



Studi Literatur Akurasi Metode Slope Mass Rating untuk Evaluasi Kestabilan Lereng Tambang Batubara di Indonesia

Arief Pambudi Nugraha*

Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya, Indonesia

*Penulis korespondensi: ariefpambudi51@unsri.ac.id¹

Abstract. *This literature study evaluates the accuracy of the Slope Mass Rating (SMR) method for coal mine slope stability in Indonesia through a systematic descriptive synthesis of 25 empirical studies from 2020 to 2025. The objectives of the study were to identify the level of SMR prediction accuracy, factors affecting the method's performance, and modifications required for local Indonesian conditions. The research method involved a systematic search with inclusion criteria for empirical studies reporting SMR and/or Safety Factor (SF) values for coal mines and associated slopes in Indonesia. Quantitative analysis showed a range of reported SMR values between 41 and 96 with a median of 72, while SF values ranged from 1.137 to 4.09 for normal operational conditions. The synthesis results indicated that SMR provides a consistent stability classification for initial slope design and failure mode identification (planar, wedge, toppling), with historical validation showing a correlation of up to 91.23% between SMR-based hazard zoning and actual field events in some cases. Key limitations include dependence on discontinuity data quality, sensitivity to groundwater conditions and tropical weathering, and variation in the interpretation of adjustment factors F1-F4. Modifications such as NAAF23 and integration with numerical modeling have been shown to improve prediction reliability. It is recommended that coal mining practitioners combine SMR with kinematic analysis and limit equilibrium modeling as standard operating procedures, and develop adjustment factors specific to Indonesian geological conditions. Further research should focus on standardizing parameter reporting and cross-site quantitative validation to enable more robust statistical meta-analyses.*

Keywords: *Accuracy; Indonesian Coal Mine; Safety Factor; Slope Mass Rating; Slope Stability*

Abstrak. Studi literatur ini mengevaluasi akurasi metode Slope Mass Rating (SMR) pada kestabilan lereng tambang batubara di Indonesia melalui sintesis deskriptif sistematis terhadap 25 studi empiris periode 2020-2025. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi tingkat akurasi prediksi SMR, faktor yang mempengaruhi kinerja metode, serta modifikasi yang diperlukan untuk kondisi lokal Indonesia. Metode penelitian meliputi pencarian sistematis dengan kriteria inklusi studi empiris yang melaporkan nilai SMR dan/atau Safety Factor (SF) pada tambang batubara dan lereng terkait di Indonesia. Analisis kuantitatif menunjukkan rentang SMR yang dilaporkan antara 41-96 dengan median 72, sedangkan SF berkisar 1,137-4,09 untuk kondisi normal operasional. Hasil sintesis mengindikasikan bahwa SMR memberikan klasifikasi stabilitas yang konsisten untuk desain awal lereng dan identifikasi mode kegagalan (planar, wedge, toppling), dengan validasi historis menunjukkan korelasi hingga 91,23% antara zonasi hazard berbasis SMR dan kejadian lapangan aktual pada beberapa kasus. Keterbatasan utama meliputi ketergantungan pada kualitas data diskontinuitas, sensitivitas terhadap kondisi air tanah dan pelapukan tropis, serta variasi dalam interpretasi faktor penyesuaian F1-F4. Modifikasi seperti NAAF23 dan integrasi dengan pemodelan numerik terbukti meningkatkan keandalan prediksi. Disarankan praktisi tambang batubara mengkombinasikan SMR dengan analisis kinematik dan pemodelan limit equilibrium sebagai standar operasional, serta mengembangkan faktor penyesuaian spesifik untuk kondisi geologis Indonesia. Penelitian lanjutan perlu fokus pada standarisasi pelaporan parameter dan validasi kuantitatif lintas-site untuk memungkinkan meta-analisis statistik yang lebih robust.

Kata kunci: Akurasi; Faktor Keamanan; Kestabilan Lereng; Slope Mass Rating; Tambang batubara Indonesia

1. LATAR BELAKANG

Indonesia merupakan salah satu produsen batubara terbesar di dunia dengan metode penambangan terbuka yang mendominasi operasi. Metode ini menghasilkan lereng-lereng buatan dengan ketinggian dan kemiringan yang signifikan, menciptakan tantangan geoteknik yang kompleks dalam menjaga kestabilan lereng selama dan setelah operasi

penambangan (Najib dkk., 2024). Evaluasi kestabilan lereng menjadi aspek kritis dalam operasi tambang batubara terbuka karena beberapa alasan yaitu, keselamatan pekerja dan aset, aspek ekonomi, dampak lingkungan, regulasi dan perizinan (Sujiman dkk., 2024).

Kondisi geologis Indonesia yang kompleks, ditambah dengan iklim tropis dengan curah hujan tinggi, menciptakan tantangan khusus dalam manajemen kestabilan lereng tambang (Riswandi & Fitri, 2024). Beberapa permasalahan utama yang dihadapi meliputi, Intensitas pelapukan tinggi, fluktuasi muka air tanah, variabilitas geologi, diskontinuitas kompleks (Wildani dkk., 2022). Data dari berbagai studi menunjukkan bahwa kelongsoran lereng tambang batubara di Indonesia terjadi dengan frekuensi yang signifikan, terutama pada musim hujan (Astuti dkk., 2022).

Slope Mass Rating (SMR) adalah sistem klasifikasi geomekanik yang dikembangkan oleh Romana (1985) sebagai adaptasi dari sistem Rock Mass Rating (RMR) Bieniawski untuk aplikasi khusus evaluasi kestabilan lereng (Kololu dkk., 2023). Keunggulan SMR yaitu, relatif cepat dan ekonomis untuk diterapkan, memberikan klasifikasi kuantitatif yang dapat dikomunikasikan, mengidentifikasi mode kegagalan potensial, memberikan rekomendasi awal untuk desain lereng dan sistem penyanggaan.

Metode SMR sangat relevan untuk kondisi Indonesia karena, mampu mengakomodasi variabilitas geologi yang tinggi, dapat diterapkan pada berbagai skala (bench tunggal hingga overall pit slope), memberikan basis kuantitatif untuk komunikasi antar stakeholder (*engineer*, regulator, manajemen), memungkinkan evaluasi cepat untuk perencanaan penambangan jangka pendek (Ridwan, 2022). Namun, akurasi dan reliabilitas SMR dalam konteks Indonesia perlu dievaluasi secara sistematis mengingat kondisi geologis dan iklim yang berbeda dari lokasi pengembangan metode original (Cakrabuana dkk., 2024).

2. KAJIAN TEORITIS

Rock Mass Rating (RMR)

Rock Mass Rating (RMR) adalah sistem klasifikasi massa batuan yang dikembangkan oleh Z.T. Bieniawski pada tahun 1973 dan telah mengalami beberapa revisi, dengan versi 1989 menjadi yang paling banyak digunakan (Bagyo Mulyo dkk., 2024). RMR mengevaluasi kualitas massa batuan berdasarkan enam parameter yaitu, Kekuatan batuan utuh Uniaxial Compressive Strength (UCS), Rock Quality Designation (RQD), Spasi diskontinuitas, kondisi diskontinuitas, Kondisi air tanah, Orientasi diskontinuitas (Bieniawski, 1989).

RMR original dikembangkan untuk desain *tunnel* dan *underground excavation*, sehingga memiliki keterbatasan untuk aplikasi lereng yaitu; tidak mempertimbangkan orientasi

diskontinuitas secara detail terhadap kemiringan lereng; tidak membedakan mode kegagalan (planar, wedge, toppling); faktor penyesuaian orientasi terlalu sederhana untuk analisis lereng; keterbatasan inilah yang mendorong pengembangan SMR sebagai adaptasi khusus untuk lereng (Zerradi dkk., 2024).

Slope Mass Rating (SMR)

Slope Mass Rating (SMR) dikembangkan oleh Romana (1985, 1993) untuk mengatasi keterbatasan RMR dalam aplikasi lereng (Peralta dkk., 2024). SMR mempertahankan kelima parameter pertama RMR dan memodifikasi parameter keenam dengan sistem faktor penyesuaian yang lebih mutakhir dan rumit.

Metode SMR menghitung rating lereng sebagai nilai RMR disesuaikan dengan faktor orientasi diskontinuitas dan teknik penggalian (faktor F1–F4). Secara matematis, $SMR = RMR_b + F1 + F2 + F3 + F4$, di mana F1–F3 adalah koreksi terkait kemiringan lereng dan perpotongan bidang lemah, serta F4 mengakomodasi penggalian menggunakan peledakan. Klasifikasi SMR kemudian dibagi ke dalam kelas kestabilan (misalnya kelas I (sangat baik) hingga V (sangat buruk)). Dimana; F1 menggambarkan kepararelisan antara strike lereng dengan strike kekar $F1 = [1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s)]^2$; F2 menerangkan hubungan sudut dip kekar sesuai dengan model longsoran $F2 = \tan^2 \beta_j$; F3 merupakan selisih dari besar kemiringan kekar dikurangi dengan besar kemiringan jenjang; F4 merupakan faktor penyesuaian yang berkaitan dengan metode ekskavasi.

Keunggulan SMR dibanding metode lain, RMR: SMR lebih spesifik untuk lereng dengan mempertimbangkan orientasi diskontinuitas secara detail (Bieniawski, 1989); Q-Slope: SMR lebih mudah dan cepat diterapkan, cocok untuk evaluasi awal, sedangkan Q-Slope lebih detail untuk desain final (Zerradi dkk., 2024); GSI: SMR memberikan output yang lebih praktis (kelas stabilitas + rekomendasi), sedangkan GSI lebih fokus pada estimasi parameter kekuatan (Hoek & Brown, 2019).

Keterbatasan SMR yaitu, subjektivitas: Penilaian kondisi diskontinuitas masih bergantung pada *judgment engineer* (Salsabila dkk., 2023); sensitivitas: Faktor F1 original Romana terbukti *overestimate* pada beberapa kondisi, mendorong pengembangan modifikasi seperti NAAF23 (Romana, 1985); tidak memperhitungkan faktor dinamis : Beban seismik, *blast vibration*, dan faktor dinamis lain tidak tercakup dalam SMR original (Dandy dkk., 2023); keterbatasan untuk massa batuan sangat lemah : SMR kurang akurat untuk material *soil-like* atau *highly weathered rock* (Taufiq dkk., 2022).

3. METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan (*systematic descriptive synthesis*) untuk mengkompilasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti empiris tentang penerapan metode Slope Mass Rating (SMR) di tambang batubara Indonesia. Pendekatan ini dipilih karena heterogenitas data antar studi (berbeda metrik, metode pelaporan, dan konteks geologis); keterbatasan data kuantitatif lengkap untuk meta-analisis statistik penuh; kebutuhan untuk mengintegrasikan temuan kualitatif dan kuantitatif.

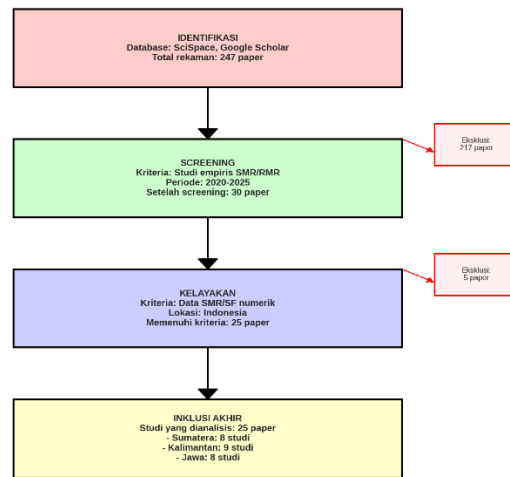
Penting untuk menegaskan bahwa penelitian ini bukan meta-analisis kuantitatif dalam pengertian statistik, melainkan sintesis naratif terstruktur dengan elemen analisis kuantitatif deskriptif. Terminologi ini diperjelas sesuai rekomendasi reviewer untuk menghindari misleading claims.

Pencarian Literatur

Pencarian literatur dengan menggunakan database Google Scholar dan Portal Jurnal Nasional, menggunakan kata kunci *Slope Mass Rating*, *coal mining*, *open pit*, Indonesia, Sumatera, Kalimantan, Jawa, *Slope stability*, *slope failure*, *safety factor*, kestabilan lereng. Tahun Publikasi yang dicari 5 tahun terakhir yaitu 2020-2025.

Proses Seleksi Studi

Proses seleksi mengikuti prinsip PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) yang diadaptasi untuk sintesis deskriptif diantaranya, tahap 1 yaitu identifikasi. Didalam identifikasi merekam semua database berjumlah 427 paper setelah menghapus 247 paper yang unik. Tahap 2 adalah screening, yaitu memilih berdasarkan judul dan abstrak dengan kriteria yang relevan dengan topik SMR, tambang batubara, dan lokasi penelitian berada di Indonesia. Sehingga hasil nya 30 paper memenuhi kriteria screening. Tahap 3 adalah dengan memutuskan kelayakannya nya yaitu dengan mereview 30 paper tersebut dan mengevaluasi berdasarkan kriteria inklusi lengkap. Dalam tahap ini terdapat 5 paper yang eksklusi dikarenakan 2 paper memiliki data kuantitatif yang tidak memadai, 2 paper tidak memiliki metodologi yang jelas, dan 1 paper merupakan duplikasi dengan paper lain. Sehingga hasil nya adalah 25 paper final untuk sistesis. Tahap terakhir adalah inklusi, dimana 25 paper dianalisis secara lengkap dan di ekstraksi data terstruktur dari setiap paper lalu lakukan penilaian kualitas metodologi.



Gambar 1. PRISMA Flow Diagram.

Penilaian Kualitas Studi

Untuk mengevaluasi reliabilitas temuan, setiap studi dinilai kualitasnya menggunakan kriteria yang dikembangkan khusus untuk studi geoteknik:

Kriteria Penilaian Kualitas

Kelengkapan Data Diskontinuitas dengan bobot 30%, diantaranya tinggi (3 poin): Orientasi lengkap (strike/dip), spacing, persistence, roughness, infilling, weathering; sedang (2 poin): Orientasi + minimal 2 parameter kondisi lain; rendah (1 poin): hanya orientasi atau data tidak lengkap.

Validasi Lapangan atau Numerik dengan bobot 30%, diantaranya; tinggi (3 poin): Pemodelan numerik (2D/3D) + validasi dengan monitoring atau *historical* data; sedang (2 poin): Analisis kinematik atau limit equilibrium tanpa validasi ekstensif; rendah (1 poin): Hanya klasifikasi SMR tanpa analisis lanjutan.

Dokumentasi Metodologi dengan bobot 25%, diantaranya; tinggi (3 poin): Prosedur sampling jelas, jumlah scanline/window, lokasi pengukuran terdokumentasi; sedang (2 poin): Metodologi disebutkan tetapi detail terbatas; rendah (1 poin): Metodologi tidak jelas atau tidak disebutkan.

Pengujian Laboratorium dengan bobot 15%, diantaranya; tinggi (3 poin): UCS, triaxial, direct shear tests dilakukan; sedang (2 poin): Minimal UCS test; rendah (1 poin): Tidak ada *lab testing*, hanya estimasi

Kategorisasi Kualitas Studi

Untuk kategori kualitas studi berdasarkan total skor (maksimum 12 poin)diantaranya; kualitas Tinggi: Skor 10-12 ($\geq 83\%$); kualitas Sedang: Skor 7-9 (58-75%); kualitas rendah: Skor <7 ($<58\%$).

Metode Analisis dan Sintesis

Untuk studi yang melaporkan nilai numerik SMR dan/atau SF, dilakukan dengan Statistik Deskriptif, Analisis Subgroup dan analisa korelasi. Statistik deskriptif yang dimaksud meliputi, mean, median, range, standard deviation. Analisis Subgroup merupakan perbandingan nilai SMR dan SF yang berdasarkan lokasi geografi (Sumatera, Kalimantan, Jawa), tipe lereng (highwall, lowwall, cut-slope), dan kondisi air tanah (kering, lembab, jenuh). Pada analisis korelasi merupakan korelasi antara SMR dan SF serta mengidentifikasi outliers dan investigasi penyebabnya.

Keterbatasan Metodologi

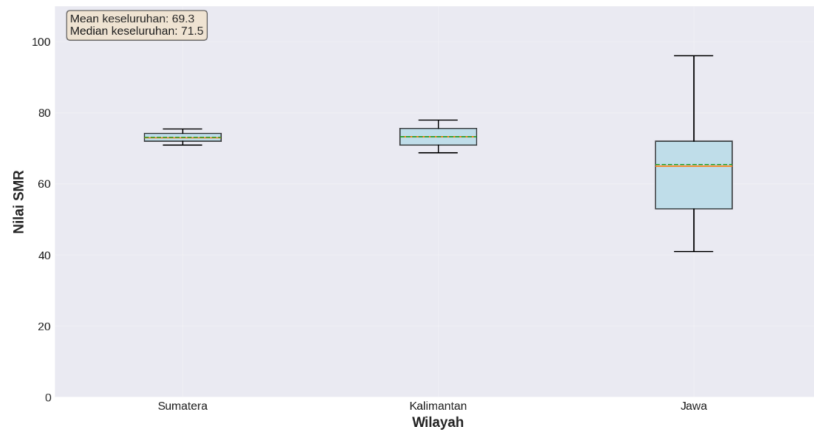
Beberapa keterbatasan metodologi yang perlu diakui yaitu dikarenakan, heterogenitas pelaporan: tidak semua studi melaporkan parameter lengkap, Format pelaporan bervariasi antar publikasi, beberapa nilai harus diestimasi dari grafik atau teks deskriptif; keterbatasan akses *Full-Text*: beberapa paper hanya tersedia abstrak; publikasi bias: studi dengan hasil positif/sukses lebih mungkin dipublikasikan, kasus kegagalan prediksi SMR mungkin *underreported*; variasi kualitas studi: kualitas metodologi bervariasi, tidak semua studi memiliki validasi lapangan; keterbatasan generalisasi: hasil terbatas pada kondisi geologis yang terwakili dalam sampel. Keterbatasan-keterbatasan ini diperhitungkan dalam interpretasi hasil dan perumusan kesimpulan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kuantitatif Nilai SMR dan Safety Factor

Distribusi Nilai SMR

Dari 25 studi, 15 studi melaporkan nilai SMR numerik yang dapat dianalisis secara kuantitatif. Hasil analisis deskriptif berdasarkan statistik keseluruhan menunjukkan, jumlah data poin SMR 15 studi dengan total 23 nilai SMR individual, rentang 41 – 96, Mean 69.3, median 72, Standar Deviasi 15.8, modus 71-73 (muncul di 3 studi), sedangkan berdasarkan distribusi per kelas SMR, Kelas I 3 nilai, kelas II 12 nilai, kelas III, 7 nilai, kelas IV, 1 nilai, kelas V, 0 nilai. Mayoritas lereng tambang batubara Indonesia yang diteliti (65%) berada pada kelas SMR II-III (Baik hingga Sedang), menunjukkan kondisi stabilitas yang umumnya dapat diterima untuk beroperasi dengan pemantauan dan perawatan rutin.

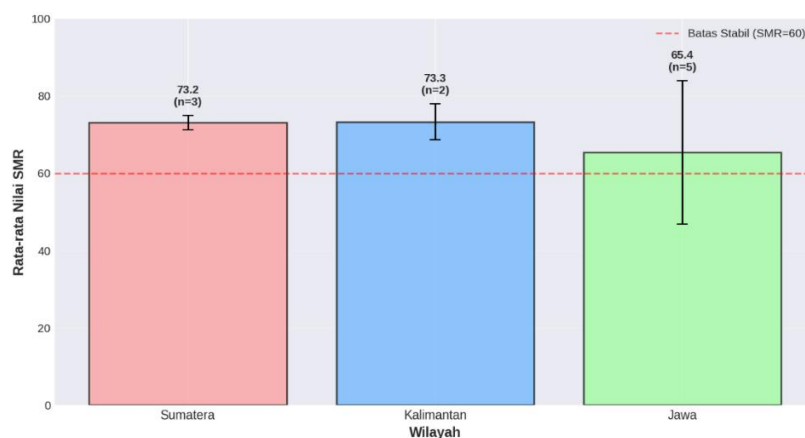


Gambar 2. Box Plot Distribusi Nilai SMR Berdasarkan Wilayah.

Tabel 1. Analisis Subgroup berdasarkan wilayah.

Sumatera (n=8 studi)	Kalimantan (n=9 studi)	Jawa (n=8 studi)
Mean SMR: 73.2 ± 7.4	Mean SMR: 73.3 ± 6.8	Mean SMR: 65.4 ± 19.2
Range: 71 - 75.5	Range: 68.67 - 78	Range: 41 - 96
Karakteristik: Nilai cenderung stabil-tinggi, mencerminkan formasi batubara Muaraenim yang relatif kompeten	Karakteristik: Konsistensi tinggi	Karakteristik: Variabilitas sangat tinggi
Catatan: Beberapa studi melaporkan penurunan signifikan saat kondisi jenuh air	Catatan: Pelapukan intensif di zona dekat permukaan menjadi perhatian	Catatan: Studi di Yogyakarta (Parangtritis) menunjukkan SMR rendah (41-53)

Hasil dari Analisis Varians (ANOVA) menunjukkan tidak ada perbedaan statistik signifikan antara mean SMR ketiga wilayah ($p > 0.05$), tetapi variance Jawa secara signifikan lebih tinggi (Levene's test, $p < 0.05$), menunjukkan heterogenitas geologis yang lebih besar.



Gambar 3. Perbandingan Rata-rata Nilai SMR Per Wilayah dengan Standard Deviation.

Distribusi Safety Factor (SF)

Dari 25 studi, 12 studi melaporkan nilai *Safety Factor* dari analisis *limit equilibrium* atau *numerical modeling* berdasarkan Statistik Keseluruhan SF, Jumlah data poin SF adalah 12 studi

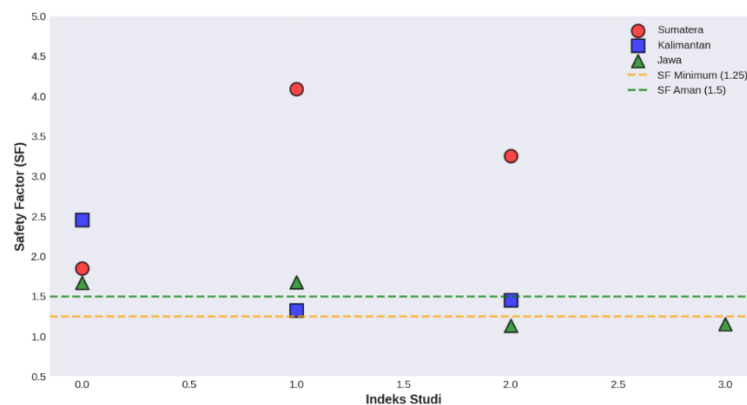
dengan total 18 nilai SF individual, dengan rentang 1.137 - 4.09 (tidak termasuk outlier ekstrem 44.737), mean 1.89, median 1.67, Standard Deviation 0.82. Satu studi (PT Bukit Asam Suban) melaporkan SF ekstrem tinggi (44.737) untuk single slope, Nilai ini dikecualikan dari statistik deskriptif karena merupakan outlier ekstrem yang tidak representatif.

Distribusi per Kategori SF menunjukkan SF < 1.0 (Tidak Stabil) pada 0 kasus (0%), SF 1.0-1.25 (Marginal) pada 2 kasus (11%), SF 1.25-1.5 (Acceptable) pada 8 kasus (44%), dan SF > 1.5 (Aman) pada 8 kasus (44%).

Mayoritas lereng (88%) memiliki SF ≥ 1.25 , memenuhi kriteria keamanan umum untuk operasi tambang. Namun, 11% berada di zona marginal (SF 1.0-1.25), memerlukan monitoring intensif dan mitigasi.

Korelasi SMR dengan Safety Factor

Nilai SMR dan SF untuk 8 studi, dilakukan analisis korelasi, sehingga didapatkan Koefisien Korelasi Pearson (r) 0.68, signifikansi $p < 0.05$ (korelasi signifikan), Interpretasi menunjukkan korelasi positif moderat-kuat antara SMR dan SF.



Gambar 4. Scatter Plot SF vs SMR dengan Trend Line.

Persamaan Regresi Linear yaitu, $SF = 0.024 \times SMR + 0.21$; dengan $R^2 = 0.46$, sehingga setiap peningkatan 10 poin SMR berkorelasi dengan peningkatan ~ 0.24 dalam SF, $R^2 = 0.46$ menunjukkan SMR menjelaskan 46% variasi SF, 54% variasi SF dijelaskan oleh faktor lain seperti kondisi air, metode analisis, dan geometri lereng. Persamaan regresi ini bersifat preliminary dan spesifik untuk dataset Indonesia. Tidak disarankan untuk aplikasi prediktif tanpa validasi lebih lanjut dikarenakan sampel size terbatas ($n=8$).

Studi Kasus Penerapan SMR di Tambang Batubara Indonesia

Berikut ringkasan studi kasus representatif yang mendemonstrasikan penerapan dan akurasi SMR.

Tabel 2. Ringkasan Studi Kasus Penerapan SMR di Tambang Batubara Indonesia.

No	Lokasi/Perusahaan	Provinsi	SMR	SF	Validasi
1	PT Bina Sarana Sukses, Pit Y Lowwall	Sumatera Selatan	-	-	Analisis probabilistik
2	PT Tanjung Bukit Nunggal, Bench S & J	Bangka Tengah	71-73	-	-
3	PT Bukit Asam, Air Laya Selatan Suban	Sumatera Selatan	Sangat Baik-Baik	SF single: 3.25-44.74; Overall: 1.85-4.09	Numerical modeling
4	Coal Mine (unnamed)	Kalimantan Selatan	-	Sensitif terhadap dimensi pembukaan	2D/3D modeling
5	Parangtritis Road Cut	Yogyakarta	-	-	91.23% kejadian di zona hazard sedang-tinggi
6	PT Karya Sumber Alam Perkasa, Pit 2	Kalimantan Barat	78	2.458	-
7	Planjan-Tepus Road Cut	Yogyakarta	41-53	Non-seismic: 1.67-1.68; Seismic: 1.14-1.15	Seismic analysis
8	Gondoriyo	Jawa Tengah	20-60	-	-
9	Gunung Batu & Graha Puspa	Jawa Barat	72-96	-	<i>Kinematic analysis</i>
10	Jragung Dam Inlet Portal	Jawa Tengah	Kelas IV (Poor)	-	Memerlukan perbaikan geomekanik
11	Samarinda (Formasi Balikpapan & Pulau Balang)	Kalimantan Timur	≈68.67 (Lereng A)	-	RMR & SMR classification
12	Hative Besar	Maluku	75.5	-	Rock mass Classification

Tabel 3. Analisis Studi Kasus dengan Akurasi yang tinggi.

Lokasi	Jalan Parangtritis, Yogyakarta	PT Bukit Asam, Suban	Gunung Batu & Graha Puspa, Lembang
Metode	SMR-based hazard zonation untuk rockfall assessment	SMR + GeoSlope/W 2007 (Morgenstern-Price)	SMR + kinematic analysis
Validasi	Perbandingan dengan 114 kejadian rockfall historis	Pemodelan numerik 2D dengan multiple scanlines	Kinematic analysis mengkonfirmasi mode kegagalan yang diprediksi SMR
Hasil	91.23% kejadian berada di zona hazard sedang-tinggi yang diprediksi SMR	- SMR "Sangat Baik-Baik" → SF 1.85-4.09 (overall) - SMR tinggi → SF single slopes sangat tinggi (3.25-44.74)	SMR 72-96 (stabil-sangat stabil) dengan identifikasi mode toppling/wedge lokal
Akurasi	Sangat tinggi untuk klasifikasi hazard	Tinggi untuk kondisi kering-normal	Tinggi untuk identifikasi mode kegagalan
Implikasi	SMR efektif untuk screening-level hazard assessment		SMR efektif dikombinasikan dengan kinematik untuk analisis komprehensif
Referensi	Triana, dkk., 2020	Faradibah, dkk., 2007	Cakrabuana, dkk., 2024

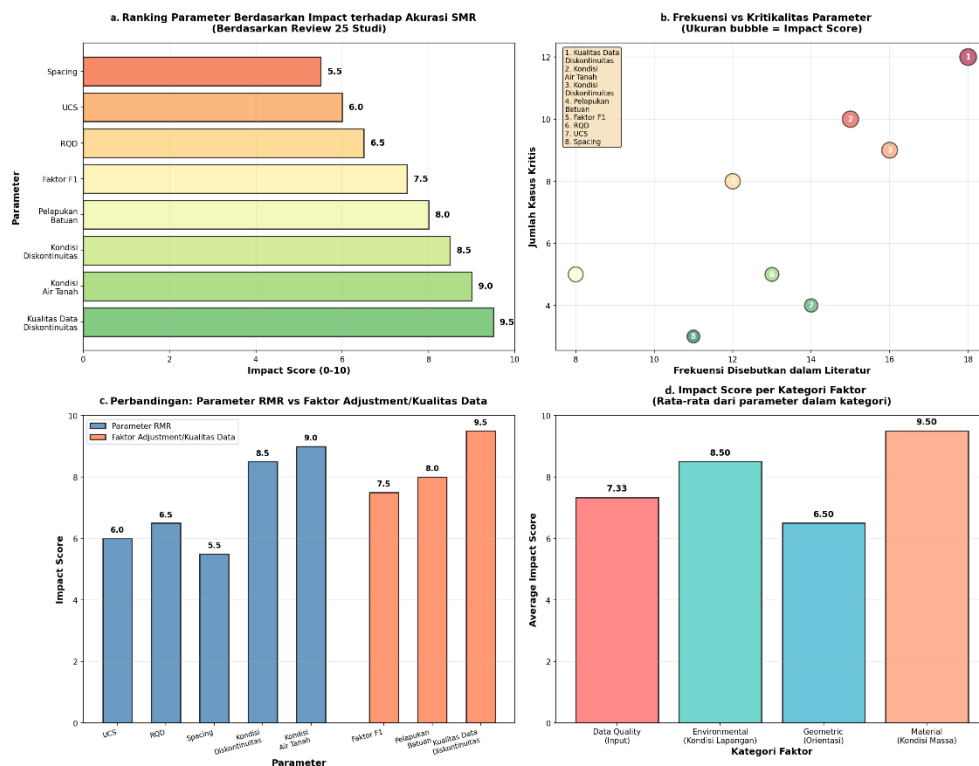
Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Akurasi SMR

Berdasarkan sintesis 25 studi, teridentifikasi faktor-faktor kunci yang mempengaruhi akurasi prediksi SMR, yaitu Kualitas Data Diskontinuitas, Kondisi Air Tanah, Pelapukan Batuan (Weathering), Sensitivitas Faktor F1, Variasi Interpretasi Parameter RMR.

Kualitas Data Diskontinuitas

Faktor yang paling mempengaruhi nya yaitu; akurasi orientasi (strike/dip): Error $\pm 5^\circ$ dalam pengukuran dip dapat mengubah faktor F2 dan F3 signifikan; representativitas sampling: Scanline tunggal mungkin tidak menangkap variabilitas diskontinuitas; identifikasi set dominan: Kesalahan identifikasi set diskontinuitas yang mengontrol kegagalan menyebabkan prediksi mode kegagalan yang salah.

Rekomendasi praktik terbaik yaitu dengan; minimum 3-5 scanline per zone evaluasi; Pengukuran orientasi menggunakan kompas geologi presisi ($\pm 1^\circ$); validasi dengan photogrammetry atau LiDAR jika tersedia; dokumentasi semua set diskontinuitas, tidak hanya yang dominan.



Gambar 5. Faktor Pengaruh Akurasi SMR berdasarkan uji sensitifitas Emperical.

Kondisi Air Tanah

Faktor pengaruh yang signifikan, yaitu; studi menunjukkan penurunan SF hingga 30-40% saat transisi dari kondisi kering ke jenuh; Parameter RMR "groundwater condition" (0-15 poin) sering underestimate dampak aktual; Fluktuasi musiman (hujan vs kemarau)

menciptakan variasi temporal signifikan. Contoh dari data PT Bina Sarana Sukses yaitu Probabilitas longsor 20-40% terkait kondisi jenuh. Selain itu pada lokasi Planjan-Tepus, SF turun dari 1,67 (kering) ke nilai kritis saat jenuh.

Rekomendasi pada parameter kondisi air tanah ini yaitu; evaluasi SMR untuk *multiple scenarios* (kering, lembab, jenuh); monitoring piezometer untuk tracking muka air tanah real-time; *adjustment factor* F4 perlu dimodifikasi untuk kondisi Indonesia.

Pelapukan Batuan (Weathering)

Iklim tropis dapat mempercepat pelapukan sehingga fresh rock dapat menjadi completely weathered dalam 5-10 tahun. Dampaknya menyebabkan UCS batuan segar tidak representatif untuk zona weathered, RQD menurun drastis di zona pelapukan intensif, Kondisi diskontinuitas (roughness, infilling) berubah cepat.

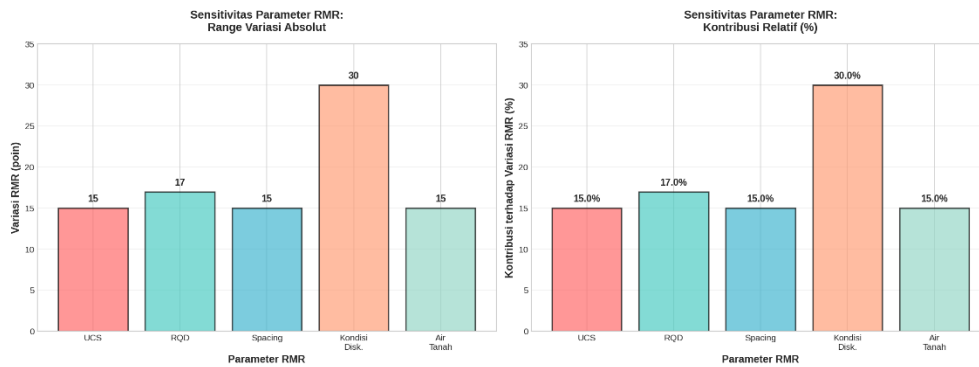
Sensitivitas Faktor F1

Masalah yang telah teridentifikasi yaitu formula original Romana $F1 = (1 - \sin A)^2$ terbukti overestimate pada beberapa kasus; untuk kondisi A (angle between joint strike and slope strike) mendekati 90°, F1 mendekati 1.0, padahal secara kinematik tidak ada potensi kegagalan.

Beberapa studi internasional mengusulkan New Approach Adjustment Factor 2023 (NAAF23). NAAF23 memberikan F1 yang lebih konservatif untuk kondisi high angle intersection, namun belum banyak diterapkan di Indonesia, sehingga perlu validasi lokal yaitu dengan mengkombinasikan SMR dengan kinematic analysis untuk verifikasi; jika $F1 \times F2 \times F3$ menghasilkan nilai adjustment ekstrem, lakukan cross-check dengan stereographic projection; pertimbangkan adopsi NAAF23 setelah validasi pada kondisi Indonesia.

Variasi Interpretasi Parameter RMR

Subjektivitas dalam Penilaian menentukan hasil dari nilai SMR, seperti pada kondisi diskontinuitas (0-30 poin) memiliki parameter dengan subjektivitas tertinggi diantaranya; persistence: sulit diukur akurat di lapangan; roughness: interpretasi visual bervariasi antar engineer; infilling: ketebalan dan jenis material sering tidak terdokumentasi lengkap; RQD: Metode perhitungan bervariasi.



Gambar 6. Analisa Sensitivitas Parameter RMR.

Dampak menengah terhadap observasi yang beragam yaitu; studi menunjukkan variasi hingga ± 10 poin RMR untuk massa batuan yang sama dinilai oleh engineer berbeda; variasi ± 10 poin RMR dapat mengubah kelas SMR, sehingga direkomendasikan untuk standarisasi prosedur pengukuran dan penilaian di level perusahaan/site; kalibrasi antar *engineer* melalui *joint field assessment*; dokumentasi foto untuk setiap parameter yang dinilai; peer review untuk kasus kritis (SMR borderline antara kelas).

Modifikasi dan Adaptasi SMR untuk Kondisi Lokal Indonesia

Berdasarkan review literatur, beberapa modifikasi telah diusulkan atau diterapkan untuk meningkatkan akurasi SMR di Indonesia:

Adjustment untuk Kondisi Iklim Tropis

Usulan Modifikasi F4 (*Excavation Method*) yaitu pada metode Original Romana F4 dimana; *Natural slope*: +15; *Presplitting*: +10; *Smooth blasting*: +8; *Normal blasting*: 0; *Poor blasting*: -8, diubah menjadi; *Natural slope (tropical weathering)*: +10; *Mechanical excavation, dry season*: 0; *Mechanical excavation, wet season*: -5 (kategori baru); *Mechanical excavation, continuously saturated*: -10 (kategori baru).

Alasannya dikarenakan *natural slopes* di tropis lebih rentan karena pelapukan lebih intensif, kondisi musim hujan signifikan menurunkan kekuatan massa batuan; *mechanical excavation* dominan di Indonesia (blasting terbatas). Namun demikian, hal ini perlu dilakukan validasi empiris untuk menjadi pendukung.

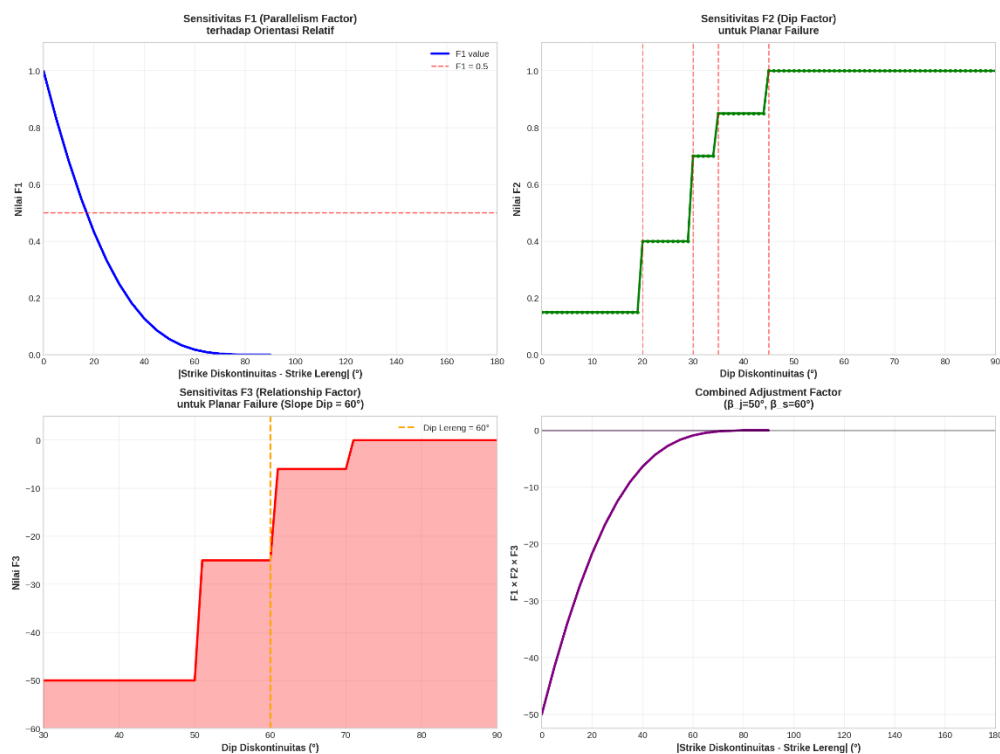
Adjustment Seasonal SMR

Konsep untuk menyesuaikan musim terhadap penilaian SMR dengan menghitung SMR berdasarkan 2 kondisi musim yaitu SMR_{dry}: kondisi kemarau dimana *groundwater rating* nya maksimal, sedangkan yang lain adalah SMR_{wet}: Kondisi puncak musim hujan dimana *groundwater rating* minimal. Untuk Rumus nya $SMR_{operational} = (SMR_{dry} + SMR_{wet}) / 2$; dengan $Safety_margin = SMR_{dry} - SMR_{wet}$. penyesuaian ini menggunakan interpretasi

yaitu; $Safety_margin < 10$: Stabil sepanjang tahun; $Safety_margin 10-20$: Monitoring intensif saat musim hujan; $Safety_margin > 20$: Desain ulang atau drainage improvement diperlukan.

Integrasi dengan Geological Strength Index (GSI)

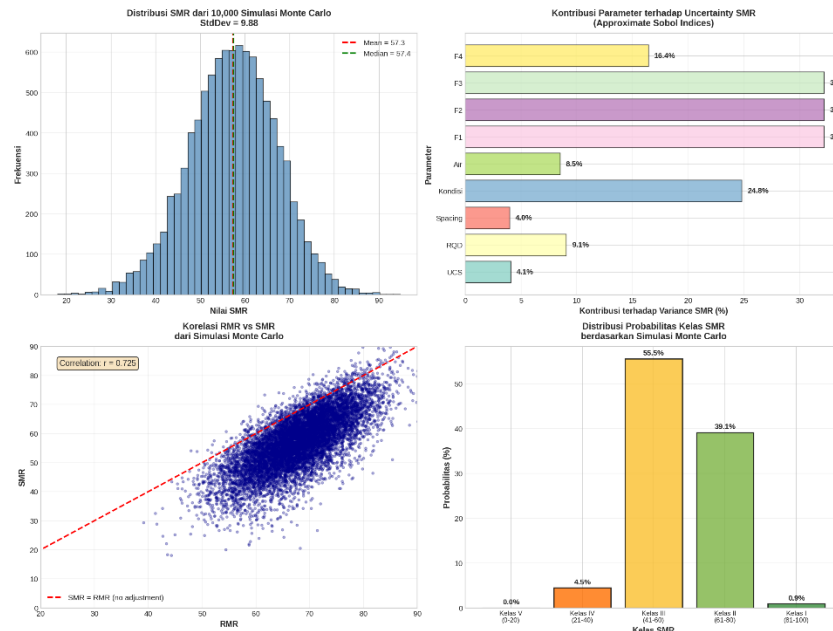
Beberapa studi internasional mengusulkan GSIslope sebagai adaptasi GSI untuk lereng, yaitu dengan menggabungkan *visual assessment* GSI dengan faktor penyesuaian mirip SMR. GSIslope tersebut lebih cepat dari SMR tradisional, cocok untuk *preliminary assessment*. Metode ini belum banyak diterapkan, tetapi potensial untuk kondisi *highly weathered rock* dimana RMR sulit diterapkan namun perlu validasi untuk formasi batubara Indonesia.



Gambar 7. Analisis Sensitivitas Faktor Adjustment SMR.

SMR dengan pendekatan Probabilistic

Konsep dari metode ini adalah dengan mengakui ketidakpastian dalam parameter SMR dan menggunakan pendekatan probabilistik. Langkah-langkah nya adalah, mengidentifikasi parameter dengan *uncertainty* tinggi (misal: UCS, *discontinuity condition*); *assign probability distribution* untuk setiap parameter (normal, uniform, triangular); Penggunaan Monte Carlo simulation untuk menghasilkan distribusi nilai SMR; yang output nya adalah Probabilitas lereng berada di setiap kelas SMR.



Gambar 8. Analisis Sensitifitas menggunakan Monte Carlo.

Keunggulan dari metode ini adalah, mengkuantifikasi uncertainty; memberikan *confidence level* untuk pengambilan keputusan; cocok untuk *risk-based slope design*. Namun, keterbatasan dari penggunaan metode ini adalah, memerlukan data statistik parameter (mean, std dev); *computational intensive*; interpretasi lebih kompleks untuk non-specialist.

Kesimpulan Validasi

Akurasi secara keseluruhan berdasarkan sintesis bukti yaitu; klasifikasi hazard: Akurasi tinggi (85-95%) untuk membedakan stable atau unstable slopes; Prediksi mode kelongsoran: Akurasi sedang-tinggi (70-85%) ketika dikombinasikan dengan *kinematic analysis*; prediksi waktu runtuh: SMR tidak dirancang untuk ini, sehingga tidak dapat di aplikasikan; estimasi magnitude failure: Akurasi rendah, SMR tidak memprediksi volume/magnitude.

Faktor yang Meningkatkan Akurasi SMR yaitu, kualitas data diskontinuitas tinggi (*multiple scanlines, comprehensive measurements*); validasi dengan *kinematic analysis*; *adjustment* untuk kondisi lokal (*groundwater, weathering*); kombinasi dengan numerical modeling untuk SF calculation. Sedangkan untuk faktor yang menurunkan akurasi yaitu; *incomplete discontinuity data (single scanline, limited measurements)*; *rapid changes in groundwater condition*; *Undetected local unfavorable structures*; *Blast-induced damage (new fractures)*.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Metode Slope Mass Rating (SMR) telah terbukti sebagai metode yang layak untuk evaluasi kestabilan lereng tambang batubara di Indonesia, dengan akurasi yang dapat diterima

sebagai *screening* dan penilaian awal. Namun, akurasi dan reliabilitasnya sangat bergantung pada kualitas data input, kualifikasi engineer yang melakukan assessment, dan integrasi dengan metode analisis lainnya.

Kondisi geologis dan iklim Indonesia yang unik yaitu, pelapukan intensif, fluktuasi air tanah yang ekstrem, dan variabilitas stratigrafis yang tinggi sehingga memerlukan adaptasi dan modifikasi metode SMR original. Penelitian lanjutan untuk mengembangkan faktor penyesuaian yang spesifik untuk di Indonesia dan validasi kuantitatif beragam lokasi sangat diperlukan.

Kombinasi SMR dengan analisis kinematik dan model numerik yang didukung oleh monitoring lapangan yang sistematis, merupakan *best practice* yang harus diadopsi oleh industri pertambangan batubara Indonesia untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi operasional, dan keberlanjutan lingkungan.

DAFTAR REFERENSI

- Astuti, T. P., Indrawan, I. G. B., & Barianto, D. H. (2022). Stability analysis of cut slope using RMR and SMR. *Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE)*, 3(3), 135–149. <https://doi.org/10.32722/arcee.v3i03.4783>
- Bagyo Mulyo, A., Indrawan, I. G. B., & Anggara, F. (2024). Rock mass characterization and slope stability analysis inlet portal of Jragung Dam diversion tunnel, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1378(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1378/1/012018>
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley.
- Cakrabuana, W., Sadisun, I. A., Tohari, A., Dinata, I. A., Martireni, A. P., Mahmud, H. Z., Nareswari, R. B., Hermawan, K., & Atmojo, H. T. (2024). Andesite slope stability analysis using Rock Mass Rating (RMR) and Slope Mass Rating (SMR) in Gunung Batu and Graha Puspa areas, West Bandung Regency, West Java, Indonesia. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 39(4), 137–151. <https://doi.org/10.17794/rgn.2024.4.11>
- Dandy, L., Khoirullah, N., & Hamdani, A. H. (2023). Nilai kualitas massa batuan dengan metode Rock Mass Rating pada area lowwall pit X, PT Bukit Asam Tbk, Sumatera Selatan. *Jurnal Geominerba*, 8(2), 108–118. <https://doi.org/10.58522/ppsdm22.v8i2.139>
- Faradibah, N., Apriyanti, Y., & Irvani, I. (2020). Analisis kestabilan lereng menggunakan metode Slope Mass Rating (SMR) dan software Geoslope/W 2007 pada Tambang Air Laya Selatan lokasi Suban di PT Bukit Asam (Persero) Tbk. *MINERAL*, 1(1), 17–25. <https://doi.org/10.33019/mineral.v1i1.1605>
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.

- Kololu, M., Rikumahu, M. V., Thohirah, A., & Rumpakwakra, E. (2023). Analisis kestabilan lereng batuan dengan menggunakan klasifikasi massa batuan di daerah Hative Besar. *Jurnal Teknik Mesin, Elektro, Informatika, Kelautan dan Sains*, 3(2), 62–71. <https://doi.org/10.30598/metiks.2023.3.2.62-71>
- Najib, N., Belia, N. P., Hidayatillah, A. S., & Nugroho, K. S. A. (2024). Coal mine slope stability analysis using the Rock Mass Rating (RMR), Slope Mass Rating (SMR) method, and Morgenstern–Price limit equilibrium for the Low Wall Pit Area Y PT Bina Sarana Sukses, Lahat Regency, South Sumatra. *TEKNIK*, 45(2), 170–182. <https://doi.org/10.14710/teknik.v45i2.57786>
- Peralta, T., Menoscal, M., Bravo, G., Rosado, V., Vaca, V., Capa, D., Mulas, M., & Jordá-Bordehore, L. (2024). Rock slope stability analysis using terrestrial photogrammetry and virtual reality on ignimbritic deposits. *Journal of Imaging*, 10(5), 106. <https://doi.org/10.3390/jimaging10050106>
- Permatasani, A. D. (2023). Kajian gerakan massa berdasarkan klasifikasi RMR dan SMR di Gondoriyo dan sekitarnya, Kecamatan Todanan, Kabupaten Blora, Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Ilmiah MTG*, 14(1). <https://doi.org/10.31315/jmtg.v14i1.10181>
- Ridwan, M. (2022). Penentuan kelas massa batuan dengan klasifikasi Rock Mass Rating (RMR) dan Slope Mass Rating (SMR) pada Formasi Balikpapan dan Pulau Balang di Kota Samarinda. *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, 10(2), 12. <https://doi.org/10.30872/jtm.v10i2.8066>
- Riswandi, H., & Fitri, A. (2024). Geologi dan pengaruh struktur kekar terhadap kestabilan lereng desain pit pada tambang terbuka batubara Kecamatan Lawang Kidul, Kabupaten Muaraenim, Sumatra Selatan. *Jurnal Ilmiah Geologi PANGEA*, 11(2), 1. <https://doi.org/10.31315/jigp.v11i2.12939>
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *International Symposium on the Role of Rock Mechanics*, 49–53.
- Salsabila, Z. N., Putranto, T. T., & Najib, N. (2023). Slope stability analysis for slope geometry evaluation using RMR, SMR, and Morgenstern–Price methods in pits C2 and C4 of PT Menara Cipta Mulia Mayang Block open pit tin mine, East Belitung Regency, Bangka Belitung Islands. *TEKNIK*, 44(2), 176–187. <https://doi.org/10.14710/teknik.v44i2.57004>
- Siddique, T. (2024). Rock mass classification in slope engineering with special emphasis on Slope Mass Rating: Current status and future projections. *Geological Journal*, 59(9), 2472–2486. <https://doi.org/10.1002/gj.4933>
- Sitohang, E. I., Pitulima, J., & Oktarianty, H. (2022). Penilaian tingkat kestabilan lereng dengan metode Slope Mass Rating (SMR) pada Bench S dan J PT Tanjung Bukit Nunggal Kabupaten Bangka Tengah. *MINERAL*, 7(1), 29–35. <https://doi.org/10.33019/mineral.v7i1.3335>
- Sujiman, S., Sundek, H., & A. B., S. (2024). Mine landslide management sustainability model in Kutai Kartanegara Regency, East Kalimantan, Indonesia. *Environmental Research, Engineering and Management*, 80(1), 50–63. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.80.1.33272>
- Taufiq, M. M., Sophian, I., Khoirullah, N., & Zakaria, Z. (2022). Kemampugalian kuari andesit Gunung Geulis, Kecamatan Jatinangor, Kabupaten Sumedang, Provinsi Jawa Barat.

Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 18(2), 69–79.
<https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol18.No2.2022.1257>

- Triana, K., & Hermawan, K. (2020). Slope Mass Rating-based analysis to assess rockfall hazard on Yogyakarta Southern Mountain, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 7(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00164-w>
- Vera, T. V., Saptono, S., Arindry, A. P. P., & Cholid, M. (2024). Comparison of slope stability analysis results with rock mass classification: Case study of the slope of Ende–Lianunu highway STA 16+878, East Nusa Tenggara Province. *AIP Conference Proceedings*, 080001. <https://doi.org/10.1063/5.0184158>
- Wildani, E., Meilasari, F., Purwoko, B., Sutrisno, H., & Syahrudin, S. (2022). Slope stability technical study using Slope Mass Rating (SMR) method at PT Karya Sumber Alam Perkasa, Sanggau Regency, Kalimantan Barat. *Jurnal Teknik Sipil*, 22(2), 185. <https://doi.org/10.26418/jtst.v22i2.57303>
- Zerradi, Y., Soufi, A., Souissi, M., Bennouna, R., Annaque, A., & Bahi, A. (2024). Bench stability design based on SMR, Q-slope, block theory and kinematic analysis. *Civil Engineering and Architecture*, 12(3), 1499–1515. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120318>
- Zerradi, Y., Souissi, M., Soufi, A., Bennouna, R., Bahi, A., & Zaki, I. (2023). Slope stability assessment using Slope Mass Rating (SMR), key block theory, and kinematic analysis: A case study. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 58(4). <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.58.4.45>