p-ISSN 2715-5358, e-ISSN 2722-6530, Volume xx Nomor xx, Halaman xx-xx, Februari/Agustus 20xx
https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee

JOURNAL OF GEOSCIENCE ENGINEERING AND ENERGY (JOGEE)
Geology Engineering Universitas Trisakti
Journal homepage : https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee
p-ISSN 2715 5358, e-ISSN 2722 6530

EVALUASI STABILITAS GEOTEKNIK LERENG DAN FONDASI JEMBATAN TERHADAP KEKAR, GERAKAN TANAH, DAN BEBAN SEISMIK KULON PROGO.

INTEGRATED GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL ASSESSMENT OF ENGINEERED SLOPE STABILITY

Yusuf Wibisono[1]

Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Kebumian dan Energi, Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia

Email korespondensi: ali@trisakti.ac.id

Sari. Penelitian ini mengevaluasi stabilitas geoteknik lereng dan fondasi jembatan di wilayaahKulon Progo, Yogyakarta, yang didominasi batuan andesit tua, kekar intensif, dan topografi curam. Metode Rock Mass Rating (RMR) digunakan untuk menilai pengaruh kekar batuan, potensi longsor, dan beban gempa. Observasi lapangan dan simulasi numerik (GeoStudio) menunjukkan bahwa kekar batuan dan aktivitas seismik memengaruhi kestabilan, namun perkuatan beton bertulang dapat meningkatkan faktor keamanan. Hasil penelitian menekankan pentingnya pendekatan terpadu geoteknik dan geologi dalam perencanaan infrastruktur di daerah rawan bencana.

Abstract. *This study evaluates the geotechnical stability of slopes and bridge foundations in the Kulon Progo area, Yogyakarta, which is characterized by old andesitic volcanic rocks, intensive jointing, and steep topography. Using the Rock Mass Rating (RMR) method, the research assesses the influence of rock joints, landslide susceptibility, and seismic loads. Field observations and numerical simulations (GeoStudio) show that jointed rock and seismic activity significantly affect stability, but reinforced concrete structures can improve safety. The study underscores the need for an integrated geotechnical and geological approach in infrastructure planning in hazard-prone areas.*

Sejarah Artikel :
Diterima
Tanggal-Bulan-Tahun
Revisi
Tanggal-Bulan-Tahun
Disetujui
Tanggal-Bulan-Tahun
Terbit Online
Tanggal-Bulan-Tahun

Kata Kunci :
- Stabilitas Lereng
- Fondasi Jembatan
- RMR
- Kekar Batuan
- Beban Gempa

Keywords :
- *Slope Stability*
- *Bridge Foundation*
- *RMR*
- *Rock Joints*
- *Seismic Load*

p-ISSN 2715-5358, e-ISSN 2722-6530, Volume xx Nomor xx, Halaman xx-xx, Februari/Agustus 20xx
https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee

PENDAHSULUAN

Stabilitas lereng dan fondasi jembatan di wilayah dengan kondisi geologi kompleks seperti Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, merupakan aspek krusial dalam perencanaan dan pengembangan infrastruktur. Kawasan ini tersusun oleh satuan batuan vulkanik, khususnya andesit tua, dengan sistem kekar yang berkembang intensif serta topografi perbukitan terjal yang memperbesar potensi ketidakstabilan lereng. Selain faktor litologis dan struktural, aktivitas antropogenik seperti pembangunan pemukiman di lereng curam dan peningkatan beban infrastruktur juga turut memperparah potensi kegagalan lereng dan fondasi.



Gambar 1. Lokasi daerah Penelitian Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (dimodifikasi dari Widagdo dkk., 2022).

Kondisi batuan dasar yang mengalami rekahan dan kekar intensif telah terbukti menurunkan kestabilan fondasi jembatan. Pengaruh mekanis dari kekar tarik maupun kekar geser menyebabkan terjadinya bidang lemah pada massa batuan, yang diperparah oleh erosi vertikal akibat aliran sungai. Penilaian teknis menggunakan metode klasifikasi massa batuan Rock Mass Rating (RMR) (Bieniawski,1973) menunjukkan bahwa batuan andesit di daerah tersebut berada pada kategori kualitas sedang (kelas III), namun tetap memiliki potensi tinggi terhadap gangguan struktural, khususnya pada elemen fondasi jembatan yang mengalami ekspos terhadap gaya erosi dan aliran air bawah permukaan.

Di sisi lain, kondisi geomorfologi yang didominasi oleh lereng-lereng curam serta faktor geologi seperti litologi dan struktur rekahan telah menghasilkan zonasi kerentanan gerakan tanah dengan tingkat risiko bervariasi dari rendah hingga tinggi. Penggunaan lahan yang tidak sesuai, seperti pembangunan permukiman pada lereng aktif, meningkatkan tekanan lateral dan risiko longsoran. Rekahan geologi juga berfungsi sebagai jalur infiltrasi air, mempercepat pelapukan batuan, dan melemahkan ikatan partikel dalam massa tanah. Kombinasi dari faktor-faktor tersebut menuntut pemodelan spasial dan geoteknik untuk mendukung mitigasi risiko secara terpadu.

p-ISSN 2715-5358, e-ISSN 2722-6530, Volume xx Nomor xx, Halaman xx-xx, Februari/Agustus 20xx
https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee

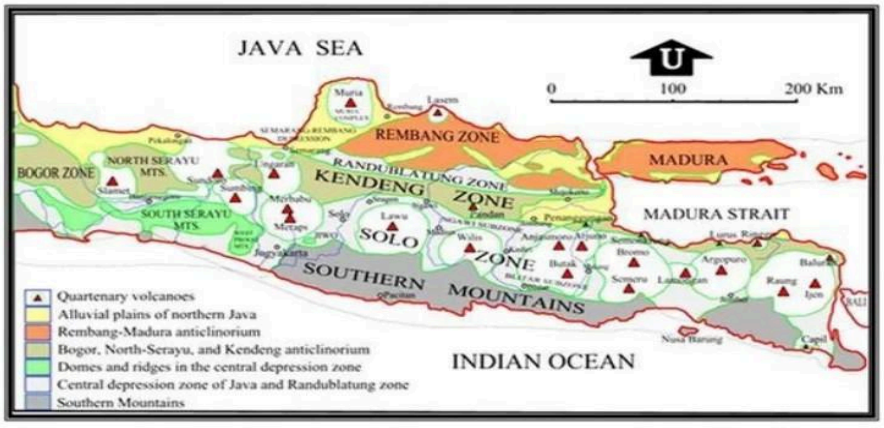
Pengaruh beban seismik juga menjadi faktor penting dalam analisis stabilitas lereng dan fondasi struktur. Simulasi numerik menggunakan metode *limit equilibrium* dengan perangkat lunak geoteknik menunjukkan bahwa peningkatan percepatan gempa (PGA) secara signifikan menurunkan nilai faktor keamanan lereng hingga mendekati ambang kritis. Namun, penerapan sistem perkuatan seperti struktur beton bertulang yang ditanam hingga mencapai lapisan batuan keras terbukti efektif meningkatkan stabilitas secara signifikan di bawah kondisi dinamis.

Secara keseluruhan, analisis geoteknik terhadap fondasi jembatan dan kestabilan lereng di wilayah ini mengindikasikan perlunya pendekatan multidisipliner yang mencakup karakterisasi struktur geologi mikro, evaluasi parameter mekanik massa batuan, simulasi numerik beban seismik, serta integrasi dengan tata guna lahan. Pendekatan tersebut tidak hanya meningkatkan keselamatan struktur, tetapi juga mendukung ketahanan infrastruktur terhadap potensi bencana geologi di kawasan pegunungan aktif seperti Kulon Progo.

GEOLOGI REGIONAL

Pegunungan Kulonprogo-Purworejo merupakan batas Timur dari Pegunungan Serayu Selatan menurut van Bemmelen (1949). rangkaian Pegunungan Kulonprogo tampak terpisah dan membentang dari utara ke selatan. Wilayah perbukitan ini dikepung oleh area dengan topografi yang lebih rendah, seperti Lembah Progo, Dataran Yogyakarta di sisi timur, dataran pantai selatan Jawa Tengah, serta Dataran Purwokerto di sisi barat. Isolasi geomorfologi ini diperkirakan terjadi karena batuan penyusun Pegunungan Kulonprogo memiliki tingkat ketahanan (resistensi) yang lebih tinggi terhadap proses erosi dibandingkan dengan batuan di wilayah sekitarnya.

Sketsa peta fisiografi sebagian Pulau Jawa dan Madura (modifikasi dari van Bemmelen, 1949).



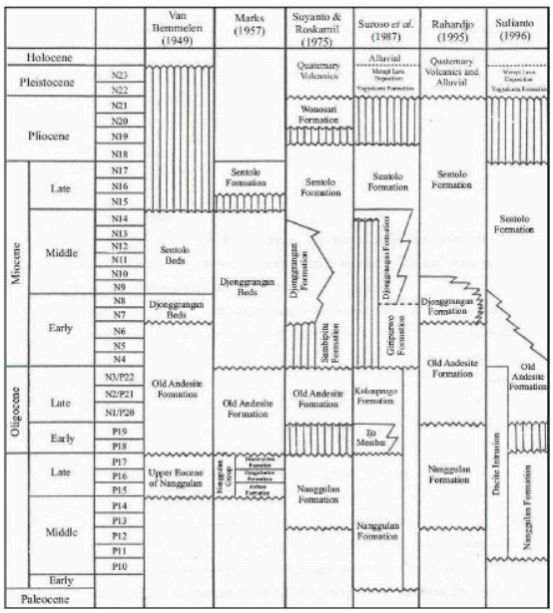
Gambar 2. Fisiografi Jawa Timur (van Bemmelen, 1949).

p-ISSN 2715-5358, e-ISSN 2722-6530, Volume xx Nomor xx, Halaman xx-xx, Februari/Agustus 20xx
https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee

Fase pertama diawali pada kala Eosen Tengah melalui pembentukan Sistem Pertama, di mana terjadi sedimentasi transgresif yang membentuk Formasi Nanggulan secara tidak selaras (*angular unconformity*) di atas batuan dasar (*basement*) berupa ofiolit; menurut catatan Lelono (2000 dalam Smyth dkk., 2005), fase ini didominasi oleh batuan kaya kuarsa, konglomerat, dan batubara yang pada bagian atasnya mulai diselingi material vulkanik halus akibat transisi lingkungan.

Memasuki kala Oligosen hingga Miosen, wilayah ini mengalami perubahan drastis ke Sistem Kedua yang ditandai sebagai fase puncak aktivitas magmatisme; berdasarkan rekonstruksi Smyth dkk. (2005), pada masa ini terjadi vulkanisme yang sangat intensif, eksplosif, dan bertipe Plinian, sehingga menghasilkan akumulasi material vulkanik primer yang sangat tebal berupa batuan andesit hingga riolit, breksi litik, serta aliran lava yang dalam literatur regional sering disebut sebagai *Old Andesite Formation* (Formasi Andesit Tua).

Sejarah stratigrafi ini kemudian diakhiri oleh Sistem Ketiga pada kala Miosen Tengah hingga Pliosen, yang menurut bagan korelasi Rahardjo dkk. (1977) dan Pringgoprawiro dkk. (1988) mencerminkan fase penurunan hingga matinya seluruh aktivitas vulkanisme secara total; kondisi lingkungan laut yang menenang dan jernih pasca-erupsi tersebut kemudian memicu pertumbuhan koloni terumbu karang secara masif, yang mengendapkan batuan karbonat tebal berupa batu gamping dari Formasi Jonggrangan dan Formasi Sentolo.

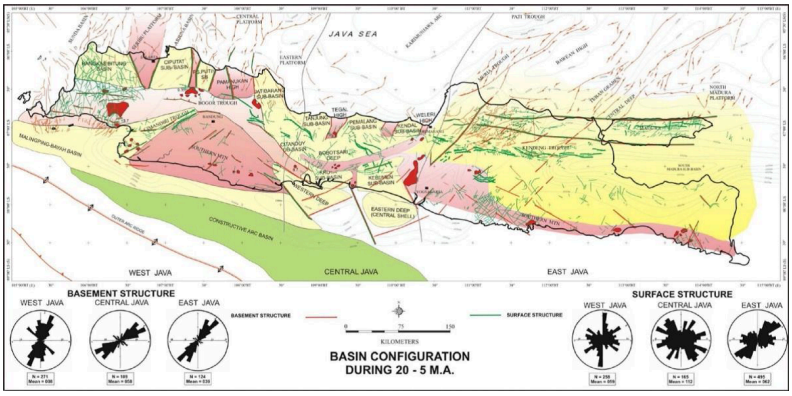


Gambar3. Susunan Stratigrafi Kulonprogo dalam beberapa publikasi (Smyth, dkk, (2005).

Struktur geologi Lekukan di bagian utara Jawa Tengah diapit oleh dua struktur kelurusan atau sesar regional yang ditafsirkan sebagai sesar mendatar. Sepanjang jalurnya, kedua struktur ini juga menunjukkan karakteristik lokal sebagai sesar normal ataupun sesar naik. Kedua sesar

p-ISSN 2715-5358, e-ISSN 2722-6530, Volume xx Nomor xx, Halaman xx-xx, Februari/Agustus 20xx
https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee

geser tersebut bergerak saling berlawanan arah, yaitu Sesar Dekstral (Menganan) Pamanukan–Cilacap dan Sesar Sinistral (Mengiri) Muria–Kebumen, yang posisinya merenggang di lekukan bagian utara namun saling memusat hingga diperkirakan saling berpotongan di area tengah lekukan selatan Jawa Tengah. Keberadaan dua sistem sesar utama ini awalnya diidentifikasi melalui analisis kelurusan struktur dan interpretasi data anomali gaya berat (Untung, 1974).



Gambar 4. Pola struktur regional di Jawa (Sribudiyani dkk., 2003).

Sesar mendatar sinistral (mengiri) Muria–Kebumen diperkirakan terus memanjang ke arah timur laut melintasi Laut Jawa (Untung, 1974; Asikin, 1974; Situmorang dkk., 1976) hingga mencapai kawasan Pegunungan Meratus di Kalimantan Tenggara (Sikumbang, 1986). Terbentuknya sesar mendatar ini berkorelasi erat dengan aktivitas subduksi miring (*oblique subduction*) Lempeng Hindia di bawah tepi selatan-tenggara Daratan Sunda (ujung Lempeng Eurasia) pada transisi Kapur Akhir hingga Paleosen.

Struktur regional berskala besar ini memicu terjadinya segmentasi batuan dasar pada bagian timur Laut Jawa (Satyana & Darwis, 2001) sekaligus bertindak sebagai batas tenggara dari Perisai Sunda yang memiliki inti benua berumur Paleozoikum (Fraser & Ichram, 2000). Di wilayah Yogyakarta sendiri, deformasi dikontrol oleh sistem Sesar Mengiri Kebumen–Muria, Sesar Mengiri Bantul–Yogyakarta, serta beberapa sesar mayor lainnya yang berorientasi searah. Sementara itu, struktur geologi lokal di daerah penelitian secara khusus didominasi oleh sesar-sesar mendatar yang berarah barat laut–tenggara, timur laut–barat daya, serta barat–timur.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Rock Mass Rating (RMR) yang dikembangkan oleh Bieniawski (1973). untuk mengevaluasi kualitas massa batuan dan pengaruhnya terhadap kestabilan fondasi jembatan.Metode ini merupakan salah satu pendekatan klasifikasi massa batuan yang digunakan untuk menentukan tingkat kekuatan suatu massa batuan. Nilai tersebut kemudian digunakan untuk mengelompokkan kualitas massa batuan. Penilaian massa batuan dilakukan berdasarkan beberapa parameter, meliputi kuat tekan batuan utuh, nilai RQD, spasi diskontinuitas, kondisi kekar, dan kondisi airtanah.

p-ISSN 2715-5358, e-ISSN 2722-6530, Volume xx Nomor xx, Halaman xx-xx, Februari/Agustus 20xx
https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee

Observasi lapangan dilakukan secara langsung pada beberapa titik pengamatan untuk memperoleh karakteristik massa batuan secara menyeluruh melalui metode (*scanline*).Proses pemindaian ini dilakukan secara visual menggunakan alat bantu seperti meteran. Proses pengambilan sampel batuan dilakukan sepanjang 50 meter, sesuai dengan standar ISRM (1980). Data yang dikumpulkan meliputi kekasaran, pengisian, lebar bukaan, luahan air, pelapukan, dan keterusan kekar, dengan bantuan alat seperti meteran, penggaris, papan uji, dan data tulis.

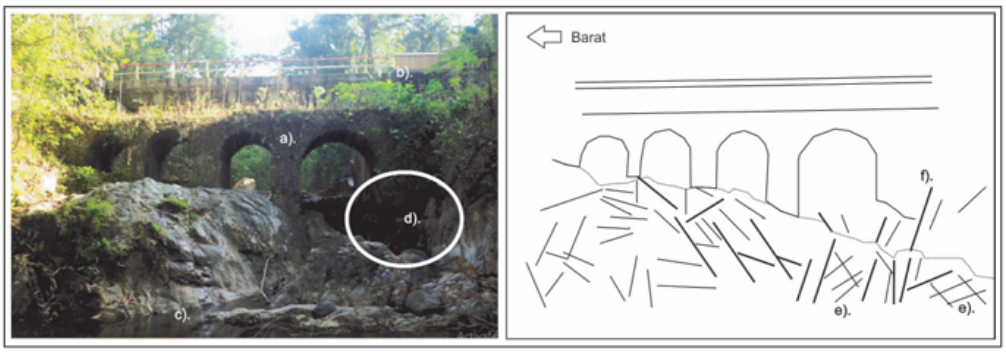
HASIL DAN PEMBAHASAN

Peran Kekar sebagai Zona Lemah

Struktur rekahan pada batuan terdiri atas kekar tarik dan kekar geser yang membentuk bidang diskontinuitas pada massa batuan. Pada lokasi penelitian, ditemukan lebih dari 109 kekar (Widagdo dkk., 2022) dengan variasi parameter seperti bukaan, kemenerusan, kekasaran permukaan, hingga tingkat pelapukan dan kondisi keberadaan air. Sebagian besar kekar yang teridentifikasi memiliki ciri:

- Bukaan cukup lebar (1 mm hingga puluhan mm),
- Material pengisi berupa lempung atau hasil pelapukan,
- Tingkat pelapukan sedang hingga tinggi,
- Keadaan basah atau lembab yang menunjukkan keberadaan aliran air.

Ciri-ciri ini mengindikasikan bahwa kekar di lokasi penelitian aktif berperan dalam memperlemah kekuatan massa batuan.



Gambar 5. Gangguan fondasi jembatan akibat kekar yang intensif, a). Jembatan lama, b). Jembatan baru, c). Sungai Plampang, d). Fondasi jembatan yang menggantung, e). Kekar gerus, f). Kekar tarik. (Widagdo dkk., 2022).

Pengaruh Hidrologi dan Erosi Vertikal

Kehadiran air pada sistem kekar mempercepat proses pelapukan kimia dan erosi mekanik. Air hujan maupun aliran dari Sungai Plampang masuk melalui jalur-jalur rekahan, dan dalam jangka panjang menyebabkan erosi vertikal sepanjang kekar-kekar tarik yang terbuka. Mekanisme ini menyebabkan penghilangan bertahap pada bagian bawah fondasi, sehingga kondisi tersebut menyebabkan bagian bawah fondasi kehilangan material penyangga sehingga kestabilan struktur menurun. eh Proses ini diamati secara nyata pada fondasi jembatan lama yang kini mengalami degradasi fungsional.

p-ISSN 2715-5358, e-ISSN 2722-6530, Volume xx Nomor xx, Halaman xx-xx, Februari/Agustus 20xx
https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee

Hasil Klasifikasi Massa Batuan (RMR)

Penggunaan metode Rock Mass Rating (RMR) dalam analisis massa batuan menunjukkan hasil bahwa batuan dasar pada lokasi penelitian diklasifikasikan ke dalam kelas III (sedang) dengan skor 59,129. Kategori ini mengindikasikan bahwa meskipun batuan masih cukup kuat untuk menopang struktur, namun kestabilannya akan sangat terganggu apabila terdapat kondisi tidak ideal seperti pelapukan tinggi dan keberadaan air tanah. Ini diperkuat dengan fakta bahwa kondisi di lapangan memperlihatkan kekar yang basah dan lapuk, membuat kualitas sebenarnya mendekati ambang batas bawah dari kategori sedang menuju buruk.

Tabel 1. Hasil Nilai Rata-rata Bobot RMR untuk Parameter Kondisi Kekar (Widagdo dkk., 2022).

Rata-rata	Kemenerusan	Kekasaran	Bukaan Kekar	Isian Kekar	Pelapukan
	4,495	2,835	0,853	3,743	3,202
Total Bobot			15,128		

Tabel 2. Parameter Klasifikasi Massa Batuan RMR dan Pembobotannya (Bieniawski, 1989).

No	Parameter		Pembobotan					
1	Kekuatan Massa Batuan	Point-load Strenth Index	> 10 Mpa	4-10 Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa		
		Uniaxial Compressive Strength	> 250 Mpa	100-250 Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	5-25 Mpa	1-5 Mpa
	Bobot		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**
2	RQD		90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %		< 25 %
	Bobot		**20**	**17**	**13**	**8**		**3**
3	Jarak Diskontinuitas		> 2 m	0,6 – 2 m	200-600 mm	60-200 mm		< 60 mm
	Bobot		**20**	**25**	**10**	**8**		**5**
4	Kondisi Kekar	Kemenerusan	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10-20 m		> 20 m
		Bobot	**6**	**4**	**2**	**1**		**0**
		Bukaan	Tidak ada	< 0,1mm	0,1-1mm	1 – 5 mm		> 5 mm
		Bobot	**6**	**5**	**4**	**1**		**0**
		Kekasaran	Sangat kasar	Kasar	Sedikit Kasar	Halus		Slickensided
		Bobot	**6**	**5**	**3**	**1**		**0**
		Material Pengisi	Tidak ada	Keras < 5mm	Keras > 5mm	Lunak < 5mm		Lunak > 5 mm
		Bobot	**6**	**4**	**2**	**1**		**0**
		Pelapukan	Tidak Lapuk	Sedikit Lapuk	Lapuk	Sangat Lapuk		Hancur
		Bobot	**6**	**5**	**3**	**1**		**0**
5	Kondisi Air Tanah		Kering	Lembab	Basah	Menetes		Mengalir
	Bobot		**15**	**10**	**7**	**4**		**0**

Tabel 3. Rekapitulasi Pembobotan *Rock Mass Rating (RMR)* (Widagdo dkk., 2022).

No	Parameter RMR	Hasil yang Didapatkan	Nilai Bobot
1	Kekuatan Batuan Utuh	50-100 MPa	7
2	Rock Quality Designation (RQD)	97,18%.	20
3	Jarak Antar Spasi Kekar	458,715	10
4	Kondisi Kekar	15,128	15,128
5	Kondisi Air Tanah	Basah	7
	Total Bobot RMR		59,128
	Kelas Massa Batuan		Sedang

p-ISSN 2715-5358, e-ISSN 2722-6530, Volume xx Nomor xx, Halaman xx-xx, Februari/Agustus 20xx
https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee

Korelasi antara Kekar, Pelapukan, dan Kerusakan Struktur

Terdapat hubungan langsung antara intensitas kekar dan tingkat kerusakan pada struktur jembatan. Makin intensif kekar yang terbuka dan terisi material lemah, makin tinggi potensi pelapukan dan penurunan daya dukung. Keadaan ini diperparah oleh desain fondasi yang tidak memperhitungkan kelemahan geologi lokal akibat kekar. Jembatan baru yang dibangun di lokasi yang sama juga menghadapi risiko yang serupa jika tidak dilakukan penguatan atau mitigasi geoteknik terhadap batuan dasar yang terkekarkan.

p-ISSN 2715-5358, e-ISSN 2722-6530, Volume xx Nomor xx, Halaman xx-xx, Februari/Agustus 20xx
https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis nilai *Rock Mass Rating* (RMR), massa batuan andesit di wilayah Kulon Progo diklasifikasikan ke dalam kategori sedang (Kelas III). Meskipun batuan utuh memiliki kuat tekan yang memadai, intensitas kekar yang tinggi bertindak sebagai bidang diskontinuitas yang secara signifikan menurunkan kestabilan lereng dan daya dukung fondasi infrastruktur. Keberadaan kekar ini memicu rekahan sekunder, mempercepat laju pelapukan batuan vulkanik, dan mempermudah infiltrasi air. Akibatnya, kehadiran air dalam sistem diskontinuitas tersebut mengakibatkan erosi vertikal pada dasar fondasi jembatan dan menggerus material penyangga bawah struktur. Kerentanan geoteknik ini kian terakselerasi oleh kondisi geomorfologi lereng yang curam serta paparan beban gempa berdasarkan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) yang secara linear mereduksi faktor keamanan (FK) lereng dan meningkatkan risiko deformasi massa batuan.

Mengingat tingginya risiko geohazard pada morfologi berbukit dengan intensitas kekar yang rapat, pelaksanaan kajian geologi teknik dan geoteknik terpadu menjadi tahapan kritikal pra-konstruksi. Implementasi rekayasa perkuatan geoteknik berupa aplikasi fondasi beton bertulang (*bored pile* atau *piles*) yang dipancang hingga mencapai lapisan batuan keras (*bedrock*) terbukti efektif dalam meningkatkan faktor keamanan struktur serta mereduksi risiko longsoran. Selain perkuatan struktural, pengelolaan drainase permukaan (*surface drainage*) dan pengontrolan air tanah juga menjadi parameter penting untuk meminimalkan pelapukan dini serta menjaga stabilitas jangka panjang bangunan, khususnya pada area konservasi dan situs warisan budaya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih dan apresiasi setinggi-tingginya kepada Bapak Moehammad Ali Jambak selaku dosen pengampu mata kuliah Geologi Kuarter atas bimbingan, arahan, dan ilmu yang telah diberikan selama penyusunan karya ini. Ungkapan terima kasih juga ditujukan kepada para peneliti terdahulu, seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, serta segenap sumber referensi yang berkontribusi penting hingga artikel ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Widagdo, A., Pramumijoyo, S., & Harijoko, A. (2022). Struktur Kekar sebagai Pengganggu Stabilitas Bangunan Jembatan di Daerah Plampang-Kokap, Yogyakarta. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 13(1), 13–23. https://jlbg.geologi.esdm.go.id/index.php/jlbg/article/view/319

2. Prastowo, R., Trianda, O., & Novitasari, S. (2018). Identifikasi Kerentanan Gerakan Tanah Berdasarkan Data Geologi Daerah Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulonprogo, Yogyakarta. *Kurvatek*, 3(2), 31–40.

p-ISSN 2715-5358, e-ISSN 2722-6530, Volume xx Nomor xx, Halaman xx-xx, Februari/Agustus 20xx
https://e-journal.trisakti.ac.id/index.php/jogee

3. Putra, O. A. (2018). Analisis Stabilitas Lereng pada Situs Ratu Boko dengan Menggunakan Variasi Beban Gempa. *Jurnal Teknik Sipil ITP*, 5(1), 1–6.
4. Clarista Angela Simbar, 2016. *Geologi Kulonprogo dan Sejarah Geologi Kulonprogo: Asosiasi Batugamping di atas Paleo Vulkanik yang Menerobos Endapan*. Independent Researcher, Academia.edu. https://independent.academia.edu/ClaristaAngelaSimbar.
5. Bemmelen, R.W. van, 1949. *The Geology of Indonesia*. Vol. IA. Government Printing Office, Yogyakarta.
6. Bieniawski, Z. T., 1973. Engineering Charac teristics of Jointed Rock Masses. Trans. The Civil Engineering In South Africa, vol. 15, pp 335 – 343.
7. Bieniawski, Z. T., 1989. Engineering Rock Mass Classification John Willey and Sons, Inc, Canada.
8. Syahidah, A., Prasongko, B. K., dan Raharjo, S., 2022. Geologi dan Analisis Risiko Bencana Tsunami di Bandara Internasional Yogyakarta dan Sekitarnya, Kabupaten Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Jurnal Ilmiah Geologi Pangea, Vol. 9, No. 2, hlm. 41–50.
9. H. Smyth, dkk. 2003. Volcanic Origin Of Quartz-Rich Sediments in East Java29th IPA Annual Convention & Exhibition.
10. **Rahardjo, W., Sukandarrumidi, & Rosidi, H.M.D.**, 1995. Peta Geologi Regional Daerah Gunung Ijo di Kulon Progo. *Buletin Sumberdaya Geologi*, Volume 8, No. 2. LIPI-Kebumen.