

Studi Pemilihan Alternatif Perkuatan Timbunan Badan Jalan di Atas Tanah Lunak dengan Metode Elemen Hingga dan Sistem Pengambilan Keputusan

Deo Pratama Prayitno^{1,*}, Edy Purwanto¹

Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta¹

Koresponden*, Email: deoprata57@yahoo.co.id

Info Artikel		Abstract
Diajukan	09 Agustus 2025	<i>Toll road construction often encounters geotechnical challenges due to soft soil conditions, which can significantly affect embankment stability, as observed on the Balikpapan–Samarinda Toll Road at STA 22+300, NSPT value is ≤ 6 up to a depth of 10 metres. This study aims to analyse the stability of the road embankment and determine an effective and efficient soil reinforcement solution. Slope stability analysis was performed using the finite element method with Plaxis 2D, while decision-making employed the pairwise comparison and simple additive weighting methods. The existing condition analysis revealed a factor of safety of 0.9852 and a settlement of 32.02 cm. The combination of mini piles and geotextiles demonstrated the best performance, increasing the factor of safety to 1.552 and reducing settlement to 13.03 cm. With the highest decision-making preference weight of 0.8989, this alternative was identified as the optimal solution, offering adequate stability, relatively low settlement, and cost efficiency compared to the spun pile–geotextile combination.</i>
Diperbaiki	12 Agustus 2025	
Disetujui	15 Agustus 2025	
Keywords: <i>soft soil, soil reinforcement, finite element method, decision-making system</i>		Abstrak Pembangunan jalan tol kerap menghadapi tantangan geoteknik akibat kondisi tanah lunak yang berdampak pada stabilitas badan jalan, seperti pada Jalan Tol Balikpapan–Samarinda STA 22+300 yang memiliki nilai NSPT ≤ 6 hingga kedalaman 10 meter. Penelitian ini bertujuan menganalisis stabilitas timbunan badan jalan serta menentukan solusi perkuatan tanah yang efektif dan efisien. Analisis stabilitas lereng menggunakan metode elemen hingga dengan Plaxis 2D, serta pengambilan keputusan berbasis metode <i>pairwise comparison</i> dan <i>simple additive weighting</i> . Hasil analisis kondisi eksisting menunjukkan faktor keamanan sebesar 0,9852 dan penurunan sebesar 32,02 cm. kombinasi perkuatan <i>mini pile</i> dan geotekstil memberikan kinerja terbaik dengan meningkatkan faktor keamanan menjadi 1,552 dan nilai penurunan menjadi 13,03 cm. Serta nilai bobot preferensi pengambilan keputusan tertinggi sebesar 0,8989 menjadikan alternatif tersebut sebagai solusi optimal karena mampu memberikan stabilitas yang memadai, penurunan yang relatif kecil, serta efisiensi biaya dibandingkan perkuatan kombinasi <i>spun pile</i> dan geotekstil.
Kata kunci: tanah lunak, perkuatan tanah, metode elemen hingga, sistem pengambilan keputusan		

1. Pendahuluan

Pemerintah Indonesia terus mendorong pemerataan pembangunan, salah satunya melalui pembangunan jalan tol guna meningkatkan konektivitas dan efisiensi logistik antar wilayah. Jalan Tol Balikpapan–Samarinda dibangun sebagai proyek strategis untuk menunjang pengembangan sektor industri di Kalimantan Timur, seperti pertambangan, perkebunan, dan migas. Jalan tol sepanjang 99,35 km ini menghubungkan dua kota utama di provinsi tersebut. Pada pelaksanaannya, pekerjaan timbunan jalan kerap menghadapi permasalahan geoteknik, terutama pada tanah lunak yang memiliki daya dukung rendah dan potensi penurunan besar. Salah satu titik kritis berada di STA 22+300, dengan hasil uji SPT menunjukkan nilai NSPT ≤ 6 hingga kedalaman 10 meter. Kondisi ini memerlukan analisis stabilitas timbunan serta penerapan metode perkuatan tanah yang tepat.

Penelitian ini bertujuan memberikan solusi teknis yang efektif dan efisien sebagai referensi pembangunan infrastruktur di wilayah serupa, mengingat jalan tol ini merupakan yang pertama di Pulau Kalimantan.

Terdapat penelitian terdahulu telah membahas efektivitas perkuatan tanah lunak dalam konstruksi timbunan. Razali et al. [5] mengevaluasi posisi optimal pemasangan geotekstil dalam timbunan bahwa pemasangan geotekstil pada bagian bawah timbunan jalan ($y = 0.00$ m) merupakan pilihan terbaik dikarenakan memiliki penurunan minimum dibanding pemasangan geotekstil dibagian tengah ($y = 1.200$ m) dan atas ($y = 1.800$). Yang et al. [9] menunjukkan bahwa penambahan panjang dan pengurangan jarak antar *spun pile* dapat menurunkan penurunan tanah secara signifikan. Saputra et al. [7] penggunaan geotekstil meningkatkan angka keamanan lereng terhadap stabilitas internal sebesar 0,390.

Perkuatan lereng dengan geotekstil membutuhkan biaya sebesar Rp. 3.728.514.155,78. Perkuatan geotekstil lebih mahal Rp. 1.126.527.145,14 dibanding perkuatan lereng eksisting DPT dari beton Dabukke dkk. [1] menunjukkan bahwa metode *spun pile* dinilai lebih unggul, dengan menggunakan *spun pile* biaya pekerjaan lebih hemat Rp1.814.678.362 atau 13,53% dari pondasi *bored pile*. Dari segi waktu, pekerjaan pondasi *spun pile* menunjukkan efisiensi waktu sebesar 16 hari atau 8,47% dari pondasi *bored pile*. Mananoma dkk. [3] mengusulkan pendekatan AHP dalam pengambilan keputusan pemilihan jenis pondasi secara objektif. Biaya merupakan prioritas utama yang dipertimbangkan dengan bobot sebesar 0,6334 dilanjut dengan dampak lingkungan sebesar 0,2604 dan metode pelaksanaan sebesar 0,1061. Pondasi sumuran direkomendasikan sebagai pilihan terbaik karena memiliki biaya yang paling ekonomis dengan nilai bobot 0,141 dan dampak lingkungan yang paling rendah dengan nilai bobot sebesar 0,464

Berbeda dari penelitian sebelumnya yang hanya membahas satu jenis perkuatan atau aspek teknis saja, penelitian ini mengkaji kombinasi beberapa metode perkuatan yaitu geotekstil, *spun pile* dan *mini pile* pada satu lokasi studi pada STA 22+300 Tol Balikpapan–Samarinda menggunakan Plaxis 2D v.20. Selain itu, juga dilakukan penilaian aspek manajemen konstruksi melalui estimasi biaya, durasi pelaksanaan, dan pengambilan keputusan berbasis metode *pairwise comparison* dan *Simple additive weighting* (SAW). Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan memberikan kontribusi yang lebih komprehensif dalam menentukan solusi perkuatan tanah lunak yang optimal dan aplikatif.

2. Metode

Penelitian ini terbagi dalam beberapa tahapan sebagai berikut:

- 1) Mengumpulkan data berupa data sekunder. Data sekunder pada penelitian ini yaitu berupa hasil penyelidikan tanah (uji lapangan dan uji laboratorium) yang didapatkan dari PT Wijaya Karya (Persero), serta data terkait harga satuan pekerjaan perkuatan didapatkan dari PT Balikpapan Ready Mix (BRM) dan Pejabat Pembuat Komitmen (PPK) SKPD-TP Samarinda TA.2022 Paket rekonstruksi dalam Kota Samarinda.
- 2) Menggambar model timbunan pada aplikasi autocad yang kemudian di import ke aplikasi plaxis.
- 3) Melakukan analisis terhadap kondisi eksisting timbunan badan jalan (tanah asli) menggunakan program plaxis dengan menginput data parameter tanah dan beban.
- 4) Mendapatkan hasil nilai stabilitas kondisi eksisting timbunan badan jalan (tanah asli) berupa faktor keamanan dan nilai penurunan.
- 5) Melakukan pemodelan dan analisis timbunan badan jalan dengan perkuatan tanah geotekstil, *spun pile* dan geotekstil serta *mini pile* dan geotekstil.
- 6) Mendapatkan nilai stabilitas dari plaxis berupa faktor keamanan dan nilai penurunan dari perkuatan geotekstil, *spun pile* dan geotekstil serta *mini pile* dan geotekstil.
- 7) Menghitung biaya dan durasi yang dibutuhkan untuk pekerjaan penambahan perkuatan tanah geotekstil, *spun pile* dan geotekstil serta *mini pile* dan geotekstil.
- 8) Membuat kuesioner dan melakukan pengumpulan data primer berupa hasil pengisian kuesioner yang telah dibagi kepada stakeholder yang memiliki pengalaman di bidang geoteknik dan manajemen konstruksi dilanjut dengan melakukan analisis dengan metode *pairwise comparison* untuk mendapatkan nilai bobot dari setiap kriteria dan metode *simple additive weighting* untuk menentukan nilai bobot preferensi.

Tanah Lunak

Tanah lunak merupakan jenis tanah yang memiliki daya dukung rendah yaitu berupa kuat geser rendah, kadar air dan kompresibilitas tinggi, sehingga menyebabkan penurunan yang besar. Pada saat terjadi pembebanan atau proses konstruksi diatas tanah lunak maka perlu dilakukannya analisis lebih lanjut dan teliti dikarenakan tanah lunak merupakan jenis tanah kohesif, sehingga membutuhkan waktu yang relatif lebih lama untuk terjadinya proses pengurangan volume (konsolidasi) atau kompresi secara sempurna.

Rencana Anggaran Biaya

Rencana anggaran biaya merupakan taksiran biaya terhadap suatu pekerjaan berupa jumlah material yang digunakan dan upah tenaga kerja serta seluruh biaya yang berkaitan dengan pelaksanaan proyek (Ibrahim, 1993). Pada umumnya perhitungan anggaran biaya pada pekerjaan proyek konstruksi dapat dilakukan dengan mengalikan volume pekerjaan dengan harga satuan pekerjaan.

Harga satuan pekerjaan merupakan penjumlahan dari analisis bahan atau material dan upah suatu pekerjaan yang ditaksir dalam besaran tertentu. Harga material dan upah disesuaikan dengan harga pasaran atau standar wilayah pada lokasi pekerjaan proyek tersebut. Proses perhitungan tersebut sering kali disebut AHSP (Analisis Harga Satuan Pekerjaan). Sebagai contoh pada penelitian ini menggunakan referensi Analisa Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) berdasarkan Peraturan Menteri PUPR Nomor 1 Tahun 2022. Rencana

Anggaran Biaya (RAB) pekerjaan konstruksi dapat ditentukan dengan Persamaan (1).

$$\text{RAB} = \text{Volume Pekerjaan} \times \text{Harga Satuan Pekerjaan} \quad (1)$$

Estimasi Durasi Pekerjaan

Setiap aktivitas atau pekerjaan dalam proyek konstruksi memiliki durasi yang mempresentasikan estimasi waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan aktivitas tersebut. Durasi tersebut umumnya dinyatakan dalam satuan waktu seperti menit, jam, hari kerja, hari kalender, minggu atau bulan. Penjadwalan pada dunia konstruksi umumnya menggunakan satuan hari kerja atau hari kalender [8]. Estimasi durasi pekerjaan konstruksi dapat ditentukan dengan Persamaan (2).

$$\text{Durasi Pekerjaan} = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Produktivitas perhari}} \quad (2)$$

Pairwise comparisons

Pairwise comparisons (Perbandingan Berpasangan) yang pada awalnya dikembangkan oleh Thomas L. Saaty [6] dalam kepentingan proses *Analytical Hierarchy Process*. Merupakan salah satu metode yang dapat digunakan dalam sistem pengambilan keputusan dengan memperhatikan faktor faktor persepsi, preferensi, pengalaman, menggabungkan penilaian-penilaian dan nilai-nilai pribadi ke dalam satu cara yang logis.

Tahapan-tahapan dalam perbandingan berpasangan pada dasarnya adalah sebagai berikut:

1. Menyusun matriks *pairwise comparison* atau perbandingan berpasangan untuk mengetahui tingkat kepentingan setiap kriteria yang didasarkan oleh skala keutamaan *pairwise comparison*. Dalam penyusunan matriks ini ditentukan bilangan dengan pertimbangan intensitas kepentingan. Berikut merupakan contoh matriks yang dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Matriks *Pairwise comparison*

C	A1	A2	...	An
A1	a11	a12	...	a1n
A2	a21	a22	...	a2n
...	...	...	...	...
Am	am1	am2	...	amn

Berdasarkan tabel di atas dapat diambil contoh misalkan nilai a12 merupakan perbandingan antara elemen atau kriteria A1 (baris) terhadap A2 (kolom) yang menyatakan seberapa penting kriteria A1 (baris) daripada kriteria A2 (kolom).

2. Melakukan normalisasi matriks, yaitu dengan cara menjumlahkan nilai setiap kolom pada matriks lalu setiap element pada baris matriks kolom tersebut dibagi dengan nilai total setiap kolomnya. Selanjutnya menentukan bobot prioritas dengan cara merata-ratakan setiap baris matriks yang telah dilakukan normalisasi.

Simple additive weighting (SAW)

Konsep utama dari metode *Simple additive weighting* (SAW) adalah menghitung jumlah terbobot dari penilaian rating kinerja pada setiap alternatif untuk semua kriteria (Kusumadewi, 2006) dalam Pribadi et al. [4]. Metode ini memerlukan proses normalisasi matriks Keputusan (X) ke dalam skala yang memungkinkan perbandingan dengan semua rating alternatif yang tersedia. Dalam metode SAW terdapat dua atribut utama yaitu kriteria keuntungan (benefit) dan kriteria biaya (cost). Perbedaan mendasar antara kedua kriteria ini terletak pada pemilihan kriteria saat pengambilan keputusan. Analisis dengan metode SAW dilakukan dengan Langkah perhitungan berikut:

1. Menentukan kriteria dan nilai bobot kriteria yang dijadikan dasar dalam pengambilan Keputusan, yaitu Ci dan Wj. Dalam hal ini kriteria tersebut didapatkan dari hasil akhir analisis menggunakan metode *pairwise comparison*,
2. Menetapkan penilaian dari hasil analisis dan respon responden pada setiap alternatif dan kriteria,
3. Menormalisasi matriks dengan menghitung nilai rating kinerja setiap alternatif terhadap nilai kriteria dengan persamaan yang disesuaikan dengan jenis kriteria yaitu kriteria keuntungan = maksimum dan biaya = minimum. Sehingga didapatkan matrik kinerja ternormalisasi yaitu R. Berikut merupakan Persamaan (3) untuk perhitungan nilai rating kinerja.

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\text{Max}_{ij}} \\ \frac{\text{Min}_{ij}}{x_{ij}} \end{cases} \quad (3)$$

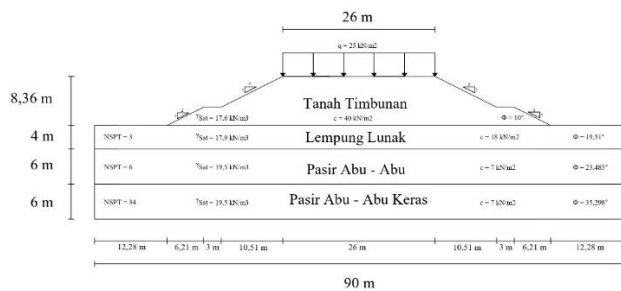
4. Menghitung nilai bobot preferensi pada setiap alternatif (Vi) sebagai hasil akhir perankingan dengan melakukan perkalian antara matriks ternormalisasi R dengan nilai bobot kriteria, sehingga didapatkan nilai tertinggi yang dipilih sebagai alternatif terbaik (Ai).

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis Stabilitas Timbunan Badan Jalan Tanah Asli

Kondisi eksisting lereng pada proyek Jalan Tol Balikpapan – Samarinda STA 22+300 direpresentasikan dalam bentuk potongan melintang berdasarkan hasil penyelidikan geoteknik di lapangan dan laboratorium.

Ilustrasi lereng, lapisan tanah, serta geometri timbunan dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Tabel 2**.



Gambar 1. Potongan Melintang Timbunan Jalan STA 22+300 Tol Balikpapan – Samarinda

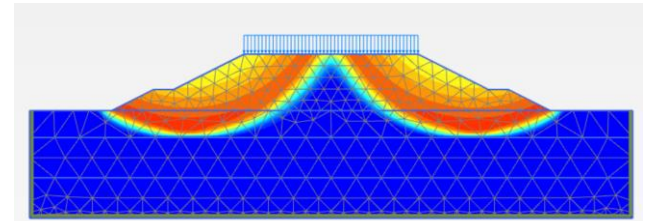
Tabel 2. Parameter Tanah

Nama	Satuan	Lempung Lunak	Pasir Abu-abu	Pasir Abu-abu Keras	Timbunan Pilihan
Kedalaman	m	0-4	4-10	10-16	
N SPT		3	6	34	
Kode		C	S	S	C
Kategori		Soft	Loose	Dense	
Jenis		Undrained	Drained	Drained	Undrained
w		36,3	24,1	24,1	X
γ_{sat}	kN/m ³	17,9	19,5	19,5	17,6
γ_{dry}	kN/m ³	13,1	15,8	15,8	16,6
γ'	kN/m ³	7,9	9,5	9,5	X
C_u	kN/m ²	18	7	7	40
ϕ	°	19,51	23,485	35,298	10
E'	kN/m ²	3900	3983,2	22792,8	25000
k	m/ha	0,0506	0,06527	0,06527	0,1
v		0,3	0,3	0,3	0,3

Analisis dilakukan dengan menggunakan aplikasi Plaxis 2D v.20 dengan geometri timbunan badan jalan yang memiliki tinggi 8,36 m. timbunan tersebut berada pada tanah asli yang terdiri dari 3 lapisan dengan kedalaman 16 m.

Kalkulasi pada aplikasi Plaxis 2D v.20 dilakukan pada bagian *Staged Construction* pada pemodelan ini terdiri dari 21 tahapan konstruksi dimulai dari tahapan pertama yaitu *initial phase* dilanjutkan dengan tahap kedua hingga tahap ke 17 berupa proses penimbunan yang dibagi menjadi 8 tahapan dengan proses konsolidasi disetiap tahapannya dilanjutkan dengan tahap ke 18 berupa pembebanan akibat beban lalu lintas dan beban perkerasan dilanjutkan dengan tahap ke 19 berupa beban gempa kemudian dilanjutkan dengan tahapan konsolidasi serta perhitungan nilai angka aman (SF). Adapun hasil deformed mesh dan bidang longsor pada timbunan

badan jalan tanah asli dapat dilihat pada Gambar 5.6 dan **Gambar 2**.



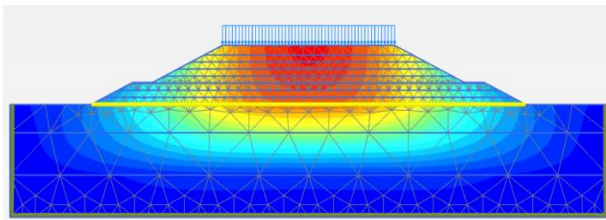
Gambar 2. Deformed Mesh Timbunan Badan Jalan Tanah Asli

Berdasarkan hasil analisis pada kondisi timbunan badan jalan di atas tanah asli, diperoleh nilai faktor keamanan (SF) sebesar 0,9852, yang berada di bawah ambang batas minimum sebesar 1,5. Selain itu, nilai penurunan sebesar 32,02 cm juga melebihi batas toleransi penurunan yang diperbolehkan, yaitu 20 cm. Dengan demikian, baik dari aspek stabilitas lereng maupun deformasi vertikal, kondisi tersebut tidak memenuhi kriteria teknis yang disyaratkan. Sehingga, diperlukan suatu upaya perbaikan tanah untuk meningkatkan kestabilan timbunan. Alternatif perkuatan pertama yang dikaji dalam penelitian ini adalah penggunaan material geotekstil sebagai perkuatan horisontal pada lapisan tanah lunak.

Analisis Stabilitas Timbunan Badan Jalan dengan Perkuatan Geotekstil

Analisis dilakukan dengan menggunakan aplikasi Plaxis 2D v.20 dengan geometri timbunan badan jalan yang memiliki tinggi 8,36 m dan Lapisan tanah terdiri dari 3 lapisan yang memiliki karakteristik berbeda dengan kedalaman total 16 m. Perkuatan tanah berupa geotekstil woven dengan kuat tarik ijin sebesar 52 kN/m

Kalkulasi pada aplikasi Plaxis 2D v.20 dilakukan pada bagian *Staged Construction* pada pemodelan ini terdiri dari 21 tahapan konstruksi dimulai dari tahapan pertama yaitu *initial phase* dilanjutkan dengan tahap kedua hingga tahap ke 17 berupa proses penimbunan yang dibagi menjadi 8 tahapan dengan proses konsolidasi disetiap tahapannya sebelum dilakukan penimbunan tanah tahapan pertama dilakukan pemasangan geotekstil sepanjang timbunan yaitu sepanjang 65,39 m dilanjutkan dengan tahap ke 18 berupa pembebanan akibat beban lalu lintas dan beban perkerasan dilanjutkan dengan tahap ke 19 berupa beban gempa kemudian dilanjutkan dengan tahap ke 20 tahapan konsolidasi serta tahapan ke 21 berupa perhitungan nilai angka aman (SF). Adapun hasil *deformed mesh* pada timbunan badan jalan dengan perkuatan geotekstil dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. *Deformed Mesh* Timbunan Badan Jalan dengan Perkuatan Geotekstil

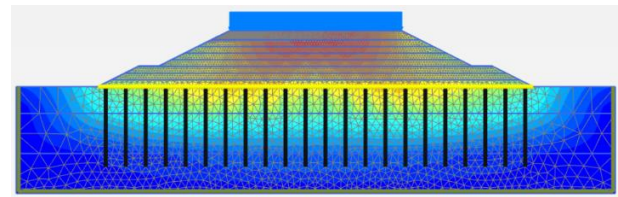
Berdasarkan hasil analisis, diketahui bahwa nilai faktor keamanan (SF) sebesar 1,238 belum memenuhi syarat minimum yang ditetapkan, yaitu 1,5. Selain itu, nilai penurunan yang terjadi sebesar 38,62 cm juga melebihi batas toleransi penurunan yang diizinkan sebesar 20 cm. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan perkuatan geotekstil pada timbunan badan jalan di atas tanah asli belum sepenuhnya efektif untuk memenuhi kriteria stabilitas dan deformasi. Meskipun terjadi peningkatan nilai faktor keamanan dibandingkan kondisi tanpa perkuatan, penurunan yang terjadi justru meningkat secara signifikan. Oleh karena itu, diperlukan alternatif perkuatan tambahan secara vertikal untuk mengurangi deformasi. Pada alternatif kedua dalam penelitian ini, dilakukan penambahan perkuatan menggunakan pondasi dalam berupa *spun pile* sebagai solusi terhadap permasalahan tersebut.

Analisis Stabilitas Timbunan Badan Jalan dengan Perkuatan *Spun pile* dan Geotekstil

Analisis dilakukan dengan menggunakan aplikasi Plaxis 2D v.20 dengan geometri timbunan badan jalan yang memiliki tinggi 8,36 m dan Lapisan tanah terdiri dari 3 lapisan yang memiliki karakteristik berbeda dengan kedalaman total 16 m. Perkuatan tanah berupa *spun pile* K-350 diameter 50 cm dan geotekstil woven dengan kuat tarik ijin sebesar 52 kN/m.

Kalkulasi pada aplikasi Plaxis 2D v.20 dilakukan pada bagian *Staged Construction* pada pemodelan ini terdiri dari 21 tahapan konstruksi dimulai dari tahapan pertama yaitu initial phase dilanjutkan dengan tahap kedua hingga tahap ke 17 berupa proses penimbunan yang dibagi menjadi 8 tahapan dengan proses konsolidasi disetiap tahapannya sebelum dilakukan penimbunan tanah tahapan pertama dilakukan pemasangan *spun pile* jarak 3 m sebanyak 22 tiang dengan kedalaman 12 m dan geotekstil sepanjang 65,39 m dilanjutkan dengan tahap ke 18 berupa pembebanan akibat beban lalu lintas dan beban perkerasan sebesar dilanjutkan dengan tahap ke 19 berupa beban gempa kemudian dilanjutkan dengan tahap ke 20 tahapan konsolidasi serta tahapan ke 21 berupa perhitungan nilai angka aman (SF). Adapun hasil *deformed*

mesh pada timbunan badan jalan dengan perkuatan *spun pile* dan geotekstil dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. *Deformed Mesh* Timbunan Badan Jalan dengan Perkuatan *Spun pile* dan Geotekstil

Berdasarkan hasil analisis pada kondisi timbunan badan jalan yang diperkuat menggunakan kombinasi *spun pile* dan geotekstil, diperoleh nilai faktor keamanan (SF) sebesar 1,617 dan nilai penurunan sebesar 18,19 cm. Kedua nilai tersebut telah memenuhi syarat teknis yang ditetapkan, yaitu faktor keamanan minimum sebesar 1,5 dan batas toleransi penurunan maksimum sebesar 20 cm. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi perkuatan horisontal (geotekstil) dan vertikal (*spun pile*) mampu meningkatkan kestabilan timbunan sekaligus mengendalikan deformasi secara efektif.

Sebelumnya, penggunaan geotekstil sebagai perkuatan tunggal belum mampu memenuhi kriteria stabilitas dan deformasi yang dipersyaratkan. Sehingga, dilakukan penambahan *spun pile* untuk meningkatkan kapasitas dukung secara vertikal. Dengan terpenuhinya seluruh kriteria teknis pada alternatif ini, maka perkuatan *spun pile* dinilai layak diterapkan.

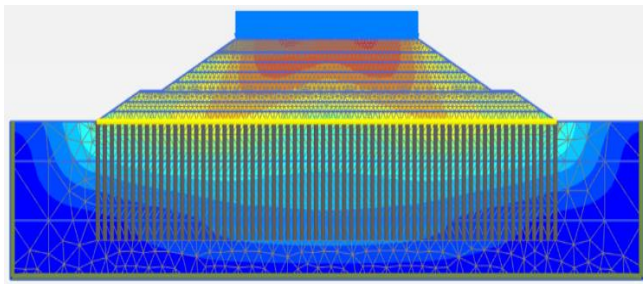
Untuk menentukan solusi perkuatan yang lebih efektif dan efisien, dilakukan analisis perbandingan dengan jenis pondasi dalam lainnya, yaitu *mini pile*, yang akan dibahas pada bagian selanjutnya dari penelitian ini

Analisis Stabilitas Timbunan Badan Jalan dengan Perkuatan *Mini pile* dan Geotekstil

Analisis dilakukan dengan menggunakan aplikasi Plaxis 2D v.20 dengan geometri timbunan badan jalan yang memiliki tinggi 8,36 m dan Lapisan tanah terdiri dari 3 lapisan yang memiliki karakteristik berbeda dengan kedalaman total 16 m. Perkuatan tanah berupa *mini pile* K-350 dimensi 20 cm x 20 cm dan geotekstil woven dengan kuat tarik ijin sebesar 52 kN/m.

Kalkulasi pada aplikasi Plaxis 2D v.20 dilakukan pada bagian *Staged Construction* pada pemodelan ini terdiri dari 21 tahapan konstruksi yaitu berupa tahap pertama yaitu initial phase dilanjutkan dengan tahap kedua hingga tahap ke 17 berupa proses penimbunan yang dibagi menjadi 8 tahapan dengan proses konsolidasi disetiap tahapannya sebelum dilakukan penimbunan tanah tahapan pertama dilakukan

pemasangan *mini pile* jarak 1 m sebanyak 66 tiang dengan kedalaman 12 m dan geotekstil sepanjang 65,39 m dilanjut dengan tahap ke 18 berupa pembebanan akibat beban lalu lintas dan beban perkerasan sebesar dilanjut dengan tahap ke 19 berupa beban gempa kemudian dilanjut dengan tahap ke 20 tahapan konsolidasi serta tahapan ke 21 berupa perhitungan nilai angka aman (SF). Adapun hasil deformed mesh pada timbunan badan jalan dengan perkuatan *mini pile* dan geotekstil dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Deformed Mesh Timbunan Badan Jalan dengan Perkuatan *Mini pile* dan Geotekstil

Berdasarkan hasil analisis terhadap timbunan badan jalan yang diperkuat dengan kombinasi *mini pile* dan geotekstil, diperoleh nilai faktor keamanan (SF) sebesar 1,552 dan nilai penurunan sebesar 13,03 cm. Kedua nilai tersebut telah memenuhi persyaratan teknis yang ditetapkan, yaitu nilai minimum faktor keamanan sebesar 1,5 dan batas maksimum penurunan sebesar 20 cm. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi perkuatan horisontal (geotekstil) dan vertikal (*mini pile*) mampu meningkatkan kestabilan timbunan secara efektif serta mengendalikan deformasi yang terjadi akibat rendahnya daya dukung tanah lunak.

Jika dibandingkan dengan alternatif sebelumnya, yaitu penggunaan *spun pile* dan geotekstil, kombinasi *mini pile* dan geotekstil memberikan nilai penurunan yang lebih kecil, meskipun nilai faktor keamanannya sedikit lebih rendah. Dengan demikian, dari aspek pengendalian deformasi vertikal, *mini pile* menunjukkan kinerja yang lebih optimal.

Untuk memperoleh keputusan yang lebih komprehensif dalam menentukan alternatif perkuatan yang paling sesuai, dilakukan analisis lanjutan terhadap aspek biaya melalui penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB), serta estimasi durasi pelaksanaan masing-masing alternatif. Evaluasi terhadap ketiga aspek utama, yaitu teknis, biaya, dan waktu, menjadi dasar dalam pemilihan solusi perkuatan yang paling efektif dan efisien untuk diterapkan pada timbunan badan jalan di atas tanah lunak. Berikut merupakan perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB) dan durasi pekerjaan perkuatan tanah setiap alternatif.

Rencana Anggaran Biaya (RAB) Perkuatan Geotekstil

Volume Geotekstil	= 65,39 m
Harga Satuan	= Rp. 149.427,22
Pekerjaan	
Biaya Pekerjaan Geotekstil	= Volume Geotekstil x Harga Satuan Pekerjaan = 65,39 x Rp. 149.427,22 = Rp. 9.771.045

Rencana Anggaran Biaya (RAB) Perkuatan *Spun pile* dan Geotekstil

Volume <i>Spun pile</i>	= 22 tiang
Harga <i>Spun pile</i> (22 tiang)	= Rp. 208.230.000
Harga Satuan	= Rp. 320.998,88
Pemancangan	
Biaya Pemancangan	= Volume <i>Spun pile</i> x Harga Satuan Pekerjaan = 22 x Rp. 302.998,88 = Rp. 7.061.975,33
Total Biaya Pekerjaan <i>Spun pile</i>	= Harga <i>Spun pile</i> + Biaya Pemancangan = Rp. 208.230.000 + Rp. 7.061.975,33 = Rp. 215.291.975,33
Biaya Pekerjaan <i>Spun pile</i> dan Geotekstil	= Biaya Pekerjaan <i>Spun pile</i> + Biaya Pekerjaan Geotekstil = Rp. 215.291.975,33 + Rp. 9.771.045 = Rp. 225.063.021,06

Rencana Anggaran Biaya (RAB) Perkuatan *Mini pile* dan Geotekstil

Volume <i>Mini pile</i>	= 66 tiang
Harga <i>Mini pile</i> (66 tiang)	= Rp. 122.760.000
Harga Satuan	= Rp. 320.998,88
Pemancangan	
Biaya Pemancangan	= Volume <i>Mini pile</i> x Harga Satuan Pekerjaan

$$\begin{aligned}
 &= 66 \times \text{Rp. } 320.998,88 \\
 &= \text{Rp. } 21.185.925,98 \\
 \text{Total Biaya} &= \text{Harga Mini pile} + \text{Biaya} \\
 \text{Pekerjaan Mini pile} &\text{ Pemancangan} \\
 &= \text{Rp. } 122.760.000 + \text{Rp.} \\
 &\quad 21.185.925,98 \\
 &= \text{Rp. } 143.945.925,98 \\
 \text{Biaya Pekerjaan} &= \text{Biaya Pekerjaan Mini pile} + \\
 \text{Mini pile dan Biaya} &\text{ Pekerjaan} \\
 \text{Geotekstil} &\text{ Geotekstil} \\
 &= \text{Rp. } 143.945.925,98 + \text{Rp.} \\
 &\quad 9.771.045 \\
 &= \text{Rp. } 153.716.971,71
 \end{aligned}$$

Durasi Pekerjaan Perkuatan Geotekstil

Berdasarkan uraian AHSP pekerjaan geotekstil dinyatakan bahwa penentu produksi pekerjaan adalah alat flat bed truck dengan kapasitas produksi/jam sebesar 5,62 m²/jam. Berikut merupakan perhitungan durasi pada pekerjaan perkuatan geotekstil.

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas} &= 5,62 \text{ m}^2 \\
 \text{Produksi/Jam} & \\
 \text{Kapasitas} &= 5,62 \text{ m}^2 \times 7 \text{ jam} \\
 \text{Produksi/Hari} & \\
 &= 39,34 \text{ m}^2/\text{hari} \\
 \text{Volume Pekerjaan} &= 65,39 \text{ m}^2 \\
 \text{Geotekstil} & \\
 \text{Durasi Pekerjaan} &= \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari}} \\
 \text{Geotekstil} & \\
 &= \frac{65,39 \text{ m}^2}{39,34 \text{ m}^2/\text{hari}} \\
 &= 1,662 \approx 2 \text{ Hari}
 \end{aligned}$$

Durasi Pekerjaan Perkuatan Spun pile dan Geotekstil

Berdasarkan uraian AHSP pekerjaan pemancangan dinyatakan bahwa penentu produksi pekerjaan adalah pile hammer dengan kapasitas produksi/jam sebesar 5,20 m. Berikut merupakan perhitungan durasi pada pekerjaan perkuatan *spun pile*.

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas} &= 5,20 \text{ m/jam} \\
 \text{Produksi/Jam} &
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas} &= 5,20 \text{ m/jam} \times 7 \text{ jam} \\
 \text{Produksi/Hari} &= 36,38 \text{ m/hari} \\
 \text{Volume Pekerjaan} &= 22 \text{ tiang} \times 12 \text{ m} \\
 &= 264 \text{ m} \\
 \text{Durasi Pekerjaan} &= \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari}} \\
 \text{Spun pile} & \\
 &= \frac{264 \text{ m}}{36,38 \text{ m/hari}} \\
 &= 7,257 \approx 8 \text{ Hari} \\
 \text{Durasi Pekerjaan} &= \text{Durasi Pekerjaan Spun pile} + \\
 \text{Perkuatan Spun pile} &\text{ Durasi Pekerjaan Geotekstil} \\
 \text{dan Geotekstil} & \\
 &= 8 \text{ hari} + 2 \text{ hari} \\
 &= 10 \text{ hari}
 \end{aligned}$$

Durasi Pekerjaan Perkuatan Mini pile dan Geotekstil

Berdasarkan uraian AHSP pekerjaan pemancangan dinyatakan bahwa penentu produksi pekerjaan adalah pile hammer dengan kapasitas produksi/jam sebesar 5,20 m. Berikut merupakan perhitungan durasi pada pekerjaan perkuatan *mini pile*.

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas} &= 5,20 \text{ m/jam} \\
 \text{Produksi/Jam} & \\
 \text{Kapasitas} &= 5,20 \text{ m/jam} \times 7 \text{ jam} \\
 \text{Produksi/Hari} & \\
 &= 36,38 \text{ m/hari} \\
 \text{Volume Pekerjaan} &= 66 \text{ tiang} \times 12 \text{ m} \\
 &= 792 \text{ m} \\
 \text{Durasi Pekerjaan} &= \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Kapasitas Produksi/Hari}} \\
 \text{Spun pile} & \\
 &= \frac{792 \text{ m}}{36,38 \text{ m/hari}} \\
 &= 21,770 \approx 22 \text{ Hari} \\
 \text{Durasi Pekerjaan} &= \text{Durasi Pekerjaan Mini pile} + \\
 \text{Perkuatan Spun pile} &\text{ Durasi Pekerjaan Geotekstil} \\
 \text{dan Geotekstil} & \\
 &= 22 \text{ hari} + 2 \text{ hari} \\
 &= 24 \text{ hari}
 \end{aligned}$$

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Analisis

Output	Tanpa Perkuatan	Perkuatan Tanah		
		Geotekstil	Spun pile dan Geotekstil	Mini pile dan Geotekstil
Faktor Keamanan (SF)	0,9852	1,238	1,617	1,552
Nilai Penurunan (cm)	32,02	38,62	18,19	13,03
Biaya Konstruksi (Rp)	-	Rp. 9.771.045	Rp. 225.063.021,06	Rp. 153.716.971,71
Durasi Konstruksi (hari)	-	2	10	24

Berdasarkan **Tabel 3** telah dilakukan analisis terhadap empat aspek utama dari setiap alternatif perkuatan timbunan badan jalan yaitu meliputi nilai faktor keamanan, besarnya penurunan, estimasi biaya konstruksi, serta durasi pelaksanaan pekerjaan. Perbandingan kuantitatif antar aspek tersebut memberikan gambaran awal mengenai keunggulan relatif masing-masing alternatif, namun untuk memperoleh keputusan yang optimal secara menyeluruh dibutuhkan pendekatan analitis yang lebih komprehensif. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan metode pengambilan keputusan multikriteria guna mengevaluasi seluruh alternatif

secara terintegrasi berdasarkan sejumlah kriteria yang telah ditetapkan.

Metode yang digunakan terdiri atas *Pairwise Comparison* (PWC) untuk menentukan bobot kepentingan relative antar kriteria berdasarkan prefensi yang logis dan sistematis, serta *Simple Additive Weighting* (SAW) untuk menilai dan mengurutkan alternatif berdasarkan skor total dari setiap kriteria yang telah dibobotkan. Pendekatan ini bertujuan untuk menghasilkan dasar pengambilan keputusan yang rasional, transparan, dan dapat dipertanggungjawabkan secara teknis dalam menentukan alternatif paling efektif dan efisien.

Tabel 4. Rekapitulasi Bobot Kriteria

Bobot Kriteria								
Kriteria		Responden						
Keterangan	Kode	1	2	3	4	5	Rata-Rata	Ranking
Faktor Keamanan	(K1)	0,5322	0,3411	0,2586	0,2897	0,3770	0,3597	1
Nilai Penurunan	(K2)	0,1680	0,3633	0,2704	0,2538	0,2426	0,2596	2
Biaya Konstruksi	(K3)	0,1064	0,1295	0,2230	0,1147	0,1823	0,1512	3
Durasi Pelaksanaan Konstruksi	(K4)	0,0869	0,0951	0,1764	0,1865	0,0969	0,1284	4
Metode Konstruksi	(K5)	0,1064	0,0710	0,0716	0,1554	0,1011	0,1011	5

Analisis dengan Metode *Pairwise Comparison*

Setelah dilakukan analisis menggunakan metode *Pairwise Comparison* (PWC), diperoleh bobot prioritas untuk masing-masing kriteria, sebagaimana ditunjukkan dalam **Tabel 4**. Nilai bobot ini mencerminkan tingkat kepentingan relatif antar kriteria berdasarkan persepsi responden terhadap kebutuhan perencanaan perkuatan timbunan badan jalan. Bobot yang telah diperoleh dari hasil analisis PWC ini selanjutnya digunakan sebagai input utama dalam analisis *Simple Additive Weighting* (SAW). Metode SAW membutuhkan bobot kriteria sebagai dasar pembobotan terhadap nilai kinerja setiap alternatif. Berikut merupakan analisis metode *Simple Additive Weighting* (SAW)

Analisis dengan Metode *Simple Additive Weighting* (SAW)

Setelah dilakukan analisis menggunakan metode *pairwise comparison* yang menghasilkan nilai bobot prioritas, selanjutnya nilai tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan dalam metode *simple additive weighting*. Sebagaimana ditunjukkan dalam **Tabel 5** diperoleh bahwa alternatif terbaik adalah penggunaan *mini pile* dan geotekstil dengan bobot preferensi sebesar 0,8989 lebih tinggi dibandingkan alternatif *spun pile* dan geotekstil sebesar 0,8784. Alternatif terbaik berdasarkan metode *simple additive weighting* diambil dari alternatif yang memiliki nilai bobot preferensi tertinggi hal tersebut menunjukkan tingkat kesesuaian dan optimalitas alternatif terhadap semua kriteria yang diprioritaskan

Tabel 5. Rekapitulasi Bobot Preferensi

No	Alternatif Perkuatan Tanah	Nilai Bobot Preferensi (Vi) Responden						Ranking
		1	2	3	4	5	Rata-rata	
1	<i>Spun pile</i> dan Geotekstil	0,8784	0,8784	0,8784	0,8784	0,8784	0,8784	2
2	<i>Mini pile</i> dan Geotekstil	0,8854	0,9107	0,9107	0,9107	0,8769	0,8989	1

4. Simpulan

Penelitian pada timbunan badan jalan di atas tanah lunak STA 22+300 Jalan Tol Balikpapan–Samarinda ini menunjukkan bahwa kondisi awal timbunan tanpa perkuatan tidak memenuhi kriteria stabilitas maupun penurunan yang disyaratkan. Upaya perbaikan dengan perkuatan geotekstil horisontal terbukti mampu meningkatkan distribusi beban dan kekakuan lateral, namun hasil analisis masih menunjukkan nilai faktor keamanan kurang dari 1,5 dan penurunan lebih dari 20 cm sehingga tidak layak dijadikan solusi tunggal.

Alternatif kedua berupa kombinasi *spun pile* dan geotekstil berhasil meningkatkan performa timbunan dengan tercapainya faktor keamanan 1,617 dan penurunan 18,19 cm yang berada dalam batas aman. Keunggulan utama dari alternatif ini terletak pada durasi pelaksanaan yang relatif singkat, yaitu 58,33% lebih cepat dibandingkan alternatif *mini pile*. Namun, biaya konstruksi yang lebih tinggi menjadi kelemahan yang perlu dipertimbangkan dalam konteks efisiensi.

Alternatif ketiga yaitu kombinasi *mini pile* dan geotekstil menghasilkan keseimbangan yang lebih baik. Nilai faktor keamanan sebesar 1,552 tetap berada di atas batas minimum, sedangkan nilai penurunan hanya 13,03 cm, lebih kecil 28,37% dibandingkan kombinasi *spun pile*. Dari sisi biaya, metode ini juga lebih ekonomis dengan penghematan sekitar Rp 71,35 juta, meskipun memerlukan waktu pelaksanaan yang lebih panjang.

Berdasarkan analisis pengambilan keputusan menggunakan *metode pairwise comparison*, diperoleh bahwa faktor keamanan memiliki bobot prioritas tertinggi sebesar 35,97%, disusul penurunan 25,96%, biaya konstruksi 15,12%, durasi pelaksanaan 12,84% dan metode konstruksi 10,11%. Selanjutnya, hasil perhitungan dengan metode *simple additive weighting* menunjukkan bahwa alternatif terbaik adalah kombinasi *mini pile* dan geotekstil dengan bobot preferensi sebesar 0,8989, lebih tinggi dibandingkan kombinasi *spun pile* dan geotekstil sebesar 0,8784. Temuan ini menegaskan bahwa alternatif *mini pile* dan geotekstil merupakan solusi yang paling optimal, karena mampu memenuhi aspek teknis dan ekonomis secara seimbang, serta

memberikan tingkat kesesuaian dan optimalitas yang lebih tinggi terhadap seluruh kriteria yang diprioritaskan.

Daftar Pustaka

- [1] Dabukke, O., & Wacono, S. (2024). Perbandingan Biaya dan Waktu Pekerjaan Pondasi Bore Pile dan *Spun pile*. Media Komunikasi Dunia Ilmu Sipil (MoDuluS), 6(1), 8-14.
- [2] Ibrahim, B. (1993). Rencana dan estimate Real of Cost. Jakarta: Bumi Aksara.
- [3] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2022). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat nomor 1 tahun 2022 tentang pedoman penyusunan perkiraan biaya pekerjaan konstruksi bidang pekerjaan umum dan perumahan rakyat.
- [4] Mananoma, T., Lembong, J. I., & Naseriman, A. N. (2024). Pemilihan Alternatif Jenis Pondasi Bangunan Gedung Menggunakan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP). Innovative: Journal Of Social Science Research, 4(3), 6001-6011.
- [5] Pribadi, D., Saputra, R. A., Hudin, J. M., & Gunawan. (2020). Sistem pendukung keputusan. Universitas Bina Sarana Informatika.
- [6] Razali, M. Z. I., Yahya, N. F., Ismail, T. N. H. T., & Latif, M. F. A. L. (2021). Analyzing Geotextile as Reinforcement on Road Embankment. Progress in Engineering Application and Technology, 2(2), 214-222.
- [7] Saaty, T.L. (1980) The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York.
- [8] Saputra, N. G. R., Wiraga, I. W., & Suasira, I. W. (2021). Analisis Efisiensi Biaya Perkuatan Lereng Eksisting Dari Beton Dibandingkan Dengan Metode Geotekstil (Studi Kasus: Lereng di Desa Sulangai Kecamatan Petang). In Proceedings (Vol. 9, No. 1, pp. 78-90).
- [9] Wideasanti, I., & Lenggogeni. (2013). Manajemen Konstruksi. PT Remaja Rosdakarya, Bandung.
- [10] Yang, L., Xu, W., & Li, K. (2021). Analysis of the Embankment Settlement on Soft Soil Subgrade with a

Cement Mixed Pile. *Advances in Civil Engineering*, 2021.