

Analisis stabilitas timbunan dengan metode *soil replacement* dan geosintetik pada proyek pembangunan Jalan Tol Jakarta-Cikampek II Selatan Paket 2A

Liyen Putri Lestari^{1,*}, Anisa Nur Amalina¹

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

Article Info

Available online

Keywords:

Embankment stability
Soil replacement
Geosynthetics
Safety factor
Slope stability
PLAXIS 2D
SLOPE/W

Corresponding Author:

Liyen Putri Lestari
22511238@students.uii.ac.id

Abstract

The construction of embankments on soft soil often faces stability problems due to low shear strength and bearing capacity. This study aims to evaluate the effectiveness of the soil replacement method and geosynthetic reinforcement in improving embankment stability at STA 8+875 of the Jakarta-Cikampek II Selatan Toll Road Project Package 2A. The analysis was conducted using the Finite Element Method (FEM) through PLAXIS 2D and the Limit Equilibrium Method (LEM) through SLOPE/W. The study considered an embankment height of 8.7 m subjected to pavement and traffic loads of 24.4 kN/m² and seismic loading with a peak ground acceleration (PGA) of 0.1969g. Soil parameters were derived from N-SPT correlations, while the reinforcement utilized woven geotextile with an ultimate tensile strength of 200 kN/m. The results indicate that the existing embankment condition produced a safety factor (SF) of 1.035 under static loading and experienced collapse under combined static and seismic loading. The application of soil replacement to a depth of 3.5 m was unable to provide sufficient improvement, as the embankment still collapsed under loading conditions. Further analysis using SLOPE/W identified the most critical condition at slope 2 (right-to-left direction) with an SF of 1.088 under combined loading. Based on this condition, geosynthetic reinforcement requirements were determined and incorporated into the model. The combination of soil replacement and geosynthetic reinforcement increased the safety factor to 1.746 under static loading and 1.144 under seismic loading, satisfying the minimum stability requirement for dynamic conditions ($SF \geq 1.1$). These findings demonstrate that the combined application of soil replacement and geosynthetic reinforcement is effective in enhancing embankment stability on soft soil foundations.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Latar belakang

Provinsi Jawa Barat merupakan salah satu provinsi dengan jumlah penduduk tertinggi di Indonesia, mencapai lebih dari 50,76 juta jiwa pada tahun 2025. Tingginya jumlah penduduk, terutama di wilayah Kabupaten

Bogor, Bekasi, Depok, Karawang, dan Kota Bekasi, menyebabkan peningkatan mobilitas masyarakat yang berdampak pada meningkatnya volume lalu lintas dan kebutuhan pembangunan infrastruktur transportasi (BPS, 2025). Salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut

adalah pembangunan Jalan Tol Jakarta–Cikampek II Selatan.

Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Jakarta–Cikampek II Selatan Paket 2A, kondisi tanah eksisting didominasi oleh area persawahan yang memiliki karakteristik tanah lunak berupa lempung lunak. Tanah lunak memiliki kuat geser rendah, kompresibilitas tinggi, serta daya dukung yang rendah sehingga berpotensi menimbulkan masalah stabilitas dan penurunan jangka panjang apabila tidak ditangani dengan baik (Kementerian Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2022). Karakteristik tersebut juga diperkuat oleh penelitian Siaturi dkk. (2022) yang menyatakan bahwa tanah lunak umumnya memiliki kuat geser rendah, pemampatan tinggi, dan permeabilitas rendah.

Berdasarkan hasil pengujian Dynamic Cone Penetrometer (DCP), nilai California Bearing Ratio (CBR) tanah dasar harus memenuhi persyaratan minimum 6% sesuai pedoman Bina Marga (2018). Untuk meningkatkan kualitas tanah yang tidak memenuhi persyaratan tersebut, dapat diterapkan metode perbaikan tanah berupa *soil replacement* dan perkuatan geosintetik. Metode *soil replacement* dilakukan dengan mengganti tanah lunak menggunakan material yang memiliki daya dukung lebih baik, sedangkan geosintetik berfungsi sebagai elemen perkuatan untuk meningkatkan stabilitas timbunan dan mengurangi deformasi tanah (Bina Marga, 2009). Penggunaan material pasir yang dikombinasikan dengan geotextile woven juga terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas timbunan pada tanah lunak (Muchlisin dan Roestaman, 2019). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji kinerja metode *soil replacement* dan perkuatan geosintetik pada STA 8+875 Proyek Pembangunan Jalan Tol Jakarta–Cikampek II Selatan Paket 2A.

Tinjauan Pustaka

Muchlisi dan Roestaman (2019) meneliti kombinasi metode *soil replacement* sedalam 2 m menggunakan material pasir dan *geotextile woven* pada tanah lunak. Hasil analisis

menunjukkan bahwa timbunan tanpa perkuatan memiliki faktor keamanan sebesar 1,241, sedangkan penambahan geotextile woven meningkatkan faktor keamanan menjadi 1,280. Kombinasi *soil replacement* dan *geotextile woven* berkekuatan 200 kN/m menghasilkan faktor keamanan sebesar 1,416 sehingga memenuhi persyaratan minimum 1,35.

Batara dan Gofar (2024) menganalisis pengaruh penggantian tanah dan geotekstil terhadap deformasi dan stabilitas timbunan pada Jalan Tol Kayuagung–Palembang–Betung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa deformasi berkurang dari 86,59 mm pada kondisi tanpa perbaikan menjadi 76,12 mm setelah dilakukan penggantian tanah sedalam 2 m dan pemasangan geotekstil. Faktor keamanan juga meningkat dari 4,149 menjadi 5,110 atau sekitar 22%.

Rizqullah dan Yelvi (2022) melakukan analisis perkuatan geotekstil pada timbunan Jalan Tol Cibitung–Cilincing menggunakan PLAXIS 2D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor keamanan meningkat dari 1,201 pada kondisi tanpa perkuatan menjadi 1,880 setelah menggunakan geotekstil. Selain itu, deformasi lateral berkurang hingga mencapai 0,034 m sehingga timbunan memenuhi kriteria stabilitas.

Romadhoni dkk. (2024) mengevaluasi stabilitas timbunan dengan perkuatan geotekstil pada proyek jalur ganda Solo Balapan–Kadipiro menggunakan PLAXIS 2D. Pada kondisi tanpa perkuatan, faktor keamanan sebesar 1,2 dengan penurunan tanah sekitar 1,707 cm pada 30 hari dan 1,691 cm pada 365 hari. Setelah diberikan perkuatan geotekstil, faktor keamanan meningkat menjadi 1,7 dan penurunan tanah berkurang menjadi sekitar 1,056 cm sehingga timbunan dinyatakan stabil sesuai persyaratan SNI 8460:2017.

Stabilitas lereng

Stabilitas lereng adalah kemampuan lereng untuk mempertahankan keseimbangan terhadap gaya-gaya yang bekerja. Tingkat kestabilan lereng dinilai berdasarkan faktor

keamanan (*safety factor*), yaitu perbandingan antara gaya penahan dan gaya penggerak.

Metode keseimbangan batas (*limit equilibrium method*)

Metode keseimbangan batas, khususnya metode Bishop Sederhana (*Simplified Bishop Method*) merupakan salah satu metode keseimbangan batas yang digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng pada bidang longsor berbentuk lingkaran. Metode ini menentukan faktor keamanan (*Safety Factor*, SF) berdasarkan keseimbangan momen dan gaya vertikal, di mana lereng dinyatakan stabil apabila nilai SF memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} c' b_i + W_i (1 - r_u) \tan \phi' \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (1)$$

Metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*)

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) adalah metode numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku tanah dan struktur dengan membagi model menjadi elemen-elemen kecil. Pada bidang geoteknik, metode ini banyak diterapkan melalui perangkat lunak PLAXIS untuk mengevaluasi distribusi tegangan, deformasi, dan stabilitas tanah berdasarkan kondisi geometri, parameter material, serta pembebanan yang diberikan.

Metode soil replacement

Soil replacement merupakan metode perbaikan tanah lunak yang dilakukan dengan mengganti tanah yang memiliki daya dukung rendah menggunakan material yang lebih baik sehingga mampu meningkatkan kestabilan dan daya dukung tanah. Menurut Ameratunga dan Sivakugan (2021), metode ini dapat dilakukan melalui dua cara, yaitu dengan menggali dan mengganti sebagian atau seluruh lapisan tanah lunak (*excavation and replacement*), serta dengan mendorong atau menggeser tanah lunak akibat penempatan

material pengganti yang lebih kaku di atasnya (*displacement and replacement*). Kedua metode tersebut bertujuan untuk memperbaiki karakteristik tanah dasar sehingga lebih mampu mendukung beban konstruksi.

Perkuatan geosintetik

Geosintetik digunakan sebagai material perkuatan pada timbunan di atas tanah lunak dengan fungsi utama sebagai pemisah dan elemen tarik. Keberadaan geosintetik membantu menahan pergerakan lateral yang terjadi akibat tekanan tanah sehingga meningkatkan kapasitas dukung dan stabilitas timbunan. Selain itu, penggunaan geosintetik dapat meningkatkan faktor keamanan serta mengurangi deformasi yang terjadi pada tanah dasar.

Tahap analisis kebutuhan geosintetik

1. Menentukan parameter tanah dan geosintetik

Data yang digunakan meliputi parameter tanah timbunan (γ , c , dan ϕ) serta parameter geosintetik berupa kuat tarik ultimit (T_u), faktor reduksi (RF), dan regangan izin (ϵ).

2. Menghitung kuat tarik izin dan kekakuan geosintetik

$$T_{all} = \frac{T_u}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_D} \quad (2)$$

$$EA = \frac{T_{all}}{\epsilon} \quad (3)$$

3. Menentukan kebutuhan geosintetik

Data diperoleh dari hasil analisis stabilitas lereng menggunakan *SLOPE/W* berupa faktor keamanan awal (SF_u), momen penggerak (M_d), dan momen penahan (M_r).

Momen penahan target:

$$MR_R = SF_R \times M_D \quad (4)$$

Tambahan momen penahan yang dibutuhkan:

$$\Delta MR = MR_R - MR \quad (5)$$

Gaya tarik maksimum geosintetik:

$$T_{smax} = \frac{(SF_R - SF_u) \times M_D}{y} \quad (6)$$

Momen penahan tiap lapisan geosintetik:

$$\Delta MR_i = T_{all} \times y_i \times N \quad (7)$$

Kriteria jumlah lapisan geosintetik:

$$\Sigma \Delta MR_i \geq \Delta MR \quad (8)$$

Gaya tarik tiap lapisan:

$$T_{max} = \frac{T_{smax}}{N} \quad (9)$$

Tegangan overburden efektif:

$$\sigma'_v = \gamma \times z \quad (10)$$

Faktor interaksi tanah-geosintetik:

$$\alpha = \tan(\varphi) \quad (11)$$

Panjang penjangkaran geosintetik:

$$L_e = \frac{T_{max} \times SF}{2 \times F \times \alpha \times \sigma'_v} \quad (12)$$

Faktor keamanan terhadap cabut (*pullout*):

$$SF = \frac{(2 \times F \times \alpha \times \sigma'_v \times L_e)}{T_{max}} \quad (13)$$

Koefisien tekanan tanah aktif:

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (14)$$

Gaya tanah aktif:

$$P_a = \frac{1}{2} \times \gamma \times H^2 \times K_a \quad (15)$$

Berat timbunan:

$$W = \frac{(L \times H - H^2)}{(2 \times \tan \beta)} \times \gamma_r \quad (16)$$

Adhesi:

$$C_a = a_d \times c \quad (17)$$

Faktor keamanan terhadap pergeseran:

$$SF = \frac{C_a \times L_B + (W + P_a \sin \phi_b) \tan \phi_{min}}{P_a \cos \phi_b} \quad (18)$$

Faktor keamanan terhadap lateral *squeezing*:

$$SF = \frac{2 \times C_u}{\gamma \times h \times \tan \beta} + \frac{4,14 \times C_u}{H \times \gamma} \quad (19)$$

Cek kuat tarik geosintetik:

$$T_u = \frac{T_{smax}}{N} \quad (20)$$

Persyaratan:

$$T_u \leq T_{all}$$

$$SF_{pullout} \geq 1.5$$

$$SF_{geser} \geq 1.5$$

$$SF_{lateral squeezing} \geq 1.3$$

Metode Penelitian

Lokasi

Lokasi studi kasus terletak pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Jakarta – Cikampek II Selatan Paket 2A pada STA 8+875. Pemilihan lokasi tersebut didasarkan pada lokasi tersebut memiliki ketinggian timbunan hingga 8,7 meter dan pada lokasi tersebut dilakukan *soil replacement* sedalam 3,5 meter yang dapat dilihat pada Gambar 1 berikut. Oleh karena itu, lokasi ini dipilih sebagai lokasi studi kasus untuk efektivitas metode *soil replacement* dan analisis kebutuhan geosintetik.



Gambar 1. Lokasi studi kasus

Alur penelitian

Penelitian diawali dengan pengumpulan data yang meliputi data geometri timbunan, data tanah, data gempa, data perkerasan, dan data beban lalu lintas kendaraan. Pengumpulan data tanah dari hasil pengujian N-SPT pada lapisan tanah di bawah timbunan. Nilai N-SPT dikorelasikan untuk memperoleh parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan, sedangkan material timbunan menggunakan tanah timbunan pilihan (*selected fill*). Analisis dilakukan pada timbunan 8,7 m dengan mempertimbangkan beban perkerasan dan lalu lintas sebesar 25 kN/m² serta beban gempa wilayah Bekasi sebesar 0,1969 g. Tahap pertama dilakukan pemodelan kondisi timbunan eksisting pada setiap ketinggian menggunakan PLAXIS 2D untuk memperoleh nilai *total displacemnt*, arah pergerakan tanah, dan *safety factor*. Tahapan berikutnya juga dilakukan pemodelan menggunakan *SLOPE/W* untuk identifikasi bidang gelincir kritis dan lokasi potensi keruntuhan lereng secara lebih rinci. Selanjutnya dilakukan pemodelan dengan *soil replacement* pada setiap tahapan tinggi timbunan menggunakan PLAXIS 2D untuk meningkatkan daya dukung tanah. Berdasarkan hasil analisis stabilitas dan bidang gelincir kritis yang diperoleh, dilakukan perhitungan kebutuhan perkuatan geosintetik yang meliputi jumlah lapisan, jarak vertikal, panjang tulangan, dan tata letak geosintetik. Tahap terakhir adalah pemodelan kombinasi *soil reolacement* dan perkuatan geosintetik menggunakan PLAXIS 2D untuk mencapai kriteria aman yang sesuai persyaratan. Hasil dari kondisi eksisting, *soil replacement*, serta kombinasi *soil replacement tanah* geosintetik kemudian dibandingkan berdasarkan nilai *total displacemnt*, arah pergerakan tanah, dan *safety factor*.

Data penelitian

Adapun data yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Parameter tanah

Parameter tanah yang digunakan sebagai input data pada pemodelan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D pada lapisan di bawah timbunan ditentukan dari data pengujian N-SPT (*Standard Penetration Test*) yang dapat dilihat pada Tabel 1, kemudian dikorelasikan dengan parameter sifat mekanik tanah. Sementara itu, parameter material timbunan menggunakan material timbunan pilihan. Adapun data parameter tanah yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Nilai N-SPT

Kedalaman (m)	N	Tebal Lapisan/N	Jenis Tanah
0			
2	3	0,667	CH (High plasticity clay)
2			
4	3	0,667	MH (High plasticity silt)
4			
6	50	0,04	SM (Silty Sand)
6			
8	60	0,033	SP (Porrly Graded Sand)
8			
10	25	0,08	
10			
12	37	0,054	SM Silty sand)
12			
14	38	0,052	
14			
16	33	0,060	
16			SM Silty sand)
18	60	0,033	
18			
20	12	0,167	
20			MH (High plasticity silt)
22	15	0,133	
22			
24	25	0,08	SM (Silty Sand)
24			
26	35	0,057	
26			
28	17	0,117	ML (Silty)
28			
30	20	0,1	
30			
32	28	0,071	CH (High plasticity clay)
32			
34	38	0,052	
34			
36	60	0,033	SM (Silty sand)

Lanjutan Tabel 1. Nilai N-SPT

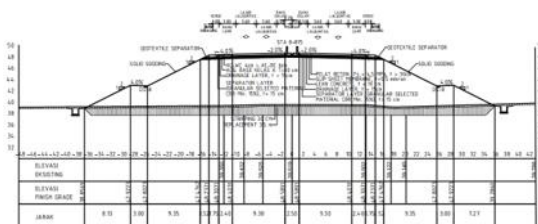
Kedalaman m	N	Tebal Lapisan/N	Jenis Tanah
36	27	0,074	ML (Low plasticity silt)
38			
38	23	0,086	
40			
40	40	0,05	
42			
42	43	0,046	
44			
44	60	0,033	
46			
46	60	0,033	
48			
48	60	0,003	
48,18			

Tabel 2. Data Parameter Tanah

Jenis Tanah	γ unsat kN/m ³	γ sat kN/m ³	Es kN/m ²	c kN/m ²	ϕ °
Timbunan	15,5	16,5	30000	8,73	20
CH	15,5	17,3	9000	18,00	10
MH	18	19,86	10,600	20,00	15
SM	21	22	18300	0,00	46,4
SP	21	22	20425	0,00	44,94
ML	18	19,32	13300	35	30
SM	19	21	12300	0	42,78
MH	17,5	18,44	6933	20	15
SM	19	21	7000	0	41,39
ML	18	19,63	14501,20	20	15
CH	19,5	20,72	126000	252	30
SM	21	22	14850	0	45,06
ML	20	21,15	25935,49	75	30

2. Data geometri timbunan

Adapun geometri timbunan STA. 8+875 berikut.



Gambar 2. Geometri Timbunan

3. Data beban merata

Parameter beban yang digunakan dalam analisis selama masa konstruksi berupa beban merata yang terdiri dari beban struktur perkerasan dan beban lalu lintas. Lapisan drainase dan separator (*capping layer*) dianggap sebagai bagian dari timbunan pilihan sehingga telah dimodelkan dalam geometri tanah dan tidak diperhitungkan sebagai beban tambahan. Berdasarkan data perencanaan Proyek Jalan Tol Jakarta–Cikampek II Selatan Paket 2A, beban struktur perkerasan yang digunakan sebesar $9,4 \text{ kN/m}^2$, sedangkan beban lalu lintas untuk jalan tol kelas I sebesar 15 kN/m^2 . Dengan demikian, total beban merata yang diinput dalam pemodelan PLAXIS 2D adalah sebesar $24,4 \text{ kN/m}^2$.

4. Data beban gempa

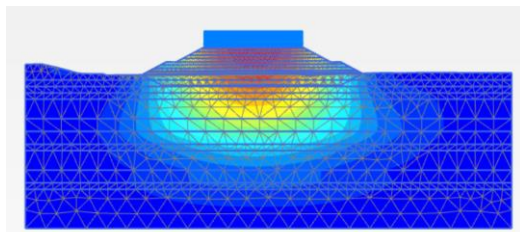
Berdasarkan data Puskim, wilayah Bekasi memiliki nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) sebesar 0,3938g. Nilai tersebut diperoleh setelah lokasi penelitian diklasifikasikan sebagai kelas situs SD (tanah sedang) berdasarkan korelasi nilai rata-rata N-SPT. Dalam analisis pseudo-statik menggunakan PLAXIS 2D, nilai PGA yang digunakan sebagai input gempa diambil sebesar 50% dari permukaan PGA, sehingga diperoleh nilai percepatan gempa sebesar 0,1969g.

5. Data geosintetik

Geosintetik yang digunakan dalam penelitian ini merupakan geotekstil tunun produksi PT Tetrasa Geosinindo dengan T_u sebesar 200 kN/m dan *limiting strain* 6%. Berdasarkan spesifikasi teknis produk, diperoleh T_{all} sebesar 109,036 kN/m nilai EA sebesar 200 kN/m dan *limiting strain* 6%. Berdasarkan spesifikasi teknis produk, diperoleh T_{all} sebesar 109,036 kN/m nilai EA sebesar 1871,373 kN/m dan nilai N_{1p} sebesar 109 kN/m.

Analisis timbunan eksisting

Pemodelan analisis timbunan tanah asli tanpa perkuatan dengan PLAXIS 2D dilakukan dengan ketinggian timbunan 8,7 m. Pada analisis pemodelan timbunan tanah asli tanpa perkuatan di PLAXIS 2D, analisis difokuskan untuk mengevaluasi tanah dasar tanah dalam menahan berat timbunan serta mengidentifikasi potensi ketidakstabilan timbunan. Pada analisis kondisi eksisting mempertimbangkan beban merata berupa beban perkerasan dan kendaraan, serta beban gempa. Seluruh beban tersebut dipertimbangkan merupakan beban yang akan bekerja pada timbunan selama masa layan jalan agar hasil analisis stabilitas lebih realistis dan sesuai kondisi aktual di lapangan. Berdasarkan hasil analisis pada kondisi timbunan eksisting dengan beban merata diperoleh ($SF=1,040$) seperti pada Gambar 3 dan Gambar 4.

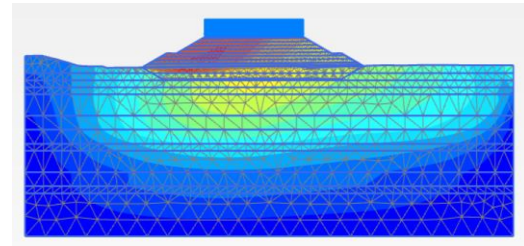


Gambar 3. Analisis SF Timbunan Eksisting dengan Beban Merata

Reached values	
Reached total time	0,000 day
CSP - Relative stiffness	0,1911E-3
ForceX - Reached total force	0,000 kN
ForceY - Reached total force	0,000 kN
Pmax - Reached max pp	225,6 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	1,040

Gambar 4. Nilai SF Timbunan Eksisting dengan Beban Merata

Sedangkan dengan penambahan beban pada kondisi timbunan dengan beban gempa mengalami *collapse* yang dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.

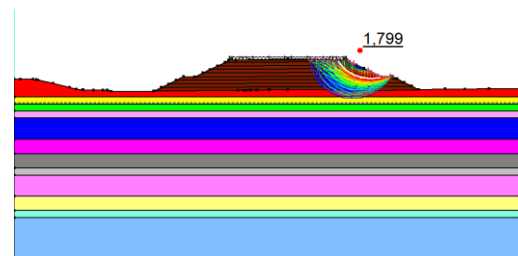


Gambar 5. Analisis SF Timbunan Eksisting dengan Beban Merata dan Beban Gempa

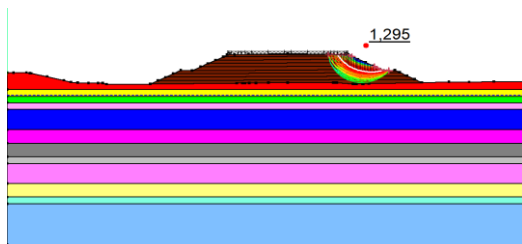
Berdasarkan hasil analisis yang didapat, kondisi eksisting timbunan tidak memenuhi persyaratan SNI 8460:2017 $SF \geq 1,3$ kondisi statis dan $SF \geq 1,1$ kondisi dinamis. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya perbaikan untuk meningkatkan daya dukung tanah. Perbaikan yang dilakukan untuk meningkatkan daya dukung tanah yaitu *soil replacement*.

Analisis timbunan asli dengan SLOPE/W

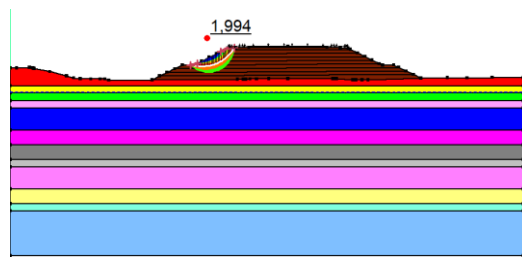
Setelah analisis stabilitas timbunan pada kondisi timbunan eksisting menggunakan PLAXIS 2D, dilakukan analisis lanjutan dengan GeoStudio *SLOPE/W* untuk mengidentifikasi bidang gelincir kritis secara lebih rinci. Pemodelan dilakukan pada 12 kondisi yang mencakup tiga variasi kemiringan lereng, arah pemodelan kiri-kanan dan kanan-kiri, serta kondisi statistik dan gempa. Hasil analisis digunakan untuk menentukan lokasi potensi keruntuhan dan kondisi lereng yang paling kritis. Adapun hasil analisis bidang gelincir menggunakan *SLOPE/W* dapat dilihat pada Gambar 6 sampai Gambar 17, serta Tabel 3 untuk rekapitulasi nilai SF.



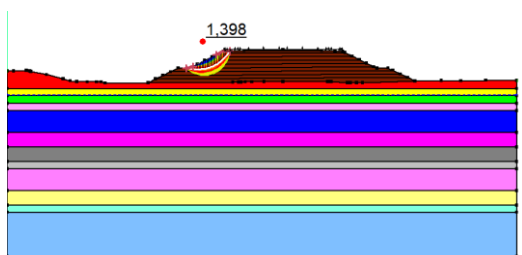
Gambar 6. Bidang Gelincir Slope 1 “Arah Kiri ke Kanan”



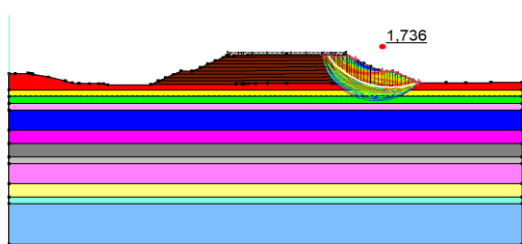
Gambar 7. Bidang Gelincir *Slope 1* “Arah Kiri ke Kanan dengan Beban Gempa”



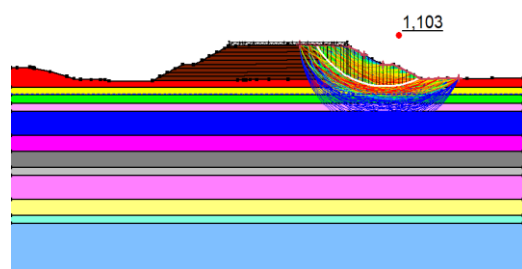
Gambar 8. Bidang Gelincir *Slope 1* “Arah Kanan ke Kiri”



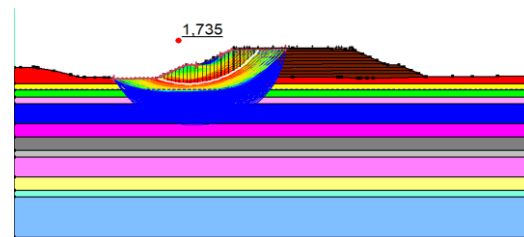
Gambar 9. Bidang Gelincir *Slope 1* “Arah Kanan ke Kiri dengan Beban Gempa”



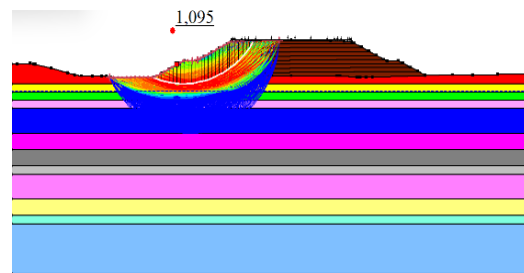
Gambar 10. Bidang Gelincir *Slope 2* “Arah Kiri ke Kanan”



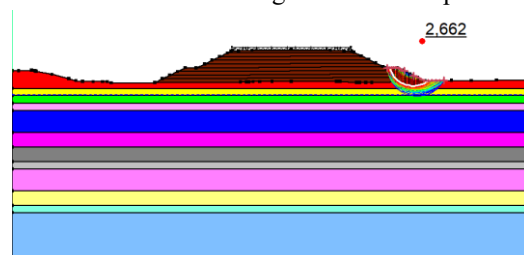
Gambar 11. Bidang Gelincir *Slope 2* “Arah Kiri ke Kanan dengan Beban Gempa”



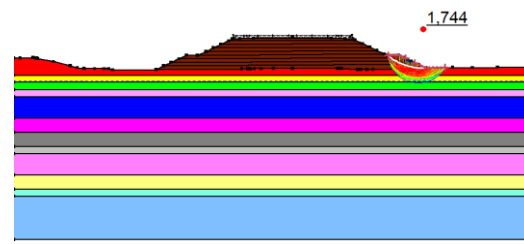
Gambar 12. Bidang Gelincir *Slope 2* Arah Kanan ke Kiri



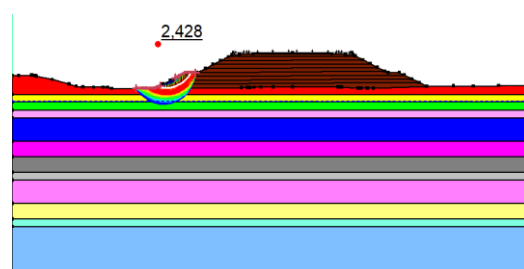
Gambar 13. Bidang Gelincir *Slope 2* Arah Kanan ke Kiri dengan Beban Gempa



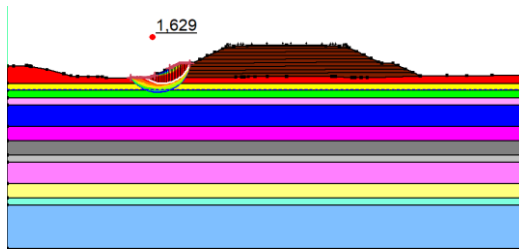
Gambar 14. Bidang Gelincir *Slope 3* “Arah Kiri ke Kanan”



Gambar 15. Bidang Gelincir *Slope 3* “Arah Kiri ke Kanan dengan Beban Gempa”



Gambar 16. Bidang Gelincir *Slope 3* “Arah Kanan ke Kiri”



Gambar 17. Bidang Gelincir Slope 3 “Arah Kanan ke Kiri dengan Beban Gempa”

Tabel 3. Nilai SF Bidang Gelincir Slope

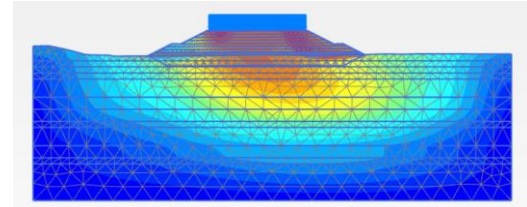
Pemodelan	Safety Factor	
	Beban merata	Beban merata dan beban gempa
Slope 1 “arah kiri ke kanan”	1,799	1,295
Slope 1 “arah kanan ke kiri”	1,994	1,398
Slope 2 “arah kiri ke kanan”	1,736	1,103
Slope 2 “arah kanan ke kiri”	1,735	1,095
Slope 3 “arah kiri ke kanan”	2,662	1,744
Slope 3 arah kanan ke kiri	2,428	1,629

Berdasarkan analisis *safety factor* kondisi timbunan eksisting pada *SLOPE/W*, setelah diberikan beban merata dan beban gempa terdapat bidang gelincir dengan nilai *safety factor* terkecil terdapat pada slope 2 “arah kanan ke kiri” sebesar 1,095 dikategorikan tidak aman. slope 3 menghasilkan nilai *safety factor* yang lebih tinggi karena bidang gelincir berada lebih dekat dengan kaki timbunan sehingga massa tanah yang berpotensi longsor lebih kecil dan gaya penahannya menjadi lebih besar.

Analisis soil replacement dengan PLAXIS 2D

Pada STA 8+875, perbaikan nilai daya dukung tanah dilakukan dengan metode *soil replacement* sedalam 3,5 m berdasarkan hasil uji *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP). Hasil pengujian menunjukkan bahwa lapisan tanah tersebut tanah lempung lunak sehingga pada kedalaman tersebut memiliki daya dukung yang rendah. Oleh karena itu, lapisan tanah tersebut hingga kedalaman 3,5 m diganti dengan material

timbunan pilihan (*selected fill*). Berdasarkan hasil analisis pada tahapan ketinggian 8,7 meter dan diberikan beban merata terjadi *collapse*. Adapun hasil analisis pada tahapan dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18. Analisis SF Soil Replacement Timbunan dengan Beban Merata

Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan metode *soil replacement* belum mampu meningkatkan daya dukung tanah untuk menahan beban yang bekerja. Penerapan metode *soil replacement* pada timbunan 8,7 meter terjadi *collapse* sehingga perlu diberikan perkuatan pada tanah timbunan. Adapun perkuatan yang akan digunakan yaitu perkuatan dengan geosintetik.

Perhitungan Kebutuhan Geosintetik

Hasil analisis PLAXIS 2D dan *SLOPE/W* menunjukkan bahwa stabilitas lereng belum memenuhi kriteria desain, dengan nilai faktor keamanan sebesar 1,095. Bidang gelincir kritis berkembang melalui tubuh timbunan hingga mencapai tanah dasar, yang mengindikasikan potensi keruntuhan lereng. Oleh karena itu, pada kondisi slope 2 “arah kanan ke kiri” dengan beban merata dan beban gempa menunjukkan kondisi paling kritis, Pemilihan kondisi yang paling kritis bertujuan agar desain geosintetik yang diperoleh mampu memberikan perkuatan yang memadai pada kondisi terburuk (*kondisi kritis*). Dengan demikian, apabila kebutuhan geosintetik telah memenuhi persyaratan stabilitas pada kondisi tersebut, maka desain tersebut diharapkan juga mampu memberikan tingkat keamanan yang memadai pada kondisi lereng lain yang memiliki nilai faktor keamanan lebih tinggi.

Adapun perhitungan kebutuhan geosintetik sebagai berikut.

1. Menghitung kuat tarik izin dan kekakuan geosintetik :

$$T_{all} = \frac{T_u}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_D}$$

$$T_{all} = \frac{1,15 \times 1,45 \times 1,1}{200}$$

$$T_{all} = 109,036 \text{ kN/m}$$

$$EA = \frac{109,036}{0,6}$$

$$EA = 1817,273 \text{ kN/m}$$

2. Momen penahan target:

$$MR_R = SF_R \times M_D$$

$$MR_R = 1,5 \times 19161,669$$

$$MR_R = 28742,504 \text{ kN/m}$$

3. Tambahan momen penahan yang dibutuhkan:

$$\Delta MR = MR_R - MR$$

$$\Delta MR = 28742,504 - 19161,669$$

$$\Delta MR = 7762,779 \text{ kN/m}$$

4. Gaya tarik maksimum geosintetik:

$$T_{smax} = \frac{(SF_R - SF_u) \times M_D}{y}$$

$$T_{smax} = (1,5 - 1,088) \frac{19161,669}{22,196}$$

$$T_{smax} = 349,663 \text{ kN/m}$$

5. Momen penahan tiap lapisan geosintetik:

$$\Delta MR_i = T_{all} \times y_i \times N$$

$$\Delta MR_i = 109,036 \times 12,78 \times 4$$

$$\Delta MR_i = 5573,940 \text{ kN/m}$$

Tabel 4. Jumlah Lapisan Geosintetik

Lapis	y _i m	Lembar	ΔM _{Ri} kN/m	Total ΔM _{Ri} kN/m	Cek
1	12,78	4	5573,940	5573,940	Not Ok
2	12,38	4	5399,482	10973,442	Ok

Nilai total ΔM_{Ri} pada lapisan 1 yaitu 5573,940 kN/m < ΔM_R sebesar 7762,779 kN/m, maka lapisan tersebut dinyatakan tidak memenuhi sehingga diperlukan penambahan lapisan geosintetik.

6. Gaya tarik tiap lapisan:

$$T_{max} = \frac{T_{smax}}{N}$$

$$T_{max} = \frac{349,644}{2}$$

$$T_{max} = 174,82 \text{ kN/m}$$

7. Tegangan overburden efektif:

$$\sigma'_v = \gamma \times z$$

$$\sigma'_v = 0,4 \times 15,5$$

$$\sigma'_v = 6,06 \text{ kN/m}^2$$

8. Faktor interaksi tanah-geosintetik:

$$\alpha = \tan(\varphi)$$

$$\alpha = \tan(\varphi 24)$$

$$\alpha = 0,445^\circ$$

9. Panjang penjangkaran geosintetik:

$$L_e = \frac{T_{max} \times SF}{2 \times F^* \times \alpha \times \sigma'_v}$$

$$L_e = \frac{174,817 \times 1,5}{2 \times 0,67 \times 0,445 \times 0,4 \times 15,5}$$

$$L_e = 70,892 \text{ m}$$

10. Faktor keamanan terhadap cabut (pullout):

$$SF = \frac{(2 \times F^* \times \alpha \times \sigma'_v \times L_e)}{T_{max}}$$

$$SF = \frac{2 \times 0,67 \times 0,445 \times 0,4 \times 15,5 \times 70,892}{174,817}$$

$$SF = 1,5$$

Tabel 5. Kebutuhan Geosintetik (Le)

Lapis	Tmax	Le	Le pakai	SF	Cek
	(kN/m)	m	m		
1	174,817	70,892	70,9	1,5	Ok
2	174,817	35,446	35,5	1,5	Ok

Cek stabilitas eksternal

11. Koefisien tekanan tanah aktif:

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{24}{2} \right)$$

$$K_a = 0,421 \text{ kN/m}$$

Rasio lereng 2H : 1V, maka

$$\beta = \tan \frac{V}{H}$$

$$\beta = \tan \frac{1}{2}$$

$$\beta = 26,565^\circ$$

12. Gaya tanah aktif:

$$P_a = \frac{1}{2} \times \gamma \times H^2 \times K_a$$

$$P_a = \frac{1}{2} \times 15,5 \times 8,7^2 \times 0,421$$

$$P_a = 247,385 \text{ kN/m}$$

Untuk $L > H$ maka,

$$W = \frac{(L \times H - H^2)}{(2 \times \tan \beta)} \times \gamma_r$$

$$W = \frac{(70,9 - 8,7^2)}{(2 \times \tan 26,565)} \times 15,5$$

$$W = 8387,67 \text{ kN/m}$$

Adhesi:

$$C_a = a_d \times c$$

$$C_a = \frac{2}{3} \times 18$$

$$C_a = 12 \text{ kN/m}^2$$

Nilai φ sebesar 10° , diperoleh berdasarkan nilai φ pada lapisan tanah pertama di bawah timbunan.

13. Faktor keamanan terhadap pergeseran:

$$SF = \frac{C_a \times L_B + (W + P_a \sin \varphi_b) \tan \varphi_{\min}}{P_a \times \cos \varphi_b}$$

$$SF = \frac{(12 \times 70,9) + (10^\circ)}{247,385 \times \cos(15,5^\circ)}$$

$$SF = 3,808$$

Tabel 6. SF Pergeseran Tiap Lapisan

Lapis	Le m	W kN/m	SF	Cek
1	70,9	8387,67	3,808	Ok
2	35,5	3613,98	1,929	Ok

14. Faktor keamanan terhadap lateral squeezing:

$$SF = \frac{2 \times C_u}{\gamma \times h \times \tan \beta} + \frac{4,14 \times C_u}{H \times \gamma}$$

$$SF = \frac{2 \times 18}{15,5 \times 4 \times \tan(26,565^\circ)} + \frac{4,14 \times 18}{8,7 \times 15,5}$$

$$SF = 1,325$$

15. Cek kuat tarik geosintetik:

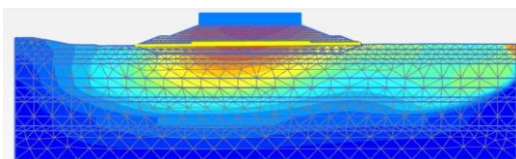
$$T_u = \frac{T_{s_{\max}}}{N}$$

$$T_u = \frac{349,633}{4}$$

$$T_u = 87,408 \text{ kN/m}$$

Analisis timbunan dengan soil replacement dan perkuatan geosintetik

Analisis kondisi kombinasi penggantian tanah sedalam 3,5 m dan perkuatan geosintetik sebanyak 4 lapis dengan panjang masing-masing 75,6 m dan 37,8 m. Pemodelan mempertimbangkan beban perkerasan dan lalu lintas sebesar 24,4 kN/m² serta beban gempa dengan PGA 0,1969g. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada soil replacement yang dikombinasikan dengan perkuatan geosintetik menghasilkan nilai SF sebesar 1,135. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan $SF \geq 1,1$ untuk kondisi dinamis, timbunan dinyatakan stabil terhadap kombinasi pembebanan tersebut. Adapun hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 19 dan Gambar 20.



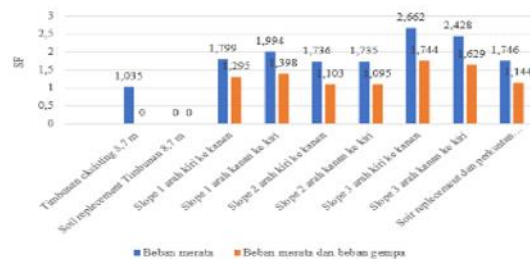
Gambar 19. Analisis SF Soil Replacement dan Perkuatan Geosintetik

Reached values	
Reached total time	0,000 day
CSP - Relative stiffness	0,04839E-3
ForceX - Reached total force	0,000 kN
ForceY - Reached total force	0,000 kN
Pmax - Reached max pp	444,2 kN/m ²
EM _{stage} - Reached phase p	0,000
EM _{weight} - Reached weight	1,000
EM _{sf} - Reached safety fact	1,144

Gambar 20. Nilai SF Soil Replacement dan Perkuatan Geosintetik

Tabel 7. Rekapitulasi Secara Keluruhan Terhadap *Safety Factor*

Pemodelan	<i>Safety Factor</i>	
	Beban merata	Beban merata dan beban gempa
Timbunan eksisting 8,7 m	1,040	<i>Collapse</i>
<i>Soil replacement</i>	<i>Collapse</i>	<i>Collapse</i>
Timbunan 8,7 m		
Slope 1 arah kiri ke kanan	1,799	1,295
Slope 1 arah kanan ke kiri	1,994	1,398
Slope 2 arah kiri ke kanan	1,736	1,103
Slope 2 arah kanan ke kiri	1,735	1,095
Slope 3 arah kiri ke kanan	2,662	1,744
Slope 3 arah kanan ke kiri	2,428	1,629
<i>Soil replacement</i> dan perkuatan geosintetik	1,746	1,144



Gambar 21. Perbandingan Nilai *Safety Factor* Hasil Analisis

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, timbunan eksisting dan *soil replacement* belum mampu memenuhi persyaratan stabilitas karena memiliki nilai *Safety Factor* (SF) yang rendah dan mengalami *collapse* (runtuh) pada kondisi pembebanan tertentu. Analisis juga menunjukkan bahwa *slope 2* “arah kanan ke kiri” dengan beban merata dan gempa merupakan kondisi paling kritis dengan nilai SF sebesar 1,095, sehingga digunakan sebagai dasar perhitungan kebutuhan geosintetik. Kombinasi *soil replacement* dan perkuatan geosintetik meningkatkan nilai SF menjadi 1,746 pada kondisi beban merata dan 1,144 pada kondisi beban gempa, sehingga memenuhi persyaratan faktor keamanan minimum

untuk kondisi dinamis ($SF \geq 1,1$) dan mampu meningkatkan stabilitas timbunan.

Daftar Pustaka

- Batara, M. and Gofar, N. (2024) “Pengaruh Penggantian Tanah Dan Lapisan Geotekstil Terhadap Deformasi Dan Stabilitas Lereng Timbunan Di Atas Tanah Lunak,” *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(3), pp. 915–924. Available at: <https://doi.org/10.24912/jmts.v7i3.29080..>
- Bowles, J.E. (1989) *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah) Jilid 1*, Erlangga. Jakarta: Erlangga.
- BPS (2025) “Catalog : 1101001,” *Statistik Indonesia* 2025, 53,2025, p. 790.
- Das, B.M. (1995) *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1*, Penerbit Erlangga. Jakarta: Erlangga.
- Das, B.M. (2010) “Principles of Geotechnical Engineering,” *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp. 127–129.
- Departemen Pekerjaan Umum (2009) “Perencanaan dan Pelaksanaan perkuatan tanah dengan geosintetik,” (003).
- Hardiyatmo, H.C. (2008) *Geosintetik untuk Rekayasa Jalan Raya*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H.C. (2012) *Mekanika Tanah 1*, Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C. (2018) *Mekanika Tanah 2*, Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Iwan rianto, I.R., Akhbar Romadhoni, D. and Agung Wibawa, S. (2024) “Analisis Stabilitas Timbunan Tanah Dengan Perkuatan Geotextile Menggunakan Software PLAXIS (Studi Kasus Pembangunan Jalur Ganda Antara Solo Balapan – Kadipiro - Kalioso),” *Inisiasi*, pp. 13–22. Available at: <https://doi.org/10.59344/inisiasi.v13i1.222>.
- Lokk, B. (2007) *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London, UK: Taylor & Francis Group.
- Roestaman, M. dan (2019) *Analisis Stabilitas Timbunan Dengan Geotextile Woven*. Available at: <http://journals.sttgarut.ac.id>.
- Nadhif, F.M., Muhammad, D. and Abdurrozaq, R. (2024) “Analisis stabilitas timbunan tanah menggunakan perkuatan geotekstil dengan software Geostudio,” *Proceeding Civil Engineering Research Forum*, 3(2), pp. 186–194.