



Analisis Pengaruh Derajat Pelapukan Terhadap Sifat Fisik dan Sifat Mekanik Batuan Andesit Porfiri di Daerah Kokap, Kompleks Pegunungan Kulon Progo, Yogyakarta

Laode Jonas Tugo, Abd. Hadid Rahman Ulfa[✉], Ika Sartika Ambarsari

Program studi Teknik Pertambangan, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received: November 17, 2025

Accepted: June 8, 2026

Published: June 21, 2026

Keywords:

andesit porfiri

pelapukan

sifat fisik

sifat mekanik

Corresponding author:

Abd. Hadid Rahman Ulfa

Email: abd.hadid@uho.ac.id

Read online:



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

Copyright © 2026 Authors



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

ABSTRAK

Batuan andesit porfiri di Kecamatan Kokap, Pegunungan Kulon Progo, Yogyakarta merupakan material geologi yang rentan mengalami degradasi akibat pelapukan, sehingga berpotensi mempengaruhi stabilitas lereng dan keandalan struktur geoteknik di kawasan tersebut. Namun, kajian kuantitatif yang secara sistematis menghubungkan derajat pelapukan dengan perubahan mikrostruktur dan penurunan sifat mekanik pada andesit porfiri di wilayah ini masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengklasifikasikan derajat pelapukan secara kuantitatif berbasis analisis petrografi digital, yang memungkinkan identifikasi persentase mineral sekunder dan pori (void) dan rekahan mikro (Microcrack). Tiga sampel batuan (ADS-01, ADS-02, ADS-03) diambil dari singkapan dengan tingkat pelapukan berbeda. Hasil analisis petrografi menunjukkan peningkatan kandungan mineral sekunder dari 12,4% (kelas I) menjadi 48,2% (kelas IV), disertai peningkatan pori dari 0% menjadi 2,9% dan rekahan mikro dari 0,2% menjadi 1,2%. Perubahan mikrostruktur ini berpengaruh nyata terhadap degradasi sifat mekanik. Hasil uji UCS memperlihatkan penurunan kekuatan tekan seiring meningkatnya kelas pelapukan, diikuti penurunan kohesi, sudut gesek, Geological Strength Index (GSI), dan Rock Mass Rating (RMR), serta penurunan konsisten bobot isi asli, jenuh, dan kering.

ABSTRACT

Porphyritic andesite in Kokap District, Kulon Progo Mountains, Yogyakarta is a geologically weak material and subject to weathering-related breakdown processes which may affect the stability of slope and strength of geotechnical structure throughout the region. Quantitative studies that established correlations between the weathering degree, microstructural changes and the degradation of mechanical properties of porphyritic andesite from Kokap District are lacking. In this study, quantitative classifications of weathering degree were carried out based on digital petrographic observations in order to measure the abundances of secondary minerals, porosity (void), and Microcracks. Three rocks samples with different weathering degree (ADS-01, ADS-02, and ADS-03) were taken from outcrops along the Kokap District. Petrographic analysis showed increasing amounts of secondary minerals with weathering class from 12.4% (Class I, to 48.2% (Class IV), increase porosity content from 0% to 2.9%, and Microcrack density from 0.2% to 1.2%. Changes in rock microstructure were concluded to play an important role in degrading mechanical properties of porphyritic andesite. Test results of Uniaxial Compressive Strength (UCS) showed decreasing trend of compressive strength with advancing weathering degree. Declines in cohesion and friction angle were also consistently observed with reduction of Geological Strength Index (GSI) and Rock Mass Rating (RMR) value. Natural, saturated and dry unit weight showed a consistent decrease.

How to cite: Tugo, L.J., Ulfa, A.H.R., Ambarsari, I.K. (2026). Analisis Pengaruh Derajat Pelapukan Terhadap Sifat Fisik dan Sifat Mekanik Batuan Andesit Porfiri di Daerah Kokap, Kompleks Pegunungan Kulon Progo. OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan, 8(1), pp. 67-75. <https://doi.org/10.56099/ophi.v8i1.p67-75>

1 Pendahuluan

Andesit porfiri merupakan salah satu batuan beku yang umum ditemukan pada formasi geologi di kawasan vulkanik. Batuan ini banyak dimanfaatkan sebagai material konstruksi maupun sebagai batuan penyangga dalam bidang teknik sipil dan pertambangan. Pegunungan Kulon Progo di Yogyakarta merupakan salah satu kawasan vulkanik di mana andesit porfiri tersebar luas dan memegang peranan penting dalam kerangka geologi wilayah tersebut. Kawasan ini dicirikan oleh topografi yang curam dan pemanfaatan lahan yang intensif, meliputi pertanian terasering dan pembangunan infrastruktur, sehingga massa batuan terekspos terhadap proses pelapukan yang berlangsung secara terus-menerus di bawah pengaruh iklim tropis lembab. Dalam kondisi tersebut, sifat fisik dan mekanik andesit porfiri dapat mengalami perubahan yang cukup signifikan akibat proses pelapukan. Pada tahap awal, pelapukan biasanya dikenali melalui perubahan warna pada batuan, di mana tingkat perubahannya akan semakin jelas seiring dengan meningkatnya derajat pelapukan, mulai dari perubahan ringan hingga warna yang sangat mencolok (Rakhman dkk., 2017; Little, 1996). Proses pelapukan, baik yang bersifat fisik, kimia, maupun biologis, mampu memodifikasi struktur internal batuan sehingga berpengaruh terhadap kekuatan, kestabilan, serta keandalannya dalam aplikasi geoteknik.

Meskipun pelapukan memiliki signifikansi geoteknik yang besar di kawasan ini, kajian kuantitatif yang secara sistematis mengkaji hubungan antara derajat pelapukan dengan degradasi sifat batuan pada andesit porfiri di Kulon Progo masih sangat terbatas. Dalam praktik geoteknik, pengaruh pelapukan terhadap batuan merupakan parameter kritis dalam penilaian stabilitas lereng, daya dukung, serta perencanaan penggalian dan penyanggaan (Durgin, 1977). Batuan yang telah mengalami pelapukan umumnya menunjukkan kondisi diskontinuitas yang lebih kompleks, seperti meningkatnya jumlah dan keterbukaan rekahan, berkurangnya kerapatan massa batuan, serta kerusakan mikrostruktural yang progresif (Letto dkk., 2017). Studi-studi terdahulu mengenai pelapukan andesit umumnya masih berfokus pada deskripsi mineralogi atau klasifikasi kualitatif, sehingga terdapat kesenjangan penting mengenai apakah parameter kekuatan massa batuan seperti Geological Strength Index (GSI) dan Rock Mass Rating (RMR) dapat diestimasi dari batuan segar berdasarkan kelas derajat pelapukannya. Pengisian kesenjangan ini sangat penting untuk meningkatkan kapasitas prediktif dalam penilaian geoteknik pada kawasan vulkanik yang rentan terhadap pelapukan intensif.

Penelitian ini bertujuan untuk mengklasifikasikan derajat pelapukan secara kuantitatif pada singkapan andesit porfiri di Kecamatan Kokap, Kulon Progo, menggunakan analisis petrografi digital guna mengidentifikasi kandungan mineral sekunder, porositas, dan densitas rekahan mikro. Dengan mengkorelasikan parameter mikrostruktur tersebut terhadap perubahan sifat fisik meliputi bobot isi asli, jenuh, dan kering serta parameter mekanik seperti Uniaxial Compressive Strength (UCS), kohesi, sudut gesek dalam, GSI, dan RMR, penelitian ini berupaya membangun kerangka kuantitatif yang sistematis dalam menghubungkan kelas pelapukan dengan kualitas massa batuan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada evaluasi geoteknik yang lebih andal serta penilaian stabilitas lereng di kawasan vulkanik tropis yang memiliki karakteristik serupa.

2 Geologi Daerah Penelitian

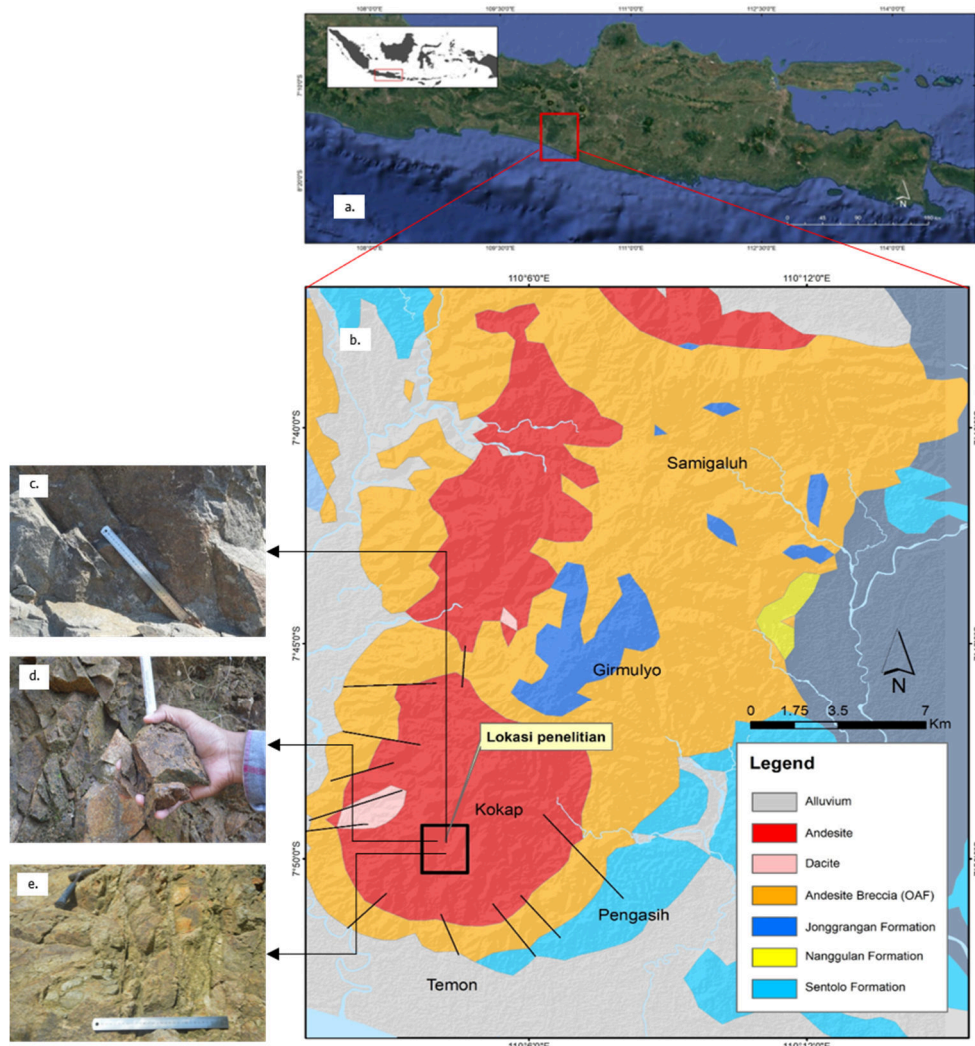
Daerah penelitian terletak di Kecamatan Kokap, Pegunungan Kulon Progo, yang secara stratigrafi tersusun atas produk vulkanisme purba berumur Oligo–Miosen. Batuan tertua di wilayah ini adalah Formasi Nanggulan berumur Eosen, terdiri atas lignit, napal pasir, batulempung, batugamping, tuf, dan batupasir (Winarti dkk., 2022). Di atasnya hadir Formasi Kebobutak yang tersusun atas breksi andesit, tuf, lapili, aglomerat, dan lava andesit berumur Oligo–Miosen, yang kemudian diterobos oleh intrusi diorit dan andesit pada Miosen Awal (Irzon, 2018). Intrusi andesit inilah yang menjadi sumber utama keterdapatan andesit porfiri di permukaan, yang singkapannya dikontrol oleh pola struktur geologi setempat. Batuan beku berumur Oligosen–Miosen di kawasan ini secara regional dikelompokkan sebagai Old Andesite Formation (OAF) di bagian barat dan Formasi Mandalika di bagian timur (Irzon, 2018).

Keterdapatan singkapan andesit porfiri di permukaan secara signifikan dikontrol oleh struktur geologi yang berkembang di kawasan ini (Gambar 1). Struktur geologi di sekitar wilayah Kulon Progo menunjukkan pola sesar berarah barat–timur dan utara–selatan yang membentuk Graben Yogyakarta–Bantul, disertai sesar berarah selatan–barat laut dan sesar turun barat–timur yang mengontrol deformasi lokal (Winarti dkk., 2022). Secara morfotektonik, Pegunungan Kulon Progo memiliki orientasi utara–timur laut yang sepola dengan Sesar Progo–Muria, dan dianggap terkait dengan batas mikro–kontinen di Pegunungan Selatan Jawa (Verdiansyah, 2019). Kompresi utara–selatan menghasilkan sesar mengiri (sinistral) dengan pola kelurusan timur laut–barat daya, sementara rekahan, sesar naik, dan sesar normal turut berperan dalam membentuk morfologi kawasan

(Nugrahini dkk., 2020). Keberadaan zona sesar dan rekahan ini membuka jalur infiltrasi air meteorik ke dalam massa batuan, yang menjadi faktor pengendali utama intensitas pelapukan pada andesit porfiri di kawasan ini.

Kondisi geologi ini menempatkan andesit porfiri Kokap dalam lingkungan tektonik aktif yang memicu intensitas pelapukan yang bervariasi antar lokasi singkapan.. Magmatisme seri kalk-alkali dengan komposisi andesit basaltik hingga dasit yang

berkembang dalam dua fase pada Oligosen Akhir-Miosen Awal dan Miosen Akhir (Harjanto, 2011) menghasilkan batuan dengan tekstur porfiri yang rentan terhadap pelapukan diferensial antara fenokris dan massa dasar. Di bawah pengaruh iklim tropis lembab yang mendominasi kawasan ini, proses pelapukan kimia berlangsung intensif dan mengubah mineral primer menjadi mineral sekunder secara progresif seiring meningkatnya derajat pelapukan.



Gambar 1 Lokasi penelitian dan titik pengambilan sampel batuan andesit porfiri dengan perbedaan kenampakan fisik di lapangan, (a) Lokasi penelitian berada di pulau Jawa daerah Istimewa Yogyakarta, (b) Peta geologi regional Kulon Progo (Rahardjo dkk., 1995) dan Lokasi penelitian berada pada Kecamatan Kokap (Kotak hitam), (c) Singkapan batuan ADS-01 dalam kondisi segar, (d) Singkapan batuan ADS-02 dalam kondisi lapuk, (e) Singkapan batuan ADS-03 dalam kondisi lapuk

3 Metode

3.1 Teknik Sampling dan Klasifikasi Derajat Pelapukan

Ketiga sampel dipilih dari tiga lokasi singkapan yang berbeda, sampel (ADS-01, ADS-02, dan ADS-03) batuan dilakukan secara purposive sampling berdasarkan variasi kenampakan megaskopis yang

mencerminkan perbedaan tingkat pelapukan pada singkapan andesit porfiri di Kecamatan Kokap, Pegunungan Kulon Progo. Pendekatan tiga sampel ini mengikuti kerangka klasifikasi derajat pelapukan Ceryan dkk., (2008) yang membagi kondisi batuan ke dalam enam kelas utama, di mana distribusi sampel diarahkan untuk mewakili kelas pelapukan.

3.2 Penentuan Kelas Massa Batuan

3.2.1 Rekahan mikro (*microcrack*)

Kondisi rekahan mikro (*microcrack*) dihitung dari pengamatan mikroskopis sayatan tipis, dengan menghitung jumlah retakan per panjang garis pemindaian (*scanline*) (Irfan dan Dearman, 1978). *Microcrack* dihitung menggunakan *Microfracture Index* (MI) dengan menentukan jumlah rekahan pada panjang tertentu dari garis *scanline* menggunakan persamaan 1.

$$MI = \frac{\text{Number of crack}}{\text{Length of scanline section}} \quad (1)$$

MI digunakan sebagai parameter untuk menilai pelapukan fisik. Semakin tinggi MI, semakin banyak rekahan mikro mengindikasikan pelapukan fisik yang lebih intens (Irfan dan Dearman, 1979). Hasil analisis petrografi menunjukkan bahwa rekahan mikro pada sayatan batuan mengalami peningkatan seiring dengan tingkat pelapukan, dari kondisi segar hingga lapuk tinggi.

3.2.2 Pori (*void*)

Peningkatan persentase pori (*void*) pada batuan seiring bertambahnya tingkat pelapukan secara teoritis disebabkan oleh perubahan mikrosstruktur yang terjadi akibat proses pelapukan fisika dan kimia (Knopp dkk., 2022). porositas ϕ didefinisikan pada persamaan 2 berikut:

$$\phi = \frac{V_{\text{pori}}}{V_{\text{total}}} \quad (2)$$

Dimana V_{pori} adalah volume rongga (*void*) dalam batuan, dan V_{total} adalah volume total sampel (padat + pori). Hasil dari analisis MI dan presentase pori (*void*) dibandingkan dengan mineral presentase sekunder yang selanjutnya diplot ke dalam ternary diagram oleh Ceryan dkk. (2008).

3.3 Karakteristik Mekanik Batuan

3.3.1 *Uniaxial Compressive Strength* (UCS)

Pengujian *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) dilakukan untuk menentukan kuat tekan uniaxial batuan andesit porfiri pada masing-masing tingkat pelapukan. Pengujian dilakukan menggunakan mesin tekan hidrolik sesuai standar International Society for Rock Mechanics (ISRM) (Ulusay dan Hudson, 2007). Sampel batuan dibentuk silinder dengan perbandingan tinggi terhadap diameter (H/D) sekitar 2:1 agar distribusi tegangan selama pengujian berlangsung seragam. Nilai UCS dihitung berdasarkan perbandingan antara beban maksimum saat sampel mengalami keruntuhan terhadap luas penampang sampel batuan, yang dinyatakan dengan persamaan 3:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Dimana σ_c adalah kuat tekan uniaxial (MPa), P adalah beban maksimum pada saat runtuh (N) dan A adalah luas penampang sampel (mm^2).

Nilai UCS digunakan untuk mengevaluasi pengaruh tingkat pelapukan terhadap penurunan kekuatan batuan. Semakin tinggi tingkat pelapukan, maka nilai UCS cenderung menurun akibat berkembangnya mineral sekunder dan pori yang menyebabkan melemahnya ikatan antar mineral penyusun batuan.

3.3.2 *Geological Strength Index* (GSI)

Penentuan nilai *Geological Strength Index* (GSI) dilakukan untuk mengevaluasi kualitas massa batuan berdasarkan kondisi struktur massa batuan dan karakteristik permukaan diskontinuitas. Penilaian GSI mengacu pada klasifikasi Hoek dan Brown (1997) melalui pengamatan langsung di lapangan serta dukungan analisis petrografi. Parameter utama yang diamati meliputi tingkat kekompakan massa batuan, intensitas rekahan, kondisi permukaan bidang diskontinuitas, tingkat pelapukan, serta keterhubungan antar rekahan.

3.3.3 Kuat geser batuan

Parameter kuat geser batuan ditentukan berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr–Coulomb yang meliputi nilai kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ). Nilai tersebut diperoleh melalui pendekatan hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser hasil pengujian laboratorium. Hubungan kuat geser batuan dinyatakan dengan persamaan 4 berikut:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (4)$$

Dimana τ adalah tegangan geser (MPa), c adalah kohesi batuan (MPa), σ_n adalah tegangan normal (MPa) dan ϕ adalah sudut gesek dalam ($^\circ$).

Analisis dilakukan untuk mengetahui hubungan antara peningkatan derajat pelapukan dengan perubahan parameter kuat geser batuan. Pelapukan menyebabkan penurunan kohesi dan sudut gesek dalam akibat melemahnya ikatan antar butir mineral, meningkatnya rekahan, dan bertambahnya kandungan mineral lempung pada batuan.

3.3.4 *Rock Mass Rating* (RMR)

Penentuan kualitas massa batuan dilakukan menggunakan metode *Rock Mass Rating* (RMR) yang dikembangkan oleh Bieniawski (1989). Sistem klasifikasi ini digunakan untuk mengevaluasi kualitas massa batuan berdasarkan beberapa parameter geoteknik yang meliputi nilai *Uniaxial Compressive Strength* (UCS), *Rock Quality Designation* (RQD), jarak antar diskontinuitas, kondisi diskontinuitas, kondisi air tanah, serta orientasi diskontinuitas terhadap arah lereng atau bukaan.

Pengamatan dilakukan secara langsung pada singkapan batuan di lapangan serta didukung oleh hasil pengujian laboratorium. Setiap parameter diberikan nilai pembobotan sesuai dengan klasifikasi [Bieniawski \(1989\)](#), kemudian seluruh nilai dijumlahkan untuk memperoleh nilai RMR total. Nilai RMR yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menentukan kelas kualitas massa batuan dan mengevaluasi pengaruh tingkat pelapukan terhadap kualitas massa batuan.

3.3.5 Bobot isi batuan

Pengujian bobot isi batuan dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat fisik batuan akibat proses pelapukan. Pengujian meliputi penentuan bobot isi asli (γ_n), bobot isi kering (γ_d), dan bobot isi jenuh (γ_{sat}) ([Ulusay dan Hudson, 2007](#)).

Sampel batuan terlebih dahulu ditimbang dalam kondisi alami, kemudian dikeringkan hingga mencapai berat konstan untuk memperoleh berat kering. Selanjutnya sampel direndam hingga mencapai kondisi jenuh untuk memperoleh berat jenuh. Volume sampel ditentukan berdasarkan metode perpindahan air atau pengukuran dimensi sampel.

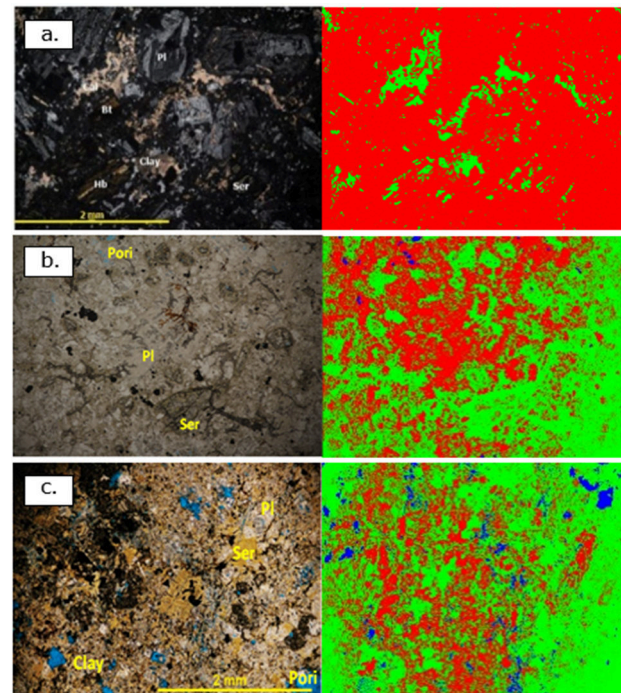
4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Klasifikasi Kelas Pelapukan Batuan

Identifikasi awal tingkat pelapukan batuan atau massa batuan dilakukan secara visual (megaskopis) di lapangan sebagai langkah awal klasifikasi. Pada tahap ini, kondisi fisik batuan diamati berdasarkan warna, kekompakan, keberadaan rekahan, serta perubahan mineralogi yang tampak secara kasat mata. Berdasarkan hasil observasi tersebut, ditemukan tiga variasi pelapukan yang menunjukkan perbedaan karakteristik yang cukup jelas. Masing-masing sampel kemudian diberi kode ADS-01, ADS-02, dan ADS-03 sebagai penanda untuk memudahkan analisis lanjutan (Gambar 1c, 1b dan 1d). Untuk menentukan kelas pelapukan dari ketiga jenis tersebut, dilakukan analisis lanjutan melalui pengujian laboratorium. Penentuan tingkat pelapukan mengacu pada klasifikasi [Ceryan dkk. \(2008\)](#) yang menggunakan tiga parameter utama, yakni persentase mineral sekunder, pori (void), dan jumlah rekahan mikro (Microcrack), yang semuanya diamati melalui pengamatan petrografi dengan bantuan mikroskop polarisasi (Gambar 2).

Sampel ADS-01 pada pengamatan petrografi dilihat pada Gambar 2a dicirikan dengan melimpahnya mineral plagioklas sebagai mineral primer dan sedikit biotit, hornblend, serisit dan mineral lempung. Munculnya mineral-mineral sekunder pada batuan ini mengindikasikan bahwa

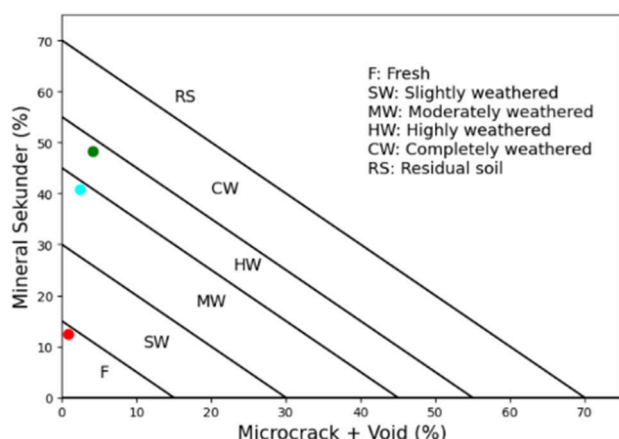
batuan ini telah mengalami proses pelapukan secara kimiawi. Sampel ADS-02 pada Gambar 2b memiliki ciri ukuran kristal lebih kecil dibanding sampel sebelumnya. Sampel ini juga memiliki persentase mineral plagioklas lebih sedikit dari sampel sebelumnya. Sampel ini memiliki pori batuan yang ditandai dengan adanya bluedye. Sampel ADS-03 pada Gambar 2c didominasi oleh mineral sekunder (mineral lempung) dan sedikit mineral primer (biotit dan plagioklas).



Gambar 2 Pemisahan (segmentasi) mineral primer dan sekunder pada batuan andesit porfiri berdasarkan fotomikrograf: (a) Sampel batuan dengan Kode ADS-01, (2) Sampel batuan dengan kode ADS-02, (c) Sampel batuan dengan kode ADS-03

Berdasarkan grafik klasifikasi pelapukan batuan menurut [Ceryan dkk. \(2008\)](#) pada Gambar 3, sampel ADS-01 termasuk dalam kategori batuan segar (Fresh), kelas I. Sampel ini hanya mengandung mineral sekunder sebesar 12,4%, sehingga masih berada di bawah ambang batas yang menunjukkan terjadinya pelapukan signifikan. Pada pengamatan mikroskopis, tidak ditemukan keberadaan pori dalam sayatan tipis (Gambar 2a).

Sampel ADS-02 menunjukkan karakteristik yang berbeda, di mana batuan ini tergolong dalam tingkat pelapukan sedang (Moderately Weathered), kelas III. Hal ini ditunjukkan oleh meningkatnya kandungan mineral sekunder hingga 40,7%, serta munculnya pori sebesar 1,6% yang terisi bluedye. Kombinasi parameter ini menempatkan sampel ADS-02 pada kategori pelapukan menengah, di mana mineral primer mulai mengalami transformasi menjadi mineral sekunder dalam jumlah yang lebih signifikan.



Gambar 3 Klasifikasi pelapukan berdasarkan kehadiran mineral sekunder (Ceryan dkk., 2008)

Sementara itu, sampel ADS-03 tergolong dalam tingkat pelapukan tinggi (Highly Weathered), kelas IV. Secara umum, sampel ini memiliki komposisi mineral sekunder yang dominan, yaitu 48,2%, dengan pori mencapai 2,9%. Peningkatan porositas menunjukkan bahwa batuan ini mengalami degradasi fisik yang lebih lanjut seiring dengan proses pelapukan kimiawi. Kondisi ini konsisten dengan karakteristik batuan pada tingkat pelapukan tinggi, di mana struktur dan mineralogi batuan telah mengalami perubahan yang signifikan.

4.2 Pengaruh Pelapukan Terhadap Karakteristik Batuan

Analisis pengaruh pelapukan terhadap karakteristik batuan dilakukan dengan melihat kecenderungan data pada masing-masing kelas pelapukan. Karakteristik batuan yang dianalisa adalah *uniaxial compressive strength* (UCS), bobot isi, kuat geser batuan, *Geological Strength Index* (GSI), dan *Rock Mass Rating* (RMR) yang disajikan pada Tabel 1.

4.2.1 Pengaruh pelapukan terhadap *Uniaxial Compressive Strength* (UCS)

Hasil pengujian UCS menunjukkan bahwa peningkatan derajat pelapukan menyebabkan

penurunan kekuatan tekan batuan andesit porfiri secara sangat signifikan. Berdasarkan hasil pengujian, batuan segar (Kelas I) memiliki nilai UCS rata-rata sebesar 83,42 MPa, sedangkan pada batuan dengan pelapukan sedang (Kelas III) menurun menjadi 19,73 MPa, dan pada batuan dengan pelapukan tinggi (Kelas IV) hanya sebesar 8,77 MPa. Dengan demikian terjadi penurunan kekuatan sekitar 76,4% dari Kelas I ke Kelas III dan mencapai 89,5% dari Kelas I ke Kelas IV.

Penurunan tersebut berkaitan erat dengan perubahan mikrostruktur batuan akibat proses pelapukan. Hasil analisis petrografi menunjukkan bahwa kandungan mineral sekunder meningkat dari 12,4% pada Kelas I menjadi 48,2% pada Kelas IV, disertai peningkatan porositas dan rekahan mikro. Mineral primer seperti plagioklas dan hornblende mengalami alterasi menjadi mineral lempung dan serisit yang memiliki kekuatan mekanik lebih rendah. Akibatnya, ikatan antarbutir mineral menjadi semakin lemah sehingga kemampuan batuan menahan beban tekan berkurang secara drastis.

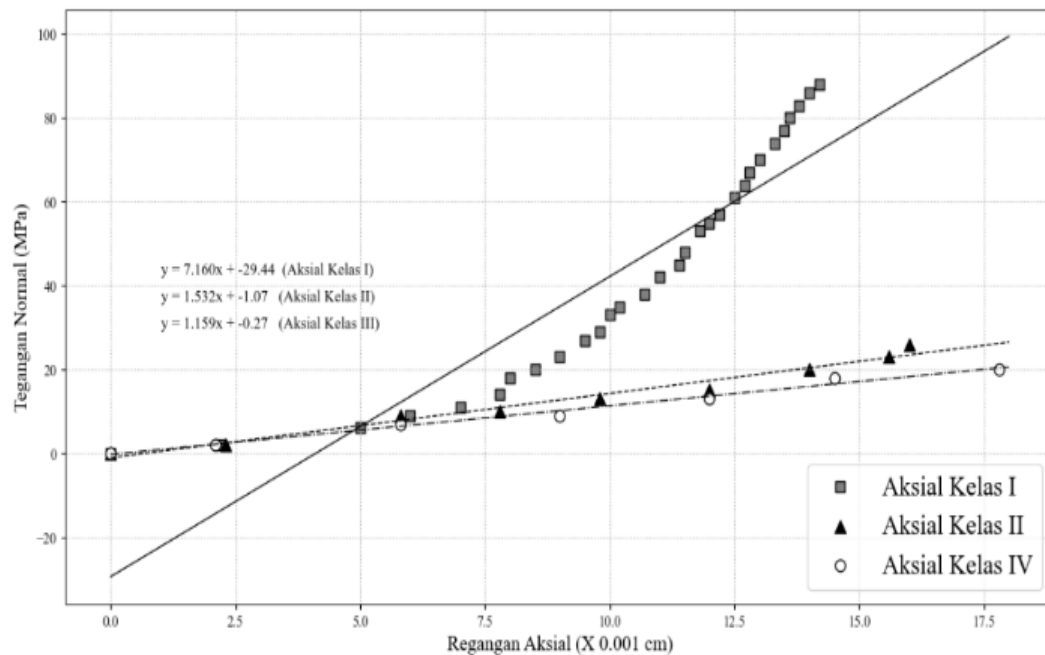
Kurva tegangan-regangan (Gambar 4) menunjukkan bahwa batuan segar bersifat lebih getas (brittle), sedangkan batuan yang telah mengalami pelapukan menunjukkan deformasi yang lebih besar sebelum mengalami keruntuhan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pelapukan tidak hanya menurunkan kekuatan batuan, tetapi juga mengubah perilaku mekaniknya.

4.2.2 Hubungan pelapukan dengan nilai *Geological Strength Index* (GSI)

Nilai Geological Strength Index (GSI) menunjukkan hubungan yang sangat kuat dengan tingkat pelapukan batuan (Gambar 5c). Nilai GSI rata-rata mengalami penurunan dari 78,50 pada Kelas I menjadi 42,67 pada Kelas III dan 32,67 pada Kelas IV. Penurunan GSI sebesar 45,6% dari Kelas I ke Kelas III menunjukkan bahwa proses pelapukan telah mengurangi kualitas massa batuan secara signifikan. Nilai GSI yang tinggi pada batuan segar menggambarkan massa batuan yang masih utuh, kompak, dan memiliki kondisi dis-

Tabel 1 Rekapitulasi hasil analisis karakteristik batuan berdasarkan berbagai kelas pelapukan

No	Parameter	Satuan	Kelas I (Segar)		Kelas III (Pelapukan Sedang)		Kelas IV (Pelapukan Tinggi)	
			Min	Rata-rata	Min	Rata-rata	Min	Rata-rata
1	UCS	MPa	80.01	83.42	7.96	19.73	7.60	8.77
2	GSI	–	60	78.50	40	42.67	30.76	32.67
3	RMR	–	68	70.67	60	64.00	46.32	47.00
4	Bobot isi (γ)	kN/m ³	24.78	24.99	21.90	22.75	18.02	18.58
5	Kohesi (c)	MPa	27.9	28.50	13.8	14.20	4.98	5.80
6	Sudut gesek dalam (φ)	(°)	39.5	42.10	32.0	33.60	24.70	25.30
7	Porositas	(%)	5.94	7.04	12.09	16.49	31.89	33.02
8	Microcrack	(%)	0.20	0.20	0.80	0.80	0.92	1.20



Gambar 4 Hubungan antara tegangan normal (MPa) dan regangan aksial

kontinuitas yang baik. Sebaliknya, meningkatnya intensitas pelapukan menyebabkan berkembangnya rekahan, bertambahnya bidang diskontinuitas, serta perubahan kondisi permukaan rekahan akibat alterasi mineral.

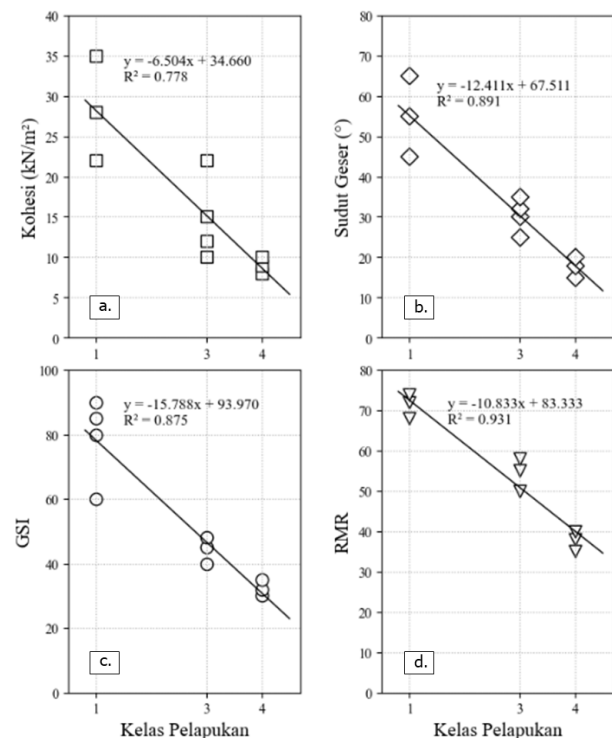
4.2.3 Hubungan pelapukan dengan nilai *Geological Strength Index* (GSI)

Nilai *Geological Strength Index* (GSI) menunjukkan hubungan yang sangat kuat dengan tingkat pelapukan batuan (Gambar 5c). Nilai GSI rata-rata mengalami penurunan dari 78,50 pada Kelas I menjadi 42,67 pada Kelas III dan 32,67 pada Kelas IV. Penurunan GSI sebesar 45,6% dari Kelas I ke Kelas III menunjukkan bahwa proses pelapukan telah mengurangi kualitas massa batuan secara signifikan. Nilai GSI yang tinggi pada batuan segar menggambarkan massa batuan yang masih utuh, kompak, dan memiliki kondisi diskontinuitas yang baik. Sebaliknya, meningkatnya intensitas pelapukan menyebabkan berkembangnya rekahan, bertambahnya bidang diskontinuitas, serta perubahan kondisi permukaan rekahan akibat alterasi mineral.

4.2.4 Pengaruh pelapukan terhadap kuat geser batuan

Kuat geser batuan merupakan kemampuan internal batuan dalam menahan tegangan sepanjang bidang geser, yang dipengaruhi oleh sifat intrinsik batuan serta faktor eksternal. Gambar 5a memperlihatkan penurunan nilai kohesi seiring meningkatnya derajat pelapukan, sedangkan Gambar 5b menunjukkan tren penurunan sudut gesek dengan peningkatan kelas pelapukan. ini secara konsisten

menunjukkan hubungan terbalik terhadap tingkat pelapukan batuan.



Gambar 5 Plotting terhadap karakteristik batuan dengan kelas pelapukan: (a) Kohesi, (b) Sudut Gesek, (c) *Geological Strength Index* (GSI), (d) *Rock Mass Rating* (RMR)

4.2.5 Hubungan pelapukan dengan nilai *Rock Mass Rating* (RMR)

Hasil perhitungan *Rock Mass Rating* (RMR) yang ditampilkan pada Gambar 5d menunjukkan tren penurunan yang sangat jelas dan konsisten seiring meningkatnya kelas pelapukan batuan, mulai dari

kondisi segar (kelas I), lapuk sedang (kelas III), hingga lapuk tinggi (kelas IV). Hasil perhitungan Rock Mass Rating (RMR) menunjukkan rata-rata turun dari 70,67 pada Kelas I menjadi 64,00 pada Kelas III dan 47,00 pada Kelas IV. Nilai RMR pada batuan segar berada pada kisaran tertinggi, mencerminkan kualitas massa batuan yang masih kompak, kuat, dan memiliki kondisi diskontinuitas yang baik. Namun, ketika batuan mengalami pelapukan sedang, nilai RMR mulai menurun secara signifikan, sejalan dengan berkembangnya rekahan, meningkatnya pori, serta melemahnya struktur internal batuan. Pada tingkat pelapukan tinggi, nilai RMR mencapai titik terendah, menunjukkan bahwa massif batuan telah mengalami degradasi fisik dan mekanik secara substansial.

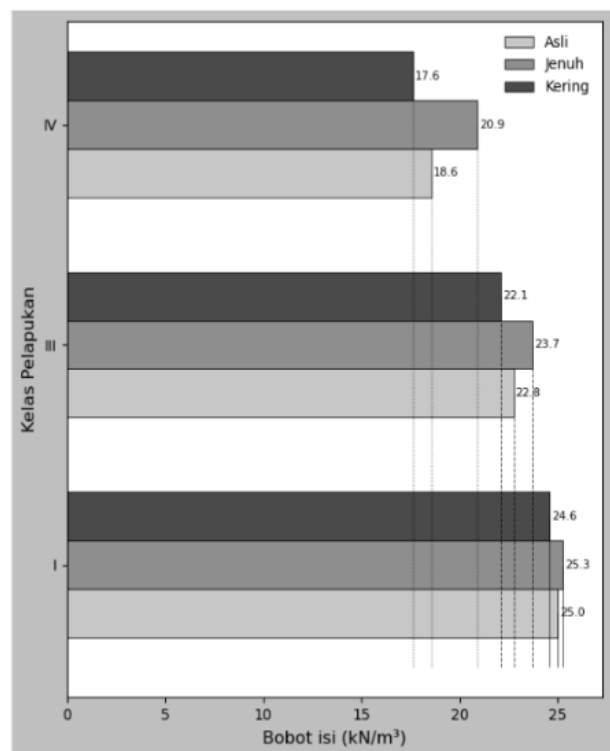
4.2.6 Pengaruh pelapukan terhadap bobot isi

Pengujian sifat fisik yang dilakukan dalam penelitian ini mencakup penentuan bobot isi asli, bobot isi jenuh, bobot isi kering, serta porositas batuan. Hasil pengujian yang ditampilkan pada Gambar 6 memperlihatkan bahwa ketiga parameter bobot isi tersebut menunjukkan pola penurunan yang konsisten seiring meningkatnya tingkat pelapukan batuan. Pada Kelas I, yang merepresentasikan kondisi batuan segar, nilai bobot isi berada pada kisaran tertinggi, yakni sekitar 24,5–25,3 kN/m³, mencerminkan struktur batuan yang masih kompak dengan porositas yang sangat rendah atau bahkan tidak terdeteksi. Ketika batuan memasuki Kelas III atau pelapukan sedang, nilai bobot isi mengalami penurunan menjadi sekitar 22–23,7 kN/m³.

Berdasarkan Tabel 1, seluruh parameter karakteristik batuan menunjukkan kecenderungan perubahan yang konsisten seiring dengan meningkatnya derajat pelapukan, mulai dari Kelas I (segar), Kelas III (pelapukan sedang), hingga Kelas IV (pelapukan tinggi). Perubahan tersebut tercermin pada penurunan parameter mekanik dan kualitas massa batuan, serta peningkatan parameter yang berkaitan dengan kerusakan mikrostruktur. Nilai Uniaxial Compressive Strength (UCS) mengalami penurunan yang sangat signifikan dari rata-rata 83,42 MPa pada Kelas I menjadi 19,73 MPa pada Kelas III dan hanya 8,77 MPa pada Kelas IV. Penurunan kekuatan tekan yang mencapai lebih dari 89% dari kondisi segar ke kondisi lapuk tinggi menunjukkan bahwa proses pelapukan berperan dominan dalam menurunkan kemampuan batuan untuk menahan beban tekan. Kondisi ini terjadi akibat transformasi mineral primer menjadi mineral sekunder, berkembangnya rekahan mikro, serta meningkatnya porositas yang menyebabkan ikatan antarbutir mineral menjadi semakin lemah.

Penurunan kualitas batuan juga tercermin dari nilai Geological Strength Index (GSI) yang mengalami

penurunan bertahap dari 78,50 pada Kelas I menjadi 42,67 pada Kelas III dan 32,67 pada Kelas IV. Nilai tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat pelapukan, semakin rendah kualitas massa batuan dan memburuknya kondisi diskontinuitas. Pola yang serupa juga terlihat pada nilai Rock Mass Rating (RMR) yang menurun dari 70,67 pada batuan segar menjadi 64,00 pada pelapukan sedang dan 47,00 pada pelapukan tinggi. Penurunan GSI dan RMR secara bersamaan mengindikasikan bahwa proses pelapukan tidak hanya mempengaruhi sifat batuan utuh (intact rock), tetapi juga mempengaruhi kualitas massa batuan secara keseluruhan melalui peningkatan intensitas rekahan, perubahan kondisi bidang diskontinuitas, dan penurunan integritas struktur batuan.



Gambar 6 Hubungan antara bobot isi dengan kelas pelapukan berdasarkan klasifikasi Ceryan dkk., (2008)

5 Kesimpulan

Kelas pelapukan pada batuan andesit porfiri di lokasi penelitian dibagi menjadi tingkat segar (kelas I), lapuk sedang (kelas III), dan lapuk tinggi (kelas IV) berdasarkan persentase mineral sekunder, porositas, dan rekahan mikro menurut klasifikasi Ceryan dkk. (2008). Pelapukan menyebabkan peningkatan mineral sekunder dari 12,4% menjadi 48,2%, porositas dari 0% menjadi 2,9%, serta microcrack dari 0,2% menjadi 1,2%. Perubahan mikrostruktur ini berdampak langsung pada penurunan sifat mekanik batuan, termasuk penurunan nilai UCS, kohesi, sudut

gesek, GSI, dan RMR. Bobot isi asli, jenuh, dan kering juga menurun secara konsisten, menandakan berkurangnya densitas akibat bertambahnya pori dan rekahan. Secara keseluruhan, pelapukan terbukti

berperan besar dalam menurunkan kualitas massa batuan andesit porfiri, sehingga penilaian tingkat pelapukan menjadi aspek penting dalam perencanaan geoteknik pada daerah berbatuan vulkanik.

Referensi

- Bieniawski, Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications. Ottawa, John Wiley & Sons.
- Ceryan, S., Tudes, S. & Ceryan, N. 2008. Influence of weathering on the engineering properties of Harsit granitic rocks (NE Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(1), pp. 97–104. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0115-0>
- Durbin, P. B. 1977. Landslides and the weathering of granitic rocks. *In*: Coates, D. R. (ed.) *Landslides*. Geological Society of America. pp. 127–131. <https://doi.org/10.1130/REG3-p125>
- Harjanto, A., dkk., 2011. Petrologi dan geokimia batuan vulkanik di Daerah Kulonprogo dan sekitarnya Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Ilmiah MTG*, 4(1), pp. 1–27.
- Hoek, E. & Brown, E. T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), pp. 1165–1186. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Irfan, T. Y. & Dearman, W. R. 1978. The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 11(3), pp. 233–244. <https://doi.org/10.1144/gsl.Qjeg.1978.011.03.03>
- Irfan, T. Y. & Dearman, W. R. 1979. Interrelationships between microscopical properties and selected index properties. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16, pp. 167–176.
- Irzon, R. 2018. Comagmatic Andesite and Dacite in Mount Ijo, Kulonprogo: A Geochemistry Perspective. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 19(4), pp. 221–231. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v19i4.185>
- Knopp, J., Steger, H., Moormann, C., Blum, P. 2022. Influence of Weathering on Pore Size Distribution of Soft Rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40, pp. 5333–5346. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02217-3>
- Letto, F., Perri, F., & Cella, F. 2017. Weathering characterization for landslides modeling in granitoid rock masses of the Capo Vaticano promontory (Calabria, Italy). *Landslides*, 15, pp. 43–62. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0860-5>
- Little, A. L., 1969. The engineering classification of residual tropical soils. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 1, pp. 1–10.
- Nugrahini, R. A., Hartono, H. G., & Listyani, T. 2020. Paleomorfogenesis Bentang Alam Kompleks Gunung Ijo, Kulonprogo. *Kurvatek*, 5(2), pp. 1–8. <https://doi.org/10.33579/krvtk.v5i2.1831>
- Rahardjo W., Sukandarrumidi, dan Rosidi H., 1995. Peta Geologi Lembar Yogyakarta skala 1:100.000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Rakhman, A. N., Astanto, N. W., & Triheriyadi, A. 2017. Pengaruh diskontinuitas dan pelapukan lava andesit terhadap sifat mekanik batuan di Giripurwo, Girimulyo, Kulonprogo, DIY. *Jurnal Mineral, Energi, dan Lingkungan*, 1(2), pp. 9–15. <https://doi.org/10.31315/jmel.v1i2.2111>
- Ulsay, R. & Hudson, J. 2007. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006*. Ankara, Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics.
- Verdiansyah, O. 2019. A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province, Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 51(1), pp. 31–41. <https://doi.org/10.22146/ijg.37442>
- Winarti, W., Sukiyah, E., Syafri, I., & Nur, A. A. 2022. Tectonic Control of the Nanggulan Formation Based on Morphometric Analysis in Kulon Progo, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, 9(2), pp. 147–157. <https://doi.org/10.17014/ijog.9.2.147-157>