

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah memiliki peranan penting pada pembangunan konstruksi karena tanah menjadi landasan berdirinya suatu konstruksi. Hal ini mengharuskan tanah dalam kondisi yang benar-benar baik agar dapat dipakai untuk pekerjaan konstruksi. Salah satu pekerjaan konstruksi yang berhubungan dengan tanah adalah pembangunan jalan tol.

Sifat-sifat tanah sering kali menjadi permasalahan disebuah pekerjaan konstruksi bangunan khususnya pada pembangunan jalan, terutama pada jalan tol. Karena pembangunan jalan tol di Indonesia sedang banyak proses pembangunan untuk mengurangi kemacetan parah yang terjadi dijalan Indonesia. Permasalahan yang terjadi dalam timbunan tanah sering kali dikarenakan kondisi lapisan tanah yang lunak dan tingkat permeabilitas yang rendah. Lapisan tanah yang lunak juga menyebabkan berbagai kesulitan pelaksanaan, diantaranya ialah kehilangan material urugan (*borrow*) yang meresap ke tanah, kuat geser tanah yang tidak cukup untuk menahan beban tanah timbunan. (Prasetyo.A,2018)

Bowles (1991), mengatakan apabila tanah yang terdapat dilapangan mempunyai sifat-sifat yang tidak diinginkan seperti sangat lunak, *compressible*, kembang susut yang besar sehingga diatas tanah tersebut tidak dapat didirikan suatu konstruksi bangunan, maka untuk memperbaiki sifat tanah tersebut agar dapat dipakai dengan baik sebagai pendukung konstruksi diatasnya adalah dengan stabilitas tanah. Metode umum yang sering digunakan dalam mengatasi penurunan

tanah adalah dengan pra – pembebanan (*preloading*). Namun metode ini kurang efektif perlu adanya percepatan terhadap waktu konsolidasinya. Hal ini bisa di padukan dengan menggunakan *vertical drain* material yang digunakan adalah *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). (Corsita.A,2018)

Drainase vertikal terbagi atas dua tipe yaitu drainase pasir vertikal (*sand drain*) dan drainase vertikal pracetak (*prefabricated vertical drain*, PVD). Tipe yang digunakan dalam penelitian ini digunakan tipe *prefabricated vertical drain* (PVD) karena lebih ekonomis dan pemasangan yang lebih mudah. Drainase vertikal banyak digunakan untuk percepatan penurunan konsolidasi, terutama untuk pembangunan timbunan jalan. Keuntungan dari pemakaian PVD dibandingkan dengan drainase pasir adalah dapat memperkecil gangguan tanah yang mengurangi kinerja drainase. (Hardiyatmo, 2020).

Perilaku tanah lempung, terutama kuat uji geser perlu diselidiki. Karena sebagian besar tanah yang ada di Indonesia termasuk dalam kategori tanah lempung. Salah satunya tanah yang berada didaerah Tebing Tinggi pembangunan Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi – Kisaran (Tahap 1) Ruas Tebing Tinggi – Inderapura. Pada penelitian ini menggunakan *Preloading* yang dikombinasikan dengan *Prefabricated Vertical Drain* karena tanah pada tempat penelitian ini merupakan jenis tanah lunak yang umumnya memiliki daya dukung tanah rendah dan permeabilitas yang rendah. Dan metode ini dinilai sebagai metode ini dinilai sebagai metode yang cukup efektif dan efisien untuk meningkatkan daya dukung tanah lunak.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, dapat diketahui rumusan permasalahan yang terdapat pada penelitian ini adalah :

1. Berapakah hasil dari tes laboratorium tanah dasar ?
2. Berapakah besarnya waktu penurunan dengan *preloading* apabila tanpa PVD?
3. Berapakah besarnya waktu penurunan tanah apabila menggunakan *preloading* dan PVD?
4. Pemasangan PVD menggunakan alat berat crane pancang hidrolik PVD
5. Bagaimanakah metode pelaksanaan pemasangan PVD ?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Sistem konsolidasi tanah menggunakan *preloading* dan PVD
2. Pola pemasangan PVD menggunakan pola segitiga

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari skripsi ini, adalah untuk :

1. Mengetahui waktu penurunan dengan *preloading* apabila tanpa PVD
2. Mengetahui besarnya waktu penurunan tanah apabila menggunakan *preloading* dan PVD

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari tugas akhir ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam perencanaan perbaikan tanah menggunakan kombinasi *preloading* dan PVD untuk tanah lunak pada studi kasus lainnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisannya adalah sebagai berikut :

1. Bab I Pendahuluan

Bab ini berisikan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, dan manfaat penelitian.

2. Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisikan tentang landasan teori tentang tanah, karakteristik tanah lunak, beban jalan, konsolidasi, dan perbaikan tanah

3. Bab III Metodologi

Bab ini berisikan tentang lokasi penelitian, data penelitian, dan tahapan penelitian.

4. Bab IV Pembahasan

Bab ini berisikan tentang hasil, dan pembahasan.

5. Bab V Kesimpulan dan saran

Bab ini berisikan tentang kesimpulan, dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Dalam pandangan teknik sipil tanah merupakan himpunan mineral, bahan organik dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*) yang letaknya diatas batu dasar (*bedrock*) (Hardiyatmo,2002). Menurut Craig (1991) tanah adalah akumulasi mineral yang tidak mempunyai atau lemah ikatan antar partikelnya, yang terbentuk karena pelapukan dari batuan.

Das (1995) menyatakan bahwa tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut.

2.2 Karakteristik Tanah Lunak

Menurut K. Terzaghi (1996) tanah terdiri dari butiran-butiran material hasil pelapukan massa batuan *massive*, dimana ukuran butirannya bisa sebesar bongkahan, berangka, kerikil, pasir, lanau, lempung, dan kontak butirnya tidak tersementasi termasuk bahan organik.

Menurut Das (1995);Hardiyatmo (2016) dan Wesley (2010), bahwa tanah lempung (*clays*) sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis yang berbentuk lempengan-lempengan pipih dan merupakan partikel-partikel dari mika, mineral-mineral lempung (*clays mineral*), dan mineral-

mineral yang sangat halus lain. Mineral lempung adalah pelapukan tanah akibat reaksi kimia yang menghasilkan susunan kelompok partikel berukuran koloid dengan diameter butiran lebih kecil dari 0,002 mm. Tanah lempung yang memiliki butiran sangat kecil ini memiliki sifat kohesi yaitu sifat butir-butirannya yang saling menempel, dan sifat plastis yang memungkinkan tanah untuk berubah bentuk tanpa mengubah volume sekaligus tidak retak atau pecah.

Mochtar (1988) menjelaskan lapisan tanah yang disebut sebagai lapisan tanah yang lunak adalah lempung (*clay*) atau lanau (*silt*) yang mempunyai harga penetrasi standar (SPT) N yang lebih kecil dari 4; atau tanah organik seperti gambut yang mempunyai kadar air alamiah yang sangat tinggi. Tanah lempung merupakan jenis tanah berbutir halus dengan ukurannya $<2\mu$ atau $<5\mu$. Tanah lempung merupakan tanah kohesif yang memiliki :

1. Nilai kadar air berkisar antara 30%-50% pada kondisi jenuh air.
2. Angka pori berkisar antara 0.9 sampai dengan 1.4 (Braja M.Das, 1985).
3. Berat volume berkisar antara 0.9 t/m^3 sampai dengan 1.25 t/m^3 (Braja M.Das, 1985).
4. *Spesific Gravity* rata-rata berkisar antara 2.70 sampai dengan 2.90.

Grim (1953) dalam Das (1995), menyatakan bahwa sifat-sifat plastis terbentuk pada tanah lempung apabila partikel-partikel mineral lempung pada tanah dicampur dengan air. Hardiyatmo (2016) menyatakan bahwa batas-batas keplastisan tanah tergantung pada sejarah terjadinya dan komposisi ineral lempung yang dikandungnya. Dalam mendefinisikan tingkat plastisitas tanah kohesif

digunakan sebutan konsistensi. Konsistensi merupakan kondisi fisik tanah pada kadar air tertentu yang dinyatakan dalam istilah lunak, sedang, kaku dan keras. Tingkat konsistensi tanah lunak bila dihubungkan dengan nilai kuat geser tekan bebas (q_u), kuat geser tak terdrainase (c_u), dan nilai N-SPT dapat dilihat pada Tabel 2.1.

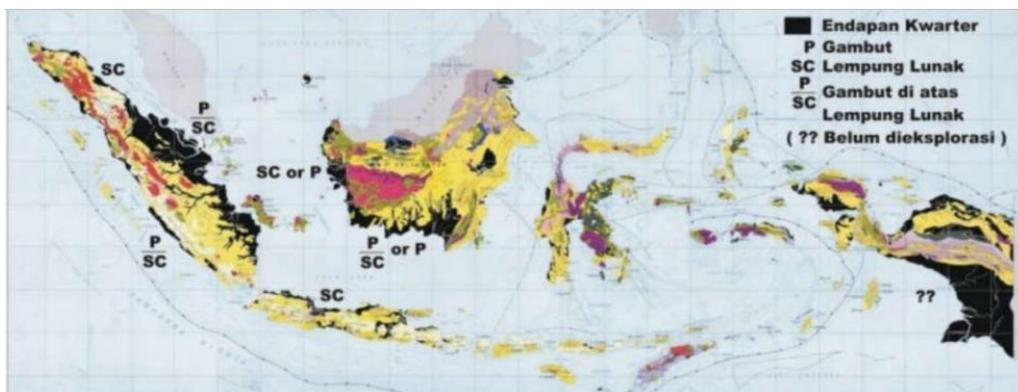
Tabel 2.1 Hubungan Antara Harga q_u , c_u dan N-SPT dengan Konsistensi Tanah

Konsistensi tanah	N-SPT	q_u (kPa)	c_u (kPa)
Sangat Lunak (<i>very soft</i>)	< 2	< 25	< 12,5
Lunak (<i>soft</i>)	2 - 4	25 - 50	12,5 - 25
Sedang (<i>medium stiff</i>)	4 - 8	50 - 100	25 - 50
Kaku (<i>stiff</i>)	8 - 15	100 - 200	50 - 100
Sangat kaku (<i>very stiff</i>)	15 - 30	200 - 400	100 - 200
Keras (<i>hard</i>)	>30	400	>200

Sumber : Terzaghi and Peck (1996) dan Panduan Geoteknik 1 (2002)

Menurut Panduan Geoteknik 1 (2002) dan Suyono (2000), bahwa umumnya lapisan tanah lempung (*clay*) atau lanau (*silt*) disebut dengan lapisan tanah lunak. Di Indonesia tanah jenis ini terdapat pada area lebih dari 20 juta hektar, lebih dari 10% dari daratan Indonesia. Lokasi tanah lunak dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Gambar 2.1 Lokasi tanah lunak di Indonesia



(Sumber : Panduan Geoteknik 1, 2002)

2.3 Jalan Tol dan Pembebanan

Menurut Pasal 1, Pasal 9, Pasal 43, Pasal 44, Undang - Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan menyatakan bahwa :

1. Jalan adalah prasarana transportasi darat yang meliputi segala bagian jalan, termasuk bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukan bagi lalu lintas, yang berada pada permukaan tanah, di atas permukaan tanah, di bawah permukaan tanah dan/atau air, serta di atas permukaan air, kecuali jalan kereta api, jalan lori, dan jalan kabel.
2. Jalan tol adalah jalan umum yang merupakan bagian sistem jaringan jalan dan sebagai jalan nasional yang penggunaanya diwajibkan membayar tol.
3. Tol adalah sejumlah uang tertentu yang dibayarkan untuk pengguna jalan tol.
4. Jalan umum adalah jalan yang diperuntukkan bagi lalu lintas umum.
5. Jalan umum menurut statusnya dikelompokkan ke dalam jalan nasional, jalan provinsi, jalan kabupaten, jalan kota, dan jalan desa.
6. Jalan nasional merupakan jalan arteri dan jalan kolaktor dalam sistem jaringan jalan primer yang menghubungkan antar ibukota provinsi, dan jalan strategis nasional, serta jalan tol.
7. Jalan tol diselenggarakan untuk :
 - a. Memperlancar lalu lintas didaerah yang telah berkembang
 - b. Meningkatkan hasil guna dan daya guna pelayanan distribusi barang dan jasa guna menunjang peningkatan pertumbuhan ekonomi
 - c. Meringankan beban dana pemerintah melalui partisipasi pengguna jalan
 - d. Meningkatkan pemerataan hasil pembangunan dan keadilan

8. Syarat-syarat jalan tol :

- a. Jalan tol sebagai bagian dari sistem jaringan jalan umum merupakan lintas alternatif.
- b. Dalam keadaan tertentu, jalan tol dapat tidak merupakan lintas alternatif.
- c. Jalan tol harus mempunyai spesifikasi dan pelayanan yang lebih tinggi daripada jalan umum yang ada.

Syarat-syarat teknis jalan tol menurut Pasal 5, peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 15 Tahun 2005 :

1. Jalan tol mempunyai tingkat pelayanan keamanan dan kenyamanan yang lebih tinggi dari jalan umum yang ada dan dapat melayani arus lalu lintas jarak jauh dengan mobilitas tinggi.
2. Jalan tol yang digunakan untuk lalu lintas antarkota didesain berdasarkan kecepatan rencana paling rendah 80 (delapan puluh) kilometer per jam, dan untuk jalan tol di wilayah perkotaan didesain dengan kecepatan rencana paling rendah 60 (enam puluh) kilometer per jam.
3. Jalan tol didesain untuk mampu menahan muatan sumbu terberat (MST) paling rendah 8 (delapan) ton.

Menurut Direktorat Jendral Bina Marga (2009), kelas jalan bebas hambatan untuk jalan tol didesain dengan Jalan kelas I. Standar kelas jalan bebas hambatan untuk jalan tol berdasarkan penggunaan jalan dan kelancaran lalu lintas dan angkutan jalan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Standar kelas jalan berdasarkan fungsi dimensi kendaraan dan MST

Kelas Jalan	Fungsi Jalan	Dimensi Kendaraan Maksimum Yang Diizinkan			Muatan Sumbu Terberat yang Diizinkan (ton)
		Lebar (mm)	Panjang (mm)	Tinggi (mm)	
I	Arteri dan Kolektor	2.500	18.000	4.200	10
Khusus	Arteri	>2.500	>18.000	4.200	>10

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2009)

Panduan geoteknik 4 (2002) menyatakan bahwa “Beban lalu lintas ditambahkan untuk analisis stabilitas timbunan jalan, Beban lalu lintas tersebut harus diperhitungkan pada seluruh lebar permukaan timbunan”. Analisa beban lalu lintas menurut kelas jalan dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Beban Lalu Lintas dalam Analisis

Kelas Jalan	Beban Lalu Lintas (kPa)
I	15
II	12
III	12

Sumber : Panduan Geoteknik 4 (2002)

Pedoman XX (2002) menyatakan bahwa “Perkerasan beton semen atau lebih dikenal sebagai perkerasan kaku adalah suatu struktur perkerasan yang umumnya terdiri dari tanah dasar, lapis pondasi bawah dan lapis beton semen dengan atau tanpa tulangan”.

Untuk menghitung beban dari perkerasan dapat menggunakan berat volume dari setiap material yang digunakan. Sebagai parameter untuk menghitung, berat jenis material dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Daftar Berat Jenis Material Konstruksi

Jenis Material	Berat Jenis (ton/m ³)
Beton bertulang/pratekan	2,50
Beton biasa, tumbuk, siklop	2,20
Tanah, pasir, krikil (semua dalam keadaan padat)	2,00

Sumber : Departemen Pekerjaan Umum (1987)

2.4 Penurunan

Das (1995), Hardiyatmo (2007), Wesley (2010), menyebutkan bahwa apabila permukaan tanah diberikan beban, maka lapisan tanah dibawahnya akan mengalami pemampatan yang disebabkan oleh adanya deormasi partikel tanah, relokasi partikel dan keluarnya air atau udara dari dalam pori sehingga berkurangnya volume dan rongga pori tanah. Secara umum, penurunan total pada ranah berbutir halus jenuh air yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam dua kelompok besar, yaitu penurunan konsolidasi (consolidation settlement) dan penurunan segera (immediate settlement). Penurunan konsolidasi masih dapat dibedakan lagi menjadi penurunan akibat konsolidasi primer dan penurunan konsolidasi sekunder. Bila dinyatakan dalam bentuk persamaan dapat dilihat pada persamaan 2.1

$$S_t = S_i + S_c + S_s \quad (2.1)$$

Dimana :

S_t = Penurunan total (m)

S_i = Penurunan segera (m)

S_c = Penurunan konsolidasi primer (m)

S_s = Penurunan konsolidasi sekunder (m).

2.4.1 Penurunan segera (*immediately settlement*)

Das (1995) menyatakan bahwa penurunan segera (*immediately settlement*) merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Penurunan terjadi dengan segera sesudah beban bekerja akibat proses penekanan udara keluar dari dalam pori tanah. Perhitungan penurunan segera umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas. Penurunan segera dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.2

$$S_i = \frac{q_0 B}{E} (1 - \mu^2) \left[F_1 - \left(\frac{1-2\mu}{1-\mu} \right) F_2 \right] \quad (2.2)$$

$$F_1 = \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{1+m^2+n^2}+m}{\sqrt{1+m^2+n^2}-m} \right) + m \times \ln \left(\frac{\sqrt{1+m^2+n^2}+1}{\sqrt{1+m^2+n^2}-1} \right) \right] \quad (2.3)$$

$$F_2 = \frac{n}{\pi} \times \tan^{-1} \left(\frac{m}{n\sqrt{m^2+n^2}+1} \right) \quad (2.4)$$

Dimana :

B = Lebar timbunan (m)

q_0 = Beban total (kN/m²)

E = Modulus elastisitas tanah (kN/m²)

μ = Angka poisson

m = L/B

n = z/B

L = Panjang timbunan (m)

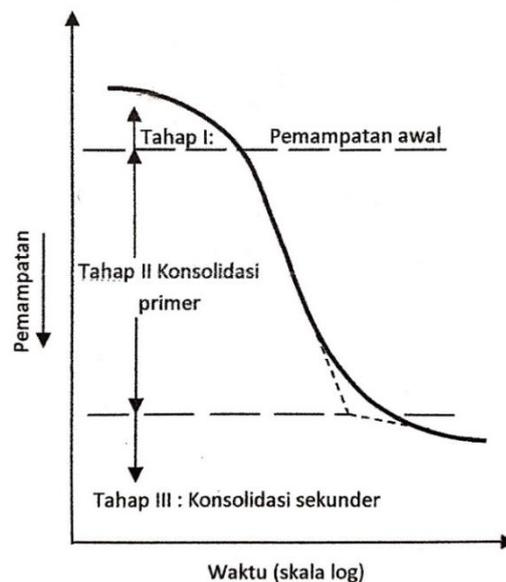
Z = Jarak lapis ke lapis yang ditinjau (m)

S_i = Penurunan segera (m).

2.4.2 Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*)

Menurut Wesley (1997), konsolidasi merupakan proses keluarnya air dari dalam pori tanah yang menyebabkan terjadinya perubahan volume (memampat). Hal ini dipicu karena adanya beban (tanah atau konstruksi bangunan) yang berada diatas tanah. Apabila terdapat beban diatas lapisan tanah maka air pori akan mengalir keluar dari lapisan tersebut dan volume akan berkurang (mengalami konsolidasi).

Pengujian konsolidasi satu dimensi pertama-tama dikenalkan oleh Terzaghi, biasanya dilakukan dilaboratorium dengan alat oedometer atau konsolidometer. Hasil pengujian umumnya dapat berbentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara pemampatan dan waktu selama konsolidasi untuk suatu penambahan beban yang diberikan seperti terlihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Grafik waktu pemampatan selama konsolidasi untuk suatu penambahan beban yang diberikan
(Sumber : Das, B.M, 1995)

Berdasarkan dari Gambar 2.2 diatas terdapat tiga tahapan berbeda yang dapat dijalankan sebagai berikut :

Tahap I : Pemampatan awal (*initial compression*), dimana terjadinya penurunan segera sesudah beban bekerja, hal ini terjadi akibat proses dari penekanan udara yang keluar dari dalam pori tanah.

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

Tahap III : Konsolidasi sekunder (*secondary consolidation*), terjadi setelah tegangan air pori seluruhnya hilang. Penurunan yang terjadi disebabkan oleh penyesuaian yang bersifat plastis dari butir tanah setelah konsolidasi primer.

Hardiyatmo (2007), menyatakan bahwa untuk lempung tertentu, penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan-persamaan berikut ini :

Besarnya penurunan konsolidasi primer total untuk lempung *normally consolidated* ($p'_c = p'_o$) dapat dihitung dengan Persamaan 2.5.

$$S_c = \frac{c_c \times H}{1 + e_0} \log \frac{p'_1}{p'_o} \quad (2.5)$$

Sedangkan untuk lempung *overconsolidated* ($p'_c > p'_o$), besarnya penurunan dihitung dengan Persamaan 2.7 dan Persamaan 2.8.

Didefinisikan :

$$p'_1 = p'_o + \Delta p \quad (2.6)$$

1) Bila $p'_1 \leq p'_c$, maka :

$$S_c = C_r \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p'_1}{P_o} \quad (2.7)$$

2) Bila $p'_1 > p_c$, maka :

$$S_c = C_r \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p'_1}{P_o} + C_c \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p'_1}{P_c} \quad (2.8)$$

Dimana :

C_c = Indeks kompresi tanah

C_r = Indeks pemampatan kembali

P_o = Tekanan *overburden* efektif (kN/m²)

P_c = Tekanan prakonsolidasi (kN/m²)

ΔP = Tambahan tegangan vertikal (kN/m²)

e_o = Angka pori awal

H = Tebal lapisan tanah (m)

S_c = Penurunan primer (m)

Δe = Perubahan angka pori.

Perhitungan besarnya penurunan konsolidasi primer dipengaruhi oleh parameter sebagai berikut:

1. Tegangan *overburden* efektif (P_o')

Menurut Hardiyatmo (2007) tegangan *overburden* efektif yaitu tegangan vertikal efektif dari tanah akibat dari adangan beban diatas lapisan tanah. maka semakin dalam lapisan tanah tegangan *overburden* efektif yang terjadi akan

semakin besar pula. Untuk menghitung tegangan *overburden* efektif pada setiap lapisan dapat menggunakan persamaan berikut :

$$P_0' = \gamma' \times H \quad (2.9)$$

Dimana :

$$P_0' = \text{Tegangan } \textit{overburden} \text{ efektif (kN/m}^2\text{)}$$

$$\gamma' = \text{Berat volume tanah efektif (kN/m}^3\text{)}$$

$$H = \text{Tebal lapisan tanah (m).}$$

2. Tambahan tegangan vertikal (ΔP)

Menurut Hardiyatmo (2007) lapisan tanah akan mengalami kenaikan tegangan akibat adanya beban yang bekerja diatas permukaan tanah. kenaikan tegangan tersebut terjadi akibat adanya beban luar yang bekerja diatas permukaan tanah dan akan didistribusikan menyebar oleh massa tanah, maka semakin dalam dalam lapisan suatu tanah tegangan yang akan diterima semakin kecil. Untuk menghitung tegangan vertikal dapat menggunakan Persamaan 2.10 dan Persamaan 2.11.

$$\Delta P = 2 \times q_o \times I \quad (2.10)$$

$$q_t = \gamma_{timb} \times H \quad (2.11)$$

$$I = \frac{1}{\pi} \left(\left\{ \frac{a+b}{a} \right\} (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \alpha_2 \right) \quad (2.12)$$

Dimana :

$$\Delta P = \text{Tambahan tegangan vertikal (kN/m}^2\text{)}$$

$$q_o = \text{Beban total (kN/m}^2\text{)}$$

γ_{timb} = Berat volume tanah timbunan (kN/m³)

H = Tebal lapisan tanah (m)

I = Faktor pengaruh

3. Indeks kompresi tanah (C_c)

Terzaghi dan Peck (1967) dalam Das (1995) menyarankan pemakaian persamaan empiris untuk menghitung indeks pemampatan pada lempung yang struktur tanahnya terganggu atau belum rusak (*undisturbed*).

4. Indeks pemampatan kembali (C_r)

Hardiyatmo (2007) menyatakan bahwa indeks pemampatan kembali atau indeks rekompresi adalah kemiringan dari kurva pelepasan beban dan pembebanan kembali yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. definisi C_r dapat dilihat pada Persamaan 2.13.

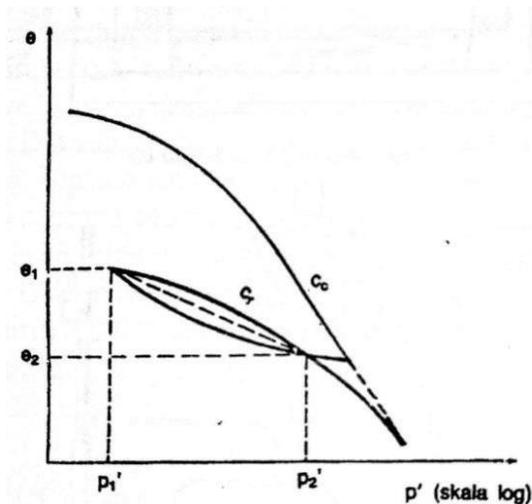
$$C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'} \quad (2.13)$$

Dimana :

C_r = indeks pemampatan kembali

Δe = Angka pori

$\Delta \log p'$ = Tambahan tegangan akibat beban



Gambar 2.3 Sifat khusus grafik hubungan $e - \log p'$
(Sumber : Hardiyatmo, 2007)

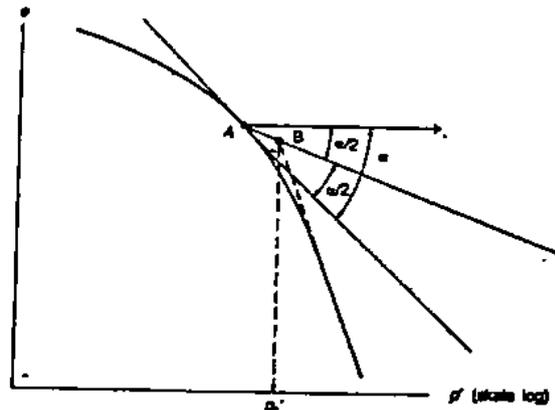
5. Tekanan prakonsolidasi (p_c')

Hardiyatmo (2007), menjelaskan terdapat beberapa cara untuk menentukan nilai tekanan prakonsolidasi (p_c'). Cara yang paling banyak digunakan adalah cara Casagrande (1936) yaitu dengan menggunakan gambar grafik hubungan $e - \log p'$ seperti pada Gambar 2.4.

Prosedur untuk menentukan tekanan prakonsolidasi (p_c') yang diusulkan oleh Casagrande (1936) adalah sebagai berikut :

- 1) Pilihlah berdasar pandangan mata satu titik yang berjari-jari minimum (atau titik pada puncak kurva) pada kurva konsolidasi (titik A dalam Gambar 2.5).
- 2) Gambarkan garis horisontal melalui titik A (sejajar absis).
- 3) Gambarkan garis singgung pada kurva lewat titik A.
- 4) Bagi dua sudut yang dibuat oleh butir (2) dan (3).

- 5) Perpanjang bagian lurus dari kurva pemampatan asli sampai memotong garis bagi sudut butir (4). Titik potong dari dua garis ini adalah tekanan prakonsolidasi (p_c'). Yaitu titik B dari Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Cara menentukan p_c' (Casagrande, 1936)
(Sumber : Hardiyatmo, 2007)

Kecepatan konsolidasi bergantung pada kecepatan air dapat mengalir keluar dari tanah, yaitu nilai koefisien rembesan (k) dan volume air yang keluar dari tanah, bergantung pada kompresibilitas tanah, yaitu parameter m_v .

Barimbing (2010), menyatakan bahwa Terzaghi memperkenalkan teori yang pertama kali mengenai kecepatan konsolidasi satu dimensi untuk tanah lempung jenuh air. Secara matematis, dasar persamaan diferensial dari teori konsolidasi oleh Terzaghi seperti Persamaan 2.14.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.14)$$

Persamaan matematis untuk konsolidasi satu dimensi dari Terzaghi dalam menentukan nilai derajat konsolidasi arah vertikal (U_V) dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.15 dan 2.16.

Jika $U_V \leq 60\%$, maka :

$$U_V = \frac{\sqrt{\frac{4 \times T_v}{\pi}}}{\left(1 + \left(\frac{4T_v}{\pi}\right)^{2,8}\right)^{0,179}} \quad (2.15)$$

Jika $U_V > 60\%$, maka :

$$U_V = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \text{Exp}^{-\left[\frac{\pi^2(2m+1)^2}{4}\right]T_v} \quad (2.16)$$

Dimana :

u = Tekanan air pori (kN/m^2)

t = Waktu konsolidasi (hari)

z = Kedalaman peninjauan (m)

$\frac{\partial u}{\partial t}$ = Turunan pertama tekanan air pori terhadap waktu

$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ = Turunan kedua tekanan air pori terhadap kedalaman

m = Bilangan bulat

U_V = Derajat konsolidasi arah vertikal

T_v = Faktor waktu vertikal

Menurut Hardiyatmo (2020) faktor waktu penurunan konsolidasi dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.17.

$$T_v = \frac{t \times C_v}{H_t^2} \quad (2.17)$$

Dimana :

t = Waktu konsolidasi (hari)

T_v = Faktor waktu vertikal

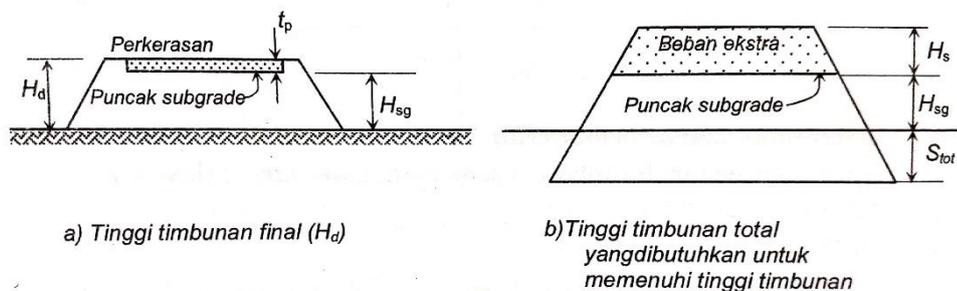
H_t = Tinggi timbunan total (m)

C_v = Koefesien Konsolidasi vertikal ($m^2/hari$)

2.5 Pra Pembebanan (*Preloading*)

Hardiyatmo (2020) menyatakan bahwa banyak bangunan infrastruktur salah satunya bidang transportasi yang dibangun diatas permukaan tanah lunak yang tebal sehingga akan terjadi masalah penurunan yang berlebih dan harus dicari solusinya. Maka dilakukanya perbaikan pada bagian tanah lunak tersebut, salah satu caranya yaitu dengan pra pembebanan (*preloading*) dan dikombinasikan dengan drainase vertikal.

Menurut Hardiyatmo (2020), pra-pembebanan (*preloading*) merupakan timbunan sementara yang hanya berfungsi pengganti beban perkerasan dan beban lalu lintas dan nantinya akan dibongkar, kemudian setelah dibongkar akan dibangun lapisan perkerasannya. Tinggi timbunan total (H_t) yang harus dibangun dilapangan adalah jumlah dari tinggi timbunan rencana (H_d) ditambah dengan tinggi timbunan yang tenggelam ke tanah fondasi akibat penurunan seperti yang terlihat di Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Tinggi timbunan rencana dan tinggi timbunan total yang dibutuhkan
(Sumber : Hardiyatmo, 2020)

Rahman (2015), menyatakan bahwa tinggi timbunan awal ($H_{t\ awal}$) pada saat pelaksanaan tidak sama dengan tinggi timbunan rencana (H_{sg}). Dalam mencari tinggi timbunan total yang dibutuhkan bisa menggunakan persamaan berikut

$$H_{t\ awal} = \frac{(q_o + (S_t \times \gamma_{timb}) + (S_t \times \gamma'_{timb}))}{\gamma_{timb}} \quad (2.18)$$

$$H_{t\ akhir} = H_{t\ awal} - S_t \quad (2.19)$$

Dimana :

$H_{t\ awal}$ = Tinggi timbunan awal (m)

$H_{t\ akhir}$ = Tinggi timbunan akhir (m)

H_{sg} = Tinggi timbunan rencana (m)

S_t = Penurunan total (m)

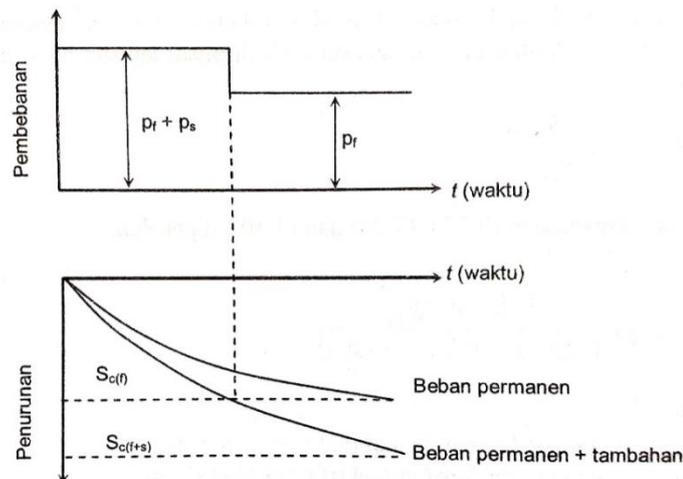
q_o = Beban total (kN/m²)

γ_w = Beban lalu lintas (kN/m³)

γ_{timb} = Berat volume timbunan (kN/m³).

Beban *preloading* yang diletakkan secara bertahap ditentukan berdasarkan besarnya pemampatan tanah dasar yang dihilangkan. Kekuatan geser tanah lunak akan mempengaruhi tinggi timbunan kritis. Sistem *precompression* atau *preloading* ialah metode perbaikan tanah dengan memberikan beban awal yang berlebih P_{f+s} sedemikian rupa sehingga pada waktu yang pendek t_{sr} didapatkan penurunan

yang sama besar dengan total penurunan S_f dari beban rencana P_f , seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Konsep mempercepat penurunan dengan cara prekompresi
(Sumber : Johnson, 1970)

2.6 Prefabricated Vertical Drain (PVD)

Menurut Hardiyatmo (2020), perbaikan tanah lunak menggunakan drainase vertikal sangat cocok digunakan pada tanah yang mudah mampat dan jenuh air seperti tanah lempung dan tanah yang berbulir halus lainnya. Ciri-ciri tanah yang mudah mampat ini yaitu mempunyai angka pori dan kadar air yang tinggi. Akibat angka pori yang terlalu besar (rongga pori besar), maka bila dibebani dengan beban yang berat akan menyebabkan pemampatan atau penurunan konsolidasi tanah yang besar pula.

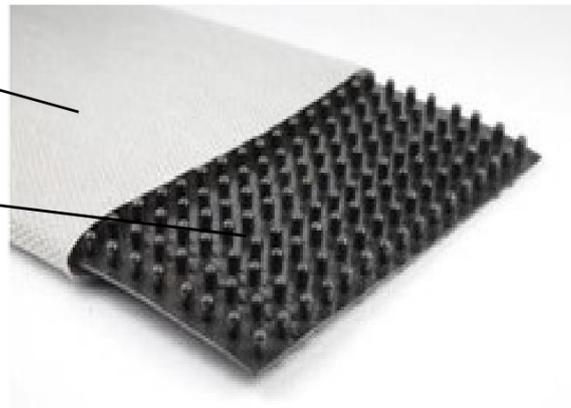
Hardiyatmo (2020), menyatakan bahwa drainase vertikal tidak cocok digunakan pada tanah yang lolos air atau tanah granular (pasir, kerikil). Selain itu drainase vertikal juga tidak cocok diaplikasikan pada tanah yang mengalami konsolidasi sekunder yang cukup tinggi, seperti lempung yang berplastisitas dan gambut (peat). Keuntungan lain dari penggunaan drainase vertikal pada proyek

jalan raya adalah sejalan dengan bertambahnya kecepatan konsolidasi, kepadatan dan kuat geser tanah juga bertambah dengan cepat. ada dua tipe drainase vertikal, yaitu Drainase pasir vertikal (*sand drain*) dan Drainase vertikal pracetak (*prefabricated vertical drain, PVD*).

Hardiyatmo (2020), menyatakan bahwa Drainase vertikal pracetak (*prefabricated vertical drain, PVD*) berbentuk pita dengan tampang empat persegi panjang dan lebar sekitar 100 mm serta tebal 4 mm terbuat dari geosintetik yang menyelubungi inti plastik. Selubung luar umumnya dibuat dari geotekstil nir-anyam (*non woven*) yang terbuat dari *polyester* atau *polypropylene*. Inti plastik berfungsi sebagai penahan sehubung filter dan untuk memberikan aliran longitudinal.

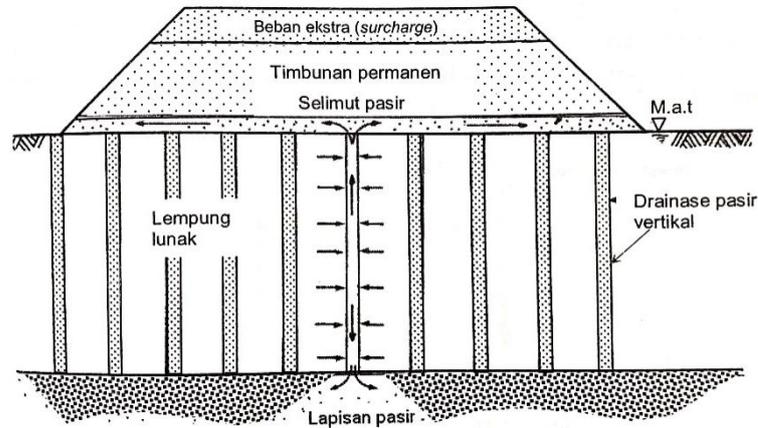
Geotekstil non woven

Inti



Gambar 2.7 Drainase vertikal pracetak (PVD)
(Sumber : Syahfiani, 2020)

Menurut Hardiyatmo (2020), untuk mempercepat proses pemampatan tanah atau penurunan konsolidasi dibutuhkan jarak aliran yang lebih pendek. Seperti yang tertera pada Gambar 2.8, pengaliran air dari drainase vertikal yang dibangun pada lapisan tanah lunak akan menuju ke arah lapisan lolos air yang berada diatas.



Gambar 2.8 Timbunan dengan beban ekstra dan drainase pasirvertikal
(Sumber : Hardiyatmo, 2020)

Menurut Hardiyatmo (2020), bahwa faktor penting dalam perancangan PVD adalah pemilihan parameter-parameter tanah, terutama koefesien konsolidasi C_h . Oleh karena itu, koefesien konsolidasi arah vertikal (C_v) dan arah horizontal (C_h) harus ditentukan dengan seksama. Namun, dalam perancangan, nilai C_h sering diestimasi dari nilai C_v maka nilai koefesien konsolidasi horizontal (C_h) dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut :

$$C_h = (1 s/d 4) \times C_v \quad (2.20)$$

Dimana :

C_h = Koefesien konsolidasi arah radial (m²/hari)

C_v = Koefesien konsolidasi arah vertikal (m²/hari).

Persamaan umum untuk menentukan waktu konsolidasi radial untuk kasus ideal tanpa ada *smear* :

$$t = \frac{D^2}{8C_h} F(n) \ln \left(\frac{1}{1-U_h} \right) \quad (2.21)$$

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8 \times T_h}{F(n)}\right) \quad (2.22)$$

Dengan,

$$T_h = \frac{c_h \times t}{D^2} \quad (2.23)$$

$$F(n) = \ln \frac{D}{D_w} - 0,75 \quad (2.24)$$

$$D_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (2.25)$$

Dimana :

T_h = Faktor waktu horizontal

C_h = Koefesien Konsolidasi horizontal (m²/hari)

D = Diameter jangkauan kerja PVD (m)

t = Waktu ke-n (hari)

U_h = Derajat konsolidasi arah radial

$F(n)$ = Faktor hambatan

D_w = Diameter lingkaran ekivalen PVD (m)

a = Lebar tampang PVD (mm)

b = Tebal tampang PVD (mm)

Hardiyatmo (2020), untuk drainase gabungan kearah vertikal dan radial sekaligus, derajat konsolidasi rata-rata dinyatakan dalam persamaan :

$$U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) \quad (2.26)$$

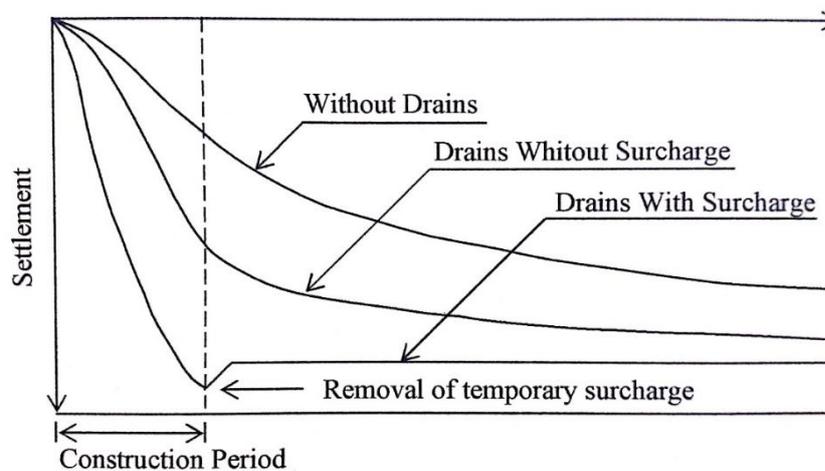
Dimana :

U = Derajat konsolidasi rata-rata

U_v = Derajat konsolidasi arah vertikal

U_h = Derajat konsolidasi arah radial

Dapat dilihat pada Gambar 2.9 Penurunan tanah dengan drainase vertikal dan tanpa menggunakan drainase vertikal terhadap waktu sebagai berikut ini.



Gambar 2.9 Penurunan dengan dan tanpa drainase vertikal
(Sumber : Barimbing, 2017)

Dalam Hardiyatmo (2020), bahwa ukuran tipe drainase vertikal dan bahan yang digunakan dirangkum dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Tipe drainase vertikal dan cara pemasangan

Tipe drainase	Cara pemasangan	Diameter drainase (m)	Jarak tipikal (m)	Panjang maksimum (m)
Drainase Pasir	Dipancang atau digetarkan <i>mandrel</i> ujung tertutup (tipe perpindahan)	0,15 – 0,6	1 – 5	≤ 30
Drainase Pasir	Batang berlubang <i>flight auger</i> kontinu (perpindahan kecil)	0,3 – 0,5	2 – 5	≤ 35
Drainase Pasir	Disemprotkan (<i>jetted</i>) (tanpa perpindahan)	0,2 – 0,3	2 – 5	≤ 30
<i>Prefabricated sand drain (sand wicks)</i>	Dipancang atau digetarkan <i>mandrel</i> ujung tertutup; <i>flight auger</i> ; bor cuci putar (perpindahan besar atau kecil)	0,06 – 0,15	1,2 – 4	≤ 30
<i>Prefabricated band shape drain (PVD)</i>	Dipenetrasikan atau digetarkan dengan <i>mandrel</i> tertutup (perpindahan besar atau kecil)	0,05 – 0,1*	1,2 – 3,5	≤ 60

*Diameter ekuivalen

Sumber : Jamiolkowski et al (1983)

1. Jarak antar PVD

Menurut Hardiyatmo (2020), bahwa jarak PVD yang pernah digunakan adalah antara 1,2 sampai 4 meter. Namun dalam praktik, jarak PVD yang lebih besar dari 2 meter umumnya jarang. Fellenius menyarankan jarak drainase vertikal sebagai berikut :

Lempung homogen : 1 sampai 1,6 m

Lempung berlanau : 1 sampai 1,8 m

Tanah-tanah yang lebih kasar : 1,5 sampai 2 m

2. Panjang PVD

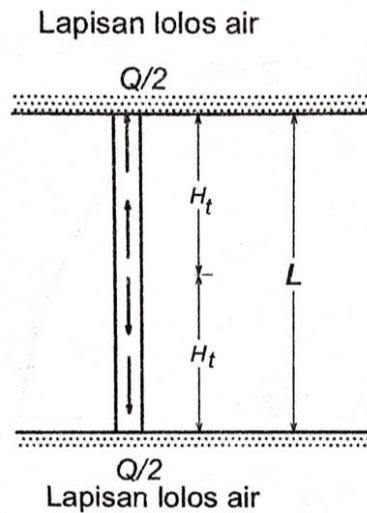
Panjang PVD sama dengan panjangnya lintasan drainase efektif dengan panjang maksimum ≤ 60 meter seperti terlihat pada Gambar 2.10. jika drainase terjadi dua arah :

$$L = 2H_t \quad (2.27)$$

Dimana :

L = Panjang lintasan drainase efektif (m)

H_t = Panjang drainase vertikal (m)



Gambar 2.10 Drainase dua arah (Sumber : FHWA, 1986)

3. Transformasi Tampang PVD

Konsolidasi dianggap hanya kearah radial dan air pori didalam tanah dialirkan oleh drainase vertikal yang mempunyai penampang lingkaran. Karena PVD umumnya bertampang persegi panjang, maka diameter drainase vertikal dinyatakan dalam bentuk diameter ekuivalen.

Keliling lingkaran = Keliling Persegi Panjang

$$\pi D_w = 2(a + b) \quad (2.28)$$

$$D_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (2.29)$$

Dimana :

D_w = Diameter PVD (m)

a = Panjang PVD (m)

b = Lebar PVD (m)

Gambar 2.11 Diameter ekuivalen PVD (*Sumber : FHWA, 1986*)

4. Pola PVD

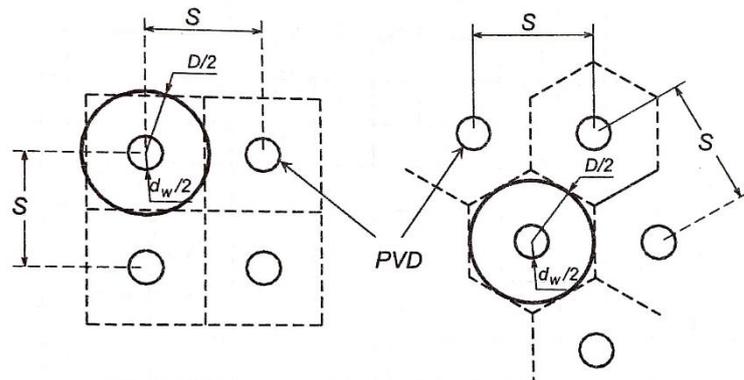
Untuk susunan PVD baik itu pola bujursangkar maupun segitiga, luas zona yang terdrainase oleh satu buah PVD adalah sama dengan $\frac{1}{4}\pi D^2$. Dari pengalaman dilapangan, pemasangan PVD dengan pola segitiga sama sisi menghasilkan penurunan yang lebih seragam, sehingga lebih banyak digunakan. Hubungan antara jarak PVD (S) dan diameter pengaruh drainase (D) dinyatakan dalam persamaan

$$D = 1,05 S \text{ (pola segitiga)} \quad (2.30)$$

Dimana :

D = Diameter jangkauan kerja PVD (m)

S = Jarak PVD (m)



a) Susunan bujursangkar, $D = 1,13 S$ b) Susunan segitiga sama sisi $D = 1,05 S$

Gambar 2.12 Pola PVD (Sumber : Hardiyatmo, 2020)

Menurut Hardiyatmo (2020), dan Michael (2020), bahwa pola pemasangan segitiga lebih efektif dalam mempercepat konsolidasi tanah dengan menghasilkan penurunan yang lebih seragam lebih banyak digunakan.