

ANALISIS STABILITAS TIMBUNAN DENGAN PERKUATAN GEOTEKSTIL DAN CERUCUK

Fahrita Sari¹, Istiatun²

^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. Dr. G.A. Siwabessy, Kampus Universitas Indonesia, Depok, Indonesia, 16425.

e-mail: fh Sari99@gmail.com, istiatun@sipil.pnj.ac.id

ABSTRACT

On the Serpong–Balaraja Toll Road Section 1A (STA 4+550–SSTA 4+900), there is a swamp area that is designed to have an embankment, so repair and reinforcement of the soil are needed. Therefore, this analysis aims to analyze the safety factor and consolidation settlement on the original soil. In addition, this analysis was carried out on soil replacement, geotextile, a combination of soil replacement and geotextile methods, and cerucuk using Plaxis 2D v20. The original soil conditions were also analyzed by the Fellenius method. The analysis results on the original soil conditions with Plaxis 2D v20 indicated a collapse, while with the Fellenius method the safety factor was 1.5, so it was not safe. Based on the methods used, only the geotextile method with variations of five layers of geotextile in post-construction is not safe. In soil replacement and soil replacement with geotextiles, the safety factor is relatively the same between 5.5 and 8 meters of replacement soil. Therefore, the thickness of the replacement soil has an optimum point where the addition of the thickness of the replacement soil is not linear with an increase in the safety factor. The consolidation settlement in the geotextile method is greater than in other methods. The detailed explanation will be developed on the writing paper below.

Keywords: Cerucuk, Consolidation Settlement, Geotextile, Safety Factor, Soil Replacement.

ABSTRAK

Pada Jalan Tol Serpong – Balaraja Seksi 1A STA 4+550 – STA 4+900 merupakan area rawa yang direncanakan terdapat timbunan tanah sehingga diperlukan perbaikan dan perkuatan tanah. Oleh karena itu, tujuan penganalisisan ini, yaitu menganalisis faktor keamanan dan penurunan konsolidasi pada tanah asli. Selain itu, analisis ini dilakukan terhadap metode soil replacement, geotekstil, kombinasi soil replacement dan geotekstil, serta cerucuk menggunakan Plaxis 2D v20. Pada kondisi tanah asli, dianalisis juga dengan metode Fellenius. Hasil analisis pada kondisi tanah asli dengan Plaxis 2D v20 mengalami collapse, sedangkan dengan metode Fellenius didapatkan faktor keamanan $\leq 1,5$ sehingga tidak aman. Berdasarkan metode-metode yang dilakukan, hanya metode geotekstil dengan variasi 5 lapis geotekstil pada pasca konstruksi yang tidak aman. Pada soil replacement dan soil replacement dengan geotekstil didapatkan faktor keamanan yang relatif sama antara 5,5 m dan 8 m ketebalan tanah pengganti. Oleh karena itu, ketebalan tanah pengganti memiliki titik optimum dimana penambahan ketebalan tanah pengganti tidak linear dengan peningkatan faktor keamanan. Penurunan konsolidasi pada metode geotekstil lebih besar dibandingkan metode lainnya. Penjelasan rinci dapat dikembangkan pada artikel di bawah ini.

Kata kunci: Cerucuk, Faktor Keamanan, Geotekstil, Penurunan Konsolidasi, Soil Replacement.

PENDAHULUAN

Jalan Tol Serpong – Balaraja merupakan salah satu Proyek Strategis Nasional (PSN) di Provinsi Banten yang diharapkan dapat meningkatkan ketersambungan wilayah menuju Jakarta dan akses menuju Merak dan Lampung

sebab tersambung dengan akses masuk Tol Tangerang – Merak. Pada saat ini, PT Trans Bumi Serbaraja sedang membangun Jalan Tol Serpong – Balaraja Seksi 1A (BSD – Legok) sepanjang 5,15 Km.

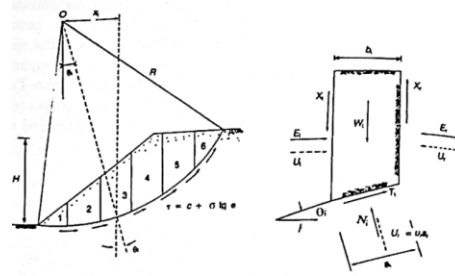
Pada proyek pembangunan Jalan Tol Serpong – Balaraja Seksi 1A STA 4+550

– STA 4+900 merupakan area rawa yang direncanakan terdapat timbunan tanah untuk *main road* dan *ramp*. Karakteristik tanah pada area tersebut hingga kedalaman 5,0 m termasuk ke dalam tanah kohesif, yaitu lanau lempungan dengan Indeks Plastisitas (PI) sebesar 45,10% dan kadar air asli sebesar 68,19%. Hal ini tentu menjadi kendala dikarenakan timbunan berada di atas tanah kohesif. Tanah kohesif memiliki daya dukung rendah, permeabilitas yang rendah (kedap air), dan kompresibilitas yang tinggi. Apabila kadar air tanah tersebut meningkat, maka akan terjadi peningkatan tegangan efektif sehingga dapat terjadi penurunan konsolidasi tanah yang besar. Hal ini menyebabkan tanah kohesif kurang mampu menahan beban yang ada di atasnya sehingga dapat terjadi keruntuhan struktur. Oleh karena itu, diperlukan perbaikan dan perkuatan tanah dengan metode yang efektif.

Dari permasalahan di atas, maka tujuan dari penganalisisan ini, yaitu untuk mengetahui faktor keamanan (*safety factor*) dan besar nilai penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) pada tanah asli. Selain itu, analisis ini dilakukan terhadap metode *soil replacement* dengan variasi ketebalan tanah pengganti, metode *geotextile* dengan variasi jumlah lapisan, dan kombinasi antara metode *soil replacement* dan *geotextile* dengan variasi ketebalan tanah pengganti dan jumlah lapisan *geotextile*, metode cerucuk. Analisis ini dilakukan menggunakan *software* Plaxis 2D v20. Pada kondisi tanah asli, dianalisis juga dengan metode *Fellenius*.

Metode *Fellenius*

Menurut *Fellenius*, faktor keamanan adalah total momen tahanan geser sepanjang bidang gelincir dibagi dengan total momen berat massa tanah yang longsor [1].



Gambar 1. Gaya-gaya yang bekerja pada irisan

Sumber: Hardiyatmo (2003)

Momen dorong tidak terpengaruhi oleh tekanan air pori pada bidang gelincir karena resultan gaya akibat tekanan air pori melalui titik pusat lingkaran sehingga persamaannya sebagai berikut.

$$SF = \frac{\sum ca_i + \sum (W \cos \theta - u_i a_i) \tan \varphi}{\sum W \sin \theta}$$

Apabila diperhitungkan beban gempa, maka faktor keamanan sebagai berikut.

$$SF = \frac{\sum ca_i + \sum (W \cos \theta - u_i a_i + N_e) \tan \varphi}{\sum W \sin \theta + T_e}$$

Keterangan:

- a_i = panjang bidang longsor pada irisan ke-i (m)
- W = berat irisan ke-i (kN)
- θ = sudut pada **Gambar 1**
- u_i = tekanan air pori pada irisan ke-i (kN/m²)
- φ = sudut geser dalam (°)

Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga menggunakan konsep diskritisasi sehingga tanah dibagi menjadi elemen-elemen kecil. Kelebihan dalam penggunaan metode ini, yaitu bentuk geometri lereng dapat bervariasi, tidak dibutuhkan asumsi dalam menentukan posisi bidang longsor dan kekuatan bidang gelincir lereng, bidang longsor secara alami terbentuk pada daerah kekuatan geser yang tidak dapat menahan tegangan geser.

Penentuan nilai faktor keamanan (*safety factor*) dengan pendekatan elemen hingga menggunakan metode *shear strength reduction* atau disebut juga *phi-c reduction* yang prinsipnya mereduksi kekuatan geser secara bertahap sampai terjadi keruntuhan lereng. Parameter

kuat geser tanah yang direduksi, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ) sehingga faktor keamanan dinyatakan dengan rumus sebagai berikut. [2]

$$\sum M_{SF} = \frac{c}{c_{reduced}} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_{reduced}}$$

Keterangan:

$\sum M_{SF}$ = Faktor keamanan

c = Kohesi tanah (kN/m^2)

$c_{reduced}$ = Kohesi tanah tereduksi (kN/m^2)

φ = Sudut geser dalam tanah ($^\circ$)

$\varphi_{reduced}$ = Sudut geser dalam tereduksi ($^\circ$)

Berdasarkan SNI 8460:2017, kriteria faktor keamanan lereng didasarkan pada pertimbangan biaya dan konsekuensi dari kegagalan lereng pada tingkat ketidakpastian kondisi analisis yang dapat dilihat pada **Tabel 1** [3].

Tabel 1. 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

^aTingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan rendah, jika kondisi geologi dapat dipahami, kondisi tanah seragam, penyelidikan tanah konsisten, lengkap dan logis terhadap kondisi di lapangan.

^bTingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan tinggi, jika kondisi geologi sangat kompleks, kondisi tanah bervariasi, dan penyelidikan tanah tidak konsisten dan tidak dapat diandalkan.

Sumber: Badan Standarisasi Nasional (2017)

Soil Replacement

Menurut Darwis Panguriseng, perbaikan tanah dengan penggantian tanah (*soil replacement*), yaitu memperbaiki gradasi dengan menambahkan tanah pada fraksi tertentu yang dianggap bermutu rendah hingga mencapai gradasi yang rapat dan memiliki parameter yang sesuai spesifikasi [4].

Perbaikan tanah metastabil mengurangi potensi penurunan mendadak saat tanah terkena pembasahan dan memberikan perbaikan untuk pengawasan desain dan konstruksi [5].

Ketebalan tanah pengganti memiliki titik optimum, bertentangan dengan gagasan tentang hubungan peningkatan linier antara biaya langsung dan ketebalan tanah pengganti. Ketika kohesi lempung dan kedalaman muka air tanah meningkat, maka ketebalan lapisan tanah pengganti yang optimal menurun [6].

Perkuatan Tanah dengan Geotekstil

Geotekstil merupakan bahan tekstil lolos air yang diproduksi dengan cara mengombinasikan elemen tekstil seperti serat atau benang menjadi produk lembaran [7].

Pemakaian geotekstil mampu meningkatkan faktor keamanan dan mempercepat waktu konsolidasi [8].

Tahapan pertama dalam merencanakan geotekstil, yaitu menentukan besarnya momen dorong untuk mencari momen penahan tambahan dengan rumus.

$$M_d = \frac{M_r}{SF}$$

$$\Delta M_r = (SF_{rencana} - SF) \times M_d$$

Selanjutnya, menentukan nilai tegangan horizontal akibat beban dinamis dengan rumus sebagai berikut.

$$\theta = \tan^{-1} k_h \cos^2(\varphi - \theta)$$

$$K_{AG} = \frac{\cos^2 \theta \times \left(1 + \sqrt{\frac{\sin \varphi \times \sin(\varphi - \theta)}{\cos \theta}}\right)}{\cos^2 \theta \times \left(1 + \sqrt{\frac{\sin \varphi \times \sin(\varphi - \theta)}{\cos \theta}}\right)}$$

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

$$\Delta K_{AG} = K_{AG} - K_a$$

$$\sigma_h = \Delta K_{AG} \times q - 2 \times c \times \sqrt{\Delta K_{AG}} + \Delta K_{AG} \times H \times \gamma$$

Untuk mencari jarak vertikal antar lapisan geotekstil (S_v) sebagai berikut.

$$S_v = \frac{T_{allow}}{\sigma_h \times SF_{rencana}}$$

Untuk menentukan jumlah lapisan geotekstil yang dibutuhkan sebagai berikut.

$$\Delta M_r < T_{allow} \times Ti \times \text{jumlah lapis}$$

Tentukan panjang geotekstil di belakang bidang longsor dengan rumus.

$$L_e = \frac{T_{allow} \times SF_{rencana}}{(\tau_{atas} + \tau_{bawah}) \times E} \geq 1 \text{ meter}$$

$$\tau_i = c + \sigma_v \tan \varphi$$

Untuk menentukan panjang *overlapping* geotekstil dinyatakan dengan rumus.

$$L_o = \frac{S_v \times \sigma_h \times SF_{rencana}}{4E(c + \sigma_v \tan \varphi)} \geq 1 \text{ meter}$$

Sedangkan untuk menghitung panjang geotekstil di depan bidang longsor (L_d) dilakukan dengan bantuan program AutoCAD.

Keterangan:

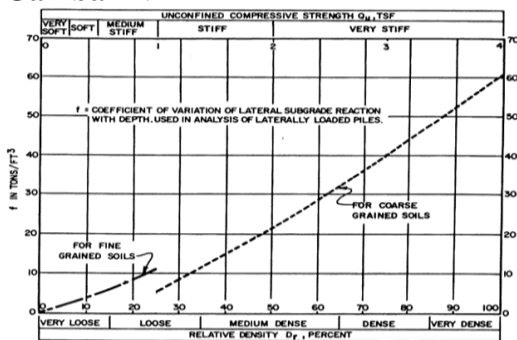
- K_h = koefisien percepatan horizontal gempa
- H = tinggi timbunan tanah (m)
- T_{allow} = kuat tarik ijin geotekstil (kN/m)
- T_i = jarak lapisan geotekstil ke pusat jari-jari kelongsoran (m)
- E = efisiensi (80%)
- σ_v = tegangan vertikal tanah (kN/m²)

Perkuatan Tanah dengan Cerucuk

Cerucuk di bawah timbunan jalan dapat meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi penurunan tanah dikarenakan menghasilkan ketahanan terhadap keruntuhan geser [9]. Pemakaian cerucuk mampu meningkatkan kekuatan daya dukung tanah timbunan sebesar 11,413% [10]. Berikut ini tahapan untuk melakukan perhitungan kebutuhan cerucuk [11]. Pertama, melakukan perhitungan kekuatan satu tiang cerucuk terhadap gaya horizontal dengan menentukan faktor kekakuan relatif sebagai berikut.

$$T = \left(\frac{EI}{f}\right)^{\frac{1}{5}}$$

Harga f didapat dari grafik pada Gambar 2.



Gambar 2 Nilai f dari berbagai jenis tanah

Sumber: *Naval Facilities Engineering Command* (1982)

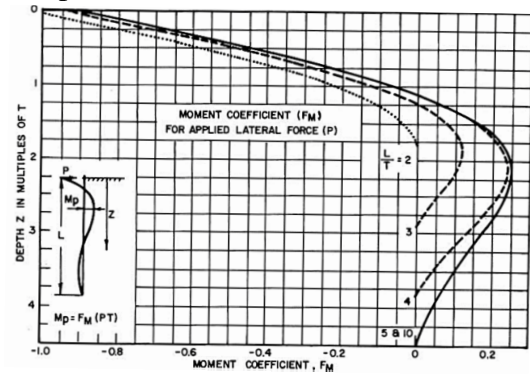
Selanjutnya, menghitung momen lentur yang bekerja pada cerucuk dengan rumus sebagai berikut.

$$Mp_{max(1\ cerucuk)} = \frac{\sigma_{all} \times I}{y}$$

Tentukan gaya horizontal yang diterima satu tiang cerucuk dengan rumus sebagai berikut.

$$P_{max(1\ cerucuk)} = \frac{Mp_{max(1\ cerucuk)}}{T \times F_M}$$

Koefisien momen akibat gaya lateral dapat ditentukan menggunakan grafik hubungan dari kedalaman (z) dengan L/T pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik koefisien momen akibat gaya lateral pada kasus 2
Sumber: *Naval Facilities Engineering Command* (1982)

Kedua, menghitung jumlah kebutuhan cerucuk dengan cara menghitung momen penggerak terlebih dahulu yang dinyatakan pada rumus sebagai berikut.

$$M_d = \frac{M_r}{SF_{min}}$$

Selanjutnya, diperhitungkan momen penahan tambahan (ΔM_R) dengan rumus sebagai berikut.

$$\Delta M_r = (SF_{rencana} - SF_{min}) \times M_d$$

Jadi, jumlah cerucuk (n) yang dibutuhkan dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut.

$$n = \frac{\Delta M_r}{R \times P_{max(1\ cerucuk)}}$$

Keterangan:

- E = modulus elastisitas cerucuk (kg/cm²)
- I = momen inersia cerucuk (cm⁴)
- f = koefisien dari variasi modulus tanah (kg/cm³)
- F_M = koefisien momen akibat gaya lateral
- σ_{all} = tegangan lentur izin cerucuk

y = jarak antara serat teratas atau terbawah dari penampang cerucuk terhadap garis netral (cm)

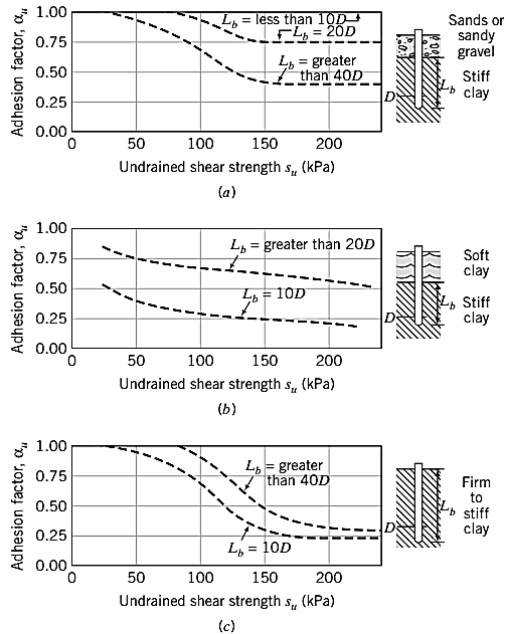
Dalam Plaxis 2D v20 dibutuhkan tahanan selimut dan tahanan ujung tiang cerucuk dengan persamaan di bawah ini.

a. Axial skin resistance

– Tanah kohesif

$$Q_s = \alpha \times c \times p$$

Nilai α dicari dengan Gambar 4 [12].



Gambar 4. Hubungan faktor adhesi dengan kohesi

Sumber: Tomlinson (1987) dalam Budhu (2010)

– Tanah non kohesif

$$Q_s = 2 \times N_{SPT} \times p$$

b. Base resistance

– Tanah kohesif

$$Q_p = 9 \times c \times Ap$$

– Tanah non kohesif

$$Q_p = 40 \times N_{SPT} \times Ap$$

Keterangan:

α = faktor adhesi

p = keliling cerucuk (m)

N_{SPT} = rata-rata N_1 (nilai $N_{rata-rata}$ dari dasar menuju 10D ke atas dan N_2 (nilai $N_{rata-rata}$ dari dasar menuju 4D ke bawah)

Ap = luas penampang cerucuk (m^2)

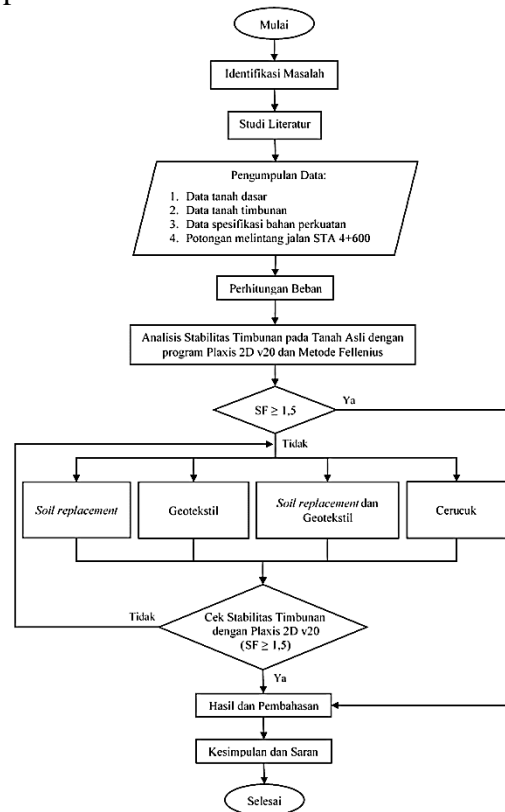
Penurunan Konsolidasi

Konsolidasi merupakan proses pengurangan volume atau rongga pori tanah jenuh dengan permeabilitas rendah

akibat pemberian beban. Hal ini bergantung dengan kecepatan air pori yang diperas keluar dari rongga tanah [1].

METODE PENELITIAN

Bagan alir penulisan yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Bagan alir penulisan

- Melakukan identifikasi masalah yang terjadi.
- Melakukan studi literatur dengan mengumpulkan materi-materi.
- Mengumpulkan data sekunder.
- Menganalisis faktor keamanan tanpa beban gempa dan penurunan konsolidasi dengan derajat konsolidasi 90% pada tanah asli dengan software Plaxis 2D v20. Selain itu, faktor keamanan pada tanah asli juga dianalisis dengan metode Fellenius dengan beban gempa dan tanpa beban gempa. Analisis faktor keamanan dilakukan pada masa konstruksi dengan beban

merata dari beban struktur sebesar 12,07 kN/m² dan pasca konstruksi dengan beban merata dari beban struktur dan beban lalu lintas sebesar 27,07 kN/m². Jika faktor keamanan SF < 1,5, maka timbunan tersebut memerlukan perbaikan dan atau perkuatan tanah.

- e. Menganalisis stabilitas timbunan terhadap metode *soil replacement* dengan variasi ketebalan tanah pengganti, geotekstil dengan variasi jumlah lapisan geotekstil, kombinasi antara *soil replacement* dan geotekstil dengan variasi ketebalan tanah pengganti dan jumlah lapisan geotekstil. Selain itu, metode perkuatan dengan cerucuk. Timbunan akan di konsolidasi selama 60 hari.
- f. Membahas hasil dari analisis stabilitas timbunan.
- g. Menarik kesimpulan dan memberikan saran untuk penulis berikutnya.

4.	Kerikil dipadatkan (<i>rolled gravel, macadam or ballast</i>)	18,8 – 22,7
5.	Beton aspal (<i>asphalt concrete</i>)	22,0
6.	Beton ringan (<i>low density</i>)	12,25 – 19,6
7.	Beton $f_c < 35$ MPa $35 < f_c < 105$ MPa	22,0 – 25,0 $22 + 0,022 f_c$
8.	Baja (<i>steel</i>)	78,5
9.	Kayu (ringan)	7,8
10.	Kayu keras (<i>hard wood</i>)	11,0

Sumber: Badan Standardisasi Nasional (2016)

Berat isi *rigid pavement*

$$\gamma_1 = 22 + 0,022 \times 45 = 22,9 \text{ kN/m}^3$$

Berat isi *lean concrete*

$$\gamma_2 = 22 \text{ kN/m}^3$$

Berat isi *drainage layer*

$$\gamma_3 = 20 \text{ kN/m}^3$$

Beban struktur perkerasan

$$q = 22,9 \times 0,3 + 22 \times 0,1 + 20 \times 0,15 = 12,07 \text{ kN/m}^2$$

- b. Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas yang digunakan mengacu pada Pedoman Kimpraswil No: Pt T-10-2002-B (Panduan Geoteknik 4 tentang Desain dan Konstruksi) pada **Tabel 4** [14].

Tabel 3. Beban lalu lintas untuk analisis stabilitas

Kelas Jalan	Beban Lalu Lintas (kN/m ²)
I	15
II	12
III	12

Sumber: Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah (2002)

Jalan tol termasuk kelas I sehingga digunakan beban lalu lintas sebesar 15 kN/m².

- c. Beban Gempa

Berdasarkan Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Perumahan, area yang ditinjau memiliki nilai PGA sebesar 0,39 g sehingga beban gempa dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

Kelas situs SE (Tanah lunak)

$$F_{PGA} = 0,93 \text{ (interpolasi Tabel 5 [15])}$$

$$PGA_M = 0,93 \times 0,39 = 0,36$$

$$k_h = 0,5 \times 0,36 = 0,18$$

HASIL dan PEMBAHASAN

Data Tanah

Parameter yang digunakan berdasarkan korelasi N-SPT dan data laboratorium dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Data Pembebanan

Berikut ini beban-beban yang bekerja pada timbunan.

- a. Beban Struktur

Berat isi untuk beban mati mengacu SNI 1725:2016 pada **Tabel 3** [13].

Tabel 2. Berat isi untuk beban mati

No.	Bahan	Berat isi (kN/m ³)
1.	Lapisan permukaan beraspal (<i>bituminous wearing surfaces</i>)	22,0
2.	Besi tuang (<i>cast iron</i>)	71,0
3.	Timbunan tanah dipadatkan (<i>compacted sand, silt or clay</i>)	17,2

Tabel 5. Koefisien Situs F_{PGA}

Kelas Situs	PGA $\leq 0,1$	PGA = 0,2	PGA = 0,3	PGA = 0,4	PGA = 0,1
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9

Sumber: Badan Standardisasi Nasional (2012)

Data Geotekstil

Geotekstil memiliki sifat *elasto-plastic* dengan parameter pada **Tabel 6**. Data ini didapatkan dari PT. Tetrasa Geosinindo.

Tabel 6. Data *geotextile woven PET 100*

Parameter	Nilai	Satuan
Kuat tarik ijin MD (N_{p1})	55	kN/m
Kuat tarik ijin CMD (N_{p2})	28	kN/m
Kekakuan normal MD (EA_1)	1000	kN/m
Kekakuan normal CMD (EA_2)	500	kN/m

Data Cerucuk

Prestressed concrete pretension spun pile digunakan sebagai cerucuk d dari PT. Wijaya Karya Beton (Persero) Tbk. Parameter yang digunakan pada **Tabel 7**.

Tabel 7. Data cerucuk

Parameter	Nilai	Satuan
Diameter	0,3	m
Ketebalan	0,06	m
Luas	452,39	cm ²
Momen Inersia	34.607,78	cm ⁴
Modulus Elastisitas	33.892.182	kN/m ²
Berat Jenis Beton	24	kN/m ³

Besarnya *axial skin resistance* dan *base resistance* sebagai berikut.

1. Axial skin resistance

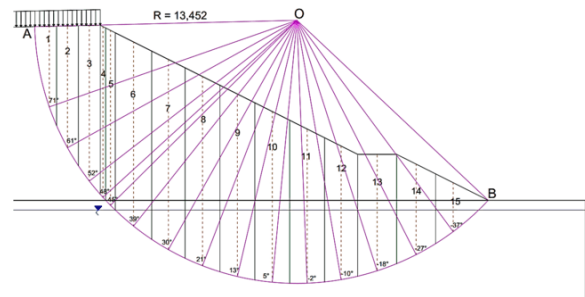
- Lapisan 1 dengan kedalaman 5 m
 $Q_{s1} = 1 \times 12,15 \times 0,94 = 11,55 \text{ kN/m}$
- Lapisan 2 dengan kedalaman 7,5 m
 $Q_{s2} = 1 \times 50,00 \times 0,94 = 47,12 \text{ kN/m}$
- Lapisan 3 dengan kedalaman 8 m
 $Q_{s3} = 1 \times 50,00 \times 0,94 = 47,12 \text{ kN/m}$
- Lapisan 4 dengan kedalaman 10 m
 $Q_{s4} = 2 \times 60,00 \times 0,94 = 113,10 \text{ kN/m}$

2. Base resistance

$$F_{max} = 40 \times 60,00 \times 0,045239 = 108,57 \text{ kN}$$

Stabilitas Timbunan pada Tanah Asli

Hasil *calculation* faktor keamanan dan penurunan konsolidasi menunjukkan bahwa kondisi timbunan pada masa konstruksi dan pasca konstruksi mengalami *collapse*.



Gambar 6. Irisan pada timbunan

Besarnya tahanan kelongsoran oleh komponen kohesi sebagai berikut.

$$\sum c_i a_i = 10 \times 9,81 + 12,25 \times 21,99 = 367,49 \text{ kN}$$

Besarnya komponen vertikal pada masa konstruksi tanpa beban gempa sebagai berikut.

$$\sum (N - U) \tan \varphi = 550,78 \text{ kN}$$

Besarnya komponen tangensial pada masa konstruksi sebagai berikut.

$$\sum W_{total} \sin \theta = 691,24 \text{ kN}$$

Jadi, *safety factor* timbunan pada tanah asli masa konstruksi tanpa beban gempa sebagai berikut.

$$SF = \frac{367,49 + 550,78}{691,24} = 1,328$$

Besarnya komponen vertikal pada pasca konstruksi tanpa beban gempa sebagai berikut.

$$\sum (N - U) \tan \varphi = 564,61 \text{ kN}$$

Besarnya komponen tangensial pada pasca konstruksi sebagai berikut.

$$\sum W_{total} \sin \theta = 735,05 \text{ kN}$$

Jadi, *safety factor* timbunan pada tanah asli pasca konstruksi tanpa beban gempa sebagai berikut.

$$SF = \frac{367,49 + 564,61}{735,05} = 1,268$$

Besarnya komponen vertikal pada masa konstruksi dengan beban gempa sebagai berikut.

$$\sum (N - U + Ne) \tan \varphi = 606,52 \text{ kN}$$

Besarnya komponen tangensial pada masa konstruksi sebagai berikut.

$$\sum W_{total} \sin \theta = 691,24 \text{ kN}$$

Besarnya komponen tangensial pada masa konstruksi dengan beban gempa sebagai berikut.

$$\sum Te = 419,67 \text{ kN}$$

Jadi, *safety factor* timbunan pada tanah asli masa konstruksi dengan beban gempa sebagai berikut.

$$SF = \frac{367,49 + 606,52}{691,24 + 419,67} = 0,877$$

Besarnya komponen vertikal pada masa konstruksi dengan beban gempa sebagai berikut.

$$\sum (N - U + Ne) \tan \phi = 624,93 \text{ kN}$$

Besarnya komponen tangensial pada masa konstruksi sebagai berikut.

$$\sum W_{total} \sin \theta = 735,05 \text{ kN}$$

Besarnya komponen tangensial pada masa konstruksi dengan beban gempa sebagai berikut.

$$\sum Te = 424,01 \text{ kN}$$

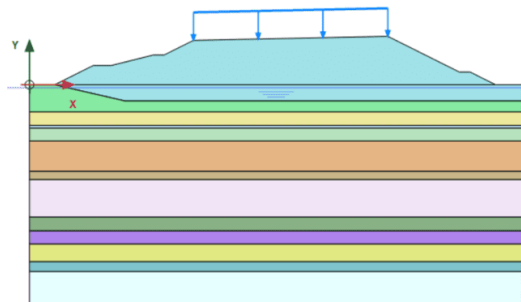
Jadi, *safety factor* timbunan pada tanah asli pasca konstruksi dengan beban gempa sebagai berikut.

$$SF = \frac{367,49 + 624,93}{735,05 + 424,01} = 0,856$$

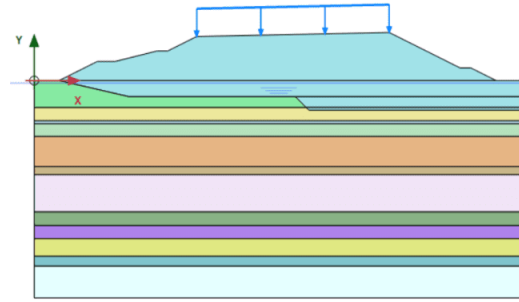
Oleh karena itu, dapat diketahui bahwa nilai *safety factor* timbunan pada tanah asli kurang dari 1,5 sehingga tidak aman.

Stabilitas Timbunan dengan Soil Replacement

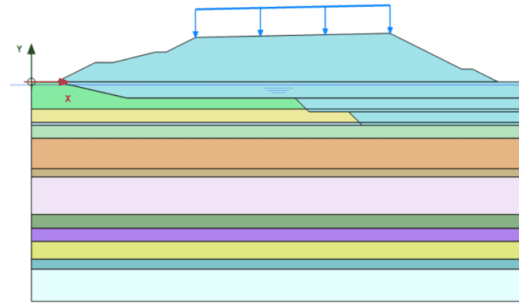
Analisis ini akan dilakukan dengan variasi ketebalan tanah pengganti sebesar 3 m, 5,5 m, dan 8 m.



Gambar 7. Pemodelan timbunan dengan soil replacement 3 m



Gambar 8. Pemodelan timbunan dengan soil replacement 5,5 m



Gambar 9. Pemodelan timbunan dengan soil replacement 8 m

Rekapitulasi nilai *safety factor* dan penurunan konsolidasi pada timbunan tanah asli menggunakan Plaxis 2D v20 dapat dilihat pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Nilai *safety factor* timbunan dengan soil replacement

Ketebalan Tanah Pengganti	Faktor Keamanan	
	Masa Konstruksi	Pasca Konstruksi
3 m	1,611	1,521
5,5 m	1,798	1,687
8 m	1,798	1,688

Tabel 9. Penurunan konsolidasi timbunan dengan soil replacement

Ketebalan Tanah Pengganti	Penurunan Konsolidasi U = 90% (m)	Waktu Konsolidasi U = 90% (hari)
	3 m	0,887
5,5 m	0,686	103,845
8 m	0,687	103,845

Perencanaan Geotekstil

Pada analisis stabilitas timbunan dengan geotekstil digunakan *geotextile woven PET 100*.

$$M_d = \frac{992,421}{0,856} = 1159,061 \text{ kNm}$$

Jadi, momen penahan tambahan yang dihasilkan sebagai berikut.

$$\Delta M_r = (1,5 - 0,856) \times 1159,061 = 746,169 \text{ kNm}$$

Selanjutnya, hitung tegangan horizontal tanah akibat beban dinamis.

$$\theta = \tan^{-1} 0,18 = 10,28^\circ$$

$$K_{AG} = \frac{\cos^2(30 - 10,28)}{\cos^2 10,28 \times \left(1 + \sqrt{\frac{\sin 30 \times \sin(30 - 10,28)}{\cos 10,28}}\right)}$$

$$= 0,647$$

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{30}{2}\right) = 0,333$$

$$\Delta K_{AG} = 0,647 - 0,333 = 0,314$$

$$\sigma_h = 0,314 \times 27,07 - 2 \times 10 \times \sqrt{0,314} + 0,314 \times 8,95 \times 16,79 = 44,46 \text{ kN/m}^2$$

Jadi, jarak vertikal antar lapisan geotekstil sebagai berikut.

$$S_v = \frac{28}{44,46 \times 1,5} = 0,41 \text{ m dipakai } 0,6 \text{ m}$$

Jumlah lapisan geotekstil yang dibutuhkan dapat dilihat pada **Tabel 10**.

Tabel 10. Rekapitulasi jumlah lapisan geotekstil yang dibutuhkan

Lapisan	Hi	Jumlah lapis	Ti	M _{geotekstil}	ΣM _{geotekstil}	Ket
1	8,95	1	9,20	254,40	254,40	NOT OK
2	8,35	1	8,60	237,82	492,22	NOT OK
3	7,75	1	8,00	221,24	713,46	NOT OK
4	7,15	1	7,40	204,65	918,11	OK
5	6,55	1	6,80	188,07	1106,18	OK
6	5,95	1	6,20	171,48	1277,66	OK
7	5,35	1	5,60	154,90	1432,56	OK
8	4,75	1	5,00	138,31	1570,88	OK
9	4,15	1	4,40	121,73	1692,61	OK
10	3,55	1	3,80	105,15	1797,75	OK
11	2,95	1	3,20	88,56	1886,31	OK
12	2,35	1	2,60	71,98	1958,29	OK
13	1,75	1	2,00	55,39	2013,69	OK

Panjang geotekstil di belakang bidang longsor dan panjang *overlapping* geotekstil dapat dilihat pada **Tabel 11**.

Tabel 11. Rekapitulasi panjang geotekstil di belakang bidang longsor dan panjang *overlapping* geotekstil

Lapisan	σ _v	t ₁	t ₂	Le	Le dipakai	Lo	Lo dipakai
1	150,27	96,76	50,83	0,35	1	0,13	1
2	140,20	90,94	90,94	0,28	1	0,14	1
3	130,12	85,13	85,13	0,30	1	0,15	1
4	120,05	79,31	79,31	0,33	1	0,16	1
5	109,97	73,49	73,49	0,35	1	0,17	1
6	99,90	67,68	67,68	0,38	1	0,18	1
7	89,83	61,86	61,86	0,42	1	0,20	1
8	79,75	56,04	56,04	0,46	1	0,22	1
9	69,68	50,23	50,23	0,52	1	0,25	1
10	59,60	44,41	44,41	0,58	1	0,28	1
11	49,53	38,60	38,60	0,67	1	0,32	1
12	39,46	32,78	32,78	0,79	1	0,38	1
13	29,38	26,96	26,96	0,96	1	0,46	1

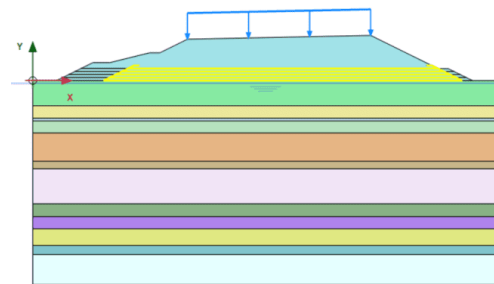
Panjang minimal geotekstil yang dipasang dapat dilihat pada **Tabel 12**.

Tabel 12. Panjang minimal geotekstil

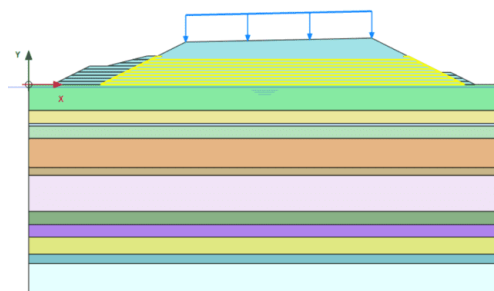
Lapisan	Jumlah lapis	Le	Ld	L
1	1	1	19,6	21,00
2	1	1	19,0	20,00
3	1	1	18,2	19,50
4	1	1	17,4	18,50
5	1	1	14,6	16,00
6	1	1	13,7	15,00
7	1	1	12,8	14,00
8	1	1	11,9	13,00
9	1	1,5	10,9	12,00
10	1	1,5	9,9	11,00
11	1	1,5	8,9	10,00
12	1	2	7,8	9,00
13	1	2	6,7	8,00

Stabilitas Timbunan dengan Geotekstil

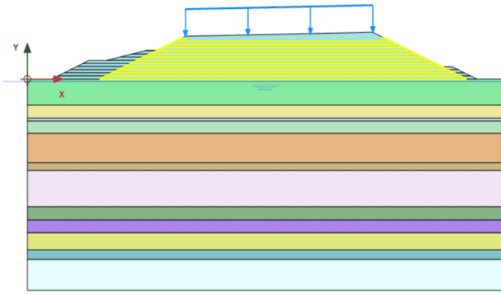
Geotekstil yang digunakan, yaitu *geotextile woven PET 100* dengan variasi lapisan geotekstil, yaitu 5 lapis, 9 lapis, dan 13 lapis.



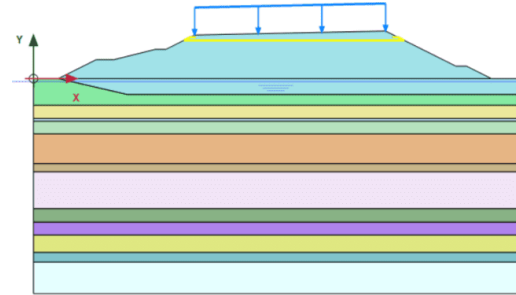
Gambar 10. Pemodelan timbunan dengan 5 lapis geotekstil



Gambar 11. Pemodelan timbunan dengan 9 lapis geotekstil



Gambar 12. Pemodelan timbunan dengan 13 lapis geotekstil

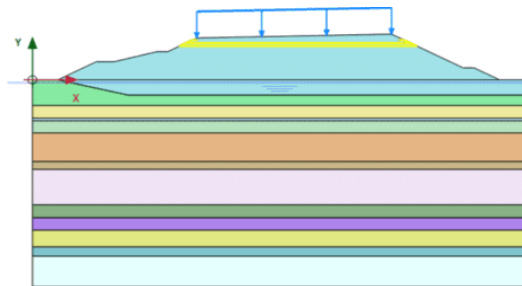


Gambar 13. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 3 m dan 1 lapis geotekstil

Rekapitulasi nilai *safety factor* dan penurunan konsolidasi pada timbunan dengan geotekstil menggunakan Plaxis 2D v20 dapat dilihat pada **Tabel 13** dan **Tabel 14**.

Tabel 13. Nilai *safety factor* timbunan dengan geotekstil

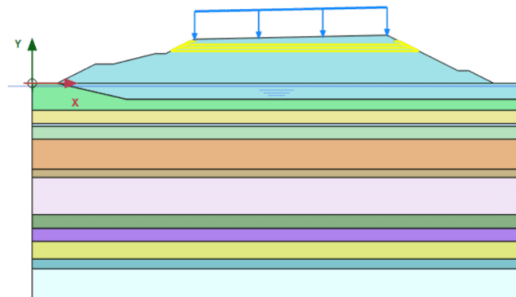
Jumlah Lapisan	Faktor Keamanan	
	Masa Konstruksi	Pasca Konstruksi
5	1,552	1,448
9	1,694	1,582
13	1,819	1,697



Gambar 14. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 3 m dan 2 lapis geotekstil

Tabel 14. Penurunan konsolidasi timbunan dengan geotekstil

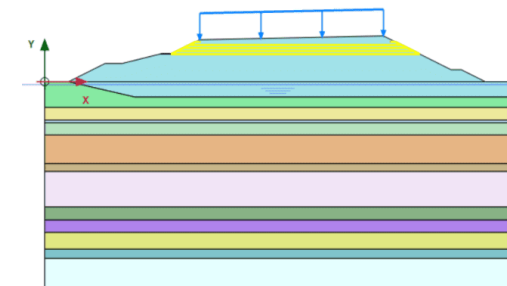
Jumlah Lapisan	Penurunan Konsolidasi U = 90% (m)	Waktu Konsolidasi U = 90% (hari)
5	1,295	103,848
9	1,289	105,486
13	1,300	106,233



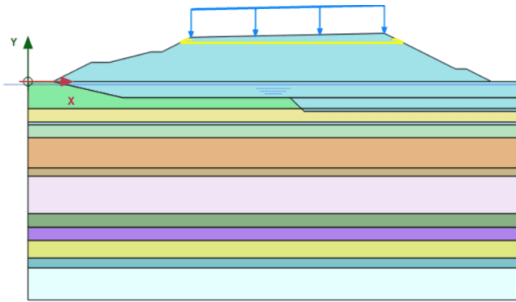
Gambar 15. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 3 m dan 3 lapis geotekstil

Stabilitas Timbunan dengan *Soil Replacement* dan Geotekstil

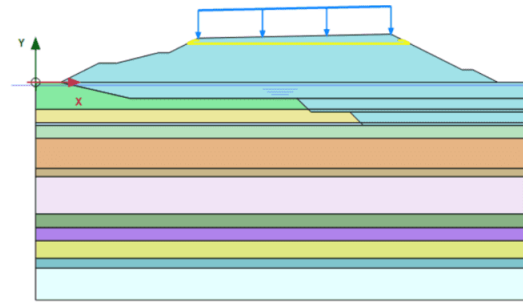
Analisis ini akan dilakukan dengan variasi ketebalan tanah pengganti sebesar 3 m, 5,5 m, dan 8 m dikombinasikan dengan *geotextile woven PET 100* dengan variasi lapisan geotekstil, yaitu 1 hingga 4 lapis.



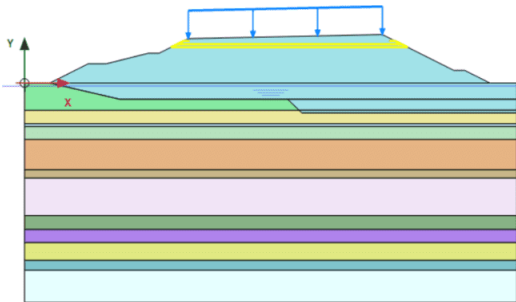
Gambar 16. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 3 m dan 4 lapis geotekstil



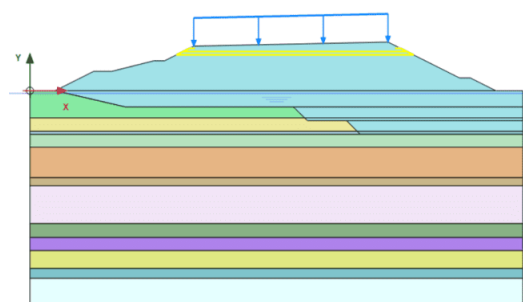
Gambar 17. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 5,5 m dan 1 lapis geotekstil



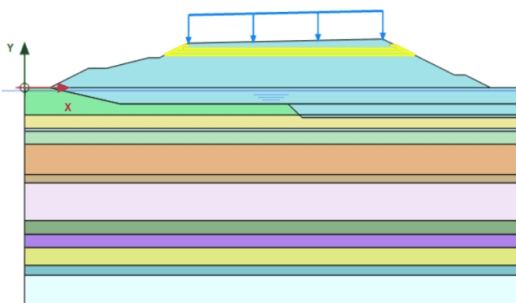
Gambar 21. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 8 m dan 1 lapis geotekstil



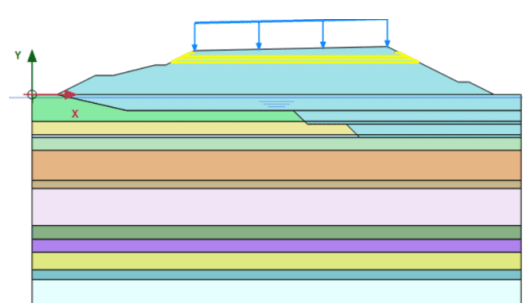
Gambar 18. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 5,5 m dan 2 lapis geotekstil



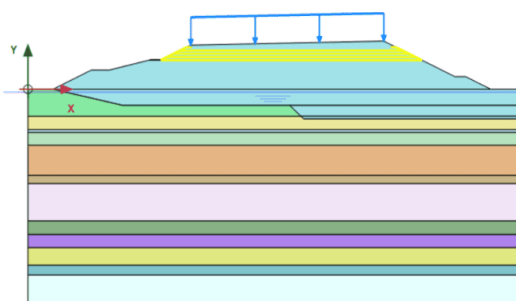
Gambar 22. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 8 m dan 2 lapis geotekstil



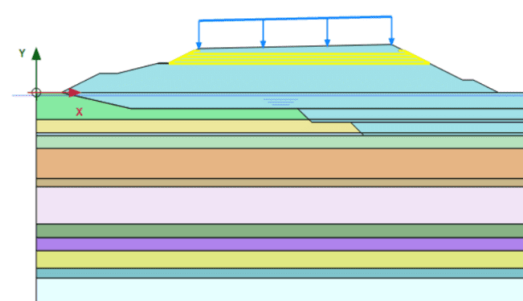
Gambar 19. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 5,5 m dan 3 lapis geotekstil



Gambar 23. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 8 m dan 3 lapis geotekstil



Gambar 20. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 5,5 m dan 4 lapis geotekstil



Gambar 24. Pemodelan timbunan dengan *soil replacement* 8 m dan 4 lapis geotekstil

Rekapitulasi nilai *safety factor* dan penurunan konsolidasi timbunan dengan *soil replacement* dan geotekstil menggunakan Plaxis 2D v20 dapat dilihat pada **Tabel 15** dan **Tabel 16**.

Tabel 15. Nilai *safety factor* timbunan dengan *soil replacement* dan geotekstil

Ketebalan Tanah Pengganti	Jumlah Lapisan	Faktor Keamanan	
		Masa Konstruksi	Pasca Konstruksi
3 m	1	1,648	1,555
	2	1,685	1,588
	3	1,717	1,619
	4	1,750	1,652
5,5 m	1	1,835	1,717
	2	1,870	1,750
	3	1,906	1,784
	4	1,940	1,816
8 m	1	1,837	1,716
	2	1,872	1,751
	3	1,907	1,785
	4	1,943	1,817

Tabel 16. Penurunan konsolidasi timbunan dengan *soil replacement* dan geotekstil

Ketebalan Tanah Pengganti	Jumlah Lapisan	Penurunan Konsolidasi	Waktu Konsolidasi
		U = 90% (m)	U = 90% (hari)
3 m	1	0,887	105,392
	2	0,887	106,061
	3	0,887	109,450
	4	0,886	113,771
5,5 m	1	0,688	106,974
	2	0,687	104,661
	3	0,687	103,795
	4	0,687	104,651
8 m	1	0,688	106,974
	2	0,688	107,995
	3	0,688	108,094
	4	0,687	104,673

Perencanaan Cerucuk

Pada analisis stabilitas timbunan dengan cerucuk digunakan *prestressed concrete pretension spun pile*.

$$q_u = 0,33 \text{ tsf}$$

$$f = 1,5 \text{ t/ft}^3 = 0,05 \text{ kg/cm}^3 \text{ (pada Gambar 2)}$$

$$f'c = 52 \text{ MPa}$$

$$I = 34.607,78 \text{ cm}^4$$

$$E = 4700\sqrt{f'c} = 4700\sqrt{52} = 33.892 \text{ MPa}$$

$$= 345.605 \text{ kg/cm}^2$$

$$= 33.892.182 \text{ kN/m}^2$$

$$T = \left(\frac{EI}{f}\right)^{\frac{1}{5}} = \left(\frac{345.605 \times 34.607,78}{0,05}\right)^{\frac{1}{5}} = 186,527 \text{ cm}$$

Momen lentur yang bekerja pada cerucuk $M_{p_{\max}(1\text{cerucuk})} = 250.000 \text{ kg.cm}$
 Panjang di atas bidang longsor $L_a = 3,743 \text{ m}$
 Panjang di bawah bidang longsor

$$L_b = 6,257 \text{ m}$$

Panjang cerucuk = 10 m

$$\frac{L_b}{T} = \frac{6,257}{1,41361} = 3,35$$

Nilai $F_M = 1$. Jadi, gaya horizontal yang diterima 1 cerucuk sebagai berikut.

$$P_{\max(1\text{cerucuk})} = \frac{250.000}{186,527 \times 1} = 1340,29 \text{ kg}$$

$$= 13,14 \text{ kN}$$

Faktor keamanan direncanakan sebesar 1,5. Jadi, momen penahan yang dipikul cerucuk sebagai berikut.

$$\Delta M_r = (1,5 - 0,856) \times 1159,061 = 746,169 \text{ kNm}$$

$$n = \frac{746,169}{13,452 \times 13,14} = 4,220$$

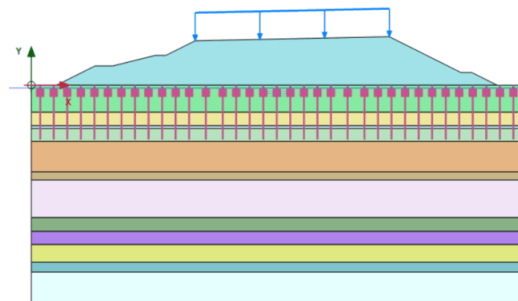
Jadi, dipakai 5 tiang cerucuk.

Panjang bidang longsor $\ell = 19,622 \text{ m}$

Jarak antar cerucuk pada penampang jalan

$$S = \frac{\ell}{n} = \frac{19,622}{12} = 3,924 \text{ m dipakai } 3,5 \text{ m}$$

Stabilitas Timbunan dengan Cerucuk



Gambar 25. Pemodelan timbunan dengan cerucuk

Nilai *safety factor* timbunan dengan cerucuk pada masa konstruksi sebesar 2,045 dan pasca konstruksi sebesar 1,885. Nilai penurunan konsolidasi sebesar 0,873 m dan terjadi selama 96,078 hari.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari analisis, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Hasil analisis stabilitas timbunan menggunakan Plaxis 2D didapatkan bahwa tanah asli tidak mampu menahan timbunan.
 2. Hanya metode geotekstil dengan variasi 5 lapis geotekstil pada pasca konstruksi yang tidak aman.
 3. Pada metode *soil replacement* dan *soil replacement* dengan geotekstil didapatkan besarnya faktor keamanan yang relatif sama antara 5,5 m dan 8 m ketebalan tanah pengganti. Oleh karena itu, ketebalan tanah pengganti memiliki titik optimum dimana penambahan ketebalan tanah pengganti tidak linear dengan peningkatan faktor keamanan. Hal ini disebabkan oleh karakteristik tanah pengganti dan tanah asli.
 4. Besarnya faktor keamanan meningkat dengan penambahan jumlah lapisan geotekstil pada timbunan karena geotekstil dapat menahan tegangan pada tanah. Penurunan konsolidasi terbesar terjadi pada timbunan dengan geotekstil. Penambahan lapis geotekstil tidak mempengaruhi penurunan dan waktu konsolidasi karena perubahan yang terjadi tidak secara signifikan.
 5. Faktor keamanan dengan metode *soil replacement* meningkat apabila ditambahkan dengan geotekstil.
 6. Faktor keamanan terbesar terjadi pada timbunan dengan cerucuk sepanjang 10 m. Waktu konsolidasi dengan cerucuk lebih cepat dibandingkan dengan metode *soil replacement*, geotekstil, dan kombinasi *soil replacement* dengan geotekstil.
- [3] Badan Standardisasi Nasional. 2017. SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
 - [4] Panguriseng, D. 2017. Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah. Makassar: Pustaka AQ.
 - [5] Ali, N. A. 2016. Controlling Collapsibility Potential by Partial Soil Replacement. Global Journal of Researches in Engineering: E Civil And Structural Engineering, 16(1), 7-19.
 - [6] Elhamid, M. A., Abdelaziz, T., & Bassioni, H. 2021. Factors Affecting The Thickness Of Replacement Layer On Medium Clay. ASEAN Engineering Journal, 11(4), 232-245.
 - [7] Departemen Pekerjaan Umum. 2009. Pedoman Konstruksi dan Bangunan No. 003/BM/2009: Perencanaan dan Pelaksanaan perkuatan tanah dengan geosintetik. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
 - [8] Hamzah, H. J., & Wulandari, S. 2022 Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil, 6(1), 33-44.
 - [9] Rusdiansyah. 2016. Asumsi Sistem Cerucuk Sebagai Alternatif Solusi Dalam Penanganan Kelongsoran Lereng Jalan Diatas Tanah Lunak. *Prosiding Seminar Nasional Geoteknik 2016*. Banjarmasin.
 - [10] Ayu, S. T., Hamdi, & Sudarmadji. 2013. Pengaruh Penggunaan Cerucuk Terhadap Daya Dukung Tanah Timbunan Pada Lapis Tanah Dasar (Studi Kasus Jalan Soekarno-Hatta Palembang). Pilar Jurnal Teknik Sipil, 8(1).
 - [11] Naval Facilities Engineering Command. 1982. NAVFAC Design Manual 7.2: Foundations and Earth Structures. Washington D.C.: U.S. Government.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hardiyatmo, H. C. 2003. Mekanika Tanah II. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- [2] Plaxis. 2020. CONNECT Edition V20.04 PLAXIS 2D - Tutorial Manual. Bentley.

- [12] Budhu, M. 2010. Soil Mechanics and Foundations. United States of America: John Wiley & Sons.
- [13] Badan Standardisasi Nasional. 2016. SNI 1725:2016 Pembebanan untuk jembatan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [14] Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah. 2002. Panduan Geoteknik 4 Timbunan Jalan Pada Tanah Lunak.
- [15] Badan Standardisasi Nasional. 2012. SNI 1726:2012 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Lampiran Tabel

Tabel 4. Parameter Tanah

Parameter	Satuan	Timbunan	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5
		Silt Loam	Clay Loam	Clay Loam	Silty Clay	Sand	Clay
Model		Mohr Coulumb					
Type		Drained	Undrained A				
Data Set		USDA					
γ_{unsat}	kN/m ³	16,79	15,30	19,00	20,00	19,03	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	18,12	15,75	20,00	22,00	20,24	22,00
E	kN/m ²	20.000	1.008	16.000	15.000	50.000	15.500
v		0,3	0,3	0,3	0,3	0,35	0,3
c	kN/m ²	10,00	12,25	50	50	0,06	50
ϕ	°	30,00	14,40	28,00	27,00	29,27	28,00
ψ	°	0	0	0	0	0	0
k_x	m/hari	0,864	0,648	0,648	0,004752	8,64	0,04752
k_y	m/hari	0,864	0,648	0,648	0,004752	8,64	0,04752

Parameter	Satuan	Lapisan 6	Lapisan 7	Lapisan 8	Lapisan 9	Lapisan 10	Lapisan 11	Lapisan 12
		Sand	Clay	Silty Clay	Silty Clay Loam	Loam	Silty Clay Loam	Silty Clay
Model		Mohr Coulumb						
Type		Undrained A						
Data Set		USDA						
γ_{unsat}	kN/m ³	16,00	16,68	16,00	17,00	19,00	17,00	18,00
γ_{sat}	kN/m ³	18,00	17,07	17,00	18,00	20,00	18,00	19,00
E	kN/m ²	10.000	2.733	5.000	5.500	16.500	6.500	8.000
v		0,35	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
c	kN/m ²	0,05	26,67	27	27	50	27	29
ϕ	°	29,00	20,45	21,00	22,00	28,00	22,00	23,00
ψ	°	0	0	0	0	0	0	0
k_x	m/hari	4,752	0,04752	0,004752	0,1676	0,7344	0,1676	0,004752
k_y	m/hari	4,752	0,04752	0,004752	0,1676	0,7344	0,1676	0,004752

Tabel 17. Rekapitulasi hasil perhitungan faktor keamanan dengan metode Fellenius

Metode	Faktor Keamanan	
	Masa Konstruksi	Pasca Konstruksi
Fellenius		

Tanpa Beban Gempa	Dengan Beban Gempa	Tanpa Beban Gempa	Dengan Beban Gempa
1,328	1,268	0,877	0,856

Tabel 18. Rekapitulasi hasil perhitungan faktor keamanan dan penurunan konsolidasi dengan perbaikan dan perkuatan tanah

	Metode		Faktor Keamanan		Penurunan Konsolidasi U = 90% (m)	Waktu Konsolidasi U = 90% (hari)	
	Ketebalan Tanah Pengganti	Jumlah Lapisan	Masa Konstruksi	Pasca Konstruksi			
<i>Soil Replacement</i>	3 m		1,611	1,521	0,887	106,653	
	5,5 m		1,798	1,687	0,686	103,845	
	8 m		1,798	1,688	0,687	103,845	
Geotekstil		5	1,552	1,448	1,295	103,848	
		9	1,694	1,582	1,289	105,486	
		13	1,819	1,697	1,300	106,233	
<i>Soil Replacement dan Geotekstil</i>	3 m	1	1,648	1,555	0,887	105,392	
		2	1,685	1,588	0,887	106,061	
		3	1,717	1,619	0,887	109,450	
		4	1,750	1,652	0,886	113,771	
	5,5 m	1	1,835	1,717	0,688	106,974	
		2	1,870	1,750	0,687	104,661	
		3	1,906	1,784	0,687	103,795	
		4	1,940	1,816	0,687	104,651	
	8 m	1	1,837	1,716	0,688	106,974	
		2	1,872	1,751	0,688	107,995	
		3	1,907	1,785	0,688	108,094	
		4	1,943	1,817	0,687	104,673	
	Cerucuk			Masa Konstruksi	Pasca Konstruksi	Penurunan Konsolidasi U = 90% (m)	Waktu Konsolidasi U = 90% (hari)
				2,045	1,885	0,873	96,078