

PERBANDINGAN ALTERNATIF PENANGANAN TANAH PASCA LONGSOR PADA TIMBUNAN JALAN TOL

Bartholomeus¹, Humisar Pasaribu², Fraederick Daniel Purba³

^{1,2,3}Fakultas Teknik, Universitas HKBP Nommensen Medan
email : bartholomeus@uhn.ac.id¹, humisar.pasaribu@uhn.ac.id²,
fraederick.purba@student.uhn.ac.id³

ABSTRAK

Proyek pembangunan jalan tol Tebing Tinggi-Indrapura di STA 103+350 mengalami kendala dimana medan di lokasi pembangunan sebagian besar terdiri dari tanah lunak dan juga di dapat bahwa daerah tersebut merupakan daerah cekungan yang merupakan titik terendah. Permasalahan geoteknik yang muncul di lokasi jalan tol adalah terjadinya kelongsoran. Tanah lunak mempunyai pengaruh negatif terhadap konstruksi jalan raya karena menyebabkan terjadinya penurunan muka tanah (*settlement*) akibat konsolidasi yang akan membuat konstruksi perkerasan jalan di atasnya menjadi tidak stabil dan merusak lapisan perkerasan. Permasalahan lain yang terkait dengan tanah lunak adalah daya dukung tanah yang rendah. Konsolidasi adalah penurunan volume secara bertahap pada tanah jenuh sempurna yang mempunyai permeabilitas buruk akibat keluarnya sebagian air pori. Studi ini mengkaji tentang bagaimana tanah longsor dikendalikan di STA 103+350 pada ruas tol Tebing Tinggi-Indrapura dengan perkuatan dimana perkuatan yang digunakan adalah dengan menggunakan perkuatan *minipile* dengan tambahan LTP. LTP yang digunakan yaitu geotekstil dan pelat beton bertulang (*slab on pile*). Metode yang digunakan adalah metode *finite element* pada *software* geoteknik guna mendapatkan nilai *Safety Factor* (SF). Berdasarkan hasil analisa dari *software* geoteknik, didapatkan nilai SF pada masa operasional setelah dilakukan perkuatan dengan alternatif 1 (*minipile* tanpa LTP), alternatif 2 (*minipile* + LTP geotekstil) dan alternatif 3 (*minipile* + LTP *slab on pile*), masing-masing sebesar SF = 1,7324; SF = 1,7353 dan SF = 1,7432. *Minipile* sangat efektif bila diletakkan pada lapisan tanah keras atau melewati tanah lempung lunak.

Kata Kunci : longsor, *minipile*, LTP, *finite element*, *safety factor*

ABSTRACT

The Tebing Tinggi-Indrapura toll road construction project at STA 103+350 is experiencing problems where the terrain at the construction site consists mostly of soft soil and it is also found that the area is a basin area which is the lowest point. The geotechnical problem that arises at the toll road site is the occurrence of landslides. Soft soil has a negative effect on highway construction because it causes settlement due the consolidation, which will make the pavement construction unstable and damage the pavement layer. Another problem associated with soft soils is their low bearing capacity. Consolidation is the gradual decrease in volume of a fully saturated soil that has poor permeability due to the escape of some pore water. This study examines how landslides are controlled at STA 103+350 on the Tebing Tinggi-Indrapura toll road with reinforcement where the reinoforcement used is using minipile reinforcement with additional LTP. The LTP used is geotextile and reinforced concrete slab (slab on pile). The method used is the finite element method in geotechnical software to obtain the Safety Factor (SF) value. Based on the analysis results from geotechnical software, the SF value during the operational period after reinforcement with alternative 1 (minipile without LTP), alternative 2 (minipile + LTP geotextile) and alternative 3 (minipile + LTP slab on pile) are SF = 1.7324; SF = 1.7353 and SF = 1.7432, respectively. Minipiles are very effective when placed in hard soil layers or over soft clay soils.

Keywords : landslide, minipile, LTP, finite element, safety factor

PENDAHULUAN

Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari butiran yang berukuran sangat kecil. Tanah lunak memiliki tekanan kuat geser yang rendah, kemampuan kompresibilitas yang tinggi dan daya dukung yang rendah dan mempunyai koefisien permeabilitas yang sangat kecil. dalam studi kasus ini, penyebab utama terjadinya longsor adalah karena adanya akumulasi air yang terperangkap di bagian dasar timbunan. Hal ini menyebabkan tanah di sekitar timbunan bersifat lunak sehingga membuat stabilitas timbunan di area tersebut menjadi terganggu.

Pada saat ini banyak alternatif penanganan yang dapat digunakan dalam menghindari kelongsoran tanah. Di dalam penulisan karya ilmiah ini, penulis menggunakan alternatif perkuatan dengan *Mini Pile* ditambahkan dengan LTP (*Load Transfer Platform*) dan tanpa LTP (*Load Transfer Platform*). Penanganan LTP terdiri dari LTP dengan geotekstil + granular dan *slab on pile*.

Minipile adalah perkuatan yang biasanya digunakan dalam perbaikan stabilitas timbunan di jalan tol. Sistem pemasangan tiang *minipile* sama dengan sistem pemasangan tiang pancang pada umumnya. Perbedaan dari *minipile* dengan tiang pancang yaitu bentuk dari kedua tiang tersebut. LTP (*Load Transfer Platform*) akan digunakan sebagai penanganan stabilitas timbunan di dalam penelitian ini yang akan digabungkan dengan perkuatan *minipile*. LTP yang digunakan berupa geotekstil + granular (misalnya pasir, kerikil atau batu pecah) serta pelat beton bertulang (*slab on pile*).

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah :

- a) Untuk mengetahui perbandingan stabilitas timbunan pada kondisi pelaksanaan konstruksi dan kondisi pada saat operasional
- b) Untuk mengetahui deformasi pada kondisi pelaksanaan konstruksi dan kondisi pada saat operasional
- c) Untuk mengetahui tingkat penurunan muka tanah (*settlement*) pada kondisi operasional.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Sifat Fisik dan Mekanik Tanah

Zahera, et. al (2019) menyatakan bahwa kestabilan tanah dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan mekanik batuan yang membentuknya, yang meliputi penjelasan tentang sifat-sifatnya. Penjelasan dari berbagai sifat fisik tersebut adalah sebagai berikut :

- a) Bobot isi adalah rasio antara berat material dan volume material yang diukur dalam satuan berat per volume;
- b) Porositas adalah rasio antara volume ruang pori dan volume butiran-butiran itu sendiri;

- c) Derajat kejenuhan suatu tanah diukur melalui perbandingan antara volume air pori dengan total volume isi pori;
- d) Sudut patah yang dihasilkan oleh abtuan yang terkena tegangan lebih besar dari tegangan gesernya disebut sudut geser internal;
- e) Kohesi adalah gaya tarik menarik antar butiran batuan, atau kekompakan diukur dalam berat per satuan luas.

2. Parameter Tanah

a. Modulus Young

Triaxial Test dapat digunakan untuk menentukan Modulus Young. Suatu pengukuran elastisitas tanah yang menggambarkan hubungan antara tegangan dan regangan. Berdasarkan jenis tanah dan data sondir, nilai modulus elastisitas (E) dapat ditentukan secara empiris, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

Macam Tanah	E (kN/m ²)	Macam Tanah	E (kN/m ²)
Lempung		Pasir dan Kerikil	
Sangat lunak	300 – 3.000	Padat	80.000 – 200.000
Lunak	2.000 – 40.000	Tidak padat	50.000 – 140.000
Sedang	4.500 – 9.000	Lanau	2.000 – 20.000
Keras	7.000 – 20.000	Loess	15.000 – 60.000
Berpasir	30.000 – 42.500	Cadas	140.000 – 1.400.000
Pasir			
Berlanau	5.000 – 20.000		
Tidak padat	10.000 – 25.000		
Padat	50.000 – 100.000		

(Sumber : *Mekanika Tanah 2, 2005*)

b. Poisson Ratio

Poisson Ratio adalah perbandingan antara kompresi poros dan regangan permukaan lateral, yang bisa ditentukan berdasarkan jenis tanah, seperti yang dijabarkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hubungan antara Jenis Tanah dan Poisson Ratio

Macam Tanah	Poisson Ratio (μ)
Lempung jenuh	0,40 – 0,50
Lempung tak jenuh	0,10 – 0,30
Lempung berpasir	0,20 – 0,30
Lanau	0,30 – 0,35
Pasir padat	0,20 – 0,40
Pasir kasar (angka pori, $e = 0,40 - 0,70$)	0,15
Pasir halus (angka pori, $e = 0,40 - 0,70$)	0,25
Batu	0,10 – 0,40
Loess	0,10 – 0,30

(Sumber : *Mekanika Tanah 2, 1994*)

c. Sudut Geser Dalam (\emptyset)

Sudut yang tercipta dalam tanah akibat interaksi antara tegangan normal dan tegangan geser dikenal sebagai sudut geser internal (\emptyset). Tabel 3 memberikan penjelasan mengenai hubungan antara sudut geser dalam dengan jenis tanah.

Tabel 3. Hubungan antara Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah

Jenis Tanah	Sudut Geser Dalam (\emptyset)
Kerikil kepasiran	35° - 40°
Kerikil kerakal	35° - 40°
Pasir padat	35° - 40°
Pasir lepas	30°
Lempung kelanauan	25° - 30°
Lempung	20° - 25°

(Sumber : DAS, 1985)

d. Kohesi (c)

Gaya kohesif yang menyatukan partikel-partikel tanah disebut kohesi. Ukuran kekuatan geser tanah yang disebut kohesivitas menunjukkan seberapa tahan tanah terhadap deformasi lateral yang disebabkan oleh tegangan tanah. Nilai kohesi yang didapatkan dari pengujian *Direct Sheer Test* atau ditentukan dari data sondir (qc) dengan persamaan sebagai berikut.

$$Kohesi (c) \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = \frac{qc (kg/cm^2)}{20} \quad (1)$$

e. Permeabilitas (k)

Permeabilitas tanah merujuk pada kemampuan tanah untuk memungkinkan air melewati rongga atau pori-porinya. Rentang nilai koefisien permeabilitas dapat ditemukan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hubungan antara Permeabilitas dengan Jenis Tanah

Jenis Tanah	Nilai k (cm/detik)
Kerikil sedang kasar	$>10^{-1}$
Kerikil halus-kasar	$10^{-1} - 10^{-3}$
Pasir halus, pasir lanau	$10^{-3} - 10^{-5}$
Lanau, lanau lempung, lempung berlanau	$10^{-4} - 10^{-6}$
Lempung gemuk	$< 10^{-7}$

(Sumber : DAS, 1985)

f. Kadar Air Tanah

Kadar air tanah mengacu pada jumlah volume air yang ada di dalam tanah, yang diukur sebagai perbandingan antara massa tanah dan berat air yang terkandung di

dalamnya. Hubungan antara kadar air tanah dan jenis tanah dijabarkan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Hubungan antara Kadar Air dengan Jenis Tanah

<i>Soil Texture</i>	<i>Saturated Water Content</i>	<i>Saturated Conductivity (cm/jam)</i>
<i>Sand</i>	0,43	29,7
<i>Loamy sand</i>	0,41	14,6
<i>Sandy loam</i>	0,41	4,42
<i>Loam</i>	0,43	1,04
<i>Silt</i>	0,46	0,25
<i>Silt loam</i>	0,45	0,45
<i>Sady clay loam</i>	0,39	1,31
<i>Clay loam</i>	0,41	0,26
<i>Silty clay loam</i>	0,43	0,07
<i>Sandy clay</i>	0,38	0,12
<i>Silty clay</i>	0,36	0,02
<i>Clay</i>	0,38	0,02

(Sumber : Alves, Leij & Genuchten, 1995)

3. Komposisi Tanah

a. Angka Pori

Menurut Lahnan (2014), jumlah ruang kosong atau pori-pori tanah, dalam kaitannya dengan ruang pada ditunjukkan dengan rasio rongga. Setelahnya air atau partikel kotoran lebih kecil akan mengisi pori-pori tersebut. Metrik ini juga dikenal sebagai rasio rongga (e) merupakan hubungan volume tanah yang banyak digunakan dan didefenisikan sebagai rasio volume pori (V_v) terhadap volume butiran padat (V_s).

$$\text{Angka pori (e)} = \frac{V_v}{V_s} \quad (2)$$

b. Porositas

Porositas yang juga dikenal dengan *porosity* adalah rasio antara volume pori (V_v) dan total volume tanah (V). Angka ini mencerminkan proporsi dari volume pori yang dapat diukur dalam bentuk persentase (%).

$$n = \frac{V_v}{V} \text{ atau } e = \frac{n}{1 - n} \quad (3)$$

c. Kadar Air

Berat air (W_w) dibagi dengan berat partikel padat (W_s) dalam volume tanah yang diteliti disebut kadar air (w). selain mengevaluasi jumlah pori tanah, porositas, tingkat kejenuhan dan berat jenis, uji laboratorium dapat digunakan untuk menentukan jumlah air dalam tanah.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (4)$$

Bobot tanah dalam satuan per volume disebut juga dengan berat volume atau unit weight (γ). Jadi,

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (5)$$

d. Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan (S), sering dinyatakan dalam persentase, dimana dalam pengertiannya yaitu rasio antara volume air (V_w) dan volume pori (V_v).

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (6)$$

e. Berat Volume Basah

Berat volume basah, juga dikenal sebagai *moist unit weight* (γ_w), adalah nilai yang menunjukkan berat tanah basah per satuan volume.

$$\gamma_w = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} \quad (7)$$

Dapat juga dinyatakan dalam berat butiran padat, kadar air dan volume total.

$$\gamma_w = \frac{W_s (1 + W)}{V} \quad (8)$$

f. Berat Volume Kering

Berat volume kering juga dikenal sebagai *dry unit weight* (γ_d), adalah rasio dari berat tanah kering per satuan volume tanah. Hasil ini diperoleh dari *soil test* dalam kondisi kering.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (9)$$

Atau dapat berfungsi sebagai keterkaitan antara berat volume, berat volume kering dan kadar air.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} \quad (10)$$

4. Daya Dukung Tanah

Menurut Najooan dan Tarbiyatno (2020) dalam Dara & Rahmadani (2022), daya dukung tanah merujuk pada kemampuan tanah untuk menopang beban struktural tanpa mengalami kegagalan geser atau penurunan yang signifikan.

Menghitung daya dukung tanah penting dalam menetapkan kekuatan yang diperlukan untuk pondasi struktural. Ini diperlukan untuk memperkirakan kemampuan tanah dalam menopang beban tertentu. Nilai maksimum didefinisikan oleh titik dimana kegagalan menjadi mungkin. Sebelum memilih jenis pondasi, perlu ditetapkan kekuatan yang diizinkan (q_a) yang dihitung dari hasil bagi antara kekuatan ultimit (Q_{ult}) dan faktor keamanan ($SF = 3$).

$$q_a = \frac{Q_{ult}}{FK} \quad (11)$$

dimana :

- q_a = Daya dukung izin (ton)
- Q_{ult} = Daya dukung ultimate (t/m^2)
- SF = *Safety Factor*

5. Analisis Stabilitas Timbunan

Faktor keamanan ditetapkan dengan mempertimbangkan tegangan geser rata-rata di sepanjang bidang potensial kelongsoran dan kekuatan geser rata-rata tanah di sepanjang permukaan kelongsoran. Faktor keamanan (SF) adalah perbandingan antara gaya yang menahan dengan gaya yang menyebabkan pergerakan.

$$SF = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (12)$$

dimana :

- τ_f = Tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah (kN/m^2)
- τ_d = Tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor (kN/m^2)

Menurut Teori *Mohr-Coulumb*, tahanan geser (τ) yang dapat dikerahkan oleh tanah, sepanjang bidang longsornya dinyatakan oleh :

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (13)$$

dimana :

- c = Kohesi (kN/m^2)
- σ = Tegangan normal (kN/m^2)
- φ = Sudut geser dalam tanah ($^\circ$)

Dengan cara yang sama, dapat dituliskan persamaan tegangan geser yang terjadi (τ_d) akibat beban tanah dan beban-beban lain pada bidang longsornya adalah :

$$\tau_d = cd + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d \quad (14)$$

dimana :

- cd = Kohesi (kN/m^2)
- φ_d = Sudut geser dalam yang bekerja sepanjang bidang longsor ($^\circ$)

Menurut penjelasan dalam buku Bowles J. E. (1989), informasi mengenai kondisi lereng berdasarkan faktor keamanan/*Safety Factor* (SF) dijelaskan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Faktor Keamanan/*Safety Factor* (SF) Lereng

Faktor Keamanan	Status Lereng	Intensitas Longsor
SF < 1,07	Lereng tidak stabil	Longsor sering terjadi

Faktor Keamanan	Status Lereng	Intensitas Longsor
$1,07 \geq SF \geq 1,25$	Lereng kritis	Longsor pernah terjadi
$SF \geq 1,25$	Lereng stabil	Longsor jarang terjadi

(Sumber : Bowles J. E., 1989)

Lereng yang tidak stabil adalah lereng yang cenderung mengalami longsor secara reguler, dengan nilai faktor keamanan (SF) di bawah 1,07. Lereng kritis merujuk pada lereng yang telah mengalami longsor sebelumnya, yang ditunjukkan oleh faktor keamanan (SF) berkisar antara 1,07 hingga 1,25. Sementara itu, lereng yang stabil merupakan lereng yang jarang mengalami longsor dan dianggap aman, dengan nilai faktor keamanan (SF) melebihi 1,25.

METODE PENELITIAN

1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di jalan tol ruas Tebing Tinggi-Indrapura tepatnya pada STA 103+350 yang mengalami kelongsoran setelah dilakukan penimbunan yang dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

(Sumber : Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019)

2. Kriteria Desain

Kriteria desain atau acuan yang digunakan dalam tinjauan penurunan seperti yang dijabarkan pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Kriteria Desain Geoteknik

Tinjauan	Kriteria Desain	Keterangan	Sumber
Penurunan total	Min. 100 mm	Penurunan mutlak setelah pelaksanaan perkerasan	Manual Desain Perkerasan Jalan 2017
Kecepatan penurunan	< 20 mm/tahun	Penurunan yang terjadi selama pelaksanaan adalah penurunan yang terjadi sebelum perkerasan jalan dilaksanakan	Pedoman Kimpraswil No. Pt-T-10-2002-B

Tinjauan	Kriteria Desain	Keterangan	Sumber
Stabilitas timbunan kondisi statik	Min. 1,5		SNI 8460:2017 KOMTEK
Stabilitas timbunan kondisi gempa	Min. 1,1		SNI 8460:2017 KOMTEK

(Sumber : *Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019*)

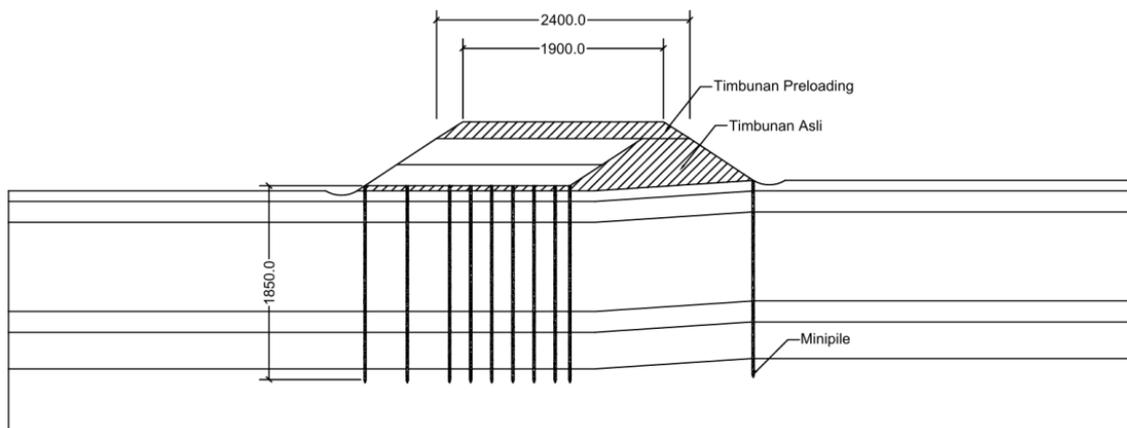
3. Pemodelan Dengan *Minipile* Tanpa *Load Transfer Platform (LTP)*

Minipile yang digunakan adalah *minipile* dengan ukuran 20 cm x 20 cm dengan kedalaman tiang *minipile* adalah – 18 m. Spasi yang dibutuhkan di badan timbunan adalah sebesar 2 m dan untuk di kaki timbunan menggunakan 4 m.

Tabel 8. Kriteria Desain Geoteknik

<i>Minipile</i>	
<i>Plate thickness (b)</i>	: 0,20 m
<i>Concrete quality (f'c)</i>	: 41,50 MPa
A ₂	: 0,2 m ²
E ₂	: 6055526 KPa
I ₂	: 0,000666667 m ⁴
EA	: 1211105 kN/m
EI	: 4037,02 kN m ² /m
w	: 4,8 kNm/m
v	: 0,20

(Sumber : *Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019*)

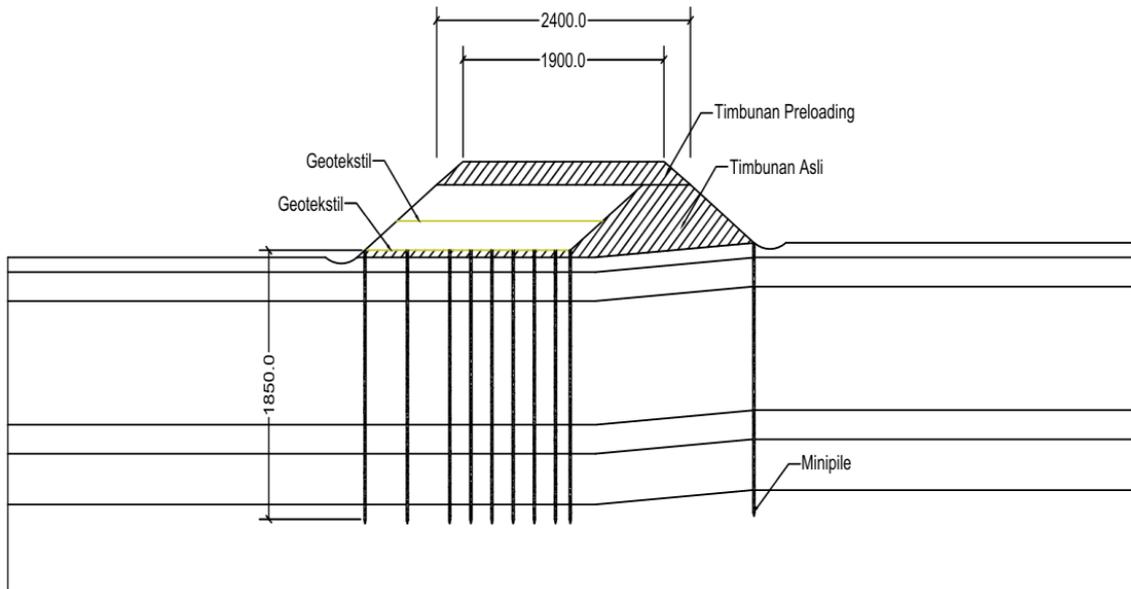


Gambar 2. Sketsa Pemodelan *Minipile* Tanpa LTP

(Sumber : *Hasil analisis, 2024*)

4. Pemodelan Dengan *Minipile* Dengan LTP Geotekstil + Granular

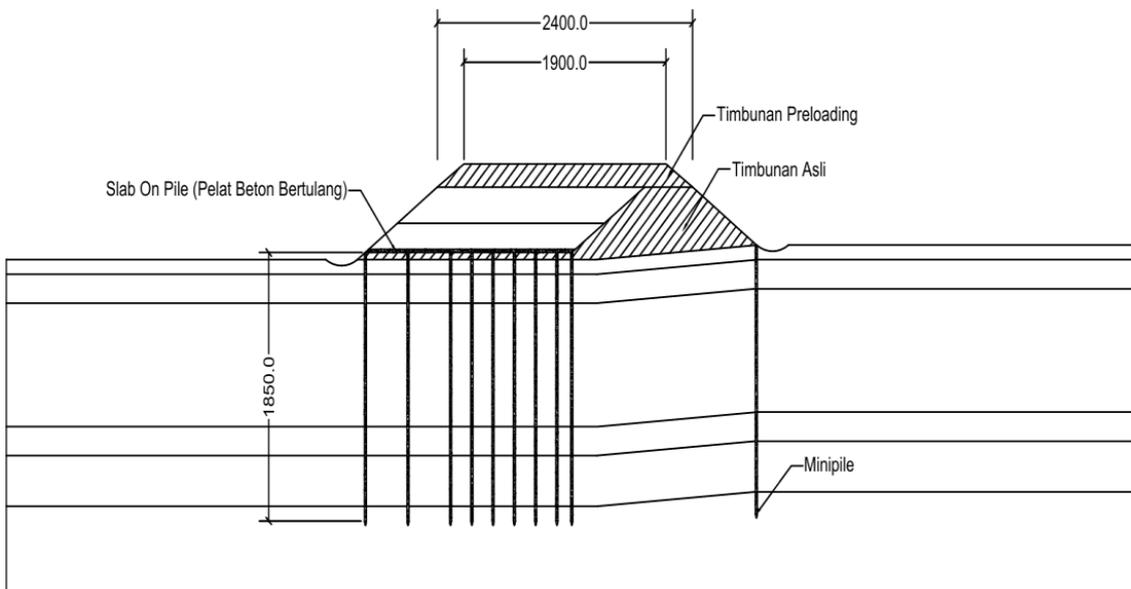
Konsep penanganan yang dilakukan adalah berupa penggunaan *minipile* serta penambahan geotekstil stabilisator ditambah dengan bahan granular dengan kuat tarik ultimate minimum 50 kN/m.



Gambar 3. Sketsa Pemodelan *Minipile* Dengan LTP Geotekstil
(Sumber : Hasil analisis, 2024)

5. Pemodelan Dengan *Minipile* Dengan LTP *Slab On Pile*

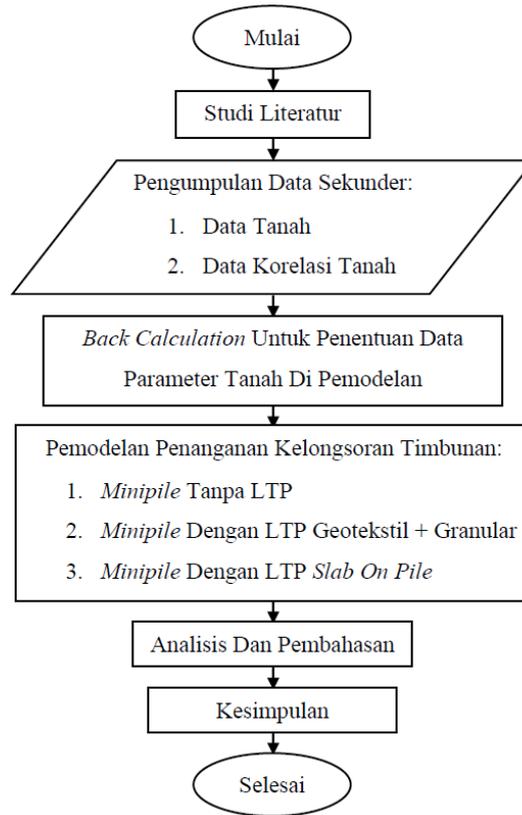
Penanganan yang selanjutnya adalah perkuatan *minipile* dengan LTP beton bertulang (*slab on pile*). Perencanaan yang akan dianalisis pada pemodelan penanganan ini meliputi perencanaan tebal plat (*slab*), merencanakan kedalaman tiang dan menghitung banyaknya tiang.



Gambar 4. Sketsa Pemodelan *Minipile* Dengan LTP *Slab On Pile*
(Sumber : Hasil analisis, 2024)

6. Bagan Alir Penelitian

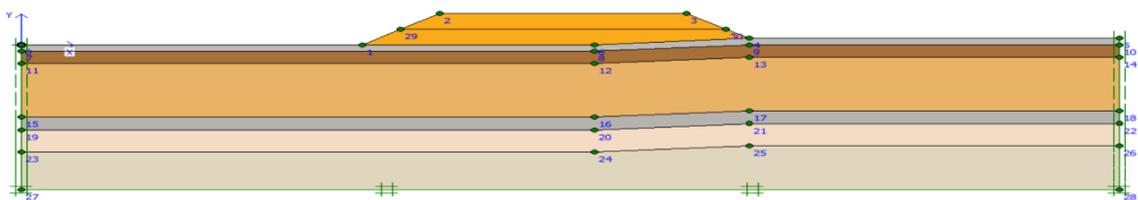
Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini seperti digambarkan pada Gambar 5 bagan alir penelitian berikut.



Gambar 5. Bagan Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis ini menggunakan tinggi timbunan eksisting sebesar 5 meter. Parameter beban yang diperhitungkan adalah beban struktur dari perkerasan jalan serta beban lalu lintas untuk lereng timbunan yang tidak aman, akan diberikan perkuatan menggunakan *minipile* yang dilengkapi dengan LTP geotekstil dan pelat beton bertulang (*slab on pile*). Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah tambahan perkuatan tersebut mampu menahan kelongsoran yang terjadi dan meningkatkan nilai faktor keamanan timbunan tersebut.



Gambar 6. Geometri Kondisi Eksisting Timbunan
(Sumber : Hasil analisis, 2024)

1. Data Bore Hole Tanah

Data tanah yang digunakan untuk perbaikan lereng timbunan mengacu pada penyelidikan tanah yang diperoleh dari pekerjaan jalan tol ruas Tebing Tinggi-Indrapura.

Tabel 9. Data Parameter Kedalaman Tanah

Kedalaman (m)	Tebal lapisan (m)	Jenis Tanah
0,0 – 1,0	1,0	Pasir
1,0 – 4,5	3,5	Humus
4,5 – 16,8	12,3	Lempung Lunak
16,8 – 18,0	1,2	Pasir
18,0 – 21,0	3,0	Pasir Sedang
21,0 – 28,5	7,5	Pasir Padat

(Sumber : Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019)

2. Data Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas yang digunakan yaitu beban untuk jalan kelas I sebesar 15 kPa atau 15 kN/m² sesuai dengan SNI 8460 tahun 2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jalan kelas I umumnya dirancang untuk menampung kendaraan berat dengan muatan besar dan memiliki spesifikasi teknis yang memungkinkan kendaraan untuk bergerak dengan kecepatan tinggi seperti jalan tol.

3. Data beban

Dalam penelitian ini terdapat dua (2) jenis beban pada kondisi yang berbeda seperti yang diuraikan pada Tabel 10 berikut.

Tabel 10. Data Beban

Masa Pelaksanaan Konstruksi		
Tebal perkerasan	:	0,3 m
γ beton	:	2.200 kg/m ³
Berat per m ²	:	6,47 kN/m ²
Tebal <i>lean concrete</i>	:	0,1 m
γ <i>concrete</i> beton	:	2.200 kg/m ³
Berat per m ²	:	2,16 kN/m ²
Tebal <i>drainage layer</i>	:	0,15 m
γ drainase	:	17 kN/m ³
Berat per m ²	:	2,55 kN/m ²
Masa Operasional		
Beban lalu lintas	:	15 kN/m ²
Beban pada saat masa pelaksanaan konstruksi	:	11,18 kN/m ²

(Sumber : Proyek Jalan Tol Tebing Tinggi - Indrapura, 2019)

Maka total pembebanan pada masa pelaksanaan konstruksi sebesar 11,18 kN/m² sedangkan pada masa operasional sebesar 26,18 kN/m².

4. Tinggi Timbunan *Preloading*

Pada proses *preloading* melibatkan penambahan beban sementara, seperti lapisan tanah atau material lain, di atas area yang akan ditimbun untuk meningkatkan tekanan pada tanah dasar. Tujuannya adalah untuk mempercepat pengeluaran air pori dari tanah lunak, sehingga meningkatkan kekuatan dan stabilitas tanah dasar, serta mengurangi resiko penurunan (*settlement*) yang berlebihan setelah konstruksi jalan selesai. Nilai tinggi timbunan *preloading* dari hasil analisis adalah 1,6 meter.

5. Waktu Konsolidasi Akhir

Konsolidasi pada tanah timbunan jalan adalah proses dimana tanah mengalami pengurangan volume akibat keluarnya air dari pori-pori tanah di bawah tekanan yang diberikan oleh beban timbunan. Proses ini menyebabkan partikel-partikel tanah saling mendekat, meningkatkan kekuatan dan kepadatan tanah. Konsolidasi penting untuk memastikan stabilitas dan kemampuan dukung tanah dasar sebelum pembangunan jalan, karena mengurangi resiko penurunan (*settlement*) yang dapat menyebabkan kerusakan pada struktur jalan di masa depan. Waktu konsolidasi akhir yang ditentukan adalah selama 1.043 hari.

6. Perhitungan Metode *Finite Element*

Hasil luaran (*output*) yaitu nilai *safety factor* (SF) dan deformasi vertikal yang terjadi pada dijabarkan pada Tabel 11 berikut.

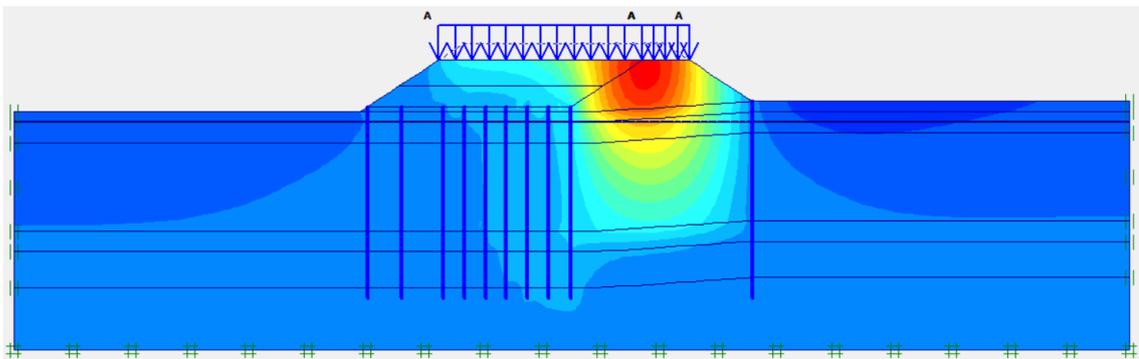
Tabel 11. Nilai Luaran (*output*) *Safety Factor* (SF)

<i>Minipile Tanpa LTP</i>	
Masa pelaksanaan konstruksi	Nilai <i>Safety Faktor</i> (SF)
a. Kondisi timbunan 1	2,6347
b. Setelah konsolidasi akhir	1,8703
c. Setelah galian <i>preloading</i>	2,4060
d. Setelah <i>input</i> beban konstruksi	2,0614
Masa operasional	
a. Kondisi timbunan 1	2,6347
b. Setelah konsolidasi akhir	1,8703
c. Setelah galian <i>preloading</i>	2,4060
d. Setelah input beban operasional	1,7324
<i>Minipile Dengan Geotekstil</i>	
Masa pelaksanaan konstruksi	Nilai <i>Safety Faktor</i> (SF)
a. Kondisi timbunan 1	2,6298
b. Setelah konsolidasi akhir	1,8877
c. Setelah galian <i>preloading</i>	2,4180
d. Setelah input beban konstruksi	2,0814
Masa operasional	
a. Kondisi timbunan 1	2,6298
b. Setelah konsolidasi akhir	1,8877
c. Setelah galian <i>preloading</i>	2,4180
d. Setelah input beban operasional	1,7353
<i>Minipile Dengan LTP Slab on Pile</i>	

Masa pelaksanaan konstruksi	Nilai <i>Safety Faktor</i> (SF)
a. Kondisi timbunan 1	2,6312
b. Setelah konsolidasi akhir	1,8795
c. Setelah galian preloading	2,4608
d. Setelah input beban konstruksi	2,0958
Masa operasional	
a. Kondisi timbunan 1	2,6312
b. Setelah konsolidasi akhir	1,8795
c. Setelah galian preloading	2,4608
d. Setelah input beban operasional	1,7432

(Sumber : Hasil analisis, 2024)

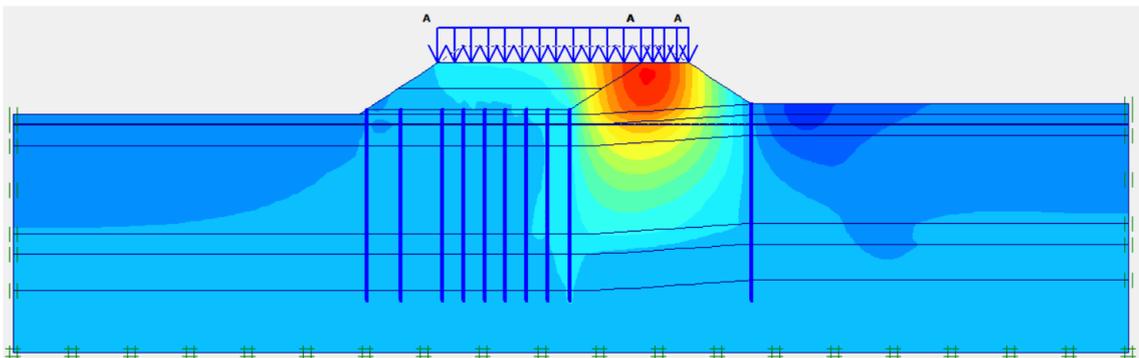
Berdasarkan hasil analisis diatas disimpulkan bahwa lereng timbunan sudah stabil dan longsoran jarang terjadi sesuai dengan nilai $SF \geq 1,25$ (Tabel 6).



Gambar 7. Deformasi Vertikal Perkuatan *Minipile* Tanpa LTP (Konstruksi)

(Sumber : Hasil analisis, 2024)

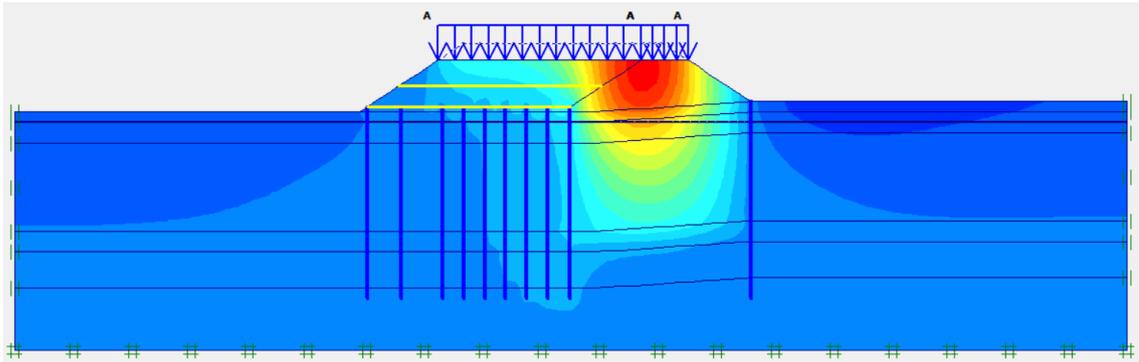
Berdasarkan Gambar 7, dapat dilihat bahwa deformasi vertikal yang terjadi pada perkuatan *minipile* tanpa LTP pada saat masa pelaksanaan konstruksi yaitu sebesar $14,74 \times 10^{-3}$ m.



Gambar 8. Deformasi Vertikal Perkuatan *Minipile* Tanpa LTP (Operasional)

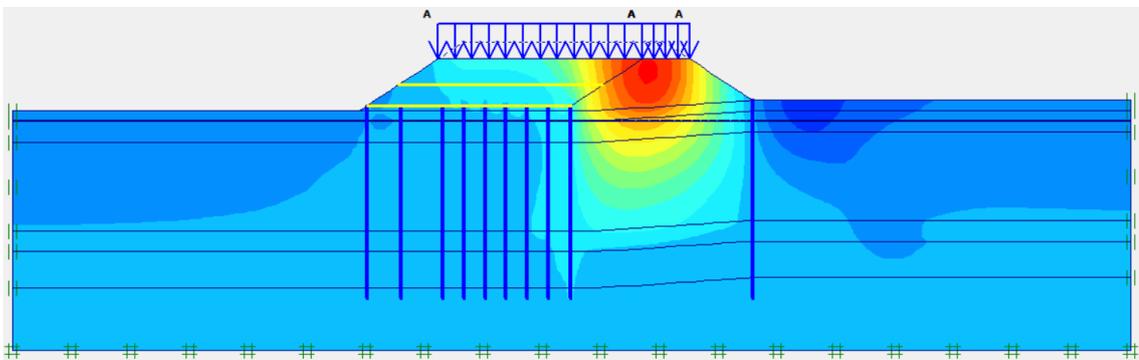
(Sumber : Hasil analisis, 2024)

Berdasarkan Gambar 8, dapat dilihat bahwa deformasi vertikal yang terjadi pada perkuatan *minipile* tanpa LTP pada saat masa operasional yaitu sebesar $50,12 \times 10^{-3}$ m.



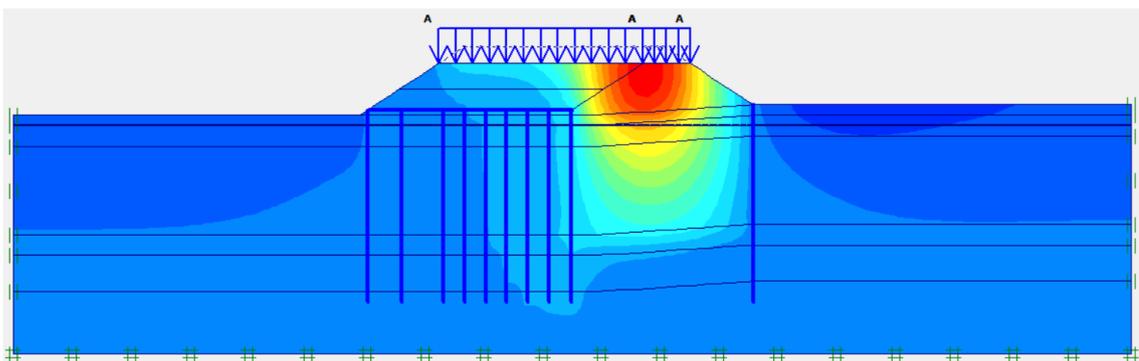
Gambar 9. Deformasi Vertikal Perkuatan *Minipile* Dengan LTP Geotekstil (Konstruksi)
(Sumber : Hasil analisis, 2024)

Berdasarkan Gambar 9, dapat dilihat bahwa deformasi vertikal yang terjadi pada perkuatan *minipile* dengan LTP geotekstil pada saat masa pelaksanaan konstruksi $14,60 \times 10^{-3}$ m.



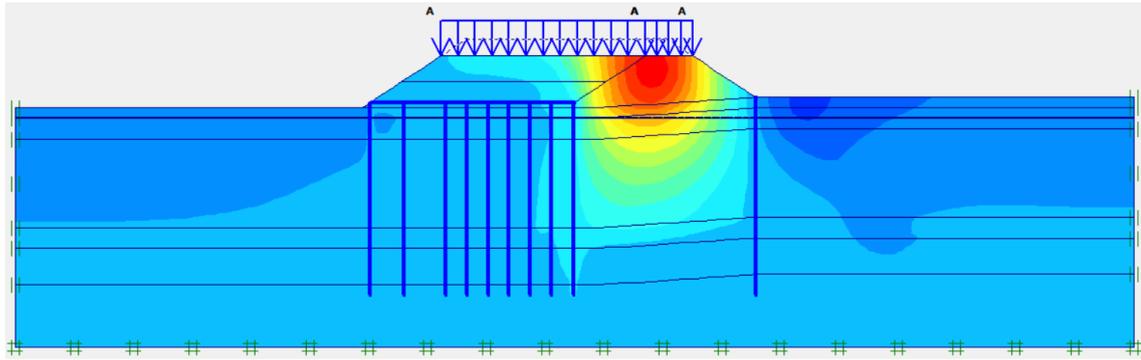
Gambar 10. Deformasi Vertikal Perkuatan *Minipile* Dengan LTP Geotekstil (Operasional)
(Sumber : Hasil analisis, 2024)

Berdasarkan Gambar 10, dapat dilihat bahwa deformasi vertikal yang terjadi pada perkuatan *minipile* dengan LTP geotekstil pada saat masa operasional yaitu sebesar $48,85 \times 10^{-3}$ m.



Gambar 11. Deformasi Vertikal Perkuatan *Minipile* Dengan LTP *Slab on Pile* (Konstruksi)
(Sumber : Hasil analisis, 2024)

Berdasarkan Gambar 11, dapat dilihat bahwa deformasi vertikal yang terjadi pada perkuatan *minipile* dengan LTP *slab on pile* pada saat masa pelaksanaan konstruksi yaitu sebesar $14,55 \times 10^{-3}$ m.



Gambar 12. Deformasi Vertikal Perkuatan *Minipile* Dengan LTP *Slab on Pile* (Operasional)
(Sumber : Hasil analisis, 2024)

Berdasarkan Gambar 12, dapat dilihat bahwa deformasi vertikal yang terjadi pada perkuatan *minipile* dengan LTP *slab on pile* pada saat masa operasional yaitu sebesar $48,51 \times 10^{-3}$ m.

Gambar 12. Rekapitulasi Hasil Analisis

Alternatif perkuatan	Safety Factor (SF)		Deformasi vertikal (m)		Penurunan muka tanah (<i>settlement</i>) (m)
	Konstruksi	Operasional	Konstruksi	Operasional	
<i>Minipile</i> tanpa LTP	2,0614	1,7324	$14,74 \times 10^{-3}$	$50,12 \times 10^{-3}$	$50,12 \times 10^{-3}$
<i>Minipile</i> dengan LTP Geotekstil	2,0814	1,7353	$14,60 \times 10^{-3}$	$48,85 \times 10^{-3}$	$48,85 \times 10^{-3}$
<i>Minipile</i> dengan LTP <i>Slab on Pile</i>	2,0958	1,7432	$14,55 \times 10^{-3}$	$48,51 \times 10^{-3}$	$48,51 \times 10^{-3}$

(Sumber : Hasil analisis, 2024)

KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang ditemukan dalam analisis penelitian ini meliputi :

1. Perbandingan stabilitas atau nilai *Safety Factor* (SF) untuk masing-masing perkuatan pada masa pelaksanaan konstruksi secara berturut-turut yaitu 2,0614; 2,0814 dan 2,0958. Kemudian ketika diberi beban operasional, nilai *Safety Factor* (SF) masing-masing perkuatan secara berturut-turut menjadi 1,7324; 1,7353 dan 1,7432. Menurut SNI 8460 tahun 2017, besaran *Safety Factor* (SF) yang diizinkan yaitu 1,5. Hal ni dapat disimpulkan nilai *Safety Factor* (SF) ketiga perkuatan tersebut telah memenuhi standar.
2. Besar deformasi vertikal setelah dilakukannya analisis yaitu, pada masa pelaksanaan konstruksi secara berturut-turut yaitu sebesar $14,74 \times 10^{-3}$ m; $14,60 \times 10^{-3}$ m dan $14,55 \times 10^{-3}$ m. Kemudian ketika diberi beban operasional, besar deformasi vertikal masing-masing perkuatan secara berturut-turut menjadi $50,12 \times 10^{-3}$ m; $48,85 \times 10^{-3}$ m dan $48,51 \times 10^{-3}$ m.
3. Penurunan muka tanah (*settlement*) dari ketiga perkuatan yang telah dianalisis pada masa operasional secara berturut-turut yaitu $50,12 \times 10^{-3}$ m; $48,85 \times 10^{-3}$ m dan $48,51 \times 10^{-3}$ m.

Menurut Manual Perkerasan Jalan No. 04/SE/Db/2017 Direktorat Jenderal Bina Marga, besarnya penurunan muka tanah (*settlement*) izin yaitu sebesar 10 cm, dimana besar penurunan muka tanah dari ketiga perkuatan yang dianalisis telah memenuhi standar tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Das, B. M. 1985. *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik)*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Dara, T., dan Rahmadani. 2022. *Analisis Stabilitas Tanah Lereng Dengan Perkuatan Sheet Pile Menggunakan Plaxis V.8 Dan Metode Fellenius*. Tugas Akhir. Semarang: Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung.
- Hardiyatmo, H. C. 1994. *Mekanika Tanah 2*. Yogyakarta: Penerbit Gadjah Mada University Press.
- Jutianti, N dan Tarbiyatno. 2019. *Hubungan Daya Dukung Tanah Berdasarkan Hasil Sondir, SPT dan Laboratorium Pada Rencana Pembangunan Gedung Multi Di Lokasi Balige*. Jurnal Pendidikan Teknik Bangunan Sipil. Vol. 2 No. 45-49.
- Latnan, Y. 2014. *Stabilitas Lereng Badan Jalan Desa Sidokumpul – Guntur Kabupaten Demak*. Tugas Akhir. Semarang: Program Studi Teknik Sipil. Fakultas Teknik Universitas Semarang.
- Zehera, N., Widiastuti, M. & Arifin, T. S. 2019. *Analisis Kekuatan Struktur Minipile Pasca Kerutuhan Dengan Menggunakan Software Plaxis V8.6 (Studi Kasus)*. Samarinda: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Sipil. Vol. 3, No. 1 Hal. 29 – 39.