doi:10.56099/ophi.v8i1.p86-98 http://ophiolite.uho.ac.id/

Vol. 08, No. 01, Tahun 2026: 86–98

OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan

|e-ISSN 2715-4440|

Program Studi Teknik Geologi, Universitas Halu Oleo

|Research Article

Integrasi Analisis Kinematika dan Q-slope untuk Optimasi Geometri Lereng pada Kuari Batugamping Daerah Moramo Utara, Sulawesi Tenggara

Masri[1]✉, Hairun Anwar[1], La Ode Andimbara[2], Waode Rizky Awaliah Nafiu[3], La Ode Sahiddin[2], Abd Ali Kayum Pino[4], La Ode Ngkoimani[1]

[1] Program Studi Teknik Geologi, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia
[2] Program Studi Teknik Geofisika, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia
[3] Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia
[4] Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Sulawesi Tenggara, Kendari, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:
Received: April 11, 2026
Accepted: June 5, 2026
Published: June 23, 2026

Keywords:
longsoran baji
kinematika longsoran
probabilitas kelongsoran
Q-Slope
kuari batugamping

Corresponding author:
Masri
Email: masri@uho.ac.id

Read online:
Scan this QR code with your smart phone or mobile device to read online.

Copyright © 2026 Authors

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

ABSTRAK

Optimalisasi geometri lereng pada kuari batugamping krusial untuk menjamin keselamatan kerja dan keberlanjutan produksi di tengah karakteristik massa batuan yang kompleks. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan desain geometri lereng kuari optimal di Desa Wawatu, Kecamatan Moramo Utara, Sulawesi Tenggara, melalui integrasi analisis kinematika dan metode Q-slope. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan hubungan empiris yang menjembatani sistem RMR, SMR, dan Q-slope khusus pada kuari batugamping daerah penelitian. Metode penelitian meliputi survei garis pindai (scanline), analisis kinematika menggunakan proyeksi stereografis, serta evaluasi kelas massa batuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kestabilan lereng sangat dikontrol oleh kekar dan perlapisan, dengan potensi longsoran baji mendominasi Lereng 1, 3, dan 5 (probabilitas hingga 69,73%) serta longsoran guling pada Lereng 2 (41,46%). Meskipun kualitas massa batuan dasar tergolong "Baik" (RMR 63–70), parameter SMR (53–66) dan Q-slope (0,17–7,13) memberikan penilaian yang lebih konservatif terhadap pengaruh orientasi diskontinuitas yang tidak menguntungkan. Berdasarkan grafik kestabilan Q-slope dengan ambang batas probabilitas kelongsoran 1%, direkomendasikan penyesuaian sudut kemiringan lereng yang lebih landai pada area kritis untuk memitigasi risiko instabilitas. Temuan ini membuktikan bahwa pendekatan Q-slope yang bersifat site-specific mampu meningkatkan standar keselamatan kerja sekaligus mengoptimalkan efisiensi produksi pada operasional penambangan terbuka.

ABSTRACT

The optimization of slope geometry in limestone quarries is crucial for ensuring occupational safety and production sustainability during complex rock mass characteristics. This study aims to determine optimal quarry slope design in Wawatu Village, Southeast Sulawesi, by integrating kinematic analysis and the Q-slope method. The novelty of this research lies in the development of site-specific empirical relationships bridging RMR, SMR, and Q-slope systems for limestone quarries in the research area. Research methods include scanline surveys, stereographic projection kinematic analysis, and rock mass classification. Results indicate that slope stability is predominantly controlled by joints and bedding, with wedge failure dominating Slopes 1, 3, and 5 (up to 69.73% probability) and toppling failure on Slope 2 (41.46%). Although the basic rock mass quality is categorized as "Good" (RMR 63–70), the SMR (53–66) and Q-slope (0.17–7.13) parameters provide more conservative assessments regarding unfavorable discontinuity orientations. Based on the Q-slope stability chart with a 1% failure probability threshold, flatter slope angles are recommended in critical areas to mitigate instability risks. These findings demonstrate that a site-specific Q-slope approach enhances safety standards while simultaneously optimizing production efficiency in open-pit mining operations.

How to cite: Masri, M., Anwar, H., Nafiu, W.R.A., Sahiddin, L.O. dan Ngkoimani, L.O. (2026). Integrasi Analisis Kinematika dan Q-slope untuk Optimasi Geometri Lereng pada Kuari Batugamping Daerah Moramo Utara, Sulawesi Tenggara. OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan, 8(1), pp. 86-98. https://doi.org/10.56099/ophi.v8i1.p86-98

1 Pendahuluan

Optimalisasi desain geometri lereng merupakan aspek fundamental dalam operasional tambang terbuka guna menjamin keamanan kerja, stabilitas infrastruktur, dan keberlanjutan produksi (Borges dkk., 2023). Pada penambangan kuari batugamping, pengaturan geometri lereng yang presisi menjadi sangat krusial mengingat karakteristik massa batuan yang seringkali kompleks, heterogen, dengan rekahan intens (Yusuf dkk., 2023). Desain geometri yang optimal tidak hanya bertujuan untuk memaksimalkan efisiensi ekonomi dalam pengambilan cadangan batuan (Li dkk., 2022), tetapi juga berfungsi sebagai batas kendali utama terhadap risiko geoteknik yang dapat menghentikan seluruh aktivitas operasional penambangan jika terjadi kegagalan sistemik (Pilecki dkk., 2018).

Ketidakefektifan dalam penentuan dimensi sudut dan tinggi lereng berpotensi besar memicu kegagalan lereng batuan yang fatal (Mikroutsikos dkk., 2021). Secara umum, potensi kegagalan lereng ini dapat diidentifikasi dan diprediksi secara dini melalui analisis kinematika menggunakan proyeksi stereografis (Masri dkk., 2024, Masri dan Sadisun, 2019, Gurocak dkk., 2008). Metode kinematika memungkinkan para praktisi geoteknik untuk mengidentifikasi potensi tipe longsoran, seperti longsoran baji (*wedge*), bidang (planar), atau guling (*toppling*), berdasarkan interaksi spasial antara orientasi bidang diskontinuitas dengan geometri muka lereng (Sirait dkk., 2021, Weerasinghe dkk., 2020). Identifikasi awal ini menjadi dasar yang kuat dalam merumuskan langkah mitigasi teknis sebelum geometri lereng aktual dibentuk.

Penentuan desain lereng yang aman secara empiris telah lama mengandalkan sistem klasifikasi massa batuan konvensional seperti *Rock Mass Rating* (RMR) dan *Slope Mass Rating* (SMR) (Qadri dkk., 2021, Romana dkk., 2015). Namun, metode Q-slope saat ini perlu dipertimbangkan sebagai alternatif utama karena dirancang khusus untuk rekayasa lereng batuan tanpa penguatan (*unreinforced*), berbeda dengan RMR dan SMR yang awalnya dikembangkan untuk pekerjaan penggalian dengan rekomendasi berupa perkuatan (Bar dan Barton, 2024, Bar dan Barton, 2017). Q-slope mengintegrasikan parameter lingkungan yang komprehensif, termasuk kondisi curah hujan erosif dan faktor iklim, yang memberikan akurasi penilaian hingga 80% pada berbagai kondisi geografis (Komurlu, 2022). Selain itu, penentuan hubungan empiris antara Q-slope dengan metode klasifikasi lainnya sangat penting dilakukan untuk memfasilitasi konversi data antar sistem, meningkatkan reliabilitas prediksi mekanika batuan, serta menyediakan instrumen evaluasi yang lebih standar dan hemat biaya bagi praktisi di lapangan (Azarafza dkk., 2021, Azarafza dkk., 2020).

Daerah penelitian adalah area penambangan kuari batugamping di Desa Wawatu, Kecamatan Moramo Utara, Kabupaten Konawe Selatan. Lokasi ini merupakan salah satu pemasok utama material batugamping untuk kebutuhan konstruksi dan pendukung industri pengolahan nikel laterit yang masif di Sulawesi Tenggara yang sebagian besar di antaranya dikelola secara swadaya oleh masyarakat sekitar sehingga dapat disebut sebagai tambang rakyat. Batugamping diperuntukkan sebagai bahan bangunan dan pengeras jalan, namun produksi juga dilakukan untuk memenuhi permintaan pada industri pengolahan nikel laterit. Meskipun memiliki peran ekonomi yang strategis, aktivitas penambangan di wilayah ini seringkali dilakukan dengan pengawasan teknis geoteknik yang terbatas. Kondisi geologi yang tersusun atas batugamping (metagamping) berumur Trias dengan rekahan intens akibat proses deformasi regional (Simandjuntak dkk., 1993) memerlukan kajian teknis yang mendalam guna mencegah kegagalan lereng batuan oleh kontrol diskontinuitas yang dapat mengancam keselamatan para penambang dan masyarakat sekitar.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi desain geometri lereng optimal pada kuari batugamping di Desa Wawatu melalui integrasi analisis kinematika dan klasifikasi massa batuan, serta menentukan hubungan empiris antara nilai Q-slope terhadap RMR dan SMR. Tahapan pemecahan masalah dalam penelitian ini dimulai dengan akuisisi data lapangan melalui survei garis pindai (*scanline*), dilanjutkan dengan analisis kinematika menggunakan bantuan perangkat lunak Dips v7.0 untuk identifikasi potensi longsoran oleh orientasi diskontinuitas. Selanjutnya, dilakukan evaluasi kualitas massa batuan menggunakan multi-sistem klasifikasi (RMR, SMR, dan Q-slope) dan diakhiri dengan analisis regresi statistik untuk merumuskan model korelasi empiris yang spesifik bagi karakteristik massa batuan kuari batugamping di daerah penelitian.

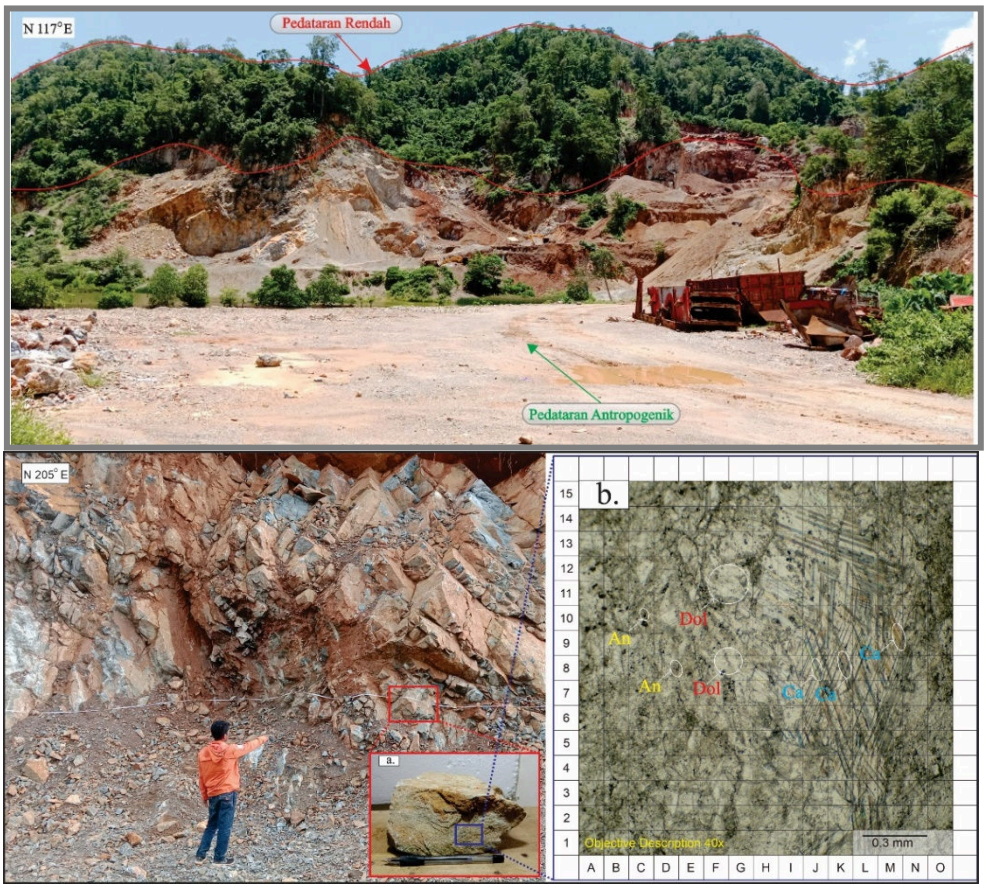
2 Geologi Daerah Penelitian

Secara deskriptif derah penelitian terdiri atas dua satuan geomorfologi yaitu satuan bentang alam perbukitan karst dan satuan bentang alam pedataran rendah antropogenik. Satuan perbukitan karst merupakan kondisi geomorfologi yang terdapat pada blok IUP lokasi penelitian (Gambar 1), dengan batugamping penyusun utamannya memiliki luas 9,31 Ha atau 45% ketinggiannya mencapai 50-200 mdpl dengan kemiringan mencapai 55°, dengan

Copyright © 2026 Masri et. al.
This work is licensed under the CC-BY-SA license

stadia daerahnya mudah sampai dengan dewasa yang terbentuk dari proses deformasi berupa perubahan ketinggian permukaan (epirogenesa).

Batuan yang tersingkap di area penambangan kuari batugamping tersusun atas sepenuhnya batuan karbonat. Penamaan dan pengelompokan satuan batuan yang diamati secara megaskopis berwarna lapuk kecoklatan, warna segar abu-abu tekstur nonklastik, sortasi sedang, kemas tertutup, tersusun mineral dolomit (51%), kalsit (41%) dan sedikit anhidrit (8%), ukuran kristal kalsit (<1mm), struktur batuan masif berlapis namun batugamping terlihat pejal (Gambar 1). Akan tetapi, perubahan kristalisasi kalsit dan kontak *suture* menujukkan beberapa indikasi metamorfisme pada litologi. Berdasarkan hasil interpretasi bahwa batugamping telah mengalami awal metamorfisme menjadi batuan metagamping dengan data pendukung berupa tingkat kekerasan batuan yang tinggi, densitas batuan tinggi, dan kristalisasi kalsit membentuk ukuran lebih besar. Bahkan setempatan telah dijumpai perubahan batugamping kristalin membentuk marmer dengan tekstur mortar (Azzaman dan Titisari, 2023).



Gambar 1 (atas) Satuan bentang alam perbukitan rendah karst dan satuan pedataran antropogenik daerha studi. (bawah) Satuan batugamping penyusun lereng kuari, a) Sampel hand specimen batuan dan b) Foto mikrograf sayatan tipis batuan yang diamati dengan mikroskop polarisasi perbesaran 40x

3 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan kombinasi metode kualitatif dan metode kuantitatif untuk mengevaluasi kestabilan lereng kuari batugamping. Metode kualitatif berupa penentuan kelas massa batuan berdasarkan klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR), *Slope Mass Rating* (SMR), dan Q-slope. Metode kuantitatif meliputi penentuan tipe dan probabilitas kelongsoran berdasarkan analisis kinematika. Penelitian ini juga merumuskan hubungan empiris klasifikasi Q-slope terhadap klasifikasi massa batuan lain seperti RMR dan SMR. Lokasi penelitian difokuskan pada lima lereng produksi di Desa Wawatu, Sulawesi Tenggara, yang dipilih berdasarkan kriteria keterwakilan operasional tambang dan variasi intensitas rekahan yang signifikan pada massa batuan (Gambar 2).

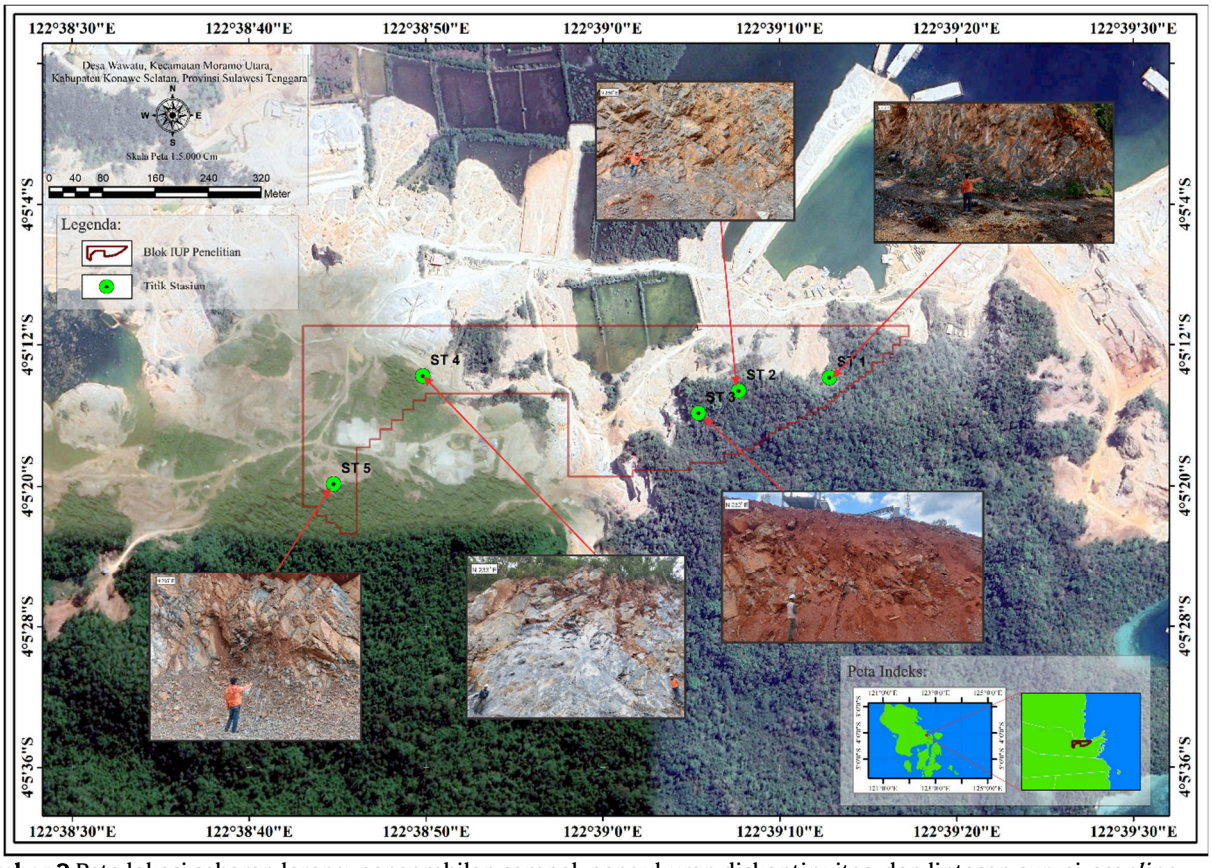
Pengumpulan data primer dilakukan melalui survei garis pindai (*scanline*). Prosedur survey mengacu pada standar ISRM (1979) dengan format tabulasi data mengacu pada Wyllie dan Mah (2017). Prosedur ini melibatkan pengukuran geometri lereng aktual yang mencakup tinggi, lebar, dan sudut kemiringan lereng menggunakan kompas geologi dan meteran. Inventarisasi diskontinuitas dilakukan secara mendetail dengan mencatat parameter orientasi (jurus dan kemiringan), spasi, persistensi,

kekasaran permukaan (JRC), lebar bukaan, dan material isian rekahan. Penentuan kuat tekan uniaksial (UCS) batuan utuh menggunakan konversi nilai pantulan *Schmidt Hammer* tupe-N mengacu pada Aydin (2009). Penentuan nilai *Rock Quality Desigantion* (RQD) dilakukan secara tidak langsung melalui nilai spasi diskontinuitas mengacu pada Priest (1993).

Data orientasi diskontinuitas yang diperoleh dari survey *scanline* selanjutnya diproses menggunakan analisis proyeksi stereografis dengan bantuan perangkat lunak Dips v7.0. Analisis kinematika ini bertujuan untuk mengidentifikasi tipe longsoran dominan pada batuan, seperti longsoran bidang, baji, maupun guling. Dalam pemodelan ini, sudut geser dalam (ϕ) ditentukan berdasarkan korelasi deskripsi kekasaran permukaan diskontinuitas (Barton dan Bandis, 2017) dan literatur teknis mengenai batugamping serupa (Masri dkk., 2024). Luaran dari tahapan ini adalah nilai probabilitas kelongsoran yang memberikan gambaran awal mengenai tingkat kerentanan setiap lereng terhadap potensi longsoran.

Evaluasi kualitas massa batuan dilakukan melalui tiga sistem klasifikasi yang berbeda untuk memperoleh perbandingan data yang komprehensif. Sistem pertama adalah *Rock Mass Rating* (RMR_{89}) yang mengevaluasi lima parameter dasar massa batuan untuk menentukan kelas kualitas batuan secara umum (Bieniawski, 1989). Sistem kedua adalah *Slope Mass Rating* (SMR) yang memodifikasi nilai RMR dasar dengan menyertakan faktor penyesuaian terkait hubungan orientasi antara bidang lemah dan muka lereng, serta pengaruh metode penggalian mekanik (Romana, 1993). Sistem ketiga adalah metode Q-slope yang mengevaluasi enam parameter spesifik, termasuk kondisi lingkungan dan tegangan batuan, yang kemudian dikoreksi dengan faktor orientasi (O-factor) untuk menghasilkan rekomendasi sudut lereng stabil (β) tanpa penguatan (Bar dan Barton, 2018, Bar dan Barton, 2017).

Analisis statistik juga digunakan untuk merumuskan hubungan empiris antara ketiga sistem klasifikasi yang digunakan. Mengingat parameter Q-slope memiliki rentang nilai yang luas dan bersifat logaritmik, dilakukan transformasi data menggunakan logaritma natural (ln) sebelum dikorelasikan dengan nilai RMR dan SMR yang bersifat linear. Analisis regresi linear sederhana diterapkan untuk menghasilkan persamaan matematis lokal yang menjembatani nilai Q-slope terhadap RMR dan SMR. Keandalan model hubungan tersebut dievaluasi melalui koefisien determinasi (R^2), sehingga persamaan yang dihasilkan dapat digunakan sebagai instrumen konversi parameter geoteknik yang praktis bagi pengembangan tambang kuari batugamping di daerah penelitian.



Gambar 2 Peta lokasi sebaran lereng, pengambilan sampel, pengukuran diskontinuitas, dan lintasan survei *scanline*

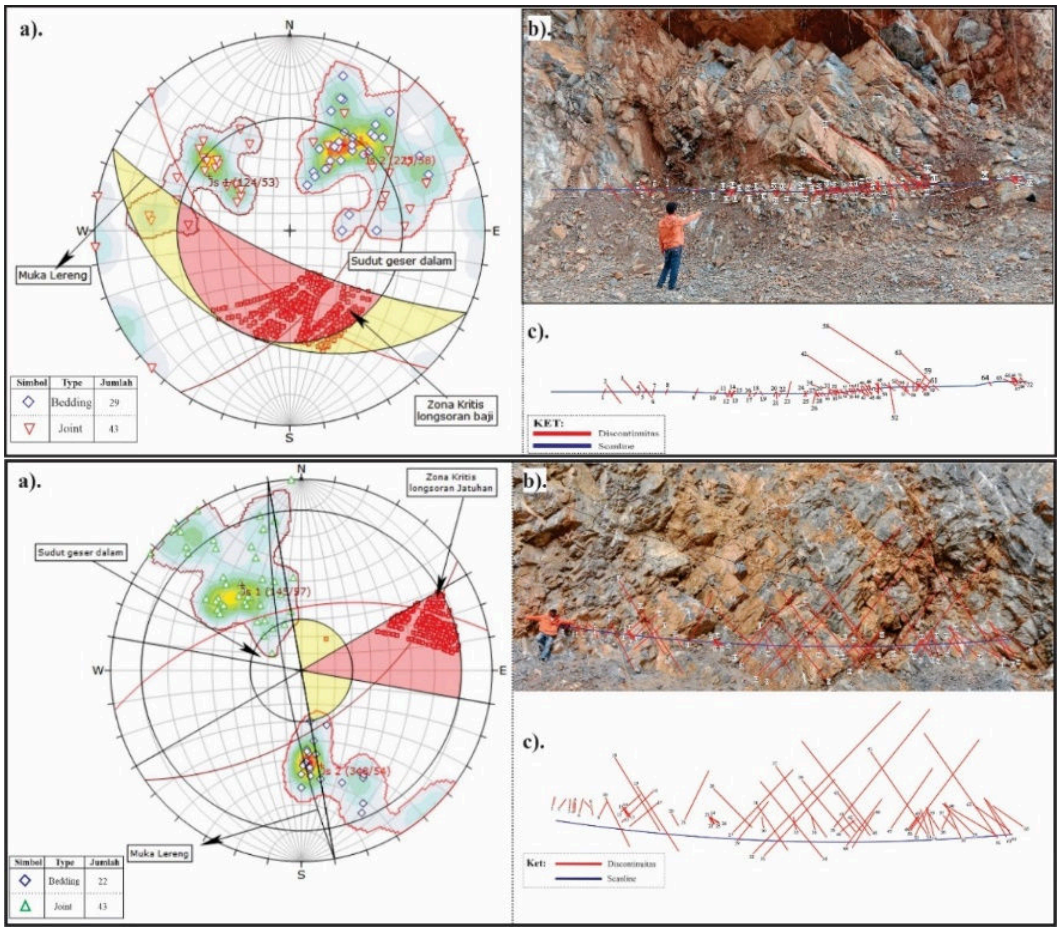
Copyright © 2026 Masri et. al.
This work is licensed under the CC-BY-SA license

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Analisis Kinematika Longsoran

Analisis kinematika dilakukan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan lereng yang dikontrol oleh struktur geologi (bidang diskontinuitas) pada massa batugamping. Dengan menggunakan parameter sudut geser dalam (ϕ) sebesar 30° yang ditentukan berdasarkan korelasi kondisi permukaan diskontinuitas (Barton dan Bandis, 2017). Seluruh data orientasi diskontinuitas diproses menggunakan proyeksi stereografis. Hasil rekapitulasi pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kestabilan lereng di lokasi penelitian sangat dipengaruhi oleh interaksi antara set kekar dan bidang perlapisan. Secara umum, probabilitas kelongsoran baji (*wedge failure*) mendominasi area penelitian dibandingkan tipe longsoran bidang (planar) maupun guling (*toppling*), yang mengindikasikan bahwa geometri lereng saat ini memiliki risiko instabilitas yang signifikan jika tidak dilakukan penyesuaian geometri sudut kemiringan lereng tambang (Masri dkk., 2024).

Perbandingan potensi longsoran baji dan longsoran guling pada kelima lereng menunjukkan variasi yang signifikan pada probabilitas kelongsoran serta karakteristik diskontinuitasnya. Pada Lereng 1, probabilitas longsoran baji mencapai 46,30%, yang disebabkan oleh persilangan bidang diskontinuitas berupa kekar dan perlapisan dengan spasi lebar dan persistensi 1-3 meter. Lereng 3 memiliki probabilitas longsoran baji yang lebih tinggi, yaitu 54,68%, dengan orientasi diskontinuitas yang lebih curam dan spasi yang relatif rendah. Lereng 4 menunjukkan probabilitas longsoran baji yang serupa dengan Lereng 1, yaitu 46,30%, namun dengan orientasi diskontinuitas yang berbeda dan bukaan yang lebih rapat. Potensi longsoran baji tertinggi terdapat pada Lereng 5, dengan probabilitas mencapai 69,73%, yang ditunjukkan oleh orientasi bidang diskontinuitas yang saling berpotongan, spasi lebar hingga 12 cm, serta persistensi hingga 10 meter, yang mengindikasikan risiko longsoran baji yang lebih tinggi. Visualisasi stereonet pada Gambar 3 mengilustrasikan bahwa risiko ini muncul akibat perpotongan antara dua set kekar dominan yang membentuk garis perpotongan di dalam zona kritis, yakni di antara lingkaran geser (*friction circle*) dan garis muka lereng (*daylight envelope*). Sebaliknya, Lereng 2 menunjukkan proba-



Gambar 3 (atas) Kinematika longsoran baji pada Lereng-5. (bawah) Kinematika longsoran guling pada Lereng-2. (a) Proyeksi stereografi yang menunjukan arah kelongsoran. (b) Kenampakan lereng dengan bidang diskontinuitas, dan (c) Sketsa bidang diskontinuitas pada survei *scanline*

Tabel 1 Rekapitulasi analisis kinematika pada kelima lereng

Lereng	Orientasi Longsoran	Potensi Longsoran	Probabilitas Kelongsoran (%)	Tipe diskontinuitas
Lereng 1	N214°W	Baji	46,30	SET 1 *Joint* SET 2 *Bedding, gash fracture*
	N276°E	Guling	17.65	SET 2 *Bedding, gash fracture*
Lereng 2	N66°W	Guling	26,16%	SET 1 *Joint* SET 2 *Bedding*
	-	-	-	SET 1 *Bedding*
Lereng 3	N280°E	Baji	54,68%	SET 1 *joint* SET 2 *Bedding, gash fracture*
	N232°E	Bidang	1,59%	SET 1 Joint
Lereng 4	N280°E	Baji	10,38%	SET 1 *joint* SET 2 *Bedding, gash fracture*
	N232°E	Bidang	4,69%	SET 1 *Joint*
Lereng 5	N170°E	Baji	69,73%	SET 1 *joint* SET 2 *Bedding, gash fracture*
	N225°W	Guling	59,57%	SET 2 *Bedding, gash fracture*

bilitas longsoran guling (*direct toppling*) sebesar 41,46%, berdasarkan identifikasi 39 data kekar dan 22 data bidang perlapisan dengan orientasi N145°E/57°SW dan N148°W/53°SE. Lereng ini memiliki struktur kolumnar dengan bidang lemah, spasi diskontinuitas yang besar (0,1–18 cm), dan persistensi antara 1 hingga 15 meter. Lereng 2 memiliki potensi longsoran guling yang signifikan (Gambar 3), meskipun dengan probabilitas lebih rendah dibandingkan longsoran baji pada Lereng 5, namun tetap mencolok karena orientasi dan struktur diskontinuitasnya yang khas.

4.2 Kualitas Massa Batuan Kuari Batugamping

Parameter kuat tekan batuan utuh (UCS) diestimasi melalui nilai pantul menggunakan *Schmidt Hammer* tipe-N yang dilakukan langsung pada permukaan massa batuan singkapan menggunakan persamaan konversi oleh Aydin (2009), di mana nilai pantulan yang diperoleh mencerminkan karakter batugamping yang memiliki kekuatan sedang hingga tinggi (47-51 MPa). Nilai RQD pada kelima lereng menunjukkan variasi kualitas massa batuan baik hingga sangat baik (84,69-93%). Lereng 5 teridentifikasi memiliki kualitas RQD terendah, sedangkan Lereng 2 dan 3 mencerminkan kondisi massa batuan yang lebih stabil dengan rata-rata RQD tertinggi. Nilai spasi diskontinuitas pada lokasi penelitian bervariasi antara 0,093 m pada Lereng 5 hingga 0,373 m pada Lereng 3, yang mencerminkan tingkat kerapatan kekar yang beragam di sepanjang area kuari. Secara umum, bidang diskontinuitas memiliki permukaan yang dominan agak kasar tanpa material isian, namun menunjukkan variasi persistensi yang signifikan (kurang dari 1 meter hingga lebih dari 10 meter). Keterbukaan diskontinuitas bervariasi antara rapat hingga terbuka dengan tingkat pelapukan yang didominasi agak lapuk. Khusus pada Lereng 5, teramati tingkat pelapukan yang lebih intensif (lapuk sedang) dibandingkan lereng lainnya, yang secara langsung berkontribusi pada penurunan kualitas integritas massa batuan secara lokal. Seluruh lereng pengamatan berada dalam kondisi kering, sehingga parameter ini memberikan kontribusi positif terhadap stabilitas lereng karena tidak adanya pengaruh tekanan air pori pada bidang diskontinuitas.

Integrasi dari seluruh parameter geomekanika (Tabel 2) secara kumulatif menghasilkan nilai RMR_{basic} yang berkisar antara 63 hingga 70, yang menempatkan massa batuan lereng kuari batugamping di lokasi penelitian dalam kategori kualitas "Baik" (Kelas II). Nilai yang tinggi ini didorong oleh kontribusi signifikan dari parameter kuat tekan batuan (UCS) yang relatif tinggi dan kondisi keairan lereng yang sepenuhnya kering. Meskipun terdapat variasi spasi diskontinuitas dan nilai RQD pada beberapa segmen lereng, diskontinuitas yang dominan kasar tanpa material isian mampu menjaga integritas antarblok batuan tetap kokoh dan saling mengunci (*interlocking*). Kondisi ini mengindikasikan bahwa secara keseluruhan, massa batuan di kuari Desa Wawatu memiliki kompetensi struktural yang stabil, sehingga memberikan basis yang kuat bagi stabilitas lereng dan memungkinkan penerapan geometri lereng yang lebih optimal dalam kegiatan operasional penambangan.

Evaluasi SMR pada kelima lereng menunjukkan adanya reduksi nilai yang bervariasi dari nilai RMR_{basic} (63–70) sebagai konsekuensi logis dari pengaruh orientasi bidang diskontinuitas terhadap geometri lereng aktual. Berdasarkan rekapitulasi bobot

Copyright © 2026 Masri et. al.
This work is licensed under the CC-BY-SA license

penyesuaian pada Tabel 3, parameter F1, F2 dan F3 memberikan dampak pengurangan nilai yang signifikan pada lereng-lereng dengan hubungan orientasi yang "tidak menguntungkan", yang secara langsung berkorelasi dengan temuan analisis kinematika pada Tabel 1. Sebagai contoh, pada Lereng 5, tingginya probabilitas longsoran baji sebesar 69,73% tercermin dari nilai faktor penyesuaian yang ekstrem, sehingga menyebabkan klasifikasi massa batuan yang sebelumnya berkategori "Baik" pada RMR turun menjadi kategori "Normal" (Kelas III) dalam sistem SMR, yang juga terlihat pada lereng lain dengan potensi longsoran baji yang sama. Sebaliknya, pada lereng dengan potensi longsoran yang lebih rendah seperti Lereng 2, faktor penyesuaian orientasi cenderung lebih kecil sehingga nilai SMR tetap terjaga pada kategori Kelas II (Baik). Perubahan nilai dari RMR ke SMR ini menegaskan bahwa meskipun massa batuan memiliki kualitas fisik yang kompeten, stabilitas lereng kuari di lokasi penelitian sangat rentan terhadap kegagalan lereng yang dipicu oleh ketidakselarasan antara arah kemiringan kekar dominan dengan arah muka lereng.

Tabel 2 Bobot parameter dan akumulasi nilai RMR

Kriteria		Lereng 1	Lereng 2	Lereng 3	Lereng 4	Lereng 5
UCS (MPa)		47	51	48	47,6	48,2
	Bobot	4	7	4	4	4
RQD (%)		85,43	93	89,27	85,82	84,69
	Bobot	17	20	17	17	17
Spasi (meter)		0,142	0,197	0,373	0,147	0,093
	Bobot	8	8	10	8	8
Kondisi diskontinuitas		persistensi 1-3 m, agak kasar, terbuka, tanpa isian, sedikit lapuk	persistensi >10 m, agak kasar, terbuka, tanpa isian, sedikit lapuk	persistensi <1 m, agak kasar, rapat, tanpa isian, sedikit lapuk	persistensi <1 m, agak halus, rapat, tanpa isian, sedikit lapuk	persistensi 3-10 m, agak kasar, terbuka, tanpa isian, lapuk sedang
	Bobot	19	20	22	22	20
Kondisi keairan		Kering	Kering	Kering	Kering	Kering
	Bobot	15	15	15	15	15
RMR_{basic}		63	70	68	66	64

Tabel 3 Bobot parameter dan akumulasi nilai SMR

Kriteria	Lereng 1	Lereng 2	Lereng 3	Lereng 4	Lereng 5
RMRbasic	63	70	68	66	64
F1	0,4	0,15	0,4	0,15	0,15
F2	0,4	1,00	0,15	0,85	0,85
F3	-60	-25	-60	-60	-60
F4	0	0	0	0	0
SMR	53	66	64	58	56
Kelas	III (cukup)	II (Baik)	II (Baik)	III (cukup)	III (cukup)

Metode Q-slope merupakan sistem klasifikasi massa batuan empiris yang dikembangkan secara spesifik untuk mengevaluasi stabilitas lereng batuan tanpa perkuatan (Bar dan Barton, 2024, Bar dan Barton, 2017). Penentuan nilai Q-slope dilakukan melalui integrasi enam parameter utama, yakni *Rock Quality Designation* (RQD), jumlah set diskontinuitas (J_n), kekasaran bidang diskontinuitas (J_r), tingkat alterasi pada bidang diskontinuitas (J_a), kondisi lingkungan lereng (J_{wice}), serta *Stress Reduction Factor* (SRF). Selain parameter dasar tersebut, metode ini menyertakan faktor orientasi bidang diskontinuitas (O-factor) yang memungkinkan penilaian lebih presisi terhadap potensi kegagalan lereng, sehingga mampu menghasilkan rekomendasi sudut lereng stabil (β) yang lebih akurat untuk kondisi kuari.

Hasil analisis parameter Q-Slope menunjukkan variasi cukup kompleks (Tabel 4). Lereng 2, 4, dan 5 memiliki dua set kekar ditambah kekar acak, sementara Lereng 5 mencatat intensitas diskontinuitas tertinggi yang meningkatkan risiko fragmentasi. Penilaian *O-factor* menunjukkan kondisi

yang bervariasi dari sangat menguntungkan hingga kurang menguntungkan. Dari sisi kuat geser diskontinuitas, meskipun parameter kekasaran (J_r) umumnya menunjukkan permukaan kasar bergelombang yang meningkatkan kuat geser, keberadaan alterasi (J_a) berupa isian mineral lempung pada Lereng 1 dan 5 menjadi faktor pelemah signifikan. Seluruh parameter ini dikombinasikan dengan kondisi lingkungan (J_{wice}) yang stabil dan faktor reduksi tegangan (SRF_a) yang disesuaikan dengan kondisi fisik lereng kuari batugamping.

Rekapitulasi nilai Q-slope menunjukkan variasi yang sangat kontras di beberapa lereng, dengan rentang nilai antara 0,17 hingga 7,13. Nilai Q-slope Lereng 2 (7,13) dan Lereng 3 (6,83) mencatatkan nilai tertinggi, yang mengindikasikan tingkat kestabilan massa batuan yang paling optimal di antara seluruh lereng. Sebaliknya, Lereng 1 (0,17) dan Lereng 5 (0,99) yang secara empiris menunjukkan kerentanan yang lebih tinggi terhadap instabilitas lereng jika tidak dilakukan penyesuaian sudut kemiringan. Variasi nilai yang lebar ini memberikan gambaran bahwa meskipun berada dalam formasi batuan yang sama, karakteristik geomekanika spesifik lereng sangat dipengaruhi oleh distribusi set kekar dan perlapisan sebagai bidang lemahnya.

Tabel 4 Bobot parameter dan akumulasi nilai Q-slope

Lokasi	Kelas	Jn	RQD (%)	Set	Jr	Ja	*O-Factor*	Jwice	SRFa	SRFb	SRFc	*Q-slope*
Lereng 1	Max	4	83,50	1	2	8	0,75	0,8	5,0	2,58	4	7,55
				2	3	8	1,0					
	Min	4	82	1	1,5	2	0,75	0,8	5,0	2,49	4	0,09
				2	1,5	2	1,0					
	Mean	4	83,03	1	1,5	8	0,75	0,8	5,0	2,53	4	0,17
				2	3	8	1,0					
Lereng 2	Max	6	95,20	1	3	6	2,0	0,8	2,5	2,58	2	21,4
				2	1.5	2	1,5					
	Min	6	84,97	1	2	2	2,0	0,8	2,5	2,40	2	2,20
				2	1	2	1,5					
	Mean	6	88,66	1	2	2	2,0	0,8	2,5	2,49	2	7,13
				2	1	2	1,5					
Lereng 3	Max	4	100	1	3	6	1,0	0,8	2,5	2,56	2	30,0
				2	2	8	1,5					
	Min	4	83	1	2	2	1,0	0,8	2,5	2,46	2	0,54
				2	1	2	1,5					
	Mean	4	86,23	1	2	2	1,0	0,8	2,5	2,52	2	6,83
				2	1	2	1,5					
Lereng 4	Max	6	83	1	3	6	1,0	0,8	5,0	2,58	2	16,4
				2	3	6	1,5					
	Min	6	63,80	1	1,5	2	1,0	0,8	5,0	2,44	2	0,11
				2	1	2	1,5					
	Mean	6	67,12	1	1,5	2	1,0	0,8	5,0	2,52	2	2,00
				2	1	2	1,5					
Lereng 5	Max	6	91,26	1	2	8	2,0	0,8	2,5	2,58	2	16,4
				2	3	8	0,9					
	Min	6	38,28	1	1	8	2,0	0,8	2,5	2,44	2	0,22
				2	1,5	2	0,9					
	Mean	6	55,67	1	1	2	2,0	0,8	2,5	2,52	2	0,99
				2	3	2	0,9					

Jika dikorelasikan dengan nilai RMR_{basic}, terlihat adanya perbedaan sensitivitas antar metode klasifikasi. Seluruh lereng berada pada kategori "Baik" (Kelas II) menurut sistem RMR dengan rentang nilai 63 hingga 70. Namun, metode Q-slope mampu menangkap perbedaan kualitas yang lebih mendalam; sebagai contoh, Lereng 1 dan Lereng 2 yang hanya terpaut 7 poin pada nilai RMR (63 vs 70), justru menunjukkan perbedaan nilai Q-slope yang sangat signifikan (0,17 vs 7,13). Hal ini menegaskan bahwa Q-slope jauh lebih sensitif dalam mengevaluasi parameter spesifik lereng seperti faktor orientasi (O-factor) dan kondisi lingkungan, dibandingkan RMR yang cenderung lebih bersifat generalis dalam menilai kualitas massa batuan dasar.

Hubungan antara Q-slope dan SMR menunjukkan pola konsistensi yang kuat dalam mendeteksi pengaruh orientasi bidang diskontinuitas. Penurunan kelas massa batuan dari RMR Kelas II ke SMR Kelas III (Normal) pada Lereng 1 (53), Lereng 3 (58), dan Lereng 5 (56) bersesuaian dengan nilai Q-slope yang juga relatif rendah pada lereng-lereng tersebut (kecuali L3 yang memiliki nilai Q-Slope tinggi namun SMR sedang). Khusus pada Lereng 2 dan Lereng 4, konsistensi stabilitas terlihat sangat jelas di mana ketiga sistem klasifikasi (RMR, SMR, dan Q-

Copyright © 2026 Masri et. al.
This work is licensed under the CC-BY-SA license

slope) secara serempak memberikan nilai tertinggi (Tabel 5). Hal ini membuktikan bahwa pada lereng dengan orientasi bidang diskontinuitas yang menguntungkan, ketiga metode akan memberikan hasil yang konvergen, namun pada kondisi kritis, Q-slope memberikan penilaian yang lebih konservatif dan detail untuk keperluan desain teknis lereng tanpa perkuatan.

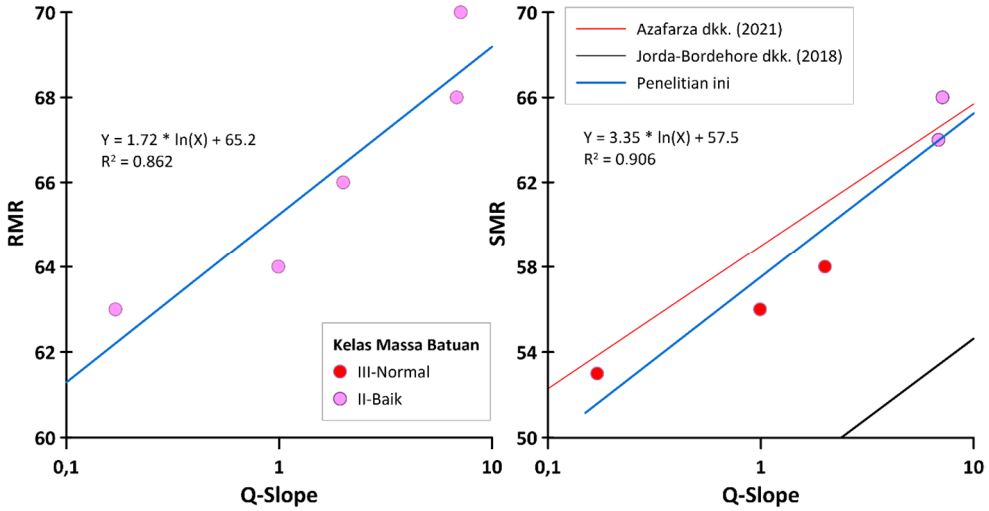
Tabel 5 Perbandingan analisis kinematika dan klasifikasi massa batuan multi parameter pada lereng kuari batugamping

Lereng	Potensi kelongsoran	RMR	SMR	Q-Slope	Keterangan
Lereng 1	baji/guling	63	53	0.17	Perlu penanganan
Lereng 2	guling	70	66	7.13	Stabil
Lereng 3	baji/bidang	68	64	6.83	Stabil
Lereng 4	baji/bidang	66	58	2	Stabil
Lereng 5	baji/guling	64	56	0.99	Perlu penanganan

Mengacu pada konsistensi perubahan nilai ketiga klasifikasi massa batuan, diperlukan pengembangan hubungan empiris antara RMR, SMR, dan Q-slope yang berfokus pada kebutuhan untuk melakukan validasi silang serta standarisasi penilaian kualitas massa batuan yang bersifat multidimensi. Fungsi regresi linear yang dihasilkan dalam penelitian ini berperan sebagai instrumen prediktif yang memungkinkan praktisi di lapangan untuk mengonversi nilai kualitas massa batuan umum (RMR) menjadi parameter desain lereng yang lebih spesifik dan teknis (Q-slope). Umumnya, SMR dan Q-slope dinyatakan dalam fungsi nonlinear, sehingga penggunaan skala logaritmik pada Q-slope dimaksudkan agar mengakomodir perubahan pada nilai Q-slope dengan interval lebih besar. Penelitian terdahulu juga menggunakan skala logaritmik untuk Q-slope, sehingga pendekatan ini memungkinkan perbandingan terhadap hasil terdahulu dan memperkuat validitas penelitian baru. Fungsi korelasi Q-slope terhadap RMR dan SMR dapat dilihat pada persamaan 1 dan 2. Tingginya koefisien determinasi (R^2) menunjukkan bahwa model ini memiliki tingkat presisi yang kuat (Gambar 4). Implikasi dari hubungan yang bersifat *site-specific* ini sangat krusial, karena perilaku geomekanika batugamping di lokasi penelitian memiliki karakteristik unik, terutama dalam hal kekakuan dan pola rekahan, sehingga penggunaan model lokal jauh lebih akurat dibandingkan menggunakan parameter generalis yang mungkin tidak merepresentasikan kondisi massa batuan aktual di Desa Wawatu.

$$RMR = 1{,}72 \times \ln Qslope + 65{,}2;\ R^2 = 0{,}862 \quad (1)$$

$$SMR = 3{,}35 \times \ln Qslope + 57{,}5;\ R^2 = 0{,}906 \quad (2)$$



Gambar 4 Korelasi empiris antara RMR/SMR terhadap Q-Slope pada pada lereng daerah penelitian. Korelasi Q-Slope SMR pada penelitian lain juga dibandingkan

Berdasarkan Gambar 4, terdapat perbedaan gradien dan intersep yang jelas antara fungsi regresi hasil penelitian ini (garis biru) dengan model terdahulu dari Azarafza dkk. (2021) dan Jorda-Bordehore dkk. (2018). Pada Gambar 4, kurva penelitian ini cenderung berada di bawah kurva Azarafza dkk. (2021), yang mengindikasikan bahwa untuk nilai SMR yang sama, batugamping di lokasi

penelitian memiliki nilai Q-slope yang lebih konservatif. Hal ini menunjukkan bahwa massa batuan di daerah penelitian lebih sensitif terhadap penurunan stabilitas akibat faktor orientasi dan kondisi lingkungan dibandingkan batuan yang menjadi basis penelitian global tersebut. Perbedaan ini memvalidasi bahwa model empiris terdahulu cenderung melakukan *over-estimation* jika diterapkan langsung pada batugamping kuari daerah penelitian. Oleh karena itu, kurva regresi lokal ini menjadi kontribusi ilmiah yang penting karena memberikan batas keamanan yang lebih tepat dalam menentukan sudut lereng stabil (β) untuk operasional penambangan kuari di wilayah tersebut.

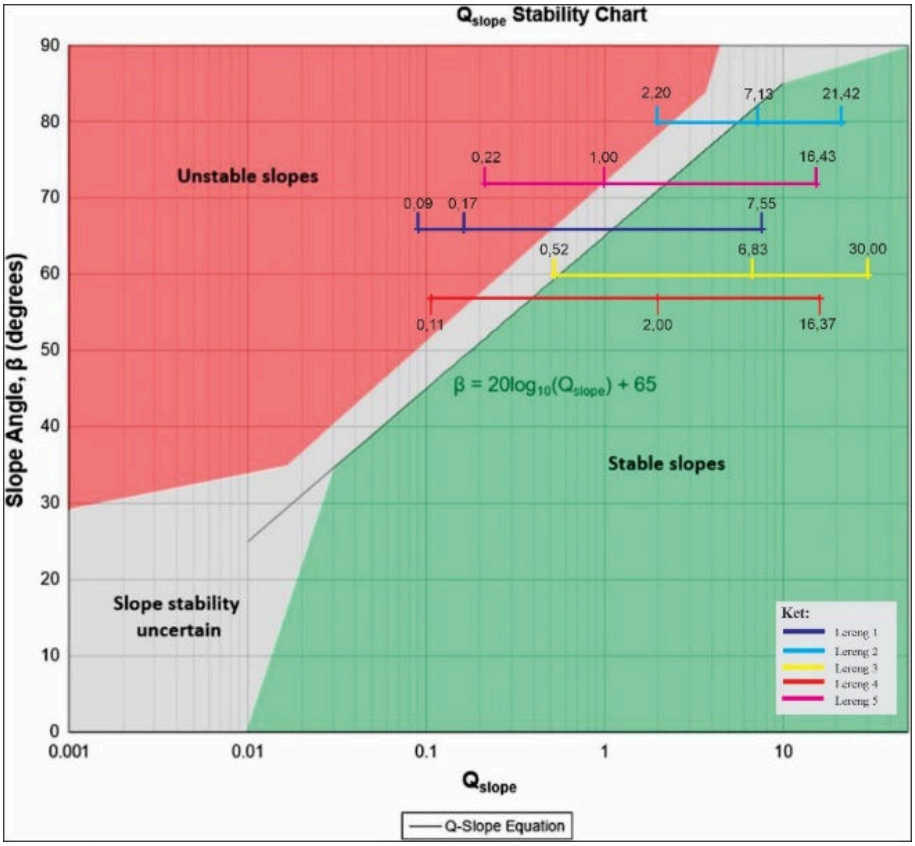
4.3 Rekomendasi Geometri Lereng Optimal

Penentuan desain geometri kemiringan lereng optimal di lima lereng kuari dilakukan dengan merujuk pada grafik kestabilan Q-slope (Gambar 5), di mana batas keamanan teknis ditetapkan secara konservatif pada kurva probabilitas kelongsoran (P_f) sebesar 1%. Penetapan ambang batas 1% ini bertujuan untuk menjamin tingkat risiko yang paling minimal terhadap keselamatan pekerja maupun perlengkapan mekanis di area operasional kuari batugamping. Berdasarkan nilai Q-slope yang telah dihitung untuk setiap lereng, sudut kemiringan lereng aman (β) ditentukan sebagai batas atas geometri yang diizinkan agar massa batuan tetap berada dalam zona stabil tanpa memerlukan dukungan perkuatan buatan (*unsupported rock slopes*).

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa Lereng 1 dan Lereng 5 merupakan area kritis yang memerlukan penanganan teknis segera berupa modifikasi geometri, mengingat sudut lereng aktual saat ini telah melampaui batas stabil yang direkomendasikan (perlu pelandaian hingga 21°). Pada Lereng 5, kemiringan aktual hingga 75° (sangat terjal) harus dilandaikan secara signifikan untuk mencapai sudut β rekomendasi sebesar 65° guna menghindari potensi longsoran baji yang terdeteksi pada analisis kinematika (

Tabel **6**). Perubahan geometri ini mencakup reduksi sudut kemiringan lereng tunggal atau penerapan sistem berjenjang (*benching*) yang lebih sistematis, sehingga gaya penggerak pada bidang-bidang diskontinuitas dapat diminimalisir dan kestabilan jangka panjang dapat terjaga.

Penyesuaian geometri lereng berdasarkan rekomendasi empiris ini memiliki korelasi positif terhadap optimalisasi produksi kuari batugamping di Desa Wawatu. Meskipun pelandaian lereng secara sekilas seperti pada Lereng 1 dan Lereng 5 tampak membatasi volume batuan yang dapat diekstraksi dalam jangka pendek, namun kestabilan lereng yang



Gambar 5 Grafik kestabilan Q-slope dengan tingkat probabilitas kelongsoran 1%

Copyright © 2026 Masri et. al.
This work is licensed under the CC-BY-SA license

Tabel 6 Perbandingan sudut lereng aktual dan sudut lereng rekomendasi berdasarkan variasi nilai Q-Slope

Lereng	*Q-slope* (˚)	Sudut lereng aktual (°)	Sudut lereng rekomendasi (°)	Perubahan sudut lereng (°)
Lereng 1	0,17	66	44,76	-21,24
Lereng 2	7,13	80	82,06	+2,06 (stabil)
Lereng 3	6,83	60	81.69	+21,69 (stabil)
Lereng 4	2,00	57	71,00	+14 (stabil)
Lereng 5	1,00	73	64,95	-8,05

terjamin akan mencegah terjadinya *downtime* operasional akibat kegagalan lereng yang jauh lebih merugikan secara ekonomi. Di sisi lain, geometri Lereng 2, 3, dan 4 pada kondisi stabil, di bawah geometri lereng optimal, memungkinkan untuk ekstraksi kuari batugamping lebih banyak. Dengan geometri yang aman, akses alat berat menuju muka penambangan menjadi lebih terjamin dan risiko kecelakaan kerja dapat ditekan, yang pada akhirnya akan meningkatkan efisiensi kerja, kelancaran siklus pengangkutan, dan total produksi kuari secara berkelanjutan.

5 Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil menentukan desain geometri lereng optimal pada tambang kuari batugamping di Desa Wawatu melalui integrasi analisis kinematika dan metode klasifikasi massa batuan Q-slope. Hasil analisis kinematika menunjukkan bahwa kestabilan lereng sangat dikontrol oleh perpotongan bidang kekar dan perlapisan, dengan potensi longsoran baji mendominasi pada Lereng 1, 3, dan 5 (probabilitas tertinggi 69,73%), serta potensi longsoran guling pada Lereng 2 (41,46%). Meskipun kualitas massa batuan secara umum dikategorikan "Baik" menurut sistem RMR (63–70), penerapan metode SMR (53-66) dan Q-slope (0,17–7,13) memberikan penilaian yang lebih sensitif dan konservatif dalam menangkap pengaruh orientasi bidang diskontinuitas dan kondisi lingkungan terhadap kestabilan lereng aktual. Hubungan empiris lokal yang dirumuskan dalam penelitian ini dapat menjadi instrumen konversi parameter geoteknik yang akurat untuk karakteristik batugamping di daerah penelitian.

Meskipun demikian, temuan dalam penelitian ini memiliki limitasi karena hanya difokuskan pada evaluasi lima lereng produksi utama yang dipilih berdasarkan keterwakilan variasi intensitas rekahan. Untuk persamaan korelasi yang lebih akurat, diperlukan lebih bnayak dataset lereng. Namun, hasil ini dapat memberikan kontribusi bagi manajemen tambang dalam merancang geometri lereng yang lebih presisi dengan mengacu pada kurva probabilitas kelongsoran 1%. Penyesuaian sudut kemiringan lereng yang direkomendasikan tidak hanya berfungsi sebagai langkah mitigasi risiko geoteknik untuk menjamin keselamatan pekerja dan alat berat, tetapi juga menjadi strategi fundamental dalam optimalisasi produksi kuari.

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 Tahun 2024.

Referensi

Aydin, A. 2009. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(3), pp. 627–634. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.020

Azarafza, M., Koçkar, M. K. & Zhu, H.-H. 2021. Correlations of SMR-Qslope Data in Stability Classification of Discontinuous Rock Slope: A Modified Relationship Considering the Iranian Data. Geotechnical and Geological Engineering, 40(4), pp. 1751–1764. https://doi.org/10.1007/s10706-021-01991-w

Azarafza, M., Nanehkaran, Y. A., Rajabion, L., Akgün, H., Rahnamarad, J., Derakhshani, R. & Raoof, A. 2020. Application of the modified Q-slope classification system for sedimentary rock slope stability assessment in Iran. Engineering Geology, 264. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105349

Azzaman, M. A. & Titisari, A. D. 2023. Genesa Marmer Daerah Mata Wawatu dan Sanggula, Kecamatan Moramo Utara, Konawe Selatan Berdasarkan Karakteristik Tekstur, Struktur, dan Asosiasi Batuannya. Jurnal Geosains dan Teknologi, 6(1), pp. 17–26. https://doi.org/10.14710/jgt.6.1.2023.17-26

Bar, N. & Barton, N. 2017. The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50(12), pp. 3307–3322. https://doi.org/10.1007/s00603-017-1305-0

Bar, N. & Barton, N. 2018. Q-slope: An empirical rock slope engineering approach in Australia. Australian Geomechanics Journal, 53(4), pp. 73–86.

Bar, N. & Barton, N. 2024. Q-Slope: Rock Slope Engineering 10 Years on. Rock Mechanics and Rock Engineering. https://doi.org/10.1007/s00603-024-04064-5

Barton, N. R. & Bandis, S. C. 2017. Characterization and modeling of the shear strength, stiffness and hydraulic behavior of rock joints for engineering purposes. *In:* Feng, X.-T. (ed.) Rock Mechanics and Engineering Volume 1: Principles. London: CRC Press. pp. 3–40.

Bieniawski, Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications. Ottawa, John Wiley & Sons.

Borges, R. P., de A. P. Bacellar, L., Grasso, C. B., Gomes, G. J. C. & Gomes, R. G. S. 2023. Slope geometry optimization considering groundwater drawdown scenarios at an open-pit phosphate mine, southeastern Brazil. Environmental Earth Sciences, 82(7), pp. 164. https://doi.org/10.1007/s12665-023-10855-w

Gurocak, Z., Alemdag, S. & Zaman, M. M. 2008. Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the Kapikaya dam site, Turkey. Engineering Geology, 96(1-2), pp. 17–27. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.08.005

ISRM 1979. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16(2), pp. 319–368. https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)91476-1

Jorda-Bordehore, L., Cano, N. B. M., Riquelme, A. & Tomás, R. 2018. Stability Assessment of Rock Slopes Using Empirical Approaches: Comparison Between Slope Mass Rating and Q-Slope XIV International Congress on Energy and Mineral Resources. Slope Stability, Sevilla, Spain. pp.

Komurlu, E. 2022. Case studies on Q-slope method use for slope stability analyses. Studia Geotechnica et Mechanica, 44(3), pp. 190–197. https://doi.org/10.2478/sgem-2022-0010

Li, S., Zhao, Z., Hu, B., Yin, T., Chen, G. & Chen, G. 2022. Hazard Classification and Stability Analysis of High and Steep Slopes from Underground to Open-Pit Mining. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(18), pp. 11679. https://doi.org/10.3390/ijerph191811679

Masri, Mili, M. Z., Nafiu, W. R. A., Wahab, Agriawan, H. & Ngkoimani, L. O. 2024. Potensi dan probabilitas kelongsoran lereng tambang kuari batugamping di daerah Moramo Utara, Sulawesi Tenggara. Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 20(2), pp. 51–63. https://doi.org/10.30556/jtmb.vol20.no2.2024.1550

Masri & 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), pp. 1–9. https://doi.org/10.56099/ophiolite.v1i1.8986

Mikroutsikos, A., Theocharis, A. I., Koukouzas, N. C. & Zevgolis, I. E. 2021. Slope stability of deep surface coal mines in the presence of a weak zone. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 7(3), pp. 66. https://doi.org/10.1007/s40948-021-00265-2

Pilecki, Z., Bazarnik, M., Dubiński, J., Marcak, H. & Dec, J. 2018. Slope stability monitoring in open pit mines using 3D terrestrial laser scanning. E3S Web of Conferences, 66, pp. 01020. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186601020

Priest, S. D. 1993. Discontinuity analysis for rock engineering. London, Chapman & Hall,.

Qadri, J., Alam, M. M. & Sadique, M. R. 2021. Comparison of Slope Mass Ratings Classification Systems: A Review. Research Square Platform LLC.

Romana, M. 1993. A Geomechanical Classification for Slope: Slope Mass Rating. *In:* Hudson, J. A. (ed.) Comprehensive Rock Engineering Principles, Practice, and Projects. Oxford: Pergamon Press. pp. 575–598.

Romana, M., Tomás, R. & Serón, J. B. 2015. Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification Thirty years review. ISRM Congress 2015 Proceedings - International Symposium on Rock Mechanics, 2015 Vancouver,

Copyright © 2026 Masri et. al.
This work is licensed under the CC-BY-SA license

Kanada. International Society of Rock Mechanics. pp. 1689–1699. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Simandjuntak, T. O., Surono & Sukido 1993. Peta Geologi Lembar Kolaka, Sulawesi (Skala 1:250000) [Geologic map of the Kolaka quadrangle, Sulawesi (Scale 1:250,000)]. Bandung, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Sirait, B., Pulungan, Z. & Pujianto, E. 2021. Identifikasi potensi longsoran lereng pada kuari batugamping menggunakan analisis kinematika. Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 17(2), pp. 61–75. https://doi.org/10.30556/jtmb.vol17.no2.2021.1113

Weerasinghe, R., Xiaoli, G., Jiancheng, Y., Xueliang, L., Xin, W., Xingli, L., Wu, J. & Weng, C. H. 2020. Study on shaping slope stability of dump in eastern grassland open-pit mine. E3S Web of Conferences, 194, pp. 04043. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019404043

Wyllie, D. C. & Mah, C. W. 2017. Rock Slope Engineering. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315274980

Yusuf, M., Helmalia, D., Ramadhoan, P., Zubaidin, Alpiana & Hidayati 2023. Analysis of Slope Stability Using Applied Research Methods A Case Study at Taman Ayu Gerung Village, Gerung District, West Lombok Regency, West Nusa Tenggara Province. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1175(1), pp. 012009. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1175/1/012009