

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsolidasi

Penambahan beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab-sebab lain. Beberapa atau semua faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan (Das, Braja M. 1985). Secara umum, Das, Braja M (1985) menjelaskan bahwa penurunan pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi ke dalam dua kelompok besar, yaitu:

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

2.1.1 Dasar Konsolidasi

Teori umum yang mencakup konsep tekanan pori dan tegangan efektif adalah dikembangkan oleh Terzaghi selama tahun 1920-1924. Teori konsolidasi Terzaghi membuat asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Tanah adalah, dan tetap akan, jenuh ($S=100\%$). Penurunan konsolidasi dapat diperoleh untuk tanah yang tidak jenuh, tetapi ramalan waktu terjadinya penurunan sangat tidak dapat dipercaya.
2. Air dan butiran-butiran tanah tidak dapat ditekan.

3. Terdapat hubungan yang linear antara tekanan yang bekerja dan perubahan volume $a_v = \frac{\Delta e}{\Delta v}$
4. Koefisien permeabilitas k merupakan konstanta. Perubahan temperatur dari sekitar 10 sampai 20⁰C menghasilkan sekitar 30 persen perubahan dalam viskositas air.
5. Konsolidasi merupakan konsolidasi satu dimensi (vertical), sehingga tidak terdapat aliran air atau pergerakan tanah lateral.
6. Contoh yang digunakan merupakan contoh tidak terganggu (Das, Braja M. 1985).

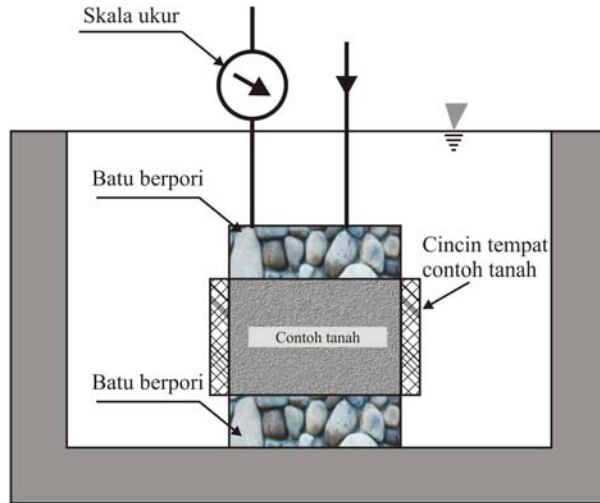
2.1.2 Uji Konsolidasi Satu Dimensi di Laboratorium

Prosedur untuk melakukan uji konsolidasi satu dimensi pertama-tama diperkenalkan oleh Terzaghi. Uji tersebut dilakukan di dalam sebuah konsolidometer (oedometer). Skema konsolidometer ditunjukkan dalam Gambar 2.1. Contoh tanah diletakkan di dalam cincin logam dengan dua buah batu berpori diletakkan di atas dan di bawah contoh tanah tersebut. Ukuran contoh tanah yang digunakan biasanya adalah: diameter 2,5 inci (63,5 mm) dan tebal 1 inci (25,4 mm). Pembebanan pada contoh tanah dilakukan dengan cara meletakkan beban pada ujung sebuah balok datar; dan pemampatan contoh tanah diukur dengan menggunakan skala ukur dengan skala mikrometer. Contoh tanah selalu direndam air selama percobaan. Tiap-tiap beban biasanya diberikan selama 24 jam. Setelah itu, beban dinaikkan sampai dengan dua kali lipat beban sebelumnya, dan pengukuran pemampatan diteruskan. Pada saat percobaan selesai, berat kering dari contoh tanah ditentukan.

Pada umumnya, bentuk grafik yang menunjukkan hubungan anantara pemampatan dan waktu adalah seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.2. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa ada tiga tahapan berbeda yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

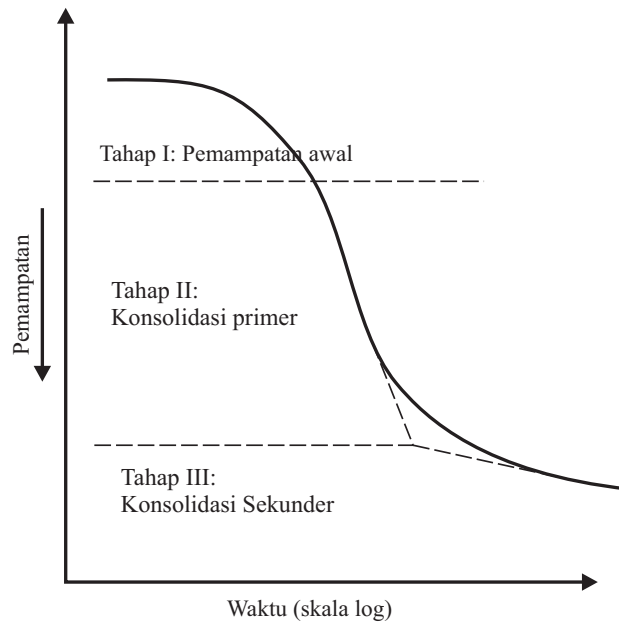
Tahap 1: Pemampatan awal (*initial compression*), yang pada umumnya disebabkan oleh pembebanan awal (*preloading*).

Tahap II: Konsolidasi primer (*primary consolidation*), yaitu periode selama tekanan air pori secara lambat laun dipindahkan ke dalam tegangan efektif, sebagai akibat keluarnya air dari pori-pori tanah.



Gambar 2.1: Konsolidometer

Tahap III: Konsolidasi sekunder (*secondary consolidation*), yang terjadi setelah tekanan air pori hilang seluruhnya. Pemampatan yang terjadi disini adalah disebabkan penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah.



Gambar 2.2: Grafik waktu – pemampatan selama konsolidasi untuk suatu penimbunan beban

2.1.3 Grafik Angka Pori - Tekanan

Setelah mendapatkan grafik antara waktu dan pemampatan untuk besar pembebanan yang bermacam-macam dari percobaan di laboratorium, selanjutnya penting bagi kita untuk mempelajari perubahan angka pori terhadap tekanan. Berikut ini adalah langkah demi langkah urutan pelaksanaannya.

1. Hitung tinggi butiran padat, H_s , pada contoh tanah (Gambar 2.3)

$$H_s = \frac{W_s}{A G_s \gamma_w} \dots\dots\dots (2.1)$$

Di mana:

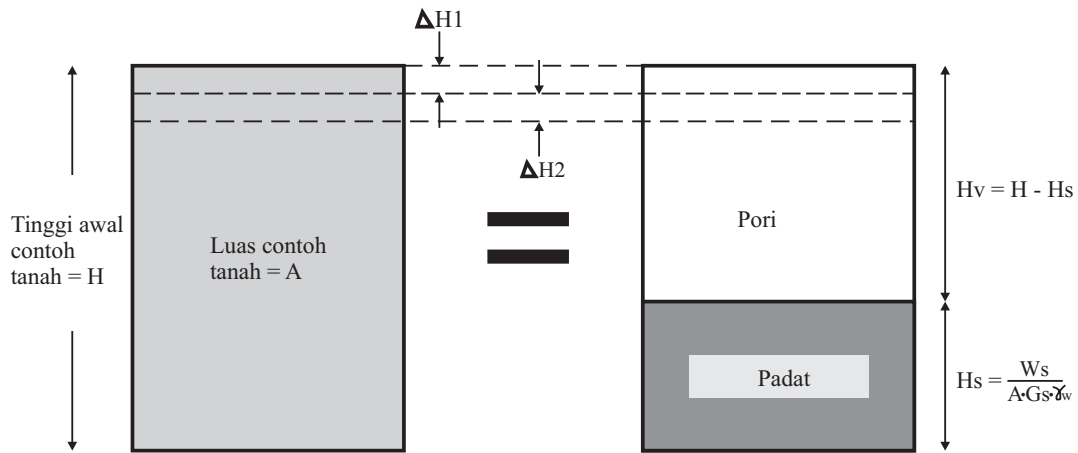
W_s = berat kering contoh tanah

A = luas penampang contoh tanah

G_s = berat spesifik contoh tanah

γ_w = berat volume air

2. Hitung tinggi awal dari ruang pori, H_v :



Gambar 2.3: Perubahan tinggi contoh tanah pada uji konsolidasi satu dimensi

$$H_v = H - H_s \dots\dots\dots(2.2)$$

Di mana H = tinggi awal contoh tanah

3. Hitung angka pori awal, e_0 , dari contoh tanah:

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v \cdot A}{H_s \cdot A} = \frac{H_v}{H_s} \dots\dots\dots (2.3)$$

4. Untuk penambahan beban pertama p_1 (beban total/luas penampang contoh tanah), yang menyebabkan penurunan ΔH_1 , hitung penurunan Δe_1 :

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s} \dots\dots\dots (2.4)$$

ΔH_1 didapatkan dari pembacaan awal dan akhir skala ukur untuk beban sebesar P_1 .

5. Hitung angka pori yang baru, e_1 , setelah konsolidasi yang disebabkan oleh penambahan tekanan P_1 :

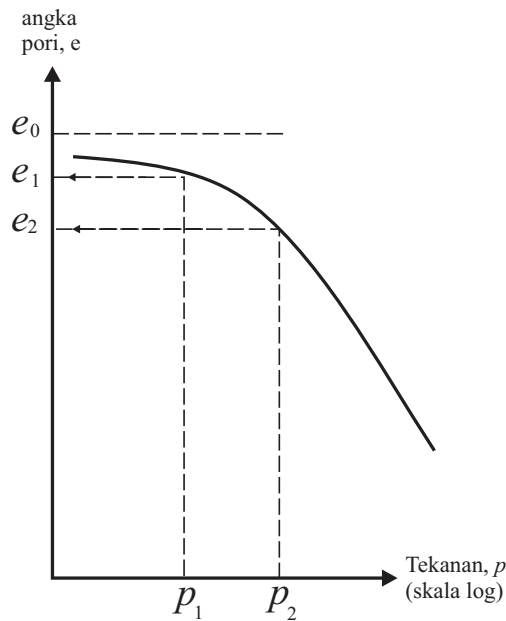
$$e_1 = e_0 - \Delta e_1 \dots\dots\dots (2.5)$$

Untuk beban berikutnya yaitu P_2 (beban kumulatif per satuan luas contoh tanah), yang menyebabkan penambahan pemampatan sebesar ΔH_2 , angka pori e_2 pada saat akhir konsolidasi dapat dihitung sebagai berikut:

$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan melakukan cara yang sama, angka pori pada saat akhir konsolidasi untuk semua penambahan beban dapat diperoleh.

Tekanan total (P) dan angka pori yang bersangkutan (e) pada akhir konsolidasi digambar pada kertas semi logaritma. Bentuk umum dari grafik e versus $\log p$ adalah seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.4.



Gambar 2.4: Bentuk khas grafik e versus $\log p$

2.1.4 Lempung yang Terkonsolidasi Secara Normal (Normally Consolidated) dan Terlalu Terkonsolidasi (Over Consolidated)

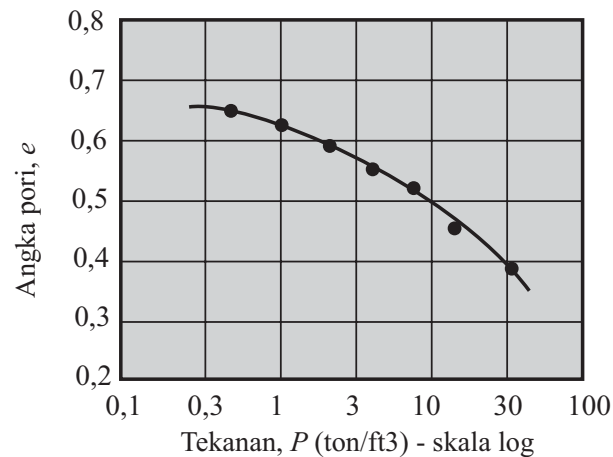
Gambar 2.4 menunjukkan bahwa bagian atas dari grafik e versus $\log p$ adalah garis lengkung dengan kemiringan yang agak datar, kemudian diikuti dengan bagian grafik yang mempunyai hubungan linear antara angka pori dengan $\log p$ yang mempunyai kemiringan agak curam. Keadaan ini dapat diterangkan dengan cara berikut ini:

Suatu tanah di lapangan dengan suatu kedalaman tertentu dalam sejarah geologinya telah mengalami tekanan efektif maksimum akibat berat tanah di atasnya (*maximum effective overburden pressure*). tekanan efektif *overburden* maksimum ini mungkin sama dengan atau lebih kecil dari tekanan *overburden* yang ada pada saat pengambilan contoh tanah. Berkurangnya tekanan di lapangan tersebut mungkin disebabkan oleh proses geologi alamiah atau proses yang disebabkan oleh makhluk hidup (misalnya manusia atau binatang). Pada saat diambil, contoh tanah tersebut terlepas dari tekanan *overburden* yang membebaninya selama ini; sebagai akibatnya contoh tanah tersebut akan mengembang. Ketika pada contoh tanah tersebut dilakukan uji konsolidasi, suatu pemampatan yang kecil (perubahan angka pori yang kecil) akan terjadi bila beban total yang diberikan pada saat percobaan adalah lebih kecil dari tekanan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami sebelumnya. Apabila beban total yang diberikan adalah lebih besar dari tekanan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami oleh tanah yang bersangkutan, maka perubahan angka pori yang terjadi adalah lebih besar, dan hubungan antara e versus $\log p$ menjadi linear dan memiliki kemiringan yang tajam. Untuk lebih jelasnya dapat pada Gambar 2.5

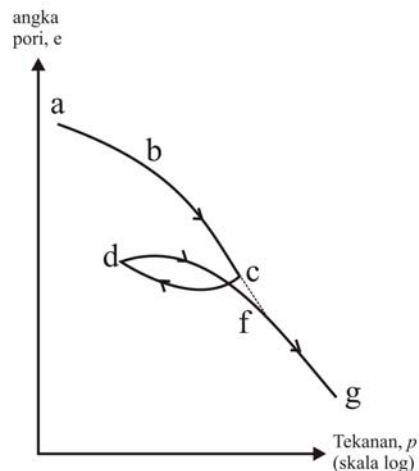
Keadaan ini dapat dibuktikan di laboratorium dengan cara membebani contoh tanah melebihi tekanan *overburden* maksimumnya, lalu beban tersebut diangkat dan diberikan lagi. Grafik e versus $\log p$ untuk keadaan tersebut ditunjukkan dalam Gambar 2.6, di mana cd menunjukkan keadaan pada saat beban diangkat dan dfg menunjukkan keadaan pada saat beban diberikan kembali.

Keadaan ini mengarah kepada dua definisi dasar yang didasarkan pada sejarah tegangan:

1. Terkonsolidasi secara normal (*normally consolidated*), dimana tekanan efektif *overburden* pada saat ini adalah merupakan tekanan maksimum yang pernah dialami oleh tanah itu.
2. Terlalu terkonsolidasi (*overconsolidated*), di mana tekanan efektif *overburden* pada saat ini adalah lebih kecil dari tekanan yang pernah dialami tanah ini sebelumnya. Tekanan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami sebelumnya dinamakan tekanan *prakonsolidasi* (*preconsolidation pressure*).



Gambar 2.5: Variasi angka pori terhadap tekanan



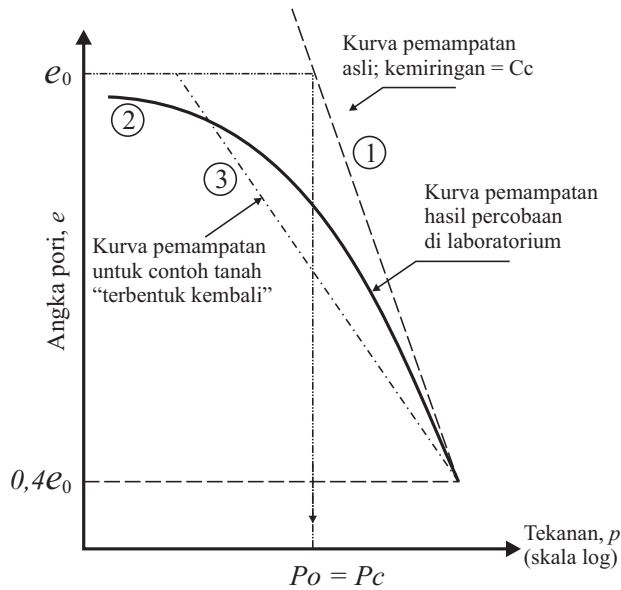
Gambar 2.6: Grafik e versus $\log p$ yang menunjukkan keadaan akibat pembebanan, pengangkatan beban, dan pembebanan kembali.

2.1.5 Pengaruh Kerusakan Struktur Tanah pada Hubungan Antara Angka Pori dan Tekanan

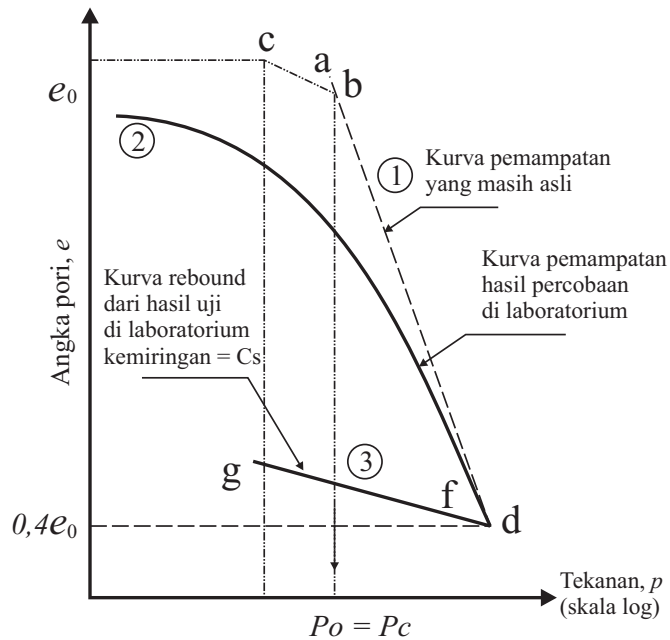
Suatu tanah dikatakan "terbentuk kembali" (*remolded*) apabila struktur dari tanah itu terganggu (*disturbed*). Keadaan ini akan mempengaruhi bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara angka pori dan tekanan dari tanah yang bersangkutan. Untuk suatu tanah lempung yang terkonsolidasi secara normal dengan derajat sensitivitas rendah sampai sedang (Gambar 2.7) serta angka pori e_o dan tekanan efektif *overburden* P_o , perubahan angka pori sebagai akibat dari penambahan tegangan di lapangan secara kasar dapat ditunjukkan seperti Kurva 1. Kurva yang hampir merupakan garis lurus apabila digambar pada kertas semi-logaritma tersebut dinamakan sebagai kurva pemampatan asli (*virgin compression curve*). Tetapi, kurva hasil uji konsolidasi di laboratorium untuk contoh tanah yang struktur tanahnya tidak rusak (*undisturbed*) dari tanah yang sama adalah Kurva 2 yang terletak di sebelah kiri Kurva 1. Apabila struktur dari contoh tanah tersebut benar-benar rusak dan kemudian dibentuk kembali (*remolded*), maka letak grafik e versus $\log p$ umumnya akan seperti Kurva 3. Kurva-kurva 1, 2, dan 3 akan berpotongan kira-kira pada angka pori $e = 0,4 e_o$ (Terzaghi dan Peck, 1967).

Untuk tanah lempung yang terlalu terkonsolidasi dengan derajat sensitivitas rendah sampai sedang dan sudah pernah mengalami tekanan prakonsolidasi P_c (Gambar 2.8) serta angka pori e_o dan tekanan efektif *overburden* P_o , kurva konsolidasi lapangan adalah seperti yang ditunjukkan oleh garis *cbd*. Perhatikan bahwa *bd* adalah bagian dari kurva pemampatan asli. Hasil uji konsolidasi di laboratorium terhadap contoh tanah yang tingkat kerusakan strukturnya tidak terlalu besar adalah seperti ditunjukkan oleh Kurva 2. Dapat disimpulkan bahwa kemiringan garis *cb*, yang merupakan garis pemampatan ulang (*recompression*) lapangan, mempunyai kemiringan yang hampir sama dengan kemiringan kurva pantul (*rebound curve*) *fg* dari hasil uji konsolidasi di laboratorium.

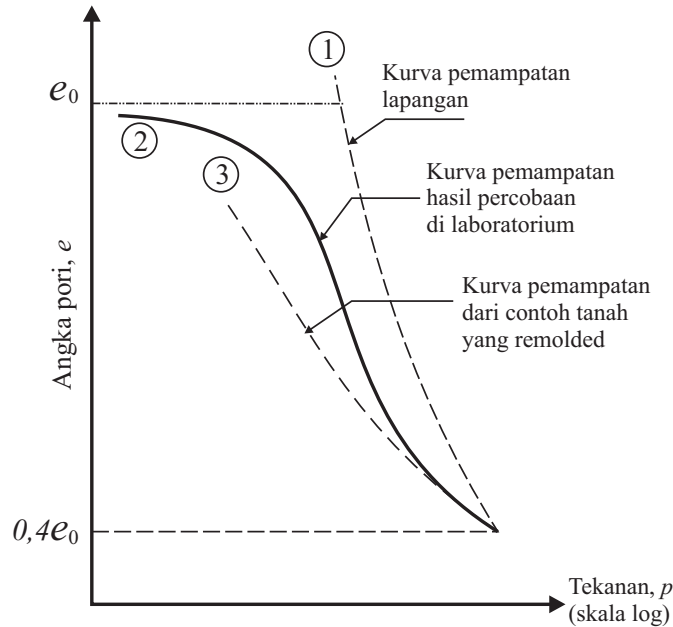
Tanah dengan derajat sensitivitas tinggi mempunyai struktur flokulasi. Di lapangan, jenis tanah tersebut umumnya sedikit prakonsolidasi (*preconsolidated*). Karakteristik konsolidasi tanah seperti ini ditunjukkan dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.7: Karakteristik konsolidasi lempung yang terkonsolidasi secara normal dengan sensitifitas rendah sampai sedang.



Gambar 2.8: Karakteristik konsolidasi lempung yang terlalu terkonsolidasi dengan sensitifitas rendah sampai sedang.

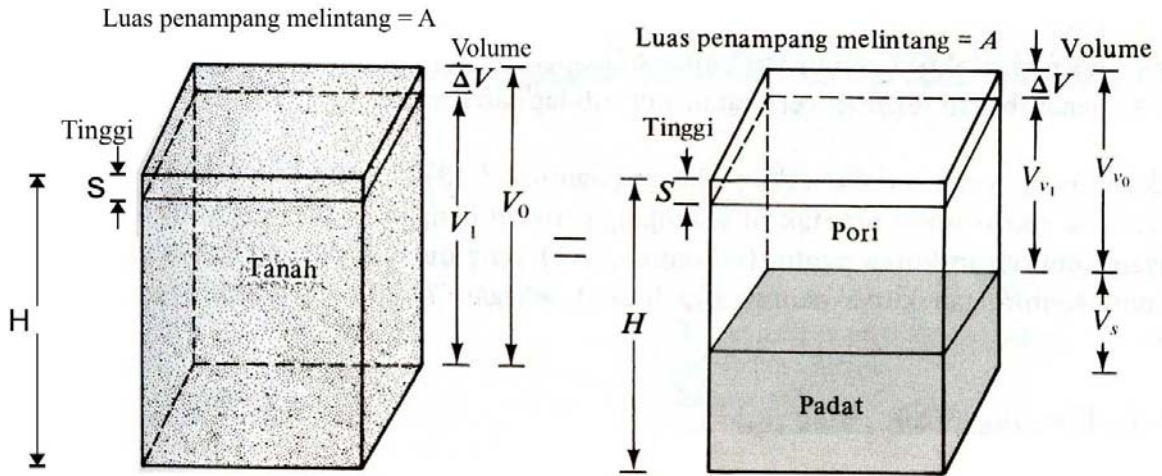


Gambar 2.9: Karakteristik konsolidasi lempung yang sensitif

2.1.6 Analisis Penurunan yang Disebabkan oleh Konsolidasi Primer Satu Dimensi

Dengan pengetahuan yang didapat dari analisis hasil uji konsolidasi, kita dapat menghitung kemungkinan penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi primer di lapangan, dengan menganggap konsolidasi tersebut adalah satu dimensi (Das, Braja M. 1985).

Tinjauan suatu lapisan lempung jenuh dengan tebal H dan luasan penampang melintang A serta tekanan efektif overburden rata-rata sebesar P_o . Disebabkan oleh penambahan tekanan sebesar ΔP , dianggaplah penurunan konsolidasi primer yang terjadi adalah sebesar S . Gambar 2.10 menjelaskan kasus penurunan tersebut.



Gambar 2.10: Penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi satu dimensi

Perubahan volume dapat diberikan sebagai berikut

$$\Delta V = V_0 - V_1 = H \cdot A - (H) \cdot A = S \cdot A \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana V_0 dan V_1 berturut-turut adalah volume awal dan volume akhir.

Tetapi perubahan volume sama dengan perubahan volume pori, ΔV_p . Jadi

$$\Delta V = S \cdot A = V_{v0} - V_{v1} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana V_{v0} dan V_{v1} berturut-turut adalah volume awal dan volume akhir dari pori.

Dari definisi angka pori

$$\Delta V_p = \Delta e \cdot V_s \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana Δe = perubahan angka pori.

Tapi,

$$V_s = \frac{V_0}{1 + e_0} = \frac{AH}{1 + e_0} \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana e_0 = angka pori awal pada saat volume tanah sama dengan V_0 .

Jadi dari persamaan-persamaan (2.7), (2.8), (2.9) dan (2.10), didapat

$$\Delta V = S \cdot A = \Delta e V_s = \frac{AH}{1 + e_0} \Delta e \text{ atau } S = H \frac{\Delta e}{1 + e_0} \dots\dots\dots(2.11)$$

untuk lempung yang terkonsolidasi secara normal maka,

$$\Delta e = C_c [\log(P_0 + \Delta P) - \log P_0] \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana C_c = kemiringan kurva e versus $\log P$ dan didefinisikan sebagai “indeks pemampatan” (*compression index*).

Masukkan persamaan (2.12) ke dalam persamaan (2.11); persamaan yang didapat adalah:

$$S = \frac{CcH}{1+eo} \log\left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0}\right) \dots\dots\dots(2.13)$$

Untuk suatu lapisan lempung yang tebal, adalah lebih teliti bila lapisan tanah tersebut dibagi menjadi beberapa sub-lapisan dan perhitungan penurunan dilakukan secara terpisah untuk tiap-tiap sub-lapisan. Jadi, penurunan total dari seluruh lapisan tersebut adalah:

$$S = \sum \left[\frac{CcHi}{1+eo} \log\left(\frac{P_{0i} + \Delta P_i}{P_{0i}}\right) \right] \dots\dots\dots(2.14)$$

dimana:

S = Penurunan total

Hi = sub lapisan i

Poi = tekanan efektif overburden untuk sub-lapisan i

ΔP_i = penambahan tekanan vertical untuk sub-lapisan i

2.1.7 Indeks Pemampatan (Compression Index Cc)

Terzaghi dan Peck (1967) menyarankan pemakaian persamaan empiris untuk menghitung indeks pemampatan:

untuk lempung yang struktur tanahnya tidak terganggu/ belum rusak (*undisturbed*)

$$Cc = 0.009 (LL - 10) \dots\dots\dots(2.15)$$

untuk lempung yang terbentuk kembali (*remolded*)

$$Cc = 0.007 (LL - 10) \dots\dots\dots(2.16)$$

dimana LL batas cair dalam persen.

2.1.8 Indeks Pemuaian (Swell Index, C_s)

Indeks pemuaian adalah lebih kecil daripada indeks pemampatan dan biasanya dapat ditentukan di laboratorium. Pada umumnya,

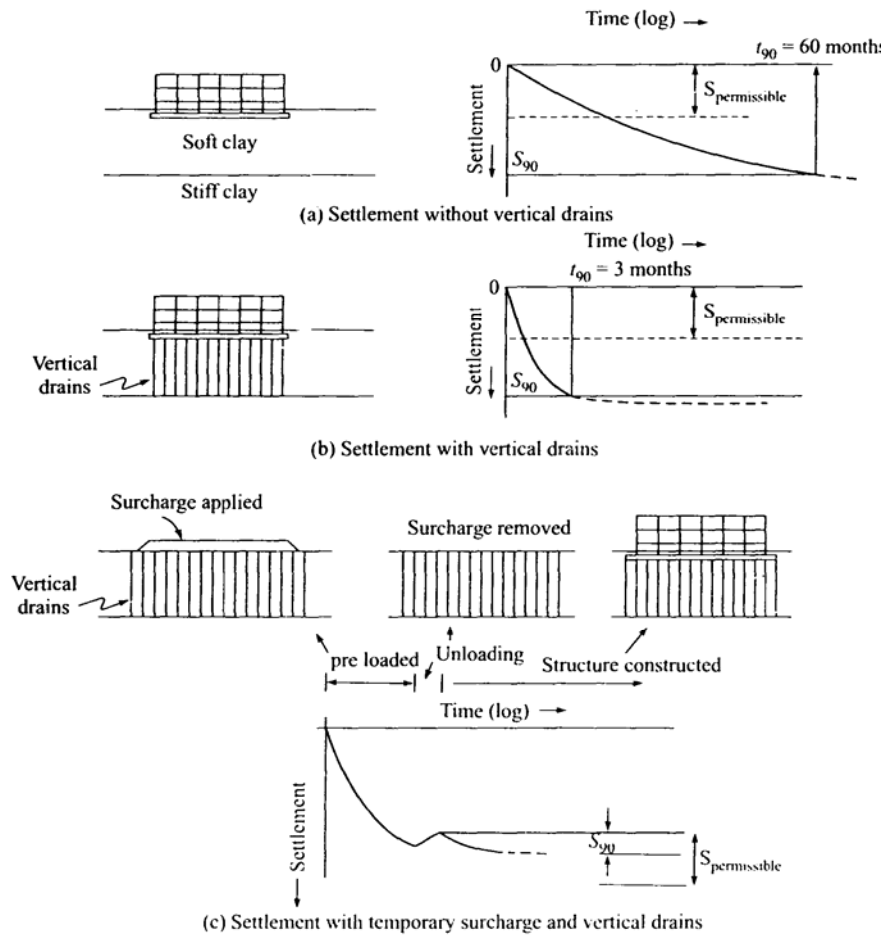
$$C_s \approx \frac{1}{5} \text{ sampai } \frac{1}{10} C_c$$

2.2 Vertical Sand Drain

Untuk mempercepat proses konsolidasi, maka panjang alur drainase dikurangi dengan memasang *vertical sand drain* dengan jarak rapat yang dikombinasikan dengan preloading dapat berupa tanah timbunan yang diletakkan di atas tanah yang akan distabilisasikan. Setelah derajat konsolidasi telah mencapai 50% dalam waktu singkat, maka lapisan *preloading* dapat dipindahkan (Gulhati, Shaskhi K. 2005)

Penurunan pada tanah lempung yang diberi *vertical drain* dan beban awal dapat dibuat grafik berupa hubungan waktu dan besarnya penurunan. Dari grafik pada Gambar 2.3 terlihat bahwa penurunan 90% didapat setelah waktu pembebanan selama 6 bulan. Apabila menggunakan *vertical drain* dan pembebanan awal maka penurunan 90% didapat hanya dalam waktu 3 bulan pembebanan.

Beban awal yang dibebankan pada proses percepatan konsolidasi dapat dihilangkan setelah penurunan tercapai tercapai 90%. Setelah beban awal dihilangkan maka bangunan yang direncanakan boleh mulai dibangun di atas tanah lempung tersebut. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.11



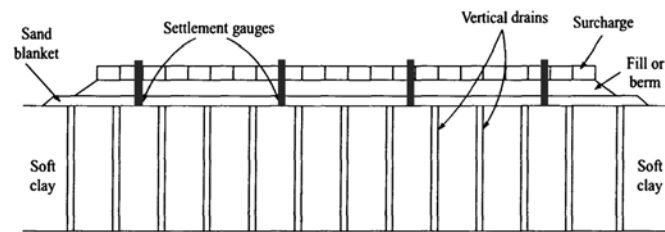
Gambar 2.11: Keuntungan pra-konsolidasi pada tanah lempung

Kombinasi pemasangan *vertical drain* dan pembebanan awal seperti yang ada pada Gambar 2.12 dapat dijelaskan sebagai berikut:

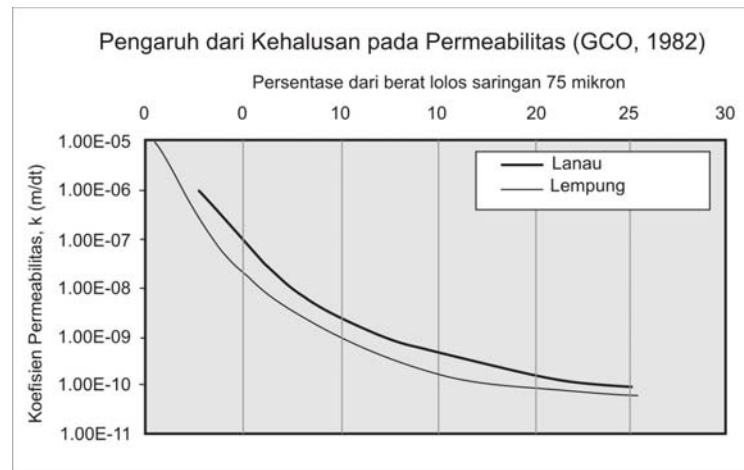
Pada tanah lempung yang akan dikonsolidasi dipasang *vertical drain* dengan jarak tertentu. Pada permukaan lapisan lempung tersebut diletakkan timbunan pasir setebal 0.5 meter. Fungsi lapisan pasir tersebut adalah untuk meneruskan aliran air dari *vertical drain* ke luar timbunan. Syarat-syarat dari selimut pasir yang digunakan adalah sebagai berikut:

- 1) Penempatan: harus dipasang pada elevasi yang secara praktis serendah mungkin untuk memperpendek jarak aliran.
- 2) Ketebalan: Tebal minimum lapisan pasir untuk memberikan kelancaran mengalirkan air adalah 30 cm.

- 3) Kemiringan melintang (*crossfall*): Lapisan pasir harus mempunyai kemiringan melintang awal dari tengah ke pinggir timbunan. Walaupun demikian, meninggikan selimut di bagian tengah supaya lebih miring akan menambah kerumitan pelaksanaan.
- 4) Gradasi: Untuk dapat mengalirkan dengan baik, maka pasir tersebut harus mempunyai koefisien permeabilitas yang cukup besar untuk mengalirkan air. Koefisien permeabilitas tersebut tergantung dari ukuran gradasinya. Hubungan antara ukuran gradasi dan koefisien permeabilitas diperlihatkan oleh Gambar 2.13



Gambar 2.12: Pemasangan vertical drain yang dikombinasikan dengan preloading



Gambar 2.13: Grafik pengaruh kehalusan pada permeabilitas

Di atas lapisan pasir yang digunakan untuk mengalirkan air ke luar tanah timbunan tadi, diletakkan beban awal untuk mempercepat proses konsolidasi. Dengan adanya beban ini diharapkan aliran (air) radial yang lebih cepat dari lapisan lempung ke lubang-lubang *vertical drain*. Di bagian-bagian tertentu diletakkan *settlement gauge* untuk memonitor besarnya penurunan tanah akibat *vertical drain*.

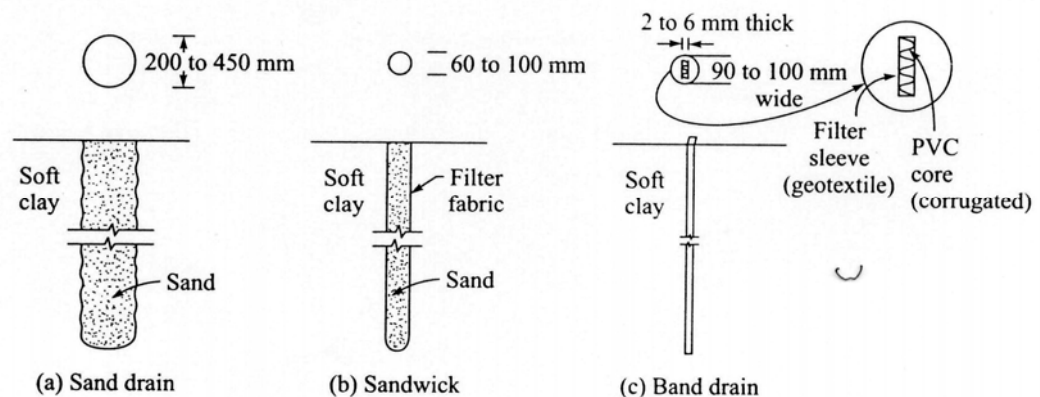
Ada dua parameter dalam mendisain *vertical sand drain*. Pertama adalah jarak antara *vertical drain*, kedua adalah ukuran diameter dari *vertical sand drain* serta tipe dari *vertical sand drain* (Gulhati, Shaskhi K. 2005).

Umumnya ada dua tipe dari *vertical sand drain*, yaitu *sand drain* dan *sandwicks*. Prinsip kerja dari sistem itu adalah air masuk secara lateral dari tanah, kemudian diangkut ke atas ke lapisan drainase horizontal yang poisisinya dibawah lapisan tanah timbunan (Gulhati, Shaskhi K. 2005).

Sand drain adalah kolom vertical yang dibuat dari pasir atau kerikil dengan diameter antara 200 sampai dengan 450 mm dan dipasang dengan cara dibor.

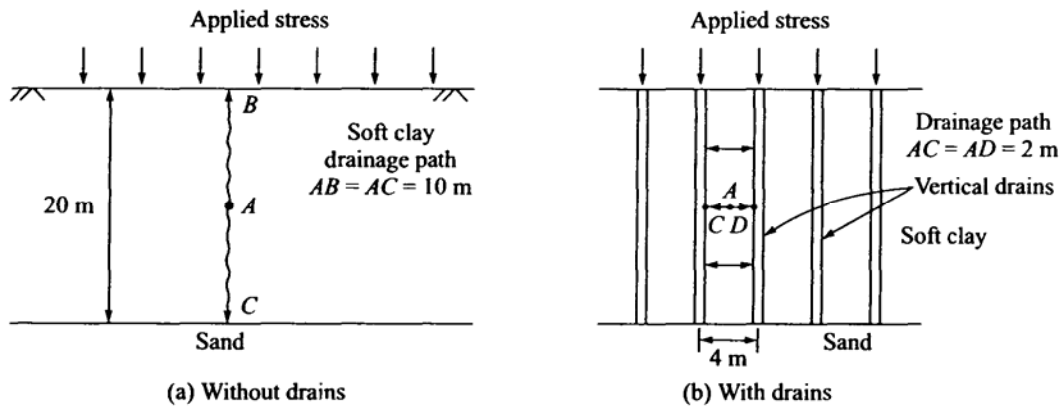
Sandwick ukuranya lebih kecil dari sand drain dan terdapat pasir (atau semacam kerikil) di dalamnya yang sudah dikemas dalam pabrikan serta bentuknya seperti kaos kaki. Diameternya antara 60 sampai 100 mm. *Sandwick* dipasang dengan jarak tertentu dengan didorong secara hidrolis sampai kedalaman yang diinginkan (Gulhati, Shaskhi K. 2005).

Selain *sand drain* ada juga jenis *vertical drain* yang lain yaitu PVD (*Prefabricated Vertical Drain*) atau disebut juga *band drain*. *Band drain* adalah pita yang terbuat dari geosintetis yang difabrikasi. Penampang melintangnya mempunyai luasan 180 mm² s/d 600 mm². Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.14



Gambar 2.14: Jenis-jenis vertical drain

Adapun pola pengaliran aliran air akibat proses konsolidasi dengan atau tanpa vertikal drain adalah sebagai berikut:



Gambar 2.15. Pola aliran air selama proses konsolidasi dengan dan tanpa sand drain

Pada Gambar 2.15 (a) terlihat bahwa sebuah contoh lapisan tanah lempung sedalam 20m. Jika tidak diberi *vertical drain* maka arah aliran yang terjadi adalah aliran vertical. Jika jalur drainase adalah dua arah (atas – bawah), maka panjang lintasan aliran air dari titik A ke titik B dan C adalah masing-masing sejauh 10m.

Pada Gambar 2.15 (b) masih pada contoh tanah yang sama tetapi dipasang *vertical drain* sejarak 4m. Setelah dipasang *vertical drain* maka arah aliran yang dominan adalah arah aliran radial. Aliran vertical masih terjadi tetapi dalam jumlah yang sangat sedikit dan dapat diabaikan. Jarak aliran radial yang diperlukan untuk mengalirkan air dari titik A ke titik C dan D adalah menjadi 2 meter. Oleh karena itu dengan pemasangan *vertical drain* maka dapat merubah pola dan jarak lintasan aliran drainase. Dari aliran vertical menjadi aliran radial dan dari jarak yang panjang menjadi lebih pendek.

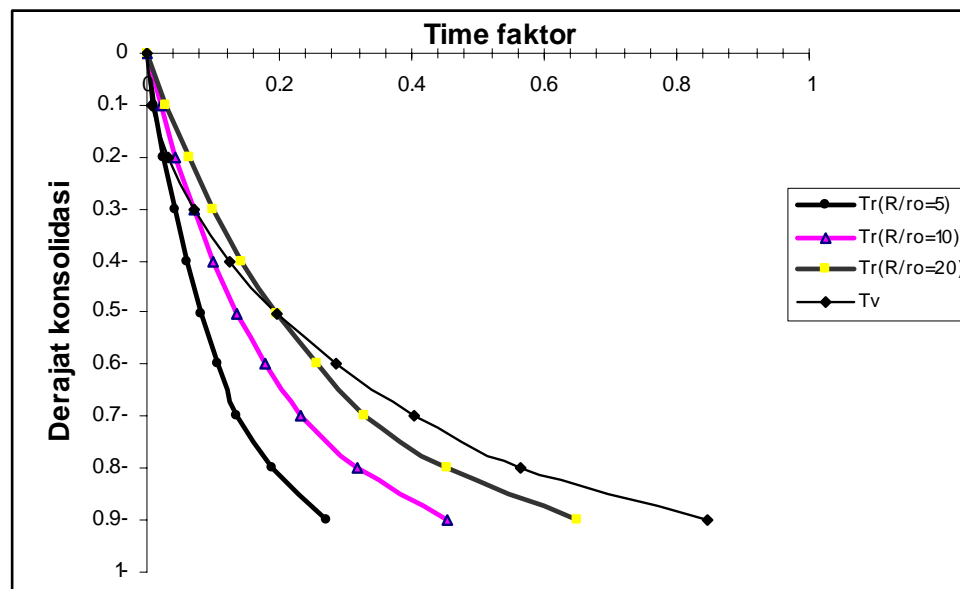
Jika koefisien konsolidasinya sama untuk arah radial dan vertical, maka akan mempercepat tercapainya derajat konsolidasi 90 % dengan mengurangi waktu penurunan sampai 1/25 kali dari waktu biasa. Untuk mempercepat laju konsolidasi tidak hanya tergantung dari jarak antar *vertical drain*, tetapi juga diameter dari *vertical drain*. (Gulhati, Shaskhi K. 2005).

Adapun hubungan antara derajat konsolidasi dan faktor waktu dijelaskan pada Tabel 2.1 dan grafik pada Gambar 2.16.

Tabel 2.1: Variasi nilai derajat konsolidasi rata-rata dengan faktor waktu pada konsolidasi arah aliran radial .

Rata-rata Derajat Konsolidasi (%)	Time Faktor Arah Radial (T_r)			Time Faktor Arah Vertical (T_v)
	$R/r_0 = 5$	$R/r_0 = 10$	$R/r_0 = 20$	
0	0	0	0	0
10	0.012	0.021	0.03	0.008
20	0.026	0.044	0.063	0.031
30	0.042	0.07	0.101	0.071
40	0.06	0.101	0.144	0.126
50	0.081	0.137	0.195	0.197
60	0.107	0.18	0.258	0.287
70	0.137	0.231	0.330	0.405
80	0.188	0.317	0.453	0.565
90	0.27	0.455	0.649	0.848
100	~	~	~	~

Sumber: Gulhati, Shaskhi K. 2005



Gambar 2.16. Grafik hubungan antara faktor waktu dengan derajat konsolidasi rata-rata

Prinsip kerja *sand drain* adalah mempercepat aliran air. Jika tanpa *sand drain* aliran air akan bergerak vertical saja, tetapi dengan adanya *sand drain* aliran air selain bergerak arah vertical, juga ke arah horizontal.

Dengan adanya *sand drain*, maka konsolidasi yang akan terjadi adalah konsolidasi tiga dimensi, yaitu arah x,y dan z Pada arah x-y atau arah mendatar, hitungan didasarkan pada satu pipa pasir yang akan berpengaruh pada satu lingkaran yang mempunyai,jari-jari pipa r, jari-jari pengaruh R . Mengenai besarnya jari-jari R tersebut tergantung dari bentuk jaringan pipanya. Untuk jaringan bujur sangkar, $R = 0.564 S$, jaringan segitiga sama sisi $R = 0.525 S$, dengan S adalah jarak antara *sand drain*.

Untuk menghitung presentase konsolidasi pada arah mendatar digunakan rumus:

$$n = \frac{R}{r} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$T_r = \frac{Cr}{(2R)^2} \times t \dots\dots\dots (2.18)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \text{Ln}(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$U_r = \frac{u_0 \exp\left(\frac{-8T_r}{F(n)}\right)}{R^2 F(n)} \left\{ R^2 \text{Ln}(n) - \frac{R^2 - r^2}{2} \right\} \dots\dots\dots (2.20)$$

Pada arah vertikal digunakan rumus :

$$T_v = \frac{C_v}{H^2} \times t \dots\dots\dots (2.21)$$

$$U_v = \left[1 - \frac{1}{3T_v} + \frac{32}{\pi^4 T_v} \exp\left(\frac{\pi^2 T_v}{4}\right) \right] \dots\dots\dots (2.22)$$

Sehingga besarnya konsolidasi gabungan radial dan vertical adalah:

$$U = 1 - (1 - U_r) (1 - U_v) \dots\dots\dots (2.23)$$

dimana

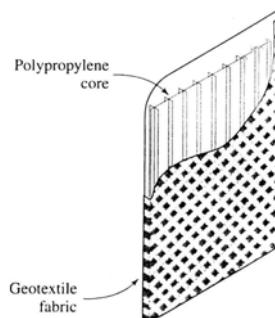
U_r = derajat konsolidasi arah radial (%)

U_v = derajat konsolidasi arah vertical (%)

- T_r = time faktor arah radial
 T_v = time faktor arah vertical
 C_r = koefisien konsolidasi arah radial (cm^2/s)
 C_v = koefisien konsolidasi arah verikal (cm^2/s)
 R = jari-jari lingkup kerja sand drain (cm)
 H = panjang pengaliran (cm)
 T = waktu terjadinya konsolidasi (s)
 U_0 = tekanan pori tanah

2.3 Prefabricated Vertical Drains (PVD)

PVD umumnya berbentuk pita dengan sebuah inti plastik beralur terbuat dari material *geosintesis* (material polimer) yang dibentuk seperti potongan yang panjang. Material polimer dapat berupa Material PVC dengan lebar 90 sampai 100 mm, ketebalan 2 sampai 6 mm. PVD dibuat dalam bentuk gulungan serta dipasang dengan minyak khusus sehingga dapat terlindung dari tekanan hidrolik tanah (Gulhati, Shaskhi K. 2005). Gambaran lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.17

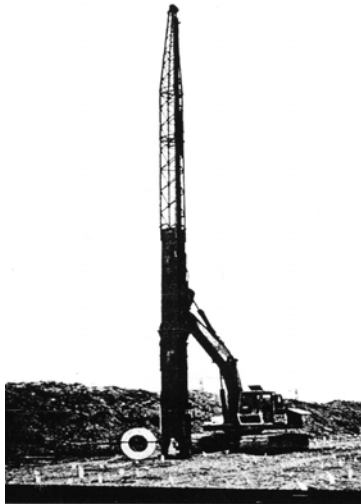


Gambar 2.17: Prefabricated Vertical Drains

Jika menggunakan PVD, maka karakteristik hidroliknya harus diperhatikan dengan seksama, misalnya mengenai kapasitas pengeluaran air dan permeabilitas dari filter dan kuat tekuk serta ketahanannya terhadap degradasi fisik dan biokimia dalam berbagai kondisi cuaca dan lingkungan yang tidak ramah.

PVD dibuat untuk menggantikan penggunaan *sand drain*. PVD dipasang dengan tidak dibor, sehingga penginstalan dapat berlangsung dengan cepat (Das, Braja M. 2002).

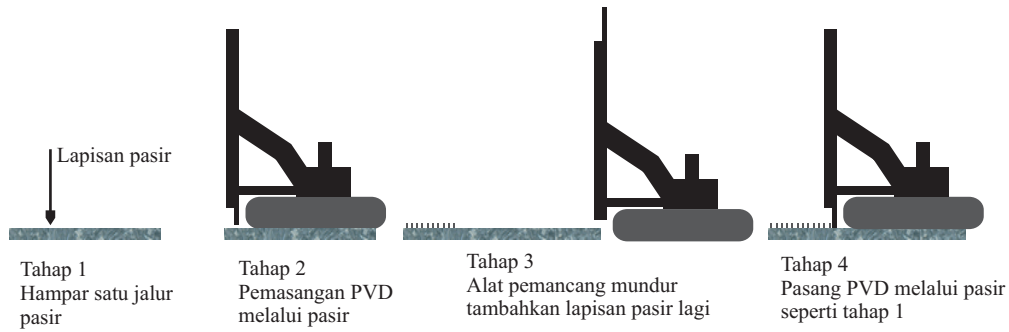
PVD biasanya dipasang sampai kedalaman hingga 24m dengan menggunakan rig penetrasi statis. Untuk yang lebih dalam dibutuhkan rig yang lebih besar untuk mempermudah proses penetrasi.



Gambar 2.18: Pemasangan PVD

Sistem vertical drain dengan PVD harus dipasang dengan mandrel yang ujungnya tertutup (*closed-end mandrel*) yang dimasukkan ke dalam tanah baik dengan penetrasi statis maupun pemancangan dengan vibrator. Tingkat kerusakan atau gangguan pada tanah yang ditimbulkannya bergantung pada bentuk dan ukuran dari mandrel dan sepatu yang dapat dilepaskan (*detachable shoe*) pada dasar mandrel, yang digunakan untuk mengangkut material ini ke dalam tanah.

Pelaksanaan pemasangan PVD adalah dengan memasang lantai kerja dengan ketebalan yang cukup yang dapat mendukung beban peralatan. Kemudian satu jalur selimut pasir dihampar dan PVD dapat dipasang melaluinya sedangkan peralatan berdiri di atas pasir tersebut. Alat pancang kemudian mundur, dan lapisan selimut pasir berikutnya dihampar dan selanjutnya proses pemasangan diulangi. Proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19: Prosedur instalasi PVD menembus selimut pasir

Parameter dari PVD berkaitan dengan berbagai faktor yang mempengaruhi sifat mekanis dan sifat penyaringan tanah yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

- *Settlement*, S (m) bisa didapat dari penyelidikan tanah di laboratorium dan perhitungan mekanika tanah. Sedangkan hubungan besarnya kedalaman tanah yang akan dipasang PVD (H_c) dengan *settlement* S/H_c (%) mengindikasikan tingkat kompresibilitas dari tanah.
- Ketebalan dari lapisan H_c bersamaan dengan kelebihan dari tekanan pori menunjukkan tekanan horizontal total di atas drainase.
- Kedalaman dari *landfill*, H (m), bersamaan dengan laju dari penurunan, dH/dt (m/s), dan permeabilitas dari tanah, menunjukkan derajat dari kelebihan tekanan pori.
- Waktu konsolidasi T_{90} dapat diperoleh dari percobaan laboratorium. Dalam hubungan dengan jarak L_{eq} (m), T_{90} (tahun) dikonversikan ke L_{eq} standar =2.5m yang memberikan indikasi permeabilitas (R.Veldhuijzen Van Zanten,1986).

Secara teoritis, jarak standar PVD 2.5m tersebut diusulkan dengan maksud untuk mempermudah memperoleh nilai suatu pembanding pada keadaan tanah yang berbeda. Nilai pembanding tersebut diwakilkan dengan ψ

$$T_{90}^{2.5} = \psi \times T_{90} \dots\dots\dots (2.24)$$

dimana $T_{90}^{2.5}$ = waktu konsolidasi dengan jarak drainase standar L_{eq} 2.5m

$$\psi = \left(\frac{2.5}{L} \right)^2 \frac{\mu(L = 2.5m)}{\mu(L)} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$\mu(L) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left\{ \ln(u) - 0.75 + \frac{1}{n^2} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right) \right\} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$n = \left(\frac{L}{d_{eq}} \right) \dots\dots\dots (2.27)$$

$$d_{eq} = \frac{2B}{\pi} \dots\dots\dots (2.28)$$

B = Lebar PVD

Dalam mendesain PVD, ada beberapa hal yang harus diperhatikan:

1. Uji tanah

Uji tanah dilakukan bertujuan untuk mendapatkan:

- Variasi lapisan tanah horizontal dan vertical.
- Mengetahui besarnya konstanta tekanan c_s dan c_p
- Koefisien permeabilitas k_v dan k_h selain koefisien tekanan satu dimensi m_v , atau koefisien konsolidasi c_v dan c_h dimana

$$c_v = k_v / (m_v \times \gamma_w) \text{ (m}^2\text{/s)} \dots\dots\dots (2.29)$$

$$c_h = k_h \times (m_v \times \gamma_w) \text{ (m}^2\text{/s)} \dots\dots\dots (2.30)$$

2. Perhitungan *settlement*

Untuk menghitung *settlement* biasa digunakan formula Terzaghi

$$S = \sum S_i = \frac{H_i}{C_i} \ln \frac{\sigma_{vi} + d\sigma_v}{\sigma_{vi}} \text{ dimana } \dots\dots\dots (2.31)$$

S = Penurunan total (m)

S_i = Penurunan dari lapisan i (m)

H_i = Ketebalan lapisan I (m)

σ_{vi} = Tegangan vertical efektif (N/m²)

$d\sigma_v$ = Penambahan tegangan vertical efektif (N/m²)

Jika menghendaki *settlement* yang terjadi tersebut tinggi, maka sangat penting untuk mengetahui progres waktu *settlement* tersebut. Dalam hal ini parameter waktu adalah sangat menentukan apakah menggunakan vertical drain atau tidak

(R.Veldhuijzen Van Zanten, 1986). Sebuah formula sederhana diberikan untuk menghitung waktu *settlement* yang dalam hal ini berkaitan dengan persentase konsolidasi yang akan dicapai, yaitu:

$$t_v = \frac{(nH_i)^2 T}{c_v} \text{ dimana}$$

n = 0.5 jika aliran dua arah

n = 1 jika aliran satu arah

t_v = waktu, dimana persentase konsolidasi yang ingin dicapai

H_i = ketebalan lapisan tanah i (m)

T = time faktor

c_v = koefisien konsolidasi (m²/s)

Parameter T secara langsung berkaitan dengan persentase konsolidasi rata-rata dengan persamaan:

$$U_v = \frac{S_t}{S_u} = 1 - \sum_{M=0}^{M=\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T) \text{ dimana} \dots\dots\dots (2.32)$$

$$T = c_v \frac{t}{(nH_i)^2} \dots\dots\dots (2.33)$$

$$M = \frac{\pi}{2} (2m + 1) \dots\dots\dots (2.34)$$

3. Perhitungan konsolidasi

Wilayah cakupan kerja dari PVD tergantung dari pola yang dipasang dari masing-masing vertical drain. Wilayah tersebut didefinisikan berupa lingkaran dengan diameter ekuivalen (L_{eq}) 1.05 atau 1.15 tergantung dari polanya. Jika polanya berbentuk segitiga, L_{eq} = 1.05L, jika persegi L_{eq} = 1.15 dengan L adalah jarak antara vertical drain Van Zanten, (R.Veldhuijzen 1986).

Untuk mempermudah perhitungan konsolidasi, Barron-Kjellman memberikan formula sebagai berikut:

$$U_h = 1 - \exp(-8T_h / \mu) \dots\dots\dots (2.33)$$

Substitusi T_h dengan (c_h t) / L_{eq}², maka hasilnya:

$$t_h = \frac{L_{eq}^2 \mu}{8c_h} \ln \frac{1}{1-U_h} \text{ dimana (2.34)}$$

U_h = rata-rata derajat konsolidasi

$$\mu = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left\{ \ln(n) - 0.75 + \frac{1}{n^2} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right) \right\} \text{ (2.35)}$$

T_h = time faktor

t_h = waktu konsolidasi

c_h = koefisien konsolidasi

n = L_{eq} / d_{eq}

d_{eq} = diameter ekuivalen vertical drain = $\frac{2B}{\pi}$ (m)

B = luas poitongan vertical drain (m)

Dengan mengkombinasikan U_v dan U_h , maka total derajat konsolidasi rata-rata (U) adalah:

$$U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) \text{ (2.36)}$$

Pemilihan dari ketiga alat tersebut di atas tergantung dari ketersediaan pasir di dekat lokasi konstruksi dan kuantitas dari pekerjaan. Para pakar geoteknik cenderung untuk memilih *sand drain* jika kedalaman tanah antara 12 sampai 15 meter, dan pemakaian *sandwick* untuk kedalaman lebih besar. Sedangkan jika ketersediaan pasir sangat sedikit dan tanah yang akan distabilisasikan sangat dalam lapisan lempungnya, maka sebaiknya menggunakan PVD. Namun pemilihan akhir tetap memperkirakan faktor biaya (Gulhati, Shaskhi K. 2005).

2.4 Bahasa Pemrograman Visual Basic (VB)

Visual basic adalah salah satu bahasa pemrograman komputer. Bahasa pemrograman adalah perintah yang dimengerti oleh komputer untuk melakukan tugas-tugas tertentu. Bahasa pemrograman visual basic yang dikembangkan oleh Microsoft sejak tahun 1991 merupakan pengembangan dari pendahulunya yaitu bahasa pemrograman basic (Octavian, Krisna D. 2003).

Dalam mengembangkan aplikasi VB menggunakan pendekatan visual (GUI – *Graphical User Interface*) untuk merancang antar muka. Dalam lingkungan MS Windows, antar muka pengguna (*user interface*) penting sekali perannya, karena dalam program aplikasi yang dibuat, pengguna sering berinteraksi dengan *user interface* tanpa sadar bahwa dibelakangnya berjalan instruksi-intruksi program yang menjalankan aplikasi tersebut (Isroi, 2004).

Adapun pengembangan VB dalam aplikasi sains dan teknik telah berkembang pesat. Salah satunya adalah program GRAPS yang merupakan salah satu program analisis struktur yang dikembangkan oleh ACECOM dibuat dengan bahasa pemograman visual basic (Dewobroto, Wiryanto 2004).