

Determinasi dan penerapan Rock Mass Rating untuk penilaian stabilitas lereng andesit di Seloharjo, Bantul.

Arie Noor Rakhman *¹

1 Universitas AKPRIND Indonesia Yogyakarta
Jl. Kalisahak No. 28, Kompleks Balapan, Yogyakarta 55222
arie_rakhman@akprind.ac.id

Abstrak

Ketidakstabilan lereng merupakan masalah penting bagi lingkungan sekitarnya, sehingga penyelidikan yang cermat dan teliti terhadap stabilitas lereng menjadi sangat penting. Lokasi penelitian berada di Seloharjo, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Sejak gempa tahun 2006 dengan kekuatan 5,9 pada Skala Richter, serangkaian gempa dengan kekuatan yang lebih rendah terus terjadi. Getaran gempa di wilayah tersebut memiliki potensi untuk memicu ketidakstabilan lereng. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik stabilitas lereng batuan dengan menerapkan metode *Rock Mass Rating* (RMR). Objek penelitian merupakan lereng batuan yang disusun lava andesit Nglanggran. Penelitian menggunakan parameter dalam RMR versi 1979 yang disertai dengan analisis kinematika berikut data kondisi orientasi kekar dan lereng batuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keseluruhan lereng cenderung stabil. Namun demikian teridentifikasi bahwa longsoran jenis baji paling berpotensi terjadi dengan arah longsoran ke arah barat daya, N292°E - N322°E. Kehadiran zona sesar sebagai pemicu gempa di sekitar Kali Opak menimbulkan perlunya meningkatkan kewaspadaan, terutama terhadap lereng yang memiliki nilai RMR terendah, mencapai 50, serta menunjukkan kualitas massa batuan yang rendah. Kualitas tersebut dapat diidentifikasi melalui penilaian *Rock Quality Designation* (RQD) dengan nilai 43,37% di area penelitian.

Kata Kunci ketidakstabilan, lereng, RMR, kinematika, RQD

Digital Object Identifier 10.36802/jnanaloka.2022.v3-no2-21-29

1 Pendahuluan

Ketidakstabilan lereng di jalur penghubung Parangtritis dan Imogiri terutama disebabkan oleh getaran gempa, terutama di sekitar Kali Opak yang diduga dipicu oleh aktivitas neo-tektonik melalui pergerakan Sesar Opak [1–4] [1][4]. Sejak gempa besar berkekuatan 5,9 Skala Richter pada tahun 2006, masih terjadi beberapa gempa dengan kekuatan lebih kecil hingga saat ini [2], [5–8] meningkatkan potensi longsor pada lereng batuan yang tampaknya stabil saat ini. Stabilitas lereng batuan di Seloharjo memiliki peran penting dalam mendukung kawasan wisata Parangtritis, yang di bagian utara terdapat obyek wisata gua bersejarah seperti Goa Surocolo atau Goa Sunan Mas, peninggalan Mataram Hindu abad ke-10 dan Mataram Islam abad ke-17, serta Goa Jepang yang menjadi bagian sejarah masa penjajahan Jepang pada tahun 1940 an [9].

Meskipun sebelumnya telah dilakukan analisis stabilitas lereng di Seloharjo, Parangtritis, dan sekitarnya dengan menggunakan sistem klasifikasi massa batuan seperti Rock Mass

* Corresponding author.



Rating (RMR) [10], Slope Mass Rating [11], Rock Quality Designation (RQD) [12], penilaian RMR versi 1979 yang dilengkapi dengan analisis kinematika bersama parameter lainnya seperti orientasi bidang diskontinuitas dan orientasi lereng belum pernah dilakukan untuk penilaian stabilitas lereng yang lebih akurat. Menurut Bieniawski, metode RMR masih memerlukan penyempurnaan, khususnya dalam parameter yang berkaitan dengan orientasi bidang diskontinuitas dan orientasi lereng. Meskipun perhatian terhadap hal tersebut telah dimasukkan sebagai parameter ke-6 dalam RMR versi 1989 untuk penilaian stabilitas lereng batuan, Bieniawski merekomendasikan penggunaan RMR versi 1979 yang telah dimodifikasi oleh Romana (1985) [13, 14].

Dalam penelitian ini, RMR versi 1979 dideterminasi bersama dengan analisis kinematika guna mendapatkan hasil penilaian stabilitas lereng batuan yang lebih akurat. Pendekatan ini sejalan dengan saran Bieniawski untuk lebih memperhatikan pengaruh orientasi bidang kekar dan lereng batuan, sebagaimana diimplementasikan dalam sistem Slope Mass Rating (SMR) sebagai modifikasi dari RMR [13, 14]. Metode RMR versi 1979 dapat dipahami dari referensi RMR yang dikemukakan Bieniawski tahun 1989 atau dapat juga dilihat dari SMR yang dikembangkan oleh Romana [13–15]. Penelitian ini dilaksanakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi stabilitas lereng batuan, dengan fokus pada aplikasi metode Rock Mass Rating (RMR). Tujuannya adalah untuk menganalisis berbagai parameter yang digunakan dalam metode RMR guna mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam tentang kondisi stabilitas lereng. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi penting dalam pemahaman dan penanganan potensi risiko keruntuhan lereng batuan di daerah yang diteliti.

2 Metodologi

Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan pendekatan penelitian kuantitatif deskriptif. Data yang diperoleh berupa angka hasil uji dan pembobotan, yang kemudian diinterpretasikan dalam bentuk deskripsi. Desain data menggabungkan data empiris yang dihasilkan dari pengamatan lapangan dan pengujian di laboratorium. Data lapangan mencakup parameter seperti intensitas kekar, jarak antar kekar, kondisi kekar (kemenerusan kekasaran/pelapukan permukaan dinding diskontinuitas/lebar bukaan diskontinuitas/material isian bukaan diskontinuitas), dan kondisi keairan (air tanah/aliran alir). Sementara itu, data kekuatan batuan diperoleh dari hasil uji kuat tekan di laboratorium.

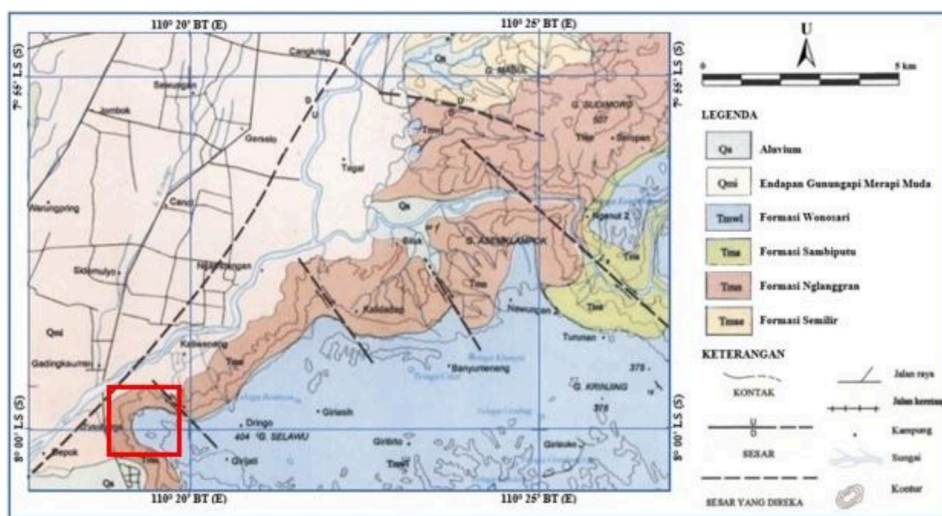
Penilaian data ini digunakan sebagai parameter dalam sistem klasifikasi massa batuan, mengacu pada RMR versi dasar yang dikembangkan oleh Bieniawski pada tahun 1979 [16]. Dalam penelitian ini, penerapan RMR versi tersebut diperkuat dengan analisis kinematika lereng batuan, mengikuti teori yang diperkenalkan oleh Wyllie & Mah pada tahun 2004 [17]. Nilai sudut gesek dalam (Φ) dari RMR memainkan peran sentral dalam proses identifikasi potensi keruntuhan pada batuan atau struktur geometris tertentu [16, 18]. Nilai sudut gesek dalam (Φ) dalam analisis kinematika ditekankan, seiring dengan parameter lainnya seperti orientasi bidang diskontinuitas dan orientasi lereng yang diproyeksikan melalui pendekatan analisis stereografis [17, 19].

3 Hasil dan pembahasan

Lokasi penelitian berada di daerah Seloharjo, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Secara astronomis, Daerah ini berada pada posisi $7^{\circ}59'00''$ - $8^{\circ}00.00''$ lintang selatan (LS) dan $110^{\circ}19'00''$ - $110^{\circ}20'00''$ bujur timur (BT) [20]. Lokasi ini dapat dicapai melalui

jalan Yogyakarta - Parangtritis, sejauh 22 km ke arah selatan dari Kota Yogyakarta. Tujuh lokasi lereng batuan yang diteliti dengan kode lokasi dan posisi koordinat lokasi: IM-1 ($7^{\circ}59'19,38''$ LS dan $110^{\circ}19'18,84''$ BT), IM-2 ($7^{\circ}59'20,23''$ LS dan $110^{\circ}19'19,32''$ BT), IM-3 ($7^{\circ}59'20,88''$ LS dan $110^{\circ}19'19,09''$ BT), IM-4 ($7^{\circ}59'19,23''$ LS dan $110^{\circ}19'20,58''$ BT), IM-5 ($7^{\circ}59'20,28''$ LS dan $110^{\circ}19'22,03''$ BT), IM-6 ($7^{\circ}59'25,08''$ LS dan $110^{\circ}19'16,83''$ BT), serta LM-7 ($7^{\circ}59'24,04''$ LS dan $110^{\circ}19'18,08''$ BT).

Batuan penyusun lereng merupakan batuan beku, berupa lava andesit. Dalam peta geologi regional Lembar Yogyakarta, batuan beku di daerah tersebut merupakan bagian dari Formasi Nglanggran [21]. Menurut sistem penamaan satuan batuan yang diusulkan oleh Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI) [22], satuan batuan tersebut mempunyai nama satuan batuan lava andesit Nglanggran. Peta sebaran batuan tersebut disajikan pada gambar 1, dimana lokasi penelitian ditunjukkan pada kotak merah. Gambar peta tersebut merupakan modifikasi dari peta geologi regional Lembar Yogyakarta [21].



■ **Gambar 1** Peta geologi daerah penelitian [21].

Secara umum, lereng batuan terdiri dari massa batuan andesit menunjukkan karakteristik kekar sebagai berikut: keberadaan dua set kekar; jarak antar kekar berkisar antara 4 hingga 18 cm; permukaan bidang kekar berkisar dari halus hingga sedikit kasar; celah kekar dominan memiliki lebar kurang dari 1 mm dan bersifat lapuk. Pada massa batuan (lereng IM-1) dengan celah kekar berukuran 1-5 mm, terdapat dinding rekahan yang bergelombang dengan permukaan yang licin, diisi oleh material lempung lunak, dan sedikit air ditemukan di dalam celah.

Sementara itu, massa batuan (pada lereng IM-3, IM-4, dan IM-5) memiliki celah kekar kurang dari 1 mm dan bersifat lapuk, umumnya menunjukkan dinding rekahan yang bergelombang halus, dengan permukaan yang terkondisi lembab oleh material lempung dan pasir, serta sedikit air di dalam celah kekar. Adapun massa batuan (pada lereng IM-2, IM-6, dan IM-7) memiliki celah kekar kurang dari 1 mm dan sedikit lapuk, umumnya menampilkan permukaan bidang kekar yang kasar dan sedikit lapuk, ditutupi oleh material yang tidak lunak dan berpasir, dengan kondisi keairan di celah kekar yang cenderung kering.

Massa batuan ini memiliki nilai RQD yang bervariasi antara 43,37 hingga 87,81%. Dengan menggunakan pendekatan data empiris yang diperoleh dari lapangan, kondisi lereng diuraikan melalui model Rock Mass Rating [16, 23], sehingga melibatkan penilaian lima pa-

parameter (R_1 , R_2 , R_3 , R_4 dan R_5) dalam RMR dasar tahun 1979 sebagaimana dijelaskan oleh Bieniawski (1989). Nilai dan hasil penilaian dari parameter sifat mekanika dan fisik batuan pada RMR (berikut bobot nilainya) dapat dilihat dalam Tabel 1 berikut.

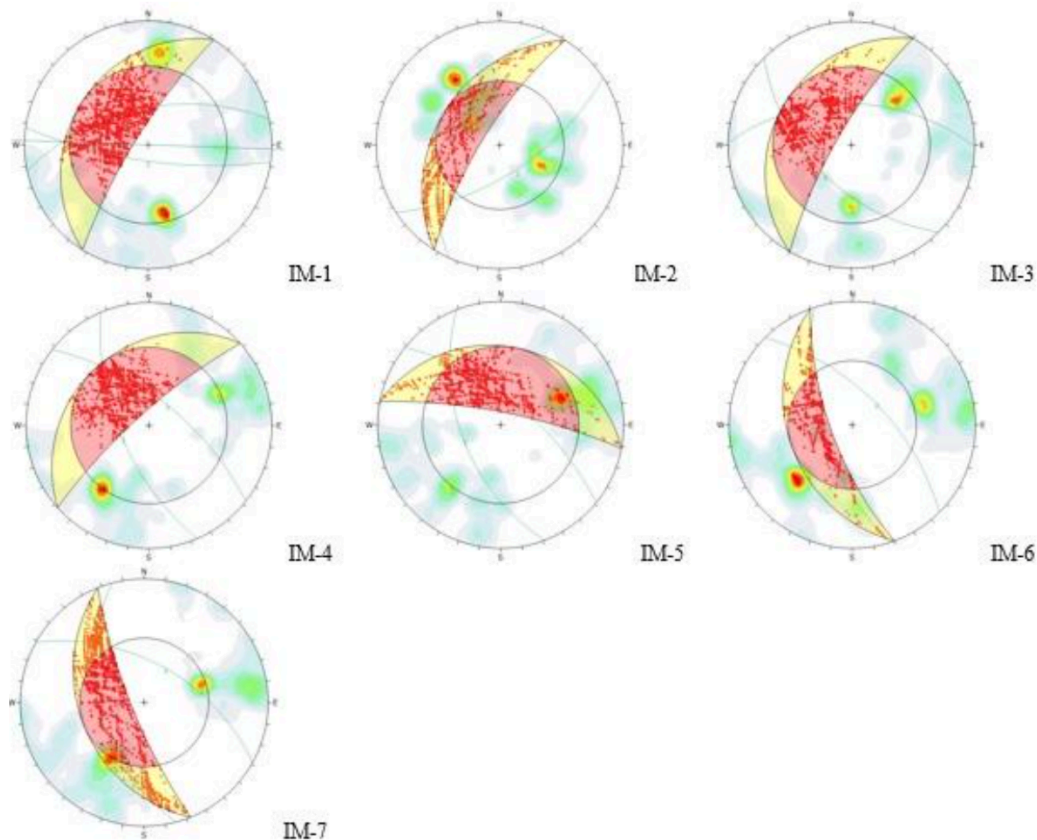
■ **Tabel 1** Determinasi RMR dari tujuh lereng batuan.

Parameter lereng batuan	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	Nilai RMR	Kelas Deskripsi
IM-1	18,71 (2)	55,78 (13)	6-13 (8)	Permukaan bidang kekar halus, kekar menerus, renggang 1-5 mm, lapuk (10)	Lembab (10)	43	III(Sedang)
IM-2	56,89 (7)	84,42 (17)	6-16 (8)	Permukaan bidang kekar sedikit kasar, renggang kurang dari 1 mm, sedikit lapuk (25)	Lembab (10)	67	II (Baik)
IM-3	36,28 (4)	43,37 (8)	4-13 (8)	Permukaan bidang kekar sedikit kasar, renggang kurang dari 1 mm, lapuk (20)	Lembab (10)	50	III(Sedang)
IM-4	29,43 (4)	52,49 (13)	6-13 (8)	Permukaan bidang kekar sedikit kasar, renggang kurang dari 1 mm, lapuk (20)	Lembab (10)	55	III(Sedang)
IM-5	31,39 (4)	55,78 (13)	7-14 (8)	Permukaan bidang kekar sedikit kasar, renggang kurang dari 1 mm, lapuk (20)	Kering (15)	60	III(Sedang)
IM-6	35,32 (4)	59,18 (13)	7-12 (8)	Permukaan bidang kekar sedikit kasar, renggang kurang dari 1 mm, sedikit lapuk (25)	Kering (15)	65	II (Baik)
IM-7	61,69 (7)	87,81 (17)	9-18 (8)	Permukaan bidang kekar sedikit kasar, renggang kurang dari 1 mm, sedikit lapuk (25)	Kering (15)	72	II (Baik)

Pada tabel tersebut, notasi R_1 merujuk pada kekuatan batuan yang diukur dalam satuan MPa; R_2 mencerminkan nilai RQD sebagai persentase sifat kemasifan batuan; R_3 merupakan jarak antar kekar yang diukur dalam satuan sentimeter; R_4 mengindikasikan kondisi diskontinuitas batuan, khususnya kekar; R_5 menunjukkan kondisi keairan, mencakup air tanah dan permukaan. Kelas RMR dan deskripsinya diperoleh melalui penjumlahan nilai-nilai parameter tersebut. Setiap kelas RMR memiliki batas estimasi untuk nilai sudut gesek dalam (Φ), dimana nilai terendah dianggap sebagai indikator potensi stabilitas lereng [18,24].

Persentase potensi longsoran dapat dihasilkan melalui analisis kinematika yang mempertimbangkan posisi diskontinuitas dan kemiringan lereng batuan [19]. Posisi kemiringan diskontinuitas dan lereng batuan beserta nilai sudut gesek dalamnya digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng. Selain data kemiringan, informasi mengenai orientasi diskontinuitas dan lereng juga diperlukan untuk mendukung interpretasi hasil analisis tersebut. Pemilihan jenis longsoran dilakukan berdasarkan probabilitas terbesar terjadinya longsoran, yang ditentukan berdasarkan persentase longsoran tertinggi [17]. Data mengenai diskontinuitas dan lereng yang digunakan dalam analisis kinematika dapat dilihat dalam Gambar 2 dan Tabel 2.

Dalam tabel 2 tersebut, simbol Ψ_f mengindikasikan besar sudut kemiringan lereng dalam satuan derajat; Ψ_i mewakili sudut dari kemiringan garis perpotongan dua bidang diskontinuitas, juga dalam satuan derajat; sementara simbol Φ mencerminkan nilai sudut gesek dalam batuan (dinyatakan dalam derajat) [16].



■ **Gambar 2** Grafis proyeksi stereografis dari orientasi diskontinuitas dan lereng batuan.

■ **Tabel 2** Data diskontinuitas dan lereng dalam analisis kinematika

Lereng batuan	Ψ_f (°)	Ψ_i (°)	Kelas RMR	Φ (°)	P	W	FT	DT	Arah longsoran (N°E)	Arah kemiringan lereng (N°E)
IM-1	78	20	III	25	3,19	45,31	0	9,34	272	302
IM-2	74	24	II	35	18,18	23,08	9,09	4,43	226	302
IM-3	76	26	III	25	4,41	44,92	1,35	3,6	292	300
IM-4	78	26	III	25	2,44	46,76	0	3,38	322	318
IM-5	78	20	III	25	13,16	43,79	3,95	6,46	320	011
IM-6	74	24	II	35	14,44	23,93	14,44	5,21	328	250
IM-7	78	26	II	35	23,28	33,56	12,07	5,05	320	248

Berdasarkan penentuan arah umum orientasi diskontinuitas dan lereng batuan serta hasil analisis kinematika, dapat disimpulkan bahwa lereng batuan memiliki potensi keruntuhan lereng dalam bentuk longsoran bidang (*planar*) yang dinotasikan sebagai P, longsoran baji (*wedge*) yang dinotasikan sebagai W, longsoran guling lembaran (*flexural toppling*) yang dinotasikan sebagai FT, dan longsoran guling langsung (*direct toppling*) yang dinotasikan sebagai DT [17, 19].

Berdasarkan ringkasan analisis potensi keruntuhan lereng, dapat diidentifikasi bahwa potensi longsor baji memiliki tingkat kecenderungan yang paling tinggi, yakni berkisar an-

tara 23,08 hingga 46,76%, yang melebihi tingkat potensi longsor bidang (23,28%), flexural toppling (14,44%), dan direct toppling (9,34%). Adanya kecenderungan instabilitas lereng terutama terlihat pada lereng IM-3 dan IM-4 (lihat Tabel 3), di mana hasil pengamatan menunjukkan bahwa nilai kemiringan lereng (Ψ_f) lebih tinggi daripada kemiringan diskontinuitas blok batuan longsor (plunge, garis perpotongan 2 diskontinuitas) (Ψ_i). Selain itu, nilai Ψ_i melebihi nilai sudut gesek dalam (Φ), atau dapat dirangkum sebagai $\Psi_f > \Psi_i > \Phi$ [17, 19].

Keruntuhan lereng batuan yang terjadi merupakan hasil analisis kinematika berdasarkan data kemiringan dan orientasi dari lereng serta batuan. Data mengenai orientasi kekar dan kemiringan lereng dijadikan sebagai dasar untuk analisis kinematika, dengan tujuan untuk menginterpretasi pergerakan blok batuan. Hal ini memberikan wawasan tambahan terhadap kondisi stabilitas dan potensi risiko keruntuhan. Informasi yang disajikan dalam analisis ini mengindikasikan arah dan kemiringan lereng, yang secara keseluruhan mendukung stabilitas lereng batuan dan menunjukkan kecenderungan pembentukan longsoran baji. Longsor baji, sebagai bentuk keruntuhan tertentu, terjadi ketika dua atau lebih bidang diskontinuitas saling berpotongan, membentuk blok longsor yang berbentuk tetrahedron. Blok tersebut dapat tergelincir keluar apabila sudut kemiringan garis persimpangan melebihi sudut gesek dalam sepanjang diskontinuitas tersebut [25, 26].

Keadaan ini diperkuat oleh arah kemiringan longsor dan lereng yang searah, N292rE dan N300rE (lereng IM-3) dan N322rE dan N318rE (lereng IM-4) (lihat Tabel 3). Dengan demikian, lereng IM-3 dan IM-4 menunjukkan kecenderungan dalam kondisi tidak stabil dan memiliki potensi risiko keruntuhan yang lebih tinggi dibandingkan dengan lereng batuan lainnya. Dengan mempertimbangkan nilai sudut gesek dalam terendah dari kelas RMR, tampak bahwa potensi longsor baji pada lereng IM-4 yaitu 46,76%, lebih signifikan dibandingkan dengan lereng IM-3, 44,92%. Potensi longsor ini dapat diatributkan pada kemiringan lereng yang lebih curam pada lereng IM-4 sebesar 78r dibandingkan dengan lereng IM-3 dengan kemiringan sebesar 76r. Meskipun demikian, nilai RMR yang lebih tinggi pada lereng IM-4, yaitu 55, sejalan dengan nilai RQD yang lebih tinggi, sebesar 52,49%, menunjukkan bahwa ketidakstabilan lereng IM-3 dengan nilai RMR 50 perlu mendapat perhatian lebih lanjut. Dalam konteks ini, pengaruh signifikan dari nilai RQD pada lereng IM-3 sebesar 43,37%, yang lebih rendah daripada lereng IM-4 menjadi faktor yang perlu diperhitungkan [27, 28].

Dalam skenario longsor baji, blok batuan berbentuk segitiga yang terperangkap di antara diskontinuitas yang bersilangan, dan apabila gaya yang bekerja pada blok tersebut melampaui kekuatan gesekan internal, blok tersebut mungkin mengalami pergerakan keluar [18, 29]. Berdasarkan nilai RQD, dapat disimpulkan bahwa massa batuan pada lereng IM-3 dapat dikategorikan sebagai massa batuan dengan kualitas yang lebih rendah dibandingkan dengan massa batuan pada lereng IM-4. Untuk melihat lebih lanjut morfologi perbukitan dan kondisi lereng batuan dapat dirujuk pada Gambar 3 yang disajikan pada ilustrasi berikut.

4 Kesimpulan dan saran

Berdasarkan analisis yang telah dibahas, sejumlah kesimpulan dapat diperoleh. Pertama, melalui penilaian RMR, dapat disimpulkan bahwa ketujuh lereng batuan di daerah penelitian memiliki stabilitas yang berkisar antara baik hingga menengah. Kedua, perlu diperhatikan bahwa RMR versi 1979 tidak memasukkan parameter orientasi kekar dan lereng dalam penilaiannya, oleh karena itu, interpretasi stabilitas lereng dapat dilakukan melalui analisis



■ **Gambar 3** Morfologi perbukitan (menghadap ke selatan) dan lereng batuan di IM-1.

kinematika.

Hasil analisis menunjukkan bahwa lereng batuan memiliki kecenderungan potensi longsor baji berkisar antara 23,08 hingga 46,76%, dengan arah longsor ke barat daya, N292°E - N322°E. Oleh karena itu, dianjurkan untuk lebih memperhatikan potensi resiko keruntuhan pada lereng batuan IM-3 dan IM-4. Ketiga, meskipun saat ini semua lereng berada dalam kondisi stabil, perlu kewaspadaan bahwa lereng dengan nilai parameter RQD terendah (43,37%), seperti yang teridentifikasi pada lereng IM-3, memerlukan perhatian lebih lanjut. Nilai parameter ini mencerminkan intensitas kekar yang tinggi pada lereng tersebut, yang mengindikasikan bahwa massa batuan di lereng tersebut memiliki kualitas yang lebih rendah dibandingkan dengan lereng lainnya. Oleh karena itu, lereng ini memerlukan perhatian khusus untuk penanganan dan pemantauan lebih lanjut.

Pustaka

- 1 R. Hall, B. Clements, H. R. Smyth, dan M. A. Cottam, "A new interpretation of jayas structure," in *Indonesian Petroleum Association, Proceedings 31st Annual Convention*, 2007, pp. 63–86.
- 2 A. Saputra, C. Gomez, I. Delikostidis, P. Zawar-Reza, D. S. Hadmoko, J. Sartohadi, dan M. A. Setiawan, "Determining earthquake susceptible areas southeast of yogyakarta, indonesia outcrop analysis from structure from motion (sfm) and geographic information system (gis)," *Geosciences*, vol. 8, no. 4, p. 132, 2018.
- 3 S. Pramumijoyo, "Road to earthquake mitigation: Lesson learnt from the yogyakarta earthquake 2006," *Journal of Applied Geology*, vol. 1, no. 2, 2009.
- 4 S. Mulyaningsih, "Earthquakes, volcanic eruptions, and other geological disasters during historical records in yogyakarta special region, indonesia," *Indonesian Journal on Geoscience*, vol. 8, no. 2, pp. 197–212, 2021.
- 5 A. Saputra, C. Gomez, I. Delikostidis, P. Zawar-Reza, D. S. Hadmoko, dan J. Sartohadi, "Preliminary identification of earthquake triggered multi-hazard and risk in pleret sub-district (yogyakarta, indonesia)," *Geo-spatial Information Science*, vol. 24, no. 2, pp. 256–278, 2021.
- 6 S. J. Hutchings dan W. D. Mooney, "The seismicity of indonesia and tectonic implications," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 22, no. 9, p. e2021GC009812, 2021.
- 7 M. Pagani, J. Garcia-Pelaez, R. Gee, K. Johnson, V. Poggi, V. Silva, M. Simionato, R. Styron, D. Viganò, L. Danciu *et al.*, "The 2018 version of the global earthquake model: hazard component," *Earthquake Spectra*, vol. 36, no. 1_suppl, pp. 226–251, 2020.
- 8 P. R. Cummins, "Geohazards in indonesia: Earth science for disaster risk reduction—introduction," pp. 1–7, 2017.

- 9 Jadesta, “Desa wisata seloharjo, jejaring desa wisata, 2024,” https://jadesta.kemenparekraf.go.id/desa/seloharjosurocolo_goa_jepang, 2024, [Online; diakses 2 Desember 2024].
- 10 A. N. Rakhman dan N. W. A. A. Triheriyadi, “Pengaruh diskontinuitas massa batuan vulkanik terhadap stabilitas lereng di daerah jelapan dan sekitarnya, kecamatan pundong, kabupaten bantul, daerah istimewa yogyakarta,” *Jurnal Teknologi Technoscintia*, pp. 71–77, 2017.
- 11 K. Triana dan K. Hermawan, “Slope mass rating-based analysis to assess rockfall hazard on yogyakarta southern mountain, indonesia,” *Geoenvironmental Disasters*, vol. 7, pp. 1–17, 2020.
- 12 A. N. Rakhman, Z. Zakaria, D. Muslim, I. Haryanto, dan F. W. Maulana, “Mineralogical control of rock slope stability assessment of columnar jointed basaltic rock masses in the cengkehan river valley, indonesia,” 2020.
- 13 M. Romana, J. B. Serón, dan E. Montalar, “Smr geomechanics classification: application, experience and validation,” in *ISRM Congress*. ISRM, 2003, pp. ISRM–10CONGRESS.
- 14 M. Romana, R. Tomás, dan J. B. Seron, “Slope mass rating (smr) geomechanics classification: thirty years review,” in *ISRM Congress*. ISRM, 2015, pp. ISRM–13CONGRESS.
- 15 M. Romana, “New adjustment ratings for application of bieniawski classification to slopes,” in *Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics, Zacatecas, Mexico*, 1985, pp. 49–53.
- 16 Z. T. Bieniawski, *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, 1989.
- 17 D. C. Wyllie dan C. Mah, *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. 4th ed. New York: Spon Press, 2004, 2004.
- 18 R. Goel dan B. Singh, *Engineering rock mass classification: tunnelling, foundations and landslides*. Elsevier, 2011.
- 19 D. C. Wyllie dan C. Mah, *Rock Slope Engineering: Civil Applications*. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- 20 Bakosurtanal, “Peta rupabumi digital indonesia lembar 1408-221 (bantul), bogor 1999,” <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/downloadpetacetak?skala=25K>, 2024, [Online; diakses 2 Desember 2024].
- 21 Sukandarrumidi, R. . Wartono, dan H. Rosidi, “Peta geologi lembar yogyakarta, jawa, pusat survey geologi, badan geologi, bandung, 2012,” <https://geologi.esdm.go.id/geomap/pages/preview/peta-geologi-lembar-kebumen-jawa>, 2024, [Online; diakses 2 Desember 2024].
- 22 K. S. S. Indonesia, “Sandi stratigrafi indonesia,” *Ikatan Ahli Geologi Indonesia*, vol. 14, 1996.
- 23 H. Sonmez, M. Ercanoglu, dan G. Dagdelenler, “A novel approach to structural anisotropy classification for jointed rock masses using theoretical rock quality designation formulation adjusted to joint spacing,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 329–345, 2022.
- 24 B. Vásárhelyi, “A possible method for estimating the poissons rate values of the rock masses,” *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, vol. 44, pp. 313–322, 2009.
- 25 J. V. Smith, “Off-center tetrahedral wedges,” *GEOMATE Journal*, vol. 22, no. 93, pp. 52–59, 2022.
- 26 J. V. Smith dan C. Arnhardt, “Distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges using the circle method,” *Engineering geology*, vol. 211, pp. 98–101, 2016.
- 27 D. Deere, “The rock quality designation (rqd) index in practice,” in *Rock classification systems for engineering purposes*. ASTM International, 1988.

- 28 C. Lucian dan E. Wangwe, "The usefulness of rock quality designation (rqd) in determining strength of the rock," *International Refereed Journal of Engineering and Science*, vol. 2, no. 9, pp. 36–40, 2013.
- 29 S. Zhang, Q. Xu, D. Peng, Z. Zhu, W. Li, H. Wong, dan P. Shen, "Stability analysis of rock wedge slide subjected to groundwater dynamic evolution," *Engineering geology*, vol. 270, p. 105528, 2020.