Buletin Profesi Insinyur 7(2) (2024) 081–088
http://dx.doi.org/10.20527/bpi.v7i2.249
ISSN 2654-5926

Optimalisasi Geometri Lereng Tunggal Tambang Nikel dengan Kondisi Statik dan Dinamik

Muhammad Zaini Arief[1]

[1]Program Studi Rekayasa Geologi, Universitas Lambung Mangkurat

✉ zaini.arief@ulm.ac.id

Geometri lereng tunggal di tambang nikel memiliki peran krusial dalam memastikan kestabilan dan kelangsungan operasional tambang. Ketidakstabilan lereng dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk kesalahan dalam desain geometri front penambangan—seperti ketinggian dan kemiringan lereng—karakteristik batuan, serta faktor eksternal di lapangan, seperti tingkat muka air tanah dan aktivitas penambangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan geometri lereng tunggal dengan mempertimbangkan kondisi statik dan dinamik guna meningkatkan efisiensi operasional dan keselamatan tambang. Implementasi geometri lereng yang optimal diharapkan dapat memaksimalkan produksi, mengurangi risiko longsoran, dan menekan biaya operasional akibat kegagalan lereng. Metode penelitian mencakup studi pustaka mengenai kondisi geologi daerah penelitian, pengambilan sampel, serta pengujian laboratorium untuk menentukan sifat fisik dan mekanik material penyusun lereng. Selanjutnya, dilakukan analisis geoteknik terhadap kestabilan lereng dalam kondisi statik dan dinamik guna menghasilkan rekomendasi desain yang sesuai dengan standar Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa geometri lereng optimal pada litologi Limonit adalah tinggi 3 m dengan sudut 70° dan tinggi 6 m dengan sudut 65°. Untuk litologi Saprolit, geometri optimal adalah tinggi 3 m dengan sudut 70° dan tinggi 6 m dengan sudut 55°, sementara pada litologi Bedrock, tinggi 3 m dengan sudut 70° dan tinggi 6 m dengan sudut 70° merupakan konfigurasi yang paling stabil.

Kata kunci: Kestabilan lereng, Lereng Tunggal, Nikel

Diajukan: 24 April 2024
Direvisi: 1 Juli 2024
Diterima: 20 September 2024
Dipublikasikan online: 23 September 2024

Pendahuluan

Indonesia, dengan kekayaan sumber daya alamnya yang melimpah, termasuk tambang nikel laterit di PT. X di daerah provinsi Papua Barat, memegang peran penting dalam penyediaan logam untuk industri yang memiliki signifikansi khusus dalam pembuatan logam anti karat, *stainless steel*, baterai *nickel-metal hybride*, dan berbagai produk lainnya. Dalam kegiatan penambangan, kestabilan lereng memiliki hubungan yang erat dengan geometri lereng tunggal, termasuk tinggi dan sudut lereng, yang berperan penting dalam menentukan kestabilan serta kelangsungan operasional tambang (Prasetyo dkk., 2020). Oleh karena itu, ketidakstabilan lereng penambangan dapat berdampak pada pekerja, peralatan, dan lingkungan sekitar yang dapat menyebabkan kerugian bagi perusahaan dan dapat menghambat proses produksi (Rumsowek & Birawaputra, 2019).

Kestabilan suatu lereng dipengaruhi secara signifikan oleh karakteristik massa batuan serta faktor-faktor eksternal di lapangan, seperti muka air tanah, getaran, dan variabel lainnya. Tingkat kestabilan lereng dapat dinilai menggunakan parameter Faktor Keamanan (FK) sebagai indikator kritis. Nilai FK ini ditentukan melalui analisis kestabilan lereng dengan metode khusus yang mempertimbangkan berbagai variabel yang memengaruhi keseimbangan lereng (Arief, 2020).

Untuk memastikan desain lereng tersebut aman maka perlu dilakukan analisis kestabilan lereng menggunakan program *SLIDE* yang berbasis Metode Kesetimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*). Stabil tidaknya suatu lereng dapat diketahui dari nilai FK. Analisis kemantapan lereng dilakukan hingga mencapai FK minimum dan *probability of failure* (PoF) maksimum yang disyaratkan oleh Kepmen ESDM No. 1827 tahun 2018. Nilai FK ini yang selanjutnya di jadikan dasar untuk suatu pertimbangan teknis dalam menentukan desain geometri lereng pada penelitian ini (Arif, 2016).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimalisasi geometri lereng tunggal dalam tambang nikel dengan mempertimbangkan baik kondisi statik

Cara mensitasi artikel ini:
Arief, M.Z. (2024) Optimalisasi Geometri Lereng Tunggal Tambang Nikel Dengan Kondisi Statik dan Dinamik. *Buletin Profesi Insinyur* 7(2) 081-088

This is an open access article under the CC BY-NC-SA license

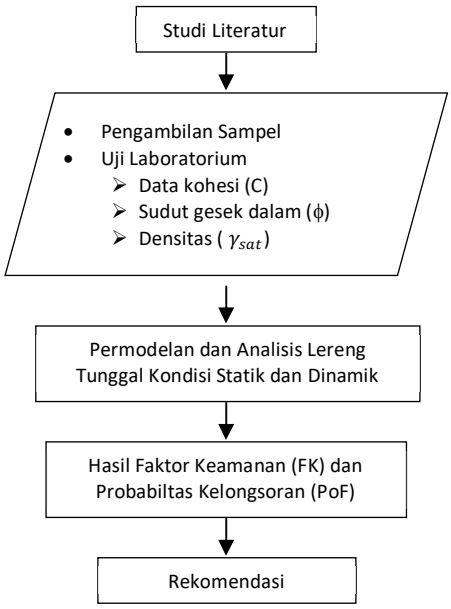
 ISSN 2654-5926

maupun dinamik, sehingga dapat mengurangi risiko kegagalan lereng dan kerusakan yang mungkin terjadi di tambang nikel. Analisis kondisi statik digunakan untuk mengevaluasi faktor-faktor yang memengaruhi kestabilan dalam kondisi kesetimbangan, sedangkan analisis kondisi dinamik digunakan untuk mengidentifikasi respons lereng terhadap beban dinamik seperti gempa bumi atau aktivitas pertambangan.

Hasil dari penelitian ini menghasilkan rekomendasi geometri lereng yang dapat meningkatkan kestabilan dan keselamatan secara keseluruhan. Rekomendasi ini termasuk modifikasi sudut lereng. Dengan menggabungkan analisis kondisi statik dan dinamik, serta optimalisasi geometri lereng, diharapkan dapat secara signifikan mengurangi risiko dan meningkatkan kinerja tambang nikel secara keseluruhan dan dengan implementasi geometri lereng yang dioptimalkan memungkinkan efisiensi dalam penggalian material, memaksimalkan produksi, dan mengurangi biaya operasional akibat penanganan longsoran pada tambang nikel

Metode

Penelitian ini diawali dengan studi pustaka mengenai kondisi geologi daerah penelitian, diikuti oleh analisis data yang mencakup pengambilan sampel dan pengujian laboratorium untuk menentukan sifat fisik serta mekanik material penyusun lereng. Selanjutnya, dilakukan analisis geoteknik terhadap lereng tunggal dalam kondisi statik dan dinamik guna memperoleh rekomendasi desain geometri lereng yang optimal. Gambar 1 memperlihatkan diagram alir penelitian ini.

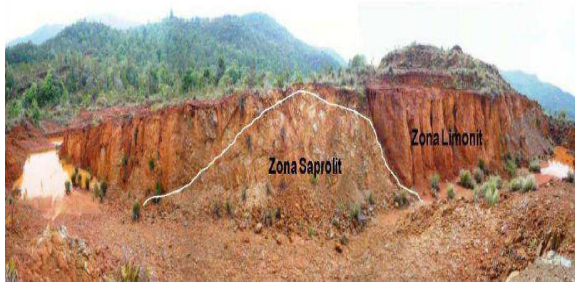


Gambar 1 Diagram alir penelitian

Kondisi Geologi Daerah Penelitian

Pada daerah penelitian, untuk keperluan pemodelan analisis, digunakan tiga zona domain kondisi geologi, yaitu: (1) Limonit, (2) Saprolit, dan (3) Bedrock. Karakteristik tanah pada limonit, saprolit, dan bedrock bervariasi sesuai dengan tingkat pelapukan dan komposisi mineralnya. Limonit merupakan zona teroksidasi yang kaya akan besi dengan kadar nikel yang rendah. Saprolit merupakan zona peralihan antara batuan asal dan laterit, di mana terjadi peningkatan kadar nikel. Bedrock merupakan batuan asal yang belum mengalami pelapukan secara signifikan. Secara umum, limonit kaya akan mineral oksida besi, sementara saprolit mengandung mineral silikat dengan kadar nikel yang lebih tinggi. Bedrock, sebagai batuan asal, memiliki resistivitas tinggi dan belum mengalami pelapukan secara signifikan (Jarot & Astuti, 2023). Sebaran endapan nikel laterit mencakup area seluas 30 km. Meskipun kedalaman pelapukan di beberapa lokasi dapat mencapai 40 m atau lebih, ketebalan rata-rata endapan adalah 23 m. Area bagian tengah memiliki kadar dan kontinuitas terbaik.

Gambar 2 menunjukkan singkapan penampang vertikal laterit yang terdiri dari dua zona utama, yaitu zona limonit di bagian atas dan zona saprolit di bagian bawah. Zona limonit memiliki warna merah kecoklatan hingga kuning, yang menunjukkan kandungan besi tinggi akibat proses pelapukan. Di bawahnya, zona saprolit tampak dengan warna yang lebih bervariasi, mulai dari kuning kecoklatan hingga hijau keabu-abuan, dan merupakan peralihan antara batuan dasar (bedrock) dan limonit. Zona saprolit memiliki struktur yang masih mempertahankan karakteristik batuan asal, tetapi lebih lunak dibandingkan bedrock. Sementara itu, zona limonit lebih teroksidasi dan memiliki tekstur yang lebih lepas. Singkapan ini memberikan gambaran stratifikasi alami endapan laterit yang menjadi dasar dalam eksplorasi dan pengelolaan sumber daya nikel.



Gambar 2 Singkapan Penampang Vertikal Laterit Menunjukkan Limonit Dan Saprolit

Gambar 3 menunjukkan proses *Shelby tube sampling* yang dilakukan di tambang nikel. *Shelby tube* digunakan untuk mengambil sampel tanah atau material laterit dalam kondisi tidak terganggu

 ISSN 2654-5926

(*undisturbed sample*) guna analisis lebih lanjut di laboratorium. Proses ini melibatkan penggunaan alat berat seperti ekskavator untuk membuka akses pengambilan sampel, sementara Shelby tube dimasukkan ke dalam tanah untuk mengekstrak material dengan struktur asli yang tetap terjaga.

Pada Gambar 3, ekskavator sedang membantu dalam proses ekstraksi sampel dari zona laterit. Di sudut kanan atas, terlihat beberapa tabung Shelby yang telah terisi material tanah, siap untuk diuji sifat fisik dan mekaniknya. Gambar di sudut kanan bawah menunjukkan ekskavator lain yang beroperasi dalam aktivitas penggalian.

Gambar 3 Shelby Tube Sampling di Tambang Nikel

Analisis Data

Data yang digunakan dalam analisis ini diperoleh melalui pengambilan sampel batuan menggunakan pemboran geoteknik sebelumnya, serta penambahan sampel data geoteknik dengan metode *Shelby tube sampling*. Pengambilan sampel dengan *Shelby tube* dilakukan secara khusus pada lapisan Limonit dan Saprolit, mengacu pada standar ASTM D 1587-94 *"Standard Practice for Thin-Walled Tube Geotechnical Sampling of Soils"*.

Setelah sampel diperoleh, dilakukan pengujian laboratorium geoteknik yang mencakup pengujian sifat fisik (densitas) dan uji geser langsung untuk menentukan parameter kohesi serta sudut gesek dalam. Data hasil pengujian laboratorium selanjutnya dianalisis secara statistik untuk menentukan distribusi sifat material penyusun lereng.

Analisis statistik dilakukan dengan metode *Fitting Test* menggunakan fungsi probabilitas Kolmogorov-Smirnov (KS). Prosedur ini membandingkan frekuensi kumulatif eksperimental dengan distribusi teoritis yang diasumsikan. Jika perbedaan antara frekuensi kumulatif eksperimental dan teoritis cukup besar untuk ukuran sampel tertentu, maka distribusi teoritis tersebut akan ditolak. Namun, distribusi tersebut dapat diuji kembali menggunakan *Akaike Information Criteria* (AIC), di mana distribusi dengan nilai AIC paling kecil akan diterima sebagai model distribusi yang paling sesuai.

Analisis Geoteknik

Untuk analisis kestabilan lereng, lereng tambang dimodelkan secara numerik menggunakan program SLIDE yang berbasis Metode Kesetimbangan Batas (Limit Equilibrium Method). Analisis kestabilan lereng tunggal dilakukan untuk setiap litologi dengan tinggi jenjang 3 m dan 6 m (sesuai masukan perusahaan). Variasi sudut lereng dimulai dari 50°, 55°, 60°, 65° dan 70°.

Beberapa asumsi yang dilakukan dalam analisis kemantapan lereng tunggal adalah sebagai berikut:

1. Untuk analisis statik, beban yang dialami lereng adalah berat material penyusun lereng itu sendiri akibat gaya gravitasi.
2. Untuk analisis dinamik (*pseudostatic*), disamping beban statik, terdapat 2 (dua) beban tambahan yang dialami lereng, yaitu: (1) *surcharge loading* sebesar 115 kPa yang berasal dari berat alat gali dan alat muat terbesar yang melintas (Komatsu PC400 dan Hino P500) dan (2) beban dinamik dari percepatan gempabumi sebesar 0,15 g, yang diambil berdasarkan Peta Gempa Indonesia (SNI 8469:2017) dengan koefisien seismik horisontal (kh) antara 1/2 sampai dengan 1/3 PSA.

Tabel 1 menyajikan parameter sifat fisik dan mekanik material penyusun lereng tunggal, yang mencakup kohesi, sudut gesek dalam, dan densitas untuk tiga jenis litologi utama, yaitu Limonit, Saprolit, dan Bedrock. Setiap parameter memiliki distribusi statistik tertentu dengan nilai rata-rata (*mean*) dan standar deviasi yang menunjukkan tingkat variasi data. Pada zona Limonit, kohesi memiliki distribusi Triangular dengan rata-rata 35,46 kPa dan standar deviasi 10,09, sementara sudut gesek dalam dan densitas mengikuti distribusi Normal dengan nilai rata-rata masing-masing 28,68° dan 16,97 kg/m³, serta standar deviasi 4,11 dan 2,16.

Zona Saprolit memiliki kohesi yang mengikuti distribusi Normal, dengan rata-rata 29,81 kPa dan standar deviasi 16,49, menunjukkan variasi yang cukup besar dalam karakteristik kekuatannya. Sudut gesek dalam juga memiliki distribusi Normal, dengan rata-rata 26,24° dan standar deviasi 4,65, sedangkan densitas mengikuti distribusi Gamma, dengan nilai rata-rata 15,93 kg/m³ dan standar deviasi 1,78. Berbeda dengan dua zona sebelumnya, Bedrock menunjukkan kohesi dan sudut gesek dalam yang mengikuti distribusi Uniform, dengan rata-rata masing-masing 105,81 kPa dan 29,76°, serta standar deviasi yang cukup besar, yaitu 57,67 dan 5,87, menandakan variasi yang luas dalam parameter ini. Sementara itu, densitas bedrock mengikuti distribusi Normal, dengan nilai rata-rata 28,06 kg/m³ dan standar deviasi 1,47, yang menunjukkan kestabilan parameter ini dibandingkan kohesi dan sudut gesek dalamnya.

.

Tabel 1 Parameter sifat fisik dan mekanik material penyusun lereng tunggal

Material	Parameter	Distribusi	Rata-rata (Mean)	Standar deviasi
Limonit	Kohesi (kPa)	Triangular	35,46	10,09
	Sudut gesek Dalam (deg)	Normal	28,68	4,11
	Densitas (kg/m^3)	Normal	16,97	2,16
Saprolit	Kohesi (kPa)	Normal	29,81	16,49
	Sudut gesek Dalam (deg)	Normal	26,24	4,65
	Densitas (kg/m^3)	Gamma	15,93	1,78
Bedrock	Kohesi (kPa)	Uniform	105,81	57,67
	Sudut gesek Dalam (deg)	Uniform	29,76	5,87
	Densitas (kg/m^3)	Normal	28,06	1,47

Hasil ini menunjukkan bahwa Bedrock memiliki kohesi dan densitas tertinggi dibandingkan Limonit dan Saprolit, menandakan kekuatan yang lebih besar dan kestabilan lereng yang lebih baik. Sebaliknya, Limonit dan Saprolit yang telah mengalami pelapukan lebih lanjut memiliki kohesi dan densitas yang lebih rendah, yang berpotensi menyebabkan kestabilan lereng yang lebih rendah.

Rekomendasi

Analisis kestabilan lereng dilakukan hingga mencapai FK minimum dan *probability of failure* (PoF) maksimum yang disyaratkan oleh Kepmen ESDM No. 1827 Tahun 2018 (Tabel 2) yang diadopsi dari (Wesseloo & Stacey, 2009). Konsep Probability of Failure (PoF) telah dibahas secara rinci dalam penelitian yang dilakukan oleh Hoek (2007) dan Steffen dkk. (2008).

Tabel 2 menyajikan kriteria kestabilan lereng berdasarkan jenis lereng, tingkat keparahan longsor (Consequences of Failure/CoF), faktor keamanan minimum (FK statik dan FK dinamis), serta batas maksimum probabilitas longsor (Probability of Failure/PoF). Parameter-parameter ini digunakan sebagai acuan dalam menilai kestabilan lereng tambang dan menentukan apakah kondisi lereng dapat diterima dalam operasi pertambangan.

Pada lereng tunggal, tingkat keparahan longsor dapat bervariasi dari rendah hingga tinggi, dengan faktor keamanan statik minimum sebesar 1,1, sementara faktor keamanan dinamis tidak didefinisikan. Probabilitas longsor yang masih dapat diterima berkisar antara 25% hingga 50%. Untuk inter-ramp (lereng antar-jenjang), tingkat kestabilannya diklasifikasikan berdasarkan tingkat keparahan longsor. Pada keparahan rendah, faktor keamanan statik minimum berada dalam rentang 1,15-1,2, dengan FK dinamis 1,0 dan probabilitas longsor maksimum 25%. Pada keparahan menengah, FK statik berada pada kisaran 1,2-1,3, FK dinamis 1,0, dan probabilitas longsor maksimum 20%. Sementara itu, untuk keparahan tinggi, FK statik tetap dalam rentang 1,2-1,3, namun FK dinamis meningkat menjadi 1,1, dengan probabilitas longsor yang lebih kecil, yaitu 10%.

Pada lereng keseluruhan (overall slope), kriteria kestabilan lebih ketat dibandingkan lereng tunggal atau inter-ramp karena dampak longsor yang lebih luas. Untuk keparahan rendah, FK statik minimum berada dalam rentang 1,2-1,3, FK dinamis 1,0, dengan probabilitas longsor maksimum 15-20%. Pada keparahan menengah, FK statik ditetapkan sebesar 1,3, FK dinamis 1,05, dan probabilitas longsor maksimum 10%. Sementara itu, pada keparahan tinggi, FK statik meningkat ke rentang 1,3-1,5, FK dinamis 1,1, dan probabilitas longsor maksimum hanya 5%, menandakan tingkat kestabilan yang lebih tinggi.

Hasil dan Pembahasan

Hasil Analisis Kestabilan Lereng Tunggal

Analisis kestabilan lereng tunggal dilakukan untuk setiap litologi dengan tinggi jenjang 3 m dan 6 m (sesuai masukan perusahaan). Variasi sudut lereng dimulai dari kemiringan 50°sampai dengan kemiringan 70°.

Tabel 2 Rekomendasi Faktor Keamanan Dan Probabilitas Longsor Lereng Tambang

Jenis Lereng	Keparahan Longsor (*Consequences oF Failure/CoF*)	Kriteria dapat diterima (*Acceptance Criteria*)		
		Faktor Keamanan (FK) Statik (Min)	Faktor Keamanan (FK) Dinamis (Min)	Probabilitas Longsor (*Probability of Failure*) (maks) PoF (FK≤1)
Lereng Tunggal	Rendah s.d Tinggi	1,1	Tidak ada	25-50%
Inter-ramp	Rendah	1,15-1,2	1,0	25%
	Menengah	1,2-1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
Lereng Keseluruhan	Rendah	1,2-1,3	1,0	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

*(Kepmen ESDM No. 1827, 2018)

Hasil analisis yang diterima sesuai persyaratan ESDM untuk litologi Limonit didapatkan yaitu tinggi 3 m dengan sudut 70^0 dan tinggi 6 m dengan sudut 65^0 dalam kondisi statik maupun dinamik. Kemudian litologi Saprolit yaitu tinggi 3 m dengan sudut 70^0 dan tinggi 6 m dengan sudut 55^0 dalam kondisi statik maupun dinamik. Selanjutnya litologi Bedrock tinggi 3 m dengan sudut 70^0 dan tinggi 6 m dengan sudut 70^0 dalam kondisi statik maupun dinamik. Untuk hasil keseluruhan bisa di lihat pada

Analisis stabilitas lereng terlihat pada Gambar 4-9 dan dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3 menyajikan hasil pemodelan kestabilan lereng tunggal berdasarkan variasi geometri lereng yang mencakup tinggi (m) dan sudut kemiringan (°), serta faktor keamanan (FK) dan probabilitas longsor (PoF, %) dalam kondisi statik dan dinamik. Penentuan diterima atau tidaknya suatu konfigurasi lereng dilakukan dengan merujuk pada Tabel 2, yang menetapkan batas FK minimum dan PoF maksimum yang dapat diterima.

Pada material Limonit, lereng dengan tinggi 6 m menunjukkan kestabilan yang baik pada sudut 50° hingga 65°, dengan FK statik berkisar antara 1,87 hingga 2,36 dan PoF 0%, sehingga semua kondisi ini diterima. Namun, dalam kondisi dinamik, FK mengalami penurunan, dan pada sudut 70° nilai FK turun menjadi 1,09 dengan PoF 33,4%, sehingga tidak memenuhi kriteria kestabilan dan tidak diterima. Sebaliknya, lereng dengan tinggi 3 m memiliki FK yang jauh lebih tinggi dalam kondisi statik maupun dinamik, sehingga sudut 60° dan 70° tetap diterima.

Pada material Saprolit, lereng dengan tinggi 6 m memiliki kestabilan yang cukup baik dalam kondisi statik, dengan FK berkisar antara 1,53 hingga 2,07, sehingga semua konfigurasi diterima meskipun PoF meningkat seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan. Namun, dalam kondisi dinamik, terjadi penurunan FK yang cukup signifikan. Pada sudut 60° (FK = 1,05, PoF = 47,9%), 65° (FK = 1,00, PoF = 55,3%), dan 70° (FK = 0,95, PoF = 63,1%), lereng tidak memenuhi kriteria dan tidak diterima. Sebaliknya, lereng dengan tinggi 3 m menunjukkan kestabilan yang lebih baik, dengan FK yang lebih tinggi dan PoF yang lebih rendah, sehingga sudut 60° dan 70° tetap diterima.

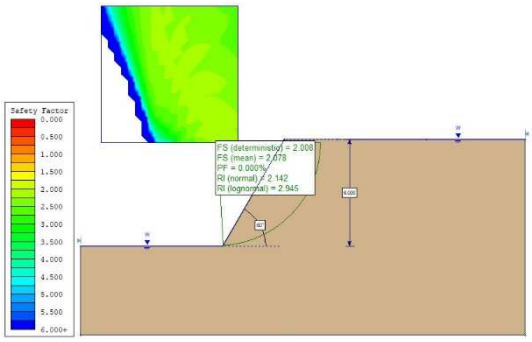
Pada material Bedrock, semua konfigurasi lereng memiliki kestabilan yang sangat baik. Lereng dengan tinggi 6 m memiliki FK statik antara 3,34 hingga 3,8, dengan PoF mendekati 0%, sehingga semua sudut diterima. Dalam kondisi dinamik, meskipun FK mengalami sedikit penurunan, nilai minimum tetap berada di 2,08 (sudut 70°) dengan PoF 4,6%, yang masih memenuhi kriteria kestabilan. Begitu pula dengan lereng dengan tinggi 3 m, yang menunjukkan FK sangat tinggi dalam semua kondisi, dengan PoF 0%, sehingga semua sudut diterima.

Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa material Bedrock memiliki kestabilan terbaik, diikuti oleh Limonit, sedangkan Saprolit memiliki kestabilan paling rendah. Lereng dengan tinggi 3 m lebih stabil dibandingkan dengan tinggi 6 m, karena memiliki FK lebih tinggi dan PoF lebih rendah, sehingga lebih aman dalam berbagai kondisi. Untuk material Limonit dan Saprolit, sudut kemiringan yang lebih kecil diperlukan agar kestabilan lereng tetap terjaga, terutama dalam kondisi dinamik.

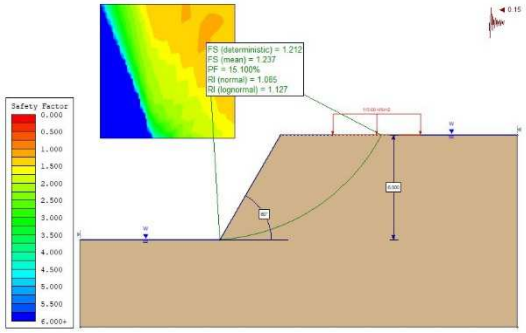
Tabel 3 Hasil Pemodelan Lereng Tunggal

Material	Geometri		Statik			Dinamik		
	Tinggi (m)	Sudut (deg)	FK	PoF (%)	Hasil Analisis (berdasarkan Tabel 2)	FK	PoF (%)	Hasil Analisis (berdasarkan Tabel 2)
Limonit	6	50	2,36	0	Diterima	1,34	2,1	Diterima
		55	2,21	0	Diterima	1,29	5	Diterima
		60	2,01	0	Diterima	1,21	15,1	Diterima
		65	**1,87**	**0**	**Diterima**	**1,15**	**23,8**	**Diterima**
		70	1,75	0	Diterima	1,09	33,4	Tidak Diterima
	3	60	3,9	0	Diterima	1,75	0	Diterima
		70	3,44	0	Diterima	1,7	0	Diterima
Saprolit	6	50	2,07	9,3	Diterima	1,16	35,6	Diterima
		55	**1,94**	**11,3**	**Diterima**	**1,12**	**40,4**	**Diterima**
		60	1,76	15,9	Diterima	1,05	47,9	Tidak Diterima
		65	1,67	20	Diterima	1	55,3	Tidak Diterima
		70	1,53	24,5	Diterima	0,95	63,1	Tidak Diterima
	3	60	3,46	2,8	Diterima	1,52	12	Diterima
		70	**3,05**	**6,3**	**Diterima**	**1,44**	**15,9**	**Diterima**
Bedrock	6	60	3,8	0	Diterima	2,28	2,6	Diterima
		70	**3,34**	**0,1**	**Diterima**	**2,08**	**4,6**	**Diterima**
	3	60	7,2	0	Diterima	3,38	0	Diterima
		70	**6,42**	**0**	**Diterima**	**3,31**	**0**	**Diterima**

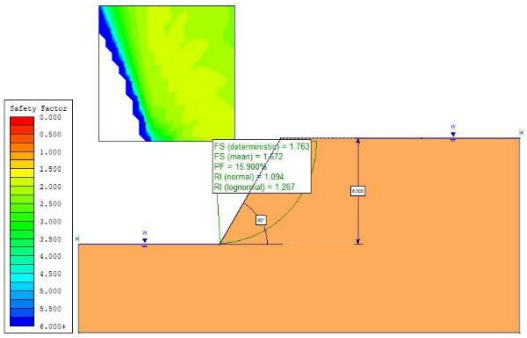
 ISSN 2654-5926



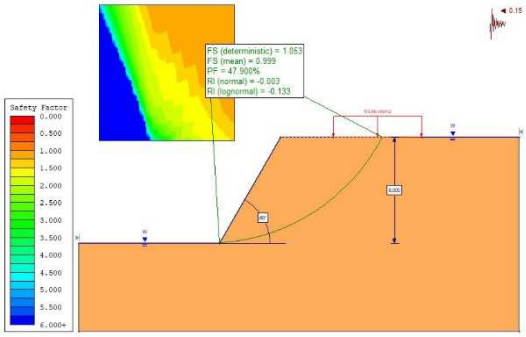
Gambar 4 Pemodelan Lereng Tunggal Statik Untuk Material Limonit Tinggi 6 m dengan Sudut Lereng 60°



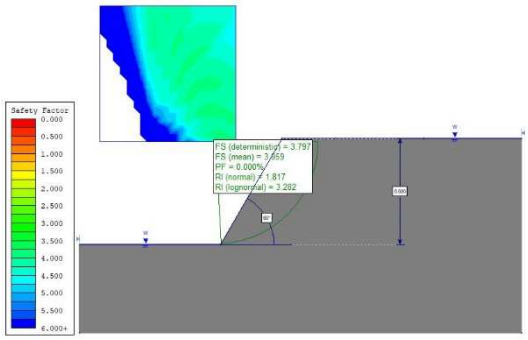
Gambar 5 Pemodelan Lereng Tunggal Dinamik Untuk Material Limonit Tinggi 6 m dengan Sudut Lereng 60°



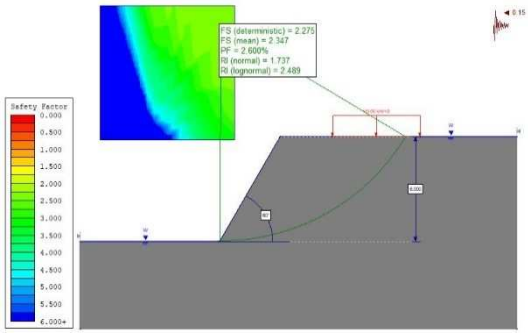
Gambar 6 Pemodelan Lereng Tunggal Statik Untuk Material Saprolit Tinggi 6 m dengan Sudut Lereng 60°



Gambar 7 Pemodelan Lereng Tunggal Dinamik Untuk Material Saprolit Tinggi 6 m dengan Sudut Lereng 60°



Gambar 8 Pemodelan Lereng Tunggal Statik Untuk Material Bedrock Tinggi 6 m dengan Sudut Lereng 60°



Gambar 9 Pemodelan Lereng Tunggal Dinamik Untuk Material Bedrock Tinggi 6 m dengan Sudut Lereng 60°

Hasil analisis kestabilan lereng tunggal menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan antara kondisi statik dan dinamik, yang disebabkan oleh perbedaan beban yang dialami lereng. Pada analisis statik, beban yang bekerja pada lereng hanya berasal dari berat material penyusunnya akibat gaya gravitasi. Sementara itu, pada analisis dinamik (pseudostatic), selain beban statik, terdapat dua beban tambahan yang mempengaruhi kestabilan lereng, yaitu surcharge loading, yang berasal dari berat alat gali dan alat muat terbesar yang melintas, serta beban dinamik akibat percepatan gempa bumi. Kehadiran dua beban tambahan ini menyebabkan faktor keamanan (FK) dalam kondisi dinamik jauh lebih kecil dibandingkan dengan FK dalam kondisi statik.

Rekomendasi Geometri Lereng Tunggal

Tabel 4 menyajikan rekomendasi geometri lereng tunggal berdasarkan hasil simulasi kestabilan dengan mempertimbangkan tinggi lereng, sudut kemiringan, faktor keamanan (FK) dalam kondisi statik dan dinamik, serta probabilitas longsor (PoF, %). Hasil simulasi menunjukkan bahwa material Bedrock memiliki kestabilan tertinggi, baik dalam kondisi statik maupun dinamik. Pada tinggi 3 m dengan sudut 70°, FK statik mencapai 6,42, FK dinamik 3,31, dan PoF 0%, menunjukkan kestabilan yang sangat baik. Pada tinggi 6 m dengan sudut yang sama, FK statik masih cukup tinggi di angka 3,34, FK dinamik 2,08, dengan PoF hanya 4,6%, yang tetap menunjukkan kestabilan yang sangat baik.

Untuk material Limonit, geometri yang direkomendasikan adalah tinggi 3 m dengan sudut 70°,

di mana FK statik mencapai 3,44, FK dinamik 1,70, dan PoF 0%, menunjukkan kestabilan yang cukup baik. Pada tinggi 6 m dengan sudut 65°, FK statik turun menjadi 1,87, FK dinamik 1,15, dengan PoF meningkat menjadi 23,8%, tetapi masih dalam batas kestabilan yang dapat diterima. Sementara itu, material Saprolit menunjukkan kestabilan yang lebih rendah dibandingkan Limonit dan Bedrock. Pada tinggi 3 m dengan sudut 70°, FK statik mencapai 3,05, FK dinamik 1,44, dan PoF 15,9%, yang masih dapat diterima. Namun, pada tinggi 6 m dengan sudut 55°, FK statik menurun menjadi 1,94, FK dinamik 1,12, dan PoF meningkat hingga 40,4%, yang menunjukkan risiko longsor yang lebih tinggi.

Berdasarkan hasil simulasi ini, lereng dengan material Bedrock memiliki kestabilan tertinggi dan dapat memiliki sudut yang lebih curam tanpa mengorbankan kestabilan. Sementara itu, lereng dengan material Limonit dan Saprolit membutuhkan sudut yang lebih landai, terutama pada tinggi 6 m, untuk mengurangi risiko longsor. Oleh karena itu, direkomendasikan bahwa lereng Limonit memiliki geometri optimal dengan tinggi 3 m pada sudut 70° dan tinggi 6 m pada sudut 65°. Untuk lereng Saprolit, geometri yang direkomendasikan adalah tinggi 3 m dengan sudut 70° dan tinggi 6 m dengan sudut maksimum 55° untuk menjaga kestabilan lereng dan mengurangi kemungkinan terjadinya longsor. Sementara itu, untuk material Bedrock, lereng dengan tinggi 3 m maupun 6 m dapat memiliki sudut hingga 70° dengan tingkat kestabilan yang tetap tinggi.

Tabel 4 Rekomendasi geometri simulasi lereng tunggal

Material	Tinggi (m)	Sudut (°)	FK Statik	FK dinamik	PoF (%)
Limonit	3	70	3,44	1,70	0
	6	65	1,87	1,15	23,8
Saprolit	3	70	3,05	1,44	15,9
	6	55	1,94	1,12	40,4
Bedrock	3	70	6,42	3,31	0
	6	70	3,34	2,08	4,6

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Azizi dkk. (2019), geometri optimal untuk lereng tunggal tambang nikel dengan material limonit dalam kondisi statik adalah tinggi 10 m dengan sudut 37°, yang menghasilkan nilai FK sebesar 1,58 dan PoF sebesar 23,6%. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian ini, terlihat bahwa geometri (tinggi dan sudut) lereng sangat berpengaruh terhadap kestabilan lereng, yang tercermin dalam nilai FK dan PoF.

Dalam penelitian ini, lereng Limonit dengan tinggi 6 m dan sudut 65° menghasilkan FK statik sebesar 1,87 dan PoF 23,8%, yang masih dapat diterima. Sementara itu, untuk tinggi 3 m dengan sudut 70°, nilai FK statik mencapai 3,44 dengan PoF 0%, menunjukkan kestabilan yang lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian Azizi dkk. (2019). Hal ini menunjukkan bahwa semakin rendah ketinggian lereng dan semakin optimal sudut kemiringannya, maka kestabilan lereng dapat meningkat secara signifikan.

Dari perbandingan ini, dapat disimpulkan bahwa tinggi lereng yang lebih besar cenderung menghasilkan FK yang lebih kecil dan PoF yang lebih tinggi, sehingga lebih rentan terhadap longsor. Oleh karena itu, dalam perencanaan geometri lereng tambang nikel, perlu mempertimbangkan keseimbangan antara tinggi dan sudut lereng agar diperoleh desain yang optimal, baik dari segi kestabilan maupun efisiensi operasional. Hasil penelitian ini juga menguatkan bahwa pemilihan sudut lereng yang terlalu curam pada ketinggian tertentu dapat meningkatkan risiko ketidakstabilan, terutama dalam kondisi dinamik, seperti yang terlihat pada hasil FK dan PoF untuk material Saprolit dan Limonit pada tinggi 6 m dengan sudut > 65°.

Kesimpulan

Geometri lereng tunggal yang paling optimal dan memenuhi persyaratan ESDM dalam kondisi statik maupun dinamik adalah sebagai berikut: litologi Limonit dengan tinggi 3 m pada sudut 70° dan tinggi 6 m pada sudut 65°; litologi Saprolit dengan tinggi 3 m pada sudut 70° dan tinggi 6 m pada sudut 55°; serta litologi Bedrock dengan tinggi 3 m pada sudut 70° dan tinggi 6 m pada sudut 70°.

Untuk penelitian lebih lanjut, disarankan untuk melakukan analisis yang lebih komprehensif terhadap stabilitas lereng keseluruhan, baik dalam kondisi statik maupun dinamik, guna memperkuat dan memperluas penelitian ini. Selain itu, evaluasi desain lereng keseluruhan pada tambang nikel yang sudah beroperasi juga perlu dilakukan untuk memastikan bahwa lereng tetap stabil dan tidak berpotensi longsor. Optimalisasi geometri lereng tunggal berdasarkan hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam perancangan lereng yang lebih aman dan efisien.

Referensi

Arief, M. Z. (2020). Studi pengaruh geometri lereng pada analisis kemantapan lereng 2D dan 3D dengan metode kesetimbangan batas. *Indonesian mining professionals journal*, *2*(1), 51–56.

Arif, I. I. (2016). *Geoteknik Tambang*. Gramedia Pustaka Utama.

Azizi, M. A., Hakim, R. N., & Nugraha, A. D. (2019). Optimalisasi Geometri Lereng Tambang Nikel Menggunakan Metode Probabilistik Pada Hill Pit 05 PT Vale Indonesia Tbk, Sorowako, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal Geomine*, *8*(1), 74–79.

Hoek, E. (2007). *Praktical Rock Engineering, Course Notes & Books*. Rocscience corner, https://www.rocscience.com/learning/hoeks-corner/course-notes-books.

Jarot, J. P., & Astuti, T. L. R. (2023). Nikel Laterit Pulau Gag: Menelusuri Proses Terbentuknya dan Implikasinya dalam Industri Pertambangan. *ReTII*, *18*(1), 871–880.

Kepmen, E. S. D. M. (2018). Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik. *Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*.

Prasetyo, M., Zakaria, Z., & Sophian, R. (2020). Hubungan Tinggi dan Sudut Lereng Terhadap Potensi Longsor Yang Diindikasikan Oleh Faktor Keamanan pada Lereng Tunggal. *Padjadjaran Geoscience Journal*, *4*(3), 238–242.

Rumsowek, P. D., & Birawaputra, I. (2019). Analisis Kestabilan Lereng Penambangan Nikel Pada PT. Gag Nikel Dengan Menggunakan Metode Bishop. *INTAN Jurnal Penelitian Tambang*, *2*(2), 147–154.

Steffen, O. K. H., Contreras, L. F., Terbrugge, P. J., & Venter, J. (2008). A risk evaluation approach for pit slope design. *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA-08.

Wesseloo, & Stacey, P. (2009). *Open Pit Slope Design*. CSIRO Publishing.