

PENILAIAN RISIKO GEOMEKANIK TAMBANG LOKAL DENGAN METODE ROCK MASS RATING DI LOA JANAN SAMARINDA

Muhammad Ali Shodiqin

Master of Urban Regional Planning, Faculty of Undergraduate, University of Palangka Raya
St. Hendrik Timang, Palangka Raya 73111A, Indonesia
e-mail: ali.shodiqin@geologist.com

Tari Budayanti Usop

Master of Urban Regional Planning, Faculty of Undergraduate, University of Palangka Raya
St. Hendrik Timang, Palangka Raya 73111A, Indonesia

Theresia Susi

Master of Urban Regional Planning, Faculty of Undergraduate, University of Palangka Raya
St. Hendrik Timang, Palangka Raya 73111A, Indonesia

Singgih Hartanto

Master of Urban Regional Planning, Faculty of Undergraduate, University of Palangka Raya
St. Hendrik Timang, Palangka Raya 73111A, Indonesia

Herwin Sutrisno

Master of Urban Regional Planning, Faculty of Undergraduate, University of Palangka Raya
St. Hendrik Timang, Palangka Raya 73111A, Indonesia

Indrawan Permana

Master of Urban Regional Planning, Faculty of Undergraduate, University of Palangka Raya
St. Hendrik Timang, Palangka Raya 73111A, Indonesia

Petrisly Perkasa

Master of Urban Regional Planning, Faculty of Undergraduate, University of Palangka Raya
St. Hendrik Timang, Palangka Raya 73111A, Indonesia

Abstract: This research explores slope stability at a sandstone mine in Loa Janan Ilir sub-district, Samarinda City, by applying the Rock Mass Rating (RMR) method to identify potential geotechnical risks. The 30-meter Scanline method was used to collect structural data on the bridges, while five key RMR parameters, including uniaxial compressive strength and Rock Quality Designation (RQD), were analyzed to determine the quality of the rock mass. The results revealed that the rock mass at the site has an RMR value of 33.5425, which classifies the slope condition as class IV (poor). This finding highlights the great potential for wedge avalanches to occur, which could threaten the safety of workers and mining operations. As such, this study offers critical insights that can drive decision-making in risk mitigation and safer mine management in the area.

Keywords: Rock Mass Rating (RMR), Slope Stability, Rock Mass Classification

Abstrak: Penelitian ini mengeksplorasi kestabilan lereng di tambang batupasir Kecamatan Loa Janan Ilir, Kota Samarinda, dengan menerapkan metode *Rock Mass Rating* (RMR) untuk mengidentifikasi potensi risiko geoteknik. Metode Scanline sepanjang 30 meter digunakan untuk mengumpulkan data struktur kekar, sementara lima parameter utama RMR, termasuk kuat tekan uniaksial dan *Rock Quality Designation* (RQD), dianalisis untuk menentukan kualitas massa batuan. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa massa batuan di lokasi tersebut memiliki nilai RMR sebesar 33,5425, yang mengklasifikasikan kondisi lereng sebagai kelas IV (buruk). Temuan ini menyoroti potensi besar terjadinya longsoran baji, yang dapat mengancam keselamatan pekerja dan operasi penambangan. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan wawasan kritis yang dapat mendorong pengambilan keputusan dalam mitigasi risiko dan pengelolaan tambang yang lebih aman di daerah tersebut.

Kata kunci: : *Rock Mass Rating* (RMR), Stabilitas Lereng, Klasifikasi Massa Batuan

PENDAHULUAN

Kestabilan lereng merupakan faktor kritis dalam operasi penambangan, terutama di daerah dengan kondisi geologi yang kompleks seperti di Kecamatan Loa Janan Ilir, Kota Samarinda. Lereng yang curam dapat meningkatkan risiko longsor, yang tidak hanya membahayakan keselamatan pekerja tambang tetapi juga dapat mengganggu proses produksi secara keseluruhan. Oleh karena itu, penilaian geoteknik yang akurat sangat penting untuk menentukan langkah-langkah mitigasi yang diperlukan.

Metode *Rock Mass Rating* (RMR) adalah salah satu metode yang paling luas digunakan untuk mengevaluasi kualitas massa batuan dan kestabilan lereng. Dikembangkan oleh Bieniawski pada tahun 1973, metode ini telah diterapkan dalam berbagai situasi geoteknik, termasuk desain terowongan, fondasi, dan penambangan. RMR menggunakan lima parameter utama ; kuat tekan uniaksial, *Rock Quality Designation* (RQD), spasi kekar, kondisi kekar, dan kondisi air tanah. Untuk mengklasifikasikan massa batuan dan memberikan panduan bagi tindakan mitigasi yang diperlukan.

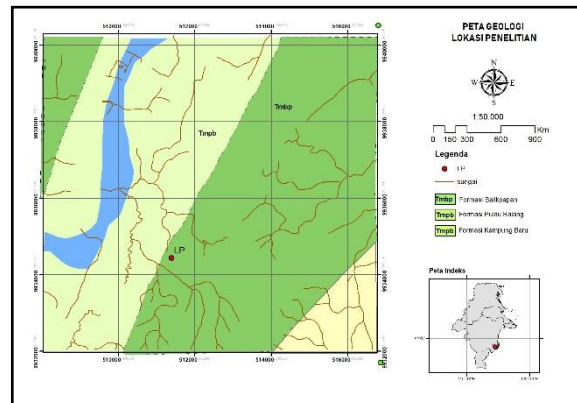
Penelitian ini dilakukan untuk menilai kestabilan lereng di tambang batupasir di Kecamatan Loa Janan Ilir, dengan menggunakan metode RMR. Xu, Zhao, & Zhou (2022) menekankan pentingnya penggunaan RMR dalam klasifikasi geoteknik untuk stabilitas lereng di penambangan terbuka.

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis untuk meningkatkan keselamatan kerja di lokasi tersebut. Studi komparatif menunjukkan variasi klasifikasi massa batuan dalam kondisi batuan yang lemah dan retak (Song & Min, 2019).

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan di tambang batupasir yang terletak di Kecamatan Loa Janan Ilir, Kota Samarinda. Daerah ini dikenal memiliki kemiringan lereng yang cukup curam, yang meningkatkan risiko longsor. Massa batuan dapat diperkirakan secara empiris untuk mendukung analisis geoteknik (Hoek &

Diederichs, 2015). Sistem RMR, memainkan peran kunci dalam karakterisasi massa batuan (Moghaddam & Koohmishi, 2017). Penelitian ini memfokuskan pada pengumpulan data geologi dan geoteknik untuk mengevaluasi kualitas massa batuan di lokasi tersebut. pendekatan baru dalam klasifikasi massa batuan dengan mengintegrasikan RMR (Guo & Zhao, 2023)



Gambar 1. Peta Geologi Daerah Penelitian

Lokasi penelitian berada pada formasi Balikpapan (Gambar 1). Formasi Balikpapan tersusun dari perselingan batupasir kuarsa, batulempung lanauan dan serpih dengan sisipan napal, batugamping dan batubara (Supriatna & Rustandi, 1995).

Data dikumpulkan menggunakan metode *Scanline* sepanjang 30 meter untuk mengukur struktur kekar di lokasi penelitian. Metode ini memungkinkan identifikasi dan pengukuran parameter-parameter penting yang digunakan dalam analisis RMR. Hasil uji lapangan langsung dengan estimasi tidak langsung untuk menentukan deformasi massa batuan (Palmstrom & Singh, 2018). Selain itu, sampel batuan diambil dari lokasi penelitian untuk diuji di laboratorium, guna menentukan kuat tekan uniaksial (UCS) dari batuan tersebut. Penilaian stabilitas lereng alami sangat penting untuk mengantisipasi bahaya longsor (Aydan & Ulusay, 2016).

Tabel 1. Rock Mass Rating System (Bieniawski, 1973)

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90%- 100%	75%- 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
	5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125	
(Joint water press)/ (Major principal σ)			0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
General conditions			Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
Rating		15	10	7	4	0			
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating			100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Friction angle of rock mass (deg)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Rating			6	4	2	1	0		
Separation (aperture)			None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Rating			6	5	4	1	0		
Roughness			Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating			6	5	3	1	0		
Infilling (gouge)			None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm		
Rating			6	4	2	2	0		
Weathering			Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Ratings			6	5	3	1	0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis					Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip - Dip 45 - 90°			Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°		
Very favourable			Favourable		Very favourable		Fair		
Drive against dip - Dip 45-90°			Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike°				
Fair			Unfavourable		Fair				

* Some conditions are mutually exclusive. For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

Sistem Rock Mass Rating (RMR) secara signifikan mempengaruhi evaluasi kestabilan lereng dalam operasi tambang terbuka (Ahmed & Zhang, 2024). penilaian stabilitas lereng menggunakan RMR dan SMR memberikan wawasan penting untuk mitigasi risiko longsor di tambang (Aladejare & Ngwang, 2020). Wang, Li, & Zhang (2021) mengemukakan bahwa analisis stabilitas lereng di area dengan ketinggian tinggi memerlukan penggunaan metode RMR.

Lima parameter utama yang digunakan dalam analisis RMR adalah:

- Kuat Tekan Uniaksial (UCS) : Uji kuat tekan dilakukan di laboratorium untuk menentukan kekuatan batuan utuh.
- *Rock Quality Designation* (RQD) : RQD diukur untuk menentukan tingkat retakan pada massa batuan.

$$RQD = 100 \cdot e^{(-1 \cdot \lambda)} (0.1 \lambda + 1) \quad (1)$$

λ adalah ratio antara jumlah kekar dengan panjang scan-line (kekar/meter) Makin besar nilai RQD, maka frekuensi retakannya kecil dan sebaliknya makin kecil nilai RQD makin banyak retakannya.

- Spasi Kekar : Jarak antar kekar diukur untuk menentukan spasi kekar.
- Kondisi Kekar : Deskripsi langsung dilakukan di lapangan untuk menentukan kekasaran, pelapukan, dan kondisi fisik lainnya dari kekar.
- Kondisi Air Tanah : Debit air tanah dan kelembaban diukur untuk menentukan pengaruh air terhadap kekuatan massa batuan.

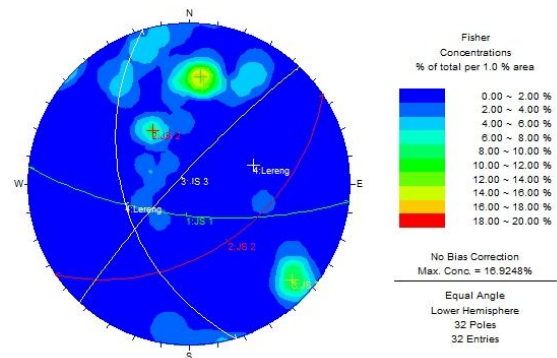
Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis untuk menentukan nilai RMR dan klasifikasi massa batuan di lokasi penelitian.

Orientasi Kekar : Penyesuaian orientasi kekar ini umumnya diterapkan setelah menghitung nilai RMR berdasarkan lima parameter utama. Penyesuaian orientasi kekar ini bervariasi tergantung pada jenis struktur geologi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran dan analisis

Dari hasil pengukuran kekar dengan panjang *Scanline* 30 meter, didapatkan 32 kekar dan kedudukan lereng N 73°E/45°. Kekar tersebut berada pada 3 *Joint Set* seperti pada gambar 2. Dari massa batuan yang diteliti, diambil 3 sampel batuan untuk digunakan dalam uji sifat fisik. Berikut ini adalah hasil uji sifat fisik batuan (Tabel 4).



Gambar 2. Proyeksi Streografis

Tabel 2. Hasil Uji Sifat Fisik Massa Batuan

No	Contoh Uji	Satuan	1	2	3
1	Nomor Cawan	AS2	832	556	
2	Berat Contoh	gr	28.1	26.3	27.7
3	Berat Contoh Batuan Jenuh	gr	29	28.6	27.2
4	Berat Contoh Batuan Jenuh Gantung	gr	19.6	20.2	12.4
5	Berat Contoh Kering	gr	25.3	25.3	24.1
6	Kadar Air	%	0.1106	0.0395	0.149
7	Kadar Air Rata-rata	%	0.0998	0.0998	0.0998
8	Natural Density	gr/cm 2	2.989	3.13	1.871
9	Dry Density	gr/cm 2	2.691	3.011	1.628
10	Apparent spesifik	per bobot isi air	2.691	3.011	1.628
11	Natural Water Content	%	0.1106	0.0395	0.149
12	Degree Of Saturation	%	0.756	0.303	1.161
13	Porosity	%	0.393	0.3928	1.48
14	Void Ratio	%	0.00394	0.00339	-1.072
15	True Specific Gravity	per bobot isi air	4.438	4.96	2.059
16	Saturated Density	gr/cm 2	3.085	3.404	1.837
17	Saturated Water Content	%	0.1462	0.1304	0.1286

Hasil pengukuran di lapangan menunjukkan bahwa lokasi penelitian memiliki struktur kekar yang signifikan, dengan nilai RMR yang diperoleh sebesar 33,5425. Nilai ini mengklasifikasikan massa batuan di lokasi penelitian ke dalam kelas IV, yang berarti bahwa kondisi massa batuan dinilai buruk. Berikut adalah hasil dari setiap parameter yang diukur:

- Kuat Tekan Uniaksial (UCS) : Pengujian *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) dilakukan dengan cara pengujian dilaboratorium dengan alat bantu mesin tekan. Pengujian kuat tekan batuan ini dilakukan sebanyak 3 kali pengujian.

Setelah didapatkan nilai kuat tekan kemudian, dilakukan perhitungan seperti pada persamaan :

$$\begin{aligned} \text{Kuat tekan } (T_c) &= F_{\text{failure}}/A \\ &= 22 \text{ Kn} / 0.0025 \text{ m}^2 \\ &= 8.8 \text{ Mpa} \end{aligned} \quad (1)$$

Hasil uji UCS menunjukkan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 8,8 MPa, maka nilai bobot *Rock Mass Rating* (RMR) untuk parameter kekuatan batuan utuh adalah 2.

- **Rock Quality Designation (RQD)** : Perhitungan nilai RQD yang dilakukan pada lokasi penelitian yaitu secara langsung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut ;

$$\begin{aligned} RQD &= 100 \cdot e^{(-1.1\lambda)}(0.1\lambda + 1) \\ &= 100 \cdot e^{(-0.18)}(1.0018) \\ &= 99.98 \% \end{aligned} \quad (2)$$

Nilai RQD yang diperoleh adalah 99,98%, yang menunjukkan bahwa batuan memiliki derajat retakan yang rendah, namun masih diklasifikasikan sebagai batuan dengan kualitas sedang. Dari hasil pembobotan yang mengacu pada (tabel 2) untuk pengklasifikasian dan bobot dapat disimpulkan bahwa nilai bobot RQD pada daerah telitian adalah 20.

- **Spasi Kekar** : Pengukuran jarak spasi kekar dilakukan pada lokasi penelitian yaitu secara langsung dengan cara melakukan pengukuran jarak dua bidang kekar tegak lurus yang terdekat. Kemudian dilakukan perhitungan dengan persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{1}{\text{spasi kekar}} = \frac{1}{5.41} = 0.18 \text{ joints/m} \quad (3)$$

Spasi kekar yang diukur memiliki nilai rata-rata 0,18 *joints/meter*, yang mengindikasikan spasi kekar yang cukup rapat dan memberikan nilai bobot 8 moderat dalam analisis RMR.

- **Kondisi Kekar** : Deskripsi lapangan menunjukkan bahwa kondisi kekar cukup

bervariasi, dengan nilai total bobot 14,48. Berdasarkan data lapangan yang didapat seperti pada tabel berikut:

Tabel 3. Pembobotan Nilai Kondisi Kekar

Kondisi kekar	Rata-rata Nilai Bobot
Presisitensi	2.09
Kekasaran	4.25
Jarak bukaan kekar	0.63
Material pengisi	3.25
Pelapukan	4.04
Jumlah Bobot	14.48

- **Kondisi Air Tanah** : Air tanah di lokasi penelitian umumnya dalam kondisi lembab, dengan nilai rata-rata bobot 14,0625.
- **Orientasi Kekar** : Berdasarkan pengukuran kedudukan kekar secara langsung dilapangan pada lokasi telitian dengan panjang scanline 30 meter dan dapatkan 32 jumlah kekar kemudian, dilakukan perhitungan dengan persamaan (4) untuk strike dan persamaan (5) untuk dip.

$$\begin{aligned} \text{Strike Rata-rata kekar} &= \frac{\Delta \text{ strike kekar}}{\text{Jumlah Strike kekar}} = \frac{3.840}{32} = N 120^{\circ} E \end{aligned} \quad (4)$$

Dip Rata-rata kekar

$$= \frac{\Delta \text{ dip kekar}}{\text{Jumlah dip kekar}} = \frac{1.984}{32} = 62^{\circ} \quad (5)$$

Dari hasil perhitungan di atas didapatkan nilai rata-rata strike dan dip yang diamati dilapangan yaitu N120°E / 62°. Dari hasil perhitungan yang didapatkan dan kemudian dilakukan penginterpretasian data kekar. Pengorientasian kekar adalah sedang dengan nilai bobot -25.

Rekapitulasi pembobotan RMR

Nilai bobot *Rock Mass Rating* (RMR) dari lima parameter yang didapatkan, maka nilai bobot RMR yang diperoleh pada lokasi penelitian dapat direkapitulasi dan ditentukan dari kelas massa batuan yang terdapat pada lokasi penelitian.

Tabel 4. Rekapitulasi Pembobotan *Rock Mass Rating* (RMR)

Parameter	Nilai Kekar		Bobot
Kuat Tekan (UCS)	8.8 Mpa		2
RQD	99.98%		20
Kondisi Airtanah	Kering - Basah		14.0625
Jarak Kekar	0.18 M		8
Kondisi Kekar	Persistensi Kekar	2.09	14.48
	Kekasaran	4.25	
	Jarak <i>aperture</i> kekar	0.63	
	Material Pengisi	3.25	
Orientasi Kekar	Pelapukan	4.04	-25
	Sedang	N 120° E/ 62	
Jumlah Bobot			33.5425
Kelas Massa Batuan			IV

Interpretasi dan pembahasan

Berdasarkan hasil analisis RMR, massa batuan di lokasi penelitian masuk dalam kelas IV (buruk), yang mengindikasikan risiko kestabilan lereng yang rendah. Kombinasi dari kemiringan lereng yang curam dan struktur kekar yang saling berpotongan meningkatkan potensi terjadinya longsoran baji. Hal ini diperburuk oleh kondisi air tanah yang lembab, yang dapat mengurangi kekuatan massa batuan lebih lanjut.

Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa area tambang batupasir di Kecamatan Loa Janan Ilir berpotensi tinggi untuk mengalami longsor jika tidak dilakukan tindakan mitigasi. Dalam operasi penambangan, kondisi ini sangat berbahaya dan memerlukan intervensi segera untuk mencegah terjadinya kecelakaan kerja.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa massa batuan di tambang batupasir Kecamatan Loa Janan Ilir, Kota Samarinda, diklasifikasikan dalam kelas IV (buruk) berdasarkan analisis Rock Mass Rating (RMR). Nilai RMR sebesar 33,5425 menunjukkan bahwa kestabilan lereng di lokasi penelitian sangat rendah, dengan potensi tinggi untuk terjadinya longsoran baji. Peneliti menyimpulkan bahwa pada tambang batupasir yang berlokasi di Kecamatan Loa Janan Ilir Kota Samarinda sangat rawan.

Oleh karena itu, diperlukan tindakan mitigasi segera, termasuk monitoring berkala dan analisis lanjutan, untuk memastikan

keselamatan pekerja tambang dan kelancaran operasi penambangan.

SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, beberapa saran dapat diberikan untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi di lokasi tambang batupasir :

- **Monitoring Berkala** : Penting untuk melakukan monitoring berkala terhadap kondisi lereng di lokasi penelitian guna mendeteksi potensi longsor secara dini.
- **Analisis Lanjutan** : Disarankan untuk melakukan analisis lebih lanjut menggunakan metode geoteknik lainnya untuk memperkuat hasil penelitian ini dan mengembangkan strategi mitigasi yang lebih efektif.
- **Peningkatan Infrastruktur** : Penambahan infrastruktur pendukung, seperti drainase yang lebih baik dan penguatan lereng, dapat membantu mengurangi risiko longsor di area tambang.
- **Pendidikan dan Pelatihan** : Pekerja tambang perlu diberikan pendidikan dan pelatihan terkait risiko longsor dan langkah-langkah mitigasi yang dapat diambil untuk mengurangi risiko tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., & Zhang, L. (2024). "Rock mass rating system and its implications on slope stability and underground excavations: A review". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(1), 115-129.
- Aladejare, A. E., & Ngwang, P. S. (2020). "Assessment of rock mass characterization and rock slope stability using RMR and SMR approaches". *Journal of Applied Geophysics*, 178, 104063.
- Arief, S. (2007). *Dasar-dasar Analisis Kestabilan Lereng*. Sorowako: PT INCO
- Askari Rijal. (2017). "Studi Kestabilan Lereng Menggunakan Metode Rock Mass Rating (RMR) pada Lereng Bekas Penambangan di Kecamatan Lhoong Aceh Besar". *Jurnal Ilmiah Teknik Kebumihan*. Universitas Syiah Kuala.
- Aydan, Ö., & Ulusay, R. (2016). "Assessment of slope stability and rockfall hazard

- potential of a natural rock slope: a case study from Turkey". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 705-716.
- Bieniawski, Z.T. (1973). *Engineering Rock Mass Classification: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. John Wiley & Sons Inc., Canada.
- Guo, H., & Zhao, J. (2023). "A new approach to rock mass classification in deep underground engineering based on rock mass rating and geological strength index". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 126, 104563.
- Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2015). "Empirical estimation of rock mass modulus". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 70, 71-77.
- Moghaddam, A. B., & Koohmishi, M. (2017). "Application of RMR, Q, and GSI systems for rock mass characterization in tunneling: A case study from Golab tunnel, Iran". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4), 725-738.
- Palmstrom, A., & Singh, R. (2018). "The deformation modulus of rock masses—comparisons between in situ tests and indirect estimates". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 186-202.
- Rai, Made Astawa, dkk. 2012. *Mekanika Batuan*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Supriatna, dkk. (1995). *Peta Geologi Lembar Samarinda, Kalimantan*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Song, Y., & Min, K. B. (2019). "Comparative study of rock mass classification systems for tunneling in weak and fractured rock masses". *Journal of the Geological Society of Korea*, 55(6), 719-729.
- Wang, S., Li, S., & Zhang, Q. (2021). "Rock mass classification and rock slope stability analysis in high-altitude areas using RMR and SMR methods". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2), 895-907.
- Xu, Q., Zhao, M., & Zhou, C. (2022). "Review of slope stability in open pit mining and the use of RMR for geotechnical classification". *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(3), 1701-1723.