

KAJIAN KERENTANAN TANAH BERDASARKAN ANALISIS HVSR DI DAERAH SEMBURAN LUMPUR SIDOARJO DAN SEKITARNYA, JAWA TIMUR, INDONESIA

SOIL VULNERABILITY ASSESSMENT BASED ON HVSR ANALYSIS IN AND AROUND THE LUSI ERUPTION AREA, EAST JAVA, INDONESIA

Karyono^{1,2,3}, Ildrem Syafri¹, Abdurrokhim¹, Masturyono³, Supriyanto Rohadi³, Januar Arifin³,
Ajat Sudrajat³, Adriano Mazzini², Soffian Hadi⁴, Agustya³

¹Padjadjaran University (UNPAD), Bandung, Indonesia

²CEED, University of Oslo, Norway

³Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics (BMKG), Jakarta, Indonesia

⁴BPLS, Indonesia

*E-mail : karyonosu@gmail.com

Naskah masuk: 21 September 2016; Naskah diperbaiki: 10 November 2016; Naskah diterima: 8 Desember 2016

ABSTRAK

Aluvium merupakan fitur geologi yang memiliki sifat rentan terhadap pengaruh gempabumi. Daerah Porong dan sekitarnya tempat semburan Lumpur Sidoarjo (Lusi) terjadi merupakan daerah dataran yang ditutupi oleh endapan aluvium Delta Brantas, sehingga daerah ini merupakan zona lemah yang rentan terhadap pengaruh gempabumi. Hal ini diperkuat dengan adanya sesar Watukosek di daerah tersebut. Dengan tujuan untuk membuktikan hal tersebut maka dilakukan observasi seismik dengan cara memasang 71 stasiun pengamat gempabumi temporal yang tersebar di daerah Sidoarjo dan sekitarnya. Hasil analisis *Horizontal Vertical Spectral Ratio* (HVSR) terhadap data seismik diperoleh sebaran frekuensi natural bawah permukaan lebih rendah di daerah Lusi yaitu 0,4Hz. Hasil analisis juga mengungkap bahwa di daerah tersebut mempunyai amplifikasi tanah sebesar 5,2 dan tingkat kerentanan tanah sebesar 56, lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lain di sekitarnya. Karena letaknya di zona lemah, maka berimplikasi bahwa Lusi menjadi sensitif terhadap gangguan luar misalnya dampak kejadian gempabumi menjadi lebih besar pada daerah ini.

Kata kunci: Lusi, HVSR, frekuensi natural, amplifikasi tanah, index kerentanan

ABSTRACT

Alluvium is a geological feature characterized by high risk vulnerability influenced by the earthquakes. Porong and surrounding areas where the eruption of Lumpur Sidoarjo's (Lusi) occurred are areas covered by alluvium sediment of Brantas Delta, as consequences this area is a weak zone characterized by high risk vulnerability as well. This is also supported by the present of Watukosek fault system in this area. To proved, we deployed 71 temporary seismic stations distributed in and around Sidoarjo area. The Horizontal Vertical Spectral Ratio (HVSR) analysis revealed that the natural frequency in Lusi area is about 0.4Hz, this is lower than other part areas. The analysis also revealed that this area have soil amplification about 5.2 and soil vulnerability index about 56, these are higher compared with other part areas. These results support that this area is a weak zone. Because of its location in a weak zone, this implies that Lusi became sensitive to external perturbation for example the earthquake events would have greater impact to this area.

Keywords: Lusi, HVSR, natural frequency, ground amplification, vulnerability index

1. Pendahuluan

Pada tanggal 29 Mei 2006, muncul erupsi lumpur di beberapa tempat di Timur Laut Pulau Jawa di Kabupaten Sidoarjo menyusul terjadinya gempa bumi 6.3 yang mengguncang Pulau Jawa [1]. Erupsi-erupsi tersebut terjadi di sepanjang sesar Watukosek yang telah tereaktivasi [2]. Secara fisiografi daerah Sidoarjo termasuk dalam Zona Kendeng yang diapit oleh Zona Rembang di bagian utara dan Zona Solo di bagian selatan [3]. Berdasarkan pemetaan yang dilakukan oleh Santoso dan Suwarti [4], geologi Lembar Malang dan daerah Sidoarjo serta bagian utaranya secara umum tersusun oleh batuan sedimen klastika, epiklastika, piroklastika, dan aluvium, berumur dari Plistosen Awal hingga Resen. Aluvium merupakan fitur geologi yang memiliki sifat rentan terhadap efek gempa bumi, hal ini diperkuat dengan adanya sesar watukosek daerah tersebut [5]. Hal ini menguatkan hipotesis bahwa daerah Lusi berada di daerah zona lemah sehingga yang memiliki resiko tinggi terhadap efek gempa bumi. Untuk membuktikannya, maka kajian kerentanan tanah terhadap risiko gempa bumi di daerah tersebut sangat diperlukan.

Kajian mikrozonasi mampu memberikan gambaran bahaya seismik dasar di daerah setempat serta memberikan batas-batas wilayah yang rawan terhadap efek gempa bumi lokal [6]. Parameter yang dapat digunakan untuk keperluan ini adalah frekuensi natural. Nakamura dkk. (2000), mengemukakan metode analisis bawah permukaan menggunakan Mikrotremor. Pada tahun 2008, Herak (2008)

mengenalkan teknik prediksi dan analisis frekuensi natural dengan metode HVSR.

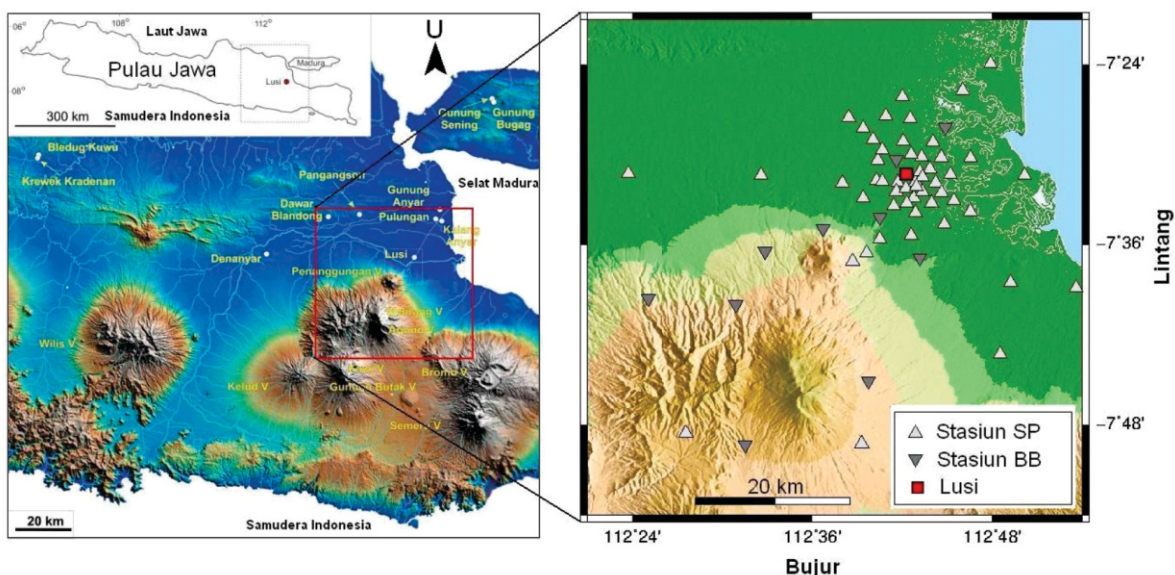
Sifat fisik dan mekanik tanah juga memiliki pengaruh terhadap karakterisasi bawah permukaan [7]. Hal ini selanjutnya dikorelasikan lagi dengan kondisi geologi, sehingga mendapatkan kesimpulan yang lebih valid. Beberapa parameter yang akan dibahas dalam penelitian ini antara lain adalah frekuensi natural, amplifikasi tanah dan indeks kerentanan tanah yang merupakan parameter hasil turunan dari rekaman data seismik melalui analisis HVSR.

Amplifikasi gelombang seismik dapat disebabkan oleh empat hal, yaitu adanya lapisan lapuk yang terlalu tebal di atas lapisan keras, adanya frekuensi natural yang rendah, frekuensi dominan gempa bumi dan geologi setempat yang memiliki energi gempa bumi yang terjebak di lapisan lapuk dalam waktu yang lama [7]. Tujuan kajian ini adalah untuk membuktikan bahwa daerah Lusi merupakan zona yang paling lemah /rentan di daerah Sidoarjo dan sekitarnya dengan cara melakukan analisis kerentanan tanah.

2. Metode Penelitian

Pemasangan Stasiun Pengamat Gempabumi.

Dalam kajian ini untuk memperoleh data seismik dilakukan pemasangan 71 stasiun (Gambar 1) pengamat gempa bumi temporal yang terdistribusi di daerah penelitian, sebaran stasiun lebih padat di sekitar daerah Lusi. Pemasangan peralatan dan akuisisi data dilakukan pada bulan Mei 2016.



Gambar 1. A) Peta Pulau Jawa (bagian kiri atas) dan peta elevasi daerah bagian Timur Jawa dengan busur vulkanik dan back arc basin dibagian Timur Laut. Lusi dan gunung lumpur lainnya terletak disepanjang sesar Watukosek (garis putih putus-putus). B) Lokasi stasiun *short-period* dan *broadband* yang dipasang saat eksperimen di lapangan.

Peralatan seismograf yang digunakan terdiri dari sensor BB *broadband* (Trilium 120s compact dan Guralph CMG3T) dan sensor SP *shortperiod* (Leinartz 3Dlite dan Mark L-4-3D). *Sampling rate* yang digunakan adalah 100 Hz. Sensor umumnya diletakan dalam tanah yang digali dengan kedalaman sekitar 1 m, dibungkus dengan bahan isolasi anti panas dan lembab kemudian ditutup lagi dengan tanah. Untuk meningkatkan nilai rasio *signal* terhadap *noise*, sensor diletakan diatas dasar plat semen.

Analisis HVSR dan Tingkat Kerentanan Tanah.

Suatu daerah yang memiliki karakteristik frekuensi natural rendah sangat rentan terhadap bahaya getaran gelombang gempabumi periode panjang [8], sehingga dapat menyebabkan kerusakan bangunan yang ada di atasnya. Amplifikasi tanah adalah kontras parameter perambatan gelombang (densitas dan kecepatan) antara batuan dasar (*bedrock*) dan sedimen di atasnya. Nilai amplifikasi perambatan gelombang seismik akan semakin bertambah apabila perbedaan antara parameter tersebut semakin besar. Nakamura (1989) menyebutkan bahwa efek lokal, amplifikasi dan frekuensi natural merupakan faktor yang penting dalam mitigasi bencana suatu tempat[9].

Pada kajian ini parameter yang digunakan adalah frekuensi natural, amplifikasi tanah dan index kerentanan tanah. Secara sederhana analisis HVSR atau H/V adalah merupakan analisis data getaran tanah untuk memperoleh nilai frekuensi natural (f_0), amplifikasi tanah (a_m) dan index kerentanan tanah (K_g). Dalam kajian ini analisis H/V dilakukan dengan menggunakan *software* Geopsy[10] yang hasilnya berupa kurva HVSR. Definisi H/V dari getaran tanah pada frekuensi f , adalah $(H/V)_m(f)$ yang dapat dijelaskan pada persamaan 1.

$$(H/V)_m(f) = \sqrt{\frac{Pns(f) + Pew(f)}{Pud(f)}} \quad (1)$$

Dengan $Pud(f)$ adalah spektrum power fourier dari pergerakan arah vertikal/atas-bawah, $Pns(f)$ adalah spektrum power fourier dari pergerakan arah utara-selatan, $Pew(f)$ adalah spectrum power fourier dari pergerakan arah timur-barat.

Data hasil observasi lapangan kemudian dilakukan windowing untuk memilah antara data asli dan noise dengan menerapkan anti triggering pada data mentah (*waveform*). Selain itu juga dilakukan *smoothing* data dengan *frequency of interest* antara 0-15Hz. Hasil yang diperoleh kemudian dilakukan *Fast Fourier Transform* untuk mendapatkan kurva HVSR. Dari kurva HVSR akan diperoleh informasi berupa frekuensi natural dan amplifikasi tanah. HVSR merupakan sebuah kurva penggabungan antara komponen Horizontal dan komponen vertikal.

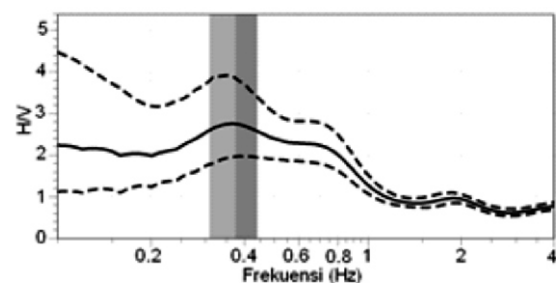
Hasil ekstraksi frekuensi natural dan amplifikasi dari kruva HVSR untuk setiap titik kemudian diplot dengan *software* GMT [11]. Selanjutnya, analisis karakteristik tanah dilakukan perhitungan Indeks Kerentanan Tanah (Vulnerability Index). Nakamura (2000) memberikan persamaan indeks kerentanan tanah (K_g) seperti pada persamaan (2)[7]. Dari hasil analisis, secara keseluruhan akan diketahui sebaran frekuensi natural, amplifikasi tanah dan tingkat kerentanan serta asosiasinya dengan kondisi geologi pada daerah penelitian.

$$K_g = \frac{A_m^2}{f_0} \quad (2)$$

Dengan K_g adalah indeks kerentanan tanah, A_m adalah amplifikasi tanah dan f_0 adalah frekuensi natural.

3. Hasil dan Pembahasan

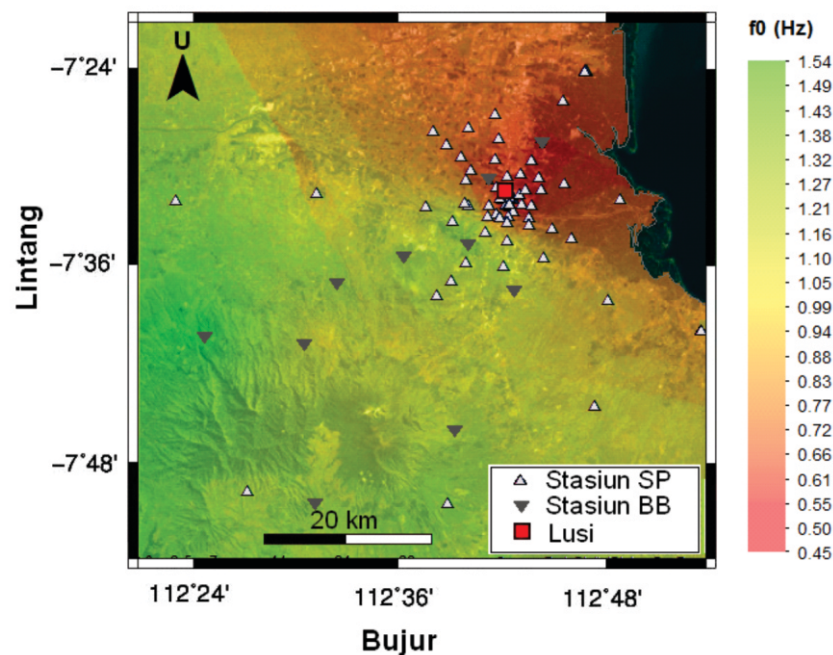
Analisis sebaran peta frekuensi natural digunakan untuk menganalisis zona-zona rentan. Zainudin dkk (2010) menyatakan bahwa frekuensi natural erat hubungannya dengan kedalaman *bedrock*[4]. Hubungan frekuensi natural berbanding terbalik dengan kerentanan tanah, apabila dihubungkan dengan Nakamura (2000) yang menyatakan bahwa frekuensi natural rendah menunjukkan daerah rentan terhadap efek lokal maka daerah yang memiliki kedalaman *bedrock* relatif dalam cenderung lebih rentan. Gambar 2 menunjukkan contoh ekstraksi frekuensi natural dari lokasi di titik pengamatan di dalam Lusi.



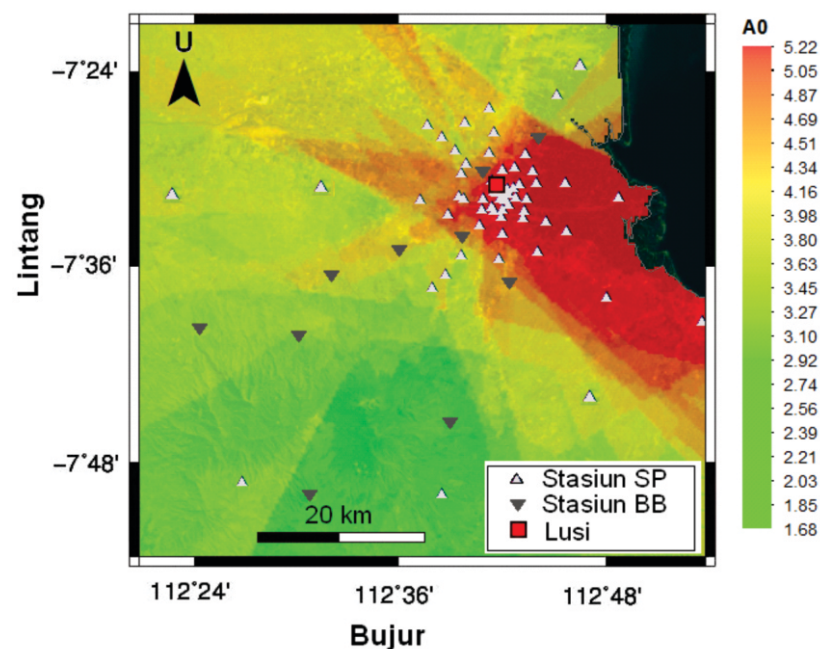
Gambar2. Contoh hasil kurva HVSR di titik pengamatan di dalam Lusi, menunjukkan bahwa nilai frekuensi natural adalah 0,4Hz

Gambar. 3 menunjukkan bahwa daerah timur laut lokasi penelitian cenderung memiliki nilai frekuensi natural yang lebih rendah dibandingkan daerah lainya yaitu berkisar antara 0,4-0,72Hz. Daerah di sekitar Lusi memiliki frekuensi natural yang paling rendah yaitu sekitar 0,4Hz, hal ini berimplikasi sebagai zona paling lemah. Daerah-daerah dengan frekuensi natural rendah mengindikasikan bahwa daerah tersebut juga memiliki kedalaman bedrock relatif dalam dan memiliki sedimen lunak yang lebih tebal [3].

Hasil analisis amplifikasi (Gambar 4), menunjukkan bahwa range nilai amplifikasi di daerah penelitian berkisar antara 1,68 -5,22. Amplifikasi merupakan penguatan gelombang yang menjalar pada sedimen lapisan tanah. Sungkono (2011) menunjukkan bahwa faktor amplifikasi dipengaruhi oleh nilai kecepatan gelombang geser Vs, kontras densitas sedimen dan bedrock yang signifikan[12].



Gambar 3. Peta sebaran frekuensi natural, di bagian timur laut lokasi penelitian cenderung mempunyai nilai frekuensi natural yang rendah dibanding bagian lainnya.



Gambar 4. Peta sebaran amplifikasi tanah, di bagian timur laut lokasi penelitian, khususnya Lusi cenderung mempunyai nilai amplifikasi yang lebih tinggi dibanding bagian lainnya.

Dari hasil analisis amplifikasi terlihat sebaran nilai amplifikasi rendah di daerah barat daya dan cenderung tinggi di daerah timur laut. Apabila dikorelasikan dengan Nakamura dkk. (2000) yang menyebutkan bahwa parameter amplifikasi yang dapat merusak bangunan apabila nilainya lebih besar dari 3 dan berasosiasi dengan frekuensi rendah. Peta sebaran frekuensi natural menunjukkan maka daerah timur laut (khususnya sekitar Lusi) yang memiliki resiko paling besar terjadinya kerusakan apabila didirikan bangunan. Jika dilihat dari kajian geologi sekitar, seperti kita ketahui bersama bahwa erupsi lumpur yang kita kenal sebagai Lusi terjadi di daerah ini. Penelitian yang pernah dilakukan [7] menyatakan bahwa amplifikasi lebih dominan dipengaruhi oleh faktor geologi. Namun, dalam penelitian ini hasil dari analisis amplifikasi ini tidak dijadikan acuan primer sebagai dasar karakterisasi tanah. Menurut Wahyu dkk. (2013) penggunaan faktor amplifikasi dalam mengkarakterisasi tanah masih menjadi perdebatan diantara para ahli [7]. Untuk menarik kesimpulan yang tepat, masih diperlukan tambahan parameter yang lain untuk bisa menghubungkan antara nilai frekuensi natural dan amplifikasi tanah dalam mengkarakterisasi tanah. Oleh karena itu, selanjutnya dilakukan perhitungan Indeks Kerentanan Tanah (*Vulnerability Index*).

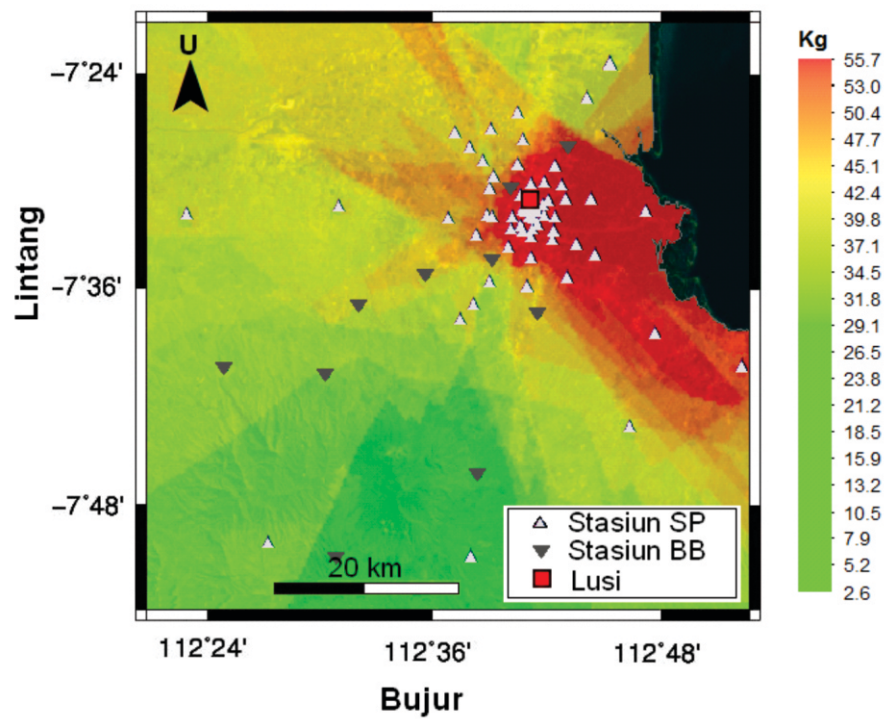
Indeks kerentanan tanah digunakan untuk mengidentifikasi suatu daerah yang rentan terhadap gerakan tanah yang kuat. Hasil dari frekuensi natural dan amplifikasi dihubungkan menggunakan persamaan 2 diatas untuk mendapatkan indeks kerentanan. Indeks kerentanan digunakan untuk memetakan area aluvium dan umumnya menunjukan nilai kerentanan yang tinggi akan berpotensi mengalami likuifaksi [7].

Pada kajian ini hasil range nilai indeks kerentanan tanah adalah berkisar 3-56 (Gambar 5). Jika dikorelasikan dengan penelitian oleh Huan dan Tseng (2002) dan Daryono (2009) maka daerah di timur laut penelitian khususnya daerah Lusi diprediksi rentan terhadap efek gempabumi dan paling berpotensi terhadap potensi likuifaksi karena merupakan zona lemah. Konsentrasi fluida yang ada di Lusi diduga ikut berkontribusi menyebabkan kerentanan yang tinggi di daerah tersebut. Kami berargumentasi bahwa kondisi seperti ini menyebabkan Lusi sensitif terhadap *external perturbation* misalnya adanya aktivitas kegempaan regional mempengaruhi *behavior* Lusi. Pengaruh ini dibuktikan atau ditunjukan oleh adanya perubahan *behavior* Lusi (*eruption flow rate* dan *subsidence*) saat atau sesudah terjadi gempabumi [12]. Kontras indeks kerentanan tanah terlihat di sisi barat daya daerah penelitian. Nilai indeks kerentanan tanah di sisi barat daya rata rata berada di bawah 34.

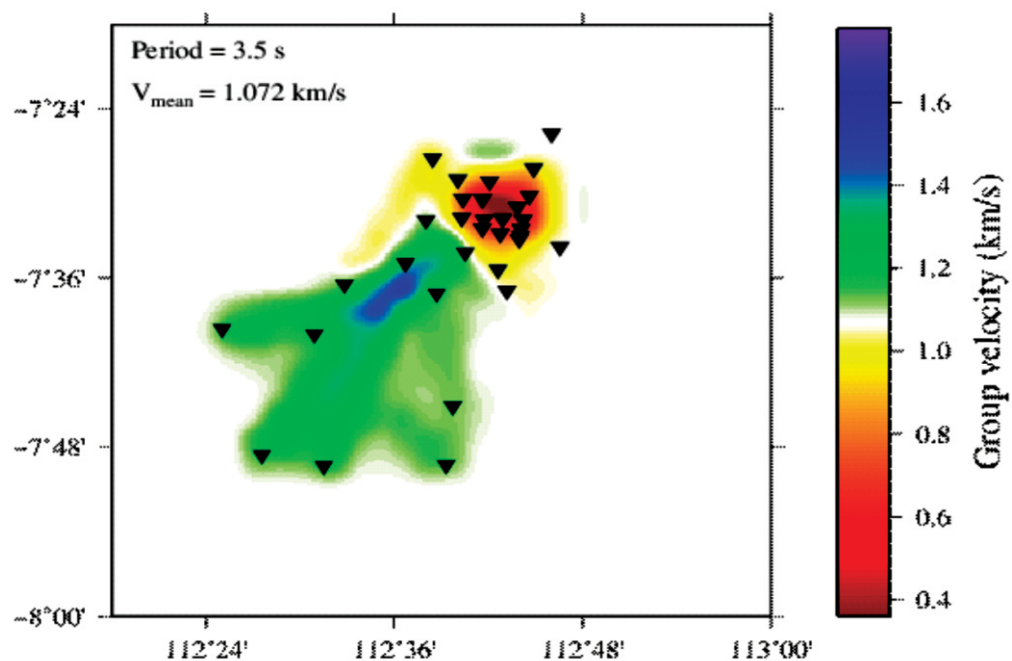
Dari sebaran frekuensi natural, amplifikasi dan kerentanan yang telah di bahas diatas, dapat ditarik kesimpulan awal bahwa daerah penelitian bagian barat daya memiliki kondisi *bedrock* dominan dangkal, *bedrock* dalam ditemukan di daerah timur atau timur laut. Hal ini juga kuatkan oleh Zaennudin dkk (2010) yang mengatakan bahwa di daerah Porong dan sekitarnya tempat semburan Lumpur Sidoarjo (Lusi) terjadi merupakan daerah dataran yang ditutupi oleh endapan aluvium Delta Brantas setebal 100 meter atau lebih. Endapan aluvium ini ke arah selatan langsung kontak dengan batuan vulkanik Gunung Penanggungan, salah satu kerucut tua dari Kompleks Gunung Api Arjuno-Welirang[4].

Stratigrafi batuan yang terdapat di daerah Sidorajo dan sekitarnya dapat dicerminkan oleh stratigrafi sumur eksplorasi minyak dan gas bumi Banjar Panji-1 dan Porong, Sidoarjo. Endapan batuan di wilayah ini diawali dengan terbentuknya batu gamping pada zaman Pliosen yang kemudian ditutupi secara tidak selaras oleh endapan batu pasir vulkanik Pliosen Atas, batu lempung berwarna kebiruan, selang-seling batu pasir dan serpih berumur Plistosen Bawah-Tengah [3].

Karakteristik tanah telah dikaji menggunakan analisis HVSR. Secara fisiografis, daerah Lusi merupakan daerah yang cenderung memiliki nilai frekuensi natural rendah, amplifikasi tinggi dan indeks kerentanan tanah tinggi. Validasi hasil kajian juga dilakukan dengan cara mengkorelasikan hasil analisis frekuensi natural tanah, amplifikasi dan indeks kerentanan dengan hasil tomografi *ambient noise* (gambar 6). yang dilakukan oleh Mohammad dkk (2016) hasilnya menunjukan adanya kecocokan satu sama lain [13].



Gambar 5. Peta sebaran indeks kerentanan tanah, di bagian timur laut lokasi penelitian, khususnya Lusi cenderung mempunyai nilai kerentanan yang lebih tinggi dibanding bagian lainnya



Gambar 6. Plot kecepatan gelombang seismik hasil ambient noise tomography, terlihat bahwa daerah Lusi adalah daerah dengan kecepatan gelombang seismik rendah yang berasosiasi dengan adanya material lunak [15]. Hal ini selaras dengan hasil dari analisis frekuensi natural, amplifikasi dan kerentanan tanah di daerah Lusi.

4. Kesimpulan

Secara keseluruhan daerah Sidorajo dan sekitarnya merupakan daerah mempunyai frekuensi natural yang berkisar antara 0,4-1,54 Hz, amplifikasi tanah berkisar antara 1,68-5,22 dan nilai indeks kerentanan tanah berada dikisaran antara 3-56. Berdasarkan hasil analisis frekuensi natural dan amplifikasi dan indeks kerentanan tanah terungkap bahwa daerah Lusi yang terletak di sisi timur laut lokasi penelitian berada di daerah zona lemah yang rentan atau memiliki resiko tinggi terhadap pengaruh gempabumi. Kondisi-kondisi inilah yang menyebabkan Lusi sensitif terhadap *external perturbation* misalnya adanya aktivitas kegempaan regional yang mempengaruhi perilaku Lusi.

Guna mewaspadai bahaya bencana gempabumi yang mungkin terjadi dimasa yang akan datang, penilaian risiko bahaya gempabumi yang berbasis mikrozonasi kerentanan tanah terhadap gempabumi merupakan hal pokok dan mendasar untuk dilakukan.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih yang sebesar-besarnya diucapkan kepada *the European Research Council under the European Union's Seventh Framework Programme Grant agreement n° 308126 and n°608553 (Project IMAGE)* yang telah memberikan dukungan biaya untuk penelitian ini. Juga kepada *The Centre for Earth Evolution and Dynamics (CEED)* yang memberikan beasiswa untuk kuliah S3 di UNPAD. Kami juga berterimakasih kepada *the Geophysical Instrument Pool Potsdam Germany (GIPP)* yang menyediakan instruments selama eksperimen di lapangan dalam *framework of the LUSI LAB project*. Ucapan terima kasih kepada kedeputian geofisika BMKG yang juga telah menyediakan peralatan untuk pengukuran di lapangan. Secara khusus terima kasih diucapkan kepada UNPAD yang memberikan kesempatan kuliah dan ijin melakukan kegiatan lapangan. Juga kepada BPLS yang mendukung proses selama kegiatan lapangan berlangsung.

Daftar Pustaka

- [1] Mazzini, A., Svensen, H., Akhmanov, G. G., Aloisi, G., Planke, S., Malthe-Sorensen, A., and Istadi, B., 2007, Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia: Earth and Planetary Science Letters, v. 261, no. 3-4, p. 375-388.
- [2] Mazzini, A., Nermoen, A., Krotkiewski, M., Podladchikov, Y., Planke, S., and Svensen, H., 2009, Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release

through piercement structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia: Marine and Petroleum Geology, v. 26, no. 9, p. 1751-1765.

- [3] Bemmelen, R.W.V., 1949, The Geology of Indonesia, Government Printing Office, The Hague
- [4] Santosa, S. dan Suwarti, T., 1992. Geologi Lembar Malang, Jawa. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung
- [5] Istadi, Bambang P., Wibowo Handoko T., Sunardi, Edy, Hadi, Soffian and Sawolo, Nurrochmat (2012). Mud Volcano and Its Evolution, Earth Sciences, Dr. Imran Ahmad Dar (Ed.), ISBN: 978-953-307-861-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/earth-sciences/mud-volcano-and-its-evolution>
- [6] Herak, M., 2008., "Model HVSR: a Matlab tool to model horizontal-to - vertical spectral ratio of ambient noise", Computers and Geosciences, vol.34, hal. 1514–1526.
- [7] Wahyu Tri Sutrisno, Bagus Jaya Santosa, Dwa Desa Warnana, 2013, Profiling Kecepatan Gelombang Geser (Vs) Menggunakan Inversi Spektrum Horizontal-To-Spectral Ratio (HvSR), Jurnal Teknik Pomits Vol. 1, No. 1, (2013) 1-6
- [8] Daryono dkk., 2009, Efek Tapak Lokal (Local Site effect) di Graben Bantul Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor. International Conference Earth Science And Technology. Yogyakarta 6-7 August 2009.
- [9] Nakamura Y, 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of the Railway Technology Research Institute, Japan ;30(1):25–33.
- [10] Marc Wathelet (2002-2011): Geopsyack-2.5.0
- [11] Wessel, P., and Smith, W. H. F. (2003) : The Generic Mapping Tools Version 3.4.3.
- [12] Alwi Husen, Karyono, Adriano Mazzini, 2016, Kumpulan pengamatan *eruption flow rate*, observasi GPS di daerah Lusi dan korelasinya dengan Kejadian gempabumi regional, *unpublished*
- [13] Mohammad J.A, Anne Obermann, Karyono, Adriano Mazzini, Matteo Lupi, 2016, Ambient Noise Tomography in and around Lusi eruption site. Poster. XI.275, EGU Conference, Vienna, April 2015
- [14] Sungkono., 2011. Inversi Terpisah Dan Simultan Dispersi Gelombang Rayleigh Dan Horizontal to Vertical Ratio Menggunakan Algoritma Genetik. Thesis ITS. Surabaya. Thesis ITS
- [15] Nakamura, Y., Sato, T., and Nishinaga, M., 2000.

- Local Site Effect Of Kobe Based On Microtremor Measurement. Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation (6ISCZ) EERI, November 12-15, 2000/ Palm Springs. California
- [16] Zaennudin, A., Badri, I., Padmawidjaja, T., Humaida, H. dan Sutaningsih, N. E., 2010, Fenomena Geologi Semburan Lumpur Sidoarjo, Badan Geologi Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral
- [17] Beroya MAA, Aydin A., 2009. A new approach to liquefaction hazard zonation: Application to Laoag City Northern Phillipina; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; 30, 1338-1351.
- [18] Huang, H.C., Tseng, Y.S. (2002). Characteristics of soil liquefaction using H/V of microtremors in Yuan-Lin Area, Taiwan. *TAO*, Vol. 13, No. 3, 325-338, September 2002.