

Pengaruh Variasi Laju Penimbunan terhadap Deformasi dan Stabilitas Timbunan pada Tanah Lunak dengan Metode Preloading dan PVD (Studi Kasus Jalan Tol Pekanbaru–Padang STA 10+400)

Dini Oktavia¹, Dian Purnamawati Solin^{1}, Bagas Aryaseti¹

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Surabaya

^{*)}diansolin.ts@upnjatim.ac.id

Abstract

Construction of embankments on soft soil frequently encounters stability problems due to low shear strength and high compressibility, particularly when the loading rate is not properly controlled. This study aims to analyze the effect of embankment loading rate on lateral deformation of soft soil improved using preloading combined with Prefabricated Vertical Drains (PVD). The study is based on data from the Pekanbaru–Padang Toll Road project at STA 10+400. The methodology employs numerical analysis using the Finite Element Method (FEM), preceded by manual calculations to determine staged loading scenarios with specified target degrees of consolidation. Three loading rate variations were analyzed, namely 0.2, 0.3, and 0.4 m/week. The parameters evaluated include settlement, safety factor, and lateral deformation. Model verification was conducted by comparing the existing condition simulation results against field settlement plate data, yielding an FEM settlement value of 3.759 m against a field measurement of 3.762 m, confirming that the model is sufficiently representative for subsequent analysis. The results indicate that all loading rate variations produce similar final settlements of approximately 3.7 m and meet the required degree of consolidation. However, significant differences are observed in lateral deformation and stability. Lower loading rates result in smaller lateral deformation and higher safety factors, indicating more stable conditions. Conversely, higher loading rates generate greater excess pore water pressure, leading to increased lateral deformation and reduced stability. It is therefore concluded that controlling the loading rate is a critical factor in minimizing lateral deformation and maintaining embankment stability on soft soil.

Keywords: Soft Soil, Embankment, Loading Rate, PVD, Lateral Deformation

Abstrak

Konstruksi timbunan di atas tanah lunak sering menghadapi permasalahan stabilitas akibat kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi, terutama apabila laju pembebanan tidak dikontrol dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh laju penimbunan terhadap deformasi lateral pada tanah lunak yang diperbaiki menggunakan metode preloading yang dikombinasikan dengan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). Studi ini menggunakan data pada proyek Jalan Tol Pekanbaru–Padang STA 10+400. Metode yang digunakan adalah analisis numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) yang diawali dengan perhitungan manual untuk menentukan skenario *stage loading* dengan target derajat konsolidasi tertentu. Variasi laju penimbunan yang dianalisis adalah 0,2; 0,3 dan 0,4 m/minggu. Parameter yang ditinjau meliputi *settlement*, safety factor, dan deformasi lateral. Verifikasi model dilakukan dengan membandingkan hasil pemodelan kondisi eksisting terhadap data *settlement plate* lapangan, di mana diperoleh nilai *settlement* FEM sebesar 3,759 m dan *settlement plate* sebesar 3,762 m, sehingga model dinyatakan representatif untuk digunakan pada analisis selanjutnya. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh variasi laju penimbunan menghasilkan *settlement* akhir yang relatif sama, yaitu sekitar 3,7 m dan memenuhi target derajat konsolidasi. Namun, terdapat perbedaan signifikan pada deformasi lateral dan stabilitas. Laju penimbunan yang lebih rendah menghasilkan deformasi lateral yang lebih kecil serta nilai *safety factor* yang lebih tinggi, sehingga menunjukkan kondisi yang lebih stabil. Sebaliknya, laju penimbunan yang lebih tinggi menghasilkan tekanan air pori berlebih yang lebih besar sehingga meningkatkan deformasi lateral dan menurunkan stabilitas. Dengan demikian, pengendalian laju penimbunan menjadi faktor penting dalam meminimalkan *deformasi lateral* dan menjaga stabilitas timbunan pada tanah lunak.

Kata Kunci: Tanah Lunak, Timbunan, Laju Penimbunan, PVD, Deformasi Lateral

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur transportasi, khususnya jalan tol, terus mengalami peningkatan akibat pesatnya perkembangan ekonomi. Dalam pelaksanaannya, pembangunan pada kondisi tanah lunak dapat menimbulkan berbagai tantangan karena tanah ini umumnya memiliki kuat geser yang rendah, kompresibilitas yang tinggi, serta permeabilitas yang kecil (Naibaho & Waruwu, 2021; Prayitno & Purwanto, 2025). Karakteristik tersebut menyebabkan tanah dasar cenderung mengalami *settlement* yang besar dalam jangka waktu lama ketika menerima beban, serta berpotensi menimbulkan deformasi lateral yang dapat memengaruhi stabilitas konstruksi (Zahera et al.,

2021). Pada konstruksi jalan, timbunan yang dibangun di atas tanah lunak tidak hanya harus mencapai elevasi rencana, tetapi juga harus tetap memenuhi kriteria stabilitas selama proses konstruksi berlangsung. Namun demikian, lokasi trase jalan tidak selalu berada pada kondisi tanah yang ideal, sehingga konstruksi sering dilakukan di atas tanah dengan daya dukung rendah. Kondisi ini mendorong perlunya upaya perbaikan tanah untuk meningkatkan kondisi tanah dasar.

Salah satu metode perbaikan tanah lunak yang efektif dalam mempercepat konsolidasi dan mengurangi besarnya *settlement* jangka panjang adalah *preloading* yang dikombinasikan dengan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). *Preloading* dilakukan dengan memberikan beban

timbunan sementara untuk mempercepat terjadinya *settlement* sebelum konstruksi akhir dibangun, sedangkan PVD berfungsi sebagai jalur drainase vertikal yang mempercepat disipasi tekanan air pori berlebih sehingga proses konsolidasi tanah berlangsung lebih cepat (Kurniawan et al., 2025). Namun demikian, risiko deformasi lateral masih dapat terjadi, terutama apabila tahapan pembebanan dilakukan terlalu cepat sementara tanah masih berada pada kondisi yang belum cukup terkonsolidasi (Yi & Liu, 2022).

Pada Proyek Jalan Tol Ruas Pekanbaru – Padang Seksi Sicincin – Lubuk Alung – Padang STA 10+400, penimbunan dilaksanakan tanpa penetapan laju penimbunan yang konsisten. Dari hasil monitoring lapangan menunjukkan adanya pergerakan lateral yang cukup besar ditandai dengan munculnya peringatan ketidakstabilan tanah ($SF < 1,35$) serta indikasi retak di sekitar area *preloading*. Akibatnya, penimbunan dihentikan sementara agar tanah sempat berkonsolidasi dan meningkatkan kuat gesernya sebelum beban berikutnya diberikan. Kondisi tersebut mengisyaratkan bahwa respons tanah selama tahap pembebanan masih perlu dievaluasi. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan optimasi laju penimbunan 0,2;0,3 dan 0,4 m/minggu untuk mengetahui pengaruhnya terhadap deformasi lateral pada tanah lunak di lokasi penelitian. Analisis dilakukan secara numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dengan model Mohr-Coulomb dan pemodelan PVD secara *plane strain*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan

rekomendasi laju penimbunan yang optimal untuk menjaga stabilitas timbunan dan meminimalkan deformasi lateral pada proyek serupa di atas tanah lunak

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) 2D dengan model Mohr-Coulomb, yang didahului perhitungan manual sebagai dasar penyusunan skenario variasi laju penimbunan. Tahapan analisis meliputi perhitungan tinggi timbunan awal, penurunan konsolidasi, derajat konsolidasi, kenaikan kuat geser *undrained*, serta pemodelan *stage loading* pada *software* geoteknik

Pengumpulan Data

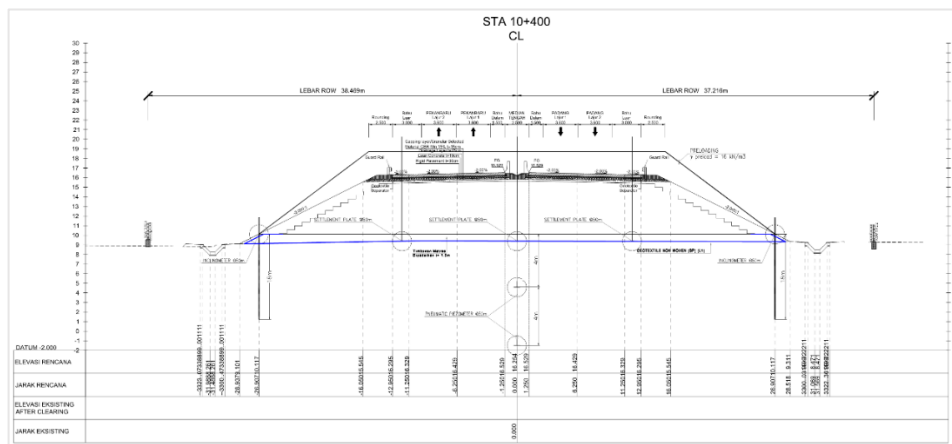
Data yang digunakan merupakan data sekunder dari PT Teknindo Geosistem Unggul, meliputi data SPT dan uji laboratorium (Tabel 1), geometri timbunan (Gambar 2), serta rekapitulasi penambahan tinggi timbunan berdasarkan monitoring *settlement plate* (Tabel 2).

Adapun PVD yang digunakan adalah tipe CT-D1009 dengan lebar 0,098 m dan tebal 0,003 m, dipasang hingga kedalaman 14 m dengan pola segitiga dan spasi antar titik sebesar 1 m.

Tabel 1. Data N-SPT dan Laboratorium BH 312 dan 313

Depth	Jenis Tanah	Konsistensi Tanah	N-SPT	γ_{sat} (kN/m ³)	e	C (kN/m ²)	ϕ (°)	Cc	Cs
0 – 3	Lanau pasiran	Lunak	0	15,58	2,01	13,5	6,81	0,68	0,098
3 – 4,8	Lempung lanauan	Sangat Lunak	2	14,73	2,57	2,1	8,38	0,82	0,117
4,8 – 6,7	Pasir	Padat sedang	11	15,52	2,03	5,42	21,45	0,53	
6,7 – 10,7	Lanau organik	Kaku sedang – lunak	6	15,11	2,22	18,66	16,37	0,59	0,084
10,7 – 11,5	Pasir Lanauan	Lepas – padat sedang	4	15,27	2,15	3,07	28,33	0,56	0,081
11,5 – 13,3	Lanau Pasiran	Lunak	4	15,27	2,15	18,44	15,71	0,56	0,081
13,3 – 15,5	Pasir lanauan	Padat sedang	13	15,59	1,97	4,5	21,14	0,33	
15,5 – 18	Pasir lanauan	Lepas	7.5	15,39	2,06	3,62	27,29	0,54	
18 - 30	Pasir lanauan	Padat – sangat padat	45	16,73	1,46	36,22	39,36	0,14	
<i>Preloading</i>				18,5		10	35		

Sumber: Geosistem (2018)



Gambar 1. Geometri Timbunan
Sumber: Geosistem (2018)

Tabel 2. Data *Stage Loading*

Tanggal	Penambahan Timbunan (m)	Total Tinggi Timbunan (m)	Waktu Tunggu (hari)
05/03/2023	0,98	0,98	85
07/03/2023	0,42	1,41	3
10/03/2023	0,20	1,61	3
13/03/2023	0,70	2,31	7
20/03/2023	0,76	3,07	2
22/03/2023	0,73	3,80	6
28/03/2023	0,64	4,44	15
12/04/2023	0,77	5,21	21
03/05/2023	0,33	5,54	20
23/05/2023	0,37	5,91	2
25/05/2023	0,31	6,23	1
26/05/2023	0,20	6,42	13
08/06/2023	0,42	6,84	12
20/06/2023	0,50	7,34	17
07/07/2023	0,28	7,62	9
16/07/2023	0,61	8,24	54
08/09/2023	0,46	8,70	2
10/09/2023	0,30	9,00	3
13/09/2023	0,31	9,31	1
14/09/2023	0,36	9,67	13
27/09/2023	0,95	10,62	8
05/10/2023	0,20	10,82	4
09/10/2023	1,72	12,54	1
10/10/2023	0,12	12,67	45
24/11/2023	0,17	12,83	171
13/05/2024	-2,22	10,61	8

Sumber: Geosistem (2018)

Pada Tabel 2 terdapat nilai penambahan timbunan negatif sebesar -2,22 m pada tanggal 13 Mei 2024 dimana hal tersebut menandakan adanya pengurangan beban timbunan (*removal of surcharge*). Pengurangan ini dilakukan untuk memenuhi elevasi rencana setelah derajat konsolidasi tercapai serta sebagai bagian dari tahapan akhir konstruksi *preloading*.

Seluruh data sekunder yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan manual *stage loading* dan input pemodelan numerik. Data lapangan berupa rekaman *settlement plate* kemudian dimanfaatkan untuk memverifikasi hasil pemodelan FEM pada kondisi eksisting

Perhitungan Manual *Stage Loading*

Perhitungan manual mengacu pada prosedur Han (2015) dengan target derajat konsolidasi antar tahap ditetapkan tetap sebesar $U = 80\%$, sementara laju penimbunan divariasikan menjadi tiga skenario yaitu 0,2;0,3 dan 0,4 m/minggu.

Tinggi Timbunan Pertama

Tinggi timbunan pertama yang diizinkan ditentukan berdasarkan kuat geser *undrained* (C_u) tanah lunak dengan *safety factor* minimum untuk konstruksi jalan tol sebesar 1,35 (SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik, 2017). Adapun tinggi timbunan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_1 \leq \frac{N_c \times C_u}{SF \times \gamma} \quad (1)$$

Dimana:

- N_c = bearing capacity factor (5,14)
- C_u = kuat geser *undrained* (kN/m²)
- SF = safety factor (1,35)
- γ = berat jenis material timbunan (kN/m³)

Penurunan Konsolidasi Primer

Penurunan konsolidasi primer dihitung per lapisan tanah berdasarkan kondisi *normally consolidated* (NC) atau *over consolidated* (OC) menggunakan persamaan Das (1994) sebagai berikut:

Normally Consolidated

$$S_c = \frac{c_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (2)$$

Over Consolidated

Jika $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma_c$, maka:

$$S_c = \frac{c_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (3)$$

Jika $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \geq \sigma_c$, maka:

$$S_c = H \left(\frac{c_s}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma_c}{\sigma'_0} \right) + \frac{c_c}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma_c} \right) \right) \quad (4)$$

Dimana:

- S_c = besar penurunan konsolidasi primer (m)
- H = tebal lapisan tanah lempung (m)
- e_0 = angka pori awal
- C_c = indeks kompresi
- C_s = swelling index
- $\Delta\sigma'$ = penambahan tegangan efektif (kN/m²)
- σ'_0 = tegangan *overburden* efektif (kN/m²)
- σ_c = tegangan prakonsolidasi (kN/m²)

Waktu Konstruksi Timbunan Pertama

Waktu penimbunan dihitung berdasarkan laju penimbunan dari masing-masing skenario. Derajat konsolidasi yang tercapai pada akhir setiap tahap penimbunan selanjutnya dihitung untuk menentukan waktu tunggu yang diperlukan agar konsolidasi mencapai target sebelum penimbunan tahap berikutnya dilaksanakan. Derajat konsolidasi dipengaruhi oleh arah vertikal dan horizontal karena adanya kontribusi disipasi air pori dari PVD, maka digunakan persamaan Carrillo (1942) sebagai berikut.

$$U_{av} = (1 - (1 - U_h) \times (1 - U_v))100\% \quad (5)$$

Untuk derajat konsolidasi arah vertikal dipengaruhi oleh dua kondisi yaitu:

$U_v < 60\%$, maka:

$$T_v = \frac{c_v t}{h_{dr}^2} \quad (6)$$

$$U_v = \left(\sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} \right) \times 100\% \quad (7)$$

$U_v > 60\%$, maka:

$$a = \frac{1,781 - T_v}{0,933} \quad (8)$$

$$U_v = (100 - 10^a)\% \quad (9)$$

Sedangkan untuk derajat konsolidasi arah horizontal dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$x = \frac{8C_h t}{d_e^2 \cdot F(N_D)} \quad (10)$$

$$U_h = [1 - \exp(-x)]100\% \quad (11)$$

Dimana:

- U_{av} = derajat konsolidasi rata-rata
- T_v = *time factor* arah vertikal
- C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal ($m^2/bulan$)
- t = waktu (*bulan*)
- h_{dr} = panjang lintasan PVD (*m*)
- C_h = koefisien konsolidasi arah horizontal ($m^2/bulan$)
- d_e = diameter pengaruh PVD (*m*)
- $F(N_D)$ = faktor hambatan antara titik PVD

Kenaikan Kuat Geser *Undrained*

Ketika suatu tahap penimbunan selesai maka tanah akan mengalami peningkatan kuat geser yang dapat ditentukan dengan persamaan Han (2015) berikut:

$$\Delta c_u = 0,25 U_{av} \Delta \sigma_z \quad (12)$$

Dimana:

- U_{av} = derajat konsolidasi rata – rata total
- $\Delta \sigma_z$ = penambahan tegangan *overburden* (kN/m^2)

Tinggi Timbunan Kedua

Tinggi timbunan kedua dapat dihitung dengan menambahkan nilai kenaikan kuat geser yang didapat dari tahap penimbunan sebelumnya seperti persamaan berikut.

$$H_2 \leq \frac{N_c(c_u + \Delta c_u)}{SF \cdot \gamma} \quad (13)$$

Dimana:

- N_c = *bearing capacity factor* (5,14)
- C_u = kuat geser *undrained* (kN/m^2)
- ΔC_u = kenaikan kuat geser *undrained* (kN/m^2)
- SF = *safety factor* (1,35)

γ = berat jenis material timbunan (kN/m^3)

Pemodelan *Finite Element Method*

Pemodelan numerik dilakukan menggunakan model Mohr-Coulomb untuk seluruh lapisan tanah. Geometri pemodelan mengacu pada penampang melintang timbunan STA 10+400. Analisis dilakukan secara bertahap (*staged construction*) yang mencakup fase pembebanan (*loading phase*) dan fase konsolidasi (*consolidation analysis*) sesuai durasi waktu yang diperoleh dari perhitungan manual.

Untuk memodelkan PVD pada kondisi *plane strain*, parameter permeabilitas horizontal tanah di zona pemasangan PVD dikonversi menggunakan metode *equivalent permeability* sebagai berikut (Hird et al., 1992).

$$\frac{k_{pl}}{k_{ax}} = \frac{2B^2}{3R_e^2 \left[\ln \left(\frac{R_e}{d_c} \right) - \frac{3}{4} \right]} \quad (14)$$

Dimana:

- k_{pl} = koefisien permeabilitas ekuivalen *plane strain*
- k_{ax} = koefisien permeabilitas pada *unit cell*, umumnya dipakai k_x
- B = setengah lebar *unit cell plane strain* (*m*)
- R_e = jari – jari lebar ekuivalen (*m*)
- d_c = diameter ekuivalen *drain* (*m*)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Verifikasi Model

Verifikasi model dilakukan dengan membandingkan hasil pemodelan kondisi eksisting terhadap data *settlement plate* lapangan. Pemodelan mengacu pada data *stage loading* aktual (Tabel 2) dan geometri potongan melintang di lapangan (Gambar 2) seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Adapun parameter tanah yang digunakan sebagai input pemodelan mengacu pada Tabel 1 dengan parameter tambahan yang ditampilkan pada Tabel 3.

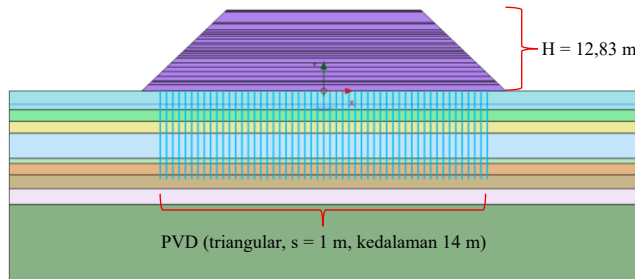
Tabel 3. Parameter Input FEM

Depth	E	Poisson's Ratio (v)	Kx eq (m/hari)	Ky (m/hari)
0 – 3	800	0,4	$3,58 \times 10^{-4}$	$3,28 \times 10^{-4}$
3 – 4,8	300	0,4	$1,64 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$
4,8 – 6,7	10000	0,4	$7,24 \times 10^{-5}$	$6,63 \times 10^{-5}$
6,7 – 10,7	1000	0,4	$5,39 \times 10^{-5}$	$4,94 \times 10^{-5}$
10,7 – 11,5	3000	0,4	$4,04 \times 10^{-5}$	$3,7 \times 10^{-5}$
11,5 – 13,3	1000	0,4	$3,62 \times 10^{-5}$	$3,31 \times 10^{-5}$
13,3 – 15,5	15000	0,2	$1,79 \times 10^{-5}$	$1,64 \times 10^{-5}$
15,5 – 18	6000	0,2	$2,56 \times 10^{-5}$	$2,35 \times 10^{-5}$
18 – 30	50000	0,2	$4,77 \times 10^{-6}$	$4,37 \times 10^{-6}$
<i>Preloading</i>	10000	0,2		

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

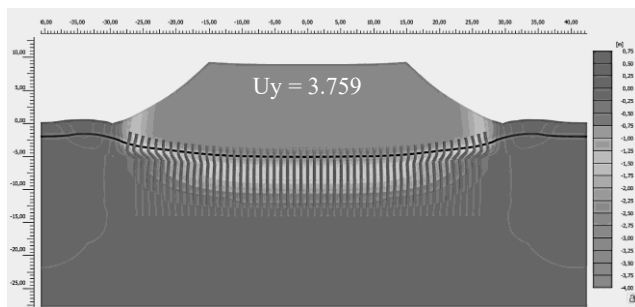
Parameter modulus elastisitas (E) dan rasio Poisson (v) yang digunakan sebagai input pada model FEM ditentukan berdasarkan korelasi empiris dengan jenis tanah

mengacu pada Bowles (1997). Dimana nilai v sebesar 0,4 digunakan untuk lapisan tanah lunak dan nilai 0,2 untuk lapisan tanah yang lebih padat pada kedalaman lebih dari 13,3 m. Sementara itu, nilai permeabilitas diperoleh melalui perhitungan konversi ke *plane strain* menggunakan metode *equivalent permeability* (Hird et al., 1992) sesuai Persamaan 14.

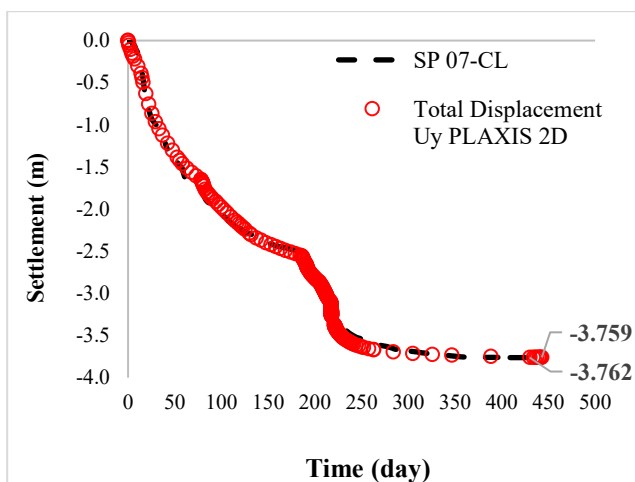


Gambar 2. Pemodelan *Stage Loading* Kondisi Eksisting
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Hasil pemodelan kondisi eksisting menunjukkan *settlement* maksimum sebesar 3,759 m yang ditunjukkan pada kontur total *displacement* arah vertikal (U_y) pada Gambar 4. Nilai ini menunjukkan kesesuaian terhadap data *settlement plate* lapangan sebesar 3,762 m dan hasil perbandingan keduanya ditunjukkan pada Gambar 5.

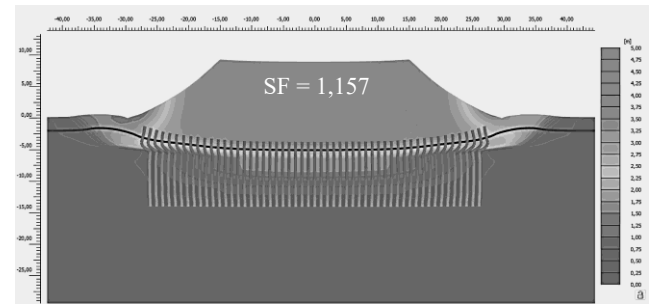


Gambar 3. Total *Displacement Uy* Kondisi Eksisting
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)



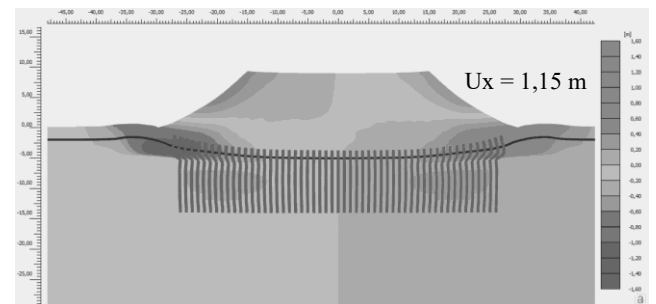
Gambar 4. Grafik Hubungan *Settlement* dengan Waktu *Settlement Plate* dan Model FEM
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Berdasarkan hasil tersebut, model beserta parameternya dianggap representatif dan dapat digunakan sebagai acuan untuk analisis variasi *stage loading* selanjutnya. Selain *settlement*, hasil pemodelan juga menunjukkan nilai *safety factor* sebesar 1,157 (Gambar 6) yang berada di bawah batas minimum yang disyaratkan yaitu 1,35 sehingga mengindikasikan bahwa tahapan penimbunan yang dilaksanakan di lapangan belum memenuhi kriteria stabilitas lereng.



Gambar 5. *Safety Factor* Kondisi Eksisting
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Pemodelan kondisi eksisting juga menampilkan nilai deformasi lateral pada kaki timbunan sebesar 1,15 m seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 6. Total *Displacement Ux* Kondisi Eksisting
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Analisis *Stage Loading*

Hasil perhitungan manual *stage loading* ditampilkan pada Tabel 4, dimana ketiga variasi laju penimbunan menghasilkan tinggi timbunan yang sama pada setiap tahapnya namun berbeda pada waktu konstruksi dan waktu tunggu.

Tabel 4. Rekapitulasi Skenario *Stage Loading*

	0,2 m/minggu	0,3 m/minggu	0,4 m/minggu
Tinggi Stage 1	3 m	3 m	3 m
Waktu Konstruksi	105 hari	70 hari	53 hari
Waktu Tunggu	24 hari	43 hari	52 hari
ΔCu (kN/m ²)	9,6	9,6	9,6
Tinggi Stage 2	2 m	2 m	2 m
Waktu Konstruksi	70 hari	47 hari	35 hari
Waktu Tunggu	-	15 hari	24 hari
ΔCu (kN/m ²)	16,1	16	16
Tinggi Stage 3	4 m	4 m	4 m
Waktu Konstruksi	140 hari	93 hari	70 hari

Waktu Tunggu	-	13 hari	28 hari
ΔCu (kN/m ²)	30,55	28,8	28,8
Tinggi Stage 4	3,8 m	3,8 m	3,8 m
Waktu Konstruksi	133 hari	89 hari	67 hari
Waktu Tunggu	24 hari	30 hari	64 hari

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

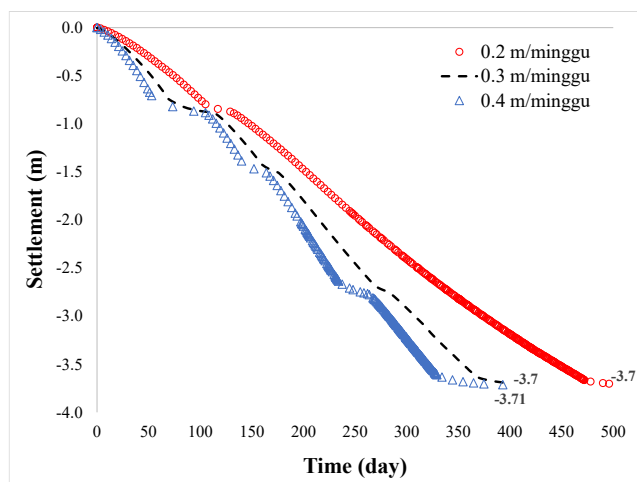
Semakin besar laju penimbunan, waktu konstruksi semakin singkat sehingga waktu tunggu antar tahap juga semakin panjang untuk memenuhi target derajat konsolidasi 80%, sedangkan pada tahap akhir ditetapkan 90% sesuai persyaratan (Panduan Geoteknik 4: Timbunan Jalan Pada Tanah Lunak, 2002). Kenaikan kuat geser *undrained* pada setiap akhir tahap menunjukkan bahwa tanah semakin menguat seiring berlangsungnya konsolidasi akibat penambahan beban secara bertahap (Rosidi, 2022).

Pemodelan Variasi *Finite Element Method*

Berdasarkan hasil perhitungan manual, ketiga skenario variasi laju penimbunan dengan tahapan yang terdiri dari empat *stage* penimbunan, masing-masing diikuti fase konsolidasi sesuai waktu tunggu yang diperoleh dari Tabel 4. Perbandingan hasil pemodelan antar skenario ditinjau dari tiga parameter utama yaitu *settlement*, *safety factor*, dan deformasi lateral.

Settlement

Grafik pada Gambar 8 menampilkan *displacement* arah vertikal (*Uy*) pada akhir konstruksi untuk masing-masing skenario variasi. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa *settlement* maksimum yang terjadi pada titik SP-07 CL untuk variasi laju penimbunan yang diterapkan (0,2;0,3 dan 0,4 m/minggu) menunjukkan profil *settlement* total yang relatif seragam di angka 3,7 m hingga 3,71 m pada akhir masa konstruksi (Gambar 8).



Gambar 7. Total *Displacement Uy* Skenario (a) 0,2 m/minggu (b) 0,3 m/minggu (c) 0,4 m/minggu
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

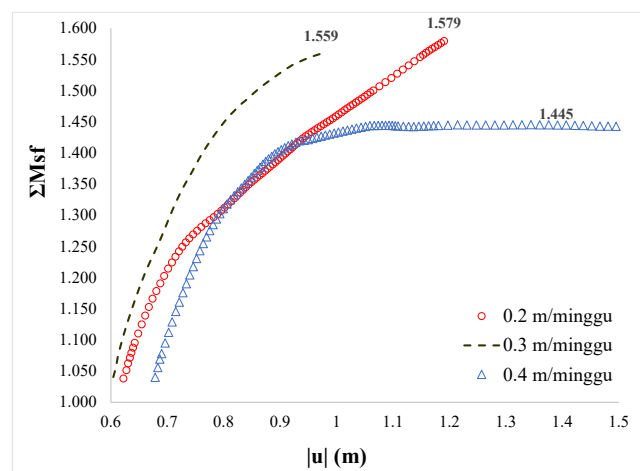
Meskipun nilai akhirnya serupa, terdapat perbedaan pada grafik perkembangan *settlement* selama masa konstruksi. Pada skenario laju 0,2 m/minggu, kurva

settlement terlihat lebih landai. Hal ini menunjukkan bahwa laju penimbunan yang lebih lambat memberikan waktu lebih panjang bagi tanah dalam proses disipasi air pori sehingga konsolidasi juga berkembang. Proporsi *settlement* yang terjadi selama masa konstruksi terhadap total *settlement* akhir untuk skenario 0,2;0,3 dan 0,4 m/minggu masing-masing adalah 97%, 97%, dan 98%, yang seluruhnya memenuhi persyaratan minimum 90% sesuai Panduan Geoteknik 4 untuk jalan kelas I.

Nilai akhir *settlement* yang hampir sama ini pada dasarnya dipengaruhi oleh pengaturan waktu tunggu di setiap tahap penimbunan. Waktu tunggu tersebut tidak dibuat sama, tetapi disesuaikan dengan laju penimbunan dan target derajat konsolidasi yang ingin dicapai. Sehingga walaupun material ditimbun dengan kecepatan yang berbeda, tiap skenario tetap diberi waktu yang cukup sebelum masuk ke tahap berikutnya. Akibatnya, proses konsolidasi yang terjadi pada akhirnya menjadi relatif setara.

Safety Factor

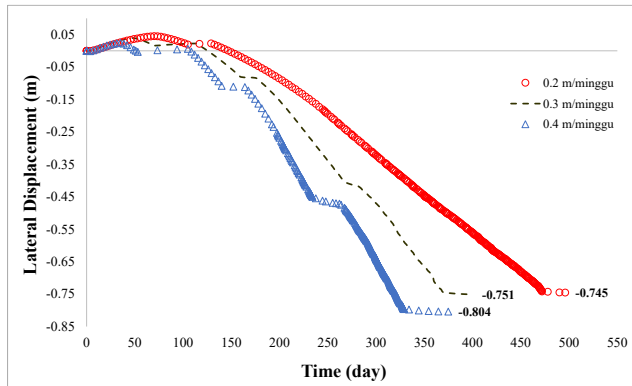
Nilai *safety factor* pada akhir konstruksi diperoleh melalui analisis *phi-c reduction* pada *software FEM* (Gambar 9). Ketiga skenario variasi menghasilkan nilai SF 1,579;1.559 dan 1,445 lebih besar dibanding kondisi eksisting yang hanya 1,157. Ketiga hasil tersebut memenuhi persyaratan minimum SF = 1,35 untuk konstruksi jalan tol sesuai SNI 8460:2017. Peningkatan SF pada skenario variasi dibandingkan kondisi eksisting disebabkan oleh adanya laju penimbunan dan waktu tunggu yang lebih terstruktur, memungkinkan peningkatan kuat geser *undrained* tanah lunak sebelum beban berikutnya diberikan. Meskipun ketiga skenario memenuhi kriteria SF minimum, skenario dengan laju penimbunan lebih lambat menghasilkan SF yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol terhadap laju pembebanan merupakan salah satu faktor penting dalam menjaga stabilitas lereng timbunan pada tanah dengan daya dukung rendah.



Gambar 8. SF Akhir *Preloading* Skenario (a) 0,2 m/minggu (b) 0,3 m/minggu (c) 0,4 m/minggu
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Deformasi Lateral

Nilai deformasi lateral ditampilkan di grafik total *displacement* arah horizontal (U_x) pada akhir konstruksi untuk masing-masing skenario variasi dengan hasil 0,745;0,751 dan 0,804.



Gambar 9. *Lateral Displacement* Akhir *Preloading* Skenario (a) 0,2 m/minggu (b) 0,3 m/minggu (c) 0,4 m/minggu

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Ketiga skenario variasi menghasilkan deformasi lateral yang lebih kecil dibandingkan kondisi eksisting (1,15 m). Hal ini disebabkan oleh penerapan waktu tunggu berbasis target derajat konsolidasi sehingga memungkinkan peningkatan kuat geser tanah sebelum pembebanan berikutnya diberikan. Temuan ini sejalan dengan Mulifandi et al. (2024) dan Badarinath & El Naggar (2021) yang menyimpulkan bahwa pengurangan laju penimbunan dan penambahan waktu konsolidasi secara konsisten menurunkan deformasi lateral pada tanah lunak organik.

Perilaku deformasi lateral menunjukkan korelasi terhadap variasi laju penimbunan. Hasil pemodelan (Gambar 10) memperlihatkan bahwa laju penimbunan tercepat (0,4 m/minggu) memicu deformasi lateral yang paling besar. Akibatnya beban vertikal yang diberikan terlalu cepat pada tanah lunak jenuh air akan menimbulkan tekanan air pori berlebih yang masif. Kondisi ini memaksa tanah untuk bergerak ke arah lateral karena air pori belum sempat teralirkan keluar melalui PVD, sehingga tanah berperilaku mendekati kondisi *undrained* yang sangat labil (Talukdar & Dey, 2021). Sebaliknya, pada laju 0,2 meter/minggu, pergerakan lateral ini jauh lebih terkendali sehingga tanah cenderung lebih stabil.

Rekapitulasi hasil pemodelan ketiga variasi laju penimbunan beserta kondisi eksisting disajikan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Pemodelan FEM

Parameter	Eksisting	Variasi Laju Penimbunan (m/minggu)		
		0,2	0,3	0,4
Settlement	3,759	3,7	3,7	3,71
Derajat Konsolidasi (%)	-	97	97	98
Safety Factor	1,157	1,579	1,559	1,445
Deformasi Lateral	1,15	0,745	0,751	0,804

Reduksi terhadap Eksisting (m)	-	↓ 0,405	↓ 0,399	↓ 0,346
--------------------------------	---	---------	---------	---------

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

KESIMPULAN

Verifikasi model numerik dilakukan dengan membandingkan hasil pemodelan kondisi eksisting terhadap data *settlement plate* lapangan. Hasil pemodelan menunjukkan nilai *settlement* sebesar 3,759 m, sedangkan data *settlement plate* lapangan menunjukkan nilai 3,762 m, sehingga selisih yang diperoleh sangat kecil dan model dinyatakan representatif untuk digunakan pada analisis variasi laju penimbunan selanjutnya.

Variasi laju penimbunan sebesar 0,2;0,3 dan 0,4 m/minggu menghasilkan nilai *settlement* akhir yang relatif seragam, yaitu sekitar 3,7 m, serta seluruhnya memenuhi target derajat konsolidasi yang disyaratkan. Hal ini menunjukkan bahwa laju penimbunan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap besarnya *settlement* total akhir.

Laju penimbunan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas timbunan. Seluruh skenario variasi menghasilkan nilai *safety factor* yang lebih tinggi dibandingkan kondisi eksisting dan telah memenuhi persyaratan minimum ($SF > 1,35$). Namun, laju penimbunan yang lebih rendah menghasilkan nilai *safety factor* yang lebih tinggi sehingga memberikan tingkat stabilitas yang lebih baik.

Deformasi lateral cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya laju penimbunan, dimana penimbunan 0,4 m/minggu menghasilkan deformasi lateral terbesar, sedangkan laju 0,2 m/minggu menghasilkan deformasi lateral paling kecil. Hal ini disebabkan oleh pembentukan tekanan air pori berlebih yang lebih besar pada laju pembebanan yang tinggi, sehingga tanah belum sempat mengalami konsolidasi secara optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Badarinath, R., & El Naggar, H. (2021). Improving the Stability of High Embankments Founded on Soft Marine Clay by Utilizing Prefabricated Vertical Drains and Controlling the Pace of Construction. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(3), 68. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00312-8>
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (Fifth). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Carrillo, N. (1942). Simple Two and Three Dimensional Case in The Theory of Consolidation of Soils. *Journal of Mathematics and Physics*, 21(1-4), 1-5.
- Das, B. M. (1994). *Mekanika Tanah (Prinsip – Prinsip Rekayasa Geotekniks)* (Jilid II). Erlangga.
- Han, J. (2015). *Principles and Practice of Ground Improvement*. John Wiley & Sons, Inc.
- Hird, C. C., Pyrah, I. C., & Russel, D. (1992). Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground. *Géotechnique*, 42(3), 499-511. <https://doi.org/10.1680/geot.1992.42.3.499>

- Kurniawan, A. T., Imananto, E. I., & Yudianto, E. A. (2025). Perencanaan Perbaikan Tanah dengan Menggunakan PVD (Prefabricated Vertical Drain) dan Timbunan (Preloading) pada Pembangunan Gedung ITS Tower 3. *Jurnal Spesialis Teknik Sipil*, 6(2).
- Mulifandi, A. W., Satrya, T. R., Soemitro, R. A. A., & Hardiningsih, S. H. (2024). Effect of Embankment Construction Pace on Slope Stability With Varied Heights on Organic Soft Soil in the Sicincin-Padang Toll Road Sta 10+250-10+400. *Journal of Infrastructure and Facility Asset Management*, 6(3). <https://iptek.its.ac.id/index.php/jifam/article/view/19953/8112>
- Naibaho, A. G., & Waruwu, A. (2021). Study on Capacity of Pile Group in Soft Soil Using a Small-Scale Laboratory. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 27(2), 179–186. <https://doi.org/10.14710/mkts.v27i2.33737>
- Panduan Geoteknik 4: Timbunan Jalan Pada Tanah Lunak, Kementerian PUPR (2002).
- Prayitno, D. P., & Purwanto, E. (2025). Studi Pemilihan Alternatif Perkuatan Timbunan Badan Jalan di Atas Tanah Lunak dengan Metode Elemen Hingga dan Sistem Pengambilan Keputusan. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 23(3), 253–262. <https://iptek.its.ac.id/index.php/jats/article/download/23137/9391>
- Rosidi, D. (2022). Incremental Strength Gain Considerations in Staged Roadway Construction. *Civil Engineering Dimension*, 24(2), 125–132. <https://doi.org/10.9744/ced.24.2.125-132>
- SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik (2017).
- Talukdar, P., & Dey, A. (2021). Influence of the Rate of Construction on the Response of PVD Improved Soft Ground. In *Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns* (pp. 35–46). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6237-2_4
- Yi, S., & Liu, J. (2022). Field investigation of steel pipe pile under lateral loading in extensively soft soil. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.971485>
- Zahera, N., Mochtar, I. B., & Satrya, T. R. (2021). Pemecahan Masalah Stabilitas Abutment dan Oprit Jembatan di Atas Tanah Lunak Menggunakan Relieving Platform. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 19(3), 311.