



Nilai *Peak Ground Acceleration* di Kecamatan Prambanan, Kabupaten Sleman

Adelia Saras Nugraheni*

Program Studi Teknik Geologi, Jurusan Teknik Pertambangan dan Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Indonesia

*Penulis korespondensi: adeliasn@unsri.ac.id¹

Abstract. *The 2006 Yogyakarta earthquake, with a magnitude of 6.3 Mw, caused severe structural damage and significant casualties, highlighting the high seismic vulnerability in the Special Region of Yogyakarta (DIY). Tectonic activity in this region is strongly influenced by the subduction of the Indo-Australian Plate beneath the Eurasian Plate and the presence of active faults, particularly the Opak Fault. Local geological conditions dominated by young volcanic deposits and unconsolidated alluvial sediments further enhance seismic wave amplification. This study aims to estimate the Peak Ground Acceleration (PGA) in Prambanan District using the empirical McGuire (1977) attenuation relationship based on parameters from the 2006 earthquake. Analysis was conducted on 113 observation points to map the spatial distribution of ground acceleration. The results indicate that PGA values range from 29.2 to 35.6 gal, with the highest values concentrated in the southern and southeastern parts of Prambanan, characterized by alluvial deposits of the Opak River. In contrast, lower PGA values occur in the northern area underlain by more consolidated young volcanic materials. These findings emphasize the significant influence of lithology and geomorphology on local site response to seismic shaking. The results provide an important basis for seismic hazard assessment and mitigation planning in Prambanan and surrounding areas.*

Keywords: *Ground Acceleration; Lithological Conditions; Risiko Seismik; Sesar Opak; Yogyakarta Earthquake*

Abstrak. Gempa bumi Yogyakarta tahun 2006 dengan magnitudo 6,3 Mw memberikan dampak besar berupa kerusakan infrastruktur dan korban jiwa, yang menunjukkan tingginya tingkat kerentanan seismik di wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Aktivitas tektonik di kawasan ini dipengaruhi oleh keberadaan zona subduksi Lempeng Indo-Australia serta struktur sesar aktif, terutama Sesar Opak. Kondisi geologi lokal yang didominasi endapan vulkanik muda dan sedimen aluvial turut memperkuat amplifikasi guncangan. Penelitian ini bertujuan mengestimasi nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) di Kecamatan Prambanan menggunakan rumus empiris McGuire (1977) dengan memanfaatkan parameter gempa Yogyakarta 2006. Analisis dilakukan pada 113 titik pengamatan untuk memetakan variasi percepatan tanah maksimum. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai PGA berkisar antara 29,2–35,6 gal, dengan nilai tertinggi terkonsentrasi pada wilayah selatan dan tenggara Prambanan yang didominasi endapan aluvial Sungai Opak. Sebaliknya, nilai PGA lebih rendah ditemukan pada bagian utara yang tersusun atas endapan vulkanik muda yang lebih terkonsolidasi. Variasi PGA ini menegaskan peran signifikan kondisi litologi dan geomorfologi dalam memengaruhi respons tanah terhadap guncangan gempa. Temuan ini diharapkan menjadi dasar dalam perencanaan mitigasi dan pengurangan risiko bencana di kawasan Prambanan dan sekitarnya.

Kata kunci: Gempa Yogyakarta; Kondisi Litologi; Percepatan Tanah; Risiko Seismik; Sesar Opak

1. LATAR BELAKANG

Peristiwa gempa bumi Yogyakarta tahun 2006 terjadi akibat aktivitas tektonik di sepanjang Sesar Opak. Guncangan berkekuatan 6,4 Mw tersebut menimbulkan dampak besar, termasuk 6.234 orang meninggal dunia serta 36.299 lainnya mengalami luka-luka (Nugraheni et al., 2024; PusGeN, 2017). Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) merupakan kawasan yang memiliki tingkat aktivitas kegempaan cukup tinggi dan telah mengalami sejumlah gempa yang menimbulkan kerusakan. Berbagai langkah mitigasi terus dilakukan, termasuk penyusunan serta pembaruan peta gempa secara berkala. Di Indonesia, parameter kegempaan telah

dijadikan acuan dalam perencanaan infrastruktur sejak 1983 hingga pembaruan terbaru pada Peta Gempa Nasional 2017. Namun, gempa bermagnitudo 6,3 SR yang terjadi pada Mei 2006 menunjukkan bahwa tingkat kerentanan bangunan di wilayah tersebut masih cukup tinggi, terutama pada bangunan yang tidak dirancang dengan ketahanan gempa yang memadai sehingga mengalami kerusakan parah (Nurhidayatullah & Kurniati, 2020). Peristiwa ini mengungkap bahwa banyak struktur belum memenuhi standar konstruksi tahan gempa, baik karena usia bangunan, kualitas material yang digunakan, maupun metode pembangunan yang belum mengikuti ketentuan teknis. Guncangan kuat tersebut menggoyang wilayah Bantul, Yogyakarta, Sleman, dan Klaten selama sekitar satu menit, menyebabkan kerusakan luas pada infrastruktur serta menimbulkan korban jiwa. Selain itu, gempa utama diikuti oleh sekitar 750 gempa susulan (Bidin et al., 2009), yang semakin memperburuk situasi dan menambah tekanan psikologis serta risiko bagi masyarakat yang terdampak. Analisis terhadap data gempa Yogyakarta dari tahun 1960 hingga 2024 menunjukkan bahwa DIY tergolong wilayah dengan tingkat bahaya seismik yang signifikan. Faktor utamanya adalah posisi daerah ini yang berada dekat zona subduksi dan keberadaan sesar aktif seperti Sesar Opak, yang dapat menimbulkan gempa berulang (R & Madrinovella, 2024).

Gempa bumi Yogyakarta tahun 2006 tidak hanya menyebabkan kerusakan utama, tetapi juga memicu bencana lanjutan. Salah satu fenomena yang muncul setelah gempa tersebut adalah terjadinya likuefaksi di beberapa lokasi. Kejadian ini memperlihatkan bahwa dampak gempa dapat berkembang menjadi bahaya sekunder yang turut memperburuk kondisi wilayah terdampak (Mase, 2014; Nugraheni et al., 2023). Tingginya aktivitas seismik ditunjukkan oleh banyaknya kejadian gempa yang berlangsung di suatu daerah. Gempa bumi sendiri merupakan peristiwa getaran yang terjadi secara mendadak pada permukaan bumi akibat pelepasan energi, yang biasanya dipicu oleh retaknya lapisan batuan pada kerak bumi (Ulfiana et al., 2018).

Gempa bumi merupakan peristiwa getaran mendadak yang muncul akibat pelepasan energi yang terakumulasi di dalam kerak bumi, yang dapat dipicu oleh tumbukan antar lempeng tektonik, pergeseran sesar, aktivitas vulkanik, maupun sumber lainnya. Energi yang dilepaskan tersebut merambat ke segala arah dalam bentuk gelombang seismik hingga mencapai permukaan bumi. Getaran yang tiba di permukaan ini menghasilkan nilai percepatan tanah yang bervariasi, dipengaruhi oleh sejumlah parameter seperti besar kecilnya magnitudo (M), kedalaman sumber gempa (hiposenter), jarak terhadap pusat gempa (episenter), serta sifat fisik dan struktur lapisan batuan pada wilayah yang terdampak (Pasau et al., 2018). Kekuatan gempa bumi meningkat seiring dengan besarnya energi yang dilepaskan. Energi ini keluar dari pusat gempa setelah terjadi akumulasi pada area tersebut, dan ketika batas tegangan maksimum

terlewati, batuan mengalami slip atau retakan sehingga sebagian energi tersimpan kemudian dilepaskan. Penyebaran energi tersebut berbentuk rambatan gelombang gempa yang berlangsung dalam dua fase: pertama, gelombang merambat dari sumber gempa menuju batuan dasar di bawah area yang akan dianalisis untuk risiko gempa; dan kedua, gelombang bergerak dari batuan dasar ke permukaan tanah yang dianalisis menggunakan respons dinamik tanah (Kumala et al., 2018).

PGA dihitung melalui fungsi atenuasi yang menggambarkan keterkaitan antara intensitas getaran tanah di suatu wilayah, magnitudo gempa, serta jaraknya dari episentrum, sehingga memberikan estimasi seberapa kuat guncangan yang berpotensi dirasakan pada lokasi tersebut ketika peristiwa gempa terjadi di sekitarnya (Irwansyah et al., 2013). Percepatan tanah maksimum (*Peak Ground Acceleration*/PGA) merupakan parameter yang menggambarkan intensitas gerakan tanah dan berfungsi untuk menilai besarnya kerusakan pada permukaan bumi akibat guncangan gempa (Gustian, 2009; Suhada et al., 2023).

Percepatan tanah maksimum pada penelitian ini dihitung menggunakan persamaan empiris McGuire (1977) dengan mengambil studi kasus Gempa Yogyakarta 2006. Parameter gempa tersebut diperoleh dari katalog gempa merusak dan signifikan. Hasil penelitian di Kabupaten Bantul menunjukkan bahwa nilai percepatan tanah maksimum (PGA) berada pada rentang 56–88 gal. Secara umum, wilayah yang berlokasi lebih dekat ke sumber gempa menunjukkan nilai PGA yang lebih tinggi, terutama area yang disusun oleh endapan sedimen kuarter. Kondisi geologi semacam ini meningkatkan kemungkinan terjadinya likuifaksi. Selain itu, kawasan sekitar Kecamatan Prambanan Kabupaten Sleman yang memiliki litologi endapan Merapi Muda dengan karakter serupa juga tergolong daerah yang berpotensi mengalami amplifikasi guncangan besar ketika terjadi gempa. Oleh sebab itu, aspek kerentanan tanah menjadi elemen penting dalam analisis seismik di wilayah tersebut (Wibowo, 2019). Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi nilai PGA pada batuan dasar serta PGA (gal) di permukaan untuk kejadian gempa di Kecamatan Berbah, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.

2. KAJIAN TEORITIS

Peak Ground Acceleration

PGA atau percepatan tanah maksimum digunakan sebagai parameter utama untuk menilai besarnya kerusakan akibat getaran gempa bumi (Meitawati et al., 2018). PGA (*Peak Ground Acceleration*) merupakan nilai percepatan maksimum dari gerakan tanah yang pernah terjadi di suatu wilayah sebagai respons terhadap aktivitas seismik. Parameter ini menjadi salah

satu indikator utama dalam menganalisis tingkat bahaya dan potensi kerusakan akibat gempa bumi, karena mencerminkan intensitas getaran yang langsung dirasakan permukaan tanah. Secara ideal, nilai PGA diperoleh dari rekaman alat *accelerograph* yang mampu mencatat percepatan gerakan tanah secara real time. Namun, distribusi *accelerograph* di Indonesia masih terbatas dan tidak merata, sehingga data observasi sering kali tidak mencukupi untuk mewakili variabilitas spasial suatu daerah. Oleh karena itu, pendekatan empiris melalui fungsi atenuasi kerap digunakan untuk mengestimasi nilai PGA secara lebih komprehensif, sebagaimana diterapkan oleh penelitian sebelumnya (Ulfiana et al., 2018; Kelo et al., 2023; Supriyadi et al., 2024). Besarnya pengaruh fisik dari suatu gempa bumi ditentukan melalui nilai percepatan tanah puncak (PGA) pada wilayah yang terdampak. PGA adalah nilai percepatan getaran tanah tertinggi yang terjadi pada satu titik di suatu area, yang dihitung berdasarkan kumpulan data seluruh gempa bumi dalam periode tertentu dengan mempertimbangkan beragam parameter seismik (Ashadi & Kaka, 2019; Chasanah et al., 2022).

Geologi Daerah Penelitian

Pergerakan Lempeng Indo-Australia yang secara konsisten bergerak ke utara dan menekan Lempeng Eurasia menyebabkan Daerah Istimewa Yogyakarta termasuk sebagai salah satu kawasan di selatan Pulau Jawa yang memiliki tingkat aktivitas seismik yang tinggi (Sulaeman,dkk, 2008; Kurniawati et al., 2016). Gempa Yogyakarta tahun 2006 diduga kuat dipicu oleh aktivitas pada Sesar Opak, yakni sesar sinistral yang memanjang dari kawasan pantai Parangtritis hingga ke sisi timur Kota Yogyakarta. Sementara itu, kontribusi pergerakan Sesar Dengkeng yang berada di bagian timur laut ujung Sesar Opak belum banyak diketahui dalam peristiwa tersebut. Aktivitas kedua sesar ini dipengaruhi oleh proses subduksi Lempeng Australia yang bergerak menukik ke bawah Lempeng Eurasia di wilayah selatan Pulau Jawa (Abidin et al., 2009). Nama Sungai Opak kembali menjadi sorotan publik setelah gempa tektonik yang mengguncang pada 27 Mei 2006. Sesar Opak sendiri telah lama dikenali oleh para ahli geologi sebagai sesar mendatar yang berorientasi barat daya–timur laut dan memanjang dari wilayah muara Sungai Opak hingga Prambanan. Pasca peristiwa tersebut, banyak peneliti berpendapat bahwa aktivitas pada Sesar Opak, dengan pusat gempa yang terletak di dekat muara sungai, merupakan pemicu utama terjadinya guncangan. Informasi mengenai Sesar Opak sebagai sesar mendatar mengiri juga telah tercantum dalam Peta Geologi Lembar Yogyakarta yang disusun oleh Rahardjo dan tim pada tahun 1995 (Santoso, 2009).

Sebagian besar dataran Yogyakarta–Bantul terselimuti oleh endapan Kuartar Merapi muda yang terdiri atas material vulkanik seperti abu, tuf, breksi, aglomerat, hingga aliran lava. Endapan tersebut merupakan hasil aktivitas erupsi Gunung Merapi yang berlangsung berulang

kali dan menyebar hingga ke wilayah dataran rendah. Di sisi lain, sepanjang alur sungai dan kawasan pesisir didominasi oleh endapan aluvium muda berupa pasir, kerikil, lanau, dan lempung. Material aluvial ini terbentuk dari proses pengendapan oleh aliran sungai serta dinamika lingkungan pesisir, sehingga menghasilkan lapisan sedimen yang lebih lepas dan tidak terkonsolidasi dibandingkan dengan endapan vulkanik. Struktur geologi dan karakteristik endapan ini sangat berpengaruh terhadap perilaku tanah, terutama dalam merespons guncangan gempa (Rahardjo et al., 1995).

3. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dihitung dengan mempertimbangkan beberapa parameter seismik, seperti magnitudo gempa, jarak terhadap hiposenter, serta jarak ke episenter dari tiap titik pengamatan. Data magnitudo merujuk pada gempa Yogyakarta tahun 2006 yang dicatat oleh USGS dengan kekuatan 6.3 Mw, berlokasi pada koordinat 7.961° LS dan 110.446° BT dengan kedalaman sekitar 12.5 km. Sebanyak 113 titik pengamatan dengan jarak antartitik sekitar ± 900 meter digunakan untuk mendapatkan gambaran distribusi spasial PGA secara lebih detail. Area studi terletak di Kecamatan Prambanan, Kabupaten Sleman, yang memiliki kondisi geologi dan geomorfologi beragam sehingga penting dianalisis untuk memahami respons tanah terhadap guncangan seismik. Sungai Opak berada di sisi barat wilayah Prambanan dan menjadi elemen geomorfik yang berpotensi memengaruhi karakter litologi lokal, khususnya pada area dataran aluvial di sekitarnya. Keberadaan sungai dan variasi kondisi geologi tersebut dapat menyebabkan perbedaan nilai percepatan tanah maksimum (PGA). Dengan mempertimbangkan berbagai parameter tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menghasilkan estimasi PGA yang lebih representatif bagi kawasan Prambanan.

Peak Ground Acceleration (PGA) merupakan parameter untuk menggambarkan percepatan tanah maksimum akibat guncangan gempa (Gustian, 2009 dalam Suhada et al., 2023). Penelitian ini menggunakan metode McGuire yang cocok untuk wilayah subduksi serta area dengan aktivitas gempa dangkal hingga menengah. Dalam metode ini, PGA dinyatakan dalam satuan gal, M mewakili magnitudo gempa (Mw), dan R merupakan jarak hiposenter ke titik observasi (km) (Gandini et al., 2022). Rumus empiris McGuire (1977) yang digunakan ditunjukkan sebagai berikut:

$$\text{PGA (gal)} = \frac{472 \times 10^{0.278M}}{(R + 25)^{1.301}}$$

Keterangan:

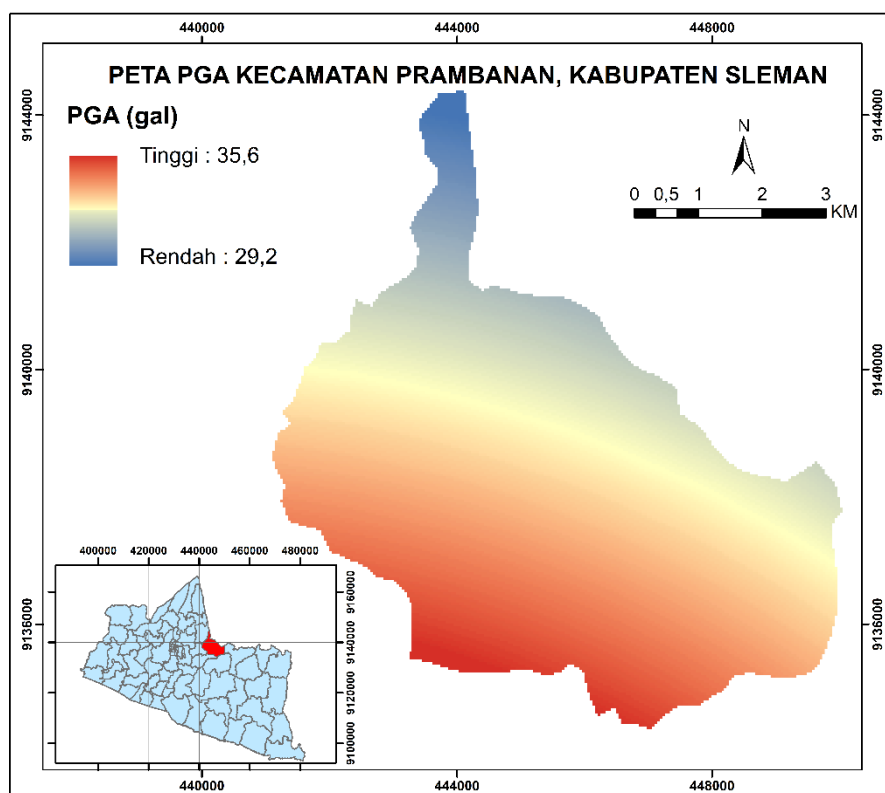
- **M** = Magnitudo gempa (Mw)
- **R** = Jarak hiposenter (km)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Peta distribusi *Peak Ground Acceleration* (PGA) Kecamatan Prambanan menunjukkan rentang percepatan tanah antara 29,2 gal hingga 35,6 gal, dengan gradasi nilai yang meningkat dari bagian utara menuju selatan kecamatan. Nilai PGA rendah ($\pm 29,2$ gal), yang tergambarkan dengan warna biru–hijau, dominan pada wilayah utara Prambanan, yaitu zona yang secara geologi tersusun oleh endapan vulkanik muda produk Gunung Merapi seperti breksi, tufa, dan pasir vulkanik terpadatkan. Satuan litologi tersebut memiliki densitas dan tingkat konsolidasi yang lebih tinggi sehingga cenderung meredam guncangan seismik. Sebaliknya, nilai PGA yang lebih tinggi (hingga 35,6 gal) muncul pada bagian selatan, tenggara, dan sebagian barat Prambanan, yang ditandai warna kuning–merah.

Wilayah ini secara geomorfologi merupakan bagian dari dataran aluvial Sungai Opak, yang pada peta lokasi tampak berada di sisi barat kecamatan. Dataran aluvial ini didominasi oleh material longgar seperti pasir, kerikil, lanau, dan lempung muda, yang secara fisik memiliki modulus elastisitas rendah sehingga mampu mengamplifikasi gelombang seismik, menghasilkan percepatan tanah yang lebih besar.

Selain itu, lokasi Prambanan yang berdekatan dengan struktur Sesar Opak, yang menjadi sumber guncangan signifikan pada gempa Yogyakarta 2006, turut memengaruhi pola pelemahan energi gelombang secara lateral. Kombinasi antara jarak terhadap sumber gempa, karakter litologi kurang terkonsolidasi, serta morfologi dataran rendah menyebabkan bagian selatan dan tenggara kecamatan mengalami PGA tertinggi dalam analisis ini. Temuan tersebut mengonfirmasi bahwa variasi PGA di Prambanan secara dominan ditentukan oleh kondisi geologi permukaan dan bentuk lahan lokal, sehingga aspek-aspek tersebut harus dipertimbangkan dalam pemodelan bahaya seismik dan perencanaan mitigasi di masa mendatang.



Gambar 1. Peta *Peak Ground Acceleration* di Kecamatan Prambanan, Kabupaten Sleman.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik geologi lokal berperan besar dalam menentukan tingkat percepatan tanah maksimum (PGA) di Kecamatan Prambanan akibat gempa Yogyakarta 2006. Nilai PGA berada pada rentang 29,2–35,6 gal, dengan pola peningkatan dari utara ke selatan. Bagian selatan dan tenggara, yang didominasi endapan aluvial Sungai Opak, menunjukkan nilai PGA tertinggi karena sifat material yang lepas dan mampu memperkuat gelombang seismik. Sebaliknya, wilayah utara yang tersusun oleh endapan vulkanik muda yang lebih padat cenderung meredam guncangan. Kedekatan wilayah studi dengan Sesar Opak turut memperjelas pengaruh jarak terhadap sumber gempa. Secara keseluruhan, hasil ini mengonfirmasi bahwa kondisi litologi, geomorfologi, dan kedekatan terhadap struktur aktif menjadi faktor utama yang mengendalikan variasi intensitas seismik di Prambanan. Oleh karena itu, aspek-aspek tersebut harus dipertimbangkan dalam pemodelan bahaya gempa dan perencanaan pembangunan infrastruktur tahan gempa di masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi kepada United States Geological Survey (USGS) atas penyediaan data gempa bumi yang sangat lengkap, mencakup informasi mengenai lokasi

kejadian, kedalaman sumber, serta besaran magnitudo. Ketersediaan data yang akurat dan dapat diandalkan tersebut menjadi unsur penting yang memungkinkan penelitian ini dapat direncanakan, dianalisis, dan diselesaikan dengan baik.

DAFTAR REFERENSI

- Abidin, H. Z., Andreas, H., Kato, T., Ito, T., Meilano, I., Kimata, F., Natawidjaya, D. H., & Harjono, H. (2009). Crustal deformation studies in Java (Indonesia) using GPS. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 3(2), 77–88. <https://doi.org/10.1142/S1793431109000445>
- Chasanah, U., Handoyo, E., Rahmawati, N. N., & Musfiana, M. (2022). Mapping risk level based on peak ground acceleration and earthquake intensity using multi-event earthquake data in Malang Regency, East Java, Indonesia. *Journal of Geoscience*, 14(1), 64–72.
- Gandini, D. R. A., Setiawan, Y. A., Madrinovella, I., Abdullah, A., Pranata, B., Suhardja, S. K., & Aisy, S. R. (2022). Hasil awal analisis peak ground acceleration di Bali. *Jurnal Geofisika*, 20(2), 71–75. <https://doi.org/10.36435/jgf.v20i2.535>
- Irwansyah, E., Winarko, E., Rasjid, Z. E., & Bkti, R. D. (2013). Earthquake hazard zonation using peak ground acceleration (PGA) approach. *Journal of Physics: Conference Series*, 423(1), 012067. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/423/1/012067>
- Kumala, S. A., Huda, D. N., & Irawan, M. C. (2018). Analisis PGA (peak ground acceleration) berdasarkan data gempa untuk wilayah Jakarta Timur menggunakan software PSHA. *Faktor Exacta*, 11(4), 380–388. <https://doi.org/10.30998/faktorexacta.v11i4.2974>
- Kurniawati, I. K. A. (2016). *Analisis mikrotremor untuk mikrozonasi indeks kerentanan seismik di kawasan jalur sesar Sungai Oyo, Yogyakarta* [Skripsi, Universitas Negeri Yogyakarta].
- Mase, L. Z. (2014). Analisis pendahuluan potensi likuifaksi di Kali Opak Imogiri, Daerah Istimewa Yogyakarta. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Geoteknik 2014* (pp. 10–11).
- Meitawati, P. M., Mulyatno, B. S., & Setiadi, A. (2018). Perbandingan nilai percepatan tanah maksimum berdasarkan modifikasi konstanta atenuasi dan data accelerograph tahun 2008–2016 pada stasiun BMKG Lampung. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 4(2), 201–215. <https://doi.org/10.23960/jge.v4i2.1>
- Nugraheni, A. S., Budi, N., & Yudianto, D. (2023). Modeling of liquefaction potential zone using the global geospatial model (case study: Special Region of Yogyakarta and Klaten Regency). *Jurnal Geofisika*, 21(1), 1–9. <https://doi.org/10.36435/jgf.v21i1.529>
- Nugraheni, A. S., Setianto, A., & Setiawan, H. (2024). Comparison of Vs30 value from microtremor data based on SPT drill test of young Merapi deposits in Opak River, Yogyakarta. *Journal of Geophysics*, 5(2), 101–110.
- Nurhidayatullah, E. K. A. F., & Kurniati, D. W. I. (2020). Pemetaan spectral acceleration daerah Yogyakarta dengan pendekatan probabilistic seismic hazard analysis. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-UNAND)*, 16(3), 217–229. <https://doi.org/10.25077/jrs.16.3.217-229.2020>

- Pasau, G., Bobanto, M. D., & Pandara, D. P. (2018). Model percepatan tanah maksimum di Kota Manado menggunakan metode Donovan dan McGuire. *Jurnal MIPA UNSRAT Online*, 7(1), 52–55. <https://doi.org/10.35799/jm.7.1.2018.19610>
- Pusat Studi Gempa Nasional (PusGeN). (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, Kementerian PUPR.
- R., S. R., & Madrinovella, I. (2024). Spatial and temporal b-value analysis of the Yogyakarta region using earthquake data. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 10(3), 191–203. <https://doi.org/10.23960/jge.v9i2.468>
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, & Rosidi, H. M. (1995). *Peta geologi lembar Yogyakarta, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Santoso. (2009). Morfologi dan umur perpindahan alur Sungai Opak di daerah Berbah, Sleman. *Jurnal Geologi Indonesia*, 19(4), 239–249.
- Suhada, A. S., Kardoso, R., & Zuhdi, M. (2023). Penghitungan peak ground acceleration (PGA) di Desa Kuta menggunakan persamaan empiris pada gempa bumi 19 Agustus 1977 (Mw 8.3). *Jurnal Penelitian dan Pembelajaran Fisika Indonesia*, 5(1), 20–24. <https://doi.org/10.29303/jppfi.v5i1.221>
- Supriyadi, Hikmah, A. N., Ardent, E., & Khumaedi. (2024). Analysis of peak ground acceleration (PGA) and earthquake disaster risk in the Central Java Region based on earthquake data 1980–2022. *Journal of Physics: Conference Series*, 2900(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2900/1/012025>
- Ulfiana, E., Rummy, S. A., Pratama, R., & Ariyanto, P. (2018). Analisis pendekatan empiris PGA (peak ground acceleration) Pulau Bali menggunakan metode Donovan, McGuire, dan M.V. Mickey. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, 2(2), 155–161. <https://doi.org/10.24198/jiif.v2i2.19730>
- Wibowo, N. B. (2019). Analisis global geospatial model (GGM) untuk identifikasi potensi likuifaksi di Kabupaten Bantul, D.I. Yogyakarta. *Buletin Meteorologi dan Geofisika*, 9.