

BAB III

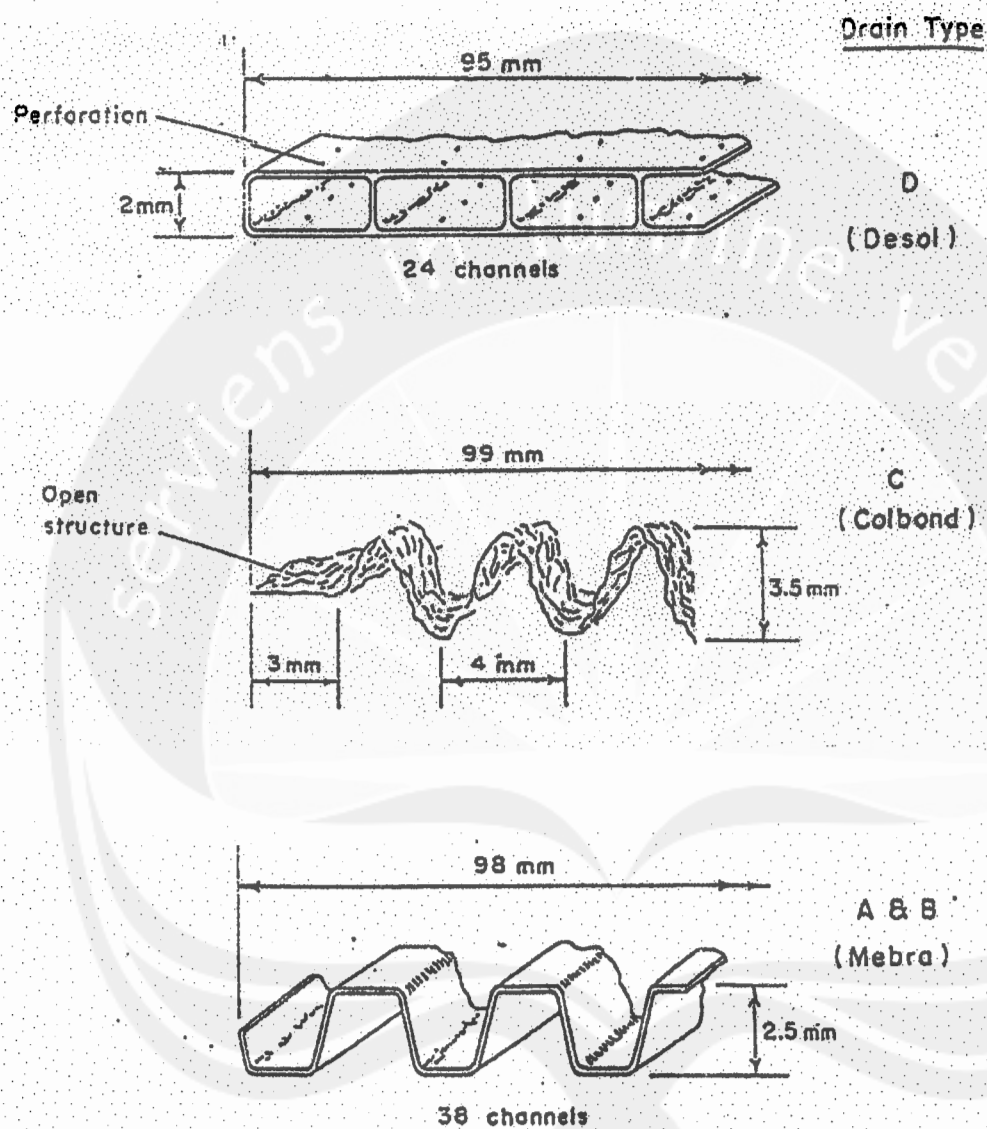
PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)

3.1. Gambaran Umum

Sama halnya dengan *sand drain*, PVD berfungsi untuk mempercepat proses konsolidasi. Prinsip kerja pada PVD sama dengan prinsip kerja metode drainase vertikal yang lain. Prinsipnya yaitu menyediakan alur drainase terpendek, sehingga air dapat dengan mudah keluar dari rongga-rongga antar butiran tanah. Yang membedakan dengan *sand drain* adalah bahan dan cara pemasangannya. *Sand drain* terbuat dari bahan alami (pasir), sedangkan PVD terbuat dari bahan sintetik yang berupa lajur. Pipa drainase yang dilapisi dengan *geotextiles* bisa digunakan sebagai *vertical drains*, tetapi jenis ini jarang digunakan, PVD yang banyak digunakan biasanya terdiri dari jaket dan inti (*core*) yang terletak didalamnya.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan PVD antara lain diameter ekuivalen, kapasitas tampung, karakteristik inti, karakteristik jaket penyangkai, permeabilitas, kekuatan bahan, fleksibilitas dan keawetan bahan. Inti (*core*) dan jaket (*filter*) bisa terbuat dari bahan yang berbeda, tetapi dapat juga dibuat dari bahan yang sama. Bahan yang digunakan biasanya berasal dari PVC, *polypropylene*, *polyester*, kertas, selulosa. Lebar PVD biasanya berkisar 100 mm dan tebalnya antara 2-6 mm (Manfred, 1990).

3.2. Inti (core) PVD



Gambar 3.1.

Bentuk Geometris beberapa variasi inti PVD

(Sumber : Bergado, D.T, 1995, *Soft Ground Improvement*)

Inti (*core*) pada PVD dilapisi dengan jaket. Inti mempunyai dua fungsi penting yaitu sebagai penyangga jaket dan untuk menyediakan jalan aliran drainase. Inti dibagi menjadi tiga kategori, yaitu *grooved core*, *studded core* dan *filament core*.

Pemilihan inti didasarkan pada kapasitas tampung bahan inti tersebut. Kapasitas tampung (q_w) tersebut nilainya bervariasi dan merupakan fungsi dari tekanan lateral. PVD yang dipilih sebaiknya memiliki kapasitas tampung minimal $100 \text{ m}^3/\text{tahun}$.

Besarnya kapasitas tampung (q_w) biasanya terdapat pada spesifikasi PVD yang digunakan. Jika tidak ada spesifikasi yang menyebutkan besarnya kapasitas tampung PVD, maka besarnya kapasitas tampung bisa ditentukan.

$$\text{Kapasitas tampung } (q_w) = k_g \cdot A \cdot i \quad (3-1)$$

k_g = koefisien permeabilitas bahan

A = Luas tampang yang dilalui aliran dengan arah tegak lurus

i = gradien hidrolik. Pada perencanaan PVD nilai gradien hidrolik = 1

Ada beberapa tes laboratorium untuk beberapa kondisi yang dikenai pada PVD. Adapun tipe PVD yang digunakan pada tes tersebut adalah :

1. PVD dengan inti dan *filter* terpisah
 - a. *Grooved core* (A)
 - b. *Studded core* (B)
 - c. *Filament core* (C)
2. PVD dengan inti dan *filter* komposit, yaitu tipe *Grooved core* (D)

Tabel 3.1 Hasil tes laboratorium pada PVD

Tipe tes	Perbandingan Hasil
A. Kapasitas tampung - Kondisi langsung - Tekanan 20 % dan tidak dibengkokkan - Tekanan 20 % dan satu dijepit - Dibengkokkan 45°	A > D > B dan C A dan D > B dan C D > A > B dan C D > A > B dan C
B. Sesuai untuk pemasangan yang aman - Kekuatan terhadap tegangan - Kekuatan terhadap robekan - Kekuatan ujung - Kekuatan terhadap pecahan	D > A dan C > B A dan D > B dan C D > A dan C > B A, C dan D > B

(Sumber : Bergado, D.T, 1995, *Soft Ground Improvement*)

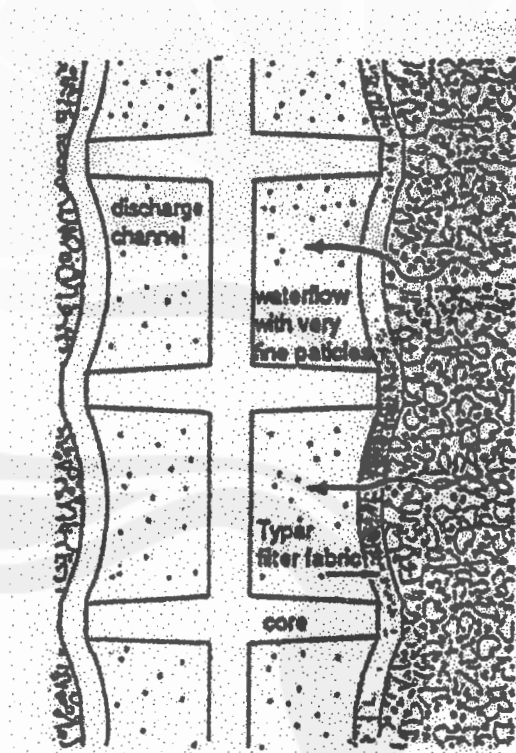
3.3. Jaket (Filter) PVD

Jaket berfungsi sebagai sekat pemisah antara inti dengan tanah lempung disekelilingnya. Selain itu jaket berfungsi sebagai penyaring (*filter*) sehingga butiran-butiran tanah tidak terangkut masuk ke inti.

Jaket pada PVD terdiri dari berbagai macam karakteristik. Prinsip yang perlu diperhatikan dalam pemilihan jaket adalah dapat melewatkan air dengan mudah (sifat permeabilitas yang tinggi) dan mampu menahan butiran-butiran tanah dalam waktu yang lama. Kedua hal ini bersifat kontradiktif, disatu sisi bahan tersebut harus mampu menahan butiran-butiran tanah (pori-pori bahan harus kecil) tetapi di sisi lain bahan harus mampu melewatkan air dalam jumlah besar dengan pori-pori bahan yang kecil.

Hal mendasar yang harus dipenuhi untuk kriteria permeabilitas adalah permeabilitas *filter* (geotekstil) harus lebih besar dari tanah yang ada. Syarat permeabilitas yang harus dipenuhi pada *filter* adalah $k_{\text{geotekstil}} \geq 10 k_{\text{tanah}}$.

Ketahanan *filter* tergantung pada distribusi ukuran butir tanah dan tekanan pori dari *filter*. Ketahanan *filter* dipengaruhi oleh partikel kecil yang masuk bersama dengan aliran air dan menyumbat *filter*. Partikel kecil harus mampu melewati *filter* dengan bebas, tetapi jumlah partikel yang masuk tidak boleh terlalu banyak. Jika jumlah partikel yang masuk terlalu banyak akan beresiko terhadap pengendapan sehingga dapat mengurangi kapasitas tampung PVD.



Gambar 3.2

Fungsi Filter

(Sumber : Cortlever, N.G, *The Mebradrain System*®),

3.3.1 Kriteria *filter*

Spesifikasi filter yang akan digunakan sangat tergantung dari keadaan tanah dimana PVD akan ditempatkan. Berikut ini beberapa aturan yang ada untuk kriteria *filter* :

$$\frac{O_{90}}{O_{50}} < 1,7 \text{ s/d } 3 \quad (\text{Schober dan Teindl, 1979}) \quad (3-2)$$

$$\frac{O_{95}}{D_{85}} < 2 \text{ s/d } 3 \quad (\text{Calhoun, 1972}) \quad (3-3)$$

$$\frac{O_{90}}{D_{85}} < 1,3 \text{ s/d } 1,8 \quad (\text{Chen dan Chen, 1986}) \quad (3-4)$$

$$\frac{O_{50}}{D_{50}} < 10 \text{ s/d } 12 \quad (\text{Chen dan Chen, 1986}) \quad (3-5)$$

Dimana O_{90} merupakan ukuran partikel yang 90% partikel terhenti di luar *filter*. D_{50} menggambarkan bahwa 50% dari ukuran partikel tanah lebih kecil dari nilai yang ada. Rasio O_{50}/D_{50} digunakan untuk memastikan bahwa tekanan yang mengenai *filter* adalah kecil. Alasan pemilihan rasio $O_{50}/D_{50} < 12$ adalah untuk menghindari masuknya partikel kecil ke dalam inti (Chen dan Chen, 1986).

Kamon (1983) menyatakan bahwa partikel tanah lempung biasanya berukuran 0,05 s/d 0,06 mm. Jika ukuran pori rata-rata kurang dari 0,05 mm, maka penyumbatan (*clogging*) pada *filter* tidak akan terjadi.

Selain kriteria *filter* yang disebutkan di atas, ada beberapa aturan kriteria *filter* yang digunakan di beberapa negara, antara lain :

- a. Amerika

Tabel 3.2 Kriteria *filter* geosintetik menurut US Army Corp of Eng.

Keterangan Tanah	Kriteria geosintetik
$d_{50} > 0,074 \text{ mm}$	$0,149 \text{ mm} \leq O_{95} \leq 0,211 \text{ mm}$
$d_{50} \leq 0,074 \text{ mm}$	$0,149 \text{ mm} \leq O_{95} \leq d_{85}$
$d_{85} < 0,074 \text{ mm}$	tidak digunakan geosintetik

(Sumber : Suryolelono, K.B, 2000, *Geosintetik Geoteknik*)

b. Jerman

Tabel 3.3 Kriteria *Filter* menurut Heerten (1982)

Keterangan Tanah	Kriteria geosintetik
$d_{50} < 0,06 \text{ mm}$	$D_w \leq 10 d_{50}$ $D_w \leq d_{90} \text{ dan } D_w \leq 100 \mu\text{m}$
$d_{50} \leq 0,06 \text{ mm}, U < 5$	$D_w \leq 2,5d_{50} \text{ dan } D_w \leq d_{90}$
$d_{50} < 0,06 \text{ mm}, U \geq 5$	$D_w \leq 10d_{50} \text{ dan } D_w \leq d_{90}$

(Sumber : Suryolelono, K.B, 2000, *Geosintetik Geoteknik*)

Tahun 1986, Heerten memberikan kriteria *filter* berdasarkan German Working Group 14 dari German Society for Soil Mechanics and Foundation Eng.

Tabel 3.4 Kriteria *Filter* berdasarkan German Working Group 14

Keterangan Tanah	Kriteria geosintetik
$d_{40} < 0,06 \text{ mm}$, tanah stabil	$D_w \leq 10d_{50} \text{ dan } D_w \leq 2d_{90}$
$d_{40} < 0,06 \text{ mm}$, tanah bermasalah	$D_w \leq 10d_{50} \text{ dan } D_w \leq d_{90}$
$d_{40} > 0,06 \text{ mm}$, tanah stabil	$D_w \leq 5d_{50}U^{1/2} \text{ dan } D_w \leq 2d_{90}$
$d_{40} > 0,06 \text{ mm}$, tanah bermasalah	$D_w \leq 5d_{50}U^{1/2} \text{ dan } D_w \leq d_{90}$

(Sumber : Suryolelono, K.B, 2000, *Geosintetik Geoteknik*)

Kriteria *filter* baru menurut German Working Group 14 dibedakan untuk tanah stabil dan tanah yang banyak menimbulkan masalah. Kelompok tanah yang banyak menimbulkan masalah, bila

1. tanah berbutir halus dengan indeks plastisitas $< 0,15$
2. diameter rerata butiran (d_{50}) antara 0,02 – 0,1 mm
3. koefisien uniformitas < 15 , berupa tanah lempung atau lanau

3.4 Mandrel

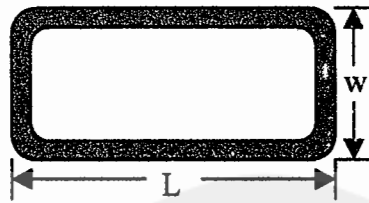
Mandrel merupakan alat bantu yang digunakan sewaktu pemasangan PVD. Ukuran *mandrel* tersebut sangat mempengaruhi besarnya kerusakan tanah yang ada di sekitar PVD (mempengaruhi besarnya efek *smear* yang terjadi). Semakin besar ukuran *mandrel* akan menyebabkan kerusakan yang lebih besar. Lebar *mandrel* (w) berkisar antara 40-150 mm dan panjangnya (L) sekitar 120-150 mm. Ukuran *mandrel* harus lebih besar dari ukuran PVD yang digunakan, supaya PVD dapat masuk ke dalam *mandrel*.

Biasanya *mandrel* berbentuk persegi panjang. Karena asumsi pengaruh kerusakan akibat pemasangan PVD berbentuk lingkaran, maka dilakukan ekivalensi ukuran *mandrel*. Besarnya diameter ekivalen *mandrel* (d_m) adalah :

$$d_m = \sqrt{\frac{4}{\pi} wL} \quad (3-6)$$

dimana w = lebar *mandrel*

L = panjang *mandrel*

Gambar 3.3 *Mandrel*

3.5. Pemasangan PVD



Gambar 3.4

Pemasangan *Prefabricated Vertical Drains*

(Sumber : Xanthakos, P.P, Abramson, L.W, Bruce, D.A, 1990, *Ground Control Improvement*)

Untuk menghindari kerusakan pada PVD digunakan pipa besi berbentuk segiempat (*mandrel*) untuk memasang PVD. Ukuran *mandrel* tersebut harus seminimal mungkin untuk mencegah besarnya kerusakan pada tanah. Ada banyak mesin yang digunakan untuk menggerakkan *mandrel* ke atas dan ke bawah

secepat mungkin. Waktu yang dibutuhkan untuk pemasangan PVD cukup singkat yaitu 1 – 5 menit.

Secara umum mesin tersebut disebut *drain stitchers*. Mesin tersebut dikelompokkan menjadi dua jenis mesin yaitu mesin statik dengan menekan *mandrel* ke dalam tanah dan dinamik yang menggetarkan *mandrel* hingga masuk ke dalam tanah

3.5.1 Metode Penekanan (Statik)

Ada berbagai jenis mesin yang bisa menekan *mandrel* hingga masuk ke dalam tanah. Saat ini *stitcher* didesain untuk menekan *mandrel* ke dalam tanah menggunakan kabel baja yang digerakkan oleh kerekan hidrolis. *Stitcher* tersebut harus tetap dalam posisi tegak, jika tidak akan menyebabkan PVD tidak terpasang dengan baik sehingga mempengaruhi proses konsolidasi.

Prinsip pemasangan:

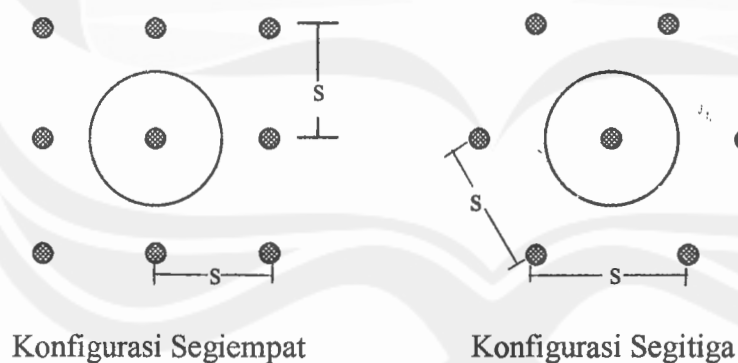
1. Ujung gulungan PVD dipasang di samping *stitcher*, kemudian dimasukkan ke dalam *stitcher*. Dengan penggerak berputar, PVD digerakkan ke bawah menuju *mandrel*. Pada dasar *mandrel* dipasang *anchor plate* yang ditarik berlawanan arah dengan dasar *mandrel*.
2. *Mandrel* ditekan ke dalam tanah dengan kekuatan berkisar 50 kN sampai 200 kN, setelah kedalaman yang diinginkan tercapai, *mandrel* langsung ditarik ke atas. *Anchor plate* yang berfungsi sebagai pengikat PVD ditinggal di dalam tanah.
3. Setelah dasar *mandrel* ditarik ke atas, PVD di potong. Setelah *anchor plate* lain dipasang, *stitcher* dipindahkan ke titik selanjutnya.

3.5.2 Metode Getaran (Dinamik)

Keuntungan penggunaan mesin penggetar ini adalah lapisan tanah yang keras bisa ditembus. Kerugiannya adalah laju *mandrel* bisa tidak terkontrol ketika terdapat pada lapisan tanah yang lunak. Mesin yang ada seringkali tidak mampu mengikuti lajunya. Akibatnya PVD akan tertarik sehingga dapat merobek *filter* (PVD rusak). Biasanya metode ini jarang digunakan. Prosedur pemasukkan untuk mesin penggetar sama seperti metode statik yaitu dengan menggunakan *stitcher*

3.6 Konfigurasi Pemasangan PVD

Konfigurasi drain ditandai dengan diameter silinder tanah yang terpengaruh oleh adanya pemasangan PVD (D), dan dibedakan menjadi dua tipe konfigurasi yaitu bentuk segitiga dan segiempat.



Gambar 3.5

Konfigurasi Pemasangan PVD

Untuk konfigurasi segi empat, bila jarak antar PVD adalah s maka diameter tanah yang terpengaruhi oleh adanya pemasangan PVD (D) adalah

$$s^2 = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{atau} \quad D = 1,13.s \quad (3-7)$$

sedangkan untuk konfigurasi segitiga besarnya nilai D adalah

$$6\left(\frac{1}{2} \frac{s}{\sqrt{3}} \frac{1}{2} s\right) = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{atau} \quad D = 1,05.s \quad (3-8)$$

3.7. Diameter ekivalen PVD

PVD biasanya berbentuk lembaran/lajur, padahal metode *vertical drains* mengasumsikan bahwa drainase memiliki potongan melintang berbentuk lingkaran, oleh sebab itu harus diperhitungkan diameter ekivalennya. Ada beberapa pendekatan yang berbeda untuk menentukan diameter ekivalen (d_w)

$$d_w = \frac{\sqrt{4Bt n_d / \pi}}{n_s} \quad \text{Koerner (1986)} \quad (3-9)$$

$$d_w = \frac{2(B+t)}{\pi} \quad \text{Kjellman (1948)} \quad (3-10)$$

$$d_w = \frac{B+t}{2} \quad \text{Rixner et al (1986) dan Hansbo (1987)} \quad (3-11)$$

B = lebar *strip*

t = tebal *strip*

n_d = *void area*

n_s = porositas *sand drain*

3.8. Kriteria PVD

3.8.1 Kekuatan PVD

Selama pemasangan PVD, gaya yang besar bisa mengenai PVD, khususnya bila digunakan mesin penggetar untuk pemasangan PVD. Selama pemasangan PVD secara dinamik tersebut, *mandrel* akan mengalami gerak jatuh bebas. Akibat gerak jatuh bebas tersebut, gulungan PVD akan mengalami percepatan yang besar. Hal ini menyebabkan gaya yang besar harus diserap sewaktu pemanjangan PVD. Gaya tersebut harus dapat diimbangi dengan kekuatan dan regangan PVD.

Seringkali *filter* sudah robek, tetapi inti (*core*) tetap utuh. Kerusakan yang seperti ini tidak dapat dideteksi, karena PVD tidak dapat dilihat selama pemasangan.

3.8.2 Kekuatan *Filter*

Selama proses konsolidasi, *filter* tidak diperbolehkan tertekan masuk ke saluran penampungan dan harus mampu mempertahankan kekuatan awal walaupun pada kondisi basah. Beban yang mengenai *filter* sangat tergantung pada konfigurasi inti.

Kekuatan *filter* tersebut sangat tergantung pada percobaan kapasitas tampung inti. Selama tes, *filter* tidak boleh rusak walaupun dikenai tekanan sel maksimum 300 kN/m². Selain itu *filter* harus mampu melapisi inti secara kuat untuk menghindari penekanan *filter* ke dalam saluran.

3.8.3 Kapasitas tampung PVD (q_w)

Kapasitas tampung PVD merupakan volume PVD yang kosong. Volume yang kosong tersebut dipengaruhi antara lain oleh tekanan pada inti dan masuknya *filter* ke dalam inti akibat tekanan pada arah horisontal. Selain itu kapasitas tampung PVD dipengaruhi oleh panjang PVD, kecepatan pengisian, penekanan pada beban maksimum.

Syarat kapasitas tampung yang harus dipenuhi oleh PVD

- a. Jika panjang PVD < 10 m dan tidak ada gangguan stabilitas

$$q_w (\text{straight}) > 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dt}$$

$$q_w (\text{buckled}) > 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dt}$$

- b. Jika panjang PVD > 10 m dan tidak ada gangguan stabilitas

$$q_w (\text{straight}) > 50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dt}$$

$$q_w (\text{buckled}) > 32,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dt}$$

3.8.4 Permeabilitas *Filter*

Air pori harus mampu masuk ke dalam saluran pada PVD tanpa banyak gangguan. *Filter* harus mempunyai permeabilitas yang lebih besar dari permeabilitas tanah. Jika permeabilitas *filter* rendah, maka *filter* tidak akan mampu menyerap air yang ada di dalam pori-pori tanah. Permeabilitas *filter* harus 10 kali lebih besar dari permeabilitas tanah pada arah horisontal.

3.9. Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja PVD

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja PVD antara lain :

3.9.1. Faktor akibat jarak antar PVD

$$F(n) = \frac{n^2}{n-1} \ln n - \frac{3n^2-1}{4n^2} \quad (3-12)$$

$$F(n) = \frac{1}{1-\frac{1}{n^2}} \ln(n) - \frac{3-\frac{1}{n^2}}{4} \quad \text{Nilai } \frac{1}{n^2} \approx 0, \text{ sehingga}$$

$$F(n) = \ln n - \frac{3}{4} \quad (3-13)$$

$F(n)$ = faktor akibat jarak antar PVD

n = D_e/d_w

D_e = 1,13.S untuk konfigurasi persegi empat dan $D_e = 1,05.S$ untuk konfigurasi segitiga

d_w = diameter ekivalen PVD

3.9.2. Faktor *Well-Resistance*

Faktor *well-resistance* adalah faktor-faktor yang dapat mengurangi kapasitas tampung PVD. Pada PVD kapasitas tampung tergantung pada karakteristik PVD yang digunakan dan kapasitas tampung tersebut akan berkurang dengan bertambahnya tekanan lateral. Hal ini disebabkan oleh tertekannya lapisan *filter* masuk ke dalam saluran inti, kemudian saluran akan tertekan bersama-sama.

Faktor lain yang mempengaruhi adalah terlipatnya PVD ketika dikenai regangan vertikal yang besar. Hal ini menyebabkan aliran saluran akan berkurang dan menghambat aliran sehingga akan mengurangi kapasitas tampung. Pengendapan partikel-partikel kecil di dalam saluran juga dapat mengurangi kapasitas tampung PVD.

$$F_r = \pi z(L-z) \frac{k_h}{q_w} \quad (3-14)$$

F_r = faktor *well-resistance*

z = Panjang suatu titik dari akhir drainase

L = Dua kali panjang aliran drainase jika drainase terjadi di satu ujung

L = Panjang aliran drainase jika drainase terjadi di dua ujung

k_h = Koefisien permeabilitas arah horisontal pada tanah yang tidak terganggu

q_w = Kapasitas tampung PVD pada gradien hidrolik=1

3.9.3. Faktor akibat efek *smear*

Walaupun ada banyak variasi peralatan yang digunakan untuk pemasangan PVD, tetapi sebagian besar peralatan tersebut mempengaruhi kinerja PVD. Pemasangan PVD mempengaruhi tanah di sekitar sistem drainase. Besarnya pengaruh tergantung dari bentuk dan ukuran *mandrel*, struktur tanah serta prosedur pemasangan.

Daerah di sekeliling drain yang terusik akibat pemasangan PVD (d_s)

a. Menurut Jamiolkowski et al (1981)

$$d_s = \frac{(5s/d_6)d_m}{2} \quad (3-15)$$

b. Menurut Hansbo (1987)

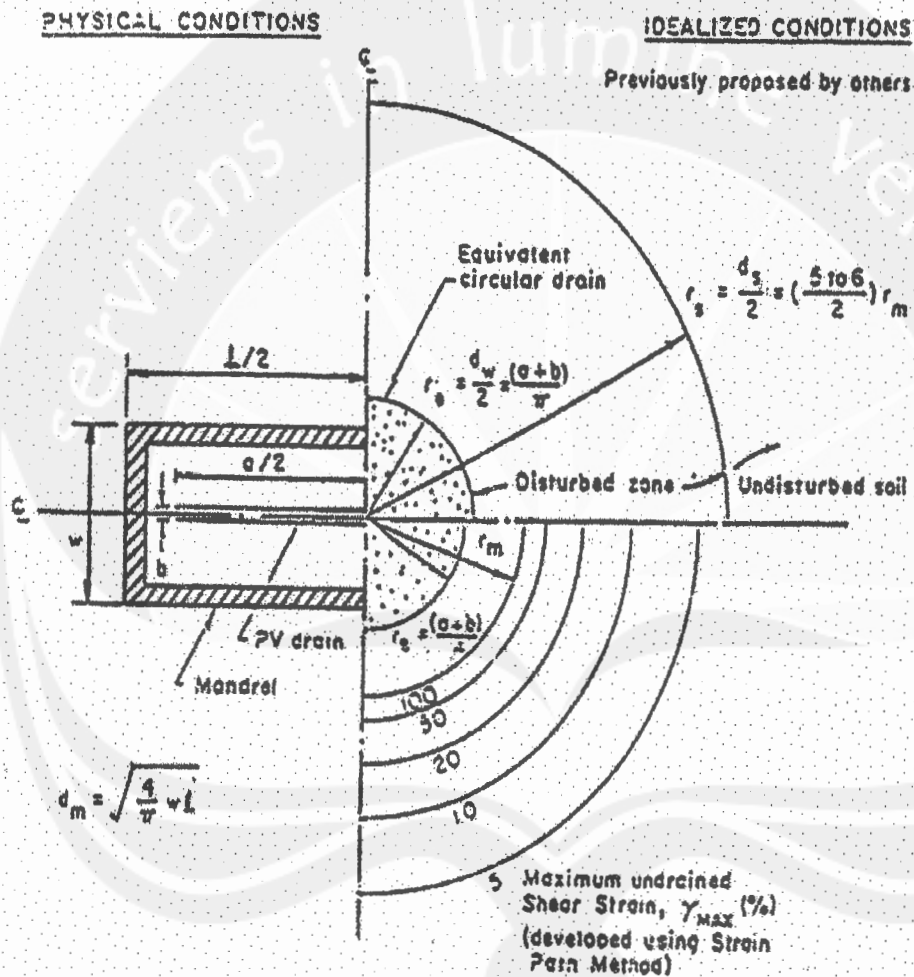
$$d_s = 2 d_m \quad (3-16)$$

Faktor akibat efek *smear*

$$F_s = \left[\left(\frac{k_h}{k_s} \right) - 1 \right] \ln \left(\frac{d_s}{d_w} \right) \quad (3-17)$$

k_s = koefisien permeabilitas tanah horisontal pada daerah yang terusik

Besarnya koefisien permeabilitas arah horisontal pada daerah yang terusik sama dengan koefisien permeabilitas vertikal pada tanah yang tidak terganggu akibat pemasangan PVD ($k_s = k_v$).



Gambar 3.6

Perkiraan Daerah yang Terusik

(Sumber : Bergado, D.T, 1995, *Soft Ground Improvement*)

3.10 Langkah-langkah Perhitungan PVD

1. Menghitung nilai T_v dari nilai c_v , L dan t dari data yang telah tersedia

$$T_v = \frac{c_v t}{L^2}$$

2. Menghitung nilai U_v dari nilai T_v . Nilai U_v menurut Brinch Hansen

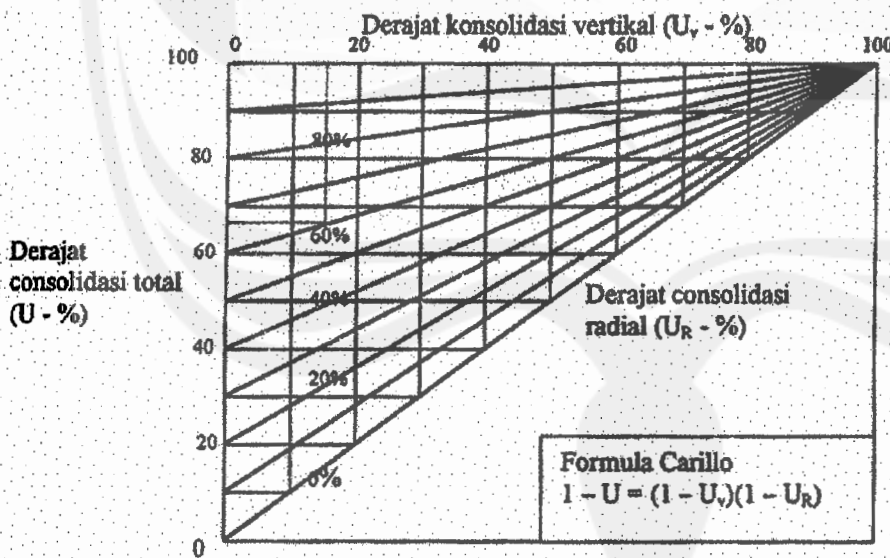
$$U_v = \sqrt[6]{\frac{T_v^3}{T_v^3 + 0,5}}$$

3. Memasukkan nilai U_{vr} .

Jika konsolidasi primer telah selesai $\pm 90\%$, maka $U_{vr} = 0,9$. Nilai U_{vr} tersebut harus lebih besar dari U_v

4. $1 - U_{vr} = (1 - U_v)(1 - U_r)$ akan didapatkan nilai U_r

Nilai U_r bisa juga didapatkan dari gambar 3.7



Gambar 3.7

Grafik derajat konsolidasi radial dan vertikal menurut hubungan Carillo (1942)

(Sumber : Suryolelono, K.B, 2000, *Geosintetik Geoteknik*)

5. $D^2 F(n) = \frac{-8C_h t}{\ln(1 - U_r)}$ selanjutnya akan didapatkan nilai D

$$C_h = \frac{k_h}{m_v \gamma_w} = \frac{k_h}{k_v} C_v$$

D = 1,05s (untuk pemasangan berbentuk segitiga) dan D = 1,13s
(untuk persegi empat) maka nilai s akan didapat.

U_r = Rasio konsolidasi rata-rata untuk konsolidasi radial

U_v = Rasio konsolidasi rata-rata untuk konsolidasi vertikal

U_{vr} = Rasio konsolidasi rata-rata untuk kombinasi konsolidasi radial
dan vertikal

C_v = Koefisien konsolidasi vertikal

C_h = koefisien konsolidasi horisontal atau radial

L = alur drainase terpanjang pada lapisan lempung.

n = D/d_w

d_w = diameter ekivalen PVD

F(n) = faktor yang mempengaruhi kinerja PVD

$$F(n) = F_n + F_r + F_s \quad (3-18)$$