

POTENSI DAN PROBABILITAS KELONGSORAN LERENG TAMBANG KUARI BATUGAMPING DI DAERAH MORAMO UTARA, SULAWESI TENGGARA

Potential and probability of failures of limestone quarry slope in North Moramo, Southeast Sulawesi

MASRI^{1*}, MARWAN Z. MILI^{2**}, WAODE R. A. NAFIU^{2**}, WAHAB^{2**}, HUSRAN AGRIAWAN^{1**}, dan LA ODE NGKOIMANI^{1**}

1 Jurusan Teknik Geologi, Universitas Halu Oleo

Kampus Hijau Bumi Tridharma Jalan H.E.A Mokodompit, Anduonohu, Kendari 93232

2 Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Halu Oleo

Kampus Hijau Bumi Tridharma Jalan H.E.A Mokodompit, Anduonohu, Kendari 93232

Email korespondensi: masri@uho.ac.id

* Kontributor Utama, ** Kontributor Anggota

ABSTRAK

Pembaraian fragmen batugamping pada tambang kuari dapat menyebabkan isu kestabilan lereng. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi longsoran dan menentukan besar probabilitas kelongsoran pada tiga lereng tambang kuari. Tipe potensi longsoran diidentifikasi menggunakan analisis kinematika. Penentuan probabilitas kelongsoran juga dilakukan untuk mengakomodir ketidakpastian dan variabilitas data masukan pada perhitungan faktor keamanan. Probabilitas kelongsoran ditentukan dengan metode kesetimbangan batas disertai uji baik suai chi-square pada kuat geser set diskontinuitas. Penentuan kuat geser diskontinuitas menggunakan nilai ekuivalensi pada Kriteria Barton-Bandis. Diskontinuitas pada lereng berupa perlapisan, kekar tarik, dan rekahan gerus. Analisis kinematika pada lereng 1 dan lereng 2 menunjukkan potensi longsoran baji dengan probabilitas sebesar 19,80% - 20,81%. Pada lereng 3 dijumpai potensi longsoran planar dengan probabilitas sebesar 69,49%. Meskipun pada analisis kinematika dijumpai potensi longsoran, faktor keamanan pada ketiga lereng bernilai di atas nilai ambang (7.28 – 30.58) dengan probabilitas kelongsoran berkisar 0 – 6,14%. Uji sensitivitas menunjukkan nilai faktor keamanan sangat dipengaruhi oleh perubahan kohesi perlapisan. Variasi pengisian airtanah pada diskontinuitas juga turut memengaruhi nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran, khususnya pada longsoran planar. Direkomendasikan untuk mengevaluasi tipe longsoran batuan lain, seperti potensi kehadiran jatuhnya batuan (*rockfalls*).

Kata kunci: analisis kinematika, longsoran baji, probabilitas kelongsoran, kuari batugamping, Kriteria Barton-Bandis.

ABSTRACT

Demolition of limestone fragments in quarries can cause slope stability issues. This study aims to identify the potential for rock failures and determine the probability of failures on three quarry slopes. The type of rock failures was identified using kinematics analysis. Determining the probability of failures is also required to accommodate the uncertainty of input parameters in the factor of safety calculation. The probability of failure was determined using the limit equilibrium method and chi-square tests to fit shear strength curves on the discontinuities. The Barton-Bandis criterion was used to determine the shear strength of the discontinuities. On the slopes, the discontinuity types are bedding, joint, and shear fractures. Kinematics analysis of slope-1 and slope-2 revealed the possibility of wedge failures with an occurrence probability ranging from 19.80 to 20.81%.

On slope 3, a planar failure possibility with a 69.49% of occurrence probability was identified. Even though the kinematics analysis suggested the possibility of rock failures, the factor of safety on all three slopes was above the threshold (7.28 – 30.58) with probability of failure ranging from 0 – 6.14%. Based on sensitivity analysis, factor of safety is most influenced by changes in the bedding cohesion. Variations in groundwater recharge at discontinuities also influence the factor of safety and the probability of failures, particularly in planar failures. It is recommended to evaluate other types of rock failures, such as the potential of rockfalls.

Keywords: *kinematic analysis, wedge failure, probability of failure, limestone quarry, Barton-Bandis criterion.*

PENDAHULUAN

Lengan Tenggara Sulawesi tersusun atas berbagai tipe batugamping dengan variasi umur dan lingkungan pengendapan (Surono, 2013). Di daerah Moramo Utara dan sekitarnya dijumpai sebaran batugamping berumur Trias yang disetarakan dengan Formasi Laonti (Darnawati dkk., 2022). Batugamping telah terdeformasi dan mengalami metamorfisme membentuk filit dan marmer. Deformasi dan metamorfisme dicirikan oleh kehadiran tesktur umum seperti kristaloblastik dan nematoblastik dan tesktur khusus seperti *saccharoidal* dan mortar. Pada marmer juga dijumpai struktur lensa (Azzaman dan Titisari, 2023). Berdasarkan kandungan geokimia dan sifat fisik mekaniknya, marmer dan batugamping pada daerah Moramo Utara dapat digunakan untuk bahan bangunan, produksi semen, dan pemanfaatan lain pada industri kertas dan tekstil (Titisari dan Azzaman, 2019).

Beberapa perusahaan pertambangan dan penambangan rakyat dijumpai pada daerah penelitian. Persero Terbatas (PT) Hoffmen Energi Perkasa merupakan salah satu perusahaan pertambangan kuari yang beroperasi di Daerah Moramo Utara. Umumnya produk kuari batugamping diperuntukkan sebagai bahan bangunan dan pengeras jalan, juga memenuhi permintaan industri pengolahan nikel laterit (Darnawati dkk., 2022). Batugamping pada pengolahan nikel dengan pirometalurgi mampu meningkatkan efisiensi melalui penurunan temperatur reaksi kimia, menyerap impuritas seperti senyawa sulfur, dan mempercepat pembentukan residu terak (Li dkk., 2015). Penambangan dan fragmentasi batugamping dilakukan menggunakan peralatan mekanik dan peledakan agar diperoleh ukuran fragmen yang optimal sebelum diproses lebih lanjut (Wang dkk., 2018). Proses pembeaian ini dapat menyebabkan isu ketidakstabilan pada lereng tambang, karena dapat mengubah geometri lereng awal, mengurangi kekuatan massa batuan

(Husni, Toha dan Komar, 2020; Yanuardian dkk., 2020), dan meningkatkan laju infiltrasi air pada rekahan batuan (Putra dkk., 2020).

Keberadaan diskontinuitas pada lereng batuan juga turut mempengaruhi kestabilan lereng. Beberapa tipe longsor seperti longsor planar, baji, dan guling menghasilkan bidang gelincir yang ditentukan oleh orientasi diskontinuitas (Wyllie dan Mah, 2017). Analisis kinematika sangat penting digunakan untuk mengidentifikasi potensi keruntuhan batuan. Metode ini melibatkan studi tentang hubungan geometris antara orientasi diskontinuitas dan orientasi muka lereng (Idris dkk., 2019). Dengan menganalisis orientasi dan interaksi diskontinuitas ini, analisis kinematik dapat menentukan tipe dan zona kelongsoran pada muka lereng dengan proyeksi stereografi (Umrao dkk., 2011; Sirait dkk., 2021; Khodijah dkk., 2023). Analisis kinematika pada batuan metamorf mampu mengidentifikasi potensi longsor guling (Masri dan Sadisun, 2019), potensi longsor baji dan planar pada lereng tambang kuari batugamping (Sirait, Pulungan dan Pujianto, 2021).

Selain faktor keamanan, nilai probabilitas kelongsoran lereng juga digunakan untuk menunjukkan tingkat kestabilan lereng. Faktor keamanan memberikan penilaian deterministik terhadap kestabilan lereng, probabilitas kelongsoran memperhitungkan ketidakpastian dan variabilitas data masukan analisis. Faktor keamanan bersifat konservatif yang mengasumsikan skenario terburuk, sedangkan probabilitas kelongsoran memberikan penilaian yang lebih realistis pada peluang kelongsoran berdasarkan analisis statistik (Read dan Stacey, 2010). Probabilitas kelongsoran ditentukan dan dianalisis dengan menggunakan berbagai metode. Metode Monte Carlo dapat digunakan untuk menghitung probabilitas kelongsoran terhadap nilai faktor keamanan yang disimulasikan dari beberapa skenario sampel data dari distribusi probabilitas parameter

masuk (Abbaszadeh *dkk.*, 2011). Analisis sensitivitas juga digunakan untuk mengevaluasi faktor yang mempengaruhi nilai probabilitas kelongsoran. Analisis ini membantu mengidentifikasi parameter masukan pada lereng yang signifikan (Azizi, 2014; Masri, 2016). Dengan menghitung probabilitas kelongsoran pada lereng tambang, dapat dibuat keputusan yang tepat terkait desain lereng, pemantauan, dan manajemen risiko. Informasi ini memungkinkan penerapan langkah pencegahan, seperti perkuatan lereng, sistem drainase, dan optimasi geometri lereng, untuk mengurangi potensi kelongsoran dan memastikan keselamatan operasi penambangan (Azizi *dkk.*, 2019).

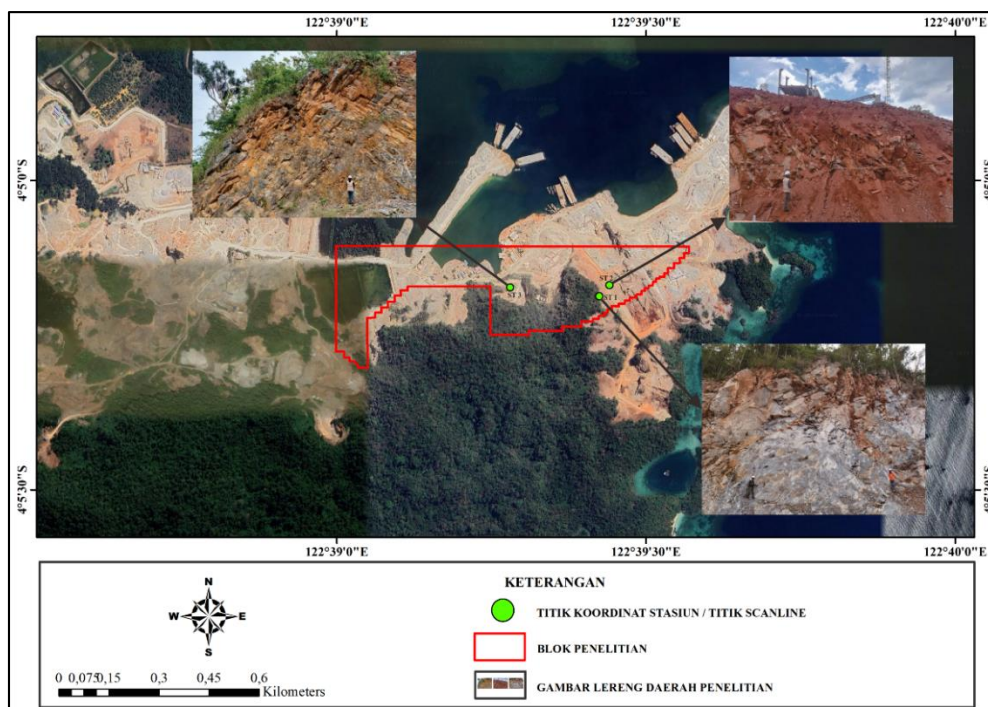
Pada penelitian ini, kestabilan lereng tambang kuari batugamping dinyatakan dalam faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran. Perhitungan dilakukan dengan asumsi bidang gelincir yang telah ditentukan (Arif, 2016). Agar asumsi bidang gelincir lebih akurat, digunakan analisis kinematika untuk mengidentifikasi tipe potensi longsoran batuan pada lereng tambang. Kombinasi penentuan probabilitas kelongsoran berdasarkan bidang gelincir oleh tipe longsor dari analisis kinematika diharapkan memberikan evaluasi kestabilan lereng tambang yang lebih akurat.

METODE

Lokasi penelitian merupakan kawasan penambangan kuari seluas ± 16 hektar. Evaluasi kestabilan lereng dilakukan pada tiga lereng produksi pit penambangan kuari batugamping (Gambar 1). Metode yang digunakan adalah perpaduan metode observasi lapangan dan metode kuantitatif eksperimental. Tahapan penelitian mencakup inventarisasi diskontinuitas pada lereng dengan survei garis pindai. Parameter diskontinuitas yang dideskripsi mengacu pada standar ISMR (1979). Pengambilan sampel batuan juga diperlukan untuk pengujian kuat tekan (Tabel 1) dan bobot isi batuan (Tabel 2). Pengujian dilakukan di UPT Laboratorium Kontruksi Dinas Sumber Daya Air dan Bina Marga, Dinas Pekerjaan Umum Sulawesi Tenggara.

Tabel 1. Hasil uji kuat tekan batuan penyusun lereng

Lereng	Litologi	Hasil Pengujian	Satuan
Lereng 1	Metagamping	54	MPa
Lereng 2	Metagamping	108	MPa
Lereng 3	Metagamping	60	MPa



Gambar 1. Lokasi penambangan kuari batugamping dan distribusi lereng yang diinvestigasi

Tabel 2. Rekapitulasi nilai bobot isi metagamping pada lereng

Parameter	Satuan	Hasil Uji		
		Lereng 1	Lereng 2	Lereng 3
Berat Kering	kN/m ³	27,14	19,86	22,44
Berat Natural	kN/m ³	27,16	19,87	28,35
Berat Jenuh	kN/m ³	27,17	19,89	28,37

Pada tahapan analisis, identifikasi potensi kelongsoran ditentukan dengan analisis kinematika pada proyeksi stereografi. Kriteria longsor ditentukan berdasarkan orientasi diskontinuitas dan muka lereng terhadap sudut geser dalam (Kliche, 2019). Penentuan kuat geser diskontinuitas menggunakan nilai ekivalensi berdasarkan koefisien kekasaran diskontinuitas JRC (*Joint Roughness Coefficient*), kekuatan dinding diskontinuitas JCS (*Joint Compressive Strength*), tegangan normal (σ_n), dan sudut geser dalam residual (ϕ_r) mengacu pada persamaan 1 dan 2 berikut (Barton, 1973; Hoek, 2007):

$$\phi_i = \tan^{-1} \left[\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} \right] \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan \left[\text{JRC} \log_{10} \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} + \phi_r \right] -$$

$$\frac{\pi \text{JRC}}{180 \ln 10} \left[\tan^2 \left(\text{JRC} \log_{10} \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} + \phi_r \right) + 1 \right]$$

$$c_i = \tau + \sigma_n \tan \phi_i \dots \dots \dots (2)$$

Uji baik suai *chi-square* dilakukan pada kelompok nilai kuat geser ekivalensi diskontinuitas agar diperoleh tipe kurva distribusi data probabilistik. Tipe distribusi data digunakan untuk membangkitkan sekumpulan bilangan acak dengan simulasi Monte Carlo. Luaran dari perhitungan dengan metode kesetimbangan batas adalah faktor keamanan deterministik, faktor keamanan probabilistik, dan persentase nilai faktor keamanan di bawah nilai ambang terhadap keseluruhan data perhitungan faktor keamanan (Abbaszadeh dkk., 2011). Parameter ini yang disebut sebagai persentase probabilitas kelongsoran (%PK). Analisis sensitivitas difokuskan pada perubahan kuat geser diskontinuitas terhadap perubahan nilai faktor keamanan. Fungsi parameter dinyatakan dalam persamaan linear. Parameter masukan yang mempengaruhi faktor keamanan ditunjukkan dengan gradien kemiringan yang besar (Tao dkk., 2018). Evaluasi lereng tambang didasarkan pada nilai ambang faktor keamanan

deterministik dan probabilitas kelongsoran mengacu pada Kepmen ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 (Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, 2018).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Geologi Daerah Penelitian

Daerah penelitian terdiri atas dua satuan geomorfologi. Satuan kars perbukitan rendah berelevasi 50 – 200 mdpl tersebar di bagian tengah meliputi 18% daerah penelitian. Satuan ini tersusun oleh metagamping. Satuan karst pedataran landai berelevasi 0 – 50 mdpl berkemiringan landai hingga miring, juga tersusun atas metagamping dengan setempatan tanah penutup. Kedua satuan ini umumnya dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik (Gambar 2).



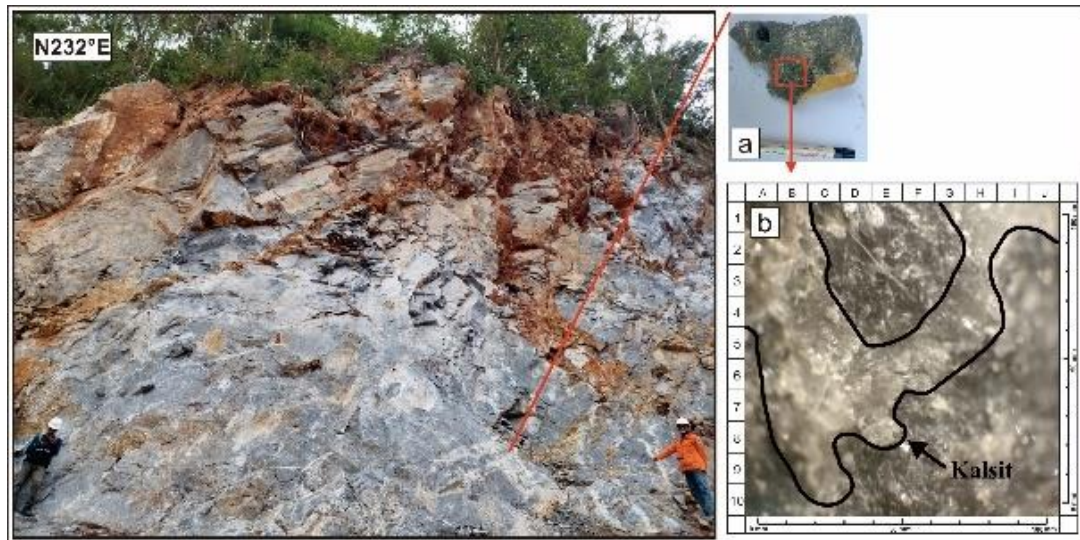
Gambar 2. Satuan geomorfologi daerah penelitian yang didominasi oleh pedataran dan perbukitan antropogenik

Batuan penyusun lereng diamati secara megaskopik. Batugamping berwarna abu-abu gelap, bertekstur nonklastik, sortasi sedang, kemas tertutup, tersusun dominan oleh mineral kalsit (CaCO_3) dan sedikit mikrit. Kristal kalsit berukuran 20 – 90 mm, struktur batuan masif dengan perlapisan yang masih terlihat dengan jelas, batuan berstruktur pejal. Kristalisasi kalsit disertai kehadiran kontak *suture* (Gambar 3) menunjukkan indikasi metamorfisme pada batugamping. Batugamping telah mengalami proses awal metamorfisme menjadi metagamping, dicirikan oleh nilai kuat tekan yang tinggi, densitas batuan yang tinggi,

dengan ukuran kristal kalsit yang relatif besar. Berbeda dengan peneliti terdahulu (Azzaman dan Titisari, 2023), deformasi dan metamorfisme pada daerah penelitian belum membentuk marmar dan filit.

Survei garis pindai menunjukkan tipe diskontinuitas pada lereng berupa perlapisan, rekahan gerus, dan kekar tarik. Perlapisan

berarah umum baratlaut-tenggara dengan kemiringan berkisar $45-75^\circ$ (Gambar 4). Kekar dan rekahan gerus berarah timurlaut-baratdaya dengan kemiringan berkisar $45-53^\circ$. Bidang perlapisan memiliki spasi dan persistensi lebih besar dibanding rekahan gerus dan kekar. Rekahan gerus memiliki nilai JRC lebih tinggi, sedangkan kekar menunjukkan derajat pelapukan yang lebih tinggi.



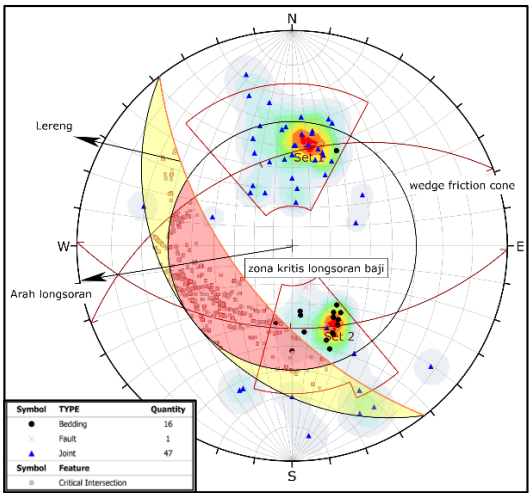
Gambar 3. Satuan metagamping pada lereng penyusun lereng yang dicirikan oleh kristal kalsit dengan tekstur *suture*



Gambar 4. Kehadiran bidang perlapisan yang nampak searah dengan muka Lereng-3. Jurus perlapisan berarah timur – barat

Tipe Potensi Longsoran

Penentuan tipe potensi longsoran batuan pada lereng tambang kuari batugamping menggunakan analisis kinematika. Data masukan berupa tipe dan orientasi diskontinuitas berdasarkan survei garis pindai dan orientasi muka lereng. Analisis dilakukan dengan proyeksi stereografi mengacu pada kriteria longsoran planar, baji, dan guling (Kliche, 2019). Hasil analisis menunjukkan lereng kuari memiliki potensi longsoran baji dan longsoran planar, meskipun longsoran guling juga hadir setempat (Tabel 3), dikontrol oleh kehadiran bidang perlapisan, kekar, dan rekahan gerus pada metagamping.



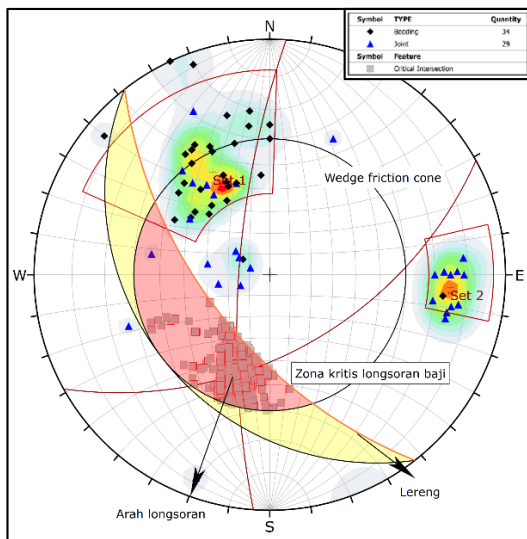
Gambar 5. Proyeksi stereografi yang menunjukkan potensi longsoran baji oleh perpotongan set perlapisan dan kekar pada Lereng-1

Pada Lereng-1 dijumpai dua set diskontinuitas yang tersusun oleh kekar dan bidang perlapisan. Orientasi kekar yang searah muka lereng menghadirkan potensi longsoran planar sebesar 3,13%, sedangkan perpotongan kekar dan perlapisan menghadirkan potensi longsoran baji berorientasi N260°E dengan probabilitas 19,80% (Gambar 5). Perlu diperhatikan bahwa nilai probabilitas yang dihasilkan hanya berdasarkan perbandingan antara diskontinuitas yang dapat memicu longsoran dan total diskontinuitas. Asumsi ini mengabaikan kondisi diskontinuitas atau gaya yang bekerja pada lereng seperti pada perhitungan dengan metode kesetimbangan batas.

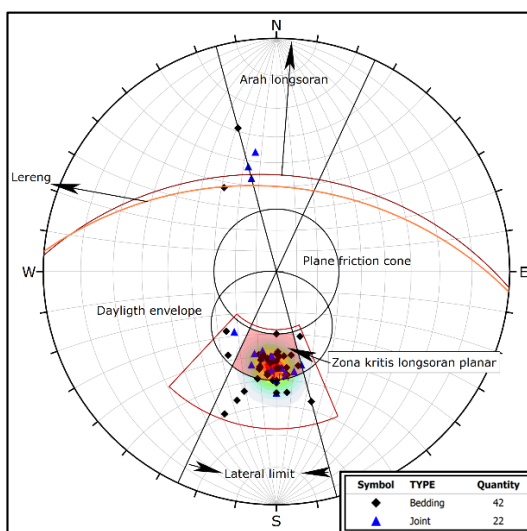
Lereng-2 menghasilkan tipe longsoran tidak jauh berbeda dengan Lereng-1. Orientasi lereng berarah N230°E dengan kemiringan 60°. Juga hadir kekar dan bidang perlapisan berarah umum yang sama. Selain potensi longsoran baji yang terbentuk oleh perpotongan bidang perlapisan dan kekar, juga hadir potensi longsoran *flexural toppling* dengan persentase rendah (1,59%) oleh kekar berorientasi acak. Longsoran baji mendominasi potensi tipe longsoran dengan persentase 20,81% (Gambar 6). Lereng-3 memiliki orientasi N5°E dengan kemiringan 50°. Diskontinuitas yang hadir adalah perlapisan dengan sedikit rekahan gerus yang orientasinya searah muka lereng. Geometri ini menghadirkan potensi longsoran planar oleh perlapisan hadir dengan persentase 69,49%. Orientasi longsoran planar searah dengan muka lereng (Gambar 7).

Tabel 3. Potensi tipe longsoran pada ketiga lereng berdasarkan analisis kinematika (kedudukan diskontinuitas dan lereng dinyatakan dalam kemiringan dan arah kemiringan)

Lokasi	Litologi	Orientasi lereng	Potensi longsoran	Orientasi longsoran	Probabilitas kelongsoran	Tipe diskontinuitas	Orientasi set diskontnuitas
Lereng 1	Metagamping	60°, N232°E/	Baji	N260°E	19,80%	Set 1 kekar Set 2 perlapisan	48°, N181°E 45°, N339°E
			Planar	N232°E	3,13%	Kekar acak	
Lereng 2	Metagamping	60°, N230°E/	Baji	N198°E	20,81%	Set 1 kekar Set 2 perlapisan	53°, N151°E 75°, N274°E
			<i>Flexural toppling</i>	N232°E	1,59%	Kekar acak	
Lereng 3	Metagamping	50°, N5°E/	Planar	N4°E	69,49%	Perlapisan dan sebagian rekahan gerus	45°, N4°E



Gambar 6. Analisis kinematika pada Lereng-2 yang menunjukkan potensi longsororan baji



Gambar 7. Dominasi orientasi bidang perlapisan searah muka Lereng-3 menunjukkan potensi longsororan planar dengan persentase 69,49%.

Uji Baik Suai Kuat Geser Diskontinuitas

Langkah awal sebelum uji baik suai adalah menggambarkan karakteristik histogram kuat geser diskontinuitas sebagai dasar pemilihan jenis distribusi data asumsi teoritik yang divalidasi pada uji baik suai. Data histogram menunjukkan kecenderungan dua jenis distribusi data, yaitu: distribusi normal dan distribusi lognormal. Pengujian distribusi data yang cocok dengan distribusi teoritis dilakukan

dengan menggunakan fungsi dfittool pada Matlab. Pengujian ini menghasilkan distribusi teoritis yang cocok dengan distribusi data dengan memperhatikan konvergensi nilai chi-square yang terkecil. Hasil uji baik suai kuat geser diskontinuitas dapat dilihat pada Tabel 4.

Hasil analisis menunjukkan tidak ada korelasi antara tipe diskontinuitas dan jenis distribusi data yang dihasilkan. Di sisi lain, setiap lereng juga memiliki distribusi data kuat geser diskontinuitas yang berbeda. Uji baik suai sangat penting dilakukan karena akan mempengaruhi pola sebaran bilangan acak simulasi Monte Carlo saat perhitungan nilai probabilitas kelongsoran (Abbaszadeh dkk., 2011). Beberapa uji baik suai pada kuat geser diskontinuitas pada litologi yang berbeda juga menghasilkan tipe distribusi yang berbeda (Azizi, 2014; Masri, 2016). Untuk itu asumsi data terdistribusi normal pada penentuan probabilitas kelongsoran tidak merepresentasikan variabilitas dan ketidakpastian data masukan yang sebenarnya.

Faktor Keamanan dan Probabilitas Kelongsoran

Faktor keamanan pada ketiga lereng ditentukan dengan metode kesetimbangan batas dengan asumsi bidang gelincir yang ditentukan. Pada Lereng-1 dan Lereng-2 faktor keamanan dihitung dengan asumsi longsororan baji, sedangkan Lereng-3 ditentukan dengan asumsi longsororan planar. Perhitungan faktor keamanan dengan asumsi longsororan baji dan planar didasari oleh Wyllie dan Mah (2017) dan Kliche (2019). Data masukan berupa geometri lereng, bobot isi, dan kuat geser diskontinuitas. Perhitungan dilakukan pada kondisi statis, dengan mengabaikan beban dinamik.

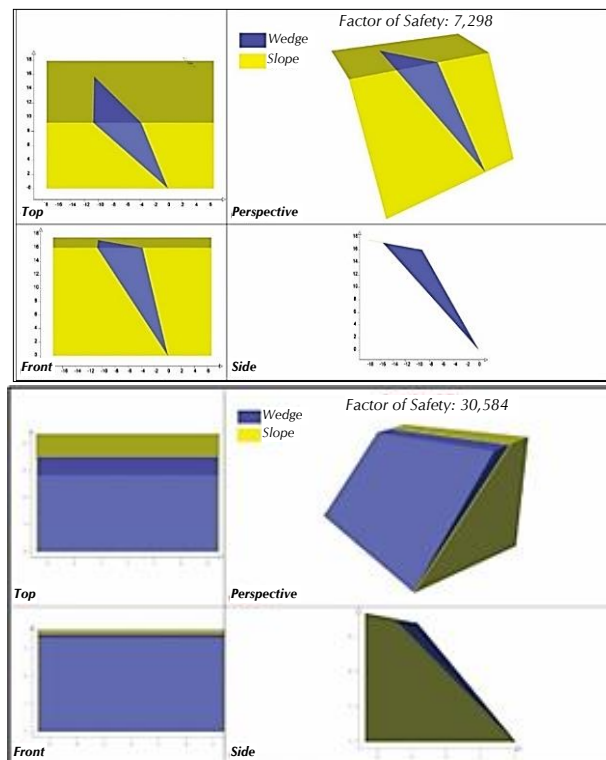
Hasil analisis menunjukkan ketiga lereng memiliki faktor keamanan di atas nilai ambang yang dipersyaratkan bagi lereng tunggal. Faktor keamanan deterministik berkisar antara 8,71 – 23,66. Potensi longsororan baji menghasilkan nilai faktor keamanan lebih rendah dibanding longsororan planar (Tabel 5). Tingginya nilai faktor keamanan ini menunjukkan optimasi lereng berupa perkuatan maupun perubahan geometri lereng optimal tidak perlu dilakukan, meskipun analisis kinematika menunjukkan potensi longsororan baji dan planar.

Tabel 4. Tipe distribusi data dan statistik univariat kuat geser diskontinuitas (kohesi dan sudut geser dalam)

Lereng	Distribusi probabilistik	Set Kekar		Set Perlapisan	
		C (kPa)	ϕ (°)	C (kPa)	ϕ (°)
Lereng 1	Distribusi	Lognormal		Lognormal	
	Rata-rata	246	39,15	398	41,72
	Standar deviasi	260	3,92	306	3,734
	Minimum	27	31,99	21	32,31
	Maksimum	822	45,61	1047	45,77
Lereng 2	KV	11,758	4,969	0,158	1
	Distribusi	Normal		Normal	
	Rata-rata	72	41,44	48	43,26
	Standar deviasi	165	6,92	95	5,13
	Minimum	30	33,71	8	37,32
Lereng 3	Maksimum	763	53,69	335	53,33
	KV	20	11,834	0,091	0,091
	Distribusi			Lognormal	
	Rata-rata			521	44,77
	Standar deviasi			424	4,76
	Minimum			19	32,99
	Maksimum			1678	49,75
	KV			1,687	49,75

Tabel 5. Rekapitulasi nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran ketiga lereng

Lereng	Nilai Ambang		Nilai Aktual			
	FK _{rerata}	PK	FK _{det}	FK _{rerata}	Standar deviasi	PK
1			9,484	8,714	1,516	0%
2	1,1	25-50%	7,298	11,41	6,806	6,14%
3			30,584	23,66	18,63	0%



Gambar 8. Geometri longsoran baji pada Lereng-2 dan longsoran planar pada Lereng-3

Kisaran nilai faktor keamanan yang diperoleh melalui analisis deterministik adalah kisaran nilai rata-rata. Untuk mengakomodir reliabilitas dan variabilitas data penyusun lereng, dilakukan perhitungan probabilitas kelongsoran. Variabilitas dilakukan melalui input data statistik pada kuat geser diskontinuitas dan melakukan simulasi 5000 skenario perhitungan faktor keamanan dengan simulasi Monte Carlo.

Hasil analisis menunjukkan faktor keamanan rata-rata lebih rendah dibandingkan faktor keamanan deterministik. Hal berbeda dijumpai pada Lereng-2, dengan faktor keamanan deterministik lebih tinggi. Hal ini dapat disebabkan oleh tipe distribusi data yang berbeda. Standar deviasi bernilai cukup besar menunjukkan perubahan nilai kuat geser turut mempengaruhi nilai faktor keamanan yang bervariasi, namun secara umum masih berada pada nilai probabilitas kelongsoran di bawah nilai ambang. Probabilitas kelongsoran terbesar (6,14%) dijumpai pada Lereng-2 dengan potensi longsoran baji. Berdasarkan nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran, disimpulkan bahwa lereng kuari batugamping stabil terhadap potensi longsoran planar dan baji.

Sensitivitas data masukan

Analisis sensitivitas data masukan dilakukan untuk melihat pengaruh data masukan terhadap penurunan dan kenaikan nilai faktor keamanan (Chang dkk., 2018). Parameter yang dianalisis berupa bobot isi batuan, kohesi dan sudut geser dalam pada tiap set diskontinuitas. Perubahan nilai faktor keamanan dikontrol oleh perubahan parameter tersebut ditunjukkan melalui gradien kurva linear terbesar (kemiringan garis). Pada analisis ini distribusi data dinyatakan dalam fungsi uniform (Azizi, 2014).

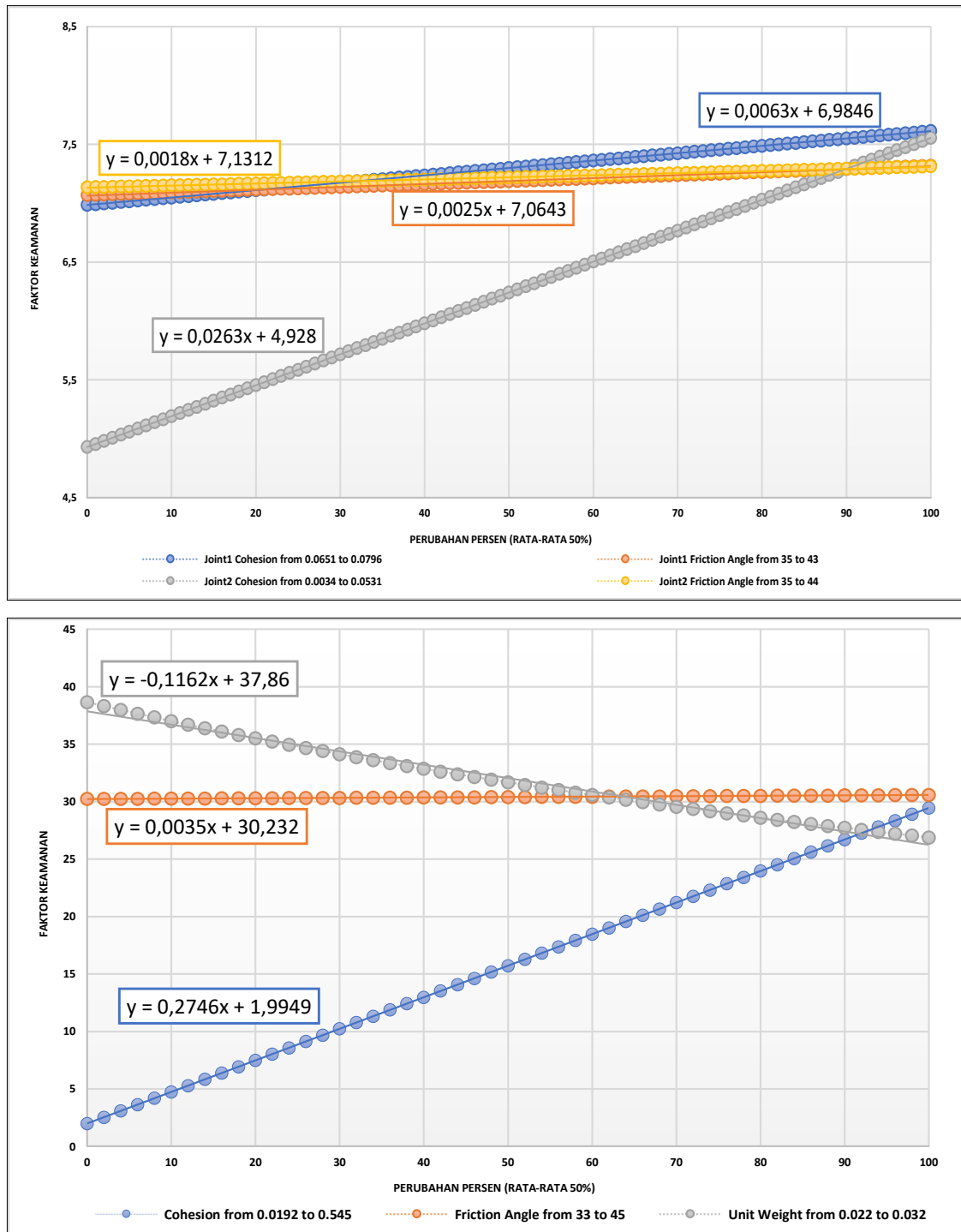
Analisis sensitivitas menunjukkan perubahan nilai faktor keamanan dipengaruhi oleh bobot isi dan kuat geser diskontinuitas, meskipun dibandingkan bobot isi, kuat geser menunjukkan nilai gradien garis yang lebih besar. Semakin besar gradien garis, semakin miring garis linear yang dibentuk, semakin sensitif perubahan faktor keamanan terhadap perubahan parameter masukan. Pada longsoran baji dan planar, kuat geser diskontinuitas menunjukkan fungsi regresi positif, sedangkan bobot isi menunjukkan fungsi

regresi negatif (Gambar 9). Hal ini menunjukkan peningkatan nilai kuat geser meningkatkan nilai faktor keamanan. Sebaliknya, peningkatan nilai bobot isi batuan mengurangi nilai faktor keamanan. Ketiga lereng dengan variasi potensi longsoran berbeda juga menunjukkan tren konsisten yang menunjukkan nilai faktor keamanan dipengaruhi oleh perubahan nilai kohesi dibandingkan nilai sudut geser dalam (nilai gradien garis kohesi diskontinuitas mencapai 0,2746).

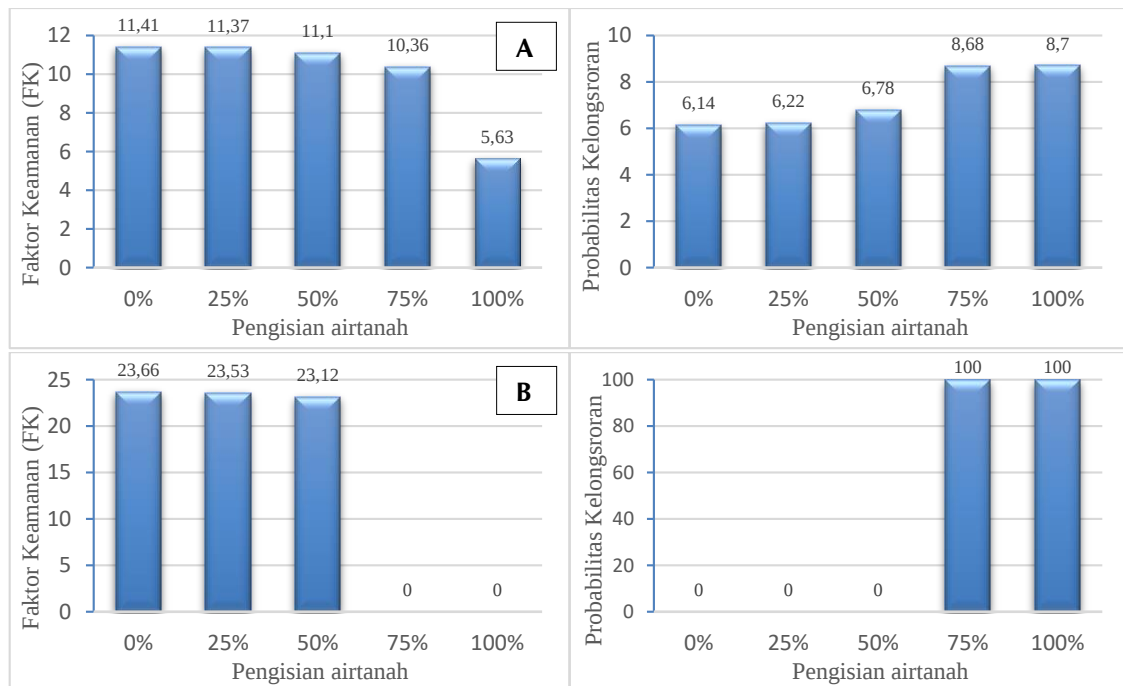
Pada longsoran baji, kohesi pada perlapisan dengan kemiringan besar sangat mempengaruhi perubahan nilai faktor keamanan, sedangkan pada longsoran planar di Lereng-3, kohesi perlapisan yang mempengaruhi nilai faktor keamanan (Gambar 9). Hasil ini menunjukkan kestabilan lereng tambang kuari dipengaruhi oleh perubahan nilai kohesi bidang perlapisan, baik pada potensi longsoran baji maupun longsoran planar.

Pengaruh Air Tanah terhadap Nilai Faktor Keamanan (FK) dan Probabilitas Kelongsoran (PK)

Airtanah memiliki pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas lereng. Airtanah menambah besar gaya penggerak akibat berat isi menjadi lebih besar karena pori batuan terisi air. Tekanan airtanah pada pori batuan juga dapat mereduksi tegangan efektif (Frans dan Nurfalaq, 2020). Variasi pengisian air tanah pada diskontinuitas diberikan pada kondisi kering (0%), 25%, 50%, 75%, hingga kondisi diskontinuitas jenuh (100%). Pada lereng dengan potensi longsoran baji, di kondisi pengisian kering hingga jenuh, nilai faktor keamanan turun hingga 58% pada Lereng-1 dan 51% pada Lereng-2. Pada Lereng-3 dengan potensi longsoran planar, skenario pengisian kering hingga 50% tidak signifikan mempengaruhi nilai faktor keamanan, namun pada pengisian di atas 75%, faktor keamanan berubah sangat drastis menjadi sangat rendah (Gambar 10). Pola yang sama juga dijumpai pada pengaruh pengisian air tanah terhadap nilai probabilitas kelongsoran. Pada Lereng-2 dengan potensi longsoran baji, variasi pengisian kering hingga jenuh meningkatkan nilai probabilitas kelongsoran hingga 8,7%, sedangkan pada Lereng-3 dengan longsoran baji, skenario pengisian lebih dari 75% menghasilkan kondisi lereng tidak stabil.



Gambar 9. Analisis sensitivitas pada Lereng-2 (Kiri) dan Lereng-3 (Kanan) menunjukkan nilai kohesi pada perlapisan paling mempengaruhi perubahan nilai faktor keamanan



Gambar 10. Perubahan nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran terhadap skenario pengisian air tanah pada longsoron baji (A) dan longsoron planar (B)

Secara umum, lereng kuari batugamping pada daerah penelitian menunjukkan potensi longsoron baji dan planar oleh kontrol perlapisan dan kekar. Meskipun dengan potensi tersebut, nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran menunjukkan lereng stabil, sehingga tidak diperlukan perkuatan dan optimasi geometri lereng. Skenario pengisian menunjukkan Lereng-3 dengan potensi longsoron planar menunjukkan perubahan nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran yang sangat drastis pada skenario pengisian 75%. Untuk itu sistem drainase diperlukan selama pemberaian batugamping agar infiltrasi air tanah menjadi lebih rendah.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penambangan kuari batugamping pada daerah penelitian dimaksudkan untuk memenuhi permintaan batugamping sebagai bahan bangunan, pengeras jalan, dan bahan baku pengolahan nikel laterit. Potensi dan penentuan probabilitas kelongsoran dilakukan pada tiga lereng tambang. Analisis kinematika menunjukkan potensi longsoron pada lereng tambang kuari adalah longsoron baji dan longsoron planar yang dikontrol oleh

perlapisan dan kekar. Perhitungan faktor keamanan probabilitas kelongsoran menunjukkan ketiga lereng stabil dan tidak memerlukan perkuatan lebih lanjut. Analisis sensitivitas data menunjukkan perubahan kuat geser diskontinuitas lebih mempengaruhi faktor keamanan dibandingkan bobot isi. Lebih lanjut, pada kuat geser diskontinuitas, kohesi perlapisan paling mempengaruhi nilai faktor keamanan dengan tren regresi positif. Skenario pengisian airtanah menunjukkan reduksi faktor keamanan pada Lereng-1 dan Lereng-2 hingga 50%, dan meningkatkan nilai probabilitas kelongsoran yang signifikan pada Lereng-3.

Penelitian ini berfokus pada analisis kinematika dan penentuan probabilitas kelongsoran pada tipe longsoron batuan. Perlu pendekatan klasifikasi massa batuan seperti *Slope Mass Rating* dan *Q-Slope* untuk penilaian yang lebih komprehensif. Efek getaran oleh peledakan juga dapat dipertimbangkan dalam perhitungan faktor keamanan sebagai parameter beban dinamik. Peneliti juga menyarankan agar dilakukan evaluasi jatuhnya batuan (*rockfall*) dengan pendekatan yang berbeda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Halu Oleo atas bantuan dana penelitian dalam skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) internal Periode Tahun 2023.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbaszadeh, M., Shahriar, K., Sharifzadeh, M. dan Heydari, M. (2011) "Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability: A case study from Sungun Copper Mine," *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(4), hal. 581–596. doi: 10.1007/s10706-011-9405-1.
- Arif, I. (2016) *Geoteknik tambang: Mewujudkan produksi tambang yang berkelanjutan dengan menjaga kestabilan lereng*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Azizi, M. A. (2014) *Pengembangan metode penentuan reliabilitas kestabilan lereng tambang terbuka batubara di indonesia*. Institut Teknologi Bandung.
- Azizi, M. A., Karim, R., Marwanza, I. dan Ghifari, M. K. (2019) "Prediction of material volume of slope failure in nickel surface mine using limit equilibrium method 3D," *Indonesian Mining Professionals Journal*, 1(1), hal. 43–48. doi: 10.36986/impj.v1i1.13.
- Azzaman, M. A. dan Titisari, A. D. (2023) "Genesa marmer Daerah Mata Wawatu dan Sanggula, Kecamatan Moramo Utara, Konawe Selatan berdasarkan karakteristik tekstur, struktur, dan asosiasi batuan," *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 6(1), hal. 17–26.
- Barton, N. (1973) "Review of a new shear-strength criterion for rock joints," *Engineering Geology*, 7(4), hal. 287–332. doi: 10.1016/0013-7952(73)90013-6.
- Chang, Z., Cai, Q., Ma, L. dan Han, L. (2018) "Sensitivity analysis of factors affecting time-dependent slope stability under freeze-thaw cycles," *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, hal. 1–10. doi: 10.1155/2018/7431465.
- Darnawati, Masri, M., Bahdad, B. dan Hasria, H. (2022) "Inventarisasi keragaman geologi pada Daerah Wisata Air Terjun Moramo dan Sekitarnya, Kabupaten Konawe Selatan, Sulawesi Tenggara," *OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan*, 4(2), hal. 112–122. doi: 10.56099/ophiolite.v4i2.28854.
- Frans, J. S. dan Nurfalaq, M. H. (2020) "Studi geoteknik pengaruh muka air tanah terhadap kestabilan lereng tambang batubara," *Prosiding Temu Profesi Tahunan PERHAPI*, 1(1), hal. 475–488. doi: 10.36986/ptptp.v1i1.90.
- Hoek, E. (2007) *Practical rock engineering*. 3 ed. Vancouver: Rocscienc.
- Husni, A., Toha, M. T. dan Komar, S. (2020) "Pengaruh fragmentasi dan getaran tanah akibat peledakan terhadap produktivitas alat gali muat dan kestabilan lereng," *Jurnal Pertambangan*, 4(3), hal. 163–167.
- Idris, S. R., Muslim, D., Sulaksana, N. dan Burhannudinnur, M. (2019) "Karakteristik kestabilan lereng daerah Jatigede Kabupaten Sumedang, Provinsi Jawa Barat berdasarkan analisis kinematik," *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 15(2), hal. 89–96. doi: 10.30556/jtmb.Vol15.No2.2019.1009.
- ISMR (1979) "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(2), hal. 22. doi: 10.1016/0148-9062(79)91476-1.
- Khodijah, S., Monica, U. S., Ersyari, J., Khoirullah, N. dan Sophian, R. I. (2023) "Potensi longsor berdasarkan analisis kinematik pada area low wall PT. Bukit Asam Tbk, site Tanjung Enim, Sumatera Selatan," *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 19(2), hal. 111–124. doi: 10.30556/jtmb.Vol19.No2.2023.1363.
- Kliche, C. (2019) *Rock slope stability*. 2 ed. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Li, G., Luo, J., Peng, Z., Zhang, Y., Rao, M. dan Jiang, T. (2015) "Effect of quaternary basicity on melting behavior and ferronickel particles growth of saprolitic laterite ores in Krupp–Renn Process," *ISIJ International*, 55(9), hal. 1828–1833. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-058.
- Masri (2016) *Analisis kestabilan lereng terhadap potensi longsoran guling pada ruas jalan Tawaeli - Toboli KM 42 - KM 53, Sulawesi Tengah*. Institut Teknologi Bandung.
- Masri dan Sadisun, I. A. (2019) "Analisis kestabilan lereng terhadap potensi longsoran guling

- menggunakan continuous slope mass rating (C-SMR) pada ruas jalan Tawaeli-Toboli KM 42–52, Sulawesi Tengah,” *OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan*, 1(1), hal. 1–9.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (2018) *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang pedoman pelaksanaan Kaidah teknik pertambangan yang baik*. Indonesia.
- Putra, M. H. Z., Kartiko, R. D., Soemantidiredja, P., Sadisun, I. A. dan Tohari, A. (2020) “Pengaruh zona jenuh air terhadap kestabilan lereng di Weninggalih, Kabupaten Bandung Barat,” *RISSET Geologi dan Pertambangan*, 30(1), hal. 119–130. doi: 10.14203/risetgeotam2020.v30.1086.
- Read, J. dan Stacey, P. (2010) *Guidelines for Open Pit Slope Design*. Oxford: CSIRO Publishing.
- Sirait, B., Salinita, S., Zulfahmi dan Pujianto, E. (2021) “Assessing slope failure in coal mining using kinematic analysis,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 882(1), hal. 012060. doi: 10.1088/1755-1315/882/1/012060.
- Sirait, B., Pulungan, Z. dan Pujianto, E. (2021) “Identifikasi potensi longsoran lereng pada kuari batugamping menggunakan analisis kinematika,” *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 17(2), hal. 61–75. doi: 10.30556/jtmb.Vol17.No2.2021.1113.
- Surono (2013) *Geologi Lengan Tenggara Sulawesi*. Diedit oleh N. Suwarna, H. Panggabean, dan A. Kurnia. Badan Geologi - Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Tao, Z., Li, M., Zhu, C., He, M., Zheng, X. dan Yu, S. (2018) “Analysis of the critical safety thickness for pretreatment of mined-out areas underlying the final slopes of open-pit mines and the effects of treatment,” *Shock and Vibration*. Diedit oleh L. Dong, 2018(1). doi: 10.1155/2018/1306535.
- Titisari, A. D. dan Azzaman, M. A. (2019) “Karakteristik marmer Daerah Mata Wawatu dan Sanggula, Kecamatan Moramo Utara, Kabupaten Konawe Selatan, Provinsi Sulawesi Tenggara,” *RISSET Geologi dan Pertambangan*, 29(1), hal. 75–90. doi: 10.14203/risetgeotam2019.v29.776.
- Umrao, R. K., Singh, R., Ahmad, M. dan Singh, T. N. (2011) “Stability analysis of cut slopes using continuous slope mass rating and kinematic analysis in Rudraprayag District, Uttarakhand,” *Geomaterials*, 01(03), hal. 79–87. doi: 10.4236/gm.2011.13012.
- Wang, H., Zhang, B., Bai, X. dan Shi, L. (2018) “A novel environmental restoration method for an abandoned limestone quarry with a deep open pit and steep palisades: a case study,” *Royal Society Open Science*, 5(5), hal. 180365. doi: 10.1098/rsos.180365.
- Wyllie, D. C. dan Mah, C. W. (2017) *Rock Slope Engineering*. London: CRC Press. doi: 10.1201/9781315274980.
- Yanuardian, A. R., Hermawan, K., Martireni, A. P. dan Tohari, A. (2020) “The influence of discontinuities on rock mass quality and overall stability of andesite rock slope in West Java,” *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 35(3), hal. 67–76. doi: 10.17794/rgn.2020.3.7.

