

Potensi Bahaya Gempa Bumi Berdasarkan Kondisi Tapak Lokal di Daerah Amlapura, Karangasem, Bali

Earthquake Hazard Potential Based on Site Class Condition at Amlapura Area, Karangasem, Bali

Rahayu Robiana dan Athanasius Cipta

Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi
Jalan Diponegoro No. 57 Bandung 40122 Indonesia

e-mail: rha.robi@gmail.com

naskah diterima 26 Maret 2021, selesai direvisi 19 November 2021, dan disetujui 22 November 2021

ABSTRAK

Bahaya gempa bumi dapat dievaluasi setidaknya dari dua sudut pandang, yaitu sumber dan area yang berpotensi terdampak. Dari sudut pandang area berpotensi terdampak, kondisi geologi lokal memegang peranan penting dalam memperbesar dampak kerusakan akibat guncangan gempa bumi. Kecepatan gelombang geser merupakan parameter penting untuk mengevaluasi perilaku dinamis tanah di bawah permukaan. Pemodelan profil kecepatan menggambarkan kedalaman batuan sedimen dan batuan dasar di Amlapura yang menunjukkan ketebalan sedimen lunak yang bervariasi mulai dari 50 m hingga 150 m. Indeks kerentanan terhadap gempa bumi yang dihitung berdasarkan parameter faktor amplifikasi, frekuensi dominan, serta percepatan tanah puncak (pga) pada batuan dasar digunakan untuk menilai potensi dampak guncangan gempa bumi seperti likuefaksi/ gerakan tanah/ kerusakan berat pada bangunan di Amlapura, sehingga diketahui pada pga 0,3 g atau lebih besar, potensi longsor, bangunan runtuh dan likuefaksi meluas terutama di bagian timur kota Amlapura dimana morfologi pedataran bertemu morfologi pegunungan bergelombang.

Kata kunci: Amlapura, bahaya gempa bumi, kecepatan gelombang geser, kondisi tapak lokal, percepatan tanah puncak

ABSTRACT

Earthquake hazard can be evaluated at least from two point of views, the source and area which potentially affected. From the perspective of the potential affected area, local geological conditions play an important role in magnifying the impact of damage due to earthquake shocks. Shear wave velocity is an important parameter for evaluating the dynamic behavior of subsurface soils. Shear wave profile modelling illustrates the depth of sedimentary rocks and bedrock in Amlapura which shows the thickness of soft sediments that vary from 50 m to 150 m. An earthquake susceptibility index calculated based on parameters of amplification factors, dominant frequency, and peak soil acceleration (pga) on bedrock is used to assess potential impacts of earthquake shocks such as liquefaction / ground motion / heavy damage to buildings in Amlapura, so that it is known at the pga 0.3 g and 0.4 g potential for landslides, buildings collapse and liquefaction extends mainly in the eastern part of the city of Amlapura where the flat meets the the surging hills morphology.

Keywords: Amlapura, earthquake hazard, shear-wave velocity, site class, peak ground acceleration

PENDAHULUAN

Bahaya guncangan gempa bumi dapat dilihat dari dua aspek yaitu sumber gempa bumi dan area berpotensi terdampak. Magnitudo, arah gerak, geometri patahan dan kondisi tektonik

merupakan aspek sumber yang harus digunakan dalam menghitung besar guncangan. Dari sudut pandang area berpotensi terdampak, kondisi geologi lokal memegang peranan penting dalam penjarangan gelombang gempa bumi. Perbedaan

kondisi geologi ini memegang peranan penting terhadap tingkat guncangan yang ditimbulkan oleh gempa bumi, seperti yang pernah terjadi di Meksiko (1985) (Rial, drr., 1992; Cruz-Atienza drr., 2016), Loma Prieta 1989 (Seekins dan Boatwright, 1994), Luzon 1990 (Kanao dan Ito, 1992), Kobe 1995 (Motosaka dan Nagano, 1996), Turki 1999 (Ozel, drr., 2002), Nepal 2015 (Galetzka, drr., 2015), Banjarnegara 2018 (Cipta, 2018), Palu 2018 (Cipta, drr., 2021).

Keberadaan Subduksi Sunda dan Sesar naik belakang busur Flores (*Flores Back Arc thrust*), masing-masing di sebelah selatan dan utara pulau Bali serta sesar geser Lombok di sebelah timur, menggambarkan besarnya potensi bahaya gempa bumi di Karangasem (Gambar 1). Adanya gempa-gempa yang jauh dari ketiga sumber tersebut mengindikasikan keberadaan sesar-sesar lokal di darat dan di laut sehingga menambah potensi bahaya gempa bumi di daerah ini. Berdasarkan data katalog gempa bumi merusak Indonesia (Supartoyo, drr., 2014), setidaknya ada dua kali kejadian gempa bumi merusak yang terjadi di Karangasem dan menyebabkan korban jiwa serta kerusakan bangunan. Gempa bumi yang terjadi pada 17 Desember 1979 dengan magnitudo 5 SR, memiliki intensitas maksimum sekitar VII - VIII skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*) yang menyebabkan 24 orang meninggal. Sedangkan gempa bumi pada 2 Januari 2004 dengan magnitudo 6,2 SR, menyebabkan 1 orang meninggal serta kerusakan pada puluhan rumah dan fasilitas umum.

Pulau Bali merupakan bagian dari busur kepulauan Sunda Kecil yang terbentuk sebagai akibat proses subduksi lempeng Indo-Australia ke bawah lempeng Eurasia. Proses subduksi ini tidak hanya menimbulkan aktivitas tektonik tetapi juga aktivitas vulkanik. Serupa dengan busur kepulauan lainnya, busur Sunda Kecil ditandai oleh bidang pusat gempa bumi yang menunjam ke bawah yang dikenal sebagai Zona Benioff (Hall, 2002). Gempa bumi dangkal akibat proses subduksi umumnya terjadi di Selatan Bali yang berjarak antara 150-200 km dari pesisir selatan Pulau Bali. Pusat gempa bumi bertambah dalam

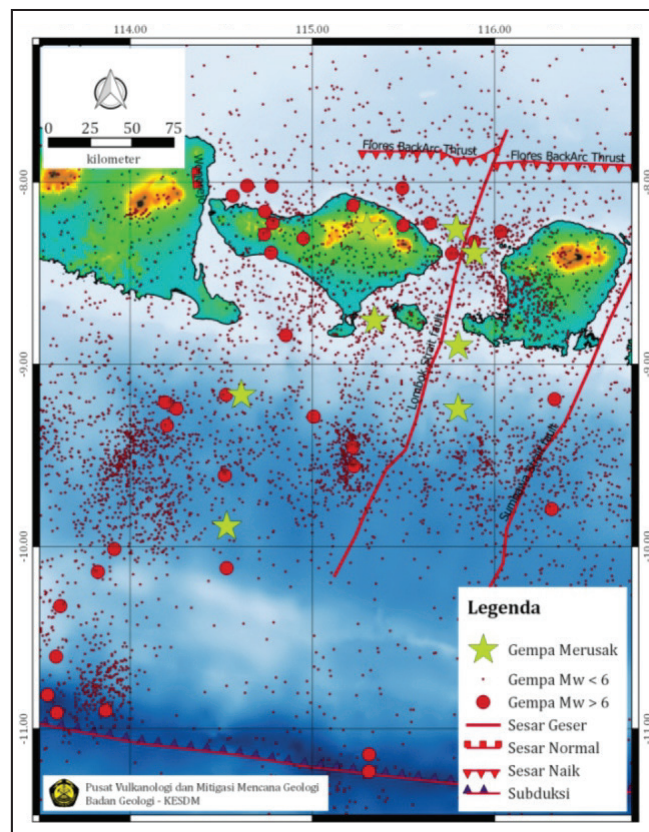
ke arah Utara akibat proses subduksi lempeng sampai kedalaman lebih dari 600 km. Gempa bumi di daratan Pulau Bali yang terjadi pada kedalaman 100-200 km berasosiasi dengan *rupture* (pematahan) pada *slab* (bagian lempeng samudra yang menunjam ke bawah lempeng benua). Aktivitas gempa bumi dangkal juga terdapat di daratan Pulau Bali dan di sebelah utara Pulau Bali (Gambar 1).

Keberadaan zona subduksi di selatan, sesar naik belakang busur Flores di utara, dan sesar mendatar Lombok di sebelah timur, menjadikan daerah ini rawan akan kejadian gempa bumi. Berdasarkan peta seismisitas, tampak aktivitas kegempaan di wilayah Bali cukup tinggi. Magnitudo gempa bumi yang terjadi bervariasi mulai dari gempa kecil dengan magnitudo $M_w < 6$ sampai dengan gempa besar yang memiliki magnitudo $M_w > 6$ pada kedalaman dangkal (< 60 km, Gambar 1) (USGS, 2018). Gempa bumi dangkal dan berada di darat walaupun kecil berpotensi menimbulkan kerusakan.

METODE PENELITIAN

Pengukuran mikrotremor dilakukan di 137 titik dengan jarak antar titik sekitar 500 - 1000 m dan waktu pengambilan data selama 45 menit di setiap titik, menggunakan sensor Lennartz LE-3D-5s/MkIII yang dilengkapi *data logger* SARA SL06 untuk menyimpan data. Seismometer tipe ini memiliki batas bawah frekuensi sebesar 0,2 Hz, sehingga periode natural dominan maksimum yang dapat diperoleh adalah 5 detik. Oleh karena itu, sifat fisis batuan hingga kedalaman 200 m dianalisis, selain geologi dekat permukaannya. Pemanfaatan mikrotremor ini sudah dilakukan oleh Cipta drr (2018, 2021) dan Pranata (2020) untuk memetakan struktur bawah permukaan di Jakarta, Balaroa - Kota Palu dan Cekungan Bandung.

Sinyal mikrotremor diolah dengan menggunakan teknik *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) untuk memperoleh profil bawah permukaan pada setiap lokasi pengukuran. Sifat fisis batuan yang direpresentasikan oleh nilai



Gambar 1. Kondisi tektonik dan kegempaan di wilayah Bali dan sekitarnya. Wilayah Karangasem setidaknya pernah merasakan dua kali gempa bumi merusak pada tahun 1979 dan 2004.

kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30 meter (V_s^{30}) dan kedalaman batuan dasar diharapkan dapat diketahui.

Inversi kurva eliptisitas (kurva HVSR) dilakukan untuk mengetahui profil kecepatan gelombang geser (*S-wave*). Secara garis besar, tahapan inversi HVSR dapat dilihat pada Gambar 2. Dimulai dari tahap pertama yaitu pengukuran mikrotremor di lapangan, kemudian hasil pengukuran akan diolah dengan perangkat lunak *geopsy* (dapat diunduh secara gratis di <http://www.geopsy.org/>) untuk mendapatkan kurva HVSR (Cipta, drr., 2018a, 2019, 2021).

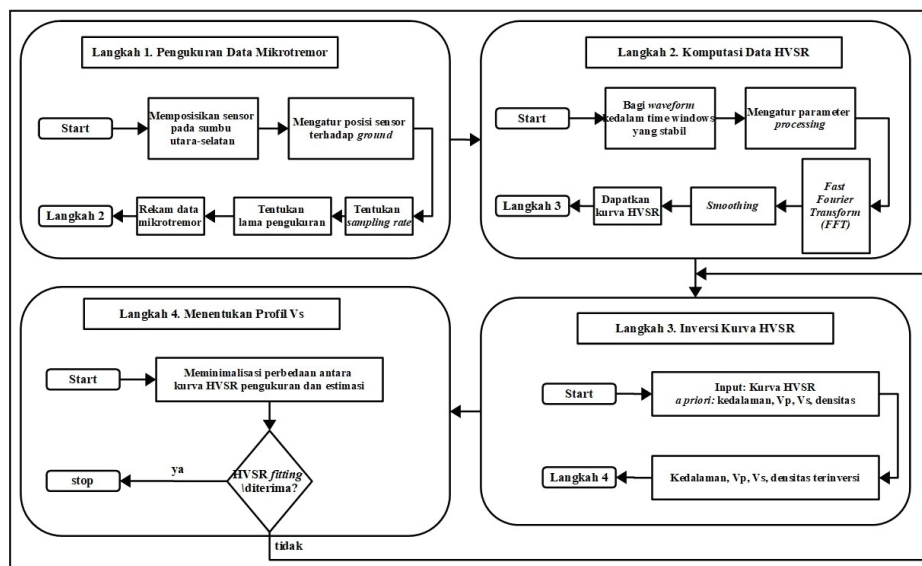
Selanjutnya dimulailah proses inversi, dalam proses ini, diperlukan *input* (masukan) berupa kurva HVSR serta *a priori* berupa model ketebalan lapisan, kecepatan gelombang geser (V_s), kecepatan gelombang primer (V_p), densitas batuan dan *poisson ratio*. Dengan mengelaborasi unit geomorfologi di titik pengukuran mikrotremor, lima parameter tersebut dapat diketahui secara

kasar. Model kasar ini akan disempurnakan dalam proses inversi.

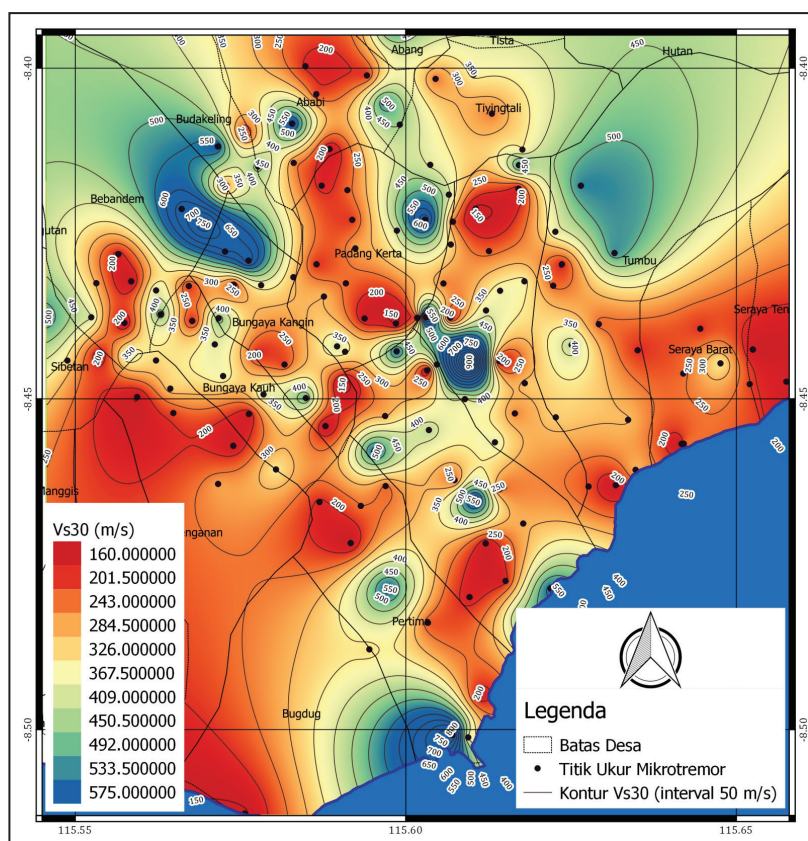
Keluaran proses inversi ini adalah model V_s , V_p , dan densitas (ρ) di tiap titik pengukuran. Dengan menggabungkan kemudian melakukan proses interpolasi, V_s^{30} , ketebalan sedimen dan geometri cekungan, jika pengukuran dilakukan di cekungan, dapat diketahui.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil proses inversi, dapat diperoleh sebaran nilai V_s^{30} yang representatif (Gambar 3), karena nilai kecepatan yang dihasilkan telah memperhitungkan kompleksitas struktur batuan mulai dari permukaan sampai kedalaman yang dimaksud. Kecepatan gelombang geser merupakan parameter penting untuk mengevaluasi perilaku dinamis tanah di bawah permukaan yang dangkal. Dalam desain teknik gempa bumi, penggunaan V_s^{30} adalah untuk mengklasifikasi-



Gambar 2. Bagan alir inversi HVSR.

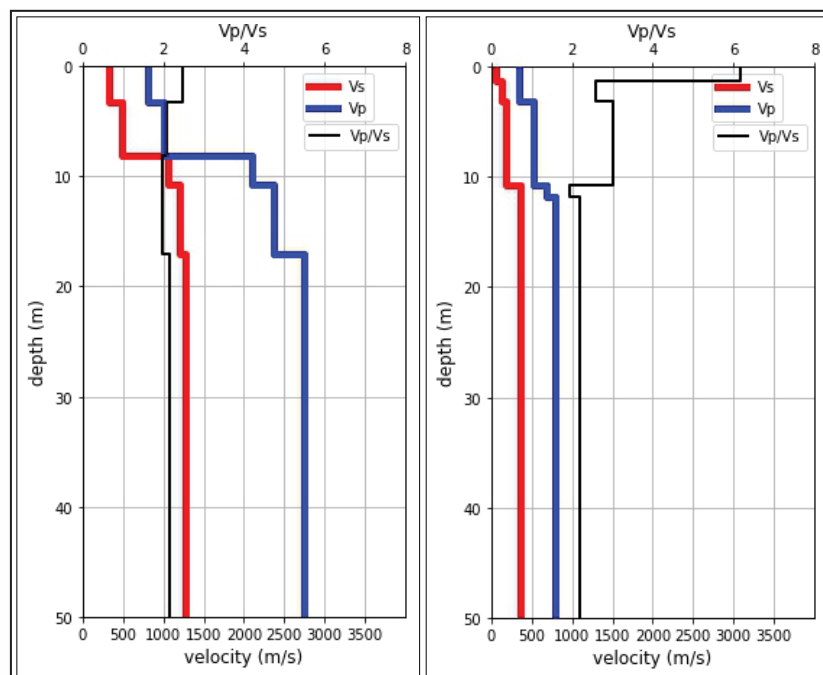


Gambar 3. Peta nilai Vs30 hasil inversi HVSR di wilayah Amlapura, Kabupaten Karangasem, Bali.

kan situs sesuai dengan tipe tanah (Cipta, dr., 2018b).

Proses inversi HVSR juga memberikan gambaran profil kecepatan gelombang (V_p dan V_s).

Setiap kontras kecepatan menunjukkan setiap lapisan tanah yang ada di bawah permukaan. Dari model profil kecepatan dapat terlihat perbedaan kedalaman sedimen di setiap titik peng-



Gambar 4. Perbedaan model kecepatan di wilayah Juuk Manis yang merupakan jalur bekas aliran lahar pada jarak yang berdekatan antara daerah pemukiman (kiri) dan daerah pinggiran sungai (kanan).

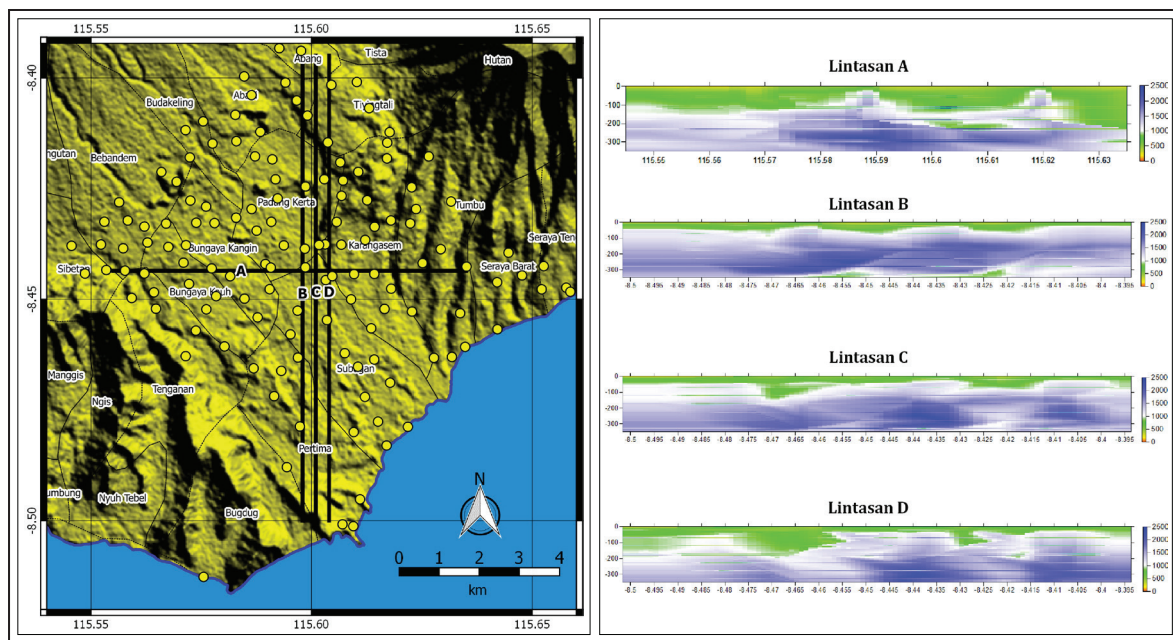
ukuran. Perbedaan kontras kecepatan terlihat sangat jelas ditunjukkan di wilayah Juuk Manis (Gambar 4). Pengukuran yang dilakukan di titik yang berdekatan namun pada profil topografi yang berbeda, menunjukkan adanya perbedaan kedalaman sedimen serta perbedaan tingkat kekerasan batuan sedimen tersebut.

Perbandingan antara nilai V_p dan V_s (V_p/V_s) dapat menunjukkan tingkat kejenuhan batuan. Nilai V_p/V_s di atas 3 mengindikasikan keberadaan air (Han, dr., 1986). Profil pada Gambar 4 kanan, memperlihatkan nilai V_p/V_s yang sangat tinggi pada permukaan hingga kedalaman sekitar 1 m, kemudian V_p/V_s yang tinggi pada kedalaman 3 – 10,5 m. Nilai V_p/V_s bergantung pada porositas, kandungan lempung dan kejenuhan air (Han, dr., 1986), makin tinggi porositas dan kandungan lempung, makin tinggi nilai V_p/V_s . Lebih jauh dikatakan bahwa rasio V_p terhadap V_s lebih sensitif terhadap perubahan porositas (Castagna, dr., 1985; Han, dr., 1986). Nilai V_p/V_s yang sangat tinggi (> 6) menunjukkan bahwa lapisan tersebut mengandung lempung yang cukup tinggi dan jenuh air, sedangkan nilai V_p/V_s antara 3 hingga 6 mengidikasikan lapisan

pasir urai yang jenuh air. Lapisan-lapisan jenuh air dekat permukaan ini, yang ditunjukkan oleh anomali V_p/V_s yang sangat tinggi, diduga dapat mengalami likuefaksi ketika terkena guncangan gempa bumi yang cukup kuat (Bailey, dr., 2013).

Pemodelan profil kecepatan di setiap titik pengukuran dapat menghasilkan model struktur bawah permukaan. Model struktur bawah permukaan yang menggambarkan kedalaman batuan sedimen dan batuan dasar terlihat dari penampang melintang hasil ekstrapolasi masing-masing model kecepatan hasil inversi (Gambar 5). Penampang melintang dapat menunjukkan wilayah-wilayah dengan lapisan sedimen tebal yang berpotensi mengalami amplifikasi guncangan gempa bumi.

Potongan melintang A, B, C dan D menunjukkan ketebalan sedimen lunak yang bervariasi mulai dari 50 hingga 150 m (Gambar 5). Variasi ketebalan sedimen ini membentuk morfologi batuan dasar. Morfologi batuan dasar yang membentuk formasi seperti gelombang dan tinggian memberikan respons yang berbeda terhadap gelombang gempa bumi. Ujung suatu cekungan akan cenderung mengamplifikasi gelombang gempa



Gambar 5. Penampang melintang model bawah permukaan hasil inversi HVSR. Warna hijau menunjukkan lapisan sedimen dan warna biru merupakan batuan dasar. Bulatan kuning pada gambar kiri menunjukkan titik pengukuran microtremor.

bumi berfrekuensi tinggi sedangkan morfologi berbentuk lembah cenderung memperkuat gelombang gempa bumi dengan perioda panjang. Respons berbeda terhadap gelombang gempa bumi akan memberikan dampak berbeda terhadap tiap jenis bangunan yang berdiri di atas suatu cekungan (Celebi, dr., 1987; Pilz, dr., 2011; Sato, dr., 2012; Tsai, dr., 2017; Cipta, dr., 2018b).

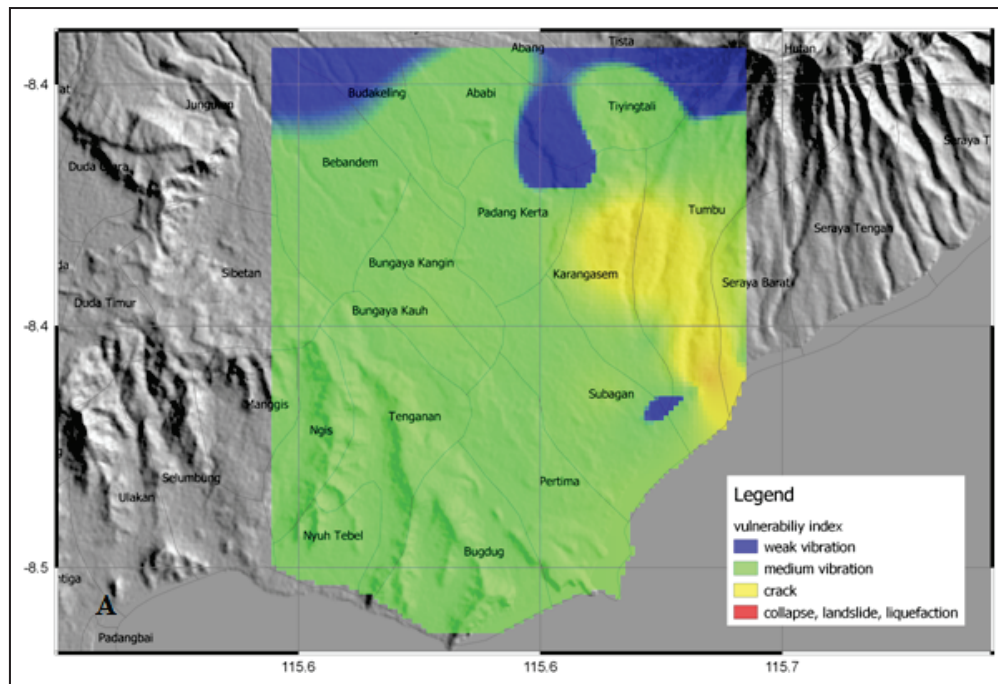
Kondisi tanah yang sangat bersifat lokal serta struktur yang berbentuk cekungan akan mempengaruhi tingkat kerentanan guncangan gempa bumi secara lokal. Hasil inversi HVSR akan digunakan untuk menilai potensi likuifaksi/gerakan tanah/ kerusakan berat pada bangunan yang dipicu guncangan gempa bumi.

Potensi bahaya gempa bumi dinilai berdasarkan indeks kerentanan yang dihitung berdasarkan parameter faktor amplifikasi, frekuensi dominan, serta percepatan tanah puncak (PGA) pada batuan dasar (Nakamura, 1997; Nakamura, 2000). Dengan mengasumsikan skenario terjadi gempa yang menghasilkan nilai PGA tertentu dapat dihitung potensi dampak guncangan tersebut (Gambar 6-9).

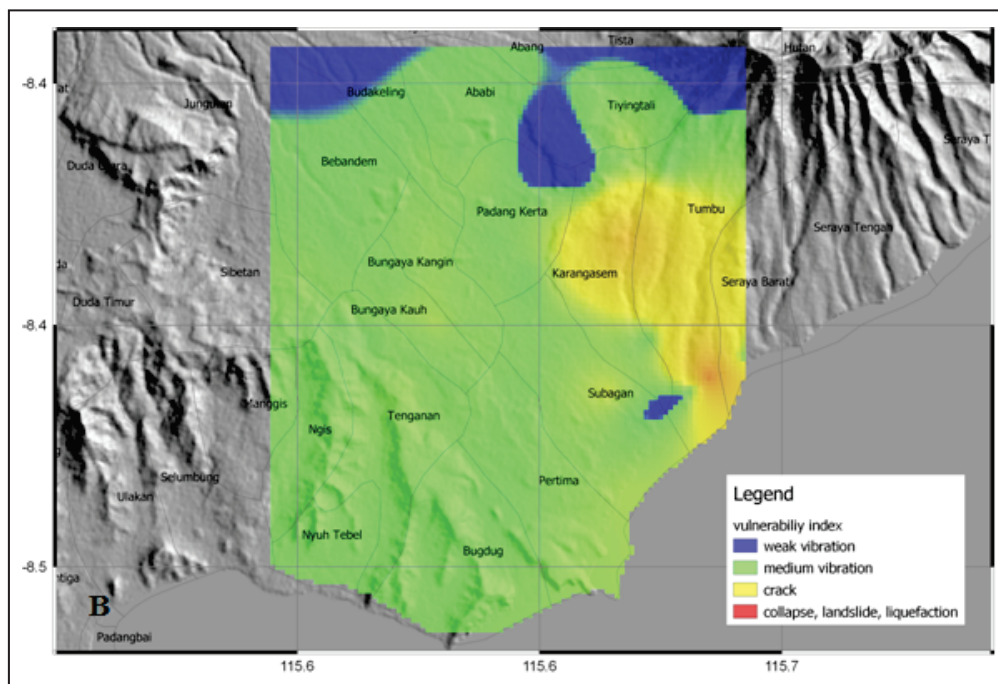
Pada Gambar 6, dengan asumsi PGA sebesar 0,1 g, potensi longsor, bangunan runtuh dan likuefaksi relatif tidak begitu besar. Sebagian besar wilayah merasakan getaran medium hingga lemah, dengan kemungkinan terjadi retakan-retakan ringan pada bangunan yang berada di kecamatan Karangasem, Tumbu dan Seraya Barat. Di wilayah tersebut mulai muncul kemungkinan runtuhnya bangunan ketika guncangan meningkat menjadi 0,2 g (Gambar 7).

Pada skenario gempa bumi dengan PGA 0,3 g (Gambar 8) dan 0,4 g (Gambar 9), potensi longsor, bangunan runtuh dan likuifaksi meluas terutama di bagian timur Kota Amlapura dimana morfologi pedataran bertemu morfologi pegunungan bergelombang (daerah berwarna kuning-merah). Salah satu daerah yang berpotensi tinggi terdampak adalah kawasan Ngurah Rai, yang pernah mengalami kerusakan berat pada gempa Karangasem 2004 (Mw 6,2)

Peta sebaran nilai V_s^{30} (Gambar 3) dan potensi bahaya gempa bumi tinggi (Gambar 9) memperlihatkan bahwa potensi likuifaksi/ runtuhnya bangunan tidak selalu berada pada daerah dengan nilai V_s^{30} rendah, namun bisa juga terjadi pada



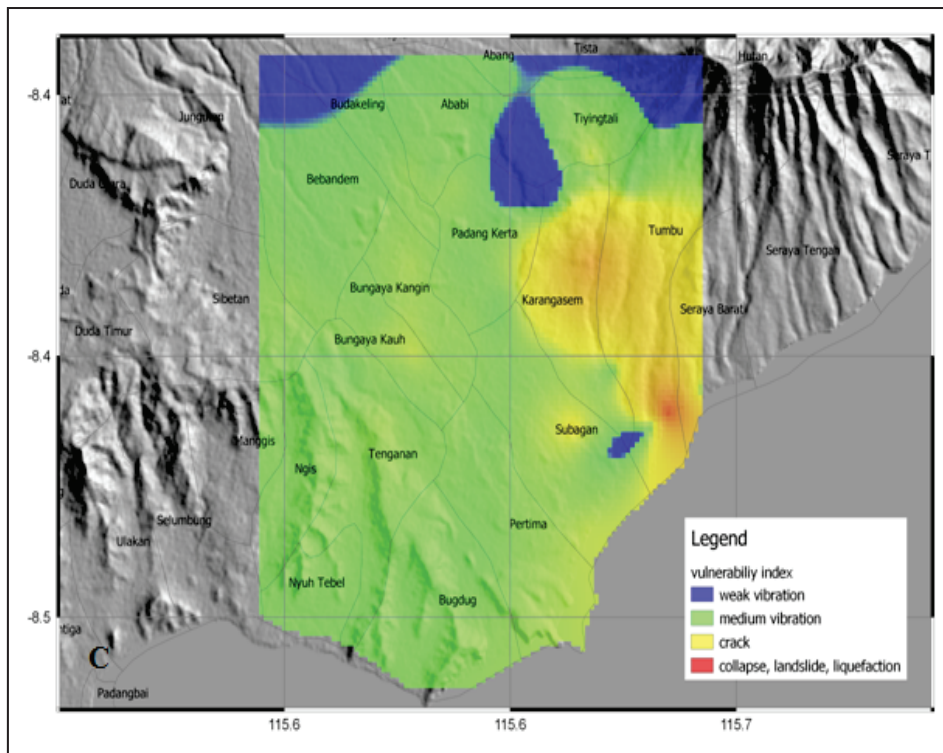
Gambar 6. Tingkat kerentanan yang terjadi dengan asumsi nilai PGA sebesar 0,1 g. Dampak gempa bumi hanya berupa getaran mulai kecil hingga sedang dengan sebagian kecil mengalami retak-retak.



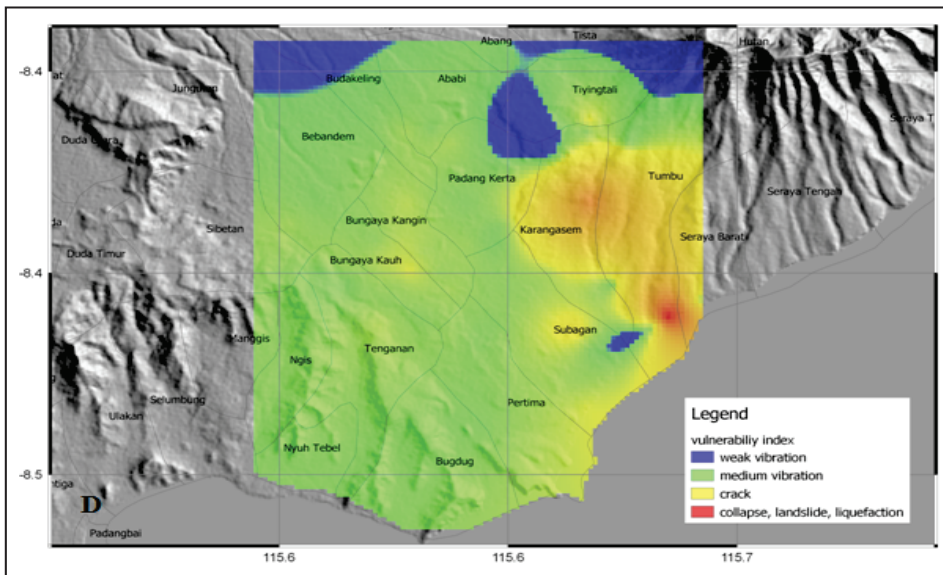
Gambar 7. Tingkat kerentanan gempa bumi dengan asumsi nilai PGA 0,2 g. Pada skenario ini mulai muncul potensi terjadi runtuhnya bangunan yaitu di wilayah kec. Karangasem, Tumbu dan Seraya Barat.

daerah dengan nilai V_s^{30} sedang atau tinggi, seperti yang terjadi di wilayah Ngurah Rai (kelas tanah B) serta Taman Ujung (kelas tanah D). Potensi bahaya tinggi di wilayah Ngurah Rai yang

memiliki sifat tanah keras terjadi karena terdapat kandungan air yang cukup tinggi yang terindikasi oleh nilai V_p/V_s antara 4 hingga 7, sehingga selain runtuhnya bangunan dapat juga terjadi likuifaksi.



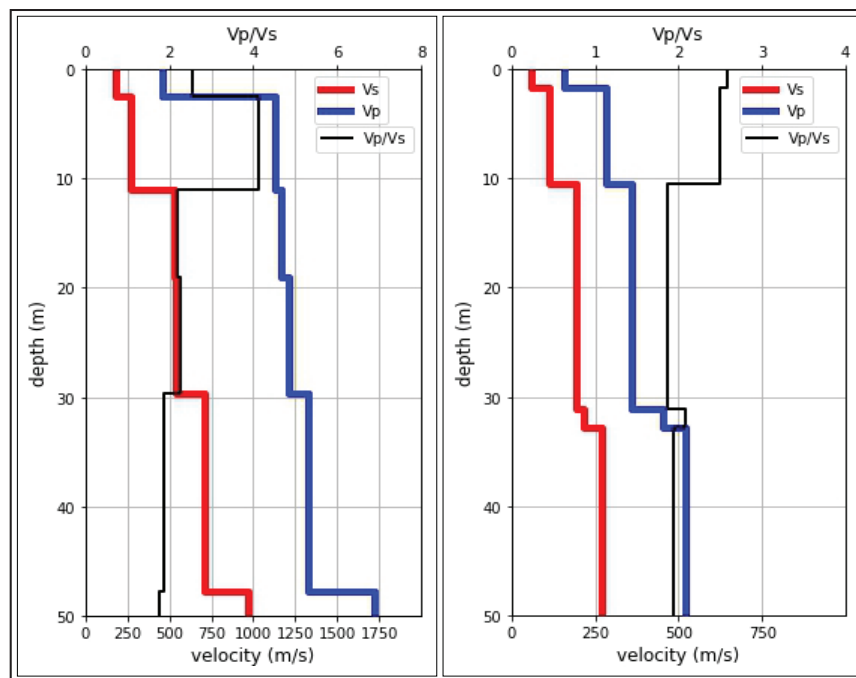
Gambar 8. Skenario gempa bumi dengan nilai PGA 0,3 memperlihatkan adanya peningkatan potensi longsor, bangunan runtuh dan likuefaksi.



Gambar 9. Potensi dampak guncangan gempa bumi yang terjadi ketika nilai PGA sebesar 0.4 g, potensi longsoran, bangunan runtuh dan likuefaksi semakin meluas.

Namun wilayah Taman Ujung yang memiliki nilai V_p/V_s rendah memiliki potensi bahaya tinggi karena sifat batuan yang lunak (Gambar 10). Pengetahuan tentang potensi dampak guncangan gempa bumi sangat berguna dalam mem-

buat perencanaan pembangunan serta penataan ruang dan wilayah, yang dapat disesuaikan dengan mitigasi bencana gempa bumi untuk mencegah korban jiwa serta meminimalkan kerugian ekonomi.



Gambar 10. Nilai V_p/V_s di wilayah Ngurah Rai (kiri) dan Taman Ujung (kanan). Potensi bahaya gempa di wilayah Ngurah Rai yang memiliki sifat tanah keras cukup tinggi karena nilai V_p/V_s yang tinggi, sedangkan di Taman Ujung potensi bahaya tinggi terjadi karena sifat tanahnya yang lunak.

KESIMPULAN

Hasil inversi HVSR menunjukkan kondisi tanah di wilayah Amlapura bersifat lokal. Parameter amplifikasi akibat kondisi tanah lokal dapat digunakan untuk menilai potensi guncangan gempa bumi seperti potensi likuefaksi/ gerakan tanah/ kerusakan berat pada bangunan ketika terjadi guncangan dengan nilai pga tertentu. Pada skenario PGA 0,3 g dan 0,4 g, potensi longsor, bangunan runtuh dan likuefaksi meluas terutama di bagian timur Kota Amlapura.

UCAPAN TERIMA KASIH

Apresiasi kami berikan kepada Bapak Nia K. Praja, Gangsar Turjono, serta staf BPBD Karangasem yang telah membantu dalam pengambilan data mikrotremor, serta semua pihak yang telah membantu terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Bailey, B. L., R. D. Miller, S. Peterie, J. Ivanov, D. Steeples, and R. Markiewicz. *Implications*

of V_p/V_s ratio on shallow P and S reflection correlation and lithology discrimination. SEG Houston 2013 Annual Meeting.

Castagna, J.P., M.L. Batzle, dan R.L. and Eastwood. 1985. *Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in elastic silicate rocks*. Geophysics, 50 (4), 571-581. DOI: 10.1190/1.1441933

Celebi, M., J. Prince, C. Dietel, M. Onate, and G. Chavez. 1987. *The Culprit in Mexico City-Amplification of Motions*. Earthquake Spectra, 3 (2). DOI: 10.1193/1.1585431

Cipta, A. 2018. *Frequency Dependent of the Building Damage during the 2018 Banjarnegara Earthquake: The Blessing of Being Different*. Bulletin Vulkanologi dan Bencana Geologi, 12 (2), 59-69.

Cipta, A. P. Cummins, J. Dettmer, E. Saygin, M. Irsyam, A. Rudyanto, and J. Murjaya. 2018a. *Seismic velocity structure of the Jakarta Basin, Indonesia, using trans-dimensional Bayesian inversion of horizontal-to-vertical spectral ratios*. Geophysical Journal International. 215 (1), 431-449. DOI: 10.1093/gji/ggy289

- Cipta, A., P. Cummins, M. Irsyam, and S. Hidayati. 2018b. *Basin Resonance and Seismic Hazard in Jakarta, Indonesia*. Geosciences 2018, 8 (4), 128. DOI: 10.3390/geosciences8040128
- Cipta, A. 2019. *Site and Basin Effects on Seismic Hazard in Indonesia: Sulawesi and Jakarta Case Studies*. Dissertation: The Australian National University.
- Cipta, A., A. Rudyanto, H. Afif, R. Robiana, A. Solikhin, A. Omang, Supartoyo, S. Hidayati. 2021. *Unearthing the buried Palu–Koro Fault and the pattern of damage caused by the 2018 Sulawesi Earthquake using HVSR inversion*. Geological Society, London, Special Publications, 501 (1), 185-203. DOI: 10.1144/SP501-2019-70
- Cruz-Atienza, V.M., Tago, J., Sanabria-Gómez, J.D., Chaljub, E., Etienne, V., Virieux, J., and Quintanar, L., 2016. Long Duration of Ground Motion in the Paradigmatic Valley of Mexico, *Nature*, 6, 38807, DOI: 10.1038/srep38807.
- Galetzka, J., Melgar, D., Genrich, J.F., Geng, J., Owen, S., Lindsey, E.O., Xu, X., Bock, Y., Avouac, J.-P., and Adhikari, L.B., 2015. Slip pulse and resonance of the Kathmandu basin during the 2015 Gorkha earthquake, Nepal. *Science*, 349, 1091–1095. DOI: 10.1126/science.aac6383
- Hall, R., 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstruction, model and animation. *Journal of Asian Earth Science*, 20, 353 – 431.
- Han, D-h., Nur, A., dan Morgan, D., 1986. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, 51 (11), 2093-2107. DOI: 10.1190/1.1442062
- Kanao, M. and Ito, K., 1992. Attenuation of Coda Waves in the Source Area of the 1990 July 16 Luzon Earthquake, Philippines. *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ*, 42 (2), No. 365.
- Motosaka, M. and M. Nagano. 1996. Analysis of Ground-Motion Amplification Characteristics in Kobe City Considering a Deep Irregular Underground Structure - Interpretation of Heavily Damaged Belt Zone during the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. *Journal of Physics of the Earth*, 44 (5), 577-590. DOI: 10.4294/jpe1952.44.577
- Nakamura Y. 1997. *Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor*. World Congress on Railway Research in Florence, Italy, November 1997.
- Nakamura, Y. 2000. *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications*. World Conferences on Earthquakes Engineering (12WCEE). Auckland, 30 January – 4 February 2000.
- Ozel, O., Cranswick, E., Meremonte, M., Erdik, M., and Safak, E., 2002. Site effects in Avcilar, West of Istanbul, Turkey, from strong- and weak-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (1), 499-508. DOI: 10.1785/0120000827.
- Pilz, M., Parolai, S., Stupazzini, M., Paolucci, R., and Zschau, J. 2011. Modelling basin effects on earthquake ground motion in the Santiago de Chile basin by a spectral element code. *Geophys. J. Int.*, 187, 929–945.
- Pranata, B., T. Yudistira, S. Widiyantoro, B. Brahmantyo, P.R. Cummins, E. Saygin, Z. Zulfakriza, S. Rosalia, and A. Cipta. 2020. Shear wave velocity structure beneath Bandung basin, West Java, Indonesia from ambient noise tomography. *Geophys. J. Int.* 220, 1045–1054. DOI: 10.1093/gji/ggz493
- Rial, J.A., Saltzman, N.G., and Hui, L., 1992. Earthquake-induced resonance in Sedimentary Basin. *Am. Sci.*, 80, 566–578.
- Sato, K., Asano, K., and Iwata, T. 2012. Long-period ground motion characteristics of the Osaka Sedimentary Basin during the 2011 Great Tohoku Earthquake. In: *Proceedings of the Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering*, Lisabon, Portugal, 24–28 September 2012.
- Seekins, L.C. and Boatwright, J., 1994. Ground motion amplification, geology, and damage

- from the 1989 Loma Prieta earthquake in the City of San Francisco. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (1): 16–30.
- Supartoyo, Surono, dan Putranto, E.T., 2014. Katalog Gempabumi Merusak di Indonesia Tahun 1612 – 2014. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Bandung.
- Tsai, V.C., Bowden, D.C., and Kanamori, H. 2017. Explaining extreme ground motion in Osaka basin during the 2011 Tohoku earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 2017, 44, 7239–7244.
- www.earthquake.usgs.gov, [Diakses 2 Juli 2018].