

SOIL IMPROVEMENT ANALYSIS FOR CONTAINER YARD USING PREFABRICATED VERTICAL DRAINS (PVD) AND PRELOADING: A CASE STUDY OF RECLAIMED LAND IN THE MADURA STRAIT

ANALISIS PERBAIKAN TANAH UNTUK LAHAN PETI KEMAS DENGAN PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD) DAN PRELOADING: STUDI KASUS LAHAN REKLAMASI SEBAGAI TERMINAL PETI KEMAS DI SELAT MADURA

Muhammad Teja Pribadi Pamungkas¹, Andhy Romdani^{2*}, Zakwan Gusnadi³, Hery Setiyaji⁴, Daniel Bara Padang Allo⁵

¹⁾²⁾³⁾ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi, Kota Tasikmalaya, Indonesia 46115

⁴⁾Karawang Internasional Industrial City (KIIC), Kota Karawang, Indonesia 41361

⁵⁾Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Cenderawasih, Papua, Indonesia 99351

Email: andhyromdani@unsil.ac.id

ABSTRACT

This study aims to analyze the effectiveness of the Prefabricated Vertical Drain (PVD) and Preloading methods in accelerating the consolidation process and improving subgrade stability. The analysis was conducted using two-dimensional Finite Element Method (FEM 2D) software. The soil conditions were dominated by clay with varying consistency to the SPT test depth. The simulation results showed that under unimproved conditions, the 90% settlement reached 1,34 m with a consolidation time of approximately ± 39 years and landslides occurred on the slope, indicating unstable conditions. After improvement, the main settlement of 1,64 m occurred during a waiting period of 420 days. The remaining settlement during the operational period was 27,84 cm, still below the design limit of 30 cm, with the FK value increasing to 1,617 (FK > 1.3) during the construction period and 1,617 (FK > 1,5) during the operational period. The results show that the combination of PVD and preloading methods effectively accelerates consolidation, controls settlement, and improves the stability of soft soil in container terminal reclamation projects.

Keywords: *Finite Element Method, Preloading, Prefabricated Vertical Drain, Reclamation, Settlement*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas metode *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan *Preloading* dalam mempercepat proses konsolidasi dan meningkatkan stabilitas tanah dasar. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis *Finite Element Method* dua dimensi (FEM 2D). Kondisi tanah di dominasi oleh tanah lempung dengan konsistensi beragam sampai kedalaman uji SPT. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa perbaikan, penurunan 90% mencapai 1,34 m dengan waktu konsolidasi sekitar ± 39 tahun dan terjadinya kelongsoran pada lereng, menandakan kondisi tidak stabil. Setelah dilakukan perbaikan, penurunan utama sebesar 1,64 m terjadi selama masa tunggu 420 hari. Sisa penurunan pada masa operasional sebesar 27,84 cm, masih di bawah batas desain 30 cm, dengan nilai FK meningkat menjadi 1,617 (FK > 1,3) pada masa konstruksi dan 1,617 (FK > 1,5) pada masa operasional. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi metode PVD dan *preloading* efektif mempercepat konsolidasi, mengendalikan penurunan, dan meningkatkan kestabilan tanah lunak pada proyek reklamasi terminal peti kemas.

Kata Kunci: *Finite Element Method, Preloading, Prefabricated Vertical Drain, Penurunan, Reklamasi*

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara maritim memiliki peran strategis dalam perdagangan global, yang mendorong pengembangan infrastruktur logistik, termasuk terminal peti kemas. Salah satu proyek strategis di sektor ini adalah pembangunan Terminal Peti Kemas di Selat Madura, Jawa Timur. Proyek ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas logistik nasional (Laksono, 2023).

Reklamasi pantai dilakukan untuk memperluas lahan terminal peti kemas melalui proses pengurukan dan penimbunan di area perairan. Tantangan utama proses ini adalah kondisi tanah dasar berupa tanah lunak yang

memiliki daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan potensi penurunan besar (Gusnadi et al., 2021). Tanpa perbaikan tanah yang memadai, risiko deformasi dan instabilitas dapat mengganggu operasional terminal peti kemas di masa mendatang.

Perbaikan tanah merupakan tahapan krusial dalam pekerjaan reklamasi, terutama ketika hasil investigasi geoteknik menunjukkan bahwa kondisi tanah di bawah dasar laut berada dalam kategori sangat buruk. Langkah ini menjadi suatu keharusan dari sudut pandang rekayasa teknik, karena keberhasilan pembangunan fasilitas pelabuhan sangat bergantung pada kestabilan permukaan

tanah hasil reklamasi. Permukaan yang stabil diperlukan untuk mencegah terjadinya deformasi tanah yang dapat mengganggu integritas struktur di atasnya. Dalam proyek pelabuhan, tantangan geoteknik ini menjadi semakin penting mengingat fasilitas pelabuhan tergolong konstruksi tugas berat, yang harus mampu menahan beban dinamis dari aktivitas bongkar muat kargo serta operasi peralatan berat. Oleh karena itu, daya dukung tanah yang memadai mutlak diperlukan untuk menjamin keamanan dan keberlanjutan operasional infrastruktur pelabuhan tersebut. Berbagai metode perbaikan tanah tersedia dan dapat diaplikasikan secara tepat guna untuk memenuhi tuntutan teknis tersebut, tergantung pada kondisi tanah dan tujuan desain yang diharapkan (Rahardjo & Karlinasari, 2018).

Salah satu pendekatan yang diterapkan untuk mempercepat konsolidasi dan meningkatkan daya dukung tanah hasil reklamasi adalah kombinasi metode *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*, dan *Preloading*. PVD berfungsi sebagai saluran drainase vertikal yang mempercepat disipasi tekanan air pori, sehingga mempercepat proses konsolidasi tanah. Studi menunjukkan bahwa penggunaan PVD dapat mempercepat waktu penurunan konsolidasi dan meningkatkan kepadatan tanah dasar (Zhafirah & Amalia, 2019).

Metode ini sangat penting dalam proyek reklamasi Terminal Peti Kemas Maspion karena mampu meminimalkan penurunan dan meningkatkan daya

dukung tanah bagi konstruksi pelabuhan. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas PVD dan *preloading* dalam meningkatkan stabilitas tanah reklamasi untuk mendukung keberhasilan pembangunan terminal peti kemas.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis kondisi tanah dasar berdasarkan hasil pengujian SPT sebagai dasar dalam analisis daya dukung, penurunan dan stabilitas. Analisis untuk timbunan tanpa perbaikan menggunakan analisis metode analitik dan untuk analisis timbunan dengan perbaikan menggunakan bantuan *software FEM 2D* (Chakraborty et al., 2023). Hasil analisis memperhatikan kriteria desain. Kriteria desain untuk daya dukung, besaran konsolidasi, dan faktor keamanan (FK) berdasarkan pada SNI geoteknik (SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik, 2017). Adapun untuk batas *residual settlement* berdasarkan pada CIRIA *Hydraulic Fill Manual* (A. N. v. d. K. Jan van 't Hoff, 2012).

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian dan Kondisi Tanah Dasar

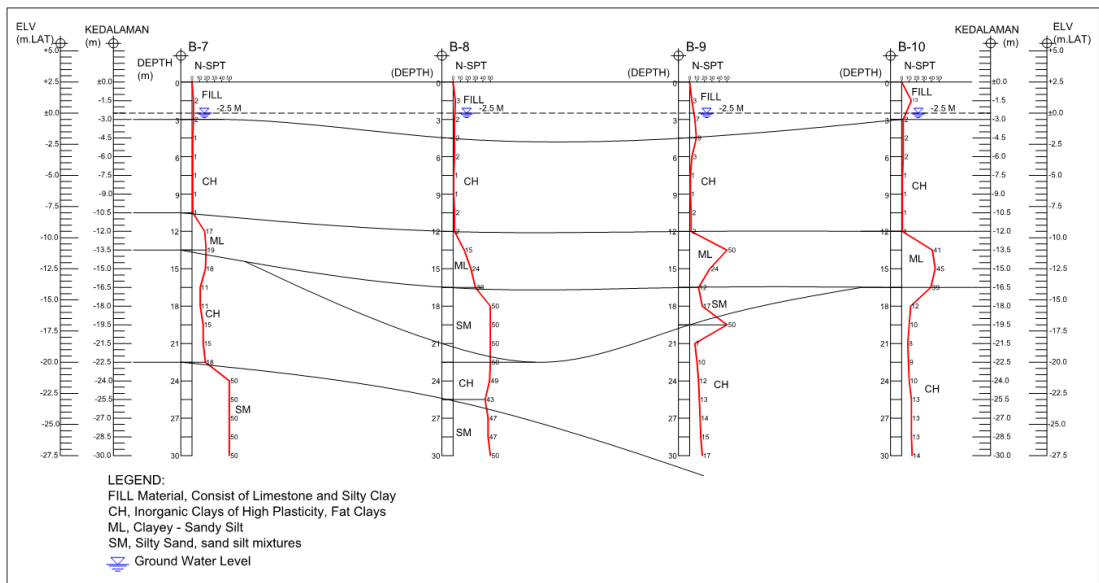
Penelitian Lokasi penelitian ini dilakukan di Jl. Beta, Kawasan Industri Maspion V, Manyar, Gresik, Jawa Timur. Dengan luas lahan ±32 Ha. Peta lokasi proyek dapat dilihat pada Gambar 1. Interpretasi data tanah dilakukan berdasarkan data penyelidikan tanah SPT di lokasi. Adapun titik lokasi yang dijadikan acuan untuk tahap analisis hanya pada titik *Bore-Hole 7, 8, 9, 10*.



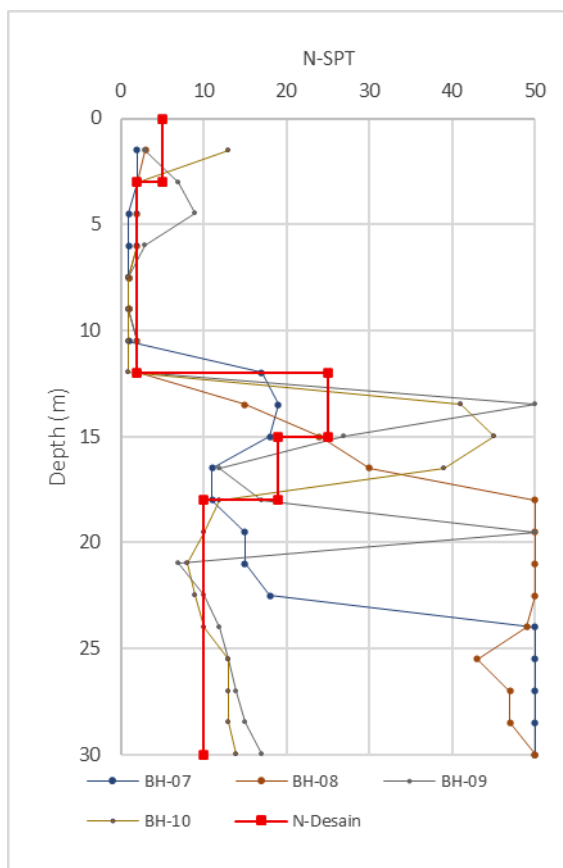
Gambar 1. Lokasi Penelitian

Berdasarkan hasil interpretasi data penyelidikan tanah, Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan tanah di lokasi didominasi berupa tanah lempung. Penentuan nilai N-Desain untuk lapisan mempertimbangkan nilai rata – rata N pada setiap lapisan dan pendekatan nilai hasil yang merepresentasikan nilai N pada lapisan agar menghasilkan nilai N yang lebih konservatif. Tanah lempung dengan konsistensi lunak di jumpai pada kedalaman 0 – 2,5 m. Tanah lempung konsistensi sangat lunak berada pada kedalaman 2,5 – 12 m. Pada

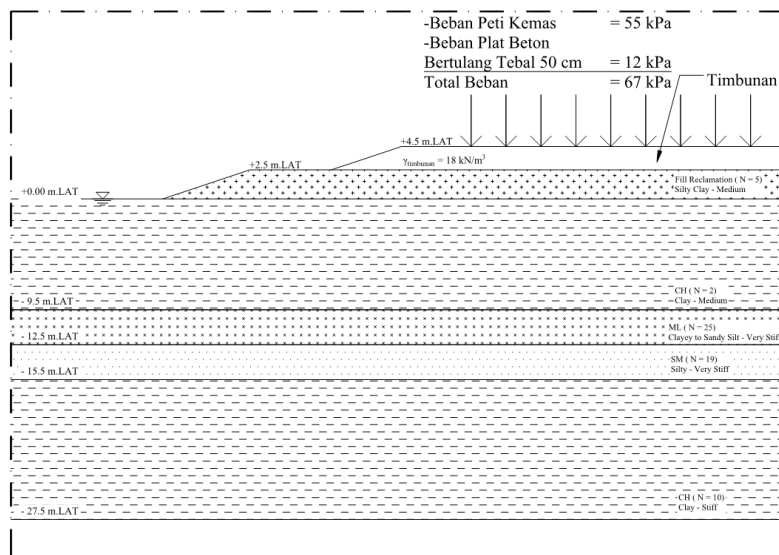
kedalaman 12 – 15 m terdapat tanah lempung-lanau kepasiran dengan konsistensi *very stiff*. Pada kedalaman 15 – 18 m ada jenis tanah *silty sand* dengan konsistensi *very stiff*. Pada lapisan di kedalaman 18 –30 m terdapat lapisan lempung dengan konsistensi *stiff*. Adapun hasil stratifikasi dan bentuk stratifikasi yang dijadikan acuan dalam analisis untuk parameter tanah. **Error! Reference source not found.** menunjukkan geometri yang ada di lokasi penelitian.



Gambar 1 Stratifikasi Tanah Dasar



Gambar 2 Penentuan Nilai N-Desain



4 POTONGAN TANPA PERBAIKAN
Scale: 1:300

Gambar 4. Geometri Model Kondisi Tanpa Perbaikan

Parameter Tanah

Parameter tanah yang digunakan untuk analisis ditentukan berdasarkan dari kondisi tanah dan pendekatan nilai tipikal parameter tanah. Penentuan berat isi tanah disesuaikan dengan kondisi tanah dan konsistensi tanah yang kemudian diambil pada kisaran 15 – 20 kN/m³ (Ameratunga et al., 2016). Sedangkan untuk modulus Young digunakan berdasarkan nilai tipikal sesuai konsistensi tanah (Look, 2007). Untuk tanah lempung, penentuan kohesi efektif diambil pada kisaran 0 – 10 kPa dan sudut geser efektif diambil pada kisaran 17 - 32° (Ameratunga et al., 2016). Untuk nilai koefisien permeabilitas tanah vertikal (k_v) pada tanah lempung dihasilkan dari nilai tipikal berdasarkan kondisi tanah dan

diasumsikan $8,4 \times 10^{-4}$ m/day, dan untuk koefisien permeabilitas tanah horizontal (k_h) dihasilkan dari $2 \times k_v$ (Look, 2007). Nilai indeks kompresi (C_c) dapat dihitung dari *Compression Ratio* (CR) dengan persamaan **Error! Reference source not found.** di mana e_0 adalah rasio pori awal tanah. hubungan ini menunjukkan bahwa *compression ratio* merupakan bentuk sederhana dari indeks kompresi yang sudah dinormalisasi terhadap kondisi awal tanah. Karena nilai CR dan e_0 telah di dapat maka C_c dapat ditentukan secara langsung. Penentuan nilai indeks *swelling* untuk lapisan tanah didasarkan pada persamaan **Error! Reference source not found.**

$$C_c = CR \times (1 + e_0) \quad (1)$$

$$C_s = 1/5 \times C_c \quad (2)$$

Rekapitulasi parameter yang digunakan untuk analisis ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Parameter Tanah

Parameter Tanah	Lapis 1	Lapis 2	Lapis 3	Lapis 4	Lapis 5	Platform	Timbunan	Unit
	<i>Silty Clay</i>	<i>Clay</i>	<i>Clayey to Sandy Silt</i>	<i>Silt</i>	<i>Clay</i>	<i>Sand</i>	<i>Sand</i>	
Soil Model	<i>Hardening Soil</i>	<i>Hardening Soil</i>	<i>Hardening Soil</i>	<i>Hardening Soil</i>	<i>Hardening Soil</i>	<i>Mohr-Coloumb</i>	<i>Mohr-Coloumb</i>	-
Type	<i>Undrained A</i>	<i>Undrained A</i>	<i>Undrained A</i>	<i>Undrained A</i>	<i>Undrained A</i>	<i>Drained</i>	<i>Undrained B</i>	-
Depth	0 s/d 2.5	2.5 s/d 12	12 s/d 15	15 s/d 18	12 s/d 30	0.5 s/d 0	2 s/d 0.5	m
NSPT	5	2	25	19	10		-	-

Parameter Tanah	Lapis 1	Lapis 2	Lapis 3	Lapis 4	Lapis 5	Platform	Timbunan	Unit
	<i>Silty Clay</i>	<i>Clay</i>	<i>Clayey to Sandy Silt</i>	<i>Silt</i>	<i>Clay</i>	<i>Sand</i>	<i>Sand</i>	
Konsistensi	<i>Medium</i>	<i>Very Soft</i>	<i>Very Stiff</i>	<i>Very Stiff</i>	<i>Stiff</i>	<i>Pasir Batu</i>	<i>Fine Sand</i>	-
γ_{unsat}	16	15	20	19	17	18	18	(kN/m ³)
γ_{sat}	16	15	20	19	17	20	20	(kN/m ³)
e_o	1,30	1,90	0,70	0,88	1,15	0,50	0,50	
C_u	25	10	183	163	83	-	55,00	(kN/m ²)
C'	3,13	1,25	8,33	6,33	5,00	5,00	-	(kN/m ²)
ϕ'	22	19	29	28	27	45	-	(°)
CR	0,19	0,24	-	-	-	-	-	
C_c	0,437	0,696	0,030	0,036	0,044	-	-	
C_s	0,087	0,139	0,006	0,007	0,009	-	-	
C_r	0,087	0,139	0,006	0,007	0,009	-	-	
μ	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
E	1500	1200	30000	27500	11500	20000	10000	(kN/m ²)
E_{oed}	1200	960	24000	22000	9200	-	-	(kN/m ²)
E_{ur}	4500	3600	90000	82500	34500	-	-	(kN/m ²)
C_v	1,00E-07	1,00E-07	2,55E-08	2,00E-08	1,18E-08	-	-	m ² /s
C_h	2,00E-07	2,00E-07	5,09E-08	4,00E-08	2,36E-08	-	-	m ² /s
k_v	8,64E-04	8,64E-04	7,33E-07	6,28E-07	8,88E-07	8,60	8,64E-02	m/day
k_h	1,73E-03	1,73E-03	1,47E-06	1,26E-06	1,78E-06	8,60	8,64E-02	m/day

Parameter hasil Korelasi Nilai Empiris dari Nilai N-SPT

Data Hasil Uji Laboratorium yang digunakan

Pemodelan FEM 2D

Pemodelan dua dimensi (2D) pada *Finite Element Method* merupakan pendekatan yang umum digunakan dalam studi geoteknik, khususnya untuk kasus yang dapat diasumsikan memiliki kondisi *plane strain* atau *axisymmetric*. Dalam pemodelan *plane strain*, deformasi dianggap hanya terjadi dalam bidang, dan tidak terjadi regangan sepanjang arah tegak lurus terhadap bidang tersebut (misalnya, pada galian memanjang atau perbaikan tanah dengan drainase vertikal). Pada prinsipnya FEM 2D dengan pendekatan model *Mohr-Coulomb*, *Soft Soil*, atau *Hardening Soil Model* untuk memodelkan perilaku tanah (Chakraborty et al., 2023).

Dalam analisis geoteknik untuk tanah lunak yang diperkuat dengan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*, pemodelan numerik langsung setiap elemen drainase sering kali menghadapi kendala teknis. Maka dari itu, penelitian ini menerapkan Metode (Chai et al., 2001) sebagai alternatif yang efisien. Metode ini tidak memodelkan setiap PVD secara fisik, melainkan menyederhanakan pengaruhnya melalui konsep *equivalent vertical hydraulic conductivity (k_{ve})*, atau permeabilitas vertikal ekuivalen. Akibat dari kondisi tanah dasar yang bervariasi, persamaan berikut digunakan dalam tahapan untuk mendapatkan nilai permeabilitas ekuivalen.

$$k_{h(eq)} = \frac{1}{H} ((k_{h1} \times H_1) + (k_{h2} \times H_2) + \dots + (k_{hn} \times H_n)) \quad (3)$$

$$k_{v(eq)} = \frac{1}{\frac{H_1}{k_{v1}} + \frac{H_2}{k_{v2}} + \dots + \frac{H_n}{k_{vn}}} \quad (1)$$

Di mana $k_{h(eq)}$ adalah permeabilitas tanah rata – rata horizontal, $k_{v(eq)}$ adalah permeabilitas tanah rata – rata vertikal, k_h adalah permeabilitas tanah horizontal, k_v adalah permeabilitas tanah vertikal.

Ekuivalensi permeabilitas dengan PVD berdasarkan metode (Chai et al., 2001), di mana membuat

$$D_e = 1,128 \times \text{spasi} \quad (2)$$

$$d_w = \frac{2(a + b)}{\pi} \quad (3)$$

$$n = \frac{D_e}{d_w} \quad (4)$$

$$d_s = 1,5 \times d_w \quad (5)$$

$$s = \frac{d_s}{d_w} \quad (6)$$

$$k_r = \frac{k_c}{10} \quad (7)$$

$$k_s = 0,5 \times k_r \quad (8)$$

Di mana a adalah lebar PVD, b adalah tebal PVD, D_e adalah diameter ekuivalen pengaruh spasi, d_w adalah diameter PVD dari bentuk PVD, n adalah rasio jarak antar PVD terhadap diameter drain, d_s adalah diameter smear zone, s adalah rasio antara diameter zona smear dan diameter drain, k_r adalah koefisien permeabilitas

permeabilitas pada kluster tanah setara dengan permeabilitas tanah dengan pengaruh PVD. Adapun untuk menghitung nilai μ didapati persamaan (2) sampai (8)(8).

horizontal tanah tidak terganggu, k_s adalah koefisien permeabilitas horizontal zona smear.

Untuk mendapatkan nilai permeabilitas tanah terpengaruh PVD berdasarkan metode (Chai et al., 2001) didapatkan berdasarkan persamaan (9) dan (10).

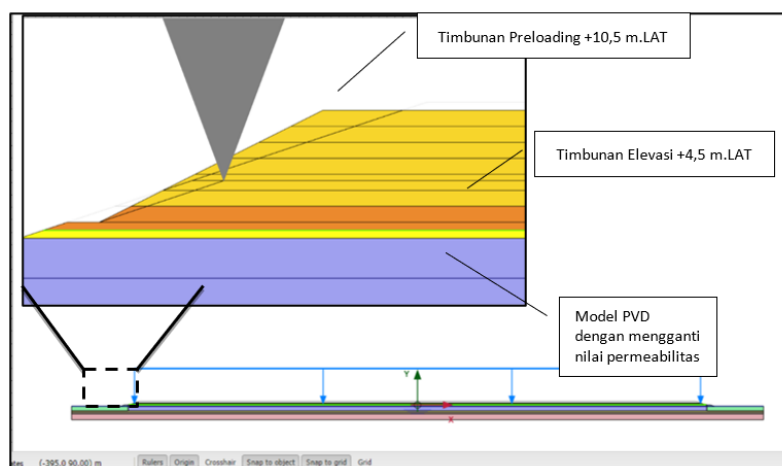
$$\mu = \ln \frac{n}{s} + \frac{k_{h(eq)}}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4} + \frac{2l^2 k_{h(eq)}}{3q_w} \quad (9)$$

$$k_{ve'} = \left(1 + \frac{2,5l^2 k_{h(eq)}}{\mu D_e^2 k_{v(eq)}} \right) k_{v(eq)} \quad (10)$$

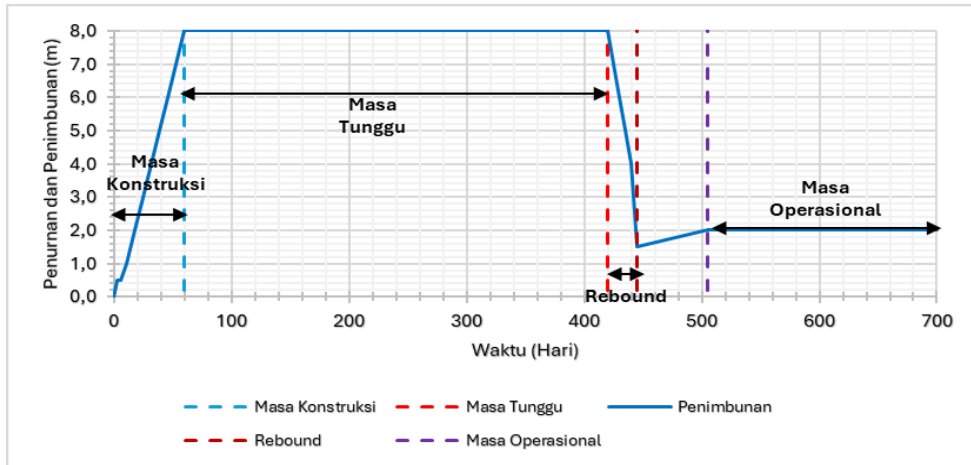
Di mana μ adalah faktor hambatan aliran, q_w adalah kapasitas aliran drain (discharge capacity of PVD), D_e adalah diameter ekuivalen area drainase, l adalah panjang drain efektif di lapisan tanah kompresibel, $k_{ve'}$ adalah permeabilitas vertikal ekuivalen.

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan di atas bisa didapat nilai permeabilitas tanah pengaruh PVD ($k_{ve'}$) sebesar $3,22 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 0,27793 \text{ m/day}$.

Pemodelan dan tahapan pekerjaan pada masa konstruksi di ilustrasikan dalam Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Geometri Model Perbaikan Tanah



Gambar 6. Grafik Pembebanan Pada Masa Konstruksi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Daya Dukung

Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menerima atau menahan beban di atasnya dan tidak

$$Q_{ult} = cN_c + \gamma D_f N_q + 0,5\gamma B N_\gamma \quad (11)$$

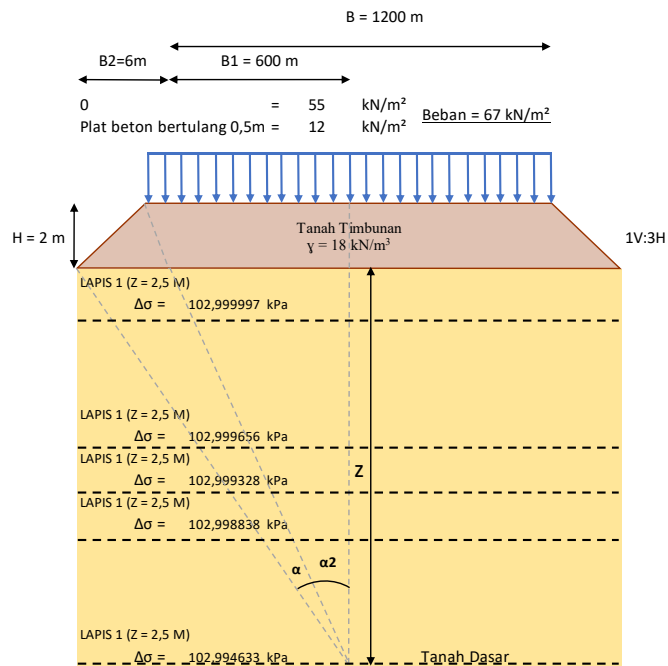
$$Q_{all} = \frac{Q_{ult}}{FK} \quad (12)$$

Di mana Q_{ult} adalah daya dukung *ultimate* (kN/m^2), C adalah nilai kohesi tanah, γ adalah berat volume tanah, B adalah lebar timbunan, N_c , N_q , N_γ adalah koefisien daya dukung tanah. Di mana Q_{all} adalah daya dukung izin (kN/m^2), Q_{ult} adalah daya dukung ultimit (kN/m^2), FK = faktor keamanan timbunan = 1,5 (SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik, 2017).

Tanah yang dianalisis adalah tanah dengan jenis tanah lempung seragam, maka perhitungan daya dukung

berubah kondisinya. Nilai daya dukung dapat dihitung menggunakan persamaan (11) dari terori daya dukung menurut Terzaghi.

cukup sampai pada bagian *shrear stress* dengan hanya mengalikan nilai kohesi tanah dengan faktor daya dukung (N_c). Adapun beban kontainer di ditetapkan sebesar 55 kN/m^2 (C. A. Thoresen, 2014). Hasil perhitungan daya dukung tanah menunjukkan lapisan satu dan lapisan dua dinyatakan tidak aman ($Q_{all} < q_0$) untuk menopang beban total. Ilustrasi dan rekapitulasi perhitungan daya dukung di sajikan pada **Error! Reference source not found.** dan **Error! Reference source not found.**



Gambar 7. Distribusi Tegangan Akibat Tanah Timbunan

Tabel 2. Rekapitulasi Daya Dukung Tanah

No	Soil Type	Depth	z (m)		Parameter		Qult	FK	Qall	q ₀	Kontrol
					Cu	Nc					
1	Silty Clay	0 - 2,5	2,5		25	5,7	142,5	1,5	95,0	103	Tidak aman
2	Clay	2,5 - 12	9,5		10	5,7	57	1,5	38,0	103	Tidak aman
3	Clayey to Sandy Silt	12 - 15	3		183	5,7	1045	1,5	696,7	103	Aman
4	Silt	15 - 18	3		163	5,7	931	1,5	620,7	103	Aman
5	Clay	18 - 30	12		83	5,7	475	1,5	316,7	103	Aman

Analisis Penurunan

Penurunan akibat beban merupakan jumlah total penurunan segera dan penurunan konsolidasi. Penurunan yang disebabkan oleh beban ini terdiri atas penurunan

segera (*immediate settlement*) dan penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*). Persamaan (13) sampai (16) adalah persamaan yang digunakan dalam tahap analisis penurunan.

$$S = S_i + S_c + S_s \tag{13}$$

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \tag{14}$$

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \tag{15}$$

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \right) + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \tag{16}$$

Keterangan:

- S = Penurunan total (m)
- S_i = Penurunan seketika (m)
- S_c = Penurunan konsolidasi (m)
- C_c = Indeks pemampatan
- C_s = Indeks pengembangan
- H = Tebal lapisan yang berkonsolidasi (m)
- σ'₀ = Tegangan vertikal (kN/m²)
- Δσ' = Distribusi tegangan (kN/m²)
- e₀ = Angka pori awal

Adapun untuk persamaan (14) digunakan ketika pada kondisi tanah *normally consolidated* (NC), persamaan (15) untuk kondisi *Over Consolidated* (OC) -

σ'₀ + Δσ' ≤ σ'_c, dan untuk persamaan (16) untuk kondisi *Over Consolidated* (OC) - σ'₀ + Δσ' > σ'_c.

Adapun dalam mencari waktu konsolidasi (t) menggunakan persamaan (17).

$$t = \frac{T_v (H_{dr})^2}{C_v} \tag{17}$$

Di mana t = waktu konsolidasi, T_v = faktor waktu, H_{dr} = panjang aliran maksimum, C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal.

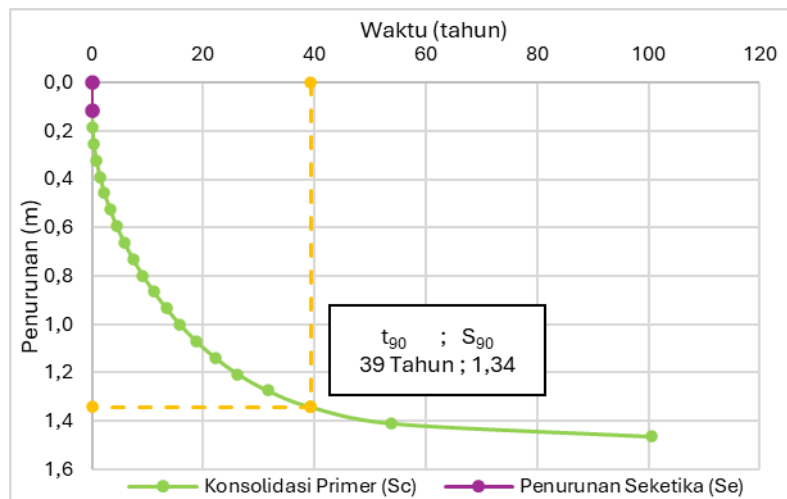
menggunakan persamaan (13) sampai (17) bisa didapatkan hasil yang disajikan pada **Error! Reference source not found.** dan **Error! Reference source not found.**

Analisis yang dihitung pada kondisi penurunan tanpa adanya perbaikan di antaranya yaitu penurunan seketika, konsolidasi primer, dan waktu konsolidasi. Dengan

Tabel 3. Analisis Konsolidasi Primer

No	Soil Type	Depth			z (m)	N	γ	Cc	Cs	e ₀	σ'	Δσ'	O	σ' _c	σ'+Δσ'	Sc	Sc
1	Silty Clay	0	-	2,5	2,5	5	16	0,437	0,087	1,30	20,00	103	1,0	20,00	123,00	0,375	37,47
2	Clay	2,	-	12	9,5	2	15	0,696	0,139	1,90	64,65	103	1,1	71,12	167,65	0,944	94,35

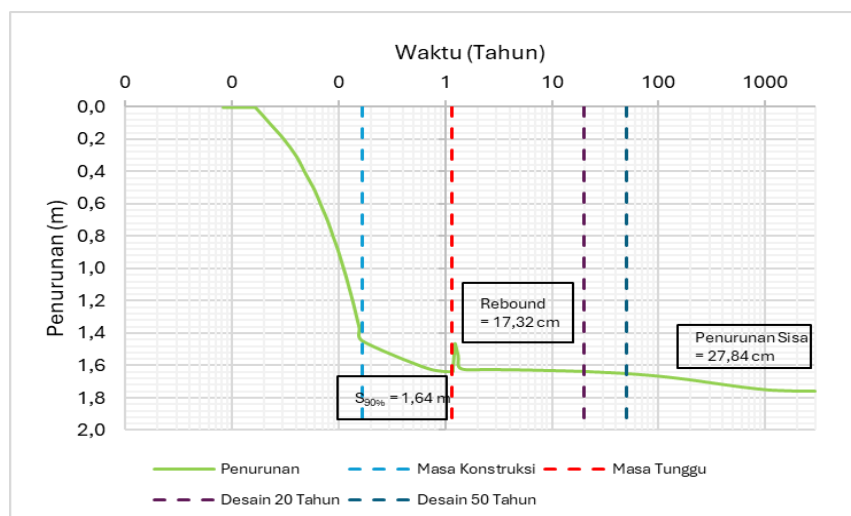
		5															
3	Clayey to Sandy Silt	12	-	15	3	25	20	0,030	0,006	0,70	104,59	103	1,9	198,72	207,59	0,019	1,86
4	Silt	15	-	18	3	19	19	0,036	0,007	0,88	133,66	103	-	133,66	236,66	0,014	1,41
5	Clay	18	-	30	12	10	17	0,044	0,009	1,15	190,59	103	2,4	457,40	293,58	0,009	0,93
Jumlah																1,36	136,02



Gambar 8. Grafik Hubungan Penurunan terhadap Waktu Konsolidasi

Analisis penurunan pada kondisi perbaikan tanah menggunakan metode PVD dan *preloading* yang dibantu dengan simulasi pada FEM 2D, di mana dalam tahap analisis diterapkan juga metode Chai (2001) dalam penerapan ekuivalen permeabilitas tanah. Penerapan

tinggi timbunan 6 m sebagai *preloading* mengacu pada (SNI 8460:2017) di mana rasio perbandingan beban perbaikan dengan operasional didapat ($1,311 > 1,3$). Hasil analisis penurunan yang terjadi akibat adanya perbaikan di sajikan dalam Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Penurunan terhadap Waktu Akibat Perbaikan dengan PVD dan Preloading

Gambar 9 menunjukkan besaran penurunan yang terjadi sampai berakhirnya masa tunggu atau sampai pada konsolidasi 90% sebesar 1,64 m, kemudian terjadi *rebound* akibat pengangkatan beban *preloading* sebesar

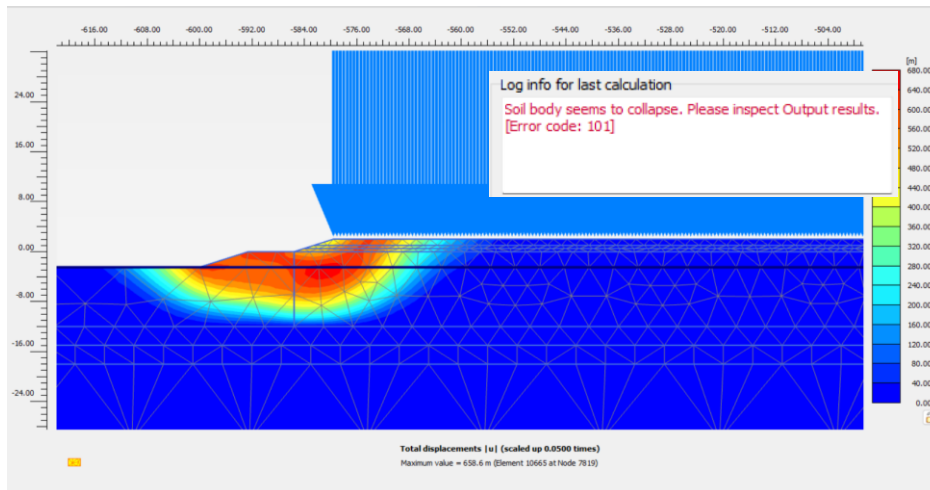
17,32 cm. Setelah di aplikasikannya beban operasional sesuai rencana terjadi sisa penurunan untuk pada masa 20 tahun operasional sebesar 15,05 cm, untuk masa 50 tahun sebesar 16,28 cm, dan sisa penurunan total sebesar

27,84 cm. Dengan ini bisa dinyatakan desain perbaikan dengan PVD dan *preloading* sudah sesuai dengan kriteria desain di mana batas sisa penurunan yaitu 30 cm ($27,84 \text{ cm} < 30 \text{ cm}$).

Analisis Stabilitas

Analisis stabilitas tanpa perbaikan PVD dilakukan untuk menilai kapasitas dukung dan kestabilan tanah dasar dalam kondisi alami, sebelum dilakukan tindakan perbaikan. Analisis stabilitas pada lereng timbunan dilakukan hanya pada kondisi statis saja. Analisis ini dilakukan dengan bantuan *software* FEM 2D.

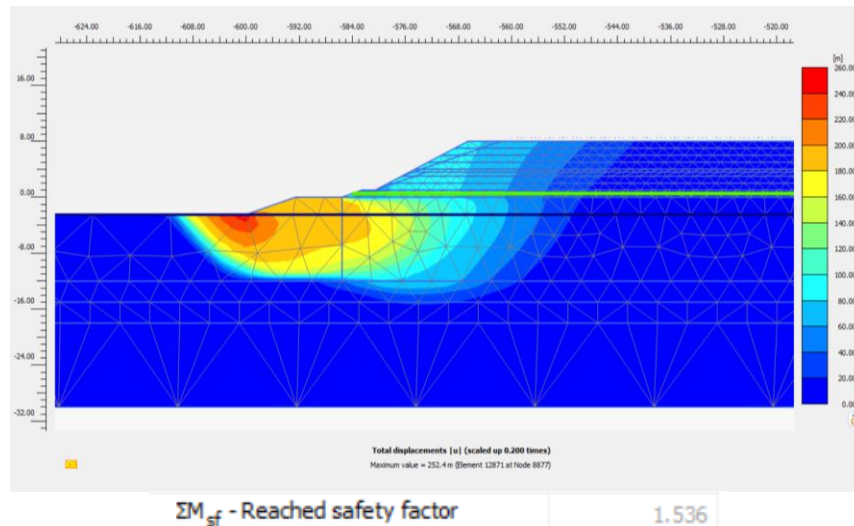
Hasil analisis stabilitas tanpa perbaikan pada kondisi statis terjadi keruntuhan lereng akibat tanah dasar tidak mampu menahan beban. Kondisi ini menandakan bahwa lereng berada dalam kondisi tidak stabil dan memerlukan evaluasi lebih lanjut untuk menentukan perlunya perbaikan tanah guna menjamin keamanan dan kestabilan struktur secara menyeluruh. Hal ini sejalan dengan hasil pada analisa daya dukung di mana lapisan satu dan lapisan dua tidak mampu menahan beban yang bekerja di atasnya.



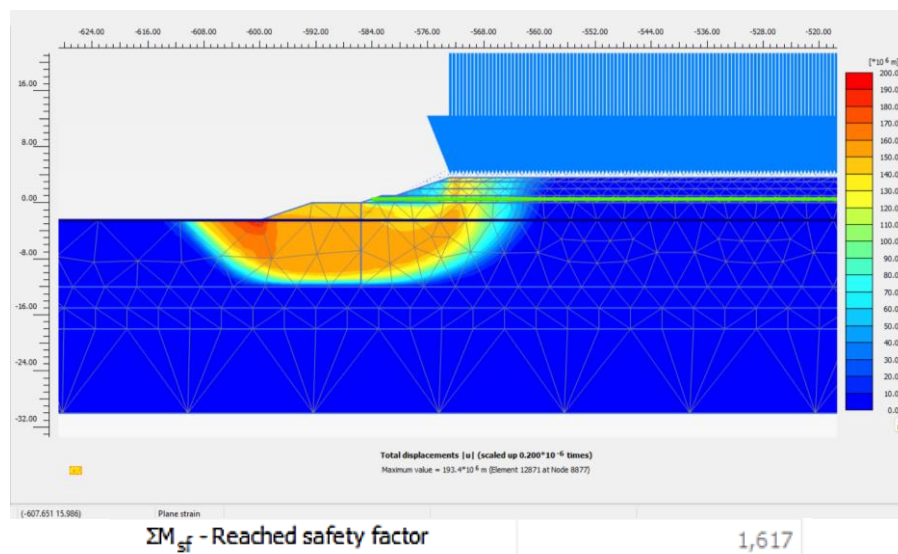
Gambar 10. Faktor Keamanan Lereng Tanpa Perbaikan

Analisis stabilitas lereng dilakukan untuk mengevaluasi kondisi keamanan timbunan setelah proses perbaikan tanah dengan metode PVD dan *preloading*. Tahapan ini penting untuk memastikan bahwa peningkatan kekuatan geser tanah akibat disipasi tekanan air pori selama konsolidasi telah memberikan kestabilan yang memadai terhadap potensi kelongsoran. Melalui pemodelan FEM 2D, dilakukan analisis perubahan tegangan efektif dan kekuatan tanah dasar pasca perbaikan untuk menilai perkembangan faktor keamanan (*safety factor*) terhadap waktu.

Pada masa tahap konstruksi tanah timbunan diterapkan perkuatan dengan menggunakan geotekstil dengan kuat tarik 300 kN/m. Dalam pemodelan dan penerapannya, kekakuan aksial (EA) geosintetik dalam analisis FEM harus ditentukan dengan mempertimbangkan regangan batas (*limiting strain*) yang sesuai dengan jenis struktur (Gouw, 2018). Besaran nilai kekuatan tarik maksimal (*limiting strain*) yang digunakan untuk timbunan yaitu 6% (Gouw, 2015).



Gambar 11. Faktor Keamanan Kondisi Statis saat Masa Konstruksi (*Short – Term*)



Gambar 12. Faktor Keamanan Kondisi Statis saat Masa Operasional (*Long – Term*)

Berdasarkan hasil analisis menggunakan *software* FEM 2D yang ditunjukkan pada **Error! Reference source not found.** dan **Error! Reference source not found.** didapat faktor keamanan pada kondisi statis saat masa konstruksi sebesar 1,536, di mana nilai faktor keamanan pada kondisi ini telah memenuhi syarat yaitu lebih dari 1,3 ($1,536 > 1,3$). Adapun pada kondisi operasional nilai faktor keamanan sebesar 1,617. Nilai faktor keamanan pada kondisi statis saat operasional pun sudah memenuhi kriteria syarat terhadap stabilitas yaitu lebih dari 1,5 ($1,617 > 1,5$). Dengan hasil ini menandakan bahwa hasil analisis ini sejalan dengan teori di mana stabilitas timbunan seiring dengan berjalannya operasional akan semakin lama menjadi lebih stabil.

Perbandingan Hasil Analisis

Analisis perbandingan dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana metode PVD dan preloading mampu meningkatkan kinerja tanah dasar dibandingkan dengan kondisi tanpa perbaikan. Melalui pendekatan ini, dapat dilihat perubahan perilaku konsolidasi, pola penurunan, serta peningkatan kestabilan tanah lunak akibat penerapan sistem drainase vertikal dan pembebanan bertahap.

Berdasarkan Tabel 4, menunjukkan bahwa sistem perbaikan PVD dan *preloading* tersebut sangat efektif dalam mempercepat disipasi tekanan air pori dan meningkatkan kinerja pemampatan tanah lunak di area reklamasi.

Tabel 4. Perbandingan Hasil Analisis

No	Kondisi Tanah	Total Penurunan	Waktu Konsolidasi	Faktor Keamanan (FK)
1	Tanpa Perbaikan	1,34 m	±14.148 Hari	N/A
2	Dengan Perbaikan (PVD + <i>Preloading</i>) – Masa Konstruksi	1,64 m	420 Hari	1,536
3	Dengan Perbaikan (PVD + <i>Preloading</i>) – Masa Operasional	27,84 cm	> 50 Tahun	1,617

KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa tanah dasar pada lokasi penelitian didominasi tanah lempung lunak hingga sangat lunak pada kedalaman 0 – 12 meter sehingga menjadi lapisan kritis terhadap beban timbunan, sedangkan lapisan lebih dalam terdiri dari lempung lanau kepasiran hingga pasir berlanau yang berperan sebagai lapisan pendukung. Kondisi tanpa perbaikan menghasilkan penurunan konsolidasi yang sangat besar dan berlangsung hingga puluhan tahun, disertai rendahnya daya dukung sehingga lereng tidak stabil dan tidak memenuhi persyaratan keamanan konstruksi. Penerapan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan *preloading* terbukti meningkatkan kinerja tanah dasar secara signifikan, ditunjukkan oleh percepatan konsolidasi dari ±39 tahun menjadi sekitar 420 hari untuk mencapai 90% konsolidasi, penurunan total yang berkurang dari 1,34 m menjadi 27,84 cm, serta peningkatan faktor keamanan menjadi 1,617 pada kondisi operasional. Dengan demikian, metode PVD dan *preloading* dinyatakan efektif dalam mengurangi penurunan, meningkatkan kestabilan, dan memenuhi kriteria desain pada area reklamasi terminal peti kemas.

DAFTAR PUSTAKA

- A. N. v. d. K. Jan van 't Hoff. (2012). *Hydraulic Fill Manual - For dredging and reclamation works*, Gouda, The Netherlands (1st ed.). CRC Press/Balkema Taylor & Francis Group.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2629-1_2
- C. A. Thoresen. (2014). *Port Designer's Handbook*.
- Chai, J.-C., Shen, S.-L., Miura, N., & Bergado, D. T. (2001). Simple Method of Modeling PVD- Improved Subsoil.

- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(11), 965–972. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:11\(965\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:11(965))
- Chakraborty, S., Hossain, S., & Ansary, M. A. (2023). Exploiting prefabricated vertical drain for ground improvement: a numerical and field approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(7). <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11528-5>
- Gouw, T. L. (2015). Importance of Elongation Factor in Determining Geosynthetics Stiffness for Finite Element Calculation. *Proceedings of International Conference on Landslides and Slope Stability*, B8-1–B8-6.
- Gouw, T. L. (2018). Common mistakes in designing MSE wall with finite element method. *11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018*, 2(September), 1414–1424.
- Gusnadi, Z., Rahardjo, P. P., & Lim, A. (2021). Perbandingan Perilaku Perbaikan Tanah Metode *Preloading* Vakum Dan *Preloading* Timbunan Dengan Elemen Hingga 2D. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), 363. <https://doi.org/10.29103/tj.v11i2.513>
- Look, B. G. (2007). Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables. In *Taylor & Francis Group* (Vol. 11, Issue 1).
- Rahardjo, S., & Karlinasari, R. (2018). *Implementation of Soil Improvement Works As Part of Reclamation Engineering in Belawan Port Project*. 147(Grost 2017), 323–334. <https://doi.org/10.2991/grost-17.2018.28>
- SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik (2017).
- Zhafirah, A., & Amalia, D. (2019). Perencanaan *Preloading* Dengan Penggunaan *Prefabricated Vertical Drain* Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan-Pemalang. *Potensi : Jurnal Sipil Politeknik*, 21(1), 10. <https://doi.org/10.35313/potensi.v21i1.1314>