

**Analisis Perbaikan Tanah Lunak
Menggunakan *Prefabricated Vertical Drain*
Kombinasi *Vacuum* Dan *Preloading* (Studi Kasus
Pada Proyek X) Di Perumahan Semarang Timur
(*Analysis of Soft Soil Refinement using Prefabricated Vertical
Drain Combined With Vacuum and Preloading (Case Study
on Project X) at East Semarang Housing Area*)**

Lukman Hakim¹; Maria Wahyuni²; Rinda Karlinasari³
email: 17b10083@student.unika.ac.id

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Dhuwur Semarang 50234

²Dosen Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Dhuwur Semarang 50234

³Dosen Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung
Jl. Kaligawe Raya IV Terboyo Kulon Semarang 50112

Abstrak

Tanah lunak menjadi salah satu kendala ketika proses konstruksi berlangsung di atas tanah ini seperti konsolidasi tanah yang cukup lama. Konsolidasi tanah berkaitan dengan tekanan air pori dan tekanan air pori berlebih di dalam tanah ketika saat beban bekerja. Tanah lunak memiliki tekanan air pori yang besar, sehingga diperlukan perbaikan tanah. Perbaikan tanah lunak dalam penelitian ini menggunakan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) kombinasi *vacuum* dan *preloading*. Pemodelan perhitungan dilakukan secara numeris dengan software PLAXIS V20. Tujuan penelitian untuk mengetahui besarnya penurunan tanah dan *excess pore pressure* tiap masing-masing pemodelan. Perbaikan tanah PVD kombinasi *vacuum* dan *preloading* jarak PVD 1 m, kedalaman PVD 24,5 m, tekanan *vacuum* 80 kPa, tinggi timbunan 2 m dan tinggi *preloading* 2 m. Hasil pemodelan secara numeris PVD kombinasi *preloading* ketika masa akhir konstruksi dengan total waktu 78 hari penurunan konsolidasi sebesar 0,514 m dengan *excess pore pressure* 0,6509 kN/m² dan nilai *safety factor* sebesar 1,725. Hasil pemodelan secara numeris PVD kombinasi *vacuum* ketika masa akhir konstruksi dengan total waktu 204 hari penurunan konsolidasi sebesar 0,229 m dengan *excess pore pressure* 0,8683 kN/m² dan nilai *safety factor* sebesar 3,55.

Kata kunci : Tanah Lunak, Konsolidasi, *Excess Pore Pressure*, PVD, *Preloading*, *Vacuum Consolidation*.

Abstract

Soft soil becomes one of the obstacles when the construction process takes place on this soil, such as soil consolidation which takes a long time. Soil consolidation is related to pore water pressure and excess pore water pressure in the soil when the load is applied. Soft soil has a large pore water pressure, so soil improvement is needed. Soft soil improvement in this study used a combination of vacuum and preloading Prefabricated Vertical Drain (PVD). Modeling calculations are done numerically with PLAXIS V20 software. The aim of the research is to determine the amount of land subsidence and excess pore pressure for each modeling. PVD soil improvement combination of vacuum and preloading PVD distance of 1 m, PVD depth of 24.5 m, vacuum pressure of 80 kPa, embankment height of 2 m and preloading height of 2 m. The results of the numerical modeling of PVD combined preloading at the end of construction with a total time of 78 days, consolidation settlement of 0.514 m with an excess pore pressure

of 0.6509 kN/m² and a safety factor value of 1.725. The results of numerical modeling of PVD combined vacuum at the end of construction with a total time of 204 days, consolidation settlement of 0.229 m with an excess pore pressure of 0.8683 kN/m² and a safety factor value of 3.55.

Keywords: *Soft Soil, Consolidation, Excess Pore Pressure, PVD, Preloading, Vacuum Consolidation.*

PENDAHULUAN

Menurut Rachlan (1986) dan Bina Marga (1999) tanah lunak adalah tanah yang terdiri dari tanah lempung yang memiliki kadar air yang tinggi, permeabilitas rendah, kompresibilitas tinggi dan secara visual dapat ditembus dengan ibu jari minimum sedalam 25 mm. Keberadaan tanah lunak menjadi salah satu masalah dalam bidang konstruksi. Tanah lunak selalu menjadi permasalahan sebelum memulai kegiatan pembangunan karena sifat tanah lunak memiliki daya dukung yang rendah, kompresibilitas yang besar, nilai permeabilitas yang tinggi, kembang susut yang besar dan penurunan tanah yang besar. Dari sifat tanah tersebut maka perlu dilakukan perbaikan tanah. Masalah yang sering terjadi pada tanah lunak adalah penurunan yang disebabkan proses konsolidasi. Penurunan tanah menyebabkan kegagalan struktur konstruksi yang berada di atasnya. Jika kegiatan konstruksi baru dimulai saat tanah terkonsolidasi, maka akan memerlukan waktu yang sangat lama. Proyek yang akan dilakukan penelitian adalah proyek perumahan di Kota Semarang tepatnya di Semarang Timur. Pada proyek ini akan dibangun perumahan dan pertokoan. Pada kawasan ini dahulunya merupakan area rawarawa dan diperlukan penyelidikan tanah (*soil investigation*). Penyelidikan tanah yang dilakukan yaitu Borlog, dari hasil pengujian tanah yang telah dilakukan tanah merupakan tanah lunak. Kondisi tanah merupakan tanah lunak dimana kandungan air dan udara lebih banyak dibandingkan partikel tanah padat. Kandungan air dan udara yang tinggi pada tanah lunak menyebabkan tanah tersebut

memiliki nilai kemampumampatan yang relatif tinggi yang menyebabkan tanah mengalami penurunan akibat terdispasinya air pori yang terkandung pada tanah lunak (konsolidasi tanah) jika tanah diberikan beban struktur, sehingga diperlukan perbaikan tanah. Perbaikan tanah menggunakan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) yang dikombinasikan dengan *vacuum* dan *preloading*.

TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka diperlukan dalam penulisan Tugas Akhir ini sebagai penunjang dan untuk menambah pengetahuan tentang tanah lunak, teori konsolidasi, metode perbaikan tanah lunak dan metode perhitungan PLAXIS. Tinjauan pustaka didapat dari internet, jurnal, buku-buku yang menunjang dalam penulisan. Berikut tinjauan pustaka yang digunakan:

a. Penurunan tanah segera (*Immediate Settlement-S_i*)

Penurunan segera merupakan proses pemampatan dari akibat perubahan elastis pada tanah tanpa adanya perubahan kadar air. Penurunan segera terjadi seketika saat beban diberikan. Das (1995) untuk menghitung penurunan segera didasarkan pada dasar teori elastis. Bentuk rumus dapat dilihat pada persamaan 2.1 berikut ini:

$$\rho_i = p \times B \frac{1-\mu^2}{E} \times I_p \dots \dots \dots (2.1)$$

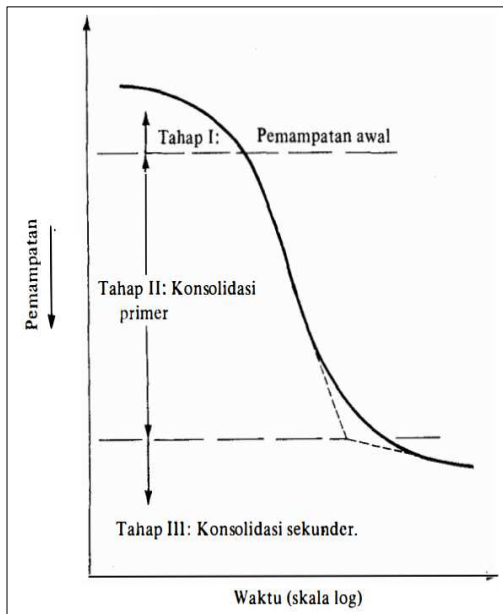
dengan:

- ρ_i = Penurunan elastis (m)
- p = Tekanan bersih yang dibebankan (t/m²)
- B = Lebar timbunan (m)

μ = Angka poisson (*poisson's ratio*)
 E = Modulus elastisitas Tanah
 (*modulus young*)

b. Penurunan Konsolidasi

Menurut Das dkk (1995) proses konsolidasi dibagi menjadi 3 tahapan yaitu tahap 1 pemampatan awal, tahapan 2 konsolidasi primer dan tahapan ke 3 konsolidasi sekunder.



Gambar 1 Grafik Hubungan Antara Waktu Dengan Pemampatan

c. Korelasi data SPT dengan Kohesi dan Sudut Geser Dalam

Kohesi tanah merupakan kekuatan tarik menarik antar partikel didalam suatu tanah. Nilai kohesi dan sudut geser dalam tanah bisa didapatkan melalui pengujian *direct shear strength test* dan *triaxial test*. Korelasi N-SPT dengan kohesi dapat dilihat pada Tabel 1 dan hubungan sudut geser dalam dan jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 1 Korelasi N-SPT dengan Kohesi Tanah Kohesif

N-SPT	Konsistensi	Kohesi Undrained (kN/m ²)
<2	<i>Very Soft</i>	<12,5
2-8	<i>Soft to Medium</i>	12,5 – 40
8-15	<i>Stiff</i>	40 – 75
15-30	<i>Very Stiff</i>	75 – 200
>30	<i>Hard</i>	> 200

Tabel 2 Korelasi N-SPT dengan Sudut Geser Tanah Pasir

Konsistensi	N-SPT	ϕ
Sangat tidak padat	< 4	< 30°
Tidak padat	4 – 10	30° - 35°
Agak padat	10 – 30	35° – 40°
Padat	30 - 50	40° – 45°
Sangat padat	> 50	> 45°

d. Permeabilitas Tanah

Permeabilitas tanah merupakan suatu sifat bahan berpori yang bisa mengalirkan rembesan dari cairan yang berupa air ataupun minyak mengalir melawati pori-pori tanah. Koefisien tanah dipilih berdasarkan penelitian Wesley pada tahun 1997 dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3 Nilai Permeabilitas Tanah

Ukuran Partikel	Koefesien Permeabilitas, k (m/s)
Pasir berlempung, pasir berlanau	$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-5}$
Pasir halus	$1 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$
Pasir kelanauan	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$
Lanau	$1 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6}$
Lempung	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$

e. Indeks Pemampatan (C_c) dan Indeks Pengembangan (C_s)

Terzaghi dan Peck (1967) memberi saran apabila tidak tersedia hasil percobaan di laboratorium bisa menggunakan rumus empiris untuk

menghitung indeks pemampatan yang dapat dilihat sebagai berikut:

1. Kondisi lempung yang struktur tanahnya tak terganggu (*undristrubed*)

$$C_c = 0,009 \times (LL-10) \dots \dots \dots (2.11)$$

2. Kondisi lempung yang terbentuk kembali (*remolded*)

$$C_c = 0,007 \times (LL-10) \dots \dots \dots (2.12)$$

f. Angka pori (*void ratio*)

Angka pori (*e*) merupakan perbandingan antara volume rongga (V_v) dengan volume butiran (V_s). Menurut Das dkk (1995) untuk menghitung angka pori dirumuskan sebagai berikut:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \dots \dots \dots (2.13)$$

Angka pori merupakan rasio antara volume pori dengan volume butir tanah. Tabel angka pori menurut Das dkk (1995) dapat dilihat pada Tabel 4

Tabel 4 Hubungan Angka Pori Dengan Berbagai Macam Jenis Tanah

Jenis Tanah	Angka Pori (e)
Pasir lepas dengan butiran seragam	0,80
Pasir padat dengan butiran seragam	0,45
Pasir berlanau yang lepas dengan butiran	0,65
Pasir yang padat dengan butiran	0,40
Lempung kaku	0,60
Lempung lembek	0,90-1,40
Tanah	0,90
Lempung Organik	2,50-3,20
<i>Glacial till</i>	0,3

g. Korelasi data SPT dengan Modulus Young dan Angka Poisson

Modulus Young adalah perbandingan antara regangan terhadap tegangan sehingga menunjukkan besar nilai elastisitas tanah.

Bowles (1977) memperkirakan nilai modulus elastisitas tanah (*E*) dan angka poisson (μ) disajikan dalam Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

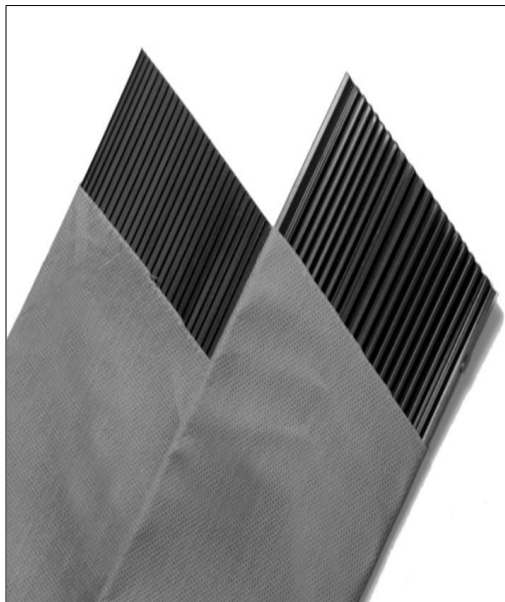
Jenis Tanah	Konsistensi	E (kN/m ²)
Lempung	Sangat lunak	300-3000
	Lunak	2000-4000
	Sedang	4500-9000
	Keras	7000-20000
	Berpasir	30000-42500
Pasir	Berlanau	5000-20000
	Tidak padat	10000-25000
	Padat	50000-100000
Pasir dan Krikil	Padat	80000-200000
	Tidak padat	50000-140000
	Lanau	2000-20000
	Loess	15000-60000
	Cadas	140000-1400000

Tabel 6 Nilai Perkiraan Angka Poisson Tanah

Jenis Tanah	Poisson (μ)
Lempung jenuh	0,40 – 0,50
Lempung tak jenuh	0,10 – 0,30
Lempung berpasir	0,20 – 0,30
Lanau	0,30 – 0,35
Pasir padat	0,20 – 0,40
Pasir kasar	0,15
Pasir halus	0,25
Batu	0,10 – 0,40
<i>Loess</i>	0,10 – 0,30

h. *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*

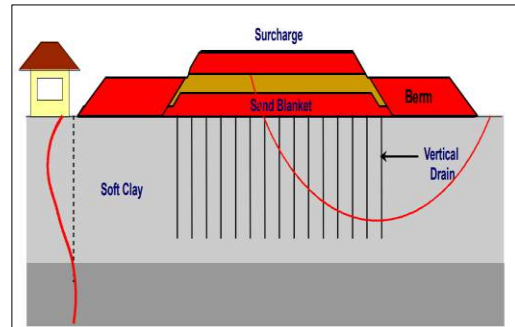
Prefabricated Vertical Drain (PVD) adalah suatu sistem drainase buatan yang dipasang secara vertikal dimasukan kedalam tanah lunak. Bahan dari PVD terbuat dari sintesis yang dibagi menjadi dua komponen penting yaitu filter dan *core* atau yang biasanya disebut jaket dan inti. Fungsi dari filter sebagai serat penyaring geotekstil yang mempermudah air masuk ke dalam inti membrane. *Core* atau inti pada PVD dilapisi dengan jaket dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Material *Prefabricated Vertical Drain*

i. *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* Kombinasi *Preloading*

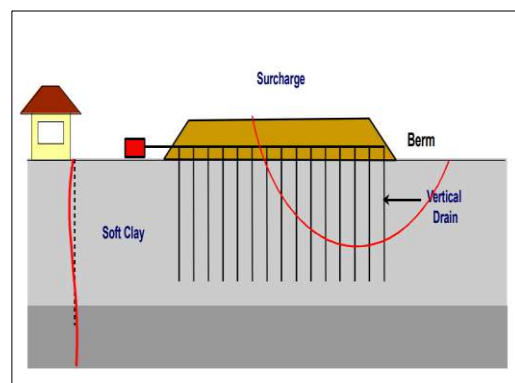
Perbaikan tanah menggunakan *preloading* dikombinasikan dengan PVD bertujuan untuk memperpendek waktu perbaikan lapisan tanah lunak yang cukup tebal. PVD akan menyebabkan terjadinya aliran pori arah horizontal dan arah vertikal yang menyebabkan air dikeluarkan lebih cepat. Kombinasi *preloading* dan PVD dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Skema Kombinasi *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain*

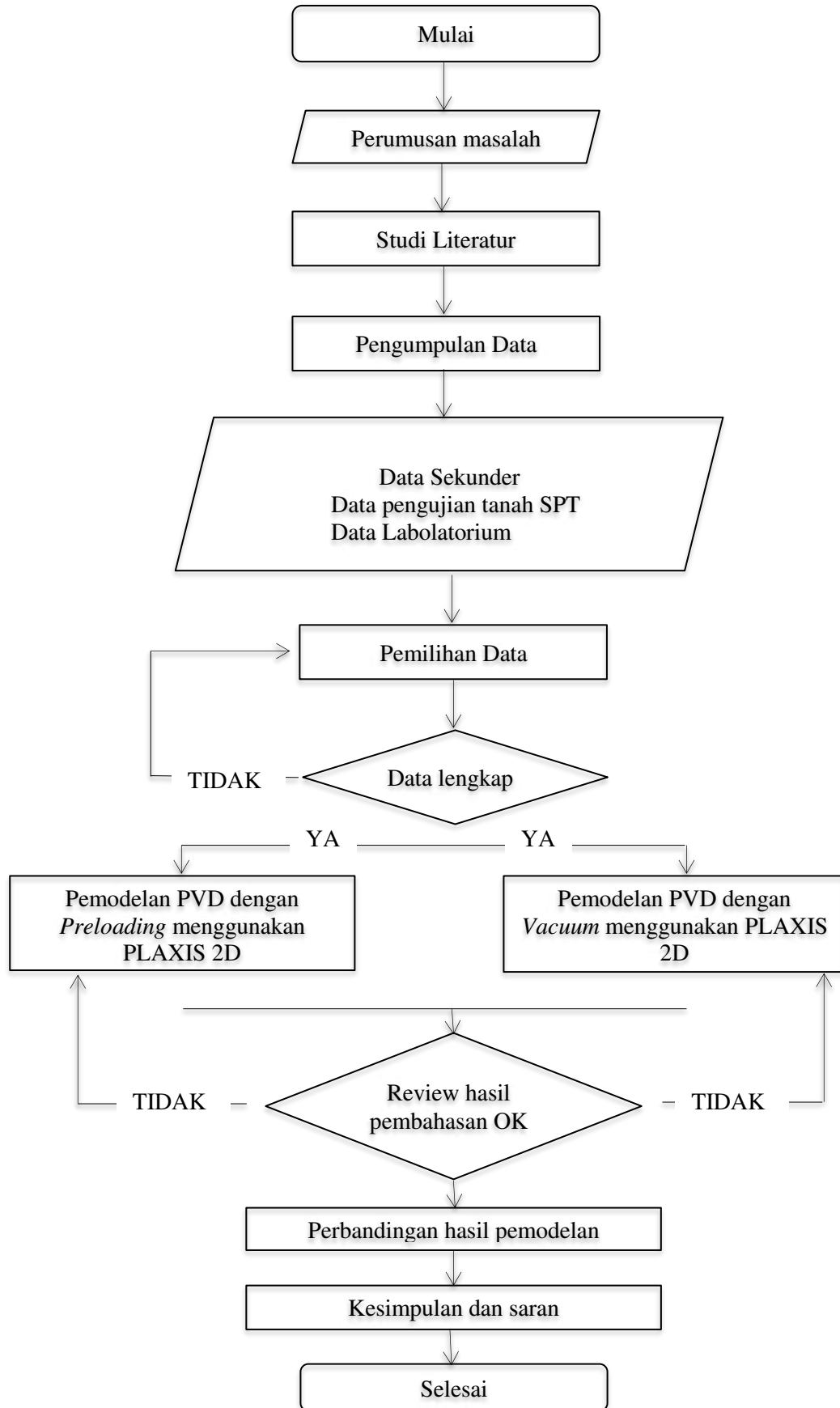
j. *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* Kombinasi *Vacuum*.

Menurut Dam et al (2006) metode *vacuum consolidation* didasarkan pada gagasan penerapan penghisapan vakum dengan massa tanah yang terisolasi untuk mengurangi tekanan atmosfer di dalamnya, sehingga dengan cara mengurangi tekanan air pori di tanah tersebut tegangan efektif dapat meningkat tanpa mengubah tegangan total. Prinsip utamanya adalah dengan menghilangkan tekanan atmosfer yang ada di tanah yang akan dikonsolidasi dan tetap bertahan dalam kondisi *vacuum* sampai waktu tertentu. Tipe tanah yang cocok untuk metode ini adalah tanah dengan konsistensi *very soft* hingga *soft*, dengan nilai N-SPT sebesar 0 – 4. Tekanan *vacuum* yang digunakan 80 kPa. Kombinasi *vacuum* dan PVD dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Skema Kombinasi *Vacuum* dan *Prefabricated Vertical Drain*

METODE PENELITIAN



ANALISIS PEMBAHASAN

Data yang digunakan pada tugas akhir ini keseluruhan merupakan data sekunder. Data sekunder dalam penelitian ini meliputi pengujian SPT dan pengujian laboratorium. Data pengujian SPT yang digunakan yaitu titik BH1. Rekapitulasi parameter tanah titik BH1 untuk pemodelan di dalam PLAXIS dapat dilihat pada Tabel 4.5. Berdasarkan hasil uji tanah timbunan dengan konsistensi *soft*, sampai 2 m merupakan tanah lempung yang tanah hasil

uji SPT titik BH1 kedalaman 0 SPT tanah dapat diklasifikasikan, klasifikasi merupakan dengan konsistensi medium, kedalaman 4 – 9,5 m merupakan tanah lempung sedikit kepasiran dengan konsistensi *soft*, kedalaman 9,5 – 2,4 m merupakan tanah lempung abu-abu dengan konsistensi *soft to medium* dan kedalaman 24,5 – 30 m merupakan tanah lempung abu-abu dengan konsistensi *stiff*. Rekapitulasi parameter tanah titik BH1 untuk pemodelan di dalam PLAXIS dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Rekapitulasi Parameter Tanah Titik BH1

Kedalaman	Nspt	Jenis Tanah	Konsistensi	E (kN/m ²)	Indeks Kompresi (C _c)
Elv (+ 0 m-2m)	10	Timbunan <i>preload</i>	<i>Stiff</i>	10000	-
0 m-2m	3	Lempung	<i>Soft</i>	2689	0.531
2m-4m	8	Lempung	<i>Medium</i>	7171	0.411
4m-9.5m	2	Lempung	<i>Soft</i>	1792	0.531
9.5m - 24.5 m	5	Lempung abu-abu	<i>Soft to Medium</i>	4482	0.426
24.5m-30m	13	Lempung abu-abu	<i>Stiff</i>	12287	0.201
Pasir Timbunan	10	Pasir Timbunan Platform	<i>Medium</i>	7584	-

Tabel 7 Rekapitulasi Parameter Tanah Titik BH1(Lanjutan)

Kedalaman	Nspt	Jenis Tanah	Konsistensi	Indeks Pengembangan(C _s)	Kohesi (C)
Elv (+ 0 m-2m)	10	Timbunan <i>preload</i>	<i>Stiff</i>	-	35
0 m-2m	3	Lempung	<i>Soft</i>	0.0531	10
2m-4m	8	Lempung	<i>Medium</i>	0.0411	15
4m-9.5m	2	Lempung	<i>Soft</i>	0.0531	10
9.5m - 24.5 m	5	Lempung abu-abu	<i>Soft to Medium</i>	0.0426	15
24.5m-30m	13	Lempung abu-abu	<i>Stiff</i>	0.0201	35
Pasir Timbunan	10	Pasir Timbunan Platform	<i>Medium</i>	-	8

Tabel 7 Rekapitulasi Parameter Tanah Titik BH1(Lanjutan)

Kedalaman	Nspt	Jenis Tanah	Konsistensi	Sudut Geser	K (m/hari)
Elv (+ 0 m-2m)	10	Timbunan Preload	<i>Stiff</i>	25°	0.864
0 m-2m	3	Lempung	<i>Soft</i>	10°	0.0001
2m-4m	8	Lempung	<i>Medium</i>	14°	0.0001
4m-9.5m	2	Lempung	<i>Soft</i>	10°	0.0001
9.5m - 24.5 m	5	Lempung abu-abu	<i>Soft to Medium</i>	14°	0.0001
24.5m-30m	13	Lempung abu-abu	<i>Stiff</i>	25°	0.001
Pasir Timbunan	10	Pasir Timbunan Platform	<i>Medium</i>	32°	4.752

Tabel 7 Rekapitulasi Parameter Tanah Titik BH1(Lanjutan)

Kedalaman	Nspt	Jenis Tanah	Konsistensi	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)
Elv (+ 0 m-2m)	10	Timbunan Preload	<i>Stiff</i>	18	19
0 m-2m	3	Lempung	<i>Soft</i>	16	17
2m-4m	8	Lempung	<i>Medium</i>	17	18
4m-9.5m	2	Lempung	<i>Soft</i>	16	17
9.5m - 24.5 m	5	Lempung abu-abu	<i>Soft to Medium</i>	16.5	17.5
24.5m-30m	13	Lempung abu-abu	<i>Stiff</i>	18	19
Pasir Timbunan	10	Pasir Timbunan Platform	<i>Medium</i>	13.7	14.7

Tabel 7 Rekapitulasi Parameter Tanah titik BH1(Lanjutan)

Kedalaman	Nspt	Jenis Tanah	Konsistensi	Poisson Ratio	Void Ratio
Elv (+ 0 m-2m)	10	Timbunan Preload	<i>Stiff</i>	0.2	-
0 m-2m	3	Lempung	<i>Soft</i>	0.3	1.69
2m-4m	8	Lempung	<i>Medium</i>	0.25	1.64
4m-9.5m	2	Lempung	<i>Soft</i>	0.3	1.69
9.5m - 24.5 m	5	Lempung abu-abu	<i>Soft to Medium</i>	0.25	1.69
24.5m-30m	13	Lempung abu-abu	<i>Stiff</i>	0.2	0.94
Pasir Timbunan	10	Pasir Timbunan Platform	<i>Medium</i>	0.3	-

Tahapan pelaksanaan analisis pemodelan di dalam PLAXIS harus dilakukan sesuai tahapan pekerjaan. Tahapan pelaksanaan konstruksi (*stage construction*) perbaikan tanah dalam pemodelan PLAXIS PVD kombinasi *preloading* dapat dilihat Tabel 8

dan *stage construction* PVD kombinasi *vacuum* dapat dilihat pada Tabel 9.

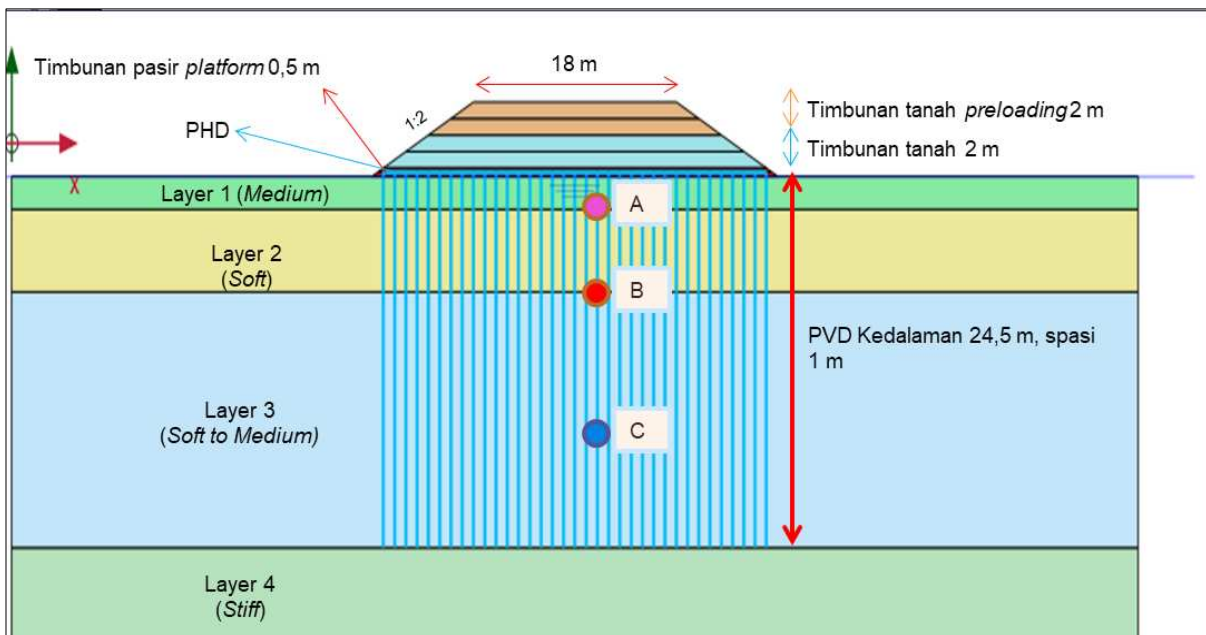
Tabel 8 Tahapan Pelaksanaan Konstruksi Pemodelan Preloading dan PVD

Staging Pelaksanaan Preloading Dengan PVD			
No	Tahapan	Hari	Total Hari
1	Initial Condition	0	0
2	Timbunan Platform 0.25 m	3	3
3	Pemasangan PVD dan PHD	14	17
4	Timbunan Platform 0.25 m	3	20
5	Timbunan Tanah 1 m	7	27
6	Timbunan Tanah 2 m	7	34
7	Timbunan Preloading 1 m	7	41
8	Timbunan Preloading 2 m	7	48
9	Konsolidasi 30 Hari	30	78
10	Konsolidasi 1 Tahun	305	383
11	Konsolidasi 3 Tahun	730	1113
12	Konsolidasi 10 Tahun	2555	3668

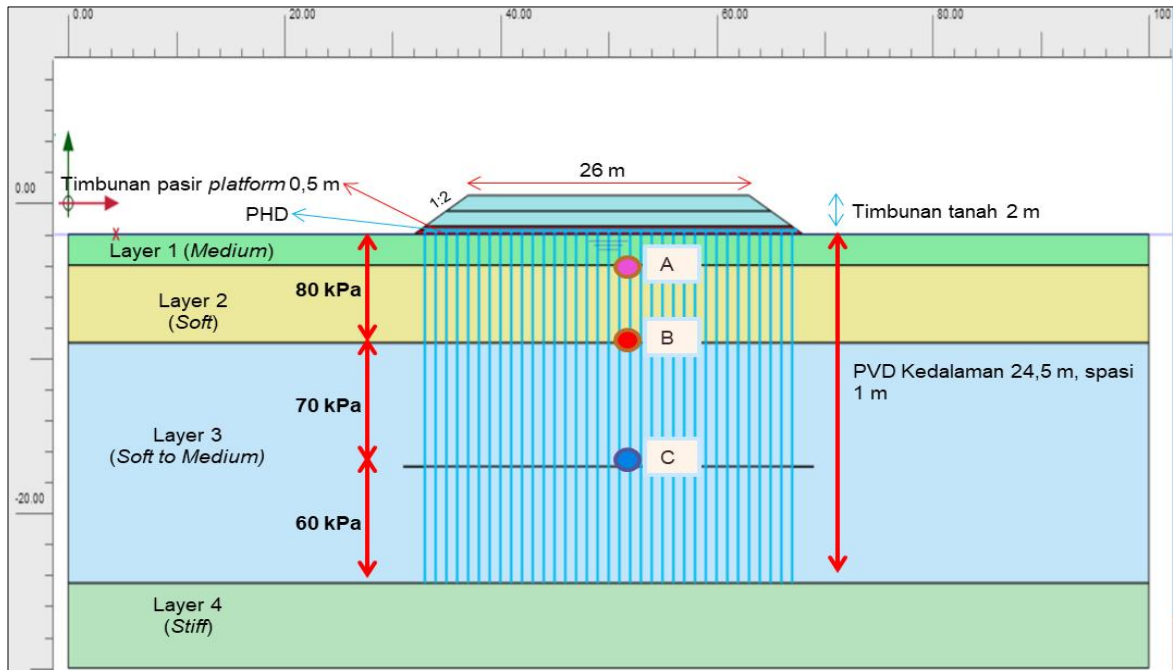
Tabel 9 Tahapan Pelaksanaan Konstruksi Pemodelan Vacuum

Staging Pelaksanaan Vacuum			
No	Tahapan	Hari	Total Hari
1	Initial Condition	0	0
2	Timbunan Platform 0.25 m	3	3
3	Pemasangan PVD dan PHD	20	23
4	Timbunan Platform 0.25 m	3	26
5.	Vacuum On	30	56
6.	Timbunan Tanah 1 m	7	63
7.	Konsolidasi Timbunan Tanah 1 m	7	70
8.	Timbunan Tanah 2 m	7	77
9.	Konsolidasi Timbunan tanah 2 m	7	84
10.	Masa Tunggu 120 Hari	120	204
11.	Vacuum off	1	205
12.	Konsolidasi 1 Tahun	285	365
13.	Konsolidasi 3 Tahun	730	1095
14.	Konsolidasi 10 Tahun	2555	3650

Perhitungan dilakukan secara numeris menggunakan *software* PLAXIS V20. Pemodelan PLAXIS PVD kombinasi *preloading* dapat dilihat pada Gambar 5. Pemodelan PLAXIS PVD kombinasi *vacuum* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 5 Pemodelan *Prefabricated Vertical Drain* Kombinasi *Preloading*

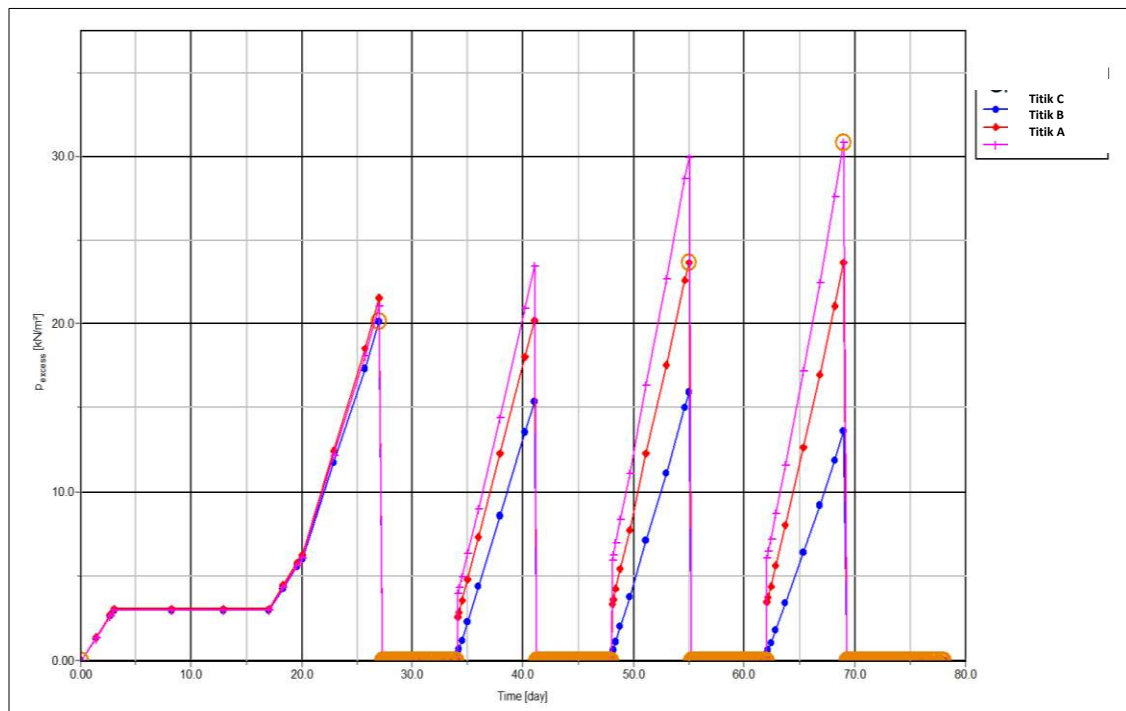


Gambar 6 Pemodelan *Prefabricated Vertical Drain* Kombinasi *Vacuum*

a. Excess pore pressure

Dalam mengecek grafik tekanan air pori dipilih salah satu titik dalam pemodelan di dalam software. Titik yang digunakan yaitu titik (52, -4, (52, -9) dan (52, -16,75), hasil *excess pore*

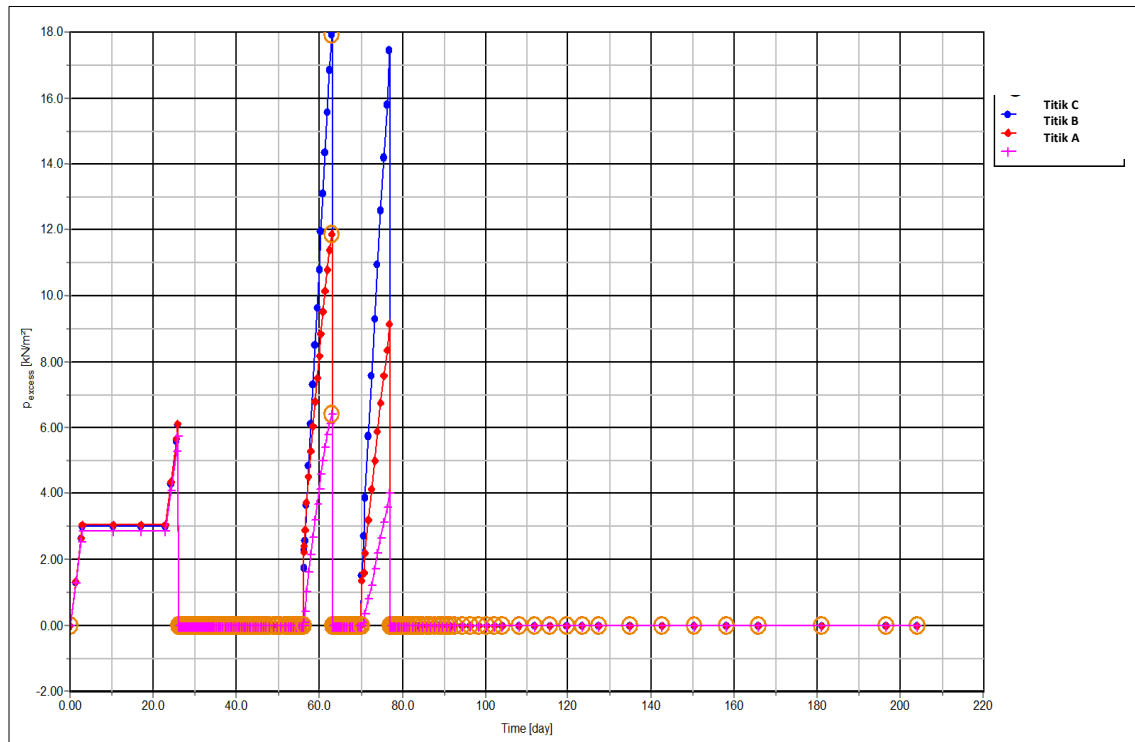
pressure vs time PVD kombinasi *preloading* dapat dilihat pada Gambar 7. hasil *excess pore pressure vs time* PVD kombinasi *vacuum* dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7 Grafik *Excess Pore Pressure vs Time* Akhir Konstruksi PVD Kombinasi *Preloading*

Hasil grafik titik A puncak *excess pore pressure* ketika phase timbunan *preloading* 2 m sebesar 30,791 kN/m², titik B puncak *excess pore pressure* ketika phase timbunan *preloading* 1 m sebesar 23,668 kN/m², titik C puncak *excess pore pressure* ketika phase timbunan tanah 1 m sebesar 20,152 kN/m². konstruksi dengan Diambil contoh titik A *excess pore pressure*

sampai masa nilai 30,791 kN/m², maka untuk konsolidasi 90 % = 30,791 x 0,1 = 3,0791 kN/m². Untuk nilai *excess pore pressure* masa akhir konstruksi sebesar 0 kN/m² < 3,0791 kN/m², maka konsolidasi 90% dapat tercapai.



Gambar 8 Grafik *Excess Pore Pressure* vs Time Akhir Konstruksi PVD Kombinasi *Vacuum*

Berdasarkan Gambar 8 hasil grafik titik A puncak *excess pore pressure* ketika phase timbunan tanah 1 m sebesar 6,42 kN/m², titik B puncak *excess pore pressure* ketika phase timbunan tanah 1 m sebesar 11,873 kN/m², titik C puncak *excess pore pressure* ketika phase timbunan tanah 1 m sebesar 17,926 kN/m². Diambil contoh titik B *excess pore pressure* sampai masa akhir konstruksi dengan nilai 6,42 kN/m², maka untuk konsolidasi 90 % = 11,873 x 0,1 = 1,1873 kN/m². Untuk nilai *excess pore pressure* masa akhir tahun. Hasil penurunan tanah PVD kombinasi *preloading* sampai masa

konstruksi sebesar 0 kN/m² < 1,1873 kN/m², maka konsolidasi 90% dapat tercapai.

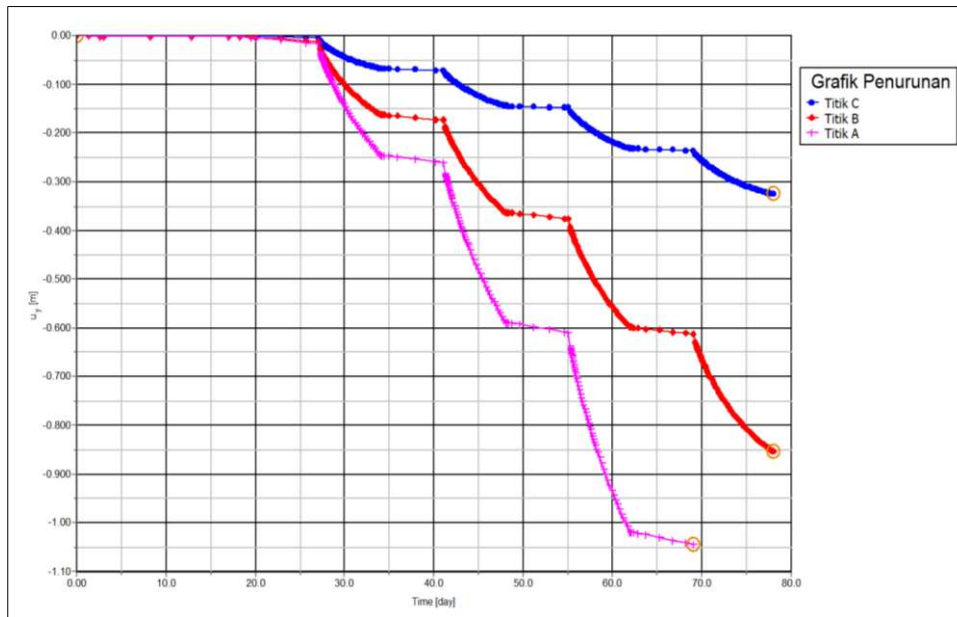
b. Total Displacement (Uy)

Total displacement PVD kombinasi *preloading* terbagi menjadi 7 yaitu ketika konsolidasi timbunan pertama, konsolidasi timbunan kedua, konsolidasi timbunan *preloading* 1, konsolidasi masa akhir konstruksi, konsolidasi 1 tahun, konsolidasi 3 tahun dan konsolidasi 10

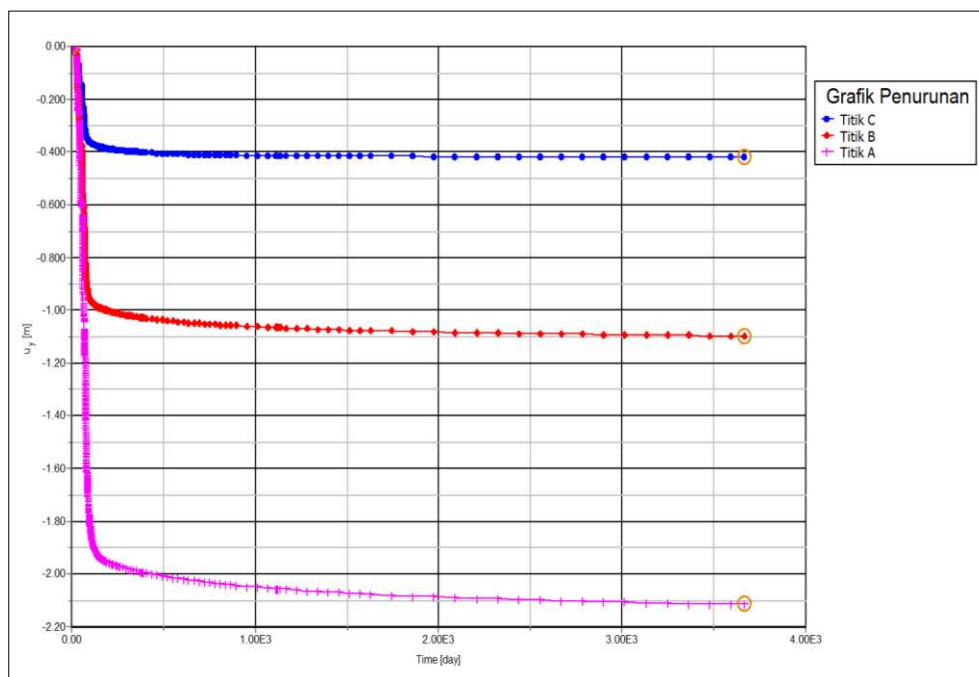
akhir konstruksi dapat dilihat pada Gambar 9. Hasil penurunan tanah PVD

kombinasi *preloading* sampai masa konsolidasi 10 tahun dapat dilihat pada Gambar 10. Total displacement PVD kombinasi *vacuum* terbagi Total penurunan dibagi menjadi 10 yaitu ketika timbunan pasir akhir *platform*, *vacuum* diaktifkan, proses konstruksi timbunan tanah pertama, konsolidasi timbunan tanah pertama, konsolidasi

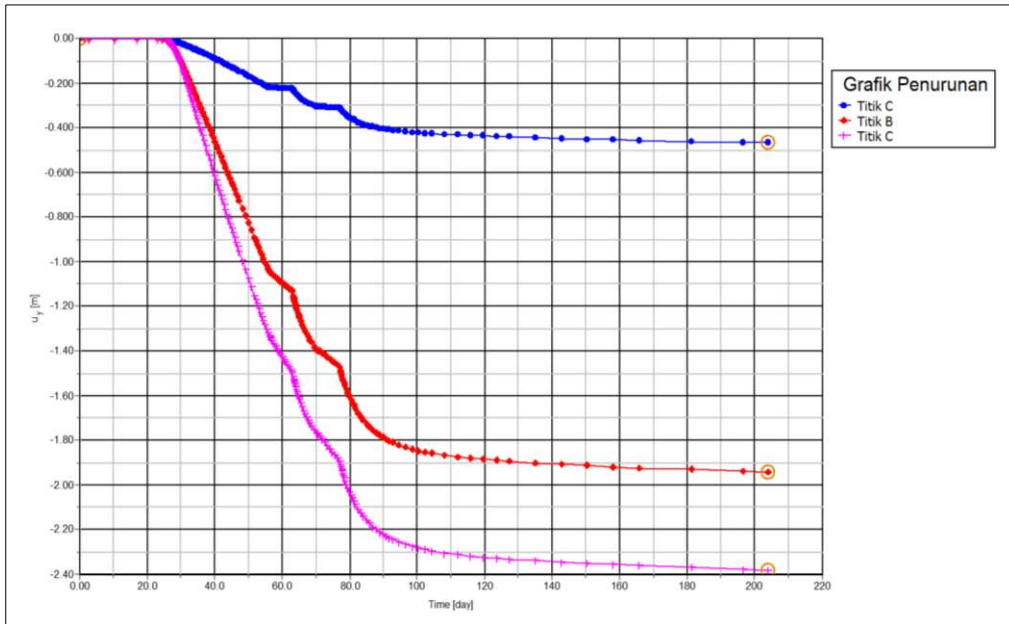
masa akhir konstruksi, konsolidasi 1 tahun, konsolidasi 3 tahun dan konsolidasi 10 tahun. Hasil penurunan tanah PVD kombinasi *vacuum* sampai masa akhir konstruksi dapat dilihat pada Gambar 11. Hasil penurunan tanah PVD kombinasi *vacuum* sampai masa konsolidasi 10 tahun dapat dilihat pada Gambar 12.



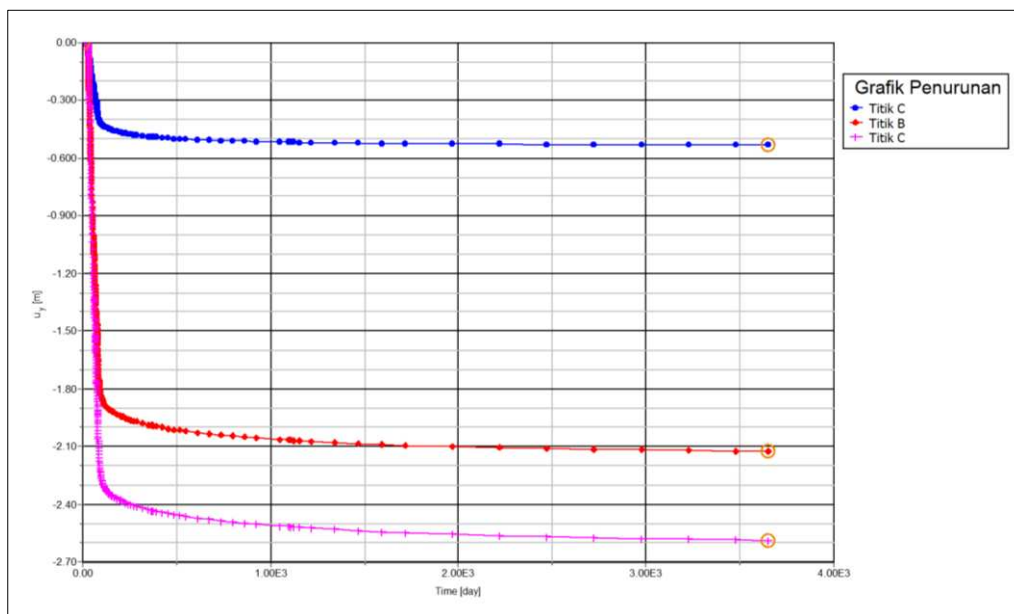
Gambar 9 Grafik Total Displacement vs Time Akhir Konstruksi PVD Kombinasi Preloading



Gambar 10 Grafik Total Displacement vs Time Sampai 10 Tahun PVD Kombinasi Preloading



Gambar 11 Grafik *Total Displacement* vs Time Akhir Konstruksi PVD Kombinasi *Vacuum*



Gambar 12 Grafik *Total Displacement* vs Time Sampai 10 Tahun PVD Kombinasi *Vacuum*

c. Rekapitulasi Hasil Analisis

Rekapitulasi hasil pemodelan total *displacement* dapat dilihat pada Tabel 11 untuk pemodelan PVD dengan *preloading* dan Tabel 12 untuk pemodelan PVD dengan *vacuum*. Berdasarkan tabel di atas hasil total konsolidasi penurunan tanah dalam jangka waktu yang panjang sama-sama

menunjukkan hasil yang kecil. Perbaikan tanah lunak menggunakan PVD kombinasi *vacuum* menunjukkan bahwa penurunan dalam jangka waktu yang panjang lebih kecil dari pada perbaikan menggunakan PVD kombinasi *preloading*.

Tabel 11 Rekapitulasi Penurunan Konsolidasi Metode PVD Kombinasi *Preloading*

No	Tahap Pelaksanaan	Total Hari	Penurunan (m)	Selisih Penurunan (m)
1.	Konsolidasi timbunan 1 m	34	0,245	0,245
2.	Konsolidasi timbunan 2 m	48	0,589	0,344
3.	Konsolidasi timbunan <i>preloading</i> 1	62	1,020	0,431
4.	Konsolidasi timbunan <i>preloading</i> 2 atau akhir konstruksi	78	1,534	0,514
5.	Konsolidasi 1 tahun	383	1,993	0,459
6.	Konsolidasi 3 tahun	1113	2,055	0,062
7.	Konsolidasi 5 tahun	1843	2,083	0,028
8.	Konsolidasi 10 tahun	3668	2,115	0,032

Tabel 12 Rekapitulasi Penurunan Konsolidasi Metode PVD Kombinasi *Vacuum*

No	Tahap Pelaksanaan	Total Hari	Penurunan (m)	Selisih Penurunan (m)
1.	Timbunan pasir akhir <i>platform</i>	26	0,004	0,004
2.	Vakum Aktif	56	1,042	1,038
3.	Timbunan tanah 1m	63	1,131	0,089
4.	Konsolidasi timbunan 1m	70	1,395	0,264
5.	Timbunan tanah 2m	77	1,487	0,092
6.	Konsolidasi timbunan tanah 2m	84	1,709	0,222
7.	Akhir konstruksi (masa tunggu)	204	1,938	0,229
8.	Konsolidasi 1 tahun	365	1,989	0,051
9.	Konsolidasi 3 tahun	1095	2,066	0,077
10.	Konsolidasi 5 tahun	1825	2,099	0,033
11.	Konsolidasi 10 tahun	3650	2,124	0,025

Rekapitulasi hasil pemodelan *excess pore pressure* dapat dilihat pada Tabel 13 untuk pemodelan PVD dengan *preloading* dan Tabel 14 untuk pemodelan PVD dengan *vacuum*. Berdasarkan Tabel 13 hasil *excess pore pressure* yang sudah dijabarkan dapat dijelaskan bahwa pada fase timbunan tanah pertama tekanan air pori yang besar berkumpul dibawah tengah timbunan tanah. Kemudian dilakukan konsolidasi

untuk timbunan tanah pertama, maka tekanan air pori dibawah timbunan berkurang. Fase selanjutnya timbunan tanah ke dua. Selama dalam fase ini tekanan air pori naik lagi, kemudian tekanan air pori menurun lagi. Nilai tekanan air pori selanjutnya seperti itu sampai tekan air pori kecil dan pusat tekanan air pori berubah di luar pemasangan PVD.

Tabel 13 Rekapitulasi *Excess Pore Pressure* Metode PVD Kombinasi *Preloading*

No	Tahap Pelaksanaan	Total Hari	Maks (kN/m ²)	Min (kN/m ²)
1.	Timbunan 1 m	27	0,000	-21,65
2.	Konsolidasi timbunan 1 m	34	2,952	-24,52
3.	Timbunan 2m	41	0,387	-38,03
4.	Konsolidasi timbunan 2 m	48	1,505	-37,90
5.	Timbunan <i>preloading</i> 1 m	55	0,8235	-53,40
6.	Konsolidasi timbunan <i>preloading</i> 1	62	0,82668	-48,31
7.	Timbunan <i>preloading</i> 2 m	69	8,442	-66,81
8.	Konsolidasi timbunan <i>preloading</i> 2 atau akhir konstruksi	78	0,6509	-48,05
9.	Konsolidasi 1 tahun	383	0,1850	-17,64
10	Konsolidasi 3 tahun	1113	0,06775	-9,523
11	Konsolidasi 10 tahun	3668	0,01595	-3,168

Berdasarkan Tabel 14 hasil *excess pore pressure* yang sudah dijabarkan dapat dijelaskan bahwa pada fase timbunan akhir *platform* tekanan air pori yang besar berkumpul di bawah tengah timbunan tanah. Ketika vakum aktif maka tekanan air pori di bawah timbunan berkurang dan pusat tekanan air pori berubah di luar pemasangan PVD. Selama fase pekerjaan konstruksi timbunan tanah nilai tekanan air pori naik turun. Nilai tekanan air pori akan terus menurun dari masa akhir konstruksi sampai waktu 10 tahun dan pusat tekanan air pori berubah di luar pemasangan PVD.

Tabel 14 Rekapitulasi *Excess Pore Pressure* Metode PVD Kombinasi *Vacuum*

No	Tahap Pelaksanaan	Total Hari	Maks (kN/m ²)	Min (kN/m ²)
1.	Timbunan pasir akhir <i>platform</i>	26	0,3410	-6,361
2.	Vakum Aktif	56	3,253	-63,69
3.	Timbunan tanah 1m	63	8,738	-83,55
4.	Konsolidasi timbunan 1m	70	1,370	-68,21
5.	Timbunan tanah 2m	77	8,219	-90,47
6.	Konsolidasi timbunan tanah 2m	84	0,4106	-71,11
7.	Akhir konstruksi (masa tunggu)	204	0,8683	-52,51
8.	Konsolidasi 1 tahun	365	0,4421	-41,12
9.	Konsolidasi 3 tahun	1095	0,07712	-26,57
10.	Konsolidasi 10 tahun	3650	0,06528	-14,42

Rekapitulasi hasil pemodelan *safety factor* dapat dilihat pada Tabel 15 untuk pemodelan PVD dengan *preloading* dan Tabel 16 untuk pemodelan PVD dengan *vacuum*.

Tabel 15 Rekapitulasi *Safety Factor* Metode PVD Kombinasi *Preloading*

No	Tahap Pelaksanaan	Total Hari	SF
1.	Akhir konstruksi	78	1,725
2.	Konsolidasi 1 tahun	383	1,904
3.	Konsolidasi 3 tahun	1113	1,907
4.	Konsolidasi 10 tahun	3668	1,901

Tabel 16 Rekapitulasi *Safety Factor* Metode PVD Kombinasi *Vacuum*

No	Tahap Pelaksanaan	Total Hari	SF
1.	Akhir konstruksi (masa tunggu)	204	3,55
2.	Konsolidasi 1 tahun	365	3,955
3.	Konsolidasi 3 tahun	1095	3,977
4.	Konsolidasi 10 tahun	3650	4,009

Berdasarkan tabel di atas *safety factor* pada akhir konstruksi semua kombinasi pemodelan memenuhi jangka pendek (*short period*) > 1,3. *Safety factor* dari 1 tahun, 3 tahun, dan 10 tahun setelah akhir konstruksi semua kombinasi pemodelan memenuhi jangka panjang (*long period*) >

1,5. Berdasarkan tabel yang sudah disajikan *safety factor* pemodelan PVD kombinasi *vacuum* lebih besar dari pemodelan PVD kombinasi *preloading*.

KESIMPULAN

Dari hasil pengolahan data dan analisis pada penelitian yang berjudul “Analisis Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan *Prefabricated Vertical Drain* Kombinasi *Vacuum* dan *Preloading* (Studi Kasus Pada Proyek X) dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Tanah lunak merupakan tanah yang memiliki kadar air yang cukup tinggi, permeabilitas yang rendah sehingga sering menimbulkan masalah di dalam konstruksi.
- Pada parameter kohesi (c), sudut geser dalam tanah (Φ), indeks kompresibilitas (C_c), indeks pengembangan (C_s) merupakan parameter tanah yang sangat penting dalam menentukan hasil dari penurunan tanah.
- Parameter permeabilitas tanah (k) merupakan parameter yang penting dalam menentukan laju disipasi air pori eksess pada lapisan tanah lunak akibat beban timbunan dan *preloading*.
- Prefabricated vertical drain* (PVD) berfungsi sebagai saluran untuk mengeluarkan air pori tanah dapat mudah keluar menuju ke permukaan tanah. *Prefabricated vertical drain* (PVD) harus dikombinasikan *preloading* atau *vacuum* supaya waktu konsolidasi tanah lebih cepat dari pada konsolidasi tanah alami.
- Dalam pemodelan perbaikan tanah lunak, tekanan air pori sangat dipengaruhi oleh beban timbunan tanah, timbunan *preload* dan tekanan *vacuum*. Pusat tekanan air pori sebelum dilakukan perbaikan tanah berada di bawah timbunan tanah. Tekanan air pori bernilai kecil menunjukkan bahwa,

air didalam tanah dapat dikeluarkan dengan maksimal.

SARAN

Adapun saran yang diberikan kepada penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan perbaikan tanah lunak menggunakan PVD kombinasi *vacuum* dan *preloading* adalah sebagai berikut:

- a. Dalam analisis pemodelan perbaikan tanah lunak sebaiknya dilakukan pemodelan analisis 3D agar hasilnya dapat lebih akurat.
- b. Bila analisis yang dilakukan sampai menghitung biaya pelaksanaan dilapangan, disarankan untuk melakukan analisis variasi jarak dan kedalaman pemasangan PVD.

DAFTAR PUSTAKA

- Aspar, N., dan Fitriani, R. (2016): Pengaruh jarak dan pola prefabricated vertical drain pada perbaikan tanah lempung lunak, *Kedudukan Teknologi Industri Rancang Bangunan dan Rekayasa Tangerang Selatan*, 1 – 48. ISSN: 1410-3680, 41-50.
- Chai, J.-C., Hayashi, S., dan Carter, JP. (2005): Characteristics of vacuum consolidation, *Proceedings of The 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, doi: 10.3233/978-1-61499-656-9, 1167-1170.
- Chu J., Yan S., dan Indraratna B. (2008): Vacuum preloading techniques – recent development and applications, *Faculty of Engineering and Information Sciences*, doi: 10.1061/40971(310)73, 1-9.
- Dam, L. T. K, Sandanbata, I., dan Kimura, M. (2006): Vacuum consolidation method - *Worldwide Practice and the Latest Improvement in Japan Annual Report of Hazama*, 12.
- Das, B. M., Endah, N., dan Mochtar, I. B. (1995): *Prinsip-prinsip rekayasa geoteknis jilid 1*. Jakarta: Erlangga, 1-78.
- Darjanto, H., Soepriyono, D., Muhtadi, A., dan Setiawan, I. (2009): Problem pelaksanaan reklamasi/timbunan di atas tanah lunak dalam rekayasa geoteknik, *Teknik Sipil Universitas Narotama Surabaya*, A-395 – A-400.
- Darwis, H. (2017): *Dasar-dasar teknik perbaikan tanah*. Jakarta: Erlangga, 1-172.

