

Pemodelan *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan Intensitas Gempabumi berdasarkan Pengukuran Mikrotremor pada Kawasan Longsor di Desa Kalongan, Ungaran Timur

Nugroho Budi Wibowo^{1,*}, Thaqibul Fikri Niyartama², Andi², Erlina Widyaningrum², Rena Septiana², Ahdian Azri Bustari², Iktifal Ajie Arif²

¹Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Stasiun Geofisika Sleman
Jl. Wates Km 8 Jitengan Balecatour Gamping, Sleman

²Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga
Jl. Laksda Adisucipto, Catur Tunggal, Depok, Sleman

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 18 Agustus 2023
Direvisi: 18 September 2023
Diterima: 19 Desember 2023

Kata kunci:

Intensitas Gempa Bumi
Mikrotremor
Peak Ground Acceleration (PGA)
Tanah Longsor

Keywords:

Earthquake Intensity
Microtremor
Peak Ground Acceleration (PGA)
Landslide

Penulis Korespondensi:

Nugroho Budi Wibowo
Email:
nugrohobudiwibowo@gmail.com

ABSTRAK

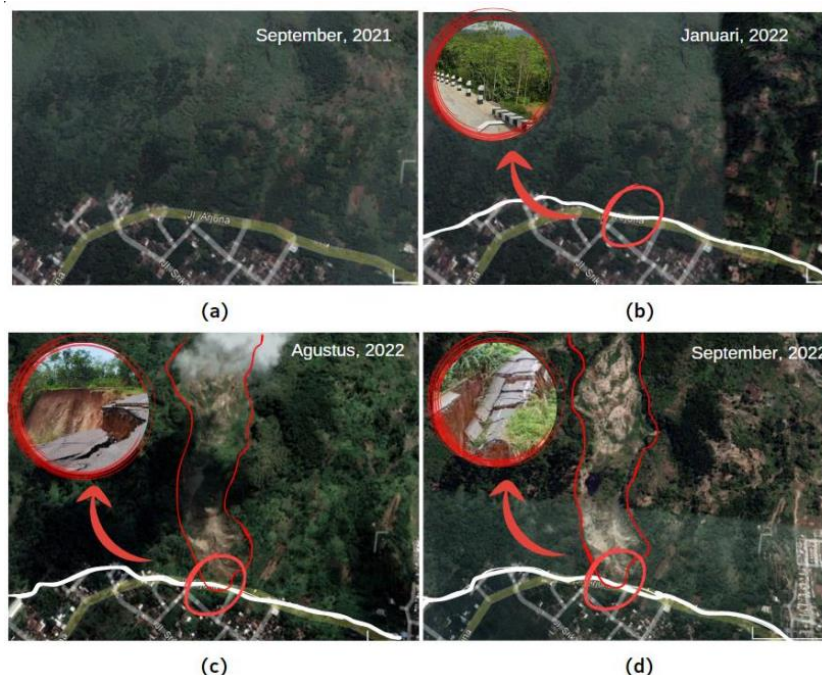
Tanah longsor pada Desa Kalongan berdampak pada kawasan seluas 5 hektar dan berpotensi mengalam longsor susulan. Tanah longsor dapat terjadi dengan pemicu faktor eksternal seperti gempa bumi. Parameter *Peak Ground Acceleration* (PGA) dapat merepresentasikan dampak yang terjadi dipermukaan dalam bentuk intensitas gempa bumi (MMI). Desa Kalongan berjarak 25.5 km dari pusat gempa bumi Ambarawa 27 Mei 2023. Penelitian ini bertujuan untuk membuat pemodelan mikrozonasi PGA dan intensitas gempa bumi Ambarawa pada zona longsor di Desa Kalongan. Model PGA berdasarkan pengukuran 72 data mikrotremor pada zona longsor dengan metode Kanai. Parameter gempa bumi Ambarawa dengan kekuatan M 2.5 dan kedalaman 5km. Hasil pemodelan PGA di zona longsor bervariasi antara nilai 1.0-7.1 gal atau I-II MMI. Hasil pemodelan PGA menunjukkan bahwa longsor susulan dapat terjadi jika kekuatan gempa bumi Ambarawa mencapai M=4 atau 7.1-50.8 gal. Kekuatan gempa bumi tersebut setara dengan intensitas II-V MMI.

The landslide in Kalongan Village affected an area of 5 hectares and has the potential to experience further landslides. Landslides can occur with triggers of external factors such as earthquakes. The Peak Ground Acceleration (PGA) parameter can represent the impacts that occur on the surface in the form of earthquake intensity (MMI). Kalongan Village is 25.5km from the epicenter of the Ambarawa earthquake on 27 May 2023. This study aims to modeling the PGA microzonation and the intensity of the Ambarawa earthquake in the avalanche zone in Kalongan Village. The PGA model is based on measurements of 72 microtremor data in the avalanche zone using the Kanai method. Parameters of the Ambarawa earthquake with a magnitude of 2.5 and a depth of 5 km. The results of PGA modeling in the avalanche zone varied between 1.0-7.1 gal or I-II MMI values. The results of the PGA modeling show that aftershocks can occur if the strength of the Ambarawa earthquake reaches M=4 or 7.1-50.8 gal. The strength of the earthquake is equivalent to the intensity of II-V MMI.

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Tanah longsor dapat didefinisikan sebagai pergerakan batuan, deritus, atau tanah yang disebabkan oleh gaya gravitasi bumi dan sebagian besar material yang bergerak harus memiliki kerapatan lebih besar 10 % dari kerapatan air untuk membedakan tanah longsor dari bentuk aliran massa gravitasi lainnya (Blasio, 2011). Tanah longsor disebabkan oleh dua faktor utama yaitu faktor pengontrol dan faktor pemicu. Faktor pengontrol adalah faktor yang dipengaruhi oleh kondisi material itu sendiri seperti kondisi geologi (Batuan), sesar, kemiringan lereng, litologi dan kekar pada batuan. Faktor pemicu adalah faktor yang menyebabkan material itu bergerak seperti curah hujan, aktivitas seismik, gempa bumi, erosi kaki lereng dan aktivitas manusia (Naryanto et al., 2019). Kejadian longsor dengan dimensi yang besar terjadi di Desa Kalongan, Kecamatan Ungaran Timur dari bulan Januari – September 2022. Dimensi zona longsor mencapai radius 5 hektar dengan ketebalan material longsor mencapai 50 m dan lebar 200 m (Gambar 1.).



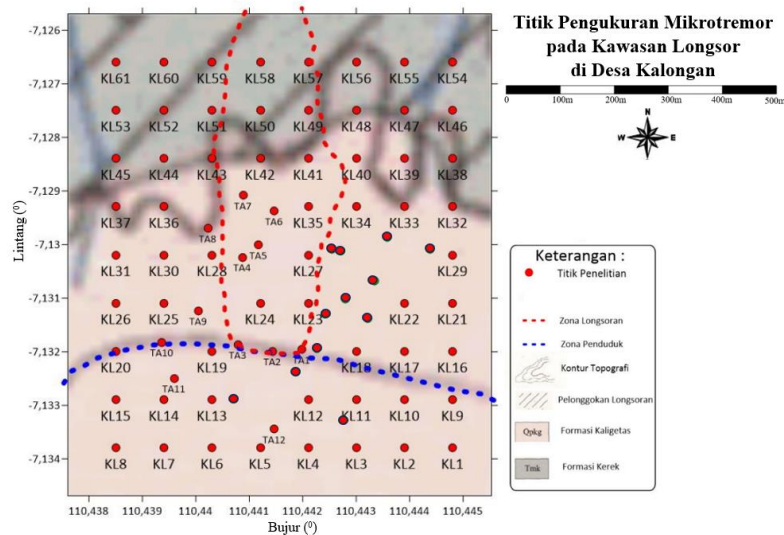
Gambar 1 Kawasan longsor di Desa Kalongan periode 2021-2022 (a) Kawasan longsor pada September 2021, (b) Kawasan longsor pada Januari 2022, (c) Kawasan longsor pada Agustus 2022 dan (d) Kawasan longsor pada September 2022

Kawasan longsor di Desa Kalongan memiliki jarak 15.7 km dengan orientasi N1980 SW dari zona gempa dangkal di wilayah Ambarawa. Catatan kejadian gempa di Ambarawa terjadi semenjak tahun 1849, 17 Juli 1865, 22 Oktober 1865, 22 April 1866, 10 Oktober 1872, dan 39 kejadian gempa pada bulan Oktober 2021 (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2022). Data kejadian gempa ambarawa terakhir pada 27 Mei 2023 dengan kekuatan M2.5, kedalaman 6 km dan pusat gempa di 7.350 LS; 110.360 BT atau berjarak 15 km Barat Daya Kota Salatiga (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2023). Perambatan gelombang gempa bumi pada kawasan zona longsor mampu menjadi pemicu terjadinya gerakan tanah dan longsor. Nilai perambatan gelombang gempa tersebut direpresentasikan dengan besaran nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan intensitas gempa bumi. Metode perhitungan PGA dengan menggunakan input kondisi site dan parameter gempa bumi adalah metode Kanai (1966). Kondisi *site* diperoleh dengan pengukuran mikrotremor menggunakan *single portable seismograph*.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat pemodelan mikrozonasi PGA dan intensitas gempa bumi Ambarawa pada zona longsor di Desa Kalongan. Pemodelan gempa bumi Ambarawa akan dibuat dengan skenario terburuk untuk mengetahui dampak yang akan terjadi pada kawasan longsor. Skenario terburuk yang dihasilkan diharapkan dapat digunakan sebagai referensi langkah mitigasi pada kawasan tersebut.

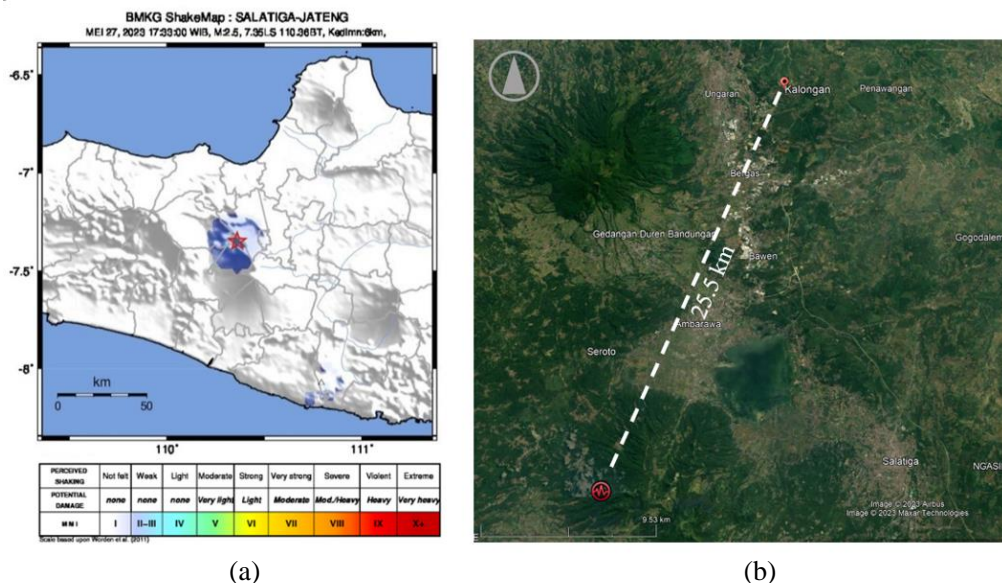
II. METODE

Penelitian dilakukan dengan menggunakan data pengukuran mikrotremor sebanyak 72 data pada kawasan longsor di Desa Kalongan. Pengukuran menggunakan *single station seismograph* dengan standar pengukuran merujuk pada SESAME (2004). Pengukuran mikrotremor dilakukan dengan durasi pengukuran 30 menit dan *sampling frequency* 100 Hz. Distribusi titik pengukuran sebanyak 20 titik pada kawasan pemukiman yang berada di sebelah selatan kawasan longsor dan 50 titik pada kawasan longsor. Pengolahan data mikrotremor menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) untuk menghasilkan parameter periode dominan tanah (T_g).

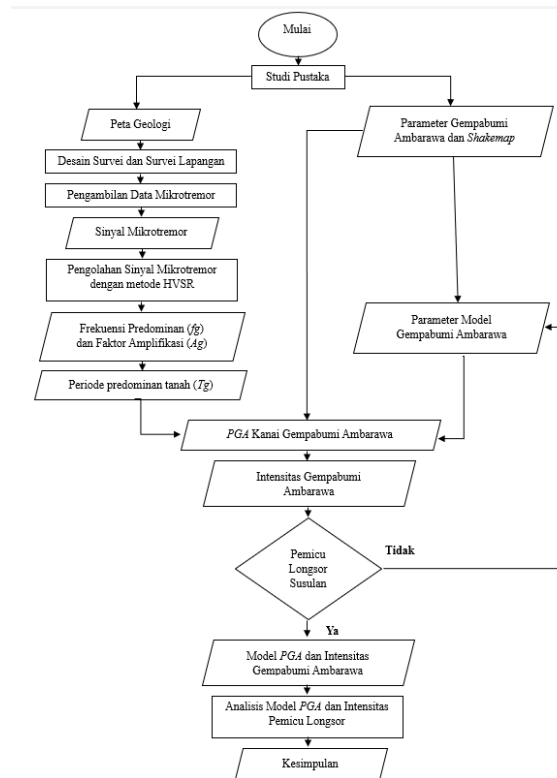


Gambar 2 Peta titik (lingkaran merah) pengukuran mikrotremor di kawasan longsor Desa Kalongan. Garis biru putus-putus merupakan batas zona pemukiman dan garis merah putus-putus merupakan zona longsor utama.

Parameter gempa bumi yang digunakan pada penelitian ini adalah data gempa bumi Ambarawa 27 Mei 2023. Parameter gempa bumi Ambarawa sebagai berikut: *origin time* 17:33:00 WIB, kekuatan M2.5, kedalaman 5 km, episenter 7.35° LS; 110.36° BT atau berjarak 15 km Barat Daya Kota Salatiga. Gempa bumi tersebut dirasakan di II MMI di Ambarawa, Banyubiru dan Jambu. Lokasi pusat gempa bumi berjarak 25.5 km dari zona longsor Desa Kalongan dengan orientasi arah N201°SW (Gambar 3).



Gambar 3 (a) peta guncangan gempa bumi Ambarawa dan (b) episenter gempa bumi Ambarawa 27 Mei 2023 (ikon seismik warna merah) dan lokasi kawasan longsor di Desa Kalongan (ikon titik warna merah)



Gambar 4 Diagram alir penelitian

Pemodelan PGA berdasarkan parameter gempa bumi Ambarawa 27 Mei 2023. Tahapan pemodelan dilakukan dengan membuat simulasi magnitudo gempa bumi yang dapat memicu terjadinya longsor. Tahapan pemodelan dilakukan seperti pada diagram alir penelitian (Gambar 4).

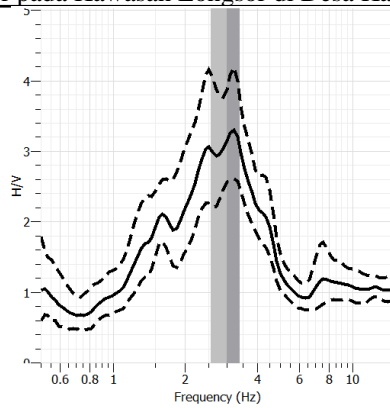
2.1 Metode HVSR

Mikrotremor adalah getaran tanah dengan amplitudo perpindahan 0,1 hingga 1 μm dan 0,001 hingga 0,01 cm/s untuk amplitudo kecepatan (Mirzaoglu & Dýkmen, 2003). Spektra mikrotremor komponen horizontal dan vertikal dibandingkan dengan menggunakan metode HVSR. Menurut Nakamura (Nakamura, 1989), fungsi transfer situs gelombang geser dan spektrum H/V sebagai fungsi frekuensi sangat terhubung. Rasio H/V pada *ambient noise* berhubungan erat dengan frekuensi yang terdeteksi di lapangan, seperti yang ditunjukkan oleh (Nakamura, 1989). Pada tahun 1989, Nakamura memperoleh data yang menunjukkan bahwa nilai tertinggi dari rasio spektrum komponen horizontal terhadap vertikal di stasiun yang terletak di daerah batuan keras mendekati nilai 1. Maksimum H/V untuk stasiun yang terletak di batuan lunak lebih besar dari satu. Sumber gelombang permukaan non-alami cenderung menyebabkan gelombang *Rayleigh* merambat melalui lapisan tanah atau lanau lunak (Mirzaoglu & Dýkmen, 2003). Gelombang *Rayleigh* mempengaruhi komponen horizontal dan vertikal permukaan tetapi tidak berpengaruh pada komponen gelombang di batuan dasar (Kanai, K; Tanaka, 1961). Nakamura menyatakan bahwa terdapat dua komponen horizontal yang diukur pada arah N-S dan W-E pada bidang pengamatan. Persamaan HVSR dituliskan sebagai berikut:

$$HVSR = \sqrt{\frac{(A_{(N-S)}(f)^2) + (A_{(W-E)}(f)^2)}{(A_{(v)}(f)^2)} \quad (1)$$

dimana HVSR merupakan *Horizontal to Vertical Ratio*, $A_{(N-S)}(f)$ adalah nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen *North-South*, $A_{(W-E)}(f)$ adalah nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen *West-East*, $A_{(v)}(f)$ adalah nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen *Vertical*.

Kurva *H/V* yang dihasilkan dari persamaan *HVSR* seperti pada Gambar 5 berikut (Wibowo, 2015).



Gambar 5 Kurva H/V , garis hitam merupakan nilai rerata H/V dan garis putus-putus merupakan standar deviasi. Puncak dari garis hitam merupakan nilai frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0).

2.2 PGA Metode Kanai dan Intensitas Gempa Bumi

Peak Ground Acceleration (PGA) merupakan nilai percepatan maksimum getaran tanah pada suatu lokasi akibat gempa bumi. PGA dipengaruhi karakteristik gempa bumi dan kondisi geologi setempat seperti; kekuatan gempa bumi, kedalaman, jarak hiposenter, dan sifat fisis batuan. *PGA* dapat memberikan informasi efek dan besarnya guncangan akibat gempa bumi dengan merepresentasikannya dalam percepatan tanah pada batuan dasar maupun permukaan (Ramkrishnan et al., 2021). Metode Kanai merupakan salah satu metode untuk menentukan PGA dengan memperhitungkan kondisi geologi setempat yang direpresentasikan dengan nilai periode dominan tanah (T_G) Persamaan PGA metode Kanai sebagai berikut (Wibowo & Sembri, 2016):

$$a = \frac{5}{\sqrt{T_G}} 10^{0.61M - P \log_{10} R + Q} \quad (2)$$

dengan T_G adalah periode dominan tanah (s), M merupakan kekuatan gempa (M), R adalah jarak hiposenter (km), P bernilai $1.66 + 3.60/R$, dan Q bernilai $0.167 + (-1.83/R)$.

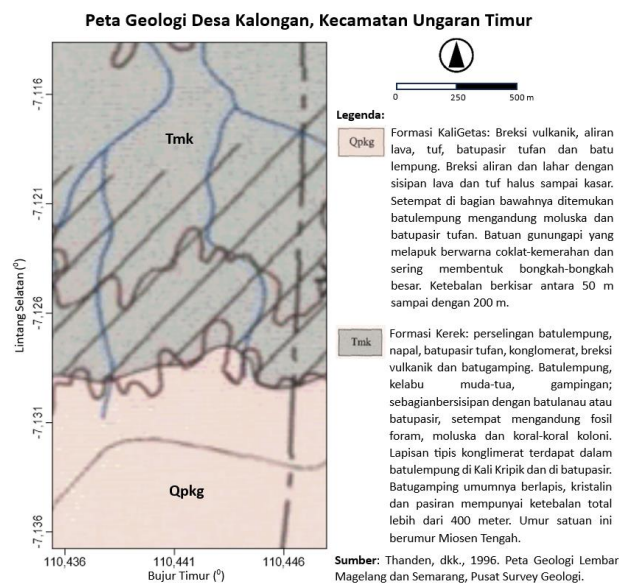
Intensitas gempa bumi dihitung dengan mengamati secara langsung kerusakan yang terjadi sebagai akibat dari gempa bumi dan dapat memberikan gambaran tentang seberapa besar kekuatan gempa bumi pada pusat gempanya (Sunarjo, G.; Pribadi, 2012). Intensitas gempa bumi dapat diketahui dengan menggunakan konversi nilai PGA menjadi kelas intensitas gempa bumi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Klasifikasi Intensitas Gempa Bumi (Lowrie 2007; Wald dkk., 1999)

Skala MMI	PGA (gal)	Dampak
I	<1.7	Getaran tidak terasa kecuali dalam keadaan hening dan hanya dirasakan oleh beberapa orang.
II-III	1.7-14	Getaran dirasakan oleh beberapa orang yang diam, berada di ruangan tingkat atas, dan benda-benda yang digantung terlihat bergoyang. Getaran dirasakan di rumah tingkat atas, getaran terasa seperti ada truk yang lewat.
IV	14.1-39	Pada siang hari dirasakan oleh banyak orang di dalam rumah, beberapa orang di luar rumah, dan kendaraan yang diam.
V	39.1-92	Hampir setiap orang merasakan getaran, kaca jendela dan plester dinding pecah, barang-barang terpelanting, pohon-pohon yang tinggi tampak bergoyang.
VI	92.1-180	Getaran dirasakan oleh semua penduduk, mayoritas penduduk kaget dan lari keluar, plester dinding dan cerobong asap pabrik rusak. Terjadi kerusakan ringan.
VII	180.1-340	Semua orang keluar rumah, kerusakan ringan pada rumah dengan konstruksi baik. Cerobong asap pecah. Getaran terasa oleh orang yang naik kendaraan.
VIII	340.1-650	Kerusakan ringan pada bangunan dengan konstruksi kuat, retak-retak pada bangunan yang kuat. Banyak kerusakan pada bangunan yang tidak kuat. Meja kursi terlempar, air menjadi keruh dan sulit mengendarai kendaraan.
IX	650.1-1240	Umumnya pondasi rumah rusak, rangka struktur bangunan terpuntir, rumah tampak bergeser dari pondasinya, pipa-pipa dalam tanah terputus.
X-XII	>1240	Bangunan tembok pondasinya hancur, bangunan kayu rusak, dan rel kereta api sedikit membengkok. Rel kereta api bengkok, rumah kayu sedikit yang masih berdiri, jembatan rusak, pipa saluran rusak berat dan tidak dapat digunakan. Kerusakan hampir menyeluruh, benda-benda terlempar ke udara.

2.3 Kondisi Geologi Daerah Penelitian

Desa Kalongan secara geologi berada pada dua formasi geologi (Gambar 6), yaitu Formasi Kaligetis (Qpkg) dan Kerek (Tmk). Formasi Qpkg mempunyai umur Plistosen dan tersusun atas breksi, batulempung, batulanau, tuf, batupasir tufan, dan konglomerat. Formasi ini didominasi oleh breksi. Breksi dan lahar berwarna cokelat kehitamaan, dengan komponen berupa andesit, basalt, batu apung dengan masa dasar tufa komponen umumnya menyudut-menyudut tanggung, porositas sedang hingga tinggi, breksi bersifat keras dan kompak, sedangkan lahar agak rapuh. Lava berwarna hitam kelabu keras dan kompak. Tufa berwarna kuning keputihan, halus kasar, porositas tinggi, getas. Batu lempung, berwarna hijau, porositas rendah, agak keras dalam keadaan kering dan mudah hancur dalam keadaan basah. Batu pasir tufaan, cokelat kekuningan, halus-sedang, porositas sedang, agak keras. Formasi Tmk merupakan formasi batuan yang berada di sebelah utara Formasi Qpkg dan berumur Miosen Tengah, berupa perselingan batulempung, napal, konglomerat, batupasir tufan, breksi vulkanik dan batugamping. Sebagian dari batulempung, kelabu muda-tua, gampingan bersisipan dengan batulanau atau batupasir dimana di tempat tersebut mengandung fosil foram, moluska, dan koral-koral koloni.

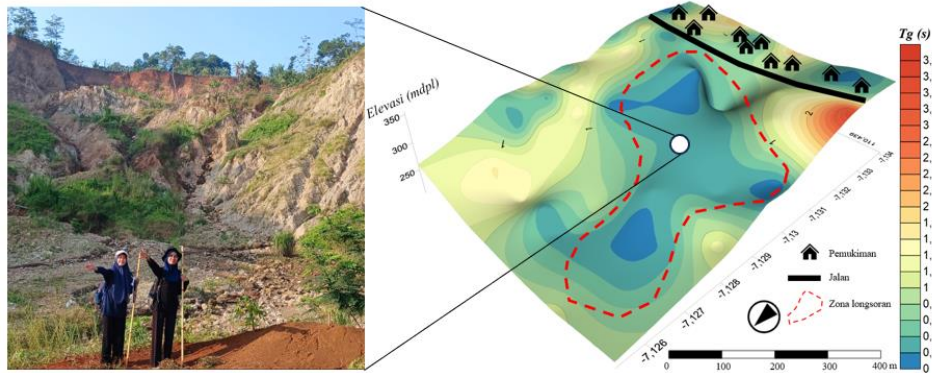


Gambar 6. Peta Geologi Desa Kalongan, Kecamatan Ungaran Timur

III. HASIL DAN DISKUSI

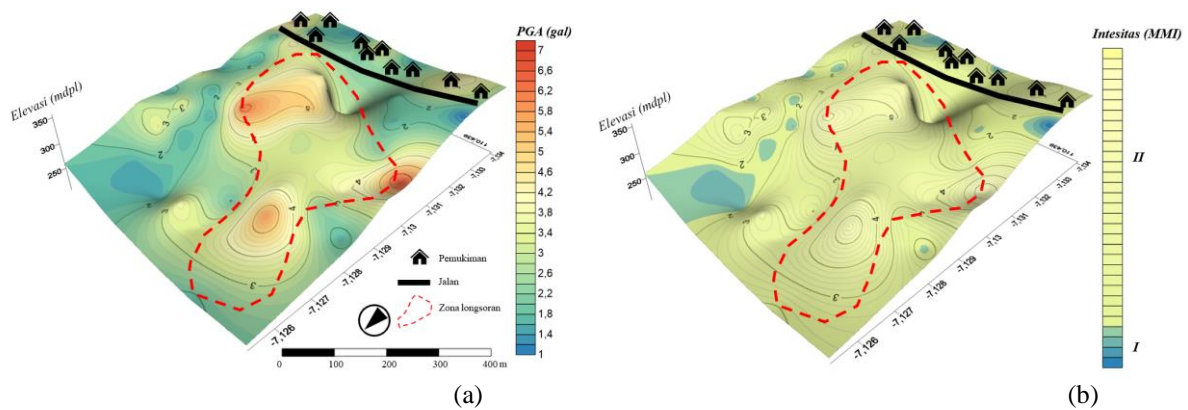
3.1 Mikrozonasi PGA dan Intensitas Gempa Bumi Ambarawa

Gempa bumi Ambarawa 27 Mei 2023 merupakan gempa bumi dangkal (kedalaman 5km) dengan kategori gempa dirasakan. Hasil pemodelan peta guncangan (*shakemap*) BMKG (Gambar 3(a)) menunjukkan dampak gempa yang dihasilkan berada pada intensitas gempa II MMI. Distribusi intensitas II MMI tersebut di wilayah Ambarawa dan sekitarnya. Informasi yang diperoleh dari lapangan menunjukkan gempa bumi tersebut dirasakan oleh masyarakat dengan intensitas II MMI di wilayah Ambarawa, Banyubiru dan Jambu. Kawasan longsor di Desa Kalongan merujuk pada model peta guncangan BMKG berada pada zona berwarna putih atau pada kategori intensitas I MMI (<1.7 gal). Pengukuran mikrotremor pada zona longsor di Desa Kalongan menghasilkan nilai periode dominan tanah (Tg). Nilai Tg pada zona longsor bervariasi antara 0.1-3.7 s, dengan Tg rendah terdapat pada zona utama longsor (Gambar 7). Nilai Tg rendah berkorelasi dengan material endapan dan sedimen lunak. Kawasan dengan dominasi material endapan akan memberikan efek amplifikasi ketika terjadi gempa bumi. Kondisi tersebut akan direpresentasikan dengan nilai PGA yang lebih tinggi dibandingkan dengan kawasan yang didominasi batuan hingga batuan keras. Kawasan longsor dominan berada pada Formasi Kaligetis (Qpkg) yang berumur kuartar atau lebih muda dibandingkan dengan Formasi Kerek (Tmk) yang berumur tersier. Litologi penyusun pada Formasi Qpkg tidak sekompak Formasi Tmk, sehingga potensi gerakan tanah hingga longsor dominan terjadi pada Formasi Qpkg.



Gambar 7 Mikrozonasi T_g pada kawasan longsor dan dokumentasi pada zona utama longsor yang didominasi material sedimen lunak berupa lumpung

Nilai PGA gempa bumi Ambarawa 27 Mei 2023 dengan metode Kanai bervariasi antara 1-7.11 gal (Gambar 8). Nilai tersebut jika dikonversi menjadi intensitas gempa bumi, berada pada kategori I-II MMI (Tabel 2). Nilai PGA yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan model *shakemap* BMKG. Mikrozonasi PGA menunjukkan distribusi nilai $PGA > 3$ gal terkonsentrasi pada zona longsor utama.



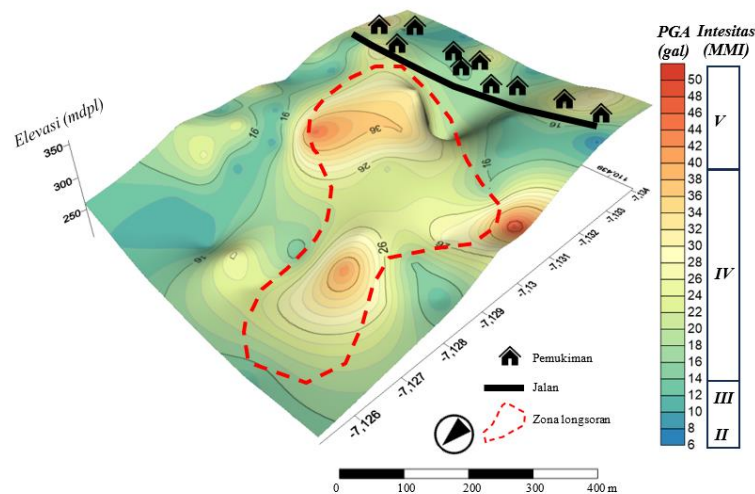
Gambar 8 (a) Mikrozonasi PGA dan (b) mikrozonasi intensitas gempa bumi Ambarawa 27 Mei 2023 di kawasan longor Desa Kalongan

Tabel 2 Klasifikasi Intensitas Gempa Bumi Ambarawa 27 Mei 2023

Skala MMI	PGA (gal)	Formasi
I-II	1.0-7.1	Kaligetas (Qpkg)
I-II	1.5-5.9	Kerek (Tmk)

3.2 Pemodelan PGA dan Intensitas Gempa Bumi Ambarawa

Gempa bumi merupakan salah satu faktor yang dapat memicu terjadinya gerakan tanah atau longsor. Gempa bumi dengan intensitas V MMI atau 39.1-92 gal diduga mampu menjadi pemicu gerakan tanah atau longsor di Desa Kalongan. Kondisi lapangan saat ini menunjukkan adanya retakan pada zona longsor utama, sehingga gempa bumi dengan intensitas V MMI diduga mampu menimbulkan longor susulan. Penelitian ini mensimulasikan besarnya kekuatan gempa yang mampu menghasilkan nilai PGA mencapai 39.1-92 gal dengan metode Kanai. Data parameter utama gempa bumi menggunakan kejadian gempa bumi Ambarawa 27 Mei 2023. Hasil simulasi menunjukkan kekuatan gempa minimal yang mampu menghasilkan nilai PGA tersebut adalah $M=4$. Variasi nilai PGA yang dihasilkan berdasarkan parameter $M=4$ di kawasan longsor Desa Kalongan yaitu 7.1-50.8 gal (Gambar 9). Hasil pemodelan menunjukkan nilai $PGA > 30$ gal terkonsentrasi pada kawasan zona longsor, dengan klosur nilai $PGA > 39$ gal atau V MMI terdapat pada sisi timur, barat dan utara.



Gambar 9 Model PGA dan intensitas gempa bumi Ambarawa dengan kekuatan M4 di Desa Kalongan

Tabel 3 Klasifikasi Intensitas Gempa Bumi Ambarawa M=4

Skala MMI	PGA (gal)	Formasi
II-V	7.12-50.79	Kaligetas (Qpkg)
II-V	10.38-42.26	Kerek (Tmk)

Tabel 3 menunjukkan simulasi gempa bumi Ambarawa dengan kekuatan M 4 menghasilkan nilai PGA yang bervariasi berdasarkan formasi geologi di Desa Kalongan. Formasi Qpkg memiliki nilai PGA dan intensitas gempa bumi yang lebih tinggi dibandingkan dengan Formasi Tmk. Hasil simulasi ini memberikan informasi, bahwa gempa bumi dangkal dengan kekuatan M=4 mampu memicu terjadinya longsor. Langkah-langkah mitigasi gempa bumi dan tanah longsor perlu dilakukan untuk mengantisipasi kemungkinan bencana yang mungkin terjadi.

IV. KESIMPULAN

Zona longsor di Desa Kalongan memiliki potensi mengalami longsor susulan dengan pemicu yang berasal dari perambatan gelombang gempa bumi. Kejadian gempa bumi Ambarawa 27 Mei 2023 berdasarkan perhitungan PGA metode Kanai menghasilkan nilai 1.0-7.1 gal atau I-II MMI. Hasil pemodelan PGA menunjukkan bahwa longsor susulan dapat terjadi jika kekuatan gempa bumi Ambarawa mencapai M=4 atau 7.1-50.8 gal. Kekuatan gempa bumi tersebut setara dengan intensitas II-V MMI.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2022). *Laporan Tahunan Gempabumi dan Tsunami Tahun 2021*. Stasiun Geofisika Sleman.
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2023). *Buletin Gempabumi dan Tsunami Bulan Mei Tahun 2023*. Stasiun Geofisika Sleman.
- Blasio, F. V. de. (2011). *Introduction to the Physics of Landslides: Lecture notes on the dynamics of mass wasting*. Springer Science & Business Media.
- Kanai, K; Tanaka, T. (1961). On Microtremors VIII. *Bulletin of Earthquakes Research Institute*, 97–144.
- Mirzaoglu, M., & Dýkmen, Ü. (2003). Application of microtremors to seismic microzoning procedure. *Journal Of The Balkan Geophysical Society*, 6(3), 143–156.
- Nakamura, Y. (1989). *Hv_1989.Pdf*.
- Naryanto, H. S., Soewandita, H., Ganesha, D., Prawiradisastra, F., & Kristijono, A. (2019). Analisis Penyebab Kejadian dan Evaluasi Bencana Tanah Longsor di Desa Banaran, Kecamatan Pulung, Kabupaten Ponorogo, Provinsi Jawa Timur Tanggal 1 April 2017. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(2), 272. <https://doi.org/10.14710/jil.17.2.272-282>

- Nugroho Budi Wibowo, dkk: Pemodelan *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan Intensitas Gempabumi berdasarkan Pengukuran Mikrotremor pada Kawasan Longsor di Desa Kalongan, Ungaran Timur
- Ramkrishnan, R; Sreevalsa, Kolathayar; Sitharam, T. G. (2021). Development of New Ground Motion Prediction Equation for the North and Central Himalayas Using Recorded Strong Motion Data. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(10), 1903–1926.
- Sunarjo, G.; Pribadi, S. (2012). *Gempabumi Edisi Populer*. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Wibowo, N. B. (2015). Spatial Analysis of Surface Aquifer Thickness Based Frequency predominant in Bantul District. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 5(01), 62.
- Wibowo, N. B., & Sembri, J. N. (2016). Analisis Peak Ground Acceleration (PGA) dan Intensitas Gempabumi berdasarkan Data Gempabumi Terasa Tahun 1981 - 2014 di Kabupaten Bantul Yogyakarta. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 6(01), 65.