Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral
Journal of Geology and Mineral Resources
Center for Geological Survey, Geological Agency, Ministry of Energy and Mineral Resources
Journal homepage: http://jgsm.geologi.esdm.go.id
ISSN 0853 - 9634, e-ISSN 2549 - 4759

Analisis Resiko Kerusakan sebagai Dasar Perencanaan Konservasi Warisan Geologi Kabupaten Klaten, Provinsi Jawa Tengah

Damage Risk Analysis as a Basis for Geoheritage Site Conservation Planning in Klaten Regency, Middle Java Province

Ronaldo Irzon[1*], Riecca Oktavitania[1], Ruly Setiawan[1], Woro Sri Sukapti[1], Emma Yan Patriani[1], Arie Pujiwati[2], Asep K. Permana[1]

[1]Pusat Survei Geologi, Badan Geologi Indonesia, Jl. Diponegoro 57, Bandung 40112, Indonesia
[2]Biro Fasilitasi Penanggulangan Krisis dan Pengawasan Energi, Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, Jl. Jend. Gatot Subroto Kav. 49 Jakarta Selatan 12950, Indonesia
[*]Email: ronaldoirzon297@gmail.com

Submit: 10 February 2026,Revised:11 May 2026, Approved: 15 May 2026, Online: 25 May 2026
DOI: https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v27i2.14079

Abstrak- Kabupaten Klaten memiliki keragaman geologi yang tinggi dan ditetapkan sebagai wilayah warisan geologi melalui Kepmen ESDM Nomor 246.K/GL.01/MEM.G/2023. Namun demikian, sejumlah warisan geologi di wilayah ini berpotensi mengalami degradasi akibat faktor alam maupun tekanan antropogenik. Penelitian ini bertujuan menilai tingkat risiko kerusakan (*degradation risk*) dari tiga belas warisan geologi di Klaten. Penentuan resiko kerusakan berbasis pada lima kriteria penilaian, yaitu kerusakan unsur, jarak terhadap sumber perusak, perlindungan hukum, aksesibilitas, dan kepadatan penduduk. Nilai setiap kriteria dikonversi menjadi Total Nilai Risiko Kerusakan (ΣDR) dan diklasifikasikan berdasarkan analisis sebaran data menggunakan rerata dan simpangan baku. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ΣDR berada pada rentang 175–287,5, dengan rata-rata 232 dan simpangan baku 35,6. Dua warisan geologi yaitu Fosil Nummulites Bukit Wungkal dan Grafit Girisimo, berada pada kategori risiko tinggi, sedangkan tiga termasuk risiko rendah. Delapan situs lainnya berada pada kategori risiko menengah. Variasi tingkat risiko ini menegaskan perlunya strategi konservasi yang berbeda untuk setiap kelompok situs, mulai dari pembatasan akses dan penguatan perlindungan fisik pada situs berisiko tinggi, hingga pemantauan berkala pada situs berisiko rendah. Temuan penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi pemerintah daerah dalam merancang kebijakan konservasi warisan geologi yang efektif, terarah, dan berkelanjutan di Kabupaten Klaten.

Kata Kunci: warisan geologi, resiko kerusakan, Kabupaten Klaten, konservasi.

Abstract- *Klaten Regency exhibits high geological diversity and has been designated as a geological heritage area through the Decree of the Minister of Energy and Mineral Resources No. 246.K/GL.01/MEM.G/2023. Nevertheless, several geoheritage sites within this area are potentially exposed to degradation caused by natural processes and anthropogenic pressures. This study aims to assess the degradation risk of thirteen geoheritage sites in Klaten. The risk evaluation is based on five criteria: element degradation, distance to damaging agents, legal protection, accessibility, and population density. The score of each criterion was converted into a Total Degradation Risk Value (ΣDR) and classified using data distribution analysis based on the mean and standard deviation. The results show that ΣDR values range from 175 to 287.5, with an average of 232 and a standard deviation of 35.6. Two geoheritage sites—Fossil Nummulites Bukit Wungkal and Girisimo Graphite—fall into the high-risk category, whereas three geoheritage sites are classified as low-risk. The remaining eight sites fall into the medium-risk category. These variations indicate the need for differentiated conservation strategies for each group of sites, ranging from access restrictions and strengthened physical protection for high-risk sites to periodic monitoring for low-risk sites. The findings provide a scientific basis for local government planning in formulating effective, targeted, and sustainable geoheritage conservation policies in Klaten Regency.*

Kata Kunci: *geoheritage, degradation risk, Klaten Regency, conservation.*

© JGSM. This is an open access article under the CC-BY-NC license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

PENDAHULUAN

Geodiversity merupakan dasar dari seluruh fenomena geologi yang muncul pada suatu bentang alam, meliputi keragaman batuan, mineral, fosil, bentuklahan, tanah, serta berbagai proses geologi yang membentuknya (Gray, 2013). Komponen-komponen ini menyediakan rekaman evolusi bumi yang dapat dipahami melalui keberadaan fenomena geologi sebagai unit representatifnya (Brilha, 2016). Dalam konteks konservasi, *geosite* berperan sebagai lokasi kunci yang memuat nilai ilmiah, edukatif, estetika, dan wisata. Oleh karena itu, *geodiversity* tidak hanya berfokus pada pelestarian, tetapi juga pada pemberdayaan masyarakat melalui pemanfaatan berkelanjutan (Reynard dkk., 2016; Jia dkk., 2023). *Geosite* pada akhirnya menjadi sarana penting untuk menjembatani pemahaman publik terhadap dinamika kebumian melalui kegiatan interpretasi dan pendidikan geologi.

Seiring berkembangnya geopark nasional dan internasional, kebutuhan untuk menilai kondisi dan risiko kerusakan warisan geologi secara objektif semakin meningkat. Penilaian kuantitatif diperlukan tidak hanya untuk memetakan nilai ilmiah atau potensi edukasi, tetapi juga untuk mengidentifikasi tingkat kerentanan fisik, tekanan antropogenik, serta kebutuhan perlindungan yang tepat (Fassoulas dkk., 2012; Adrianda dkk., 2025). Berbagai metode penilaian telah dikembangkan, mulai dari penekanan pada nilai ilmiah (Reynard dkk., 2016), evaluasi geomorfosit (Pereira dkk., 2007), hingga pendekatan komprehensif berbasis parameter utama dan tambahan seperti dikemukakan oleh Brilha (2016). Perkembangan terkini bahkan memasukkan aspek turisme dan digitalisasi untuk memvisualisasikan ancaman terhadap *geosite* (Pasquaré Mariotto dkk., 2023). Metode-metode tersebut telah diaplikasikan secara luas di Indonesia dan terbukti membantu identifikasi potensi kerusakan serta perencanaan konservasi berbasis data (Ali dkk., 2020; Irzon dkk., 2024; Jannah dkk., 2024; Permanadewi dkk., 2024; Samodra dkk., 2024).

Kabupaten Klaten merupakan wilayah yang memiliki potensi warisan geologi (*geoheritage*) signifikan karena berada pada zona vulkanik aktif Merapi–Merbabu dan memiliki struktur geologi kompleks yang mencerminkan proses magmatik, sedimenter, hingga hidrotermal (Marjiyono dkk., 2014; Adha dkk., 2018; Kristanto dkk., 2021; Febriarta dkk., 2022). Berbagai warisan geologi di wilayah ini juga menyimpan elemen geologi yang bernilai tinggi, seperti rekaman erupsi Merapi Muda, manifestasi hidrotermal, batuan intrusif, hingga formasi karbonat yang kaya fosil. Namun demikian, sebagian warisan geologi menghadapi ancaman kerusakan akibat cuaca, erosi, aktivitas penambangan rakyat, pembangunan infrastruktur, dan pertumbuhan desa wisata. Oleh karena itu, Klaten menjadi lokasi yang relevan untuk menguji penilaian risiko degradasi sebagai dasar perencanaan konservasi geologi.

Penelitian ini bertujuan menilai tingkat risiko kerusakan (*degradation risk*) dari tiga belas warisan geologi di Kabupaten Klaten. Seluruh warisan geologi yang dianalisis merupakan situs yang telah ditetapkan dalam Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 246.K/GL.01/MEM.G/2023 tentang Warisan Geologi Kabupaten Klaten. Pendekatan penilaian mengacu pada metode Brilha (2016) dengan memeriksa karakter-karakter yang berhubungan dengan kerentanan unsur geologi, kedekatan terhadap sumber kerusakan, dan keberadaan perlindungan hukum. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran tingkat prioritas konservasi serta mendukung strategi pengelolaan warisan geologi (*geoheritage*) Klaten yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Geologi Wilayah Studi

Kondisi geologi Kabupaten Klaten digambarkan secara detail dalam Peta Geologi Lembar Klaten–Bayat skala 1:50.000 (Samodra & Sutisna, 1997) seperti ditampilkan pada Gambar 1. Berdasarkan peta tersebut, satuan batuan yang tersingkap di wilayah ini tersusun dari batuan malihan Pra-Tersier hingga endapan permukaan Kuarter. Satuan tertua adalah Kompleks Batuan Malihan Konang (pTKm), yang terdiri atas sekis dengan variasi komposisi, pualam setempat, serta serpentinit berumur Kapur Akhir. Kompleks metamorf ini diterobos oleh Diorit Pendul (Topi) berumur Oligosen, yang mencakup diorit, mikrodiorit, dan monzonit. Kedua satuan tersebut tersingkap terbatas di sekitar Gunung Konang dan Gunung Kebo pada bagian selatan Klaten. Secara regional, keberadaan batuan malihan dan intrusi ini konsisten dengan karakter Pegunungan Selatan yang mewakili fragmen busur magmatik Paleogen–Neogen di Jawa (Retongga & Siregar, 2026). Pada konteks

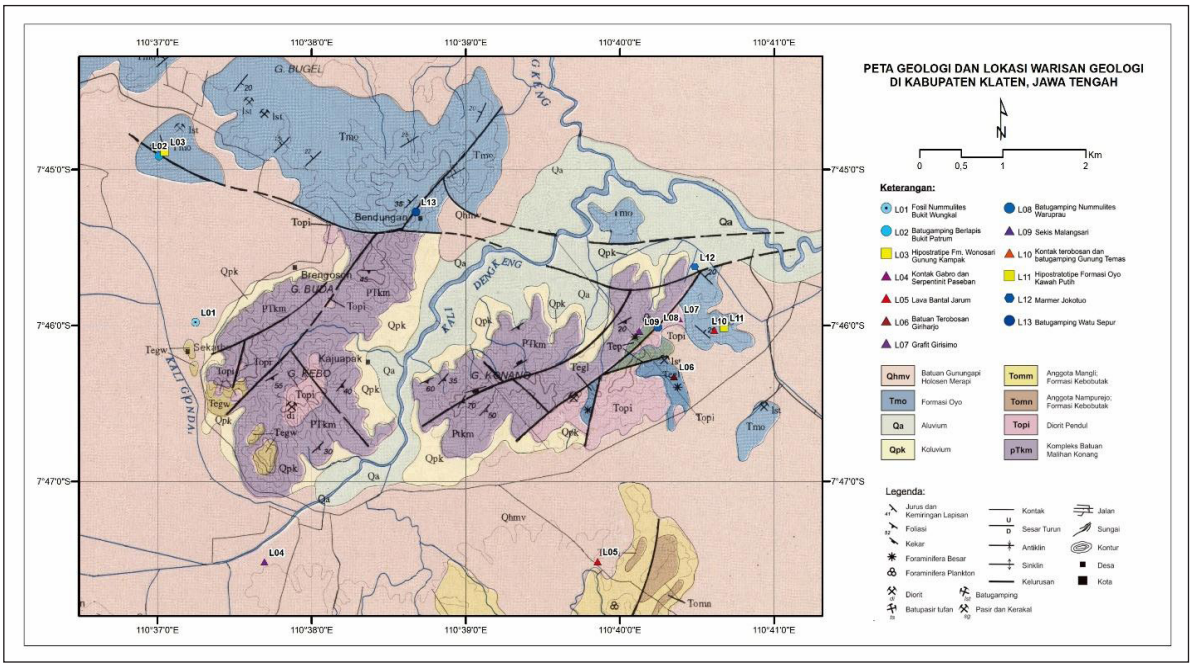
risiko kerusakan, zona ini cenderung stabil secara geologi tetapi beberapa singkapannya bersifat rapuh akibat pelapukan intensif dan aktivitas manusia di sekitarnya.

Formasi Kebo Butak (Tom), yang terendapkan sejak Oligosen hingga Miosen Awal, terdiri atas tiga anggota, yaitu: Nampurejo, Mangli, dan Belang. Anggota tersebut dibedakan berdasarkan urutan pengendapan dan variasi litologinya. Di atas satuan ini terdapat Formasi Semilir (Tms) berumur Miosen Awal–Tengah, ditandai oleh perselingan batupasir tufan, batulanau, dan batulempung berwarna cerah yang merupakan fasies khas dari *Semilir Formation Volcaniclastic Event* (Satyana, 2015). Formasi Nglanggran (Tmnv), yang terbentuk pada Miosen Tengah, berupa breksi gunungapi yang menunjukkan aktivitas vulkanisme intens di Pegunungan Selatan. Ketiga formasi tersebut tersingkap luas di zona perbukitan bagian selatan wilayah studi dan menjadi elemen penting pembentuk bentang alam Karst Gunung Sewu bagian barat. Kondisi geomorfiknya yang terjal menjadikan kawasan ini relatif rentan terhadap erosi dan gerakan tanah, sehingga sejumlah warisan geologi yang berada di dalamnya memerlukan perhatian khusus dalam penilaian risiko degradasi.

Sebagian besar wilayah Kabupaten Klaten ditutupi oleh endapan vulkanik muda dari Batuan Gunungapi Holosen Merapi (Qhmv). Produk erupsi ini berupa pasir gunungapi, tuf, dan material piroklastik lain yang berasal dari aktivitas Gunung Merapi di barat laut Klaten. Endapan Kuarter lainnya berupa koluvium (Qpk) dan aluvium (Qa) tersebar di bagian tengah hingga selatan daerah studi, mengisi lembah dan zona kaki perbukitan yang berasosiasi dengan singkapan batuan metamorf maupun intrusi tua. Satuan-satuan kuarter ini cenderung tidak kompak dan mudah tererosi, sehingga wilayah yang berada pada lingkungan tersebut umumnya memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap pelapukan, runtuhan singkapan, dan gangguan aktivitas manusia (Zhong dkk., 2021; Gverić dkk., 2023).

METODOLOGI

Warisan geologi yang dinilai resiko kerusakannya secara kuantitatif pada studi ini adalah seluruh tiga belas warisan geologi yang terangkum dalam Kepmen ESDM-RI Nomor 246.K/GL.01/MEM.G/2023. Sebagai gambaran mengenai kondisi warisan geologi, maka komponen geologi unggulan berikut keadaan lapangannya dirangkum sebagai inventaris. Pada metode yang diajukan Brilha (2016) dapat dipahami bahwa terdapat terdapat lima kriteria penilaian resiko kerusakan (*degradation risk*, DR), yaitu Kerusakan Unsur, Jarak Dengan Potensi Perusak, Perlindungan Hukum, Aksesibilitas, dan Kepadatan Penduduk. Kelima kriteria tersebut dapat diberi nilai dengan rentang 1-4 yang disebut Nilai Kriteria (NK) berdasarkan indikator yang jelas sesuai kondisi lapangan (Tabel 1). Acuan yang digunakan menjelaskan bahwa setiap kriteria pun memiliki bobot yang tidak sama, sehingga diajukan adanya Nilai Indikator (NI). Nilai Resiko Kerusakan (DR) setiap indikator adalah perkalian Nilai Kriteria (NK) dengan Nilai Indikator (NI) seperti tertera dalam Persamaan 1. Total Nilai Resiko Kerusakan (ΣDR) setiap warisan geologi adalah penjumlahan Nilai Degradation Risk dari kelima kriteria (Persamaan 2). Dalam penelitian ini, rentang nilai tersebut diperlakukan sebagai skala kontinu sehingga nilai NK tidak terbatas pada bilangan bulat (1, 2, 3, atau 4), tetapi juga dapat diberikan dalam bentuk desimal apabila kondisi lapangan berada di antara dua kategori indikator seperti pada studi-studi terdahulu (Irzon dkk., 2024; Permanadewi dkk., 2024; Samodra dkk., 2024).



Gambar 1. Peta geologi dan lokasi warisan geologi di wilayah Kabupaten Klaten dan sekitarnya (sumber: Samodra & Sutisna, 1997)

No	Kriteria	Indikator	NI
1	Kerusakan Unsur	Kemungkinan rusaknya semua elemen geologi	4
		Kemungkinan rusaknya elemen geologi utama	3
		Kemungkinan rusaknya elemen geologi sekunder	2
		Kecil kemungkinan rusaknya elemen geologi sekunder	1
2	Jarak Dengan Potensi Perusak	Situs berjarak <50 m dari kegiatan yang dapat menyebabkan kerusakan	4
		Situs berjarak <200 m dari kegiatan yang dapat menyebabkan kerusakan	3
		Situs berjarak <500 m dari kegiatan yang dapat menyebabkan kerusakan	2
		Situs berjarak <1 km dari kegiatan yang dapat menyebabkan kerusakan	1
3	Perlindungan Hukum	Tidak ada perlindungan hukum dan kontrol akses terhadap situs	4
		Tidak ada perlindungan hukum, tapi ada kontrol akses terhadap situs	3
		Ada perlindungan hukum, tapi tanpa kontrol akses terhadap situs	2
		Ada perlindungan hukum, maupun kontrol akses terhadap situs	1
4	Aksesibilitas	Situs berjarak <100 m dari jalan beraspal	4
		Situs berjarak <500 m dari jalan beraspal	3
		Situs dapat diakses langsung melalui jalan berkerikil	2
		Situs tak dapat diakses langsung, tapi jarak parkir bus <1 km	1
5	Kepadatan Penduduk	Situs berada dalam wilayah dengan kepadatan >1000 orang/km2	4
		Situs berada dalam wilayah dengan kepadatan 250-1000 orang/km2	3
		Situs berada dalam wilayah dengan kepadatan 100-250 orang/km2	2
		Situs berada dalam wilayah dengan kepadatan <100 orang/km2	1

Tabel 1. Petunjuk penilaian resiko kerusakan pada situs geologi seperti dijelaskan pada studi Brilha (2016)

Metode analisis sebaran data kemudian diterapkan pada klasifikasi Total Nilai Resiko Kerusakan. Rerata (μ) dan simpangan baku (σ) adalah dua karakter sebaran data yang perlu diketahui dan dihitung masing-masing berdasarkan Persamaan 3 dan Persamaan 4 secara berurutan. Geosite digolongkan beresiko kerusakan tinggi jika $\Sigma DR \geq \mu + \sigma$, beresiko menengah jika $\mu - \sigma < \Sigma DR < \mu + \sigma$, dan berpotensi rendah jika $\Sigma DR \leq \mu - \sigma$.

$$DR_k = NK \; x \; NI \quad \text{.....(1)}$$

$$\Sigma DR = DR_{k1} + DR_{k2} + \cdots + DR_{k5} \quad \text{.....(2)}$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} DR_i \quad \text{.....(3)}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (DR_i - \mu)^2} \quad \text{.....(4)}$$

HASIL PENELITIAN

Identifikasi Warisan Geologi

Fosil Nummulites Bukit Wungkal

Situs ini berada di Desa Sembung, Kecamatan Wedi. Keunikan situs ini adalah keterdapatan fosil foraminifera besar yang melimpah pada masa dasar batugamping kristalin (Gambar 2a). Batugamping di sini tersusun oleh kalsit, kuarsa, dan plagioklas. Struktur *slumping* ditemukan pada singkapan di sini.

Batugamping Berlapis Bukit Patrum

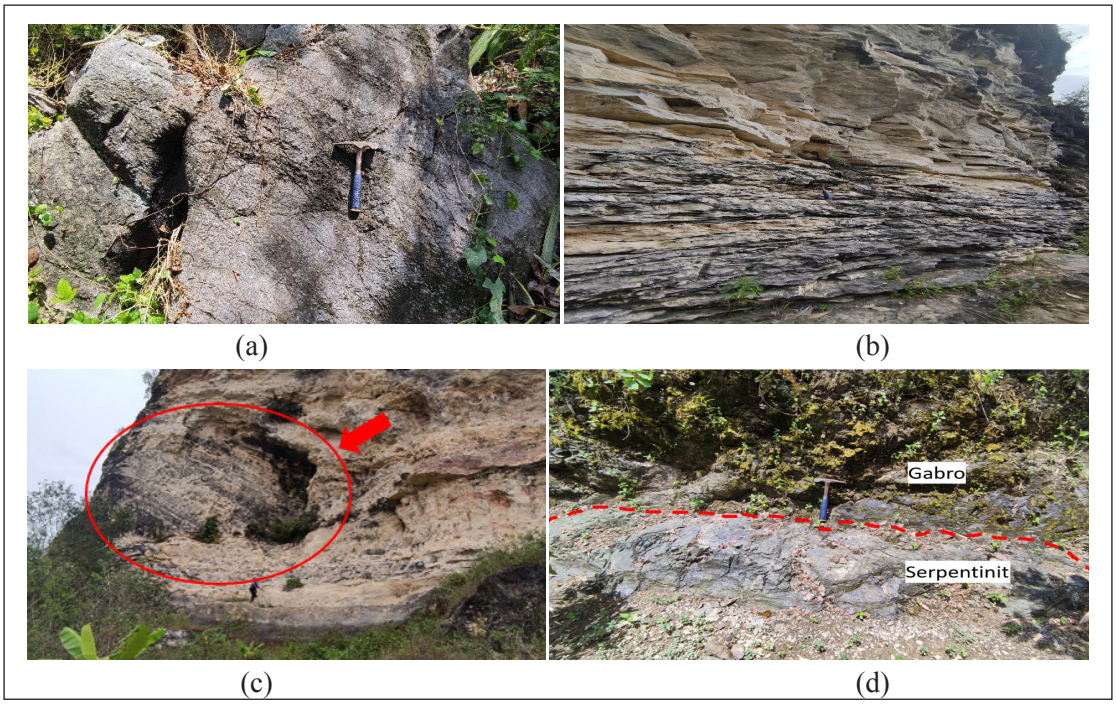
Perselingan batugamping yang meliputi *wackstone*, *packstone*, kalkarenit, dan kalsirudit dapat diamati pada situs yang berada di Desa Krakitan, Kecamatan Bayat (Gambar 2b). Fosil foraminifera planktonik maupun fosil foraminifera besar ditemukan cukup melimpah.

Hipostratotipe Formasi Wonosari Gunung Kampak

Situs ini menjadi bukti kehadiran Formasi Wonosari. Perlapisan batugamping yang terdiri dari *wackstone*, *packstone*, *grainstone*, *floatstone*, dan *rudstone* dapat dijumpai pada lokasi yang berada di Desa Krakitan ini. Sama seperti situs Batugamping Berlapis Bukit Patrum, situs ini memiliki kelimpahan fosil foraminifera planktonik maupun fosil foraminifera besar yang tinggi. Secara umum fasies fosil foraminifera di sini sama dengan yang dideteksi di Batugamping Berlapis Bukit Patrum. Struktur *dragfold* dan sesar normal terlihat pada singkapan batugamping (Gambar 3c).

Kontak Gabro dan Serpentinit Paseban

Singkapan pada situs di Desa Paseban ini terbentuk atas gabro dan serpentinit, dengan kontak berupa sesar normal. Kandungan mineral pada batuan antara lain berupa plagioklas, piroksen, serpentin, talk, magnetit, dan zeolit. Situs ini sebagai bukti evolusi batuan lantai Samudra yang berasosiasi dengan proses penunjaman saat Kapur Atas. Kehadiran serpentinit (Gambar 2d) menjadi pertanda reaksi seri ofiolit dengan air (Irzon & Abdullah, 2018; Jaya dkk., 2025).



Gambar 2. Kondisi lapangan empat situs geologi di Klaten: a) Warisan Geologi Fosil Nummulites Bukit Wungkal; b) perselingan batugamping di Batugamping Berlapis Bukit Patrum; c) fenomena *dragfold* (dalam lingkaran) pada Hipostratotipe Formasi Wonosari Gunung Kampak; dan d) serpentinit yang tersingkap pada Kontak Gabro dan Serpentinit Paseban

Lava Bantal Jarum

Sesuai dengan namanya, situs ini berlokasi di Desa Jarum, Kecamatan Bayat. Basalt berstruktur bantal, tekstur porfiroafanitik dan vesikuler menjadi komponen geologi utama (Gambar 3a). Struktur bantal terbentuk ketika lava keluar dan berinteraksi dengan lingkungan berair, terutama pada lingkungan bawah laut, sehingga mengalami pendinginan cepat (Suhendro dkk., 2023; Djafar dkk., 2024). Singkapan tersusun atas mineral plagioklas dan piroksen.

Batuan Terobosan Giriharjo

Magmatisme pada Oligosen Awal – Oligosen Akhir terekam pada situs ini dengan ditemukannya tubuh intrusi diorit dari satuan batuan Diorit Pendul. Diorit dan gabro pada singkapan telah mengalami proses eksogenik berupa pelapukan mengulitbawang (Gambar 3b). Plagioklas, piroksen, dan smektit dapat terdeteksi secara megaskopis. Situs ini berada di Desa Gununggajah, Kecamatan Bayat.

Grafit Girismo

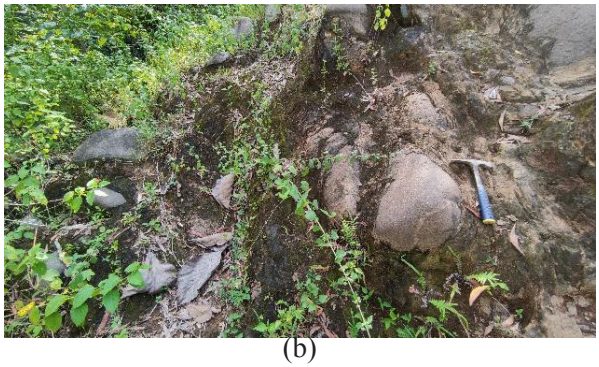
Grafit Girismo adalah situs berikutnya yang berada di Desa Gununggajah. Batuan tersingkap berupa sekis grafit, batulempung, dan batugamping (Gambar 3c). Ragam jenis fosil berupa foraminifera planktonik, bentos kecil, dan bentos besar dijumpai melimpah. Keberadaan fosil di sini telah dibahas dalam zonasi biostratigrafi foraminifera besar di kawasan Bayat, Klaten (Rahmawati dkk., 2024). Situs ini menjadi bukti pengangkatan batuan yang terbentuk di laut dangkal dan mengalami pensesaran akibat tektonik.

Batugamping Nummulites Watuprau

Situs ini juga berlokasi di Desa Gununggajah. Fosil nummulites menjadi titik berat komponen geologi di sini (Gambar 3d). Situs Batugamping Nummulites Watuprau merekam kondisi pengendapan karbonat laut dangkal pada Kala Eosen Tengah hingga Eosen Akhir (Rafaat dkk., 2025) yang berkaitan dengan kenaikan muka air laut, serta mengalami pengaruh metamorfisme regional derajat rendah sebagai bagian dari evolusi tektonik regional Jawa. Selain itu, batugamping yang diendapkan secara tidak selaras di atas basement berupa batuan malihan teramati pada situs ini.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3. a)struktur lava bantal dari Lava Bantal Jarum; b) pelapukan mengulitbawang di Batuan Terobosan Giriharjo berupa diorit; c) grafit yang berjumlah terbatas pada Grafit Girismo; dan d) Kumpulan fosil dari Batugamping Nummulites Watuprau

Sekis Malangsari

Warisan geologi ini dinilai unik karena merepresentasikan manifestasi proses metamorfisme regional yang berkaitan dengan evolusi tektonik Pulau Jawa sejak Kala Kapur Atas, yang telah lama menjadi objek kajian dalam literatur kebumian (Hall, 2012; Wakita dkk., 2021). Singkapan batuan teramati berupa sekis dengan sisipan marmer. Mineral pada batuan berupa muskovit, kuarsa, oksida besi, dan kalsit. Sama seperti tiga warisan geologi sebelumnya, Sekis Malangsari pun berada di Desa Gununggajah.

Kontak Batuan Terobosan dan Batugamping Gunung Temas

Situs ini berlokasi di Desa Talang, Kecamatan Bayat. Singkapan batuan dijumpai berupa batuan terobosan diabas, batugamping, dan lapisan paleosol. Kuarsa, plagioklas, piroksen, dan olivin dijumpai sebagai mineral utama penyusun diabas. Kalsit adalah mineral utama pada batugamping.

Hipostratotipe Formasi Oyo Kawah Putih

Warisan Geologi Hipostratotipe Formasi Oyo Kawah Putih pun dapat dijumpai di Desa Talang (Gambar 4a). Singkapan batuan terdiri atas napal, tufan, kalkarenit, *wackstone*, *packstone*, dan batugamping konglomeratan. Warisan geologi ini menjadi hipostratotipe Formasi Oyo yang terbentuk pada lingkungan neritik ketika Miosen Awal sampai Miosen Tengah

Marmer Jokotuo

Bentukan bukit terisolir yang tersusun oleh batuan marmer dengan jejak fosil foraminifera besar adalah deskripsi warisan geologi Marmer Jokotuo. Situs yang berkedudukan di Desa Tawangrejo, Kecamatan Bayat tersebut diperkirakan berasal dari sedimen pelitik dan batugamping berumur Kapur Bawah berdasarkan temuan fosil *Orbitulina sp* (Obaida dkk., 2025). Situs ini juga merekam mengenai pecahan Benua Australia yang dikenal sebagai Mikrokontinen Jawa Bagian Timur (Novianto dkk., 2022).

Batugamping Watu Sepur

Situs ini terletak di Desa Jotangan, Kecamatan Bayat. Pada lokasi ini dapat dijumpai singkapan berupa perlapisan batugamping *wackestone* dan *packstone* dengan kalsit sebagai mineral paling dominan. Warisan geologi tersebut adalah representasi Formasi Wonosari yang terendapkan ketika Miosen Tengah (Lunt & Allan, 2004).



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. a) singkapan Hipostratotipe Formasi Oyo Kawah Putih; b) kondisi Marmer Jokotuo; dan c) Singkapan Batugamping Watu Sepur

DISKUSI

Penilaian Kuantitatif Resiko Kerusakan Warisan Geologi di Klaten

Nilai resiko kerusakan geosite yang diteliti berdasarkan kriteria Kerusakan Unsur berada pada rentang 1–3,5. Batuan Terobosan Giriharjo dianggap paling aman

dari resiko kerusakan karena terdiri dari batuan beku *intermediate* yang kuat dan kompak. Batuan jenis ini paling tahan terhadap pelapukan (Irzon, 2018; Park dkk., 2024). Sebaliknya, Grafit Girismo adalah yang paling rentan rusak berdasarkan kriteria Kerusakan Unsur. Elemen geologi utama pada Grafit Girismo adalah yang mudah rusak. Selain itu, elemen geologi sekunder pada warisan geologi ini berupa mineral karbon amorf yang juga cukup rentan terhadap kerusakan. Pada skala yang lebih rendah, warisan geologi yang menjadikan fosil sebagai elemen utamanya, yaitu Fosil Nummulites Bukit Wungkal dan Batugamping Nummulites Watuprau, juga perlu mendapat perhatian karena jumlah fosil yang terbatas.

Ketiadaan penambangan aktif di wilayah studi menjadikan jalan raya, permukiman, dan lahan perkebunan sebagai sumber utama kerusakan ditinjau dari kriteria Jarak Dengan Potensi Perusak. Seluruh warisan geologi yang dipelajari berada <1 km dari pemukiman maupun perkebunan sehingga tidak ada yang tergolong sangat aman dari resiko kerusakan ditinjau dari kriteria tersebut. Empat warisan geologi, yaitu Kontak Gabro dan Serpentinit Paseban, Lava Bantal, Batuan Terobosan Giriharjo, dan Hipostratotipe Formasi Oyo Kawah Putih Jarum, adalah situs yang berjarak sekitar 700–800 m dari lokasi aktivitas penduduk. Belum adanya peraturan daerah secara formal mengenai konservasi warisan geologi menyebabkan potensi kerusakan dari kriteria Perlindungan Hukum menjadi tinggi. Beberapa warisan geologi bahkan tanpa kontrol akses yang kuat sehingga berisiko mengalami kerusakan lebih tinggi. Pemerintah daerah setempat dapat menjadikan Peraturan Menteri ESDM terkait penetapan situs geologi di Klaten pada masa mendatang sebagai dasar pemberian perlindungan hukum.

Sebaran jalan beraspal di Klaten yang cukup tinggi memang mempercepat gerakan roda perekonomian masyarakat. Namun demikian, hal tersebut menjadi sumber penyebab kerusakan situs geologi dari kriteria Aksesibilitas. Situs Kontak Gabro dan Serpentinit Paseban beresiko paling rendah berdasarkan kriteria tersebut karena setelah jalan beraspal habis, pengunjung harus menempuh jalan desa untuk sampai di sana. Lokasi studi berada di Pulau Jawa yang merupakan pulau terpadat di Indonesia. Fosil Nummulites Bukit Wungkal, Batugamping Berlapis Bukit Patrum, dan Hipostratotipe Formasi Wonosari Gunung Kampak berada di area yang cukup padat, dengan kepadatan mendekati 1000 jiwa/km² sehingga memiliki resiko kerusakan tertinggi. Di sisi lain, Lava Bantal Jarum dan Batuan Terobosan Giriharjo beresiko kerusakan terendah akibat letaknya di kawasan pedesaan–perbukitan dengan kepadatan kurang dari 250 jiwa/km². Detil penilaian kualitatif resiko kerusakan terhadap seluruh warisan geologi berdasarkan lima kriteria dapat dilihat pada Tabel 2.

Klasifikasi Situs Berdasarkan Sebaran Data

Total Nilai Resiko Kerusakan (ΣDR) seluruh warisan geologi pada lokasi studi berada pada rentang yang cukup lebar, yaitu 190–302,5. Batuan Terobosan Giriharjo memiliki ΣDR terendah sehingga paling tahan terhadap resiko kerusakan. Sebaliknya, Grafit Girismo paling rentan terhadap faktor-faktor kerusakan berdasarkan nilai ΣDR situs tersebut. Rata-rata ΣDR dari tiga belas situs yang dipelajari adalah 246. Menggunakan metode perhitungan pada Persamaan 4, dapat diketahui bahwa simpangan baku dari data studi ini adalah 32,5.

Tabel 2. Hasil penilaian kuantitatif resiko kerusakan setiap geosite di wilayah studi dari lima karakter (N_1 hingga N_5)

No	Kriteria	Warisan Geologi						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Kerusakan Unsur	2,3	1,5	2	1,2	1,5	1	3,5
2	Jarak Dengan Potensi Perusak	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	2,5
3	Perlindungan Hukum	3,25	3,25	3,5	3	3	3	3
4	Aksesibilitas	3,5	3,5	3,5	2,5	3	3	3
5	Kepadatan Penduduk	3,5	3,5	3,5	2,5	2	2	2,5

No	Kriteria	Warisan Geologi						Bobot
		8	9	10	11	12	13	
1	Kerusakan Unsur	2,3	2	2	2	1,25	1,5	**35**
2	Jarak Dengan Potensi Perusak	2,3	2,5	2,5	1,5	2	2,5	**20**
3	Perlindungan Hukum	3	3	3	3	3	3	**20**
4	Aksesibilitas	3	3,5	3,75	3,75	3,75	3,5	**15**
5	Kepadatan Penduduk	2,5	2,5	2,5	2,75	2,75	2,75	**10**
	Total							**100**

Keterangan: 1 = Fosil Nummulites Bukit Wungkal, 2 = Batugamping Berlapis Bukit Patrum, 3 = Hipostratotipe Formasi Wonosari Gunung Kampak, 4 = Kontak Gabro dan Serpentinit Paseban, 5 = Lava Bantal Jarum, 6 = Batuan Terobosan Giriharjo, 7 = Grafit Girismo, 8 = Batugamping Nummulites Watuprau, 9 = Sekis Malangsari, 10 = Kontak Batuan Terobosan dan Batugamping Gunung Temas, 11 = Hipostratotipe Formasi Oyo Kawah Putih, 12 = Marmer Jokotuo, 13 = Batugamping Watu Sepur.

Tabel 3. Total nilai resiko kerusakan (ΣDR) setiap situs dalam studi ini. Geosite Girismo menunjukkan ΣDR tertinggi, sedangkan Batuan Terobosan Giriharjo dengan ΣDR terendah. Nama dan nomor situs sama dengan Tabel 2

No	Kriteria	Warisan Geologi						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Kerusakan Unsur	80,5	52,5	70	42	52,5	35	122,5
2	Jarak Dengan Potensi Perusak	50	50	50	30	30	30	50
3	Perlindungan Hukum	65	65	70	60	60	60	60
4	Aksesibilitas	52,5	52,5	52,5	37,5	45	45	45
5	Kepadatan Penduduk	35	35	35	25	20	20	25
	Total	**283**	**255**	**277,5**	**194,5**	**207,5**	**190**	**302,5**

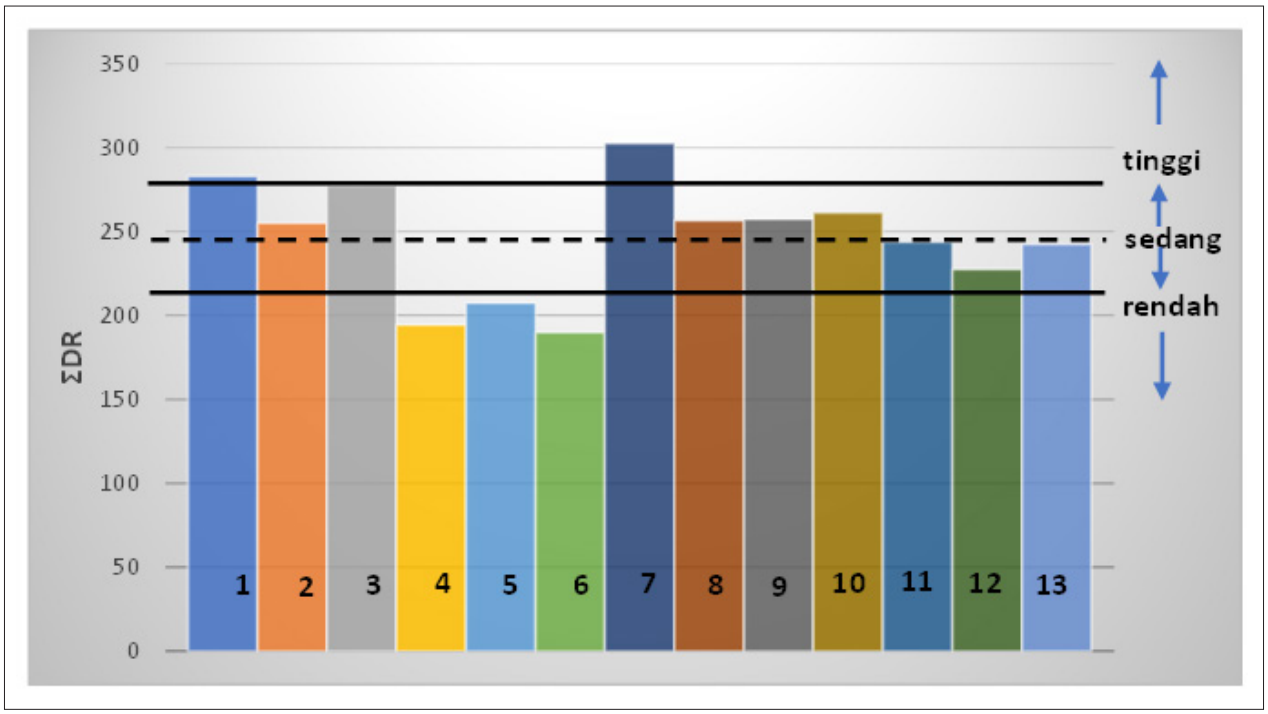
No	Kriteria	Warisan Geologi					
		8	9	10	11	12	13
1	Kerusakan Unsur	80,5	70	70	70	43,75	52,5
2	Jarak Dengan Potensi Perusak	46	50	50	30	40	50
3	Perlindungan Hukum	60	60	60	60	60	60
4	Aksesibilitas	45	52,5	56,25	56,25	56,25	52,5
5	Kepadatan Penduduk	25	25	25	27,5	27,5	27,5
	Total	**256,5**	**257,5**	**261,25**	**243,75**	**227,5**	**242,5**

Studi terdahulu menekankan bahwa klasifikasi berdasarkan sebaran data paling sesuai diterapkan karena langsung membandingkan nilai-nilai dari setiap situs (Cooksey, 2020; Febriani, 2022). Berdasarkan prinsip pengelompokan berdasarkan sebaran data yang diungkap pada bagian sebelumnya, dua geosite (Fosil Nummulites Bukit Wungkal dan Grafit Girisimo) tergolong beresiko kerusakan tinggi (Gambar 5). Pada sisi lain, Kontak Gabro dan Serpentinit Paseban, Batuan Terobosan Giriharjo, dan Lava Bantal Jarum beresiko kerusakan rendah. Delapan situs lain terdefinisi sebagai situs dengan resiko kerusakan menengah.

Penyesuaian Resiko Kerusakan terhadap Strategi Pengelolaan Warisan Geologi

Perbedaan nilai resiko kerusakan antar geosite menunjukkan bahwa setiap situs memiliki tingkat urgensi konservasi yang berbeda. Rentang ΣDR

yang cukup lebar (190–302,5) menegaskan bahwa kondisi kerentanan geosite di Klaten tidak seragam sehingga pendekatan pengelolaan perlu disesuaikan dengan karakteristik masing-masing situs. Geosite dengan ΣDR tinggi, seperti Fosil Nummulites Bukit Wungkal dan Grafit Girisimo, memerlukan tindakan perlindungan yang lebih intensif. Kerusakan unsur utama pada kedua situs tersebut bersifat irreversibel; kehilangan fosil maupun grafit terinklusi pada batuan tidak dapat dipulihkan sehingga strategi mitigasi harus menekankan pengaturan akses, pemasangan rambu konservasi, serta pembatasan aktivitas yang berpotensi mengikis atau mengganggu elemen geologi.



Gambar 5. Hasil klasifikasi resiko kerusakan seluruh warisan geologi di Kabupaten Klaten berdasarkan sebaran data. Dua situs diklasifikasikan sebagai beresiko tinggi, sedangkan tiga lainnya beresiko rendah. Nomor situs sama dengan keterangan pada Tabel 2

Situs dengan ΣDR menengah tetap memerlukan pemantauan berkala mengingat tekanan lingkungan yang tinggi dari aktivitas penduduk, kemudahan akses, dan ketiadaan peraturan daerah yang formal. Pada kelompok ini, penguatan dokumentasi ilmiah, penataan jalur kunjungan, dan edukasi publik menjadi langkah yang tepat untuk menurunkan laju degradasi tanpa menghambat pemanfaatan geosite untuk pendidikan dan wisata. Sementara itu, geosite beresiko rendah tetap memiliki potensi ancaman dari perkembangan infrastruktur dan dinamika tata ruang di masa depan. Oleh karena itu, meskipun tingkat kerentanannya rendah, penyediaan sistem pemantauan sederhana dan penegasan batas kawasan tetap diperlukan untuk menjaga kondisi yang sudah stabil.

Secara keseluruhan, angka-angka resiko kerusakan ini memberikan dasar prioritas yang jelas dalam perencanaan konservasi geologi di Klaten. Nilai ΣDR dapat digunakan sebagai instrumen awal untuk menentukan alokasi sumber daya, mulai dari penetapan zona perlindungan, penentuan jenis intervensi fisik yang diperlukan, hingga pengembangan regulasi daerah. Integrasi hasil penilaian resiko dengan rencana tata ruang dan kebijakan perlindungan geosite akan memperkuat upaya konservasi sehingga setiap situs dapat terkelola secara berkelanjutan sesuai nilai ilmiah dan edukatifnya.

KESIMPULAN

Penilaian risiko kerusakan (DR) terhadap tiga belas geosite warisan geologi di Kabupaten Klaten menunjukkan bahwa tingkat kerentanan setiap situs bervariasi secara signifikan. Total Nilai Risiko Kerusakan (ΣDR) berada pada rentang 175–287,5, dengan rata-rata 232 dan simpangan baku 35,6. Dua geosite, yaitu Fosil Nummulites Bukit Wungkal dan Grafit Girisimo, termasuk dalam kategori risiko kerusakan tinggi karena kombinasi litologi yang rapuh,

kedekatan dengan sumber gangguan, serta minimnya perlindungan fisik di lapangan. Tiga geosite lain, yaitu Kontak Gabro dan Serpentinit Paseban, Batuan Terobosan Giriharjo, dan Lava Bantal Jarum tergolong risiko rendah, terutama karena karakter litologi yang kompak dan relatif jauh dari ancaman antropogenik. Sebagian besar situs lainnya berada pada kategori risiko menengah, mencerminkan kebutuhan pengelolaan yang proporsional dan berbasis prioritas. Temuan ini memberikan dasar yang kuat bagi Pemerintah Kabupaten Klaten dalam merancang strategi konservasi yang terarah. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan pentingnya perlindungan aktif, pemantauan berkelanjutan, serta integrasi aspek konservasi dengan kegiatan ekonomi dan pemanfaatan ruang di Klaten.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada Bapak Edy Slameto selaku Kepala Pusat Survei Geologi atas izin publikasinya. Pemerintah Kabupaten Klaten telah menyediakan bantuan perizinan dan data untuk kelancaran pengambilan data. Peta geologi dapat terselesaikan atas bantuan Bapak Jamal dari Tim Kerja Pemetaan Sistematik PSG. Kami juga mengucapkan terimakasih kepada seluruh rekan di Tim Kerja Geoheritage Pusat Survei Geologi atas bantuan moril dan semangatnya.

ACUAN

Adha, I., Kurniasih, A., Nugroho, H. & Rachwibowo, P. (2018) 'Kajian analisis sesar di Perbukitan Jiwo Barat, Kecamatan Bayat, Kabupaten Klaten, Jawa Tengah', *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 1(1), pp. 8–18.

Adrianda, R.S., Sahara, R. & Gusti, U.K. (2025) 'The geodiversity site of Geopark Ranah Minang Silokek, Indonesia: Promoting geo-education and geotourism through geosite assessment', *International Journal of Geoheritage and Parks*, 13(2), pp. 239–249.

Ali, R.K., Winarno, T. & Maulana, H.R. (2020) 'Identifikasi dan analisis potensi geosite di Kabupaten Batang sebagai pendukung pengembangan kawasan geowisata di Jawa Tengah', *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 3(3), pp. 107–115.

Brilha, J. (2016) 'Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: A review', *Geoheritage*, 8(2), pp. 119–134. doi: 10.1007/s12371-014-0139-3.

Cooksey, R.W. (2020) 'Descriptive statistics for summarising data', in *Illustrating Statistical Procedures: Finding Meaning in Quantitative Data*. Singapore: Springer, pp. 61–139. doi: 10.1007/978-981-15-2537-7_5.

Djafar, A., Pratomo, I. & Nurlathifah, W.A. (2024) 'Karakteristik lava bantal, peperit, dan hialoklastit di selatan Sukabumi', *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 25(1), pp. 1–8.

Fassoulas, C., Mouriki, D., Dimitriou-Nikolakis, P. & Iliopoulos, G. (2012) 'Quantitative assessment of geotopes as an effective tool for geoheritage management', *Geoheritage*, 4(3), pp. 177–193.

Febriani, S. (2022) 'Analisis deskriptif standar deviasi', *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 6(1), pp. 910–913.

Febriarta, E., Larasati, A. & Suswanti, S. (2022) 'Kajian potensi air tanah pada formasi vulkanik di Kecamatan Prambanan, Kabupaten Klaten', *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(2), pp. 240–249. doi: 10.29122/jtl.v23i2.4826.

Gray, M. (2013) *Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature*. Hoboken: John Wiley & Sons.

Gverić, Z., Tomašić, N., Kisiel, M., Maj-Szeliga, K., Skiba, M. & Rubinić, V. (2023) 'The effect of weathering on clay mineralogy of Plio-Quaternary sediments and the overlying material on SE slopes of Medvednica Mt., Croatia', *Environmental Earth Sciences*, 82(14), 350. doi: 10.1007/s12665-023-11042-7.

Hall, R. (2012) 'Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean', *Tectonophysics*, 570–571, pp. 1–41. doi: 10.1016/j.tecto.2012.04.021.

Irzon, R. (2018) 'Komposisi kimia pasir pantai di selatan Kulon Progo dan implikasi terhadap provenance', *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 19(1), pp. 31–45.

Irzon, R. & Abdullah, B. (2018) 'Element mobilization during weathering process of ultramafic complex in North Konawe Regency', *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(3), pp. 277–290. doi: 10.17014/ijog.5.3.277-290.

Irzon, R., Setiawan, V.E., Yurnaldi, D., Yulius, A., Oktavitania, R. & Harneti, D. (2024) 'Inventarisasi dan penilaian geowisata kuantitatif calon geosite di Geopark Silokek, Kabupaten Sijunjung, Provinsi Sumatra Barat', *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 25(4), pp. 225–234.

Jannah, N.M., Basri, I.S. & Novianti, V. (2024) 'Penilaian Geosite Palukoro di Lembah Palu', *Jurnal Peweka Tadulako*, 3(2), pp. 101–110.

Jaya, R. I. M. C., Syahrul, S., & Masri, M. (2025). Mineral Chemistry and The Stability Temperature of Nickel-Iron Sulfide from Kolaka Ultramafic Rocks, Southeast Sulawesi. *OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan*, 7(1), 1-6.

Jia, Z., Wu, F. & Hou, D. (2023) 'Geodiversity, geotourism, geoconservation, and sustainable development in Longyan Aspiring Geopark (China)', *Geoheritage*, 15(1), p. 11.

Kristanto, W.A.D., Nugroho, N.E., Anom, T.N. & Muhaimin, A. (2021) 'Karakteristik geologi teknik Desa Katekan', *KURVATEK*, 6(2), pp. 183–192.

Lunt, P. & Allan, T. (2004) 'Larger benthic foraminifera and Tertiary stratigraphy of Southeast Asia', *Journal of Asian Earth Sciences*, 23, pp. 431–450. doi: 10.1016/S1367-9120(03)00135-2.

Marjiyono, M., Ratdomopurbo, R., Suharna, S., Zajuli, M.H.H. & Setianegara, R. (2014) 'Geologi bawah permukaan Dataran Klaten berdasarkan interpretasi data mikrotremor', *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 15(1), pp. 3–9.

Novianto, A., Sutanto, S., Suharsono, S., Prasetyadi, C., & Setiawan, J. (2022). Structure boundary separating using gravity data for central and southern parts of the east java basin beneath the quaternary volcanic deposits. *The Iraqi Geological Journal*, 1-13.

Obaida, M. I., Abdulsamad, E. O., Muftah, A. M., & Khalifa, A. K. (2025). Cretaceous-Paleocene Biostratigraphy of Jardas Al Abid Area, Al Jabal Al Akhdar, NE Libya. *Scientific Journal of University of Benghazi*, 38(1), 129-158.

Permanadewi, S., Samodra, H., Irzon, R., Prabowo, A. & Ansori, C. (2024) 'Quantitative assessment for geosites of the Ijen Geopark in Banyuwangi Regency, East Java, Indonesia', *International Journal of Geoheritage and Parks*, 12(1), pp. 63–74. doi: 10.1016/j.ijgeop.2024.01.003.

Park, J., Jeong, S., Jang, S., Lee, J., Ko, K. & Yang, M. (2024) 'Influence of chemical weathering and microcracks on permeability variations in crystalline rocks', *Water*, 16(20), 3007.

Pasquaré Mariotto, F.o, Drymoni, K., Bonali, F.L., Tibaldi, 9999A., Corti, N. & Oppizzi, P. (2023) 'Geosite assessment and communication: A review', *Resources*, 12(2), 29. doi: 10.3390/resources12020029.

Pereira, P., Pereira, D. & Caetano Alves, M.I. (2007) 'Geomorphosite assessment in Montesinho Natural Park (Portugal)', *Geographica Helvetica*, 62(3), pp. 159–168.

Rafaat, S.A., Kora, M.A., Abdel-Fattah, Z.A. & Al Menoufy, S.G. (2025) 'Middle to Late Eocene *Nummulites* from the southern Tethys, Fayum, Egypt: Taxonomic, biostratigraphic, and paleobiogeographic context', *Journal of Paleontology*, 99(1), pp. 1–25. doi: 10.1017/jpa.2024.88.

Rahmawati, D., Surjono, S.S., Barianto, D.H. & Rahardjo, W. (2024) 'Bioerosion in the Late Eocene *Discocyclina discus sowerbyi* (Nuttall, 1926) in Bayat Area, Indonesia: Implications for paleoecology', *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*, 9(4), 93779.

Retongga, N., & Siregar, Y. (2026). Analysis Diagenesis and Porosity Values of Carbonate Rocks of the Wonosari Formation in Krakitan Village, Bayat. *Journal of Geology Mengkarang*, *1*(1), 17-24.

Reynard, E., Perret, A., Bussard, J., Grangier, L., & Martin, S. (2016). Integrated approach for the inventory and management of geomorphological heritage at the regional scale. *Geoheritage*, 8(1), 43-60..

Samodra, H., Permanadewi, S., Irzon, R., Yuniarto, B., Ansori, C., Lucki Junursyah, G.M. & Maryanto, S. (2024) 'The geodiversity site of Sentono Gentong in Pacitan', *International Journal of Geoheritage and Parks*, 12(2), pp. 196–208. doi: 10.1016/j.ijgeop.2024.03.002.

Samodra, H. & Sutisna, K. (1997) *Peta Geologi Lembar Klaten (Bayat), Jawa*, skala 1:50.000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Satyana, A.H. (2015) 'Semilir Formation volcaniclastic event: Volcanic sources and tectonic reconstruction of Southern Java', *Indonesian Petroleum Association Proceedings*.

Suhendro, I., Harijoko, A., Setiawan, N.I. & Wibowo, H.E. (2023) 'Cooling history of the Watuadeg pillow lava, Yogyakarta, Indonesia', *Journal of Applied Geology*, 8(1), pp. 1–8.

Wakita, K., Metcalfe, I. & Hall, R. (2021) 'Tectonic evolution of Southeast Asia', *Gondwana Research*, 90, pp. 1–22. doi: 10.1016/j.gr.2020.10.001.

Zhong, Y., Wilson, D.J., Liu, J., Wan, S., Bao, R., Liu, J., Chao, Q. & Liu, Q. (2021) 'Contrasting sensitivity of weathering proxies to Quaternary climate and sea-level fluctuations on the southern slope of the South China Sea', *Geophysical Research Letters*, 48(24), e2021GL096433.