



STABILITAS LERENG TAMBANG TERBUKA MENGUNAKAN METODE LIMIT EQUILIBRIUM DAN ANALISIS RISIKO UNTUK MENUNJANG PERENCANAAN INFRASTRUKTUR TAMBANG

STABILITY OF OPEN MINE SLOPE USING THE LIMIT EQUILIBRIUM METHOD AND RISK ANALYSIS TO SUPPORT MINING INFRASTRUCTURE PLANNING

Irianto^{1*}, Mapuay Menasye Theo Afasedanya²

¹ Magister Rekayasa Sipil, Universitas Yapis Papua, Jl. Dr. Sam Ratulangi No.11 Dok. V atas, Indonesia

² Teknik Pertambangan Politeknik Amamapare Timika, Jl. C Heatubun, Kwamki Baru, Indonesia

*Penulis korespondensi: irian.anto@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1st July 2025

Received in revised from 7th August 2025

Accepted 12th September 2025

Available online November 2025

Keywords:

Risk Analysis

Limestone

Mine Drainage

Factor of Safety (FoS)

Slope Stability

ABSTRACT

Slope stability is a critical aspect in open-pit mining operations, particularly in limestone (C Group Mining) quarries that are widely developed in the Polimak area, Jayapura City. This study aims to evaluate slope stability under various slope geometries and hydrogeological conditions, as well as to establish a relevant risk map to support the design of safe and sustainable slopes. The methodology involved field surveys to collect slope geometry data and soil-rock samples, followed by laboratory testing to determine key geotechnical parameters (cohesion, internal friction angle, unit weight, and UCS). Slope stability analysis was performed using the Limit Equilibrium approach with Slide2 software, considering different combinations of slope heights (10–20 m), angles (45°–65°), and drainage conditions (dry vs. saturated). The results indicate that increasing slope height and angle significantly reduces the Factor of Safety (FoS), while rising groundwater levels due to rainfall can further decrease FoS by up to 20%. For instance, a 20 m high slope at 65° under saturated conditions yielded an FoS of only 0.73, far below the minimum safety threshold (FoS ≥ 1.3). Based on the risk matrix, such conditions fall into the high to extreme risk categories. This study recommends implementing multi-bench slopes with a maximum angle of 45°, complemented by proper drainage systems to maintain stability. The findings are expected to serve as practical guidance for managing limestone quarry operations in Polimak to ensure safe and efficient mining activities.

ABSTRAK

Stabilitas lereng merupakan aspek kritis dalam kegiatan tambang terbuka, terutama pada tambang batugamping (Golongan C) yang marak di wilayah Polimak, Kota Jayapura. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas lereng berdasarkan variasi geometri lereng, kondisi hidrogeologi, serta menyusun peta risiko yang relevan guna mendukung perencanaan desain lereng yang aman dan berkelanjutan. Metode penelitian meliputi survei lapangan untuk

Kata Kunci:

Analisis risiko

Batugamping

Drainase tambang

Faktor keamanan (FoS)

Stabilitas lereng

ABSTRAK

memperoleh geometri lereng dan sampel tanah serta batuan, dilanjutkan dengan uji laboratorium untuk menentukan parameter geoteknik utama (kohesi, sudut geser dalam, berat jenis, dan UCS). Analisis stabilitas dilakukan menggunakan pendekatan Limit Equilibrium dengan perangkat lunak Slide2 pada berbagai kombinasi tinggi lereng (10–20 m), sudut (45° – 65°), dan kondisi drainase (kering vs jenuh). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan tinggi dan sudut lereng signifikan menurunkan Faktor Keamanan (FoS), sementara kenaikan muka air tanah akibat curah hujan dapat menurunkan FoS hingga 20%. Pada lereng 20 m dengan sudut 65° , kondisi jenuh menghasilkan FoS hanya 0.73, jauh di bawah ambang aman ($\text{FoS} \geq 1.3$). Berdasarkan matriks risiko, kondisi tersebut termasuk kategori risiko tinggi hingga ekstrem. Penelitian ini merekomendasikan penerapan lereng bertingkat dengan sudut maksimal 45° disertai sistem drainase untuk menjaga stabilitas. Hasil ini diharapkan menjadi acuan praktis dalam pengelolaan tambang batugamping di Polimak agar operasi berjalan aman dan efisien.

How to Cite This Article: Irianto. dkk (2025). Stabilitas Lereng Tambang Terbuka Menggunakan Metode Limit Equilibrium dan Analisis Risiko untuk Menunjang Perencanaan Infrastruktur Tambang: Jurnal Penelitian Tambang, 8(2), 35–41. <https://doi.org/10.56139/intan.v8i2.316>

PENDAHULUAN

Pertambangan terbuka (open pit mining) merupakan salah satu metode penambangan yang paling umum diterapkan pada berbagai komoditas, termasuk mineral berharga seperti emas, tembaga, nikel, batubara, hingga intan. Dalam konteks tambang intan maupun tambang lain yang memiliki nilai ekonomis tinggi, penerapan tambang terbuka memberikan keunggulan dalam hal efisiensi penambangan, kapasitas produksi besar, serta kontrol terhadap mutu material yang ditambang. Namun demikian, metode ini juga membawa konsekuensi penting berupa perubahan bentang alam secara drastis, pembukaan lereng-lereng tinggi dengan kemiringan curam, serta potensi instabilitas geoteknik yang dapat berakibat fatal bagi keselamatan operasional tambang maupun infrastruktur penunjangnya.

Stabilitas lereng pada tambang terbuka merupakan aspek krusial dalam keseluruhan perencanaan dan operasional tambang. Lereng yang tidak stabil tidak hanya berpotensi menyebabkan kerugian material akibat longsoran tanah atau batuan (slope failure), tetapi juga mengancam keselamatan pekerja, mengganggu kontinuitas operasi tambang, merusak fasilitas penting seperti jalan angkut (hauling road), kolam pengendapan, serta dapat berdampak luas pada lingkungan sekitar. Kegagalan lereng pada sektor pertambangan telah banyak tercatat dalam studi maupun laporan historis kecelakaan tambang global yang menunjukkan potensi risiko apabila desain lereng tidak dilakukan secara cermat dengan memperhitungkan kompleksitas geoteknik setempat. Kompleksitas stabilitas lereng ini dapat meningkat ketika mempertimbangkan kondisi geologi yang

heterogen, variasi parameter mekanik tanah dan batuan, serta dinamika air tanah yang mempengaruhi tekanan pori. Pada banyak kasus tambang, keterbatasan data geoteknik baik dari jumlah titik bor maupun pengujian laboratorium seringkali menyebabkan tingginya ketidakpastian dalam menentukan parameter desain. Ditambah lagi, penggunaan faktor keamanan tunggal sebagai acuan seringkali tidak cukup untuk menggambarkan probabilitas kegagalan secara komprehensif, sehingga pendekatan analisis risiko mulai banyak dikembangkan dan diintegrasikan dalam evaluasi stabilitas lereng tambang moderen.

Dalam studi tambang batu kapur di Indonesia, faktor keamanan lereng sangat dipengaruhi oleh keberadaan air tanah yang dapat meningkatkan tekanan pori sehingga menurunkan stabilitas lereng secara signifikan. Oleh karena itu, penerapan analisis probabilistik menjadi penting untuk memperkirakan peluang kegagalan yang tidak dapat diungkap hanya dengan metode deterministik [1].

Salah satu metode konvensional yang masih dominan digunakan untuk evaluasi stabilitas lereng adalah metode *Limit Equilibrium* (LEM) [2,3], seperti metode *Bishop Simplified*, Janbu, *Morgenstern-Price*, dan *Spencer*. Metode-metode ini mempermudah estimasi faktor keamanan (FoS) lereng terhadap kelongsoran, dengan mempertimbangkan keseimbangan gaya dan momen pada potensi bidang geser kritis. Meskipun metode ini secara deterministik memberikan nilai FoS, pendekatan lebih lanjut melalui analisis probabilistik dan *risk assessment* diperlukan untuk mengakomodasi variabilitas parameter dan potensi kegagalan yang

mungkin masih tersembunyi. pendekatan terpadu antara metode *limit equilibrium* dan elemen hingga dapat memberikan hasil evaluasi stabilitas yang lebih komprehensif, khususnya pada area tambang terbuka dengan kondisi geoteknik yang heterogen [4]. Analisis probabilistik banyak digunakan untuk memperkuat hasil deterministik metode *limit equilibrium* sehingga dapat mengantisipasi variabilitas parameter geoteknik yang tinggi pada tambang terbuka [5,6].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini diarahkan untuk melakukan evaluasi stabilitas lereng pada area tambang terbuka dengan pendekatan komprehensif. Penelitian akan mengintegrasikan metode *Limit Equilibrium* untuk memperoleh faktor keamanan lereng pada berbagai kondisi desain, serta melakukan analisis risiko dengan memetakan probabilitas dan dampak kegagalan lereng terhadap infrastruktur tambang. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang kredibel, tidak hanya dalam bentuk nilai FoS, tetapi juga dalam bentuk relevansi strategi mitigasi risiko, guna menjamin keberlanjutan operasi tambang serta keselamatan seluruh aktivitas yang bergantung pada stabilitas lereng tersebut.

Secara lebih spesifik, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengidentifikasi kondisi geologi, geoteknik, dan hidrogeologi yang mempengaruhi stabilitas lereng pada area studi.
2. Melakukan analisis stabilitas lereng menggunakan metode *Limit Equilibrium* untuk menentukan faktor keamanan lereng pada berbagai variasi geometri dan kondisi air tanah.
3. Melakukan analisis risiko untuk memetakan probabilitas kegagalan dan konsekuensinya terhadap operasional tambang serta infrastruktur penunjang.
4. Menyusun rekomendasi teknis berupa batasan desain geometri lereng yang optimal dan tindakan mitigasi risiko yang diperlukan agar stabilitas lereng dapat terjamin sepanjang umur tambang.

Dengan capaian tersebut, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam meningkatkan keandalan desain lereng tambang terbuka, meminimalisir potensi kerugian ekonomi dan lingkungan, serta memperkuat aspek keselamatan kerja pada industri pertambangan di Indonesia, khususnya pada sektor vital seperti penambangan intan maupun mineral bernilai tinggi lainnya.

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan studi kasus pada area tambang batugamping di Polimak, Kota Jayapura. Penelitian ini bersifat deskriptif-analitis, di mana data geoteknik dikumpulkan dan dianalisis secara kuantitatif untuk

mengevaluasi stabilitas lereng dan memetakan risiko. Beberapa studi juga menggabungkan pendekatan LEM dengan metode elemen hingga untuk memperoleh hasil evaluasi stabilitas yang lebih *robust* [7].

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada area tambang terbuka batugamping (limestone) Golongan C yang berada di Kelurahan Polimak, Distrik Jayapura Selatan, Kota Jayapura, Provinsi Papua. Lokasi ini dipilih berdasarkan intensitas aktivitas penambangan lokal untuk kebutuhan material konstruksi yang tinggi, serta topografi berbukit dengan potensi terbentuknya lereng curam akibat proses ekskavasi.

Pengumpulan Data

a. Data Primer

Survei Lapangan:

- Pengamatan morfologi lereng, dokumentasi visual retakan, tanda-tanda *creep*, rembesan air, dan tanda deformasi lainnya.
- Pengukuran geometri lereng (tinggi, sudut kemiringan, panjang kaki lereng) menggunakan alat ukur *total station* atau *theodolite* sederhana.

Pengujian Geoteknik:

Pengambilan sampel tanah/batuan pada beberapa titik bor dangkal (hand auger/core) untuk analisis sifat fisik (kadar air, berat jenis).

Pengujian laboratorium:

- Uji kuat geser langsung (direct shear test) untuk mendapatkan kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ).
- Uji UCS (Unconfined Compressive Strength) pada batugamping.

b. Data Sekunder

Selain sebagai sumber informasi pendukung, data sekunder dalam penelitian ini digunakan secara terintegrasi untuk memberikan konteks yang lebih kuat terhadap kondisi hidrogeologi dan geoteknik di lokasi studi.

- Data Curah Hujan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Jayapura dianalisis untuk mengidentifikasi pola musiman dan potensi kejadian hujan ekstrem. Data ini digunakan untuk memperkirakan tingkat kejenuhan lereng serta menentukan skenario kondisi jenuh (fully saturated) pada simulasi FoS. Misalnya, periode puncak hujan pada Desember–Maret dikorelasikan dengan potensi kenaikan muka air tanah hingga 50% tinggi lereng, sebagaimana dimodelkan pada analisis stabilitas.
- Peta Geologi Lembar Jayapura skala 1:50.000 digunakan tidak hanya untuk mengenali formasi batuan, tetapi juga untuk memetakan sebaran litologi batugamping dan tanah residu pelapukan

[8]. Data ini dikombinasikan dengan hasil pengamatan lapangan sebagai validasi ketebalan lapisan pelapukan dan arah bidang diskontinuitas batuan [8,9].

- Data Izin Usaha Pertambangan (IUP OP) diinterpretasikan untuk menentukan batas operasi tambang dan area kerja yang dianalisis. Data ini membantu mengidentifikasi zona yang dekat dengan infrastruktur penunjang tambang (hauling road, fasilitas pengolahan), sehingga hasil analisis risiko dapat difokuskan pada area yang memiliki implikasi operasional terbesar.

Analisis Stabilitas Lereng

a. Pemodelan Geometri

Membuat penampang melintang lereng berdasarkan data lapangan, memuat geometri eksisting (tinggi, sudut) dan asumsi kondisi lapisan batuan penutup/tanah *residual* di atas batugamping.

b. Analisis Menggunakan Metode *Limit Equilibrium*

Menggunakan *software* analisis stabilitas lereng (misalnya SLOPE/W atau Slide2) dengan metode *Bishop Simplified* dan Janbu untuk menghitung Faktor Keamanan (FoS) [2, 11].

Analisis dilakukan untuk beberapa skenario:

- Kondisi kering (dry condition) tanpa pengaruh air tanah.
- Kondisi jenuh (fully saturated) untuk memodelkan kondisi hujan ekstrim atau sistem *drainase* yang kurang baik.

Nilai FoS yang diperoleh dibandingkan dengan standar umum pertambangan (FoS minimum 1.3 untuk kondisi operasi normal) [10,11].

c. Analisis Sensitivitas

Dilakukan variasi parameter kohesi dan sudut geser dalam $\pm 20\%$ dari nilai rata-rata hasil uji laboratorium untuk melihat pengaruhnya terhadap stabilitas lereng.

Analisis Risiko

Sebagai pendekatan semi-kuantitatif untuk memetakan tingkat bahaya:

- Identifikasi potensi bahaya: seperti longsor kecil yang dapat menimbun akses *hauling*, hingga potensi keruntuhan skala besar yang dapat mempengaruhi bangunan atau jalan lingkungan sekitar Polimak.
- Estimasi probabilitas dan dampak: menggunakan pendekatan matriks risiko (probability vs consequence matrix) untuk mengklasifikasikan risiko menjadi rendah, sedang, atau tinggi.
- Rencana mitigasi: jika ditemukan risiko sedang hingga tinggi, disusun rekomendasi seperti penyesuaian geometri lereng (reduksi sudut),

perbaikan sistem drainase, serta pemasangan pemantauan sederhana (crack meter manual).

Validasi dan Penyusunan Rekomendasi

Hasil analisis stabilitas dan risiko:

- Divalidasi dengan pemadanan terhadap kejadian longsor historis (jika ada data lokal atau wawancara warga setempat).
- Menyusun rekomendasi desain akhir lereng yang stabil dengan mempertimbangkan keekonomian tambang serta keselamatan lingkungan sekitarnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Geologi dan Hidrogeologi Daerah Penelitian

Hasil interpretasi peta geologi menunjukkan bahwa lokasi penelitian berada pada satuan batugamping Miosen Akhir–Pliosen yang relatif masif, dengan sisipan tipis tanah residu setebal 0,5–2 m. Temuan ini sejalan dengan pengamatan lapangan yang mendeteksi adanya retakan vertikal dengan jarak bidang antar-retakan 0,3–0,5 m.

Analisis data curah hujan BMKG Jayapura selama 10 tahun terakhir memperlihatkan curah hujan tahunan rata-rata 3.200–3.800 mm, dengan puncak curah hujan bulanan >400 mm pada Desember–Februari. Hal ini mengindikasikan tingginya potensi kejenuhan lereng pada musim hujan. Korelasi ini mendukung temuan analisis stabilitas lereng, di mana skenario kondisi jenuh menunjukkan penurunan FoS hingga 20% dibanding kondisi kering.

Data izin tambang (IUP OP) menunjukkan bahwa beberapa lereng aktif berada dalam jarak <50 m dari jalan angkut utama. Ketika hasil analisis risiko diplotkan terhadap peta izin tambang, lereng-lereng dengan FoS $<1,2$ pada kondisi jenuh berada tepat pada jalur *hauling* yang vital, sehingga implikasi risiko terhadap kelancaran operasi tambang menjadi signifikan.

Dengan demikian, integrasi data sekunder dan data primer memperjelas bahwa risiko kelongsoran tidak hanya dipengaruhi oleh geometri dan sifat mekanik lereng, tetapi juga oleh faktor eksternal seperti pola curah hujan tahunan, sebaran litologi, dan lokasi infrastruktur penting dalam area izin tambang.

Parameter Geoteknik Lereng

Parameter geoteknik diperoleh dari hasil uji laboratorium pada sampel tanah penutup dan *core* batugamping, serta pengamatan lapangan.

a. Parameter Tanah Penutup

Parameter tanah penutup dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter tanah penutup

Parameter	Nilai Rata-rata Kering	Nilai Rata-rata Jenuh
Densitas curah (γ_{bulk})	1.88 ton/m ³	2.05 ton/m ³
Berat jenis (Gs)	2.65	–
Kadar air (w)	24 %	38 %
Kohesi (c)	20 kPa	18 kPa
Sudut geser dalam (ϕ)	22°	20°

b. Parameter Batugamping

Parameter batugamping disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter batugamping

Parameter	Nilai Rata-rata Kering	Nilai Rata-rata Jenuh
Densitas curah (γ_{bulk})	2.55 ton/m ³	2.60 ton/m ³
Berat jenis (Gs)	2.70	–
Kekuatan tekan bebas (UCS)	52 MPa	–
Kohesi (c)	320 kPa	300 kPa
Sudut geser dalam (ϕ)	36°	34°

Analisis Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode *Limit Equilibrium* dengan *software Slide2*, pada beberapa variasi geometri lereng, yaitu:

- Tinggi lereng (H): 10 m, 15 m, dan 20 m
- Sudut lereng (β): 45°, 55°, dan 65°
- Kondisi *drainase*: kering dan jenuh (*water table* naik hingga setengah tinggi lereng)

Analisis bertujuan untuk mendapatkan nilai FoS dan menentukan geometri aman sesuai rekomendasi umum ($\text{FoS} \geq 1.3$ untuk kondisi operasi).

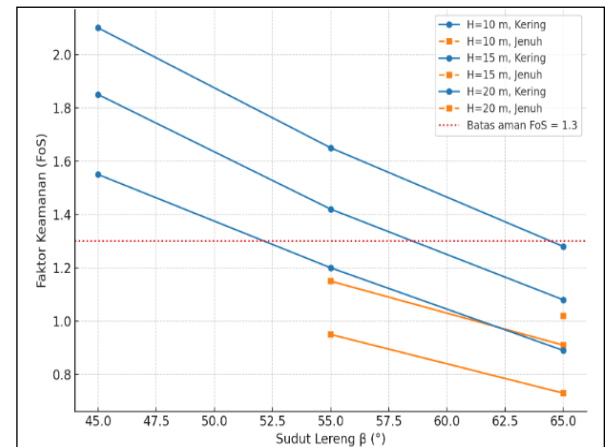
Hasil analisis stabilitas lereng yang menunjukkan nilai FoS dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil analisis stabilitas lereng

H (m)	β (°)	Kondisi	Faktor Keamanan (FoS)
10	45	Kering	2.10
10	55	Kering	1.65
10	65	Kering	1.28
10	65	Jenuh	1.02
15	45	Kering	1.85
15	55	Kering	1.42
15	55	Jenuh	1.15
15	65	Kering	1.08
15	65	Jenuh	0.91
20	45	Kering	1.55

H (m)	β (°)	Kondisi	Faktor Keamanan (FoS)
20	55	Kering	1.20
20	55	Jenuh	0.95
20	65	Kering	0.89
20	65	Jenuh	0.73

Berdasarkan tabel 3 digambarkan grafik FoS yang disajikan pada Gambar 1.

**Gambar 1.** Grafik FoS kondisi kering dan jenuh**Interpretasi Hasil**

a. Pengaruh geometri:

Nilai FoS menurun signifikan dengan bertambahnya tinggi lereng dan sudut lereng yang semakin curam. Pada tinggi lereng 10 m, kombinasi sudut hingga 65° masih dapat bertahan dengan FoS ~1.28 pada kondisi kering, tetapi menjadi *marginal* (FoS ~1.02) saat jenuh.

b. Pengaruh *drainase*:

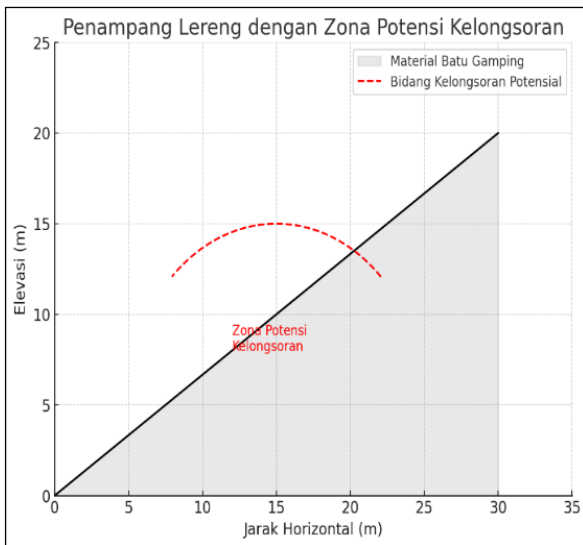
Kenaikan muka air tanah hingga setengah tinggi lereng mengakibatkan penurunan FoS rata-rata 15–20%, yang menurunkan beberapa kondisi di bawah batas aman (FoS < 1.3).

c. Rekomendasi awal:

Untuk menjamin stabilitas operasi tambang, geometri optimal yang direkomendasikan adalah:

- Maksimum H = 15 m dengan $\beta = 45^\circ$ pada kondisi *drainase* baik (FoS ~1.85).
- Jika diperlukan H = 20 m, maka sudut lereng perlu dikurangi $\leq 45^\circ$ dengan prioritas pengendalian air permukaan dan sub-permukaan.

Penampang lereng dengan zona potensi kelongsoran dapat dilihat pada Gambar 2.



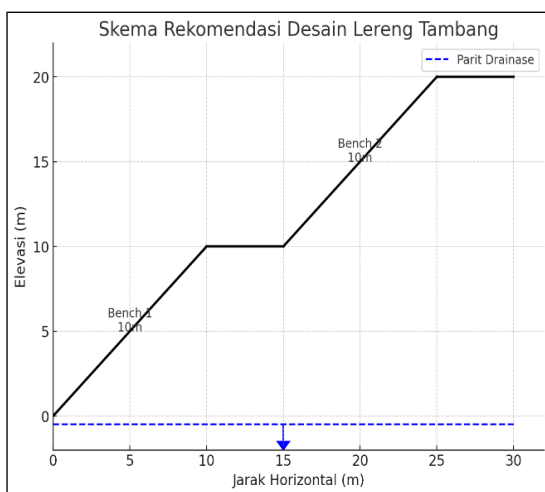
Gambar 2. Zona potensi longsor

Implikasi Desain dan Operasional

Berdasarkan hasil ini, rekomendasi awal dapat disusun:

- Untuk $H = 15$ m, direkomendasikan sudut maksimal $\leq 45^\circ$, terutama jika sistem *drainase* belum optimal, agar diperoleh $FoS \geq 1.8$.
- Jika diperlukan sudut lebih curam (misalnya untuk alasan stripping ratio tambang), harus didukung sistem *drainase* yang efektif (parit permukaan dan subdrain) untuk menjaga kondisi kering.
- Pada lereng dengan $H = 20$ m, sebaiknya dilakukan penurunan sudut menjadi $\leq 45^\circ$ atau dibuat bertingkat (*benching*) agar distribusi tegangan menjadi lebih aman.

Skema rekomendasi desain lereng tambang disajikan pada Gambar 3.



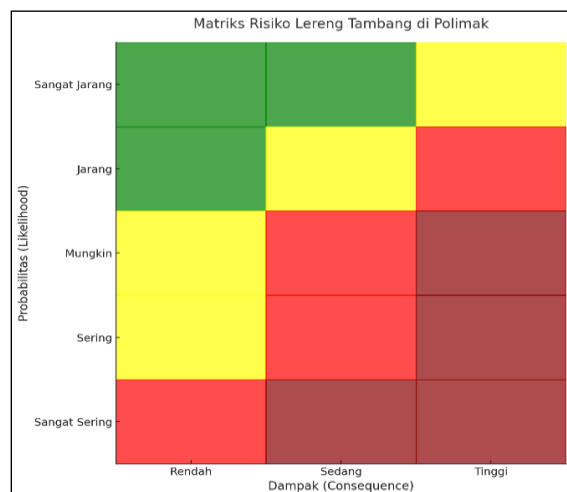
Gambar 3. Desain lereng rekomendasi

Untuk melengkapi analisis deterministik melalui perhitungan faktor keamanan (FoS), penelitian ini juga menyusun pemetaan risiko (*risk mapping*) terhadap potensi kelongsoran lereng tambang di

Polimak. Pendekatan ini penting karena perhitungan FoS pada dasarnya bersifat statik dan deterministik, sehingga belum dapat sepenuhnya merepresentasikan variabilitas alami sifat geoteknik, dinamika air tanah, maupun ketidakpastian kondisi lapangan lainnya. Oleh sebab itu, analisis risiko diterapkan sebagai instrumen bantu untuk menilai tingkat probabilitas terjadinya kegagalan lereng dan besar dampak yang dapat ditimbulkan terhadap operasi tambang maupun infrastruktur penunjang. Dalam konteks ini, dua komponen utama diperhatikan, yaitu:

1. Probabilitas kegagalan (*likelihood*) yang menggambarkan seberapa sering kondisi kritis atau marginal dapat terjadi. Penilaiannya didasarkan pada hasil analisis sensitivitas parameter geoteknik, kondisi muka air tanah, serta riwayat kejadian longsor lokal.
2. Dampak kegagalan (*consequence*) yang menunjukkan seberapa besar konsekuensi operasional, ekonomi, dan keselamatan kerja jika kelongsoran benar-benar terjadi. Dampak dibedakan antara longsor kecil (sekedar menutup kaki lereng), longsor sedang (mengganggu jalur hauling), hingga longsor besar (mengancam pekerja, alat berat, atau fasilitas penting).

Kedua komponen tersebut kemudian dipetakan ke dalam matriks risiko, yang mengklasifikasikan tingkat risiko menjadi rendah (*low*), sedang (*medium*), tinggi (*high*), dan sangat tinggi (*extreme*). Dengan demikian, matriks ini menjadi dasar untuk menentukan prioritas tindakan pengendalian dan mitigasi pada area tambang. Gambar 4 menampilkan visualisasi matriks risiko stabilitas lereng untuk tambang batugamping Golongan C di Polimak, yang telah disesuaikan dengan karakteristik lokal dan hasil analisis stabilitas sebelumnya.



Gambar 4. Matrik resiko

KESIMPULAN

Penelitian ini telah melakukan evaluasi stabilitas lereng pada tambang batugamping Golongan C di Polimak, Kota Jayapura, dengan pendekatan analisis

geoteknik menggunakan metode *Limit Equilibrium* yang didukung perangkat lunak *Slide2/SLOPE/W*. Analisis dilakukan pada berbagai skenario tinggi lereng (10 m, 15 m, dan 20 m), variasi sudut lereng (45°, 55°, dan 65°), dan dua kondisi hidrogeologi (kering dan jenuh). Hasil penelitian menunjukkan bahwa:

1. Stabilitas lereng sangat sensitif terhadap perubahan geometri dan kondisi muka air tanah. Pada kondisi kering, lereng dengan tinggi 10 m dan sudut 45° memiliki Faktor Keamanan (FoS) sebesar 2.10 yang tergolong sangat stabil, sedangkan lereng 20 m dengan sudut 65° hanya memiliki FoS sekitar 0.89 (kering) dan turun menjadi 0.73 saat jenuh, jauh di bawah standar minimum tambang (FoS ≥ 1.3).
2. Kondisi *drainase* memegang peranan penting. Kenaikan muka air tanah akibat curah hujan meningkatkan tekanan air pori yang secara signifikan menurunkan stabilitas. Lereng dengan FoS semula aman (>1.4) dapat turun menjadi *marginal* atau tidak aman (<1.2) ketika jenuh.
3. Analisis risiko mengklasifikasikan sebagian besar kombinasi geometri tinggi dan sudut curam pada kondisi jenuh ke dalam kategori risiko tinggi hingga sangat tinggi, memerlukan tindakan mitigasi aktif seperti penurunan sudut lereng, penerapan sistem *drainase*, dan pengaturan geometri bertingkat (*benching*).
4. Berdasarkan hasil ini, direkomendasikan penerapan desain lereng bertingkat untuk tinggi total lebih dari 15 m, dengan sudut per bench maksimal 45°, disertai sistem *drainase* di kaki lereng untuk menjaga stabilitas air tanah, sehingga nilai FoS dapat dijaga di atas standar aman sepanjang umur tambang.

Dengan demikian, pendekatan terpadu melalui analisis stabilitas lereng berbasis *software*, penilaian risiko, dan perencanaan mitigasi ini sangat penting untuk memastikan operasi tambang di Polimak berjalan aman, efisien, serta meminimalkan potensi kerugian baik pada aspek keselamatan kerja maupun keberlanjutan produksi.

PERNYATAAN KONTRIBUSI

Dalam penelitian ini, masing-masing penulis memiliki peran dan kontribusi. Penulis 1 merancang konsep penelitian, menyusun kerangka metodologi, melakukan pengumpulan data di lapangan, serta validasi data hasil pengujian. Penulis 1 juga berperan utama dalam penyusunan draf manuskrip. Penulis 2 melaksanakan proses pengolahan data, analisis data kuantitatif maupun kualitatif, serta memberikan interpretasi terhadap hasil penelitian. Penulis 2 juga berpartisipasi aktif dalam diskusi metodologi dan koordinasi teknis penelitian. Seluruh penulis membaca, merevisi, serta menyetujui naskah akhir penelitian sebelum diajukan untuk publikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Yapis Papua, atas dukungan fasilitas penelitian dan kesempatan yang diberikan untuk melakukan penelitian ini. Penghargaan tertinggi diberikan kepada Laboratorium Teknik Sipil, yang telah menyediakan sarana dan prasarana pengujian, serta kepada para teknisi laboratorium yang membantu selama proses penelitian berlangsung. Dalam kesempatan ini, penulis juga menyampaikan terima kasih kepada rekan-rekan sejawat, mahasiswa, dan mitra kerja sama yang telah membantu dalam pengumpulan data, diskusi, dan memberikan masukan berharga sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Geologi. Peta Geologi Lembar Jayapura, Papua, Skala 1:50.000. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi; 2013.
- [2] Rocscience Inc. *Slide2 - 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis* [Software Manual]. Toronto (Canada): Rocscience Inc.; 2022.
- [3] Santoso A, Gunawan B, Sugianto S. Integrating limit equilibrium and finite element methods to assess open-pit slope stability. *Geotech Eng J*. 2020;51(3):215–25.
- [4] Duncan JM, Wright SG. *Soil Strength and Slope Stability*. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2005.
- [5] Hoek E, Bray JW. *Rock Slope Engineering*. 3rd ed. London: Institution of Mining and Metallurgy; 1981.
- [6] Nurlaily R, Ulfah RN. Perhitungan faktor keamanan lereng menggunakan metode Bishop pada tambang terbuka batubara. *J Ilm Teknol Miner Batubara*. 2020;16(2):111–8.
- [7] Pramana RP, Subagio A, Purnomo AB. *Probabilistic slope stability analysis on open pit mines in Indonesia*. *Int J Min Sci Technol*. 2021;31(5):823–31.
- [8] Pusat Survei Geologi. Laporan Penyelidikan Geologi Teknik Wilayah Jayapura. Kementerian ESDM Republik Indonesia; 2019.
- [9] Raharjo SB, Pramono R, Wicaksono A. Analisis kestabilan lereng berdasarkan metode *limit equilibrium* dan elemen hingga pada tambang terbuka. *J Teknol Miner Batubara*. 2018;14(1):21–32.
- [10] Sihombing J, Rachmansyah A. Kajian stabilitas lereng pada tambang batu kapur dengan pendekatan probabilistik. *Jurnal Geoteknik Indonesia*. 2021;8(2):75–84.
- [11] Widodo S, Haryanto S. *Slope risk mapping using GIS and probabilistic analysis for quarry operations*. *J Min Environ*. 2019;10(2):45–53.