

Analisis Perbaikan Tanah Lunak Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3 Dengan Berbagai Alternatif Metode Perbaikan Tanah

Muhammad Salman Mukhtar, *Yerry Kahaditu Firmansyah, Bagas Aryaseta, Miguel Felix Wijaya
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Kota Surabaya
[*\)yerry.kahaditu.ts@upnjatim.ac.id](mailto:yerry.kahaditu.ts@upnjatim.ac.id)

Abstract

The construction of Probolinggo–Banyuwangi Toll Road Package 3 faces geotechnical challenges due to variations in the thickness of compressible soft soil layers, which may cause excessive settlement and embankment instability. This study aims to analyze the influence of existing soil conditions on settlement and embankment stability and to determine the most appropriate ground improvement methods based on variations in compressible soil thickness. The research employed a quantitative method using secondary data, including Standard Penetration Test (SPT) data, embankment material parameters, ground improvement parameters, and seismic data for pseudostatic analysis. The N-SPT values were corrected and correlated into soil parameters, which were then modeled using PLAXIS 2D finite element software with the Hardening Soil model. The analysis results indicate that at STA 42+675, with a soft soil thickness of 5.5 m, the settlement difference under existing conditions was 16.22 cm and was successfully reduced to 7.9 cm after applying a combination of bamboo piles and bamboo mattress. At STA 45+700, with a soft soil thickness of 12 m, the existing condition experienced collapse during the embankment construction stage, whereas the combination of Prefabricated Vertical Drain (PVD) and preloading produced stable conditions with a settlement difference of 6.54 cm and a seismic safety factor of 1.375. This study concludes that selecting ground improvement methods based on the thickness of compressible soil layers can effectively improve embankment stability and control settlement.

Keywords: Soft Soil, Embankment Stability, Settlement, PLAXIS 2D, Soil Improvement

Abstrak

Pembangunan Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3 menghadapi permasalahan geoteknik berupa variasi ketebalan tanah lunak kompresibel yang berpotensi menyebabkan penurunan berlebih dan ketidakstabilan timbunan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kondisi tanah eksisting terhadap penurunan dan stabilitas timbunan serta menentukan metode perbaikan tanah yang paling sesuai berdasarkan variasi ketebalan tanah kompresibel. Penelitian menggunakan metode kuantitatif berbasis data sekunder berupa data *Standard Penetration Test* (SPT), parameter material timbunan, parameter perbaikan tanah, serta data gempa untuk analisis pseudostatik. Nilai N-SPT dikoreksi dan dikorelasikan menjadi parameter tanah, kemudian dimodelkan menggunakan perangkat lunak elemen hingga PLAXIS 2D dengan model tanah *Hardening Soil*. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada STA 42+675 dengan ketebalan tanah lunak 5,5 m, selisih penurunan kondisi eksisting sebesar 16,22 cm dan berhasil dikurangi menjadi 7,9 cm setelah penerapan kombinasi cerucuk dan matras bambu. Pada STA 45+700 dengan ketebalan tanah lunak 12 m, kondisi eksisting mengalami *collapse* pada tahap penimbunan, sedangkan kombinasi PVD dan *preloading* menghasilkan kondisi stabil dengan selisih penurunan sebesar 6,54 cm dan faktor keamanan gempa sebesar 1,375. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemilihan metode perbaikan tanah yang disesuaikan dengan ketebalan tanah kompresibel mampu meningkatkan stabilitas dan mengendalikan penurunan timbunan secara efektif.

Kata Kunci: Tanah Lunak, Stabilitas Timbunan, Penurunan, PLAXIS 2D, Perbaikan Tanah

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan tol di Indonesia sering menghadapi permasalahan geoteknik, terutama pada daerah yang didominasi tanah lunak. Tanah lunak memiliki karakteristik berupa daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan permeabilitas rendah sehingga berpotensi menyebabkan penurunan konsolidasi yang besar serta ketidakstabilan timbunan apabila tidak dilakukan perbaikan yang tepat (Pratiwi dkk., 2021).

Berbagai metode perbaikan tanah telah dikembangkan, penggunaan cerucuk dan matras bambu merupakan metode tradisional yang masih banyak digunakan di Indonesia, terutama untuk tanah lunak dengan ketebalan relatif kecil. Metode ini mampu meningkatkan daya dukung tanah serta mendistribusikan beban timbunan secara lebih merata (Hosang dkk., 2025), serta metode kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dengan *preloading* merupakan salah satu metode yang umum

digunakan dalam perbaikan tanah lunak di Indonesia. PVD berfungsi untuk mempercepat proses konsolidasi dengan memperpendek jalur drainase air pori sehingga waktu konsolidasi menjadi lebih singkat (Kurniawan dkk., 2025), *preloading* dilakukan dengan memberikan beban awal sebelum konstruksi utama untuk mempercepat penurunan tanah (Halimah dkk., 2022). Kombinasi PVD dan *preloading* terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas timbunan serta mengurangi penurunan jangka panjang (Fitriansyah dkk., 2024). Namun, penelitian terdahulu umumnya hanya berfokus pada satu metode perbaikan tanpa mempertimbangkan variasi ketebalan tanah kompresibel dalam satu lokasi proyek.

Berdasarkan data *Standard Penetration Test* (SPT) pada Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3, ketebalan tanah kompresibel bervariasi, yaitu 5,5 meter pada STA. 42+675 dan 12 meter pada STA. 45+700 dengan nilai N-SPT kurang dari 10, yang menunjukkan kondisi tanah lunak hingga sangat lunak (Direktorat

Jenderal Bina Marga, 2024). Variasi ini menuntut penerapan metode perbaikan yang berbeda sesuai karakteristik tanah.

Penelitian ini mengusulkan pendekatan adaptif dengan mengombinasikan metode perbaikan tanah berdasarkan ketebalan lapisan kompresibel, yaitu penggunaan cerucuk dan matras bambu pada STA. 42+675 serta PVD dan *preloading* pada STA. 45+700. Permasalahan yang dikaji adalah pengaruh kondisi tanah eksisting (RTA) terhadap penurunan dan stabilitas timbunan.

Hipotesis penelitian ini adalah bahwa metode perbaikan yang disesuaikan dengan ketebalan tanah kompresibel akan menghasilkan penurunan yang lebih terkendali dan meningkatkan stabilitas timbunan secara optimal. Adapun tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh kondisi tanah eksisting terhadap penurunan dan stabilitas timbunan serta menentukan alternatif metode perbaikan yang efektif, aman, dan memenuhi kriteria teknis.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis kuantitatif berbasis data sekunder untuk mengevaluasi karakteristik tanah lunak serta menentukan alternatif metode perbaikan tanah pada Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3. Lokasi penelitian difokuskan pada STA. 42+675 dan STA. 45+700 yang memiliki lapisan tanah kompresibel dengan nilai N-SPT kurang dari 10.

Data yang digunakan meliputi data *Standard Penetration Test* (SPT), parameter material timbunan dan *replacement*, material perbaikan tanah, serta geometri potongan melintang. Parameter gempa berupa *Peak Ground Acceleration* (PGA) juga digunakan dalam analisis pseudostatik.

Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pengumpulan data, nilai N-SPT yang diperoleh dari lapangan dikoreksi untuk mendapatkan nilai yang lebih representatif terhadap kondisi tanah sebenarnya. Koreksi ini diperlukan agar hasil pengujian dapat digunakan dalam penentuan parameter tanah melalui korelasi empiris yang telah banyak digunakan dalam studi geoteknik di Indonesia (Anggrahini dkk., 2022). Parameter tanah hasil korelasi digunakan sebagai input dalam pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method*). Metode ini banyak digunakan dalam analisis geoteknik karena mampu merepresentasikan perilaku tanah secara nonlinier serta mempertimbangkan tahapan konstruksi secara realistis (Santi Pratiwi & Warsih Winoto, 2025). Selanjutnya dilakukan analisis kondisi eksisting (RTA) untuk mengevaluasi penurunan dan stabilitas timbunan.

Berdasarkan hasil analisis yang belum memenuhi kriteria teknis, direncanakan alternatif perbaikan tanah, yaitu kombinasi cerucuk dan matras bambu pada STA. 42+675 serta kombinasi PVD dan *preloading* pada STA. 45+700. Setiap alternatif kemudian dianalisis untuk menilai efektivitasnya dalam mengurangi penurunan dan meningkatkan stabilitas timbunan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Tanah

Berdasarkan pengujian SPT, kedalaman penyelidikan ditentukan oleh letak lapisan tanah keras atau batas pengeboran rencana. Detail kondisi lapisan tanah tersebut dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Penyelidikan Tanah

Lokasi	Lapisan	Kedalaman (meter)	N-SPT	Deskripsi
(SPT-1) STA. 42+675	1	0 - 5,5	8	lempung coklat pasiran krikilan
	2	5,5 - 9	21	lempung abu-abu kecoklatan pasiran krikilan
	3	9 - 13,5	27	lempung coklat tua pasiran krikilan
	4	13,5 - 19	29	lempung coklat tua muda pasiran krikilan
	5	19 - 22	35	pasir halus lanauan
	6	22 - 24	60	lempung coklat keabuan krikilan batu pasiran lapuk
	7	24 - 28	60	batu pasir bolderan
	8	28 - 30,5	60	lempung keras merah batu pasiran krikilan
(SPT-2) STA. 45+700	1	0 - 5	5	tanah liat dan lumpur, coklat, sedikit pasir, lunak hingga sedang
	2	5 - 12	7	tanah liat dan lumpur, abu-abu, sedikit pasir, sedang hingga kaku
	3	12 - 18	12	tanah liat dan pasir, abu-abu, sedikit lumpur, kaku
	4	18 - 22	27	pasir dan lumpur, abu-abu, sedikit hingga agak tanah liat, sedang
	5	22 - 27,5	15	pasir dan lumpur, abu-abu, sedikit tanah liat, sedang
	6	27,5 - 28,5	13	pasir dan lumpur, abu-abu, sedikit tanah liat
	7	28,5 - 30	37	tanah liat dan lumpur, abu-abu, keras

Sumber: PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Koreksi Data Tanah

Koreksi N-SPT merupakan proses standarisasi nilai pukulan hasil uji SPT untuk menghasilkan parameter yang komparabel antar kondisi lapangan. Nilai N di lapangan dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti spesifikasi alat, kondisi tanah, dan elevasi muka air tanah. Hasil koreksi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Koreksi Data Tanah

Lokasi	Lapisan	Kedalaman (meter)	N-SPT	N ₆₀	(N ₁) ₆₀	(N ₁) ₆₀ (CORR)
(SPT-1) STA. 42+675	1	0 - 5,5	8	8	8	8
	2	5,5 - 9	21	23	23	23
	3	9 - 13,5	27	31	27	21
	4	13,5 - 19	29	34	26	21
	5	19 - 22	35	41	30	22
	6	22 - 24	60	70	48	32
	7	24 - 28	60	70	44	29
	8	28 - 30,5	60	70	70	70
(SPT-2) STA. 45+700	1	0 - 5	5	4	4	4
	2	5 - 12	7	8	8	8
	3	12 - 18	12	14	13	13
	4	18 - 22	27	32	26	21
	5	22 - 27,5	15	18	13	13
	6	27,5 - 28,5	13	15	11	11
	7	28,5 - 30	37	43	43	43

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Korelasi Data Tanah

Parameter tanah berikut diperoleh dari hasil korelasi data uji SPT. Parameter STA. 42+675 yang disajikan meliputi sifat fisik dan mekanik tanah tiap lapisan, yang selanjutnya digunakan sebagai input dalam pemodelan numerik pada program bantu yang dapat dilihat. Nilainya disajikan pada Gambar 1.

$\gamma_{unsat} = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 18 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,8$ $E_{50ref} = 4760 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 3808 \text{ kN/m}^2$	1	$E_{urref} = 14280 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 4 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 29^\circ$ $\psi = 0$ $k = 0,0000864 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,55$ $E_{50ref} = 13965 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 11172 \text{ kN/m}^2$	2	$E_{urref} = 41895 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 11,6 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 34^\circ$ $\psi = 4^\circ$ $k = 0,0000864 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 20 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,5$ $E_{50ref} = 12639 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 10111 \text{ kN/m}^2$	3	$E_{urref} = 37918 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 10,5 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 35^\circ$ $\psi = 5^\circ$ $k = 0,0000864 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 20 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,3$ $E_{50ref} = 12316 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 9852 \text{ kN/m}^2$	4	$E_{urref} = 36947 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 10,3 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 35^\circ$ $\psi = 5^\circ$ $k = 0,0000864 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 20 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,3$ $E_{50ref} = 22267 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 17813 \text{ kN/m}^2$	5	$E_{urref} = 66800 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 0 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 36^\circ$ $\psi = 6^\circ$ $k = 4,32 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 22 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 24 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,3$ $E_{50ref} = 18936 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 15149 \text{ kN/m}^2$	6	$E_{urref} = 56809 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 15,8 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 41^\circ$ $\psi = 11^\circ$ $k = 12,5 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 23 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 24 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,3$ $E_{50ref} = 29396 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 23517 \text{ kN/m}^2$	7	$E_{urref} = 88189 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 4 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 40^\circ$ $\psi = 10^\circ$ $k = 12,5 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 23 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 24 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,35$ $E_{50ref} = 42000 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 33600 \text{ kN/m}^2$	8	$E_{urref} = 126000 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 35 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 48^\circ$ $\psi = 18^\circ$ $k = 0,0000864 \text{ m/day}$

Gambar 1. Parameter Hasil Korelasi Data Tanah (SPT-1) STA. 42+675
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Parameter STA. 45+700 yang disajikan meliputi sifat fisik dan mekanik tanah tiap lapisan, yang selanjutnya digunakan sebagai input dalam pemodelan numerik pada program bantu yang dapat dilihat. Nilainya disajikan pada Gambar 2.

$\gamma_{unsat} = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 18 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 1$ $E_{50ref} = 4262 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 3409 \text{ kN/m}^2$	1	$E_{urref} = 12785 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 0,4 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 29^\circ$ $\psi = 0$ $k = 0,0000864 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 18 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,85$ $E_{50ref} = 5009 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 4007 \text{ kN/m}^2$	2	$E_{urref} = 15027 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 0,8 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 30^\circ$ $\psi = 0$ $k = 0,0000864 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 18 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,6$ $E_{50ref} = 12855 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 10284 \text{ kN/m}^2$	3	$E_{urref} = 38564 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 0 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 31^\circ$ $\psi = 1^\circ$ $k = 0,0000864 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,4$ $E_{50ref} = 20641 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 16513 \text{ kN/m}^2$	4	$E_{urref} = 61922 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 0 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 35^\circ$ $\psi = 5^\circ$ $k = 0,864 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 19 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,55$ $E_{50ref} = 13256 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 10605 \text{ kN/m}^2$	5	$E_{urref} = 39768 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 0 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 31^\circ$ $\psi = 1^\circ$ $k = 0,864 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 19 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,58$ $E_{50ref} = 11308 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 9047 \text{ kN/m}^2$	6	$E_{urref} = 33925 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 0 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 30^\circ$ $\psi = 0^\circ$ $k = 0,864 \text{ m/day}$
$\gamma_{unsat} = 20 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$ $e_{init} = 0,3$ $E_{50ref} = 18709 \text{ kN/m}^2$ $E_{oedref} = 14967 \text{ kN/m}^2$	7	$E_{urref} = 56128 \text{ kN/m}^2$ $c'_{ref} = 16 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 36^\circ$ $\psi = 6^\circ$ $k = 0,0000864 \text{ m/day}$

Gambar 2. Parameter Hasil Korelasi Data Tanah (SPT-2) STA. 45+700
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Parameter Tanah Timbunan dan Replacement

Untuk analisis penurunan dan stabilitas diperlukan parameter material guna merepresentasikan tanah timbunan dan replacement. Properti *Common Borrow Material* (CBM) disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter CBM

No.	Parameter	CBM	Satuan
1	Soil Model	Hardening Soil	-
2	Drainage Type	Drained	-
3	γ_{unsat}	19,00	kN/m ³
4	γ_{sat}	20,00	kN/m ³
5	e_{init}	0,50	-
6	k_x	0,864	m/day
7	k_y	0,864	m/day
8	v_{ur}	0,30	-
9	E_{50}^{ref}	30000	kN/m ²
10	E_{oed}^{ref}	24000	kN/m ²
11	E_{ur}^{ref}	90000	kN/m ²
12	c'_{ref}	5,0	kN/m ²
13	ϕ'	29	°
14	ψ	0	°
15	R_{inter}	0,75	-

Sumber: PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Parameter Geotekstil

Parameter geotekstil yang digunakan sebagai input material geogrid dalam analisis numerik diperoleh berdasarkan data spesifikasi teknis pabrikan dan hasil pengujian laboratorium. Parameter utama yang digunakan meliputi modulus kekakuan aksial (EA) dan kekuatan tarik plastis maksimum ($N_{p,1}$). Nilai EA diperoleh dari perhitungan kekuatan tarik izin geotekstil yang telah mempertimbangkan faktor reduksi jangka panjang, kemudian dibagi dengan batas regangan izin sebesar 6% karena sesuai struktur timbunan (Tjie-Long, 2015). Sementara itu, nilai $N_{p,1}$ diperoleh dari hasil uji kuat tarik laboratorium berdasarkan nilai tegangan tarik maksimum geotekstil. Parameter yang digunakan disajikan pada Tabel 4.

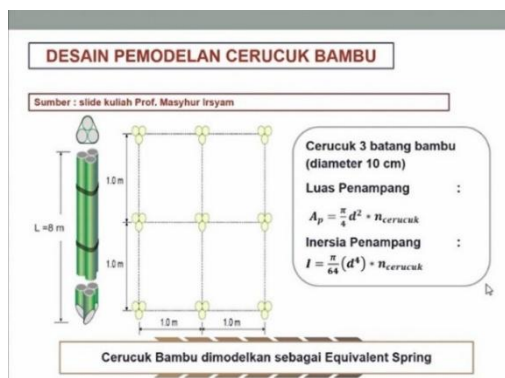
Tabel 4. Parameter Geotekstil

No.	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Modulus Kekakuan Aksial	EA	378,79	kN/m
2	Kekuatan Tarik Plastis Maksimum	$N_{p,1}$	17,71	kN

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

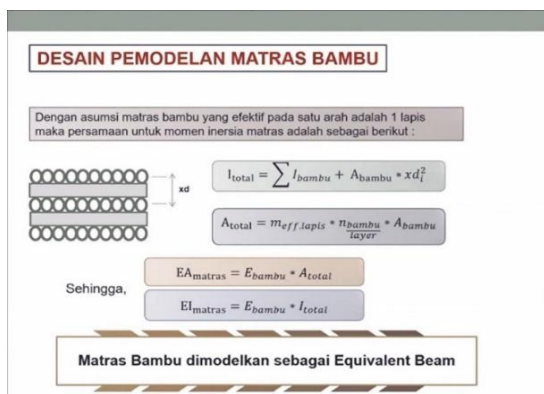
Parameter Cerucuk dan Matras Bambu

Perhitungan parameter cerucuk bambu mengacu pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain Pemodelan Cerucuk Bambu
Sumber: Prof. Masyhur Irsyam Presentation (2008)

Perhitungan matras bambu mengacu pada Gambar 4.



Gambar 4. Desain Pemodelan Matras Bambu
Sumber: Prof. Masyhur Irsyam Presentation (2008)

Parameter cerucuk dan matras bambu yang digunakan dalam pemodelan numerik ditentukan berdasarkan pendekatan geometri penampang serta sifat mekanis material bambu. Nilai modulus elastisitas bambu yang digunakan dalam perhitungan sebesar 9.000.000 kN/m² dan nilai poisson rasio sebesar 0,25. Pada cerucuk bambu yang dimodelkan sebagai elemen *node-to-node anchor*, parameter utama yang digunakan hanya kekakuan aksial (EA) yang dihitung berdasarkan dimensi serta jumlah batang bambu dalam satu kelompok cerucuk. Sementara itu, pada matras bambu yang dimodelkan sebagai elemen *plate*, parameter yang digunakan meliputi kekakuan lentur (Elmatras) dan kekakuan aksial (EAmatras) yang diperoleh dari konfigurasi susunan bambu dan modulus elastisitas material (Kevin, 2025). Rekapitulasi hasil perhitungan parameter cerucuk bambu yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Parameter Cerucuk Bambu

No.	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Luas Penampang Total	A_p	0,02356	m ²
2	Kekakuan Aksial	EA	212057,50	kN/m

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Rekapitulasi hasil perhitungan parameter matras bambu yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Parameter Matras Bambu

No.	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Luas Penampang Total	A_{total}	0,4712	m ²
2	Kekakuan Aksial	EA_{matras}	212057,041	kN/m
3	Momen Inersia	I_{total}	0,003189	m ⁴
4	Kekakuan Lentur	EI_{matras}	28701	kN/m ²

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Dalam pemodelan *plate* dengan tipe material *Elasto-plastic*, program bantu memerlukan batasan kapasitas agar elemen tersebut tidak hanya bersifat kaku secara elastis, tetapi juga dapat mengalami leleh (*yield*) jika beban melampaui kapasitas materialnya (Weber & Altenbach, 2024). Parameter tersebut disajikan pada Tabel 7.

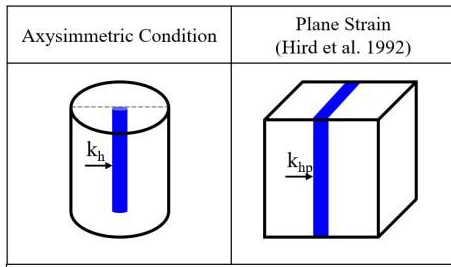
Tabel 7. Parameter Tipe Material *Elasto-plastic* Matras Bambu

No.	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Momen Lentur Maksimum	M_p	500	kNm
2	Kekuatan Maksimum	$N_{p,1}$ & $N_{p,2}$	400	kN/m

Sumber: Salsabila (2025)

Parameter Permeabilitas Horizontal Ekivalen PVD

Meskipun setiap drainase vertikal bersifat simetris terhadap sumbu, sebagian besar analisis elemen hingga dilakukan berdasarkan *plane-strain* untuk efisiensi komputasi (Indraratna dkk., 2003). Untuk menggunakan analisis elemen hingga dua dimensi yang realistis untuk drainase vertikal, kesetaraan antara analisis *plane-strain* dan simetris terhadap sumbu perlu ditetapkan, seperti penyetaraan koefisien permeabilitas horizontal yang ditunjukkan pada skema pada Gambar 5.



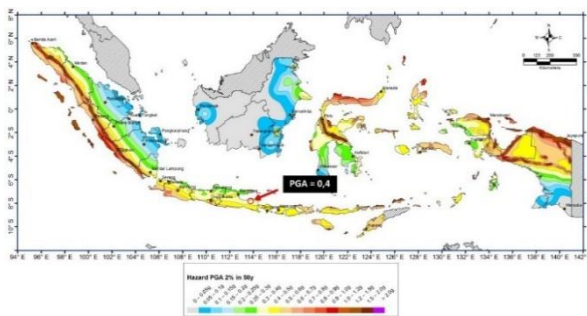
Gambar 5. Skema Permeabilitas Horizontal Ekuivalen
Sumber: Gusnadi dkk. (2024)

Untuk drainase ideal tanpa mempertimbangkan efek *smear* dan *well resistance*, koefisien permeabilitas horizontal ekuivalen dapat dihitung menggunakan persamaan menurut (Hird dkk., 1992) berikut:

$$\frac{k_{hp}}{k_h} = \frac{0,67}{[\ln(n)-0,75]} \quad (1)$$

Pembebanan Gempa

Gempa rencana untuk lereng galian dan timbunan ditetapkan dengan peluang terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang 500 tahun), mengacu pada peta gempa pada Gambar 6.



Gambar 6. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) Untuk Probabilitas Terlampaui 2% Dalam 50 Tahun
Sumber: Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

Dalam analisis stabilitas timbunan pada tanah lunak, beban gempa tidak cukup didasarkan pada percepatan batuan dasar karena adanya amplifikasi gelombang. Oleh karena itu, koefisien seismik dan parameter situs digunakan untuk memperoleh percepatan gempa konstan (α) sebagai input pseudostatik (Mahardika dkk., 2023), sesuai persamaan berikut:

$$\alpha = PGA \times F_{PGA} \times kh \quad (2)$$

Batas Penurunan Timbunan

Penurunan yang terjadi pada timbunan dibatasi maksimum sebesar 100 mm dalam waktu 10 tahun setelah masa konstruksi selesai (Permana dkk., 2023).

Faktor Keamanan Stabilitas Timbunan

Faktor keamanan minimum untuk analisis pseudostatik adalah $FK > 1,1$ berdasarkan nilai PGA sesuai SNI 8460 (Standar Nasional Indonesia, 2017). Kriteria faktor keamanan timbunan selanjutnya disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Nilai Faktor Keamanan Untuk Lereng Tanah

Biaya dan konsekuensi dari kegagalan lereng	Tingkat ketidakpastian kondisi analisis	
	Rendah ^a	Tinggi ^b
Biaya perbaikan sebanding dengan biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,25	1,5
Biaya perbaikan lebih besar dari biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,5	2,0 atau lebih

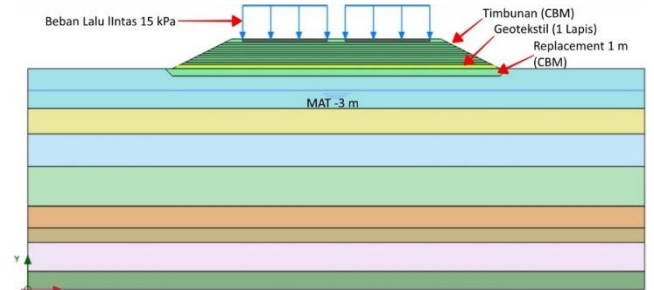
^a) Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan rendah, jika kondisi geologi dapat dipahami, kondisi tanah seragam, penyelidikan tanah konsisten, lengkap dan logis terhadap kondisi di lapangan.
^b) Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan tinggi, jika kondisi geologi sangat kompleks, kondisi tanah bervariasi, dan penyelidikan tanah tidak konsisten dan tidak dapat diandalkan

Sumber: SNI 8460 (2017)

Analisis Numerik Penurunan dan Stabilitas

STA. 42+675 Kondisi Eksisting (RTA)

Analisis kondisi eksisting (RTA) pada STA. 42+675 dilakukan dengan mempertimbangkan 1 lapis geotekstil dan *replacement* setebal 1 m. Geometri pemodelan ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Geometri Pemodelan STA. 42+675 Kondisi Eksisting (RTA)

Sumber: Hasil Analisis (2026)

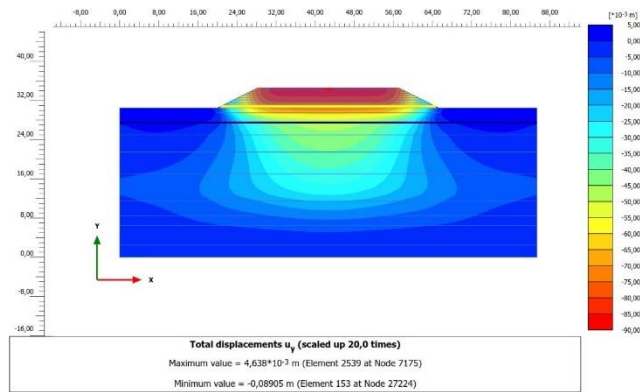
ID	Calculation...	Loading type...	Time interval	Estimated m...	Ignore and...	Reset displ...	Updated m...	Max. disp (D)	Final disp	Last disp
0	Initial phase [InitialPhase]		0,000 day	0,000 day				0,000	0	0
1	Fill Replacement [Phase_29]		0,000 day	0,000 day				0,000	567	569
2	Replacement [Phase_30]		0,000 day	0,000 day				0,000	570	576
3	Timbunan [Phase_31]		3,000 day	3,000 day				0,000	577	578
4	Timbunan [Phase_32]		3,000 day	6,000 day				0,000	579	580
5	Timbunan [Phase_33]		3,000 day	9,000 day				0,000	581	582
6	Timbunan [Phase_34]		3,000 day	12,000 day				0,000	583	584
7	Timbunan [Phase_35]		3,000 day	15,000 day				0,000	585	586
8	Timbunan [Phase_36]		3,000 day	18,000 day				0,000	587	588
9	Timbunan [Phase_37]		3,000 day	21,000 day				0,000	589	590
10	Timbunan [Phase_38]		3,000 day	24,000 day				0,000	591	592
11	Timbunan [Phase_39]		3,000 day	27,000 day				0,000	593	594
12	Timbunan [Phase_40]		3,000 day	30,000 day				0,000	595	596
13	Timbunan [Phase_41]		3,000 day	33,000 day				0,000	597	598
14	Timbunan [Phase_42]		3,000 day	36,000 day				0,000	599	700
15	Timbunan [Phase_43]		3,000 day	39,000 day				0,000	701	702
16	Final Konstruksi [Phase_45]		0,000 day	39,000 day				0,000	703	710
17	Operasional 1 Tahun [Phase_46]		365,0 day	404,0 day				0,000	711	721
18	Operasional 10 Tahun [Phase_47]		3650 day	4054 day				0,000	722	722
19	Gempa x+ [Phase_48]		0,000 day	4054 day				0,000	733	737
20	SF Gempa x+ [Phase_53]		0,000 day	4054 day				0,000	738	837
21	Gempa x- [Phase_49]		0,000 day	4054 day				0,000	838	942
22	SF Gempa x- [Phase_54]		0,000 day	4054 day				0,000	843	942
23	SF Operasional 1 Tahun [Phase_50]		0,000 day	404,0 day				0,000	843	1042
24	SF Final Konstruksi [Phase_51]		0,000 day	39,000 day				0,000	1042	1042

Gambar 8. Tahapan Pemodelan STA. 42+675 Kondisi Eksisting (RTA)

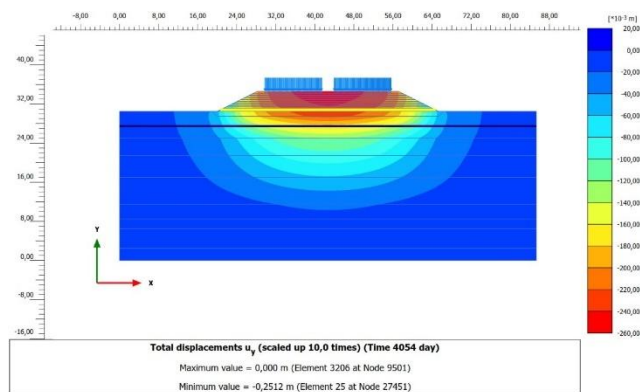
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Analisis mempertimbangkan tahapan konstruksi dan durasinya. Tahapan dan waktu pelaksanaan pada kondisi eksisting (RTA) ditunjukkan pada Gambar 8.

Berdasarkan pemodelan dan tahapan yang sudah dilakukan. Gambar 9 dan Gambar 10 merupakan hasil analisis penurunan yang terjadi pada STA. 42+675 kondisi eksisting (RTA).



Gambar 9. Penurunan Fase Final Konstruksi STA. 42+675 Kondisi Eksisting (RTA)
Sumber: Hasil Analisis (2026)



Gambar 10. Penurunan Fase Operasional 10 Tahun STA. 42+675 Kondisi Eksisting (RTA)
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Reached values	
Reached total time	39,00 day
CSP - Relative stiffness	0,01584
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	83,41 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	1,854

Gambar 11. Faktor Keamanan Stabilitas Fase Final Konstruksi STA. 42+675 Kondisi Eksisting (RTA)
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Berdasarkan pemodelan dan tahapan yang sudah dilakukan. Gambar 11, Gambar 12, dan Gambar 13 merupakan hasil analisis stabilitas yang terjadi pada STA. 42+675 kondisi eksisting (RTA).

Reached values	
Reached total time	4054 day
CSP - Relative stiffness	-4,130E-15
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	15,65 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	1,851

Gambar 12. Faktor Keamanan Stabilitas Fase Operasional 10 Tahun STA. 42+675 Kondisi Eksisting (RTA)
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Reached values	
Reached total time	4054 day
CSP - Relative stiffness	0,7053E-9
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	62,54 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	1,456

Gambar 13. Faktor Keamanan Stabilitas Fase Gempa STA. 42+675 Kondisi Eksisting (RTA)
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Rekapitulasi hasil analisis penurunan dan stabilitas STA. 42+675 kondisi eksisting disajikan pada Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 9. Rekapitulasi Penurunan STA. 42+675 Kondisi Eksisting (RTA)

No	Fase	Penuruna	Perbedaa	Syarat	Keteranga
		(cm)	n	n	
			Δ	(cm)	
		(cm)	(cm)	(cm)	
1	Final Konstruksi	8,9	-	-	-
2	Operasional 10 Tahun	25,12	16,22	$\Delta < 10$	Tidak Aman

Sumber: Hasil Analisis (2026)

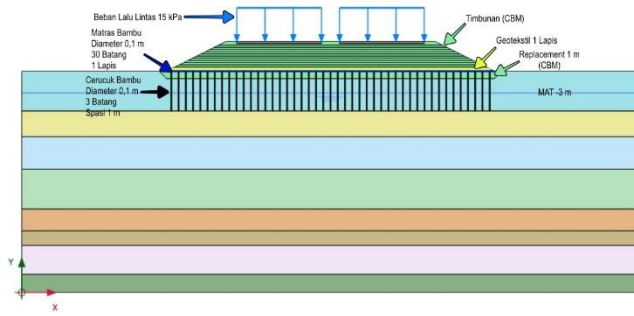
Tabel 10. Rekapitulasi Faktor Keamanan Stabilitas STA. 42+675 Kondisi Eksisting

No.	Fase	Faktor	Syarat Faktor	Keterangan
		Keamanan SF		
1	Final Konstruksi	1,854	SF > 1,5	Aman
2	Operasional 10 Tahun	1,851	SF > 1,5	Aman
3	Gempa	1,456	SF > 1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2026)

STA. 42+675 Kondisi Perbaikan

Karena hasil analisis kondisi eksisting (RTA) tidak memenuhi kriteria penurunan izin, direncanakan perbaikan dengan kombinasi cerucuk dan matras bambu. Geometri pemodelan ditunjukkan pada Gambar 14.



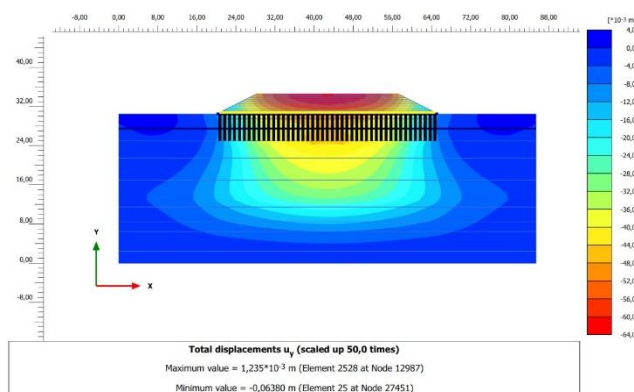
Gambar 14. Geometri Pemodelan STA. 42+675 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Analisis mencakup tahapan konstruksi dan durasinya. Tahapan dan waktu pada kondisi perbaikan ditunjukkan pada Gambar 15.

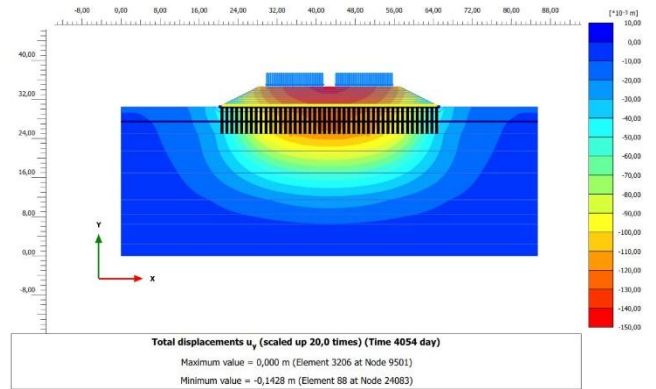
ID	Calculation L...	Loading type...	Time interval	Estimated m...	Ignore un...	Reset displa...	Updated me...	Max steps (D)	First stop	Last stop
Initial phase [InitialPhase]			0,000 day	0,000 day	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10000	0	0
Gei Replacement [Phase_1]			0,000 day	0,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	1	3
Replacement [Phase_2]			0,000 day	0,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	4	10
Cerucuk Bambu [Phase_3]			0,000 day	0,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	11	13
Matras Bambu [Phase_4]			0,000 day	0,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	15	18
Timbunan [Phase_5]			3,000 day	3,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	19	20
Timbunan [Phase_6]			3,000 day	6,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	21	22
Timbunan [Phase_7]			3,000 day	9,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	23	24
Timbunan [Phase_8]			3,000 day	12,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	25	26
Timbunan [Phase_9]			3,000 day	15,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	27	28
Timbunan [Phase_10]			3,000 day	18,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	29	30
Timbunan [Phase_11]			3,000 day	21,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	31	32
Timbunan [Phase_12]			3,000 day	24,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	33	34
Timbunan [Phase_13]			3,000 day	27,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	35	36
Timbunan [Phase_14]			3,000 day	30,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	37	38
Timbunan [Phase_15]			3,000 day	33,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	39	40
Timbunan [Phase_16]			3,000 day	36,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	41	42
Timbunan [Phase_17]			3,000 day	39,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	43	44
Final Konstruksi [Phase_18]			3,000 day	39,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	374	520
Operasional 1 Tahun [Phase_20]			365,0 day	404,0 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	457	465
Operasional 10 Tahun [Phase_22]			3650 day	4054 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	3143	3273
Gempa x+ [Phase_27]			0,000 day	4054 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	100	50	149
SF Gempa x+ [Phase_27]			0,000 day	4054 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	100	150	154
Gempa x- [Phase_28]			0,000 day	4054 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	100	155	254
SF Gempa x- [Phase_28]			0,000 day	4054 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	100	255	354
SF Operasional 1 Tahun [Phase_23]			0,000 day	404,0 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1000	2143	2143
SF Final Konstruksi [Phase_24]			0,000 day	39,000 day	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	100	355	454

Gambar 15. Tahapan Pemodelan STA. 42+675 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Berdasarkan pemodelan dan tahapan konstruksi, Gambar 16 hingga Gambar 20 menunjukkan hasil analisis penurunan dan stabilitas pada STA. 42+675 kondisi perbaikan.



Gambar 16. Penurunan Fase Final Konstruksi STA. 42+675 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)



Gambar 17. Penurunan Fase Operasional 10 Tahun STA. 42+675 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Reached values	
Reached total time	39,00 day
CSP - Relative stiffness	2,097E-9
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	202,3 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	1,852

Gambar 18. Faktor Keamanan Stabilitas Fase Final Konstruksi STA. 42+675 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Reached values	
Reached total time	4054 day
CSP - Relative stiffness	0,01394E-6
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	172,1 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	1,852

Gambar 19. Faktor Keamanan Stabilitas Fase Operasional 10 Tahun STA. 42+675 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Reached values	
Reached total time	4054 day
CSP - Relative stiffness	-0,6401E-9
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	84,47 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	1,458

Gambar 20. Faktor Keamanan Stabilitas Fase Gempa STA. 42+675 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Rekapitulasi hasil analisis penurunan dan stabilitas STA. 42+675 kondisi perbaikan disajikan pada Tabel 11 dan Tabel 12.

Tabel 11. Rekapitulasi Penurunan STA. 42+675 Kondisi Perbaikan

Fase	Penurunan (cm)	Perbedaan Penurunan Δ (cm)	Syarat Perbedaan Penurunan (cm)	Keterangan
Final Konstruksi	6,38	-	-	-
Operasional 10 Tahun	14,28	7,9	$\Delta < 10$	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2026)

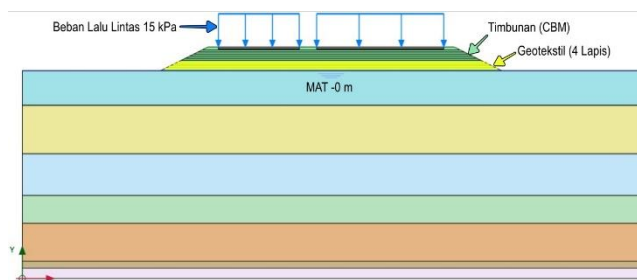
Tabel 12. Rekapitulasi Faktor Keamanan Stabilitas STA. 42+675 Kondisi Perbaikan

Fase	Faktor Keamanan SF	Syarat Faktor Keamana	Keterangan
Final Konstruksi	1,852	SF > 1,5	Aman
Operasional 10 Tahun	1,852	SF > 1,5	Aman
Gempa	1,458	SF > 1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2026)

STA. 45+700 Kondisi Eksisting (RTA)

Analisis kondisi eksisting (RTA) STA. 45+700 dilakukan dengan 4 lapis geotekstil tanpa perbaikan tambahan. Geometri pemodelan ditunjukkan pada Gambar 21.



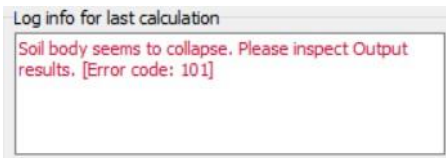
Gambar 21. Geometri Pemodelan STA. 45+700 Kondisi Eksisting (RTA)
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Analisis mencakup tahapan konstruksi dan durasinya; detail kondisi eksisting (RTA) ditunjukkan pada Gambar 22.

Activity	Calculation...	Loading Type...	Time Interval	Estimated m...	Ignore end...	Reset displa...	Upload m...	Max step (D)	First step	Last step
Initial phase [InitialPhase]			0,000 day	0,000 day				10000	0	0
Timbunan [Phase_24]			3,000 day	3,000 day				10000	583	584
Timbunan [Phase_25]			3,000 day	6,000 day				10000	585	586
Timbunan [Phase_26]			3,000 day	9,000 day				10000	587	590
Timbunan [Phase_27]			3,000 day	12,000 day				10000	591	623
Timbunan [Phase_28]			3,000 day	15,000 day				10000	624	697
Timbunan [Phase_29]			3,000 day	18,000 day				10000	698	833
Timbunan [Phase_30]			3,000 day	21,000 day				10000	834	1125
Timbunan [Phase_31]			3,000 day	24,000 day				10000	1136	1890
Timbunan [Phase_32]			3,000 day	27,000 day				10000	1891	3418
Timbunan [Phase_33]			3,000 day	30,000 day				10000	3419	3456
Timbunan [Phase_34]			3,000 day	33,000 day				10000		
Final Konstruksi [Phase_36]			3,000 day	33,000 day				10000		
Operasional 1 Tahun [Phase_37]			365,0 day	398,0 day				10000		
Operasional 10 Tahun [Phase_38]			3655 day	4048 day				10000		
Gempa x-+ [Phase_39]			0,000 day	4048 day				10000		
SF Gempa x-+ [Phase_40]			0,000 day	4048 day				10000		
Gempa x- [Phase_41]			0,000 day	4048 day				10000		
SF Gempa x- [Phase_42]			0,000 day	4048 day				10000		
SF Operasional 10 Tahun [Phase_43]			0,000 day	4048 day				10000		
SF Operasional 1 Tahun [Phase_44]			0,000 day	398,0 day				10000		
SF Final Konstruksi [Phase_45]			0,000 day	33,000 day				10000		

Gambar 22. Tahapan Pemodelan STA. 45+700 Kondisi Eksisting (RTA)
Sumber: Hasil Analisis (2026)

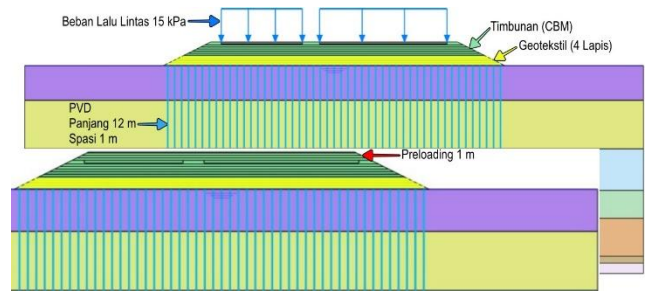
Hasil pemodelan menunjukkan indikasi kegagalan saat penimbunan lapis ke-10 (Phase_33), ditandai notifikasi “Soil body seems to collapse” (Error code: 101) pada Gambar 23.



Gambar 23. Collapse Pada Fase Penimbunan Lapis ke-10 STA. 45+700 Kondisi Eksisting (RTA)
Sumber: Hasil Analisis (2026)

STA. 45+700 Kondisi Perbaikan

Karena kondisi eksisting (RTA) mengalami collapse pada lapis timbunan ke-10, direncanakan perbaikan dengan kombinasi PVD dan preloading. Geometri pemodelan ditunjukkan pada Gambar 24.



Gambar 24. Geometri Pemodelan STA. 45+700 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

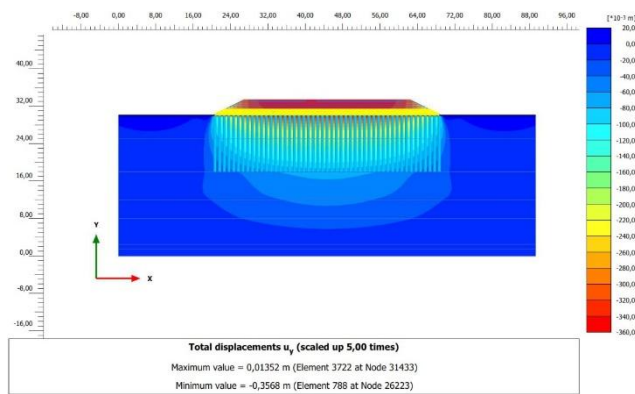
Analisis mencakup tahapan konstruksi dan durasinya; detail kondisi perbaikan ditunjukkan pada Gambar 25.

Activity	Calculation...	Loading Type...	Time Interval	Estimated m...	Ignore end...	Reset displa...	Upload m...	Max step (D)	First step	Last step
Initial phase [InitialPhase]			0,000 day	0,000 day				10000	0	0
PVD [Phase_1]			0,000 day	0,000 day				10000	1	2
Timbunan [Phase_2]			6,000 day	6,000 day				10000	3	4
Timbunan [Phase_3]			6,000 day	12,000 day				10000	5	6
Timbunan [Phase_4]			6,000 day	18,000 day				10000	7	8
Timbunan [Phase_5]			6,000 day	24,000 day				10000	9	10
Timbunan [Phase_6]			9,000 day	33,000 day				10000	11	12
Timbunan [Phase_7]			3,000 day	36,000 day				10000	13	14
Timbunan [Phase_8]			3,000 day	39,000 day				10000	15	16
Timbunan [Phase_9]			3,000 day	42,000 day				10000	3457	3459
Timbunan [Phase_10]			3,000 day	45,000 day				10000	17	19
Timbunan [Phase_11]			3,000 day	48,000 day				10000	20	22
Timbunan [Phase_12]			3,000 day	51,000 day				10000	23	25
Preloading [Phase_7]			30,000 day	61,000 day				10000	26	29
Final Konstruksi [Phase_9]			0,000 day	61,000 day				10000	30	32
Operasional 1 Tahun [Phase_10]			365,0 day	426,0 day				10000	3460	3469
Operasional 10 Tahun [Phase_11]			3650 day	4076 day				10000	33	44
Gempa x-+ [Phase_12]			0,000 day	4076 day				10000	45	55
SF Gempa x-+ [Phase_13]			0,000 day	4076 day				10000	56	155
Gempa x- [Phase_14]			0,000 day	4076 day				10000	156	165
SF Gempa x- [Phase_15]			0,000 day	4076 day				10000	166	265
SF Operasional 10 Tahun [Phase_16]			0,000 day	4076 day				10000	266	365
SF Operasional 1 Tahun [Phase_17]			0,000 day	426,0 day				10000	366	465
SF Final Konstruksi [Phase_14]			0,000 day	61,000 day				10000	466	565

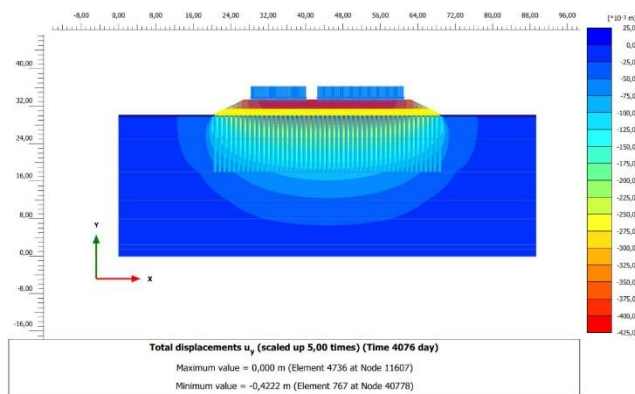
Gambar 25. Tahapan Pemodelan STA. 45+700 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Berdasarkan pemodelan dan tahapan konstruksi, Gambar 26–Gambar 30 menunjukkan hasil analisis

penurunan dan stabilitas pada STA. 45+700 kondisi perbaikan.



Gambar 26. Penurunan Fase Final Konstruksi STA. 45+700 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)



Gambar 27. Penurunan Fase Operasional 10 Tahun STA. 45+700 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Reached values	
Reached total time	61,00 day
CSP - Relative stiffness	0,4349E-3
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	51,92 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	2,272

Gambar 28. Faktor Keamanan Stabilitas Fase Final Konstruksi STA. 45+700 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Reached values	
Reached total time	4076 day
CSP - Relative stiffness	0,03580E-3
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	26,43 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	2,182

Gambar 29. Faktor Keamanan Stabilitas Fase Operasional 10 Tahun STA. 45+700 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Reached values	
Reached total time	4076 day
CSP - Relative stiffness	2,366E-6
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	69,18 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	1,375

Gambar 30. Faktor Keamanan Stabilitas Fase Gempa STA. 45+700 Kondisi Perbaikan
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Rekapitulasi hasil analisis penurunan dan stabilitas STA. 45+700 kondisi perbaikan disajikan pada Tabel 13 dan Tabel 14.

Tabel 13. Rekapitulasi Penurunan STA. 45+700 Kondisi Perbaikan

Fase	Penurunan	Perbedaan Penurunan	Syarat Perbedaan Penurunan	Keterangan
	(cm)	Δ (cm)	(cm)	
Final Konstruksi	35,68	-	-	-
Operasional 10 Tahun	42,22	6,54	$\Delta < 10$	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2026)

Tabel 14. Rekapitulasi Penurunan STA. 45+700 Kondisi Perbaikan

Fase	Faktor Keamanan	Syarat Faktor Keamanan	Keterangan
	SF		
Final Konstruksi	2,272	SF > 1,5	Aman
Operasional 10 Tahun	2,182	SF > 1,5	Aman
Gempa	1,375	SF > 1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2026)

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, kondisi tanah lunak pada STA. 42+675 dan STA. 45+700 tidak layak tanpa perbaikan. Kesimpulan penelitian adalah sebagai berikut.

1. Pada STA. 42+675 (ketebalan 5,5 m), kondisi eksisting (RTA) menghasilkan penurunan sebesar 16,22 cm (tidak memenuhi $\Delta < 10$ cm). Setelah perbaikan cerucuk dan matras bambu, penurunan berkurang menjadi 7,9 cm dan memenuhi kriteria.
2. Pada STA. 45+700 (ketebalan 12 m), kondisi eksisting (RTA) mengalami *collapse* pada penimbunan lapis ke-10. Perbaikan dengan PVD dan *preloading* menghasilkan faktor keamanan SF > 1,5 serta penurunan $\Delta < 10$ cm, sehingga memenuhi kriteria.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Yerry Kahaditu Firmansyah, S.T., M.T. dan Bagas Aryaseta, S.T., M.S. selaku pembimbing atas arahan dan dukungannya. Terima kasih juga disampaikan kepada PT Parama Karya Mandiri KSO selaku Konsultan Pengawas

Proyek Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 3B atas izin dan dukungan data dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Pratiwi, D. K., Handayasari, I. & Sepriyanna, I. (2021). “Angka Keamanan Lereng Timbunan di Atas Tanah Lunak Pada Proyek Jalan Tol”. *Jurnal Forum Mekanika*, Vol. 10, No. 2.
- Hosang, F., Legrans, R., & Sarajar, A., (2025). “Desain Cerucuk Bambu Sebagai Perkuatan Timbunan Pada Tanah Lunak Untuk Konstruksi Bangunan Kantor”. *Jurnal TEKNO*, Vol. 23, No. 94.
- Tri Kurniawan, A., Iskak Imananto, E., & Andrian Yulianto, E. (2025). “Perencanaan Perbaikan Tanah Dengan Menggunakan PVD (Prefabricated Vertical Drain) Dan Timbunan (Preloading) Pada Pembangunan Gedung Its Tower 3”. *Global Research and Innovation Journal*, Vol. 1, No. 3, Hal 833-845.
- N S, H., Juniarso, J., Sulardi, S., Dimiyati, D., Suparman, A., & Pramono, D. (2022). “Perencanaan Perbaikan Tanah Lunak dengan Metode Preloading dan Prefabricated Vertical Drain di Kawasan Ancol Timur”. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, Vol. 6, No. 2, Hal 8700-8711.
- Fitriansyah, M., Elia Anggarini, Irwandy Muzaidi, Heru Dwi Fandika, & Hidayati Sabrina. (2024). “Analisis Konfigurasi Prefabricated Vertical Drain (PVD) Terhadap Waktu Konsolidasi dan Penurunan Tanah (Studi Tanah Lempung Lunak Banjarmasin)”. *AGREGAT*, Vol. 9, No. 2, Hal 1147-1154.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2024) “Manual Desain Perkerasan Jalan”. No. 03/M/BM/2024. Jakarta.
- Anggrahini, N., Pratikso, H. & Fitriyana, L. (2022). “Studi Kasus Perbaikan Tanah Lunak Pada Proyek Tol Semarang-Demak (STA 20+300-STA 20+500)”. *Jurnal Ilmiah Sultan Agung*, Vol. 1, No. 1, Hal 668-681.
- Santi Pratiwi, D., Warsih Winoto, G. (2025). “Studi Daya Dukung dan Penurunan Tiang Bor Menggunakan Plaxis 3D Berdasarkan Data N-SPT”. *Jurnal Rivet (Riset dan Inovasi Teknologi)*, Vol. 05, No. 1.
- Gouw, Tjie-Liong. (2015). “Importance Of Elongation Factor in Determining Geosynthetics Stiffness for Finite Element Calculation”. *Conference: International Conference on Landslides and Slope Stability*, September, Bali.
- Kevin, P. (2025). “Embankment on Pile: Performance Comparison of Bamboo and Mini Pile For Settlement Reduction and Stabilization of Embankment Over Soft Soil”. *Indonesian Geotechnical Journal*, Vol. 4, No. 2, Hal 113-126.
- Weber, M. & Altenbeah, H. (2024). “Elasto-plasticity theory for large plastic deformation and its use for the material stiffness determination”. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Vol. 36, No. 5, Hal 1305-1321.
- Irsyam, M., Krisnanto, S. (2008). “Pengujian Skala Penuh dan Analisis Perkuatan Cerucuk Matras Bambu Untuk Timbunan Badan Jalan di Atas Tanah Lunak di Lokasi Tambak Oso, Surabaya”. *Forum Teknik Sipil* No. 18, 667.
- Salsabila, H. (2025). “Analisis Stabilitas dan Penurunan Tanggul Laut Dengan Penggunaan Matras Bambu Pada Jalan Tol Semarang-Demak (Stability and Settlement Analysis of Coastal Embankment with Bamboo Mattress Reinforcement on Semarang Demak Toll Road)”. *Skripsi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta*.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). “Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017”. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Bandung.
- Indraratna, B., Bamunawita, C., Redana, I., & McIntosh, G. (2003). “Modelling of prefabricated vertical drains in soft clay and evaluation of their effectiveness in practice”. *Faculty of Engineering – Papers*.
- Gusnadi, Z., Handiman, I., Dermawan, H. & Desilia, A. (2024). “Analysis of Soil Improvement Through PVD and Vacuum Preloading with Several Equivalent Permeability Methods”. *Indonesian Geotechnical Journal*, Vol. 3, No. 1, Hal 25-34.
- Hird C. C., Pyrah I. C., & Russel D. (1992). “Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground”. *Geotechnique*, Vol. 42, No. 3, Hal 499-511.
- Mahardika, T., Yusa, M., & Satibi, S. (2023). “Analysis Of Peak Earthquake Acceleration (PGA) Value in The Dumai Duri Kandis Road Area Km 68 + 975 Using Pseudostatic Analysis”. *Jurnal Pensil: Pendidikan Teknik Sipil*, Vol. 12, No. 3, Hal 314–321.
- Permana, A., Despa, D., & Septiana, T. (2023). “Metode Cerucuk Matras Beton Sebagai Perkuatan Daya Dukung Tanah di Area Transisi Antara Area Timbunan di Area Tanah Lunak Dengan Struktur”. *Seminal Nasional Insinyur Profesional (SNIP)*, Vol. 3, No. 1.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). “Persyaratan Perancangan Geoteknik”. SNI 8460:2017, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.