

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Tinjauan Lokasi

Tinjauan lokasi diperlukan untuk mendapatkan gambaran bagaimana keadaan dilapangan. Pada tinjauan lokasi ini akan mendapatkan tahapan pekerjaan dengan metode *hydraulic fill*. Adapun tahapannya yaitu persiapan alat dan material, pemasangan pipa PVC, pembuatan saluran terbuka, *rainbowing*, *dewatering*/pengeringan, dan pemasangan PVD.

1) Persiapan material dan alat

Material dan Peralatan yang digunakan di lapangan adalah pipa PVC, PVD (*Prefabricated Vertical Drain*), pelat baja, campuran air-pasir, *settlement plate*, *theodolite*, *excavator*, dan alat berat *rig* PVD.

a. Pipa PVC

Pipa PVC memiliki ukuran diameter 8 inch, pipa PVC berfungsi untuk menyalurkan bahan timbunan yaitu campuran air-pasir ke lokasi proyek. Pipa PVC disambung agar mencapai lokasi dimana yang harus ditimbun.



Gambar 4.1. Pipa PVC

b. Campuran air-pasir

Campuran air-pasir digunakan sebagai bahan timbunan lokasi proyek. Campuran air-pasir ini akan ditimbun setinggi 3.6 m. Campuran air-pasir didatangkan dengan kapal dari tempat produksinya.



Gambar 4.2. Campuran air-pasir

c. PVD (*Prefabricated Vertical Drain*)

PVD ini memiliki ukuran lebar 100 mm dan lebar 4.8 mm. *Vertical drain* terdiri dari polyster struktur filamen inti 3 (tiga) dimensi dibungkus *non-woven polyster* yang ditekan oleh perekat terikat penyaring. Efektif ukuran bukaan tidak lebih dari 75 μm dan minimum koefisien permeabilitasnya adalah 11×10^{-4} m/s. Sumbu drainase harus memiliki karakteristik kekuatan-regangan yang cukup untuk menanggung beban selama instalasi atau waktu operasi. Elongasi/perpanjangan putus harus 25% atau lebih. Kekuatan tarik sebesar 10% elongasi/perpanjangan tidak kurang dari 1.0 kN. Kapasitas debit tidak lebih kecil dari 70×10^{-6} m³/detik pada tekanan 360 kPa.

PVD ini akan dimasukkan kedalam tanah dengan menggunakan mesin yang kedalamannya sesuai dengan yang direncanakan. PVD ini akan dipasang dengan pola segitiga dengan jarak antar *vertical drain* yaitu 1,5 m



Gambar 4.3. Material PVD

d. Pelat Baja

Pelat baja dipasang pada ujung PVD, pelat baja ini berfungsi untuk membantu penetrasi PVD kedalam tanah sampai kedalaman yang direncanakan. Pelat ini berbentuk persegi yang memiliki celah sedikit untuk PVD masuk dan melekat pada pelat baja tersebut. Pelat baja ini sering disebut ‘sepatu’ di lapangan.



Gambar 4.4. Pelat baja

e. *Settlement Plate*

Settlement Plate merupakan alat yang biasa digunakan untuk pembuatan timbunan lereng, galian dan mengukur penurunan tanah. Selain itu, alat ini juga bisa digunakan untuk memantau penurunan pondasi pada jembatan, menara, gedung bertingkat dan tower. Tujuan pengamatan pada proyek ini menggunakan *settlement plate* yaitu untuk menghitung besar volume timbunan yang telah ditimbun pada lokasi proyek dengan cara mengetahui tinggi timbunan sebelum mengalami penurunan dan sesudah mengalami penurunan.



Gambar 4.5. *Settlement Plate*

f. *Rig* PVD

Alat berat *rig* PVD berfungsi untuk memasukkan PVD ke dalam tanah sesuai kedalaman yang telah direncanakan. *Rig* PVD memiliki tempat untuk meletakkan gulungan PVD, apabila gulungannya telah habis bisa diganti dengan yang baru. Untuk menentukan jarak antar PVD dapat diatur dengan kaki dari alat *rig* PVD yang terdapat plat sebagai penopang pada ujungnya. Alat *rig* ini dioperasikan oleh seorang operator yang telah mempunyai pengalaman dibidangnya.



Gambar 4.6. *Rig* PVD

2) Pemasangan Pipa PVC

Material yang digunakan yaitu campuran air-pasir dan pipa PVC. Air yang digunakan adalah air Sungai Musi dan pasir didatangkan melalui jalur air dengan kapal ponton dari tempat produksinya. Pipa PVC yang digunakan berdiameter 8 inch yang akan disambung dengan panjang menyesuaikan dengan lokasi penimbunan. Pipa PVC ini akan menjadi media penyalur dari material pengisi timbunan yaitu campuran air-pasir yang akan disedot oleh pompa yang dipasang di ujung pipa PVC ini.



Gambar 4.7. Pipa PVC yang telah tersambung

3) Pembuatan Saluran Terbuka

Pembuatan saluran terbuka berfungsi untuk mengalirkan air pada saat proses dewatering. Pembuatan saluran terbuka dilakukan dengan menggali dengan kedalaman ± 50 cm dengan lebar 1 m. Pekerjaan saluran terbuka ini bersifat sementara karena pada saat penimbunan tanah dilakukan secara bertahap, sehingga lokasi atau jalur saluran terbuka dapat berubah-ubah sesuai yang direncanakan. Saluran terbuka ini bermuara di Sungai Musi. Saluran terbuka ini dibuat menyerupai labirin. Hal ini bertujuan untuk menghambat kecepatan aliran air yang mengalir sehingga timbunan yang disekitar saluran tidak ikut tergerus.



Gambar 4.8. Proses penggalian saluran terbuka



Gambar 4.9. Saluran terbuka

4) *Rainbowing*

Rainbowing adalah salah satu metode penempatan material pengisi. Material yang telah disiapkan kemudian akan disedot dengan menggunakan pompa yang akan dialirkan oleh pipa PVC yang telah disambung ke lokasi penimbunan kemudian material akan keluar dari pipa dan akan menyebar ke lokasi penimbunan layaknya pelangi. Proses *rainbowing* dapat dilihat seperti Gambar 4.10. berikut ini.



Gambar 4.10. Proses Penimbunan

5) *Dewatering/Pengeringan*

Setelah pekerjaan penimbunan, untuk melanjutkan ke tahap berikutnya yaitu pemasangan PVD, keadaan tanah timbunan harus kering agar bisa dilaksanakan pekerjaan pemasangan PVD. Oleh karena itu, diperlukan proses dewatering/pengeringan. Air yang telah bercampur dengan pasir setelah proses penimbunan selesai air tersebut akan mengalir ke saluran terbuka yang telah dibuat dan akan mengalir sesuai alur saluran terbuka yang telah dibuat yang akan bermuara ke Sungai Musi. Tanah timbunan yang semula penuh dengan air, setelah didiamkan beberapa hari air yang terkandung didalam timbunan akan berkurang sampai keadaan timbunan kering atau hampir tidak ada air. Keadaan inilah akan dimanfaatkan kontraktor untuk melaksanakan pekerjaan pemasangan PVD untuk mempercepat waktu pekerjaan.

6) *Pemasangan PVD*

Adapun tahapan pemasangan PVD (*Prefabricated Vertical Drain*) yaitu:

- a. *Persiapan alat berat rig PVD untuk pemasangan PVD.*
- b. *Pembuatan titik acuan untuk pemasangan PVD dengan menggunakan tali rafia yang dimasukkan kedalam tanah. Titik ini membantu operator untuk mempercepat pekerjaan pemasangan PVD.*
- c. *Pemasangan gulungan PVD pada alat berat rig.*



Gambar 4.11. Pemasangan gulungan PVD

- d. Pekerjaan Pemasangan PVD kedalam tanah, dengan terdiri dari tiga (3) orang yaitu: 1 untuk menjaga gulungan PVD agar tidak terjadi kesalahan pada saat pemasangan PVD, 1 orang bertugas untuk memotong PVD dan meletakkan plat baja pada PVD, dan 1 orang sebagai operator alat berat *rig*.

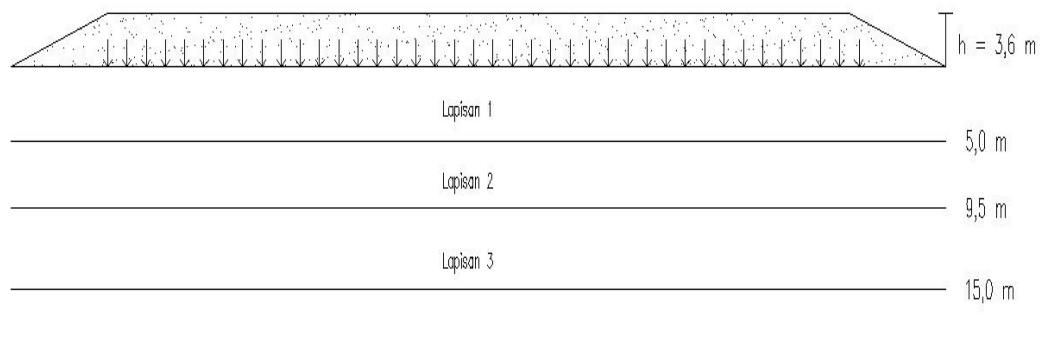


Gambar 4.12. Pemasangan PVD

- e. Pancang PVD sesuai dengan kekuatan yang direncanakan berdasarkan pengujian SPT. Kekuatan yang digunakan yaitu 75 kg/cm^2 . Jadi Kedalaman dari pemancangan PVD bisa bervariasi tergantung kekuatan pada kedalaman tersebut telah mencapai 75 kg/cm^2 .
- f. Setelah mencapai kekuatan telah yang ditentukan
- g. Tarik *mandrel* ke atas. Selama proses ini, PVD tetap berada didalam tanah tertahan oleh pelat baja.
- h. Potong PVD yang berada diatas tanah.
- i. Ulangi langkah di atas sampai PVD yang direncanakan terpasang semua.

4.2. Perhitungan Penurunan Akibat Beban Timbunan

Pada bab ini akan dianalisis perhitungan manual penurunan konsolidasi akibat beban timbunan pasir pada variasi waktu 6, 8, 10, 12, 14, 16, dan 18 bulan berdasarkan tiap titik bor 1, 2, dan 3 pada proyek IPAL Palembang.



Gambar 4.13. Pemodelan lapisan tanah

Tabel 4.1 . Data tanah proyek IPAL Palembang berdasarkan titik bor 1, titik bor 2, dan titik bor 3.

Titik Bor	Lapisan I			Lapisan II			Lapisan III		
	γ (kN/m ³)	e_0	Cc	γ (kN/m ³)	e_0	Cc	γ (kN/m ³)	e_0	Cc
1	13,94	2,29	0,787	14,38	2,53	0,861	16,59	1,47	0,523
2	14,35	2,52	0,853	14,32	1,96	0,668	16,59	1,47	0,523
3	18,37	1,1	0,316	14,32	1,96	0,668	16,59	1,47	0,523

Berikut ini adalah analisa besar penurunan yang ditinjau pada tiap lapisan tanah pada proyek IPAL Palembang yang dihitung per meter maka disini hanya dijabarkan satu contoh perhitungan saja untuk setiap titik bor.

1) Titik Bor 1

Berikut ini adalah contoh penjabaran perhitungan pada kedalaman $z = 1$ m.

Untuk tegangan efektif vertikal pada tanah dengan kedalaman $z = 1$ m yaitu:

Berat volume tanah, $\gamma = 13,94 \text{ kN/m}^3 = 1,421 \text{ t/m}^3$

Jadi, Tegangan efektif vertikalnya, yaitu:

$$\begin{aligned} \sigma_o &= \gamma \cdot h \\ &= 1,421 \text{ t/m}^3 \cdot 1 \text{ m} \\ &= 1,421 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Untuk tambahan tegangan vertikal tanah timbunan pasir yaitu:

$$\Delta\sigma = \gamma_{\text{pasir}} \cdot h_{\text{timbunan}}$$

diketahui:

$$\gamma_{\text{pasir}} = 2 \text{ t/m}^3$$

$$h_{\text{timbunan}} = 3,6 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{maka, } \Delta\sigma &= \gamma_{\text{pasir}} \cdot h_{\text{timbunan}} \\ &= 2 \text{ t/m}^3 \cdot 3,6 \text{ m} \\ &= 7,2 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh besar penurunan akibat beban timbunan adalah;

$$\begin{aligned} S &= \left[\frac{Cc \cdot H}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma_{o'} + \Delta\sigma'}{\sigma_{o'}}\right) \right] \\ S &= \left[\frac{0,787 \cdot 1/2 \text{ m}}{1 + 2,29} \log\left(\frac{1,421 \text{ t/m}^2 + 7,2 \text{ t/m}^2}{1,421 \text{ t/m}^2}\right) \right] \\ S &= 0,0936 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk hasil perhitungan selengkapnya dengan kedalaman tanah yang lain disajikan dalam Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2. Rekapitulasi perhitungan penurunan akibat beban timbunan pada titik bor 1

z m	H m	y t/m ³	Po t/m ²	h _{timbunan} m	γ _{pasir} t/m ³	Δp t/m ²	Cc	e _o	Sc m
1	0.5	1.421	1.420999	3.6	2	7.2	0.787	2.29	0.093646
2	0.5	1.421	1.776249	3.6	2	7.2	0.787	2.29	0.084153
3	0.5	1.421	2.131498	3.6	2	7.2	0.787	2.29	0.076699
4	0.5	1.421	2.486748	3.6	2	7.2	0.787	2.29	0.070632
5	0.5	1.46585	2.853211	3.6	2	7.2	0.861	2.53	0.066706
6	0.5	1.46585	3.219674	3.6	2	7.2	0.861	2.53	0.062202
7	0.5	1.46585	3.586137	3.6	2	7.2	0.861	2.53	0.058323
8	0.5	1.46585	3.952599	3.6	2	7.2	0.861	2.53	0.05494
9	0.5	1.46585	4.319062	3.6	2	7.2	0.861	2.53	0.051956
10	0.5	1.69113	4.741845	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.042467
11	0.5	1.69113	5.164628	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.04014
12	0.5	1.69113	5.587411	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.038068
13	0.5	1.69113	6.010194	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.03621
14	0.5	1.69113	6.432977	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.034533
15	0.5	1.69113	6.855759	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.03301
								ΣS	0.843685

Jadi Penurunan konsolidasi yang terjadi akibat beban timbunan total adalah sebesar 0,843 m pada titik bor 1.

2) Titik Bor 2

Tabel 4.3. Rekapitulasi perhitungan penurunan akibat beban timbunan pada titik bor 2

z m	H m	y t/m³	Po t/m²	h_{timbunan} m	γ_{pasir} t/m²	Δp t/m²	Cc	Eo	Sc m
1	0.5	1.46279	1.462793	3.6	2	7.2	0.853	2.52	0.093597
2	0.5	1.46279	1.828491	3.6	2	7.2	0.853	2.52	0.08403
3	0.5	1.46279	2.19419	3.6	2	7.2	0.853	2.52	0.076526
4	0.5	1.46279	2.559888	3.6	2	7.2	0.853	2.52	0.070424
5	0.5	1.45973	2.924822	3.6	2	7.2	0.668	1.96	0.060852
6	0.5	1.45973	3.289755	3.6	2	7.2	0.668	1.96	0.056825
7	0.5	1.45973	3.654689	3.6	2	7.2	0.668	1.96	0.053346
8	0.5	1.45973	4.019623	3.6	2	7.2	0.668	1.96	0.050302
9	0.5	1.45973	4.384557	3.6	2	7.2	0.668	1.96	0.047612
10	0.5	1.69113	4.807339	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.042088
11	0.5	1.69113	5.230122	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.039803
12	0.5	1.69113	5.652905	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.037767
13	0.5	1.69113	6.075688	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.035939
14	0.5	1.69113	6.498471	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.034287
15	0.5	1.69113	6.921254	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.032787
								ΣS	0.816187

Berikut ini adalah contoh penjabaran perhitungan pada kedalaman $z = 1$ m.

Untuk tegangan efektif vertikal pada tanah dengan kedalaman $z = 1$ m yaitu:

Berat volume tanah, $\gamma = 14,35 \text{ kN/m}^3 = 1,462 \text{ t/m}^3$

Jadi, Tegangan efektif vertikalnya, yaitu:

$$\begin{aligned}\sigma_o &= \gamma \cdot h \\ &= 1,462 \text{ t/m}^3 \cdot 1 \text{ m} \\ &= 1,462 \text{ t/m}^2\end{aligned}$$

Untuk tambahan tegangan vertikal tanah timbunan pasir yaitu:

$$\Delta\sigma = \gamma_{\text{pasir}} \cdot h_{\text{timbunan}}$$

diketahui:

$$\gamma_{\text{pasir}} = 2 \text{ t/m}^3$$

$$h_{\text{timbunan}} = 3,6 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{maka, } \Delta\sigma &= \gamma_{\text{pasir}} \cdot h_{\text{timbunan}} \\ &= 2 \text{ t/m}^3 \cdot 3,6 \text{ m} \\ &= 7,2 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh besar penurunan akibat beban timbunan adalah;

$$\begin{aligned} S &= \left[\frac{Cc \cdot H}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma_{o'} + \Delta\sigma'}{\sigma_{o'}}\right) \right] \\ S &= \left[\frac{0,853 \cdot 1/2 \text{ m}}{1 + 2,52} \log\left(\frac{1,462 \text{ t/m}^2 + 7,2 \text{ t/m}^2}{1,462 \text{ t/m}^2}\right) \right] \\ S &= 0,0935 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk hasil perhitungan selengkapnya dengan kedalaman tanah yang lain disajikan dalam tabel 4.3 diatas.

Jadi Penurunan konsolidasi yang terjadi akibat beban timbunan total adalah sebesar 0,816 m pada titik bor 2.

3) Titik Bor 3

Berikut ini adalah contoh penjabaran perhitungan pada kedalaman $z = 1 \text{ m}$.

Untuk tegangan efektif vertikal pada tanah dengan kedalaman $z = 1 \text{ m}$ yaitu:

$$\text{Berat volume tanah, } \gamma = 18,37 \text{ kN/m}^3 = 1,872 \text{ t/m}^3$$

Jadi, Tegangan efektif vertikalnya, yaitu:

$$\begin{aligned} \sigma_o &= \gamma \cdot h \\ &= 1,872 \text{ t/m}^3 \cdot 1 \text{ m} \\ &= 1,872 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Untuk tambahan tegangan vertikal tanah timbunan pasir yaitu:

$$\Delta\sigma = \gamma_{\text{pasir}} \cdot h_{\text{timbunan}}$$

diketahui:

$$\gamma_{\text{pasir}} = 2 \text{ t/m}^3$$

$$h_{\text{timbunan}} = 3,6 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{maka, } \Delta\sigma &= \gamma_{\text{pasir}} \cdot h_{\text{timbunan}} \\ &= 2 \text{ t/m}^3 \cdot 3,6 \text{ m} \\ &= 7,2 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh besar penurunan akibat beban timbunan adalah;

$$S = \left[\frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma_{o'} + \Delta \sigma'}{\sigma_{o'}} \right) \right]$$

$$S = \left[\frac{0,316 \cdot 1/2 \text{ m}}{1 + 1,1} \log \left(\frac{1,872 \text{ t/m}^2 + 7,2 \text{ t/m}^2}{1,872 \text{ t/m}^2} \right) \right]$$

$$S = 0,0515 \text{ m}$$

Untuk hasil perhitungan selengkapnya dengan kedalaman tanah yang lain disajikan dalam tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4. Rekapitulasi perhitungan penurunan akibat beban timbunan pada titik bor 3

z m	H m	y t/m ³	Po t/m ²	h _{timbunan} m	γ _{pasir} t/m ³	Δp t/m ²	Cc	e _o	Sc (m)
1	0.5	1.87258	1.872579	3.6	2	7.2	0.316	1.1	0.05156
2	0.5	1.87258	2.340724	3.6	2	7.2	0.316	1.1	0.045913
3	0.5	1.87258	2.808869	3.6	2	7.2	0.316	1.1	0.04152
4	0.5	1.87258	3.277013	3.6	2	7.2	0.316	1.1	0.037977
5	0.5	1.45973	3.641947	3.6	2	7.2	0.668	1.96	0.05346
6	0.5	1.45973	4.006881	3.6	2	7.2	0.668	1.96	0.050402
7	0.5	1.45973	4.371814	3.6	2	7.2	0.668	1.96	0.047701
8	0.5	1.45973	4.736748	3.6	2	7.2	0.668	1.96	0.045294
9	0.5	1.45973	5.101682	3.6	2	7.2	0.668	1.96	0.043132
10	0.5	1.69113	5.524465	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.038362
11	0.5	1.69113	5.947248	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.036474
12	0.5	1.69113	6.370031	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.034772
13	0.5	1.69113	6.792813	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.033228
14	0.5	1.69113	7.215596	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.03182
15	0.5	1.69113	7.638379	3.6	2	7.2	0.523	1.47	0.030531
								ΣS	0.622148

Jadi Penurunan konsolidasi yang terjadi akibat beban timbunan total adalah sebesar 0,622 m pada titik bor 3.

4.2.1. Analisis Waktu 90% Konsolidasi

1) Titik bor 1

diketahui tebal lapis tanah terkonsolidasi, H= 15 m

koefisien kecepatan konsolidasi, Cv

Nilai Cv di ambil nilai Cv gabungan dari semua lapisan tanah

$$Cv \text{ lapisan tanah I} = 2,08 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}$$

$$Cv \text{ lapisan tanah II} = 1,37 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}$$

$$Cv \text{ lapisan tanah III} = 2,75 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}$$

$$\begin{aligned} Cv \text{ gabungan} &= \frac{(H_1+H_2+H_3)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{Cv_1}} + \frac{H_2}{\sqrt{Cv_2}} + \frac{H_3}{\sqrt{Cv_3}}\right)^2} \\ &= \frac{(5 \text{ m} + 4,5 \text{ m} + 5,5 \text{ m})^2}{\left(\frac{5 \text{ m}}{\sqrt{2,08 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{4,5 \text{ m}}{\sqrt{1,37 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{5,5 \text{ m}}{\sqrt{2,75 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}}}\right)^2} \\ &= 2,047 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{detik} = 6,45 \text{ m}^2/\text{tahun} \end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned} t &= \frac{Tv.H^2}{Cv} \\ t &= \frac{0,848 \cdot (15/2 \text{ m})^2}{2,047 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{detik} \times 3600 \times 24 \times 365} \\ t &= 7,38 \text{ tahun} \end{aligned}$$

dari hasil perhitungan diatas, untuk mencapai konsolidasi 90% tanpa *vertical drain* dibutuhkan waktu selama 7,38 tahun.

2) Titik bor 2

diketahui tebal lapis tanah terkonsolidasi, H= 15 m

koefisien kecepatan konsolidasi, Cv

Nilai Cv di ambil nilai Cv gabungan dari semua lapisan tanah

$$Cv \text{ lapisan tanah I} = 1,68 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}$$

$$Cv \text{ lapisan tanah II} = 2,24 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}$$

$$Cv \text{ lapisan tanah III} = 2,75 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}$$

$$\begin{aligned} Cv \text{ gabungan} &= \frac{(H_1+H_2+H_3)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{Cv_1}} + \frac{H_2}{\sqrt{Cv_2}} + \frac{H_3}{\sqrt{Cv_3}}\right)^2} \\ &= \frac{(5 \text{ m} + 4,5 \text{ m} + 5,5 \text{ m})^2}{\left(\frac{5 \text{ m}}{\sqrt{1,68 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{4,5 \text{ m}}{\sqrt{2,24 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{5,5 \text{ m}}{\sqrt{2,75 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}}}\right)^2} \\ &= 2,047 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{detik} = 6,45 \text{ m}^2/\text{tahun} \end{aligned}$$

Maka,

$$t = \frac{T_v \cdot H^2}{C_v}$$

$$t = \frac{0,848 \cdot (15/2 \text{ m})^2}{2,047 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{detik} \times 3600 \times 24 \times 365}$$

$$t = 7,38 \text{ tahun}$$

dari hasil perhitungan diatas, untuk mencapai konsolidasi 90% tanpa *vertical drain* dibutuhkan waktu selama 7,38 tahun.

3) Titik bor 3

diketahui tebal lapis tanah terkonsolidasi, H= 15 m

koefisien kecepatan konsolidasi, Cv

Nilai Cv di ambil nilai Cv gabungan dari semua lapisan tanah

Cv lapisan tanah I = $6,88 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}$

Cv lapisan tanah II = $2,24 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}$

Cv lapisan tanah III = $2,75 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}$

$$C_v \text{ gabungan} = \frac{(H_1 + H_2 + H_3)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \frac{H_3}{\sqrt{C_{v3}}}\right)^2}$$

$$= \frac{(5 \text{ m} + 4,5 \text{ m} + 5,5 \text{ m})^2}{\left(\frac{5 \text{ m}}{\sqrt{6,88 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{4,5 \text{ m}}{\sqrt{2,24 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{5,5 \text{ m}}{\sqrt{2,75 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik}}}\right)^2}$$

$$= 2,047 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{detik} = 6,45 \text{ m}^2/\text{tahun}$$

Maka,

$$t = \frac{T_v \cdot H^2}{C_v}$$

$$t = \frac{0,848 \cdot (15/2 \text{ m})^2}{2,047 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{detik} \times 3600 \times 24 \times 365}$$

$$t = 7,38 \text{ tahun}$$

dari hasil perhitungan diatas, untuk mencapai konsolidasi 90% tanpa *vertical drain* dibutuhkan waktu selama 7,38 tahun.

4.2.2. Perhitungan Waktu Proses Konsolidasi

Perhitungan akan dianalisis pada data dari tiga titik bor yang berbeda yaitu bor titik 1, bor titik 2, dan bor titik 3.

1) Bor Titik 1

Berikut ini adalah analisis waktu 90% konsolidasi pada waktu $t = 6$ bulan yang diambil pada tanah proyek IPAL Palembang.

a. Perhitungan Waktu Proses Konsolidasi Satu Dimensi

tebal lapis terkonsolidasi, $H = 15$ m

$t = 6$ bulan = 0,5 tahun

koefisien kecepatan konsolidasi, C_v

nilai C_v di ambil nilai C_v gabungan dari semua lapisan tanah

C_v gabungan = $2,047 \times 10^{-7}$ m²/detik = 6,45 m²/tahun

1. Faktor Waktu Konsolidasi

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H^2}$$

$$T_v = \frac{6,45 \text{ m}^2/\text{tahun} \times 0,5 \text{ tahun}}{(15/2 \text{ m})^2}$$

$$T_v = 0.0573$$

2. Derajat Konsolidasi U

$$U = \sqrt{\frac{4 \cdot T_v}{\pi}}$$

$$U = \sqrt{\frac{4 \times 0,0143}{\pi}}$$

$$U = 0,27 = 27 \%$$

b. Perhitungan Waktu Proses Konsolidasi Tiga Dimensi

Berikut ini adalah analisa waktu 90% konsolidasi pada waktu $t = 6$ bulan yang diambil pada tanah proyek IPAL Palembang.

tebal lapis terkonsolidasi, $H = 15$ m

koefisien kecepatan konsolidasi, C_v

nilai C_v di ambil nilai C_v gabungan dari semua lapisan tanah

C_v gabungan = $2,047 \times 10^{-7}$ m²/detik = 6,45 m²/tahun

nilai C_h di ambil nilai C_h gabungan dari semua lapisan tanah

C_h lapisan tanah I = $6,18 \times 10^{-9}$ m²/detik

$$\text{Ch lapisan tanah II} = 7,29 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}$$

$$\text{Ch lapisan tanah III} = 5,55 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}$$

$$\begin{aligned} \text{Ch gabungan} &= \frac{(H_1+H_2+H_3)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{Cv_1}} + \frac{H_2}{\sqrt{Cv_2}} + \frac{H_3}{\sqrt{Cv_3}}\right)^2} \\ &= \frac{(5 \text{ m} + 4,5 \text{ m} + 5,5 \text{ m})^2}{\left(\frac{5 \text{ m}}{\sqrt{6,18 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{4,5 \text{ m}}{\sqrt{7,29 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{5,5 \text{ m}}{\sqrt{5,55 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}}}\right)^2} \\ &= 4,127 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik} = 1,301 \text{ m}^2/\text{tahun} \end{aligned}$$

$$t = 6 \text{ bulan} = 0,5 \text{ tahun}$$

$$\text{lebar PVD, } a = 10 \text{ cm}$$

$$\text{tebal PVD, } b = 0,48 \text{ cm}$$

$$\text{Diameter PVD, } D = 1,05 \times \text{jarak antar PVD (untuk pesegi)}$$

$$D = 1,05 \times 1,5 \text{ m} = 1,575 \text{ m}$$

$$\text{Diameter ekivalen, } D_w = r$$

$$D_w = \frac{2(a+b)}{\pi} = \frac{2(10 \text{ cm} + 0,48 \text{ cm})}{\pi} = 6,67 \text{ cm} = 0,067 \text{ m}$$

$$\text{Diameter efektif, } R = D = 1,575 \text{ m}$$

$$n = D/D_w = R/r = 1,575 \text{ m}/0,067 \text{ m} = 23,59$$

1. Menentukan Faktor Waktu Radial

$$Tr = \frac{Ch \cdot t}{(R)^2}$$

$$Tr = \frac{1,301 \text{ m}^2/\text{tahun} \times 0,5 \text{ tahun}}{(1,575)^2}$$

$$Tr = 0,262$$

2. Menentukan nilai derajat Konsolidasi arah vertikal, U_v

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4Tv}{\pi}}}{\left[1 + \left(4\frac{Tv}{\pi}\right)^{2,8}\right]^{0,179}}$$

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 0,0573}{\pi}}}{\left[1 + \left(\frac{4 \cdot 0,0573}{\pi}\right)^{2,8}\right]^{0,179}}$$

$$U_v = 0,2703$$

3. Menentukan derajat konsolidasi radial, U_r

Dengan menggunakan persamaan zona smear, persamaan derajat konsolidasi, U_r adalah :

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8 T r}{F}\right)$$

dengan,

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

$$F_{(n)} = \left[\frac{(23,59 \text{ m})^2}{((23,59 \text{ m})^2-1)} \right] \ln(23,59) - \frac{(3(23,59 \text{ m})-1)}{(4(23,59 \text{ m})^2)}$$

$$F_{(n)} = 3,135$$

maka,

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8 \cdot 0,262}{3,135}\right)$$

$$U_r = 0,487$$

4. Menentukan nilai derajat konsolidasi total, U

$$U = 1 - (1 - U_v) (1 - U_r)$$

$$U = 1 - [(1 - 0,2703) (1 - 0,487)]$$

$$U = 0,6264 = 62,64 \%$$

5. Menentukan besar penurunan, S

$$S = U \cdot S_{\text{total}}$$

$$S = 0,6264 \cdot 0,843$$

$$S = 0,528 \text{ m}$$

Tabel 4.5. Hasil perhitungan penurunan waktu konsolidasi satu dimensi

H	t (bulan)	t (tahun)	Cv (m ² /thn)	Tv	U	U %
15	6	0.5	6.455768759	0.057385	0.270373	27.03727
15	8	0.666667	6.455768759	0.076513	0.3122	31.21995
15	10	0.833333	6.455768759	0.095641	0.34905	34.90497
15	12	1	6.455768759	0.114769	0.382365	38.23648
15	14	1.166667	6.455768759	0.133897	0.413001	41.30012
15	16	1.333333	6.455768759	0.153026	0.441517	44.15168
15	18	1.5	6.455768759	0.172154	0.468299	46.82993

Tabel 4.6. Hasil perhitungan penurunan waktu konsolidasi tiga dimensi

H	t bulan	t tahun	Cv	Ch m ² /thn	Tv	Uv	Tr	Ur	U %	S m
15	6	0.5	6.455	1.3016	0.057384	0.2703	0.2623	0.4879	62.640	0.5284
15	8	0.6666	6.455	1.3016	0.076512	0.3121	0.3498	0.5903	71.823	0.6059
15	10	0.8333	6.455	1.3016	0.095641	0.3488	0.4372	0.6723	78.663	0.6636
15	12	1	6.455	1.3016	0.114769	0.3820	0.5247	0.7378	83.800	0.7070
15	14	1.1666	6.455	1.3016	0.133897	0.4124	0.6121	0.7902	87.678	0.7397
15	16	1.3333	6.455	1.3016	0.153025	0.4407	0.6996	0.8322	90.616	0.7645
15	18	1.5	6.455	1.3016	0.172153	0.4671	0.7870	0.8657	92.847	0.7833

2) Bor Titik 2

Berikut ini adalah analisis waktu 90% konsolidasi pada waktu $t = 6$ bulan yang diambil pada tanah proyek IPAL Palembang.

a. Perhitungan Waktu Proses Konsolidasi Satu Dimensi

tebal lapis terkonsolidasi, $H = 15$ m

$t = 6$ bulan = 0,5 tahun

koefisien kecepatan konsolidasi, Cv

nilai Cv di ambil nilai Cv gabungan dari semua lapisan tanah

Cv gabungan = $2,047 \times 10^{-7}$ m²/detik = 6,45 m²/tahun

1. Faktor Waktu Konsolidasi

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H^2}$$

$$T_v = \frac{6,45 \text{ m}^2/\text{tahun} \times 0,5 \text{ tahun}}{(15/2 \text{ m})^2}$$

$$T_v = 0.0573$$

2. Derajat Konsolidasi U

$$U = \sqrt{\frac{4 \cdot T_v}{\pi}}$$

$$U = \sqrt{\frac{4 \times 0,0573}{\pi}}$$

$$U = 0,27 = 27 \%$$

b. Perhitungan Waktu Proses Konsolidasi Tiga Dimensi

Berikut ini adalah analisa waktu 90% konsolidasi pada waktu $t = 6$ bulan yang diambil pada tanah proyek IPAL Palembang.

tebal lapis terkonsolidasi, $H = 15 \text{ m}$

koefisien kecepatan konsolidasi, C_v

nilai C_v di ambil nilai C_v gabungan dari semua lapisan tanah

C_v gabungan = $2,047 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{detik} = 6,45 \text{ m}^2/\text{tahun}$

nilai C_h di ambil nilai C_h gabungan dari semua lapisan tanah

C_h lapisan tanah I = $5,48 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}$

C_h lapisan tanah II = $4,88 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}$

C_h lapisan tanah III = $5,55 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}$

$$\begin{aligned} C_h \text{ gabungan} &= \frac{(H_1 + H_2 + H_3)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \frac{H_3}{\sqrt{C_{v3}}}\right)^2} \\ &= \frac{(5 \text{ m} + 4,5 \text{ m} + 5,5 \text{ m})^2}{\left(\frac{5 \text{ m}}{\sqrt{5,48 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{4,5 \text{ m}}{\sqrt{4,88 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{5,5 \text{ m}}{\sqrt{5,55 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}}}\right)^2} \\ &= 4,127 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik} = 1,301 \text{ m}^2/\text{tahun} \end{aligned}$$

$t = 6 \text{ bulan} = 0,5 \text{ tahun}$

lebar PVD, $a = 10 \text{ cm}$

tebal PVD, $b = 0,48 \text{ cm}$

Diameter PVD, $D = 1,05 \times \text{jarak antar PVD (untuk pesegi)}$

$D = 1,05 \times 1,5 \text{ m} = 1,575 \text{ m}$

Diameter ekivalen, $D_w = r$

$$D_w = \frac{2(a+b)}{\pi} = \frac{2(10 \text{ cm} + 0,48 \text{ cm})}{\pi} = 6,67 \text{ cm} = 0,067 \text{ m}$$

Diameter efektif, $R = D = 1,575 \text{ m}$

$$n = D/D_w = R/r = 1,575 \text{ m}/0,067 \text{ m} = 23,59$$

1. Menentukan Faktor Waktu Radial

$$T_r = \frac{Ch \cdot t}{(R)^2}$$

$$T_r = \frac{1,301 \text{ m}^2/\text{tahun} \times 0,5 \text{ tahun}}{(1,575)^2}$$

$$T_r = 0,262$$

2. Menentukan nilai derajat Konsolidasi arah vertikal, U_v

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4Tv}{\pi}}}{[1 + (4\frac{Tv}{\pi})^{2,8}]^{0,179}}$$

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 0,0573}{\pi}}}{[1 + (\frac{4 \cdot 0,0573}{\pi})^{2,8}]^{0,179}}$$

$$U_v = 0,2703$$

3. Menentukan derajat konsolidasi radial, U_r

Dengan menggunakan persamaan zona smear, persamaan derajat konsolidasi, U_r adalah :

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8 Tr}{F}\right)$$

dengan,

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

$$F_{(n)} = \left[\frac{(23,59 \text{ m})^2}{((23,59 \text{ m})^2-1)} \right] \ln(23,59) - \frac{(3(23,59 \text{ m})-1)}{(4(23,59 \text{ m})^2)}$$

$$F_{(n)} = 3,135$$

maka,

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8 \cdot 0,262}{3,135}\right)$$

$$U_r = 0,487$$

4. Menentukan nilai derajat konsolidasi total, U

$$U = 1 - (1 - U_v) (1 - U_r)$$

$$U = 1 - [(1 - 0,2703) (1 - 0,487)]$$

$$U = 0,6264 = 62,64 \%$$

5. Menentukan besar penurunan, S

$$S = U \cdot S_{total}$$

$$S = 0,6264 \cdot 0,816$$

$$S = 0,511 \text{ m}$$

Tabel 4.7. Hasil perhitungan penurunan waktu konsolidasi satu dimensi

H	t (bulan)	t (tahun)	Cv (m ² /thn)	Tv	U	U %
15	6	0.5	6.455795428	0.057385	0.270373	27.03733
15	8	0.666667	6.455795428	0.076513	0.3122	31.22002
15	10	0.833333	6.455795428	0.095641	0.34905	34.90504
15	12	1	6.455795428	0.11477	0.382366	38.23656
15	14	1.166667	6.455795428	0.133898	0.413002	41.3002
15	16	1.333333	6.455795428	0.153026	0.441518	44.15177
15	18	1.5	6.455795428	0.172155	0.4683	46.83003

Tabel 4.8. Hasil perhitungan penurunan waktu konsolidasi tiga dimensi

H	t bulan	t tahun	Cv	Ch m ² /thn	Tv	Uv	Tr	Ur	U %	S m
15	6	0.5	6.455	1.3016	0.057384	0.2703	0.2623	0.4879	62.640	0.5112
15	8	0.6666	6.455	1.3016	0.076513	0.3121	0.3498	0.5903	71.823	0.5862
15	10	0.8333	6.455	1.3016	0.095641	0.3488	0.4372	0.6723	78.663	0.6420
15	12	1	6.455	1.3016	0.114769	0.3820	0.5247	0.7378	83.800	0.6839
15	14	1.1666	6.455	1.3016	0.133897	0.4124	0.6121	0.7902	87.678	0.7156
15	16	1.3333	6.455	1.3016	0.153026	0.4407	0.6996	0.8322	90.616	0.7395
15	18	1.5	6.455	1.3016	0.172154	0.4671	0.7870	0.8657	92.847	0.7578

3) Bor Titik 3

Berikut ini adalah analisis waktu 90% konsolidasi pada waktu $t = 6$ bulan yang diambil pada tanah proyek IPAL Palembang.

a. Perhitungan Waktu Proses Konsolidasi Satu Dimensi

tebal lapis terkonsolidasi, $H = 15$ m

$t = 6$ bulan = 0,5 tahun

koefisien kecepatan konsolidasi, C_v

nilai C_v di ambil nilai C_v gabungan dari semua lapisan tanah

C_v gabungan = $2,047 \times 10^{-7}$ m²/detik = 6,45 m²/tahun

1. Faktor Waktu Konsolidasi

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H^2}$$

$$T_v = \frac{6,45 \text{ m}^2/\text{tahun} \times 0,5 \text{ tahun}}{(15/2 \text{ m})^2}$$

$$T_v = 0.0573$$

2. Derajat Konsolidasi U

$$U = \sqrt{\frac{4 \cdot T_v}{\pi}}$$

$$U = \sqrt{\frac{4 \times 0,0573}{\pi}}$$

$$U = 0,27 = 27 \%$$

b. Perhitungan Waktu Proses Konsolidasi Tiga Dimensi

Berikut ini adalah analisa waktu 90% konsolidasi pada waktu $t = 6$ bulan yang diambil pada tanah proyek IPAL Palembang.

tebal lapis terkonsolidasi, $H = 15$ m

koefisien kecepatan konsolidasi, C_v

nilai C_v di ambil nilai C_v gabungan dari semua lapisan tanah

C_v gabungan = $2,047 \times 10^{-7}$ m²/detik = 6,45 m²/tahun

nilai C_h di ambil nilai C_h gabungan dari semua lapisan tanah

C_h lapisan tanah I = $2,98 \times 10^{-9}$ m²/detik

C_h lapisan tanah II = $4,88 \times 10^{-9}$ m²/detik

Ch lapisan tanah III = $5,55 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}$

$$\begin{aligned} \text{Ch gabungan} &= \frac{(H_1+H_2+H_3)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{Cv_1}} + \frac{H_2}{\sqrt{Cv_2}} + \frac{H_3}{\sqrt{Cv_3}}\right)^2} \\ &= \frac{(5 \text{ m} + 4,5 \text{ m} + 5,5 \text{ m})^2}{\left(\frac{5 \text{ m}}{\sqrt{2,98 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{4,5 \text{ m}}{\sqrt{4,88 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}}} + \frac{5,5 \text{ m}}{\sqrt{5,55 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{detik}}}\right)^2} \\ &= 4,127 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{detik} = 1,301 \text{ m}^2/\text{tahun} \end{aligned}$$

t = 6 bulan = 0,5 tahun

lebar PVD, a = 10 cm

tebal PVD, b = 0,48 cm

Diameter PVD, D = 1,05 x jarak antar PVD (untuk pesegi)

$$D = 1,05 \times 1,5 \text{ m} = 1,575 \text{ m}$$

Diameter ekuivalen, Dw = r

$$Dw = \frac{2(a+b)}{\pi} = \frac{2(10 \text{ cm} + 0,48 \text{ cm})}{\pi} = 6,67 \text{ cm} = 0,067 \text{ m}$$

Diameter efektif, R = D = 1,575 m

$$n = D/Dw = R/r = 1,575 \text{ m}/0,067 \text{ m} = 23,59$$

1. Menentukan Faktor Waktu Radial

$$Tr = \frac{Ch \cdot t}{(R)^2}$$

$$Tr = \frac{1,301 \text{ m}^2/\text{tahun} \times 0,5 \text{ tahun}}{(1,575)^2}$$

$$Tr = 0,262$$

2. Menentukan nilai derajat Konsolidasi arah vertikal, Uv

$$Uv = \frac{\sqrt{\frac{4Tv}{\pi}}}{\left[1 + \left(4\frac{Tv}{\pi}\right)^{2,8}\right]^{0,179}}$$

$$Uv = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 0,0573}{\pi}}}{\left[1 + \left(\frac{4 \cdot 0,0573}{\pi}\right)^{2,8}\right]^{0,179}}$$

$$Uv = 0,2703$$

Tabel 4.9. Hasil perhitungan penurunan waktu konsolidasi satu dimensi

H	t bulan	t tahun	Cv m ² /thn	Tv	U	U %
15	6	0.5	6.455909613	0.057386	0.270376	0.270376
15	8	0.666667	6.455909613	0.076514	0.312203	0.312203
15	10	0.833333	6.455909613	0.095643	0.349054	0.349054
15	12	1	6.455909613	0.114772	0.382369	0.382369
15	14	1.166667	6.455909613	0.1339	0.413006	0.413006
15	16	1.333333	6.455909613	0.153029	0.441522	0.441522
15	18	1.5	6.455909613	0.172158	0.468304	0.468304

Tabel 4.10. Hasil perhitungan penurunan waktu konsolidasi tiga dimensi

H	t (bulan)	t (tahun)	Cv	Ch m ² /thn	Tv	Uv	Tr	Ur	U %	S m
15	6	0.5	6.455	1.3016	0.057385	0.2703	0.2623	0.4879	62.640	0.3897
15	8	0.6666	6.455	1.3016	0.076514	0.3121	0.3498	0.5903	71.823	0.4468
15	10	0.8333	6.455	1.3016	0.095643	0.3488	0.4372	0.6723	78.663	0.4894
15	12	1	6.455	1.3016	0.114771	0.3820	0.5247	0.7378	83.800	0.5213
15	14	1.1666	6.455	1.3016	0.133900	0.4124	0.6121	0.7902	87.678	0.5454
15	16	1.3333	6.455	1.3016	0.153028	0.4407	0.6996	0.8322	90.616	0.5637
15	18	1.5	6.455	1.3016	0.172157	0.4671	0.7870	0.8657	92.847	0.5776

3. Menentukan derajat konsolidasi radial, Ur

Dengan menggunakan persamaan zona smear, persamaan derajat konsolidasi, Ur adalah :

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8 Tr}{F}\right)$$

dengan,

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

$$F_{(n)} = \left[\frac{(23,59 m)^2}{((23,59 m)^2-1)} \right] \ln(23,59) - \frac{(3(23,59 m)-1)}{(4(23,59 m)^2)}$$

$$F_{(n)} = 3,135$$

maka,

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8 \cdot 0,262}{3,135}\right)$$

$$U_r = 0,487$$

4. Menentukan nilai derajat konsolidasi total, U

$$U = 1 - (1 - U_v) (1 - U_r)$$

$$U = 1 - [(1 - 0,2703) (1 - 0,487)]$$

$$U = 0,5572 = 55,72 \%$$

5. Menentukan besar penurunan, S

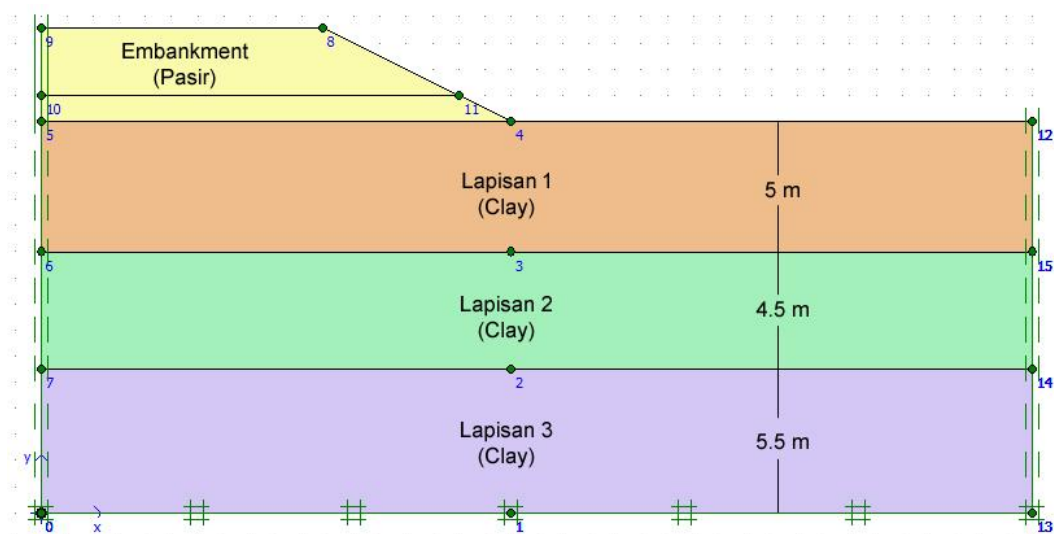
$$S = U \cdot S_{total}$$

$$S = 0,6264 \cdot 0,622$$

$$S = 0,389 \text{ m}$$

4.3. Perhitungan Penurunan Dengan Program Plaxis 2D Versi 8.2

Perhitungan penurunan konsolidasi pada program Plaxis 2D adalah pemodelan kondisi di lapangan dalam bentuk program dengan data-data yang diambil di lapangan. Pada penelitian ini pemodelan yang dilakukan mengacu pada proyek IPAL Palembang yang sedang melakukan penimbunan dengan metode *hydraulic fill*. Pemodelan dilakukan berdasarkan tiga titik bor yaitu, titik bor 1, titik bor 2, dan titik bor 3. Adapun tampilan pemodelan geometri di lapangan sebelum terjadi penurunan.



Gambar 4.14. Pemodelan geometri sebelum terjadi penurunan

Tabel 4.11. Material *properties* untuk *input* data program Plaxis 2D

Parameter	Embankment	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3
Material Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Material Type	Drained	Undrained	Undrained	Undrained
γ_{unsat}	19.61	13.94	14.38	16.59
γ_{sat}	19.61	13.94	14.38	16.59
k_x	1	0.0001	0.0001	0.0001
k_y	1	0.0001	0.0001	0.0001
E_{ref}	50000	500-600	2000	2000
ν (nu)	0.3	0.35	0.35	0.35
c_{ref}	1	7.5	2.75	3.72
ϕ (phi)	30	25	31.14	20.54

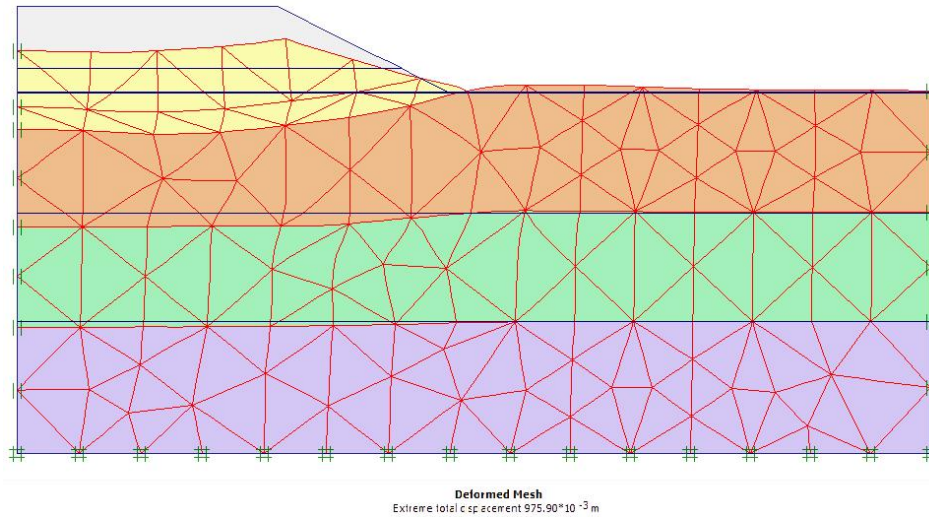
Data diatas didapatkan berdasarkan pengujian yang telah dilakukan di lapangan dan di laboratorium. Terdapat data yang diasumsikan pada program Plaxis 2D karena data yang di lapangan terbatas. Data yang dimasukkan mayoritas hampir sama namun hanya nilai γ_{unsat} yang berbeda pada setiap bor. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 4.1. sampai 4.3. sebelumnya.

Data diatas akan dimasukkan ke program Plaxis 2D pada tahap *input* data. Data dimasukkan berdasarkan jenis tanah masing-masing yang telah dimodelkan pada gambar 4.14. Setelah tahap *input data* selesai, kemudian pemodelan tersebut akan dihitung oleh program Plaxis 2D secara otomatis.

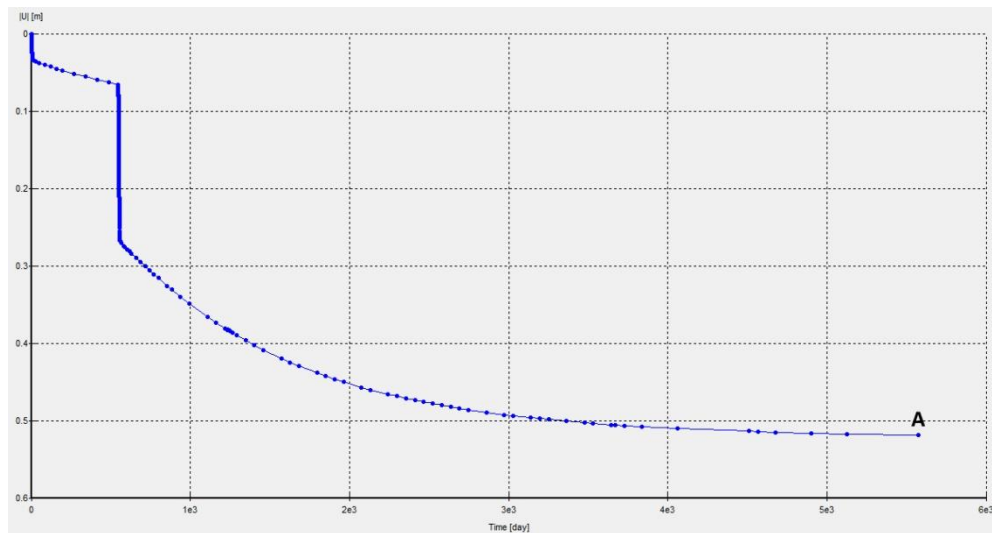
Hasil yang akan didapatkan dari perhitungan program Plaxis 2D adalah besar penurunan, gambar pemodelan setelah terjadi penurunan, dan grafik penurunan terhadap waktu

1) Titik bor 1

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan oleh program Plaxis 2D didapatkan penurunan konsolidasi total sebesar 0,975 m.



Gambar 4.15. *Output* pemodelan titik bor 1



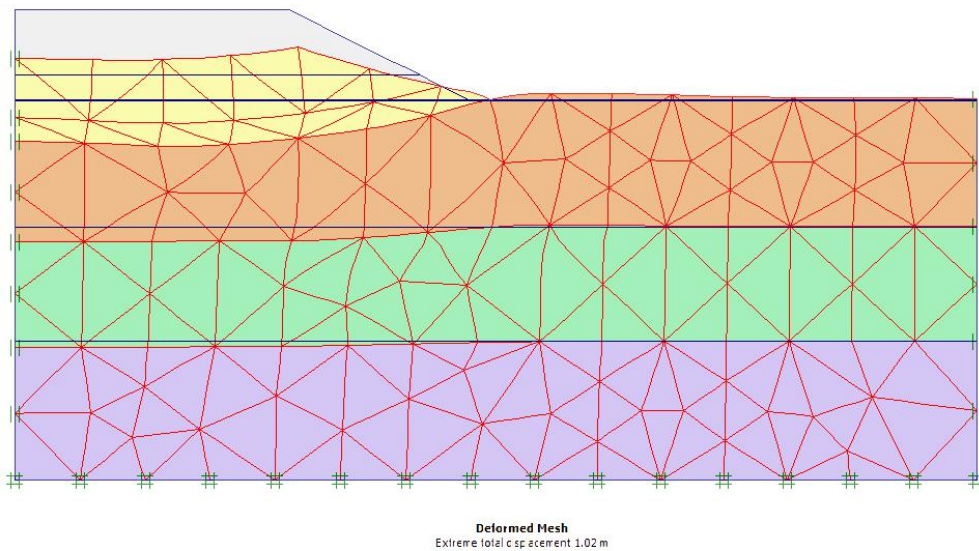
Gambar 4.16. Grafik hubungan waktu dan penurunan pada titik bor 1

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.24. di atas menyatakan bahwa penurunan konsolidasi memerlukan waktu yang sangat lama. Berdasarkan grafik di atas pada titik A waktu yang diperlukan telah melebihi 5575 hari atau sekitar 15

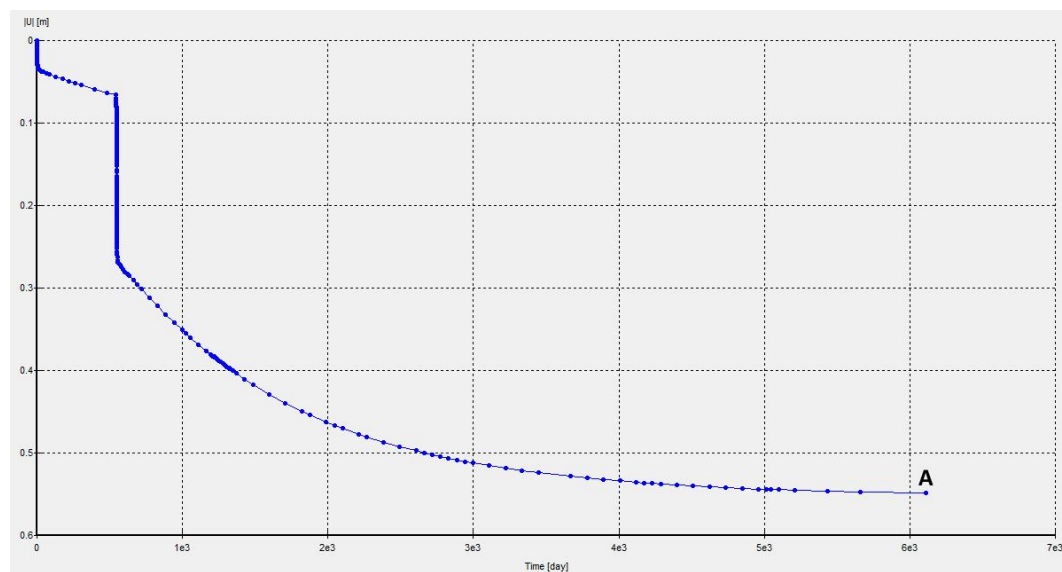
tahun untuk mengalami penurunan konsolidasi. Namun waktu tersebut belum mencukupi penurunan total yang terjadi, penurunan yang terjadi baru 0.518 m yang artinya sekitar 53% proses penurunan yang terjadi.

2) Titik bor 2

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan oleh program Plaxis 2D didapatkan penurunan konsolidasi total sebesar 1.02 m.



Gambar 4.17. *Output* pemodelan titik bor 2

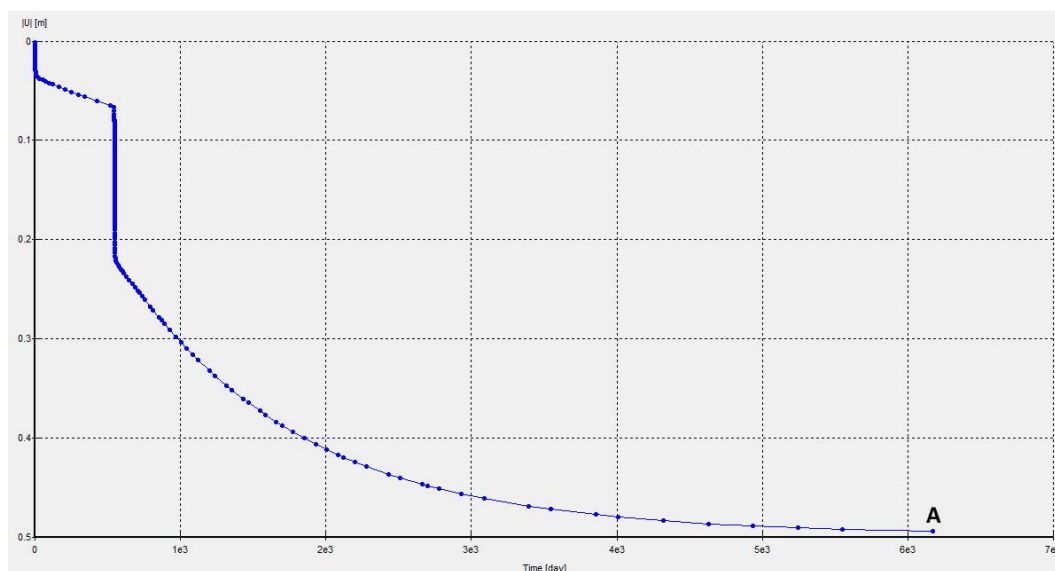


Gambar 4.18. Grafik hubungan waktu dan penurunan pada titik bor 2

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.26. di atas menyatakan bahwa penurunan konsolidasi memerlukan waktu yang sangat lama. Berdasarkan grafik diatas waktu yang diperlukan telah melebihi 6106 hari atau sekitar 17 tahun tahun untuk mengalami penurunan konsolidasi. Namun waktu tersebut belum mencukupi penurunan total yang terjadi, penurunan yang terjadi baru 0,548 m yang artinya sekitar 53% proses penurunan yang terjadi.

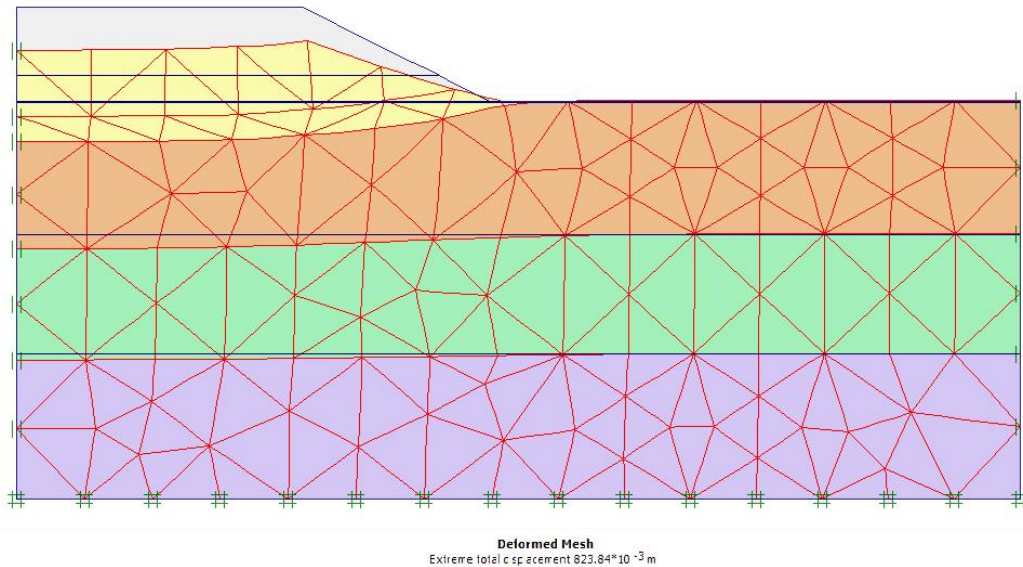
3) Titik bor 3

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan oleh program Plaxis 2D didapatkan penurunan konsolidasi total sebesar 1.10 m.



Gambar 4.19. Grafik hubungan waktu dan penurunan pada titik bor 3

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.28. di atas menyatakan bahwa penurunan konsolidasi memerlukan waktu yang sangat lama. Berdasarkan grafik di atas waktu yang diperlukan telah melebihi 6166 hari atau sekitar 17 tahun tahun untuk mengalami penurunan konsolidasi. Namun waktu tersebut belum mencukupi penurunan total yang terjadi, penurunan yang terjadi baru 0,494 m yang artinya sekitar 60% proses penurunan yang terjadi.



Gambar 4.20. *Output* pemodelan titik bor 3

4.4. Analisis Jarak Antar PVD

Vertikal drain yang dipakai adalah vertikal drain sintesis berbentuk strip dengan lebar 100 mm dan ketebalan 4.8 mm, jadi diameter ekuivalennya:

$$d_w = (a+b)/2$$

$$d_w = (100+4)/2$$

$$d_w = 52,4 \text{ mm}$$

Jarak drain didapat dari perhitungan dibawah ini:

$$T_h = t C_h / D^2$$

$$T_h = 1/8 F_n \ln (1/1-U_h)$$

$$F_n = \ln (D/d_w - 0,75)$$

Dengan menggabungkan ketiga persamaan diatas, dengan waktu yang telah didapat dari perhitungan manual yaitu 18 bulan didapat:

$$\frac{t C_h}{D^2} = \frac{1}{8} \left(\ln \frac{D}{d_w} - 0,75 \right) \ln \frac{1}{1-U_h}$$

$$\frac{1,5 \cdot 1,301}{D^2} = \frac{1}{8} \left(\ln \frac{D}{0,05} - 0,75 \right) \ln \frac{1}{1-0,9}$$

Dengan cara coba-coba didapat, $D = 1,585$ m. Vertikal drain dipasang dalam pola segitiga dengan jarak:

$$S = D/1,05$$

$$S = 1,585/1,05$$

$$S = 1,509 \text{ m} = 1,5 \text{ m}$$

4.5. Pembahasan

4.5.1. Penurunan Tanpa Menggunakan PVD

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan baik itu perhitungan manual dan perhitungan menggunakan program Plaxis 2D versi 8.2. hasil dari kedua perhitungan tersebut tidak berbeda jauh. Berikut tabel rekapitulasi dari perhitungan manual dan perhitungan program Plaxis 2D.

Tabel 4.12. Rekapitulasi perhitungan penurunan secara manual dan program Plaxis 2D

Titik Bor	Manual	Program Plaxis 2D	Selisih
Bor 1	0,843 m	0,975 m	15,65%
Bor 2	0,816 m	1,02 m	25%
Bor 3	0,622 m	0,823 m	32,31%

Berdasarkan tabel di atas, pada titik bor 1 perhitungan dengan cara manual dan program Plaxis memiliki selisih 15,65%, pada titik bor 2 memiliki selisih 25%, dan titik bor 3 memiliki selisih 32,31%. Perbedaan selisih tersebut dapat terjadi karena pada program Plaxis memiliki *input* data yang kompleks dan perhitungan yang lebih kompleks, sedangkan pada perhitungan manual hanya menghitung penurunan konsolidasi saja. Pada perhitungan program Plaxis 2D terdapat penurunan segera dan konsolidasi sekunder yang diperhitungkan sehingga nilai yang didapatkan lebih besar dari perhitungan manual. Data yang didapatkan di lapangan terbatas sehingga terdapat data yang diasumsikan pada saat *input* kedalam program Plaxis karena data di lapangan terbatas.

Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan program Plaxis waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi total sangat lama pada titik bor 1 lebih dari 15 tahun, titik bor 2 lebih dari 17 tahun, dan titik bor 3 lebih dari 17 tahun. Oleh karena itu pemasangan PVD dapat mempercepat terjadinya penurunan konsolidasi pada tanah.

Berdasarkan perhitungan manual dengan analisis menggunakan PVD dengan jarak 1.5 m didapatkan penurunan pada saat waktu 18 bulan pada titik bor 1 telah mencapai 0,783 m yang artinya penurunan konsolidasi telah mencapai 92,84% dari penurunan total yaitu 0,843 m, pada titik bor 2 telah mencapai 0,757 m yang artinya penurunan konsolidasi telah mencapai 92,84% dari penurunan total yaitu 0,816 m, dan pada titik bor 3 penurunan konsolidasi telah mencapai 0,577 m yang artinya penurunan konsolidasi yang terjadi 92,84% dari penurunan total yaitu 0,622 m.

4.5.2. Penurunan Dengan Menggunakan PVD

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan penurunan dengan menggunakan PVD memiliki waktu penurunan yang lebih cepat. Hal ini diakibatkan terjadinya aliran air didalam tanah secara radikal. Radikal artinya aliran tidak hanya terjadi secara vertikal saja, dengan adanya penanaman PVD kedalam tanah mengakibatkan air yang berada disekitar PVD akan mengalir ke PVD dimana hal ini mengakibatkan terjadinya aliran air horizontal dari segala arah sekitar PVD.

Pada titik bor 1, titik bor 2, dan titik bor 3 memiliki derajat konsolidasi yang sama berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan dalam waktu 6, 8, 10, 12, 14, 16, dan 18 bulan yaitu; 62,64%, 71,82%, 78,66%, 83,80%, 87,67%, 90,61%, dan 92,84%. Besar penurunan yang terjadi pada titik bor 1, 2, dan 3 bervariasi tergantung dengan penurunan total yang terjadi. Besar penurunan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.6., Tabel 4.8., dan Tabel 4.10.

Berdasarkan derajat konsolidasi yang terjadi pada 18 bulan di ketiga titik bor yaitu 92,84%, Hal ini berarti tanah pada proyek IPAL Palembang telah memenuhi syarat terjadinya penurunan konsolidasi dan tanah tersebut telah siap untuk dibangun bangunan konstruksi di atasnya. Penurunan konsolidasi

memerlukan waktu yang lama untuk mencapai penurunan 100%, oleh sebab itu apabila penurunan konsolidasi telah mencapai 90% penurunan tersebut telah dianggap selesai dan siap untuk dibangun.