

ANALISIS PERBANDINGAN STABILITAS LERENG PADA AREA KARST (STUDI KASUS GIRIMULYO, KULON PROGO)

Anisa Nur Amalina^{1*}, Azmi Aufa Ifthikhar²

¹ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta
Email: *anisa.amalina@uii.ac.id

² Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Email: azmiaufaitikhar@gmail.com

Masuk: 04-04-2025, revisi: 17-04-2025, diterima untuk diterbitkan: 30-04-2025

ABSTRAK

Girimulyo, Kulon Progo merupakan daerah yang terkenal dengan bentang alam karst sehingga menjadi salah satu tujuan wisata. Lokasi ini banyak tersusun oleh batuan yang mudah larut seperti batu kapur, dolomit, gipsum, dan garam batu, sehingga sangat rentan terhadap tanah longsor sehingga memerlukan analisis stabilitas lereng Kecamatan yang komprehensif untuk mengurangi risiko tanah longsor yang berdampak pada kawasan permukiman, jalan akses, dan lokasi wisata. Penelitian ini mengevaluasi stabilitas lereng menggunakan Metode Keseimbangan Batas (LEM) dan Metode Elemen Hingga (FEM). Lereng pada lokasi penelitian terdiri dari lapisan lanau di permukaan dan batu kapur pada kedalaman 9 meter. Pemodelan lereng dilakukan dalam kondisi statis dan pseudo-statis, dengan menggabungkan koefisien seismik horizontal yang berasal dari SNI 1726 (2019). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar metode LEM, kecuali metode Fellenius, memiliki SF yang lebih tinggi daripada metode FEM. Semua metode menunjukkan bahwa lereng dalam kondisi statis stabil dengan faktor keamanan (SF) $\geq 1,25$, sedangkan dalam kondisi pseudo-statis, semua metode dianggap tidak stabil ($SF \leq 1,07$). Di antara pendekatan LEM, metode Fellenius (1936) menunjukkan SF terendah, hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya di mana metode ini paling konservatif dan sesuai untuk bidang gelincir *circular*. Sementara itu, metode Bishop (1955) dan Morgenstern-Price (1965) merupakan metode yang paling direkomendasikan dalam analisis LEM karena dapat mengakomodasi permukaan longsor *circular* dan *non-circular*, hasil SF berbeda 2% lebih tinggi dari hasil FEM. Hasil ini menunjukkan pentingnya memilih metode analisis yang tepat untuk medan karst yang rawan longsor seperti Girimulyo.

Kata kunci: FEM; LEM; PLAXIS 2D; slope/W; SF

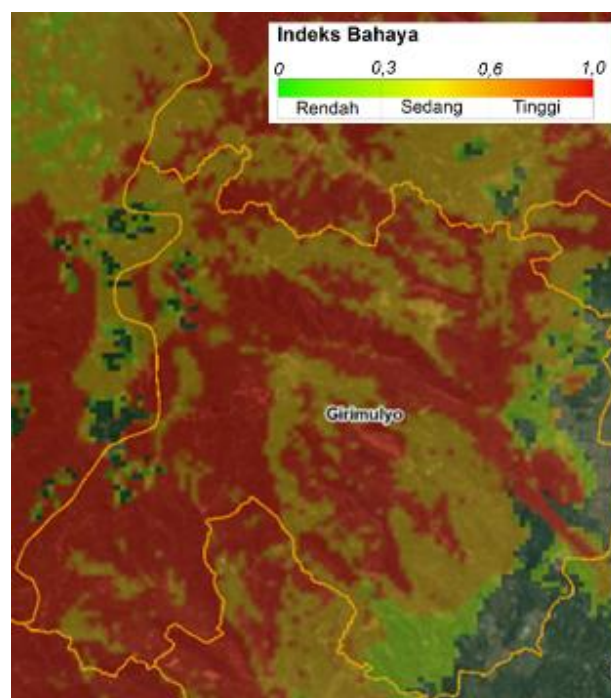
ABSTRACT

Girimulyo District, Kulon Progo, is famous for its karst landscape, making it one of the tourist destinations. This location is mainly composed of easily soluble rocks such as limestone, dolomite, gypsum, and rock salt, making it very susceptible to landslides, thus requiring a comprehensive slope stability analysis to reduce the risk of landslides that impact residential areas, access roads, and tourist locations. This study evaluated slope stability using the Limit Equilibrium Method (LEM) and the Finite Element Method (FEM). The slope at the research location consists of a layer of silt on the surface and limestone at a depth of 9 meters. Slope modeling was carried out in static and pseudo-static conditions by combining horizontal seismic coefficients derived from SNI 1726 (2019). The results showed that most LEM methods, except the Fellenius method, had higher SF than the FEM method. All methods showed that the slope in the static condition is stable with a safety factor (SF) ≥ 1.25 , while in the pseudo-static condition, all methods are considered unstable ($SF \leq 1.07$). Among the LEM approaches, the Fellenius (1936) method showed the lowest SF, which is in accordance with previous studies, where this method is the most conservative and suitable for circular slip surfaces only. Meanwhile, the Bishop (1955) and Morgenstern-Price (1965) methods are the most recommended in this study because they accommodate circular and non-circular slip surfaces. The SF results are 2% higher than the FEM results. These results show the importance of choosing the proper analysis method for landslide-prone karst terrain such as Girimulyo.

Keywords: FEM; LEM; PLAXIS 2D; slope/W; SF

1. PENDAHULUAN

Kecamatan Girimulyo di Kabupaten Kulon Progo, Indonesia, dikenal dengan bentang alam karstnya, yang dicirikan oleh batuan yang mudah larut seperti batu kapur, dolomit, gipsum, dan garam batu (Agniy et al., 2019). Medan perbukitan di wilayah utara dan tengah Kulon Progo meningkatkan kerentanan wilayah tersebut terhadap tanah longsor (Santie et al., 2024). Menurut Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD), selama tahun 2015 - 2020, terdapat lebih dari 1000 kejadian tanah longsor di Kabupaten Kulonprogo. Girimulyo merupakan salah satu wilayah yang paling sering mengalami tanah longsor (Jianti, 2021). Selain itu, berdasarkan Dokumen Kajian Risiko Bencana Kabupaten Kulon Progo (2022–2026) menunjukkan bahwa 10,38% wilayahnya masuk dalam kategori daerah rawan longsor tingkat tinggi, sedangkan 36,14% masuk dalam kategori daerah rawan longsor tingkat sedang (Santie et al., 2024). Hal tersebut dapat dilihat pada peta bahaya longsor di Girimulyo berdasarkan InaRISK dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta bahaya longsor (BNPB, 2017)

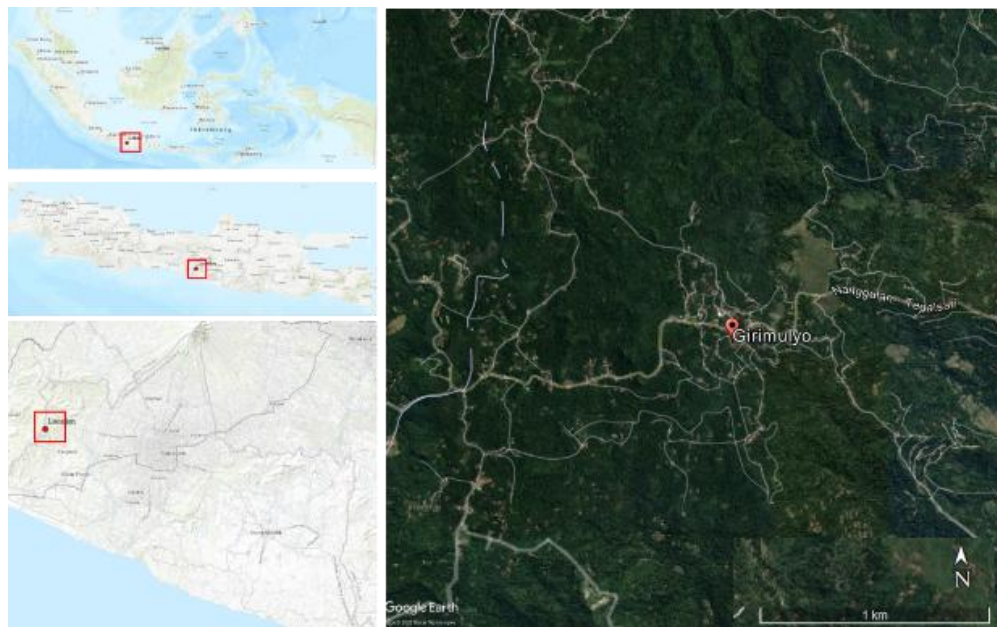
Girimulyo adalah salah satu tujuan wisata yang terkenal di Kulonprogo dengan jumlah penduduk sekitar 24,000 jiwa (BPS, 2024). Berkaitan dengan tersebut, kajian mengenai stabilitas lereng di sekitar permukiman, jalan akses, dan daerah tujuan wisata menjadi sangat penting. Analisis stabilitas lereng dilakukan untuk mengurangi risiko longsor dan menentukan mitigasi risiko terkait longsor. Dua metode utama yang biasa digunakan dalam analisis stabilitas lereng adalah Metode Keseimbangan Batas (LEM) dan Metode Elemen Hingga (FEM). LEM berfokus pada pencapaian keseimbangan gaya dan momen untuk menilai stabilitas lereng, sementara FEM memanfaatkan hubungan tegangan-regangan untuk memodelkan dan memprediksi perilaku lereng. Kedua metode ini memiliki keunggulan masing-masing tergantung pada kondisi lereng, parameter tanah, serta kompleksitas geometri dan beban.

Beberapa studi telah membandingkan efektivitas kedua metode tersebut. Fitri & Wahyuni, (2022) menunjukkan bahwa perbedaan hasil faktor keamanan (SF) dari metode LEM dengan

metode *Morgenstern-Price* dan FEM dapat terjadi akibat variabel seperti tinggi timbunan, kemiringan lereng, dan muka air tanah, meskipun bidang gelincir yang dihasilkan cenderung serupa. Dalam konteks lereng jalan yang terdampak hujan monsun, metode FEM lebih akurat dalam merepresentasikan pola aliran rembesan dan potensi kegagalan lereng dibandingkan LEM (Remesh et al., 2023). Selain itu, LEM cenderung memberikan nilai FK lebih tinggi, yaitu 5–14% dibanding FEM, terutama pada kondisi lereng jenuh air (Bardhi, 2021). Hal ini disebabkan karena FEM lebih mampu menghitung distribusi tegangan internal. Pada kasus identifikasi potensi kegagalan pada lereng tambang batubara, LEM maupun FEM memberikan hasil yang serupa meskipun pendekatan FEM dianggap lebih representatif untuk perhitungan deformasi (Sudinda, 2020). Berdasarkan temuan tersebut, studi ini bertujuan untuk membandingkan hasil analisis lereng alami dalam kondisi statik dan pseudostatik menggunakan pendekatan LEM dan FEM, sehingga dapat menentukan metode yang paling sesuai untuk diterapkan pada medan karst seperti di Kecamatan Girimulyo.

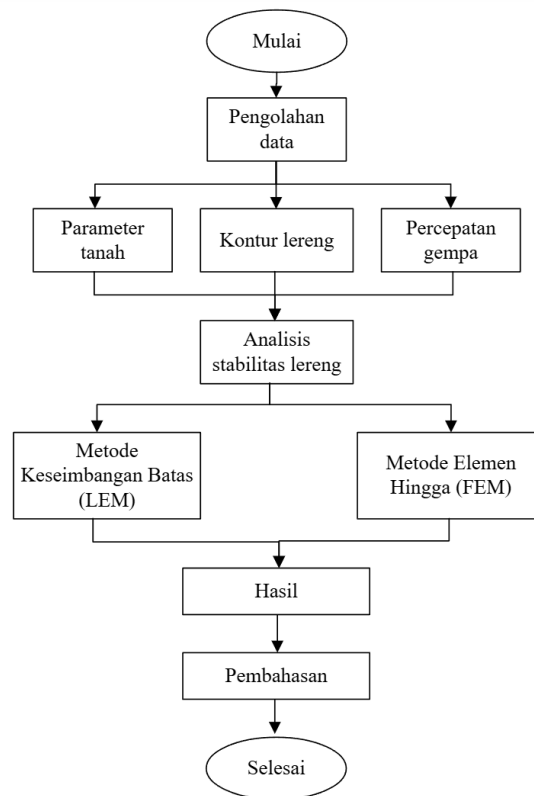
2. METODE

Penelitian diawali dengan pengumpulan data parameter tanah, topografi lereng, dan percepatan gempa sebagai parameter input analisis lereng. Kemudian dilakukan analisis stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak *Slope/W* dan *PLAXIS 2D*. Analisis penelitian ini difokuskan pada Kecamatan Girimulyo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta (Gambar 2).



Gambar 2. Lokasi penelitian (*Google Earth*, 2022)

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan analisis lereng menggunakan dua metode, yaitu *Limit Equilibrium Method* (LEM) dan *Finite Element Method* (FEM). Pada metode LEM, penelitian ini menggunakan tiga metode untuk membandingkan hasil dengan analisis FEM. Metode yang digunakan untuk analisis LEM adalah *Fellenius* atau *Ordinary* (1936), *Bishop* (1955), dan *Morgenstern-Price* (1965). Selanjutnya lereng dimodelkan dalam dua kondisi, yaitu statik dan pseudo statik. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *Slope/W* sebagai perangkat lunak LEM dan *PLAXIS 2D* sebagai perangkat lunak FEM. Bagan alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Bagan Alur Penelitian

2.1. Input Data

Beberapa data masukan yang diperlukan dalam analisis stabilitas lereng, antara lain parameter tanah dari hasil uji tanah, penampang lereng, dan percepatan tanah puncak. Data tersebut selanjutnya akan digunakan untuk pemodelan dan perhitungan stabilitas lereng.

2.1.1. Soil parameter

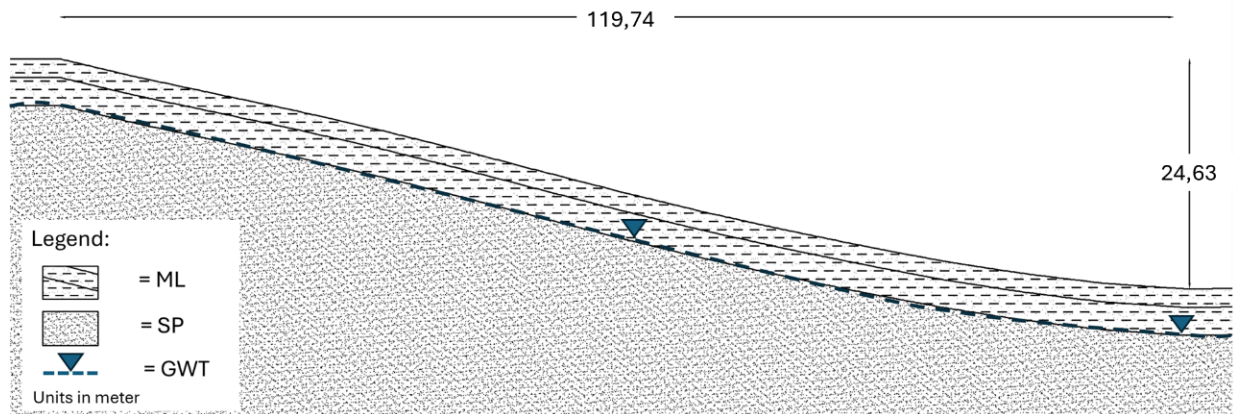
Parameter tanah yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan hasil Uji Penetrasi Tanah (SPT) dan uji laboratorium. Parameter kuat geser, kohesi (c) dan sudut gesek internal (ϕ), dan berat isi tanah (γ) diambil dari hasil uji laboratorium. Sedangkan modulus elastisitas (E) dan rasio Poisson (ν) dikorelasikan berdasarkan Look (2007). Nilai E didekati dengan nilai N-SPT, sedangkan nilai ν dipilih berdasarkan jenis tanah. Hasil penyelidikan tanah menunjukkan bahwa lapisan tanah terdiri dari lanau plastisitas rendah (ML) dengan sifat kekakuan rendah sampai sedang dan batu gamping (SP) yang mengalami pelapukan sedang pada kedalaman 9,5 m ke bawah. Muka air tanah (GWT) ditemukan pada kedalaman 9 m. Lapisan tanah dan parameternya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Lapisan tanah dan parameter

Lapisan	Kedalaman (m)	Klasifikasi	N-SPT	γ_b (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	E (kPa)	ν
1	1 – 2	ML	5	15,68	16,68	7,20	32	3500	0,30
2	2 – 9	ML	10	15,89	16,89	8,29	25	7000	0,30
3	9 – 14	SP	60	17,32	18,32	26,66	12	66000	0,30

2.1.2. Kontur lereng

Kontur lereng diekstraksi dari Digital Elevation Model yang dapat diakses di <https://tanahair.indonesia.go.id/>. Kontur dipilih di dekat lokasi penyelidikan tanah dan merupakan lereng alami dengan ketinggian sekitar 24,63 m. Keberadaan GWT digambar dengan garis putus-putus. Kontur yang digunakan dalam analisis dapat dilihat Gambar 4.



Gambar 4. Kontur lereng

2.2. Metode Perhitungan Stabilitas Lereng

Dalam penelitian ini, dua pendekatan utama digunakan untuk analisis stabilitas lereng, yaitu Metode Ekuilibrium Batas (LEM) dan Metode Elemen Hingga (FEM). Untuk LEM, Slope/W digunakan untuk memodelkan stabilitas lereng. Sementara itu, PLAXIS 2D digunakan untuk memodelkan FEM.

2.2.1. Limit Equilibrium Method (LEM)

LEM menghitung faktor keamanan berdasarkan asumsi keseimbangan gaya dan momen pada irisan tanah. Kriteria *Mohr-Coulomb* digunakan untuk menyatakan kekuatan sepanjang permukaan longsor. Kekuatan geser dapat dinyatakan dengan Persamaan 1 dan 2 (Aryal, 2006). Nilai τ adalah tegangan geser yang dimobilisasi, τ_f adalah kekuatan geser sepanjang permukaan slip, c' adalah kohesi efektif, ϕ' adalah sudut gesekan efektif, dan F adalah faktor keamanan atau SF.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\tau_f}{F} = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{F} \quad (2)$$

Untuk pendekatan ini, tiga metode diterapkan, yaitu Metode Fellenius atau Metode Irisan Biasa (Fellenius, 1936), Metode Bishop (Bishop, 1955), dan Metode Morgenstern-Price Method (Morgenstern & Price, 1965). Pemilihan metode ini disesuaikan dari metode yang paling konservatif hingga metode yang dianggap paling disarankan dalam praktik. Metode *Fellenius* menyederhanakan perhitungan dengan mengasumsikan bahwa gaya antar irisan saling meniadakan, yang sering kali menghasilkan faktor keamanan yang konservatif. Metode ini hanya

berlaku untuk bidang gelincir melingkar dan hanya menggunakan satu persamaan untuk mendapatkan kesetimbangan momen untuk seluruh massa (Burman et al., 2015). Persamaan 3 menunjukkan persamaan untuk Metode Fellenius. Nilai c adalah kohesi tanah, l adalah panjang permukaan slip, W adalah berat irisan, ϕ' adalah sudut gesek internal, dan α adalah kemiringan lereng.

$$SF = \frac{\sum (c'l + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad (3)$$

Metode Bishop memperbarui pendekatan ini dengan memperhitungkan gaya normal antar irisan untuk meningkatkan akurasi dalam estimasi faktor keamanan, meskipun tidak sepenuhnya memenuhi semua kondisi kesetimbangan statis. Metode ini dapat digunakan untuk bidang gelincir melingkar dan tidak melingkar (Aryal, 2006). Metode ini hanya memenuhi kesetimbangan momen, dan prosedur iteratif diperlukan untuk menghitung faktor keamanan (Burman et al., 2015). Persamaan (4) dan (5) menunjukkan Persamaan Bishop (4).

$$N' = \frac{1}{m_a} \sum \left(W - \frac{c'l \sin \alpha}{SF} - ul \cos \alpha \right) \quad (4)$$

$$m_a = \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{SF} \right) \quad (5)$$

Metode Morgenstern-Price dianggap lebih komprehensif karena memenuhi semua persamaan keseimbangan statis dan menggunakan pendekatan yang lebih lengkap untuk analisis stabilitas lereng (Burman et al., 2015). Metode ini dapat diterapkan pada bidang gelincir melingkar dan tidak melingkar (Aryal, 2006). Persamaan (6) dan (7) menunjukkan persamaan Morgenstern-Price, di mana N adalah gaya normal, serta E dan T gaya antar potongan (Aryal, 2006).

$$SF = \frac{\sum [c'l + (N - ul) \tan \phi'] \sec \alpha}{\sum \{W - (T_2 - T_1)\} \tan \alpha + \sum (E_2 - E_1)} \quad (6)$$

$$SF = \frac{\sum (c'l + (N - ul) \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad (7)$$

2.2.1. Finite Element Method (FEM)

Penelitian diawali dengan pengumpulan data parameter tanah, topografi lereng, dan percepatan gempa sebagai parameter input analisis lereng. Kemudian dilakukan analisis stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak Slope/W dan PLAXIS 2D. Analisis penelitian ini difokuskan pada Kecamatan Girimulyo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta (Burman et al., 2015). Baik LEM maupun FEM menggunakan pendekatan yang berbeda untuk menghitung faktor keamanan (SF) lereng. Untuk metode LEM, SF ditunjukkan di pusat rotasi untuk memenuhi keseimbangan momen. Sementara itu, FEM menggunakan prosedur 'reduksi c - ϕ' ' dengan mengurangi parameter kekuatan tanah c' dan $\tan \phi'$ hingga terjadi keruntuhan (PLAXIS,

2012).

Dengan itu, PLAXIS akan menghitung rasio antara kuat geser yang tersedia dan kuat geser pada saat keruntuhan. Persamaan SF dapat didefinisikan oleh Persamaan (8).

$$SF = \frac{\text{available shear strenght}}{\text{shear strenght at failure}} = \sum M_{SF} \text{ at failure} \quad (8)$$

Nilai faktor keamanan penting untuk mengidentifikasi kondisi lereng (Tabel 2). Dengan membandingkan beberapa metode analisis dapat membantu menentukan hasil yang tepat yang sesuai dengan kondisi di lapangan.

Tabel 2 Klasifikasi faktor keamanan lereng (SF)

Faktor Keamanan (SF)	Kondisi Lereng
$SF \geq 1,25$	Stabil
$1,07 \leq SF \leq 1,25$	Kritis
$SF \leq 1,07$	Tidak stabil

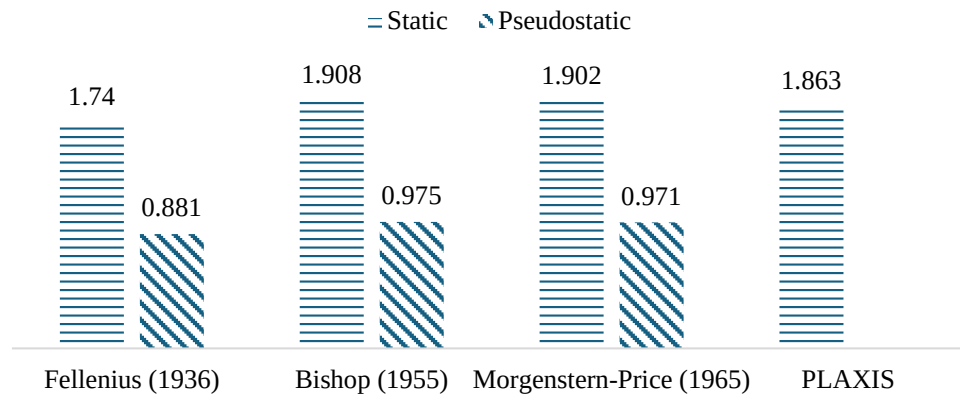
Sumber: Bowles, 1997

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data tanah, lokasi penelitian terdiri dari lapisan lanau dan batugamping yang memiliki plastisitas rendah. Batugamping ditemukan pada kedalaman 9 m dengan N-SPT mencapai 60. Keberadaan batugamping tersebut berkaitan dengan daerah penelitian di Desa Jatimulyo yang tersusun dari Formasi Jonggrangan (Maryanto, 2013). Batugamping tersebut terdiri dari batuan konglomerat, tuf napal, batupasir berlapis lignit, batugamping berlapis, dan batugamping koral (Agniy et al., 2019). Dari hasil laboratorium, lapisan batugamping tersebut termasuk dalam klasifikasi SP dengan persentase berbutir halus hanya sekitar 1,4%.

Pada pemodelan Slope/W, parameter input yang digunakan hanya nilai γ , c , dan ϕ . Penelitian ini menggunakan opsi *entry* dan *exit* untuk melakukan perhitungan stabilitas lereng. Sementara itu, pada pemodelan 2D PLAXIS, semua material tanah dimodelkan dalam Mohr-Coulomb dengan parameter sesuai Tabel 1. Pemodelan dilakukan dalam dua kondisi, yaitu statis (tanpa input PGA) dan pseudo-statis (dengan input PGA). Analisis pseudo-statis menyimulasikan pergerakan akibat gempa bumi dengan memasukkan percepatan pseudo-statis arah horizontal yang menghasilkan gaya inersia dan bekerja melalui pusat massa keruntuhan (Akhlaghi & Nikkar, 2014).

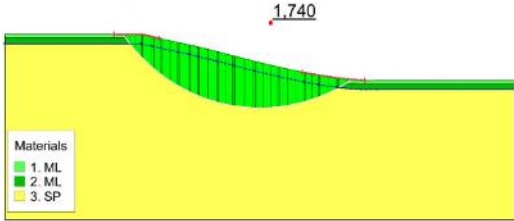
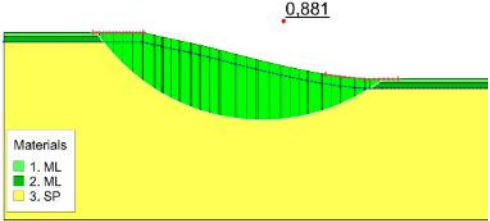
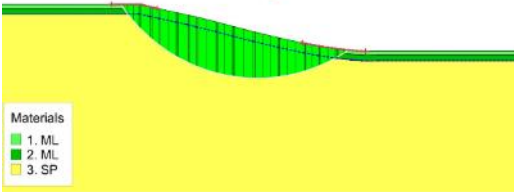
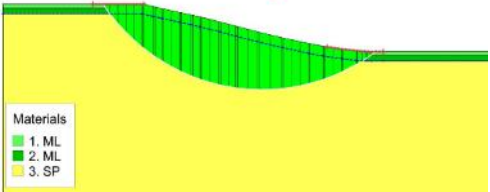
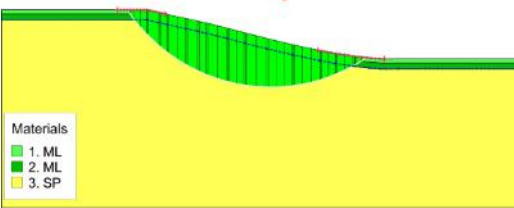
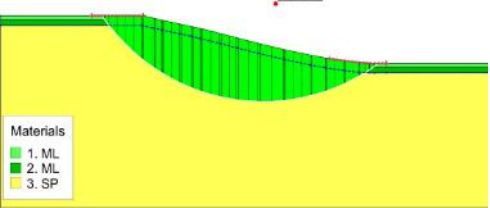
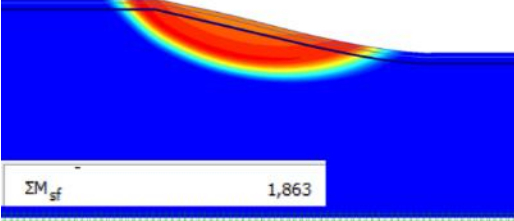
Kondisi pseudo-statis memerlukan parameter koefisien seismik sebagai nilai input. Berdasarkan SNI 8460 (2017), koefisien seismik adalah percepatan puncak di permukaan (PGA). Koefisien seismik horizontal, k_h , ditentukan sebesar 0,5 dari percepatan puncak horizontal dengan menentukan kelas tapak dan faktor amplifikasi. Percepatan puncak di permukaan (PGA) diambil dari SNI 1726 (2019), yaitu 0,4166. Metode Bishop dan Morgenstern-Price menunjukkan nilai yang cenderung sama dalam kedua kondisi tersebut. Kedua metode tersebut lebih direkomendasikan untuk perhitungan karena pada metode Bishop persamaan dapat memenuhi momen keseluruhan, sedangkan pada metode Morgenstern-Price persamaan momen dan gaya sudah memenuhi keseimbangan (Wubalem, 2022). Kedua metode ini juga cocok untuk bidang gelincir melingkar dan tidak melingkar, yang sesuai dalam kasus ini. Hasil dari kedua metode tersebut hanya berbeda sekitar 2% dari model FEM. Perbandingan hasil SF dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Hasil faktor keamanan

Secara umum hasil model stabilitas lereng menunjukkan bahwa lereng memiliki bidang longsor tidak melingkar pada semua metode dan kondisi analisis. Lebar bidang longsor sekitar 120 m sampai dengan 130 m, dan kedalamannya sekitar 28 m. Faktor keamanan (SF) untuk kondisi statis bervariasi, namun menurut kondisi lereng dianggap sebagai lereng stabil dengan $SF \geq 1,25$. Pada kondisi pseudo-statis semua metode menunjukkan bahwa lereng tidak stabil ($SF \leq 1,07$). Pada pemodelan FEM apabila SF turun di bawah 1 secara umum mengindikasikan bahwa lereng atau struktur dalam keadaan gagal dan sering menimbulkan masalah ketidakstabilan numerik dalam analisis. Dengan demikian nilai SF tidak dapat dihitung. Hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 3. Dari segi metode yang digunakan, semua pemodelan LEM memiliki faktor keamanan yang lebih tinggi daripada FEM, kecuali metode Fellenius. Hal ini sejalan dengan penelitian Memon (2018), di mana metode Fellenius merupakan metode yang paling konservatif dan menunjukkan angka keamanan terendah dibandingkan metode lainnya. Metode ini memiliki selisih 9% lebih rendah daripada metode LEM lainnya dan 7% lebih rendah daripada metode FEM. Faktor keamanan (SF) yang rendah pada metode Fellenius terjadi karena pendekatan ini tidak sepenuhnya memenuhi kesetimbangan gaya keseluruhan dan hanya digunakan untuk permukaan slip melingkar. Nilai SF yang dihitung cenderung tidak realistis karena poligon gaya yang tidak menutup dan menunjukkan bahwa setiap irisan di dalam lereng tidak dalam keadaan keseimbangan gaya yang seimbang (Wubalem, 2022).

Tabel 3. Hasil Analisis

Metode	Hasil	
	Statik	Pseudo-statik
Slope/W: Fellenius (1936)	 1.740	 0.881
Slope/W: Bishop (1955)	 1.908	 0.975
Slope/W: Morgenstern -Price (1965)	 1.902	 0.971
PLAXIS	 ΣM_{sf} 1,863	

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini lereng terdiri dari dua jenis tanah, yaitu lanau yang berplastisitas rendah dan batugamping. Metode Fellenius (1936) memiliki faktor keamanan paling rendah di antara semua metode karena merupakan metode yang paling konservatif. Dari ketiga metode LEM, metode Morgenstern-Price (1965) merupakan metode yang paling direkomendasikan dalam analisis LEM. Dari ketiga metode LEM, metode *Morgenstern-Price* (1965) merupakan metode yang paling direkomendasikan dalam analisis LEM karena dapat mengakomodasi bidang longsor baik yang melingkar maupun tidak melingkar. Hasil perhitungan LEM cenderung lebih tinggi dibandingkan FEM, tetapi analisis FEM memiliki output yang lebih lengkap karena menggunakan perhitungan dan input data yang lebih maju.

5. REFERENSI

- Agniyy, R. F., Septianingrum, R. S., Adinugraha, A. S., Alghozali, Q., Aditya, B., Cahyadi, A., & Adji, T. N. (2019). Analysis of Cavities Characteristics in the Semar—Kiskendo Caves System, Jonggrangan Karst Area, Kulon Progo, Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 125, 01016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912501016>
- Akhlaghi, T., & Nikkar, A. (2014). Evaluation of the pseudostatic analyses of earth dams using Fe simulation and observed earthquake-induced deformations: Case studies of Upper San

- Fernando and Kitayama dams. *ScientificWorldJournal*.
<https://doi.org/10.1155/2014/585462>
- Aryal, K. P. (2006). *Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods*. Norwegian University of Science and Technology.
- Bardhi, D. (2021). Slopes Analyses—Case Study, Slope Stability of Bypass Project. *European Journal of Engineering and Formal Sciences*, 4(2), 34.
<https://doi.org/10.26417/466qfl71z>
- Bishop, A. (1955). The use of slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7–17.
- BNPB. (2017). *Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB)*. InaRISK.
<https://inarisk.bnpb.go.id/>
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design (5th ed.)* (5th ed.). McGraw-Hill.
- BPS. (2024). *Jumlah Penduduk Menurut Kecamatan dan Jenis Kelamin*. Jumlah Penduduk Menurut Kecamatan Dan Jenis Kelamin. <https://kulonprogokab.bps.go.id/id/statistics-table/2/NDQ0IzI=/jumlah-penduduk-menurut-kecamatan-dan-jenis-kelamin--tahun-2020.html>
- Burman, A., Acharya, S. P., Sahay, R. R., & Maity, D. (2015). *A Comparative Study Of Slope Stability Analysis Using Traditional Limit Equilibrium Method And Finite Element Method*.
- Fellenius, W. (1936). Calculations of the Stability of Earth Dams. *Proceedings of the 2nd Congress on Large Dams*, 4, 445.
- Fitri, S. N., & Wahyuni, F. (2022). Safety Factors Investigation Based on FEM and LEM Approach in Toll Road Embankment Slope. *Civil Engineering and Architecture*, 10(5), 1948–1966. <https://doi.org/10.13189/cea.2022.100518>
- Google Earth. (2022). *Research Location* (2022nd ed.) [Map]. Google Earth.
- Jianti, M. (2021). *Pemetaan Tingkat Kerawanan Bencana Tanah Longsor Pada Kawasan Lahan Terbangun Menggunakan Metode Berjenjang Tertimbang Di Sebagian Kabupaten Kulon Progo (Studi Kasus Kecamatan Samigaluh, Girimulyo, dan Kokap)* [Univesitas Gadjah Mada]. <http://etd.repository.ugm.ac.id/>
- Look, B. (2007). *Handbook of geotechnical investigation and design tables*.
<https://doi.org/10.1201/9780203946602>
- Maryanto, S. (2013). *Sedimentologi Batugamping Formasi Jonggrangan Di Sepanjang Lintasan Gua Kiskendo, Girimulyo, Kulonprogo*. 23(2).
- Memon, M. Y. (2018). *A Comparison Between Limit Equilibrium and Finite Element Methods for Slope Stability Analysis*. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16932.53124>
- Morgenstern, N. R., & Price, V. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79–93.
- PLAXIS. (2012). *PLAXIS Manual* [Manual]. Delft University of Technology.
- Remesh, P., Sha, R., Mohan, S., & Paul, M. M. (2023). *Slope Stability Analysis Using Geostudio And Plaxis 2d Software: A Comparative Study*. 10(10).
- Santie, P. A. W., Wilopo, W., & Faris, F. (2024). Slope Stability Analysis Using Electrical Resistivity Tomography and Limit Equilibrium Method: A Case Study from Girimulyo, Kulon Progo. *Journal of Applied Geology*, 9(1), 37. <https://doi.org/10.22146/jag.97467>
- Sudinda, T. W. (2020). *Analisis Kestabilan Lereng Pada Lokasi Tambang Batubara Tanah Laut Kalimantan Selatan*.
- Wubalem, A. (2022). *Comparison of General Limit Equilibrium Methods for Slope Stability Analysis*. <https://doi.org/10.20372/EJNCS/EA.2022.18>