

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Pengertian Tanah

Secara umum 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. (Das, B. M. 1994 : 1)

Tanah umumnya dapat disebut sebagai kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau atau lempung (*clay*), tergantung pada ukuran partikel yang paling dominan pada tanah tersebut. Dimana kerikil (*gravels*) adalah kepingan-kepingan dari batuan yang kadang-kadang juga mengandung partikel-partikel mineral *quartz*, *feldspar*, dan mineral-mineral lain. Pasir (*sand*) sebagian besar terdiri dari mineral *quartz* dan *feldspar*. Lanau sebagian besar merupakan fraksi mikroskopis (berukuran sangat kecil) dari tanah yang terdiri dari butiran-butiran yang sangat halus dan sejumlah partikel berbentuk lempengan-lempengan pipih yang merupakan pecahan dari mineral-mineral mika. Sedangkan lempung (*clay*) sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis (tidak dapat dilihat dengan jelas bila hanya dengan mikroskopis biasa) yang berbentuk lempengan-lempengan pipih dan merupakan partikel-partikel dari mika, mineral-mineral lempung (*clay minerals*) dan mineral-mineral yang sangat halus lain. (sumber : Das, B. M. 1994:8)

Pada **Tabel 2.1** ditunjukkan batasan-batasan ukuran golongan jenis tanah yang telah dikembangkan oleh *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, *U.S. Departement of Agriculture (USDA)*, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* dan oleh *U.S. Army Corps of Engineers* dan *U.S. Bureau of Reclamation* yang kemudian menghasilkan apa yang disebut sebagai *Unified Soil Classification System (USCS)*. Pada tabel tersebut, system *MIT* diberikan hanya untuk keterangan tambahan saja. Sistem *MIT* ini penting artinya dalam sejarah perkembangan sistem batasan ukuran golongan jenis tanah. (sumber : Das, B. M. 1994:7)

Tabel 2.1
Batasan-Batasan Ukuran Golongan Tanah

Nama Golongan	Ukuran Butiran (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2 - 0.06	0.06 – 0.002	<0.002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2 – 0.05	0.05 – 0.002	< 0.002
American Assoxiation of State Highway and Transportation Officials (AASTO)	76.2 – 2	2 – 0.075	0.075 – 0.002	<0.002
Unified Soil Classification System (U.S. Bureu of Reclamation)	76.2 – 4.75	4.75 – 0.075	Halus (yaitu lanau dan lempung) < 0.0075	

sumber : Das, B. M. 1994:7

1.2 Peran Tanah

Tanah berperan sebagai material konstruksi yang merupakan suatu bahan atau material untuk membangun suatu bangunan konstruksi maupun sebagai pendukung pondasi dari bangunan konstruksi di atasnya. Letak geografis Indonesia yang berada pada iklim tropis dengan curah hujan yang tinggi merupakan faktor yang sangat mempengaruhi karakteristik dan sifat – sifat tanah tersebut. Pada kondisi tanah dengan kriteria kandungan air yang cukup tinggi serta kompresibilitas yang besar menyebabkan tanah mengalami penurunan dalam waktu cukup lama sehingga dapat menyebabkan potensi kerusakan dalam konstruksi yang didirikan di atas tanah tersebut. Apabila suatu tanah mengalami pemampatan, maka penurunan tanah akibat beban konstruksi yang didirikan di atasnya tidak berpotensi merusak bangunan tersebut.

Tanah memiliki 3 (tiga) peran utama pada bangunan insfrastruktur, yaitu sebagai pendukung, bahan dan beban bangunan insfrastruktur seperti yang ditunjukkan pada (**Gambar 2.1**). Sebagai peran pendukung daya dukung tanah harus mampu mendukung bangunan insfrastruktur yang berada di atasnya. Apabila tanah mengalami pemampatan maka penurunan bangunan yang diakibatkan tidak menyebabkan bangunan rusak seperti yang ditunjukkan pada (**Gambar 2.2**)



Gambar 2.1.1 Peran tanah pada bangunan
Sumber : PT. Teknindo Geosistem Unggul



Gambar 2.1.2 Syarat tanah pendukung bangunan
Sumber : Teknindo Geosistem Unggul

1.3 Tanah Lunak

Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari sebagian besar butir-butir yang sangat kecil seperti lempung atau lanau. Sifat tanah lunak adalah gaya gesernya kecil, kemampatannya besar, koefisien permeabilitas yang kecil dan mempunyai daya dukung rendah jika dibandingkan dengan tanah lempung lainnya. Tanah lempung lunak secara umum mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

1. Kuat geser rendah
2. Bila kadar air bertambah, kuat geser berkurang
3. Bila struktur tanah terganggu, kuat geser berkurang
4. Bila basah bersifat platis dan mudah mampat
5. Menyusut bila kering dan mengembang bila basah

6. Memiliki kompresibilitas yang besar
7. Merupakan material kedap air

Menurut Terzaghi (1967) tanah lempung kohesif diklasifikasikan sebagai tanah lunak apabila mempunyai daya dukung lebih kecil dari $0,5 \text{ kg/cm}^2$ dan nilai *standard penetration test* lebih kecil dari 4 ($N\text{-value} < 4$). Berdasarkan uji lapangan, tanah lunak secara fisik dapat diremas dengan mudah oleh jari-jarai tangan. Menurut Toha (1989), sifat umum tanah lunak adalah memiliki kadar air 80-100 %, batas cair 80-100%, batas plastis 30-45%, saat dites *sieve analysis*, maka butiran yang lolos oleh saringan no 200 akan lebih besar dari 90% serta memiliki kuat geser 20-40 kN/m^2 .

Tanah lempung lunak didefinisikan sebagai lempung yang mempunyai tegangan geser kurang dari 25 Kpa. (Edward W and Rolf Peter B, 1981). Peck dkk, (1953) mengklasifikasikan lempung berdasarkan hubungan antar konsistensi, identifikasi dan kuat geser tekan bebas (q_u) seperti pada (**Tabel 2.2**). Braja M DAS, (1985) mengklasifikasikan lempung berdasarkan kadar air seperti (**Tabel 2.3**).

Tabel 2.2
Klasifikasi Tanah Lempung Berdasarkan Kuat Geser Tekan Bebas

Konsistensi Tanah Lempung	Identifikasi di Lapangan	q_u (kg/cm^2)
Sangat Lunak	Dengan mudah ditembus beberapa inchi dengan kepala tangan	<0.25
Lunak	Dengan mudah ditembus beberapa inchi dengan ibu jari	0.25-0.5
Sedang	Dapat ditembus beberapa inchi pada kekuatan sedang dengan ibu jari	0.5 – 1.0
Kaku	Melekuk bila ditekan dengan kuku ibu jari, tapi dengan kekuatan besar	1.0 – 2.0
Sangat kaku keras	Melekuk bila ditekan dengan kuku ibu jari. Dengan kesulitan, melekuk bila ditekan dengan kuku ibu jari	2.0– 0.4 >0.4

sumber : Das, B. M. 1994

Tabel 2.3
Klasifikasi Tanah Lempung Berdasarkan Kadar Air

Tipe Tanah Lempung	Kadar air, w (%)
Kaku	21
Lembek	30 – 50
Lunak	90 - 120
Batas Cair >50 %	

sumber : Das, B. M. 1994

1.4 Penurunan Tanah (*Settlement*)

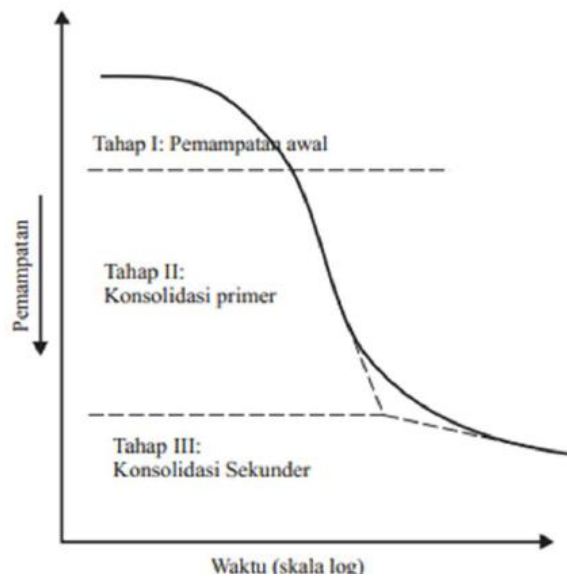
Bilamana suatu lapisan tanah jenuh air diberi penambahan beban, angka tekanan air akan naik secara mendadak. Pada tanah berpasir yang sangat tembus air (*permeable*), air dapat mengalir dengan cepat sehingga pengaliran air pori ke luar sebagai akibat dari kenaikan tekanan air pori dapat selesai dengan cepat. Keluarnya air dari dalam pori selalu disertai dengan berkurangnya volume tanah, berkurangnya volume tanah berpasir dapat menyebabkan penurunan lapisan tanah itu. Karena air pori di dalam tanah berpasir dapat mengalir ke luar dengan cepat, maka penurunan segera dan penurunan konsolidasi terjadi bersamaan.

Bilamana suatu lapisan tanah lempung jenuh air yang mampumampat (*compressible*) diberi penambahan tegangan, maka penurunan (*settlement*) akan terjadi dengan segera. Koefisien rembesan lempung sangat kecil dibandingkan dengan koefisien rembesan pasir sehingga tekanan air pori disebabkan oleh pembebanan akan berkurang secara lambat laun dalam waktu yang sangat lama. Jadi untuk tanah lempung lembek perubahan volume yang disebabkan oleh keluarnya air dari dalam pori (konsolidasi) akan terjadi sesudah penurunan segera. Penurunan konsolidasi tersebut biasanya jauh lebih besar dan lebih lambat serta lama dibandingkan dengan penurunan segera.

Konsolidasi tanah adalah suatu proses pengecilan volume secara perlahan-lahan pada tanah jenuh sempurna dengan permeabilitas rendah akibat pengaliran sebagian air pori. Proses tersebut berlangsung terus sampai kelebihan tegangan air pori yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total telah benar-benar hilang. (Craig,1994:213)

Pada umumnya, tahapan konsolidasi dapat ditunjukkan oleh grafik (**Gambar 2.3**), hubungan antara pemampatan dan waktu. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa ada tiga tahapan yang berbeda yang dapat dijalankan:

- Tahap I : pemampatan awal (*initial compression*), terjadi disebabkan oleh pembebanan awal (*preloading*)
- 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*), yaitu terjadi setelah tegangan air pori hilang seluruhnya. Pemampatan yang terjadi adalah disebabkan oleh penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah setelah konsolidasi primer.



Gambar 2.1.3 Hubungan antara waktu (skala log) dengan pemampatan selama konsolidasi untuk penambahan beban yang diberikan.

Sumber: Das, B.M. (1994 : 184)

Bila suatu lapisan tanah mengalami pembebanan akibat beban di atasnya, maka tanah di dibawah beban yang bekerja tersebut akan mengalami kenaikan tegangan, kenaikan tegangan ini adalah terjadinya penurunan elevasi tanah dasar (*settlement*). Pembebanan ini mengakibatkan adanya deformasi partikel tanah dan keluarnya air pori dari tanah yang disertai berkurangnya volume tanah. Tiga komponen hal inilah yang mengakibatkan terjadinya penurunan tanah yaitu :

$$S_t = S_i + S_c + S_s \dots\dots\dots (1-1)$$

Dengan :

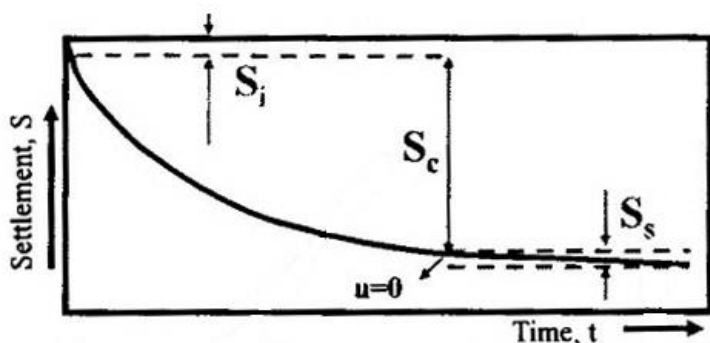
S_t = penurunan total (m)

S_i = penurunan segera (m)

S_c = penurunan akibat konsolidasi primer (m)

S_s = penurunan akibat konsolidasi sekunder (m)

Dengan kata lain, penurunan sekunder terjadi ketika penurunan konsolidasi selesai yaitu pada saat tegangan air pori berlebih $u = 0$.



Gambar 2.1.4 Grafik Hubungan antara penurunan dengan waktu.
 Sumber : Gouw, (2010)

1.4.1 Penurunan Segera (S_i)

Penurunan segera atau penurunan elastis disebabkan dari deformasi elastis tanah kering, basah dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Umumnya penurunan ini diturunkan dari teori elastisitas. *Immediate settlement* ini biasanya terjadi selama proses konstruksi berlangsung. Parameter tanah yang dibutuhkan untuk perhitungan adalah *undrained modulus* dengan uji coba tanah yang diperlukan seperti SPT, Sondir (*dutch cone penetration test*) dan *Pressuremeter test*.

$$S_i = \Delta\sigma B \frac{1-\mu_s^2}{E_s} I_p \dots\dots\dots(1-2)$$

Dengan :

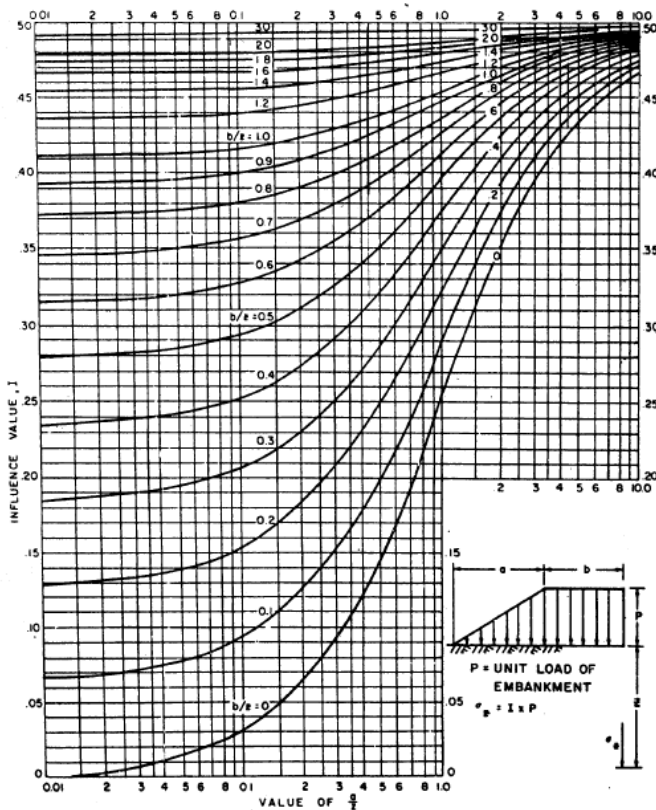
- S_i = penurunan segera (m)
- $\Delta\sigma$ = Beban timbunan (kN/m^2)
- E_s = modulus elassitas tanah
- μ_s = *Poisson`s Ratio*
- B = Lebar/diameter timbunan (m)
- I_p = non-dimensional influence factor

Influence factor bisa didapat dari grafik pada (**Gambar 2.5**) sebagai berikut:

$$\Delta\sigma = 2 \times I \times q \dots\dots\dots(1-3)$$

Dimana :

- q = tegangan vertikal efektif dipermukaan tanah akibat timbunan
- I = Influence factor



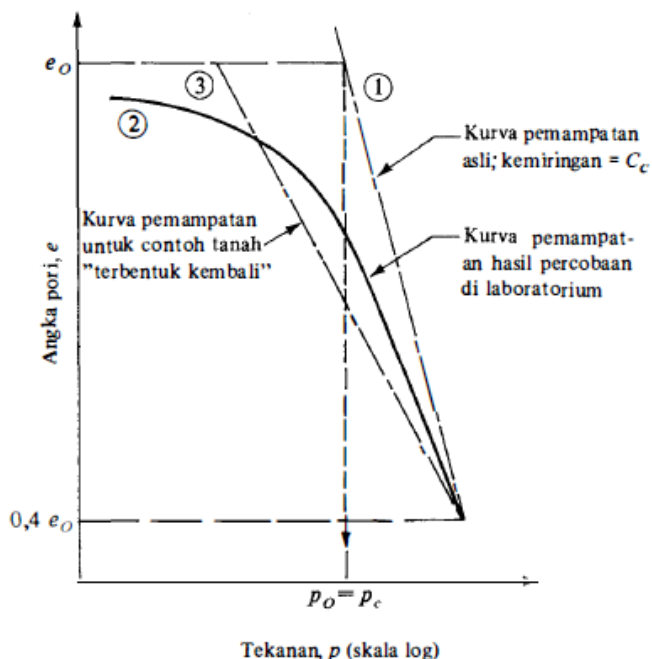
Gambar 2.1.5 Grafik Influence Factor
Sumber :Das, B.M. (1994)

1.4.2 Penurunan Akibat Konsolidasi Primer (S_c)

Bila suatu lapisan tanah jenuh yang permeabilitasnya rendah dibebani, maka tekanan pori dalam tanah tersebut akan bertambah. Perbedaan tekanan air pori pada lapisan tanah, berakibat air mengalir ke lapisan tanah yang tekanan air porinya lebih rendah, yang diikuti proses penurunan tanahnya. Karena permeabilitas rendah akibat pembebanan, prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terlepasnya air pori keluar dari rongga tanah.

Penambahan beban di atas permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah dibawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan karena adanya deformasi partikel tanah, keluarnya air atau udara dalam pori. Faktor-faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan, besarnya penurunan dihitung dengan persamaan 2.4.

Untuk tanah yang terkonsolidasi normal (*normally consolidated*) (**Gambar 2.6**), dimana tekanan efektif *overburden* pada saat ini adalah tekanan maksimum yang pernah dialami.



Gambar 2.1.6 Karakteristik konsolidasi lempung yang terkonsolidasi secara normal (*normally consolidated*) dengan sensitivitas rendah sampai sedang
 Sumber: Das, B.M. (1994 : 190)

$$S_c = \frac{C_c \cdot h}{1 + e_s} \times \text{Log} \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_o} \right) \dots\dots\dots (1-4)$$

Untuk tanah yang terkonsolidasi lebih (*over consolidated*), (**Gambar 2.7**) dimana tanah di lapangan pada suatu kedalaman tertentu mengalami tekanan efektif *overburden* akibat beban di atasnya saat ini lebih kecil dari pada tekanan yang pernah dialami oleh tanah itu sebelumnya dinamakan tegangan prakonsolidasi (*preconsolidation pressure/pc*), besarnya penurunan tersebut digunakan persamaan:

Bila $\sigma'_o + \Delta\sigma \leq \sigma'_c$, maka:

$$S_c = \frac{C_s \cdot h}{1 + e_s} \times \text{Log} \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma'_o} \right) \dots\dots\dots (1-5)$$

Bila $\sigma'_o + \Delta\sigma > \sigma'_c$, maka:

$$S_c = \frac{C_s \cdot h}{1 + e_s} \times \text{Log} \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} \right) + \frac{C_c \cdot h}{1 + e_s} \times \text{Log} \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_c} \right) \dots\dots\dots (1-6)$$

Dengan :

h = tebal lapisan lempung (m)

e₀= angka pori awal (Initial Void Ratio)

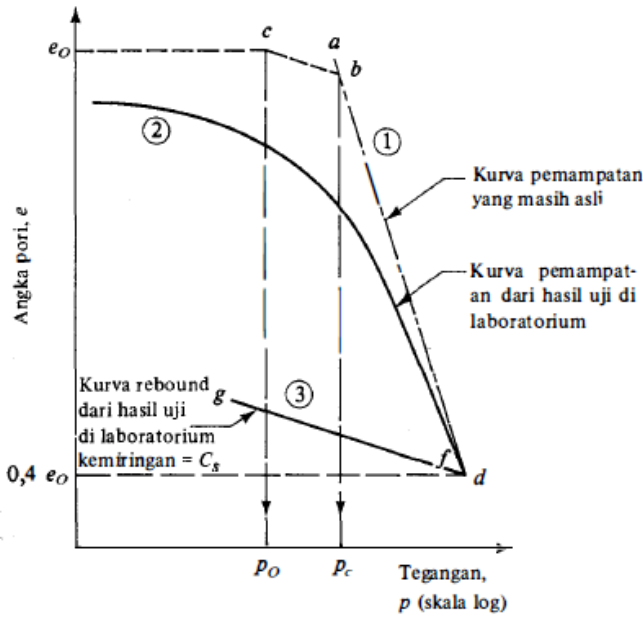
C_c = *Compression Index*

C_s = *Swelling Index*

$\Delta\sigma$ = besarnya tegangan dimuka tanah (Surchage) (t/m^2)

σ'_{o} = tegangan overburden efektif (t/m^2)

σ'_c = tegangan prakonsolidasi efektif (t/m^2)



Gambar 2.1.7 Karakteristik konsolidasi lempung yang terlalu terkonsolidasi (overconsolidated) dengan sensitivitas rendah sampai sedang

Sumber :Das, B.M. (1994 : 191)

1.4.3 Penurunan Akibat Konsolidasi Sekunder

Penurunan akibat konsolidasi sekunder adalah penurunan yang masih berjalan setelah konsolidasi primer selesai, yaitu setelah tidak terdapat lagi tegangan air pori. Dan berlangsung dalam waktu yang lama serta kecil.

Indeks pemampatan sekunder (*secondary compression ratio*) atau C_{α} dinyatakan oleh persamaan :

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} \dots\dots\dots (1-7)$$

Ratio pemampatan sekunder ($C_{\alpha e}$) dinyatakan oleh persamaan

$$C_{\alpha e} = \frac{C_{\alpha}}{1 + e_p} \dots\dots\dots (1-8)$$

Penurunan konsolidasi sekunder dihitung dengan persamaan:

$$S_s = HC_{\alpha e} \log \frac{t_2}{t_1} \dots\dots\dots (1-9)$$

Dimana :

e_p = Angka pori saat konsolidasi selesai

H = tebal benda uji awal atau tebal lapisan tanah yang ditinjau

$t_2 = t_1 + \Delta t$

t_1 = waktu saat konsolidasi primer selesai

1.5 Indeks Pemampatan (*Compression Index C_c*)

Indeks pemampatan yang digunakan untuk menghitung besarnya penurunan yang terjadi di lapangan sebagai akibat dari konsolidasi. Terzaghi dan Peck (1967) menyarankan pemakaian persamaan empiris berikut ini untuk menghitung indeks pemampatan :

Untuk lempung yang struktur tanahnya tak terganggu/belum rusak (*undisturbed*)

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \dots\dots\dots (1-10)$$

Untuk lempung yang terbentuk kembali (*remolded*)

$$C_c = 0,007 (LL - 10) \dots\dots\dots (1-11)$$

Dimana LL = batas cair dalam persen

Beberapa perumusan untuk menghitung indeks pemampatan yang lain banyak tersedia saat ini. Perumusan-perumusan tersebut telah dikembangkan dengan menguji bermacam-macam jenis lempung. Hubungan tersebut diberikan dalam (**Tabel 2.4**).

Tabel 2.4
Hubungan untuk Indeks Pemampatan, C_c

Persamaan	Acuan	Daerah Pemakaian
$C_c = 0.007 (LL - 7)$	Skempton	Lempung yang terbentuk kembali (<i>remolded</i>)
$C_c = 0.01 W_n$		Lempung Chicago
$C_c = 1.15 (e_0 - 0.27)$	Nishida	Semua lempung
$C_c = 0.30 (e_0 - 0.27)$	Hough	Tanah kohesif anorganik: lanau, lempung berlanau, lempung
$C_c = 0.0115 W_n$		Tanah organik, gambut, lanau organik, dan lempung
$C_c = 0.0046 (LL - 9)$		Lempung Brazilia
$C_c = 0.75 (e_0 - 0.5)$		Tanah dengan plastisida rendah
$C_c = 0.208e_0 + 0.0083$		Lempung Chicago
$C_c = 0.156e_0 + 0.0107$		Semua lempung

Menurut Rendon – Herrero (1980)

Catatan e_0 = angka pori tanah di lapangan

W_n = kadar air tanah di lapangan

Sumber :Das, B. M. (1994:195)

Tabel 2.5
Pemampatan dan Pengembang Tanah Asli

Tanah	Batas Cair	Batas Plastis	Indeks Pemampatan C_c	Indeks Pengembang C_s
Lempung Boston Blue	41	20	0.35	0.07
Lempung Chicago	60	20	0.4	0.07
Lempung Ft. Gordon Georgia	51	26	0.12	
Lempung New Orleans	80	25	0.3	0.05
Lempung Montana	60	28	0.21	0.05

Sumber :Das, B. M. (1994:195)

1.6 Indeks Pengembang (*Swell Indeks, C_s*)

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

$$C_s \approx 1/5 \text{ sampai } 1/10 C_c \dots\dots\dots (1-12)$$

Batas air, batas plastis, indeks pemampatan dan indeks pengembang untuk tanah yang masih belum rusak strukturnya diberikan dalam (**Tabel 2.5**).

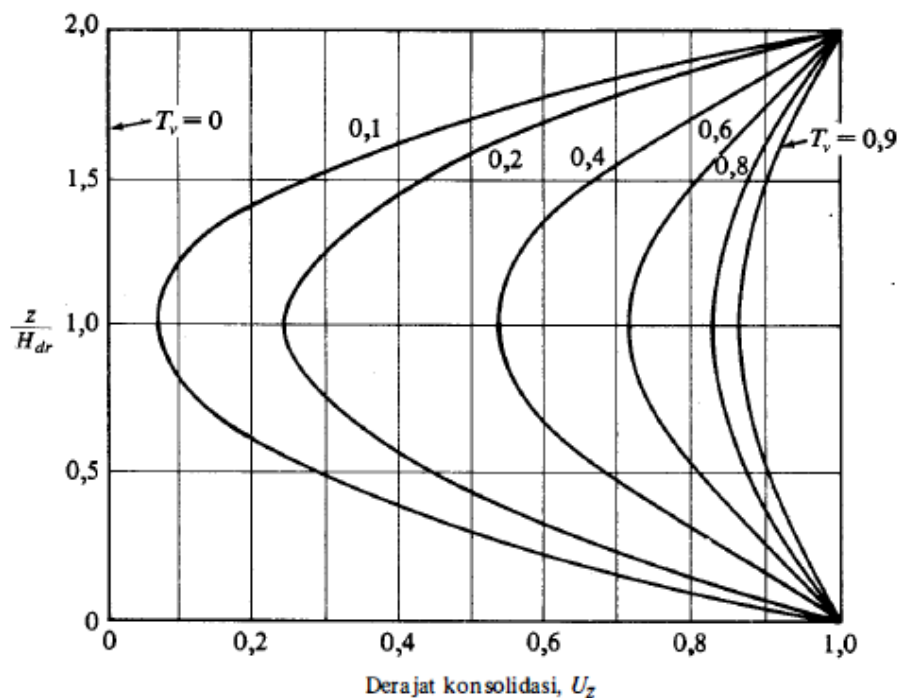
1.7 Kecepatan Waktu Konsolidasi

Terzaghi (1925) mengeluarkan teori pertama untuk memperhitungkan kecepatan konsolidasi satu dimensi untuk tanah lempung jenuh. Bebearapa asumsi untuk melakukan perhitungan yaitu : (Tailor, 1948)

1. Campuran lempung dan air homogen
2. Tanah jenuh sepenuhnya
3. Air dianggap tidak dapat terkompresi (incompressible)
4. Partikel tanah dianggap tidak dapat terkompresi
5. Kemampatan dan aliran hanya satu dimensi (Vertical)
6. Hukum Darcy berlaku untuk semua gradient hidrolis

Teori konsolidasi satu dimensi ini akan berhubungan dengan tiga besaran, yaitu:

1. Ekses tekanan air pori
2. Kedalaman z di bawah permukaan atas lapisan lempung
3. Waktu t dari saat pemberian kenaikan tegangan total



Gambar 2.1.8 Variasi U_z terhadap T_v dan z/H_{dr}
 Sumber: Das, B.M. (1994 : 206)

Variasi derajat konsolidasi rata-rata terhadap factor waktu yang tak berdimensi, T_v diberikan dalam (**Tabel 2.6**) yang berlaku untuk keadaan dimana u_0 adalah sama untuk seluruh kedalaman lapisan yang mengalami konsolidasi dan variasi linear dari tekanan air pori awal pada lapisan lempung dengan aliran air pori atau satu arah.

Tabel 2.6
 Variasi Faktor Waktu terhadap Derajat Konsolidasi

Derajat Konsolidasi U (%)	Faktor Waktu (T_v)		
	Kurva (1)	Kurva (2)	Kurva (3)
0	0	0	0
10	0.008	0.047	0.003
20	0.031	0.100	0.009
30	0.071	0.158	0.024
40	0.126	0.221	0.048
50	0.197	0.294	0.092
60	0.287	0.383	0.160
70	0.403	0.500	0.271
80	0.567	0.665	0.440
90	0.848	0.940	0.720
100	∞	∞	∞

Sumber: Das, B.M. (1994 : 207,208)

1.8 Koefisien Konsolidasi, c_v

Menurut Das, B.M. (1994 : 208) Koefisien konsolidasi c_v , biasanya akan berkurang dengan bertambahnya batas cair (LL) dari tanah. Rentang (range) dari variasi harga c_v untuk suatu batas cair tanah tertentu adalah agak lebar.

Untuk konsolidasi 90%, $T_{90} = 0,848$. Jadi

$$T_{90} = \frac{c_v t_{90}}{H^2 dr} \dots\dots\dots (1-13)$$

Atau

$$c_v = \frac{0,848 H^2 dr}{t_{90}} \dots\dots\dots (1-14)$$

Rumus tambahan untuk menentukan C_v terhadap tanah berlapis-lapis dengan ketebalan yang berbeda, waktu penurunan dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$C_{v \text{ gabungan}} = \frac{(H_1+H_2+H_3+\dots+H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}}\right)^2} \dots\dots\dots (1-15)$$

1.9 Perbaikan Tanah Lunak

Tanah lunak dalam konstruksi seringkali menjadi permasalahan. Komposisi tanah lunak sebagian besarnya diisi oleh air pori dan udara. Hal tersebut berpengaruh terhadap berkurangnya daya dukung tanah tersebut. Daya dukung tanah yang rendah dapat menimbulkan kerugian yang sangat besar mulai dari sisi biaya konstruksi yang semakin mahal. Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari sebagian besar butir-butir yang sangat kecil seperti lempung (*clay*) atau lanau (*silt*). Sifat tanah lunak adalah gaya gesernya yang kecil, kemampatan yang besar, koefisien permeabilitas yang kecil serta mempunyai daya dukung tanah yang rendah jika dibandingkan dengan tanah lempung lainnya.

1.9.1 Perbaikan Tanah dengan Pembebanan Awal (*Preloading*)

Metode pembebanan awal (*preloading*) adalah metode penimbunan beban yang besarnya sama dengan beban konstruksi yang akan dilaksanakan. Ada pula yang menentukan tinggi timbunan sesuai dengan nilai penurunan, agar tanah timbunan tidak dibuang sia-sia dan dapat dijadikan suatu pondasi dari suatu konstruksi.

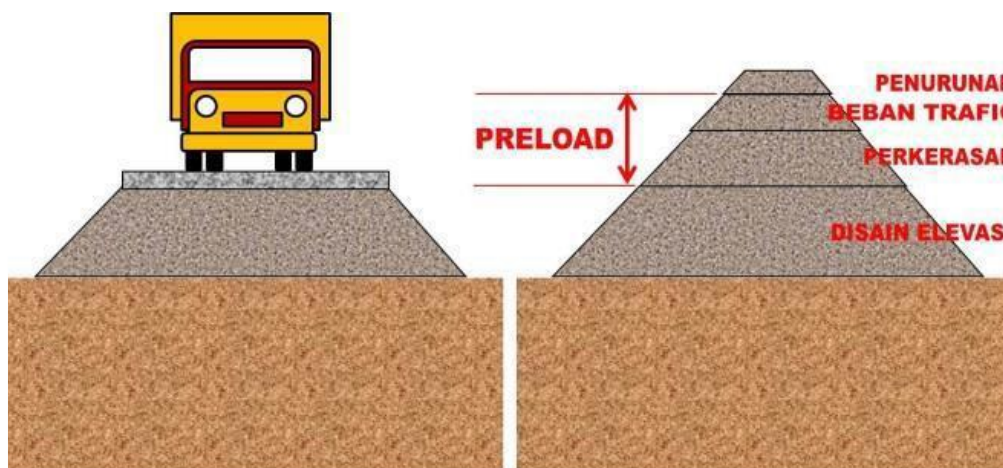
Tujuan dari *preloading* meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi kompresibilitas pada tanah lunak dengan membuat butiran-butiran tanah menjadi mampat.

Selain itu *preloading* dapat mengurangi besarnya penurunan dan penurunan berbeda (*differential settlement*).

Pada penggunaan *preloading* menggunakan timbunan, agar penurunan konsolidasi dapat sesuai dengan yang akan dicapai maka beban timbunan direncanakan dengan ketinggian tertentu. Tinggi timbunan pada umumnya berkisar antara 3-8 meter dengan penurunan yang terjadi umumnya berkisar 0,3-2,0 meter (Stamatopoulus, 1985).

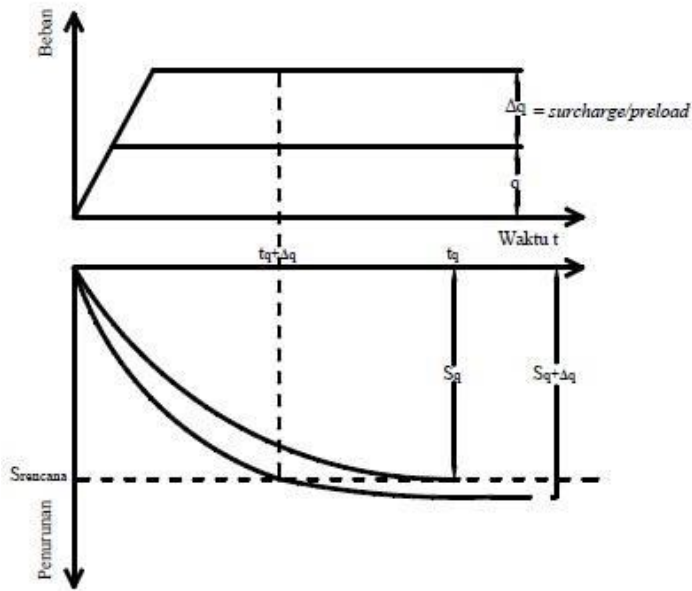
Pada penggunaan timbunan yang perlu diperhatikan yaitu daya dukung dasar agar tidak terjadi kelongsoran pada pemberian timbunan. Untuk mencegah kelongsoran pada umumnya digunakan pemberian timbunan secara bertahap.

Penentuan penambahan tinggi timbunan pada preloading system bertahap (**Gambar 2.9**) dimulai dengan menentukan tinggi kritis (H_{cr}) yang mampu diterima oleh tanah dasar.



Gambar 2.1.9 Perencanaan timbunan *preload*

Sumber : Jurnal Problematika Pembangunan Infrastruktur pada Tanah Lempung Lunak dan Alternatif Metoda Penanganannya, (2015)



Gambar 2.1.10 Perbandingan waktu dan penurunan preloading tanpa dan dengan surcharge

Sumber : Yunias, Lishia, Skripsi, (2010)

Pada tanah yang dikonsolidasi hanya menggunakan *preloading*, pengaliran air pori hanya terjadi pada arah vertikal saja. Sehingga perhitungan lamanya waktu konsolidasi dilapangan dapat menggunakan rumus dengan (**Persamaan 2-16**).

$$t = \frac{T_v \cdot H^2 \cdot dr}{C_v} \dots\dots\dots (1-16)$$

Dimana :

H_{dr} = panjang aliran rata-rata yang harus ditempuh air pori selama konsolidasi (m)

T_v = factor waktu

t = waktu (hari)

C_v = koefisien konsolidasi vertical

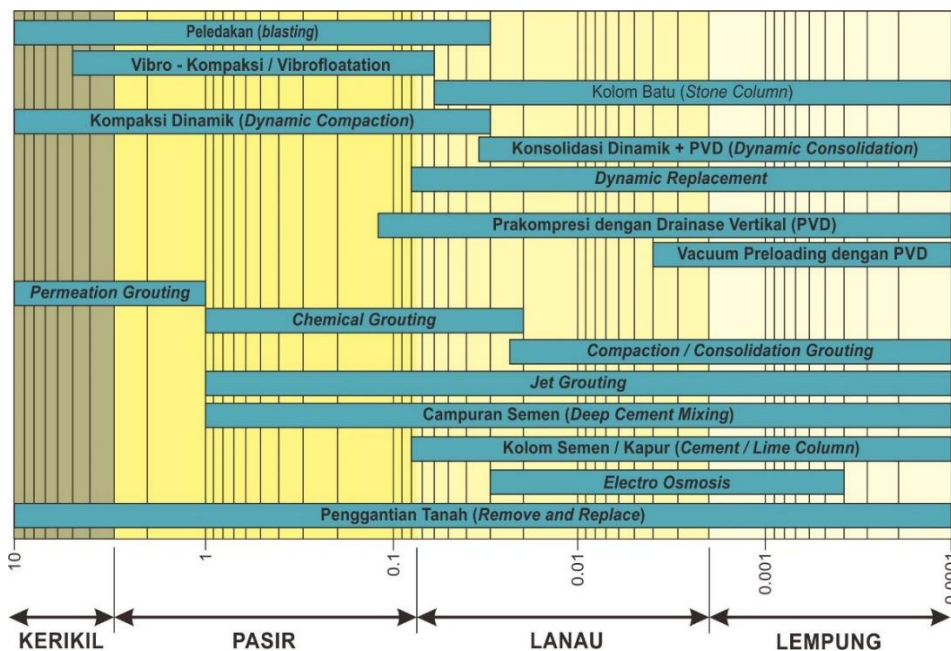
Pada (**Gambar 2.10**) menunjukkan bahwa terdapat perbandingan waktu *preloading* menggunakan *surcharge* (beban tambahan) dan *preloading* tanpa *surcharge*. Dimana saat dibebani oleh beban tambahan maka penurunan akan semakin tinggi dan lebih cepat terkonsolidasi dari pada tanpa beban tambahan.

1.9.2 Vertical Drain

Pada perbaikan tanah dengan metode pembebanan awal, masalah yang timbul adalah lamanya proses waktu penurunan. Hal ini sering terjadi pada lapisan tanah yang cukup dalam dan mempunyai permeabilitas tanah yang rendah.

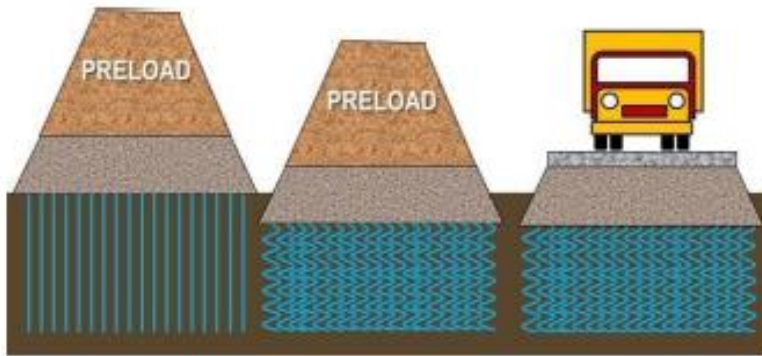
Untuk mengatasi cara yang digunakan adalah membuat saluran vertikal yang mempunyai permeabilitas tinggi, sehingga memberi fasilitas kepada air pori untuk mengalir melalui lintasan-lintasan yang berarah radial pada saluran vertikal tadi.

Saluran vertikal ini disebut drainase vertikal. Sebelum menentukan menggunakan *vertical drain* terlebih dahulu melihat kriteria tanah. Karena *vertical drain* hanya bisa digunakan jika kriteria tanah tersebut merupakan golongan tanah lempung lanau kepasiran seperti yang tertera pada (**Gambar 2.11**).



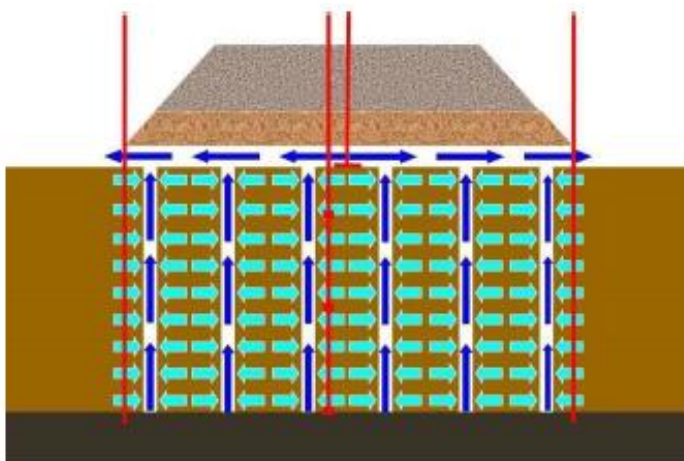
Gambar 2.1.11 Kriteria Tanah untuk Pemilihan Metode Perbaikan Tanah
sumber: PT. Teknindo Geosistem Unggul

Metoda *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*, perbaikan tanah dilakukan dengan cara meletakkan beban (*preload*) pada tanah dasar sesuai dengan beban kerja (*work land*) dan beban konstruksi (*construction load*) yang direncanakan. Durasi pembebanan dilakukan sampai konsolidasi tanah dasar mencapai derajat konsolidasi yang direncanakan. Apabila derajat konsolidasi tanah dasar telah mencapai pada derajat yang direncanakan maka *preload* dibongkar dan konstruksi dimulai pelaksanaannya. Ilustrasi metoda preloading dengan *Prefabricated Vertical Drain* ditunjukkan pada (**Gambar 2.12**)



Gambar 2.1.12 Prinsip preloading dengan Prefabricated Vertical Drain
 Sumber : PT. Teknindo Geosistem Unggul

Perbaikan tanah lempung lunak metoda preloading dengan *Prefabricated Vertical Drain* merupakan satu sistem perbaikan tanah yang terdiri dari pekerjaan *preload*, *Prefabricated Vertical Drain*, *horizontal drain* dan *instrument* geoteknik seperti ditunjukkan pada (**Gambar 2.13**). *Preload* berfungsi untuk memampatkan tanah dasar dan *Prefabricated Vertical Drain* berfungsi untuk mempercepat proses pemampatan tanah kemudian diteruskan oleh *horizontal drain* yang berfungsi untuk mengalirkan air pori dari *Prefabricated Vertical Drain* ke arah horizontal ke luar timbungan *preload*. Instrumen geoteknik berfungsi untuk memantau proses dan mengetahui kinerja hasil perbaikan tanah yang telah dilakukan.



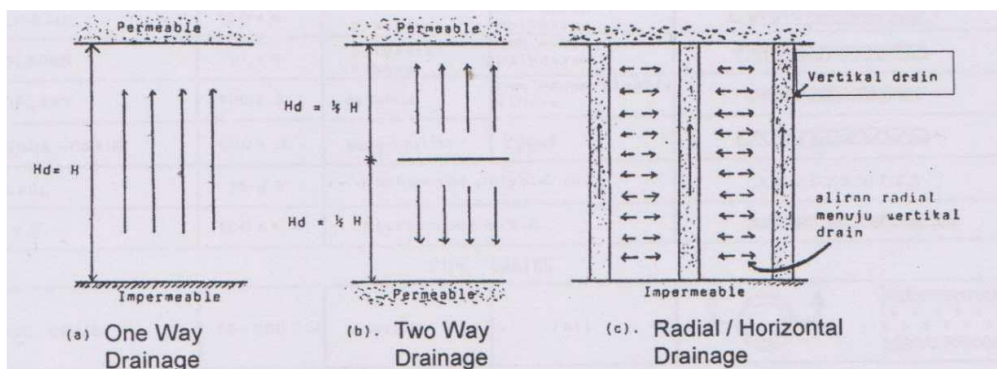
Gambar 2.1.13 Sistem preloading dengan Prefabricated Vertical Drain
 Sumber : PT. Teknindo Geosistem Unggul

Penggunaan *Prefabricated Vertical Drain* lebih sering digunakan karena memiliki banyak keuntungan, diantaranya:

- Gangguan pada tanah yang diakibatkan pada saat pemasangan lebih kecil
- Waktu yang dibutuhkan saat kontrol kualitas lebih cepat
- Kualitas *Prefabricated Vertical Drain* cenderung seragam karena dibuat di pabrik
- Pemasangan lebih cepat dan ekonomis
- Tahan terhadap deformasi besar tanpa terlalu banyak kehilangan fungsi drainase
- Kontaminasi butiran halus tanah asli yang menyebabkan terhambatnya lebih kecil.

1.9.2.1 Teori Vertical Drain

Prefabricated Vertical Drain berperan besar dalam proses konsolidasi. Dengan menggunakan *Prefabricated Vertical Drain*, maka proses konsolidasi dapat berjalan lebih cepat. Teori dasar konsolidasi radial di sekitar sistem drainase vertikal merupakan perpanjangan teori konsolidasi satu dimensi.



Gambar 2.1.14 Modifikasi Jarak Tempuh Air dengan Keberadaan *Prefabricated Vertical Drain*

Sumber: Gouw, (2010)

Dalam (**Gambar 2.29**) Terlihat bahwa dengan memanfaatkan *Prefabricated Vertical Drain*, proses konsolidasi berjalan lebih cepat. Ada dua faktor yang terlibat di dalamnya:

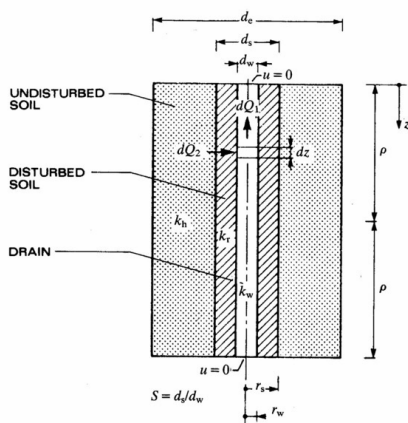
1. Jarak tempuh air, dengan menggunakan *Prefabricated Vertical Drain*, jarak tempuh air berkurang dan tegangan air pori berlebih dapat terdisipasi dengan cepat.
2. Arah aliran menunjukkan bahwa air mengalir secara horizontal. Pada umumnya nilai koefisien konsolidasi untuk aliran horizontal (C_h) mempunyai nilai lebih besar daripada

koefisien konsolidasi untuk aliran vertical (C_v). Semakin besar koefisien konsolidasi, semakin cepat konsolidasi terjadi.

Karena itu, dalam mendesain *Prefabricated Vertical Drain*, faktor jarak dan koefisien konsolidasi menggunakan nilai arah horizontal. Salah satu cara yang umum digunakan adalah metode Baron (*Baron's Equation*) yaitu *free strain* dan *equal strain* dan menunjukkan bahwa konsolidasi rata-rata yang diperoleh dalam dua kasus hampir sama. Solusi didasarkan pada asumsi sebagai berikut:

1. Semua beban vertikal pada awalnya dibawa oleh tekanan pori berlebih, sehingga tanah menjadi jenuh
2. Beban diterapkan, diasumsikan terdistribusi secara merata dan semua *strain* terjadi pada arah vertikal
3. Zona pengaruh dari drain filter diasumsikan melingkar dan *axisymmetric*
4. Permeabilitas saluran tak terbatas dibandingkan dengan permeabilitas tanah
5. Hukum Darcy berlaku

Sedangkan menurut hypothesis Hansbo (1981), berasal dari solusi perkiraan untuk vertical drain berdasarkan usulan hipotesis dari Barron (1948) untuk mengambil kedua zona smear dengan permeabilitas berkurang dan resistensi yang harus dipertimbangkan. Dengan menerapkan hukum Darcy, laju air pori internal dalam arah radial dapat diperkirakan. Total aliran air dari irisa, dz , ke drain filter, dQ_1 sama dengan perubahan aliran air dari tanah sekitarnya, DQ_2 yang sebanding dengan perubahan volume massa tanah (**Gambar 2.15**)



Gambar 2.15 Verikal Drain termasuk *Smear* dan *Well Resistance*
Sumber : (Holtz et al., 1991)

1.9.2.2 *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*

Secara umum *Prefabricated Vertical Drain* merupakan alat untuk pengaliran drainase menggunakan bahan sintesis. Drainase vertikal yang menggunakan lembaran plastik dengan panjang dan berkantung merupakan kombinasi antara bahan inti (*core*) *polypropylene* yang memiliki kekuatan mekanik tinggi. Lapisan pembungkus tersebut menggunakan bahan berbentuk geotekstil.

Prefabricated Vertical Drain berfungsi untuk mempercepat proses konsolidasi tanah, terutama pada jenis tanah lempung (*Clay*) atau lanau (*silt clay*). *Prefabricated Vertical Drain* ditanam secara vertikal ke dalam tanah untuk mengalirkan air dari lapisan tanah lunak ke permukaan.

Prefabricated Vertical Drain memiliki 2 sisi yaitu *filter* dan *core* atau yang biasanya disebut sebagai jaket dan inti. Fungsi dari jaket adalah untuk menyaring agar hanya air yang memasuki ke inti membradrain. Sedangkan inti (*core*) sebagai penyalur air untuk mempermudah air keluar dari dalam tanah ke permukaan.

a. Inti (*Core*) *Prefabricated Vertical Drain*

Inti (*core*) pada *Prefabricated Vertical Drain* 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*.

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

b. Jaket (*Filter*) *Prefabricated Vertical Drain*

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

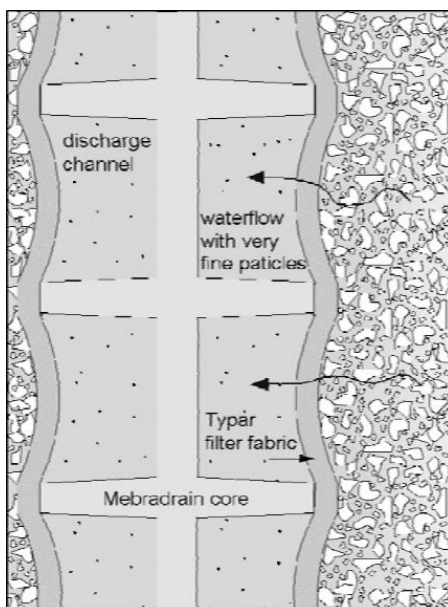
Ketahanan *filter* tergantung pada distribusi ukuran butir tanah dan tekanan pori dari filter. Ketahanan *filter* dipengaruhi oleh partikel kecil yang masuk bersama dengan aliran air dan menyumbat *filter*. Partikel kecil harus mampu melewati *filter* dengan bebas, tetapi

jumlah partikel yang masuk tidak boleh terlalu banyak. Jika jumlah partikel yang masuk terlalu banyak akan beresiko terhadap pengendapan sehingga dapat mengurangi kapasitas tampung *Prefabricated Vertical Drain*.

Menurut Hansbo (1979,1994), *filter* harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Permeabilitas *filter* harus cukup tinggi untuk tidak mempengaruhi kapasitas debit dari *vertical drain system*
2. Sebaliknya permeabilitas *filter* harus lebih rendah untuk mempertahankan partikel tanah halus. Partikel-partikel tanah halus mungkin menembus *filter* ke dalam inti, yang akhirnya saluran inti jadi tersumbat.
3. *Filter* harus cukup kuat untuk menahan tekanan lateral yang tinggi agar tidak terserap ke dalam saluran inti
4. *Filter* tidak boleh memperburuk dengan waktu karena ini akan mengurangi kapasitas debit dari saluran inti pembuangan.

Fungsi *filter* dapat diilustrasikan sebagai berikut :



Gambar 2.1.16 Ilustrasi Fungs Filter
Sumber :T. Stapelfeldt, (2001)

Dalam rangka untuk memenuhi persyaratan sesuai dengan teori Hansbo di atas, ada kriteria desain *filter* dasar yang harus dipenuhi yaitu:

1. Permeabilitas

Kriteria pertama adalah permeabilitas dari *filter* harus cukup besar, dan harus lebih tinggi dari permeabilitas tanah. Karena sesuai dari hukum air akan mengalir dari permeabilitas rendah ke tinggi. Menurut Chu et al, 2004 permeabilitas *filter* bisa didefinisikan sebagai berikut

$K_f \geq 10k_s$, dimana k_f adalah permeabilitas *filter* dan k_s adalah permeabilitas tanah.

2. Sifat mekanis dari *filter* dan inti

Prefabricated Vertikal Drain harus memiliki kekuatan yang memadai untuk mempertahankan tegangan tarik selama proses instalasi. Menurut Kremer et al. (1983), kekuatan tarik maksimum terjadi ketika madrel dipercepat dan pada waktu awal penetrasi atau sesudah diperlambat dikarenakan melewati hambatan atau lapisan tanah. Oleh karena itu kekuatan inti, kekuatan *filter* dan kekuatan seluruh drainase harus ditentukan dalam dua kondisi yaitu kondisi basah dan kondisi kering. Kremer et al. (1983)

- Kekuatan tarik longitudinal salah satu komponennya minimal 0,5kN
- Longitudinal *strain* akan mengalami kegagalan antara $\geq 2\%$ dan $\leq 10\%$
- Di setiap bagian drainase *filter* harus memiliki sifat yang sama atau lebih baik



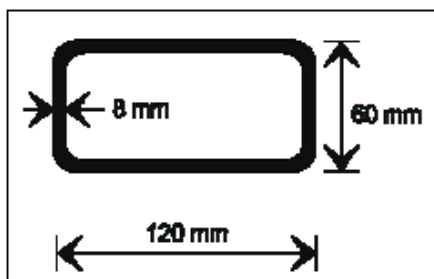
Gambar 2.1.17 Material *Prefabricated Vertikal Drain*

Sumber :Jurnal Problematika Pembangunan Infrastruktur pada Tanah Lempung Lunak dan Alternatif Metoda Penanganannya, (2015)

1.9.2.3 Pemasangan *Prefabricated Vertical Drain*

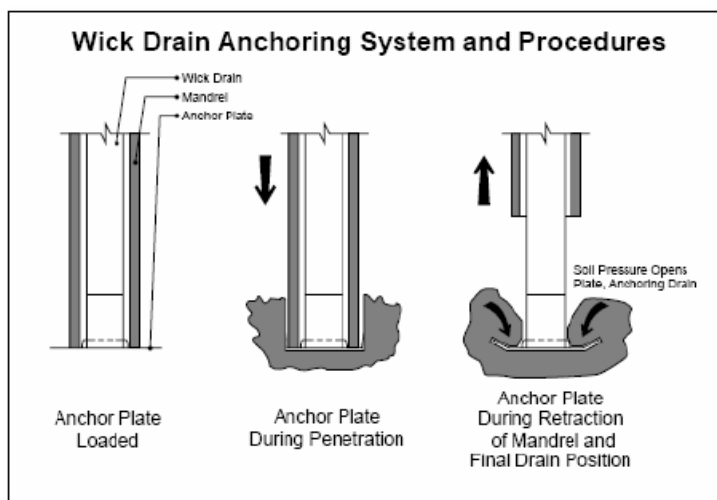
Untuk menghindari kerusakan pada *Prefabricated Vertical Drain* digunakan pipa besi berbentuk segiempat (*mandrel*) untuk memasang *Prefabricated Vertical Drain*. *Mandrel* (**Gambar 2.18**) merupakan alat bantu yang digunakan sewaktu pemasangan *Prefabricated Vertical Drain*. Ukuran *mandrel* tersebut sangat mempengaruhi besarnya kerusakan tanah yang ada di sekitar *Prefabricated Vertical Drain* (mempengaruhi besarnya efek *smear* yang terjadi). Semakin besar ukuran *mandrel* akan menyebabkan kerusakan yang lebih besar. Lebar *mandrel* (w) berkisar antara 40-150 mm. Ukuran *mandrel* harus lebih besar dari ukuran *Prefabricated Vertical Drain* yang digunakan, supaya *Prefabricated Vertical Drain* dapat masuk ke dalam *mandrel*. 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 *Prefabricated Vertical Drain* cukup singkat yaitu 1-5 menit.



Gambar 2.1.18 Mandrel

Sumber :*Jurnal Preloading and Vertical Drain*



Gambar 2.1.19 Drain, mandrel dan Anchor Plate

Sumber : (Cramer, undated)

1.9.2.3.1 Metode Penekanan (*Static*)

Ada beberapa 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 *Prefabricated Vertical Drain* tidak terpasang dengan baik sehingga mempengaruhi proses konsolidasi.

Prinsip pemasangan :

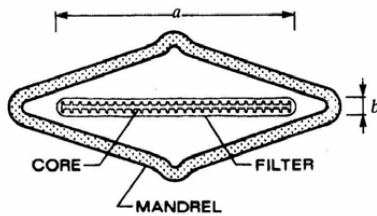
1. Ujung gulungan *Prefabricated Vertical Drain* dipasang di samping *stitcher*, kemudian dimasukkan ke dalam *stitcher*. Dengan penggerak berputar, *Prefabricated Vertical Drain* digerakkan ke bawah menuju *mandrel*. Pada dasar *mandrel* dipasang *anchor plate* yang ditarik berlawanan arah dengan dasar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

1.9.2.3.2 Metode Getaran (*Dinamic*)

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 *Prefabricated Vertical Drain* akan tertarik sehingga dapat merobek *filter*. Biasanya metode ini jarang digunakan. Prosedur pemasukkan untuk mesin penggetar sama seperti metode *static* yaitu dengan menggunakan *stitcher*.

1.9.2.4 Diameter ekuivalen *Prefabricated Vertikal Drain*

Prefabricated Vertical Drain biasanya berbentuk lembaran/lajur, padahal metode *vertical drains* mengasumsikan bahwa drainase memiliki potongan melintang berbentuk lingkaran, oleh sebab itu harus dipertimbangkan diameter ekuivalennya. Ada beberapa pendekatan yang berbeda untuk menentukan diameter ekuivalen (d_w).



Gambar 2.1.20 Diameter Equivalen (d_w) untuk *Prefabricated Vertical Drain*
 Sumber :Mochtar, 2012

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

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

$$d_w = \frac{B+t}{2} \quad \text{Rixner et al (1986) dan Hansbo (1987) (1-17)}$$

Dimana ;

B = lebar strip

t = tebal strip

n_d = void area

n_s = porositas sand drain

1.9.2.5 Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja *Prefabricated Vertical Drain*

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja *Prefabricated Vertical Drain* antara lain:

- a. Faktor akibat jarak antar *Prefabricated Vertikal Drain* Fungsi F(n)

Merupakan fungsi hambatan akibat jarak antara titik pusat *Prefabricated Vertical Drain*. Oleh Hansbo (1979) harga F(n) didefinisikan sebagai berikut:

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

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

$$F(n) = \ln n - \frac{3}{4} \dots\dots\dots (1-18)$$

$$n = D / d_w \dots\dots\dots (1-19)$$

Dimana ;

$F(n)$ = factor akibat jarak antar *Prefabricated Vertical Drain*

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

d_w = diameter ekuivalen *Prefabricated Vertical Drain*

b. Faktor *Well Resistance*

Factor *well resistance* adalah factor-faktor yang dapat mengurangi kapasitas tampung *Prefabricated Vertical Drain*. Pada *Prefabricated Vertical Drain* kapasitas tampung tergantung pada karakteristik *Prefabricated Vertical Drain* 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 *Prefabricated Vertical Drain*, 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 didalam saluran juga dapat mengurangi kapasitas tampung *Prefabricated Vertical Drain*.

$$F_r = \pi z(L - z) \frac{k_h}{q_w} \dots\dots\dots (1-20)$$

Dimana;

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 horizontal pada tanah yang tidak terganggu

q_w = kapasitas tampung *Prefabricated Vertical Drain* pada gradient hidrolik = 1

Pengaruh perlawanan aliran F_r umumnya kecil dan tidak begitu penting, maka harga F_r dapat dianggap nol.

c. Factor akibat efek *smear*

Walaupun ada banyak variasi peralatan yang digunakan untuk pemasangan *Prefabricated Vertical Drain*, tetapi sebagian besar peralatan tersebut mempengaruhi kinerja *Prefabricated Vertical Drain*. Pemasangan *Prefabricated Vertikal Drain*

mempengaruhi tanah di sekitar sistem drainase. Besarnya pengaruh tergantung dari bentuk dan ukuran mandrel, struktur tanah serta prosedur pemasangan.

Daerah disekeliling *drain* yang terusik akibat pemasangan *Prefabricated Vertical Drain* (d_s)

- Menurut Jamiolkowski et al (1981)

$$d_s = \frac{\left(\frac{s_s}{d_s}\right) d_m}{2} \dots\dots\dots (1-21)$$

- Menurut Hansbo (1987)

$$d_s = 2d_m \dots\dots\dots (1-22)$$

Faktor akibat efek smear

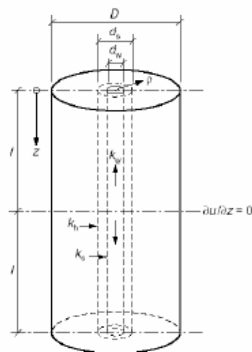
$$F_s = \left(\left(\frac{k_h}{k_s} \right) - 1 \right) \ln \left(\frac{d_s}{d_w} \right) \dots\dots\dots (1-23)$$

Dimana :

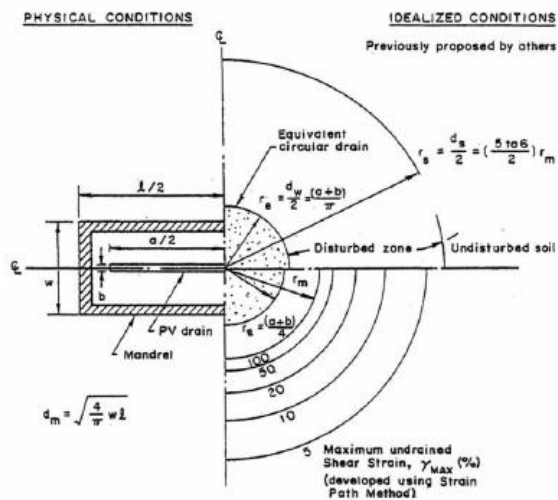
k_s = koefisien permeabilitas tanah horizontal pada daerah yang terusik

Besarnya koefisien permeabilitas arah horizontal pada daerah yang terusik sama dengan koefisien permeabilitas vertikal pada tanah yang tidak terganggu akibat pemasangan *Prefabricated Vertikal Drain* ($k_s = k_v$).

Besar faktor (F_s) dapat mendekati atau bahkan sedikit lebih besar daripada $F(n)$, tergantung dari besarnya kerusakan pada tanahnya akibat pemancangan *Prefabricated Vertical Drain*. Dari data lapangan yang didapatkan harga $F_s/F(n)$ dapat berkisar 1 sampai 3. Untuk memudahkan perencanaan maka diasumsikan bahwa $F(n) = F_s$



Gambar 2.1.21 Smear Effect
Sumber : Hansbo (1994)



Gambar 2.1.22 Perkiraan Daerah Terusik
Sumber : Bergado et al, (1996)

1.10 Daya Dukung Tiang Pancang

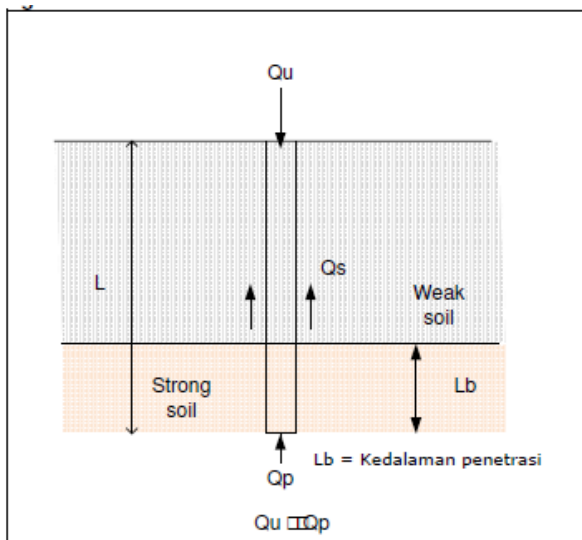
Analisis daya dukung tanah mempelajari kemampuan tanah mendukung beban struktur/bangunan di atas pondasi. Daya dukung menyatakan kuat geser tanah untuk melawan penurunan akibat pembebanan, yaitu kuat geser yang dapat dibangkitkan oleh tanah sepanjang bidang gesernya.

Dalam perencanaan pondasi harus memperhitungkan adanya keruntuhan geser dan penurunan yang berlebihan. Untuk itu perlu dipenuhi kriteria stabilitas (*stability*) dan kriteria penurunan (*elasticity*). Seperti telah dijelaskan bahwa persyaratan yang harus dipenuhi dalam perencanaan pondasi adalah

- Angka keamanan terhadap keruntuhan geser harus cukup, umumnya digunakan angka keamanan 3
- Penurunan pondasi baik total dan perbedaan (total and differential settlement) masih dalam batas toleransi,

Disamping itu untuk memenuhi stabilitas jangka panjang, pondasi harus bertumpu pada perletakan yang stabil yakni pada kedalaman yang cukup untuk menanggulangi bahaya erosi/gerusan, kembang susut tanah dan sebagainya. Untuk penentuan daya dukung tiang pancang menggunakan cara statistik sebagai berikut:

1.10.1 Daya Dukung Tekan



Gambar 1.23 Skema Daya Dukung Tanah

Sumber : Perancangan Dermaga dan Trestle Tipe Deck On Pile di Pelabuhan Gaongkong, Propinsi Sulawesi Selatan

Menurut (**Gambar 2.23**) didapat rumus sebagai berikut:

$$Q_u = \frac{Q_p}{SF} + \frac{Q_s}{SF} \dots\dots\dots (1-24)$$

Dimana :

Q_u = Daya dukung tekan ultimate (kN)

Q_p = Daya dukung ujung tiang (kN)

Q_s = Daya dukung friksi (kN)

SF = *factor of safety*

1.10.1.1 Daya Dukung Ujung (Q_p)

- Tanah Lempung

Persamaan daya dukung tiang pancang di tanah lempung :

$$Q_p = N_q^* \cdot C_u \cdot A_p = 9 \cdot C_u \cdot A_p \dots\dots\dots (1-25)$$

Dimana

C_u = kohesi tanah dibawah ujung tiang pancang

A_p = Luas ujung tiang

N_q = faktor daya dukung ujung

1.10.1.2 Daya Dukung Friksi (Q_s)

- Tanah Lempung

$$Q_s = \Delta L \cdot P \cdot \alpha \cdot C_u \dots\dots\dots (1-26)$$

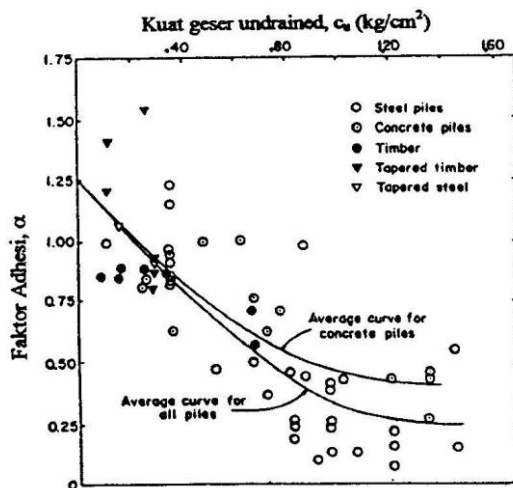
Dimana :

ΔL = panjang segmen tiang

P = keliling tiang

α = Faktor Adhesi

Nilai α dapat ditentukan menggunakan Metode Alpha (Tomlison) dengan menggunakan (Gambar 2.24)

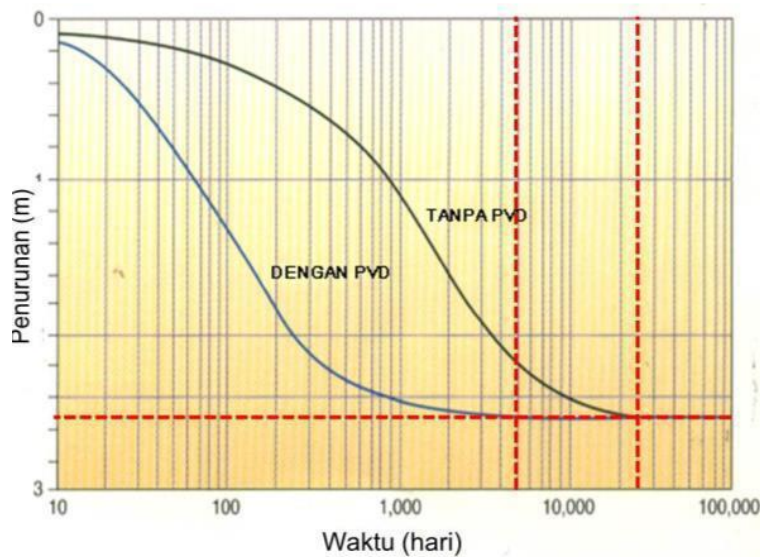


Gambar 2.1.24 Variasi Harga α terhadap Harga C_u

1.11 Perencanaan *Prefabricated Vertical Drain*

Perencanaan sering dijumpai bahwa *preloading* masih memerlukan waktu yang cukup lama (umumnya lebih dari satu tahun) padahal proyek tidak dapat menunggu selama itu. Sehingga untuk mempercepat proses *preloading*, *preloading* biasanya dikombinasikan dengan *Vertical Drains*. Cara ini diterapkan pada tanah dimana pemampatan terjadi sebagian besar akibat konsolidasi primer (*primary consolidation*)

Prefabricated Vertical Drain (PVD) merupakan salah satu produk geosintetik (*geosynthetics products*) yang berfungsi sebagai pengalir air (*drainage*). Fungsi *Prefabricated Vertikal Drain* pada perbaikan pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* kombinsai *Prefabricated Vertical Drain* adalah untuk mempercepat waktu proses konsolidasi sperti yang ditunjukkan oleh (Gambar 2.25).



Gambar 2.1.25 Fungsi Prefabricated Vertical Drain

Sumber : Jurnal Problematika Pembangunan Infrastruktur pada Tanah Lempung Lunak dan Alternatif Metoda Penanganannya, (2015)

1.11.1 Menentukan Parameter yang Digunakan

Data yang diperlukan untuk perencanaan adalah sebagai berikut :

1. $\gamma_{\text{tanah}}, \gamma_{\text{saturated}}$
2. e (angka pori)
3. G_s (*specific gravity*)
4. PI (*Plasticity Index*)
5. C_u , *undrained shear strength*
6. C_c dan C_s , parameter konsolidasi, untuk besar pemampatan
7. C_v parameter konsolidasi untuk waktu pemampatan

1.11.2 Menghitung Besarnya Settlement Akibat Konsolidasi Tanah Dasar

Untuk menentukan settlement akibat konsolidasi tanah dasar dapat menggunakan **(Persamaan (2-4))** untuk *normally consolidated* sedangkan untuk *over consolidated* dapat menggunakan **(Persamaan (2-5))** dan **(Persamaan (2-6))**

catatan :

- Tanah lunak di Indonesia umumnya dapat dianggap tanah agak *over consolidated* dengan harga sebagai berikut :

$$\sigma'_e = \sigma'_0 + \text{fluktuasi terbesar muka air tanah}$$

- Bila fluktuasi muka air tanah tergantung pasang-surut (tanah lunak dekat pantai). Fluktuasi air tanah $\approx 2\text{m}$. Jadi,

$$\sigma'_e = \sigma'_0 + 2\text{ton}/\text{m}^2 \text{ (B. Mochtar, Indrasurya, 2000)}$$

- b. Menghitung $\Delta\sigma$ akibat penambahan tegangan Vertikal

Dapat menggunakan grafik Influence Factor seperti pada (**Gambar 2.5**)

$$\Delta\sigma = 2 \times I \times q$$

Dimana :

q = tegangan *vertical effective* dipermukaan tanah akibat embankment struktur.

1.11.3 Faktor Penggunaan *Prefabricated Vertical Drain*

Ada beberapa factor yang mempengaruhi digunakannya *Prefabricated Vertical Drain* dalam pelaksanaan perbaikan tanah yaitu sebagai berikut :

1. Waktu

Lamanya waktu penurunan yang diperhitungkan adalah waktu yang dibutuhkan oleh tanah untuk melakukan proses konsolidasi. Hal ini dikarenakan proses penurunan segera berlangsung sesaat setelah beban bekerja pada tanah ($t=0$). Air pori mengalir ke arah vertical sesuai dengan besarnya koefisien konsolidasi vertikal (C_v) sepanjang tebal lapisan tanah lunak (H_{dr}).

Waktu konsolidasi (t) ditentukan oleh besarnya kuadrat dari tebal lapisan tanah lunak (H_{dr}) dibagi dengan koefisien konsolidasi vertikal (C_v).

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_{dr}^2} \dots\dots\dots (1-27)$$

Dimana :

T_v = *time factor*

t = waktu konsolidasi

H_{dr} = kedalaman *Prefabricated Vertical Drain*

C_v = koefisien konsolidasi vertikal

2. Kecepatan Penurunan yang Relatif Besar pada Awal Umur Struktur Bangunan

Mula-mula menghitung *settlement* (S_c) sesuai dengan beban konstruksi yang direncanakan, setelah didapatkan total *settlement* akibat konsolidasi tanah diketahui pula lama waktu mencapai penurunan tersebut.

Setelah didapatkan derajat konsolidasi penurunan tiap tahunnya dapat diperoleh dari perhitungan derajat konsolidasi dikalikan dengan penurunan total yang didapat sebelumnya.

Bila penurunan dibiarkan maka beda penurunan (*differential settlement*) akan merusak perkerasan. Bila dianggap *differential settlement*, $\Delta S = \frac{1}{2} S_c$. Jika hasil penurunan tiap tahun yang diperoleh lebih dari 1,5 cm ini akan terjadi kerusakan yang berarti pada bangunan konstruksi. Demikian juga pada tahun-tahun berikutnya, walaupun sudah ada usaha untuk perbaikan.

3. Daya Dukung Tanah

Dengan adanya konsolidasi tanah, kekuatan tanah dasar meningkat akibat kenaikan harga C_u (*undrained shear strength*). Seperti yang diketahui bahwa menggunakan *Prefabricated Vertikal Drain* memerlukan waktu yang relative singkat (beberapa bulan saja), telah dapat dicapai harga U yang mendekati 100%. Tanpa *Prefabricated Vertikal Drain* harga U meningkat sangat perlahan-lahan. Ini berarti pada awal umur konstruksi praktis belum ada perbaikan kekuatan tanah.

1.11.4 Waktu Konsolidasi dengan Prefabricated Vertical Drain

Penentuan waktu konsolidasi oleh Hansbo (1979) dalam Mochtar (2012) dapat dibuat dengan persamaan

$$t = \left(\frac{D^2}{8.C_h} \right) \cdot (F(s) + F(r) + F(n)) \cdot \ln \left(\frac{1}{1-U_h} \right) \dots\dots\dots (1-28)$$

Dimana :

t = waktu yang diperlukan untuk mencapai U_h

D = diameter equivalen dari lingkaran tanah yang merupakan daerah pengaruh dari equivalen vertical drain

C_h = koefisien konsolidasi tanah akibat aliran arah horizontal

U_h = derajat konsolidasi tanah akibat aliran arah horizontal

$F(s)$ = *factor smear effect*

$F(r) = \text{Factor well resistance}$

Untuk F_s dianggap sama dengan F_n dikarenakan nilai yang didapat mendekati F_n , sedangkan F_r nilainya dianggap nol. Jadi (**Persamaan 2-28**) dapat disimpulkan menjadi

$$t = \left(\frac{D^2}{8 \cdot c_h} \right) \cdot 2F(n) \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - U_h} \right) \dots\dots\dots (1-29)$$

1.11.5 Parameter Tanah untuk Penentuan Waktu Konsolidasi dengan *Prefabricated Vertical Drain*

- Koefisien Konsolidasi Horizontal

Koefisien konsolidasi horizontal didapat dari hasil test konsolidasi pada hasil laboratorium tanah. Dan untuk nilai koefisien permeabilitas horizontal berkisar antara 2 sampai 5 kali koefisien konsolidasi vertical.

- Faktor hambatan akibat jarak antar *Prefabricated Vertical Drain* ($F(n)$)

Perhitungan besar faktor hambatan yang diakibatkan jarak antar *Prefabricated Vertical Drain* dapat dihitung dengan menggunakan (**Persamaan 2-18**).

1.11.6 Menentukan Kedalaman *Prefabricated Vertical Drain*

Metode penentuan kedalaman dapat menggunakan cara sebagai berikut:

Asumsi :

1. Lapisan tanah disekitar *vertical drain* mengalami pemampatan yang relatife cepat dengan aliran air dominan
2. Lapisan tanah dibawah ujung dasar *vertical drain* mengalami pemampatan dengan arah aliran air (tetap) dominan keatas (vertikal)
3. Mengasumsikan harga C_v dari data tanah yang didapat dari hasil uji konsolidasi
4. $C_h = 2 \times C_v$ (B. Mochtar, Indrasurya, 2000)
5. Menentukan H_{initial} dan H timbunan final akibat beban konstruksi yang direncanakan
6. Penurunan dibagi menjadi 2 bagian yaitu :
 - Penurunan jangka pendek, yaitu penurunan aibat lapisan tanah setebal sama dengan kedalaman *vertical drain*.

- Penurunan jangka panjang, yaitu penurunan akibat pemampatan lapisan tanah dibawah kedalaman unjung *vertical drain*.

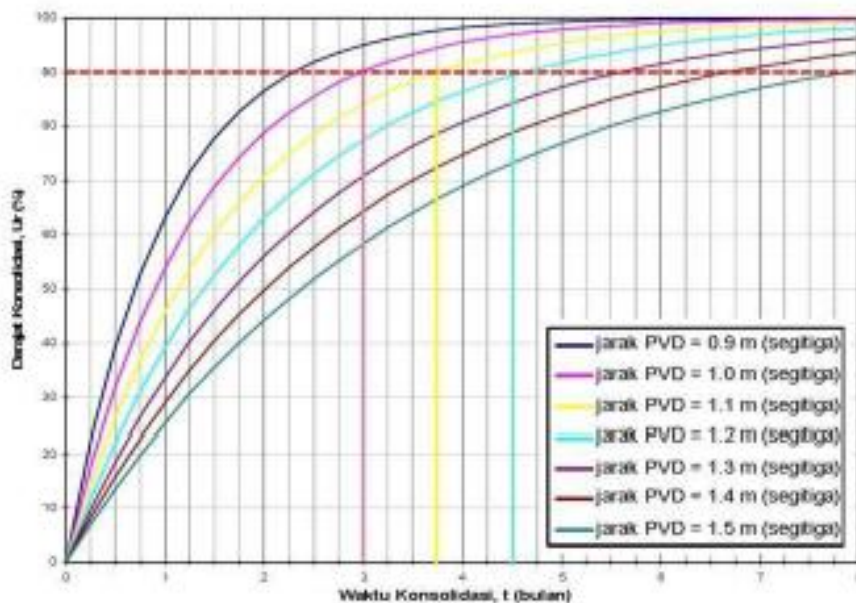
Kedalaman *Prefabricated Vertical Drain* juga dapat ditentukan menggunakan tabel konsistensi tanah kohesif pada **Tabel 2.7** Tanah kohesif yang berkemampumpapatan tinggi adalah tanah yang domain mengandung lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) dengan konsistensi sangat lunak (*very soft*), lunak (*soft*) dan menengah (*medium*). Dalam praktek, biasanya ditentukan dengan nilai $N\text{-SPT} \leq 10$ atau $C_u \leq 40$ kPa

Tabel 2.7

Konsistensi tanah kohesif

Kosistensi Tanah	Taksiran Harga Kekuatan Geser Undrained, C_u		Taksiran harga SPT, harga N
	kPa	Ton/m ²	
Sangat Lunak (<i>very soft</i>)	0-12.5	0-12.5	0-2.5
Lunak (<i>soft</i>)	12.5-25	1.25-2.5	2.5-5
Menengah (<i>medium</i>)	25-50	2.5-5	5-10
Kaku (<i>stiff</i>)	50-100	5-10	10-20
Sangat kaku (<i>very stiff</i>)	100-200	10-20	20-40
Keras (<i>hard</i>)	>200	>20	>40

Sumber : PT. Teknindo Geosistem Unggul

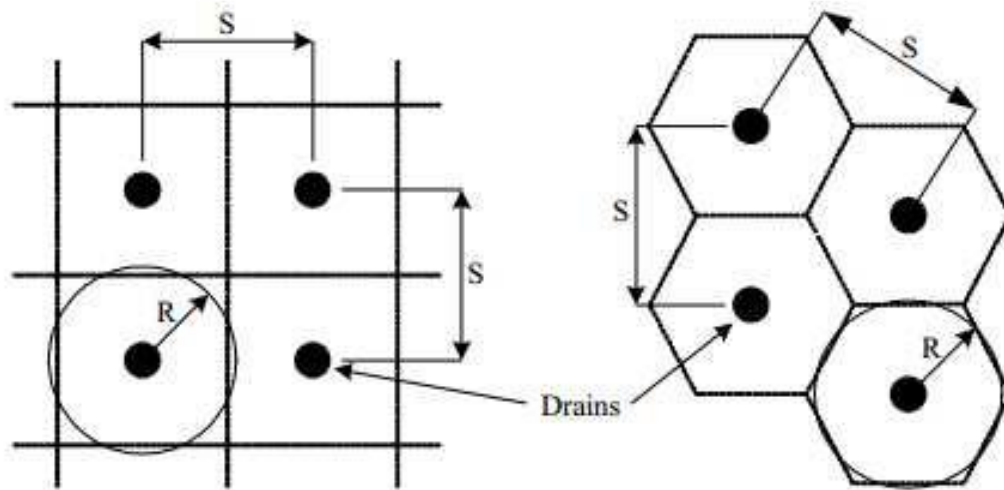


Gambar 1.26 Jarak *Prefabricated Vertikal Drain* dan waktu konsolidasi

Sumber : Jurnal Problematika Pembangunan Infrastruktur pada Tanah Lempung Lunak dan Alternatif Metoda Penanganannya, (2015)

Setelah didapat kedalaman *Prefabricated Vertical Drain*, jarak *Prefabricated Vertical Drain* dapat ditentukan berdasarkan (**Gambar 2.26**). Dimana semakin dekat jarak

Prefabricated Vertical Drain maka semakin cepat pula waktu yg dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi yang diperlukan.



Gambar 2.1.27 Pola *Prefabricated Vertical Drain* (Kiri pola persegi, kanan pola segitiga)
 Sumber: Civil.aalto.fi, (2006)

Pola pemasangan drainase vertikal yang biasa dipakai adalah pola segitiga dan pola persegi seperti yang ditunjukkan pada (**Gambar 2.27**). Diameter yang digunakan pada pola pemasangan *Prefabricated Vertical Drain* dapat dihitung dengan persamaan.

Pola Segiempat:

$$D = 1.13 S \quad \text{atau} \quad S^2 = \frac{\pi D^2}{4} \dots\dots\dots (1-30)$$

Pola Segitiga

$$D = 1.05 S \quad \text{atau} \quad 6 \left(\frac{1}{2} \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{2} S \right) = \frac{\pi D^2}{4} \dots\dots\dots (1-31)$$

1.11.7 Mencari Hubungan Antara Tinggi Timbunan Awal

Pada perhitungan penurunan diperlukan data yang diperlukan yang bisa didapatkan dari data sekunder. Setelah mendapatkan penurunan konsolidasi primer didapat tinggi timbunan dengan persamaan sebagai berikut:

Mula-mula :

$$q_{awal} = H_{awal} \times \gamma_{timbunan} \dots\dots\dots (1-32)$$

Setelah mengalami penurunan S_c :

$$H_{akhir} = H_{awal} - S_c$$

$$q_{akhir} = H_{akhir} \times \gamma_{timbunan} + SC(\gamma_{sat.timbunan} - \gamma_{water})$$

$$q_{akhir} = H_{akhir} \times \gamma_{timbunan} + (\gamma_{sat.timbunan} - 1)$$

Karena dianggap $\gamma_{timbunan} = \gamma_{sat.timbunan}$, maka

$$q_{akhir} = H_{awal} \times \gamma_{timbunan} - SC \dots \dots \dots (1-33)$$

$$H_{awal} = q_i + S_{ci} \times \gamma_{sat} \dots \dots \dots (1-34)$$

Jadi, $q_{akhir} < q_{awal}$

1.11.8 Perhitungan Kenaikan Daya Dukung Tanah

Sebagai akibat terjadinya konsolidasi pada suatu lapisan tanah maka lapisan tanah yang bersangkutan menjadi lebih padat yang berarti kekuatan tanah juga meningkatkan sebagai akibat kenaikan harga C_u . Apabila proses peletakkan timbunan dilakukan secara bertahap, daya dukung tanah juga akan meningkat secara bertahap. Misalkan tinggi setiap tahapan penimbunan adalah h_1, h_2, h_3 dan h_n , umur masing-masing tahapan penimbunan adalah t_1, t_2, t_3 dan t_4 , dan derajat konsolidasi yang dicapai akibat masing-masing tahapan penimbunan adalah U_1, U_2, U_3 dan U_n maka penambahan tegangan pada lapisan tanah yang ditinjau akibat masing-masing tahapan penimbunan adalah $\Delta\sigma'_1, \Delta\sigma'_2, \Delta\sigma'_3$, dan $\Delta\sigma'_n$.

Penambahan tegangan akibat beban bertahap dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

- $\Delta\sigma'_1$ (penambahan tegangan akibat tahap penimbunan 1, dari 0 s.d. h_1 selama t_1 (derajat konsolidasi = U_1))

$$\Delta\sigma_{1-U_1} = \left(\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} \right)^{U_1} \times \sigma'_0 \right) - \sigma'_0$$

- $\Delta\sigma'_2$ (penambahan tegangan) akibat tahap penimbunan 2, dari h_1 s.d. h_2 selama t_2 (derajat konsolidasi = U_2)

$$\Delta\sigma_{2-U_2} = \left(\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \right)^{U_2} \times \sigma'_1 \right) - \sigma'_1$$

- $\Delta\sigma'_3$ (penambahan tegangan) akibat tahap penimbunan 3, dari h_2 s.d. h_3 selama t_3 (derajat konsolidasi U_3)

$$\Delta\sigma_{3-U_3} = \left(\left(\frac{\sigma'_3}{\sigma'_2} \right)^{U_3} \times \sigma'_2 \right) - \sigma'_2$$

- $\Delta\sigma'_n$ (penambahan tegangan) akibat tahap penimbunan n, dari h_n selama t_n (derajat konsolidasi = U_n)

$$\Delta\sigma_{n-U_n} = \left(\left(\frac{\sigma'_n}{\sigma'_{n-1}} \right)^{U_n} \times \sigma'_{n-1} \right) - \sigma'_{n-1} \dots\dots\dots (1-35)$$

Jadi, penambahan tegangan tanah pada lapisan yang ditinjau menjadi :

$$\begin{aligned} \sigma'(H = p) = & \sigma'_0 + \left(\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} \right)^{U_1} \times \sigma'_0 \right) - \sigma'_0 + \left(\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \right)^{U_2} \times \sigma'_1 \right) - \sigma'_1 + \left(\left(\frac{\sigma'_3}{\sigma'_2} \right)^{U_3} \times \sigma'_2 \right) - \\ & \sigma'_2 + \dots + \left(\left(\frac{\sigma'_n}{\sigma'_{n-1}} \right)^{U_n} \times \sigma'_{n-1} \right) - \sigma'_{n-1} \end{aligned} \dots\dots\dots (1-36)$$

Rumus Skempton dan Henkel (1953) di atas akan sama dengan rumus-rumus oleh Mesri (1975) dan Jamiolkwski (1985) bila $PI < 30$, yaitu suatu angka yang typical untuk kebanyakan tanah lempung. Bila tanahnya memiliki $PI > 30$, umumnya digunakan rumus Skempton dan Henkel (1953) diatas. Sedikit kelemahan dari rumus-rumus diatas adalah harga $C_u = 0$ bila harga $\sigma'_p = 0$, padahal umumnya tanah-tanah lunak dipermukaan memberikan harga $C_u > 0$ bila $p'_0 = 0$.

Hasil Penelitian yang terbaru oleh Ardana dan Mochtar (1999) memberikan penurunan yang lebih sesuai dengan kondisi di lapangan yaitu sebagai berikut:

- Untuk harga Plasticity Index, PI tanah $< 120\%$

$$C_u = 0,0737 + (0,1899 - 0,0016 PI)\sigma'_p \dots\dots\dots (1-37)$$

- Untuk harga PI tanah $> 120\%$

$$C_u = 0,0737 + (0,0454 - 0,00004 PI) \sigma'_p \dots\dots\dots (1-38)$$

Dimana : harga σ'_p adalah jumlah keseluruhan dari tegangan akibat tahap penimbunan

Hasil Ardana dan Mochtar (1999) tersebut memberikan harga $C_u = 0,0737 \text{ kg/cm}^2$ untuk tanah sangat lunak dipermukaan, dimana $p'_0 = 0$, yaitu harga yang lebih sesuai dengan hasil penyelidikan dilapangan.

Dengan adanya kenaikan harga C_u dari tanah lempung setelah mengalami pemampatan, umumnya kondisi yng paling berbahaya bagi tanah lempung yang lunak bila dibebani dengan timbunan tanah (atau gedung) adalah pada awal-awal umur timbunan. Sering dijumpai keadaan dalam perencanaan bahwa dengan kekuatan dukung tanah yang ada mula-mula, suatu tanah yang lembek hanya dapat mendukung timbunan tanah yang

relatife tidak tinggi. Tetapi dengan waktu, tinggi timbunan dapat ditambah disesuaikan dengan kenaikan daya dukungnya. Bilamana diinginkan tinggi timbunan pada awal konstruksi sudah setinggi yang diisyaratkan, padahal daya dukung tanah belum memenuhi, maka pada dasar timbunan harus diberi perkuatan atau pada dasar tanah dilakukan perbaikan supaya daya dukung awalnya meningkat. Asumsi penumpukan timbunan awal untuk lantai kerja adalah 100 cm. Sedangkan timbunan berikutnya 50cm

1.11.9 Derajat Konsolidasi Rata-Rata

Derajat konsolidasi rata-rata dapat diperoleh dengan persamaan

$$U_r = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) \dots\dots\dots (1-39)$$

Dimana :

U_r = derajat konsolidasi tanah rata-rata

U_v = derajat konsolidasi vertikal

U_h = derajat konsolidasi horizontal

1.11.10 Parameter Tanah untuk Penentuan Derajat Konsolidasi dengan *Prefabricated Vertikal Drain*

- Derajat Konsolidasi Vertikal

Harga untuk derajat konsolidasi arah vertikal dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

Untuk T_v antara 0 s/d 60%

$$U_v = \left(2 \sqrt{\frac{T_v}{\pi}} \right) X 100\% \dots\dots\dots (1-40)$$

Untuk $T_v > 60\%$

$$U_v = (100 - 10^a)\% \dots\dots\dots (1-41)$$

Dimana :

$$a = \frac{1.781 - T_v}{0.933} \dots\dots\dots (1-42)$$

- Derajat Konsolidasi Horizontal

Besarnya harga derajat konsolidasi horizontal dirumuskan oleh Barron (1948) dalam Bergado (1996) dengan persamaan

$$U_h = (1 - EXP(-X)) x 100\% \dots\dots\dots (1-43)$$

$$X = \frac{8 \times T_h}{2F(n)} \dots\dots\dots (1-44)$$

$$T_h = \frac{C_h \cdot t}{D^2} \dots\dots\dots (1-45)$$

Dimana

T_h = factor waktu arah horizontal

C_h = Koefisien konsolidasi horizontal

D = Diameter tanah yang dipengaruhi *Prefabricated Vertical Drain*

U_h = derajat konsolidasi tanah arah horizontal

1.11.11 Timbunan Bertahap

Sebagai penilaian awal stabilitas timbunan, pt T-10-2002-B memberikan rekomendasi untuk melakukan perhitungan tinggi kritis timbunan untuk mengetahui timbunan tersebut memerlukan perbaikan tanah dasar atau sudah stabil. Perhitungan ini tidak memperhitungkan kontribusi kuat geser dari timbunan:

- a. Hitung kuat geser tak terdrainase (C_u) rata-rata sampai kedalaman lima meter atau setebal lapisan lempung lunak bila kurang dari lima meter
- b. Ambil berat isi (γ) tertinggi material timbunan
- c. Tinggi timbunan maksimum yang aman tanpa perbaikan tanah dapat ditentukan dengan persamaan

$$H_c = \frac{N_c C_u}{\gamma} \dots\dots\dots (1-46)$$

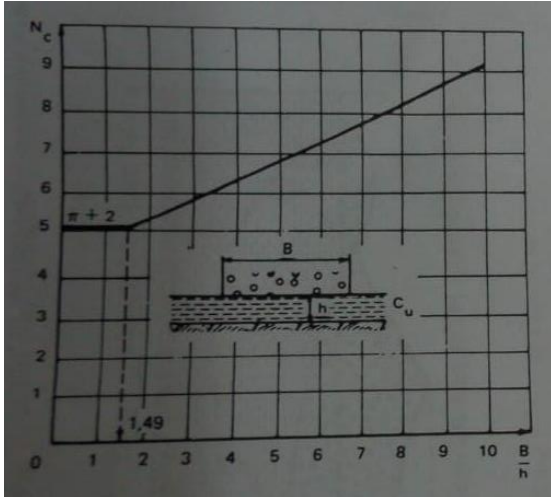
Dimana :

H_c = tinggi kritis timbunan

C_u = kuat geser tak terdrainase

γ = berat isi timbunan

N_c = koefisien daya dukung yang tergantung dari B/h (Mandel dan Salencon, 1969), dengan B = lebar timbunan dan h = tebal *compressible soil*. Dapat dilihat pada Gambar

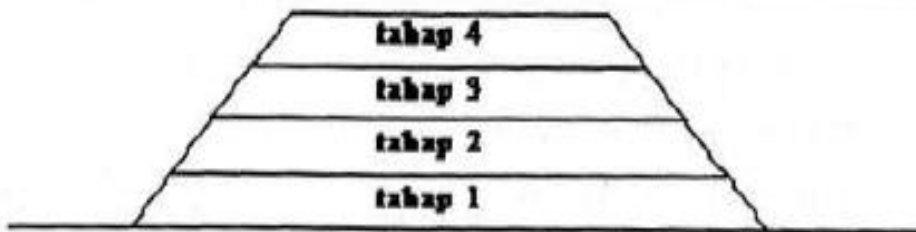


Gambar 2.1.28 Koefisien daya dukung N_c dalam fungsi B/h
 Sumber : Diktat Teknik reklamasi, Wahyudi, Prof. Herman

catatan :

- Apabila tinggi timbunan rencana kurang dari tinggi kritisnya, maka tidak diperlukan perbaikan.
- Apabila tinggi timbunan sudah melampaui tinggi kritisnya, maka sebagian dari timbunan tersebut harus dibongkar atau menggunakan perencanaan timbunan bertahap.

Sesuai dengan (**Gambar 2.29**) bahwa timbunan dilapangan diletakkan lapis demi lapis dengan kecepatan sesuai dengan yang direncanakan. Dengan demikian rumus yang digunakan untuk menghitung besar pemampatan konsolidasi perlu disesuaikan terutama perumusan tentang besar beban dan pemakaian harga C_c dan C_s .



Gambar 2.1.29 Timbunan diletakkan secara bertahap
 Sumber : Yogyanta Dwiaji Ari, 2017

Untuk pembebanan secara bertahap, besar beban setiap tahapan adalah Δq .

Persamaan yang digunakan sebagai berikut:

1. Apabila $\sigma'_0 + \Delta\sigma_1 \leq \sigma_c$

$$S_c = \frac{C_s \cdot H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma_1}{\sigma'_0} \dots\dots\dots (1-47)$$

2. Apabila $\sigma'_0 + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 > \sigma_c$

$$S_c = \frac{c_s \cdot H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_c}{\sigma'_0 + \Delta\sigma_1} + \frac{c_c \cdot H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2}{\sigma_c} \dots\dots\dots (1-48)$$

3. Apabila $\sigma'_0 + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3 > \sigma_c$

$$S_c = \frac{c_c \cdot H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{\sigma'_0 + \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2} \dots\dots\dots (1-49)$$

1.11.12 Perhitungan Stabilitas Lereng

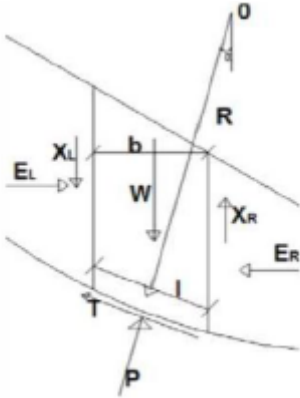
Lereng terbentuk oleh banyaknya variabel dan banyaknya faktor ketidakpastian antara lain parameter-parameter tanah seperti kuat geser tanah, kondisi tekanan air pori maka dalam menganalisis selalu dilakukan penyerderhanaan dengan berbagai asumsi (Rachim 2012). Faktor-faktor yang menyebabkan longsor dapat diklarifikasikan sebagai berikut:

1. Faktor-faktor yang menyebabkan naiknya tegangan geser, yaitu : naiknya berat unit tanah karena pembasahan, adanya tambahan beban eksternal, bertambahnya kecuraman lereng karena erosi alami, penggalian dan bekerjanya beban guncangan
2. Faktor-faktor yang menyebabkan turunnya kekuatan geser, yaitu : adanya absorsi air, naiknya tekanan air, beban guncangan, pengaruh pembekuan dan hilangnya kekuatan karena regangan berlebihan pada lumpung.

Bila nilai faktor keamanan yang didapat kurang dari 1 maka lereng tidak stabil, untuk faktor keamanan sama dengan 1 maka tanah siap untuk longsor sedangkan untuk faktor keamanan lebih dari 1 maka lereng dalam keadaan stabil. Umumnya harga 1.5 untuk angka keamanan terhadap kekuatan geser dapat diterima untuk merencanakan stabilitas lereng.

Stabilitas lereng juga dapat dihitung menggunakan program Geosloope atau program sejenis lainnya. Perhitungan nilai faktor keamanan dapat menggunakan metode Bishop. Apabila dengan nilai faktor keamanan (SF) kurang dari yang direncanakan maka perlu dilakukan perkuatan lereng. Perkuatan lereng tersebut dapat berupa *Geotextile*.

Menurut Bishop (1995). Metode Bishop adalah metode yang diperkenalkan oleh A.W. Bishop menggunakan cara potongan dimana gaya-gaya yang bekerja pada tiap potongan ditunjukkan pada (**Gambar 2.30**)



Gambar 2.1.30 Gaya-gaya yang bekerja pada suatu potongan
Sumber : Effendi Madianto, 2016

Metode Bishop digunakan untuk menganalisis permukaan gelincir (*slip surface*) yang berbentuk lingkaran. Dalam metode ini diasumsikan bahwa gaya-gaya normal total/bekerja dipusat atas potongan dan bisa ditentukan dengan mengurangi gaya-gaya pada potongan-potongan secara vertikal atau normal. Persyaratan keseimbangan dipakai pada potongan-potongan yang membentuk lereng tersebut. Metode Bishop menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal. (Bishop, 1995)

Dengan mempertimbangkan seluruh keseimbangan gaya maka rumus untuk faktor keamanan (FS) metode bishop diperoleh sebagai berikut (Anderson dan Richard 1987)

$$FS = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left((c' l \cos \alpha + (W - ub) \tan \varphi') \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \varphi' \tan \alpha}{F}} \right) \dots \dots \dots (1-50)$$

Dimana :

W = berat segmen tanah

C = kohesi tanah

φ = sudut geser dalam

P = gaya normal total pada irisan

T = gaya geser pada dasar irisan

B = lebar dari irisan

L = panjang dari irisan

α = sudut kemiringan lereng

EL, ER = gaya antar irisan yang bekerja secara horizontal pada penampang kiri dan kanan

XL, XR = gaya antar irisan yang bekerja secara vertical pada penampang kiri dan kanan

1.12 Perencanaan Prefabricated Horizontal Drain (PHD)

Penggunaan *Horizontal drain* diperlukan untuk mengalirkan air secara horizontal yang berasal dari *Prefabricated Vertical Drain* pada perbaikan tanah lempung lunak metode *preloading* kombinasi *Prefabricated Vertical Drain*.

1.12.1 Penggunaan PHD (*Prefabricated Horizontal Drain*)

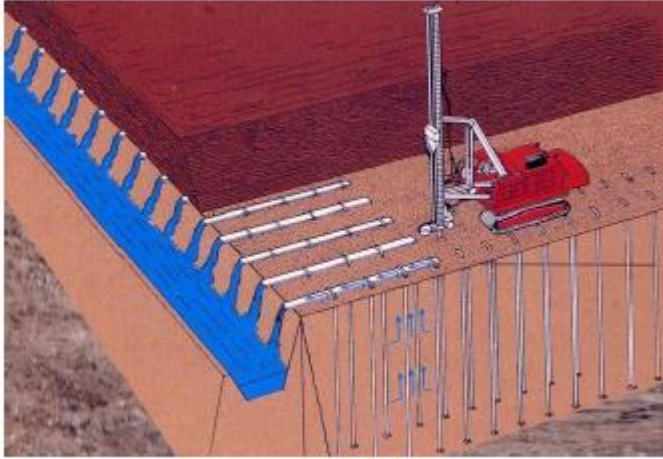
PHD (*Prefabricated horinzontal drain*) merupakan salah satu produk geosintetik (*geosynthehetics products*) yang berfungsi sebagai pengalir air (*drainage*). PHD merupakan material komposit yang terdiri dari inti (*core*) dan penyaring (*filter*) seperti yang ditunjukkan pada (**Gambar 2.31**).

Fungsi PHD pada pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metode *preloading* dengan *Prefabricated Vertikal Drain* adalah untuk menampung dan mengalirkan air yang berasal dari beberapa ujung *Prefabricated Vertikal Drain* pada (**Gambar 2.32**). Pada (**Gambar 2.33**) ditunjukkan penggunaan PHD sebagai horizontal drain pada pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metode *preloading* dengan *Prefabricated Vertikal Drain*. PHD yang digunakan ukuran 20mm x 100mm.



Gambar 2.1.31 Material PHD

Sumber : Jurnal Problematika Pembangunan Infrastruktur pada Tanah Lempung Lunak dan Alternatif Metoda Penanganannya, (2015)



Gambar 2.1.32 Fungsi PHD

Sumber : Jurnal Problematika Pembangunan Infrastruktur pada Tanah Lempung Lunak dan Alternatif Metoda Penanganannya, (2015)



Gambar 2.1.33 PHD metoda Preloading

Sumber : Jurnal Problematika Pembangunan Infrastruktur pada Tanah Lempung Lunak dan Alternatif Metoda Penanganannya, (2015)

Perencanaan *PHD* dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

1. Menentukan tinggi timbunan pelaksanaan, dan besar penurunan setelah konsolidasi 95%
2. Dari 3 data tersebut akan didapat besarnya pemampatan tanah dan waktu konsolidasi 95 %
3. Hitung debit air vertikal rata-rata setiap 1 titik *PVD* dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Debit} = \frac{\text{Volume aliran air}}{\text{waktu pengaliran}} \dots\dots\dots(1-51)$$

$$\text{Volume aliran air} = t . A$$

$A = \pi/4 \cdot (1.05 \cdot S)^2$ karena menggunakan PVD pola segitiga

Dimana :

t = tinggi penurunan

Sc = besarnya pemampatan tanah

A = luas aliran yang keluar dari 1 titik PVD

4. Koreksi debit air vertikal menggunakan derajat konsolidasi 75% setiap 1 titik PVD
5. Menentukan panjang maksimal lajur PHD dengan jarak PVD yang ditentukan. Dan menghitung jumlah ujung pada 1 lajur PHD.
6. Menghitung estimasi debit maksimal aliran air horizontal dengan

$$Q = N \times q \dots\dots\dots (1-52)$$

Dimana :

Q = debit maks

N = jumlah titik PVD dalam 1 lajur *PHD*

q = debit air vertical setiap 1 titik *PVD*

7. Membandingkan debit pengaliran air yang diperlukan apakah sudah sesuai dengan kriteria PHD CT-SD100-20 sesuai **Tabel 2.8**:

Tabel 2.8
Kriteria PHD CETEAU CT-SD100-20

Jenis Uji	Satuan	Metode Uji ASTM	Hasil
1. Kuat tarik pegang filter (Filter grab tensile strength)	N	D 4632	421.8
2. Regang putus pegang filter (Filter grab elongation at break)	%	D4632	36.7
3. Ketahanan sobel trapezium filter (filter trapezoidal tear resistance)	N	D 4533	156.9
4. Kuat tekan (compression strength)	kN/m ²	D 695	381.6
5. Permeabilitas air filter (water filter permeability)			
a. Permeabilitas (permeability)	m/s	D 4491	2.7 x 10 ⁻⁴
b. Laju aliran (flow rate)	l/m ² s		48.51
6. Uji kapasitas pelepasan (discharge capacity test)			
a. Pada tekanan 250 kPa	m ³ /s	D4716	3.92 x 10 ⁻⁴
b. Pada tekanan 300 kPa	m ³ /s		3.77 x 10 ⁻⁴

1.13 Instrumentasi Geoteknik

Pemasangan instrument geoteknik (*geotechnical instrument*) pada pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metode *preloading* kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* berfungsi untuk mengetahui serta memantau proses pelaksanaan dan hasil selama pekerjaan perbaikan tanah yang telah dilakukan.

1. *Settlement Plate*

Settlement plate berfungsi untuk mengetahui penurunan yang terjadi pada permukaan tanah. *Settlement plate* dipasang di zona dimana akan terjadi penurunan tanah maksimum akibat *preloading*.

Untuk monitoring *settlement plate* digunakan alat bantu *watterpass*. Berdasarkan data monitoring *settlement plate* dapat dibuat grafik hubungan antara penurunan tanah dasar dan waktu.

2. *Pneumatic Piezometer*

Pneumatic piezometer berfungsi untuk mengetahui serta mengukur tingkat tekanan air pori pada tanah dasar secara tepat dan cepat di titik tersebut.

Untuk monitoring *pneumatic piezometer* menggunakan *read out*. Berdasarkan data monitoring *pneumatic piezometer* dapat dibuat grafik hubungan antara tekanan air pori dan waktu.

3. *Inclinometer*

Inclinometer berfungsi untuk mengetahui deformasi lateral tanah dasar yang tujuannya untuk mengetahui kemungkinan terjadinya *slidding* atau keruntuhan pada konstruksi yang sedang berlangsung. Alat *inclinometer* sendiri dipasang di area tepi pada suatu timbunan.

