



KAJIAN KESTABILAN LERENG TAMBANG TERHADAP IMPLIKASINYA PADA INFRASTRUKTUR JALAN DI ZONA KRITIS

STABILITY ASSESSMENT OF MINING SLOPES AND ITS IMPLICATIONS ON ROAD INFRASTRUCTURE IN CRITICAL ZONES

Lusitania*¹, D. Nurohim², Jarwinda³, H. H. Syahputra⁴, A. Kurniawan⁵

¹ Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

² Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

³ Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera

⁴ PT Banti Tekno Investama, ⁵ PT Indomining

¹⁻²Jalan Raya Palembang-Indralaya KM 32, Indralaya, Kabupaten Ogan Ilir, Telp (0711) 580739

³Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Telp (0721) 8030188

⁴New Caribbean, W6, No.10 Balikpapan Regency, Balikpapan Selatan, Telp. 0542-7581763

⁵Sanga-Sanga Dalam, Sanga Sanga, Kutai Kartanegara Regency, East Kalimantan

e-mail: *¹lusitania@ft.unsri.ac.id, ²dedenurohim@ft.unsri.ac.id, ³jarwinda@ta.itera.ac.id

⁴harry@banti-indonesia.com, ⁵agus.kurniawan@indomining.co.id

ABSTRAK

Lereng tambang yang berdekatan dengan infrastruktur jalan umum di zona kritis menghadirkan risiko tinggi terhadap keselamatan operasional tambang dan infrastruktur tersebut. Stabilitas lereng merupakan faktor kunci yang perlu dianalisis untuk menghindari potensi longsor yang dapat merusak infrastruktur dan mengganggu aktivitas tambang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng tambang aktif di PT Indomining, Kalimantan Timur, yang berjarak ±60 meter dari jalan umum. Metode penelitian yang digunakan adalah Metode Kesetimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*) dengan bantuan perangkat lunak SLIDE versi 6.0. Data primer diperoleh melalui survei lapangan dan investigasi geoteknik, sedangkan data sekunder meliputi hasil uji laboratorium dan pengeboran geoteknik. Penelitian ini memodelkan geometri lereng, menghitung Faktor Keamanan (FK), dan melakukan simulasi untuk mengoptimalkan desain lereng. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh penampang lereng yang dianalisis memenuhi nilai FK minimum yang disyaratkan dengan FK dinamis di atas 1,05 atau sekitar 1,246–1,417 dan Probabilitas Kegagalan (PoF) sebesar 0%. Penelitian ini menegaskan bahwa lereng tetap stabil di bawah beban dinamis yang signifikan akibat lalu lintas dengan bobot maksimum 40 ton.

Kata kunci: kestabilan lereng, metode kesetimbangan batas, analisis geoteknik, zona kritis, faktor keamanan (FK)

ABSTRACT

Mining slopes adjacent to public road infrastructure in critical zones pose a significant risk to the operational safety of the mine and the infrastructure itself. Slope stability is a key factor that must be analyzed to prevent potential landslides that could damage infrastructure and disrupt mining activities. This study aims to assess the stability of active mine slopes at PT Indomining, East Kalimantan, located approximately 60 meters from a public road. The research methodology applied the Limit Equilibrium Method (LEM) with the assistance of Slide version 6.0 software. Primary data were obtained through field surveys and geotechnical investigations, while secondary data included laboratory testing results and geotechnical borehole data. The study modeled slope geometry, calculated the Safety Factor (SF), and conducted simulations to optimize slope design. The analysis results show that all analyzed slope sections meet the minimum required SF, with dynamic SF values above 1.05, ranging from approximately 1.246 to 1.417, and a Probability of Failure (PoF) of 0%. The study confirms that the slopes remain stable under significant dynamic loads, including traffic with a maximum weight of 40 tons.

Keywords: slope stability, limit equilibrium method, geotechnical analysis, critical zone, safety factor (SF)

PENDAHULUAN

Studi Himalaya (2023) dan Selsabeel, (2021) mengkaji kestabilan lereng pada jalan dengan menggunakan metode geoteknik dalam menentukan stabilitas. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa desain yang kurang optimal dapat meningkatkan risiko longsor yang membahayakan infrastruktur di sekitar [1 & 2]. Selain itu, pada kondisi tertentu, terutama di zona kritis yang berdekatan dengan dinding lereng aktif, keberadaan jalan tambang menghadapi ancaman serius akibat potensi instabilitas lereng [3]. Kegagalan lereng tidak hanya berdampak pada hilangnya massa batuan, tetapi juga dapat merusak badan jalan, memutus akses *haulage*, menghambat produksi, serta menimbulkan risiko keselamatan yang signifikan bagi pekerja maupun operasional tambang [4].

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 4 Tahun 2012 terkait jarak minimum dari tepi galian lubang tambang atau batas pit limit tambang dengan pemukiman warga (jalan) adalah 500 m [5]. Sementara itu, Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 1827/K/30/MEM/2018 bahwa jarak minimum dari tepi galian lubang tambang terhadap jalan bersifat kondisional dengan menunjukkan adanya hasil kajian teknis yang disampaikan dalam laporan khusus kepada Kepala Inspektur Tambang [6].

Berdasarkan penelitian dan peraturan di atas menunjukkan bahwa kajian teknis yang mengintegrasikan faktor geologi, rekayasa, lingkungan dan distribusi infrastruktur menjadi kunci dalam mengidentifikasi area rawan longsor. Oleh karena itu, kestabilan lereng tambang merupakan faktor kunci dalam operasi penambangan yang berkelanjutan. Kondisi lereng yang tidak stabil dapat menyebabkan berbagai dampak negatif, termasuk kerusakan infrastruktur di sekitar tambang dan potensi kecelakaan kerja. Dengan demikian, analisis geoteknik untuk menentukan kestabilan lereng merupakan hal yang sangat penting, terutama pada zona kritis yang posisi lereng tambang berbatasan dengan infrastruktur seperti jalan umum.

Penelitian ini berfokus pada lereng tambang di PT Indominco, Kalimantan Timur, yang terletak di zona kritis dengan jarak ± 60 meter dari jalan umum. Solusi yang dilakukan dengan menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM) yaitu perangkat lunak SLIDE versi 6.0 untuk memodelkan kestabilan lereng dan simulasi dinamis. Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan pengaruh beban dinamis, seperti lalu lintas kendaraan berbobot maksimum 40 ton, serta aktivitas seismik di lokasi penelitian. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan rekomendasi teknis yang tidak hanya memastikan kestabilan lereng, tetapi juga menjaga keberlanjutan dan keselamatan infrastruktur jalan yang berdekatan dengan zona tambang.

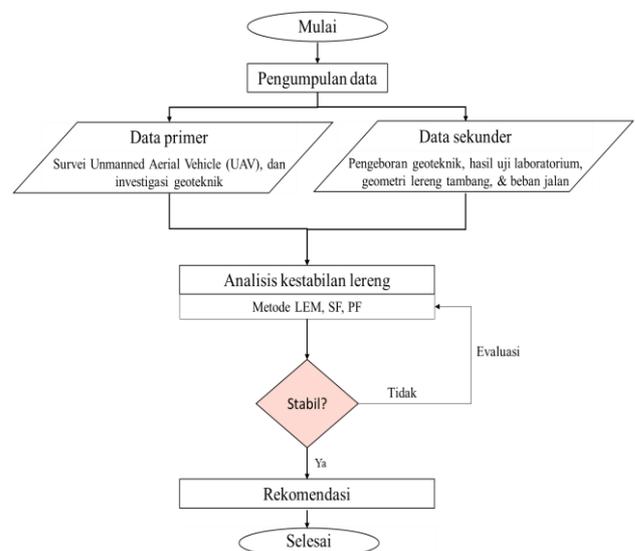
METODE PENELITIAN

PT Indominco adalah salah satu perusahaan yang bergerak di sektor pertambangan batubara yang telah memiliki izin Usaha Pertambangan Operasi Produksi (IUP-OP) yang berada di Kalimantan Timur (Gambar 1). Penelitian berlokasi di daerah Kecamatan Sanga Sanga, Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur dengan luas areal konsesi 683 Ha.

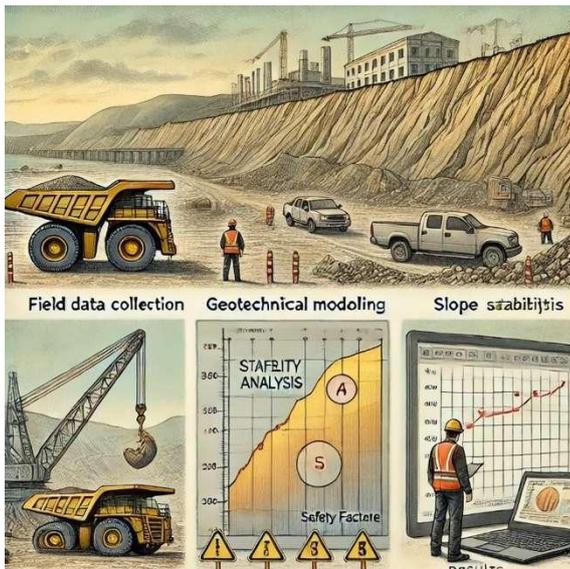


Gambar 1. Lokasi Perusahaan (PT Indominco)

Penelitian ini menganalisis kestabilan lereng tambang terhadap jalan umum yang berada pada zona kritis. Waktu penelitian berlangsung pada bulan Mei-Juni 2024, alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan ilustrasi tahapan penelitian pada Gambar 3.



Gambar 2. Diagram alir penelitian



Gambar 3. Ilustrasi penelitian

Pengumpulan Data

Pengumpulan data bertujuan untuk mendapatkan data yang mendukung penelitian ini [7 & 8]. Data yang digunakan yakni data primer dan data sekunder.

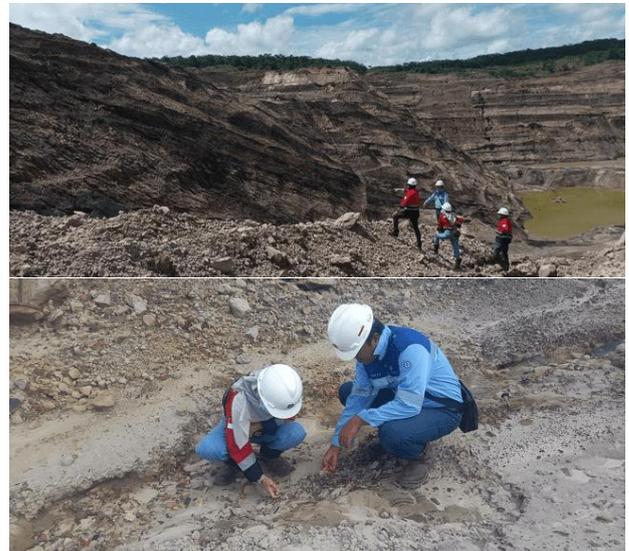
- Data Primer dari:
 1. Survei lapangan menggunakan UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), kegiatan ini (Gambar 4) untuk memetakan topografi area tambang dan dapat memperbarui peta kontur dan kondisi lapangan secara aktual.



Gambar 4. Kegiatan *Unmanned Aerial Vehicle*

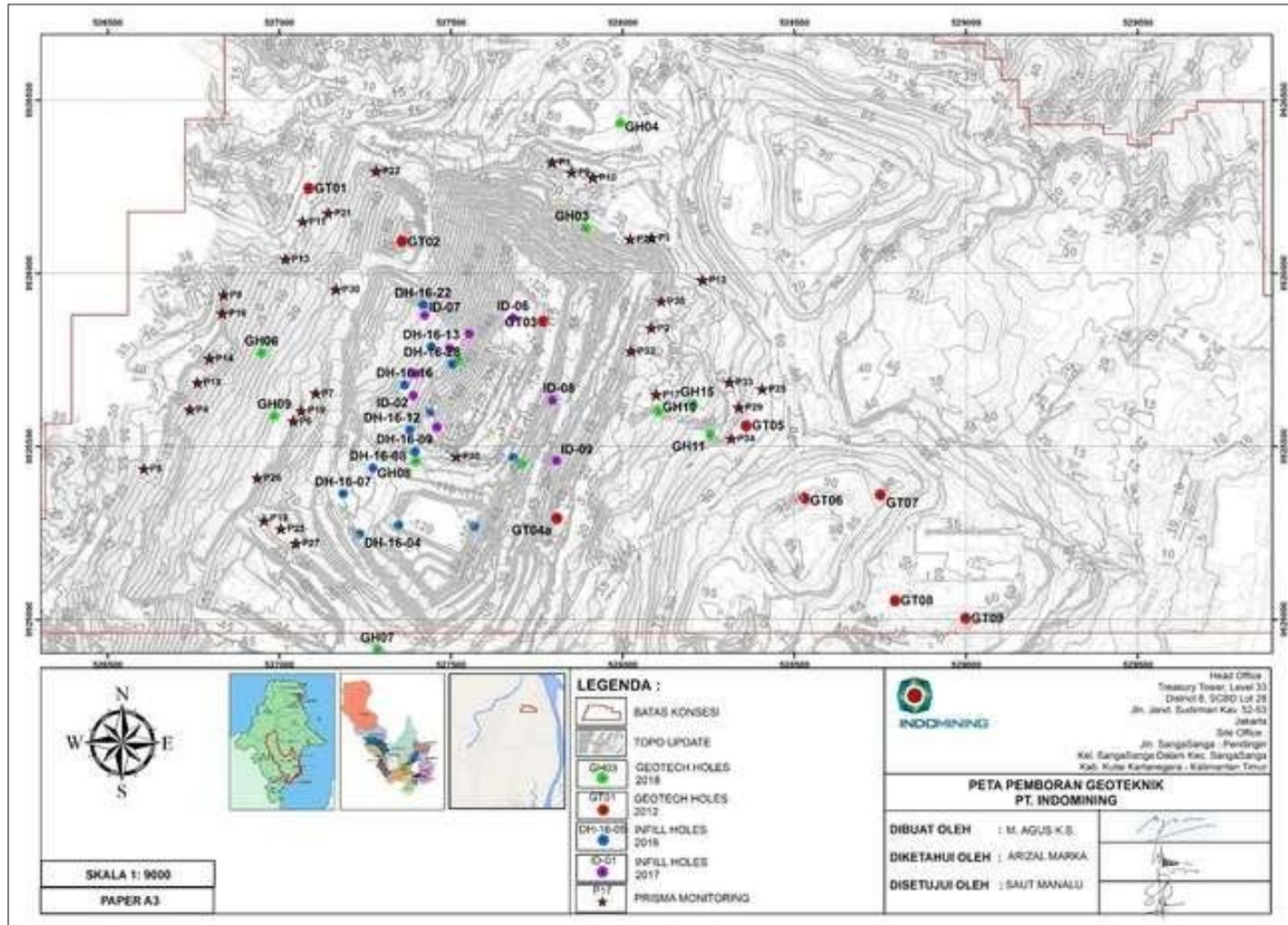
2. Investigasi geoteknik [7 - 12] merupakan kegiatan yang penting untuk dapat menganalisis kegiatan geoteknik. Pada studi kasus ini (Gambar 5), kegiatan yang dilakukan ialah pengamatan

mengenai litologi lapisan batuan pembentuk lereng, deskripsi kekuatan massa batuan, pemetaan rembesan air di jalur-jalur *crack* dan area-area yang rawan longsor.



Gambar 5. Kegiatan investigasi geoteknik

- Data Sekunder berupa:
 1. Data pengeboran geoteknik dari 12 titik bor yang tersebar dari lokasi IUP PT Indominig, dapat dilihat pada Gambar 6.
 2. Berdasarkan hasil uji laboratorium diperoleh sifat fisik dan mekanik batuan. Sampel batuan yang diambil dari lokasi pengeboran diuji di laboratorium untuk menentukan sifat fisik dan mekanik batuan, meliputi:
 - a) Uji Kuat Tekan Uniaksial (*Unconfined Compressive Strength - UCS*): Untuk menentukan kekuatan batuan terhadap tekanan.
 - b) Uji Geser Langsung (*Direct Shear Test*): Untuk mengetahui sudut gesekan dalam dan kohesi batuan.
 - c) Uji Bobot Isi (*Natural Unit Weight Test*): Untuk mengetahui bobot jenis alami dari berbagai jenis batuan.
 3. Geometri lereng tambang eksisting menjadi kunci dalam menganalisis kestabilan lereng [13].
 4. Beban atau *load* yang diizinkan pada jalan umum, agar menjaga kestabilan lereng tambang yang aktif ataupun sebaliknya.



Gambar 6. Peta Penyebaran Lokasi Titik Bor Geoteknik

Analisis Kestabilan Lereng

Metode yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng adalah *Limit Equilibrium Method* (LEM) [6] dengan menggunakan *software* SLIDE versi 6.0 dari *RocScience*. Pendekatan ini digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng dan implikasinya pada infrastruktur jalan dengan berbagai *section*.

Proses analisis meliputi beberapa tahapan:

- **Pemodelan Geometri Lereng:** berdasarkan data topografi dan pengeboran geoteknik, dibuat model geometri lereng yang mencakup ketinggian lereng (*overall slope height*) dan sudut kemiringan (*overall slope angle*).
- **Penghitungan Faktor Keamanan (*Safety Factor - SF*):** kriteria stabilitas lereng diukur berdasarkan nilai FK minimum sebesar 1,05 dan probabilitas kegagalan (PoF) ditentukan tidak lebih dari 10%, sebagaimana diatur dalam Kepmen ESDM No. 1827 Tahun 2018.
- **Simulasi Alternatif Desain:** dilakukan simulasi untuk mengoptimalkan geometri lereng, seperti mengubah elevasi lantai pit dan sudut kemiringan lereng, hingga ditemukan desain yang optimal.

Evaluasi dan Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng dan kajian hidrologi, rekomendasi teknis disusun untuk mendukung rencana pemindahan jalan. Evaluasi dilakukan untuk menentukan geometri lereng yang optimal dan aman, serta sistem drainase yang tepat untuk menjaga kestabilan lereng dan jalan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

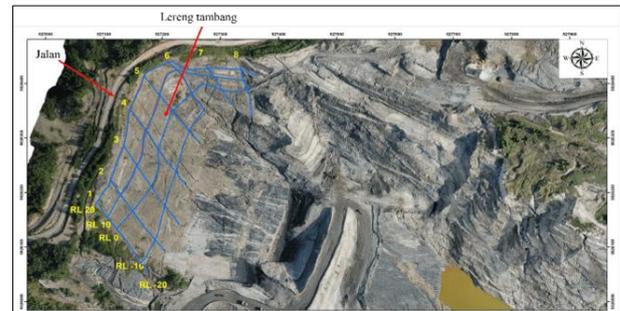
Kriteria kestabilan lereng mengacu kepada kriteria nilai Faktor Keamanan minimum lereng keseluruhan yang disyaratkan oleh Kepmen ESDM No. 1827 Tahun 2018 (Tabel 1). Kestabilan lereng dianalisis menggunakan program SLIDE versi 6.0 (metode kesetimbangan batas dua dimensi), dengan metode irisan *Bishop* dan *Janbu*.

Tingkat keparahan longsor yang digunakan untuk lereng tambang yaitu menengah, dengan FK statik = 1,30 dan FK dinamik = 1,05 dengan PoF = 10%. Adapun lereng tambang yang dianalisis berjarak ±60 m dari *crest* lereng tambang aktif lihat Gambar 7, dengan konsep pemodelan lereng yang dianalisis yaitu;

- Kondisi jalan yang dianalisis: dengan *load* 40 ton.
- Kondisi lereng aktual
- Kondisi pembebanan: dinamik, dengan kondisi MAT jenuh. Perhitungan FK dinamik pada lereng menggunakan prinsip pseudostatik dengan PGA (*Peak Ground Acceleration*) gempa diberikan sebagai percepatan horizontal ah. Nilai PGA tersebut didapat dari hasil studi kegunaan. Pemodelan dinamik lereng juga mengadopsi faktor reduksi gempa = 50% dan faktor amplifikasi = 1,0 g.

Tabel 1. Kriteria FK minimum untuk lereng tambang (Kepmen ESDM No. 1827 Tahun 2018)

Jenis lereng	Keparahan longsor (<i>Consequences of Failure</i> atau CoF)	Kriteria dapat diterima (<i>Acceptance Criteria</i>)		
		Faktor keamanan (FK) statik	Faktor keamanan (FK) dinamik	Probabilitas kelongsoran (<i>Probability of Failure</i> atau PoF) (FK ≤ 1)
Lereng tunggal	Rendah-tinggi	1,1	Tidak ada	25 – 50%
Inter-ramp	Rendah	1,15 – 1,20	1	25%
	Menengah	1,2 – 1,3	1	20%
	Tinggi	1,2 – 1,3	1,1	10%
Lereng keseluruhan	Rendah	1,2 – 1,3	1	15 – 20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3 – 1,5	1,1	5%



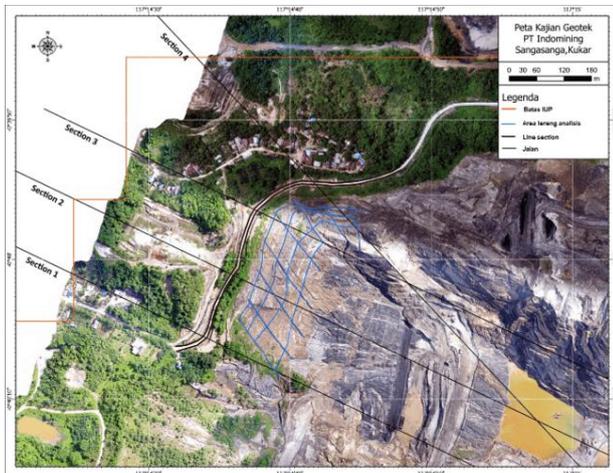
Gambar 7. Lereng tambang yang dianalisis

Selanjutnya, parameter geoteknik untuk analisis kestabilan lereng yaitu; γ_n = bobot isi natural, ϕ = sudut geser dalam, dan c = kohesi, seperti tercantum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Parameter geoteknik penelitian

No.	Litologi	Bobot isi natural, γ_n (kN, m ³)	Kohesi, c (kPa)	Sudut geser dalam, ϕ (°)
1	Tanah	15,70	107,01	14,91
2	Batu lempung	21,95	209,90	36,10
3	Batu lanau	22,39	231,00	28,90
4	Batu pasir	22,03	230,40	30,80
5	Batubara	12,90	283,00	28,98
6	Timbunan	18,22	53,33	22,74

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng dari keempat penampang (Gambar 8), menunjukkan bahwa seluruh lereng memenuhi nilai Faktor Keamanan (FK) minimum yaitu FK dinamik >1,05 dengan probabilitas kegagalan lereng PoF <10%.

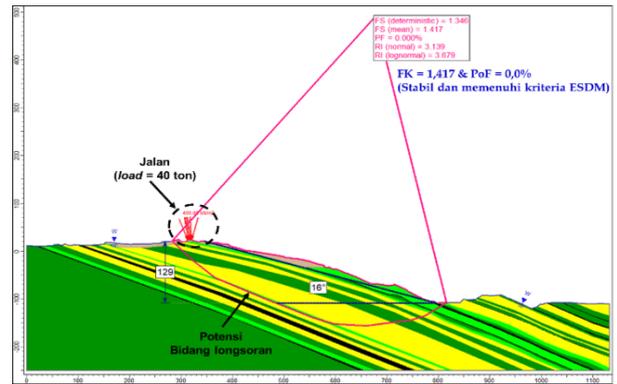


Gambar 8. Lokasi penampang yang dianalisis

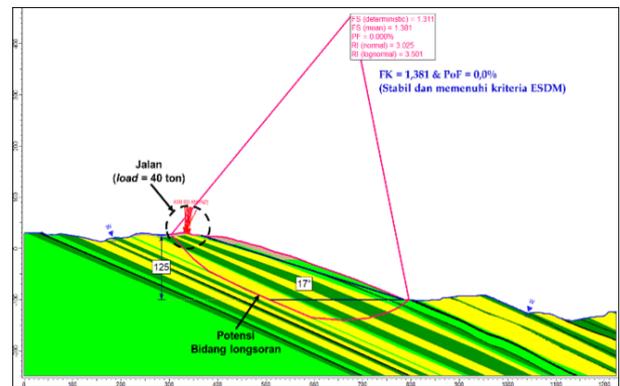
FK yang didapat bervariasi mulai dari 1,246 – 1,417 dengan PoF 0%. Nilai FK dan PoF ini cukup tinggi untuk berbagai variasi geometri lereng dan beban yang ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa lereng dalam keadaan stabil dan aman saat kondisi pembebanan dinamis. Dengan demikian, hal ini menjadi penting mengingat adanya pengaruh beban dinamis seperti gempa atau aktivitas kendaraan berat di jalan umum yang berada dalam zona kritis. Hasil analisis kestabilan lereng pada Tabel 3 dan Gambar 9 sampai dengan Gambar 12.

Tabel 3. Hasil analisis kestabilan lereng

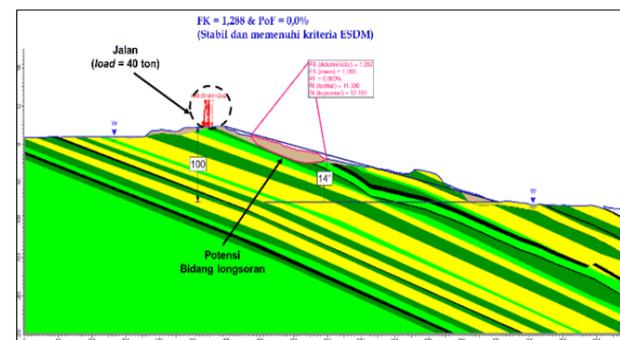
No.	Geometri lereng keseluruhan		Pembebanan		Kestabilan
	H (m)	α (°)	Dinamik ($a_h = 0,1$ g)		
			FK	PoF (%)	
1	129	16	1,417	0,0	Stabil dan memenuhi kriteria ESDM
2	125	17	1,381	0,0	Stabil dan memenuhi kriteria ESDM
3	194	32	1,288	0,0	Stabil dan memenuhi kriteria ESDM
4	195	33	1,246	0,0	Stabil dan memenuhi kriteria ESDM



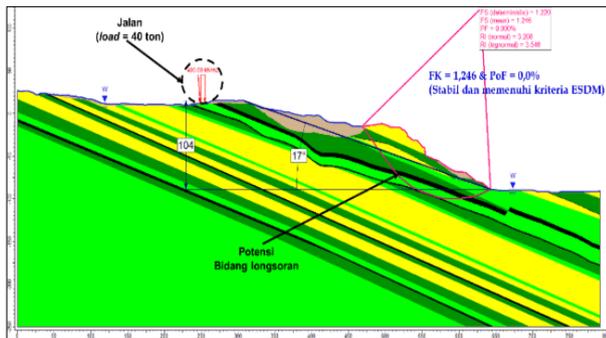
Gambar 9. Analisis kestabilan lereng penampang pertama



Gambar 10. Analisis kestabilan lereng penampang kedua



Gambar 11. Hasil analisis kestabilan lereng penampang ketiga



Gambar 12. Analisis kestabilan lereng penampang keempat

Geometri lereng yang dianalisis melibatkan berbagai aspek seperti sudut kemiringan, tinggi lereng, serta sifat fisik dan mekanik dari batuan penyusun lereng. Pada penampang lereng yang dianalisis (Tabel 2), material seperti batupasir, batulanau, dan batulempung menunjukkan variasi sudut gesek dalam dan kohesi yang berpengaruh pada kestabilan. Kondisi lereng yang terletak dekat dengan jalan umum dapat tetap stabil selama desain geometri lereng dioptimalkan dengan benar.

Pentingnya mempertahankan sudut kemiringan dan memperkuat massa batuan pada lereng ini terbukti efektif dalam menjaga kestabilan. Simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa meskipun beban 40 ton di jalan umum diterapkan, lereng masih mampu mempertahankan stabilitas dengan nilai FK yang memenuhi standar.

Jarak antara jalan umum dengan lereng tambang menjadi salah satu tantangan terbesar dalam operasi tambang di zona kritis. Jika tidak diantisipasi dengan baik, potensi longsor dapat berdampak langsung pada kerusakan jalan, yang dapat berakibat fatal baik bagi operasional tambang maupun keselamatan publik.

Dalam kajian ini, faktor keamanan dinamis yang dihitung berdasarkan skenario gempa juga memberikan indikasi bahwa lereng memiliki tingkat keamanan yang cukup untuk menahan beban dinamis akibat getaran atau aktivitas kendaraan berat. Ini menunjukkan bahwa pengelolaan kestabilan lereng yang efektif tidak hanya menjaga keamanan operasional tambang, tetapi juga memastikan keberlanjutan infrastruktur yang berada di sekitarnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian geoteknik dan analisis kestabilan lereng tambang menggunakan pemodelan geoteknik, kondisi kestabilan lereng menunjukkan bahwa seluruh lereng tambang yang dianalisis memiliki **Faktor Keamanan (FK) yang memadai**, dengan nilai FK dinamis berkisar antara 1,246 hingga 1,417, yang memenuhi standar Kepmen ESDM No. 1827 Tahun 2018.

Probabilitas kegagalan lereng (PoF) juga berada di bawah 10%, dengan PoF 0%, yang menunjukkan bahwa lereng dalam kondisi stabil. Hal ini dipengaruhi oleh geometri lereng (tinggi lereng dan sudut kemiringan), variasi sifat fisik dan mekanik batuan (sudut gesek dalam dan kohesi batuan), menjadi faktor kunci dalam menentukan desain lereng yang optimal.

Kedekatan lereng tambang dengan jalan umum menjadi perhatian utama dalam studi ini. Hasil simulasi menunjukkan bahwa jalan umum masih dalam kondisi stabil selama desain geometri lereng dioptimalkan dan beban kendaraan berat tidak melebihi batas yang ditetapkan. Dengan beban kendaraan hingga 40 ton, lereng tetap mempertahankan stabilitas yang baik, memastikan bahwa infrastruktur jalan tidak mengalami kerusakan atau terganggu oleh aktivitas tambang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Himalaya, G. (2023). *Geotechnical Stability Assessment of Road-cut Slopes: A Case Study of Geotechnical Stability Assessment of Road-cut Slopes: A Case Study of Srinagar*. May.
- [2] Selsabeel, S., Widiarso, D. A., & Trisnawati, D. (2021). *Analisis Balik Stabilitas Lereng Tambang dan Rekomendasi Rekayasa Keteknikannya, Studi Kasus: Area Low Wall Pit Y Blok 4900-550 Strip 3500-4300 PT. Pamapersada Nusantara Site PT. Adaro Indonesia*. Jurnal Geosains dan Teknologi, 4(3), 142-150.
- [3] Turner, D. (2025). *Landslide risk zoning in open-pit mines: Integrating geotechnical, environmental, and infrastructure factors*. Landslides, 22(1), 55–70.
- [4] Hustrulid, W., & Read, J. (2024). *Slope design and risk assessment in open pit mining: Integrating geotechnical and operational perspectives*. International Journal of Mining Science and Technology, 34(6), 1123–1138.
- [5] Kementerian Energi Sumber Daya Mineral. (2018). Kepmen ESDM No. 1827 K. 30. MEM - 2018. *Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*. Jakarta: Kementerian Energi Sumber Daya Mineral.
- [6] Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2012). Permen No. 4 Tahun 2012. *Indikator Ramah Lingkungan untuk Usaha dan/atau Kegiatan Penambangan Terbuka Batubara*. Jakarta: Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia.
- [7] Arif, Irwandy. (2015). *Geoteknik Tambang*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- [8] Rai, Made Astawa, Suseno Kramadibrata, dan Ridho Kresna Wattimena. (2013). *Mekanika Batuan*. Bandung: Institut Teknologi



Bandung.

- [9] Miscevic, P., Vlastelica, G., 2014. *Impact of weathering on slope stability in soft rock mass. J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 6, 240–250.
- [10] Rocscience, 2020. RocData 5.0. “*Analysis of Rock, Soil, and Discontinuity Strength Data.*” Rocscience Inc., Toronto.
- [11] Hoek, E., Brown, E.T., 2018. *The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. J. Rock Mech. Geotech. Eng.*
- [12] Zhang, Q., Huang, X., Zhu, H., Li, J., 2019. *Quantitative assessments of the correlations between rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI). Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 83, 73–81.
- [13] Huang, S., Wang, J., Qiu, Z., Kang, K., 2018. *Effects of cyclic wetting-drying conditions on elastic modulus and compressive strength of sandstone and mudstone. Processes* 6, 1–17.