

## **Analisis Stabilitas dan Penanganan Alternatif Kelongsoran Lereng Galian pada Jalan Tol Padang–Sicincin**

**Marthen Riyandi Wibowo\*, Trihanyndio Rendy Satrya, Ria Asih Aryani Soemitro**

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: marthenrw@gmail.com\*, trendysatrya@its.ac.id, ria@ce.its.ac.id

---

### **Keywords:**

*stabilisasi lereng, soil nailing, secant pile, struktur portal, matriks*

---

### **Abstract**

*Slope failure in highway excavation works represents a significant geotechnical problem that may affect construction safety and long-term infrastructure performance. The Padang–Sicincin Toll Road passes through hilly terrain with soil conditions that are susceptible to instability due to slope geometry changes, soil characteristics, and groundwater effects. This study aims to identify the causes of slope failure, determine the most influential soil parameters affecting slope stability, and evaluate the most appropriate mitigation alternative for the excavation area of the Padang–Sicincin Toll Road. The research employed an analytical-comparative approach based on numerical modelling using PLAXIS 2D and manual calculation verification. Five slope stabilization alternatives were evaluated, including soil nailing, secant pile, secant pile with ground anchor, secant pile with alignment adjustment, and portal structure (box traffic). The results indicate that the slope failure was primarily caused by the combination of steep slope geometry, increased pore water pressure due to groundwater conditions, and loose sand characteristics with low internal friction angle values. All proposed alternatives satisfied the required safety factor criteria under service and seismic conditions. Based on the Simple Additive Weighting (SAW) analysis, soil nailing achieved the highest preference value of 0.97 and was selected as the most suitable stabilization method due to its technical performance, shorter construction duration, easier implementation, and more competitive construction cost. The findings provide a systematic basis for selecting effective slope stabilization strategies in similar geotechnical conditions.*

---

### **Kata Kunci:**

slope stability, soil nailing, secant pile, portal structure, matric

---

### **Abstrak**

Kelongsoran lereng pada pekerjaan galian jalan tol menjadi permasalahan geoteknik yang dapat memengaruhi keamanan konstruksi dan keberlanjutan operasional infrastruktur. Jalan Tol Padang–Sicincin memiliki kondisi topografi berbukit dengan karakteristik tanah yang berpotensi mengalami ketidakstabilan akibat perubahan geometri lereng, kondisi material tanah, dan pengaruh muka air tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi penyebab kelongsoran, menentukan parameter tanah yang berpengaruh terhadap stabilitas lereng, serta mengevaluasi alternatif penanganan yang paling sesuai pada lokasi galian Jalan Tol Padang–Sicincin. Metode penelitian menggunakan pendekatan analitis-komparatif berbasis pemodelan numerik dengan bantuan perangkat lunak PLAXIS 2D dan verifikasi perhitungan manual. Lima alternatif penanganan dianalisis, yaitu soil nailing, secant pile, secant pile dengan ground anchor, secant pile dengan penyesuaian alinyemen, dan struktur portal (box traffic). Hasil penelitian menunjukkan bahwa

penyebab utama kelongsoran adalah kombinasi kemiringan lereng yang curam, tekanan air pori akibat muka air tanah, serta karakteristik tanah loose sand dengan nilai sudut geser dalam yang rendah. Seluruh alternatif mampu memenuhi kriteria faktor keamanan desain. Berdasarkan analisis Simple Additive Weighting (SAW), metode soil nailing memperoleh nilai preferensi tertinggi sebesar 0,97 sehingga dipilih sebagai alternatif penanganan paling sesuai karena memiliki kinerja teknis, efisiensi waktu, kemudahan pelaksanaan, dan biaya konstruksi yang lebih optimal.

---

## PENDAHULUAN

Jalan Tol Padang–Sicincin merupakan salah satu infrastruktur transportasi strategis yang berperan dalam meningkatkan konektivitas antara Kota Padang dengan wilayah Sicincin dan kawasan sekitarnya. Dalam pelaksanaan pembangunannya, trase jalan tol ini melewati kondisi topografi yang beragam, mulai dari daerah relatif landai hingga kawasan perbukitan. Pada beberapa segmen yang berada di daerah berbukit, metode konstruksi yang digunakan adalah cut and fill. Kondisi ini menyebabkan adanya pekerjaan galian lereng dengan konsekuensi teknis berupa perubahan keseimbangan massa tanah alami. Dalam pelaksanaannya, pada beberapa titik di sekitar area trase ditemukan indikasi keruntuhan lereng, sehingga diperlukan evaluasi yang lebih mendalam terhadap kestabilan lereng pada lokasi galian tersebut.

Pada area galian di ruas Jalan Tol Padang–Sicincin, ditemukan indikasi keruntuhan atau kelongsoran lereng pada beberapa lokasi. Kejadian tersebut menunjukkan bahwa pekerjaan galian pada daerah berbukit memiliki potensi permasalahan geoteknik yang cukup signifikan, terutama apabila kondisi tanah, geologi, geometri lereng, dan pengaruh air tidak dianalisis secara menyeluruh. Lereng galian yang tidak stabil dapat menimbulkan dampak terhadap keselamatan konstruksi, kelancaran pelaksanaan pekerjaan, serta keberlanjutan kinerja infrastruktur jalan pada tahap operasional. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi yang lebih mendalam untuk memahami mekanisme kelongsoran yang terjadi serta menentukan bentuk penanganan yang paling sesuai.

Debris slide merupakan gerakan massa tanah atau campuran tanah dan fragmen batuan yang bergerak sebagai satu unit atau beberapa unit di sepanjang bidang planar yang curam. Bentuk kelongsoran ini umumnya berkembang secara progresif dan dalam kondisi tertentu dapat berubah menjadi debris avalanche atau flow. Hunt menjelaskan bahwa penyebab utamanya adalah meningkatnya gaya rembesan dan bertambahnya kemiringan lereng, sedangkan kejadian longsor dapat meningkat secara signifikan akibat berkurangnya atau terkelupasnya vegetasi penutup. Massa longsoran yang terlibat dapat berukuran sangat besar dengan perkembangan pergerakan yang berlangsung bertahap, namun pada kondisi tertentu kegagalan total suatu blok dapat terjadi secara tiba-tiba. Uraian tersebut menunjukkan bahwa kelongsoran lereng pada dasarnya dipengaruhi oleh interaksi antara kondisi lereng, kekuatan material, pengaruh rembesan, dan kondisi permukaan lereng. (Ray E. Hunt, 2005)

Berdasarkan pengamatan lapangan, pada beberapa area galian dijumpai singkapan berwarna coklat dengan kondisi pelapukan kuat hingga sempurna, ditumbuhi vegetasi di sekitarnya, serta menunjukkan ciri-ciri bekas longsoran. Material penyusunnya berupa massa dasar pasir lanauan dengan fragmen batu apung dan batu andesit. Secara geologi, kondisi ini mengindikasikan bahwa lokasi penelitian berada pada formasi yang dipengaruhi oleh material tuf batu apung dan andesit yang termasuk endapan piroklastik aliran. Material piroklastik pada

umumnya memiliki sifat klastik atau lepas-lepas (unconsolidated), sehingga relatif rentan mengalami gangguan kestabilan apabila dikenai pemotongan lereng, perubahan kadar air, maupun pengaruh beban luar. Karakteristik geologi tersebut menjadi salah satu dasar penting dalam mengevaluasi perilaku lereng pada area galian.

Selain aspek geologi, kondisi tanah dasar juga memegang peranan penting dalam menentukan tingkat kestabilan lereng. Berdasarkan hasil soil investigation yang telah dilakukan melalui pengujian sondir dan borlog, kondisi tanah pada area galian Jalan Tol Padang–Sicincin menunjukkan variasi lapisan dengan dominasi tanah berbutir halus dan kekuatan tanah yang bervariasi terhadap kedalaman. Pada beberapa lapisan, nilai SPT yang relatif rendah menunjukkan bahwa tanah memiliki konsistensi lunak hingga sedang. Kondisi ini dapat menyebabkan daya dukung tanah menjadi terbatas dan meningkatkan potensi deformasi maupun ketidakstabilan lereng, khususnya pada area yang mengalami galian dengan tinggi tertentu. Dengan demikian, permasalahan utama yang perlu diperhatikan tidak hanya berkaitan dengan bentuk geometrik lereng, tetapi juga dengan karakteristik parameter tanah yang memengaruhi kestabilannya.

Soil investigation yang telah dilakukan adalah uji sondir sebanyak 4 titik, serta borlog sebanyak 4 titik, dimana merujuk pada hasil yang diperoleh kondisi tanah dasar yang ada didominasi oleh tanah lempung dengan tingkat kekuatan variatif sesuai dengan lokasi dan kedalaman lapisan tanah. Nilai SPT rerata yang diperoleh pada kedalaman 2 s.d. 8 meter berkisar diangka 4 - 10, mengindikasikan bahwa Sebagian area atas tanah pada trase yang direncanakan adalah tanah lunak. Pada kondisi normal tanpa penanganan serta penyesuaian apapun, lokasi dengan konstruksi galian tinggi lebih dari 5 meter diatas tanah terkompresi biasanya memiliki stabilitas lereng. Daya dukung rendah, ketidakstabilan lereng terhadap longsoran, serta kumulatif penurunan tanah dasar yang besar adalah permasalahan yang perlu diatasi dalam tahap perencanaan ini.

Dalam basic design, geometri lereng galian pada umumnya direncanakan dengan kemiringan tertentu untuk memenuhi kebutuhan trase dan efisiensi konstruksi. Namun demikian, desain geometrik tersebut perlu diuji kembali terhadap kondisi aktual di lapangan, karena setiap lokasi galian dapat memiliki karakteristik geoteknik dan geologi yang berbeda. Pada kondisi tanah yang rentan dan material lereng yang bersifat lepas, lereng galian dapat memerlukan sistem perkuatan atau perlindungan tambahan. Beberapa metode yang umum digunakan untuk meningkatkan stabilitas lereng antara lain soil nailing, secant pile, pelapisan shotcrete, dan kombinasi penanganan. Masing-masing metode tersebut memiliki keunggulan, keterbatasan, dan tingkat kesesuaian yang berbeda-beda tergantung pada penyebab longsor, kondisi tanah, geometri lereng, serta kemudahan pelaksanaan di lapangan.

Oleh karena itu, penelitian mengenai kelongsoran lereng pada area galian Jalan Tol Padang–Sicincin menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini tidak hanya diperlukan untuk mengetahui faktor-faktor penyebab terjadinya kelongsoran, tetapi juga untuk mengidentifikasi parameter tanah yang paling berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Selanjutnya, hasil identifikasi tersebut perlu ditindaklanjuti melalui analisis beberapa alternatif desain pencegahan kelongsoran agar dapat diperoleh solusi yang memenuhi kriteria teknis serta sesuai dengan kondisi lapangan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar analisis yang lebih komprehensif dalam menentukan alternatif penanganan lereng yang paling tepat pada lokasi galian Jalan Tol Padang–Sicincin.

Tujuan dari penelitian ini adalah Mengetahui penyebab kelongsoran lereng dan parameter tanah yang paling berpengaruh pada Lokasi galian tol padang – sicincin. Menganalisis alternatif desain pencegahan kelongsoran lereng di Lokasi Jalan Tol Padang - Sicincin sesuai kriteria desain. Mendapatkan alternatif manakah yang paling tepat untuk digunakan di Lokasi tersebut

## **METODE**

Penelitian ini menggunakan pendekatan analitis-komparatif berbasis pemodelan numerik dan evaluasi multi-kriteria untuk menganalisis kestabilan lereng, mengidentifikasi penyebab kelongsoran, serta menentukan alternatif penanganan yang paling sesuai pada lokasi penelitian. Pendekatan ini dipilih karena penelitian tidak hanya bertujuan untuk mengetahui kondisi kestabilan lereng eksisting, tetapi juga untuk membandingkan beberapa alternatif penanganan berdasarkan kinerja teknis dan aspek pelaksanaan. Alternatif penanganan yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi soil nailing, secant pile, secant pile dengan ground anchor, secant pile dengan penyesuaian alinyemen, serta struktur portal berupa box traffic. Evaluasi dilakukan terhadap kondisi eksisting dan masing-masing alternatif penanganan dengan menggunakan perhitungan manual serta analisis numerik dua dimensi melalui perangkat lunak Plaxis. Hasil analisis stabilitas dari setiap alternatif kemudian dibandingkan menggunakan analisis matriks dengan metode Simple Additive Weighting (SAW), sehingga dapat diperoleh alternatif penanganan yang paling sesuai berdasarkan aspek stabilitas, biaya, waktu pelaksanaan, kemudahan metode kerja, dan keselamatan konstruksi.

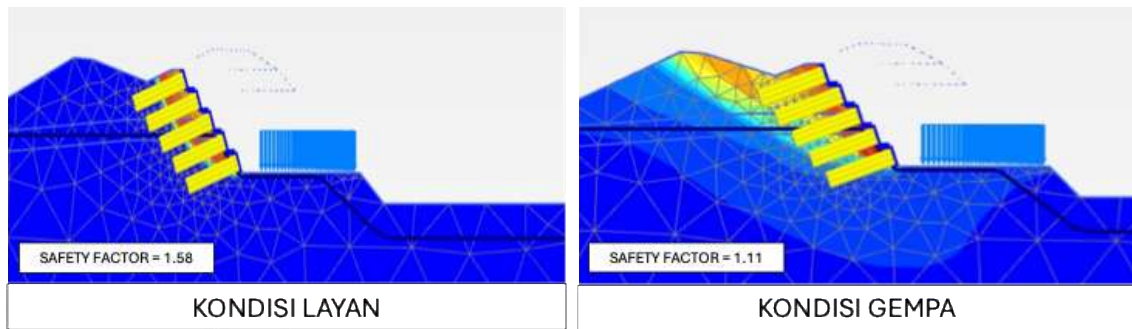
## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Cek Stabilitas pada Setiap Penanganan Alternatif**

#### **1. Cek Stabilitas Alternatif *Soil Nailing***

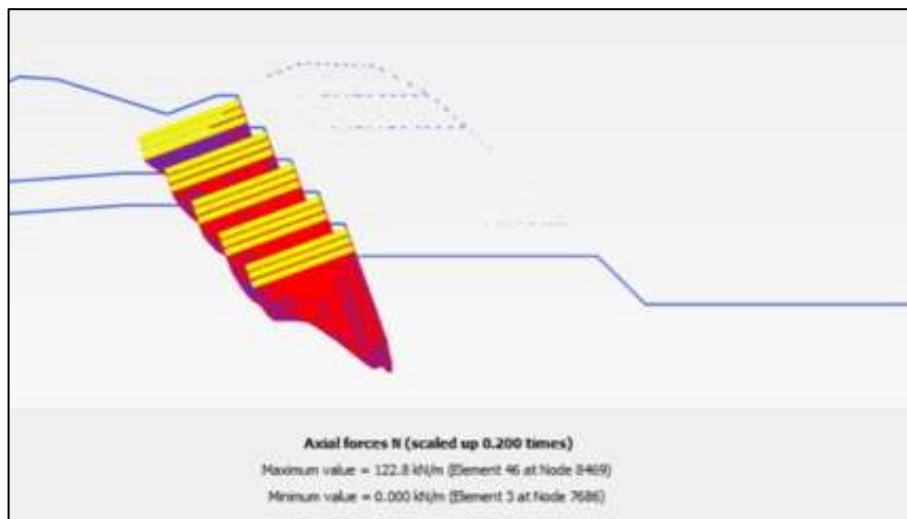
Konfigurasi soil nailing yang telah ditentukan pada tahap pemilihan pola pemasangan dan dimensi selanjutnya dianalisis untuk memastikan kemampuannya dalam memenuhi kriteria desain. Evaluasi dilakukan melalui analisis numerik menggunakan PLAXIS, pemeriksaan kapasitas internal soil nail, dan verifikasi stabilitas secara manual. Tahapan ini bertujuan untuk memperoleh desain akhir Alternatif 1 yang layak digunakan dalam perbandingan antara setiap alternatif.

Hasil analisis PLAXIS menunjukkan faktor keamanan sebesar 1,58 pada kondisi layan dengan beban lalu lintas 30 kPa dan sebesar 1,11 pada kondisi gempa. Nilai tersebut telah memenuhi kriteria minimum sebesar 1,50 untuk kondisi layan dan 1,10 untuk kondisi gempa. Dengan demikian, pemasangan soil nailing mampu meningkatkan stabilitas lereng dibandingkan kondisi galian tanpa penanganan.



**Gambar 1 Hasil pemodelan penanganan galian dengan *soil nailing* menggunakan PLAXIS**

Pemeriksaan berikutnya dilakukan terhadap kapasitas soil nail berdasarkan gaya aksial maksimum hasil pemodelan sebesar 122,8 kN/m. Pemeriksaan mencakup tahanan cabut pada bidang kontak tanah–grout dan kapasitas tarik batang baja. Hasil perhitungan menunjukkan faktor keamanan terhadap cabut sebesar 6,6, sedangkan kapasitas tarik batang masih lebih besar daripada gaya tarik yang termobilisasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa elemen soil nail memenuhi persyaratan terhadap kegagalan cabut maupun putus batang.



**Gambar 2 Hasil *axial force soil nailing* menggunakan PLAXIS**

Verifikasi stabilitas global kemudian dilakukan menggunakan metode keseimbangan batas pada bidang gelincir berbentuk busur lingkaran. Perhitungan mempertimbangkan momen penahan tanah dan kontribusi gaya tarik soil nail terhadap momen penggerak massa tanah.

Evaluasi stabilitas menggunakan kesetimbangan batas metode bidang gelincir busur lingkaran (rotational slip surface) dengan persamaan sebagai berikut:

$$FSG = \frac{1}{2} \left[ \frac{S_u \cdot R^2 \cdot \theta + (TEQ \cdot \cos \lambda) \cdot (R \cdot \cos \beta)}{W \cdot x + TEQ \cdot \sin \lambda \cdot R \cdot \sin \beta} \right]$$

**Tabel 1 Parameter Desain & Material Penanganan Galian dengan Soil Nailing**

| Parameter Desain & Material                     | Nilai Aktual           |
|-------------------------------------------------|------------------------|
| Kohesi Lapisan <i>Loose Sand</i> ( $c'$ )       | 8.7 kN/m <sup>2</sup>  |
| Kohesi Lapisan <i>Medium Sand</i> ( $c'$ )      | 9.0 kN/m <sup>2</sup>  |
| Kohesi Lapisan <i>Dense Sand</i> ( $c'$ )       | 10.0 kN/m <sup>2</sup> |
| Kuat Geser Rata-rata Sepanjang Bidang ( $S_u$ ) | 47.1 kN/m <sup>2</sup> |
| Gaya Tarik Mobilisasi Maksimum Plaxis (TEQ,max) | 122.8 kN/m             |
| Radius Bidang Gelincir (R)                      | 20.0 m                 |
| Sudut Pasang Paku / Nail ( $\lambda$ )          | 15°                    |
| Sudut Bidang Gelincir Kritis ( $\beta$ )        | 35°                    |
| Sudut Busur Lingkaran ( $\theta$ )              | 1.0 rad                |

**Tabel 2 Perhitungan Manual Faktor Keamanan Penanganan Galian dengan Soil Nailing**

| No | Komponen Analisis                                                 | Persamaan / Rumus                                    | Nilai Parameter Input                                                                         | Hasil Komputasi |
|----|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1  | Momen Penahan Tanah ( <i>M<sub>tanah</sub></i> )                  | $S_u \times R^2 \times \theta$                       | $S_u = 47.1 \text{ kN/m}^2$ ; $R = 20.0 \text{ m}$ ; $\theta = 1.0 \text{ rad}$               | 18.840 kNm/m    |
| 2  | Momen Penahan Soil Nail ( <i>M<sub>nail</sub></i> )               | $(TEQ \times \cos\lambda \times R \times \cos\beta)$ | $TEQ = 122.8 \text{ kN/m}$ ; $\lambda = 15^\circ$ ; $R = 20.0 \text{ m}$ ; $\beta = 35^\circ$ | 1.943 kNm/m     |
| 3  | Total Momen Penahan ( <i>Pembilang</i> )                          | $M_{tanah} + M_{nail}$                               | $18.840 + 1.943$                                                                              | 20.783 kNm/m    |
| 4  | Momen Penggerak Massa Tanah ( <i>M<sub>driving,tanah</sub></i> )  | $\Sigma(W_i \times x_i)$                             | Hasil integrasi pias massa tanah berat isi ( $\gamma$ ) & beban lalu lintas 30 kPa            | 12.789 kNm/m    |
| 5  | Momen Penggerak Vertikal Nail ( <i>M<sub>driving,nail</sub></i> ) | $TEQ \times \sin\lambda \times R \times \sin\beta$   | $TEQ = 122.8 \text{ kN/m}$ ; $\lambda = 15^\circ$ ; $R = 20.0 \text{ m}$ ; $\beta = 35^\circ$ | 365 kNm/m       |
| 6  | Total Momen Penggerak ( <i>Penyebut</i> )                         | $M_{driving,tanah} + M_{driving,nail}$               | $12.789 + 365$                                                                                | 13.154 kNm/m    |
| 7  | Faktor Keamanan                                                   | $M_{penahan} / M_{penggerak}$                        | $20.783 / 13.154$                                                                             | <b>1.58</b>     |

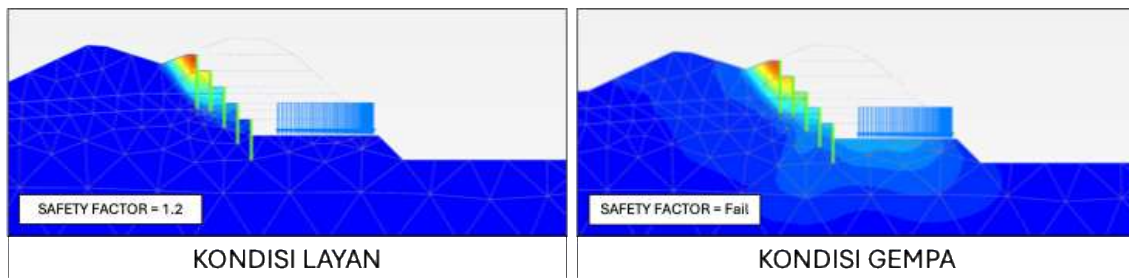
Hasil perhitungan memperoleh momen penahan sebesar 20.783 kNm/m, momen penggerak sebesar 13.154 kNm/m, dan faktor keamanan sebesar 1,58. Nilai tersebut identic dengan hasil PLAXIS pada kondisi layan.

## 2. Cek Stabilitas Alternatif *Secant Pile*

Konfigurasi *secant pile* yang telah ditentukan pada tahap pemilihan pola pemasangan dan dimensi selanjutnya dianalisis untuk memastikan kemampuannya dalam memenuhi kriteria desain. Evaluasi dilakukan melalui analisis numerik menggunakan PLAXIS, pemeriksaan kontribusi tahanan *secant pile*, dan verifikasi stabilitas secara manual. Dalam prosesnya

dilakukan penyesuaian secara *trial and error* terhadap dimensi struktur dan geometri lereng hingga diperoleh desain akhir Alternatif 2 yang memenuhi persyaratan dan dapat digunakan dalam perbandingan antara setiap alternatif.

Pada pemodelan awal digunakan *secant pile* berdiameter 1,20 m, panjang 25 m, dan jarak antartiang 1,20 m. Hasil analisis PLAXIS menunjukkan faktor keamanan kondisi layan sebesar 1,20, sedangkan pada kondisi gempa model belum mencapai kondisi stabil. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi awal belum memenuhi kriteria desain, sehingga diperlukan penyesuaian terhadap dimensi *secant pile*.

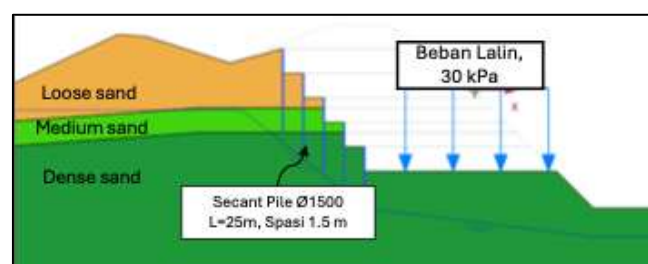


**Gambar 2 Hasil pemodelan penanganan galian dengan *secant pile* menggunakan PLAXIS**

Tahap berikutnya dilakukan dengan meningkatkan diameter *secant pile* menjadi 1,50 m dan jarak antartiang menjadi 1,50 m. Peningkatan dimensi tersebut menghasilkan faktor keamanan sebesar 1,329 pada kondisi layan dan 1,11 pada kondisi gempa. Meskipun kondisi gempa telah memenuhi batas minimum, faktor keamanan kondisi layan masih berada di bawah persyaratan sebesar 1,50.

| Parameter     | Unit                   | Pile     |
|---------------|------------------------|----------|
| Diameter      | [mm]                   | 1500     |
| Length        | [m]                    | 25       |
| Interval      | [m]                    | 1.5      |
| A             | [m <sup>2</sup> ]      | 1.77     |
| I             | [m <sup>4</sup> ]      | 0.25     |
| E             | kN/m <sup>2</sup>      | 25742960 |
| γ concrt      | kN/m <sup>3</sup>      | 24       |
| γ soil        | kN/m <sup>3</sup>      | 15       |
| Material type | [ - ]                  | Elastic  |
| EA            | [kN/m]                 | 30327710 |
| EI            | [kN/m <sup>2</sup> /m] | 4264834  |
| w             | [kN/m]                 | 10.603   |
| ν             | [ - ]                  | 0.15     |

**Gambar 3 Perhitungan Parameter Secant pile desain kedua**

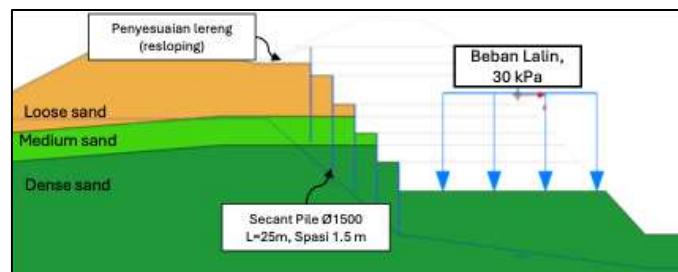


**Gambar 4 Pemodelan penanganan galian dengan *secant pile* desain kedua di PLAXIS**



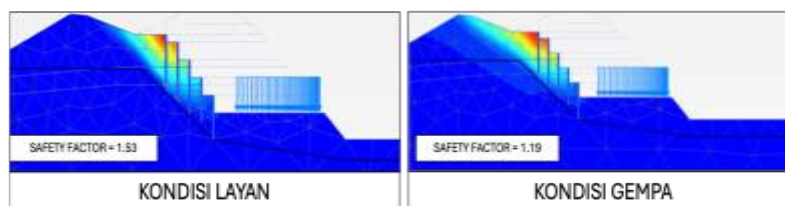
**Gambar 5 Hasil pemodelan penanganan galian dengan *secant pile* desain kedua menggunakan PLAXIS**

Penyesuaian selanjutnya dilakukan dengan mengombinasikan *secant pile* berdiameter 1,50 m dan perubahan geometri berupa *resloping* pada lereng bagian atas. Trap paling atas yang berada pada zona potensi bidang gelincir dikurangi untuk menurunkan massa tanah dan gaya penggerak. Penyesuaian pada *secant pile* itu sendiri tidak dilakukan perubahan apapun.



**Gambar 6 Pemodelan penanganan galian dengan *secant pile* desain ketiga di PLAXIS**

Hasil analisis menunjukkan faktor keamanan sebesar 1,53 pada kondisi layan dan 1,19 pada kondisi gempa. Kedua nilai tersebut telah memenuhi kriteria desain, sehingga konfigurasi ini ditetapkan sebagai desain akhir Alternatif 2.



**Gambar 7 Hasil pemodelan penanganan galian dengan *secant pile* desain ketiga menggunakan PLAXIS**

Pemeriksaan manual kemudian dilakukan untuk mengevaluasi kontribusi tahanan *secant pile* terhadap stabilitas lereng. Berdasarkan kekakuan lentur ( $EI$ ) tiang sebesar 4.264.834  $\text{kNm}^2/\text{m}$ , gaya lateral izin ( $P_{all}$ ) sebesar 320  $\text{kN/m}$ , dan lengan momen sebesar 12 m, diperoleh tambahan momen penahan struktur sebesar 3.840  $\text{kNm/m}$ .



**Tabel 3 Parameter Desain & Material Penanganan Galian dengan *Secant Pile* pada Desain Ketiga**

| No                                               | Komponen Perhitungan / Parameter           | Simbol | Nilai Perhitungan / Formula   | Keterangan / Sumber            |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------|-------------------------------|--------------------------------|
| <b>A PARAMETER TANAH (HARDING SOIL)</b>          |                                            |        |                               |                                |
| 1                                                | Kohesi Efektif ( <i>Medium Sand</i> )      | C'     | 9.0 Kn/M <sup>2</sup>         |                                |
| 2                                                | Sudut Geser Efektif ( <i>Medium Sand</i> ) | Φ'     | 38° (Tan 38° = 0.7813)        |                                |
| 3                                                | Panjang Busur Kelongsoran                  | L      | 20.94 M                       | Proyeksi Bidang Runtuh         |
| 4                                                | Gaya Normal Kumulatif Lintasan             | ΣN     | 3,800.00 Kn/M                 | Estimasi Massa Tanah           |
| <b>B PARAMETER ELEMEN STRUKTUR (SECANT PILE)</b> |                                            |        |                               |                                |
| 5                                                | Kekakuan Lentur Tiang Per Meter            | EI     | 4,264,834 Knm <sup>2</sup> /M | Data Properti Tiang Ø1500      |
| 6                                                | Gaya Geser Lateral Izin Tiang              | Pall   | 320.00 Kn/M                   | Tahanan Jepitan Pasir Padat    |
| 7                                                | Lengan Momen Tiang Ke Pusat Rotasi         | Hpile  | 12.00 M                       | Jarak Vertikal Ke Pusat Rotasi |

Verifikasi stabilitas global dilakukan dengan membandingkan jumlah momen penahan tanah dan momen penahan *secant pile* terhadap momen penggerak.

$$FS = \frac{\Sigma M_{R,tanah} + M_{pile}}{\Sigma M_D}$$

**Tabel 4 Perhitungan Manual Faktor Keamanan Penanganan Galian dengan *Secant Pile* pada Desain Ketiga**

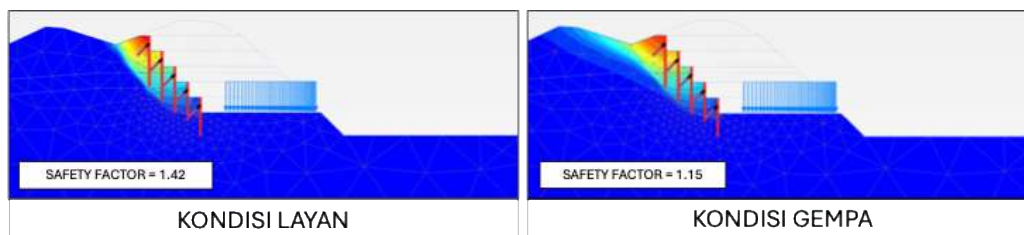
| No                                                 | Komponen Analisis            | Simbol / Rumus | Nilai Parameter Input                                                                                           | Hasil Komputasi |
|----------------------------------------------------|------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>C KESEIMBANGAN MOMEN LERENG</b>                 |                              |                |                                                                                                                 |                 |
| 8                                                  | Total Momen Penggerak Lereng | ΣMD            | Berat Tanah + Beban Lalu Lintas 30 kPa                                                                          | 4,500.00 kNm/m  |
| 9                                                  | Momen Penahan Alami Tanah    | ΣMR,tanah      | $[(c' \times L) + (\Sigma N \times \tan \phi')] \times R = [(9 \times 20.94) + (3800 \times 0.7813)] \times 20$ | 6,314.80 kNm/m  |
| 10                                                 | Momen Tahanan Struktur Tiang | Mpile          | Pall × Hpile = 320 × 12.00                                                                                      | 3,840.00 kNm/m  |
| <b>D HASIL EVALUASI AKHIR FAKTOR KEAMANAN (SF)</b> |                              |                |                                                                                                                 |                 |
| 11                                                 | SF Perhitungan Manual        | SFmanual       | $(6,314.80 + 3,840.00) / 4,500.00$                                                                              | <b>2.25</b>     |
| 12                                                 | SF Plaxis (Kondisi Layan)    | SFlayan        | Output Plaxis                                                                                                   | <b>1.53</b>     |

Hasil perhitungan memperoleh momen penahan alami tanah sebesar 6.314,80 kNm/m, momen penahan tiang sebesar 3.840 kNm/m, dan momen penggerak sebesar 4.500 kNm/m, sehingga diperoleh faktor keamanan manual sebesar 2,25. Nilai tersebut lebih tinggi daripada hasil PLAXIS sebesar 1,53 karena perhitungan manual menggunakan penyederhanaan terhadap bidang gelincir dan distribusi gaya.

### 3. Cek Stabilitas Alternatif *Secant Pile* + *Ground Anchor*

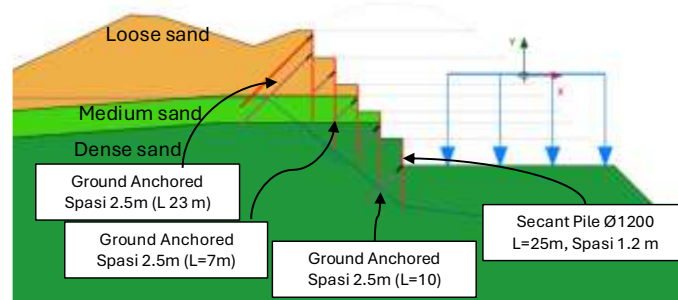
Konfigurasi *secant pile* dengan *ground anchor* yang telah ditentukan pada tahap pemilihan pola pemasangan dan dimensi selanjutnya dianalisis untuk memastikan kemampuannya dalam memenuhi kriteria desain. Evaluasi dilakukan melalui analisis numerik menggunakan PLAXIS, pemeriksaan kapasitas internal *ground anchor*, dan verifikasi stabilitas secara manual. Dalam prosesnya dilakukan penyesuaian secara *trial and error* terhadap panjang angkur hingga diperoleh desain akhir Alternatif 3 yang memenuhi persyaratan dan dapat digunakan dalam perbandingan antara setiap alternatif.

Pada pemodelan awal digunakan *secant pile* berdiameter 1,20 m, panjang 25 m, dan jarak antara tiang 1,20 m yang dikombinasikan dengan *ground anchor* sepanjang 7 m pada setiap trap dengan jarak horizontal 2,50 m.



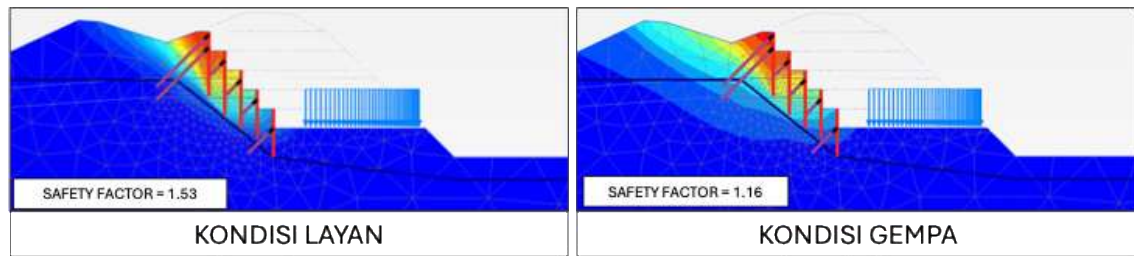
**Gambar 8 Hasil pemodelan penanganan galian dengan *secant pile* + *ground anchor* menggunakan PLAXIS**

Hasil analisis PLAXIS menunjukkan faktor keamanan sebesar 1,42 pada kondisi layan dan 1,15 pada kondisi gempa. Meskipun kondisi gempa telah memenuhi batas minimum sebesar 1,10, faktor keamanan kondisi layan masih berada di bawah kriteria sebesar 1,50 sehingga konfigurasi awal belum dapat ditetapkan sebagai desain akhir.



**Gambar 9 Pemodelan penanganan galian dengan *secant pile* + *ground* desain kedua di PLAXIS**

Penyesuaian selanjutnya dilakukan dengan membagi *ground anchor* menjadi tiga tipe. Angkur pada trap paling atas, yang berada pada zona kritis bidang gelincir, diperpanjang dari 7 m menjadi 23 m agar bagian terikatnya dapat menjangkau zona tanah yang lebih stabil. Kemudian angkur pada trap paling bawah, juga diperpanjang dari 7 m menjadi 10 m. Sementara itu, angkur pada sisa trap menggunakan panjang 7 m.



**Gambar 10 Hasil pemodelan penanganan galian dengan *secant pile* + ground desain kedua menggunakan PLAXIS**

Hasil analisis ulang menunjukkan faktor keamanan sebesar 1,53 pada kondisi layan dan 1,16 pada kondisi gempa. Kedua nilai tersebut telah memenuhi kriteria desain, sehingga konfigurasi tiga tipe *ground anchor* ditetapkan sebagai desain akhir Alternatif 3.

Pemeriksaan kapasitas *ground anchor* dilakukan berdasarkan gaya tarik maksimum hasil PLAXIS sebesar 509,30 kN yang dibulatkan menjadi 510 kN. Pemeriksaan menggunakan diameter *grout body* sebesar 0,30 m, panjang terikat 20 m, dan tahanan gesek satuan tanah–grout sebesar 65 kPa.

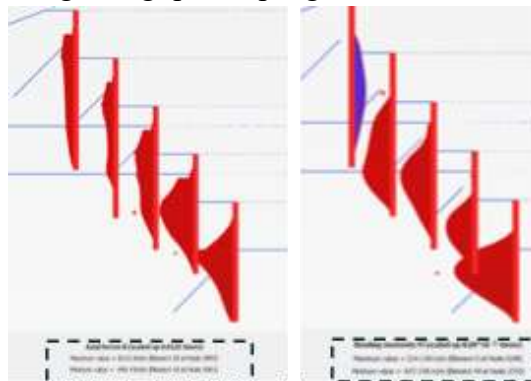
**Tabel 5 Output Gaya Element Ground Anchored dari PLAXIS**

| Structural Element                | Node | Local Number | X (m)   | Y (m)   | N (kN)  | Nmin (kN) | Nmax (kN) |
|-----------------------------------|------|--------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| NodeToNodeAnchor_1_1              | 6259 | 1            | -47.000 | 9.000   | 149.525 | -88.294   | 149.525   |
| Element 1-1 (Node-to-node anchor) | 9240 | 2            | -48.414 | 7.586   | 149.525 | -88.294   | 149.525   |
| NodeToNodeAnchor_6_1              | 7339 | 1            | -47.000 | 5.000   | 362.238 | -167.327  | 362.238   |
| Element 2-2 (Node-to-node anchor) | 9261 | 2            | -48.414 | 3.586   | 362.238 | -167.327  | 362.238   |
| NodeToNodeAnchor_2_1              | 8443 | 1            | -42.000 | 0.978   | 179.964 | -42.647   | 179.964   |
| Element 3-3 (Node-to-node anchor) | 9282 | 2            | -43.414 | -0.436  | 179.964 | -42.647   | 179.964   |
| NodeToNodeAnchor_3_1              | 7891 | 1            | -37.000 | -5.022  | 223.246 | -19.312   | 223.513   |
| Element 4-4 (Node-to-node anchor) | 9295 | 2            | -38.414 | -6.436  | 223.246 | -19.312   | 223.513   |
| NodeToNodeAnchor_4_1              | 5841 | 1            | -32.000 | -11.022 | 360.378 | -47.453   | 360.976   |
| Element 5-5 (Node-to-node anchor) | 9308 | 2            | -33.414 | -12.436 | 360.378 | -47.453   | 360.976   |
| NodeToNodeAnchor_5_1              | 2641 | 1            | -27.000 | -20.000 | 509.295 | -91.989   | 509.295   |
| Element 6-6 (Node-to-node anchor) | 9321 | 2            | -28.414 | -21.414 | 509.295 | -91.989   | 509.295   |

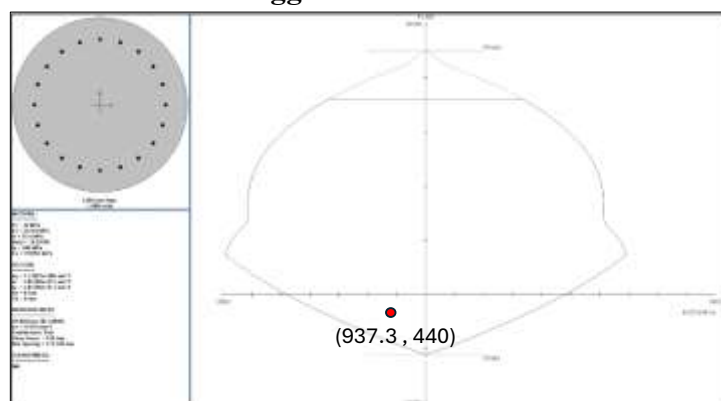
Hasil perhitungan menunjukkan kapasitas transfer beban sebesar 61 kN/m dan faktor keamanan terhadap cabut sebesar 2,40, sehingga memenuhi persyaratan kapasitas tarik keluar angkur.

Pemeriksaan terhadap putusnya tendon dilakukan menggunakan tiga batang baja berdiameter 32 mm dengan luas penampang total sebesar 2.412,7 mm<sup>2</sup> dan kapasitas tarik ultimit sebesar 1.254,6 kN. Kapasitas tarik setelah penerapan faktor reduksi diperoleh sebesar 752,8 kN, lebih besar daripada gaya desain sebesar 510 kN. Pemeriksaan terhadap beban pengujian sebesar 678,3 kN juga menunjukkan kapasitas tersedia sebesar 754,7 kN, sehingga tendon memenuhi persyaratan terhadap kondisi desain maupun pengujian.

Selain pemeriksaan angkur, dilakukan evaluasi kapasitas struktural secant pile berdiameter 1,20 m berdasarkan gaya dalam hasil PLAXIS. Nilai maksimum yang digunakan dalam pemeriksaan penampang adalah gaya aksial sebesar 440,4 kN/m dan momen lentur sebesar 937,3 kNm/m. Penampang secant pile direncanakan menggunakan beton dengan kuat tekan ( $f_c=30$ ) MPa dan pemilihan tulangan memanjang sebanyak 20 batang berdiameter 28 mm yang disusun merata mengelilingi penampang secara *trial and error*.



**Gambar 11 Hasil output gaya pemodelan *secant pile* + ground desain kedua menggunakan PLAXIS**



**Gambar 12 Pengecekan tulangan memanjang *secant pile* + ground desain kedua**

Luas tulangan memanjang yang digunakan sebesar 12.315 mm<sup>2</sup> atau setara dengan rasio tulangan 1,089%, dengan selimut beton sebesar 135 mm dan sistem konfinemen berupa tulangan ikat. Kombinasi gaya aksial dan momen lentur kemudian diperiksa menggunakan diagram interaksi penampang. Titik gaya dalam ( $M=937,3$  kNm/m;  $P=440,4$  kN/m) masih berada di dalam kurva kapasitas, sehingga penampang dan pendetailan tulangan secant pile dinyatakan memenuhi kapasitas terhadap kombinasi gaya aksial dan lentur.

Verifikasi stabilitas global kemudian dilakukan dengan memperhitungkan momen penahan dari kuat geser tanah, *ground anchor*, dan *secant pile*. Hasil perhitungan memperoleh momen penggerak sebesar 14.654 kNm/m, momen penahan tanah sebesar 14.068 kNm/m, kontribusi momen penahan *ground anchor* sebesar 14.778 kNm/m, dan kontribusi *secant pile* sebesar 6.420 kNm/m. Total momen penahan sebesar 35.266 kNm/m menghasilkan faktor keamanan manual sebesar 2,41.

**Tabel 6 Parameter Desain & Material Penanganan Galian dengan *Secant Pile* + *Ground* Desain Kedua**

| Elemen Perkuatan          | Parameter Kunci                              | Nilai Batas Rencana              | Satuan              |
|---------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Ground Anchor<br>(Revisi) | Allowable Tensile Force (Tall)               | 510.0                            | kN/unit             |
|                           | Gaya Desain per Meter Lari (Tall / Lspacing) | 204.0 (Spasi horizontal = 2.5 m) | kN/m'               |
| Secant Pile               | Diameter (D) / Panjang Efektif (L)           | 1.2 / 25.0                       | meter (m)           |
|                           | Kekakuan Lentur Ekuivalen (EI)               | $2.184 \times 10^6$              | kNm <sup>2</sup> /m |

**Tabel 7 Perhitungan Manual Faktor Keamanan Penanganan Galian dengan *Secant Pile* + *Ground* Desain Kedua**

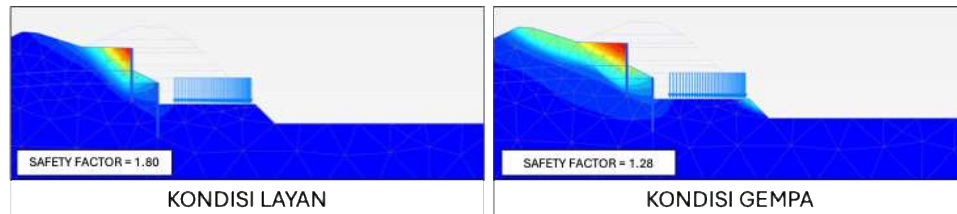
| No. | Komponen Analisis                                               | Formula / Pendekatan Teoretis                                                      | Nilai Input Parameter Aktual                                                                                                                    | Hasil Momen (kNm/m) |
|-----|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1   | Massa Tanah Longsor (MD)                                        | $W \times x$ (Momen Penggerak Lereng)                                              | $W = 2.580 \text{ kN/m} \times 5,68 \text{ m}$                                                                                                  | 14.654              |
| 2   | Kuat Geser Tanah Alami (MR,tanah)                               | $SF_{\text{alami}} \times MD$ (Momen Tahanan Internal)                             | $SF_{\text{alami}} = 0,96$<br>$MD = 14.654 \text{ kNm/m}$                                                                                       | 14.068              |
| 3   | <i>Ground Anchor</i> (MR,anchor)                                | $n \times [\text{Tall-meter} \times \cos(\alpha) \times R]$ (Gaya Tarik Eksternal) | $n = 5$ baris<br>$\text{Tall} = 510 \text{ kNs}$<br>$= 2,5 \text{ m} \rightarrow 204 \text{ kN/m}$<br>$\alpha = 15^\circ$<br>$R = 15 \text{ m}$ | 14.778              |
| 4   | <i>Secant Pile</i> (MR,pile)                                    | Teori Tiang Kaku Broms (Tahanan Pasif Lateral)                                     | Diameter = 1,2 m<br>$L = 25 \text{ m}$<br>Jepitan pada Dense Sand<br>$c' = 10 \text{ kPa}$ ; $\phi' = 41^\circ$                                 | 6.420               |
|     | Total Momen Penahan (MR,Total = MR,tanah + MR,anchor + MR,pile) |                                                                                    |                                                                                                                                                 | 35.266              |
|     | Faktor Keamanan Batas Manual (SF = MR,Total / MD)               |                                                                                    |                                                                                                                                                 | 2,41                |

Berdasarkan seluruh evaluasi tersebut, konfigurasi *secant pile* dengan tiga tipe panjang *ground anchor* dinyatakan memenuhi kriteria stabilitas dan selanjutnya digunakan dalam tahap analisis matriks.

#### 4. Cek Stabilitas Alternatif *Secant Pile* dengan Penyesuaian Alinyemen

Konfigurasi *secant pile* dengan penyesuaian alinyemen yang telah ditentukan pada tahap pemilihan pola pemasangan dan dimensi selanjutnya dianalisis untuk memastikan kemampuannya dalam memenuhi kriteria desain. Evaluasi dilakukan melalui analisis numerik menggunakan PLAXIS, pemeriksaan kapasitas struktural *secant pile*, dan verifikasi stabilitas

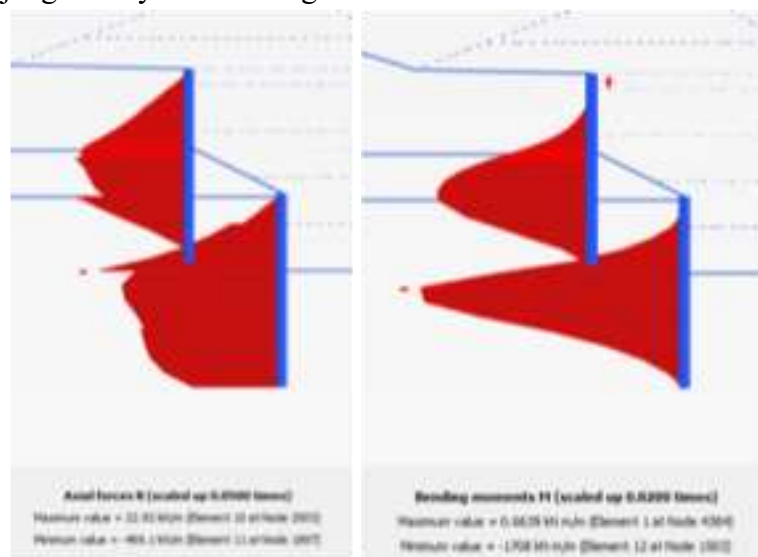
secara manual. Pemodelan menggunakan *secant pile* berdiameter 1,50 m, panjang 25 m, dan jarak antartiang 2,25 m. Penyesuaian alinyemen dilakukan untuk mengurangi tinggi dan massa tanah pada area galian, sehingga gaya penggerak yang bekerja pada lereng dapat dikurangi. Analisis juga memperhitungkan beban lalu lintas sebesar 30 kPa pada area jalan.



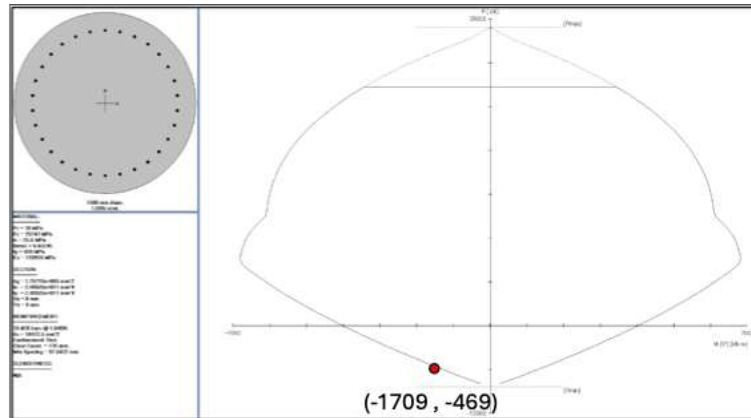
**Gambar 13 Hasil pemodelan penanganan galian dengan *secant pile* dengan penyesuaian alinyemen menggunakan PLAXIS**

Hasil analisis PLAXIS menunjukkan faktor keamanan sebesar 1,80 pada kondisi layan dan 1,28 pada kondisi gempa. Nilai tersebut telah memenuhi kriteria minimum sebesar 1,50 untuk kondisi layan dan 1,10 untuk kondisi gempa. Dengan demikian, kombinasi penyesuaian alinyemen dan pemasangan *secant pile* dapat langsung ditetapkan sebagai konfigurasi akhir Alternatif 4.

Selanjutnya dilakukan pemeriksaan kapasitas struktural *secant pile* berdasarkan gaya dalam hasil PLAXIS. Nilai kritis yang digunakan dalam pemeriksaan penampang adalah gaya aksial sebesar 469,1 kN/m dan momen lentur sebesar 1.708 kNm/m. Penampang *secant pile* berdiameter 1,50 m direncanakan menggunakan beton dengan kuat tekan ( $f_c=30$ ) MPa dan tulangan memanjang sebanyak 30 batang berdiameter 28 mm.



**Gambar 14 Hasil output gaya pemodelan *secant pile* dengan penyesuaian alinyemen menggunakan PLAXIS**



**Gambar 15 Pengecekan tulangan memanjang *secant pile* dengan penyesuaian alinyemen**

Luas tulangan memanjang yang digunakan sebesar 18.472,5 mm<sup>2</sup> atau setara dengan rasio tulangan 1,045%, dengan selimut beton sebesar 135 mm dan sistem konfinemen berupa tulangan ikat. Pemeriksaan menggunakan diagram interaksi gaya aksial dan momen menunjukkan bahwa titik gaya dalam (M=-1.709 kNm/m}; P=-469 kN/m) masih berada di dalam kurva kapasitas penampang. Dengan demikian, dimensi dan pendetailan tulangan *secant pile* memenuhi kapasitas terhadap kombinasi gaya aksial dan lentur.

Verifikasi stabilitas global kemudian dilakukan dengan metode keseimbangan momen.

- Kekakuan Lentur Tiang (EI) = 2,843x10<sup>6</sup> kNm<sup>2</sup>/m
- Beban Layan (q) = 30,00 kPa
- Radius Gelincir rata-rata (R) = 15,00 m
- Panjang Busur (L) = 22,00 m
- Estimas Berat Masa Tanah (W<sub>total</sub>) = 1340 kN/m

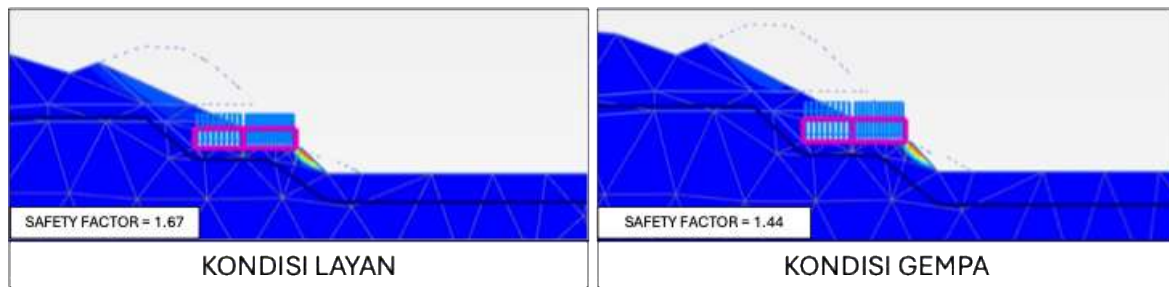
$$FS = \frac{\Sigma M_{R,tanah} + M_{pile}}{\Sigma M_D}$$

Kontribusi kuat geser alami tanah menghasilkan momen penahan sebesar 15.834 kNm/m, sedangkan kontribusi tahanan *secant pile* menghasilkan tambahan momen penahan sebesar 3.100 kNm/m. Total momen penahan sebesar 18.934 kNm/m menghasilkan faktor keamanan manual sebesar 2,17.

Nilai faktor keamanan manual lebih tinggi daripada hasil PLAXIS sebesar 1,80. Berdasarkan seluruh evaluasi tersebut, Alternatif 4 dinyatakan memenuhi kriteria stabilitas dan kapasitas struktural, serta dapat digunakan dalam tahap analisis matriks.

### **5. Cek Stabilitas Alternatif Struktur Portal (*Box Traffic*)**

Konfigurasi struktur beton (*box traffic*) dianalisis menggunakan PLAXIS untuk memastikan pemenuhan kriteria stabilitas. Hasil analisis menunjukkan faktor keamanan sebesar 1,67 pada kondisi layan dan 1,44 pada kondisi gempa. Nilai tersebut telah memenuhi kriteria minimum sebesar 1,50 untuk kondisi layan dan 1,10 untuk kondisi gempa, sehingga tidak diperlukan perubahan terhadap konfigurasi awal.



**Gambar 16 Hasil pemodelan penanganan galian dengan struktur beton (*box traffic*) menggunakan PLAXIS**

Verifikasi stabilitas selanjutnya dilakukan melalui perhitungan manual dengan memperhitungkan tahanan geser tanah dan tahanan pada dasar struktur. Hasil perhitungan menghasilkan faktor keamanan sebesar 2,54. Nilai tersebut lebih tinggi daripada hasil PLAXIS karena perhitungan manual menggunakan penyederhanaan terhadap bidang gelincir dan mobilisasi tahanan struktur. Oleh karena itu, hasil PLAXIS tetap digunakan sebagai acuan utama, sedangkan perhitungan manual digunakan untuk memeriksa kewajaran hasil analisis.

- Berat isi tanah jenuh ( $\gamma_{\text{sat}}$ ) = 19,0 kN/m<sup>3</sup>
- Kohesi ( $c'$ ) = 10,0 kPa
- Sudut geser ( $\phi$ ) = 41 derajat
- Lebar tapak pondasi dasar (B) = 34,0 meter
- Berat mati *box traffic* ( $W_{\text{box}}$ ) = 2.042,5 kN/m

Perhitungan gaya tahanan kontak dasar struktur ( $R_{\text{box}}$ ), dengan sudut geser sebesar 41 derajat, nilai friksi mekanis antara pelat dasar beton massif dan lapisan tanah pasir mengalami kenaikan massif:

$$R_{\text{box}} = W_{\text{box}} \cdot \tan(\phi') + c' \cdot B$$

$$R_{\text{box}} = 2042,5 \cdot \tan(41^\circ) + 10,0 \cdot 34,0$$

$$R_{\text{box}} = 2115,5 \text{ kN/m}$$

Melalui parameter penahan dasar tanah keras pada  $\phi' = 41$  derajat dan  $c' = 10,0$  kPa, total gaya geser tanah dihitung ulang sebagai berikut :

**Tabel 8 Perhitungan Tahanan Tanah Geser**

| No. Irisan       | Berat, W (kN/m) | Sudut, $\alpha$ (°) | Panjang, l (m) | $W \times \sin \alpha$ (Pendorong) | $W \times \cos \alpha$ (Normal) | $c' \times l + W \cos \alpha \times \tan(41^\circ)$ (Tahanan Geser) |
|------------------|-----------------|---------------------|----------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1                | 450             | 52                  | 5,2            | 354,6                              | 277,0                           | 52,0 + 240,8 = 292,8                                                |
| 2                | 820             | 38                  | 5,7            | 504,8                              | 646,2                           | 57,0 + 561,7 = 618,7                                                |
| 3                | 1100            | 24                  | 5,5            | 447,4                              | 1005,0                          | 55,0 + 873,6 = 928,6                                                |
| 4                | 650             | 10                  | 4,1            | 112,9                              | 640,1                           | 41,0 + 556,4 = 597,4                                                |
| 5                | 280             | -5                  | 3,0            | -24,4                              | 278,9                           | 30,0 + 242,4 = 272,4                                                |
| $\Sigma$ (Total) | 3300            | -                   | 23,5           | 1395,3 kN/m                        | 2847,2 kN/m                     | 2709,9 kN/m                                                         |

Perhitungan nilai faktor keamanan (safety factor) secara manual, sebagai berikut:

- Kondisi alami tanah tanpa struktur box



$$SF_{tanah} = \frac{\Sigma[Tahanan Geser]}{\Sigma[Pendorong]}$$

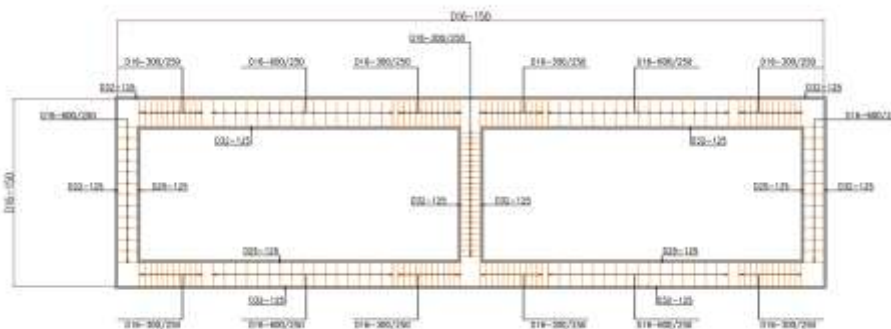
$$SF_{tanah} = \frac{2709,9}{1395,3} = 1,94$$

- b. Memasukkan gaya jepit tahanan geser dasar pondasi *box* ( $R_{box} = 2115,5 \text{ kN/m}$ ) dengan faktor efisiensi distribusi keruntuhan busur sisa sebesar 40%:

$$SF_{final} = \frac{\Sigma R_{tanah} + (0,40 \cdot R_{box})}{\Sigma(W \cdot \sin \alpha)}$$

$$SF_{final} = \frac{2709,9 + (0,40 \cdot 2115,5)}{1395,3} = 2,54$$

Pelat atas direncanakan setebal 1,70 m dengan tulangan utama D32-125, sedangkan pelat bawah setebal 1,50 m menggunakan tulangan D32-125 dan D25-125. Dinding tengah dan dinding sisi direncanakan setebal 1,30 m dengan kombinasi tulangan D32-125 dan D25-125. Tulangan geser digunakan D16 dengan spasi 300–250 mm.



**Gambar 17 Sketsa penulangan struktur box (*Box Traffic*)**

### **Matriks Pengambilan Keputusan dengan Metode Simple Additive Weighting (SAW)**

Setelah seluruh alternatif penanganan dianalisis dan dinyatakan memenuhi kriteria faktor keamanan, tahapan berikutnya adalah menentukan penanganan alternatif yang paling sesuai untuk diterapkan pada lokasi penelitian. Pemilihan dilakukan menggunakan metode *Simple Additive Weighting* (SAW) sebagai alat bantu pengambilan keputusan multikriteria.

Metode ini digunakan agar proses pemilihan tidak hanya didasarkan pada satu aspek, tetapi mempertimbangkan kinerja teknis dan aspek pelaksanaan secara sistematis, objektif, dan terukur. Alternatif yang dibandingkan meliputi penanganan alternatif 1 (satu) dengan *soil nailing*, penanganan alternatif 2 (dua) dengan *secant pile*, penanganan alternatif 3 (tiga) dengan *secant pile* dengan *ground anchor*, penanganan alternatif 4 (empat) dengan *secant pile* dengan penyesuaian alinyemen, dan penanganan alternatif 5 (lima) dengan struktur beton (*box traffic*).

#### **1. Menentukan Kriteria – Kriteria Aspek Keputusan/Penilaian**

Langkah pertama adalah menetapkan kriteria yang digunakan sebagai dasar penilaian terhadap setiap alternatif. Dalam penelitian ini digunakan lima kriteria, yaitu aspek kesesuaian desain sebagai C1, aspek sumber daya sebagai C2, aspek pelaksanaan sebagai C3, aspek waktu sebagai C4, dan aspek biaya sebagai C5.

Kriteria kesesuaian desain digunakan untuk menilai kemampuan setiap alternatif dalam memenuhi persyaratan stabilitas dan kondisi desain. Aspek sumber daya mempertimbangkan kebutuhan material dan peralatan. Aspek pelaksanaan menilai tingkat kemudahan metode

kerja, kebutuhan akses, serta ketergantungan terhadap urutan pekerjaan. Sementara itu, aspek waktu dan biaya digunakan untuk menilai efisiensi pelaksanaan setiap alternatif.

**Tabel 9 Kriteria Aspek Keputusan/Penilaian**

| Kriteria | Nama Kriteria           | Jenis Kriteria | Penjelasan Kriteria                                                                                                    |
|----------|-------------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C1       | Aspek Kesesuaian Desain | Benefit        | Semakin sedikit catatan dan monitor pada masa layan terhadap kesesuaian desain dengan kondisi medan maka semakin baik. |
| C2       | Aspek Sumberdaya        | Benefit        | Semakin sedikit sumberdaya material dan alat yang digunakan maka semakin baik.                                         |
| C3       | Aspek Pelaksanaan       | Benefit        | Semakin simpel pelaksanaan maka semakin baik.                                                                          |
| C4       | Aspek Waktu             | Benefit        | Semakin kecil waktu penyelesaian penanganan alternatif maka semakin baik.                                              |
| C5       | Aspek Biaya             | Cost           | Semakin kecil biaya suatu penanganan alternatif maka semakin baik.                                                     |

Dengan kriteria tersebut, pemilihan alternatif tidak hanya didasarkan pada kemampuan teknis dalam meningkatkan stabilitas lereng, tetapi juga mempertimbangkan kelayakan dan efisiensi pelaksanaannya di lapangan.

## 2. Menentukan Bobot untuk Masing – Masing Aspek Keputusan/Penilaian

Langkah kedua adalah menentukan bobot masing-masing kriteria sesuai dengan tingkat kepentingannya dalam penelitian. Semakin besar bobot yang diberikan, semakin besar pula pengaruh kriteria tersebut terhadap hasil akhir pemilihan alternatif.

Aspek kesesuaian desain, aspek pelaksanaan, dan aspek waktu masing-masing diberikan bobot sebesar 25 persen karena dinilai memiliki pengaruh utama terhadap keberhasilan penanganan lereng. Aspek sumber daya diberikan bobot sebesar 15 persen, sedangkan aspek biaya diberikan bobot sebesar 10 persen. Total keseluruhan bobot adalah 100 persen. Pertimbangan besaran bobot berdasarkan penentuan prioritas, penentuan prioritas mengacu kepada tujuan dan tingkat *urgency* proyek Pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera Ruas Padang – Sicincin. Dimana tujuan tersebut adalah agar jalan tol tersebut dapat diselesaikan secepat mungkin dan minor perbaikan pada saat masa pemeliharaan maupun operasional.

$$\text{Bobot} = \frac{\text{Prioritas Setiap Kriteria}}{\text{Total Prioritas}}$$

**Tabel 10 Bobot Aspek Keputusan/Penilaian**

| Kriteria     | Nama Kriteria           | Prioritas    | Bobot          |
|--------------|-------------------------|--------------|----------------|
| C1           | Aspek Kesesuaian Desain | 5,00         | 25,00%         |
| C2           | Aspek Sumberdaya        | 3,00         | 15,00%         |
| C3           | Aspek Pelaksanaan       | 5,00         | 25,00%         |
| C4           | Aspek Waktu             | 5,00         | 25,00%         |
| C5           | Aspek Biaya             | 2,00         | 10,00%         |
| <b>Total</b> |                         | <b>20,00</b> | <b>100,00%</b> |

### 3. Melakukan Normalisasi

Langkah keempat adalah melakukan normalisasi atau penyetaraan nilai pada matriks keputusan. Normalisasi diperlukan karena masing-masing kriteria memiliki karakteristik dan rentang penilaian yang berbeda. Melalui tahapan ini, seluruh nilai diubah ke dalam skala yang sama sehingga dapat dibandingkan secara langsung.

Untuk kriteria yang bersifat benefit, yaitu semakin besar nilainya semakin baik, normalisasi dilakukan dengan membagi nilai setiap alternatif dengan nilai terbesar pada kriteria tersebut. Sementara itu, untuk kriteria yang bersifat cost, yaitu semakin kecil nilainya semakin baik, normalisasi dilakukan dengan membagi nilai terkecil dengan nilai setiap alternatif.

**Tabel 11 Rekap Normalisasi Pada Masing Masing Kriteria**

| Alternatif (A) | C1   | C2   | C3   | C4   | C5   |
|----------------|------|------|------|------|------|
| Alternatif 1   | 1,00 | 0,80 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Alternatif 2   | 1,00 | 1,00 | 0,60 | 0,60 | 0,67 |
| Alternatif 3   | 1,00 | 0,40 | 0,40 | 0,20 | 0,40 |
| Alternatif 4   | 1,00 | 1,00 | 0,60 | 0,80 | 0,67 |
| Alternatif 5   | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,60 | 1,00 |

Hasil normalisasi berupa nilai antara nol sampai satu. Nilai yang semakin mendekati satu menunjukkan bahwa alternatif tersebut memiliki kinerja yang semakin baik pada kriteria yang sedang dinilai. Dengan demikian, seluruh alternatif telah berada dalam satu skala penilaian yang sama dan dapat dilanjutkan ke perhitungan nilai preferensi.

### 4. Menghitung Nilai – Nilai Preferensi dan Menentukan Penanganan Alternatif Terpilih

Langkah kelima adalah menghitung nilai preferensi sekaligus menentukan peringkat setiap alternatif. Perhitungan dilakukan dengan mengalikan nilai hasil normalisasi dengan bobot masing-masing kriteria, kemudian menjumlahkan seluruh hasil perkalian tersebut.

Nilai preferensi menunjukkan kinerja gabungan setiap alternatif berdasarkan aspek kesesuaian desain, kebutuhan sumber daya, kemudahan pelaksanaan, waktu pekerjaan, dan biaya. Semakin besar nilai preferensi yang diperoleh, semakin baik kinerja alternatif tersebut berdasarkan keseluruhan kriteria penilaian.

$$\text{Nilai Preferensi} = \text{Nilai Normalisasi} \times \text{Bobot}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa Alternatif 1 memperoleh nilai preferensi sebesar 0,97 dan menempati peringkat pertama. Selanjutnya, Alternatif 5 memperoleh nilai 0,90, Alternatif 4 sebesar 0,82, Alternatif 2 sebesar 0,77, dan Alternatif 3 sebesar 0,50.

**Tabel 12 Tabel Rekap Nilai Preferensi Serta Peringkat Penanganan Alternatif**

| Alternatif (A) | C1   | C2   | C3   | C4   | C5   | Jumlah (V) | Peringkat |
|----------------|------|------|------|------|------|------------|-----------|
| Alternatif 1   | 0,25 | 0,12 | 0,25 | 0,25 | 0,10 | 0,97       | 1         |
| Alternatif 2   | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,07 | 0,77       | 4         |
| Alternatif 3   | 0,25 | 0,06 | 0,10 | 0,05 | 0,04 | 0,50       | 5         |
| Alternatif 4   | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,20 | 0,07 | 0,82       | 3         |
| Alternatif 5   | 0,25 | 0,15 | 0,25 | 0,15 | 0,10 | 0,90       | 2         |

Dengan demikian, Alternatif 1 berupa penanganan menggunakan metode soil nailing dipilih sebagai alternatif yang paling sesuai untuk diterapkan pada lokasi penelitian. Pemilihan ini didasarkan pada nilai kinerja gabungan tertinggi dibandingkan alternatif lainnya, terutama dalam aspek kesesuaian desain, kemudahan pelaksanaan, efisiensi waktu, serta biaya konstruksi.

Melalui metode SAW, seluruh alternatif dapat dibandingkan dalam satu sistem penilaian yang menggabungkan aspek teknis dan nonteknis. Tahapan penetapan kriteria, pembobotan, pemberian skor, normalisasi, perhitungan nilai preferensi, dan penyusunan peringkat memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih sistematis, rasional, dan terukur. Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa soil nailing merupakan alternatif penanganan yang paling sesuai untuk kondisi lokasi penelitian

## **KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kelongsoran lereng galian pada Jalan Tol Padang–Sicincin terjadi pada lapisan loose sand akibat kombinasi geometri lereng yang terlalu curam, keberadaan muka air tanah yang meningkatkan tekanan air pori, serta berkurangnya dukungan lateral akibat proses penggalian. Parameter tanah yang paling berpengaruh terhadap kestabilan lereng adalah sudut geser dalam (friction angle) pada lapisan loose sand, sementara muka air tanah berperan sebagai faktor pemicu yang meningkatkan potensi terjadinya kelongsoran. Analisis terhadap lima alternatif penanganan menggunakan PLAXIS 2D dan perhitungan manual menunjukkan bahwa seluruh alternatif telah memenuhi kriteria desain dengan faktor keamanan lebih besar dari 1,50 pada kondisi layan dan lebih besar dari 1,10 pada kondisi gempa. Berdasarkan metode Simple Additive Weighting (SAW), alternatif penanganan menggunakan soil nailing memperoleh nilai preferensi tertinggi sebesar 0,97 sehingga dipilih sebagai solusi yang paling sesuai karena mampu memenuhi persyaratan teknis, relatif mudah dilaksanakan, memiliki waktu pelaksanaan yang lebih singkat, serta biaya yang lebih kompetitif dibandingkan alternatif lainnya. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menggunakan data penyelidikan tanah yang lebih lengkap, khususnya parameter kekakuan tanah, serta mengembangkan analisis dengan mempertimbangkan variasi muka air tanah, parameter kuat geser, dan tahapan penggalian guna memperoleh evaluasi kestabilan lereng yang lebih komprehensif.

## **REFERENSI**

- Ravindra B., and R.P. Arora (2016), "Soil Nailing For Slope Stabilization: An Overview", IJESC, Vol.6 Issue No. 12
- Bayu P. U., dan Hanindya K. A. (2016), "Analisis Stabilisasi Lereng Dengan Perkuatan Soil Nailing Menggunakan Program Geoslope (Studi Kasus: Dusun Gemawang, Desa Sinduadi, Kecamatan Mlati, Kabupaten Sleman D.I Yogyakarta)", UII, Yogyakarta
- Azmi A. I. (2024), "Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan Soil Nailing Menggunakan Program Plaxis2D V20 (Studi Kasus: Tebing Cibeureum, Kabupaten Cianjur)", UII, Yogyakarta

- Irshad K., Afayou, Naeem A., Asghar K., Numam A., and Kausar S. S. (2024), "Enhanced Geotechnical Methods for Evaluating Slope Stability in Unconsolidated Strata: A Comprehensive Analysis", *Journal of Mining and Environment*, Vol.15, No.3, 991-1010
- C.-X.Guo., J.-W.Zhou, P. Cui, M.-Hao, and F.-G. Xu. (2014), "A Heoretical Model For The Initiation Of Debris Flow In Unconsolidated Soil Under Hydrodynamic Conditions", *NNat. Hazards Eartg Syst. Sci. Discuss.*, 2, 4487-4524
- Amit P., and Mousumu M. (2010), "Soil Nailing For Stabilization of Steep Slopes Near Railway Tracks", *Indian Institute of Technology Kanpur, India*
- Pankaj S., Saurabh R. , and Ashok K. G. (2018), "Soil Nailing For Stabilization of Steep Slopes Near Railway Tracks", *Indian Geotechnical Journal*, DOI 10.007/s40098-018-0343-1
- Shamontee A. (2020), "Remediation of Rainfall Induced Landslide in Hills Of Bangladesh Using Vegetation and Nailing", *Bangladesh University of Engineering and Technology, Bangladesh*
- Virgiawan A. (2018), "Studi Stabilitas Secant Pile Sebagai Retaining Wall dengan Perkuatan Ground Anchor pada Proyek Grand Dharmahusada Lagoon – Olive Tower Surabaya", *Universitas Muhammadiyah Jember, Jember*
- U.C Sari, M. N. Sholeh. , and I. Hermanto. (2020), "The Stability Analysis study of Conventional Retaining Wall Variation Design in Vertical Slope", *IOP Publishing*, DOI 10.1088/1742-6596/1444/1/012053
- Lusmeilia, A. (2022), *Kerawanan Longsor Pada Lereng Tanah Lunak dan Penanganannya, Lakeisha, Bandar Lampung*
- Ausilio, E. dkk (2001), "Stability analysis of slopes reinforced with piles", *Computers and Geotechnics*, Vol. 28, Hal. 591-611
- Herryal, Z.A dan Saiman, K. (1991), "Konstruksi Jalan Di Daerah Pegunungan Tropis", *Pertemuan Ilmiah Tahunan ke-20, Jakarta*
- Arisona, dkk. (2025), "Studi kajian literature: Analisis Kestabilan Tanah Lereng Area Rawan Longsor di Indonesia", *Einstein's: Research Journal of Applied Physics*, Vol. 3, No. 1
- Fakhili G., and Fricles A S (2022), "Analisis Perbandingan Metode SAW dengan AHP Dalam Pemilihan Supervisor Pada The Batik Hotel", *SAINTEK*, Vol.3 No. 2