*Indonesian Journal of Civil Engineering Study*
**Universitas Semarang**
E-ISSN: 3110-0376
**Journal homepage: https://journals.usm.ac.id/index.php/ijces**

# Analisis Stabilitas dan Alternatif Perkuatan Lereng Menggunakan Metode Fellenius dan Plaxis 2D pada Kawasan Perumahan Semarang Sky City, Kota Semarang

**Wahyu Aji Saputra [a]*, Ronald Kurniawan [b], Adolf Situmorang [c], Hendra Masvika [d]**
[a, b, c, d] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Semarang, Jl. Soekarno-Hatta, Tlogosari, Semarang
**Corresponding author, e*mail: wahyuajiv@gmail.com

**ARTICLE INFO**

***Article history:***
*Received December 18, 2025*
*Revised October21, 2026*
*Accepted October 23, 2026*
*Available online October 23, 2026*

***Keywords:***
*Slope stability*
*Safety factor*
*Fellenius method*
*Plaxis 2D*
*Geotechnical engineering*

**ABSTRACT**

*Slope instability in hillside residential areas threatens buildings, infrastructure, and residents, particularly where steep cuts are made in fine-grained soils. This study evaluates the stability of an existing cut slope, approximately 10 m high and inclined at about 60°, in the Semarang Sky City residential area, Semarang City, Indonesia, and assesses two remedial alternatives. Soil parameters were obtained from hand-auger sampling at three points and laboratory tests of physical properties, Atterberg limits, grain size, and direct shear strength. The safety factor was calculated manually with the Fellenius limit equilibrium method and numerically with the strength reduction technique in Plaxis 2D using the Mohr–Coulomb model. The soils are fine-grained with low plasticity, a cohesion of 0.75–7.07 kPa, and a friction angle of 13.4°–32.4°. Without traffic load, the Fellenius method gave a safety factor of 1.547, marginally above the minimum of 1.5 for permanent slopes, whereas Plaxis 2D, which included a groundwater table at 3 m depth, gave 1.414. Under a 10 kN/m² traffic surcharge on the crest, the numerical model collapsed. Strengthening with 20 cm shotcrete raised the safety factor to 1.679, and a combination of D60 secant piles and D60 bored piles raised it to 1.652; both satisfy the 1.5 criterion, and the shotcrete alternative produced the smaller vertical displacement. The results indicate that the existing slope is not safe for the planned road and requires strengthening before the road is built.*

*© 2026 IJCES. Publishing Services by Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Semarang.*

## 1. Pendahuluan

Pengembangan kawasan permukiman di wilayah perbukitan Kota Semarang, khususnya Kecamatan Tembalang, banyak dilakukan dengan memotong lereng untuk memperoleh lahan datar bagi kavling dan jalan lingkungan. Pemotongan tersebut mengubah geometri dan kondisi tegangan dalam massa tanah sehingga gaya penggerak bertambah, sementara kuat geser tanah tidak ikut meningkat. Pada musim hujan, kenaikan tekanan air pori menurunkan tegangan efektif dan kuat geser tanah, sehingga lereng yang semula stabil dapat mengalami kelongsoran (Hardiyatmo, 2003; Mina dkk., 2022). Kelongsoran pada lereng di kawasan permukiman berisiko merusak bangunan dan prasarana di sekitarnya serta mengancam keselamatan penghuni.

Perumahan Semarang Sky City di Kecamatan Tembalang memiliki lereng galian di sisi timur kawasan dengan tinggi sekitar 10 m dan kemiringan mendekati 60°. Di kaki lereng mengalir sungai, sedangkan di bagian atasnya direncanakan jalan lingkungan sebagai akses permukiman. Lereng ini pernah mengalami

This is an open acces article under the CC BY-NC license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

kelongsoran dalam beberapa tahun terakhir, sehingga evaluasi stabilitas diperlukan sebagai dasar penentuan penanganan sebelum jalan dibangun.

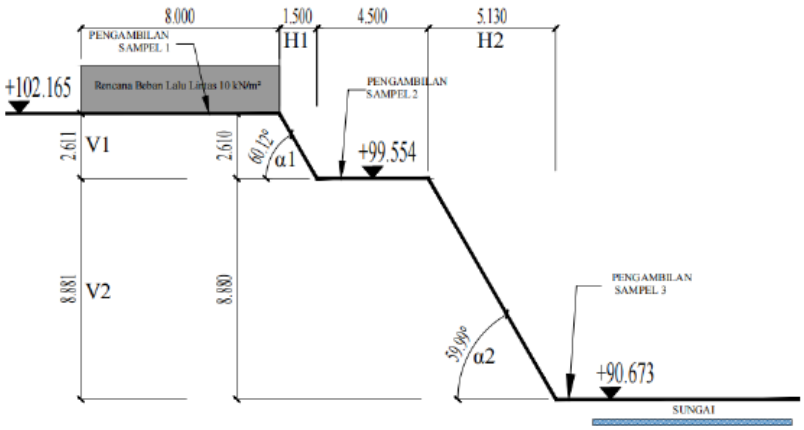
Tingkat kestabilan lereng umumnya dinyatakan dengan faktor keamanan (FK). Metode kesetimbangan batas, termasuk metode irisan Fellenius (Das & Sobhan, 2014), masih banyak digunakan karena sederhana dan dapat dihitung secara manual. Metode ini mengasumsikan kelongsoran terjadi melalui rotasi blok tanah pada bidang longsor berbentuk busur lingkaran (Firdaus dkk., 2022) dan mengabaikan gaya antariris, sehingga FK yang diperoleh cenderung lebih rendah dibandingkan metode kesetimbangan batas yang lebih teliti (Duncan dkk., 2014). Metode elemen hingga dengan teknik reduksi kekuatan geser (*strength reduction*) tidak memerlukan asumsi bentuk bidang longsor, karena mekanisme keruntuhan terbentuk dengan sendirinya pada zona yang kuat gesernya tidak lagi mampu menahan tegangan geser yang bekerja (Cheng dkk., 2007). Teknik ini tersedia dalam perangkat lunak Plaxis 2D yang telah luas digunakan untuk analisis lereng dan perencanaan perkuatannya (Isdianto & Agustina, 2023; Mina dkk., 2022).

Penelitian terdahulu yang membandingkan kedua pendekatan menunjukkan hasil yang tidak selalu searah. Pada lereng di Ungaran Timur, Kabupaten Semarang, FK metode Fellenius sebesar 1,212 dan Plaxis sebesar 1,329 (Vijaya, 2022), sedangkan pada Tebing Cibeureum, Kabupaten Cianjur, diperoleh 1,56 dengan metode Fellenius dan 1,606 dengan Plaxis 2D (Iftikhar, 2024). Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh asumsi bidang longsor, kondisi air tanah, dan cara pemodelan beban. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk (1) mengidentifikasi sifat fisik dan mekanik tanah lereng berdasarkan pengujian laboratorium, (2) mengevaluasi FK lereng eksisting dengan metode Fellenius dan Plaxis 2D, termasuk pengaruh beban lalu lintas rencana, serta (3) membandingkan dua alternatif perkuatan, yaitu *shotcrete* 20 cm dan kombinasi *secant pile* D60 dengan *bore pile* D60.

## 2. Metode Penelitian

### Lokasi dan Geometri Lereng

Penelitian ini merupakan studi kasus dengan pendekatan deskriptif kuantitatif pada lereng galian di sisi timur Perumahan Semarang Sky City, Kecamatan Tembalang, Kota Semarang. Lereng yang ditinjau memiliki panjang sekitar 160 m dan terdiri atas dua segmen, masing-masing dengan jarak horizontal $H_1$ = 1,50 m dan $H_2$ = 5,13 m, tinggi vertikal $V_1$ = 2,61 m dan $V_2$ = 8,88 m, serta kemiringan $\alpha_1$ = 60,12° dan $\alpha_2$ = 59,99°. Geometri lereng dan posisi titik pengambilan sampel ditunjukkan pada Gambar 1.




**Gambar 1.** Geometri Lereng dan Titik Pengambilan Sampel
*(Sumber: Peneliti, 2025)*

### Pengumpulan Data dan Pengujian Laboratorium

Pengambilan sampel tanah dilakukan melalui metode *boring test* menggunakan sistem boring pada

beberapa titik strategis lereng, yakni bagian atas, tengah, dan bawah lereng. Sampel terganggu diambil secara berkala setiap interval kedalaman 1,5 meter untuk analisis sifat fisik tanah, sedangkan sampel tak terganggu diambil menggunakan Shelby Tube untuk pengujian mekanika tanah di laboratorium, seperti uji kuat geser dan konsolidasi. Pengambilan sampel tanah melalui pengeboran tangan pada tiga titik (A, B, dan C) yang mewakili bagian atas, tengah, dan bawah lereng, masing-masing pada kedalaman 1,5 m dan 3,0 m. Sampel terganggu digunakan untuk pengujian sifat fisik, sedangkan sampel tak terganggu yang diambil dengan tabung Shelby digunakan untuk pengujian kuat geser. Pengujian di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Semarang meliputi kadar air, berat jenis, batas Atterberg (SNI 1967:2008), analisis ukuran butir dengan saringan dan hidrometer (SNI 3423:2008), serta uji geser langsung untuk memperoleh kohesi ($c$) dan sudut geser dalam ($\varphi$) (SNI 3240:2016).

**Analisis Stabilitas dengan Metode Fellenius**

Analisis kesetimbangan batas dilakukan dengan metode Fellenius (*ordinary method of slices*). Massa tanah di atas bidang longsor berbentuk busur lingkaran dibagi menjadi 10 irisan vertikal. Letak pusat busur longsor diperkirakan dengan sudut-sudut petunjuk Fellenius, kemudian dicari secara coba-coba hingga diperoleh FK terkecil. Berat setiap irisan dihitung dari luas bagian irisan pada masing-masing lapisan tanah dikalikan berat volumenya. Sesuai batasan penelitian, tekanan air pori tidak diperhitungkan secara langsung pada perhitungan manual, sehingga FK dihitung dengan Persamaan 1 (Hardiyatmo, 2003).

$$FK = \frac{\sum_{i=1}^{n}(c_i l_i + W_i \cos\alpha_i \tan\varphi_i)}{\sum_{i=1}^{n} W_i \sin\alpha_i} \quad (1)$$

dengan $c_i$ adalah kohesi (kN/m²), $l_i$ panjang alas irisan (m), $W_i$ berat irisan (kN/m), $\alpha_i$ sudut kemiringan alas irisan terhadap bidang horizontal, dan $\varphi_i$ sudut geser dalam tanah pada alas irisan.

**Analisis Numerik dengan Plaxis 2D**

Analisis numerik dilakukan dengan Plaxis 2D versi 24 menggunakan model regangan bidang (*plane strain*) dan elemen segitiga 15 titik nodal. Tanah dimodelkan dengan model Mohr–Coulomb tipe *undrained* (A) menggunakan parameter hasil laboratorium. Muka air tanah ditetapkan pada kedalaman 3 m dari permukaan asli. Tahapan perhitungan terdiri atas pembentukan tegangan awal, tahap plastis dengan konstruksi bertahap, dan tahap analisis keamanan dengan reduksi parameter $c$ dan tan $\varphi$ secara bertahap hingga keruntuhan. FK ditentukan sebagai nilai $\Sigma M_{sf}$ pada saat keruntuhan (Persamaan 2).

$$FK = \Sigma M_{sf} = \frac{c_{\text{input}}}{c_{\text{reduksi}}} = \frac{\tan\varphi_{\text{input}}}{\tan\varphi_{\text{reduksi}}} \quad (2)$$

Analisis dilakukan untuk lereng eksisting tanpa beban dan dengan beban lalu lintas merata 10 kN/m² di puncak lereng, sesuai rencana jalan lingkungan. Apabila lereng eksisting tidak memenuhi syarat, dilakukan pemodelan dua alternatif perkuatan dengan beban lalu lintas yang sama. Lereng dinyatakan stabil apabila FK ≥ 1,5 (SNI 8460:2017).

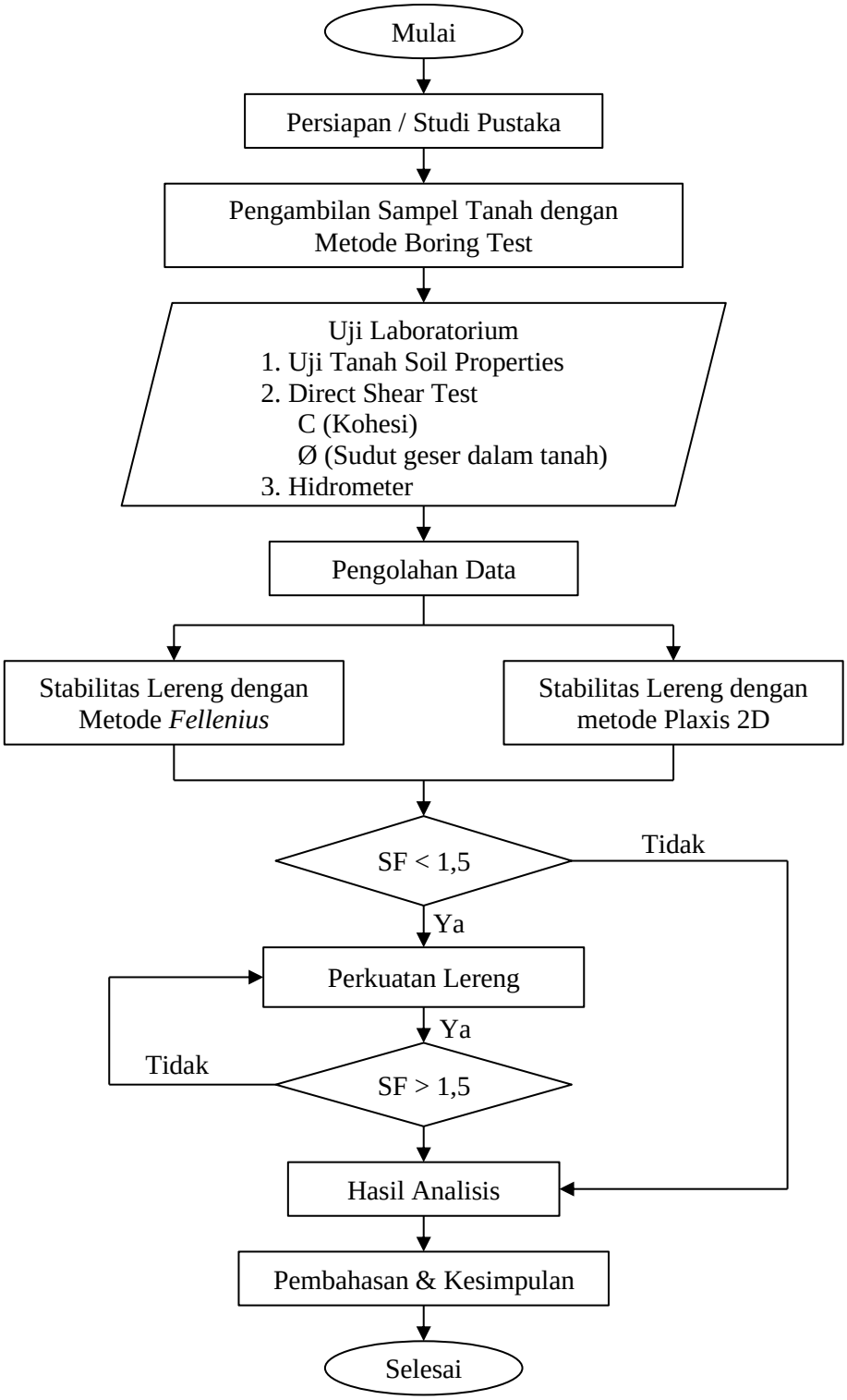
Tahapan pelaksanaan penelitian dirancang secara berurutan dan logis agar hasil akhir yang diperoleh dapat menggambarkan kondisi aktual lereng secara teknis. Alur penelitian meliputi:

1. Studi Literatur: Menganalisis teori dan metode terkait lereng, stabilitas tanah, serta penggunaan perangkat lunak Plaxis 2D.S
2. Survei Lapangan: Peninjauan lokasi untuk mengidentifikasi geometri lereng dan mengambil sampel tanah
3. Pengujian Laboratorium: Menentukan sifat-sifat tanah seperti kohesi, sudut geser dalam, dan klasifikasi tekstur.
4. Analisis Manual: Menggunakan metode *Fellenius* untuk menghitung faktor keamanan

berdasarkan irisan tanah.

5. Simulasi *Software*: Membuat model lereng pada Plaxis 2D dengan input parameter hasil lab.
6. Perbandingan Hasil: Menyandingkan nilai FK dari perhitungan manual dan *software* untuk evaluasi dan validasi.
7. Penyimpulan: Menarik kesimpulan berdasarkan analisis dan memberikan saran teknis.

Secara ringkas langkah-langkah penelitian terdapat dalam Gambar 1.




**Gambar 2.** Bagan Alir Penelitian
*(Sumber: Peneliti, 2025)*

## 3. Hasil dan Pembahasan

### Karakteristik Tanah

Rekapitulasi hasil pengujian laboratorium disajikan pada Tabel 1. Kadar air tanah berkisar antara 12,64% dan 24,46%, dengan derajat kejenuhan 34–78% pada saat pengambilan sampel. Persentase butiran lolos saringan No. 200 sebesar 42,9–53,1% dan fraksi lempung 20,0–57,2%, sehingga tanah termasuk berbutir halus hingga campuran pasir berlanau-berlempung. Berat volume basah tanah berkisar antara 1,458 dan 1,848 g/cm³, dengan porositas 37,8–49,9% dan angka pori 0,61–1,00. Batas cair berkisar antara 28,77% dan 50,81% dengan indeks plastisitas rendah, yaitu 0,28–8,62%, bahkan sampel titik C kedalaman 1,5 m bersifat nonplastis. Klasifikasi USCS menempatkan seluruh sampel pada kelompok CL, sedangkan klasifikasi AASHTO berkisar dari A-2-4 hingga A-5.

Kohesi tanah relatif kecil, yaitu 5,52–7,07 kPa pada lapisan lempung dan 0,75 kPa pada lapisan pasir di titik B kedalaman 1,5–3 m. Sudut geser dalam lapisan lempung berkisar antara 13,37° dan 16,20°, sedangkan lapisan pasir memiliki sudut geser dalam 32,35°.

**Tabel 1.** Rekapitulasi Hasil Pengujian Laboratorium

| Titik | Kedalaman (m) | $w$ (%) | $G_s$ | $\gamma_b$ (g/cm³) | LL (%) | PI (%) | Lolos No. 200 (%) | Lempung (%) | USCS | AASHTO | $c$ (kPa) | $\varphi$ (°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 0–1,5 | 24,46 | 2,260 | 1,649 | 39,54 | 3,50 | 42,99 | 33,78 | CL | A-4 | 7,07 | 13,37 |
| A | 1,5–3,0 | 21,62 | 2,370 | 1,521 | 40,20 | 8,62 | 42,90 | 40,86 | CL | A-5 | 6,29 | 14,79 |
| B | 0–1,5 | 22,11 | 1,932 | 1,468 | 50,81 | 5,65 | 46,90 | 39,08 | CL | A-5 | 5,52 | 16,19 |
| B | 1,5–3,0 | 17,59 | 3,138 | 1,848 | 45,00 | 1,45 | 49,20 | 20,00 | CL | A-5 | 0,75 | 32,35 |
| C | 0–1,5 | 12,64 | 2,564 | 1,478 | 28,77 | NP | 44,00 | 36,00 | CL | A-2-4 | 5,52 | 16,19 |
| C | 1,5–3,0 | 14,69 | 2,516 | 1,458 | 32,19 | 0,28 | 53,10 | 57,20 | CL | A-2-4 | 6,62 | 16,20 |

*(Sumber: Hasil Penelitian, 2025)*

Dengan kohesi serendah ini, tahanan geser lereng sangat bergantung pada tegangan normal efektif, sehingga kenaikan muka air tanah dan tekanan air pori pada musim hujan akan langsung menurunkan kuat geser tanah. Parameter desain yang digunakan pada analisis stabilitas disajikan pada Tabel 2.

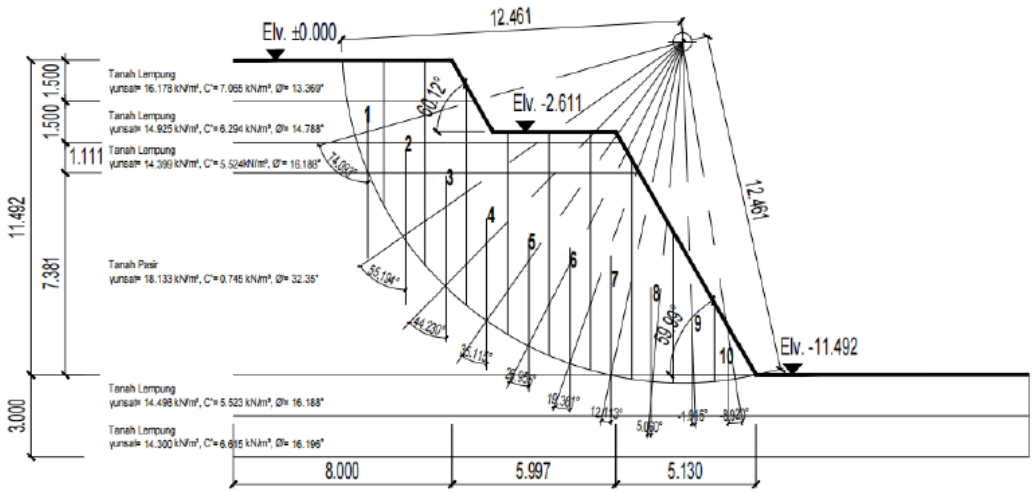
**Tabel 2.** Parameter Desain Tanah untuk Analisis Stabilitas

| Parameter | Satuan | A (0–1,5 m) | A (1,5–3 m) | B (0–1,5 m) | B (1,5–3 m) | C (0–1,5 m) | C (1,5–3 m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Jenis tanah | – | Lempung | Lempung | Lempung | Pasir | Lempung | Lempung |
| $\gamma_{unsat}$ | kN/m³ | 16,178 | 14,925 | 14,399 | 18,133 | 14,498 | 14,300 |
| $\gamma_{sat}$ | kN/m³ | 17,057 | 16,904 | 15,499 | 20,318 | 17,661 | 17,322 |
| $E_{ref}$ | kN/m² | 30.000 | 30.000 | 30.000 | 20.000 | 30.000 | 30.000 |
| $v$ | – | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| $c_{ref}$ | kN/m² | 7,065 | 6,294 | 5,524 | 0,745 | 5,523 | 6,615 |
| $\varphi$ | ° | 13,369 | 14,788 | 16,188 | 32,350 | 16,188 | 16,196 |
| $\psi$ | ° | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| $k_x = k_y$ | m/hari | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ | $10^{-5}$ | $10^{-5}$ | $10^{-5}$ |

*(Sumber: Hasil Penelitian, 2025)*

### Faktor Keamanan Metode Fellenius

Model bidang longsor kritis hasil coba-coba ditunjukkan pada Gambar 3. Bidang longsor memotong keempat lapisan tanah di bagian atas lereng dan berakhir di sekitar kaki lereng. Hasil perhitungan setiap irisan disajikan pada Tabel 3.




**Gambar 3.** Model Bidang Longsor Kritis Metode Fellenius
*(Sumber: Peneliti, 2025)*

**Tabel 3.** Rekapitulasi Perhitungan Faktor Keamanan Metode Fellenius

| Irisan | $W$ (kN/m) | $\alpha$ (°) | $c \cdot l$ (kN/m) | $W \cos \alpha \tan \varphi$ (kN/m) | Kuat geser $s$ (kN/m) | $W \sin \alpha$ (kN/m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 80,365 | 74,093 | 27,913 | 6,313 | 34,227 | 77,287 |
| 2 | 159,725 | 55,194 | 52,114 | 37,575 | 89,689 | 131,149 |
| 3 | 204,568 | 44,230 | 41,495 | 68,679 | 110,173 | 142,695 |
| 4 | 193,395 | 35,115 | 36,333 | 87,060 | 123,392 | 111,244 |
| 5 | 206,231 | 26,955 | 21,333 | 106,144 | 127,477 | 93,483 |
| 6 | 224,071 | 19,361 | 20,165 | 123,007 | 143,172 | 74,284 |
| 7 | 231,209 | 12,113 | 19,449 | 133,467 | 152,915 | 48,517 |
| 8 | 184,537 | 5,060 | 17,925 | 114,337 | 132,261 | 16,276 |
| 9 | 113,854 | −1,915 | 43,654 | 69,985 | 113,639 | −3,805 |
| 10 | 38,872 | −8,920 | 9,603 | 23,323 | 32,927 | −6,027 |
| Jumlah | | | 289,984 | 769,890 | 1.059,872 | 685,103 |

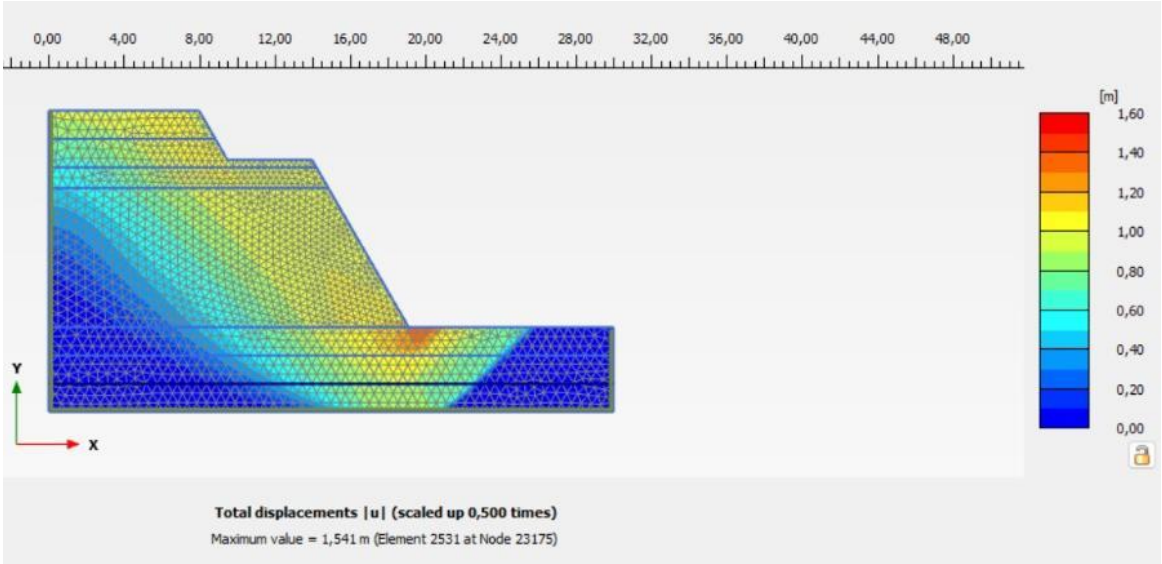
*(Sumber: Hasil Penelitian, 2025)*

$$FK = \frac{\sum s}{\sum W \sin \alpha} = \frac{1.059{,}872}{685{,}103} = 1{,}547$$

Nilai FK sebesar 1,547 hanya 3% di atas batas minimum 1,5 untuk lereng permanen. Nilai ini diperoleh tanpa beban lalu lintas dan tanpa tekanan air pori, sehingga menggambarkan kondisi lereng yang paling menguntungkan. Irisan 2 sampai 4 pada bagian atas lereng memberikan gaya penggerak terbesar karena sudut alas irisannya curam (35°–55°), sedangkan irisan 9 dan 10 di kaki lereng memiliki sudut alas negatif dan berfungsi sebagai penahan. Kontribusi kohesi terhadap kuat geser total hanya sekitar 27%, sedangkan sisanya berasal dari komponen gesekan. Dengan margin keamanan yang sekecil ini, tambahan beban di puncak lereng atau kenaikan muka air tanah berpotensi menurunkan FK di bawah 1,5.

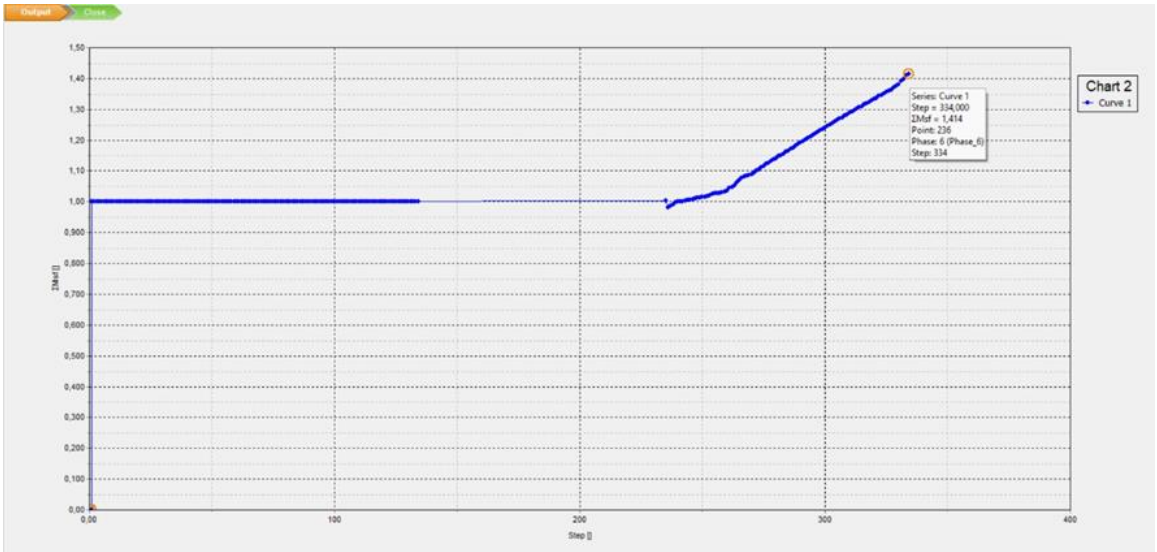
**Analisis Numerik Plaxis 2D**

Potensi kelongsoran atau pola perpindahan total pada lereng eksisting tanpa beban lalu lintas hasil pemodelan dalam Plaxis V24 ditunjukkan pada Gambar 4.




**Gambar 4.** Perpindahan Total Lereng Eksisting tanpa Beban Lalu Lintas
*(Sumber: Peneliti, 2025)*

Pada Gambar 4 terlihat perpindahan terbesar terkonsentrasi pada tubuh lereng bagian tengah hingga kaki lereng, membentuk mekanisme keruntuhan rotasional yang berujung di dekat kaki lereng. Pola ini menunjukkan bahwa kaki lereng merupakan zona kritis yang menentukan kestabilan secara keseluruhan. Hasil nilai faktor keamanan dari lereng eksisting tanpa beban lalu lintas menggunakan Plaxis 2D ditunjukan pada Gambar 5.




**Gambar 5.** Kurva Faktor Keamanan Lereng Eksisting tanpa Beban Lalu Lintas
*(Sumber: Peneliti, 2025)*

Kurva $\Sigma M_{sf}$ terhadap perpindahan pada Gambar 5 mencapai nilai konstan sebesar 1,414. Bagian kurva yang mendatar menunjukkan bahwa mekanisme keruntuhan telah terbentuk penuh, sehingga nilai tersebut dapat diambil sebagai FK lereng eksisting. Nilai ini berada di bawah batas 1,5, sehingga lereng eksisting tidak memenuhi syarat keamanan bahkan tanpa beban lalu lintas. Ketika beban lalu lintas 10 kN/m² diterapkan di puncak lereng, perhitungan tahap plastis tidak mencapai kesetimbangan dan model mengalami keruntuhan (*collapse*), sehingga FK tidak dapat ditentukan.

### Perbandingan Hasil Metode Fellenius dan Plaxis 2D

Analisis perbandingan hasil faktor keamanan dari kedua metode dilakukan untuk mengetahui faktor keamanan dari lereng eksisting yang paling efektif. Hasil faktor keamanan dari dua metode yaitu metode Fellenius dan Plaxis 2D tersaji pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Perbandingan Faktor Keamanan Lereng Eksisting

| Kondisi | Fellenius | Plaxis 2D | Keterangan |
|---|---|---|---|
| Eksisting tanpa beban lalu lintas | 1,547 | 1,414 | Kritis |
| Eksisting dengan beban lalu lintas 10 kN/m² | – | *Collapse* | Tidak stabil |

*(Sumber: Hasil Penelitian, 2025)*

Tabel 4 menunjukkan bahwa FK hasil Plaxis 2D lebih rendah 8,6% dibandingkan hasil metode Fellenius. Arah perbedaan ini berlawanan dengan kecenderungan umum, karena metode Fellenius yang mengabaikan gaya antaririsan biasanya menghasilkan FK lebih rendah daripada metode yang lebih teliti (Duncan dkk., 2014). Perbedaan tersebut terutama disebabkan oleh perlakuan air tanah. Perhitungan manual tidak memasukkan tekanan air pori, sedangkan model Plaxis 2D memperhitungkan muka air tanah pada kedalaman 3 m sehingga tegangan normal efektif dan tahanan gesek pada bidang longsor berkurang. Selain itu, teknik reduksi kekuatan menemukan mekanisme keruntuhan secara bebas tanpa dibatasi bentuk busur lingkaran (Cheng dkk., 2007), sedangkan pencarian bidang kritis pada metode Fellenius terbatas pada jumlah lingkaran coba yang dianalisis.

Meskipun nilainya berbeda, kedua metode menunjukkan bahwa lereng berada pada kondisi kritis di sekitar batas 1,5, dan hasil Plaxis 2D dengan beban lalu lintas menunjukkan bahwa lereng tidak mampu menahan beban jalan yang direncanakan. Kondisi ini sesuai dengan riwayat kelongsoran di lokasi penelitian. Temuan serupa dilaporkan pada lereng di Ungaran Timur, dengan FK kedua metode berada di bawah 1,5 (Vijaya, 2022). Oleh karena itu, lereng perlu diperkuat sebelum jalan lingkungan dibangun.

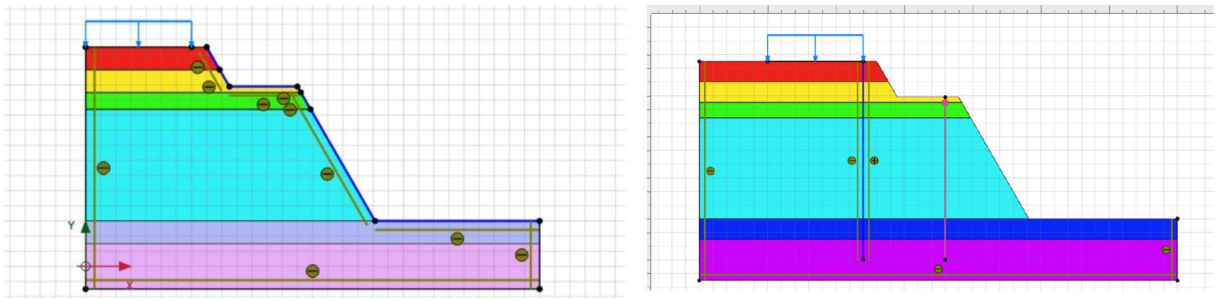
### Alternatif Perkuatan Lereng

Dua alternatif perkuatan dimodelkan dengan beban lalu lintas 10 kN/m² tetap bekerja di puncak lereng. Alternatif 1 berupa lapisan *shotcrete* setebal 20 cm pada permukaan lereng yang dimodelkan sebagai elemen *plate*. Alternatif 2 berupa kombinasi *secant pile* D60 yang dimodelkan sebagai elemen *plate* dan *bore pile* D60 yang dimodelkan sebagai *embedded beam*. Sifat material elemen perkuatan disajikan pada Tabel 5, sedangkan model kedua alternatif ditunjukkan pada Gambar 6.

**Tabel 5.** Sifat Material Elemen Perkuatan

| Parameter | Simbol | Satuan | *Shotcrete* 20 cm | *Secant pile* D60 | *Bore pile* D60 |
|---|---|---|---|---|---|
| Tipe elemen | – | – | *Plate* | *Plate* | *Embedded beam* |
| Model material | – | – | Elastis | Elastis | Elastis |
| Berat isi | $\gamma$ | kN/m³ | 24 | 24 | 24 |
| Kuat tekan beton | $f'_c$ | MPa | 30 | 40 | 30 |
| Tebal/diameter | $D$ | m | 0,2 | 0,6 | 0,6 |
| Modulus elastisitas | $E$ | kN/m² | 25.742.960 | 29.725.410 | 25.742.960 |
| Kekakuan aksial | $EA$ | kN/m | 5.148.592 | 14.000.668 | – |
| Kekakuan lentur | $EI$ | kN·m²/m | 17.162 | 258.827 | – |
| Rasio Poisson | $\nu$ | – | 0,25 | 0,25 | – |

*(Sumber: Hasil Penelitian, 2025)*



(a) (b)

**Gambar 6.** Pemodelan Perkuatan: (a) Alternatif 1, *Shotcrete* 20 cm; (b) Alternatif 2, *Secant Pile* D60 dan *Bore Pile* D60
*(Sumber: Peneliti, 2025)*

**Tabel 6.** Hasil Analisis Alternatif Perkuatan dengan Beban Lalu Lintas 10 kN/m²

| Kondisi | Konstruksi | FK | $u_y$ minimum (m) | Keterangan |
|---|---|---|---|---|
| Eksisting | Tanpa perkuatan | *Collapse* | – | Tidak stabil |
| Alternatif 1 | *Shotcrete* 20 cm | 1,679 | −0,128 | Stabil |
| Alternatif 2 | *Secant pile* D60 + *bore pile* D60 | 1,652 | −1,913 | Stabil |

*(Sumber: Hasil Penelitian, 2025)*

Hasil analisis kedua alternatif dirangkum pada Tabel 6. Alternatif 1 menghasilkan FK sebesar 1,679, sedangkan Alternatif 2 menghasilkan FK sebesar 1,652. Kedua nilai memenuhi syarat FK ≥ 1,5, padahal lereng eksisting runtuh di bawah beban yang sama. Dibandingkan dengan FK lereng eksisting tanpa beban (1,414), kedua alternatif meningkatkan FK masing-masing sebesar 18,7% dan 16,8%. Selain FK yang lebih tinggi, Alternatif 1 menghasilkan perpindahan vertikal minimum ($u_y$) sebesar −0,128 m, jauh lebih kecil daripada Alternatif 2 yang mencapai −1,913 m. Nilai perpindahan ini merupakan keluaran model numerik dan lebih tepat digunakan untuk membandingkan kedua alternatif secara relatif, bukan sebagai prediksi penurunan di lapangan. Lapisan *shotcrete* bekerja sebagai pelapis permukaan yang menambah kekakuan, menahan erosi, dan membatasi deformasi permukaan, sedangkan tiang pada Alternatif 2 bekerja dengan memotong bidang gelincir. Berdasarkan FK dan perpindahan yang dihasilkan, Alternatif 1 merupakan pilihan yang lebih efektif untuk lereng ini. Kedua alternatif tetap perlu dilengkapi dengan sistem drainase permukaan dan bawah permukaan untuk mengendalikan kenaikan muka air tanah, karena kuat geser tanah di lokasi sangat bergantung pada tegangan efektif.

## 4. Kesimpulan

Tanah pada lereng Perumahan Semarang Sky City merupakan tanah berbutir halus berplastisitas rendah dengan kadar air 12,64–24,46%, kohesi 0,75–7,07 kPa, dan sudut geser dalam 13,37°–32,35°. Kuat geser tanah yang rendah dan sangat bergantung pada tegangan efektif ini membuat lereng peka terhadap kenaikan muka air tanah. Pada kondisi eksisting tanpa beban lalu lintas, metode Fellenius menghasilkan FK sebesar 1,547, sedikit di atas batas 1,5, sedangkan analisis Plaxis 2D yang memperhitungkan muka air tanah menghasilkan FK sebesar 1,414. Dengan beban lalu lintas 10 kN/m², model numerik mengalami keruntuhan. Perbedaan hasil kedua metode terutama disebabkan oleh perlakuan tekanan air pori dan cara penentuan bidang longsor kritis. Kedua metode menunjukkan bahwa lereng berada pada kondisi kritis dan tidak aman untuk menahan jalan lingkungan yang direncanakan. Perkuatan dengan *shotcrete* 20 cm meningkatkan FK menjadi 1,679, sedangkan kombinasi *secant pile* D60 dan *bore pile* D60 meningkatkan FK menjadi 1,652 pada kondisi beban lalu lintas yang sama. *Shotcrete* 20 cm direkomendasikan karena menghasilkan FK tertinggi dan perpindahan vertikal terkecil. Penelitian lanjutan disarankan untuk

memasukkan tekanan air pori dalam perhitungan kesetimbangan batas, membandingkan hasil dengan metode Bishop atau Spencer, serta menambahkan analisis beban gempa.

## DAFTAR PUSTAKA

Cheng, Y. M., Lansivaara, T., & Wei, W. B. (2007). Two-Dimensional Slope Stability Analysis By Limit Equilibrium And Strength Reduction Methods. *Computers and Geotechnics, 34*(3), 137–150. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.011

Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). *Principles Of Geotechnical Engineering* (8th ed.). Cengage Learning.

Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength And Slope Stability* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Firdaus, Y., Sarie, F., & Hendri, O. (2022). Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Metode Fellenius Studi Kasus: Proyek Pekerjaan Drainase Gedung PPIIG di Universitas Palangka Raya. *Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Keteknikan, 5*(2), 1–9.

Hardiyatmo, H. C. (2003). *Mekanika tanah II* (Edisi ke-3). Gadjah Mada University Press.

Iftikhar, A. A. (2024). *Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan Soil Nailing Menggunakan Program Plaxis 2D V20 (Studi kasus: Tebing Cibeureum, Kabupaten Cianjur). Tugas Akhir.* Universitas Islam Indonesia.

Isdianto, & Agustina, D. H. (2023). Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan Dinding Penahan Tanah Menggunakan Program Plaxis (Studi Kasus: Ruas Jalan Gesek–Simpang Busung, Kabupaten Bintan). *Sigma Teknika, 6*(2), 493–502.

Mina, E., dkk. (2022). Analisis Stabilitas Lereng dengan Alternatif Perkuatan Menggunakan Software Plaxis 2D dan Slope/W (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Kampus Baru UNTIRTA Sindangsari). *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil, 11*(2), 161–171.

SNI 1967:2008. *Cara Uji Penentuan Batas Cair Tanah*. Badan Standardisasi Nasional.

SNI 3240:2016. *Metode Uji Kuat Geser Langsung Tanah Tidak Terkonsolidasi dan Tidak Terdrainase*. Badan Standardisasi Nasional.

SNI 3423:2008. *Cara Uji Analisis Ukuran Butir Tanah*. Badan Standardisasi Nasional.

SNI 8460:2017. *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Badan Standardisasi Nasional.

Vijaya, R. M. (2022). *Analisa stabilitas lereng longsor di Ungaran Timur, Kabupaten Semarang*. T*ugas Akhir*. Universitas Semarang.