RESEARCH ARTICLE • OPEN ACCESS

Pemodelan Bahaya Gempa Bumi Deterministik Berbasis Mikrotremor Berdasarkan Skenario Sesar Opak dan Dengkeng: Studi Kasus Kecamatan Depok, Sleman-Yogyakarta

Yuni Dwi Trisnowati dkk.

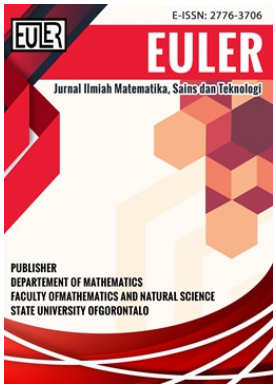
Volume 13, Issue 1, Pages 105–112, April 2025

Diterima 28 Februari 2025, Direvisi 18 April 2025, Disetujui 25 April 2025, Diterbitkan 28 April 2025

To Cite this Article : Y. D. Trisnowati dkk.,"Pemodelan Bahaya Gempa Bumi Deterministik Berbasis Mikrotremor Berdasarkan Skenario Sesar Opak dan Dengkeng: Studi Kasus Kecamatan Depok, Sleman-Yogyakarta", *Euler J. Ilm. Mat. Sains dan Teknol.*, vol. 13, no. 1, pp. 105–112, 2025, *https://doi.org/10.37905/euler.v13i1.31079*

© 2025 by author(s)

JOURNAL INFO • EULER : JURNAL ILMIAH MATEMATIKA, SAINS DAN TEKNOLOGI

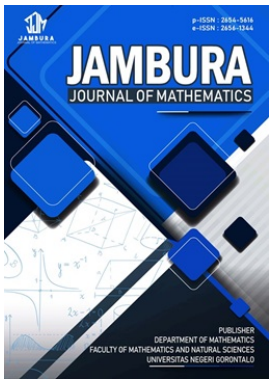


Homepage	:	http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/euler/index
Journal Abbreviation	:	Euler J. Ilm. Mat. Sains dan Teknol.
Frequency	:	Three times a year
Publication Language	:	English (preferable), Indonesia
DOI	:	https://doi.org/10.37905/euler
Online ISSN	:	2776-3706
License	:	Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
Publisher	:	Department of Mathematics, Universitas Negeri Gorontalo
Country	:	Indonesia
OAI Address	:	http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/euler/oai
Google Scholar ID	:	QF_r-_gAAAAJ
Email	:	euler@ung.ac.id

JAMBURA JOURNAL • FIND OUR OTHER JOURNALS



Jambura Journal of Biomathematics



Jambura Journal of Mathematics



Jambura Journal of Mathematics Education



Jambura Journal of Probability and Statistics

Euler : Jurnal Ilmiah Matematika, Sains dan Teknologi, Volume 13, Issue 1, Pages 105–112, April 2025 *https://doi.org/10.37905/euler.v13i1.31079*

Research Article

Check for updates

Pemodelan Bahaya Gempa Bumi Deterministik Berbasis Mikrotremor Berdasarkan Skenario Sesar Opak dan Dengkeng: Studi Kasus Kecamatan Depok, Sleman-Yogyakarta

Yuni Dwi Trisnowati[1,2,*], Yohana Noradika Maharani[2], Arif Rianto Budi Nugroho[2], Sari Bahagiarti Kusumayudha[2], Suharsono[2]

[1]*Stasiun Geofisika Sleman, Yogyakarta, Indonesia*
[2]*Program Studi Magister Manajemen Bencana, UPN Veteran Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia*

ARTICLE HISTORY
Diterima 28 Februari 2025
Direvisi 18 April 2025
Disetujui 25 April 2025
Diterbitkan 28 April 2025

KATA KUNCI
Bahaya Gempa Bumi
DSHA
Mikrotremor

KEYWORDS
Seismic Hazard
DSHA
Microtremor

ABSTRAK. *Kecamatan Depok, dengan jumlah penduduk terbesar di Kabupaten Sleman, merupakan wilayah yang memicu perkembangan ekonomi, sosial, dan budaya. Perkembangan ini semakin meningkatkan risiko gempa bumi, mengingat adanya Sesar Opak dan Dengkeng yang terbukti aktif. Oleh karena itu, analisis bahaya gempa bumi dengan skenario terburuk dari Sesar Opak dan Dengkeng diperlukan sebagai salah satu upaya mitigasi bencana gempa bumi. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan bahaya gempa bumi deterministik berbasis mikrotremor dengan skenario terburuk dari Sesar Opak dan Dengkeng. Pendekatan geofisika digunakan dalam penelitian ini dengan menerapkan metode Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) berdasarkan data pengukuran mikrotremor. Metode HVSR digunakan untuk mengkarakterisasi efek lokal situs yang memengaruhi guncangan gempa bumi di permukaan tanah. Analisis bahaya gempa bumi di permukaan tanah dilakukan menggunakan metode Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA), dengan mempertimbangkan efek lokal situs berdasarkan data pengukuran mikrotremor. Hasil analisis DSHA menunjukkan nilai Peak Ground Acceleration (PGA) yang tinggi, terutama akibat pengaruh Sesar Opak dan Dengkeng, yang mengindikasikan risiko kerusakan yang signifikan. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai masukan dalam perencanaan tata ruang dan manajemen pengurangan risiko bencana, khususnya di Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.*

ABSTRACT. *The Subdistrict of Depok, with the largest population in Sleman Regency, is a region that drives economic, social, and cultural development. This growth further increases the risk of earthquakes, given the presence of the active Opak and Dengkeng Faults. Therefore, an earthquake hazard analysis using the worst-case scenario from the Opak and Dengkeng Faults is necessary for disaster mitigation efforts. This study aims to model deterministic earthquake hazards based on microtremor data using the worst-case scenario from the Opak and Dengkeng Faults. A geophysical approach is employed in this research by applying the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) method based on microtremor measurements. The HVSR method characterizes local site effects that influence ground shaking during an earthquake. The earthquake hazard analysis at the ground surface is conducted using the Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) method, considering local site effects based on microtremor measurement data. The DSHA results indicate high Peak Ground Acceleration (PGA) values, primarily due to the influence of the Opak and Dengkeng Faults, which suggest a significant risk of damage. The findings of this study can serve as input for spatial planning and disaster risk reduction management, particularly in Depok District, Sleman Regency, Special Region of Yogyakarta.*

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonComercial 4.0 International License. Editorial of EULER: Department of Mathematics, Universitas Negeri Gorontalo, Jln. Prof. Dr. Ing. B. J. Habibie, Bone Bolango 96554, Indonesia.

1. Pendahuluan

Daerah Istimewa Yogyakarta terletak di selatan Pulau Jawa dan memiliki tingkat kerawanan tinggi terhadap gempa bumi karena kedekatannya dengan Sesar Opak dan zona subduksi di selatan Jawa [1]. Sepanjang sejarah, wilayah ini mengalami beberapa gempa bumi signifikan, termasuk gempa bumi bermagnitudo 6.3 pada Mei 2006 yang menyebabkan kerugian Rp 29,1 triliun atau 41% dari PDB regional. Dampaknya bahkan melebihi tsunami Aceh 2004 akibat tingginya kepadatan penduduk [2, 3]. Kecamatan Depok di Kabupaten Sleman merupakan salah satu kawasan padat penduduk yang mengalami pertumbuhan pesat dan memegang peran strategis dalam bidang ekonomi, sosial, dan budaya [4]. Dengan luas 35,55 km^2 dan jumlah penduduk 131.517 jiwa [5], wilayah ini memiliki tingkat risiko yang tinggi terhadap guncangan gempa bumi, terutama karena didominasi oleh endapan vulkanik Gunung Merapi. Salah satu faktor penting dalam mitigasi bencana adalah amplifikasi tanah akibat kondisi geologi lokal,

*Penulis Korespondensi.

Email : *yuni.dwi.trisnowati@bmkg.go.id* (Y. D. Trisnowati)
Homepage : http://ejurnal.ung.ac.id/index.php/euler/index / E-ISSN : 2776-3706
© 2025 by the Author(s).

yang dikenal sebagai *local site effect*.

Sesar Opak menjadi perhatian utama pasca gempa bumi 2006 di Yogyakarta. Penelitian menunjukkan bahwa peristiwa tersebut dapat dipicu oleh aktivasi Sesar Opak, sesar lebih tua, atau sesar aktif tak dikenal [3, 6–8]. Selain itu, Sesar Mataram yang berorientasi timur-barat dan diduga sebagai kelanjutan dari Sesar Dengkeng, baru-baru ini diidentifikasi di wilayah Yogyakarta [9, 10]. Aktivitas kegempaan juga tercatat di sekitar Sesar Dengkeng, termasuk sepuluh kejadian gempa bumi selama 2015–2019, yang memperkuat dugaan aktivitas sesar ini [11]. Aktivitas kedua sesar ini perlu menjadi perhatian dalam perencanaan pembangunan berbasis mitigasi bencana.

Analisis bahaya gempa bumi penting dilakukan untuk memahami potensi dampak dari sumber gempa bumi yang relevan. Pendekatan *Deterministic Seismic Hazard Analysis* (DSHA) digunakan untuk memodelkan skenario gempa bumi terburuk berdasarkan sumber gempa bumi terdekat dan paling berpengaruh terhadap suatu wilayah [12–14]. Pendekatan ini mempertimbangkan aspek geologi, tektonik, serta sejarah kegempaan untuk menghasilkan estimasi konservatif. Dalam konteks Kecamatan Depok, DSHA digunakan dengan mempertimbangkan pengaruh efek tapak lokal akibat endapan vulkanik Gunung Merapi, yang dianalisis melalui data mikrotremor.

Analisis bahaya gempa bumi dengan pendekatan DSHA telah diterapkan di berbagai wilayah untuk menilai potensi gempa bumi. Yilong Li mensimulasikan skenario gempa bumi di Sesar Zhujiangkou, yang menunjukkan dampak signifikan pada infrastruktur dan populasi [15]. Padmanabhan dkk. [16] menilai bahaya gempa bumi dengan metode DSHA di Kuil Sree Padmanabhaswamy, dan menekankan perlunya mitigasi gempa bumi selanjutnya. Wang dkk. [17] menerapkan DSHA pada bendungan Xiluodu untuk evaluasi bahaya gempa bumi yang lebih akurat. Penelitian DSHA di Bengkulu menunjukkan variasi PGA yang berpengaruh pada risiko gempa bumi [18]. Ramkrishnan dkk. [19] juga melakukan penelitian DSHA di Himalaya dengan hasil PGA yang menunjukkan risiko gempa bumi yang tinggi. Penelitian di Yogyakarta mengonfirmasi tingkat bahaya gempa bumi tinggi, terutama di Bantul dan sekitar Sesar Opak [1, 20, 21]. Simulasi gempa bumi Bantul 2006 menunjukkan percepatan tanah maksimum 0.398-0.412 g [22]. Di Kecamatan Depok, nilai frekuensi dominan dan amplifikasi tinggi menunjukkan potensi bahaya gempa bumi yang signifikan [23]. Dari berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa pendekatan DSHA terbukti efektif dalam mengidentifikasi tingkat bahaya gempa bumi di berbagai kondisi geologi dan wilayah dengan risiko tinggi. Namun, sebagian besar studi tersebut masih terbatas pada analisis di batuan dasar tanpa mempertimbangkan efek lokal yang dapat memperkuat guncangan di permukaan tanah. Hal ini menegaskan pentingnya pendekatan baru yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan karakteristik lokal melalui data mikrotremor.

Untuk mengisi kekosongan tersebut, penelitian ini memanfaatkan metode *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSR) dari data mikrotremor untuk mengidentifikasi karakteristik tapak lokal. Analisis bahaya gempa bumi dilakukan menggunakan pendekatan DSHA yang memasukkan efek lokal, sehingga dapat memberikan estimasi PGA yang lebih realistis. Fokus tujuan penelitian ini adalah memodelkan bahaya gempa bumi di Kecamatan Depok berdasarkan skenario terburuk dari dua sesar aktif utama, yaitu Sesar Opak dan Sesar Dengkeng. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata terhadap penyusunan kebijakan tata ruang dan strategi mitigasi bencana, serta meningkatkan kesadaran masyarakat mengenai risiko gempa bumi di wilayah padat penduduk seperti Kecamatan Depok.

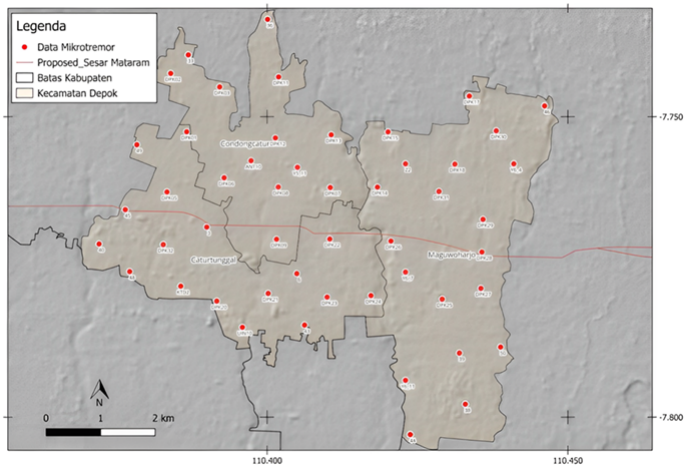
2. Metode

2.1. Lokasi Penelitian

Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman secara geografis terletak pada koordinat $7^0$46'43''LS dan $11^0$023'21''BT dengan ketinggian wilayah rata-rata 140 m. Secara administratif berada di wilayah Kabupaten Sleman yang terdiri dari 3 Kalurahan yaitu Caturtunggal, Maguwoharjo dan Condongcatur, dengan 58 Padukuhan, 256 RW dan 704 RT. Luas Wilayah Kecamatan Depok sekitar 35.5 km^2, berbatasan langsung dengan Kecamatan Ngaglik di sebelah utara, Kecamatan Kalasan di sebelah timur, Kecamatan Gondokusuman dan Kecamatan Banguntapan di sebelah selatan, serta Kecamatan Mlati di sebelah barat.

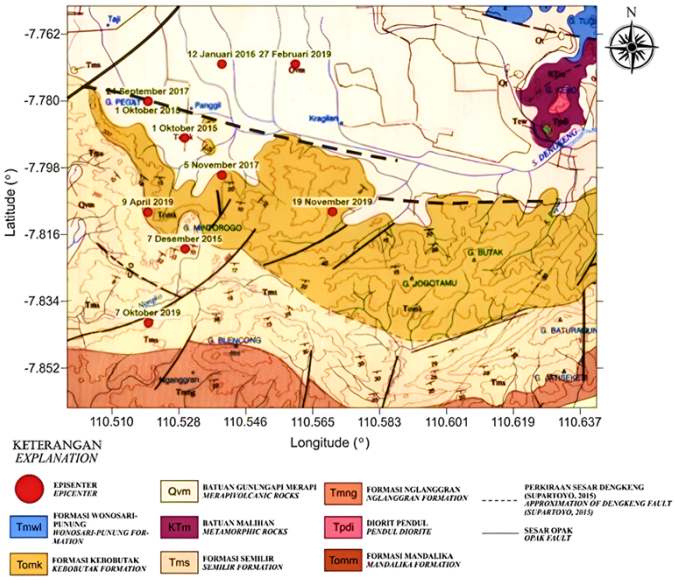
2.2. Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian analisis bahaya gempa bumi di Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman meliputi data skenario terburuk dari Sesar Opak dan Sesar Dengkeng, *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE), dan data pengukuran mikrotremor di 50 titik pengukuran sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Data mikrotremor yang terekam mencakup tiga komponen, yaitu komponen horizontal (timur-barat), komponen horizontal (utara-selatan), dan komponen vertikal. Skenario terburuk Sesar Opak mengacu pada magnitudo maksimum dari Pusgen Mmax 6.6, sedangkan Sesar Dengkeng Mmax 6.0 dengan mempertimbangkan dimensinya.



Gambar 1. Lokasi pengukuran mikrotremor di Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman

Selain itu, data geologi regional dan kegempaan di sekitar Sesar Dengkeng (Gambar 2) digunakan untuk mengidentifikasi kondisi litologi dan struktur geologi yang dapat mempengaruhi respons seismik lokal. Untuk keperluan validasi dan verifikasi hasil pemodelan, digunakan pula data kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30 meter (Vs30) dari USGS [24]. Data Vs30 ini membantu dalam mengevaluasi kesesuaian hasil pemodelan *site* terhadap kondisi sebenarnya di lapangan serta memperkuat analisis bahaya seismik secara keseluruhan.



Gambar 2. Geologi di sekitar Sesar Dengkeng dan kegempaan periode 2015-2019 [11]

2.3. Prosedur Penelitian

2.3.1. Pengolahan Data Mikrotremor

Goncangan gempa bumi di permukaan tanah tidak hanya tergantung pada jarak dengan pusat gempa bumi, tetapi juga bergantung pada kondisi geologi lokal. Fenomena semacam ini dikenal sebagai *local site effect*. Dalam penelitian ini, *local site effect* dikarakterisasi menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) dari data mikrotremor [25–28]. Metode HVSR digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi dominan tanah serta memperkirakan ketebalan lapisan sedimen, sehingga dapat membantu dalam pemetaan kawasan yang berisiko mengalami amplifikasi getaran akibat gempa bumi. dalam penelitian ini, pengolahan HVSR dari data mikrotremor dilakukan dengan memanfaatkan software Geopsy.

2.3.2. Pengolahan Inversi HVSR dan Vs30

Kecepatan gelombang geser (Vs) dapat diperoleh dengan melakukan inversi kurva HVSR [29–31]. Dalam penelitian ini, inversi HVSR dilakukan menggunakan software Dinver, hingga memperoleh profil 1D kecepatan gelombang geser (Vs). Tahapan dalam proses inversi HVSR adalah menyiapkan input data masukan yaitu kurva H/V dan data *initial model* yang berisikan model awal kecepatan gelombang primer (Vp), kecepatan gelombang sekunder (Vs), densitas lapisan (ρ), dan ketebalan lapisan (h). Proses inversi HVSR dilakukan hingga fungsi misfit minimal [32]. Selanjutnya nilai kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30 m (Vs30) diestimasi dengan mengacu pada SNI 1726:2019 [33] sebagaimana ditunjukkan pada pers. (1).

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{V_{si}}}, \tag{1}$$

dimana d_i adalah tebal setiap lapisan antara kedalaman 0 sampai 30 meter; V_{si} adalah kecepatan gelombang geser lapisan i (m/detik), dan $\sum_{i=1}^{n} d_i = 30$ meter. Vs30 merupakan salah satu parameter yang dipertimbangkan untuk memperkirakan goncangan di permukaan tanah akibat gempa bumi. Dengan memahami Vs30, kita dapat lebih baik menilai bahaya gempa bumi di suatu wilayah [34]. Selain Vs30, parameter kedalaman dimana kecepatan gelombang geser 1 km/s (Z1) dan 2,5 km/s (Z2.5) juga dihitung berdasarkan pers. (2) dan pers. (3) [35].

$$\mathrm{LnZ}_{1.0} = \frac{-7.15}{4} \times \ln\left(\frac{V_{s30}^4 + 571^4}{1360^4 + 571^4}\right), \tag{2}$$

$$\mathrm{LnZ}_{2.5} = 7.089 - 1.144 \mathrm{lnV}_{s30}. \tag{3}$$

2.3.3. Penentuan Model *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE)

Penentuan GMPE dalam analisis DSHA dilakukan dengan memilih model empiris yang sesuai dengan karakteristik sumber gempa bumi dan kondisi regional. Dalam penelitian ini, digunakan model GMPE Chiou & Youngs [35] yang dikembangkan untuk gempa bumi dangkal pada kerak bumi (*shallow crustal earthquakes*). Model ini mempertimbangkan berbagai parameter seperti magnitudo, jarak ke sumber gempa bumi, kondisi geologi lokal, serta efek arah dan amplifikasi situs. Dibandingkan dengan GMPE lain yang umum digunakan di Indonesia, seperti Boore & Atkinson [36] atau Zhao dkk. [37], model Chiou & Youngs [35] memiliki keunggulan dalam menangani efek nonlinier dari kondisi situs dan koreksi arah sumber (*directivity*) yang lebih eksplisit. Selain itu, model ini telah banyak digunakan dalam studi seismik global dan regional dengan kondisi tektonik serupa, sehingga memberikan kepercayaan lebih terhadap akurasinya dalam memperkirakan percepatan tanah puncak (PGA) dan respons spektral. Oleh karena itu, pemilihan GMPE ini dinilai paling sesuai dengan karakteristik tektonik wilayah studi dan tujuan analisis bahaya gempa bumi secara deterministik.

2.3.4. Pengolahan *Deterministic Seismic Hazard Analysis* (DSHA)

Analisis bahaya gempa bumi di permukaan tanah dilakukan menggunakan metode DSHA. DSHA, juga dikenal sebagai analisis berbasis skenario, melibatkan identifikasi dan evaluasi skenario potensi gempa bumi berdasarkan parameter patahan tertentu. Beberapa upaya untuk analisis bahaya gempa bumi di berbagai belahan dunia telah dilakukan dengan menggunakan pendekatan DSHA [38–41]. Langkah-langkah dasar yang terlibat dalam proses DSHA dikelompokkan menjadi empat tahapan [42]. Langkah pertama dalam pendekatan DSHA adalah identifikasi sumber gempa bumi. Dalam hal ini dilakukan dengan menganalisis dan mengidentifikasi patahan aktif atau sumber gempa bumi yang mampu menimbulkan gempa bumi signifikan di Kecamatan Depok. Hal ini melibatkan penyelidikan geologi dan seismologi untuk menentukan karakteristik patahan, sejarah kegempaan, dan aktivitas tektonik. Dalam penelitian ini, Sesar Opak dan Sesar Dengkeng dipilih mengingat kedua sesar tersebut terbukti aktif, dan memiliki jarak terdekat dengan Kecamatan Depok. Langkah kedua, dengan mengkarakterisasi sumber gempa bumi. Parameter seperti magnitudo gempa bumi, kedalaman fokus, panjang patahan, dan geometri patahan ditentukan untuk setiap sumber gempa bumi yang teridentifikasi. Parameter ini membantu dalam memodelkan potensi intensitas goncangan tanah akibat pecahnya segmen sesar tertentu. Langkah ketiga menentukan model GMPE. Analisis dilakukan untuk memperkirakan percepatan maksimum tanah (PGA), dan intensitas gempa bumi di berbagai lokasi

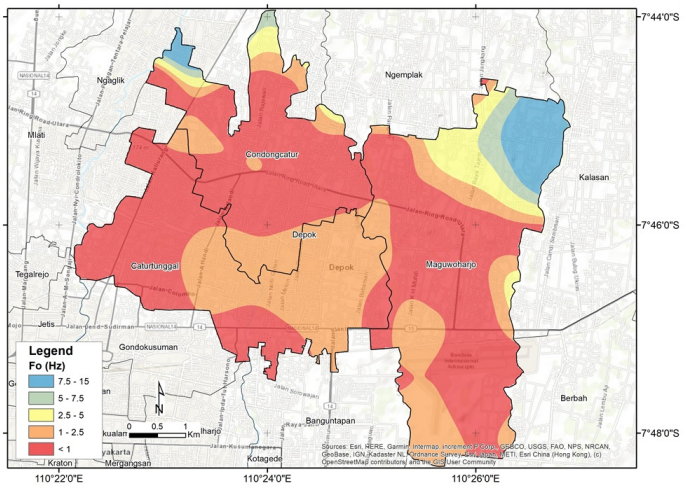
berdasarkan skenario gempa bumi yang ditentukan. Langkah keempat dengan menghitung dan memetakan bahaya gempa bumi di permukaan tanah. Parameter pergerakan tanah yang dihitung kemudian direpresentasikan secara spasial melalui peta bahaya gempa bumi, yang menggambarkan distribusi bahaya gempa bumi di wilayah yang diteliti.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Data Mikrotremor

Analisis data mikrotremor dalam penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik bawah permukaan melalui penentuan frekuensi dominan (frekuensi resonansi) pada setiap lokasi pengukuran. Informasi ini penting untuk memahami kondisi dinamika tanah yang berkaitan dengan potensi bahaya seismik di wilayah studi. Pengukuran dilakukan di 50 titik yang tersebar di Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Metode ini menganalisis perbandingan spektrum komponen horizontal dan vertikal dari gelombang mikrotremor guna memperoleh frekuensi dominan di masing-masing titik. Hasil analisis menunjukkan nilai frekuensi dominan berkisar antara 0.56 hingga 12.1 Hz, yang mencerminkan variasi kondisi geologi dan geoteknik di wilayah tersebut di wilayah tersebut.

Variasi spasial dalam distribusi frekuensi dominan di wilayah penelitian diperlihatkan pada Gambar 3. Peta ini mengilustrasikan bagaimana frekuensi dominan bervariasi dari satu titik ke titik lainnya, yang mengindikasikan perbedaan karakteristik tanah dan lapisan bawah permukaan. Data yang diperoleh mengindikasikan adanya perbedaan karakteristik tanah yang dapat mempengaruhi potensi kerentanan gempa bumi di wilayah tersebut. Tanah dengan frekuensi dominan yang lebih rendah biasanya menunjukkan lapisan yang lebih tebal atau material yang lebih lunak, yang lebih rentan terhadap amplifikasi getaran gempa bumi.

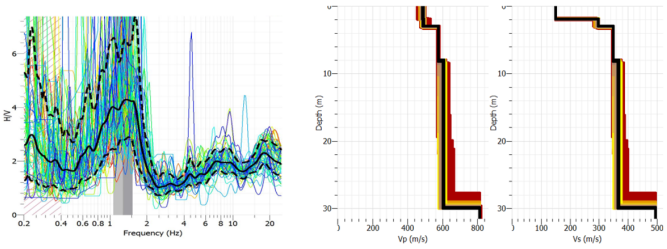


Gambar 3. Variasi nilai frekuensi dominan di Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman

Pemahaman karakteristik dinamis tanah sangat penting untuk menentukan respon tanah terhadap gempa bumi. Terdapat beberapa klasifikasi *efek site* yang didasarkan pada berbagai parameter dinamis tanah, seperti frekuensi, periode, ketebalan aluvial, dan kecepatan gelombang geser (Vs). Panah dkk. [43] memperkenalkan klasifikasi berdasarkan metode HVSR. Klasifikasi tersebut menggunakan frekuensi fundamental sebagai faktor utama. Berdasarkan klasifikasi tersebut, wilayah penelitian didominasi oleh *soft soil* yang terdiri dari tanah liat lunak tebal atau tanah liat berpasir berlumpur. Sebagian besar wilayah ini merupakan dataran aluvial, yang cenderung memiliki karakteristik dinamis tanah yang rentan terhadap amplifikasi getaran gempa bumi. Karakteristik ini menunjukkan bahwa wilayah ini memiliki lapisan tanah yang tebal dan lembut, yang dapat memperkuat getaran gempa bumi dan meningkatkan risiko kerusakan infrastruktur. Daerah utara wilayah penelitian terdiri dari *moderate soft soil*, yang memiliki kondisi geologi material halus yang diselingi oleh material kasar. Di daerah ini, teras aluvium dengan sementasi yang lemah menjadi ciri khas geologi, menunjukkan bahwa meskipun tanahnya lebih stabil dibandingkan dengan tanah lunak, masih terdapat risiko amplifikasi gempa bumi yang harus diperhatikan. Selain itu, ada juga daerah yang terdiri dari *stiff soil*, yang memiliki kondisi geologi teras aluvium tua yang tebal atau tanah koluvium dengan tingkat sementasi yang medium hingga baik. Tanah ini cenderung lebih stabil dan memiliki risiko amplifikasi getaran gempa bumi yang lebih rendah dibandingkan dengan *soft soil* dan *moderate soft soil*. Namun, meskipun lebih stabil, *stiff soil* masih memerlukan perhatian dalam desain dan konstruksi bangunan untuk memastikan ketahanan terhadap gempa bumi.

3.2. Analisis Hasil Inversi HVSR

Analisis hasil inversi HVSR dalam penelitian ini dilakukan untuk memperoleh informasi struktur bawah permukaan berupa profil kecepatan gelombang geser (Vs) satu dimensi (1D), yang berperan penting dalam evaluasi kerentanan seismik dan karakterisasi dinamika tanah. Inversi dilakukan terhadap kurva HVSR yang diperoleh dari data mikrotremor, dengan menggunakan pendekatan *forward modeling* dan pencocokan kurva teoritis terhadap kurva observasi. Melalui proses ini, diperoleh model Vs terhadap kedalaman pada masing-masing titik pengukuran. Gambar 4 menampilkan hasil inversi HVSR di titik pengukuran 18.



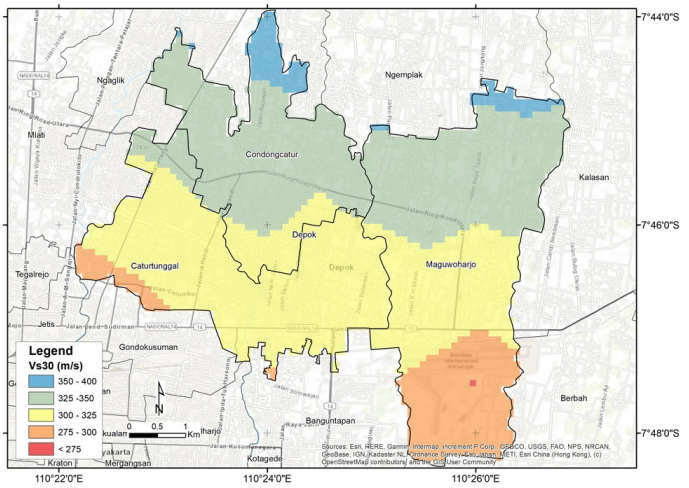
Gambar 4. Hasil pengolahan HVSR dan inversinya di titik pengukuran 18

Hasil inversi HVSR menunjukkan bagaimana kecepatan gelombang geser bervariasi dari permukaan hingga kedalaman tertentu, yang penting untuk penilaian risiko gempa bumi dan perencanaan mitigasi bencana. Profil Vs membantu dalam memahami karakteristik dinamis tanah, seperti kekakuan dan kekuatan, yang mempengaruhi bagaimana tanah akan merespon terhadap getaran gempa bumi. Nilai Vs yang rendah pada lapisan atas mengindikasikan keberadaan lapisan sedimen lunak, sedangkan peningkatan Vs pada kedalaman mencerminkan lapisan yang lebih padat atau batuan dasar. Informasi ini sangat berguna dalam menilai respons seismik lokal serta menjadi dasar untuk peren-

canaan mitigasi bencana gempa bumi di wilayah studi.

3.3. Analisis Vs30

Analisis Vs30 dilakukan untuk mengkarakterisasi kondisi tanah berdasarkan kecepatan gelombang geser, yang merupakan parameter penting dalam penilaian bahaya gempa bumi. Nilai Vs30 diperoleh dari hasil profil 1D kecepatan gelombang geser yang diestimasi melalui pemodelan data hasil inversi HVSR. Proses ini menghasilkan distribusi kecepatan gelombang geser dari permukaan hingga kedalaman 30 meter, yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai Vs30 menggunakan pers. (1) di setiap titik pengamatan. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai Vs30 di wilayah penelitian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



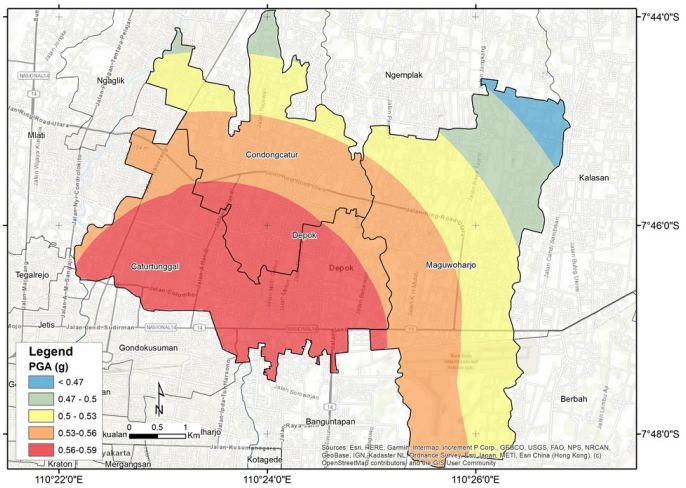
Gambar 5. Variasi nilai Vs30 di Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman

Nilai Vs30 yang relatif lebih rendah dominan berada di Kalurahan Caturtunggal dan bagian selatan Maguwoharjo. Kondisi ini menunjukkan bahwa daerah-daerah tersebut memiliki tanah yang lebih lunak dan lebih rentan terhadap amplifikasi getaran gempa bumi, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan dan desain bangunan untuk memastikan ketahanannya terhadap gempa bumi. Sebaliknya, Kalurahan Condongcatur dan bagian utara Maguwoharjo memiliki nilai Vs30 yang relatif lebih tinggi, menunjukkan bahwa tanah di daerah-daerah tersebut lebih kaku dan stabil, sehingga memiliki risiko amplifikasi gempa bumi yang lebih rendah. Hasil pengolahan Vs30 dalam penelitian ini menunjukkan korelasi yang baik dengan data Vs30 USGS [24], dengan pola sebaran yang serupa. Perbedaan kecil pada beberapa titik kemungkinan disebabkan oleh variasi geologi lokal dan perbedaan resolusi data. Secara keseluruhan, hasil ini mendukung keandalan data Vs30 untuk analisis seismik di wilayah penelitian.

Nilai Vs30 merupakan faktor penting dalam *local site effect* dan dapat digunakan untuk memperkirakan efek basin berupa nilai Z1 dan Z2.5. Parameter Z1 adalah kedalaman di mana kecepatan gelombang geser mencapai 1,0 km/s, sementara Z2.5 adalah kedalaman di mana kecepatan gelombang geser mencapai 2,5 km/s, yang diperkirakan menggunakan pers. (2) dan pers. (3). Kedua parameter ini memberikan informasi tambahan tentang karakteristik basin sedimen yang dapat mempengaruhi amplifikasi gempa bumi. Basin yang lebih dalam dengan nilai Z1 dan Z2.5 yang besar cenderung memiliki potensi amplifikasi yang lebih tinggi karena gelombang gempa bumi dapat terperangkap dan diperkuat dalam lapisan sedimen yang tebal.

3.4. Analisis DSHA Sesar Opak

Analisis DSHA diterapkan untuk memperkirakan dampak potensial dari gempa bumi yang bersumber dari Sesar Opak, khususnya dalam skenario terburuk. Analisis ini dilakukan untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat bahaya gempa bumi di permukaan tanah, guna mendukung perencanaan mitigasi risiko di wilayah terdampak. Proses analisis didasarkan pada skenario gempa bumi dengan magnitudo maksimum moment (Mw) 6.6, yang dianggap sebagai nilai tertinggi yang realistis berdasarkan data geologi dan rekaman kejadian seismik di masa lalu. Untuk menghitung PGA, digunakan model GMPE CY-14 NGA. Berdasarkan model GMPE CY-14 NGA [35] yang diterapkan, percepatan tanah maksimum di permukaan (PGA) di Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman mencapai 0.59 g, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

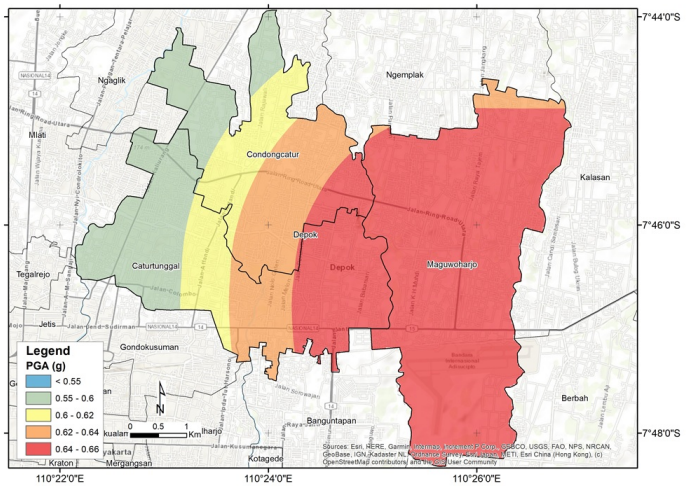


Gambar 6. Nilai PGA hasil DSHA dengan skenario terburuk gempa bumi dari Sesar Opak

Nilai ini menunjukkan tingkat getaran tanah yang cukup tinggi, yang dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada bangunan dan infrastruktur. Wilayah tersebut sangat rentan terhadap kerusakan struktural, terutama pada bangunan yang tidak dirancang atau diperkuat untuk tahan gempa bumi. Getaran ini dapat mengakibatkan retakan pada dinding, keruntuhan sebagian atau total bangunan, serta kerusakan pada infrastruktur penting seperti jalan, jembatan, dan utilitas publik. Getaran dengan intensitas seperti ini memiliki potensi untuk menyebabkan kerusakan besar, terutama pada bangunan yang lebih tua atau tidak memenuhi standar bangunan tahan gempa bumi. Di wilayah yang tercatat memiliki PGA tertinggi, yakni di Kalurahan Caturtunggal, risiko kerusakan lebih tinggi dan memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan mitigasi dan penanggulangan bencana. Sementara itu, nilai PGA menurun ke arah utara, dengan PGA terkecil tercatat di utara Kalurahan Condongcatur dan Maguwoharjo. Meskipun nilai PGA di area tersebut lebih rendah, tetap ada risiko kerusakan, terutama pada struktur yang lebih rentan.

Hasil DSHA menunjukkan bahwa nilai PGA di permukaan tanah di Kecamatan Depok lebih tinggi dibanding estimasi pa-

da Peta Zonasi Gempa Nasional 2017 yang berkisar antara 0,35–0,45 g di batuan dasar. Perbedaan ini disebabkan oleh penggunaan skenario gempa bumi maksimum dan model GMPE CY-14 yang mempertimbangkan efek amplifikasi tanah lokal. Temuan ini menunjukkan bahwa tingkat bahaya seismik di beberapa zona lebih tinggi dari yang tercermin dalam peta nasional, sehingga mendukung perlunya peta mikrozonasi dan kebijakan mitigasi yang berbasis kondisi lokal. Di area dengan PGA tinggi, diperlukan langkah-langkah perkuatan bangunan dan peningkatan standar konstruksi yang lebih ketat. Selain itu, penting juga untuk melakukan evaluasi dan perkuatan pada infrastruktur eksisting guna mengurangi potensi kerusakan dan memastikan keberlanjutan fungsi-fungsi penting selama dan setelah gempa bumi terjadi. Pendekatan mitigasi yang komprehensif juga harus mencakup edukasi masyarakat mengenai langkah-langkah keselamatan selama gempa bumi, peningkatan kesadaran akan risiko gempa bumi, serta pengembangan rencana evakuasi yang efektif.



Gambar 7. Nilai PGA hasil DSHA dengan skenario terburuk gempa bumi dari Sesar Dengkeng

3.5. Analisis DSHA Sesar Dengkeng

Analisis DSHA terhadap Sesar Dengkeng dilakukan untuk mengevaluasi potensi bahaya gempa bumi yang berasal dari sesar tersebut. Proses analisis ini melibatkan pengumpulan data geologi dan seismologi untuk mengidentifikasi karakteristik sesar, termasuk dimensinya, mekanisme pergerakan, dan bukti aktivitas tektonik terkini. Selain itu, dilakukan peninjauan terhadap catatan sejarah kegempaan dan model seismotektonik regional. Sesar Dengkeng, bersama dengan sesar lainnya seperti Sesar Opak, merupakan bagian dari jaringan sesar yang kompleks di daerah Yogyakarta dan sekitarnya. Aktivitas kegempaan yang tersebar di sekitar Sesar Dengkeng, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 dapat merepresentasikan zona pelepasan energi seismik yang potensial. Wilayah di sepanjang dan sekitar sesar patut mendapatkan perhatian khusus dalam upaya mitigasi bencana gempa bumi. Aktivitas sesar ini dapat menimbulkan gempa bumi yang cukup signifikan mengingat wilayah ini berada di zona tektonik yang aktif. Studi geologi dan seismologi telah mengonfirmasi bahwa Sesar Dengkeng masih menunjukkan aktivitas, sehingga potensi gempa bumi dari sesar ini tetap ada. Hasil DSHA di Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman berdasarkan skenario terburuk dari Sesar Dengkeng, dengan magnitudo Mw 6.0 ditunjukkan pada Gambar 7.

Nilai PGA tertinggi tercatat di bagian selatan Kalurahan Maguwoharjo. Nilai PGA menurun ke arah barat, dengan nilai PGA terkecil ditemukan di daerah barat Kalurahan Caturtunggal dan Condongcatur. Nilai PGA di permukaan tanah mencapai 0.66 g, lebih tinggi dibanding skenario dari Sesar Opak. Tingginya nilai PGA tersebut disebabkan oleh jarak Kecamatan Depok yang lebih dekat ke sumber gempa bumi dari Sesar Dengkeng. Angka ini mengindikasikan potensi kerusakan yang signifikan pada struktur bangunan, terutama jika bangunan tidak didesain untuk menahan percepatan sebesar itu. Dekatnya jarak Kecamatan Depok ke Sesar Dengkeng dibandingkan dengan Sesar Opak membuat dampak gempa bumi lebih terasa di wilayah ini. Kedekatan ke sumber gempa bumi sangat mempengaruhi besarnya percepatan tanah yang dirasakan. Nilai PGA yang tinggi menggarisbawahi pentingnya desain bangunan yang tahan gempa bumi dan kesiapan masyarakat dalam menghadapi gempa bumi. Infrastruktur dan bangunan di Kecamatan Depok perlu diperkuat untuk mengurangi risiko kerusakan dan korban jiwa. Meski Sesar Opak juga merupakan ancaman, analisis ini menunjukkan bahwa Sesar Dengkeng juga memberikan risiko yang tinggi untuk wilayah Kecamatan Depok, sehingga prioritas mitigasi mungkin perlu disesuaikan.

Berdasarkan analisis DSHA dengan skenario terburuk dari Sesar Opak dan Sesar Dengkeng, kewaspadaan dan mitigasi bencana di daerah yang berdekatan dengan sesar aktif sangat penting untuk dilakukan. Sesar Opak dan Sesar Dengkeng merupakan sesar aktif yang memiliki potensi untuk menimbulkan gempa bumi yang signifikan, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam upaya pengurangan risiko bencana. Pemantauan aktivitas gempa bumi secara *real-time* sangat penting untuk memberikan peringatan dini bagi masyarakat. Penelitian lanjutan mengenai karakteristik sesar, sejarah gempa bumi, studi geologi dan geofisika untuk memahami lebih dalam mengenai dinamika sesar Opak dan Dengkeng sangat diperlukan. Masyarakat di sekitar wilayah sesar harus diberikan edukasi tentang tindakan darurat yang harus dilakukan saat terjadi gempa bumi. Pelatihan ini bisa meliputi simulasi evakuasi, penggunaan peralatan darurat, dan pemahaman mengenai jalur evakuasi yang aman. Bangunan dan infrastruktur harus dibangun sesuai dengan standar tahan gempa bumi. Pemerintah harus memiliki rencana tanggap darurat yang jelas dan terstruktur, termasuk koordinasi antara berbagai pihak. Ke depan, model ini juga dapat dipertimbangkan untuk dikembangkan menjadi platform *early warning* sederhana berbasis skenario deterministik, yang dapat digunakan oleh BPBD lokal untuk mendukung pengambilan keputusan cepat dalam situasi darurat.

4. Kesimpulan

Penelitian ini memodelkan bahaya gempa bumi deterministik berbasis mikrotremor dengan skenario terburuk dari Sesar Opak dan Sesar Dengkeng. Analisis data mikrotremor menggunakan metode HVSR menunjukkan variasi frekuensi dominan dari 0.56 hingga 12.1 Hz, yang mencerminkan karakteristik tanah heterogen di Kecamatan Depok. Inversi HVSR menghasilkan profil kecepatan gelombang geser (Vs) yang memberikan wawasan tentang dinamika tanah dan risiko amplifikasi gempa bumi. Nilai Vs30 berkisar antara 282 hingga 384 m/s, dengan daerah yang

lebih lunak berada di Kalurahan Caturtunggal dan bagian selatan Maguwoharjo, yang lebih rentan terhadap amplifikasi getaran gempa bumi. Skenario gempa bumi dari Sesar Opak dengan magnitudo Mw 6.6 menghasilkan PGA hingga 0.59 g, sementara skenario dari Sesar Dengkeng dengan magnitudo Mw 6.0 menunjukkan PGA lebih tinggi hingga 0.66 g, yang meningkatkan risiko kerusakan struktural. Hasil ini dapat digunakan dalam perencanaan ruang berbasis risiko gempa bumi. Temuan ini menekankan pentingnya penguatan upaya mitigasi bencana melalui pemantauan seismik *real-time*, edukasi masyarakat, peningkatan standar konstruksi, serta rencana tanggap darurat yang efektif. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar perencanaan tata ruang berbasis risiko gempa bumi, guna mendukung pembangunan yang lebih aman dan berkelanjutan. Selain itu, pemetaan karakteristik risiko gempa bumi di masing-masing wilayah juga dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap potensi bahaya gempa bumi di wilayah ini.

Kontribusi Penulis. **Yuni Dwi Trisnowati**: Konseptualisasi, metodologi, perangkat lunak, validasi, analisis formal, penulisan—penyiapan draft awal. **Yohana Noradika Maharani, Arif Rianto Budi Nugroho**: Supervisi, penulisan—tinjauan dan penyuntingan. **Sari Bahagiarti Kusumayudha, Suharsono**: Supervisi. Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi manuskrip yang diterbitkan.

Ucapan Terima Kasih. Para penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini dan dalam penyusunan manuskrip. Kami sangat menghargai editor dan reviewer atas masukan serta dukungannya dalam menyempurnakan karya ini.

Pembiayaan. Penelitian ini tidak menerima pendanaan dari pihak eksternal.

Konflik Kepentingan. Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan yang terkait dengan artikel ini.

Referensi

[1] W. Partono, R. Nazir, F. Kistiani, and U. C. Sari, "Seismic Microzonation of Yogyakarta Province Based on 2019 Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake," *Lecture Notes in Civil Engineering, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*, pp. 489–497, 2023, doi: 10.1007/978-981-16-9348-9_43.

[2] V. Librian dkk., "Detailed seismic structure beneath the earthquake zone of Yogyakarta 2006 (Mw 6.4), Indonesia, from local earthquake tomography," *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, pp. 107170, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.pepi.2024.107170.

[3] L. Setijadji, B. Koichiro Fukuoka, C. Sachio Ehara, and D. Koichiro Watanabe, "Geology of Yogyakarta earthquakes 2006 (central Java, Indonesia): Current understanding based on integration of research outputs in geology, geophysics and remote sensing," 2007.

[4] B. Setyorini, "Analisis Kepadatan Penduduk Dan Proyeksi Kebutuhan Permukiman Kecamatan Depok Sleman Tahun 2010 – 2015," 2012.

[5] BPS, "Kabupaten Sleman Dalam Angka," 2023.

[6] T. R. Walter dkk., "The 26 May 2006 magnitude 6.4 Yogyakarta earthquake south of Mt. Merapi volcano: Did lahar deposits amplify ground shaking and thus lead to the disaster?," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 9, no. 5, May 2008, doi: 10.1029/2007GC001810.

[7] C. Pratama dkk., "A possible opak fault segment that caused the 2006 mw 6.3 yogyakarta earthquake and its future implication," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Mar. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/683/1/012059.

[8] N. Widjajanti dkk., "Present-day crustal deformation revealed active tectonics in Yogyakarta, Indonesia inferred from GPS observations," *Geod Geodyn*, vol. 11, no. 2, pp. 135–142, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.geog.2020.02.001.

[9] M. R. Daryono, A. Pamumpuni, D. D. Wardhana, and D. H. Natawidjaja, "Mataram Fault - New Active Fault Crosses East-West in the Centre of Yogyakarta City," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1227/1/012003.

[10] Natawidjadja, *Riset Sesar Aktif Indonesia dan Peranannya Dalam Mitigasi Bencana Gempa Dan Tsunami*, 2021.

[11] D. Darmawan dkk., "Microtremors Measurement Around Dengkeng Fault Line in Central Java," 2021.

[12] N. Afsari, M. S. Abdipour, and F. Taghizadeh-Farahmand, "Seismic Hazard Analysis from Deterministic Method Using Fuzzy Logic in Anzali Port," *Earth Sci Inform*, vol. 15, no. 1, pp. 563–572, Mar. 2022, doi: 10.1007/s12145-021-00742-y.

[13] R. Ramkrishnan, S. Kolathayar, and T. G. Sitharam, "Deterministic seismic hazard analysis of north and central Himalayas using region-specific ground motion prediction equations," *Journal of Earth System Science*, vol. 130, no. 4, Dec. 2021, doi: 10.1007/s12040-021-01728-6.

[14] S. Kolathayar and T. G. Sitharam, *Earthquake Hazard Assessment*, 2018.

[15] Y. Li dkk., "The physics-based deterministic scenarios for earthquake hazards and losses of the Zhujiangkou fault in southern China," *npj Natural Hazards*, vol. 2, no. 1, p. 6, Jan. 2025, doi: 10.1038/s44304-024-00054-3.

[16] M. P. H. Padmanabhan, R. Siddhardha, S. Kolathayar, R. Hegde, and B. M. Praveen, "Deterministic Seismic Hazard Analysis of Sree Padmanabhaswamy Temple, Kerala State," *Indian Geotechnical Journal*, 2024, doi: 10.1007/s40098-024-00960-3.

[17] X. C. Wang, J. T. Wang, and C. H. Zhang, "Deterministic full-scenario analysis for maximum credible earthquake hazards," *Nat Commun*, vol. 14, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-42410-3.

[18] L. Z. Mase, "Seismic Hazard Vulnerability of Bengkulu City, Indonesia, Based on Deterministic Seismic Hazard Analysis," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 38, no. 5, pp. 5433–5455, Oct. 2020, doi: 10.1007/s10706-020-01375-6.

[19] R. Ramkrishnan, S. Kolathayar, and T. G. Sitharam, "Deterministic seismic hazard analysis of north and central Himalayas using region-specific ground motion prediction equations," *Journal of Earth System Science*, vol. 130, no. 4, Dec. 2021, doi: 10.1007/s12040-021-01728-6.

[20] B. N. Zega, Z. Zulfakriza, S. Rosalia, and N. T. Puspito, "Seismic Hazard Potential in Yogyakarta Based on HVSR Curve Estimation," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1047/1/012028.

[21] A. Zakia, "Analisis Bahaya Kegempaan Di Wilayah Yogyakarta Menggunakan Pendekatan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (Psha)," Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, Malang, 2022.

[22] W. Pawirodikromo, "Ground Motions, Site Amplification and Building Damage at Near Source of the 2006 Yogyakarta, Indonesia Earthquake," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 40, no. 12, pp. 5781–5798, Dec. 2022, doi: 10.1007/s10706-022-02249-9.

[23] W. Raharjo, I. R. Palupi, N. B. Wibowo, V. D. Supriyono, and A. P. Setiahadiwibowo, "Microseismic research using coherence and cross-correlation in Depok, Sleman, Yogyakarta," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/212/1/012009.

[24] D. C. Heath, D. J. Wald, C. B. Worden, E. M. Thompson, and G. M. Smoczyk, "A global hybrid VS30 map with a topographic slope–based default and regional map insets," *Earthquake Spectra*, vol. 36, no. 3, pp. 1570–1584, Aug. 2020, doi: 10.1177/8755293020911137.

[25] Y. Nakamura, "Seismic Vulnerability Indices For Ground And Structures Using Microtremor," in *World Congress on Railway Research*, Florence, Italy, 1997.

[26] Y. Nakamura, "On The H/V Spectrum," in *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.

[27] Y. Nakamura, J. Saita, and T. Sato, "Applications to World Heritage Sites," 2009.

[28] Y. Nakamura, T. Sato, and M. Nishinaga, "Local Site Effect Of Kobe Based On Microtremor Measurement," in *Proc. of the 6th Int. Conf. on Seismic Zonation (6ISCZ)*, EERI, 2000.

[29] J. F. Borges dkk., "Inversion of ambient seismic noise HVSR to evaluate velocity and structural models of the Lower Tagus Basin, Portugal," *J Seismol*, vol. 20, no. 3, pp. 875–887, Jul. 2016, doi: 10.1007/s10950-016-9564-x.

[30] S. Maghami, A. Sohrabi-Bidar, S. Bignardi, A. Zarean, and M. Kamalian, "Extracting the shear wave velocity structure of deep alluviums of 'Qom' Basin (Iran) employing HVSR inversion of microtremor recordings," *J Appl Geophy*, vol. 185, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jappgeo.2020.104246.

[31] R. Xu and L. Wang, "The horizontal-to-vertical spectral ratio and its applications," *EURASIP J Adv Signal Process*, vol. 2021, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s13634-021-00765-z.

[32] S. Bignardi, A. Mantovani, and N. Abu Zeid, "OpenHVSR: Imaging the

subsurface 2D/3D elastic properties through multiple HVSR modeling and inversion," *Comput Geosci*, vol. 93, pp. 103–113, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.cageo.2016.05.009.

[33] BSN, "SNI 1726:2019. Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung," Badan Standardisasi Nasional, 2019.

[34] F. Ghione, A. Köhler, A. M. Dichiarante, I. Aarnes, and V. Oye, "Vs30 and depth to bedrock estimates from integrating HVSR measurements and geology-slope approach in the Oslo area, Norway," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/feart.2023.1242679.

[35] B. S. J. Chiou and R. R. Youngs, "Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra," *Earthquake Spectra*, vol. 30, no. 3, pp. 1117–1153, Aug. 2014, doi: 10.1193/072813EQS219M.

[36] D. M. Boore and G. M. Atkinson, "Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s," *Earthquake Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 99–138, 2008, doi: 10.1193/1.2830434.

[37] J. X. Zhao *dkk.*, "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, no. 3, pp. 898–913, Jun. 2006, doi: 10.1785/0120050122.

[38] F. Bellalem dkk., "Seismic risk assessment for the downtown of the city of Blida, Algeria," *Int J Disaster Risk Reduct*, vol. 103, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ijdrr.2024.104314.

[39] F. A. Kinasih, N. Miladan, and K. Kusumastuti, "Kajian risiko bencana gempa bumi akibat aktivitas Sesar Lembang di Kabupaten Bandung Barat," *Region: Jurnal Pembangunan Wilayah dan Perencanaan Partisipatif*, vol. 18, no. 2, p. 357, Jul. 2023, doi: 10.20961/region.v18i2.57232.

[40] S. Koesuma, A. Z. Shidqi, and B. Sunardi, "Hazard analysis of earthquake in Pleret, Bantul Regency, Yogyakarta Special Region based on microtremor data," in *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1314/1/012077.

[41] N. K. Ricky and M. B. Basyid, "Pemetaan Potensi Kerawanan Bencana Gempa Bumi Akibat Sesar Lembang di Kawasan Kabupaten Bandung Barat," in *Seminar Nasional dan Diseminasi Tugas Akhir*, 2021.

[42] S. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.

[43] A. K. Panah, H. Moghaddas, M. R. Ghayamghamian, M. Motosaka, M. K. Jafari, and A. Uromieh, "Site Effect Classification in East-Central of Iran," *J. Seismol. Earthq. Eng.*, vol. 4, no. 1, p. 37, 2002.