diukur dan dicatat.

Koefisien permeabilitas dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$k = \frac{Q}{2\pi H^3} \left[H \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{H}{r} \right) - \sqrt{r^2 + H^2} + r \right] \dots \dots \dots (6.39)$$

$$k = \frac{Q}{2\pi H^3} \left[H \cdot 2,30 \log \frac{H}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{H}{r} \right)^2} - \sqrt{r^2 + H^2} + r \right] \dots \dots \dots (6.40.)$$

Dalam hal ini:

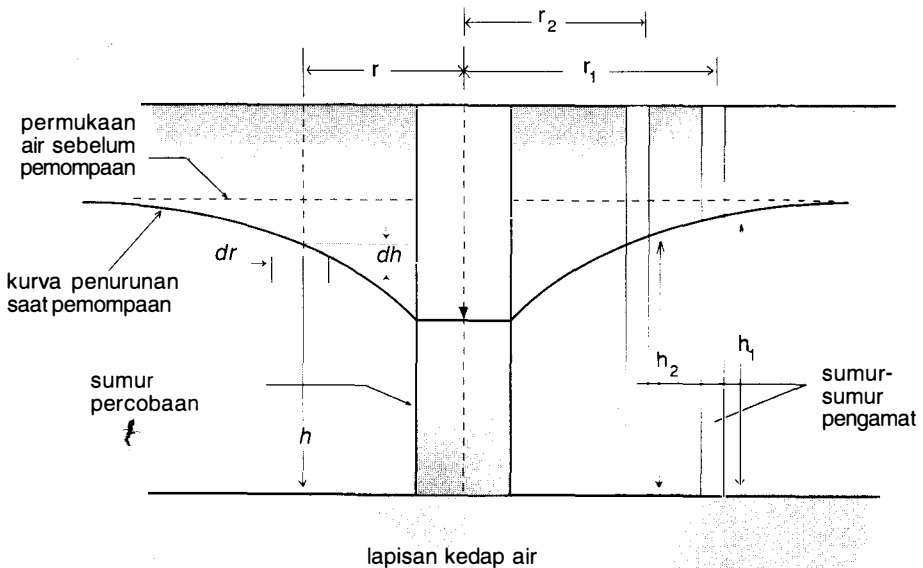
- H = kedalaman air dalam sumur percobaan (cm)
- r = jari-jari sumur percobaan (cm)
- Q = debit tetap air yang dituangkan ke dalam sumur percobaan (cm³/det.).
- k = koefisien permeabilitas (cm/det.)

B. Percobaan permeabilitas di lapangan dengan pompa dari sumur percobaan

1. Akuifer bebas/tidak terkekang (*unconfined aquifer*).

Di lapangan koefisien permeabilitas rata-rata dapat ditentukan dengan melakukan pemompaan dari sumur-sumur percobaan (Gambar 6.19.). Dalam pelaksanaannya, air dipompa keluar dengan kecepatan konstan dari sumur percobaan dengan pipa berlubang. Berapa sumur pengamatan dengan berbagai macam jarak dibuat sekeliling sumur percobaan. Pengamatan terus-menerus kedudukan air dalam sumur percobaan dan sumur pengamatan sesudah pemompaan dimulai sampai kedudukan air tetap. Keadaan tetap ditentukan jika kedudukan air dalam sumur percobaan dan sumur-sumur pengamatan sudah tetap/konstan. Debit/kuantitas air yang dipompa:

$$q = k \left(\frac{dh}{dr} \right) 2\pi r h$$



Gb. 6.19. Sumur percobaan akuifer bebas.

$$\int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = \frac{2\pi k}{q} \int_{h_2}^{h_1} h \, dh$$

$$k = \frac{2,30 \, q \log \frac{r_1}{r_2}}{\pi (h_1^2 - h_2^2)} \dots\dots\dots (6.41.)$$

Dalam hal ini:

- q = debit air yang dipompa/merembes
- r₁ = jari-jari dari sumbu sumur percobaan sampai ke sumbu sumur pengamat pertama
- r₂ = jari-jari dari sumbu sumur percobaan sampai ke sumbu sumur pengamat kedua
- h₁ = tinggi air pada sumur pengamat pertama
- h₂ = tinggi air pada sumur pengamat kedua

2. Akuifer tidak bebas/terkekang (*Confined aquifer*).

Koefisien permeabilitas rata-rata untuk akuifer terkekang dapat juga ditentukan dengan cara percobaan pemompaan dari lubang sumuran yang ditekan masuk ke dalam lapisan akuifer dan mengamati kedudukan muka air dengan sumur-sumur pengamat dengan berbagai macam jarak. Pemompaan terus-menerus dengan kecepatan debit q seragam sehingga keadaan konstan dicapai.

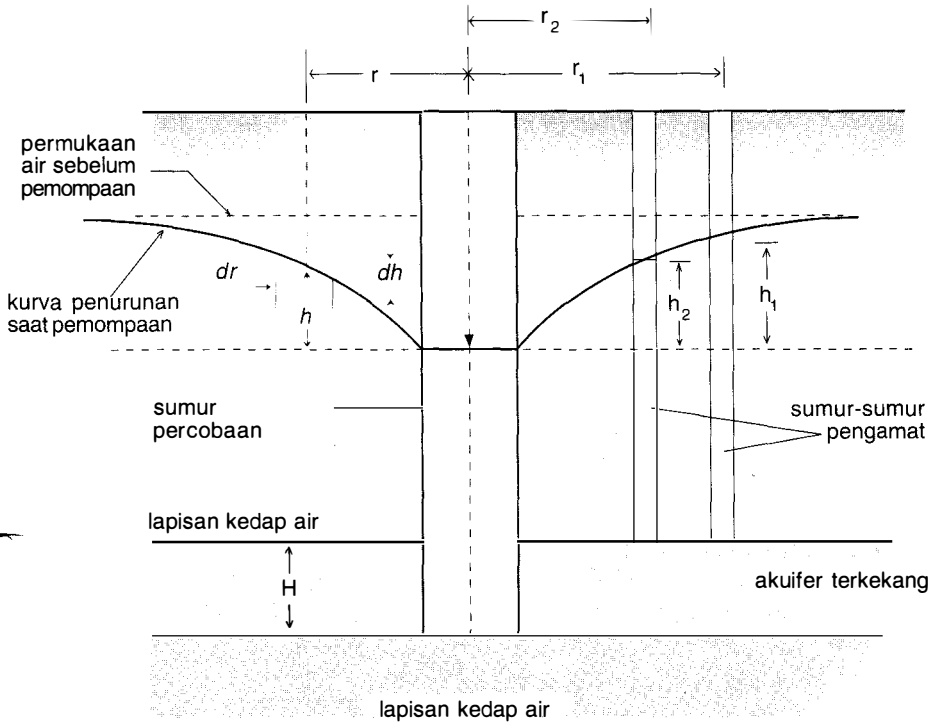
Jika air dapat masuk sumur percobaan hanya dari akuifer setebal = H, maka debit air tetap:

$$q = k \left(\frac{dh}{dr} \right) 2\pi r \cdot H$$

atau

$$\int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = \int_{h_2}^{h_1} \frac{2\pi k H}{q} \cdot dh$$

$$k = \frac{q \log \frac{r_1}{r_2}}{2,727 H (h_1 - h_2)} \dots\dots\dots (6.42.)$$



Gb. 6.20. Sumur percobaan akuifer terkekang.

3. Gabungan dua sumur dengan akuifer terkekang.

Bila dua sumur terletak berdekatan satu sama lain dan airnya dipompa keluar, maka kurva penurunannya akan tampak seperti gambar berikut ini (Gambar 6.20.)

Jika dua sumur berjarak B dan mempunyai diameter dan kurva penurunan serta debit yang sama dalam periode yang sama pula. Ini dapat diselesaikan dengan bantuan variabel kompleks dan debit yang melalui sumur masing-masing dihitung dengan persamaan:

$$q_1 = q_2 = \frac{2,727k \cdot b \cdot (H - h)}{\log \frac{R^2}{r_w B}} \dots\dots\dots (6.43.)$$

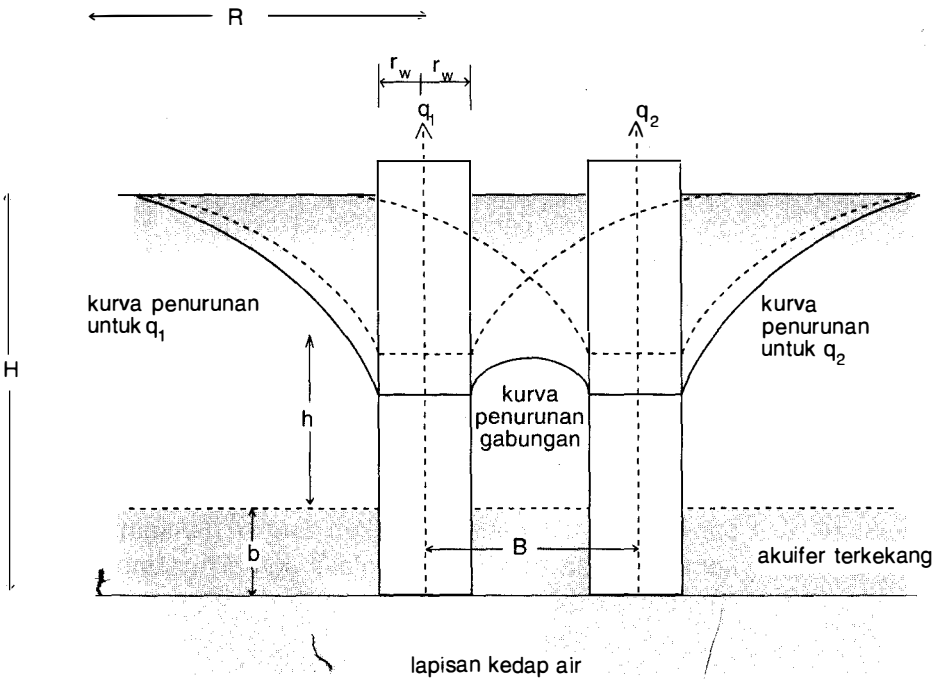
Dalam hal ini: $R \gg B$

R = jari-jari pengaruh luas (*the radius of area of influence*) atau jari-jari pengaruh kerucut penurunan (*the radius of influence of the depression cone*).

Apabila hanya satu sumur:

$$q = \frac{2,727 \text{ k.b (H-h)}}{\log \frac{R}{r_w}} \dots \dots \dots (6.44.)$$

Apabila: $R \gg B \rightarrow \frac{R^2}{r_w B} > \frac{R}{r_w}$, maka : $q > q_1$



Gb. 6.21. Percobaan permeabilitas dengan dua sumur.

Tabel 6.10. Harga-harga lingkaran pengaruh R pada berbagai jenis tanah.

Jenis-jenis tanah	Ukuran butir (mm)	R (m)
Kerikil kasar	>10,00	>1.500
Kerikil sedang	2,00 – 10,00	500 – 1.500
Kerikil halus	1,00 – 2,00	400 – 500
Pasir kasar	0,50 – 1,00	200 – 400
Pasir sedang	0,25 – 0,50	100 – 200
Pasir halus	0,10 – 0,25	50 – 100
Pasir sangat halus	0,05 – 0,10	10 – 50
Pasir berlanau	0,025 – 0,05	5 – 10

Kalau kita amati, maka persamaan (6.44.) akan sama dengan persamaan (6.42.) hanya berbeda huruf-hurufnya saja.

Dengan cara yang sama, untuk n sumur, maka berlaku persamaan:

$$q_1 = q_2 = \dots = q_n = \frac{2,727k \cdot b \cdot (H - h)}{\log \frac{R^n}{r_w \cdot B^{(n-1)}}} \quad \dots \dots \dots \quad (6.45.)$$

Dalam hal ini:

- b = tebal lapisan akuifer
- H = tinggi air mula-mula
- h = tinggi air setelah pemompaan
- R = jari-jari pengaruh luas
- r_w = jari-jari sumuran
- B = jarak dari sumbu ke sumbu sumur percobaan
- n = jumlah sumur percobaan.

iii. *Metoda tidak langsung:*

A. Percobaan kapiler mendatar.

Percobaan permeabilitas kapiler atau percobaan kapiler mendatar digunakan untuk menentukan koefisien permeabilitas k berkaitan dengan tinggi kapiler tanah h_c . Gambar 6.22. dan 6.23 menunjukkan susunan percobaan tersebut.

Tanah kering diletakkan pada tabung gelas dengan diameter ± 4 cm dan panjang 35 cm.

Jika katup A dibuka, air dari bak penampung akan masuk ke dalam tabung melalui silinder tanah secara kapiler. Jarak x dari titik 1 sebagai fungsi waktu t . Pada titik 1, tinggi energi total = 0 dan pada titik 2 tinggi energi total = $-(h + h_c)$.

$$\text{Gradien hidrolik : } i = \frac{0 - (-(h + h_c))}{x} = \frac{h + h_c}{x}$$

Berdasarkan hukum Darcy:

$$\begin{aligned} v &= k \cdot i \\ nv_s &= k \cdot i \quad (\text{Anggap kejenuhan} = 100\%) \\ v_s &= \text{kecepatan rembesan sejajar dengan } x \\ v_s &= \frac{dx}{dt} \end{aligned}$$

Jika koefisien permeabilitas disebut: k_u pada kejenuhan sebagian (parsial) S_r , maka persamaan di atas dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$\begin{aligned} S_r \cdot n \cdot v_s &= k_u \cdot i \\ S_r \cdot n \cdot \frac{dx}{dt} &= k_u \frac{h + h_c}{x} \\ x \cdot dx &= \frac{k_u}{S_r \cdot n} (h + h_c) dt \end{aligned}$$

Dengan integrasi ruas kiri dan ruas kanan kita dapatkan:

$$\begin{aligned} \int_{x_1}^{x_2} x \cdot dx &= \frac{k_u}{S_r \cdot n} (h + h_c) \int_{t_1}^{t_2} dt \\ \frac{x_2^2 - x_1^2}{2 - t_1} &= \frac{2k_u}{S_r \cdot n} (h + h_c) \dots \dots \dots (4.46.) \end{aligned}$$

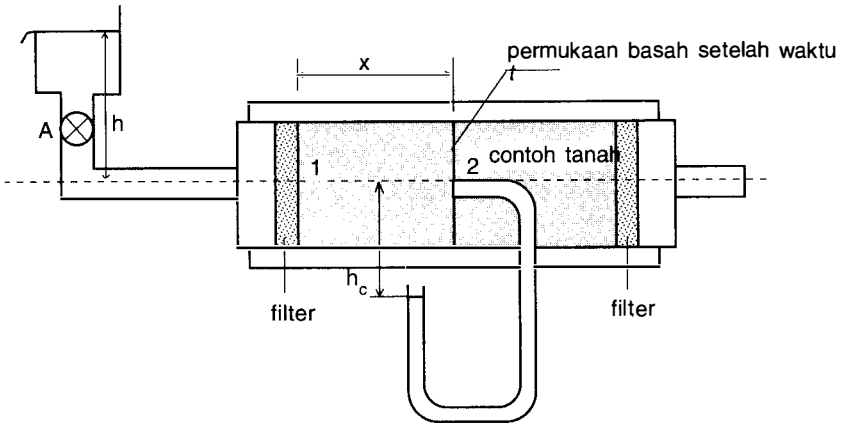
Jika : $S_r = 100\%$, maka persamaan (6.46.) menjadi:

$$\frac{x_2^2 - x_1^2}{2 - t_1} = \frac{2k}{n} (h + h_c) \dots \dots \dots (6.47.)$$

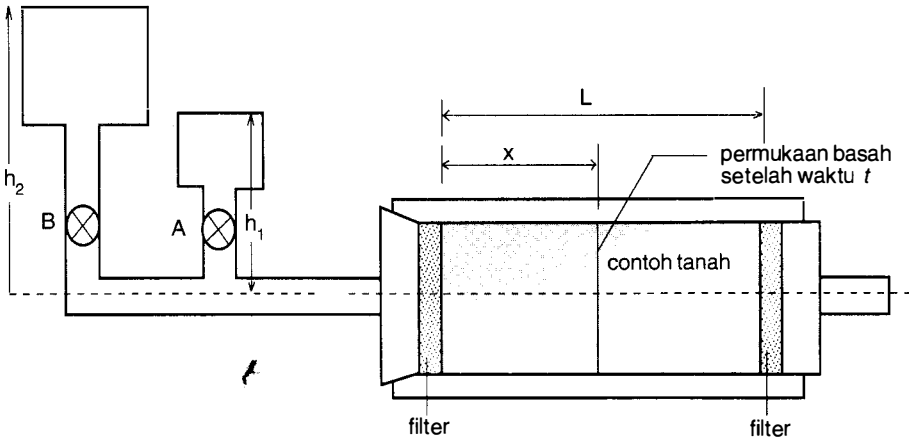
Catatan:

Dalam kenyataan umumnya derajat kejenuhan tanah berkisar antara: 75 – 90%.

Cara pengujian kapiler mendatar sebagai berikut:
(Lihat gambar 6.23.)



Gb. 6.22. Pengujian kapiler horizontal.



Gb. 6.23. Pengujian permeabilitas kapiler horizontal.

1. Buka katup A.
2. Segera setelah air mengalir, catat waktu (t) yang dibutuhkan untuk pengaliran sepanjang x .
3. ketika air terdepan yang mengalir mencapai 0,50 L, tutup katup a dan buka katup B.

4. Lanjutkan sampai aliran air mencapai $x = L$.
5. Tutup katup B dan ambil contoh tanah untuk ditentukan kadar airnya dan derajat kejenuhannya.
6. Gambarkan hubungan nilai-nilai x^2 terhadap waktu t . Gambar 6.21. menunjukkan kurva tersebut. Garis OA adalah data langkah 2 dan AB adalah data langkah 5.
7. Dari persamaan (6.47.) dapat diperoleh harga:

$$\frac{\Delta x^2}{\Delta t} = \frac{2k}{h}(h + h_c)$$

Sebelah kiri persamaan ini menunjukkan kemiringan garis lurus x^2 terhadap waktu t .

8. Tentukan kemiringan garis $\overline{OA} = m_1$ dan $\overline{AB} = m_2$

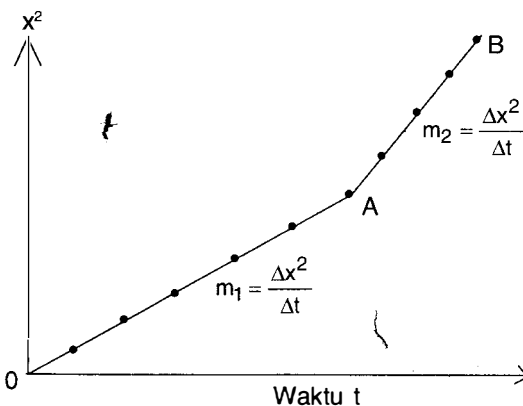
$$m_1 = \frac{x_2^2 - x_1^2}{t_2 - t_1} = \frac{2k}{n}(h_1 + h_c)$$

dan

$$m_2 = \frac{x_2^2 - x_1^2}{t_2 - t_1} = \frac{2k}{n}(h_2 + h_c)$$

Dengan mengetahui dua kemiringan tersebut, maka nilai-nilai k dan h_c dapat dicari dengan kedua persamaan di atas.

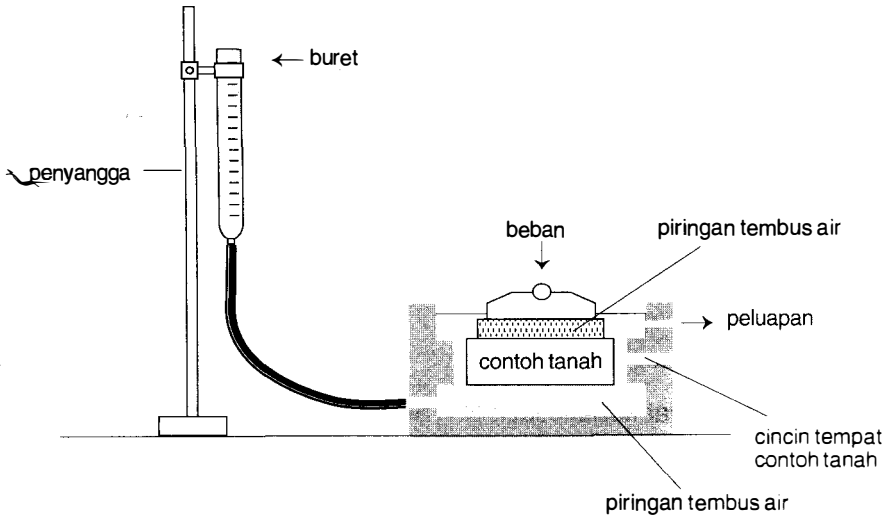
Derajat kejenuhan S_r dapat dicari dengan mengambil berat tanah basah pada akhir percobaan. Porositas dihitung dari berat kering, isi dan berat spesifik yang diketahui.



gb. 6.24. Kurva hubungan antara x^2 terhadap t .

B. Percobaan data konsolidasi.

Koefisien permeabilitas tanah lempung yang kecil dapat ditentukan dalam sebuah permeameter tinggi/tegangan menurun/tidak tetap (*falling head permeameter*) yang direncanakan khusus dari percobaan konsolidasi. Pada alat ini, luas benda uji dibuat besar, sedangkan panjang lintasan air l dibuat kecil dan tinggi h dibuat besar. Untuk menghindari penggunaan pipa yang panjang, maka tinggi tekanan dapat dibuat dengan jalan memberikan tekanan udara. Gambar 6.25 menunjukkan sketsa alat tersebut.



Gb. 6.25. Pengujian permeabilitas dengan alat konsolidasi.

Penentuan koefisien permeabilitas diperoleh dari persamaan konsolidasi sebagai berikut:

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H^2} \dots \dots \dots (i)$$

Dalam hal ini:

- T_v = faktor waktu
- C_v = koefisien konsolidasi
- H = panjang rata-rata lintasan drainase
- t = waktu pengaliran.

Persamaan koefisien konsolidasi:

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} \dots\dots\dots (ii)$$

Dalam hal ini:

γ_w = berat isi air

m_v = koefisien pemampatan isi

Koefisien pemampatan isi:

$$m_v = \frac{e_o - e}{(\sigma - \sigma_o)(1 + e_o)} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma(1 + e_o)} = \frac{a_v}{1 + e_o} \dots\dots\dots (iii)$$

Dalam hal ini:

e_o = angka pori mula-mula sesuai dengan tekanan mula-mula σ_o

e = angka pori pada penambahan tekanan σ

a_v = koefisien pemampatan.

Substitusi dari ketiga persamaan tersebut, maka akan diperoleh persamaan:

$$k = \frac{T_v \cdot \gamma_w \cdot a_v \cdot H^2}{t(1 + e_o)} \dots\dots\dots (6.48.)$$

Untuk derajat konsolidasi: $U = 50\%$, $T_v = 0,197$, maka:

$$k = \frac{0,197 \gamma_w \cdot a_v \cdot H^2}{t_{50}(1 + e_o)}$$

Untuk derajat konsolidasi : $U = 90\%$, $T_v = 0,848$, maka:

$$k = \frac{0,848 \gamma_w \cdot a_v \cdot H^2}{t_{90}(1 + e_o)}$$

- C. Perkiraan/perhitungan berdasarkan ukuran butir atau permukaan. Permeabilitas dapat diperhitungkan dengan luas ukuran butir. Jika tanah berupa berbagai macam ukuran butir, sebagian ukuran butir spesifik dapat digunakan sebagai perbandingan. Allen Hazen (1892), berdasarkan percobaannya untuk saringan (filter) pasir dengan ukuran butir antara 0,10 dan 0,30 mm, untuk mendapatkan koefisien permeabilitas dengan persamaan sebagai berikut:

$$k = C \cdot D_{10}^2 \dots\dots\dots (6.49.)$$

Dalam hal ini:

k = koefisien permeabilitas (cm/det.)

D_{10} = diameter efektif (cm)

C = konstante, C = 100 jika D_{10} dinyatakan dalam cm.

Percobaan-percobaan yang mempunyai korelasi permeabilitas dengan permukaan spesifik butir tanah. Salah satunya diberikan oleh Kozeny (1927) dengan persamaan sebagai berikut:

$$k = \frac{1}{K_k \cdot \eta S^2} \times \frac{n^3}{1-n^2} \dots\dots\dots (6.50.)$$

Dalam hal ini:

k = koefisien permeabilitas (cm/det per satuan gradien hidrolis)

n = porositas

S = permukaan spesifik butir (cm^2/cm^3)

η = kekentalan (g.det/ cm^2)

K_k = konstante kozeny, nilai $K_k = 5$ untuk butir bulat.

Dalam dasar percobaannya Loudon (1952-1953) mengembangkan rumus empiris sebagai berikut:

$$\log k \cdot S^2 = a + b \cdot n \dots\dots\dots (6.51.)$$

Dalam hal ini:

a = konstante yang nilainya = 1,365

b = konstante yang nilainya = 5,15. Keduanya berhubungan permeabilitas pada suhu 10°C

n = porositas.

Contoh-contoh soal:

1. Suatu contoh tanah pasir akan diuji dengan tegangan tetap disebuah laboratorium mekanika tanah.

Data-data:

Luas penampang contoh tanah = 35 cm^2

Tinggi contoh tanah = 20 cm

Berat kering = 1.105 gram

Berat spesifik = 2,67

Tinggi air (head) = 50 cm

Kuantitas air yang merembes = 105 cm^3 selama 5 menit.

Diminta untuk:

- Menghitung koefisien permeabilitas k , jika pada percobaan suhu menunjukkan 23°C .
- Kecepatan aliran dan kecepatan rembesan.

Jawaban:

- $Q = 105 \text{ cm}^3$
 $t = 5 \text{ menit} = 5 \times 60 \text{ detik} = 300 \text{ detik.}$
 $L = 20 \text{ cm}$
 $h = 50 \text{ cm}$
 $A = 35 \text{ cm}^2$

$$k_T = \frac{Q.L.}{A.h.t.} = \frac{105 \times 20}{35 \times 50 \times 300} = 4 \times 10^{-3} \text{ cm / det.}$$

$T = 23^{\circ}\text{C}$ (Lihat tabel 3.6.)

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{u_T}{u_{20^{\circ}\text{C}}} \cdot k_T = \frac{9,38}{10,09} \times 4 \times 10^{-3} \text{ cm / det.}$$

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = 0,930 \times 4 \times 10^{-3} \text{ cm / det.} = 3,72 \times 10^{-3} \text{ cm / det.}$$

- Isi contoh tanah: $V = L \times A = 20 \times 35 = 700 \text{ cm}^3$

$$W_s = 1.105 \text{ gr.}$$

$$V_s = \frac{W_s}{G \cdot \gamma_w} = \frac{1,105}{2,67 \times 1} = 414 \text{ cm}^3$$

$$V_v = V - V_s = 700 - 414 = 286 \text{ cm}^3$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{286}{700} = 0,409$$

$$v = \frac{Q}{A.t.} = \frac{105}{300 \times 35} = 10^{-2} \text{ cm / det.}$$

$$v_s = \frac{v}{n} = \frac{10^{-2}}{0,409} = 2,445 \times 10^{-2} \text{ cm / det.}$$

- Dalam suatu percobaan permeabilitas dengan cara tegangan tidak tetap/menurun diperoleh data-data sebagai berikut:

Kuantitas air yang merembes : $Q = 36 \text{ cm}^3$

Suhu pada saat percobaan : $T = 26^{\circ} \text{ C}$

Lama percobaan : $T = 82 \text{ detik}$

Tinggi air mula-mula : $h_0 = 50 \text{ cm}$

Tinggi air akhir percobaan : $h_1 = 20$ cm
 Diameter contoh tanah : $D = 7,6$ cm
 Panjang contoh tanah : $L = 20,3$ cm

Tentukan harga k standar.

Jawaban:

$$k_T = 2,30 \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \log \frac{h_0}{h_1} \quad a = \frac{Q}{h_0 - h_1} = \frac{36}{30} = 1,20 \text{ cm}^2$$

$$k_T = 2,30 \frac{1,20 \times 20,3}{0,25 \times 3,14 \times 7,6^2 \times 82} \log \frac{50}{20} = 5,997 \times 10^{-3} \text{ cm / det.}$$

$$k_{20^\circ\text{C}} = 0,867 \times 5,997 \times 10^{-3} \text{ cm / det.}$$

$$k_{20^\circ\text{C}} = 5,199 \cdot 10^{-3} \text{ cm / dt}$$

3. Suatu percobaan dengan lubang bor (*slug tests*) yang di lapangan diperoleh data-data sebagai berikut:

Jari-jari sumur percobaan: $r = 0,15$ m

Tinggi muka air tanah sampai dasar lubang: $L = 3,50$ m

Kenaikan muka air di dalam lubang: $\Delta y = 0,45$ m

Waktu percobaan: $\Delta t = 8$ menit

Tinggi muka air di dalam lubang sampai permukaan air tanah:
 $y = 3,20$ m.

Tentukan koefisien permeabilitasnya.

Jawaban:

$$k = \frac{40}{\left(20 + \frac{L}{r}\right) \left(2 - \frac{Y}{L}\right)} \frac{r \Delta y}{y \Delta t}$$

$$k = \frac{40}{\left(20 + \frac{3,50}{0,15}\right) \left(2 - \frac{3,20}{3,50}\right)} \left(\frac{0,15}{3,20}\right) \left(\frac{0,45}{8}\right)$$

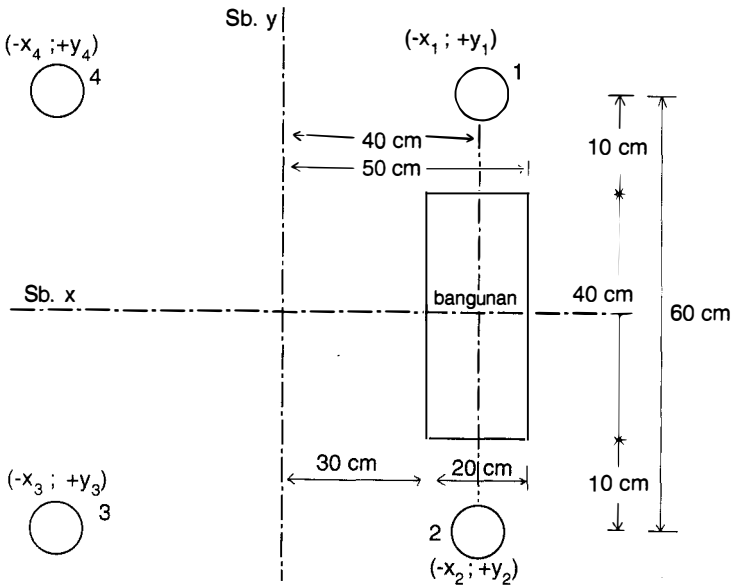
$$k = 2,24 \times 10^{-3} \text{ m/menit}$$

4. Suatu percobaan pemompaan dari sumur yang terletak pada lapisan tembus air di atas lapisan kedap air (lihat gambar. (6.19.)). Jika kedudukan air tetap sudah dicapai dan pengamatan dilakukan, diperoleh data-data sebagai berikut:
 $q = 0,45 \text{ m}^3/\text{menit}$; $h_1 = 6,0 \text{ m}$; $h_2 = 4,5 \text{ m}$; $r_1 = 45,0 \text{ m}$; $r_2 = 15,0 \text{ m}$
 Tentukan koefisien permeabilitas lapisan tembus air tersebut.

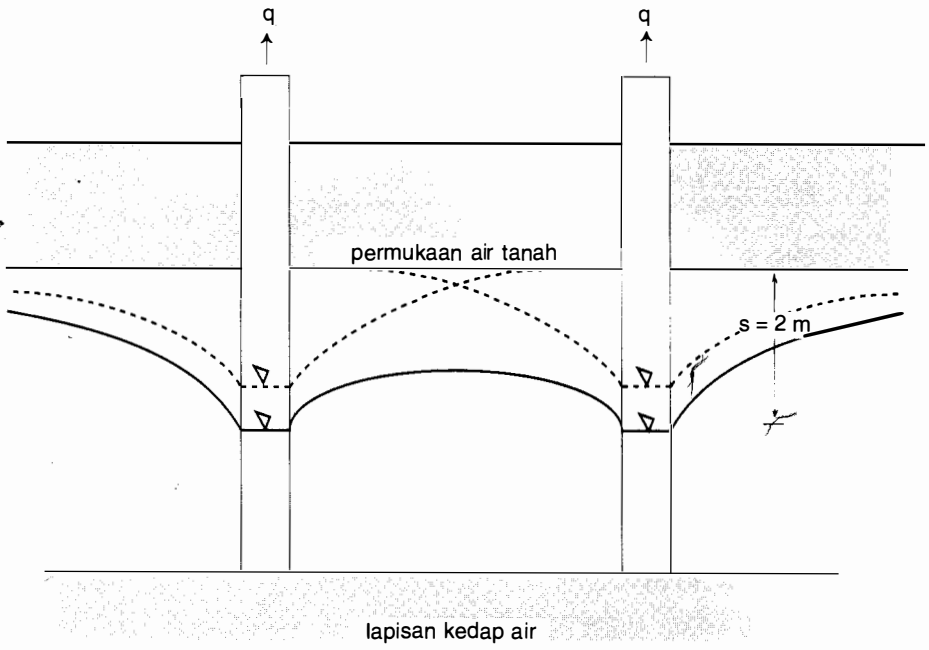
Jawaban:

$$k = \frac{2,30 q \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right)}{\pi (h_1^2 - h_2^2)}$$

$$k = \frac{2,30 \times 0,45 \times \log \left(\frac{45}{15} \right)}{\pi (6^2 - 4,5^2)} = 0,00998 \text{ m / menit.}$$



(a) Denah sumur dan bangunan



(b) Penampang melintang sumur

Gb. 6.26. Pemompaan dengan 4 sumur.

5. Sebuah bangunan terletak dekat aliran sungai. Untuk menurunkan permukaan air tanah pada bangunan tersebut diperlukan pemompaan dan digunakan 4 buah pompa seperti tampak pada gambar 6.26. Data-data lihat gambar.

Dipertanyakan:

- Di manakah titik penurunan air minimum di bawah bangunan?
- Berapakah besar debit q untuk menurunkan permukaan air tanah: $s = 2$ m, jika: $T = k.b. 100$ m²/hari?

Jawaban:

- a. Rumus:

$$s = -\frac{q}{2\pi k.b} \ln \sqrt{\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{R}}$$

Titik 1:

$$x_1 = + 40 \text{ m}$$

$$y_1 = + 30 \text{ m}$$

$$s_1 = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \ln \sqrt{\frac{(x-40)^2 + (y-30)^2}{R}}$$

Titik 2:

$$x_2 = + 40 \text{ m}$$

$$y_2 = - 30 \text{ m}$$

$$s_2 = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \ln \sqrt{\frac{(x-40)^2 + (y+30)^2}{R}}$$

Titik 3:

$$x_3 = - 40 \text{ m}$$

$$y_3 = - 30 \text{ m}$$

$$s_3 = +\frac{q}{2\pi k \cdot b} \ln \sqrt{\frac{(x+40)^2 + (y+30)^2}{R}}$$

Titik 4:

$$x_4 = - 40 \text{ m}$$

$$y_4 = + 30 \text{ m}$$

$$s_4 = +\frac{q}{2\pi k \cdot b} \ln \sqrt{\frac{(x+40)^2 + (y-30)^2}{R}}$$

$$s = s_1 + s_2 + s_3 + s_4$$

$$s = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \left\{ \ln \sqrt{\frac{(4-40)^2 + (y-30)^2}{R}} \right. \\ \left. + \ln \sqrt{\frac{(x-40)^2 + (y+30)^2}{R}} + \right. \\ \left. - \ln \sqrt{\frac{(x+40)^2 + (y+30)^2}{R}} + \right.$$

$$s = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \ln \left\{ \frac{\sqrt{(x+40)^2 + (y-30)^2}}{R} \right\}$$

$$s = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \ln \frac{\sqrt{(x-40)^2 + (y-30)^2} \times \sqrt{(x-40)^2 + (y+30)^2}}{\sqrt{(x+40)^2 + (y+30)^2} \times \sqrt{(x+40)^2 + (y-30)^2}}$$

Pada sumbu $x \rightarrow y = 0$

$$s = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \ln \frac{\sqrt{(x-40)^2 + 900} \times \sqrt{(x-40)^2 + 900}}{\sqrt{(x+40)^2 + 900} \times \sqrt{(x+40)^2 + 900}}$$

$$s = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \ln \frac{(x-40)^2 + 900}{(x+40)^2 + 900}$$

$$s = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \left[\ln \left\{ (x-40)^2 + 900 \right\} - \ln \left\{ (x+40)^2 + 900 \right\} \right]$$

$$\frac{ds}{dx} = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \left[\left\{ \frac{1}{(x-40)^2 + 900} \cdot 2(x-40) \cdot 1 \right\} + \right. \\ \left. - \left\{ \frac{1}{(x+40)^2 + 900} \cdot 2(x+40) \cdot 1 \right\} \right]$$

$$\frac{ds}{dx} = 0$$

$$0 = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \left\{ \frac{2(x-40)}{x^2 - 80x + 2500} - \frac{2(x+40)}{x^2 + 80x + 2500} \right\}$$

$$\frac{2(x-40)}{x^2 - 80x + 2500} = \frac{2(x+40)}{x^2 + 80x + 2500}$$

$$(x-40)(x^2 + 80x + 2500) = (x+40)(x^2 - 80x + 2500)$$

$$40x^2 - 100.000 = -40x^2 + 100.000$$

$$80x^2 = 200.000$$

$$x^2 = 2.500$$

$$x = 50 \text{ m.}$$

b. Penurunan muka air : $s = 2 \text{ m} \rightarrow x = 30 \text{ m}$.

$$s = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \ln \frac{(x-40)^2 + 900}{(x+40)^2 + 900}$$

$$s = -\frac{q}{2\pi k \cdot b} \ln \frac{(30-40)^2 + 900}{(30+40)^2 + 900}$$

$$s = -\frac{q}{2\pi 100} \ln \frac{1.000}{5.800}$$

$$2 = -\frac{q}{2\pi 100} (-1,7579)$$

$$q = 714,49 \text{ m}^3/\text{hari}$$

6. Pada suatu percobaan kapiler mendatar, diperoleh data-data sebagai berikut:

Pada Kondisi 1: $x_1 = 3 \text{ cm}$; $x_2 = 15 \text{ cm}$; $t_2 - t_1 = 15 \text{ men.}$; $h_1 = 5 \text{ cm}$

Pada kondisi 2: $x_1 = 18 \text{ cm}$; $x_2 = 25 \text{ cm}$; $t_2 - t_1 = 18 \text{ men.}$; $h_2 = 45 \text{ cm}$

Jika porositas tanah: $n = 0,35$, maka hitung koefisien permeabilitas dan tinggi tekanan kapiler tanah tersebut.

Perhitungan:

Pada kondisi 1:

$$\frac{(x_2^2 - x_1^2)}{(t_2 - t_1)} = \frac{2k}{n} (h_1 + h_c)$$

$$\frac{(15^2 - 3^2)}{15} = \frac{2k}{0,35} (5 + h_c)$$

$$2,52 = k (5 + h_c) \dots\dots\dots (i)$$

Pada kondisi 2:

$$\frac{(x_2^2 - x_1^2)}{(t_2 - t_1)} = \frac{2k}{n} (h_2 + h_c)$$

$$\frac{(25^2 - 18^2)}{18} = \frac{2k}{0,35} (45 + h_c)$$

$$2,93 = k (45 + h_c) \dots\dots\dots (ii)$$

Dari persamaan (i) dan (ii), dapat diperoleh:

$$k = 0,010 \text{ cm/menit dan } h_c = 245 \text{ cm.}$$

7. Untuk menentukan koefisien permeabilitas dipakai cara tidak langsung dengan menggunakan data konsolidasi. Dari hasil-hasil percobaan tersebut diperoleh data-data:

Pada tekanan awal benda uji: $P_o = 1,254 \text{ kg/cm}^2$ dan angka pori: $e_o = 0,525$

Pada akhir percobaan tekanan: $p = 2,805 \text{ kg/cm}^2$ dan angka pori: $e = 0,346$

Apabila derajat konsolidasi: $U = 50\%$, tentukan koefisien permeabilitas tanah yang bersangkutan dan tebal contoh tanah yang digunakan: $H = 2,54 \text{ cm}$, waktu percobaan:

$t = 6 \text{ jam}$ serta aliran air dapat ke atas dan ke bawah (*double drain*).

Penyelesaian:

$$\frac{\Delta e}{\Delta \sigma} = \frac{e_o - e}{p - p_o} = \frac{0,525 - 0,346}{2,805 - 1,254} = 1,154 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{gr}$$

$$t_{50} = 6 \text{ jam} = 6 \times 60 \times 60 = 21.600 \text{ det.}$$

$$k = \frac{T_v \cdot \gamma_w \cdot \Delta e \cdot (H/2)^2}{t_{50} \cdot \Delta \sigma (1 + e_o)}$$

$$k = \frac{0,197 \times 1 \times 1,154 \times 10^{-4} (2,54 / 2)^2}{21.600 (1 + 0,346)}$$

$$k = 1,26 \times 10^{-9} \text{ cm/det.}$$

Soal-soal latihan:

1. Pada suatu percobaan dengan cara tegangan tetap, diperoleh data-data sebagai berikut:

Jumlah air yang ditampung = 1.200 cm^3

Lama percobaan = 6 menit

Angka pori = 0,55
Diameter contoh tanah = 7,60 cm
Tinggi contoh tanah = 20 cm
Suhu pada saat percobaan = 28°C.

Ditanyakan:

- a. Koefisien permeabilitas standar $k_{20}^{\circ\text{C}}$
 - b. Kecepatan pengaliran : v
 - c. Kecepatan rembesan : v_s
2. Turunkan persamaan untuk menghitung koefisien permeabilitas k pada percobaan tegangan menurun dan gambarkan sketsanya. Berapakah diameter gelas pengukur (*standpipe*) yang dipakai bila diketahui:
Luas penampang contoh tanah = 15 cm²
Tinggi air akhir percobaan = 27,50 cm
Tinggi akhir percobaan = 20,00 cm
Koefisien permeabilitas : k = $0,20 \times 10^{-4}$ cm/det.
Panjang contoh tanah = 8,50 cm.
3. Dua buah sumur letaknya sejajar dengan jarak : $B = 10$ m. Jika diameter kedua sumur tersebut sama : $d_w = 30$ cm, tebal akuifer : $b = 2$ m, elevasi dasar tanah kedap air + 200,00, elevasi air pada sumur + 210,50 dan elevasi permukaan air tanah + 218,00 m serta jari-jari lingkaran pengaruh $R = 150$ m. Berapakah debit kedua sumur tersebut jika : $k = 4 \times 10^{-3}$ cm/det.
4. Sebuah tabung sumur dengan diameter = 20 cm dimasukkan ke dalam akuifer artesis setebal = 30 m. Hitung koefisien permeabilitas akuifer, jika pada debit tetap : $q = 40$ liter/det. yang diperoleh dari penurunan air : $s = H - h = 4$ m. Jari-jari lingkaran pengaruh : $R = 245$ m.
5. Dari suatu percobaan dengan sumur percobaan silinder besi diketahui : $H = 65$ cm, jari-jari sumur : $r = 30$ cm dan debit : $Q = 20$ liter/menit. Tentukan koefisien permeabilitasnya.

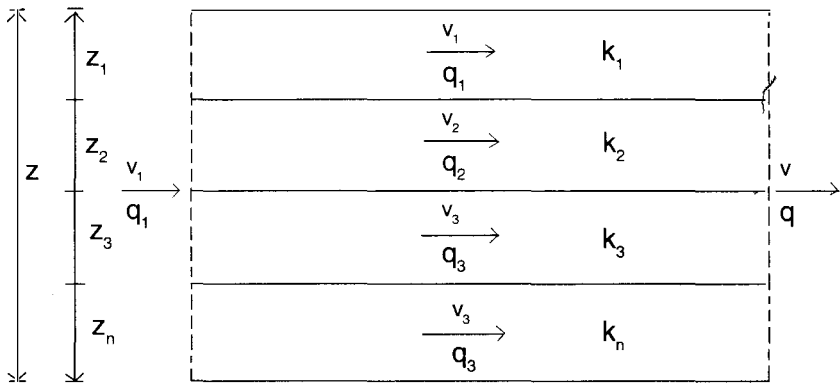
6.5. REMBESAN MELALUI BEBERAPA LAPISAN ENDAPAN TANAH

Di alam ini massa tanah biasanya terdiri dari beberapa lapis endapan, satu di atas yang lain. Bidang dasarnya mungkin mendatar, bersudut atau tegak. Tiap-tiap lapis dianggap homogen dan isotropis, masing-masing mempunyai nilai koefisien permeabilitas sendiri.

Koefisien permeabilitas rata-rata seluruh endapan tergantung arah aliran yang berhubungan dengan arah bidang dasar.

Perhitungan masing-masing kasus:

1. Rembesan ke arah mendatar



Gb. 6.27. Pengaliran melalui bidang sejajar.

Jumlah debit yang melalui endapan = jumlah debit tiap-tiap lapisan

$$q = q_1 + q_2 + q_3 \dots + q_n$$

$$q = k_x \cdot i \cdot z$$

$$q_1 = k_1 \cdot i \cdot z_1$$

$$q_2 = k_2 \cdot i \cdot z_2$$

$$q_3 = k_3 \cdot i \cdot z_3$$

$$q_n = k_n \cdot i \cdot z_n$$

$$k_x \cdot i \cdot z = k_1 \cdot i \cdot z_1 + k_2 \cdot i \cdot z_2 + k_3 \cdot i \cdot z_3 + \dots + k_n \cdot i \cdot z_n$$

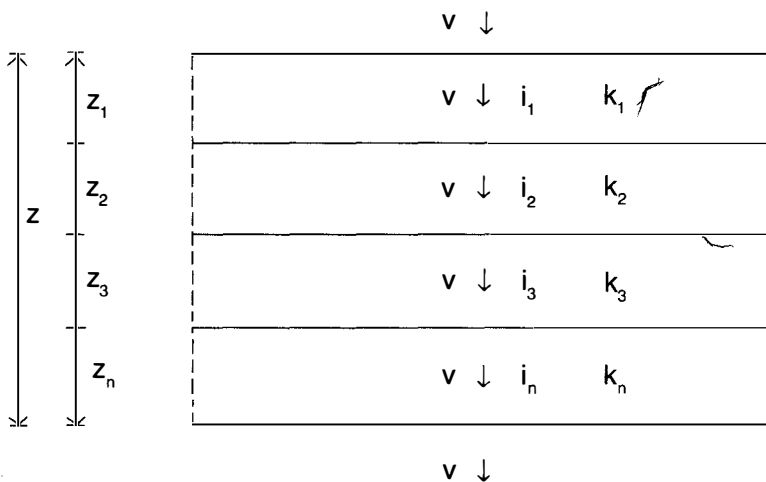
$$k_x = \frac{k_1 z_1 + k_2 z_2 + k_3 z_3 + k_n z_n}{z} \dots \dots \dots (6.52.)$$

Dalam hal ini: $z = z_1 + z_2 + z_3 + \dots + z_n$

2. Rembesan ke arah tegak

Jika kehilangan tinggi tenaga/energi (*loss of head*) melalui tiap-tiap lapisan = $h_1, h_2, h_3 \dots h_n$ dan jumlah kehilangan tinggi energi = h , maka:

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n$$



Gb. 6.28. Pengaliran melalui bidang tegak.

Berdasarkan hukum Darcy:

$$v = k \cdot i = k \cdot \frac{h}{z}$$

$$v = \frac{v \cdot z}{k} = \frac{v \cdot z}{k_z}$$

$$h_1 = \frac{v \cdot z_1}{k_1}$$

$$h_2 = \frac{v \cdot z_2}{k_2}$$

$$h_3 = \frac{v \cdot z_3}{k_3}$$

$$h_n = \frac{v \cdot z_n}{k_n}$$

$$\frac{v \cdot z}{k_z} = \frac{v \cdot z_1}{k_1} + \frac{v \cdot z_2}{k_2} + \frac{v \cdot z_3}{k_3} + \dots + \frac{v \cdot z_n}{k_n}$$

$$k_z = \frac{z}{\frac{z_1}{k_1} + \frac{z_2}{k_2} + \frac{z_3}{k_3} + \dots + \frac{z_n}{k_n}} \dots \dots \dots (6.53.)$$

Dapat diketahui di sini bahwa untuk beberapa lapisan massa tanah, bahwa : k_x nilainya selalu lebih besar dari pada k_z .

Sebagai contoh diambil tiga lapisan tanah yang mempunyai: $k_1 = 2$; $k_2 = 1$; $k_3 = 4$ satuan dan $z_1 = 4$; $z_2 = 1$; $z_3 = 2$ satuan.

Jadi $z = 4 + 1 + 2 = 7$ satuan.

Dari persamaan (6.52.), diperoleh:

$$k_x = \frac{(2 \times 4) + (1 \times 1) + (4 \times 2)}{7} = \frac{17}{7} = 2,43$$

Dari persamaan (6.53.), diperoleh:

$$k_z = \frac{7}{\frac{4}{2} + \frac{1}{1} + \frac{2}{4}} = \frac{7}{3,50} = 2$$

Jadi: $k_x > k_z$

Apabila rembesan arah mendatar dan arah tegak terjadi bersamaan, maka koefisien permeabilitas ekuivalen:

$$k_e = \sqrt{k_x \cdot k_z}$$

$$k_e = \sqrt{2,43 \times 2} = 2,20$$

Contoh soal:

Tentukan koefisien permeabilitas mendatar dan tegak, tanah yang terdiri dari tiga lapisan mendatar. Lapisan pertama dan kedua tebalnya = 0.50 meter, sedangkan lapisan ketiga tebalnya = 1 meter. Koefisien permeabilitas lapisan pertama = 10^{-3} cm/det, lapisan kedua = 2×10^{-2} cm/det. dan lapisan ketiga = 5×10^{-4} cm/det.

Berapakah koefisien permeabilitas ekuivalennya?

Jawaban:

$$z_1 = 0,50 \text{ m}$$

$$k_1 = 10^{-3} \text{ cm/det.}$$

$$z_2 = 0,50 \text{ m}$$

$$k_2 = 2 \times 10^{-2} \text{ cm/det.}$$

$$z_3 = 1,00 \text{ m}$$

$$k_3 = 5 \times 10^{-4} \text{ cm/det.}$$

$$k_x = \frac{(10^{-3} \times 0,50) + (2 \times 10^{-2} \times 0,50) + (5 \times 10^{-4} \times 1,00)}{2}$$

$$k_x = 5,50 \times 10^{-3} \text{ cm/det.}$$

$$k_z = \frac{2}{\frac{0,50}{10^{-3}} + \frac{0,50}{2 \times 10^{-2}} + \frac{1,00}{5 \times 10^{-4}}}$$

$$k_z = 0,79 \cdot 10^{-3} \text{ cm/dst.}$$

$$k_e = \sqrt{(5,50 \times 10^{-3})(0,79 \times 10^{-3})}$$

$$k_e = 2,08 \times 10^{-3} \text{ cm/det.}$$

6.6. GAYA REMBESAN

Berdasarkan geseran air yang digunakan untuk aliran melalui pori-pori tanah, maka suatu energi dipindahkan antara butir tanah dan air. Gaya tersebut sesuai dengan pemindahan energi dan disebut *gaya rembesan* atau *tekanan rembesan*.

Ditinjau tiga kasus dalam bahasan ini (Lihat gambar 6.29)

1. Gaya tanpa rembesan.
2. Gaya rembesan arah
3. Gaya rembesan arah ke bawah.

1. Gaya tanpa rembesan.

Gaya efektif pada luasan A:

$$P_1' = z \cdot \gamma' \cdot A$$

2. Gaya rembesan arah ke atas.

Gaya efektif pada luasan A dengan kedalaman z:

$$P_2' = (z \cdot \gamma' - i \cdot z \cdot \gamma_w) A$$

Gaya rembesan total:

$$J = P_1' - P_2' = i \cdot z \cdot \gamma_w \cdot A \dots \dots \dots (6.54.)$$

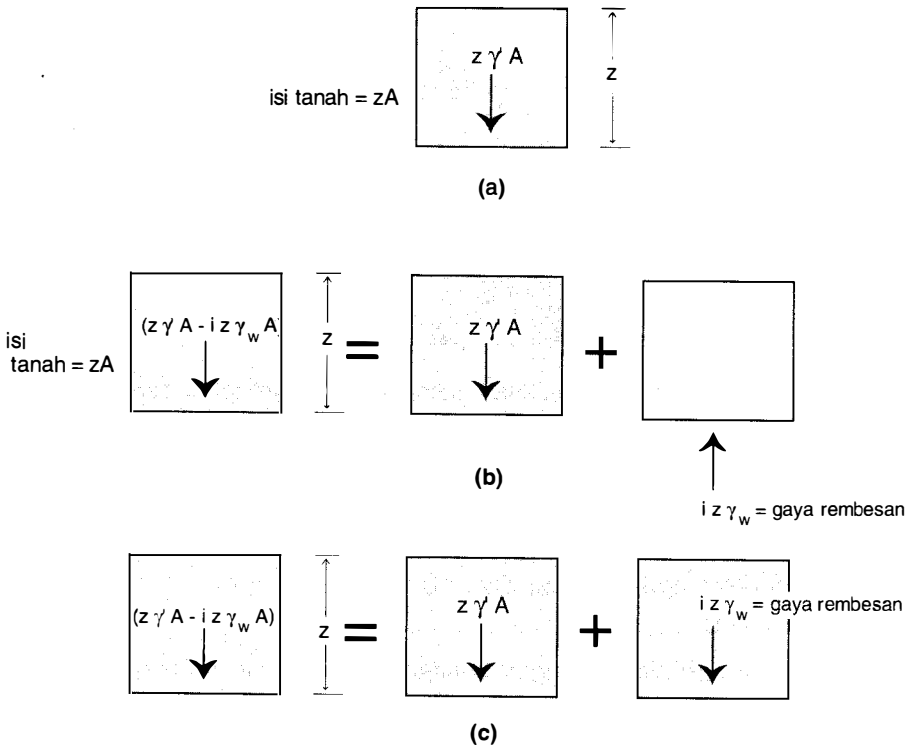
Gaya rembesan per satuan isi tanah:

$$D = \frac{P_1' - P_2'}{z \cdot A} = \frac{i \cdot z \cdot \gamma_w \cdot A}{z \cdot A} = i \cdot \gamma_w \dots \dots \dots (6.55.)$$

3. Gaya rembesan arah ke bawah.

$$P_3' = (z \cdot \gamma' + i \cdot z \cdot \gamma_w) A$$

Analog dengan butir 2. dan arah gaya ke bawah (Lihat gambar 6.29.c.)



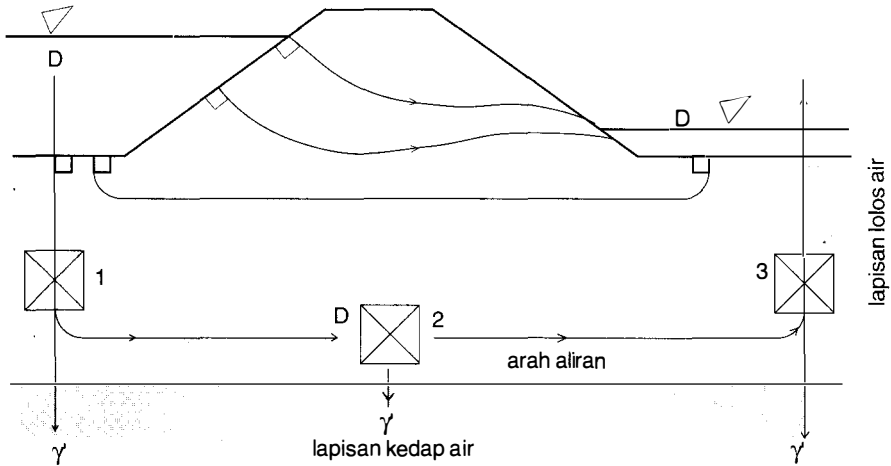
Gb. 6.29. Gaya karena (a) Tanpa rembesan (b) Rembesan ke atas dan (c) rembesan ke bawah.

6.7. PENGARUH GAYA REMBESAN TERHADAP STABILITAS TANAH

Gaya/tekanan rembesan atau tekanan hidrodinamis D dapat mempengaruhi stabilitas tanah. Tergantung pada arah alirannya, tekanan hidrodinamis dapat mempengaruhi berat isi tanah. Pengaruh hidrodinamis pada berat isi tanah karena rembesan digambarkan seperti gambar 6.30.

Pada titik 1 garis aliran mengarah ke bawah dan tegak lurus, berat isi efektif adalah:

$$\gamma_{ef.} = \gamma' + D \dots\dots\dots (i)$$



Gb. 6.30. Kondisi tekanan hidrodinamis akibat rembesan.

Pada titik 2 garis aliran mengarah mendatar dan γ' tegak lurus, maka D dan γ' saling tegak serta membentuk dua vektor dan menghasilkan resultante gaya yang miring.

Pada titik 3 arah aliran vertikal, berat isi efektifnya:

$$\gamma_{ef} = \gamma' - D \dots\dots\dots (ii)$$

Jika: $D = \gamma'$, tanah akan nampak kehilangan beratnya, sehingga menjadi tidak stabil. Keadaan demikian disebut dalam kondisi kritis, dalam hal ini terdapat gradien hidrolis kritis dengan konsekuensi kecepatan yang terjadi juga kecepatan kritis v_c , sehingga:

$$D = i_c \cdot \gamma_w \dots\dots\dots (6.56.)$$

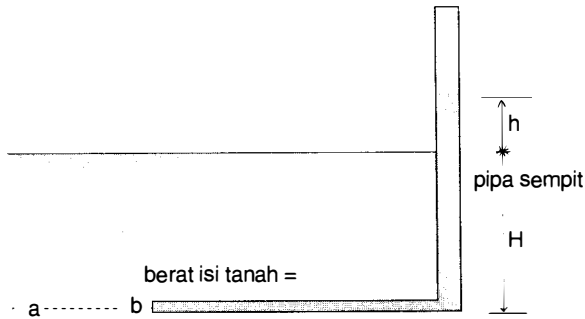
Bila kecepatan aliran melampaui kecepatan kritisnya, maka $D > \gamma'$, dan ef. dalam persamaan (ii) menjadi negatif. Keadaan ini menunjukkan bahwa tanah dalam kondisi mengapung atau terangkat ke atas (*quick condition*) atau kondisi mendidih (*boiling condition*) atau pasir mengapung (*quick sand*).

6.8. FAKTOR KEAMANAN (FK) TERHADAP BAHAYA PENGAPUNGAN

Berdasarkan tekanan/tegangan efektif dalam tanah:

Tegangan total pada a – b:

$$\sigma_{total} = \gamma \cdot H$$



Gb. 6.31. Rembesan melalui pipa sempit.

Tegangan air pori:

$$u = \gamma_w (H + h)$$

Tegangan efektif:

$$\sigma_{ef.} = \sigma_{total} - u$$

$$\sigma_{ef.} = \gamma \cdot H - \gamma_w (H + h)$$

Tegangan efektif ini dapat menurun sampai = nol. Apabila tegangan efektif = 0, maka

$$0 = \gamma \cdot H - \gamma_w (H + h)$$

$$0 = \gamma \cdot H - \gamma_w \cdot H - \gamma_w \cdot h$$

$$0 = H (\gamma - \gamma_w) - h \cdot \gamma_w$$

$$\frac{h}{H} = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w}$$

$$i = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w}$$

Gradien hidrolik ini merupakan gradien hidrolik kritis (*critical hydraulic gradient*).

$$i_c = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} \dots\dots\dots (6.57.)$$

Jadi gradien hidrolik kritis terjadi, jika tegangan efektif = 0

Oleh karena tanah dalam keadaan jenuh, maka derajat kejenuhan: $S_r = 100\% = 1$ dan berat isi tanah:

$$\gamma = \frac{\gamma_w(G + S_r \cdot e)}{1 + e}$$

$$\gamma = \frac{\gamma_w(G + e)}{1 + e} \dots\dots\dots (i)$$

Dengan memasukkan persamaan (i) ke dalam persamaan (6.57.), maka:

$$i_c = \frac{\frac{\gamma_w(G + e)}{1 + e} - \gamma_w}{\gamma_w}$$

$$i_c = \frac{\gamma_w(G + e) - \gamma_w(1 + e)}{\gamma_w(1 + e)}$$

$$i_c = \frac{G - 1}{1 + e} \dots\dots\dots (6.58.)$$

Dalam keadaan demikian akan terjadi "piping" dalam hal ini butir-butir tanah dapat terangkat ke atas, bahkan akan terjadi pula pendidihan (boiling).

Gradien hidrolis kritis didefinisikan sebagai gradien hidrolis minimum yang akan menyebabkan kondisi mengapung/piping pada jenis tanah tertentu. Untuk pasir dengan kepadatan sedang: $G = 2,65$ dan $e = 0,65$ nilai gradien hidrolis kritis:

$$i_c = \frac{G - 1}{1 + e} = \frac{2,65 - 1}{1 + 0,65} = 1$$

Dalam perencanaan konstruksi terhadap bahaya piping harus dipenuhi syarat:

$$FK \geq \frac{i_c}{i} \dots\dots\dots (6.59.)$$

Dalam hal ini:

FK = Faktor keamanan.

Harga faktor keamanan = 3 – 4.

Contoh-contoh soal:

1. Suatu tanah butir kasar mempunyai angka pori = 0,78 dan berat specific = 2,67. Hitung gradien hidrolik kritis yang akan mengakibatkan terjadinya kondisi pengapungan pasir.

Jawaban:

$$i_c = \frac{G-1}{1+e} = \frac{2,67-1}{1+0,78} = 0,94$$

2. Suatu lapisan pasir halus tebal = 2 m mempunyai berat spesifik = 2,68, angka pori = 0,90
- Tentukan tinggi tekanan air ke atas yang menyebabkan bahaya tanah mengapung.
 - Jika koefisien permeabilitas tanah pasir: $k = 1,20 \times 10^{-4}$ cm/det. pada suhu standar = 20°C, berapakah debit air yang harus dipelihara untuk mencegah kondisi kritis?
 - Jika suhu naik menjadi 32°C, berapa persen kenaikan debitnya?

Penyelesaian:

a. $i = \frac{h}{H} = \frac{G-1}{1+e}$ $H = 2$ m.; $G = 2,68$ dan $e = 0,90$

$$\frac{h}{2} = \frac{2,68-1}{1+0,90}$$

$$h = \frac{1,68}{1,90} \times 2 = 1,77 \text{ m.}$$

b. $q = k \cdot i \cdot A$ $A = 1 \text{ m}^2$; $i = \frac{h}{H} = \frac{1,77}{2,00} = 0,89$

$$q = 1,20 \times 10^{-6} \times 0,89 \times 1 = 1,07 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det.}$$

- c. Persentase kenaikan debit karena kenaikan suhu menjadi 32°C (Lihat tabel 3.6.)

$$k_{32^\circ\text{C}} = k_{20^\circ\text{C}} \frac{u_{20^\circ\text{C}}}{u_{32^\circ\text{C}}}$$

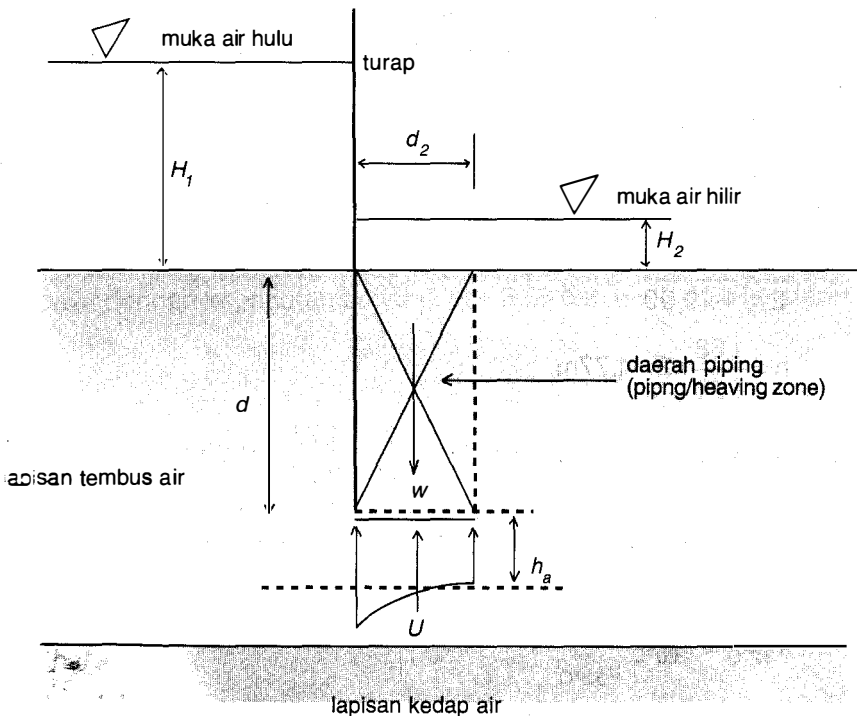
$$k_{32^\circ\text{C}} = 1,20 \times 10^{-6} \frac{10,09}{7,67} = 1,58 \times 10^{-6} \text{ m/det.}$$

Kenaikan permeabilitas:

$\Delta k (1,58 - 1,20) 100\% = 38\%$, berarti debit rembesan juga bertambah = $38\% \cdot 0,89 = 34\%$

6.9. PIPING DALAM TANAH KARENA ALIRAN SEKITAR TURAP

Gaya rembesan tiap satuan isi tanah dapat dihitung dengan memeriksa keruntuhan konstruksi turap di mana rembesan di bawah tanah yang menyebabkan piping dalam tanah pada bagian hilir (lihat gambar 6.32.). Setelah melakukan beberapa kali pengujian model, Terzaghi (1922) menyimpulkan bahwa umumnya piping terjadi pada jarak $0,50 d$ dari turap (d = kedalaman turap yang masuk ke dalam lapisan tanah tembus air). Karena itu, kita perlu menyelidiki stabilitas tanah dalam daerah berukuran $d \times 0,50 d$ seperti penampang melintang dalam gambar 6.32.



Gb. 32. Keruntuhan akibat *piping* pada sederet turap.

Faktor keamanan terhadap piping dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$FK = \frac{W'}{U} \dots\dots\dots (6.60)$$

Dalam hal ini:

W' = berat tanah basah dalam daerah piping tiap satuan lebar turap.

$$= d \times 0,50 d (\gamma_{sat} - \gamma_w) = 0,50 d^2 \gamma'$$

U = Gaya angkat ke atas karena rembesan pada isi tanah yang sama

$$U = \text{isi tanah} \times i_{av} \times \gamma_w = 0,50 d^2 \times i_{av} \times \gamma_w$$

Dalam hal ini:

i_{av} = gradien hidrolik rata-rata bungkal (blok) tanah Substitusi harga-harga W' dan U ke dalam persamaan (6.60) maka akan diperoleh persamaan faktor keamanan:

$$FK = \frac{\gamma'}{i_{av} \times \gamma_w} = \frac{d\gamma'}{h_a \times \gamma_w} \dots\dots\dots (6.61.)$$

6.10. TEORI RANGKAK (CREEP) UNTUK REMBESAN DI BAWAH BENDUNGAN

Rembesan air yang melalui bawah bendung atau konstruksi bangunan air lainnya, membahayakan stabilitas konstruksi dan mungkin akan terjadi keruntuhan disebabkan oleh:

1. Piping.
2. Tekanan air ke atas (*uplift*) langsung.
1. Keruntuhan akibat piping atau gangsiaran (*failure by piping or undermining*).

Apabila terjadi piping atau boiling di hilir bendung karena rembesan yang lewat bawah bendung, maka jika konstruksi lantai atau panjang bendung tidak mencukupi, konstruksi akan runtuh dan lantai akan patah. Untuk mengatasi hal ini ada dua teori yang membahas masalah ini yaitu:

- i. Teori rangkak Bligh (*Bligh's creep theory*).
- ii. Teori rangkak Lane (*Lane's creep theory*).

2. Keruntuhan karena uplift langsung (*failure by direct uplift*).

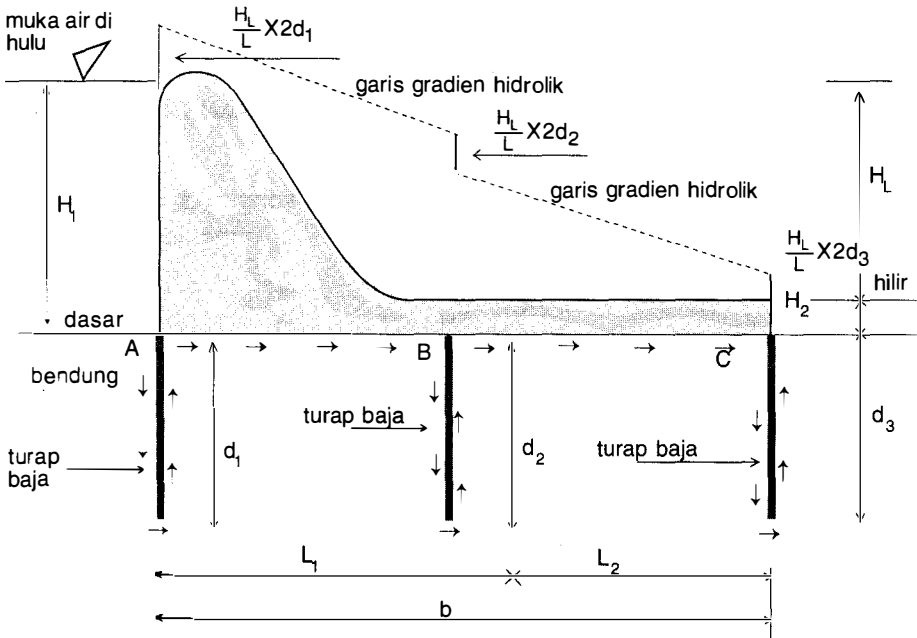
Rembesan air di bawah bendung dapat menyebabkan tekanan ke atas (uplift) pada lantai bendung. Apabila tekanan ini tidak diimbangi oleh berat sendiri lantai bendung atau beban lainnya di atasnya, maka lantai bendung akan runtuh atau patah.

i. Teori rangkai Bligh untuk rembesan di bawah bendung.

Teori rangkai Bligh menyatakan bahwa panjang rembesan air yang melalui bawah bendung dan penghalang lainnya (misalnya turap baja) disebut panjang rangkai (*the length of creep*)

Untuk jelasnya lihat gambar 6.33.

Rembesan dimulai dari titik A menurut anak panah dan berakhir di titik C.



Gb. 6.33. Konstruksi bendung dengan turap baja dan panjang rangkai (creep).

Panjang rangkai total (*Total length of creep*):

$$\begin{aligned}
 L_B &= d_1 + d_1 + L_1 + d_2 + d_2 + L_2 + d_3 + d_3 \\
 L_B &= 2 d_1 + L_1 + 2 d_2 + L_2 + 2 d_3 \\
 L_B &= L_1 + L_2 + 2 (d_1 + d_2 + d_3) \\
 L_B &= b + 2 (d_1 + d_2 + d_3) \dots\dots\dots (6.62.)
 \end{aligned}$$

Kehilangan tinggi energi tiap satuan panjang atau gradien hidrolik:

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{H_L}{L} \\
 i &= \frac{H_L}{b + 2 (d_1 + d_2 + d_3)} \dots\dots\dots (6.63.)
 \end{aligned}$$

Kehilangan tinggi energi di tiap-tiap titik:

$$\begin{aligned}
 \text{Di titik A} &: \frac{H_L}{L} \times 2d_1 \\
 \text{Di titik B} &: \frac{H_L}{L} \times 2d_2 \\
 \text{Di titik C} &: \frac{H_L}{L} \times 2d_3
 \end{aligned}$$

a. Angka/faktor keamanan terhadap piping atau gangsiaran (*Safety against piping or undermining*).

Keamanan terhadap piping, Bligh membuat rumusan sebagai berikut:

Panjang rangkai total:

$$L_B = C_B \cdot H_L \dots\dots\dots (6.64.)$$

Dalam hal ini:

- L_B = panjang rangkai total
- C_B = koefisien rangkai Bligh (*creep ratio*).
- H_L = kehilangan tinggi energi.

Tabel 6.11. Harga-harga koefisien C_B dan keamanan gradien hidrolis.

No.	Jenis	C_B	Keamanan gradien hidrolis ($1/C_B$)
1.	Pasir sangat halus atau lumpur	18	1/18
2.	Pasir halus	15	1/5
3.	Pasir kasar	12	1/12
4.	Pasir bercampur berangkal dan kerikil serta tanah lempung	5 – 9	1/5 – 1/9
5.	Pasir ringan dan lumpur	8	1/8
6.	Berangkal, kerikil dan pasir	4 – 6	1/4 – 1/6

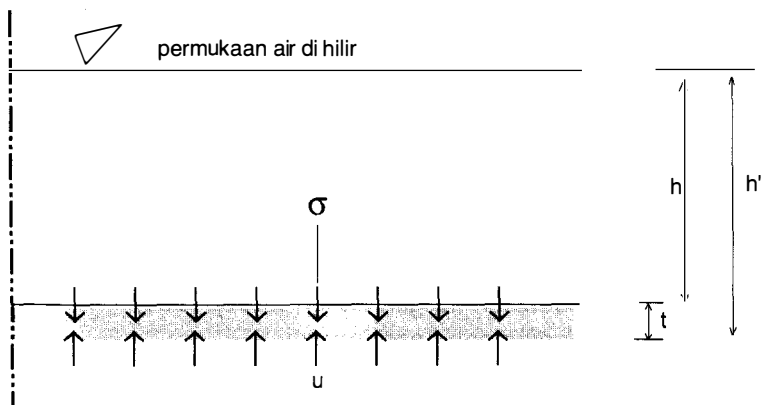
b. Keamanan terhadap tekanan air ke atas (*uplift*) (*Safety against uplift pressure*).

Tekanan ke bawah karena berat konstruksi lantai:

$$\sigma = \gamma_w \cdot G \cdot t \dots\dots\dots (i)$$

Tekanan air ke atas (*uplift*):

$$u = \gamma_w \cdot h' \dots\dots\dots (ii)$$



Gb. 6.34. Diagram tekanan pada lantai bendung.

Dalam hal ini:

G = berat spesifik bahan lantai.

Dalam kondisi setimbang:

Persamaan (i) = Persamaan (ii)

$$\gamma_w \cdot G \cdot t = \gamma_w \cdot h'$$

$$G \cdot t = h'$$

$$G \cdot t = h + t$$

$$G \cdot t - t = h$$

$$t(G - 1) = h$$

$$t = \frac{h}{G-1} \dots\dots\dots (6.65.)$$

Jika tinggi muka air di atas lantai h diketahui demikian juga G , maka tebal lantai = t dapat dihitung.

Dalam praktek Bligh membuat rumusan sebagai berikut:

$$t = 1,33 \left(\frac{h}{G-1} \right) \dots\dots\dots (6.66.)$$

ii. Teori rangkai Lane (*Lane's weighted creep theory*).

Lane pada dasarnya mendukung teori Bligh, tetapi juga memperbaiki teori Bligh. Lane sependapat bahwa aliran air itu mungkin/ dapat melalui garis kontak (garis creep), karena ada kemungkinan bahwa lintasan air dapat mencapai tempat yang perlawanannya lebih lemah.

Di bawah fondasi/lantai bendung, besar kemungkinannya merupakan garis lintasan terlemah karena akan sukar didapat ikatan yang erat antara tanah dan dasar fondasi. Di sini Lane menggunakan garis berat rangkai (*weight creep*) dan dibedakan antara rangkai vertikal dan rangkai mendatar di mana yang vertikal lebih berat. Lane mengemukakan bahwa yang vertikal 3 kali lebih berat daripada yang mendatar (vertikal = 3 kali mendatar) dan untuk garis yang miringnya lebih dari 45° dianggap vertikal dan yang kurang dari 45° dianggap mendatar.

Panjang total rangkai menurut Lane:

$$L_L = (d_1 + d_1) + \frac{1}{3}L_1 + (d_2 + d_2) + \frac{1}{3}L_2 - (d_3 + d_3)$$

$$L_L = \frac{1}{3}(L_1 + L_2) + 2(d_1 + d_2 + d_3)$$

$$L_L = \frac{1}{3}b + 2(d_1 + d_2 + d_3) \dots\dots\dots (6.67.)$$

Untuk keamanan terhadap piping Lane membuat rumusan sebagai berikut:

$$L_L = C_L \cdot H_L \dots\dots\dots (6.68.)$$

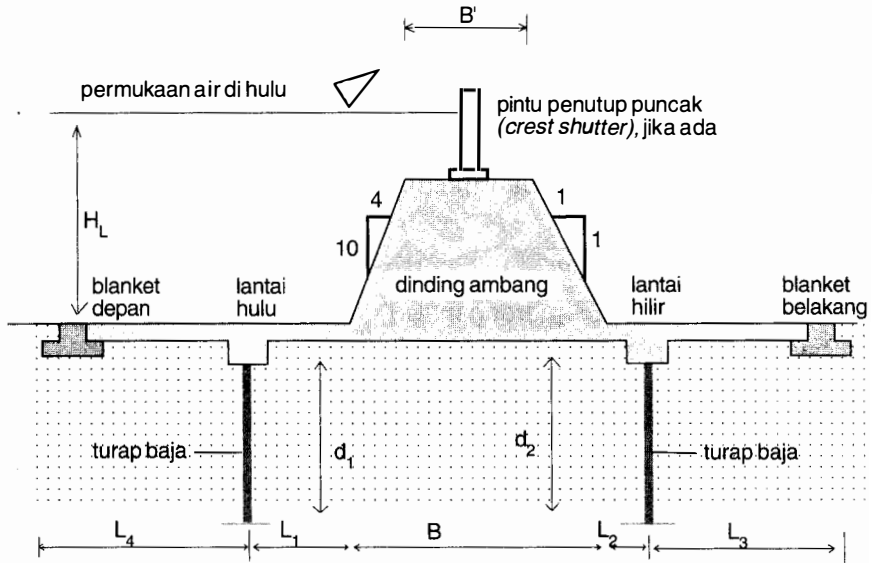
Dalam hal ini:

- L_L = panjang total rangkai Lane
- C_L = koefisien rangkai Lane (*creep ratio*)
- H_L = kehilangan tinggi energi.

Tabel 6.12. Harga-harga koefisien C_L dan keamanan gradien hidrolis.

No.	Jenis tanah	C_L	Keamanan gradien Hidrolik ($1/C_L$)
1.	Pasir sangat halus atau lumpur	8,50	1/8,50
2.	Pasir halus	7,00	1/7,00
3.	Pasir sedang	6,00	1/6,00
4.	Pasir kasar	5,00	1/5,00
5.	Kerikil halus	4,00	1/4,00
6.	Kerikil sedang	3,50	1/3,00
7.	Kerikil kasar termasuk batu	3,00	1/3,00
8.	Berangkal dengan sedikit batu dan kerikil	2,50	1/2,50
9.	Tanah berlempung	1,60–3	1/1,60 – 1/3,00

6.11. PERENCANAAN KONSTRUKSI BERDASAR TEORI BЛИGH



Gb. 6.35. Konstruksi bendung dengan blanket.

1. Perencanaan lantai bendung dan blanket.

Rumus-rumus yang digunakan:

i) Dengan pintu penutup puncak.

$$L_2 = 2,21C_B \sqrt{\frac{H_L}{13}} \dots\dots\dots (6.69.)$$

ii) Tanpa pintu penutup puncak.

$$L_2 = 22,1C_B \sqrt{\frac{H_L}{10}} \dots\dots\dots (6.70.)$$

iii) Dengan pintu penutup puncak.

$$L_2 + L_3 = 18C_B \sqrt{\frac{H_L}{13} \times \frac{q}{15}} \dots\dots\dots (6.71.)$$

iv) Tanpa pintu penutup puncak.

$$L_2 + L_3 = 18C_B \sqrt{\frac{H_L}{13} \times \frac{q}{15}} \dots\dots\dots (6.72.)$$

Dalam hal ini:

- L_2 = panjang lantai bendung di hilir.
- L_3 = panjang blanket belakang (hilir).
- C_B = *creep ratio bligh*.
- H_L = kehilangan tinggi energi.
- q = kuantitas rembesan tiap satuan lebar.

Panjang blanket depan (hulu) diambil setengah panjang blanket belakang (hilir).

$$L_4 = 0,50 L_3 \dots\dots\dots (6.73.)$$

Dalam praktek untuk merencanakan konstruksi tersebut, apabila ada bagian pintu: pintu bawah (*undersluices*) pada ambang, maka rumus-rumus (6.69) sd. (6.72.) dimodifikasi sebagai berikut:

i) Untuk "undersluices" dengan penutup puncak.

$$L_2 = 3,87 C_B \sqrt{\frac{H_L}{13}} \dots\dots\dots (6.74.)$$

ii) Untuk "undersluices" tanpa penutup puncak.

$$L_2 = 3,87 C_B \sqrt{\frac{H_L}{10}} \dots\dots\dots (6.75.)$$

iii) Untuk "undersluices" dengan penutup puncak.

$$L_2 + L_3 = 27C_B \sqrt{\frac{H_L}{13} \times \frac{q}{75}} \dots\dots\dots (6.76.)$$

iv) Untuk "undersluices" tanpa penutup puncak.

$$L_2 + L_3 = 27C_B \sqrt{\frac{H_L}{10} \times \frac{q}{75}} \dots\dots\dots (6.77.)$$

2. Perencanaan dinding ambang

Untuk perencanaan dinding ambang digunakan rumus:

i) Lebar puncak.

$$B' = \frac{H}{\sqrt{G-1}} \dots\dots\dots (6.78.)$$

ii) Lebar dasar.

$$B = \frac{H + \text{tinggi ambang}}{\sqrt{G-1}} \dots\dots\dots (6.79.)$$

Dalam hal ini:

B' = lebar puncak ambang, biasanya diambil = 1,50 – 1,80 meter.

B = lebar dasar.

H = tinggi air yang melimpah pada puncak ambang pada waktu banjir maksimum.

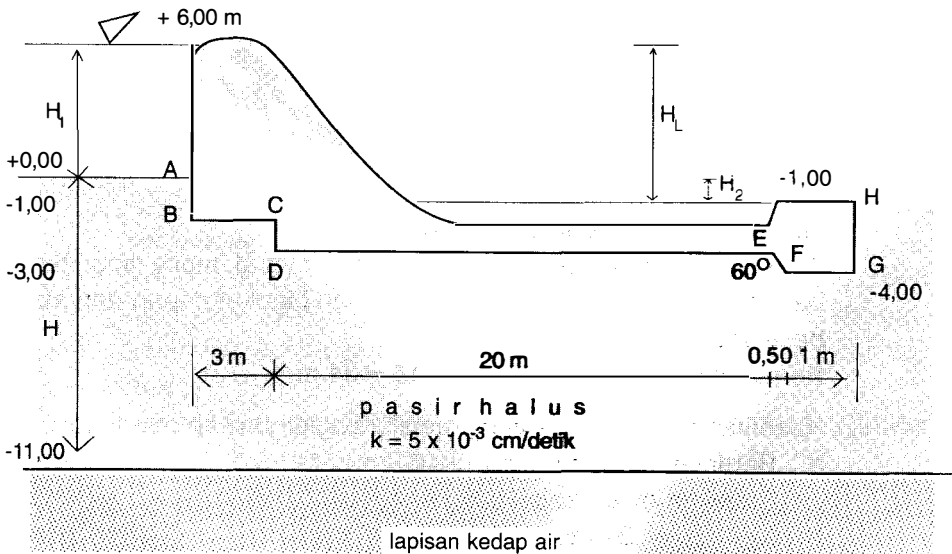
G = berat spesifik bahan yang dipakai.

Contoh-contoh perhitungan:

1. Suatu bendung konstruksi beton dengan penampang dan ukuran seperti tampak dalam gambar 6.36. Bendung terletak pada lapisan tanah pasir halus dengan koefisien permeabilitas: $k = 5 \times 10^{-3}$ cm/detik.

Ditanyakan:

- i. Apakah konstruksi bendung cukup aman terhadap piping berdasarkan teori Bligh dan Lane? Apabila tidak aman apa usaha anda untuk mengatasinya?
- ii. Berapa kuantitas rembesan air yang melalui bagian bawah tubuh bendung tersebut?



Gb. 6.36. Penampang bendung konstruksi beton.

Jawaban:

- i. Berdasarkan teori Bligh.

Tanah pasir halus: $C_B = 15$

$$\begin{aligned} L_{B \text{ syarat}} &= C_B \cdot H_L \rightarrow H_L = H_1 + H_2 \\ &= (15)(7) \quad H_L = 6 + 1 = 7 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{\text{yang ada}} &= AB + BC + DE + EF + FG + GH \\ &= 1 + 3 + 2 + 20 + 1 + 1 + 3 \\ &= 31 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$L_{\text{yang ada}} < L_{B \text{ syarat}}$$

Jadi bendung tidak aman terhadap pipping.

Agar supaya aman konstruksi perlu di beri tambahan turat di bawah bendung atau blanket depan dan/atau belakang.

Jadi penambahan panjang: $L = 105 - 31 = 74 \text{ m}$, agar bendung aman terhadap pipping.

Berdasarkan teori Lane.

Tanah pasir halus: $C_L = 7$

$$L_{L \text{ syarat}} = C_L \cdot H_L = (7) (7) = 49 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} L_{\text{yang ada}} &= AB + \frac{BC}{3} + CD + \frac{DE}{3} + EF + \frac{FG}{3} + GH \\ &= 1 + \frac{3}{3} + 2 + \frac{20}{3} + 1 + \frac{1}{3} + 3 \\ &= 15 \text{ m} \end{aligned}$$

$$L_{\text{yang ada}} < L_{L \text{ syarat}}$$

Jadi bendung tidak aman terhadap pipping.

Agar aman dan panjang *creep* memenuhi syarat, maka diberi tambahan turap di bawah bendung atau/dan blanket depan dan/atau belakang.

Penambahan panjang: $L = 49 - 15 = 34 \text{ m}$.

- ii. Kuantitas rembesan air yang melalui bagian bawah bendung:

- a. Berdasarkan teori Bligh.

Sebelum diperpanjang:

$$L_{\text{yang ada}} = 31 \text{ m}$$

$$H_L = 7 \text{ m}$$

$$k = 5 \times 10^{-3} \text{ cm/det.} = 5 \times 10^{-5} \text{ m/det.}$$

$$i = \frac{H_L}{L} = \frac{7}{31} = 0,226$$

$$H = 11 - 1 = 10 \text{ m}$$

$$q = k.i.H = 5 \times 10^{-5} \times 0,226 \times 10$$

$$q = 1,13 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{det./m}$$

b. Sesudah diperpanjang.

$$L_{\text{yang ada}} = 105 \text{ m}$$

$$i = \frac{H_L}{L} = \frac{7}{105} = 0,067$$

$$q = k.i.H = 5 \times 10^{-5} \times 0,067 \times 10$$

$$q = 0,34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{det./m}$$

c. Berdasarkan teori Lane.

Sebelum diperpanjang:

$$L_{\text{yang ada}} = 15 \text{ m}$$

$$i = \frac{H_L}{L} = \frac{7}{15} = 0,467$$

$$q = k.i.H = 5 \times 10^{-5} \times 0,467 \times 10$$

$$q = 2,34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{det./m}$$

d. Sesudah diperpanjang:

$$L_{\text{yang ada}} = 49 \text{ m}$$

$$i = \frac{H_L}{L} = \frac{7}{49} = 0,143$$

$$q = k.i.H = 5 \times 10^{-5} \times 0,143 \times 10$$

$$q = 0,72 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{det./m}$$

Kesimpulan:

Berdasarkan teori Bligh maupun teori Lane setelah panjang creep memenuhi syarat-syarat Bligh dan Lane, maka kuantitas air rembesan melalui bagian bawah bendung menjadi lebih kecil dari semula.

Berdasarkan teori Bligh berkurang = 69,91% dan berdasarkan teori Lane kuantitas air rembesan berkurang sebesar = 69,23%.

2. Sebuah bendung mempunyai data-data teknis sebagai berikut:

- Tanah dasar terdiri dari pasir kasar : $C_B = 12$
- Debit banjir : $Q = 300 \text{ m}^3/\text{det.}$
- Panjang ambang (tegak lurus gambar) : $L = 40 \text{ m}$

- Tinggi ambang di bawah muka air : $H_1 = 2 \text{ m}$
- Tinggi pintu penutup puncak : $h_2 = 0,60 \text{ m}$
- Lebar puncak ambang : $B' = 2 \text{ m}$
- Lebar dasar ambang : $B = 3,50 \text{ m}$

Rencana panjang dan tebal lantai bendung (apron) dan gambarkan penampang melintang bendung tersebut.

Penyelesaian:

$$H_L = h_1 + h_2 = 2 + 0,60 = 2,60 \text{ m}$$

Panjang total rangkai/creep:

$$L_B = C_B \cdot H_L = 12 \times 2,60 = 31,20 \text{ m}$$

Panjang lantai di hilir:

$$L_2 = 2,21 \text{ CB} \sqrt{\frac{H_L}{13}}$$

$$L_2 = 2,21 \times 12 \sqrt{\frac{2,60}{13}}$$

$$L_2 = 2,21 \times 12 \times 0,447 = 11,85 \text{ m} \sim 12 \text{ m}$$

Lebar dasar ambang: $B = 3,50 \text{ m}$

Untuk menghitung tinggi air yang melimpah di atas puncak ambang dipakai rumus:

$$Q = C.L.H^{1,50} \rightarrow \text{Koefisien debit: } C = 1,70$$

$$300 = 1,70 \times 40 \times H^{1,50}$$

$$H^{1,50} = \frac{300}{1,70 \times 40} = 4,41$$

$$H = 2,69 \text{ m}$$

Jadi tinggi total: $H_{\text{total}} = 2,00 + 2,69 = 4,69 \text{ m}$ dari dasar.

Kedalaman bersih cara Lacey (*Lacey's regime scoured depth*)

$$R = 1,35 \left(\frac{q^2}{f} \right)^{1/3} \rightarrow f = \text{faktor lumpur.}$$

$$R = 1,35 \left(\frac{7,50^2}{1} \right)^{1/3} \quad \text{Dianggap: } f = 1$$

$$R = 1,35 \times 3,83 = 5,17 \text{ m}$$

Kedalaman turap baja di hulu:

$$D_f = 1,50 R = 1,50 \times 5,17 = 7,76 \text{ m}$$

Kedudukan dasar turap baja di hulu:

$$D_s = 4,68 - 7,76 = -3,08 \text{ dibulatkan} = -3,00 \text{ m}$$

$$\text{Analog untuk turap baja di hilir} = -3,00 \text{ m}$$

Panjang total creep dihitung dari ujung kaki ambang depan:

$$L = L_2 + B + 2 d_2 + 2 d_1$$

$$L = 12 + 3,50 + 2 \times 3 + 2 \times 3 = 27,50 \text{ cm}$$

Agar seimbang, maka panjang lantai di hulu:

$$L_1 = L_B - L = 31,20 - 27,50 = 3,70 \text{ dibulatkan} = 5 \text{ m}$$

Jadi panjang total creep sekarang menjadi:

$$LB = 27,50 + 5 = 32,50 \text{ m}$$

Panjang blanket belakang:

$$L_2 + L_3 = 18 C_B \sqrt{\frac{H_L}{13} \times \frac{q}{75}}$$

$$L_2 + L_3 = 18 \times 12 \sqrt{\frac{2,60}{13} \times \frac{7,50}{75}}$$

$$L_2 + L_3 = 30,46$$

$$L_3 = 30,46 - 12 = 18,46 \text{ m dibulatkan} = 20 \text{ m}$$

Panjang blanket depan:

$$L_4 = 0,50 L_3 = 0,50 \times 20 = 10 \text{ m}$$

Perhitungan tebal lantai bendung:

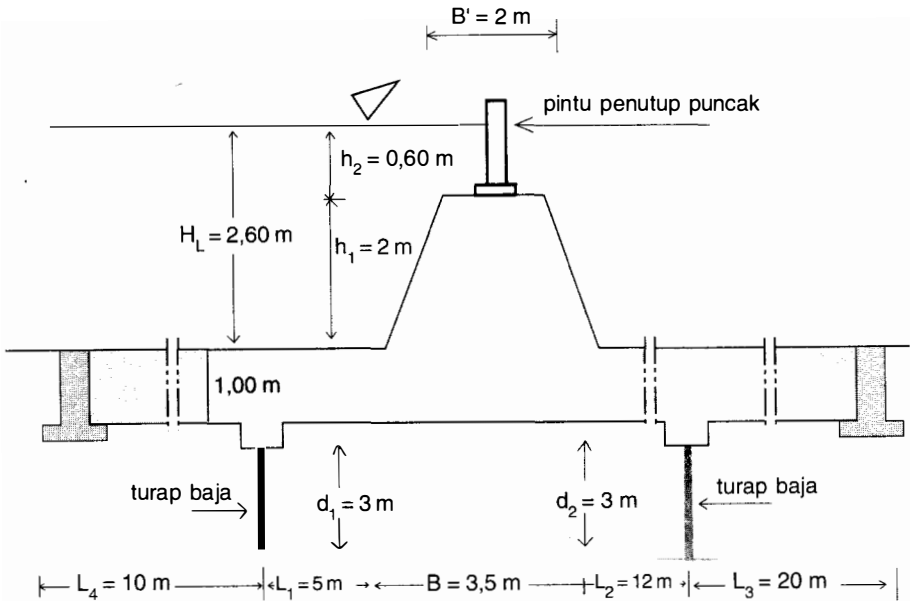
$$t = 1,33 \left(\frac{h}{G-1} \right) \rightarrow G = 2,40 \text{ (Anggapan)}$$

$$t = 1,33 \left(\frac{0,96}{2,40-1} \right) \quad h = \frac{H_L}{L_B} \times 2(d_1 - d_2)$$

$$t = 1,33 \times 0,69 = 0,92 \text{ m} \quad h = \frac{2,60}{32,50} \times 12 = 0,96 \text{ m}$$

$$t = 1,00 \text{ m}$$

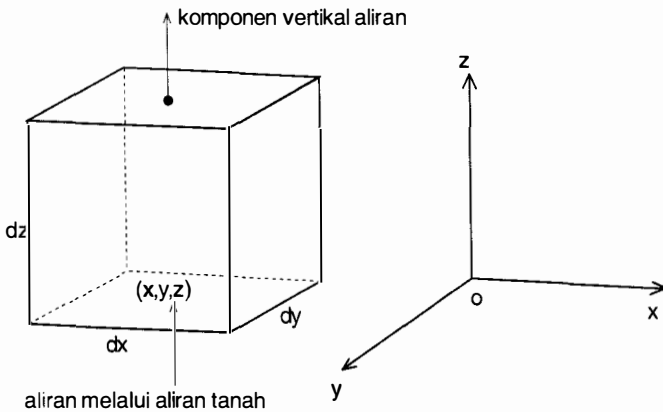
Jadi tebal lantai bendung: $t = 1,00 \text{ m}$.



Gb. 6.37. Sketsa penampang melintang bendung.

6.12. RUMUS-RUMUS DASAR PENGALIRAN DALAM TANAH (Basic equation for flow in soil).

Untuk menurunkan rumus-rumus dasar ini diambil contoh tanah (elemen tanah) berbentuk kubus seperti gambar 6.38.



Gb. 6.38. Aliran melalui elemen tanah tiga matra/dimensi.

Kuantitas aliran: q ke arah x , y dan z .

$$q = q_x + q_y + q_z \dots \dots \dots (6.80.)$$

Berdasarkan hukum Darcy:

Kuantitas aliran masuk melalui dasar kubus:

$$q_{\text{masuk}} = q_i$$

$$(q_z)_i = k_z \cdot i \cdot a \dots \dots \dots (6.81.)$$

Dalam hal ini:

$$a = \text{luas alas kubus} = (dx) (dy)$$

$$i = \frac{\partial h}{\partial z} \rightarrow \text{arah ke atas (-)}$$

$$(q_z)_i = k_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) (dx) (dy)$$

Kuantitas aliran yang keluar pada bagian atas elemen tanah:

$$q_{\text{keluar}} = q_o$$

$$(q_z)_o = \left(k_z + \frac{\partial k_z}{\partial z} dz \right) \left(-\frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) (dx) (dy) \dots \dots \dots (6.82.)$$

Dalam hal ini:

k_z = koefisien permeabilitas arah sumbu z pada titik (x, y, z)

h = tinggi energi total (*total head*)

$$\Delta q_z = (q_z)_i - (q_z)_o$$

$$= k_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) (dx) (dy) - \left(k_z + \frac{\partial k_z}{\partial z} dz \right) \left(-\frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) (dx) (dy)$$

$$\Delta q_z = \left(k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} - \frac{\partial k_z}{\partial z} \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial k_z}{\partial z} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) (dx) (dy) (dz) \dots \dots \dots (6.83.)$$

Untuk koefisien permeabilitas tetap:

$$\frac{\partial k_z}{\partial z} = 0, \text{ maka:}$$

$$\Delta q_z = \left(k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) (dx)(dy)(dz) \dots\dots\dots (6.84.)$$

Analog terhadap sumbu x:

$$\Delta q_x = \left(k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) (dx)(dy)(dz) \dots\dots\dots (6.85.)$$

Untuk aliran bermatra dua: $q_y = 0$, sehingga:

$$\Delta q = \Delta q_x + q_z \dots\dots\dots (6.86.)$$

$$\Delta q = \left(k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) (dx)(dy)(dz) \dots\dots\dots (6.87.)$$

Isi air dalam elemen tanah:

$$V_w = \frac{S_r \cdot e}{1 + e} (dx)(dy)(dz) \dots\dots\dots (6.88.)$$

$$\Delta q = \frac{\partial V_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_r \cdot e}{1 + e} dx \cdot dy \cdot dz \right)$$

Jika: $\frac{dx \cdot dy \cdot dz}{1 + e} =$ isi butir tanah tetap, maka:

$$\Delta q = \frac{dx \cdot dy \cdot dz}{1 + e} \frac{\partial (S_r \cdot e)}{\partial t} \dots\dots\dots (6.89.)$$

Persamaan (6.87.) = Persamaan (6.89.)

$$\left(k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx \cdot dy \cdot dz = \frac{dx \cdot dy \cdot dz}{1 + e} \frac{\partial (S_r \cdot e)}{\partial t}$$

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1 + e} \frac{\partial (S_r \cdot e)}{\partial t} \dots\dots\dots (6.90.)$$

Persamaan (6.90.) ini merupakan persamaan dasar aliran laminar dalam tanah bermatra dua.

Persamaan ruas kanan di mana terdapat e dan S_r dapat terjadi empat macam kemungkinan tipe aliran:

1. e dan S_r keduanya tetap
2. e variabel dan S_r tetap
3. e tetap dan S_r variabel
4. e dan S_r variabel.

Tipe 1 = aliran tetap (*steady flow*).

Tipe 2, 3 dan 4 = aliran tidak tetap (*unsteady flow*).

Untuk aliran tetap (*steady flow*), di mana e dan S_r tetap, maka:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (6.91.)$$

Jika koefisien permeabilitas dalam segala arah sama, di mana: $k_x = k_z$, maka:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (6.92.)$$

Persamaan (6.92. disebut persamaan Laplace.

Catatan:

Persamaan dasar aliran laminer tersebut berlaku untuk tanah-tanah yang homogen dan isotropis, artinya aliran dapat mengalir ke segala arah baik vertikal maupun mendatar dan pada bidang bersifat tidak homogen (*non homogeneous*) dan tidak isotropis (anisotropis).

(Isotropis = mempunyai sifat-sifat elastis yang sama dalam semua arah). Pada kedalaman lapisan sedalam = 55 meter, koefisien permeabilitas bervariasi antara:

$$k = 3 \times 10^{-5} \text{ cm/detik dan } k = 2 \times 10^{-7} \text{ cm/detik.}$$

Tanah yang tidak isotropis (*anisotropic soil*).

Persamaan Laplace:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 h}{(k_z / k_x) \partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (6.93.)$$

Jika: $(k_z/k_x)^{1/2} x = x_T$, maka:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x_T^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (6.94.)$$

Dalam hal ini:

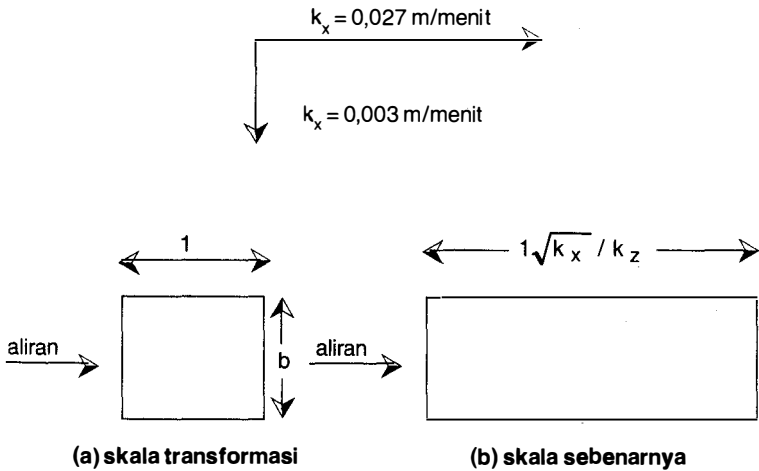
x_T = harga x yang sudah ditransformasi/diubah. Untuk anah anisotropic berlaku:

$$k_e = \sqrt{k_x \cdot k_z} \dots\dots\dots (6.95.)$$

Dalam hal ini:

- k_e = koefisien permeabilitas ekivalen
- k_x = koefisien permeabilitas mendatar arah sumbu x
- k_z = koefisien permeabilitas vertikal arah sumbu z.

Bukti persamaan (6.95.)



Gb. 6.39. Skala transformasi dan skala sebenarnya.

Penampang transformasi:

Kuantitas aliran yang melalui penampang:

$$q_T = k_e \cdot i \cdot a = k_e \frac{\Delta h}{1} \cdot b \rightarrow b = 1$$

$$q_T = k_e \cdot \Delta h \dots\dots\dots (i)$$

Penampang sebenarnya

$$q_N = k_e \cdot i \cdot a = k_x \frac{\Delta h}{1 \sqrt{k_x/k_z}} \cdot b \rightarrow b = 1$$

$$q_N = k_x \frac{\Delta h}{\sqrt{k_x/k_z}} \dots\dots\dots (ii)$$

Apabila persamaan (i) = Persamaan (ii), maka:

$$q_T = q_N$$

$$k_e \Delta h = k_x \frac{\Delta h}{\sqrt{k_x/k_z}}$$

$$k_e = \frac{k_x \sqrt{k_z}}{\sqrt{k_x}}$$

$$k_e = \sqrt{k_x \cdot k_z} \quad (\text{terbukti})$$

Contoh soal:

Rembesan melalui lapisan tanah tidak homogen.

Diketahui:

Susunan tanah A dan B yang tersusun mendatar sejajar. Gambar 6.40 (a).

$k_A = 0,10$ m/menit; $k_B = 0,01$ m/menit.

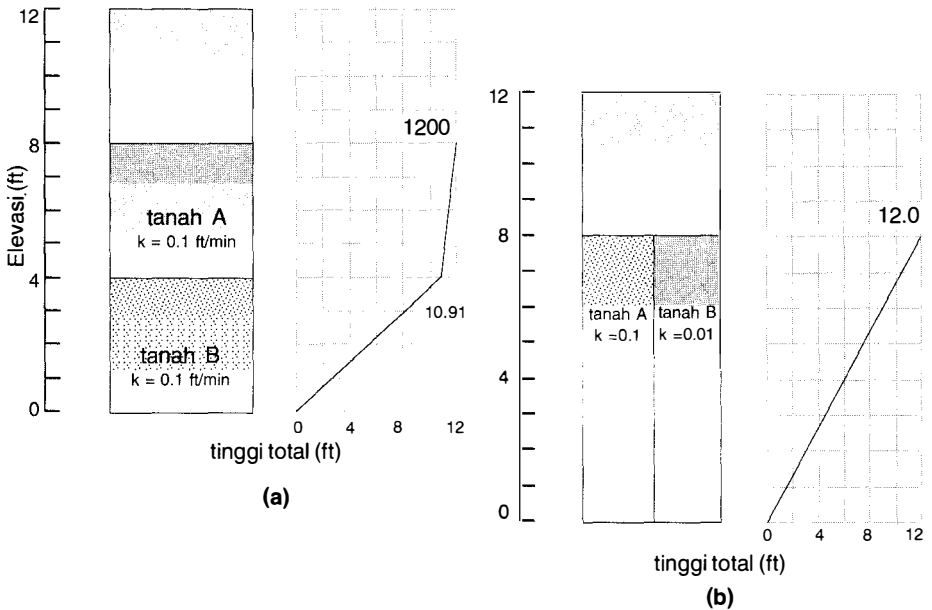
Tabung berbentuk bujur sangkar dengan luas = 4×4 m²

Susunan tanah A dan B yang tersusun vertikal sejajar. Gambar 6.40 (b).

$k_A = 0,01$ m/menit; $k_B = 0,01$ m/menit

Luas tabung : A = 4×4 m²; b = 4 m.

Selidiki kuantitas air yang melalui susunan tanah tersebut.



Gb. 6.40. Rembesan melalui tanah tidak homogen.

Jawaban:

Gambar 6.40 (a).

Tanah A:

$$k_A = 0,10 \text{ m/menit}$$

$$h_A = (12 - 10,91) = 1,09 \text{ m}$$

$$b = 4 \text{ m (lebar contoh tanah)}$$

$$h = (8 - 4) = 4 \text{ m (tebal tanah)}$$

$$Q_A = k_A \frac{h_A}{h} A = (0,10) \frac{1,09}{4} (4) = 0,109 \text{ m}^3 / \text{menit} / \text{m}.$$

Tanah B:

$$k_B = 0,01 \text{ m/menit}$$

$$h_B = 1,09 \text{ m}$$

$$h = 4 \text{ m}$$

$$A = 4 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$Q_B = k_B \frac{h_B}{h} A = (0,01) \frac{1,09}{4} (4) = 0,109 \text{ m}^3 / \text{menit} / \text{m}.$$

$$\text{Jadi : } Q_A = Q_B$$

Gambar 6.40 (b).

Tanah A:

$$K_A = 0,01 \text{ m/menit}$$

$$H_A = 12 \text{ m}$$

$$h = 8 \text{ m}$$

$$A = 2 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$Q_A = k_A \frac{h_b}{h} A = (0,01) \frac{12}{8} (2) = 0,40 \text{ m}^3 / \text{menit} / \text{m}$$

Tanah B:

$$k_B = 0,01 \text{ m/menit}$$

$$h_B = 12 \text{ m}$$

$$h = 8 \text{ m}$$

$$A = 2 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$Q_B = k_B \frac{h_B}{h} A = (0,01) \frac{12}{8} (2) = 0,03 \text{ m}^3 / \text{menit} / \text{m}.$$

Jadi: $Q_A \neq Q_B$

Kesimpulan:

Dari hasil perhitungan tersebut dapat diambil kesimpulan, bahwa tanah dengan susunan seperti gambar 6.40 (a) mempunyai kuantitas rembesan sama, sedangkan tanah dengan susunan seperti gambar 6.40. (b) kuantitas rembesan yang melalui tanah A dan B tidak sama dan ini tergantung sifat-sifat tanah masing-masing.

Kuantitas rembesan total:

$$Q_{\text{total}} = Q_A = Q_B = (\text{tetap}) \quad \rightarrow \quad \text{Gambar 6.40. (a).}$$

$$Q_{\text{total}} = Q_A + Q_B \quad \text{Gambar 6.40. (b)}$$

6.13. JARING-JARING ALIRAN (*FLOW NETS*)

1. Pendahuluan.

Persamaan Laplace (6.92.) dalam tanah isotropis menggambarkan dua kurva orthogonal yaitu: *garis aliran* dan *garis ekipotensial*.

Garis aliran ialah garis sepanjang aliran air yang mengalir dari hulu ke hilir melalui tanah yang tembus air.

Garis ekitensial ialah garis yang mempunyai tinggi tekanan yang sama sepanjang garis tersebut.

Gabungan/kombinasi jumlah garis-garis aliran dan ekitensial disebut *jaring-jaring aliran (flow nets)*. Gambar 6.41. (a) menggambarkan garis aliran dan garis ekitensial sedangkan gambar 6.41. (b) menggambarkan garis-garis aliran dan ekitensial lengkap rembesan air melalui sekeliling turap. Gambar 6.42. menggambarkan jaring-jaring aliran melalui bawah bendung.

2. Perhitungan rembesan jaring-jaring aliran.

A. Jaring-jaring aliran untuk aliran bermatra satu. Gambar 6.38. (a) menunjukkan penampang sebuah tabung berukuran 4 m x 4 m dengan tinggi 16 m yang dialiri air secara tetap. Harga-harga tinggi total, tinggi elevasi dan tinggi tekanan digambarkan dalam gambar 6.43. (b).

Berdasarkan hukum Darcy, maka kuantitas rembesan melalui tabung tanah dapat dihitung sebagai berikut:

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

$$k = 0,10 \text{ m/menit}$$

$$h = 16 \text{ m}$$

$$h_e = 12 - 2 = 10 \text{ m} \rightarrow \text{Lihat Gb. 6.43. (b).}$$

$$A = 16 \text{ m}^2$$

$$Q = 0,10 \times \frac{16}{10} \times 16 = 2,56 \text{ m}^3/\text{menit.}$$

Lihat gambar 6.43. (c), kuantitas air pada A:

$$Q_A = k \cdot i_A \cdot a_A$$

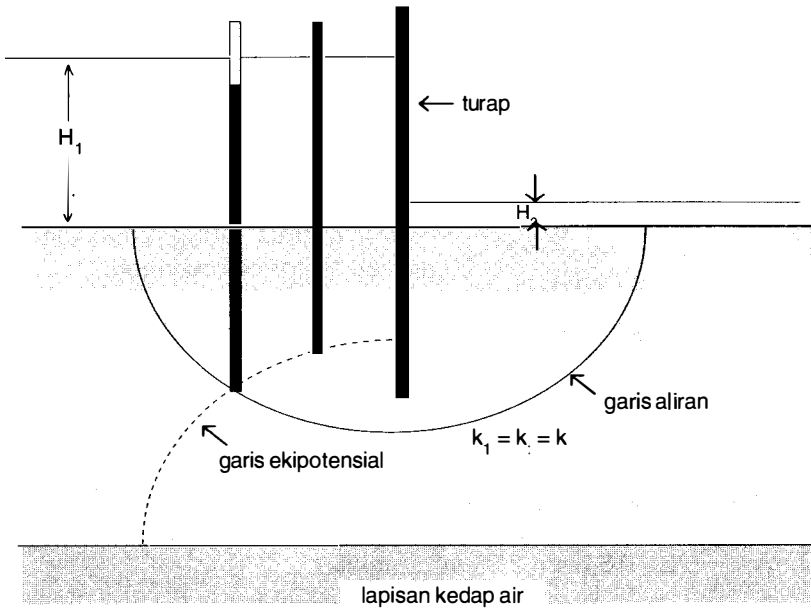
$$i_A = \frac{H}{N_e \cdot 1} \rightarrow N_e = \text{jumlah penurunan ekitensial (Number of equipotential drops)}$$

$$a = \text{luas daerah A}$$

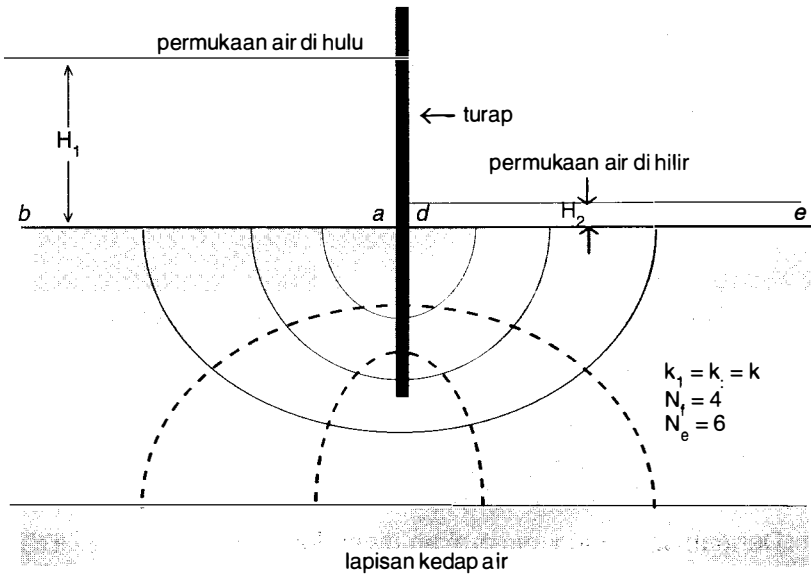
$$q_A = k \cdot \frac{H}{N_e \cdot 1} \cdot a_A \rightarrow a_A = b \cdot 1.$$

$$q_A = k \cdot \frac{H}{N_e \cdot 1} \cdot b \cdot 1 = k \cdot \frac{H}{N_e} \cdot b \rightarrow b = 1 \text{ m}$$

$$q_A = k \cdot \frac{H}{N_e} \dots\dots\dots (i)$$



(a) Garis aliran dan ekuipotensial



(b) Jaring aliran lengkap

Gb. 6.41. Jaring aliran sekeliling turap.

Kuantitas aliran tiap satuan lebar = L

$$\frac{Q}{L} = q_A \cdot N_f \rightarrow N_f = N_f = \text{Jumlah dalam aliran (number of flow channels)}$$

Dengan memasukkan persamaan (i) ke dalam persamaan di atas, maka:

$$\frac{Q}{L} = k \cdot H \cdot \frac{N_f}{N_e} \rightarrow \frac{N_f}{N_e} = S_f = \text{Faktor bentuk jaring-jaring aliran (shape factor of flow nets).}$$

$$S_f = \frac{N_f}{N_e} = \frac{4}{10} = 0,40$$

$$\frac{Q}{L} = k \cdot H \cdot S_f = 0,10 \times 16 \times 0,40 = 0,64 \text{ m}^3/\text{men.}/\text{m.}$$

Jumlah kuantitas aliran:

$$Q = \frac{Q}{L} \times L = 0,64 \times 4 = 2,56 \text{ m}^3 / \text{menit.}$$

Sekarang kita tinjau tekanan-tekanan air pada elevasi sebagai berikut:

i. Pada tinggi elevasi: $h_e = 10 \text{ m.}$ (Lihat gambar 6.43. (c))
terdapat: $h = 0,80 \text{ H} = 0,80 \times 16 = 12,80 \text{ m.}$

$$\text{Tinggi tekanan: } h_{p_i} = h - h_e = 12,80 - 10 = 2,80 \text{ m}$$

ii. Pada elevasi: $h_e = 7 \text{ m}$ terdapat: $h = 0,50 \text{ H} = 0,50 \times 16 = 8 \text{ m.}$

$$\text{Tinggi tekanan: } h_{p_{ii}} = h - h_e = 8 - 7 = 1 \text{ m.}$$

iii. Pada elevasi: $h_e = 3 \text{ m}$ terdapat: $h = 0,10 \text{ H} = 0,10 \times 16 = 1,60 \text{ m.}$

$$\text{Tinggi tekanan: } h_{p_{iii}} = h - h_e = 1,60 - 3 = -1,40 \text{ m.}$$

Tekanan-tekanan air pori yang terjadi pada elevasi-elevasi tersebut, masing-masing:

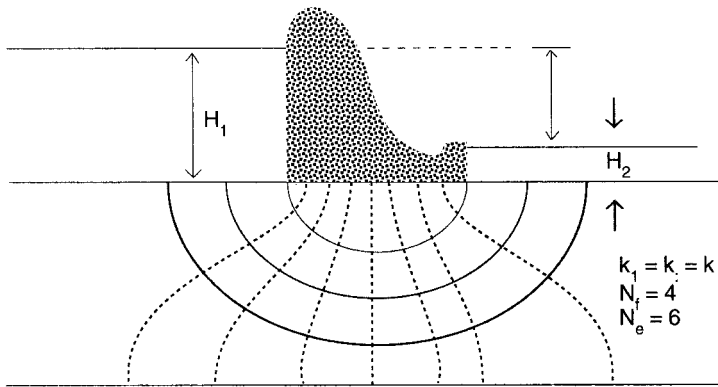
$$u_i = h_p \cdot \gamma_w \rightarrow \gamma_w = 1,00 \text{ t/m}^3$$

$$u_i = 2,80 \times 1,00 = 2,80 \text{ t/m}^2$$

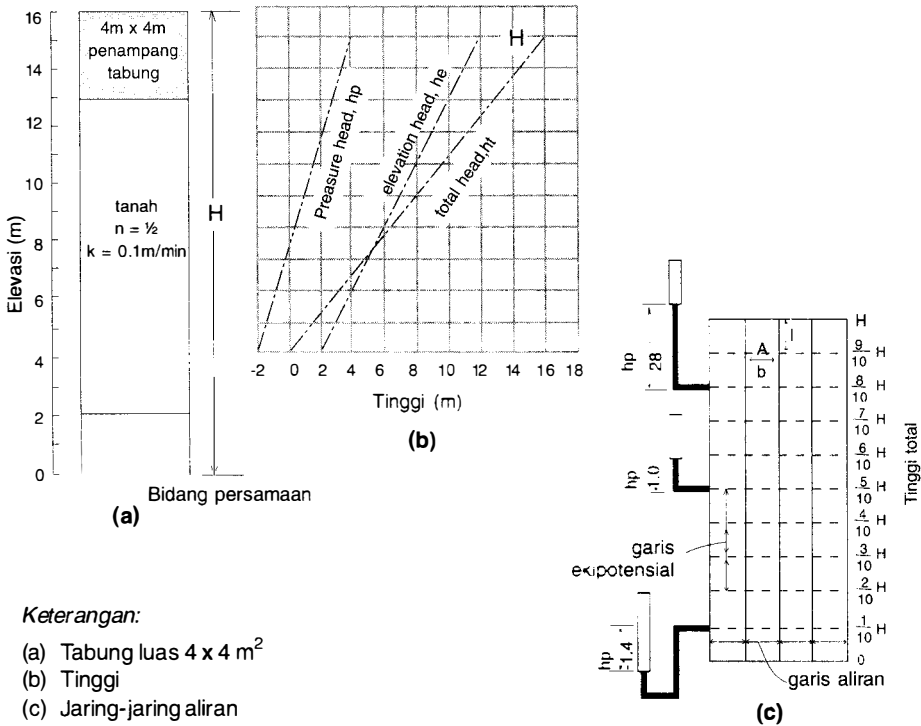
Dengan cara yang sama akan diperoleh

$$u_{ii} = 1,00 \text{ t/m}^2$$

$$u_{iii} = -1,40 \text{ t/m}^2.$$



Gb. 6.42. Jaringan aliran melalui bawah bendung.



Gb. 6.43. Aliran bermatra satu.

B. Jaringan-jaring aliran untuk aliran bermatra dua.

Dalam bagian ini akan dibahas aliran-aliran yang melalui:

- 1) Sekeliling bawah turap baja
- 2) Bawah bendung beton
- 3) Bendungan tanah.

1) Jaringan-jaring aliran melalui sekeliling bawah turap baja.

Dengan menggunakan prinsip-prinsip jaring-jaring aliran, maka suatu jaring-jaring aliran dapat digambarkan untuk suatu turap baja yang umumnya digunakan untuk dinding penahan tanah atau dermaga. Pada gambar 6.41. (b) tampak jumlah alur aliran: $N_f = 4$ dan jumlah penurunan tinggi tekanan: $N_e = 6$ atau $N_d = 6$.

Apabila harga koefisien rembesan dan selisih tinggi muka air di hulu dan di hilir diketahui, maka kuantitas air yang merembes lewat turap baja tersebut dapat dihitung dengan persamaan:

$$q = k.H. \frac{N_f}{N_e}$$

Persamaan ini dapat dijabarkan sebagai berikut: (Lihat gambar 6.44)

Jika: $h_1, h_2, h_3, h_4, \dots, h_n$ merupakan kedudukan garis-garis piezometris atau sama dengan garis-garis ekipotensial, maka kecepatan rembesan melalui alur aliran dan kuantitas rembesannya tiap satuan lebar dapat dihitung dengan persamaan:

$$\Delta q_1 = \Delta q_2 = \Delta q_3 = \dots = \Delta q_n \dots\dots\dots (6.96.)$$

Dari persamaan Darcy:

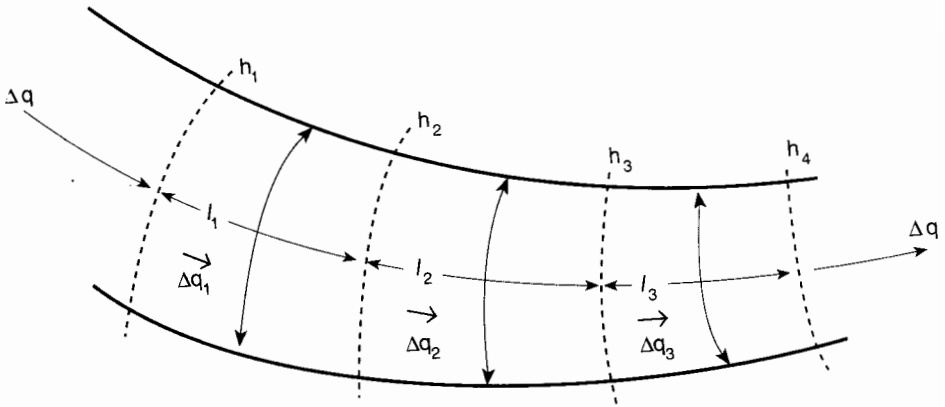
$$\Delta q = k.i.A$$

dan persamaan (6.96.) dapat ditulis:

$$\Delta q = k \left(\frac{h_1 - h_2}{l_1} \right) l_1 = k \left(\frac{h_2 - h_3}{l_2} \right) l_2 = k \left(\frac{h_3 - h_4}{l_3} \right) l_3 = \dots (6.97.)$$

$$h_1 - h_2 = h_2 - h_3 = h_3 - h_4 = \dots = \frac{H}{N_e} \dots\dots\dots (6.98.)$$

$$\Delta q = k. \frac{H}{N_e} \dots\dots\dots (6.99.)$$



Gb. 44. Rembesan melalui alur aliran berbentuk bujur sangkar.

$$q = \Delta q \cdot N_f$$

$$q = k.H. \frac{N_f}{N_e} \dots\dots\dots (6.100.)$$

Jika alur aliran tidak berbentuk bujur sngkar, dalam hal ini berbentuk empat persegi panjang, maka perhitungan dilakukan sebagai berikut:

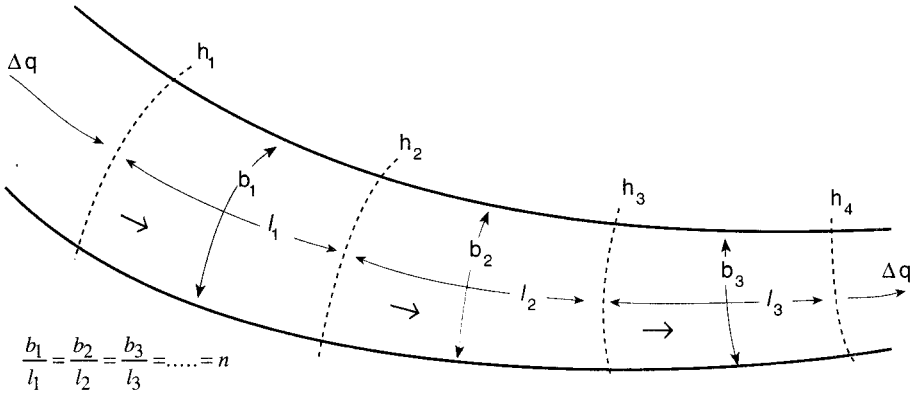
$$k \left(\frac{h_1 - h_2}{l_1} \right) p_1 = k \left(\frac{h_2 - h_3}{l_2} \right) p_2 = k \left(\frac{h_3 - h_4}{l_3} \right) p_3 = \dots\dots\dots (6.101.)$$

Jika: $b_1/l_1 = b_2/l_2 = b_3/l_3 = \dots = n$, maka

$$\Delta q = k.H \left(\frac{n}{N_e} \right) \dots\dots\dots (6.102.)$$

$$q = k.H. \frac{N_f}{N_e} \cdot n \dots\dots\dots (6.103.)$$

Gambar 6.45. menunjukkan rembesan melalui alur aliran berbentuk empat persegi panjang.



Gb. 6.45. Rembesan melalui alur aliran berbentuk empat persegi panjang.

Gambar 6.46. menggambarkan jaring-jaring aliran rembesan sekeliling sederetan turap. Alur aliran No. 1 dan 2 berbentuk bujur sangkar, maka kuantitas aliran yang melalui bidang-bidang tersebut:

$$\Delta q_1 + \Delta q_2 = k \cdot \frac{H}{N_e} + k_o \cdot \frac{H}{N_e} = 2k \cdot \frac{H}{N_e}$$

Sedangkan alur aliran No. 3 berbentuk empat persegi panjang, elemen ini mempunyai perbandingan $l/b = 1/0,38$ atau $b = 0,38 l$, sehingga:

$$\Delta q_3 = k \cdot \frac{H}{N_e} (0,38)$$

Jadi kuantitas seluruhnya:

$$q = \Delta q_1 + \Delta q_2 + \Delta q_3 = 2,38k \cdot \frac{H}{N_e}$$

Rembesan di bawah beberapa konstruksi bangunan air dapat diselesaikan dengan matematika. Harr (1962) melengkapi analisisnya dengan beberapa macam kondisi. Gambar 6.48. menunjukkan kurva hubungan antara S/T dengan q/kH untuk menghitung rembesan yang melalui sekeliling bawah turap.

Contoh soal:

Diketahui sederetan turap baja dengan penampang seperti tampak dalam gambar 6.47.

Tentukan:

- Tekanan air pada tiap-tiap titik
- Kuantitas rembesan, jika: $k = 10^{-6}$ m/menit
- Gradien hidrolis.

Penyelesaian:

Titik	Tinggi elevasi h_e (m)	Tinggi total h_t (m)	Tinggi tekanan h_p (m)	Tekanan air p (lb/m ²)
a	90	90,00	0	0
b	60	90,00	30,00	1.872
c	49	86,88	37,88	2.364
d	39	83,75	44,75	2.792
e	30	77,50	47,50	2.964
f	39	71,25	32,25	2.012
g	49	68,12	19,12	1.193
h	60	65,00	5,00	312
i	65	65,00	0	0

a. Titik : a

$$\begin{aligned} \text{Tinggi elevasi : } h_e &= 90 \text{ m.} \\ N_f &= 0 \text{ dan } N_e = 0 \end{aligned}$$

Tinggi total :

$$h_t = h_e - \frac{N_f}{N_e} \cdot H \rightarrow H = 90 - 65 = 25 \text{ m}$$

$$h_t = 90 - 0 = 90 \text{ m}$$

$$h_p = h_t - h_e = 90 - 90 = 0$$

$$p = h_p \cdot \gamma_w = 0$$

Titik: b

$$\begin{aligned} \text{Tinggi elevasi : } h_e &= 60 \text{ m} \\ N_f &= 0 \text{ dan } N_e = 0 \end{aligned}$$

Tinggi total :

$$h_t = 90 - 0 = 90 \text{ m}$$

$$h_p = h_t - h_e = 90 - 60 = 30 \text{ m}$$

$$p = h_p \cdot \gamma_w = 30 \times 1,00 = 30 \text{ t/m}^2$$

Titik: c

$$\begin{aligned} \text{Tinggi elevasi : } h_e &= 49 \text{ m} \\ N_f &= 1 \text{ dan } N_e = 8 \end{aligned}$$

$$h_t = 90 - \frac{1}{8} \times 25 = 86,88 \text{ m}$$

$$h_p = 86,88 - 49 = 37,88 \text{ m}$$

$$p = 37,88 \times 1,00 = 37,88 \text{ t/m}^2$$

Titik: d

$$\begin{aligned} \text{Tinggi elevasi : } h_e &= 39 \text{ m} \\ N_f &= 2 \text{ dan } N_e = 8 \end{aligned}$$

$$h_t = 90 - \frac{2}{8} \times 25 = 83,75 \text{ m}$$

$$h_p = 83,75 - 39 = 44,75 \text{ m}$$

$$p = 44,75 \times 1,00 = 44,75 \text{ t/m}^2$$

Titik: e

$$\begin{aligned} \text{Tinggi elevasi : } h_e &= 30 \text{ m} \\ N_f &= 4 \text{ dan } N_e = 8 \end{aligned}$$

$$h_t = 90 - \frac{4}{8} \times 25 = 77,50 \text{ m}$$

$$h_p = 77,50 - 30 = 47,50 \text{ m}$$

$$p = 47,50 \times 1,00 = 47,50 \text{ t/m}^2$$

Dengan cara yang sama untuk titik-titik: f,g,h dan i dapat dihitung dan hasilnya seperti tampak dalam tabel.

b. Kuantitas rembesan:

$$q = k.H. \frac{N_f}{N_e}$$

$$q = 10^{-6} \times 25 \times \frac{4}{8} = 12,50 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{menit} / \text{m}$$

c. Gradien hidrolis

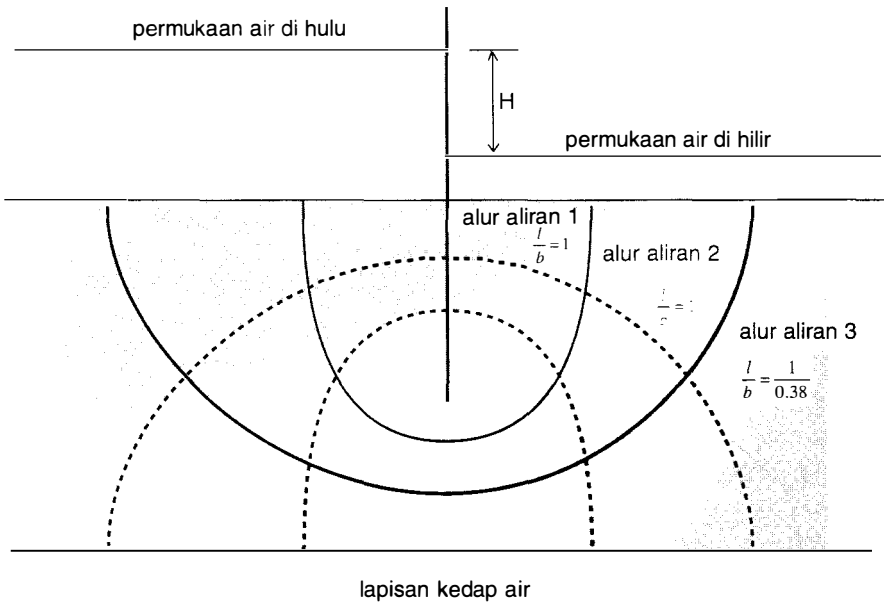
$$i = \frac{H}{N_e \cdot l} \rightarrow l = 11,50$$

$$i = \frac{25}{8 \cdot 11,50} = 0,27$$

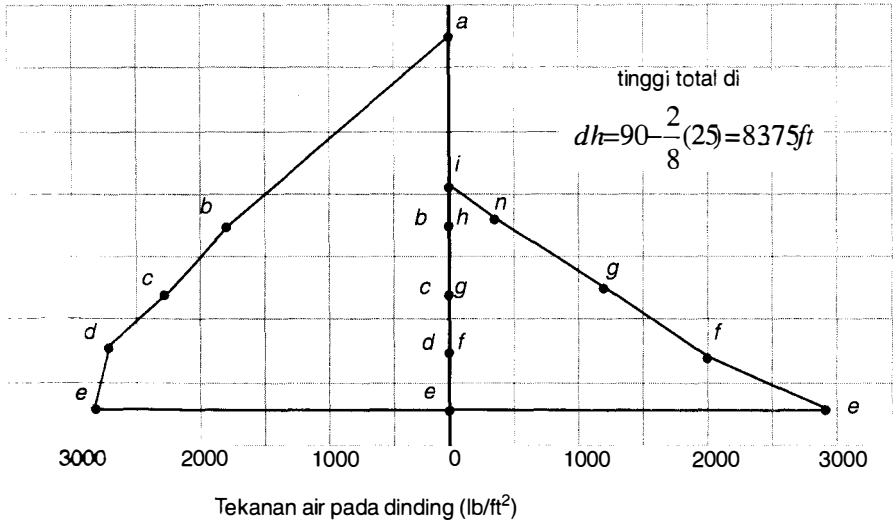
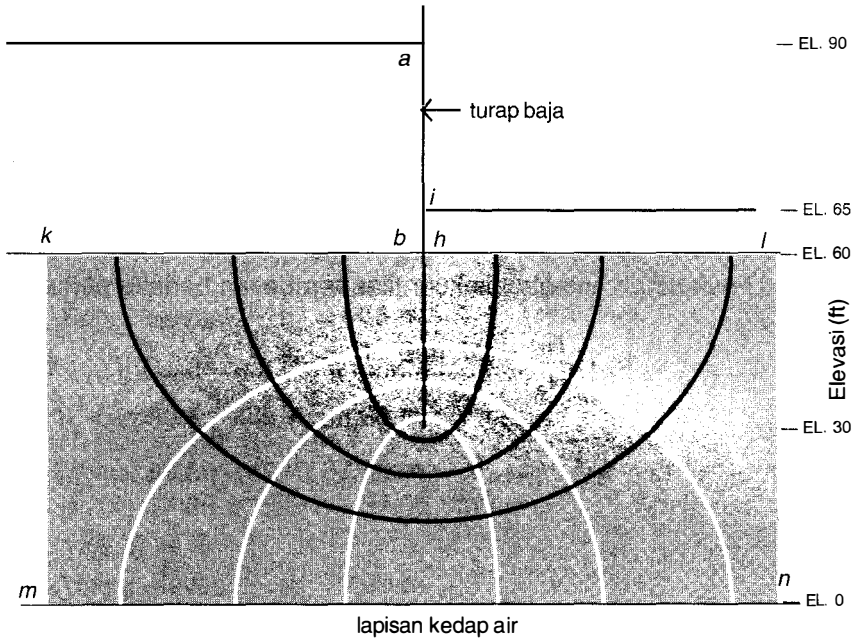
Jaring-jaring aliran untuk tanah anisotropis.

Untuk tanah anisotropis kuantitas rembesan berlaku persamaan:

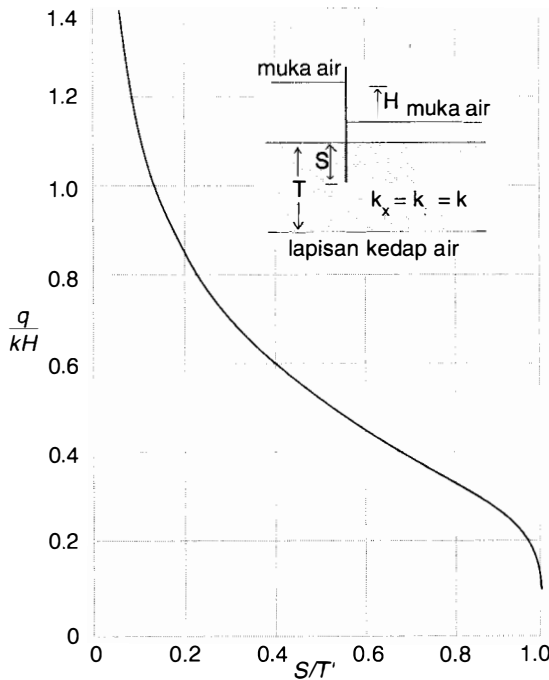
$$q = k_x \cdot k_z \cdot H \cdot \frac{N_f}{N_e} \dots \dots \dots (6.104.)$$



Gb. 6.46. Jaring aliran untuk rembesan sekeliling turap tunggal.



Gb. 6.47. Aliran di bawah dinding turap.

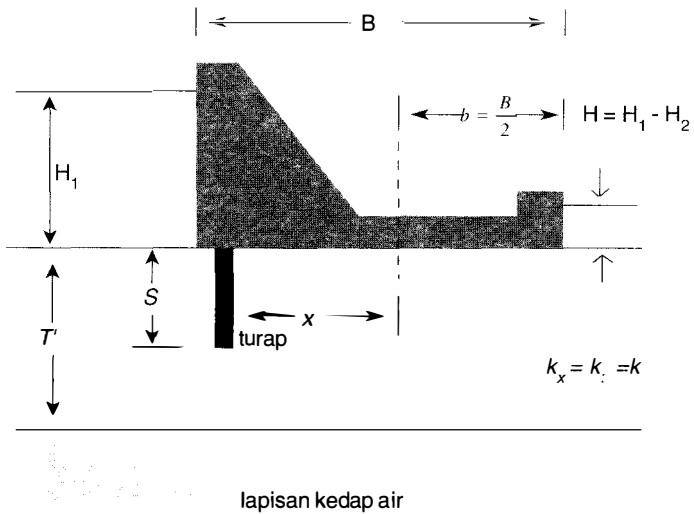


Gb. 6.48. Kurva hubungan q/kH dengan S/T untuk aliran sekeliling deretan turap tunggal. (Harr, 1962).

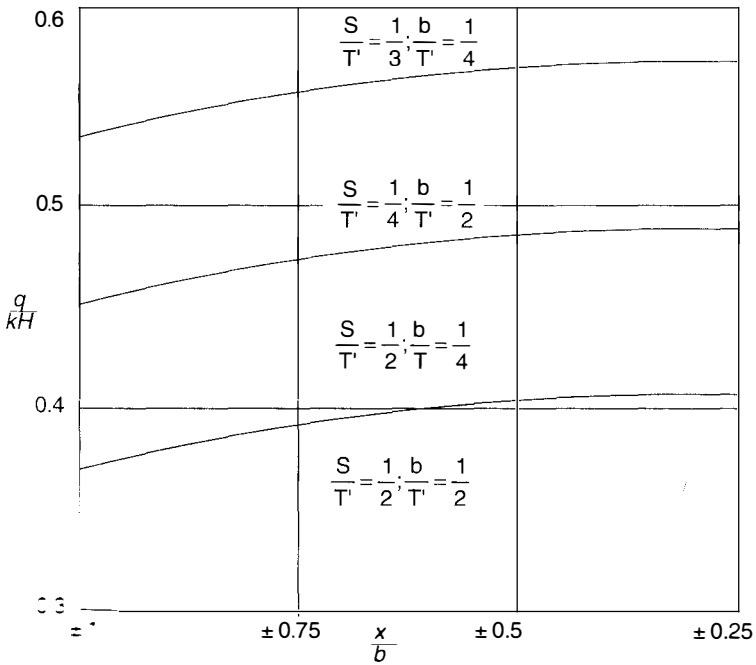
- 2) Jaring-jaring aliran dan rembesan melalui bawah bendung beton.

Seperti halnya dengan jaring-jaring aliran pada turap, maka jaring-jaring aliran dan rembesan melalui bawah bendung beton berlaku juga persamaan-persamaan untuk menghitung kuantitas air yang merembes seperti halnya pada turap. Di samping itu tekanan air ke atas (*uplift*) pada semua titik di bawah bendung dapat dihitung berdasarkan tekanan air pori dan penurunan tinggi tekanan pada jaring-jaring tersebut. Dalam gambar 6.42. tampak jumlah alur aliran: $N_f = 4$ dan $N_e = 8$, dengan diketahuinya selisih tinggi air di hulu dan di hilir: $H = H_1 - H_2$ serta koefisien permeabilitas: k , maka kuantitas air yang lewat bawah bendung dapat dihitung sebagai berikut:

$$q = k.H. \frac{N_f}{N_e}$$



(a) Penampang melintang bendungan



Gb. 6.49. Rembesan di bawah bendungan (Harr, 1962).

Kuantitas air yang merembes melalui bawah bendung selain dapat dihitung dengan matematika dapat juga ditentukan menggunakan kurva (Harr, 1962) seperti tampak pada gambar 6.49.

Tekanan air ke atas (*uplift pressure*) di bawah konstruksi bangunan air.

Jaring-jaring aliran dapat digunakan untuk menentukan tekanan air ke atas pada dasar bangunan air. Konsep umum ini dapat diterangkan dengan contoh sederhana. Gambar 6.50. (a) menunjukkan sebuah bendung yang alasnya terletak 6 m di bawah permukaan tanah. Jaring-jaring aliran yang diperlukan juga tergambar dan dianggap: $k_x = k_z = k$.

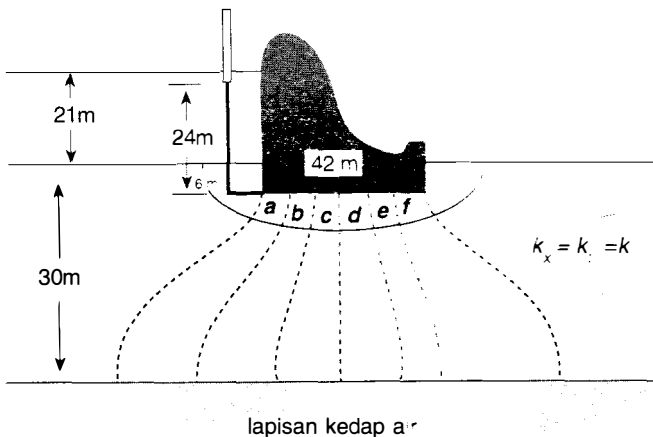
Diagram distribusi tekanan pada dasar bendung dapat diperoleh dengan melihat garis-garis ekuipotensial sebagai berikut:

Dalam jaring-jaring aliran terdapat $N_e = 7$ dan selisih tinggi muka air di hulu dan di hilir: $H = 21$ m. Kehilangan tinggi penurunan tekanan $\Delta H = H/N_e = 21/7 = 3$ m.

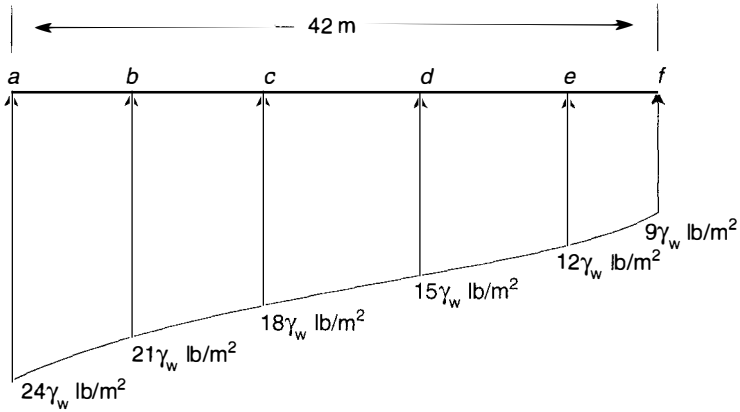
Tekanan ke atas (*uplift pressure*) pada tiap-tiap titik:

Di a :

$$\begin{aligned} u_a &= h_{pa} \times \gamma_w = [(H + D_f) - \Delta H] \gamma_w \\ &= [(21 + 6) - 3] \gamma_w = 24 \gamma_w \end{aligned}$$



Gb. 6.50. (a) Bendung



Gb. 6.50. (b) Gaya angkat ke atas di bawah konstruksi bendung.

Di b :

$$u_b = [27 - (2)]\gamma_w = 21\gamma_w$$

Di f :

$$u_f = [27 - (6)3]\gamma_w = 9\gamma_w$$

Hasil-hasil ini digambarkan seperti gambar 6.505. (b).

Contoh-contoh soal:

1. Diketahui jaring-jaring aliran seperti tampak pada gambar 6.51.

Hitung:

- a. Tinggi tekanan pada titik A sd. H
- b. Kuantitas rembesan
- c. Gradien hidrolik di X.

Penyelesaian:

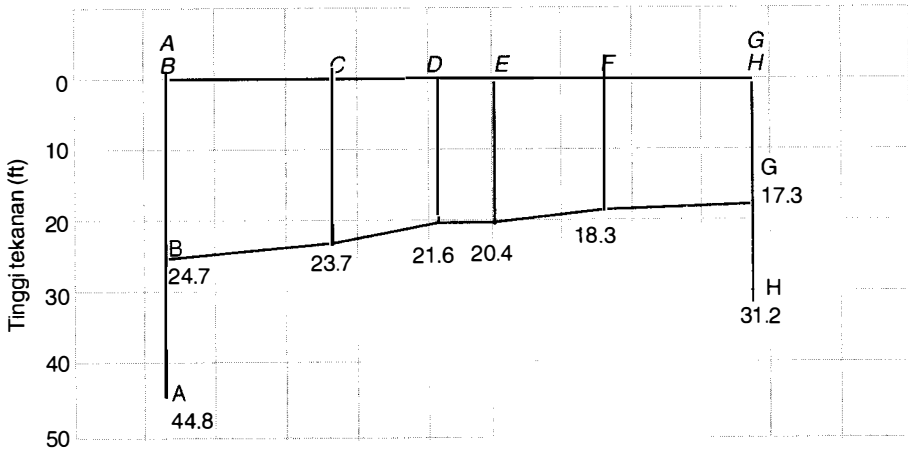
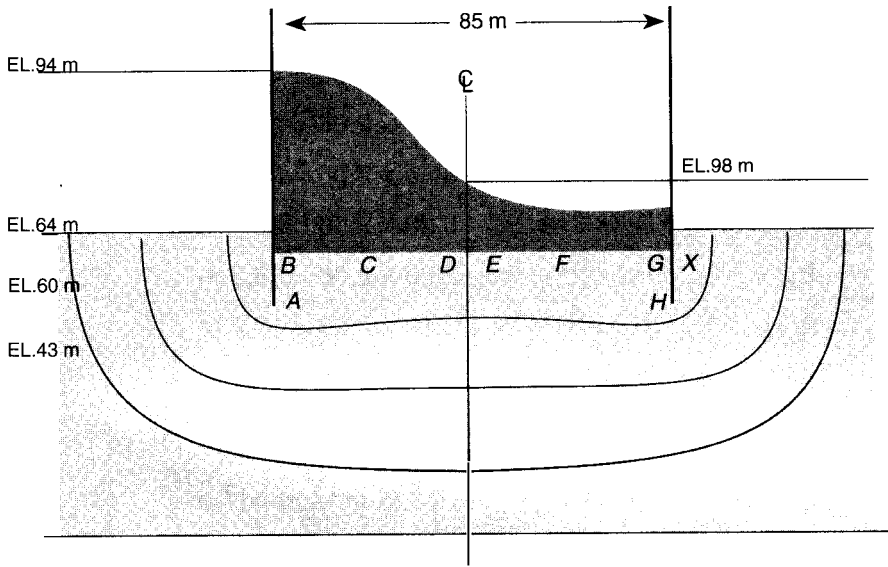
$$a. N_f = 4$$

$$N_e = 12,60$$

$$k = 0,10 \text{ m/menit}$$

$$H = (94 - 68) \text{ m} = 26 \text{ m}$$

$$\Delta H = \frac{H}{N_e} = \frac{26}{12,60} = 2,06 \text{ m}$$



Gb. 6.51. Aliran di bawah bendung dan diagram distribusi tinggi tekanan di dasar bendung

$$h_{pB} = h_{eB} - N_{eB} \times \Delta H = 34 - 4,50 \times 2,06 = 24,7 \text{ m}$$

$$h_{pA} = h_{eA} - N_{eA} \times \Delta H = 51 - 3 \times 2,06 = 44,8 \text{ m}$$

$$h_{pC} = h_{eC} - N_{eC} \times \Delta H = 34 - 5 \times 2,06 = 23,7 \text{ m}$$

$$h_{pD} = h_{eD} - N_{eD} \times \Delta H = 34 - 6 \times 2,06 = 21,6 \text{ m}$$

$$h_{pE} = h_{eE} - N_{eE} \times \Delta H = 34 - 6,60 \times 2,06 = 20,4 \text{ m}$$

$$h_{pF} = h_{eF} - N_{eF} \times \Delta H = 34 - 7,60 \times 2,06 = 18,3 \text{ m}$$

$$h_{pG} = h_{eG} - N_{eG} \times \Delta H = 34 - 8,10 \times 2,06 = 17,3 \text{ m}$$

$$h_{pH} = h_{eH} - N_{eH} \times \Delta H = 51 - 9,60 \times 2,06 = 31,2 \text{ m}$$

b. Kuantitas rembesan:

$$q = k \cdot H \cdot \frac{N_f}{N_e} = 0,10 \times 26 \times \frac{4}{12,60} = 0,825 \text{ m}^3 / \text{menit} / \text{m.}$$

c. Gradien hidrolik di X:

$$i_x = \frac{\Delta H}{l} \rightarrow l = 11$$

$$i_x = \frac{2,06}{11} = 0,19$$

2. Diketahui sebuah konstruksi bendung dengan jaring-jaring aliran seperti tampak pada gambar 6.50.

Data-data: $N_f = 5$; $N_e = 12$; $k = 2,20 \times 10^{-5} \text{ m/detik.}$

Hitung:

- Tekanan ke atas (*uplift*) di dasar bendung
- Kuantitas air yang merembes di bawah bendung
- Gradien hidrolik di G.

Penyelesaian:

a. $H = 11 \text{ m.}$

$$\Delta H = \frac{H}{N_e} = \frac{11}{12} = 0,917 \text{ m}$$

$$D_f = 2.30 \text{ m}$$

Tinggi tekanan di tiap-tiap titik:

Titik	Tinggi elevasi h_e (m)	Penurunan tinggi tekanan $H \cdot N_e$ (m)	Tinggi tekanan h_p (m)	Tekanan ke atas (uplift) $u = h_p \cdot \partial w$ (t/m ₂)
1	2	3	4	5
D	12,30	1,83	11,47	11,47
E	13,30	2,75	10,55	10,55
F	11,65	3,21	8,44	8,44
G	11,65	7,79	3,86	3,86
H	13,30	8,25	5,05	5,05
I	13,50	9,17	4,13	4,13

Tekanan di bawah bendung:

$U = \text{Luas trapesium (I + II + III + IV + V)}$

$$\text{Luas trapesium I} = 0,50 (11,47 + 10,55) 1,65 = 18,17 \text{ t/m}$$

$$\text{Luas trapesium II} = 0,50 (10,55 + 8,44) 1,65 = 15,67 \text{ t/m}$$

$$\text{Luas trapesium III} = 0,50 (8,44 + 3,86) 1,65 = 116,85 \text{ t/m}$$

$$\text{Luas prapesium IV} = 0,50 (3,86 + 5,05) 1,65 = 7,35 \text{ t/m}$$

$$\text{Luas trapesium V} = 0,50 (5,05 + 4,13) 1,65 = 7.57 \text{ t/m}$$

$$U = 165.61 \text{ t/m}$$

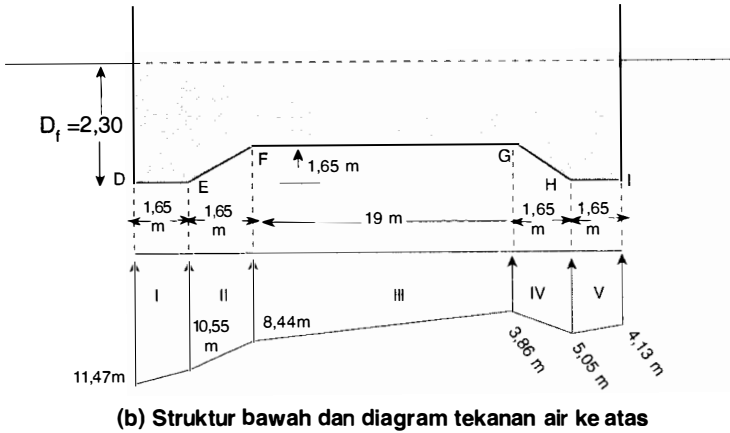
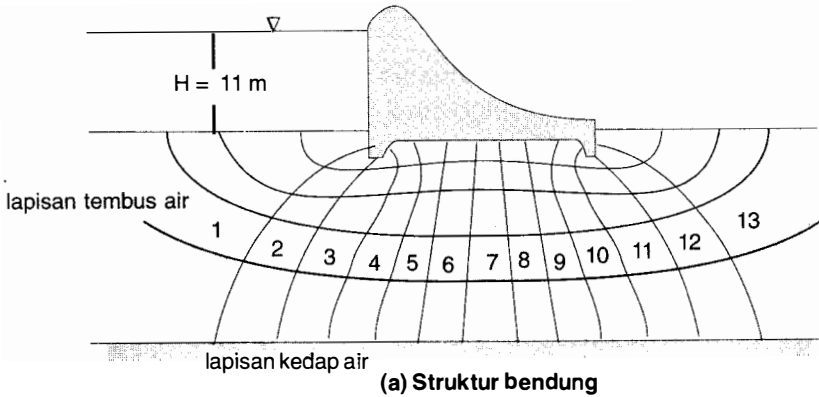
b. Kuantitas air yang merembes di bawah bendung.

$$q = k \cdot H \cdot \frac{N_f}{N_e} = 2,20 \times 10^{-5} \times 11 \times \frac{5}{12} = 10.08 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{det. / m.}$$

c. Gradien hidrolis di G.

$$i_G = \frac{\Delta H}{\ell} \rightarrow \ell = 9$$

$$i_G = \frac{0,917}{9} = 0,102$$



Gb. 6.52. Struktur bendung dengan jaring-jaring aliran.

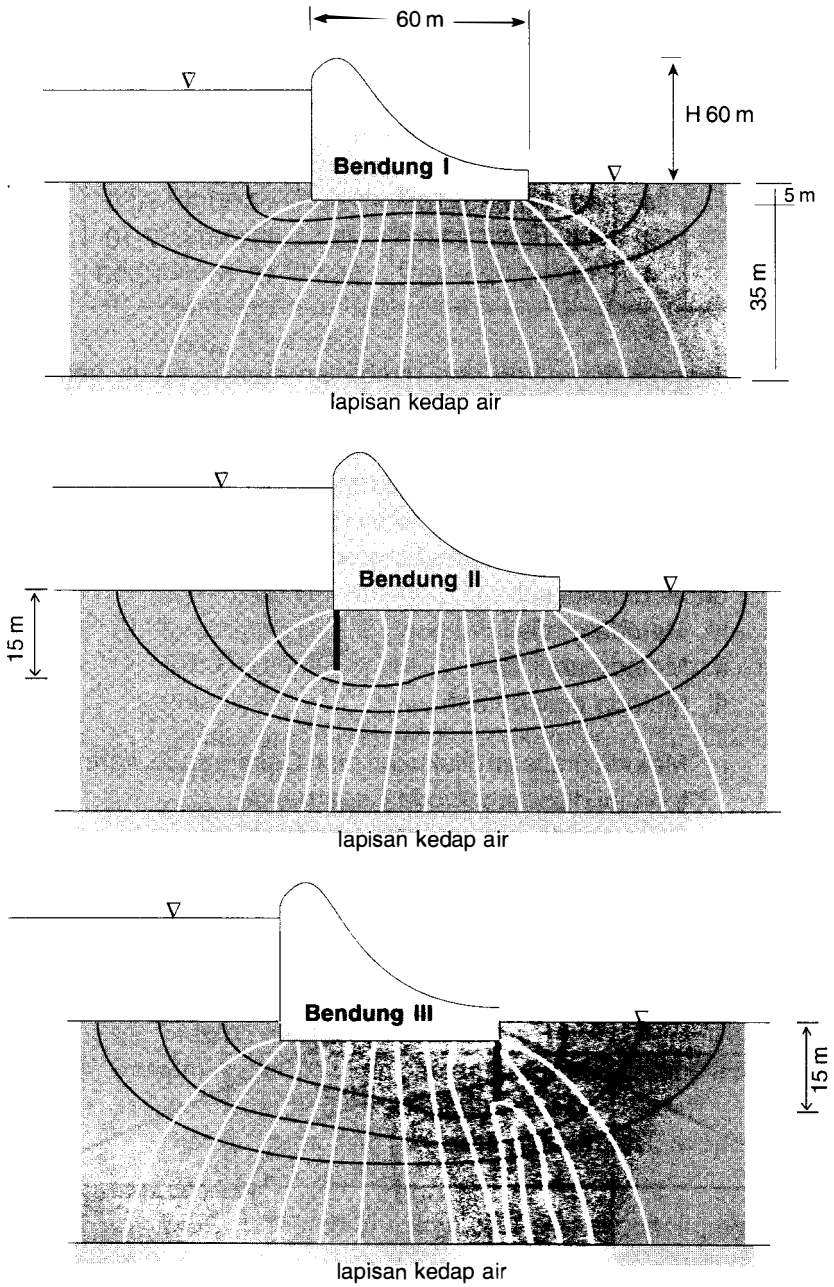
3. Diketahui tiga buah bendung dengan jaring-jaring aliran seperti tampak dalam gambar 6.53. Koefisien permeabilitas: $k = 10^{-3}$ m/menit, berat isi air : $\gamma_w = 1,00$ t/m³.

Hitung:

- Kuantitas rembesan yang melalui bawah bendung I, II, III
- Tinggi tekanan di A
- Tekanan air ke atas (*uplift*) di A.

Perhitungan:

$H = 20$ m



Gb. 6.53. Tiga bendung dengan jaring-jaring aliran.

Perhitungan selanjutnya digunakan tabel sebagai berikut:

Bendung	N_f	N_e	q m ³ /men/m	h_e m	HxN_e m	h_p m	u t/m ²
I	4	12	$6,66 \times 10^{-3}$	25	17,50	7,50	7,50
II	4	14	$5,72 \times 10^{-3}$	25	17,90	7,10	7,10
III	4	14	$5,72 \times 10^{-3}$	25	12,10	12,90	12,90

3) Jaring-jaring aliran dan rembesan melalui tubuh bendungan tanah.

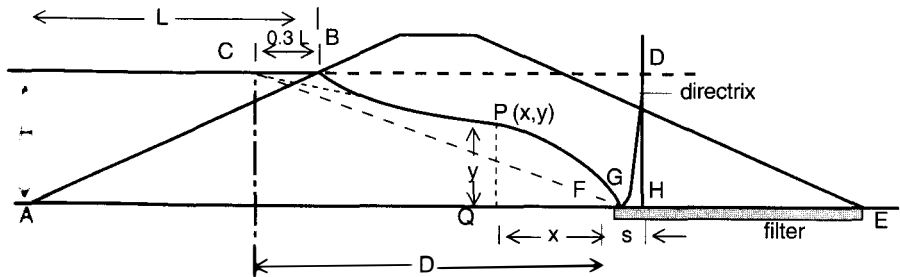
Aliran melalui bendungan tanah merupakan salah satu pemakaian pertama jaring-jaring aliran.

Untuk menentukan garis freatik (*phreatic line*) dan jaring-jaring aliran dalam tubuh bendungan tanah ada tiga metoda yang dapat dipakai sebagai berikut:

- i. Metoda grafis.
- ii. Metoda analitis.
- iii. Metoda eksperiman.

i. Metoda grafis ini dilakukan oleh Casagrande, karena itu metoda ini disebut metoda Casagrande.

Casagrande menentukan garis freatik dalam bendungan tanah yang homogen seperti tampak dalam gambar 6.54 yaitu bendungan tanah dengan filter mendatar.



Gb. 6.54. Bendungan dengan filter drainase mendatar untuk menentukan garis freatik dengan metoda Casagrande.

Prosedur untuk menentukan letak garis freatik dengan grafis sebagai berikut:

1. Apabila tinggi muka air di hulu diketahui = H dan kemiringan bendungan juga diketahui: m : 1 (m = mendatar dan 1 = vertikal), maka panjang: L = m.H.
2. Tentukan pada muka air di hulu, panjang: BC = 0,30 L. Hubungan titik C dengan titik F ujung filter yang terletak di dasar bendungan.
3. Buat lingkaran dengan jari-jari CF dan titik C sebagai titik pusat lingkaran.
4. Perpanjang garis CB sehingga garis ini berpotongan dengan lingkaran di titik D. Titik D merupakan titik singgung pada lingkaran.
5. Buat garis singgung dari titik D yang memotong filter di titik H. DH = directrix dan FH = s.
6. Bagilah FH = s menjadi dua bagian yang sama panjang, sehingga: FG = GH = 0,50 s.
7. Lukiskan titik-titik dengan absis = x dan ordinat = y, mulai titik F sampai ke titik C dan akan membentuk kurva parabola.

Secara teoritis garis freatik akan mulai dari titik C dan berakhir di titik G.

Praktis garis freatik mulai dari titik B ke titik G. Titik B tegak lurus garis AB.

Dengan demikian garis freatik merupakan garis aliran. Garis aliran ini di titik B tegak lurus garis AB.

Jika x = D, maka y = H dan P (x, y) merupakan titik sebarang pada garis freatik.

ii. Metoda analitis.

Untuk menentukan persamaan dasar parabola dengan cara ini, maka digunakan gambar 6.54.

Diambil sebarang titik pada garis freatik, misal titik P (x, y) dengan titik awal F.

Dengan memperhatikan sifat-sifat parabola, diperoleh:

$$\begin{aligned}
 &PF = QH \\
 \sqrt{x^2 + y^2} &= QF + FH = x + s \dots\dots\dots (i) \\
 &FH = s = \text{jarak fokus}
 \end{aligned}$$

Persamaan (i) dikuadratkan, sehingga menjadi:

$$x^2 + y^2 = x^2 + 2xs + s^2$$

$$x = \frac{y^2 - s^2}{2s} \dots\dots\dots (6.105)$$

dan

$$y^2 = 2xs + s^2$$

$$y = \sqrt{2xs + s^2} \dots\dots\dots (6.106.)$$

Jarak s selain dapat ditentukan dengan cara grafis dapat dihitung juga secara analitis sebagai berikut:

Dari persamaan (i) diperoleh:

$$s = \sqrt{x^2 + y^2} - x \dots\dots\dots (ii)$$

Di titik C : x = D dan y = H, sehingga persamaan (ii) menjadi:

$$s = \sqrt{D^2 + H^2} - D \dots\dots\dots (6.107.)$$

Kuantitas rembesan air yang melalui tubuh bendungan. Untuk menghitung kuantitas rembesan yang melalui tubuh bendungan sampai ke filter mendatar, maka di ambil penampang vertikal = PQ.

Kuantitas rembesan air yang melalui tubuh bendungan tiap meter lebar:

$$q = k.i.A = k \cdot \frac{dy}{dx} \cdot y \dots\dots\dots (iii)$$

Dari persamaan (6.106):

$$y = (2xs + s^2)^{1/2}$$

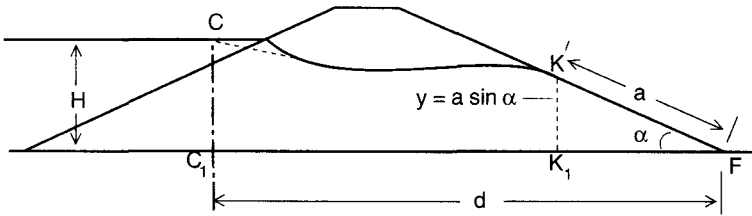
$$\frac{dy}{dx} = \frac{s}{(2xs + s^2)^{1/2}} \dots\dots\dots (iv)$$

Masukkan persamaan (iv) ke dalam pers. (iii), sehingga:

$$q = k \cdot \frac{s}{(2xs + s^2)^{1/2}} \cdot (2xs + s^2)^{1/2}$$

$$q = k.s. \dots\dots\dots (6.108.)$$

Persamaan (6.108.) ini merupakan persamaan sederhana untuk menghitung kuantitas rembesan: q dengan menggunakan jarak fokus = s.



Gb. 6.55. Metoda Leo Casagrande.

Metoda analitis Leo Casagrande untuk bendungan tanah tanpa filter untuk: $30^\circ < \alpha < 60^\circ$.

Leo Casagrande menganjurkan untuk menggunakan $\sin \alpha$ sebagai pengganti $\tan \alpha$.

Jadi: $q = k.i.A. = k \cdot \frac{dy}{ds} \cdot A$ (i)

Pada titik K : $s = a$ dan $y = a \sin \alpha = A$ (ii)

$$\frac{dy}{ds} = \sin \alpha$$
 (iii)

Dalam hal ini:

s = jarak rata-rata sepanjang kurva.

Masukkan persamaan-persamaan (ii) dan (iii) ke dalam persamaan (i), sehingga:

$$q = k \cdot \sin \alpha \cdot a \sin \alpha$$

$$q = k \cdot a \sin^2 \alpha$$
 (6.109.)

Dari persamaan (i) dan persamaan (6.109.), diperoleh:

$$k \cdot \frac{dy}{ds} \cdot y = k \cdot a \sin^2 \alpha$$

Jadi: $a \sin^2 \alpha \cdot ds = y \cdot dy$

Dengan integrasi ruas kiri dan kanan, yang batas-batasnya:

$$s = a \text{ sampai } s = S$$

$$S = \text{panjang total parabola}$$

$$y = a \sin \alpha \text{ sampai } y = H, \text{ diperoleh:}$$

$$a \sin^2 \alpha \int_a^S ds = \int_{a \sin^2 \alpha}^H y \cdot dy$$

$$\text{Jadi : } a \sin^2 \alpha (S - a) = \frac{H^2 - a^2 - \sin^2 \alpha}{2}$$

Atau : $a^2 - 2 aS + \frac{H^2}{\sin^2 \alpha} = 0$, sehingga:

$$a = S - \sqrt{S^2 - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}} \dots\dots\dots (6.110.)$$

Ambil : $S = (H^2 + d^2)^{1/2}$, maka diperoleh:

$$a = \sqrt{H^2 + d^2} - \sqrt{H^2 + d^2 - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}}$$

Atau : $a = \sqrt{H^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - H^2 \cot^2 \alpha} \dots\dots\dots (6.111.)$

Metoda analitis Schaffernak dan Van Iterson untuk: $\alpha < 30^\circ$. Untuk menentukan harga: a secara analitis, Schaffernak dan Van Iterson (1917) menganggap bahwa gradien hidrolik:

$$i = \tan \alpha = \frac{dy}{dx}$$

Kuantitas rembesan air melalui bagian vertikal KK_1 :

$$q = k \cdot \frac{dy}{dx} \cdot y \dots\dots\dots (i)$$

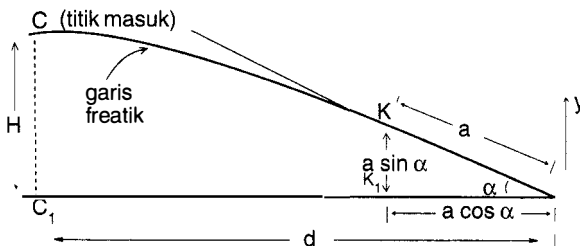
$$\frac{dy}{dx} = i = \tan \alpha \dots\dots\dots (ii)$$

$$y = KK_1 = a \sin \alpha \dots\dots\dots (iii)$$

Masukkan persamaan-persamaan (ii) dan (iii) ke dalam persamaan (i), sehingga:

$$q = k \cdot (\tan \alpha) (a \sin \alpha)$$

$$q = k \cdot a \sin \alpha \cdot \tan \alpha \dots\dots\dots (6.112.)$$



Gb. 6.56. Metoda Schaffernak.

Dari persamaan (i) dan persamaan (6.112.) diperoleh:

$$k \cdot \frac{dy}{dx} \cdot y = k \cdot a \sin \alpha \cdot \tan \alpha$$

Jadi : $a \sin \alpha \tan \alpha \cdot dx = y \cdot dy$

Integrasi persamaan ini dengan batas-batas:

$$x = a \cos \alpha \text{ sampai } x = d$$

$$y = a \sin \alpha \text{ sampai } y = H$$

Sehingga:

$$a \sin \alpha \tan \alpha \int_{a \cos \alpha}^d dx = \int_{a \sin \alpha}^H y \cdot dy$$

Jadi : $a \sin \alpha \tan \alpha (d - a \cos \alpha) = \frac{H^2 - a^2 \sin^2 \alpha}{2}$

Setelah disederhanakan diperoleh harga: a sbb.:

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}} \dots\dots\dots (6.113.)$$

Metoda analitis Dupuit.

Kuantitas rembesan tiap satuan lebar tegak lurus arah gambar berdasarkan hukum Darcy:

$$q = k.i.A$$

Dupuit (1863), menganggap bahwa gradien hidrolik

$$i = \frac{dy}{dx} \quad \text{dan } A = y, \text{ maka:}$$

$$q = k \cdot \frac{dy}{dx} \cdot y$$

$$q \cdot dx = k.y.dy$$

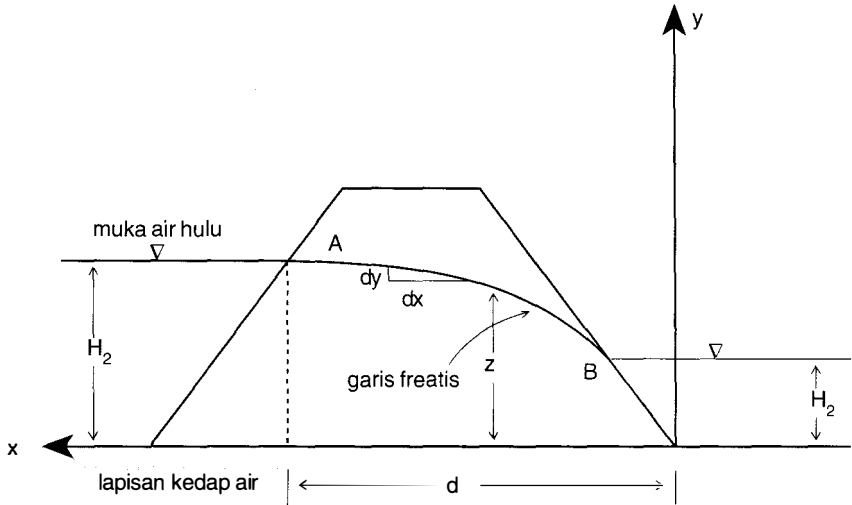
Integrasi ruas kiri dan ruas kanan dengan batas-batas:

$$x = 0 \text{ sampai } x = d$$

$$y = H_2 \text{ sampai } y = H_1$$

$$q \int_0^d dx = k \int_{H_2}^{H_1} y \cdot dy$$

$$q = \frac{k}{2d} (H_1^2 - H_2^2) \dots\dots\dots (6.114.)$$



Gb. 6.57. Metoda analitis Dupuit.

Persamaan (6.114.) menghasilkan permukaan garis freatik berbentuk parabola, akan tetapi derivatif persamaannya tidak mempertimbangkan kondisi masuk dan keluarnya air rembesan pada tubuh bendungan. Lagi pula, jika $H_2 = 0$, maka garis freatik akan memotong permukaan kedap air.

4) Garis freatik dalam bendungan tanah tanpa filter.

Gambar 6.58. menunjukkan sebuah bendungan tanah homogen tanpa filter drainase mendatar di hilir.

Berdasarkan persamaan dasar parabola secara teoretis garis freatik mulai dari titik B memotong lereng bendungan di hilir dan titik J dan keluar sampai ke titik G pada dasar bendungan. Sebenarnya garis freatik akan melalui titik-titik B – K – F. Titik K merupakan titik singgung parabola dengan kaki bendungan



Gb. 6.58. Bendungan tanah tanpa filter drainase.

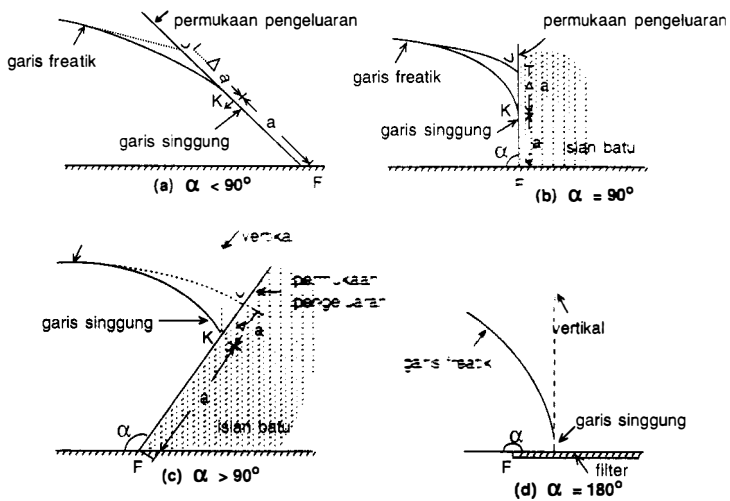
di hilir. Bagian KF disebut permukaan pengeluaran (*discharge face*) dan selalu berbekas basah.

Untuk menghitung Δa dan a tergantung besar sudut: α dan harga-harganya berdasarkan tabel 6.13.

Tabel 6.13. Hubungan antara α dan $\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$

α	$\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$
30°	0,36
60°	0,32
90°	0,26
120°	0,18
135°	0,14
150°	0,10
180°	0,00

Sudut α bahkan dapat melampaui 90° khususnya bendungan yang mempunyai isian batu di ujung bawah kaki lereng (Lihat gambar 6.59.)



Gb. 6.59. Kondisi keluarnya air untuk bermacam-macam kemiringan pada permukaan pengeluaran.

5) Syarat-syarat pembuatan jaring-jaring aliran.

Bentuk umum suatu jaring-jaring aliran untuk sebagian besar kasus akan ditentukan oleh kondisi-kondisi batas.

Perkecualian pada titik-titik tunggal, di mana jaring-jaring aliran dapat menentukan kondisi-kondisi batas.

Syarat-syarat umum untuk kondisi-kondisi batas jaring-jaring aliran:

- a. Jaring-jaring aliran berpotongan dengan garis-garis ekipotensial saling tegak lurus, kecuali pada titik-titik tunggal di mana kecepatan = nol (stagnasi) atau $v \rightarrow \infty$, seperti yang terjadi pada sudut-sudut atau ujung-ujung dinding penahan yang tidak tembus air.
- b. Untuk kuantitas = q dan Δh harus merupakan besaran yang sama untuk setiap garis ekipotensial.
- c. Tinggi tekanan pada perpotongan antara garis freatik dan setiap garis ekipotensial = nol.
- d. Semua jalur aliran harus mengandung kontinuitas, sehingga kuantitas masuk = kuantitas keluar ($q_{\text{masuk}} = q_{\text{keluar}}$).

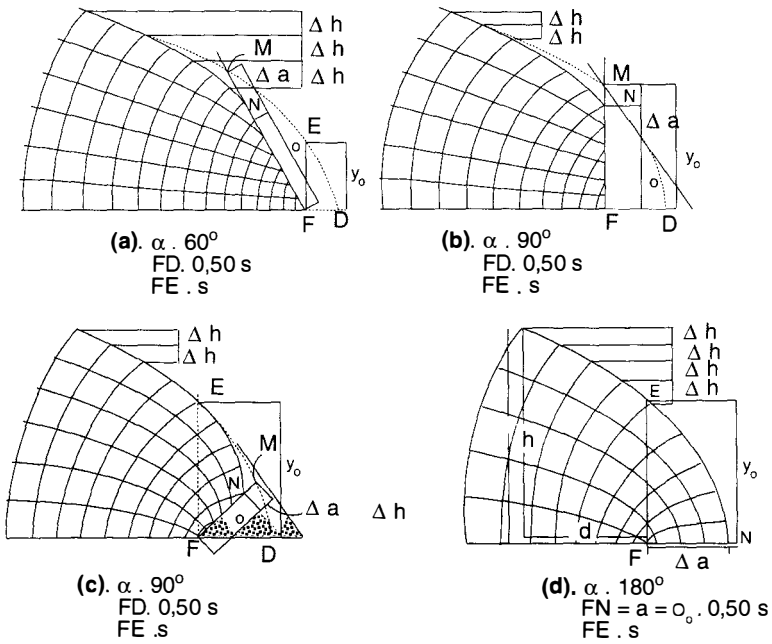
Untuk membuat jaring-jaring aliran, maka dapat dipakai petunjuk-petunjuk sebagai berikut:

- a. Selalu gambarkan bujur sangkar-bujur sangkar yang saling berpotongan tegak lurus apabila masih memungkinkan untuk menggambarannya (kecuali pada titik-titik tunggal, seperti pada sudut-sudut). Apabila timbul kondisi-kondisi yang memerlukan empat persegi panjang, lihat gambar 6.60. untuk modifikasi sehingga dapat memakai kembali bentuk bujur sangkar.
- b. Pakailah sesedikit mungkin jalur aliran (dan penurunan ekipotensial yang dihasilkannya), sambil tetap mempertahankan bentuk bujur sangkar. Umumnya empat sampai enam jalur akan cukup dan gunakan skala penggambaran yang sesuai.
- c. Periksa ketepatan bujur sangkar-bujur sangkar tersebut dengan menambah garis-garis tertentu dan telitilah apakah garis-garis tersebut membagi bujur sangkar yang lebih besar menjadi bujur sangkar yang lebih kecil tetap masih dapat dilihat.

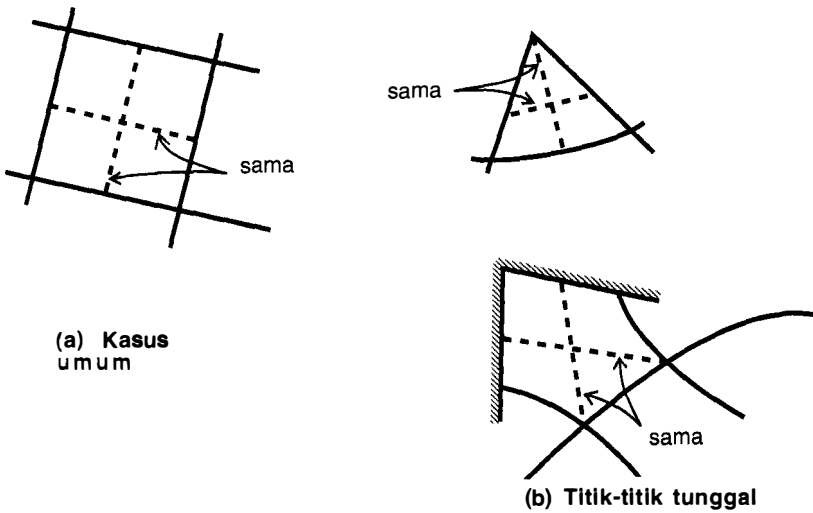
- d. Pakailah sepasang pembagi (divider) untuk mengukur dimensi-dimensi bujur sangkaryang bersangkutan (Lihat gambar 6.61.).
- e. Selalu perhatikan gambar jaring-jaring aliran tersebut secara keseluruhan. Jangan membuat penyesuaian-penyesuaian kecil sebelum keseluruhan jaring-jaring aliran mendekati kebenaran.
- f. Ambil kondisi-kondisi yang simetri bila memungkinkan. Geometri yang simetris dapat menghasilkan jaring-jaring yang hampir tepat berbentuk bujur sangkar. Apabila ini diperoleh, buat dan gambarkan luasan ini terlebih dahulu, baru kemudian dilanjutkan ke daerah-daerah yang berdampingan.
- g. Pakailah peralihan (transisi) yang halus di sekitar sudut-sudut. Gunakan transisi yang berangsur-angsur dari bujur sangkar yang kecil ke bujur sangkar yang besar.
- h. Muka aliran yang bersentuhan dengan udara bukan merupakan garis aliran ataupun garis ekipotensial, walaupun demikian batas seperti tersebut di atas harus tetap memenuhi kondisi-kondisi yang sama untuk penurunan potensial bernilai sama, apabila garis-garis ekipotensial memotongnya.
- i. Untuk memperoleh hasil yang sangat baik, jaring-jaring aliran yang digambarkan secara kasar sudah akan mencukupi. Walaupun penggambaran kasar ini biasanya tidak dapat diterima di dalam suatu pekerjaan akademis, para mahasiswa harus mengetahui bahwa ratio N_f/N_e tidak akan relatif berubah jika dibandingkan dengan jaring-jaring aliran yang digambarkan secara tepat dan teliti. Harus selalu diingat bahwa koefisien permeabilitas mungkin akan benar dalam besarnya yang akan jauh kurang teliti jika dibandingkan dengan ratio N_f/N_e .

6) Filter pelindung

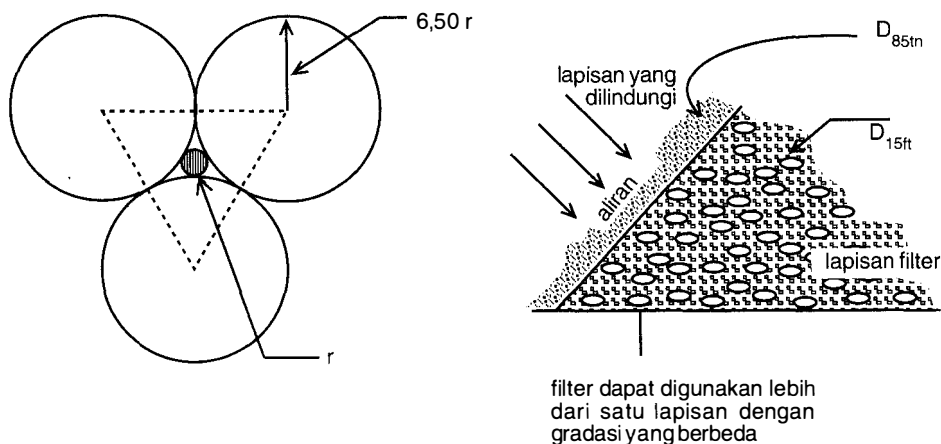
Seperti telah diuraikan dalam metoda-metoda grafis Casagrande yang menggunakan model bendungan dengan filter drainase mendatar (Gambar 6.54.), maka piping dapat dikontrol dan/atau dihilangkan di dalam bendungan tanah dengan memakai filter atau filter miring pada bagian pengeluaran elemen yang tidak tembus



Gb. 6.60. Muka kaki bendungan di hilir dengan bermacam-macam sudut.



Gb. 6.61. Batasan suatu "bujur sangkar" untuk membuat jaring-jaring aliran.



Gb. 6.62. Konsep lapisan filter dan tanah yang dilindungi.

air. Filter harus miring untuk menjamin bahwa tanah yang dilindungi tidak dapat terbawa melalui bahan filter (Lihat gambar 6.62.)

Dua syarat yang harus dipenuhi filter drainase untuk mengendalikan rembesan, yaitu:

- Ukuran pori-pori harus cukup kecil untuk mencegah butir-butir tanah terbawa aliran.
- Permeabilitas harus cukup tinggi agar air yang masuk ke filter mempunyai kecepatan drainase yang besar.

Kriteria-kriteria yang harus dipenuhi bahan filter.

Empat syarat penting yang harus dipenuhi untuk bahan filter adalah sebagai berikut: (USBR. Earth Manual)

- Bahan filter harus cukup halus demikian juga ruang pori filter cukup kecil untuk mencegah tanah yang dilindungi dari penetrasi dan menyumbang filter.
- Bahan filter harus cukup kasar dan tembus air dibandingkan dengan bahan yang dilindungi demikian juga air segera lenyap tanpa menimbulkan gaya rembesan dalam filter.
- Bahan filter harus cukup kasar dan tidak terbawa air melalui pipa drainase terbuka. Pipa drainase harus dilengkapi dengan lubang-lubang kecil secukupnya atau ditambah lapisan kasar bila diperlukan.

- d. Lapisan filter harus cukup tebal untuk memenuhi distribusi semua ukuran butir baik seluruhnya pada filter dan dapat menyalurkan kuantitas rembesan.

Tebal filter akan memungkinkan cukup aman terhadap piping dan layak terhadap kemungkinan beku bahan tanah yang dilindungi pada kasus yang mungkin terjadi.

Sesuai dengan rekomendasi Terzaghi dan berdasarkan pengalaman serta didukung dengan percobaan-percobaan yang dilakukan oleh Bertram (1940), merekomendasikan dua kriteria bahan filter agar piping akan cukup terkontrol sebagai berikut:

- a. Untuk mencegah bahan fondasi masuk ke pori bahan filter dan memenuhi kriteria piping:

$$\frac{D_{15ft}}{D_{85tn}} < 4 \text{ sampai } 5 \dots\dots\dots (6.115.)$$

Dalam hal ini:

D_{15ft} = ukuran butir bahan filter yang terletak di garis 15% pada kurva gradasinya.

D_{85tn} = ukuran butir tanah yang dilindungi yang terletak di garis 85% pada kurva gradasinya.

- b. Untuk melindungi gaya rembesan terhadap filter sesuai yang diijinkan atau meyakinkan permeabilitas bahan filter mempunyai kemampuan drainase yang cukup tinggi:

$$\frac{D_{15ft}}{D_{15tn}} > 4 \text{ sampai } 5 \dots\dots\dots (6.116.)$$

Dalam hal ini:

D_{15tn} = ukuran butir tanah yang dilindungi yang terletak di garis 15% pada kurva gradasinya.

Korps insinyur-insinyur Amerika Serikat (U.S. corps Engineers) juga merekomendasikan kriteria sebagai berikut:

$$\frac{D_{50ft}}{D_{50tn}} \leq 25 \dots\dots\dots (6.117.)$$

Dalam hal ini:

D_{50ft} = ukuran butir bahan filter yang terletak di garis 50% pada kurva gradasinya.

D_{50tn} = ukuran butir tanah yang dilindungi yang terletak di garis 50% pada kurva gradasinya.

Syarat-syarat tersebut di atas harus memenuhi antara dua lapisan yang berdekatan dengan filter.

Kriteria yang diberikan Terzaghi telah dimodifikasi sebagai berikut (U.S.B.R. Design of small dam):

- a. $\frac{D_{15ft}}{D_{15tn}} = 5$ sampai 40, filter tidak mengandung lebih 5% bahan yang lebih kecil 0,075 mm.
- b. $\frac{D_{15ft}}{D_{85tn}} \leq 5$
- c. $\frac{D_{85ft}}{\text{Lubangpipadrainmaks.}} \geq 2$
- d. Kurva ukuran butir filter kurang lebih sejajar dengan bahan tanah yang dilindungi.

Tebal filter

Penentuan tebal filter, bukan hanya didasarkan pada perhitungan-perhitungan teoritis, tetapi juga dipertimbangkan faktor-faktor praktis dan faktor-faktor keamanan lainnya.

Sebagai contoh dapat kiranya diikuti uraian sebagai berikut:

- a. Apabila diperoleh bahan pasir sungai berbutir hampir seragam dan butirannya berbentuk bulat dengan koefisien filtrasi: $k = 1 \times 10^{-2}$ sampai 1×10^{-3} cm/detik, maka secara teoritis bahan seperti ini dapat digunakan sebagai filter dengan ketebalan antara: 20 sd. 30 cm saja.
- b. Akan tetapi dengan mempertimbangkan faktor-faktor praktis dan faktor-faktor keamanan baik pada saat penimbunan, maupun saat eksploitasinya dan faktor besarnya debit filtrasi yang harus diluluskan, maka dalam pelaksanaannya filter dari bahan semacam ini dapat mencapai ketebalan antara 2 sd. 3 meter.

Contoh-contoh perhitungan:

1. Hitung kuantitas rembesan yang terjadi pada bendungan tipe urukan seperti tampak dalam gambar 6.61.

Jika diketahui koefisien permeabilitas: $k = 4 \times 10^{-4}$ m/menit.

Perhitungan:

$$AD = m \cdot H_t + 10 + m \cdot H_t$$

$$AD = 2,50 \times 10 + 10 + 2,50 \times 20 = 110,00 \text{ m}$$

$$L = m \cdot H = 2,50 \times 18 = 45,00 \text{ m}$$

$$BC = 0,30 L = 0,30 \times 45 = 13,50 \text{ m}$$

$$D = AD - 0,70 L = 110 - 0,70 \times 45 = 78,50 \text{ m}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{20}{50} = 21,80^\circ$$

$$a = \frac{D}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{78,50^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\cos^2 \alpha}} \rightarrow \alpha \leq 30^\circ$$

$$a = \frac{78,50}{\cos 21,80} - \sqrt{\frac{78,50^2}{\cos^2 21,80} - \frac{18^2}{\sin^2 21,80}}$$

$$a = 84,55 - 69,27 = 15,28 \text{ m.}$$

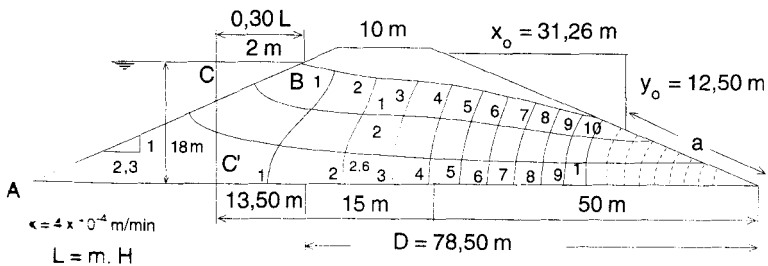
Kuantitas rembesan dalam tubuh bendungan tiap meter lebar:

$$q = k.a. \sin \alpha \cdot \tan \alpha$$

$$q = 4 \times 10^{-4} \times 15,28 \times \sin 21,80 \times \tan 21,80$$

$$q = 4 \times 10^{-4} \times 15,28 \times 0,3714 \times 0,4000$$

$$q = 9,08 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{menit}/\text{m.}$$



Gb. 6.63. Bendungan tipe urukan tanpa filter.

Dibandingkan dengan menggunakan jaring-jaring aliran:

$$N_f = 2,60 \text{ dan } N_e = 16$$

$$q = k.H. \frac{N_f}{N_e} = 4 \times 10^{-4} \times 18 \times \frac{2,60}{16} = 11,70 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{men.}/\text{m}$$

2. Sebuah bendungan tanah dengan filter miring pada kaki lereng di hilir seperti tampak dalam gambar 6.64. Jika koefisien permeabilitas tanah: $k = 2 \times 10^{-5}$ cm/det, maka hitung kuantitas rembesan air yang melalui tubuh bendungan tersebut.

Perhitungan:

$$N_f = 1,90$$

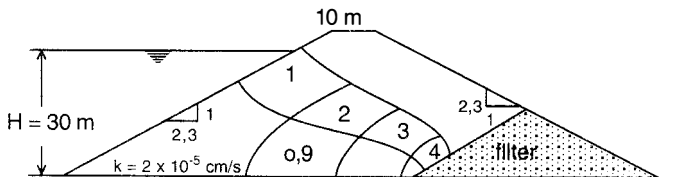
$$N_e = 4$$

$$k = 2 \times 10^{-5} \text{ cm/det.} = 2 \times 10^{-7} \text{ m/det}$$

$$H = 30 \text{ m}$$

$$q = k.H. \frac{N_f}{N_e} = 2 \times 10^{-7} \times 30 \times \frac{1,90}{4}$$

$$q = 2,85 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det.}/\text{m.}$$



Gb. 6.64. Bendungan tanah dengan filter miring.

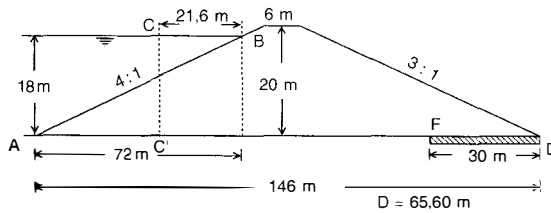
3. Sebuah bendungan tanah homogen dengan filter mendatar seperti tampak dalam gambar 6.65. Diminta untuk menggambar garis freatik dan tentukan kuantitas rembesan air yang melalui tubuh bendungan tanah homogen tersebut, jika diketahui koefisien permeabilitas tanah: $k = 5 \times 10^{-4}$ cm/detik.

Penyelesaian:

$$L = m.H. = 4 \times 18 \text{ m} = 72 \text{ m}$$

$$BC = 0,30 L = 0,30 \times 72 \text{ m} = 21,60 \text{ m}$$

$$FC' = D = AD - AC - FD = 146 - 50,40 - 30 = 65,60 \text{ m}$$



Gb. 6.65. Bendungan tanah homogen dengan filter mendatar.

$$s = \sqrt{D^2 + H^2} - D$$

$$s = \sqrt{65,60^2 + 18^2} - 65,60 = 2,42 \text{ m}$$

Persamaan parabola:

$$y = \sqrt{2xs + s^2} = \sqrt{4,84x + 5,86}$$

Untuk memudahkan perhitungan selanjutnya dibuat tabel seperti di bawah ini.

x	0	10	20	30	40	50	60	65,60
y	2,42	7,37	10,13	12,29	14,12	15,74	17,21	18,00

Dari hasil-hasil tabel di atas ini dapat digambarkan garis freatik.

Kuantitas rembesan air yang melalui tubuh bendungan:

$$q = k.s.$$

$$k = 5 \times 10^{-4} \text{ cm/detik} = 5 \times 10^{-6} \text{ m/detik}$$

$$q = 5 \times 10^{-6} \times 2,42 = 1,21 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{detik/m.}$$

4. Diketahui suatu konstruksi turap baja seperti tampak pada gambar 6.66.

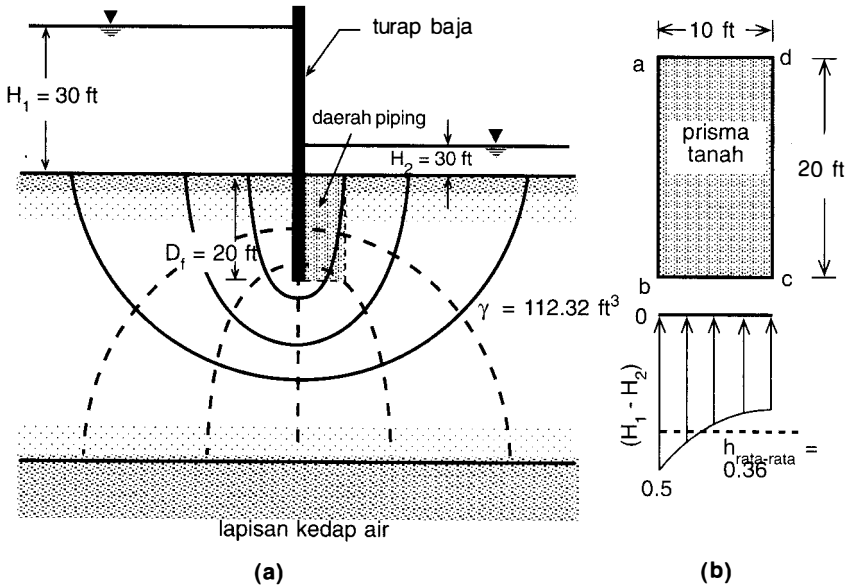
Tentukan faktor keamanan konstruksi tersebut terhadap piping.

Penyelesaian:

$$n_c = \frac{3}{6} (H_1 - H_2) = 0,50 (30 - 5) = 12,50 \text{ ft}$$

$$hc = \frac{1,60}{6} (H_1 - H_2) = 0,27 (30 - 5) = 6,75 \text{ ft}$$

$$h_{\text{rata-rata}} = 0,36 (H_1 - H_2) = 0,36 (30 - 5) = 9,00 \text{ ft}$$



Gb. 6.66. (a) Jaringan-jaring aliran rembesan air sekeliling turap baja.
 (b) Detail daerah piping dan diagram tekanan.

$$i_{\text{rata-rata}} = \frac{h_{\text{rata-rata}}}{D_f}$$

$$i_{\text{rata-rata}} = \frac{9}{20} = 0,45$$

$$FK. = \frac{\gamma'}{i_{\text{rata-rata}} \cdot \gamma_w}$$

$$FK. = \frac{(112,32 - 62,40)}{0,45 \times 62,40} = 1,78$$

$$FK = 3 - 4$$

Jadi konstruksi turap baja tersebut tidak aman terhadap piping.

- Konstruksi turap seperti tampak pada gambar 6.67. Tinggi air di hulu $H = 6$ m. Di bagian hilir terdapat filter setebal: $h_{ft} = 1,80$ m dengan berat isi basah = $2,0 \text{ t/m}^3$, sedang lapisan tanah tembus air mempunyai berat isi = $1,95 \text{ t/m}^3$.

Selidiki apakah konstruksi tersebut aman terhadap piping berdasarkan metoda Harza dan Terzaghi?

Jawaban:

Metoda Harza:

Ditinjau titik P.

$$H = 6 \text{ m}$$

$$N_e = 10$$

$$N_{eP} = 9,50$$

Tinggi tekanan air di P:

$$h_p = H (1 - N_{eP}/N_e) = 6 (1 - 9,50/10) = 0,30 \text{ m}$$

$$\text{Panjang lintasan rembesan air: } PA = z = 0,91 \text{ m}$$

Gradien hidrolitik keluar (exit gradien):

$$i_e = \frac{h_p}{z} = \frac{0,30}{0,91} = 0,33$$

Tegangan efektif di P:

$$\sigma_{ef.} = z (\gamma_{sat.} - \gamma_w) + h_{ft} \times \gamma_{ft}$$

$$\sigma_{ef.} = 0,91 (1,95 - 1) + 1,80 \times 2,0$$

$$\sigma_{ef.} = 0,86 + 3,60 = 4,46 \text{ t/m}^2$$

Gaya rembesan ke atas:

$$U = i_e \times z \times \gamma_w = 0,33 \times 0,91 \times 1 = 0,30 \text{ t/m}^2$$

Faktor keamanan:

$$FK = \frac{\sigma_{ef.}}{U} = \frac{4,46}{0,30} = 14,87$$

Aman terhadap piping.

Atau dapat dihitung sebagai berikut:

$$h_p = 0,30 \text{ m}$$

$$u_p = h_p \cdot \gamma_w = 0,30 \times 1 = 0,30 \text{ t/m}^2$$

$$FK = \frac{\sigma_{ef.}}{u_p} = \frac{4,46}{0,30} = 14,87$$

Tinggi tekanan air di C:

$$N_{eC} = 6$$

$$h_C = H (1 - N_{eC}/N_e) = 6 (1 - 6/10) = 2,40 \text{ m}$$

Tinggi tekanan air di D:

$$N_{eD} = 6,60$$

$$h_D = H (1 - N_{eD}/N_e) = 6 (1 - 6,60/10) = 2,04 \text{ m}$$

Tinggi tekanan air di E:

$$N_{eE} = 7,20$$

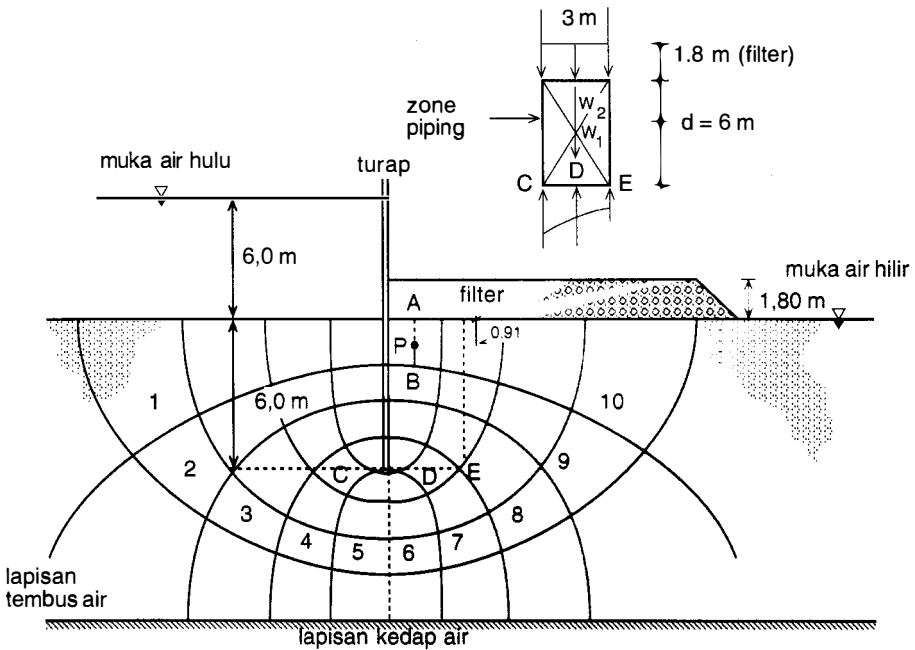
$$h_E = H (1 - N_{eE}/N_e) = 6 (1 - 7,20/10) = 1,68 \text{ m}$$

Tinggi tekanan air rata-rata:

$$h_r = \frac{1,50}{3,00} \left(\frac{2,40 + 1,68}{2} + 2,04 \right) = 2,04 \text{ m}$$

Faktor keamanan:

$$FK = \frac{0,50d \times dx\gamma' + 0,50d \times h_{ft} \times \gamma_{ft}}{0,50d \times \gamma_w \times h_r}$$



Gb. 6.67. Konstruksi turap dengan filter di hilir.

$$FK = \frac{dx\gamma' + h_{ft} \times \gamma_{ft}}{h_r \times \gamma_w}$$

$$FK = \frac{6 \times 0,95 + 1,80 \times 2,0}{2,04 \times 1}$$

$$FK = 4,56$$

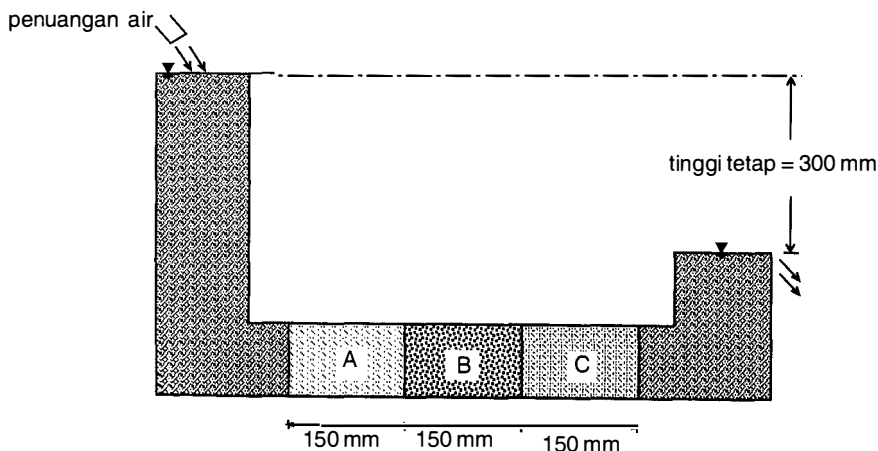
Jadi konstruksi aman terhadap piping.

Soal-soal latihan campuran:

- Gambar 6.68. menunjukkan lapisan-lapisan tanah dalam tabung berpenampang melintang 100 mm x 100 mm. Penuangan air ke dalam tabung tetap dipertahankan dengan ketinggian 300 mm. Koefisien permeabilitas tanah yang teraliri air masing-masing sebagai berikut:

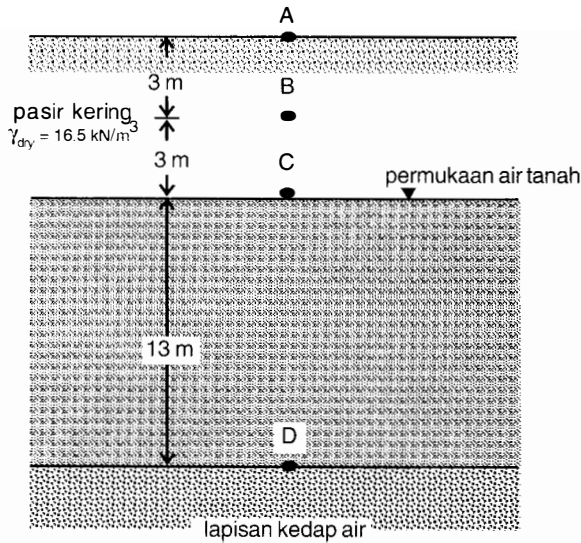
Tanah:	k (cm/detik):
A	10^{-2}
B	3×10^{-3}
C	$4,9 \times 10^{-4}$

Tentukan kuantitas air yang merembes melalui tanah tersebut dalam cm^3/jam .



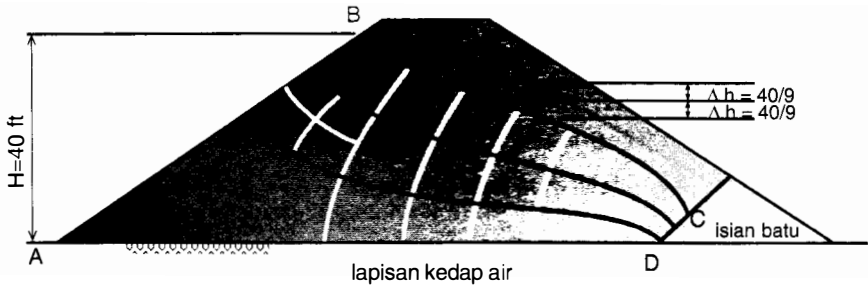
Gb. 6.68. Penampang tiga lapisan tanah.

2. Penampang melintang tanah seperti tampak pada gambar 6.69. Hitung tegangan total, tegangan air pori dan tegangan efektif di A, B, C dan D.



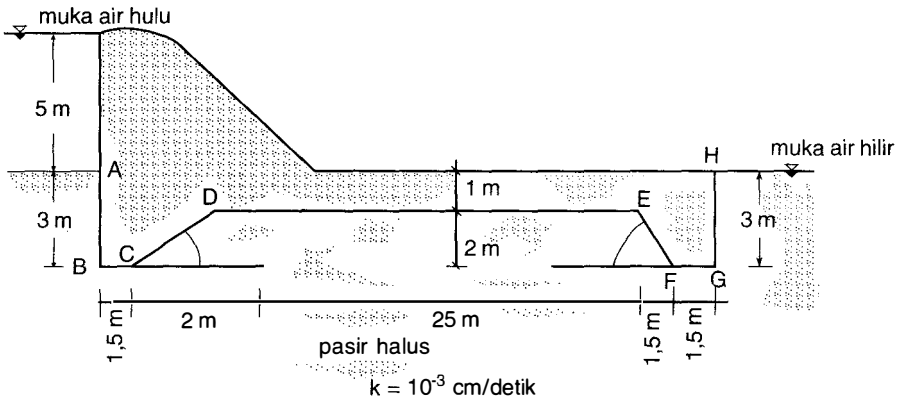
Gb. 6.69. Penampang melintang tanah untuk menghitung tegangan total, tegangan air pori dan tegangan efektif.

3. Diketahui jaring-jaring aliran dalam bendungan tanah seperti tampak dalam gambar 6.70. Tentukan kuantitas rembesan dan gradien hidrolik pada bujur sangkar I. Jika koefisien permeabilitas: $k = 0,0005 \text{ m/detik}$.



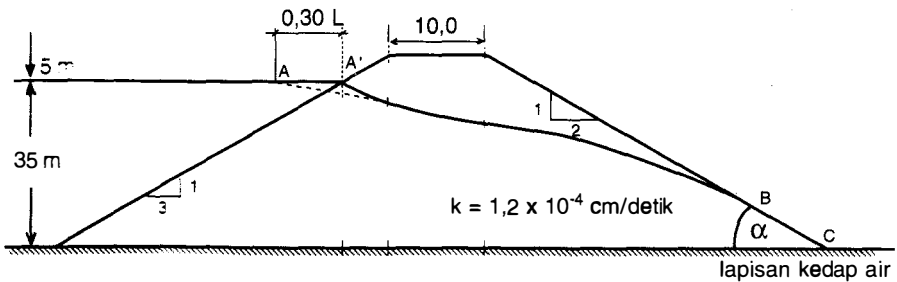
Gb. 6.70. Aliran melalui bendungan tanah.

4. Penampang melintang bendung beton seperti tampak dalam gambar 6.71. Selidiki apakah bendung tersebut aman terhadap piping berdasarkan teori Bligh dan Lane. Jika tidak aman apakah yang harus dilakukan untuk mengatasi hal tersebut? Hitung kuantitas rembesan yang melalui bawah bendung.



Gb. 6.71. Penampang bendung beton.

5. Sebuah bendungan tipe urukan seperti terlihat pada gambar 6.72. Tentukan kuantitas rembesan yang melalui tubuh bendungan tersebut dalam m^3 /menit, dengan metoda:
- Dupuit
 - Schaffernak
 - Casagrande.



Gb. 6.72. Penampang bendungan tipe urukan.

Daftar Pustaka

1. A.A.S.H.T.O. Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing Part II. Washington D.C. 20001 U.S.A., 1982.
2. Arpad Kezdi. *Handbook of soil Mechanics*, Vol. 2 *Soil Testing*. Elsevier Scientific Publishing Company. New York, 1980.
3. A.S.T.M. Annual Book of ASTM Standards Part 19., *Soil and Rock*, Building Stones. Philadelphia U.S.A., 1981.
4. Babbit, Harold E.MS. and James J. Doland, MS, CE, D.Sc., *Water Supply Engineering*. Mc.Graw-Hill Book Company, Inc. New York, 1967.
5. Bowles, J.E., *Engineering Properties of Soils and Their Measurement*, International Student Edition. Mc. Graw-Hill International Book Company, Singapore, 1984.
6. Bowles, J.E., *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. Alih bahasa Ir. Johan Kelanaputra Hainim. Penerbit Erlangga Jakarta, 1984.
7. Braja M. Das., *Principles of Geotechnical Engineering*. P.W.S. Engineering Boston U.S.A., 1985.
8. Braja M. Das., *Mekanika Tanah Jilid 1 (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*, Penerbit Erlangga, Jakarta, cetakan ketiga, 1993.
9. Djatmiko Soedarmo, G, Ir., *Diktat Mekanika Tanah Jilid I*. Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Karya Malang, 1989.
10. Djatmiko Soedarmo, G.Ir., *Petunjuk Praktikum Mekanika Tanah*, Universitas Merdeka Malang, 1985.
11. Hary Christady Hardiyatmo, M. Eng., *Mekanika Tanah I*, Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama Jakarta, 1992.

12. Lambe, William T., *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons Inc. New York, 1969.
13. Lambe, William T., *Soil Testing for Engineers*, John Wiley & Sons Inc. New York, 1951.
14. Murthy, V.N.S., Prof., BE, MS, Ph.D., F.I.E., *Soils Mechanics & Foundation Engineering*, Dhanpat Rai & Sons. New Delhi, 1987.
15. Punmia, B.P., *Soil Mechanics and Foundation*, Standard Book House. Nai Sarak Delhi, 1982.
16. Santosh Kumar Garg, B.Sc.Eng. (Civil); A.M.I.E., *Irrigation Engineering and Hydraulic Structures*, Khanna Publisher. Nai Sarak Delhi, 1976.
17. Shirley LH, Ir., *Penuntun Praktis Geoteknik dan Mekanika Tanah*, Penerbit Nova Bandung, 1987.
18. Silvia Sukirman, *Perkerasan Lentur Jalan Raya*, Penerbit Nova Bandung.
19. Sunggono, KH., Ir., *Mekanika Tanah*, Penerbit Nova Bandung, 1984.
20. Suyono Sosrodarsono, Ir dan Kensaku Takeda, *Bendungan Type Urunan*, PT. Pradnya Paramita Jakarta, 1989.
21. U.S.B.R., *Design of Small Dams*, Oxford & IBH Publishing Co. New Delhi, 1961.
22. Verma, BP., *Problems in Soil Mechanics*, Khanna Publisher Delhi, 1975.
23. Wesley, L.D., *Mekanika Tanah*, Badan Penerbit Pekerjaan Umum Jakarta, 1977.
24. Majalah *Konstruksi*, PT. Tren Pembangunan Jakarta.
25. Majalah *Insinyur*, P.I.I. Jakarta.

Daftar Konversi

Panjang

- 1 meter (m) = 100 centimeter (cm)
- 1 meter (m) = 3,281 feet (ft)
- 1 meter (m) = 39,37 inchi (in)
- 1 inchi (in) = 2,54 centimeter (cm)
- 1 foot (ft) = 30,48 centimeter (cm)
- 1 mikron (μ) = 10^{-4} centimeter (cm)

Luas:

- 1 m² = 10,764 ft²
- 1 m² = 1.550,016 in²
- 1 m² = 10⁴ cm²
- 1 cm² = 10² mm²
- 1 ft² = 14⁴ in²
- 1 ft² = 929,03 cm²
- 1 in² = 6,452 cm²

Isi:

- 1 m³ = 1.000 dm³
- 1 dm³ = 1.000 cm³
- 1 dm³ = 1 liter (*ℓ*)
- 1 liter = 1.000 cm³
- 1 cm³ = 1.000 mm³
- 1 m³ = 35,315 ft³
- 1 ft³ = 1.728 in³
- 1 ft³ = 28.317 cm³
- 1 in³ = 16,387 cm³

Kecepatan:

- 1 m/det. = 100 cm/det.
- 1 m/det. = 39,37 in/sec.
- 1 m/det. = 3,28 ft/sec.
- 1 in/sec. = 2,54 cm/det.
- 1 ft/sec. = 30,48 cm/det.
- 1 ft/min. = 0,508 cm/det.
- 1 ft/min. = 5.080 u/det.

Massa:

- 1 ton = 1.000 kg.
- 1 ton = 2.200 lb.
- 1 kg. = 2,20 lb.
- 1 lb = 453,60 gr.
- 1 Kip = 1.000 lb.
- 1 N = 1.0197×10^2 gr.
- 1 dyne = $1,0197 \times 10^{-3}$ gr.

Tekanan:

- 1 ton/m² = 1 kg/cm²
- 1 kg/cm² = 0,10 MPa (Mega Pascal – SI).
- 1 ton/ft² = 0,976 kg/cm²
- 1 ton/ft² = 13,90 psi (lb/in²)
- 1 psi = 70,30 gr/cm²
- 1 psi = 6,895 x 10⁴ dyne/cm²
- 1 psi = 5,17 cm Hg (pada 0°C)
- 1 psi = 5,19 cm Hg (pada 20°C)
- 1 psi = 2,03 in Hg (pada 0°C)
- 1 psi = 2,04 in Hg (pada 20°C)
- 1 psi = 70,29 cm air (pada 4°C)
- 1 psi = 70,43 cm air (pada 20°C)
- 1 psi = 27,67 in air (pada 4°C)
- 1 psi = 27,73 in air (pada 20°C)
- 1 cm Hg (pada 20°C) = 13,57 cm air (pada 20°C)
- 1 cm Hg (pada 20°C) = 5,34 in air (pada 20°C)
- 1 cm Hg (pada 20°C) = 27,75 lb/ft²
- 1 atm. = 14,70 psi

1 atm.	=	76,00 cm Hg	(pada 0°C)
1 atm.	=	33,90 ft air	(pada 4°C)
1 atm.	=	2.116 lb/ft ²	
1 bar	=	105 Pa	
1 bar	=	1,0197 x 10 ³ gr/cm ²	
1 mbar (milibar)	=	1,0197 x 10 ⁴ gr.cm ²	

Usaha/Daya:

1 kgm	=	105 gr.cm
1 DK	=	27 x 109 gr.cm
1 DK/HP	=	550 ft-lb/sec
1 erg	=	1,0197 x 10 ⁻³ gr.cm
1 J (Joule)	=	1,0197 x 10 ⁴ gr.cm

Energi pepadatan:

1 lb. ft/ft ³	=	47,88 J/m ³
--------------------------	---	------------------------

Kekentalan:

1 dyne sec/cm ²	=	1 poise
1 gram sec/cm ²	=	980,70 poise
1 pound sec/ft ²	=	478,69 poise
1 poise	=	1.000 mili poise

Faktor-faktor Konversi

Konversi dari	Ke	Dikalikan dengan
Atmosfir	kg/cm ²	1,0333
Atmosfir	lb/in ²	14,70
Centimeter	ft	3,281 x 10 ⁻²
Centimeter	in	0,3937
Feet kubik	m ³	0,02832
Feet kubik	liter	28,32
Meter kubik	ft ³	35,31
Hari	detik	86.400
Feet	cm	30,48
Feet	m	0,3048
Feet air	lb/in ²	0,4335
Feet/sec	m/det	0,3048
Feet/sec ²	m/det ²	0,3048
Foot-pounds	kg.m	0,1383
Gallon (U.S.)	ft ³	0,1337
Gallon (British)	liter	4,546
Gram	lb	2,205 x 10 ⁻³
Gram/cm ³	lb/ft ³	62,43
Gram/liter	lb/ft ³	0,062427
Daya kuda (Horse Power)	ft-lb/sec	550,077
Daya kuda	kW	0,7457
Inchi	cm	2,540
Inci	m	2,540 x 10 ⁻²
Inchi	mm	25,40
Kilogram	lb	2,205
Kilogram/m ³	lb/ft ³	0,06243

Kilogram/cm ²	lb/in ³	14,22
Kilogram/m ²	lb/ft ³	0,2048
Kilogram-meter	ft-lb	7,23
Liter	ft ³	0,03532
Liter/jam	ft ³ /sec	9,81 x 10 ⁻⁶
Meter	ft	3,281
Meter	in	39,37
Meter/det.	ft/sec	3,281
Milimeter	in	0,03937
Pounds	gr	453,5924
Pounds/ft ³	kg/m ³	16,02
Pounds/in ²	kg/cm ²	0,07031
Centimeter persegi	ft ²	1,077 x 10 ⁻²
Centimeter persegi	in ²	0,1550
Feet persegi	m ²	0,0929
Inchi persegi	cm ²	6,452
Meter persegi	ft ²	10,764
Ton	kg	1.000
Ton	lb	2.205

MEKANIKA TANAH I

Mekanika tanah merupakan bagian yang sangat penting dan tidak dapat dipisahkan dalam semua bidang kegiatan teknik sipil (bangunan gedung, waduk, irigasi, jalan raya, jembatan, jalan kereta api dan sebagainya). Ilmu mekanika tanah telah berkembang pesat sampai saat ini, namun perkembangan tersebut tidak terlepas dari teori dasar mekanika tanah yang telah ada.

Buku *Mekanika Tanah* ini terdiri dari dua jilid. Jilid I membahas tentang sifat-sifat serta klasifikasi tanah secara umum, pemadatan serta hidrolika tanah. Jilid II membahas tentang tekanan vertikal, konsolidasi dan penurunan, kuat geser tanah, tekanan tanah, kemantapan lereng serta penyelidikan lapangan.

Pembahasan dalam buku ini dilakukan secara rinci dan dilengkapi dengan contoh kasus. Oleh karena itu buku *Mekanika Tanah* ini sangat sesuai untuk mahasiswa dan para praktisi di bidang teknik sipil, khususnya bidang mekanika tanah.

ISBN 979-497-385-8
ISBN 979-497-386-6