

MODEL PREDIKSI PROBABILISTIK LONGSOR YANG DIPICU GEMPABUMI DI WILAYAH PURWOSARI, KULON PROGO

Sidik Pramono^{1,2}, Arif Riyanto Budi Nugroho², Tedy Agung Cahyadi², Suharsono², Yohana Noradika Maharani^{2*}

¹ Stasiun Geofisika Sleman, Jl. Wates Km. 8, Balekatun, Gamping, Sleman, Yogyakarta, Indonesia 55294

² Program Studi Magister Manajemen Bencana, UPN Veteran Yogyakarta, Jl. Babarsari 2 Yogyakarta, Indonesia 55281
email:yohanam@upnyk.ac.id

ABSTRAK

Longsor yang dipicu gempa bumi merupakan ancaman signifikan di wilayah dengan topografi curam dan aktivitas seismik tinggi, seperti Purwosari, Kabupaten Kulon Progo. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji probabilitas longsor akibat gempa bumi melalui integrasi metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) untuk karakterisasi geologi permukaan dan pemodelan probabilistik berdasarkan pendekatan Hamburger *et al.* (2020). Data mikrotremor dari 22 titik digunakan untuk mengestimasi parameter V_{s30} dan ketebalan tanah (*soil thickness*), yang kemudian diintegrasikan dengan parameter spasial lain seperti *peak ground velocity* (PGV), kemiringan lereng (*slope*), dan *Compound Topographic Index* (CTI). Hasil pemodelan menggunakan regresi logistik multivariat menunjukkan bahwa 56,69% wilayah studi termasuk dalam kategori risiko rendah hingga sedang, 40,36% dalam kategori sedang hingga tinggi, dan 2,26% berada pada kategori tinggi. Integrasi metode HVSR dan model probabilistik dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona rawan longsor akibat gempa bumi serta mendukung perumusan strategi mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang berbasis kerentanan seismik di kawasan wisata alam seperti Purwosari.

Kata Kunci: Longsor akibat gempa bumi; HVSR; probabilitas; Purwosari; mitigasi bencana

ABSTRACT

[**Title: Probabilistic Prediction Model of Earthquake-Induced Landslides in the Purwosari Area, Kulon Progo**]. Earthquake-triggered landslides pose a significant threat in regions with steep topography and high seismic activity, such as Purwosari, Kulon Progo Regency. This study aims to assess the probability of landslides triggered by earthquakes through the integration of the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method for surface geological characterization and a probabilistic model based on the approach of Hamburger *et al.* (2020). Microtremor data from 22 sites were used to estimate V_{s30} and soil thickness, which were then combined with other spatial parameters, including peak ground velocity (PGV), slope gradient, and the Compound Topographic Index (CTI). The multivariate logistic regression model results indicate that 56.69% of the study area falls within the low to moderate risk category, 40.36% in the moderate to high category, and 2.26% in the high-risk category. The integration of the HVSR method and probabilistic modeling can be used to identify zones prone to earthquake-induced landslides and support the development of disaster mitigation strategies and seismic vulnerability-based spatial planning in nature-based tourism areas such as Purwosari.

Keywords: Earthquake landslides; HVSR; probability; Purwosari; disaster mitigation

PENDAHULUAN

Longsor merupakan salah satu bencana geologi yang sangat merusak, terutama di wilayah dengan topografi curam dan kepadatan penduduk tinggi. Bencana ini terjadi akibat pergerakan massa tanah atau batuan yang dipicu oleh faktor alami seperti curah hujan ekstrem, gempa bumi, dan aktivitas vulkanik, serta diperparah oleh aktivitas manusia seperti deforestasi dan perubahan tata guna lahan (Ayele *et al.*, 2025; Jaafari, 2024; Hidayat, 2020). Perubahan iklim global, peningkatan

intensitas dan frekuensi curah hujan memperbesar risiko kejadian longsor yang berakibat pada kerugian ekonomi, korban jiwa, dan kerusakan infrastruktur (Fang *et al.*, 2025). Salah satu bentuk paling berbahaya dari tanah longsor adalah yang dipicu oleh aktivitas seismik, yang berpotensi menimbulkan dampak luas dan kompleks di wilayah rawan gempa bumi seperti Indonesia.

Longsor yang dipicu oleh gempa bumi telah terbukti sebagai penyebab utama ketiga kematian akibat gempa bumi setelah runtuhnya bangunan dan

tsunami (Marano *et al.*, 2009; Hamburger *et al.*, 2020). Dampaknya tidak hanya berupa korban jiwa, tetapi juga kerusakan infrastruktur vital seperti jalan, jembatan, dan jaringan komunikasi, yang menghambat upaya evakuasi dan distribusi bantuan darurat (Bird & Bommer, 2004). Oleh karena itu, pengembangan metode mitigasi dan pemetaan risiko longsor akibat gempa bumi menjadi sangat penting, terutama di wilayah-wilayah dengan kerentanan tinggi terhadap bencana.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk memodelkan potensi longsor akibat gempa bumi, salah satunya adalah model probabilistik berbasis data global yang dikembangkan oleh Hamburger *et al.* (2020). Model ini mengintegrasikan parameter guncangan tanah dari gempa bumi, seperti *Peak ground velocity (PGV)* dengan proksi kerentanan longsor seperti kemiringan lereng (*slope*), geologi permukaan seperti halnya *soil thickness*, dan *material wetness*, untuk memperkirakan distribusi spasial dan probabilitas terjadinya longsor akibat gempa bumi.

Metode geofisika seperti *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)* berbasis mikrotremor semakin banyak digunakan untuk karakterisasi geologi permukaan (Yulianto *et al.*, 2023; Molnar *et al.*, 2022). HVSr memungkinkan identifikasi frekuensi dominan lokal dan ketebalan tanah lunak, yang sangat berguna dalam mengkaji potensi amplifikasi seismik dan kestabilan lereng, terutama di daerah dengan keterbatasan data bor (Moro & Panza, 2022). Studi Abdelrahman (2021) dan Fiorucci (2022) menunjukkan efektivitas metode HVSr dalam mengidentifikasi kerentanan longsor. Liu *et al.* (2023) menggabungkan mikrotremor dengan indeks kerentanan untuk deteksi yang lebih akurat, sedangkan Hosseinzadeh *et al.* (2025) menilai respons dinamis longsor terhadap kebisingan ambient menggunakan HVSr, memperkuat peran metode ini dalam mitigasi risiko longsor.

Purwosari, Kabupaten Kulon Progo, merupakan wilayah dengan potensi longsor tinggi akibat kombinasi kondisi geologis yang kompleks, topografi perbukitan curam, jenis tanah yang mudah tererosi, dan aktivitas antropogenik seperti pembukaan lahan untuk pertanian dan pengembangan pariwisata (Santie *et al.*, 2024; Aziz *et al.*, 2023; Litasari *et al.*, 2022). Dari 2010–2020, terjadi ratusan longsor yang menyebabkan korban jiwa dan kerusakan infrastruktur (Syahputri & Sismanto, 2020). Meski memiliki potensi wisata alam dan budaya, pengembangan wisata di daerah rawan ini menghadapi tantangan pengelolaan risiko, terutama risiko sekunder seperti longsor akibat

gempa bumi, yang sering diabaikan dalam perencanaan Pembangunan.

Meskipun beberapa studi telah mengkaji longsor di Kulon Progo, integrasi pendekatan HVSr untuk karakterisasi bawah permukaan dengan model probabilistik Hamburger *et al.* (2020) di kawasan Purwosari masih belum dilakukan. Integrasi ini berpotensi meningkatkan akurasi pemodelan bahaya dan mendukung mitigasi longsor akibat gempa bumi. Ketiadaan kajian terpadu tentang probabilitas longsor akibat gempa bumi di wilayah Purwosari menjadi celah penelitian penting yang perlu diisi.

Berdasarkan hal tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji probabilitas longsor yang dipicu gempa bumi di wilayah Purwosari, Kulon Progo, dengan mengintegrasikan metode HVSr untuk karakterisasi geologi permukaan dan model probabilistik longsor akibat gempa bumi mengadaptasi pendekatan Hamburger *et al.* (2020). Kajian ini diharapkan dapat menghasilkan peta probabilitas longsor akibat gempa bumi yang lebih akurat serta memberikan rekomendasi strategi mitigasi risiko berbasis sains guna mendukung pengembangan kawasan yang aman dan berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode spasial untuk memodelkan probabilitas longsor akibat gempa bumi di wilayah Purwosari, Kabupaten Gunungkidul. Model yang digunakan merupakan adaptasi dari Model Hamburger *et al.* (2020) yang berbasis regresi logistik multivariat. Model ini dipilih karena kemampuannya dalam memprediksi sebaran spasial potensi longsor akibat gempa bumi secara cepat dan efisien, serta dapat disesuaikan dengan data lokal.

Penelitian ini dilakukan di wilayah Purwosari, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Wilayah ini memiliki karakteristik geomorfologi berupa lereng terjal, perbukitan dengan litologi yang mudah tererosi, serta berada dalam kawasan yang mengalami perkembangan wisata alam. Kombinasi antara topografi, kondisi geologi yang rentan, dan intensitas aktivitas manusia menjadikan lokasi ini strategis untuk kajian risiko longsor, terutama yang dipicu oleh aktivitas gempa bumi.

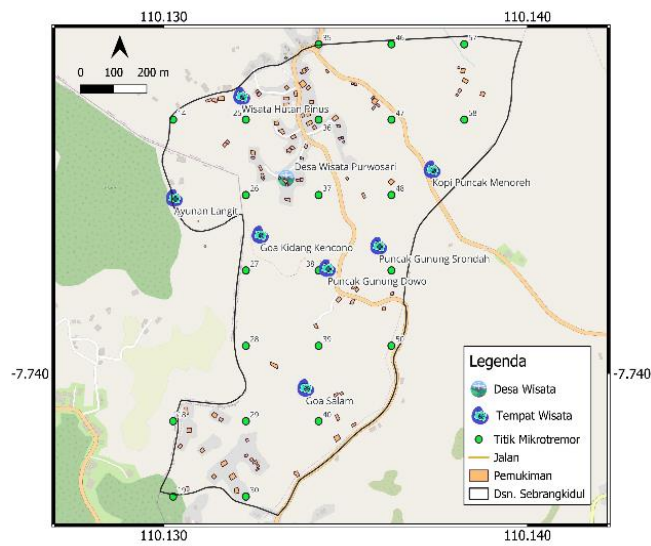
Data dan Sumber Data

Penelitian ini memanfaatkan berbagai jenis data spasial dan non-spasial yang diperlukan untuk memprediksi probabilistik longsor yang dipicu oleh gempa bumi di wilayah studi. Parameter utama

dalam estimasi probabilitas longsor akibat gempa bumi antara lain *PGV*, yang merepresentasikan intensitas guncangan tanah, dan *slope* yang dihitung dari data *Digital Elevation Model* (DEM), khususnya DEMNAS (<https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/demnas>). Parameter ini penting karena lereng yang curam sangat berkontribusi terhadap ketidakstabilan tanah, terutama saat terjadi gempa bumi.

Parameter *material wetness* seperti *Compound Topographic Index* (CTI), juga dihitung berdasarkan data DEM. CTI menggambarkan potensi akumulasi air pada lereng, dan berfungsi sebagai indikator

kelembaban relatif yang dapat mempengaruhi kestabilan tanah. Untuk menggambarkan kondisi geologi permukaan, digunakan data *soil thickness*. Data ini diperoleh melalui pengukuran mikrotremor di 22 titik pengamatan, yang tersebar di seluruh wilayah studi. Penentuan titik pengukuran dilakukan menggunakan pendekatan grid sampling, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Seluruh parameter tersebut kemudian diekstraksi ke titik survei dan diintegrasikan dalam satu basis data yang digunakan untuk pemodelan probabilitas longsor akibat gempa bumi serta analisis spasial lanjutan.



Gambar 1. Titik pengukuran mikrotremor di wilayah penelitian

Untuk mengkaji keterkaitan probabilitas longsor akibat gempa bumi dan pengembangan wisata, data kawasan wisata dipadukan dengan peta probabilitas longsor untuk mengidentifikasi zona wisata berisiko tinggi. Hasil analisis menjadi dasar rekomendasi mitigasi bencana serta strategi pengembangan kawasan wisata yang aman dan berkelanjutan.

Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan melalui beberapa tahapan utama untuk menghasilkan peta probabilitas longsor yang dipicu oleh gempa bumi, serta menganalisis keterkaitannya dengan pengembangan kawasan wisata di wilayah studi. Tahapan pengolahan meliputi pemrosesan data, pemodelan probabilitas, klasifikasi risiko, analisis spasial, dan verifikasi hasil.

Pada tahap awal, dilakukan pengolahan data mikrotremor menggunakan metode HVSR. Prinsip utama metode HVSR dapat dijelaskan dengan membandingkan spektrum horizontal dan vertikal

(Nakamura, 1989) seperti yang ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$HVSR = \sqrt{\frac{[(S_{N-S})^2 + (S_{E-W})^2]}{S_V}} \tag{1}$$

dengan S_{N-S} adalah spektrum horizontal utara-selatan, S_{E-W} adalah spektrum horizontal barat-timur, dan S_V adalah spektrum vertikal. Analisis HVSR dilakukan dengan bantuan perangkat lunak hvsrpy (Vantassel, 2024), yaitu pustaka berbasis Python yang memungkinkan pemrosesan data secara efisien.

Kurva HVSR yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai masukan dalam proses inversi untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser (V_s). Inversi dilakukan menggunakan perangkat lunak ProHVSR berbasis MATLAB dengan menerapkan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). PSO dipilih karena kemampuannya dalam menyelesaikan permasalahan non-linear secara global dan efisien. Proses inversi diawali dengan penyusunan *initial model* yang mencakup parameter kecepatan gelombang primer (V_p), kecepatan gelombang geser (V_s), ketebalan tiap

lapisan, serta faktor redaman gelombang (Q_p dan Q_s). Hasil dari proses inversi berupa profil V_s digunakan untuk menghitung nilai V_{s30} , yaitu kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30-meter, yang merupakan parameter penting dalam penilaian kondisi tanah lokal pada analisis bahaya gempa bumi. Selanjutnya V_{s30} diperkirakan menggunakan persamaan berikut:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{si}}} \quad (2)$$

dimana h_i adalah ketebalan masing-masing lapisan hingga kedalaman 30 meter, V_{si} adalah kecepatan gelombang geser pada lapisan ke- i , dan n adalah jumlah lapisan hingga kedalaman 30 meter. Nilai V_{s30} yang diperoleh digunakan untuk analisis bahaya seismik, seperti menghitung nilai PGV .

Sementara itu, *soil thickness* diperkirakan dari hasil survei mikrotremor dengan menggunakan hubungan empirik antara frekuensi dominan (F_0) dan kecepatan gelombang geser (V_s), melalui rumusan Seht & Wohlenberg, 1999 berikut:

$$d = \frac{V_s}{4F_0} \quad (3)$$

dengan d adalah *soil thickness*, V_s merupakan kecepatan gelombang geser rata-rata lapisan tanah atas (dalam m/s) dan F_0 adalah frekuensi dominan hasil analisis HVSR dalam satuan Hz. Penerapan estimasi praktis ketebalan tanah tersebut perlu dilakukan secara hati-hati, mengingat sifatnya yang empiris dan sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi lokal. Kalibrasi dengan data bor atau pengujian geofisika disarankan untuk meningkatkan akurasi hasil estimasi.

Pengolahan dilanjutkan perhitungan parameter topografi *slope* dan *CTI* menggunakan data DEMNAS. Pengolahan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak QGIS 3.40.6. Perhitungan *slope* dilakukan menggunakan fungsi turunan spasial, sedangkan nilai *CTI* dihitung dengan persamaan 1 (Moore *et al.*, 1991; Winzeler *et al.*, 2022).

$$CTI = \ln \frac{A}{\tan(\beta)} \quad (4)$$

dengan A adalah kontribusi area aliran (*flow accumulation*) dalam satuan meter persegi (m^2), β adalah *slope* dalam radian, \ln adalah logaritma natural.

Parameter seismik berupa PGV dihitung berdasarkan skenario terburuk gempa bumi yang bersumber dari Sesar Opak. Skenario dimaksud merupakan skenario terburuk dari Sesar Opak dengan magnitudo maksimum Mw 6,6. Pemilihan skenario ini didasarkan pada potensi maksimum

Sesar Opak sebagaimana telah ditetapkan dalam Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017 oleh Pusat Studi Gempa Nasional (Pusgen, 2017), yang mengacu pada kajian geologi dan seismotektonik wilayah tersebut. Estimasi PGV dilakukan menggunakan pendekatan *Deterministic Seismic Hazard Analysis* (DSHA) dengan model GMPE dari Chiou & Youngs (2014), yang mempertimbangkan magnitudo, jarak sumber gempa, dan kondisi lokal tanah (V_{s30}) dari survei mikrotremor. Adapun kerangka prediksi probabilitas longsor secara keseluruhan tetap disusun berdasarkan pendekatan probabilistik. Estimasi PGV secara umum dihitung dengan persamaan berikut:

$$\ln(PGV) = f(M, R_{rup}, V_{s30}, F_{NM}, F_{RV}, Z1.0, D, H) + \epsilon \quad (5)$$

Dimana M adalah magnitudo gempa, R_{rup} adalah jarak terpendek ke permukaan patahan (*rupture*), F_{NM} adalah koefisien untuk jenis mekanisme patahan, $Z1.0$ adalah kedalaman ke lapisan dengan kecepatan gelombang geser 1.0 km/s, D adalah *directivity*, yaitu efek arah propagasi gelombang, H adalah *Hanging Wall*, yaitu efek posisi relatif terhadap sisi patahan, dan ϵ adalah variabilitas aleatorik (residual acak). Rumus lengkap dan koefisien numerik spesifik untuk setiap parameter dapat ditemukan dalam publikasi resmi Chiou & Youngs (2014).

Seluruh parameter PGV , *slope*, *CTI*, dan *soil thickness*, kemudian diekstraksi ke titik-titik koordinat pengukuran mikrotremor. Data hasil ekstraksi ini selanjutnya dikompilasi dan digunakan sebagai basis data input dalam pemodelan probabilitas longsor berbasis regresi logistik multivariat, mengadaptasi pada model yang dikembangkan oleh Hamburger *et al.* (2020), dengan persamaan berikut:

$$z = a + b \cdot \ln(PGV) + c \cdot Slope + f \cdot (PGV \cdot Slope) + g \cdot CTI + h \cdot Soil Depth$$

$$P(z) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (6)$$

dengan $P(z)$ adalah prediksi probabilitas longsor, sedangkan nilai koefisien $a=-4$; $b=0,5$; $c=0,04$; $f=0,007$; $g=0,04$, dan $h=0,015$. Model ini diimplementasikan untuk menghasilkan nilai probabilitas longsor untuk setiap titik observasi. Nilai koefisien tersebut diadaptasi dari model Hamburger *et al.* (2020) dan merepresentasikan pengaruh masing-masing variabel terhadap probabilitas longsor. Koefisien ini tidak bersifat universal, melainkan bergantung pada lokasi,

karakteristik geologi, dan data yang digunakan dalam proses kalibrasi. Dalam studi ini, model digunakan dengan mengacu langsung pada koefisien dari penelitian Hamburger *et al.* (2020), karena keterbatasan data untuk melakukan kalibrasi lokal yang lebih spesifik.

Nilai prediksi probabilitas hasil model diklasifikasikan ke dalam lima kategori bahaya, yaitu <0,2 sebagai kategori sangat rendah, 0,2 hingga 0,4 kategori rendah, 0,4 hingga 0,6 kategori sedang, 0,6 hingga 0,8 kategori tinggi, dan >0,8 kategori sangat tinggi. Hasil klasifikasi ini kemudian dipetakan kembali untuk menghasilkan peta sebaran probabilitas longsor.

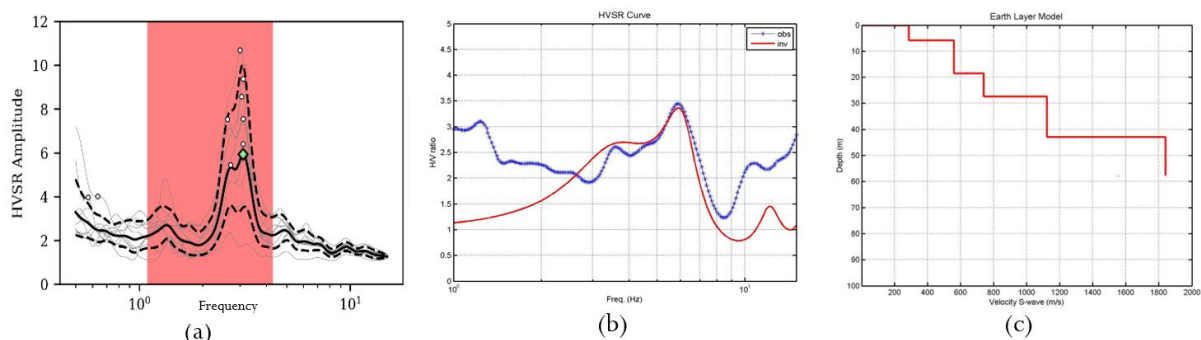
Peta probabilitas longsor kemudian dipadukan dengan peta kawasan wisata hasil digitasi. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kawasan wisata berada di zona rawan dan untuk mengidentifikasi wilayah prioritas mitigasi. Berdasarkan hasil paduan peta dan validasi, dibuat rekomendasi zonasi kawasan wisata menjadi zona aman (rendah risiko), zona rawan (sedang hingga sangat tinggi), dan strategi mitigasi seperti

penanaman vegetasi, larangan pembangunan permanen, serta sistem peringatan dini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis HVSR, Inversi dan Profil V_s

Pengolahan data mikrotremor di Kalurahan Purwosari dilakukan menggunakan metode HVSR untuk mengidentifikasi efek tapak lokal dan memperoleh estimasi profil kecepatan gelombang geser (V_s). Gambar 2 menunjukkan hasil pengolahan mikrotremor di titik pengukuran 30. Analisis HVSR menunjukkan frekuensi dominan sebesar 3,14 Hz dengan amplitudo puncak sekitar 5,92, seperti ditampilkan pada Gambar 2(a). Nilai ini menandakan adanya resonansi lokal akibat kontras impedansi bawah permukaan. Gambar 2(b) memperlihatkan kesesuaian antara kurva HVSR hasil observasi dan hasil inversi, khususnya pada frekuensi dominan. Sementara itu, Gambar 2(c) menunjukkan model kecepatan gelombang geser (V_s) terhadap kedalaman hasil inversi HVSR. Hasil analisis HVSR dan inversi HVSR ini digunakan untuk memperkirakan nilai V_{s30} dan *soil thickness*.



Gambar 2. Hasil pengolahan HVSR di titik 30. Kurva HVSR dengan frekuensi dominan dan amplitudo (a), perbandingan kurva HVSR observasi dan inversi (b), dan profil V_s terhadap kedalaman hasil inversi HVSR (c)

Karakteristik Geospasial dan Seismik

Karakteristik geospasial dan seismik wilayah Purwosari, Kabupaten Kulon Progo, ditinjau berdasarkan beberapa parameter yaitu V_{s30} hasil pengukuran mikrotremor, serta parameter utama seperti *slope*, *CTI*, *soil thickness*, dan *PGV*. Parameter utama ini berperan penting dalam mengidentifikasi probabilitas longsor yang dipicu oleh aktivitas gempa bumi.

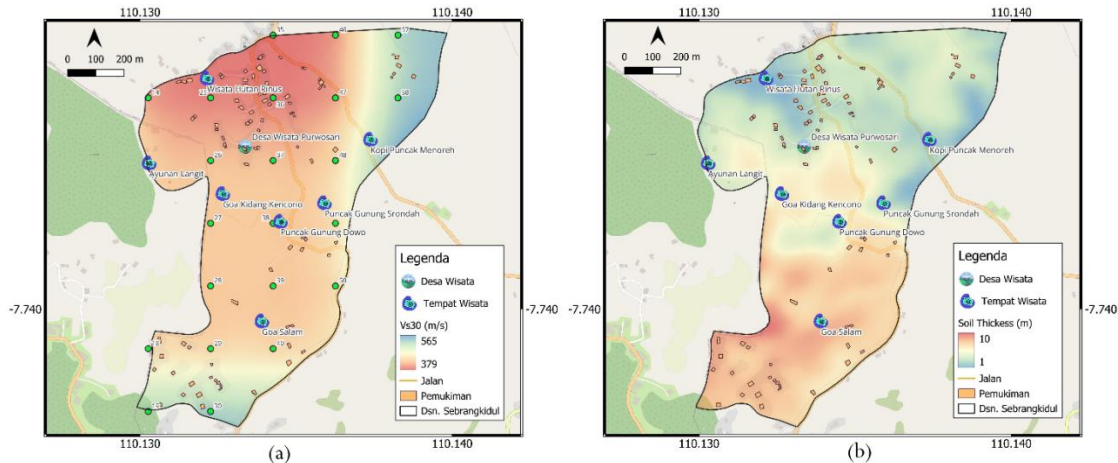
Nilai V_{s30} merupakan parameter penting dalam menilai kerentanan seismik suatu lokasi karena mencerminkan kekakuan tanah. Berdasarkan peta V_{s30} pada Gambar 3(a), wilayah studi didominasi oleh kelas tanah sedang hingga keras, dengan nilai V_{s30} berkisar antara 300 hingga 760 m/s. Area dengan V_{s30} yang lebih rendah umumnya tersusun oleh material sedimen yang lepas dan

lunak. Karakteristik ini menjadikan area tersebut lebih rentan terhadap amplifikasi gelombang gempa bumi, sehingga berpotensi menyebabkan kecepatan tanah yang lebih besar saat terjadi guncangan seismik. Kondisi ini berkaitan erat dengan nilai *PGV*, di mana daerah dengan V_{s30} yang lebih rendah cenderung memiliki nilai *PGV* yang lebih tinggi, meningkatkan potensi kerusakan dan instabilitas lereng.

V_{s30} juga berhubungan erat dengan *soil thickness*. Nilai V_{s30} yang rendah seringkali mengindikasikan lapisan sedimen tebal dan lunak, yang berperan penting dalam penguatan gelombang seismik serta memperpanjang durasi guncangan. Akumulasi sedimen ini, terutama jika terjadi di atas lereng curam, dapat meningkatkan probabilitas terjadinya longsor yang dipicu oleh gempa bumi.

Wilayah dengan *soil thickness* yang besar memiliki probabilitas longsor yang lebih tinggi, terutama jika berada di atas atau dekat dengan lereng curam. Berdasarkan Gambar 3(b), distribusi *soil thickness* di wilayah studi menunjukkan beberapa area akumulasi sedimen yang lebih tebal di zona kaki lereng dan cekungan topografi. Wilayah tengah area

penelitian merupakan zona dengan *soil thickness* yang relatif lebih tinggi. *Soil thickness* yang lebih tinggi mengindikasikan adanya endapan lepas yang belum terkonsolidasi, yang bersifat lebih rentan terhadap gerakan tanah, terutama pada musim hujan atau saat terjadi gempa bumi.

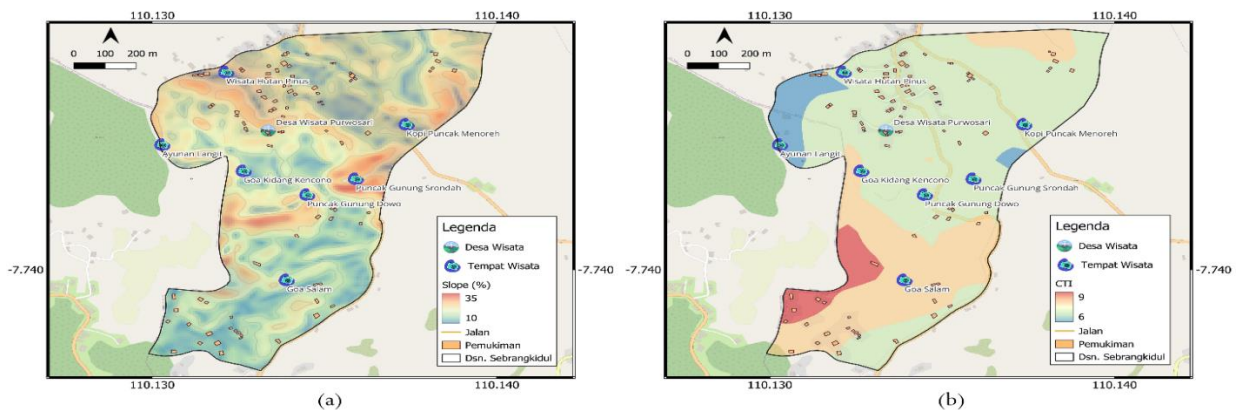


Gambar 3. Sebaran V_s30 (a), dan *soil thickness* (b) di wilayah penelitian

Kondisi ini selaras dengan nilai V_s30 yang cenderung rendah di area tersebut, yang menandakan lapisan tanah yang lunak dan tidak kompak. Kombinasi antara ketebalan sedimen, dan posisi topografi lereng meningkatkan kerentanan wilayah tersebut terhadap amplifikasi gelombang gempa bumi serta probabilitas terjadinya longsor yang dipicu gempa bumi. Selain itu, tanah yang lebih tebal dan jenuh air dapat berkontribusi terhadap pelemahan kekuatan geser tanah, memperbesar risiko ketidakstabilan lereng selama atau setelah kejadian gempa bumi.

tiga kelas utama, yaitu lereng landai (8–15%), lereng sedang (15–25%), dan lereng curam (25–40%). Kelas lereng landai umumnya tersebar di bagian selatan dan utara wilayah studi, yang merupakan wilayah dataran rendah dan kaki lereng. Lereng sedang mendominasi bagian tengah dan barat wilayah studi, terutama pada zona perbukitan dengan morfologi bergelombang. Adapun lereng curam tampak mencolok di kawasan perbukitan tengah, yang memiliki potensi instabilitas tanah yang tinggi. Semakin curam suatu lereng, semakin besar gaya geser yang bekerja pada massa tanah, sehingga meningkatkan risiko terjadinya longsor, khususnya saat dipicu oleh guncangan gempa bumi atau curah hujan yang tinggi.

Peta kemiringan lereng (*slope*) pada Gambar 4(a) menunjukkan bahwa wilayah studi didominasi oleh lereng dengan kemiringan antara 10% hingga lebih dari 35%, yang dapat diklasifikasikan ke dalam



Gambar 4. Sebaran *slope* (a), dan *CTI* (b) di wilayah penelitian

CTI menggambarkan kecenderungan suatu area untuk mengalami akumulasi air dan tingkat kejenuhan tanah, yang merupakan faktor penting dalam analisis probabilitas longsor. Nilai *CTI* yang tinggi menunjukkan wilayah dengan kombinasi lereng landai dan konvergensi aliran air, seperti di lembah atau cekungan, di mana air cenderung tertahan dan mengakumulasi. Kondisi ini menyebabkan meningkatnya kejenuhan pori tanah, yang pada akhirnya akan menurunkan kekuatan geser tanah, sebuah kondisi kritis dalam mekanisme longsor, terutama saat terjadi guncangan gempa bumi.

Berdasarkan peta *CTI* pada Gambar 4(b), terlihat bahwa nilai *CTI* tinggi tersebar di beberapa titik, khususnya di zona kaki lereng, lembah sempit, dan area transisi antar elevasi. Keberadaan nilai *CTI* tinggi di lokasi-lokasi ini berpotensi memperbesar risiko instabilitas lereng, terutama jika dikombinasikan dengan *soil thickness* yang besar dan nilai *Vs30* yang rendah. Area dengan *CTI* tinggi dan sedimen tebal menandakan akumulasi endapan lunak dan memperkuat potensi amplifikasi gelombang gempa bumi.

PGV adalah parameter penting dalam penilaian bahaya seismik karena menggambarkan kecepatan maksimum pergerakan tanah akibat gempa. Peta *PGV* pada Gambar 5(a) menunjukkan variasi spasial, dengan nilai tertinggi di bagian utara dan tengah wilayah studi. Area dengan *PGV* >30 cm/s berasosiasi dengan zona *Vs30* rendah, yang terdiri dari material lunak dan tebal. Ini sesuai dengan prinsip amplifikasi seismik, di mana tanah lunak memperbesar guncangan, dan memperkuat dampak di permukaan. Area dengan *PGV* tinggi,

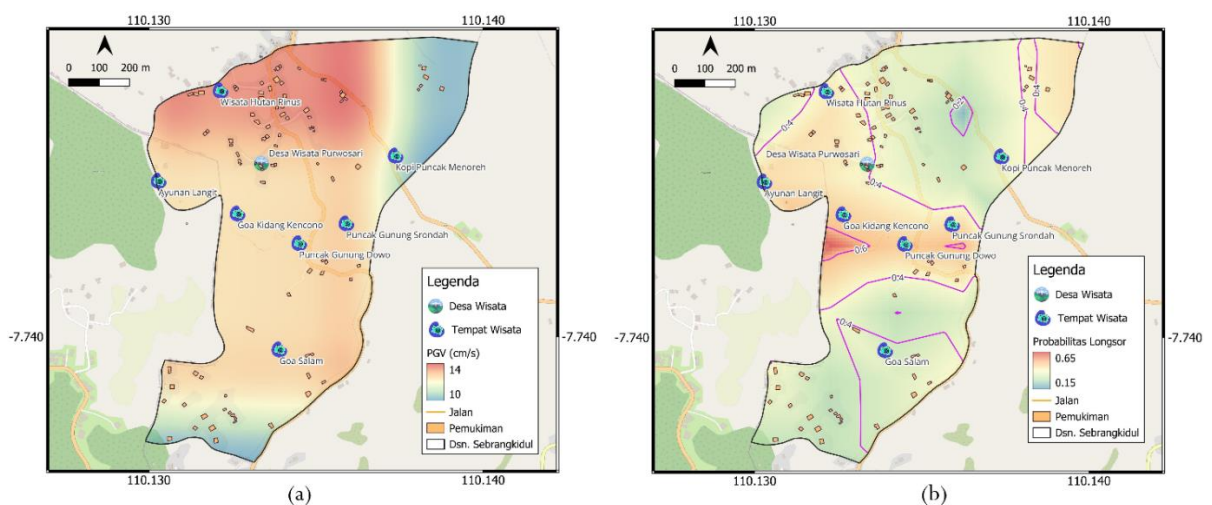
lereng curam dan nilai *CTI* yang sedang hingga tinggi, menandakan potensi besar longsor yang dipicu gempa bumi di wilayah tersebut.

Nilai *PGV* yang tinggi di wilayah-wilayah tersebut tidak hanya meningkatkan risiko longsor, tetapi juga berimplikasi langsung terhadap kerusakan struktur permukaan. Nilai *PGV* sangat dipengaruhi oleh kondisi lokal tanah (*Vs30*) dan kedalaman serta karakteristik batuan dasar. Variasi nilai *PGV* pada wilayah studi dapat dianggap mencerminkan keragaman kondisi seismik lokal yang perlu dipertimbangkan dalam mitigasi bencana.

Probabilitas Longsor Akibat Gempa Bumi

Hasil pemodelan probabilitas longsor akibat gempa bumi di wilayah Purwosari, Kulon Progo, menunjukkan distribusi spasial yang bervariasi dan berkorelasi erat dengan kondisi geospasial wilayah. Estimasi probabilitas dihitung pada titik-titik observasi mikrotremor, dan hasilnya divisualisasikan dalam peta probabilitas longsor seperti ditunjukkan pada Gambar 5(b).

Berdasarkan klasifikasi nilai probabilitas longsor, sebagian besar wilayah studi berada dalam kategori risiko rendah hingga sedang. Sekitar 56,69% area termasuk dalam kelas rendah dengan probabilitas 0,2 hingga 0,4, dan 40,36% lainnya berada dalam kelas sedang dengan probabilitas 0,4 hingga 0,6. Area dengan probabilitas sangat rendah (<0,2) hanya mencakup sekitar 0,69%, sedangkan probabilitas tinggi (>0,6) mencakup 2,26% dari total area. Temuan ini menandakan bahwa probabilitas longsor akibat gempa bumi di kawasan ini relatif moderat, dengan sebagian besar area tidak berada pada zona risiko ekstrem.



Gambar 5. Sebaran *PGV* (a), dan probabilitas longsor akibat gempa bumi (b) di wilayah penelitian

Distribusi spasial probabilitas konsisten dengan parameter geospasial. Probabilitas tertinggi ada di tengah, dan diikuti bagian utara khususnya wilayah barat dan timur area. Kondisi ini menunjukkan instabilitas tinggi akibat topografi dan tanah yang lebih lunak, didukung nilai V_{s30} yang lebih rendah serta akumulasi sedimen di zona tersebut. Sebaliknya, wilayah utara bagian Tengah dan wilayah Selatan menunjukkan nilai probabilitas longsor yang lebih rendah. Area ini umumnya memiliki kemiringan lereng yang lebih landai, dengan nilai CTI yang lebih rendah hingga sedang, sehingga menurunkan kerentanan terhadap longsor.

Kesesuaian spasial antara peta probabilitas longsor dan parameter geospasial seperti *slope*, *soil thickness*, V_{s30} , dan PGV menunjukkan bahwa integrasi data geofisika dan topografi mampu mengidentifikasi zona rawan longsor akibat gempa. Oleh karena itu, hasil ini sangat penting untuk mendukung mitigasi risiko bencana dan perencanaan tata ruang berbasis kerentanan seismik di kawasan wisata berbasis alam seperti Purwosari

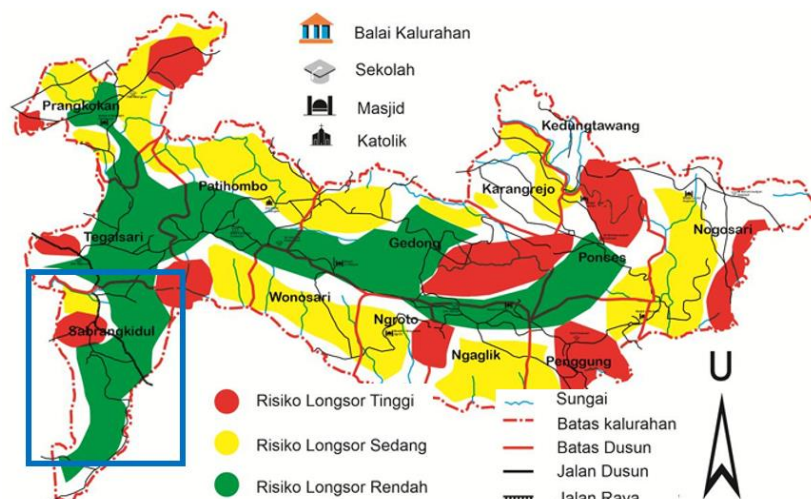
Analisis spasial terhadap peta probabilitas longsor akibat gempa bumi menunjukkan bahwa wilayah Purwosari, khususnya Dusun Sebrangkidul, memiliki variasi tingkat kerawanan yang signifikan terhadap longsor. Beberapa destinasi wisata seperti Ayunan Langit, Goa Kidang Kencono, dan beberapa puncak gunung terletak pada zona dengan probabilitas longsor sedang hingga tinggi, yang menandakan adanya risiko longsor apabila terjadi gempa bumi dengan guncangan kuat. Sebaliknya, lokasi wisata lain seperti Goa Salam, Kopi Menoreh, dan Wisata Hutan Pinus berada pada zona dengan tingkat risiko yang lebih rendah.

Kondisi ini menunjukkan urgensi dalam mengintegrasikan informasi risiko bencana ke dalam

perencanaan dan pengembangan wisata di kawasan tersebut. Pengembangan kawasan wisata di zona risiko tinggi harus mempertimbangkan penerapan langkah mitigasi struktural dan non-struktural, seperti pembangunan dinding penahan lereng, sistem drainase yang baik, dan pemantauan kestabilan lereng secara berkala. Selain itu, pemasangan sistem peringatan dini, rambu informasi bahaya, serta penyediaan jalur evakuasi dan pelatihan tanggap darurat bagi pengelola dan pengunjung sangat dianjurkan untuk meminimalkan dampak jika terjadi bencana.

Untuk menjamin validitas hasil pemodelan, verifikasi data sangat dianjurkan, terutama setelah terjadinya gempa bumi besar yang disertai guncangan tanah signifikan. Catatan pasca gempa bumi Yogyakarta tahun 2006 menunjukkan adanya longsor kecil dan retakan tanah di lereng-lereng perbukitan, khususnya di wilayah Kulon Progo bagian selatan dan barat. Verifikasi tambahan juga dari kejadian longsor tahun 2017 di wilayah Sebrangkidul, yang menimbulkan kerusakan infrastruktur dan isolasi wilayah (Kaltana Purwosari, 2023). Lokasi-lokasi tersebut sebagian besar berada dalam zona probabilitas tinggi hasil pemodelan, sehingga memperkuat validitas model.

Verifikasi spasial juga dilakukan dengan membandingkan hasil pemodelan terhadap peta risiko longsor Kalurahan Purwosari (Kaltana Purwosari, 2023), seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil verifikasi di wilayah yang diberi tanda kotak biru menunjukkan kesesuaian antara zona probabilitas yang lebih tinggi dalam model dengan wilayah risiko longsor yang telah teridentifikasi sebelumnya.



Gambar 6. Peta risiko ancaman tanah longsor Kalurahan Purwosari (Kaltana Purwosari, 2023)

Proses verifikasi ini penting untuk memastikan bahwa estimasi probabilitas longsor yang dihasilkan sesuai dengan kondisi faktual di lapangan, sekaligus menjadi dasar untuk penyempurnaan model. Dengan adanya validasi, model probabilistik dapat terus diperbarui dan disesuaikan agar tetap akurat dan responsif terhadap dinamika geospasial serta karakteristik seismik aktual wilayah studi.

Strategi pengembangan kawasan wisata perlu diarahkan ke zona dengan tingkat risiko rendah sebagai langkah preventif untuk menjamin keselamatan dan keberlanjutan aktivitas wisata. Integrasi peta risiko dalam penataan ruang menjadi dasar penting dalam mendukung pengembangan kawasan yang aman dan adaptif terhadap risiko longsor, khususnya di wilayah Sebrangkidul. Informasi hasil pemodelan probabilitas longsor dapat dimanfaatkan tidak hanya sebagai panduan pengembangan sektor pariwisata, tetapi juga sebagai dasar dalam perumusan kebijakan mitigasi bencana. Strategi mitigasi risiko dapat diterapkan secara lebih tepat sasaran, terutama pada zona dengan tingkat probabilitas tinggi, seperti wilayah tengah serta bagian utara sebelah barat dan timur. Langkah-langkah mitigasi yang direkomendasikan mencakup pengawasan terhadap pembangunan di area lereng curam, penguatan struktur bangunan, dan pelestarian vegetasi penutup lahan untuk menjaga stabilitas lereng. Aktivitas seperti pengundulan hutan akibat alih fungsi lahan atau pembangunan pariwisata perlu dikendalikan karena dapat meningkatkan potensi longsor. Selain itu, peningkatan edukasi kebencanaan dan kesiapsiagaan masyarakat menjadi aspek penting, khususnya di kawasan wisata berbasis alam seperti Purwosari yang rentan terhadap longsor akibat aktivitas seismik.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengkaji probabilitas longsor yang dipicu oleh gempa bumi di wilayah Purwosari, Kabupaten Kulon Progo, melalui integrasi metode HVSR untuk karakterisasi geologi permukaan dan model probabilistik berbasis pendekatan Hamburger *et al.* (2020). Pendekatan ini memungkinkan evaluasi risiko longsor secara lebih menyeluruh dengan mempertimbangkan parameter geofisika dan geospasial.

Metode HVSR memberikan estimasi parameter seismik seperti V_{s30} dan ketebalan tanah (*soil thickness*), yang berperan dalam mengidentifikasi zona amplifikasi gelombang dan kerentanan tanah. Nilai V_{s30} rendah dan akumulasi sedimen tebal

umumnya ditemukan di zona lereng dan kaki lereng, yang memiliki kerentanan tinggi terhadap longsor.

Hasil pemodelan probabilistik menunjukkan bahwa sekitar 56,69% wilayah termasuk kategori risiko rendah hingga sedang, 40,36% sedang hingga tinggi, dan 2,26% berada pada risiko tinggi. Integrasi HVSR dan model probabilistik dapat diterapkan dalam mengidentifikasi probabilitas longsor akibat gempa bumi, dan dapat menjadi dasar bagi strategi mitigasi serta perencanaan tata ruang berbasis kerentanan seismik, khususnya di kawasan wisata alam seperti Purwosari.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelrahman, K., Al-Otaibi, N., Ibrahim, E., & Binsadoon, A. (2021). Landslide susceptibility assessment and its disastrous impact on Makkah Al-Mukarramah urban expansion, Saudi Arabia, using microtremor measurements. *Journal of King Saud University - Science*, 33(5), 101450
- Ayele, A. B., Tura, A. L., Utallo, A. U., & Mekonnen, A. G. (2025). Spatial assessments of landslide hazard vulnerability using decision support system in the Sile-Sago Watershed, Lake Chamo Rift Valley Basin, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 18, 101057
- Aziz, K. N., Ruwanto, B., Suparno, Darmawan, D., & Dwandaru, W. S. B. (2023). Workshop bencana tanah longsor untuk guru-guru IPA sekolah dasar di Kecamatan Samigaluh Kabupaten Kulon Progo. *Jurnal Pengabdian Masyarakat MIPA dan Pendidikan MIPA*, 7(1), 108–116
- BIG - Badan Informasi Geospasial. (2025). DEMNAS (Data Elevasi Nasional). <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/demnas>
- Bird, J. F., & Bommer, J. J. (2004). Earthquake losses due to ground failure. *Engineering Geology*, 75(2), 147–179
- Chiou, B.S.J. & Youngs, R.R. (2014). Update Of the Chiou and Young's NGA Model for The Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3): 1117–1153
- Fang, Z., Morales, A.B., Wang, Y., & Lombardo, L. (2025). Climate change has increased rainfall-induced landslide damages in central China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Vol. 119, 105320

- Fiorucci, M., Martino, S., Della Seta, L., & Lenti, L. (2022). Seismic response of landslides to natural and man-induced ground vibrations: Evidence from the Petacciato coastal slope (central Italy). *Engineering Geology*, 309
- Hidayat, M. N. (2020). Studi material Tanah Longsor Akibat Gempa Lombok 2018. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 235.
- Hosseinzadeh, M., Sohrabi-Bidar, A., Khajevand, R., & Ghaffari, H. (2025). Dynamic response evaluation of landslide to ambient noise using the HVSR method: The case of Golay landslide in North Khorasan Province, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84, 251
- Jaafari, A. (2024). An Overview of Triggering and Causing Factors of Landslides. In: Chatterjee, U., Lalmalsawmzaava, K., Biswas, B., Pal, S.C. (eds) *Landslides in the Himalayan Region*. Disaster Risk Reduction. Springer
- Kaltana Purwosari. (2023). Dokumen Kaurahan Tangguh Bencana Purwosari, Kapanewon Girimulyo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta.
- Litasari, U. C. N., Widiatmaka, Munibah, K., & Machfud. (2022). Mapping the landslide risk in Kulon Progo, Indonesia using GeoTOPSIS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1109, 012059. IOP Publishing
- Liu, P.-H., Wu, J.-H., Lee, D.-H., & Lin, Y.-H. (2023). Detecting landslide vulnerability using anisotropic microtremors and vulnerability index. *Engineering Geology*, 323, 107240
- Marano, K. D., Wald, D. J., & Allen, T. I. (2009). Global earthquake casualties due to secondary effects: a quantitative analysis for improving rapid loss analyses. *Natural Hazards*, 52(2), 319–328
- Molnar, S., Sirohey, A., Assaf, J., & others. (2022). A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSR) method. *Journal of Seismology*, 26, 653–685
- Moore, I. D., R. B. Grayson, and A. R. Ladson (1991), Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrol. Process.*, 5(1), 3–30
- Moro, G. D., & Panza, G. F. (2022). Multiple-peak HVSR curves: Management and statistical assessment. *Engineering Geology*, 297, 106500
- Hamburger, M., Jessee, A. N., Seal, D., Sherrill, E. Estimating the Likelihood and Impact of Seismically Induced Landslides in Near Real-Time. Final Technical Report
- Santie, P. A. W., Wilopo, W., & Faris, F. (2024). Slope stability analysis using electrical resistivity tomography and limit equilibrium method: A case study from Girimulyo, Kulon Progo. *Journal of Applied Geology*, 9(1), 37–50
- Seht, M. I., and Wohlenberg, J. (1999). Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), 250–259
- Syahputri, A., & Sismanto, S. (2020). Identifikasi potensi tanah longsor menggunakan metode mikrotremor di Dusun Tegalsari Desa Ngargosari Kecamatan Samigaluh Kabupaten Kulon Progo. *Jurnal Fisika Indonesia*, 24(2), 66-71
- Vantassel, J. (2024). jpvantassel/hvsrpy: v2.0.0 (v2.0.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12735911>
- Winzeler, M., Baghdadi, N., Walker, J. P., Zribi, M., & Dabas, A. (2022). Mapping Soil Moisture at Regional Scale: Impact of Terrain Indices on Model Performance. *Land*, 11(11), 2018
- Yuliyanto, G., & Yulianto, T. (2023). Microtremor data and HVSR method of geothermal manifestation of Mt. Telomoyo, Central Java, Indonesia. *Data in Brief*, 51, 109721