

2.1 Klasifikasi Tanah Lunak

Tanah merupakan material yang terdiri dari agregat, mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut. Tanah umumnya dapat dibagi menjadi 3 yaitu sebagai kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), atau lempung (*clay*), tergantung pada ukuran partikel yang paling dominan pada tanah tersebut (Das, 1995).

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. Nilai korelasi antara N -SPT pada jenis tanah lainnya dapat dilihat pada Tabel 2.1 (Nasya, 2017).

Tabel 2.1 Korelasi N -SPT dan Konsistensi Tanah (untuk tanah dominan lanau dan lempung)

Konsistensi Tanah	Taksiran harga kekuatan geser <i>undrained, C_u</i>		Taksiran harga SPT, harga N	Taksiran harga tahanan conus, q_c (dari Sondir)	
	kPa	ton/m ²		kg/cm ²	kPa
Sangat lunak (<i>very soft</i>)	0 - 12,5	0 - 1,25	0 - 2,5	0 - 10	0 -1000
Lunak (<i>soft</i>)	12,5 - 25	1,25 - 2,5	2,5 - 5	10 - 20	1000 - 2000
Menengah (<i>medium</i>)	25 - 50	2,5 - 5,0	5 - 10	20 - 40	2000 - 4000
Kaku (<i>stiff</i>)	50 - 100	5,0 - 10	10 - 20	40 - 75	4000 - 7500
Sangat kaku (<i>very stiff</i>)	100 - 200	10 - 20	20 - 40	75 - 150	7500 - 15000
Keras (<i>hard</i>)	>200	>20	>40	>150	>15000

(Sumber : Nasya, 2017)

2.2 Penurunan Konsolidasi

Penurunan tanah terjadi jika lapisan tanah dibebani, sehingga tanah mengalami rengangan atau penurunan (*settlement*). Rengangan yang terjadi dalam tanah ini disebabkan oleh berubahnya susunan tanah maupun oleh pengurangan rongga pori air didalam tanah tersebut. Penurunan tanah akibat beban adalah jumlah total dari penurunan segera dan penurunan konsolidasi (Hardiyatmo, 2002).

Penurunan yang terjadi pada tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus kering atau tidak jenuh terjadi dengan segera sesudah beban bekerja biasanya disebut penurunan segera (*immediate settlement*). Penurunan segera merupakan bentuk penurunan elastis yang dalam praktek sangat sulit memperkirakan besarnya penurunan segera. Penyebab sulitnya memperkirakan besarnya penurunan adalah karena kondisi alam dan sulitnya mengevaluasi kondisi tegangan dan regangan yang terjadi di lapisan tanah (Hardiyatmo, 2002).

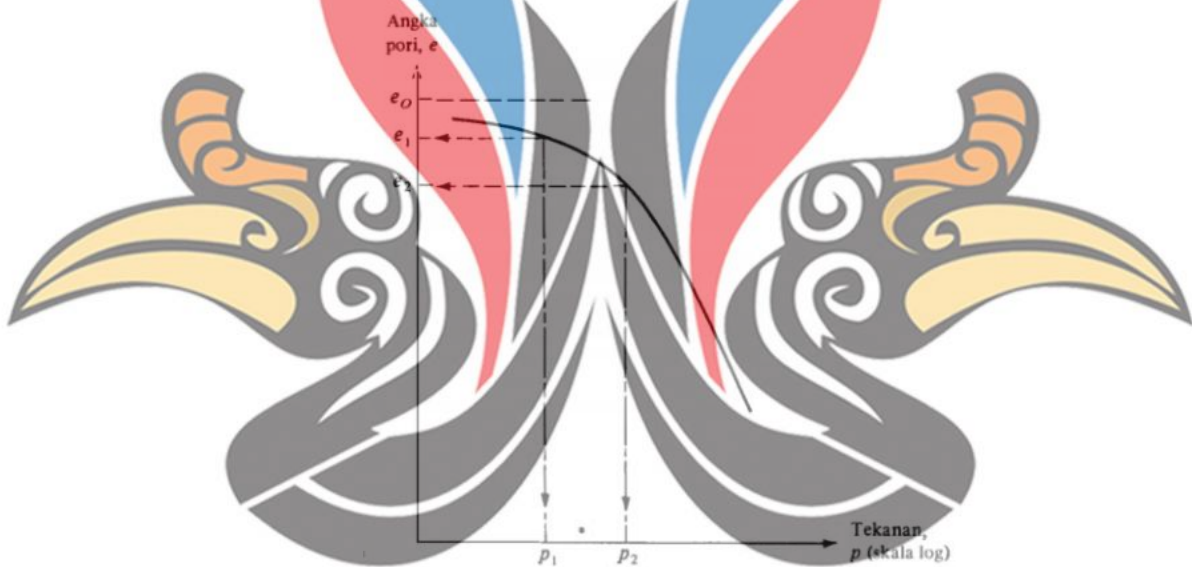
Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) adalah penurunan yang memerlukan waktu yang lama, waktu konsolidasi tergantung pada kondisi lapisan tanah dan terjadi pada tanah berbutir halus yang terletak dibawah permukaan air tanah. Proses konsolidasi akibat pembebanan pada tanah berlangsung dalam 3 fase, yaitu;

1. Fase pertama, yaitu fase dimana penurunan terjadi dengan segera sesudah beban bekerja. Akibat proses penekanan dari beban yang bekerja sehingga udara dari pori tanah keluar. Proporsi penurunan awal dapat dilihat dalam perubahan angka pori dan dapat ditentukan dari kurva waktu terhadap penurunan dari uji konsolidasi.
2. Fase kedua yaitu konsolidasi primer atau konsolidasi hidrodinamis, dimana penurunan yang diakibatkan kecepatan aliran air yang meninggalkan rongga pori karena adanya tambahan tekanan pada tanah. Proses konsolidasi primer ini dipengaruhi oleh sifat asli tanah seperti permeabilitas, kompresibilitas, angka pori, bentuk geometri tanah termasuk tebal lapisan mampat, pengembangan arah horizontal dari zona mampat, dan batas lapisan lolos air dimana air keluar pada lapisan yang lolos air ini.

3. Fase ketiga yaitu konsolidasi sekunder merupakan proses penurunan yang berjalan sangat lambat. Pada tanah-tanah anorganik penurunan konsolidasi sekunder jarang di perhitungkan karena pengaruhnya sangat kecil. Kecuali, pada jenis tanah organik tinggi dan beberapa lempung anorganik yang sangat mudah mampat (Hardiyatmo, 2002).

Penurunan tanah diakibatkan oleh pengaruh angka pori dan hampir semua jenis tanah akan mengalami berkurangnya angka pori (e). Hal ini terjadi bila beban vertikal bertambah dan apabila beban yang bekerja dikurangi maka angka pori (e) pada tanah akan bertambah (Hardiyatmo, 2002).

Berikut ini grafik hubungan antara angka pori dan tekanan total dapat di lihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Grafik Angka pori (e) terhadap Tekanan Total (p).

(Sumber :Das, 1995)

Besarnya amplitudo/penurunan tanah total dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.1 di bawah ini (Hardiyatmo, 2002):

$$S_t = S_i + S_{ep} + S_{cs} + S_{lat} \quad (2.1)$$

Dimana :

S_t = total *settlement* (m)

S_i = *immediate settlement* (m)

S_{cp} = *consolidation primer settlement* (m)

S_{cs} = consolidation secondary settlement (m)

S_{lat} = settlement akibat pergerakan tanah arah lateral (m)

2.3 Metode Terzaghi

Teori Terzaghi ini telah menemukan persamaan untuk memperdiksi pemampatan dan waktu konsolidasi. Pada metode Terzaghi, proses konsolidasi terjadi jika beban pada lapisan tanah yang porous serta sangat kompresibel seperti pada tanah lempung diperbesar, maka lapisan tanah tersebut akan terkompresi dan air akan keluar. Tekanan konsolidasi merupakan proses dimana beban ditambah persatuan luas yang mengakibatkan terjadinya proses konsolidasi.

2.3.1 Besar Consolidation Settlement (S_c) Tanah Lunak Akibat Beban Timbunan

Penurunan konsolidasi atau *consolidation settlement* (S_c) merupakan proses yang terjadi akibat perubahan volume tanah jenuh air, dimana air yang terdapat pada pori-pori tanah keluar akibat adanya beban. Persamaan yang digunakan untuk menghitung *consolidation settlement* (S_c) yang telah di kembangkan oleh Terzaghi (1942) dapat di lihat pada Persamaan 2.2, Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4 sebagai berikut (Nasya, 2017) :

1. Untuk tanah terkonsolidasi normal

$$S_c = \frac{C_c \times H}{1 + e_0} \log \left(\frac{p'_o + \Delta p}{p'_o} \right) \quad (2.2)$$

2. Untuk tanah terkonsolidasi lebih

Apabila $(p'_o + \Delta p) \leq p'_o$

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_0} \left[H \log \left(\frac{p'_o + \Delta p}{p'_o} \right) \right] \quad (2.3)$$

Apabila $(p'_o + \Delta p) > p'_o$

$$S_c = \frac{C_s}{1 + e_0} H \log \frac{p'_c}{p'_o} + \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \frac{p'_o + \Delta p}{p'_o} \quad (2.4)$$

Dimana:

S_c = pemampatan konsolidasi pada lapisan tanah yang ditinjau (m)

- H = tebal lapisan tanah *compressible* (m)
- e_0 = angka pori awal (*initial void ratio*)
- C_c = indeks kompresi
- C_s = indeks mengembang
- Δp = beban *surchage* (t/m^3)
- p'_o = tekanan tanah vertikal efektif dari suatu titik di tengah-tengah lapisan ke-i akibat beban tanah sendiri di atas titik tersebut di lapangan (*effective overburden pressure*) (t/m^2)
- P'_c = tegangan konsolidasi efektif di masa lampau (*effective past overburden pressure*) (t/m^2)

Keterangan tambahan:

- Tanah lunak di Indonesia umumnya dapat dianggap sebagai tanah agak terkonsolidasi lebih, dengan harga dapat dilihat pada Persamaan 2.5 (Nasya, 2017):

$$p'_c = p'_o + \Delta p f \quad (2.5)$$

Adapun parameter tanah untuk perhitungan *consolidation settlement* dijelaskan sebagai berikut:

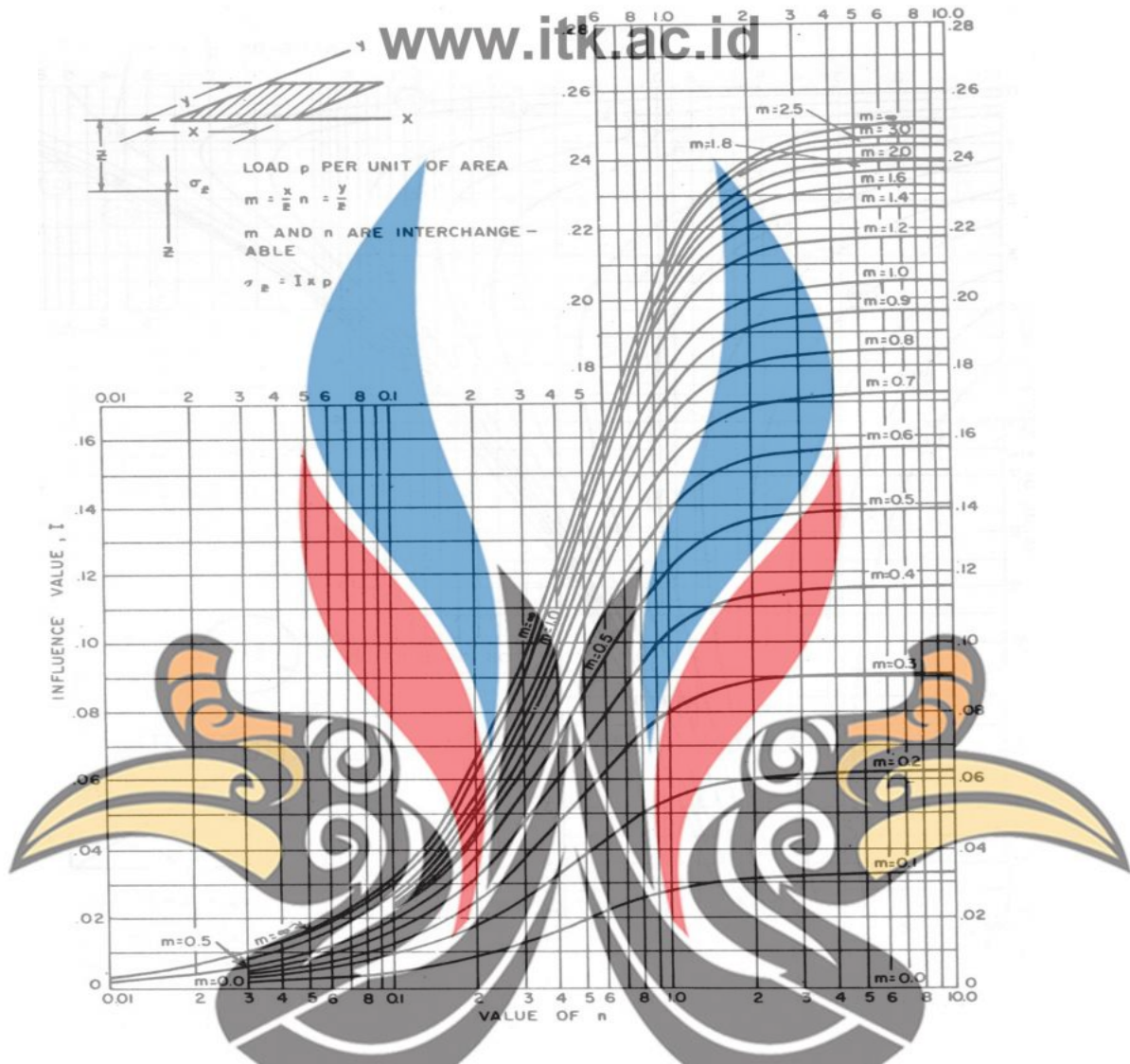
1. Tebal Lapisan *Compressible*
Tebal Lapisan *Compressible* yang diperhitungkan adalah yang memiliki nilai N-SPT < 10.
2. Tegangan *Overburden* Efektif
Overburden pressure effective (p'_o) adalah tegangan vertikal efektif dari tanah asli yang dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2.6 (Nasya, 2017) :

$$p'_o = \gamma' \times h \quad (2.6)$$

Dimana:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_{air} \quad (2.7)$$

3. Distribusi Tegangan Tanah (Δp)
Distribusi tegangan tanah merupakan tambahan tegangan akibat pengaruh beban tambahan diatas tanah yang ditinjau pada tiap lapisan. Grafik faktor pengaruh akibat tanah timbunan dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Grafik Faktor Pengaruh Akibat Beban Timbunan

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

Grafik tersebut dapat digunakan untuk mencari nilai I (nilai pengaruh dari fungsi m dan n) yang nantinya akan digunakan untuk menghitung distribusi tegangan tanah dengan menggunakan Persamaan 2.8 (Hardiyatmo, 2002)

$$\Delta p = I \cdot q_o \quad (2.8)$$

dimana :

Δp = besarnya tegangan akibat pengaruh beban timbunan ditinjau di tengah tengah lapisan (t/m²)

q_o = beban timbunan (t/m²) $\rightarrow q_o = \gamma_{timb} \times h_{timb}$

I = nilai pengaruh dari fungsi m dan n (Gambar 2.2)

www.itk.ac.id

2.3.2 Waktu Konsolidasi

Proses penurunan konsolidasi pada tanah lunak memerlukan waktu yang relatif lama, proses ini berlangsung terus sampai kelebihan tekanan air pori benar-benar menghilang. Menurut Terzaghi dalam buku Das (1995), perhitungan lamanya waktu konsolidasi dapat dicari menggunakan Persamaan 2.9 sebagai berikut:

$$t = \frac{T_v (H_{dr})^2}{C_v} \quad (2.9)$$

Dimana:

t = waktu konsolidasi (minggu)

T_v = faktor waktu

H_{dr} = panjang aliran air/ *drainage* terpanjang (m)

C_v = koefisien konsolidasi vertikal ($m^2/minggu$)

Dari Persamaan 2.9 dapat dilihat terdapat beberapa parameter untuk mengetahui waktu konsolidasi, seperti faktor waktu (T_v), koefisien konsolidasi vertikal (C_v) dan panjang aliran air/ *drainage* terpanjang (H_{dr}).

a. Faktor Waktu

Faktor waktu (T_v) adalah besaran tanpa dimensi yang merupakan fungsi dari derajat konsolidasi (U) dan bentuk dari distribusi tekanan air pori (u) didalam tanah. Berikut ini hubungan antara faktor waktu (T_v) dan derajat konsolidasi (U) dapat dilihat pada Tabel 2.2, dimana pada kasus 1 nilai hubungan U dan T_v dalam kondisi tekanan air pori awal (u) yang dianggap sama besar diseluruh lapisannya. Kasus 2 dan kasus 3 dalam kondisi tekanan pori awal yang lainnya (Hardiyatmo, 2002).

Tabel 2.2 Hubungan antara Faktor Waktu (T_v) dan Derajat Konsolidasi (U)

Derajat Konsolidasi U (%)	Faktor Waktu (T_v)		
	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3
0	0	0	0
10	0,008	0,048	0,050
20	0,031	0,090	0,101

www.itk.ac.id

Derajat Konsolidasi U (%)	Faktor Waktu (T_v)		
	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3
30	0,071	0,115	0,157
40	0,126	0,207	0,220
50	0,197	0,281	0,294
60	0,287	0,371	0,384
70	0,403	0,488	0,501
80	0,567	0,652	0,665
90	0,848	0,933	0,946
100	∞	∞	∞



(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

Casagrande (1938) dan Taylor (1948) mengusulkan persamaan hubungan U dan T_v , yang sangat berguna dan dapat dilihat pada Persamaan 2.10, Persamaan 2.11 dan Persamaan 2.12 (Nasya, 2017):

- Untuk $U < 60\%$

$$T_v = \left(\frac{\pi}{4}\right)U^2 \quad (2.10)$$

- Untuk $U > 60\%$

$$T_v = -0,933 \log(1 - U) - 0,085 \quad (2.11)$$

Atau

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U\%) \quad (2.12)$$

b. Koefisien Konsolidasi Vertikal (C_v)

Koefisien konsolidasi vertikal (C_v) dapat digunakan untuk menghitung kecepatan penurunan tanah. Nilai (C_v) ini didapatkan dari grafik hubungan

www.itk.ac.id

antara penurunan dengan waktu, dimana Persamaan 2.13 yang dipakai untuk nilai $U = 90\%$ sebagai berikut (Hardiyatmo, 2002):

$$C_v = \frac{T_v (H_{dr})^2}{t_{90}} \quad (2.13)$$

Pada uji konsolidasi dengan drainase dan arah aliran selama proses konsolidasi dua arah (keatas dan kebawah), maka perhitungan nilai H_{dr} menggunakan Persamaan 2.14 sebagai berikut (Hardiyatmo, 2002):

$$H_{dr} = \frac{1}{2} H \quad (2.14)$$

Dan untuk drainase dengan arah aliran satu arah (keatas atau kebawah), maka nilai H_{dr} dapat dilihat pada Persamaan 2.15 (Hardiyatmo, 2002):

$$H_{dr} = H \quad (2.15)$$

2.4 Timbunan Bertahap

Proses pembebanan timbunan di lapangan dilakukan secara bertahap dengan kecepatan sesuai dengan yang direncanakan. Oleh karena itu, formula yang digunakan untuk menghitung penurunan konsolidasi perlu disesuaikan terutama besar beban dan pemakaian C_c dan C_s . Untuk pembebanan secara bertahap dimana besar beban setiap tahapan adalah Δp , persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut (Nasya, 2017).

1. Apabila $p'_o + \Delta p \leq p'_c$

$$S_c = \frac{C_s}{1 + e_o} \left(H \log \left(\frac{p'_o + \Delta p_1}{p'_o} \right) \right) \quad (2.16)$$

2. Apabila $p'_o + \Delta p_1 + \Delta p_2 \geq p'_c$

$$S_c = \frac{C_s}{1 + e_o} H \log \frac{p'_c}{p'_o \Delta p_1} + \frac{C_c}{1 + e_o} H \log \left(\frac{p'_o + \Delta p_1 + \Delta p_2}{p'_c} \right) \quad (2.17)$$

3. Apabila $p'_o + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 \geq p'_c$

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_o} \left(H \log \left(\frac{p'_o + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3}{p'_o + \Delta p_1 + \Delta p_2} \right) \right) \quad (2.18)$$

Dimana:

www.itk.ac.id

C_c = Indeks pemampatan (*compression index*)

C_s = Indeks pemuai (*swelling index*)

p'_o = Tegangan efektif *overburden* (t/m^2)

Δp = Penambahan tekanan vertikal (t/m^2)

e_o = Angka Pori

2.5 Drainasi Vertikal (*Vertical Drain*)

Pada tanah lempung proses konsolidasi sangat rendah atau kecepatan konsolidasi sangat rendah. Proses konsolidasi ini dapat dipercepat dengan menggunakan drainasi pasir (atau bahan lain) yang ditanam secara vertikal untuk mempermudah mengeluarkan air dari dalam tanah. *Vertical drain* ini memberikan lintasan air pori yang lebih pendek ke arah horizontal, hal ini lah yang membuat proses konsolidasi menjadi lebih cepat (Hardiyatmo, 2002).

Bahan atau material yang digunakan pada perencanaan *vertical drain* untuk mempermudah mengalirkan berupa tiang pasir atau bahan geosintetis yang di kenal dengan *Wick Drain* atau *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*. Pemasangan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* ini sering digunakan karena kemudahan dalam pemasangan di lapangan (Nasya, 2017).

2.5.1 Menentukan Kedalaman dan Waktu Kosolidasi

Kedalaman pemasangan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* dapat ditentukan berdasarkan kedalaman tanah *compressible* dengan nilai N-SPT 10. Menurut Barron (1948), penentuan waktu konsolidasi dengan teori aliran pasir vertikal dan dengan menggunakan asumsi teori Terzaghi tentang konsolidasi linier satu dimensi maka didapatkan Persamaan 2.19 berikut (Hardiyatmo, 2002):

$$t = \left(\frac{D^2}{8 \cdot C_h} \right) F(n) \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - U_h} \right) \quad (2.19)$$

Dengan :

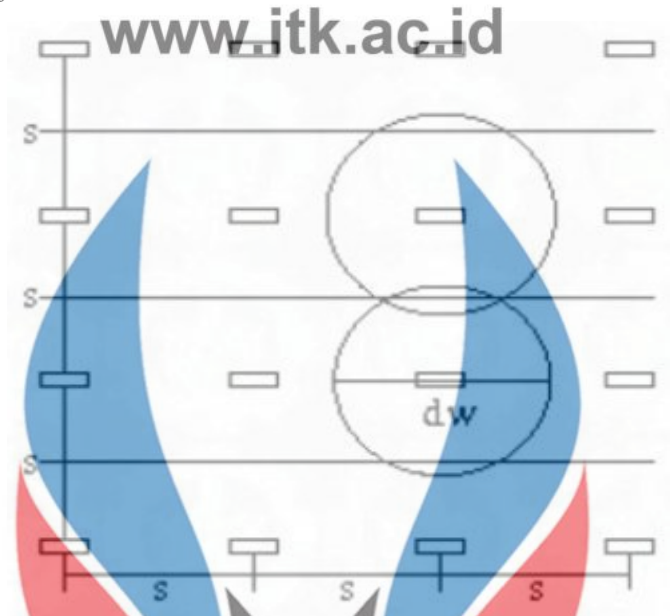
t = Waktu untuk menyelesaikan konsolidasi primer (minggu)

D = Diameter ekivalen dari lingkaran tanah yang merupakan daerah pengaruh *PVD* (mm)

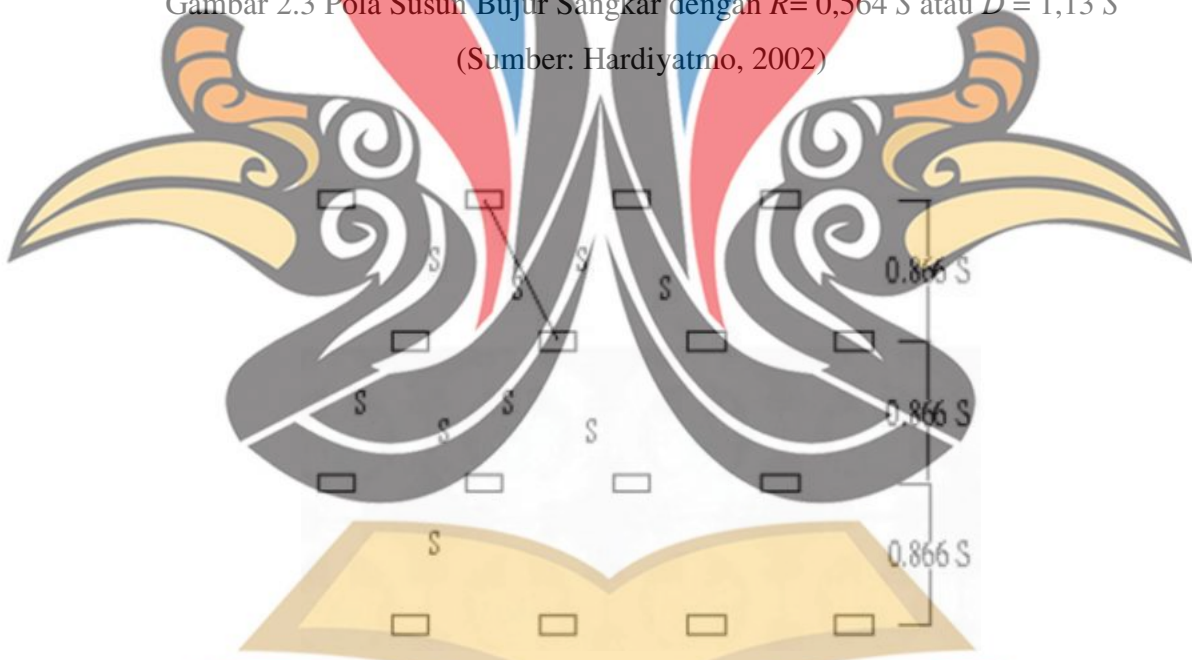
d = Diameter drainase pasir (mm)

C_h = Koefisien konsolidasi tanah arah horizontal (m^2 /minggu)

\bar{U}_h = Derajat konsolidasi tanah akibat aliran air arah horizontal.



Gambar 2.3 Pola Susun Bujur Sangkar dengan $R= 0,564 S$ atau $D = 1,13 S$
(Sumber: Hardiyatmo, 2002)



Gambar 2.4 Pola Susun Segitiga dengan $R= 0,525 S$ atau $D = 1,05 S$
(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

Fungsi $F(n)$ adalah fungsi hambatan akibat jarak titik pusat PVD . Menurut Hansbo (1979) harga $F(n)$ dapat dilihat pada Persamaan 2.20 dan Persamaan 2.21 sebagai berikut (Nasya, 2017):

$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \left[\ln(n) - \left(\frac{3n^2 - 1}{4n^2} \right) \right] \quad (2.20)$$

Atau

$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \left[\ln(n) - \frac{3}{4} - \left(\frac{1}{4n^2} \right) \right] \quad (2.21)$$

Pada umumnya $n > 20$ sehingga dapat dianggap $1/n = 0$ dan $\left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \approx 1$, jadi:

$$F(n) = \ln(n) - \frac{3}{4} \quad (2.22)$$

atau

$$F(n) = \ln \left(\frac{D}{dw} \right) - \frac{3}{4} \quad (2.23)$$

Hansbo (1979) menentukan waktu konsolidasi dengan menggunakan Persamaan 2.24 berikut (Nasya, 2017):

$$t = \left(\frac{D^2}{8 \cdot C_h} \right) (F(n) + F_s + Fr) \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \bar{U}_h} \right) \quad (2.24)$$

dan

$$C_h = \left(\frac{k_h}{k_v} \right) \times C_v \quad (2.25)$$

Dimana:

t = waktu yang diperlukan untuk mencapai U_h (minggu)

D = diameter ekuivalen lingkaran *PVD* (mm)

S = jarak antar titik pusat *PVD* (mm)

C_h = koefisien konsolidasi arah horizontal (m^2 /minggu)

k_h/k_v = Perbandingan antara koefisien permeabilitas tanah arah horisontal dan vertikal, untuk tanah lempung yang jenuh air, harga berkisar antara 2-5

$F(n)$ = Faktor hambatan disebabkan karena jarak antar *PVD*

Fr = Faktor hambatan akibat pada *PVD* itu sendiri

F_s = Faktor hambatan tanah yang terganggu (*disturbed*)

\bar{U}_h = Derajat konsolidasi tanah akibat aliran air arah horizontal

Harga Fr merupakan faktor tahanan akibat adanya gangguan *PVD* itu sendiri dan dirumuskan dengan Persamaan 2.26 berikut (Nasya, 2017):

$$Fr = \pi \cdot z \cdot (L - z) \left(\frac{k_h}{q_v} \right) \quad (2.26)$$

Dimana:

z = kedalaman titik tinjau pada PVD terhadap permukaan tanah (m)

L = panjang drain (m)

k_h = koefisien permeabilitas arah horisontal dalam tanah yang tidak terganggu (*undisturbed*) (cm/det)

q_w = discharge capacity dari drain

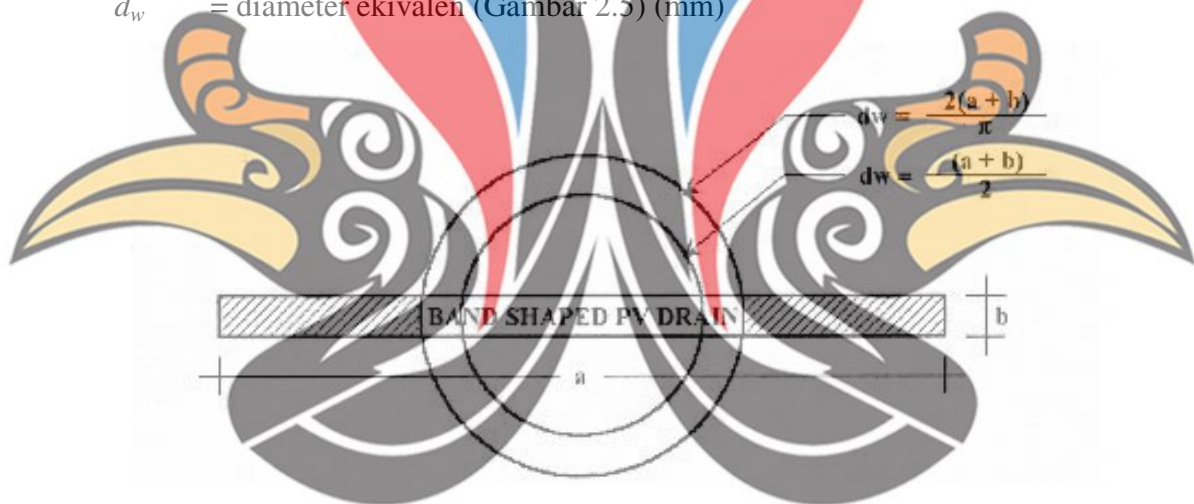
$$F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \ln \left(\frac{d_s}{d_w} \right) \quad (2.27)$$

Dimana:

k_s = koefisien permeabilitas arah horisontal pada tanah terganggu (*disturbed*) (cm/det)

d_s = diameter tanah yang terganggu (*disturbed*) di sekeliling PVD (mm)

d_w = diameter ekuivalen (Gambar 2.5) (mm)



Gambar 2.5 Equivalen diameter untuk PVD

(Sumber: Nasya, 2017)

Untuk memudahkan perencanaan maka dapat di asumsikan bahwa $F(n) = F_s$ dan nilai Fr yang umumnya memiliki nilai yang kecil, maka nilai Fr dianggap nol. Berdasarkan anggapan-anggapan tersebut, maka persamaan 2.24 berubah menjadi:

$$t = \left(\frac{D^2}{8.C_h} \right) (2.F(n)) \ln \left(\frac{1}{1-U_h} \right) \quad (2.28)$$

dengan memasukkan nilai t , maka dapat di cari \bar{U}_h pada lapisan tanah yang dipasang *PVD* (Nasya,2017).

www.itk.ac.id

2.5.2 Menghitung Derajat Kosolidasi Rata-rata

Dalam perhitungan derajat konsolidasi dibutuhkan data konsolidasi vertikal (\bar{U}_v), harga konsolidasi vertikal (\bar{U}_v) dapat dicari dengan persamaan Casagrande (1938) dan Taylor (1948) yang dapat dilihat pada Persamaan 2.29 dan Persamaan 2.30 berikut ini (Nasya, 2017):

- Untuk $0 < \bar{U}_v < 60\%$

$$\bar{U}_v = \left(2\sqrt{\frac{T_v}{\pi}} \right) \times 100\% \quad (2.29)$$

- Untuk $\bar{U}_v > 60\%$

$$\bar{U}_v = \left(100 - 10^a \right) \% \quad (2.30)$$

Dimana,

$$a = \frac{1,781T_v}{0,933} \quad (2.31)$$

Derajat konsolidasi rata-rata U dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 2.32 (Nasya, 2017):

$$U = [1 - (1 - U_h)(1 - \bar{U}_v)] \times 100\% \quad (2.32)$$

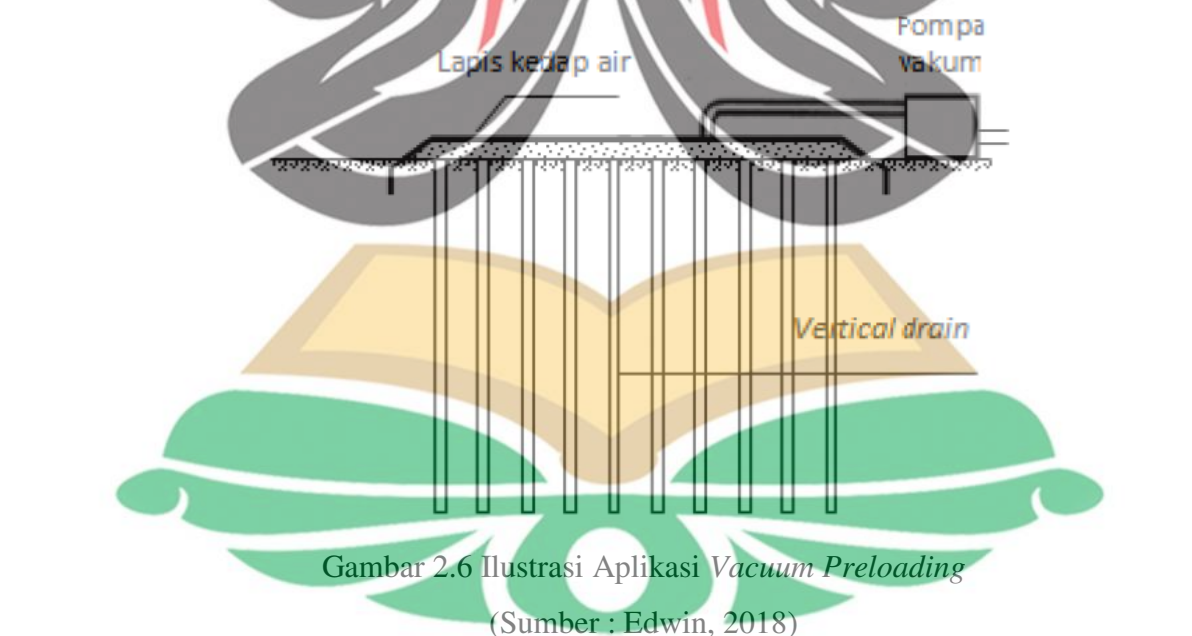
2.6 Vacuum Consolidation

Vacuum Consolidation merupakan metode pembebanan menggunakan vakum dan metode ini pertama kali diperkenalkan di Swedia oleh Kjellman (1952). Metode ini merupakan metode pengganti prapembeban dengan cara memasang lembaran material kedap air di permukaan tanah dan kemudian menyedot air dan udara dengan menggunakan pompa vakum (Edwin, 2018).

Keuntungan dari perbaikan tanah lunak metode vakum konsolidasi dibandingkan metode prapembebanan konvensional adalah sebagai berikut (Hardiyatmo, 2017):

www.itk.ac.id

1. Tegangan efektif meningkat seiring dengan peningkatan tekanan isap dan pergeseran lateral tanah dapat ditahan. Dengan demikian keruntuhan geser dapat diminimalisir.
2. Tinggi tekanan vakum dapat di distribusikan sampai kedalaman yang jauh dibawah lapisan tanah dengan menggunakan sistem *PVD*.
3. Volume tambahan timbunan untuk pembebanan dapat dikurangi dan tetap mencapai besar penurunan yang sama.
4. Karena tinggi timbunan dapat dikurangi (sehingga tekanan ke tanah berkurang), maka kelebihan tekanan pori maksimum yang timbul akan lebih kecil dibandingkan dengan *preloading* konvensional.
5. Dengan tekanan vakum yang diterapkan, kondisi ketidak-jenuhan tanah di daerah antarmuka (*interface*) antara tanah dan *drain* dapat di kompensasikan.
6. Dengan konsolidasi vakum, tekanan kekang yang bekerja pada elemen tanah menjadi terdiri dari 2 bagian, yaitu tekanan vakum dan tekanan tanah lateral
- Berikut ini gambar ilustrasi aplikasi *vacuum preloading* yang dapat di lihat pada Gambar 2.6

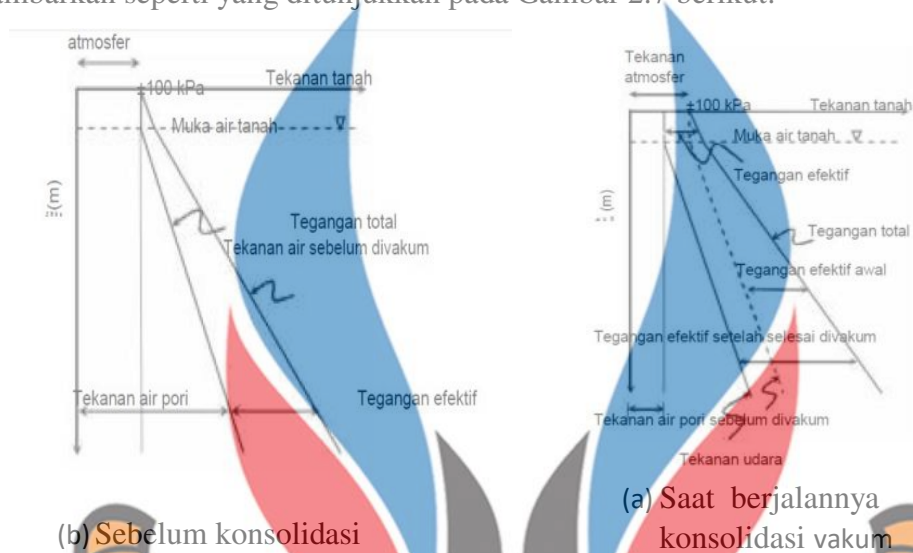


Gambar 2.6 Ilustrasi Aplikasi *Vacuum Preloading*
(Sumber : Edwin, 2018)

Tekanan vakum yang digunakan bisa sampai 90 kPa, tetapi dalam praktek di lapangan tekanan vakum yang sering digunakan hanya sekitar 80 kPa. Dalam

analisis geoteknik tekanan atmosfer sering diabaikan, tetapi dalam teori *vacuum preloading* tekanan atmosfer perlu dipertimbangkan (Hardiyatmo, 2017).

Diagram yang menunjukkan mekanisme selama proses *vacuum preloading* digambarkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 berikut:

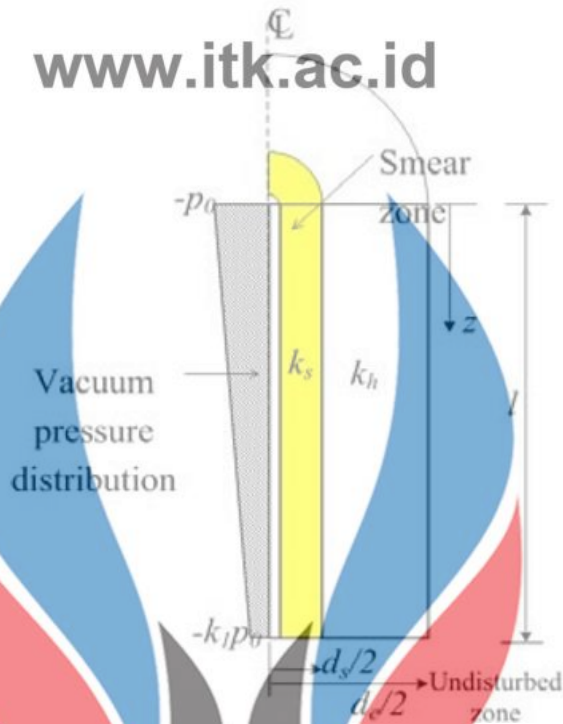


Gambar 2.7 Perkembangan Tekanan Tanah, Air Pori dan Tekanan Udara Sebelum dan Selama Proses Konsolidasi Vakum

(Sumber : Hardiyatmo, 2017)

Menurut Indraratna et al (2005a), Persamaan konsolidasi radial yang didasarkan pada uji laboratorium terkait dengan pola distribusi tekanan vakum dapat dilihat pada Gambar 2.8 berikut ini (Hardiyatmo, 2017):





Gambar 2.8 Distribusi Tekanan Vakum Dalam Arah Vertikal di Anggap Berbentuk Trapesium (Sumber : Hardiyatmo, 2017)

2.7 Instrumentasi Geoteknik

Instrumentasi geoteknik ini sangat dibutuhkan dalam proses pengamatan selama proses perbaikan tanah. Keberhasilan dari perbaikan tanah menggunakan metode *preloading* ataupun metode *vacuum consolidation* dapat dilihat dari hasil pengamatan menggunakan instrumentasi geoteknik. Data pengamatan bias dijadikan bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan yang berkaitan dengan kinerja *PVD*, perubahan pada desain, dan lain-lain. Oleh karena itu, pengamatan perilaku kondisi tanah menggunakan instrumentasi geoteknik menjadi hal yang penting. Instrumen-instrumen geoteknik yang sering digunakan seperti *settlement plate*, *inclinometer* dan *piezometer* dipasang pada lokasi lahan untuk mengamati kondisi dan perilaku tanah saat proses perbaikan tanah berlangsung (Kuswanda, 2016).

Alat instrumentasi geoteknik memiliki fungsi yang berbeda-beda, seperti *settlement plate* berfungsi sebagai alat ukur guna mengetahui penurunan yang terjadi pada permukaan tanah. *Inclinometer* berfungsi untuk mengukur dan

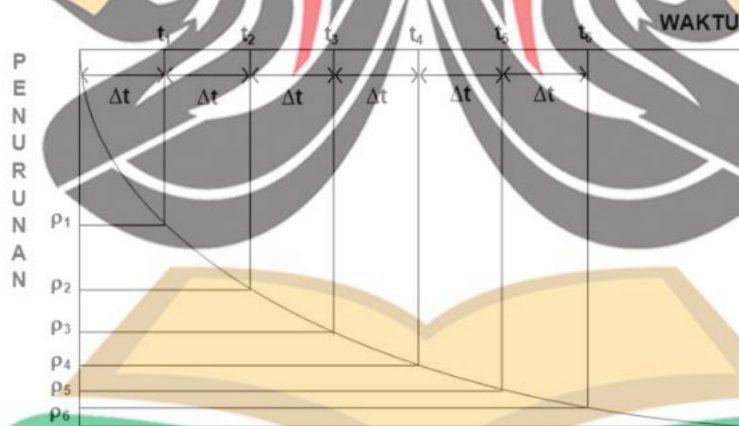
mengetahui deformasi lateral tanah. *Piezometer* berfungsi untuk mengukur dan mengetahui perubahan tekanan air pori (Kuswanda, 2016).

2.8 Metode Asaoka

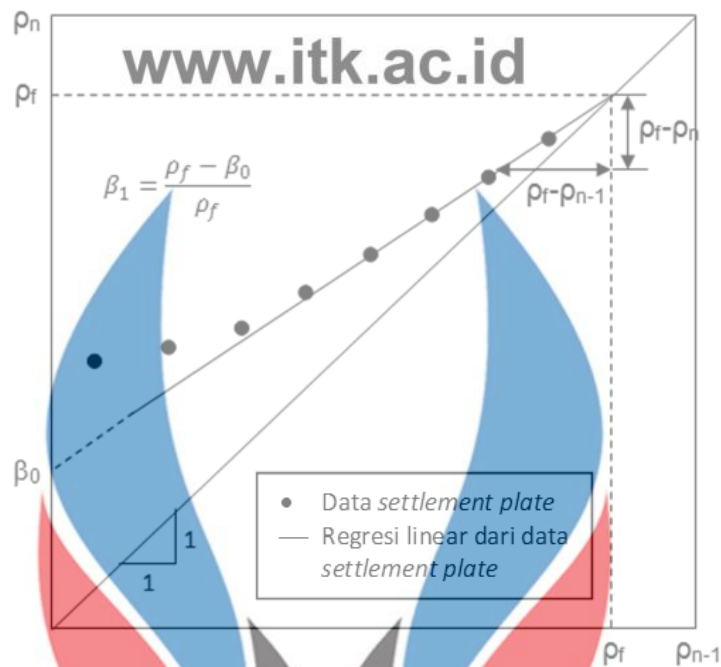
Metode Asaoka (1978) merupakan metode observasi untuk konsolidasi satu arah yang digunakan memprediksi penurunan tanah dan dapat memungkinkan diperoleh parameter-parameter konsolidasi lebih akurat. Analisis penurunan tanah pada metode ini umumnya memerlukan data lapangan dan data laboratorium (Nawir dkk, 2012).

2.7.1 Metode Grafis Prediksi Penurunan Tanah

Untuk dapat memprediksi penurunan akhir tanah, maka data-data penurunan tanah di lapangan digunakan data instrument *settlement plate*. Data-data penurunan ini harus dipilih, sehingga di peroleh nilai penurunan $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ dengan interval waktu Δt yang konstan seperti pada Gambar 2.9 Kemudian nilai ρ_n (sumbu y) dan ρ_{n-1} (sumbu x) diplot sehingga akan di peroleh titik-titik yang membentuk garis lurus, seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2.9 Prosedur Analisis Data *Monitoring* Penurunan dengan Interval Waktu yang Konstan
(Sumber: Nawir dkk, 2012)



Gambar 2.10 Prediksi Penurunan Akhir dengan Metode Asaoka
(Sumber: Nawir dkk, 2012)

Dimana β_0 adalah waktu titik plot pertama dari generasi linear ρ_n dan . Penurunan akhir (ρ_f) adalah titik pertemuan antara garis $\rho_n = \rho_{n-1}$ (bersudut 45°) dengan *trendline* dari garis ρ_n vs ρ_{n-1} sebenarnya. Setelah diperoleh penurunan akhir (ρ_f) maka dapat di cari nilai yang merupakan kemiringan dari garis ρ_n vs ρ_{n-1} sebenarnya, yang memberikan hubungan dan dapat dilihat pada Persamaan 2.33 (Nawir dkk, 2012).

$$\beta_1 = \frac{p_f - \beta_0}{p_f} \quad (2.33)$$

2.7.2 Korelasi Nilai Koefisien Konsolidasi

Nilai korelasi koefisien konsolidasi berguna untuk mengetahui kecepatan penurunan konsolidasi pada lapisan tanah yang diberi perbaikan tanah berupa timbunan dan vakum menggunakan *PVD*. Dengan menggunakan metode Asaoka juga dapat diperoleh korelasi nilai koefisien konsolidasi arah vertikal (C_v) dan nilai koefisien konsolidasi arah horizontal (C_h). Menurut Hausmann dengan adanya *vertical drain (PVD)*, maka disipasi tekanan air pori akan dominan terjadi pada arah horizontal. Dengan demikian, korelasi koefisien konsolidasi hanya

dilakukan untuk parameter konsolidasi horizontal (C_h) saja. Penentuan nilai (C_h) dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.34 berikut (Nasya, 2017):

$$\frac{-\ln\beta_1}{\Delta t} = \frac{8C_h}{d^2 F(n)} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2} \quad (2.34)$$

Dimana:

C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal (m²/minggu)

H = tebal lapisan tanah yang terkonsolidasi (m)

β_1 = kemiringan kurva p_n vs p_{n-1}

Δt = selang waktu dalam pengamatan penurunan (minggu)

C_h = koefisien konsolidasi arah horizontal (m²/minggu)

d = diameter daerah pengaruh PVD (mm)

$F(n)$ = fungsi n terhadap waktu akibat PVD

Untuk menghitung penurunan pada waktu t , maka rumus yang digunakan adalah seperti yang terlihat pada Persamaan 2.35 berikut ini (Agoeng, 2017).

$$\rho_t = \rho_f \left(1 - \exp \left(\left(\ln \frac{\beta_1}{\Delta t} \right) (t) \right) \right) \quad (2.35)$$

2.9 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga ini adalah metode analisa dan prediksi penurunan konsolidasi tanah yang dilakukan dengan menggunakan program bantu *software* PLAXIS. Metode yang digunakan pada analisis metode Elemen Hingga adalah dengan cara pendekatan solusi analisis struktur secara numerik dimana struktur kontinum dengan derajat kebebasan tak hingga disederhanakan ke dalam elemen-elemen kecil diskrit yang memiliki geometri yang lebih sederhana dengan derajat kebebasan berhingga. Elemen-elemen diferensial ini memiliki asumsi fungsi perpindahan yang dikontrol pada tiap nodal. Pada nodal tersebut diberlakukan syarat keseimbangan dan kompatibilitas. Pada titik lain, diasumsikan perpindahan dipengaruhi oleh nilai nodal. Perpindahan diperoleh dengan menerapkan prinsip energi yang disusun dari matriks kekakuan untuk tiap elemen dan kemudian diturunkan persamaan keseimbangannya untuk setiap nodal dari elemen diskrit sesuai dengan kontribusi elemennya (Nasya, 2017).

www.itk.ac.id

Nilai parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan FEM diperoleh dari data laboratorium maupun dari referensi berdasarkan tipe tanah. Referensi parameter yang digunakan meliputi parameter k (koefisien permeabilitas), E (modulus elastisitas), dan ν (*Poisson's Ratio*) (Nawir dkk, 2012).

2.8.1 Jenis Material

Jenis material digunakan untuk menggambarkan sifat interaksi air-tanah. Berikut ini jenis material yang dibagi menjadi 3 antara lain:

1. Model terdrainase adalah model yang digunakan untuk menggambarkan kondisi dimana tidak terjadi tekanan air pori berlebih. Jenis material ini juga dapat menggambarkan kondisi jangka panjang.
2. Tak terdrainase adalah model yang digunakan untuk menggambarkan kondisi dimana terjadi tekanan air pori berlebih.
3. Tidak porous adalah model yang menggambarkan kondisi dimana tidak terdapat tekanan air pori awal dan tekanan air pori berlebih. Jenis material ini biasanya digunakan untuk memodelkan batuan dan beton (Nasya, 2017).

2.8.2 Model Mohr-Coloumb (*Perfect Plasticity*)

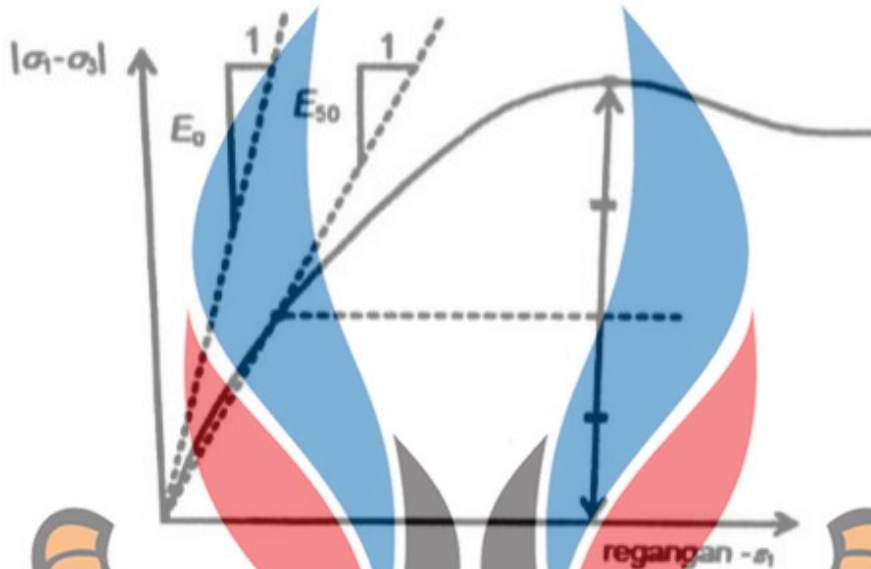
Model Mohr-Coloumb adalah suatu pendekatan “ordo pertama” dari perilaku tanah atau buatan dan disarankan untuk digunakan dalam analisis awal dari masalah yang dihadapi. Nilai kekakuan rata-rata pada setiap lapisan dengan model ini akan mempunyai nilai yang konstan. Karena kekakuan yang konstan maka perhitungan cenderung cepat. Model Morh-Coloumb adalah model elastis-plastis yang membutuhkan berbagai input parameter dalam PLAXIS seperti berikut ini (Nasya, 2017).

1. Modulus Elastisitas atau Modulus Kekakuan (E)

Modulus kekakuan mempunyai satuan tegangan (satuan gaya per satuan). PLAXIS menggunakan modulus elastisitas sebagai modulus kekakuan dasar dalam model elastis dan model Mohr-Coloumb. Perhitungan nilai dari parameter kekakuan memerlukan perhatian khusus karena banyak material tanah yang telah menunjukkan perilaku *non-linier* dari awal pembebanan (Nasya, 2017).

www.itk.ac.id

Kemiripan awal kurva tegangan-regangan biasanya disebut sebagai E_0 seperti dalam mekanika tanah. *Secant modulus* pada 50% kekuatan disebut sebagai E_{50} seperti pada Gambar 2.11 berikut (Nasya, 2017)..



Gambar 2.11 Definisi untuk hasil Uji *Triaksial Undrained Standar*
(Sumber: Nasya, 2017)

E_0 dapat digunakan untuk realistik tanah lempung yang terkonsolidasi sangat berlebih dan beberapa batuan yang rentang perilaku linier elastisnya besar. E_{50} lebih tepat digunakan untuk tanah pasiran atau tanah lempung terkonsolidasi normal saat menerima pembebanan. Berikut ini nilai modulus elastisitas yang dapat dilihat pada Tabel 2.3 (Nasya, 2017).

Tabel 2.3 Nilai Modulus Elastisitas (E) Berdasarkan Jenis Tanah

Macam Tanah	E (kN/m ²)
Lempung	
- Sangat lunak	300-3000
- Lunak	2000-4000
- Sedang	4500-9000
- Keras	7000-20000
- Berpasir	30000-42500
Pasir	
- Berlanau	5000-20000

Macam Tanah	E (kN/m ²)
- Tidak padat	10000-25000
- Padat	50000-100000
Padat dan kerikil	80000-200000
- Padat	50000-140000
- Lanau	2000-20000
- Loess	15000-60000
- Serpih	140000-1400000

(Sumber: Nasya, 2017)

2. Angka *Poisson Ratio* (ν)

Perbandingan volume pada daerah yang diberikan gaya dengan daerah lain yang tegak lurus dengan gaya tersebut disebut sebagai angka *Poisson Ratio* (ν). Kisaran nilai *Poisson Ratio* (ν) untuk beberapa kasus adalah berkisar antara 0,3 - 0,4. Nilai tersebut tidak hanya digunakan pada kompresi satu dimensi, tetapi juga dapat digunakan untuk kondisi pembebanan lainnya. Kisaran nilai *Poisson Ratio* (ν) untuk kasus *unloading* biasanya atau lebih umum menggunakan nilai antara 0,15 – 0,25. Berikut ini nilai dari *Poisson Ratio* (ν) berbagai jenis tanah yang dapat dilihat pada Tabel 2.4 (Nasya, 2017).

Tabel 2.4 Korelasi Konsistensi Tanah Dengan *Poisson Ratio* (ν)

Macam Tanah	ν
Lempung jenuh	0,4 - 0,5
Lempung tak jenuh	0,1 - 0,3
Lempung berpasir	0,2 - 0,3
Lanau	0,3 - 0,35
Pasir padat	0,2 - 0,4
Pasir kasar (angka pori, $e = 0,4 - 0,7$)	0,25
Pasir halus (angka pori, $e = 0,4 - 0,7$)	0,25
Batu (agak tergantung dari macamnya)	0,1 - 0,4
Loess	0,1 - 0,3

(Sumber: Nasya, 2017)

3. Sudut Geser (\emptyset)

Parameter sudut geser ini dipergunakan untuk menghitung kekuatan dari tanah. Sudut geser yang tinggi dapat mengakibatkan peningkatan beban komputasi plastis dan waktu komputasi akan meningkat secara eksponensial terhadap sudut geser. Oleh karena itu, sudut geser yang tinggi sebaiknya dihindari saat melakukan perhitungan awal. Sudut geser yang tinggi biasanya diperoleh pada pasir padat (Nasya, 2017).

4. Kohesi (c)

Parameter kohesi (c) digunakan sebagai masukan untuk menghitung kekuatan tanah bersama dengan sudut geser (\emptyset). Pada aplikasi PLAXIS dapat menerima pasir non-kohesi tetapi biasanya berjalan kurang baik. Oleh karena itu, biasanya pengguna disarankan untuk memasukkan nilai yang kecil (gunakan $c > 0,2$ kPa)

5. Sudut Dilatasi (ψ)

Nilai sudut dilatasi (ψ) pada tanah lempung cenderung tidak menunjukkan dilatasi sama sekali ($\psi = 0$), terkecuali tanah lempung yang terkonsolidasi berlebih. Nilai dilatasi pada tanah pasir bergantung pada sudut gesernya. Seperti pada pasir kasar nilai dilatansinya dapat dilihat pada Persamaan 2.36 sebagai berikut.

$$\psi = \emptyset - 30^\circ \quad (2.36)$$

Tetapi dalam kebanyakan kasus sudut dilatasi yang sering digunakan adalah nol untuk nilai sudut geser (\emptyset) kurang dari 30.

6. Koefisien permeabilitas dari tanah (k)

Parameter koefisien permeabilitas ini digunakan untuk melakukan perhitungan kecepatan pengurangan tegangan air pori selama proses pengeluaran air dari pori-pori tanah pada permodelan PLAXIS. Analisa pada parameter ini digunakan pada analisa tak terdrainase yang akan mengontrol besar penurunan terhadap waktu. Harga koefisien rembesan (k) berbeda-beda untuk tiap jenis tanah. Berikut ini nilai besaran koefisien rembesan (k) yang dapat dilihat pada Tabel 2.5 (Rumintha, 2017).

Tabel 2.5 Nilai Koefisien Rembesan pada Umumnya

Material	Coefficient of permeability
Coarse	$10^{-10} - 10^{-3}$
Fine gravel, coarse, and medium sand	$10^{-2} - 10^{-4}$
Fine sand, loose silt	$10^{-4} - 10^{-2}$
Dense silt, clayey silt	$10^{-5} - 10^{-4}$
Silty clay, clay	$10^{-8} - 10^{-5}$

(Sumber: Rumintha, 2017)

2.10 Penelitian Terdahulu

Keaslian penelitian ini berdasarkan pada beberapa penelitian terdahulu yang mempunyai karakteristik yang relative sama dalam hal tema kajian, berikut ini beberapa penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Penelitian Terdahulu

No	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
1	Hasbullah Nawir dkk, 2012	Metode : Prediksi penurunan tanah menggunakan prosedur metode Asaoka, metode Terzaghi dan metode Elemen Hingga (FEM). Hasil : Dari hasil prediksi penurunan didapat metode Asaoka lebih baik digunakan dan hasil yang didapatkan lebih mendekati data penurunan lapangan.
2	Farah Nasya, 2017	Metode : Penentuan harga C_h lapangan dari hasil <i>test trial embankment</i> dan implementasinya dengan metode Konvensional, Elemen Hingga dan Asaoka. Hasil : Metode yang memberikan hasil prediksi pemampatan yang paling mendekati hasil pengamatan lapangan adalah metode Asaoka.
3	Wimpie Agoeng Noegroho dkk, 2017	Metode : Perhitungan kembali nilai koefisien konsolidasi pada perbaikan tanah lempung lunak dengan metode Asaoka. Hasil : Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa nilai derajat konsolidasi yang didapat dari lapangan yaitu $C_v = 0.15037 \text{ cm}^2/\text{det}$ dan $C_h = 1.018 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{det}$.

Penelitian yang dilakukan oleh Neneng Dahlia dengan judul “Prediksi Penurunan Tanah pada Perbaikan Tanah Lunak Metode *Vacuum Consolidation* dengan Analisa Menggunakan Metode Terzaghi, Metode Asaoka dan Metode Elemen Hingga (PLAXIS)” dalam penyusunan tugas akhir memiliki kesamaan

variable bebas dan terdapat beberapa perbedaan variabel penelitian. Perbedaan penelitian pada tugas akhir ini terletak pada lokasi penelitian, yaitu menggunakan studi kasus di area *Dayana Cluster* kawasan Summarecon Bandung yang membuat nilai parameter-parameter tanahnya berbeda. Perbedaan lainnya pada penelitian yang penulis tinjau terletak pada metode perbaikan tanah lunak, dimana perbaikan tanah lunak pada proyek di area *Dayana Cluster* kawasan Summarecon Bandung menggunakan metode *Vacuum Consolidation*. Berikut ini adalah model letak kesamaan dan perbedaan penelitian penulis terhadap penelitian terdahulu yang dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Letak Penelitian Terhadap Penelitian Terdahulu

No	Identitas Penelitian	Prediksi Penurunan Metode Terzaghi	Prediksi Penurunan Metode Asaoka	Prediksi Penurunan Metode Elemen Hingga (PLAXIS)	<i>Vacuum Consolidation</i>	Timbunan (<i>Preloading</i>)
1	Hasbullah Nawir dkk, 2012	√	√	√		√
2	Farah Nasya, 2017	√	√	√		√
3	Wimpie Agoeng Noegroho dkk, 2017		√			√
4	Letak Penelitian	√	√	√	√	

