

Analisis penanganan tanah lunak pada timbunan studi kasus pembangunan jalan hauling di Kalimantan Timur

Aisya Galuh Laksita^{1,*}, Rizki Budiman¹, Adityawan Sigit¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Embankment
Soft soil
Cerucuk
Soil replacement

Corresponding Author:

Aisya Galuh Laksita
245111201@uii.ac.id

Abstract

Haul road construction in coal mining areas of East Kalimantan commonly encounters soft clay subsoil with low bearing capacity and considerable thickness. This condition becomes critical when high embankments are required to support heavy mining truck loads. This paper presents a case study on ground improvement design for a 12 m high haul road embankment constructed over soft clay deposits extending to a depth of approximately 8 m with N-SPT values lower than 10. Several ground improvement alternatives were evaluated, including shallow soil replacement up to 1 m and 2 m, as well as a combined system of 2 m soil replacement and timber piles (dolken). Bearing capacity evaluation was conducted using analytical methods, while global stability and deformation behavior were assessed through two-dimensional finite element analysis using PLAXIS 2D. The results indicate that the untreated condition and shallow replacement alternatives alone do not satisfy the required global safety factor ($SF < 1.50$), despite reducing settlement magnitude. Bearing capacity assessment identified a critical depth of approximately 9–10 m, indicating the need for deeper ground reinforcement. The selected alternative, consisting of 2 m soil replacement combined with 7 m long timber piles, successfully increased the static safety factor to 1.53 and the seismic safety factor to 1.26, while reducing maximum deformation to 0.2315 m. The study demonstrates that timber pile reinforcement provides an effective and economical solution for improving embankment stability on soft ground, particularly for temporary haul roads in mining operations.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Pembangunan jalan hauling pada area pertambangan batu bara di Kalimantan Timur sering kali dihadapkan pada kondisi tanah dasar berupa lempung lunak dengan daya dukung rendah dan ketebalan yang signifikan. Kondisi ini menjadi kritis ketika jalan hauling harus menahan timbunan tinggi serta beban lalu lintas kendaraan tambang dengan kapasitas jauh lebih besar dibandingkan kendaraan jalan umum. Kegagalan dalam merancang perbaikan tanah yang tepat dapat menyebabkan ketidakstabilan timbunan dan penurunan berlebih (Firoozi et al., 2017), sehingga mengganggu operasional tambang.

Selain itu, perencanaan geoteknik jalan hauling juga perlu mempertimbangkan efisiensi biaya konstruksi mengingat umur layanan infrastruktur yang relatif sementara pada kegiatan pertambangan.

Kondisi lapangan

Hasil penyelidikan tanah pada titik BHR 39-A menunjukkan keberadaan lapisan lempung lunak hingga kedalaman 8 m dengan nilai N-SPT rendah, yaitu berturut-turut 5, 4, 5, dan 6 pada interval kedalaman setiap 2 m. Lapisan tanah yang lebih kaku baru dijumpai pada kedalaman lebih besar dengan nilai N-SPT meningkat hingga 28 dan 50. Kondisi ini menunjukkan potensi rendahnya kapasitas

dukung tanah dasar terhadap beban timbunan. Pada lokasi tersebut direncanakan timbunan jalan hauling dengan tinggi mencapai 12 m, sehingga risiko keruntuhan lereng dan penurunan tanah dasar menjadi isu utama dalam perencanaan geoteknik.

Selain faktor tanah dasar, beban lalu lintas yang bekerja pada timbunan berasal dari kendaraan tambang tipe *dolly* dengan berat total sekitar 325 ton. Beban ini menghasilkan tegangan tambahan yang signifikan pada timbunan dan tanah dasar, sehingga memerlukan evaluasi stabilitas lereng timbunan dan penurunan.

Muka air tanah alami teridentifikasi pada kedalaman sekitar 1,2 m dari permukaan tanah asli. Timbunan diasumsikan dibangun dalam satu tahap dengan material yang dipadatkan sesuai spesifikasi jalan hauling, yaitu tebal lapisan penghamparan ± 30 cm dan nilai CBR minimum 6%.

Makalah ini menyajikan studi kasus perencanaan perbaikan tanah pada timbunan jalan hauling di atas tanah lunak dalam dengan berfokus pada analisis stabilitas, penurunan, dan evaluasi biaya sebagai dasar pemilihan solusi desain yang optimal.

Alternatif desain timbunan

Alternatif desain awal yang direncanakan adalah berupa *replacement* tanah dangkal hingga kedalaman 1–2 meter, lalu diikuti dengan perawatan berkala. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman *replacement* tanah asli dapat menurunkan nilai *settlement* dan meningkatkan faktor keamanan terhadap perbaikan tanpa perbaikan (Al Hanif et al., 2024). Perawatan berkala seperti perataan ulang, pemadatan kembali, dan penambahan material permukaan dalam praktik desain dan pemeliharaan jalan *haul* di area pertambangan, karena hal tersebut merupakan bagian integral dari strategi pemeliharaan untuk menghadapi deformasi seiring waktu, karena jaringan jalan tambang umumnya merupakan struktur sementara tanpa perkerasan permanen dan mengalami penurunan serta degradasi permukaan yang

tolerable selama tetap aman terhadap operasional (Tannant & Regensburg, 2001; Thompson & Viisser, 2003). Pendekatan ini sesuai dengan prinsip desain jalan tidak beraspal yang sering diterapkan pada jalan tambang di mana *maintenance* berkala diperlukan untuk menjaga *trafficability* sekaligus meminimalkan biaya infrastruktur dalam jangka pendek (Tannant & Regensburg, 2001). Meskipun demikian, *replacement* dangkal tanah asli sering kali hanya memberikan perbaikan lokal dan belum cukup memenuhi persyaratan stabilitas untuk beban tinggi tanpa penanganan lanjutan (Al Hanif et al., 2024).

Metode seperti *stone column*, *deep mixing column*, dan material pengganti lainnya terbukti secara signifikan dapat menurunkan *settlement* dan memperbaiki distribusi tegangan pada tanah lunak melalui peningkatan kekakuan dan drainase vertikal (Abdrabbo et al., 2024; Hamdhan et al., 2025). Selain itu, teknik *reinforcement* seperti *micropile* telah dilaporkan meningkatkan kapasitas dukung tanah lunak dan mengatasi pergerakan lateral ketika dipasang di daerah kegagalan potensial (Isnaniati & Mochtar, 2023).

Penelitian lain menunjukkan bahwa penggunaan cerucuk atau tiang sebagai elemen perkuatan dapat meningkatkan kemampuan tanah dasar dalam menahan beban struktur maupun timbunan, dengan mekanisme peningkatan kapasitas dukung dan pengurangan deformasi yang lebih signifikan dibandingkan tanpa perkuatan (Gasruddin, 2017; Suyuti, 2020). Cerucuk kayu khususnya telah diteliti sebagai perkuatan yang efektif pada tanah lempung atau tanah dasar lunak untuk meningkatkan stabilitas dan daya dukung tanah, sekaligus relatif ekonomis dan mudah dilaksanakan dibandingkan fondasi dalam tradisional (Gasruddin, 2017; Suyuti, 2020).

Pada kasus ini, penggunaan *mini-pile* sempat direncanakan sebagai solusi perbaikan tanah yang tepat secara teknis, namun solusi ini ditolak karena dinilai kurang sesuai karena

biaya konstruksi yang tinggi. Pada studi kasus ini, solusi awal adalah berupa penggantian tanah lunak hingga kedalaman 2 m sesuai keterbatasan kemampuan alat berat di lapangan, lalu akan dilakukan perawatan berkala apabila terjadi penurunan. Apabila solusi ini belum mencapai standar perencanaan, alternatif yang akan dilakukan adalah dengan melakukan penambahan cerucuk kayu (dolken) sebagai elemen perkuatan tanah dasar. Hal ini dikarenakan tersedianya sumber daya kayu di lapangan, sehingga bahan kayu mudah ditemukan.

Metode Penelitian

Data dan kondisi awal

Studi kasus dilakukan pada pembangunan jalan hauling baru di Kalimantan Timur sepanjang ± 27 km. Dari 21 titik penyelidikan tanah SPT, salah satu titik yaitu BHR 39-A memiliki nilai SPT < 10 hingga kedalaman 8 m dengan dominasi tanah lempung. Di atas tanah tersebut direncanakan timbunan setinggi 12 m sehingga diperlukan analisis stabilitas dan deformasi.

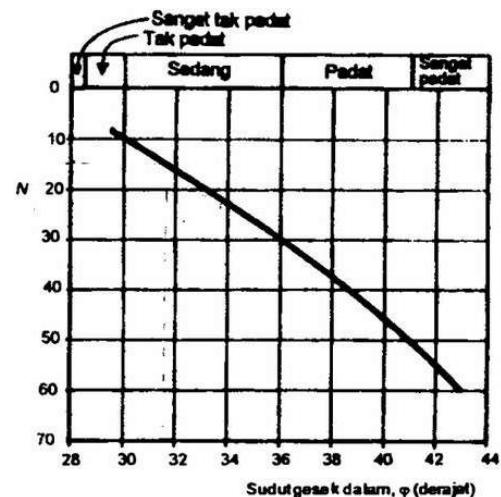
Parameter tanah dan model konstitutif

Parameter tanah dasar ditentukan berdasarkan korelasi empiris terhadap nilai SPT. Pada tanah kohesif, kohesi tanah, c ditetapkan menggunakan hubungan $c = 0.6N$ t/m³ sesuai Gambar 2 dengan N adalah nilai NSPT, sedangkan sudut geser dalam diasumsikan 0° secara konservatif. Pada tanah granuler, sudut gesek internal tanah, ϕ ditetapkan menggunakan hubungan sesuai Gambar 1, sedangkan kohesi tanah c , diasumsikan 0° secara konservatif.

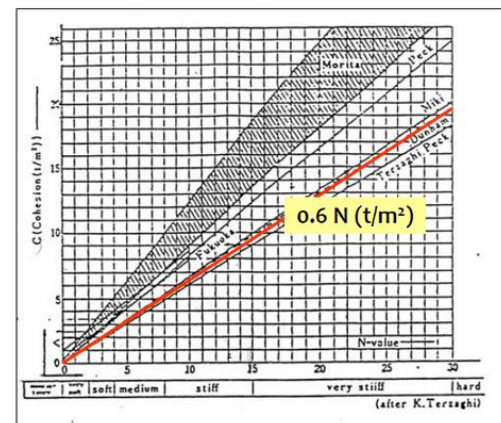
Berat volume tanah dan parameter lainnya diperoleh dari korelasi SPT (lihat Tabel 1 sampai Tabel 3). Modulus elastisitas ditentukan menggunakan korelasi $E = 1100 NSPT$. Nilai rasio Poisson digunakan sebesar 0,30. Seluruh lapisan tanah dimodelkan menggunakan model Mohr–Coulomb.

Tanah timbunan dimodelkan dengan kohesi 15 kPa, sudut geser dalam 30°, berat isi kering

16 kN/m³, berat isi jenuh 18 kN/m³, serta CBR minimum 6%, sesuai spesifikasi umum pekerjaan jalan. Parameter geoteknik pada pemodelan dapat dilihat pada Tabel 5.



Gambar 1. Hubungan ϕ dengan N-SPT (Peck dkk, 1974) dalam Hardiyatmo (2018)



Gambar 2. Hubungan kohesi, c dengan N-SPT (Terzaghi & Peck, 1967) dalam Kazhimi (2013)

Tabel 1. Nilai tipikal berat volume kering dan berat volume jenuh (AS 4678, 2002)

Jenis Tanah		Berat volume kering (kN/m ³)		Berat volume jenuh (kN/m ³)	
		Lepas	Padat	Lepas	Padat
Tanah Granuler	Kerikil	16.0	18.0	20.0	21.0
	Pasir bergradasi baik dan kerikil	19.0	21.0	21.5	23.0
	Pasir kasar atau sedang	16.5	18.5	20.0	21.5
	Pasir bergradasi baik	18.0	21.0	20.5	22.5
	Pasir halus atau kelanauan	17.0	19.0	20.0	21.5
	Rock fill	15.0	17.5	19.5	21.0
	Brick hardcore	13.0	17.5	16.5	19.0
	Slag fill	12.0	15.0	18.0	20.0
	Ash fill	6.5	10.0	13.0	15.0
Tanah Kohesif	Gambut (variabilitas)	12.0		12.0	
	Lempung organik	15.0		15.0	
	Lempung lunak	17.0		17.0	
	Lempung padat	18.0		18.0	
	Lempung kaku	19.0		19.0	
	Lempung keras	20.0		20.0	
	Lempung glasial keras atau kaku	21.0		21.0	

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2019

Tabel 2. Nilai Empiris untuk ϕ , γ dari tanah berbutir dari nilai N Koreksi (Bowles, 1977)

Deskripsi	Sangat Lepas	Lepas	Sedang	Padat	Sangat Padat
Kerapatan Relatif (D_r)	0-0.15	0.15-0.35	0.35-0.65	0.65-0.85	0.85-1.00
Nilai N-SPT terkoreksi	0-4	4-10	10-30	30-50	>50
Sudut geser dalam (ϕ) (°)	25-30	27-32	30-35	35-40	38-43
Berat volume tanah (γ) (kN/m ³)	11.0-15.7	14.1-18.1	17.4-20.4	17.3-22	20.4-23.6

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2019

Tabel 3. Nilai Empiris untuk γ_{sat} dan kuat tekan bebas (q_u) dan konsistensi dari tanah kohesif berdasarkan nilai N Koreksi (Bowles, 1977)

Konsistensi	Sangat Lunak	Lunak	Sedang	Kenyal	Sangat Kenyal	Keras
q_u (kPa)	0-24	24-28	48-96	96-192	192-384	>384
Nilai N-SPT terkoreksi	0-2	2-4	10-30	30-50	>50	>32
Berat volume tanah jenuh (γ_{sat}) (kN/m ³)	15.8-18.8	15.8-18.8	17.3-20.4	18.8-22	18.8-22	18.8-22

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2019

Pembebanan dan kondisi hidraulik

Beban lalu lintas jalan hauling dimodelkan sebagai beban merata sebesar 25 kPa yang merepresentasikan kendaraan angkut tambang tipe dolly seperti pada Gambar 4. Nilai ini didapatkan dari beban maksimum berat total penuh ada 325 ton dibagi dengan luasan truk dengan panjang truk adalah 39.57 m dan lebar truk 3.25 m.

Muka air tanah alami berada pada kedalaman $\pm 1,2$ m, namun dalam analisis diasumsikan berada di permukaan tanah untuk memperoleh kondisi paling kritis.

Analisis kapasitas dukung tanah

Evaluasi kapasitas dukung tanah dasar terhadap beban timbunan dilakukan menggunakan pendekatan analitik dan empiris yang telah baku, dengan parameter tanah yang diperoleh dari hasil penyelidikan lapangan. Mengacu pada ketentuan SNI 8460:2017 (Badan Standardisasi Nasional, 2017), daya dukung izin ditentukan sebagai daya dukung ultimit yang dibagi dengan faktor keamanan.

Untuk menjamin keamanan terhadap mekanisme keruntuhan daya dukung, faktor keamanan minimum terhadap kapasitas dukung ditetapkan sebesar ≥ 3 , sehingga seluruh alternatif desain perbaikan tanah harus memenuhi kriteria tersebut sebelum dilakukan

analisis numerik lanjutan. Kapasitas dukung tanah dihitung menggunakan metode Terzaghi (Hardiyatmo, 2020) dapat dilihat pada Pers. (1).

$$q_{ult} = c \cdot N_c + p_o \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma_{soil} \cdot B \cdot N_\gamma \quad (1)$$

Beban yang bekerja adalah berupa beban timbunan setinggi 12 m dengan γ 18 kN/m³ dan beban lalu lintas sebesar 25 kPa, sehingga total beban yang diaplikasikan adalah 236.4 kPa.

Alternatif perbaikan tanah

Dua alternatif perbaikan tanah akan dievaluasi, yaitu (1) *replacement* tanah asli maksimum sedalam 2 m diikuti dengan *maintenance* berkala dan (2) kombinasi *replacement* tanah 2 m dengan pemasangan cerucuk kayu (dolken). *Replacement* dibatasi hingga 2 m sesuai kemampuan alat berat di lapangan, sedangkan cerucuk digunakan sebagai faktor perkuatan tambahan dengan pertimbangan efektivitas teknis dan efisiensi biaya.

Analisis kapasitas dukung cerucuk

Cerucuk berupa kayu keras dengan diameter 0,6 m dan spasi 1,2 m (as ke as) disusun dalam pola grid. Analisis kapasitas dukung aksial dilakukan menggunakan metode US Army untuk tahanan selimut dan metode Meyerhof untuk daya dukung ujung, dengan perhitungan dilakukan per interval kedalaman 2 m. Hasil analisis kapasitas dukung aksial dapat dilihat pada Tabel 4, sedangkan daya dukung ujung (Q_b) = 31,67 kN.

Tabel 4. Hasil analisis kapasitas selimut tiang cerucuk

Jarak (m)	Kapasitas Selimut, Q_s (kN)
0	0
2	1
4	3,14
6	3,58
8	10,55

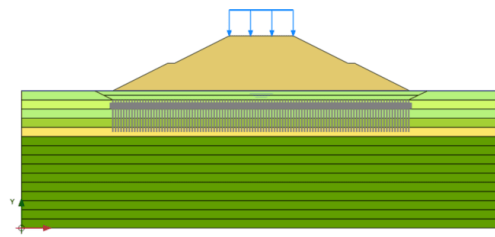
Pemodelan numerik

Analisis stabilitas dan deformasi dilakukan menggunakan metode elemen hingga dua dimensi dengan perangkat lunak PLAXIS 2D

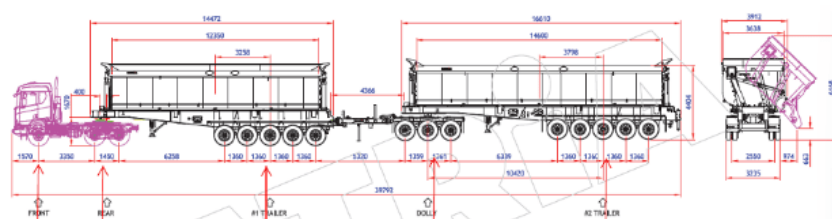
v20. Tanah dimodelkan menggunakan model Mohr–Coulomb, sedangkan cerucuk dimodelkan sebagai *embedded beam* dengan modulus elastisitas yang diperoleh dari Matheus & Hartono (2024) sebesar $7,92 \times 10^{-6}$ kN/m² dan berat isi 6 kN/m³. Tahapan konstruksi dimodelkan secara bertahap sesuai kondisi lapangan.

Evaluasi dilakukan terhadap faktor keamanan statik, $SF \geq 1,5$, faktor keamanan pseudo-dinamik, $SF \geq 1,10$, serta penurunan maksimum dengan batas toleransi 20 cm. Nilai ini faktor aman diambil berdasarkan SNI 8460:2017 dengan pertimbangan tingkat ketidakpastian kondisi analisis tinggi dan biaya perbaikan sebanding dengan biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif.

Alternatif desain dimodelkan dalam plaxis seperti pada Gambar 3. Timbunan memiliki lebar perkerasan 14 m dengan kemiringan lereng timbunan 1V : 2H. Trap atau *bench* dipasang setiap 6 m tinggi timbunan, dengan lebar 1,50 m. Timbunan dimodelkan dalam *elastic soil* dengan parameter tanah dapat dilihat pada Tabel 5. Muka air tanah asli dimodelkan setinggi muka tanah. Beban kendaraan diaplikasikan dalam bentuk beban merata sebesar 25 kPa di sisi atas timbunan.



Gambar 3. Model geometri pada plaxis



Gambar 4. Truk dolly

Tabel 5. Parameter tanah yang digunakan

Kedalaman	Klasifikasi	N-SPT	c (kN/m ²)	ϕ (°)	γ_{bulk} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	μ
0-2	Lempung	5	30	0	16.9	18.9	4400	0.3
2-4	Lempung	4	24	0	16.9	18.9	5500	0.3
4-6	Lempung	5	30	0	16.9	18.9	4400	0.3
6-8	Lempung	6	36	0	16.9	18.9	6600	0.3
8-10	Pasir	28	0	35.42	16	19	30800	0.3
10-30	Lempung	>50	200	0	17	19	55000	0.3
-	Timbunan	-	15	30	16	18	11000	0.3

Tabel 6. Hasil Analisis Kapasitas Dukung Tanah Asli

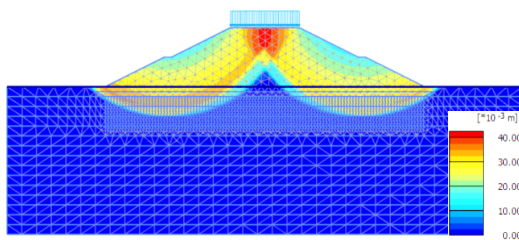
Kedalaman (m)	Klasifikasi	N _{SPT}	Berat Volume (kN/m ³)		c_u (kPa)	ϕ (°)	q_{ult} (kPa)	SF	Ket.
			γ_{bulk}	γ_{sat}					
1	Lempung	2	16.9	18.9	8	0	54.7	0.2	NOT OK
2	Lempung	5	16.9	18.9	20	0	132.2	0.6	NOT OK
3	Lempung	5	16.9	18.9	18	0	129.9	0.5	NOT OK
4	Lempung	4	16.9	18.9	16	0	127.6	0.5	NOT OK
5	Lempung	5	16.9	18.9	18	0	148.1	0.6	NOT OK
6	Lempung	5	16.9	18.9	20	0	168.6	0.7	NOT OK
7	Lempung	6	16.9	18.9	22	0	189.1	0.8	NOT OK
8	Lempung	6	16.9	18.9	24	0	209.6	0.9	NOT OK
9	Lempung	17	16.9	18.9	68	0	469.5	2.0	NOT OK
10	Pasir	28	16	19	0	35.4101	840	3.6	OK

Hasil penelitian

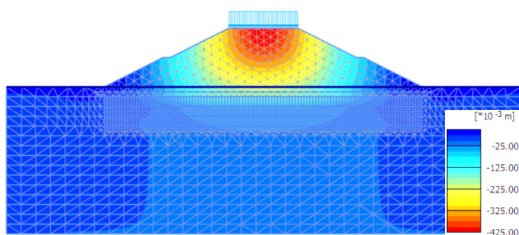
Kondisi tanpa perbaikan tanah

Analisis stabilitas timbunan setinggi 12 m pada kondisi tanah asli tanpa perbaikan menunjukkan faktor keamanan global sebesar $SF = 0,9775$, lebih kecil dari kriteria minimum yang dipersyaratkan yaitu 1,50 pada kondisi statis. Mekanisme kegagalan yang terjadi berupa keruntuhan rotasional dalam (*deep-seated rotational failure*) yang berkembang hingga lapisan tanah asli.

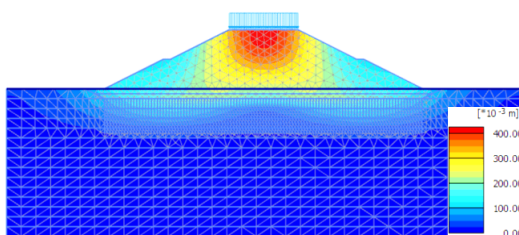
Penurunan maksimum berdasarkan analisis plastis tercatat sebesar 4,37 cm. Hasil analisis deformasi menunjukkan deformasi total maksimum sebesar $\pm 0,415$ m. Pola deformasi didominasi oleh penurunan vertikal (*settlement*) dengan penyebaran lateral ke arah kaki timbunan (lihat Gambar 5 sampai Gambar 7).



Gambar 5. Hasil analisis stabilitas lereng (*incremental strain*) kondisi tanah asli



Gambar 6. Hasil analisis penurunan kondisi tanah asli

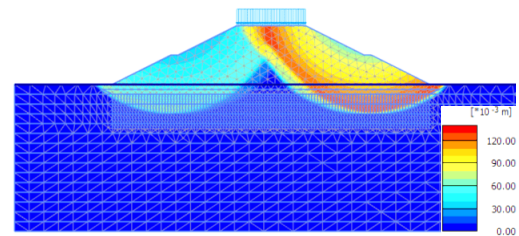


Gambar 7. Hasil analisis displacement (total displacement) kondisi tanah asli

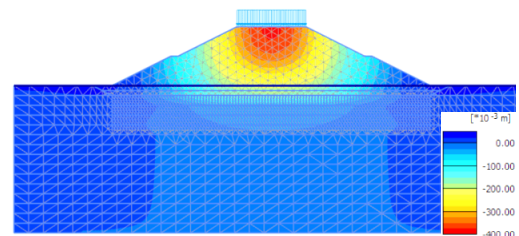
Evaluasi alternatif 1, replacement tanah

Upaya perbaikan awal dilakukan melalui *replacement* tanah secara bertahap untuk meningkatkan stabilitas dan mengurangi deformasi.

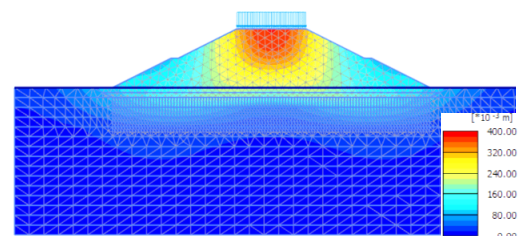
Pada *replacement* setebal 1 m, faktor keamanan meningkat menjadi $SF = 1,029$. Mekanisme kegagalan masih didominasi oleh keruntuhan rotasional hingga tanah asli. Penurunan segera maksimum analisis plastis berkurang menjadi 3,72 cm, dengan deformasi total maksimum sebesar $\pm 0,381$ m. Reduksi deformasi terutama terjadi pada lapisan tanah dasar bagian atas, meskipun *settlement* vertikal masih mendominasi (lihat Gambar 8 sampai Gambar 10).



Gambar 8. Hasil analisis stabilitas lereng (*incremental strain*) kondisi *replacement* tanah asli 1 m



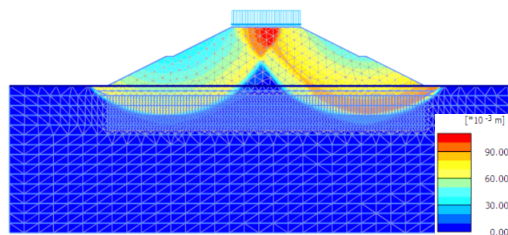
Gambar 9. Hasil analisis penurunan kondisi *replacement* tanah asli 1 m



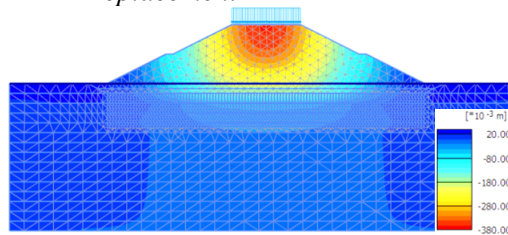
Gambar 10. Hasil analisis deformasi kondisi *replacement* tanah asli 1 m

Pada *replacement* tanah setebal 2 m, faktor keamanan meningkat lebih lanjut menjadi

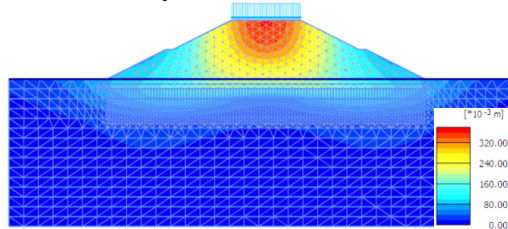
SF = 1,086, dengan penurunan maksimum analisis plastis sebesar 3,40 cm dan deformasi total maksimum $\pm 0,362$ m. Meskipun demikian, nilai faktor keamanan global masih berada di bawah kriteria desain, sehingga *replacement* hingga 2 m belum mampu mencapai batas aman stabilitas lereng (lihat Gambar 11 sampai Gambar 13).



Gambar 11. Hasil analisis stabilitas lereng (*incremental strain*) kondisi *replacement* tanah asli 2 m



Gambar 12. Hasil analisis penurunan kondisi *replacement* tanah asli 2 m



Gambar 13. Hasil analisis deformasi kondisi *replacement* tanah asli 2 m

Evaluasi alternatif 2, *replacement* tanah dan cerucuk

Evaluasi Kapasitas Dukung Tanah Dasar

Evaluasi kapasitas dukung tanah dasar dilakukan sebagai dasar penentuan kebutuhan perkuatan tambahan. Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor keamanan kapasitas dukung tanpa perkuatan pada kedalaman 9 m sebesar 2,0, sedangkan pada kedalaman 10 m meningkat menjadi 3,6 (lihat Tabel 6). Mengacu pada kriteria

faktor keamanan minimum sebesar 3,0, kedalaman perbaikan efektif ditetapkan hingga kisaran 9–10 m. Hasil ini menjadi dasar pemilihan kombinasi *replacement* tanah 2 m dan perkuatan cerucuk sepanjang 7 m.

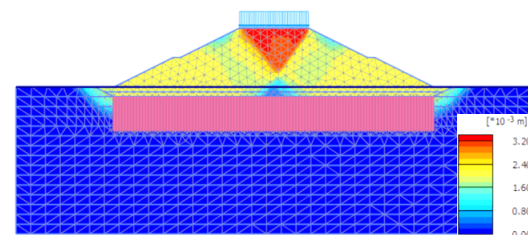
Hasil Analisis Numerik Alternatif Terpilih (*Replacement* 2 m + Cerucuk 7 m)

Pemodelan numerik menggunakan PLAXIS 2D pada alternatif perkuatan cerucuk menunjukkan peningkatan nilai stabilitas yang signifikan. Faktor keamanan global hasil analisis meningkat menjadi SF = 1,532, yang telah memenuhi kriteria faktor keamanan statik minimum.

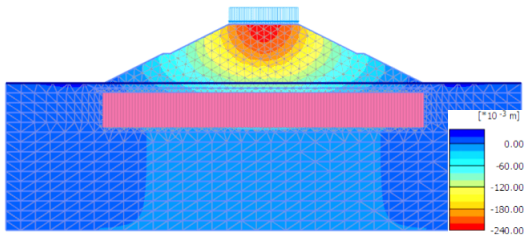
Penurunan maksimum berdasarkan analisis plastis tercatat sebesar 2,21 cm, dengan lokasi penurunan terbesar berada di bagian tengah timbunan.

Hasil analisis deformasi menunjukkan deformasi total maksimum sebesar 0,2315 m, yang berada di tengah timbunan tepat di bawah area pembebanan. Pola deformasi bersifat simetris terhadap sumbu timbunan, dengan besaran *displacement* yang menurun ke arah lereng dan semakin kecil pada lapisan tanah dasar di bawah zona perkuatan. Arah deformasi didominasi oleh pergerakan vertikal ke bawah, sementara *displacement* lateral relatif kecil.

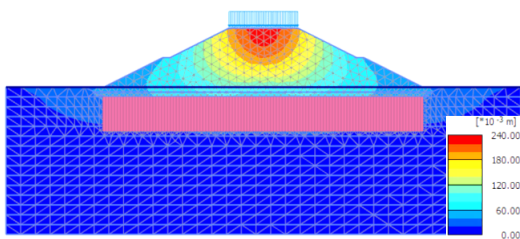
Nilai PGA di lokasi penelitian adalah 0,1049 g. Pada analisis pseudodinamik, beban gempa diaplikasikan sebesar 50% nilai PGA di lokasi, yaitu sebesar 0.05245 g. Hasil faktor aman pada kondisi dinamis adalah sebesar 1,26.



Gambar 14. Hasil analisis stabilitas lereng timbunan (*incremental strain*) dengan 2 m *replacement* dan perkuatan cerucuk



Gambar 15. Hasil analisis penurunan timbunan dengan 2 m replacement dan perkuatan cerucuk



Gambar 16. Hasil analisis displacement timbunan (incremental strain) dengan 2 m replacement dan perkuatan cerucuk

Pembahasan

Rekapitulasi hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 17. Pada kondisi tanpa perbaikan, replacement 1 m, hingga replacement 2 m, nilai faktor keamanan global berada di bawah kriteria minimum yaitu $\leq 1,50$. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kekakuan lapisan permukaan saja tidak cukup untuk mencapai standar faktor aman lereng.



Gambar 17 Perbandingan hasil analisis metode numeris pada berbagai kondisi perbaikan

Hasil analisis menunjukkan bahwa timbunan setinggi 12 m yang dibangun di atas tanah lempung lunak memiliki keterbatasan stabilitas dan deformasi apabila

hanya mengandalkan kondisi tanah asli maupun perbaikan berupa replacement tanah dangkal.

Penerapan replacement tanah hingga 2 m terbukti mampu menurunkan besarnya deformasi dan sedikit meningkatkan faktor keamanan. Hal ini menegaskan bahwa pada tanah dengan kuat geser rendah dan ketebalan lapisan lunak yang signifikan, perbaikan dangkal tidak dapat menjadi solusi tunggal.

Evaluasi kapasitas dukung tanah dasar memperlihatkan bahwa kedalaman kritis stabilitas berada hingga pada kisaran 9–10 m. Pemilihan kombinasi replacement tanah 2 m dan cerucuk kayu sepanjang 7 m secara efektif menargetkan zona kritis tersebut. Cerucuk berperan dalam meningkatkan kekakuan sistem tanah dan timbunan, serta memobilisasi tahanan selimut dan daya dukung ujung untuk menurunkan deformasi dan meningkatkan stabilitas global.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa kombinasi replacement tanah dan cerucuk kayu merupakan solusi yang efektif dan rasional untuk meningkatkan stabilitas timbunan di atas tanah lunak, khususnya pada konstruksi jalan haulung tanpa perkerasan kaku. Pendekatan ini juga memiliki implikasi praktis dari sisi konstruksi dan biaya, yang akan dibahas lebih lanjut pada evaluasi manajemen pelaksanaan.

Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi timbunan pada tanah lunak tanpa perbaikan maupun dengan replacement tanah dangkal hingga kedalaman 2 m belum mampu memenuhi kriteria faktor keamanan global yang disyaratkan, meskipun terjadi penurunan besaran deformasi. Evaluasi kapasitas dukung tanah dasar mengindikasikan bahwa zona kritis stabilitas berada hingga kedalaman sekitar 9–10 m, sehingga perbaikan dangkal saja tidak efektif dalam menahan mekanisme keruntuhan rotasional dalam. Penambahan cerucuk kayu (dolken) sepanjang 7 m yang

dikombinasikan dengan replacement tanah 2 m terbukti meningkatkan stabilitas timbunan secara signifikan, ditunjukkan oleh tercapainya faktor keamanan statik dan pseudo-dinamik serta terkendalinya deformasi lateral. Pola deformasi pasca-perkuatan didominasi oleh penurunan vertikal yang terlokalisasi di bagian tengah timbunan, menandakan mekanisme transfer beban yang lebih stabil. Dengan mempertimbangkan umur layanan jalan hauling yang bersifat sementara, sistem perkuatan ini dinilai efektif secara teknis dan layak secara ekonomis untuk diterapkan pada proyek pertambangan di atas tanah lunak.

Daftar Pustaka

- Abdrabbo, F. M., Gaaver, K. E., Elwakil, A. Z., & Khalifa, S. A. (2024). Towards construction of embankment on soft soil: a comparative study of lightweight materials and deep replacement techniques. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77587-0>
- Al Hanif, B., Nussyura, A., & Islami, A. (2024). Case Study of Replacement Method on Road Embankment Over a Deep Soft Soil. *International Journal of Civil Engineering and Infrastructure*, 4(1).
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik*.
- Firoozi, Ali Akbar, Guney Olgun, C., Firoozi, Ali Asghar, & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Gasruddin, A. (2017). Uji Model Perkuatan Lereng Dengan Cerucuk Kayu Pada Tanah Lunak. *Jurnal Media Inovasi Teknik Sipil UNIDAYAN*, 6(1), 21–28. <https://doi.org/10.55340/jmi.v6i1.584>
- Hamdhan, I. N., Muchamad, D., & Raasyid, A. (2025). *Pemodelan Perbaikan Tanah Lunak dengan Preloading, Deep Mixing Column, dan Stone Column*. 8(4), 1043–1056.
- Hardiyatmo, H. C. (2018). *Analisis dan Perancangan Fondasi II*. Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2020). *Analisis dan Perancangan Fondasi I* (4th ed.). UGM Press.
- Isnaniati, & Mochtar, I. B. (2023). Increasing the Bearing Capacity of Shallow Foundations on Soft Soil After the Installation of Micro-Piles. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 227–238. <https://doi.org/10.22146/jcef.5925>
- Kazhimi, R. (2013). *Studi Perbandingan Daya Dukung Aksial Tiang Pancang dengan Analisis Statik, Analisis Gelombang, dan Formula Dinamik Studi Kasus pada Beberapa Proyek di Indonesia*. Institut Teknologi Bandung.
- Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga. (2019). *Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik dan Fondasi*. Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Matheus, P., & Hartono, D. (2024). Analisis Penggunaan Cerucuk sebagai Soil Improvement Pengganti Prefabricated Vertical Drain (PVD) untuk Mempercepat Pelaksanaan Pekerjaan. *TEKNIK*, 45(3), 12530. <https://doi.org/10.14710/teknik.v45i3.63041>
- Suyuti, S. (2020). Evaluasi Tinggi Embankmenr Jalan pada Tanah Lunak Diperkuat Geotextile dan Fondasi Cerucuk. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 224–234. <https://doi.org/10.29103/tj.v10i2.320>
- Tannant, D. D., & Regensburg, B. (2001). *Guidelines for Mine Haul Road Design*.
- Thompson, R. J., & Viisser, A. T. (2003). Mine haul road maintenance management systems. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*.