PENERAPAN METODE KINEMATIK DAN KESETIMBANGAN BATAS TERHADAP KESTABILAN LERENG PRODUKSI TAMBANG NIKEL

Diana Irmawati Pradani[1)], Gindang Rain Pratama[1)], Harsalim Aimunandar Jayaputra[1)], dan Gregorius Aryoko Gautama [1]

[1]Prodi D3-Teknologi Pertambangan, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang

E-mail: dianapradani@polinema.ac.id

Abstract

Slope stability analysis is a crucial aspect in mining activities, especially in nickel production areas that have complex geological and morphological characteristics. The method used in analyzing slope stability in nickel mining production areas is by applying the kinematic and limit equilibrium methods. The kinematic method is used to identify potential landslide types based on the orientation of rock joints, while the LEM method is used to calculate the slope safety factor. The data used include discontinuity orientation, physical and mechanical properties of rocks, and slope geometry in the nickel mining area. The analysis results show that in Block D there is the potential for wedge and rock mass landslides, while Block E is dominated by the potential for rock mass landslides. The slope safety factor values are mostly above 1.1, which indicates stable and safe conditions according to the criteria of the Minister of Energy and Mineral Resources Decree No. 1827K/30/MEM/2018. The combination of kinematic and limit equilibrium methods has proven effective in providing comprehensive analysis results, both geometrically and quantitatively. The results of this study are expected to be the basis for safe, efficient, and sustainable mining technical planning, and can be used to control landslide risks through optimizing geometric design and drainage systems.

Keywords: *Slope stability, kinematic method, limit equilibrium, safety factor*

PENDAHULUAN

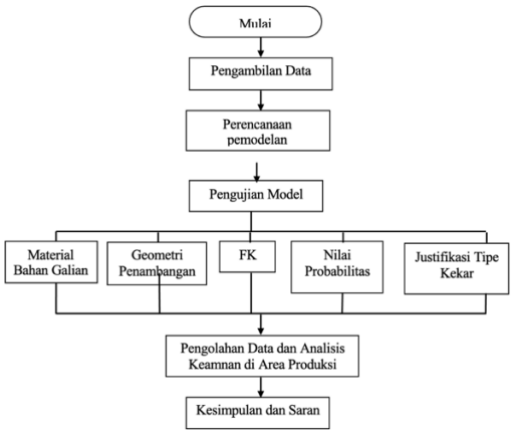
Dalam kegiatan pengusahaan mineral, penambangan nikel pada umumnya dilakukan dengan metode tambang terbuka yang menuntut pembentukan lereng sebagai akses dan area produksi. Keberadaan lereng tambang memiliki peranan yang sangat penting karena kestabilannya berkaitan langsung dengan keselamatan pekerja, kelancaran operasional, serta efisiensi produksi. Namun, kondisi geologi dan morfologi pada daerah penambangan nikel umumnya kompleks, ditandai dengan adanya variasi litologi, struktur geologi, serta kondisi hidrogeologi yang dapat memengaruhi kestabilan lereng. Permasalahan utama yang sering dihadapi adalah terjadinya longsor lereng, baik dalam skala kecil maupun besar, yang dapat menimbulkan kerugian material, keterlambatan produksi, hingga potensi kecelakaan kerja. Oleh karena itu, analisis kestabilan lereng menjadi aspek

fundamental dalam perencanaan tambang yang aman dan berkelanjutan. Berbagai metode analisis kestabilan lereng terus dikembangkan untuk memitigasi risiko ketidakstabilan tersebut. Djainal et al., (2022) menjelaskan bahwa pembentukan geometri lereng pada area pit penambangan nikel harus mengacu pada parameter properties material nikel dan material pengikutnya agar area operasi tetap aman. Dua pendekatan utama yang saat ini lazim digabungkan untuk memberikan hasil evaluasi komprehensif adalah metode kinematik dan metode kesetimbangan batas (Limit Equilibrium Method/LEM). Metode kinematik digunakan untuk mengidentifikasi potensi jenis runtuhan yang mungkin terjadi berdasarkan orientasi diskontinuitas batuan, sedangkan metode kesetimbangan batas digunakan untuk menghitung faktor keamanan lereng secara kuantitatif. Terkait pentingnya integrasi penerapan kedua metode geoteknik ini secara berkesinambungan di lapangan, sebuah studi terdahulu di kawasan tambang nikel Sulawesi menemukan bahwa penggunaan metode kinematik secara awal mampu memetakan potensi runtuhan secara spasial, yang kemudian dikonfirmasi dan dianalisis lebih lanjut secara numerik melalui metode LEM. Pendekatan terpadu ini membantu dalam penyusunan rekomendasi teknis seperti desain geometri lereng, sistem drainase, dan perkuatan lereng. Yusuf et al., (2022).

Meskipun kombinasi kedua metode ini secara teoritis telah dipahami, penerapannya pada area produksi material ultramafic yang bersifat semi hardrock masih memerlukan validasi terhadap kondisi rekahan aktual di lapangan. Berdasarkan pada batasan tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada tiga hal utama: bagaimana menganalisis geometri aktual lereng pada area produksi tambang nikel, bagaimana kondisi kestabilan pembentukan lereng pada area produksi tersebut, serta bagaimana pengaruh keberadaan joint (kekar) terhadap proses penggalian material nikel. Sejalan dengan permasalahan yang diangkat, penelitian ini secara umum bertujuan untuk mendapatkan data geometri aktual lereng tambang nikel selama proses penggalian berlangsung. Selain itu, analisis ini ditujukan secara spesifik untuk mendapatkan nilai faktor keamanan dan nilai probabilitas keamanan lereng, serta mendapatkan parameter pengaruh nilai kekar terhadap potensi kelongsoran selama kegiatan penggalian dilakukan di area penambangan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif yang dilakukan menggunakan pendekatan deskriptif-analitis dengan alur penelitian pada gambar 1. Evaluasi terhadap kestabilan lereng pada area produksi dieksekusi secara komprehensif melalui penerapan dua metode analisis utama di bidang geoteknik, yakni metode kinematik dan metode kesetimbangan batas (Limit Equilibrium Method/LEM). Sampel penelitian difokuskan pada dua blok penambangan utama, yaitu Blok D dan Blok E. Pada masing-masing blok tersebut, pengambilan data geometri dan pemodelan dirinci menjadi tiga area sayatan penampang melintang (cross section), yakni CS-1, CS-2, dan CS-3. Berdasarkan hasil observasi, area sampel ini merepresentasikan litologi batuan penyusun yang terdiri atas basalt, schist, gabbro, peridotite, dan rijang.

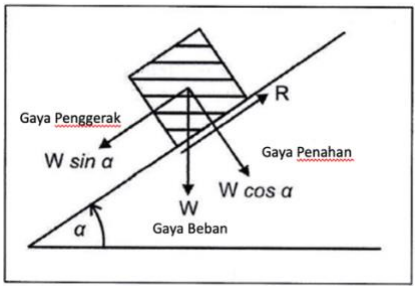


Gambar 1. Diagram alir penelitian

Variabel utama yang diteliti dalam kajian ini meliputi kondisi massa batuan (orientasi bidang lereng, orientasi diskontinuitas/kekar, dan kondisi hidrologi air), sifat fisik dan mekanik batuan, geometri lereng penambangan aktual, data curah hujan, serta indikasi potensi jenis runtuhan. Secara lebih spesifik, parameter properties material batuan yang diukur terdiri dari nilai kohesi (c), sudut geser dalam (phi), kuat tarik (tensile strength), kuat tekan uniaksial (uniaxial compressive strength), global strength, modulus of deformation, hingga bobot isi (unit weight).

Aktivitas penambangan di ruang terbuka yang berupa penggalian dan penibunan akan selalau menghadapi permasalah kestabilan lereng. Lereng tersebut

adalah lereng tambang aktif, lereng timbunan, dan lereng infrastruktur tambang. Lereng-lereng tersebut perlu dilakukan analisis untuk menilai kestabilannya, baik dalam tahap perancangan, tahap penambangan, maupun tahap pascatambang. Analisis yang dilakukan ini betujuan untuk mencegah bahaya longsoran di waktu yang akan datang karena dapat menyebabkan kerugian material maupun korban jiwa. Kestabilan suatu lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dapat dinyatakan secara sederhanan sebagai gaya-gaya penahan dan gaya-gaya penggerak yang betanggungjawab terhadap kestabilan lereng tersebut. Lereng dalam keadaan stabil (aman) apabila gaya penahan terhadap longsoran lebih besar dari gaya penggeraknya. Lereng akan terjadi longsor ataupun tidak stabil jika gaya penahan lebih kecil dari gaya penggeraknya. Faktor Keamanan (Safety Factor) merupakan parameter yang dijadikan sebagai penilain kestabilan suatu lereng. Faktor keamanan ini diperlukan untuk mengetahui kemantapan suatu lereng untuk mencegah bahaya longsoran di waktu-waktu yang akan datang.

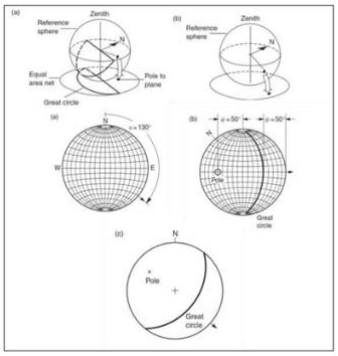


Gambar 2. Konsep kesetimbangan gaya pada bidang miring

Gaya pengerak, gaya beban, dan gaya penahan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2 di atas merupakan gaya-gaya yang bekerja pada sebuah lereng. Dua gaya sebenarnya berlaku pada lereng yaitu gaya penahan diaman gaya yang menahan massa dari bergerak dan gaya penggerak yang merupakan pemicu pergerakan massa. Jika gaya penggerak lebih besar dari gaya penahan, lereng akan longsor.Perhitungan kemiringan harus dilakukan sesuai dengan faktor keamanan agar material pada lereng tidak jatuh (Failure).

Analisis metode kesetimbangan batas ini memiliki beberapa asumsi utama, antara lain: bentuk bidang longsor berupa melingkar (circular slip) atau non-melingkar (non-circular slip), distribusi tegangan antar irisan bisa diabaikan atau dianggap sebagai distribusi tertentu, interaksi antar blok dalam analisis irisan (slice method) memiliki interaksi geser dan normal dengan blok di sekitarnya.

Metode kinematik adalah pendekatan dalam analisis kestabilan lereng yang digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan terjadinya kelongsoran berdasarkan orientasi bidang diskontinuitas dalam massa batuan. Metode ini fokus pada geometri dan mekanisme kelongsoran yang dipengaruhi oleh struktur geologi seperti bidang perlapisan, sesar, dan kekar. Metode kinematik biasanya diterapkan dalam analisis kestabilan lereng tambang dengan menggunakan diagram stereonet atau analisis stereografi, yang membantu dalam mengidentifikasi potensi jenis kelongsoran berdasarkan hubungan antara bidang diskontinuitas dan arah gaya gravitasi (gambar 3).



Gambar 3. Ilustrasi proyeksi stereografi dari garis dan bidang

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kegiatan pemetaan geoteknik dilakukan untuk pengumpulan data geoteknik dan geologi untuk memahami memahami karakteristik fisik dan mekanik material disekitar lokasi penambangan nikel. data tersebut meliputi pengukuran kekar dan bidang lemah, pengujian laboratium, dan pemodelan lokasi pengamatan. Pengujian dilakukan pada litologi disekitar area penambangan yang terdiri dari tanah/batuan basalt, tanah/batuan schist, tanah/batuan peridotit, tanah/batuan rijang dan tanah/batuan gabro. Data pemetaan kekar disekitar area penambangan dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Data kekar disekitar area penambangan nikel

Dip (^{0})	Dip DIrection (^{0})	Strike (^{0})	Dip (^{0})	Dip DIrection (^{0})	Strike (^{0})
53	20	290	43	371	281
79	102	12	67	168	78
71	237	147	38	152	62
51	311	221	66	282	192
66	108	18	73	42	312
41	143	53	47	311	221

67	290	200	58	160	70
75	40	310	33	290	200
57	314	224	50	108	18
66	165	75	81	180	90
67	244	154	62	310	220
78	162	72	56	97	7

Sumber : Hasil pemetan lapangan

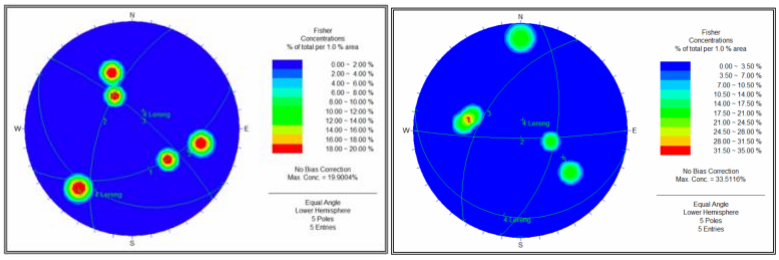
Berikut data properties material hasil pengujian laboratorium dari lokasi penambangan nikel tersaji pada Tabel 2.

Tabel 2. Data material disekitar area penambangan nikel

Material Name	**C MPa**	**Phi (^{0})**	**Sigt MPa**	**Sigc MPa**	**Sigcm MPa**	**Em MPa**	**UW MN/m^3**
Basalt	0.1675	54.12	0.0075	0.4913	12.05	1455.17	0.026
Schist	0.0979	41.28	0.0088	0.2329	3.31	1334.89	0.026
Gabro	0.1305	50.58	0.0041	0.2538	9.56	1030.18	0.026
Peridotit	0.1217	48.56	0.0032	0.2105	5.16	1260.21	0.026
Rijang	0.0961	43.84	0.0028	0.1371	3.83	1001.02	0.026

Sumber : Hasil pengujian laboratiorium geomekanuka

Analisis mengenai tipe pergerakan lereng diperlukan sebagai langkah antisipasi maupun penangan apabila akan terjadi kelongsoran. Tipe kelongsoran dapat dilakukan melalui kalkulasi kinematic analysis dengan menghitung persentase probabilitas kelongsoran pada tiap jenis longsoran berdasarkan data orientasi struktur geologi, sudut geser dalam, dan orientasi lereng. Dengan mengasumsikan gaya-gaya lokal dengan stress stregth dari daerah sekitar lereng penambangan, maka dibuat plot stereonet bidang kekar pada lereng penambangan seperti pada gambar dibawah ini (gambar 4).



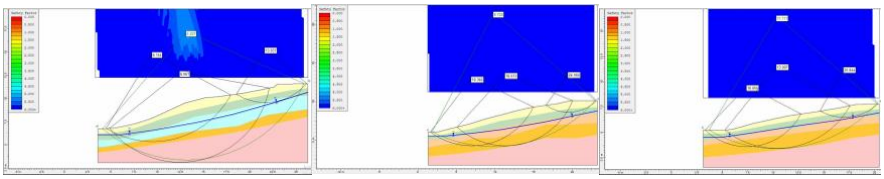
Blok D Blok E

Gambar 4. Kinematik analisis area penambangan D dan E

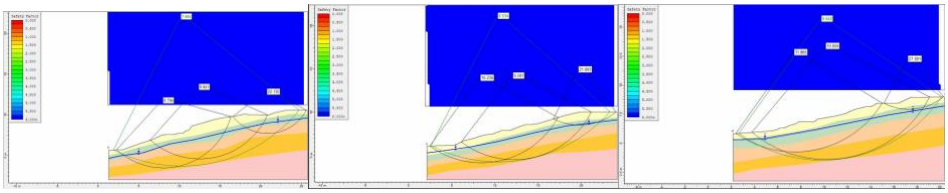
Berdasarkan hasil analisis menggunakan stereonet diatas dapat disimpulkan pada blok D bahwa jenis dan tipe longsoran dari hasil pemetaan geoteknik dan pengukuran kekar serta analisis stereonet, dapat diketahui bahwa kemungkinan tipe longsoran adalah

longsoran baji dan longsoran massa batuan. Kestabilan lereng di beberapa tempat stabil namun secara parsial terdapat beberapa daerah pada lereng yang punya potensi untuk longsor. Persentase longsor : adapun nilai persentase longsor berdasarkan hasil pemetaan geoteknik antara 35% - 40%. Berdasarkan hasil analisis menggunakan stereonet diatas dapat disimpulkan pada blok E bahwa jenis dan tipe longsoran dari hasil pemetaan geoteknik dan pengukuran kekar serta analisis stereonet, dapat diketahui bahwa kemungkinan tipe longsoran adalah longsoran massa batuan. Kestabilan lereng stabil namun secara parsial terdapat beberapa daerah pada lereng yang punya potensi untuk longsor, walaupun potensi ini kecil. Persentase longsor adapun nilai persentase longsor berdasarkan hasil pemetaan geoteknik antara 15% - 20%.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, bahwa permodelan geoteknik pada blok D dan E terbagi atas 3 penampang melintang (cross section), yakni CS-1, CS-2 dan CS-3. Untuk masing-masing penampang melintang (cross section), digunakan pendekatan model limit equilibrium untuk mengetahui nilai dan persentase kestablian tanah/batuan dan pendekatan finite elemen untuk mengetahui nilai kekuatan tanah/batuan.



Gambar 5. Nilai Kestabilan Lereng Penampang CS-1 – CS-3 Blok D



Gambar 6. Nilai Kestabilan Lereng Penampang CS-1 – CS-3 Blok E

Dari permodelan dengan pendekatan metode limit equilibrium, dapat diketahui nilai kestabilan lereng (FK) dan persentase kestabilan lereng, baik lereng penambangan maupun lereng disposal, sesuai yang dipersyaratkan dalam Kepmen ESDM 1827/K/30/MEM/2018. Sedangkan nilai batas FS dan persentasi yang ditetapkan oleh Perusahaan sebesar 53% berdasarkan kondisi material dilapangan. Pada tabel 3 dan table 4 berikut diperlihatkan hasil permodelan dengan pendekatan limit equilibrium untuk penampang 1 bagian barat blok D, dimana diperoleh bahwa nilai kestabilan lereng (FK) semuanya diatas 1.1 dan persentase kestabilan lereng adalah 100%.

Tabel 3 Nilai FK dan Persentase Penampang Bagian Barat Blok D

No	Lereng	Nilai Kestabilan Lereng		Nilai Batas Kestabilan		Kondisi Lereng
		FS	Persentase	FS	Persentase	
1	Lereng-1	5.227	100.00%	1.1	53.33%	Aman/Stabil
2	Lereng-2	6.061	100.00%	1.1	53.33%	Aman/Stabil
3	Lereng-3	6.144	100.00%	1.1	53.33%	Aman/Stabil
4	Lereng-4	13.937	100.00%	1.1	53.33%	Aman/Stabil

Tabel 4. Nilai FK dan Persentase Penampang Bagian Barat Blok E

No	Lereng	Nilai Kestabilan Lereng		Nilai Batas Kestabilan		Kondisi Lereng
		FS	Persentase	FS	Persentase	
1	Lereng-1	7.665	100.00%	1.1	53.33%	Aman/Stabil
2	Lereng-2	8.794	100.00%	1.1	53.33%	Aman/Stabil
3	Lereng-3	9.841	100.00%	1.1	53.33%	Aman/Stabil
4	Lereng-4	22.13	100.00%	1.1	53.33%	Aman/Stabil

Tingginya nilai FS, khususnya pada beberapa penampang seperti Lereng-4 Blok D (13,937) dan Lereng-4 Blok E (22,130) berkaitan dengan geometri penampang yang relatif landai, tinggi lereng yang rendah, parameter kekuatan material yang tinggi, atau kombinasi beberapa kondisi tersebut. Evaluasi kestabilan tidak hanya didasarkan pada nilai FS, tetapi juga mempertimbangkan kesesuaian parameter geoteknik dengan kondisi lapangan serta skenario pembebanan yang mungkin terjadi selama kegiatan penambangan. Nilai kestabilan lereng (FK) dan nilai persentase kestabilan lereng, untuk semua penampang yang dianalisis, baik di blok D maupun blok E, cenderung tinggi dari 1.1 (100%) dikarenakan lereng yang landai dan memiliki kemiringan rata-rata 30^0. Berdasarkan hasil penelitian mengenai penerapan metode kinematik dan kesetimbangan batas pada analisis kestabilan lereng area produksi penambangan nikel, dapat disimpulkan bahwa kestabilan lereng dipengaruhi oleh kondisi geologi yang kompleks, termasuk keberadaan kekar, variasi litologi, serta tingkat pelapukan batuan ultrabasa. Hasil analisis kinematik menunjukkan adanya potensi kelongsoran dengan mekanisme baji dan massa batuan pada lereng Blok D, serta massa batuan pada lereng Blok E, dengan persentase potensi longsor yang berbeda antarblok. Sementara itu, hasil pemodelan menggunakan metode kesetimbangan batas (Limit Equilibrium Method) menunjukkan bahwa sebagian besar lereng yang dianalisis berada dalam kondisi aman dengan nilai faktor keamanan (FK) lebih besar dari 1,1 dan persentase

kestabilan mencapai 100%. Hal ini menunjukkan bahwa secara umum desain geometri lereng yang ada relatif stabil, meskipun terdapat beberapa area parsial yang masih berpotensi mengalami ketidakstabilan. Kendati demikian, dinamika kondisi lapangan seperti infiltrasi air hujan, perubahan desain pit, serta aktivitas operasional tambang tetap menjadi faktor penting yang dapat memengaruhi kestabilan lereng secara signifikan. Oleh karena itu, pemantauan lereng secara berkala, penerapan sistem drainase yang memadai, serta penyesuaian desain geometri lereng dan sistem penyanggaan sangat diperlukan untuk menjaga kestabilan dalam jangka panjang. Secara keseluruhan, kombinasi metode kinematik dan kesetimbangan batas terbukti memberikan pendekatan analisis yang komprehensif, karena mampu mengidentifikasi potensi jenis longsoran sekaligus menilai tingkat keamanan lereng secara kuantitatif. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan teknis dalam upaya perencanaan tambang yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan mengenai penerapan metode kinematik dan kesetimbangan batas pada analisis kestabilan lereng di area produksi penambangan nikel, dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain area penelitian memiliki kondisi geologi yang kompleks, terdiri atas batuan ultramafik, basalt, schist, gabbro, dan rijang dengan tingkat pelapukan bervariasi. Struktur geologi berupa sesar dan kekar sangat memengaruhi kestabilan lereng, terutama pada sektor dengan kerapatan diskontinuitas tinggi. Berdasarkan analisis stereonet, potensi jenis kelongsoran yang terjadi di lereng Blok D adalah longsoran baji dan massa batuan, sedangkan di Blok E dominan berupa longsoran massa batuan. Persentase potensi kelongsoran berkisar antara 15%–40%, menunjukkan adanya sektor tertentu yang perlu perhatian khusus. Hasil Analisis Kesetimbangan Batas (Limit Equilibrium Method) Nilai faktor keamanan (FK) untuk seluruh penampang lereng di Blok D dan Blok E berada di atas 1,1 dengan persentase kestabilan mencapai 100%. Hal ini menunjukkan bahwa secara umum, geometri lereng yang diterapkan sudah dalam kondisi aman dan stabil, sesuai dengan kriteria dalam Kepmen ESDM No. 1827K/30/MEM/2018. Kombinasi metode kinematik dan kesetimbangan batas terbukti efektif memberikan hasil analisis yang

komprehensif, karena metode kinematik mampu mengidentifikasi potensi mekanisme kelongsoran, sedangkan metode LEM memberikan penilaian kuantitatif terhadap tingkat keamanan lereng. Walaupun secara teoritis lereng berada dalam kondisi stabil, faktor eksternal seperti infiltrasi air hujan, perubahan desain pit, kegiatan peledakan, dan penggunaan alat berat dapat memengaruhi stabilitas secara lokal. Oleh karena itu, pemantauan dan evaluasi berkelanjutan sangat diperlukan.

DAFTAR PUSTAKA

Arif, I. (2016). Geoteknik Tambang. Penerbit ITB.

Djainal, M., Rahma, A., & Saputra, H. (2022). Analisis geometri dan kestabilan lereng pada pit penambangan nikel berdasarkan parameter properties material. Jurnal Teknologi Pertambangan, 8(2), 115–124.

Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering* (3rd ed.). Institution of Mining and Metallurgy.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2018). *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*. Kementerian ESDM RI.

Priest, S. D. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman & Hall.

Rai, M. A., Kramadibrata, S., & Wattimena, R. K. (2014). *Mekanika Batuan*. LTM ITB.

Rocscience Inc. (2020). *Dips Version 7.0: Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data*. Rocscience Inc.

Rocscience Inc. (2021). *Slide2: 2D Limit Equilibrium Analysis of Slope Stability*. Rocscience Inc.

Wyllie, D. C. (2017). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining* (5th ed.). CRC Press.

Yusuf, M., Ramli, M., & Nur, I. (2022). Integrasi metode kinematik dan Limit Equilibrium Method (LEM) dalam evaluasi kestabilan lereng tambang nikel di Sulawesi. *Jurnal Geologi dan Pertambangan*, 14(3), 195–205.