

Optimasi Kurva HVSR, Kemiringan Lereng dan Informasi Geologi
untuk Pemetaan V_s30 dan Kerentanan Seismik Wilayah Likupang***Optimizing HVSR Curves, Slope and Geologic Information
for V_s30 and Seismic Vulnerability Zoning in Likupang***

Athanasius Cipta, Haunan Afif, M. Arifin. J. Pradipto, Amalfi Omang, Akhmad Solikhin

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

e-mail: ciptito@gmail.com

Naskah diterima 2 April 2023, selesai direvisi 5 April 2023, dan disetujui 10 April 2023

ABSTRAK

Teknik Nakamura adalah salah satu pendekatan paling populer untuk menghitung kerentanan seismik. Namun tentu saja ada keterbatasan dalam penerapan teknik ini, yang seringkali diabaikan oleh peneliti pemula. Teknik Nakamura disusun dengan asumsi kecepatan gelombang geser pada batuan dasar = 600 m/s sehingga harus ada pemilahan frekuensi alamiah pada rentang tertentu agar teknik ini menghasilkan estimasi kerentanan seismik yang andal. Selanjutnya, informasi geologi dan kelerengan sangat diperlukan dalam penentuan lokasi titik ukur mikrotremor. Pemilihan titik ukur mikrotremor yang tepat memungkinkan dilakukannya pembuatan formula regresi antara kerentanan seismik dengan parameter geologi dan kemiringan lereng. Penerapan teknik Nakamura terhadap data HVSR dengan distribusi spasial yang mempertimbangkan informasi geologi dan kelerengan menghasilkan peta kerentanan seismik yang berdayaguna.

Kata kunci: Teknik Nakamura, HVSR, kemiringan lereng, kerentanan seismik

ABSTRACT

Owing to its simplicity, Nakamura Technique is one of the most popular approach for estimating seismic vulnerability index. However, this technique contains some limitations in which undergraduate students and early career researchers frequently disobey. The technique was composed by assuming shear-wave velocity on bedrock equals to 600 m/s. Consequently, only natural frequencies in a certain range match well with the technique. Furthermore, information regarding geological condition and slope should be highly considered in designing of acquisition sites of microvibration. The right choice of microtremor sites allows us to create regression formula relates seismic vulnerability index with geologic parameters and slope. Applying Nakamura technique to a set of well spatially distributed HVSR data resulting in a robust seismic vulnerability map.

Keywords: Nakamura Technique, HVSR, slope, seismic vulnerability

PENDAHULUAN

Likupang yang telah ditetapkan sebagai salah satu Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) berada dekat dengan sumber gempa. Selain itu, Likupang didominasi oleh batuan gunung api berumur Kuarter yang dapat mengamplifikasi gelombang gempa bumi. Fenomena amplifikasi akibat kehadiran lahar pernah terjadi pada Gempa Yogyakarta 2006 (Walter, drr., 2008). Kombinasi kedekatan dengan

sumber gempa dan batuan sedimen vulkanik penyusun daerah Likupang, membuat daerah tersebut rentan terhadap bahaya gempa bumi. Namun demikian, studi mengenai kerentanan seismik belum banyak dilakukan.

Nakamura (1989, 1997, 2000) menawarkan teknik sederhana untuk menghitung indeks kerentanan tanah terhadap guncangan gempa bumi. Teknik ini hanya membutuhkan 2 parameter yaitu frekuensi

alamiah (f_0) tanah dan amplitudo pada frekuensi alamiah tersebut (A_0). Model Nakamura ini dibangun dengan dua asumsi dasar yaitu kecepatan gelombang geser pada batuan dasar (V_b) = 600 m/s dan densitas pada batuan dasar sama dengan densitas pada batuan sedimen di atasnya ($\rho_b = \rho_s$). Kedua asumsi tersebut menyiratkan ada rentang f_0 dan A_0 tertentu yang harus dipatuhi sebelum menerapkan Teknik Nakamura. Artikel ini mencoba mengeksplorasi rentang f_0 dan A_0 yang paling sesuai untuk menghitung indeks kerentanan seismik pada batuan sedimen permukaan.

Walaupun dari berbagai segi survei mikrotremor adalah salah satu metode geofisika yang paling fleksibel namun keterbatasan aksesibilitas tidak memungkinkan kita untuk melakukan pengambilan data di daerah tanpa jaringan jalan. Berkat ketersediaan data DEMNAS (<https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/>) dan peta geologi seluruh wilayah Indonesia, dapat dibuat formula regresi yang menjelaskan hubungan antara kekerasan batuan permukaan ($Vs30$) dengan litologi dan kemiringan lereng. Hubungan erat antara $Vs30$ dengan f_0 (Zhao&Hua, 2013) memungkinkan kita membuat persamaan korelasi antara $Vs30$ dengan indeks kerentanan seismik (K_g).

METODE PENELITIAN

Pengukuran mikrotremor dilakukan di lokasi terpilih dengan mempertimbangkan aspek litologi dan morfologi. Durasi pengukuran minimal 45 menit untuk setiap titik ukur, sehingga berhasil didapatkan data mikrotremor di 73 titik terpilih. Data mikrotremor kemudian diolah dengan perangkat lunak *geopsy* untuk mendapatkan kurva eliptisitas HVSr. *Geopsy* dapat diunduh melalui laman <https://www.geopsy.org/>. Teknik pengolahan data mikrotremor dipaparkan secara lengkap dalam SESAME (2004).

Selanjutnya, inversi kurva HVSr dilakukan untuk mendapatkan nilai profil kecepatan gelombang geser (Vs), kecepatan gelombang primer (Vp), kecepatan gelombang geser pada 30 m teratas batuan ($Vs30$) dan densitas batuan. Dalam artikel ini, pembahasan dibatasi hanya pada

$Vs30$ dan turunannya saja. Kurva HVSr juga menyediakan informasi frekuensi dan amplitudo puncak (*peak frequency and amplitude*). Frekuensi puncak kerap disebut frekuensi alamiah atau frekuensi resonansi dan ditulis dengan notasi f_0 sementara amplitudo puncak diberi notasi A_0 . Melalui Teknik Nakamura, f_0 dan A_0 diolah untuk mendapatkan nilai kerentanan seismik (K_g). Selanjutnya, *shear-strain* (γ) didapatkan dengan mengalikan K_g dengan percepatan tanah puncak (PGA).

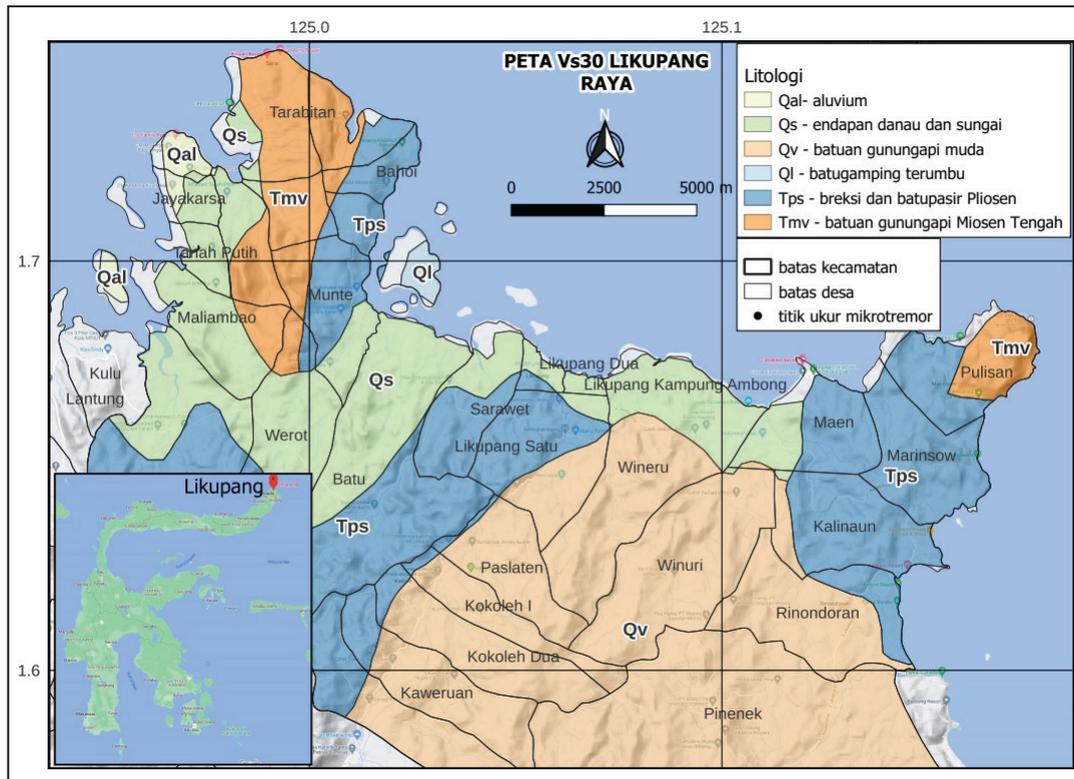
Untuk mengatasi keterbatasan distribusi spasial data, dibuatlah formula korelasi antara $Vs30$ dengan litologi dan kemiringan lereng. Setelah itu dibuat persamaan korelasi antara $Vs30$ dan K_g . Nilai $Vs30$ hasil inversi diasimilasi dengan nilai $Vs30$ hasil persamaan korelasi untuk mendapatkan peta zonasi. Demikian asimilasi data dilakukan untuk K_g untuk mendapatkan peta kerentanan seismik.

$Vs30$ hasil inversi hvsr dan regresi. Pengukuran mikrotremor dilakukan di Likupang Raya yang meliputi Kecamatan Likupang Barat, Likupang Selatan dan Likupang Timur. Dengan membandingkan lokasi titik pengukuran dengan peta geologi, diketahui bahwa 2 titik berlokasi di satuan aluvium (Qal), 20 titik di satuan endapan danau dan sungai (Qs), 16 titik di satuan batuan gunungapi muda (Qv), 26 titik di breksi dan batupasir (Tps), dan 8 titik di formasi batuan gunungapi berumur Miosen Tengah (Tmv).

Dari sudut pandang geomorfologi titik pengukuran mikrotremor yang berada di daerah bermorfologi datar (kemiringan lereng 0-2°), landai (2-7°), bergelombang (7-15°) dan curam (15-35°) masing-masing 14, 26, 24 dan 4 buah. Sementara ditinjau dari sisi elevasi, titik pengukuran berada pada ketinggian berkisar antara 1 hingga 190 m dpl (Gambar 1).

Keterbatasan akses jalan membuat sebagian besar wilayah Likupang Raya tidak terliput pengukuran. Namun karena lokasi titik-titik pengukuran sudah mempertimbangkan litologi dan morfologi, maka dapat dibuat persamaan regresi yang menghubungkan $Vs30$ dengan

Optimasi Kurva HVSR, Kemiringan Lereng dan Informasi Geologi untuk Pemetaan $Vs30$ dan Kerentanan Seismik Wilayah Likupang



Gambar 1. Lokasi Penelitian: (a) DAS Sumatera, (b) DAS Kuranji, (c) Lokasi Penelitian.

litologi dan *slope-topography*. Wald & Allen (2007) berpendapat bahwa *slope-topography* memiliki korelasi yang baik dengan $Vs30$ hasil pengukuran *strong-motion*. Sementara Shen-Tu, dr. (2010) mengatakan bahwa metoda geologi memiliki akurasi yang lebih baik dibandingkan metoda *slope-topography* dalam mengestimasi nilai $Vs30$. Oleh karena itu, dengan mengikuti Matsuoka dr (2006), Wakamatsu dr (2006) dan Wakamatsu&Matsuoka (2006), dibuat persamaan korelasi $Vs30$ dengan litologi, kemiringan lereng (*slope*) dan elevasi. Penerapan pendekatan ini diharapkan menghasilkan nilai $Vs30$ yang lebih akurat dari pada hanya mempertimbangkan parameter litologi atau morfologi saja. Untuk membuat persamaan korelasi antara $Vs30$ dengan kemiringan lereng dan elevasi, $Vs30$ hasil inversi dikelaskan berdasarkan litologi tempat pengambilan data. Langkah kedua, tiap kelas litologi dibagi lagi berdasarkan morfologi sehingga didapat kelas litologi Qs dan Qal (karena hanya ada 2 titik di litologi Qal dan keduanya berada di pedataran, maka Qal disat-

ukelaskan dengan Qs) dengan kemiringan lereng kurang dari 3° , Qs dengan kemiringan lereng $3^\circ-10^\circ$, Qs dengan kemiringan lereng lebih dari 10° dan seterusnya untuk litologi lain. Langkah ketiga adalah melakukan pembuatan persamaan regresi. Pembagian kelas juga harus mempertimbangkan populasi setiap kelas, sehingga dimungkinkan pembagian kelas berdasarkan kemiringan lereng (*slope*) yang sedikit berbeda (Tabel 1).

Tabel 1 memperlihatkan beberapa kelas memiliki koefisien korelasi (R^2) yang baik namun beberapa kurang baik bahkan nyaris tidak memiliki korelasi, yaitu kelas Tps , *slope* $3^\circ-10^\circ$. Oleh karena itu kelas Tps , *slope* $3^\circ-10^\circ$ akan diabaikan dalam perhitungan. Persamaan pada Tabel 1 kemudian digunakan untuk menghitung $Vs30$ di daerah yang tidak terliput pengukuran. Karena setiap kelas memiliki nilai maksimum dan minimum $Vs30$ hasil inversi, maka hasil perhitungan yang berada di luar nilai maksimum-minimum data pengukuran akan diabaikan.

Tabel 1. Pembagian kelas dan persamaan regresi untuk setiap kelas

Kelas	Persamaan regresi	R ²	Min <i>Vs30</i>	Max <i>Vs30</i>
<i>Qs+Qal, slope <3°</i>	$110.86 + 124.85 \cdot \text{LN}(\text{elevasi}) - 57.49 \cdot \text{LN}(\text{slope})$	0.5609	123	595
<i>Qs, slope 3°-10°</i>	$198.53 - 338.31 \cdot \text{LN}(\text{elevasi}) + 660.21 \cdot \text{LN}(\text{slope})$	0.4740	168	637
<i>Qs, slope 10°-17°</i>	$-1740.36 + 63.45 \cdot \text{LN}(\text{elevasi}) + 720.88 \cdot \text{LN}(\text{slope})$ [data terlalu sedikit, hanya 3 data sehingga tidak dilakukan perhitungan korelasi untuk kelas ini.]	1.0000	189	514
<i>Qv, slope <5°</i>	$690.70 - 89.36 \cdot \text{LN}(\text{elevasi}) + 52.76 \cdot \text{LN}(\text{slope})$	0.8288	306	4
<i>Qv, slope 5°-13°</i>	$951.18 - 106.24 \cdot \text{LN}(\text{elevasi}) - 103.53 \cdot \text{LN}(\text{slope})$	0.7225	219	592
<i>Tmv, slope <5°</i>	$517.79 + 98.53 \cdot \text{LN}(\text{elevasi}) - 394.60 \cdot \text{LN}(\text{slope})$	0.4641	153	557
<i>Tmv, slope 5°-15°</i>	$1190.05 + 9.30 \cdot \text{LN}(\text{elevasi}) - 339.79 \cdot \text{LN}(\text{slope})$	0.8895	304	660
<i>Tps, slope <3°</i>	$182.07 + 62.70 \cdot \text{LN}(\text{elevasi}) + 40.79 \cdot \text{LN}(\text{slope})$	0.4437	189	520
<i>Tps, slope 3°-10°</i>	Korelasi antara <i>Vs30</i> dengan kemiringan lereng dan elevasi sangat buruk (R ² sangat rendah) sehingga tidak dilakukan perhitungan korelasi untuk kelas ini.	0.1829	335	637
<i>Tps, slope 10°-17°</i>	$1856.37 - 17.50 \cdot \text{LN}(\text{elevasi}) - 510.94 \cdot \text{LN}(\text{slope})$	0.6976	288	597

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil asimilasi antara *inverted Vs30* (*Vs30* yang didapat dari inversi HVSr) dengan *correlated Vs30* (*Vs30* yang didapat dari perhitungan persamaan korelasi pada Tabel 1) ditunjukkan dalam Gambar 2. Gambar tersebut juga menunjukkan bahwa hasil perhitungan gagal menyelesaikan masalah di bagian selatan satuan *Qv* dan *Tps* serta beberapa bidang kecil di satuan lain. Kegagalan disebabkan baik karena kurangnya populasi data dalam kelas maupun karena tidak adanya titik pengukuran di lokasi dengan kemiringan lereng lebih dari 17°. Sebagai catatan, elevasi diambil dari DEMNAS yang diproduksi oleh Badan Informasi Geospasial yang dapat diunduh di laman DEMNAS, <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/demnas>. Kemiringan lereng dihitung dari data DEM tersebut.

Nakamura (1997) mendefinisikan indeks kerentanan tanah (K_g) sebagai hasil bagi antara kuadrat amplifikasi tanah permukaan (A_0) dengan frekuensi dominan tanah (f_0), dengan asumsi shear-strain efektif (e) = 60% dan kecepatan gelombang geser pada batuan dasar (V_b) = 600 m/s, serta densitas batuan dasar sama dengan densitas tanah permukaan ($\rho_b = \rho_s$). Nilai A_0 dan f_0 didapat dari kurva eliptisitas yang dibuat dengan membagi spektral gelombang komponen horizontal dengan komponen vertikal. Gelombang yang digunakan dapat berupa mikrotremor maupun gempa.

Secara umum, persamaan untuk menghitung indeks kerentanan (Nakamura, 1997) adalah:

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0} \dots\dots\dots (1)$$

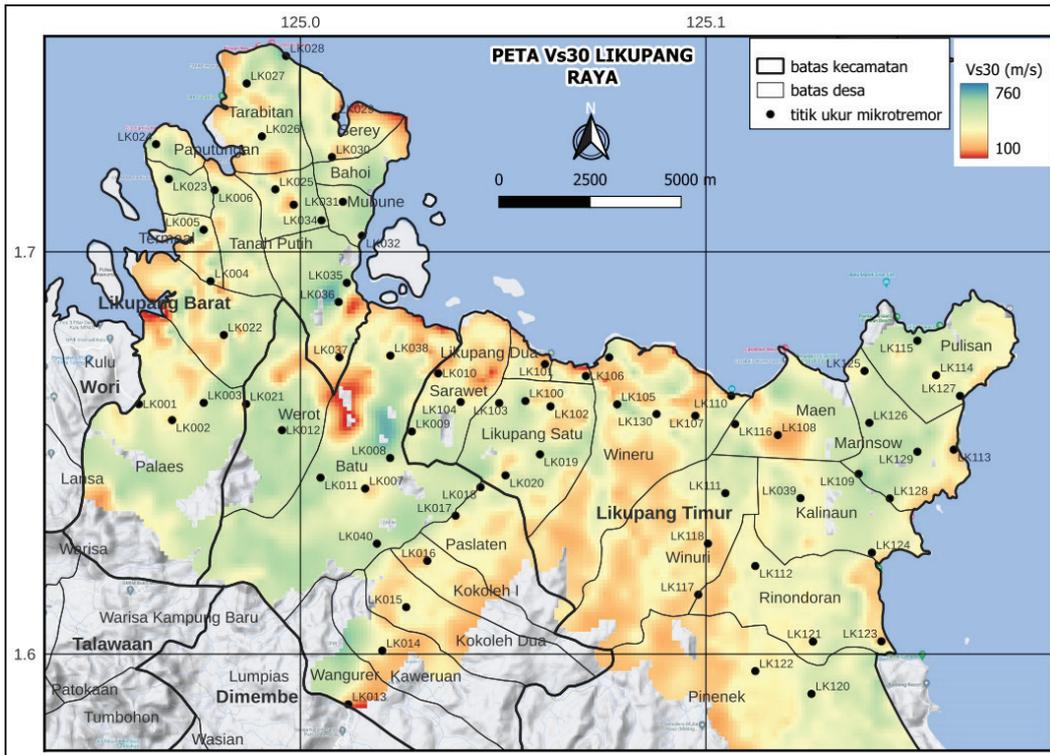
Dengan asumsi $\rho_b = \rho_s$ sehingga $A_0 = V_b/V_s$, maka dengan persamaan gelombang harmonik dalam pipa organa terbuka, h ($h = 1/4 \lambda$) dapat diestimasi dengan persamaan:

$$h = \frac{V_b}{4A_0 \cdot f_0} \text{ atau } f_0 = \frac{V_b}{4A_0 \cdot h_0} \dots\dots\dots (2)$$

Kemudian dengan asumsi bahwa yang disebut tanah permukaan adalah tanah sampai kedalaman maksimum 20 m ($h \leq 20$ m), $V_b = 600$ m/s dan $A_0 \geq 2$ (*peak amplitude* yang kurang dari 2 tidak dianggap *peak* [Uebayashi 2012]), maka $f_0 \geq 3.75$ Hz. Sedangkan jika ketebalan tanah minimum adalah 5 m maka $f_0 \leq 15$ Hz. Sementara jika $A_0 = 5$, maka untuk $5 \leq h \leq 20$ frekuensi natural adalah $1.5 \leq f_0 \leq 6$ Hz. Berdasarkan pertimbangan tersebut maka hanya frekuensi dominan pada rentang $1.5 \leq f_0 \leq 15$ Hz dan $A_0 \geq 2$ yang akan digunakan dalam perhitungan K_g .

Langkah selanjutnya, dengan cara yang sama seperti pada a, dengan cara yang sama seperti pada pembuatan persamaan korelasi K_g , data *Vs30* hasil inversi dikelaskan sesuai klasifikasi NEHRP sehingga didapat 2 kelas yaitu kelas D (tanah) dan C (batuan lunak/tanah keras) dengan rentang nilai *Vs30* masing-masing antara 174-346 m/s dan 361-547 m/s. Langkah selanjutnya adalah membuat persamaan korelasi antara K_g dan *Vs30* untuk masing-masing kelas tanah (Tabel 2).

Optimasi Kurva HVSR, Kemiringan Lereng dan Informasi Geologi untuk Pemetaan $Vs30$ dan Kerentanan Seismik Wilayah Likupang



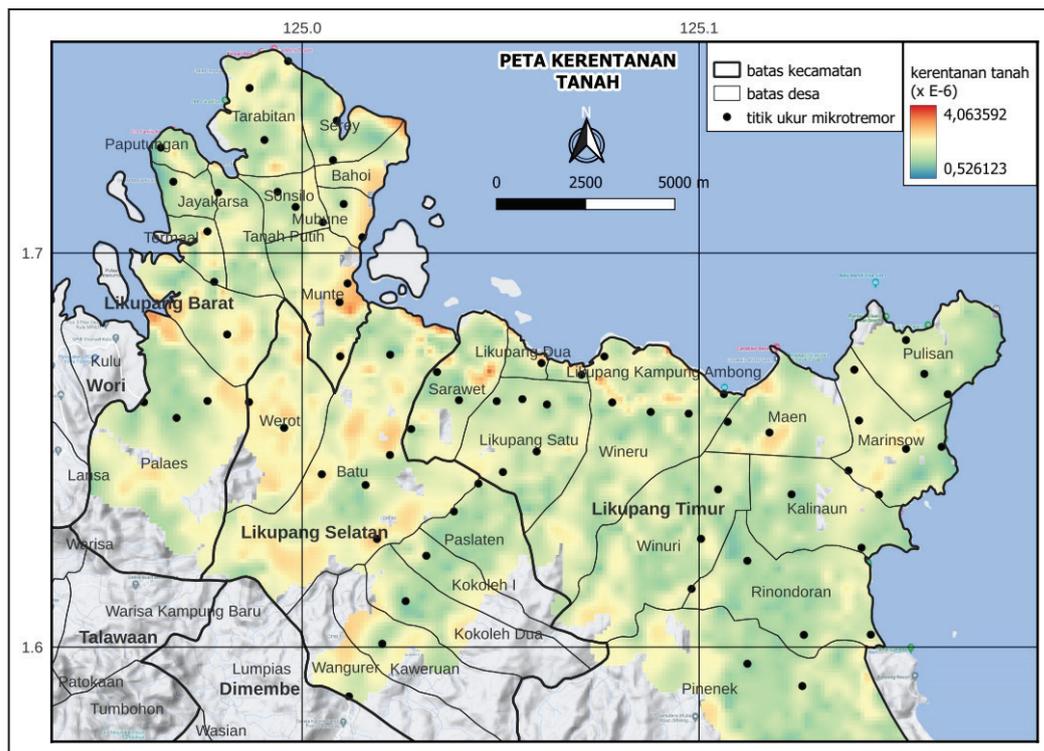
Gambar 2. Peta $Vs30$ hasil asimilasi antara inverted $Vs30$ dan correlated $Vs30$.

Tabel 2. Persamaan korelasi antara K_g dengan $Vs30$

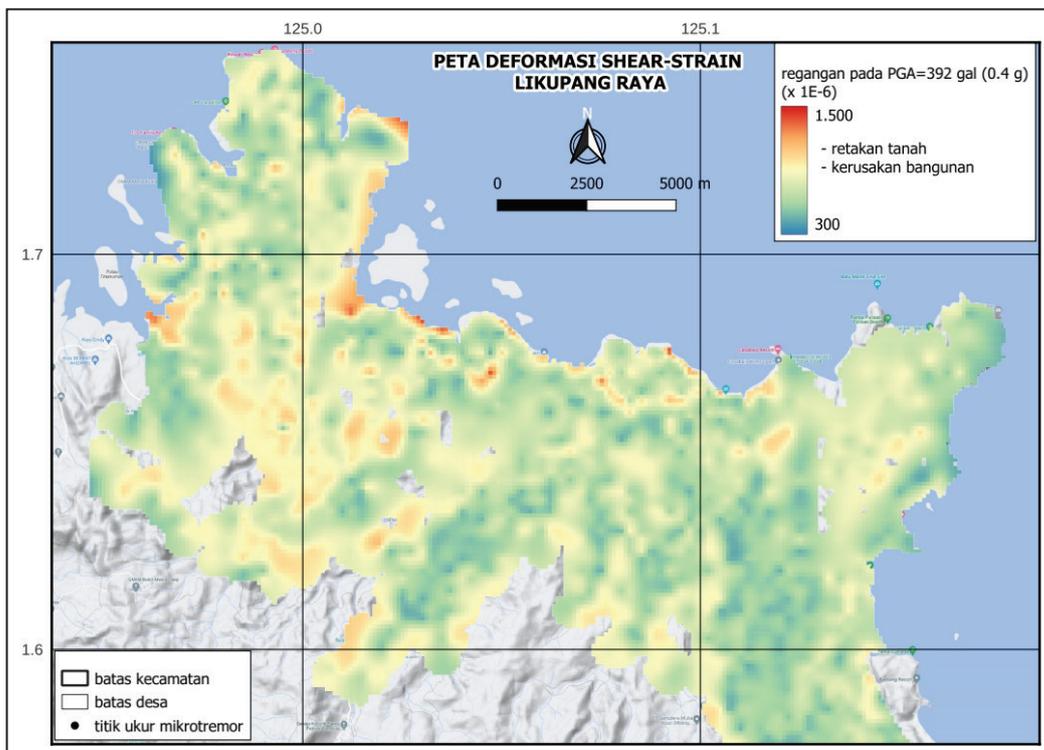
Kelas	Max $Vs30$	Min $Vs30$	Persamaan Korelasi	R^2
D	174	346	$K_g = -1.9810 \text{ LN}(Vs30) - 13.0145$	0.6343
C	361	547	$K_g = 2.9606 \text{ LN}(Vs30) - 16.2539$	0.6347

Langkah terakhir adalah menghitung nilai K_g di titik *inverted* $Vs30$ dan *correlated* $Vs30$ di sub-bab $Vs30$ Hasil Inversi dan Regresi. Nilai K_g tersebut ditampilkan pada peta di Gambar 3. Setelah memiliki nilai K_g , dapat dilakukan simulasi bahaya akibat guncangan gempa bumi. Dengan mengalikan K_g dengan PGA pada batuan dasar didapat nilai *shear-strain*, yaitu nilai yang menggambarkan sifat dinamis tanah saat menerima guncangan (Nakamura, 1997). Skenario wilayah Likupang Raya terlanda guncangan gempa bumi dengan PGA pada batuan dasar 0.4 g ditunjukkan dalam Gambar 4. Kedua gambar tersebut menunjukkan bahwa dengan PGA 0.4 g, ancaman yang paling mungkin dialami oleh Likupang adalah retakan tanah dan kerusakan bangunan. Kecil kemungkinan terjadi likuifaksi, gerakan tanah dan kompaksi tanah.

Pemilahan data f_0 dan A_0 sebelum menerapkan Teknik Matsuoka memberikan luaran K_g yang lebih masuk akal, dalam arti berkesesuaian dengan $Vs30$, litologi dan kemiringan lereng. Daerah bermorfologi datar yang disusun oleh batuan lunak akan memiliki nilai $Vs30$ rendah dan kerentanan tinggi sebaliknya daerah berbukit yang tertutup sedimen lebih tipis memiliki nilai $Vs30$ lebih tinggi dan K_g lebih rendah. Shen-Tu, dr. (2010) mengklaim bahwa $Vs30$ berkesesuaian dengan kondisi geologi, kemudian Wald&Allen (2007) mengemukakan pendapat bahwa $Vs30$ berkorelasi erat dengan kemiringan lereng serta Wakamatsu, dr. (2006) yang menemukan bahwa litologi (jenis, ketebalan dan umur) dan morfologi (kemiringan lereng dan elevasi) memberi-



Gambar 3. Kerentanan tanah (K_g) Likupang Raya hasil asimilasi antara K_g dari HVSR mikrotremor dengan kalkulasi dengan persamaan regresi antara K_g mikrotremor dengan $V_s/30$.



Gambar 4: Peta *shear-strain* yang menggambarkan sifat dinamis tanah ketika menerima guncangan gempa bumi. Dengan skenario PGA 0.4 g melanda wilayah Likupang Raya, kemungkinan bangunan roboh, likuifaksi, gerakan tanah dan kompaksi tanah sangat kecil. Dengan catatan rumah dibangun dengan konstruksi baik dan tidak ada pemotongan lereng secara sembarangan.

kan kontribusi terhadap besar-kecilnya nilai $Vs30$. Selanjutnya Zhao&Hu (2013) menemukan eratnya hubungan antara periode dominan (T_0) dengan $Vs30$ untuk yang periode lebih pendek dari 0.4 s ($T_0 < 0.4$ s). Dengan kata lain untuk situs yang memiliki frekuensi tinggi ($f_0 > 2.5$ Hz) korelasi antara $Vs30$ dan f_0 sangat tinggi sementara pada situs dengan $f_0 < 2.0$ Hz, korelasi f_0 - $Vs30$ melemah.

Mengabaikan pemilahan f_0 dan A_0 sebelum menerapkan Teknik Matsuoka akan menghasilkan nilai K_g yang sangat liar, dalam arti nilai K_g hampir tidak berkorelasi dengan litologi maupun morfologi. Saadudin, drr. (2015), menerapkan Teknik Nakamura tanpa melakukan seleksi, memasukkan semua nilai f_0 antara 0.42 hingga 12.2 Hz dan A_0 antara 1.54 hingga 10.67, sebagai konsekuensi daerah dengan morfologi dan batuan penyusun serupa memiliki nilai K_g yang sangat bervariasi. Mereka mengklaim bahwa daerah di Padang yang mengalami kerusakan akibat Gempa Padang 2009 memiliki nilai K_g yang tinggi tapi tidak dapat menjelaskan mengapa daerah pebukitan dengan nilai K_g jauh lebih tinggi tidak mengalami kerusakan signifikan.

Artikel yang ditulis oleh Januarta, drr. (2020) dan Fahrurijal, drr. (2020) memberikan contoh yang baik tentang pengaruh f_0 dan A_0 terhadap K_g . Para penulis melakukan riset di daerah dengan morfologi yaitu pebukitan landai hingga bergelombang. Morfologi pebukitan tidak memungkinkan terjadinya pengendapan sedimen secara intensif sehingga tidak akan ditemui endapan tebal batuan lunak. Hal ini tercermin dari nilai f_0 yang sebagian berkisar antara 2 hingga 6 Hz kecuali dua titik yang memiliki nilai f_0 lebih rendah dari 2 Hz. Rentang frekuensi ini sudah masuk dalam kriteria yang disebut dalam sub-bab 3.2. Oleh karena itu, hasil perhitungan K_g di Padalarang tersebut menunjukkan kesesuaian dengan kondisi geologi lokal.

KESIMPULAN

Kerentanan seismik dapat dihitung dengan secara mudah dengan Teknik Matsuoka yang hanya memerlukan dua parameter yaitu f_0 dan A_0 . Pemilihan f_0 dan A_0 menjadi kunci untuk menghasilkan indeks kerentanan seismik yang andal. Frekuensi alamiah dalam rentang 2.5-10 Hz memberikan hasil K_g paling realistis namun nilai f_0 berkisar 2.0-15 Hz masih berterima. Selain itu rentang A_0 yang disarankan adalah 2 hingga 5 walaupun A_0 hingga 8 masih bisa diterima.

Keterbatasan data pengukuran dapat diselesaikan dengan mencari korelasi antara pemrosesan hasil pengukuran ($Vs30$ dan K_g) dengan informasi geologi dan kemiringan lereng. Korelasi bisa dilakukan jika pengukuran mikrotremor dilakukan di titik terpilih yang mempertimbangkan kondisi geologi dan morfologi sehingga setiap kelas geomorfologi memiliki populasi yang cukup.

KESIMPULAN

PVMBG telah menyediakan dana dan fasilitas penelitian lapangan, untuk itu penulis mengucapkan terimakasih. Selanjutnya ucapan terimakasih juga ditujukan kepada Tudi atas kerjasama selama melakukan survei lapangan. Kepada para penelaah yang telah memberikan masukan berharga, penulis sampaikan apresiasi.

DAFTAR PUSTAKA

- DEMNAS, <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/demnas>
- Fahrurijal, R., A. Tohari, I. Muttaqien. 2020. Mikrozonasi Seismik Di Wilayah Ancaman Sesar Lembang Antara Seksi Cihideung Dan Gunung Batu Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor. *J. Ris.Geo.Tam* 30(1), 81-92. DOI: 10.14203/risetgeotam2020.v30.1092
- Januarta, G.H., T. Yudistira, A. Tohari, E.I. Fattah. 2020. Mikrozonasi Seismik Wilayah

- Padalarang, Kabupaten Bandung Barat Menggunakan Metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR). *J. Ris. Geo. Tam* 30(2), 143-152. DOI: 10.14203/risetgeo-tam2020.v30.1087
- Nakamura, Y. 1997. Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor. *World Congress on Railway Research*, Florence, Nov. 1997. https://www.sdr.co.jp/papers/wcrr_vulnerability_indices.pdf
- Saaduddin, Sismanto dan Marjiyono. 2015. Pemetaan Indeks Kerentanan Seismik Kota Padang Sumatera Barat dan Korelasinya dengan Titik Kerusakan Gempabumi 30 September 2009. Proceeding, Seminar Nasional Kebumihan Ke-8 *Academia-Industry Linkage*, 15-16 Oktober 2015.
- SESAME. 2004. Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations: Measurements, Processing and Interpretation (pp. 1-62). *SESAME European Research Project WP12*.
- Shen-Tu, B., M. Mahdyiar, Y. Rong, K. Shabestari, dan J. Guin. 2010. On The Correlation of Site Classifications Estimated from Surface Geology, Topographic Slope, And Shear-Wave Velocity Measurements. *Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*. July 25-29, 2010, Toronto, Ontario, Canada. Paper No 406
- Uebayashi, H., H. Kawabe dan K. Kamae. 2012. Reproduction of microseism H/V spectral features using a three-dimensional complex topographical model of the sediment-bedrock interface in the Osaka sedimentary basin. *Geophys. J. Int.* (2012) 189, 1060–1074. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05408.x
- Wakamatsu, K., & M. Matsuoka. 2006. Development of the 7.5-arc-second engineering geomorphologic classification database and its application to seismic microzoning. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. Tokyo. Vol. 81, 317-324 h. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/BERI/pdf/IHO81317.pdf>
- Wakamatsu, K., M. Matsuoka, & K. Hasegawa, 2006, GIS-based Nationwide Hazard Zoning Using the Japan Engineering Geomorphologic Classification Map, *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 849, California, USA
- Wald, D.J., and T.I. Allen, 2007, Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplifications. *Bull. Seism. Soc. Am.* 97(5), 1379-1395. https://pubs.usgs.gov/of/2007/1357/pdf/OF07-1357_508.pdf
- Walter, T.R., R. Wang, B.-G. Luehr, S. Parolai, A. Anggraini, E. Günther, M. Sobiesiak, H. Grosser, H.-U. Wetzel, C. Milkereit, P. J. K. S. Brotopuspito, P. Harjadi, dan J. Zschau. 2008. 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* 9(5). doi: <https://doi.org/10.1029/2007GC001810>
- Zhao, J.X. and H. Xu. 2013. A Comparison of V S30 and Site Period as Site-Effect Parameters in Response Spectral Ground-Motion Prediction Equations. *BSSA*, Vol. 103, No. 1, pp. 1–18, doi: 10.1785/0120110251