

INVESTIGASI KERENTANAN TANAH BERPOTENSI LIKUEFAKSI MENGUNAKAN METODE MIKROSEISMIK DI WILAYAH PRAMBANAN, YOGYAKARTA

SITE EFFECT INVESTIGATION FOR LIQUEFACTION BASED ON MICROSEISMIC METHOD IN PRAMBANAN, YOGYAKARTA

Maulana Rizki Aditama¹, Achmad Gunar Saadi², Budi Eka Nurcahya³

*Email: maulanarizkia@unsoed.ac.id

¹Jurusan Teknik Geologi, Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia

^{2,3}Departemen Geofisika, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Abstrak—Metode mikroseismik merupakan suatu metode pasif seismik yang menggunakan sumber pasif bumi. Metode ini dapat digunakan untuk menganalisis potensi efek kerentanan tanah di sekitar wilayah Prambanan, Yogyakarta, Indonesia. Studi kali ini berlandaskan pada teori gempa bumi yang dapat memicu mengaktifkan bahaya lain seperti likuefaksi yang disebabkan karena tanah kehilangan kekuatan akibat kehilangan tegangan yang berasal dari pori batuan yang terisi oleh fluida. Dengan demikian, informasi tentang potensi likuefaksi diperlukan untuk mencegah kerusakan, pada hal ini terfokus pada Candi Prambanan. Teknik pengukuran dan analisis mikrotremor telah berhasil untuk mengidentifikasi keberadaan kerentanan tanah dan potensinya terhadap likuefaksi dengan cara mikrozonasi di banyak tempat di seluruh dunia. Makalah ini menyajikan studi eksperimental mikrotremor untuk penyelidikan karakteristik tanah berdasarkan tiga parameter seismik pasif yaitu frekuensi dominan (f_0), amplifikasi (A_0), dan indeks kerentanan seismic (SVI). Dilakukan pengambilan data sebanyak 56 titik di sekitar Candi Prambanan untuk menyelidiki sifat-sifat tanah di daerah ini. Dalam hasil penelitian ini, perlu dicatat bahwa karakteristik mikrotremor tergantung pada jenis endapan tanah dengan menghasilkan nilai amplifikasi di atas 4 dan nilai indeks SVI berada pada 20-100. Dengan demikian, wilayah penelitian termasuk pada zona berbahaya potensi likuefaksi apabila terjadi gempa lokal maupun regional, terkhusus di wilayah utara dan timur, dibuktikan dengan distribusi nilai A_0 dan SVI yang tinggi. Peta mikrozonasi dari hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi untuk pembangunan dan perencanaan kota di sekitar Prambanan dan mendorong inovasi untuk mengurangi dampak kerentanan seismik dan likuefaksi di sekitar Candi Prambanan.

Kata kunci— Kerentanan tanah, Likuefaksi, Mikroseismik HVSR, Prambanan

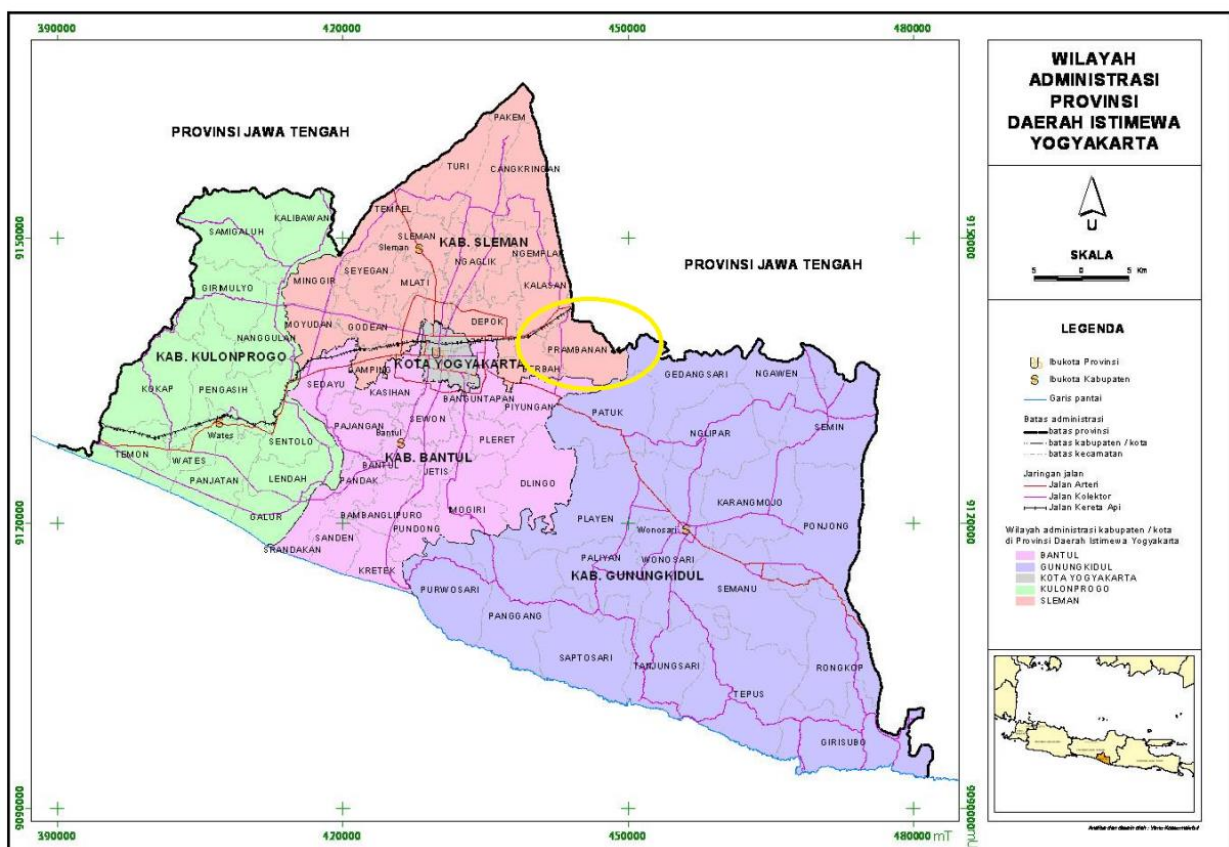
Abstract— Microseismic methods are applied to analyze the site effect potential around Prambanan temple, Yogyakarta, Indonesia. This study is based on the earthquakes theory which can induce a trigger to activate the seismic hazard. Thus, the information about site effect potential was needed to prevent the damages of Prambanan temple in the future, due to the close relationship between the nature microtremors and basic physical properties of rocks. The technique of microtremors measurement has been successful for microzoning procedure in order to determine the vulnerability of seismic index. This paper presents an experimental study of microtremors for investigation ground characteristics based on three main parameters which are dominant frequency (f_0), amplification (A_0), and seismic vulnerability index (SVI). We carried out 56 measurement points to investigate the soil properties in this area. The result of this study shows the characteristics of microtremors are influenced by the type of soil deposits by having more than 4 of amplification and vulnerability index of 20 to 100 values. Site effect plays an important role in microtremors measurements. Hence, it can be used to provide more information to improve the microzonation map of seismic vulnerability index. The microzonation map is expected to be used as a reference for building, urban planning in around Prambanan temple.

Keywords— Liquefaction, micro seismic HVSR, Prambanan, site effect

I. PENDAHULUAN

Wilayah Prambanan merupakan wilayah bersejarah dengan keberadaan salah satu candi tertua di Indonesia yaitu Candi Prambanan. Wilayah kompleks Candi Prambanan berjarak sekitar 17 km di sebelah timurlaut kota Yogyakarta, berbatasan dengan Provinsi Jawa Tengah. Wilayah Prambanan merupakan salah satu wilayah yang terdampak signifikan dari Gempa Bumi Yogyakarta pada Mei 2006 yang diakibatkan oleh aktifnya sesar opak [1]. Gempa tersebut menyebabkan kerusakan serius di beberapa wilayah Prambanan, terutama kondisi

candi yang mengalami *minor collapsed* di beberapa bagian akibat gempa bumi. Sementara itu, sumber gempa (episenter) berjarak 25 km dari wilayah Prambanan. Kondisi ini yang melandasi bahwa wilayah Prambanan merupakan wilayah yang rentan terhadap efek kerentanan tanah yang dapat menyebabkan potensi bencana likuefaksi [2]. Oleh karena itu, studi ini mencakup wilayah Prambanan, khususnya wilayah timurlaut Prambanan, berdekatan dengan sesar opak yang memiliki potensi rentan terhadap bencana likuefaksi (Gambar-1).



Gambar-1. Peta wilayah Yogyakarta, disertai dengan fokus penelitian di wilayah Prambanan (bagian timur laut)

Efek kerentanan tanah dapat terjadi akibat adanya gelombang yang merambat dari sumber gempa (*ground motions*) melalui lapisan yang porus (*permeable*) dan didukung dengan besarnya nilai amplifikasi dari suatu sumber gempa. Potensi kerentanan tanah dapat diinvestigasi dengan menganalisis gelombang vertikal (SV) dan horizontal (SH) dari suatu seismik mikro atau fenomena tremor dari gelombang alam yang dihasilkan bumi. Studi ini dilakukan dengan tujuan untuk melakukan investigasi pada potensi kerentanan tanah (*local site effect*) yang berpotensi gejala likuefaksi [3]. Gejala likuefaksi akan

berkorelasi dengan tingginya nilai indeks kerentanan seismik (*seismic vulnerability index*) yang bersumber pada nilai properti fisis batuan. Keberadaan properti fisis batuan yang rentan atau porus dan lapuk akan memungkinkan fluida dominan untuk menekan dan menggeser lapisan batuan di permukaan [4].

Meningkatnya aktifitas seismik di zona subduksi selatan Pulau Jawa akan meningkatkan potensi bencana yang akan terjadi di wilayah Prambanan. Berdasarkan sebaran *seismic hazard*, secara umum nilai akselerasi tanah (*peak ground acceleration*) di wilayah Jawa berkisar antara 0,2 g ke 0,25 g [5].

Berdasarkan data tersebut, keberadaan kerentanan tanah berpotensi likuefaksi akan dipengaruhi oleh nilai kerentanan seismik (SVI), frekuensi gempa, amplifikasi dan akselerasi tanah (*peak ground acceleration*) [6].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Mikroseismik merupakan suatu metode seismik pasif yang didapatkan dari dalam bumi, dengan range frekuensi sangat kecil (di bawah 1Hz), dan dapat digunakan sebagai analisis gelombang alam dengan menghubungkan nilai Sv dan Sh dari *passive seismic* dengan properti penyusun batuan [7]. Seismik pasif berjalan terus-menerus sebagai sumber energi yang aktif dipancarkan dari dalam bumi. Studi kali ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan mikroseismik di wilayah Prambanan, Kabupaten Sleman, Yogyakarta. Tiga parameter utama dalam menentukan spektrum HVSR berupa nilai frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0) dan indeks kerentanan seismik.

A. Frekuensi dominan / f_0

Nilai frekuensi dominan berhubungan dengan tebal kedalaman bidang pantul suatu gelombang. Bidang pantul tersebut berasosiasi dengan batas antara sedimen lepas dengan batuan keras. Semakin kecil nilai f_0 , akan berasosiasi dengan tebal sedimen atau dalamnya bidang pantul [8].

B. Amplifikasi / A_0

Faktor amplifikasi merupakan faktor percepatan gempa yang terjadi pada permukaan tanah akibat tanah terkena suatu gelombang. Berdasarkan [8], faktor amplifikasi dipengaruhi oleh variasi formasi geologi, ketebalan dan sifat fisis lapisan batuan (seperti deformasi, pelapukan, maupun adanya zona lemah batuan).

C. Indeks kerentanan seismik / K

Indeks kerentanan seismik merupakan kerentanan permukaan tanah yang berakibat deformasi pada saat terjadinya gelombang gempa. Kerentanan ini bisa berasosiasi pada gerakan tanah secara lateral dikarenakan zona lemah dan pori batuan yang terisi fluida [9]

Fokus studi penelitian berlokasi di wilayah Prambanan, yang tergolong pada fisiografi Jawa Tengah bagian selatan-timur yang meliputi kawasan Gunungapi Merapi, Yogyakarta, Surakarta dan

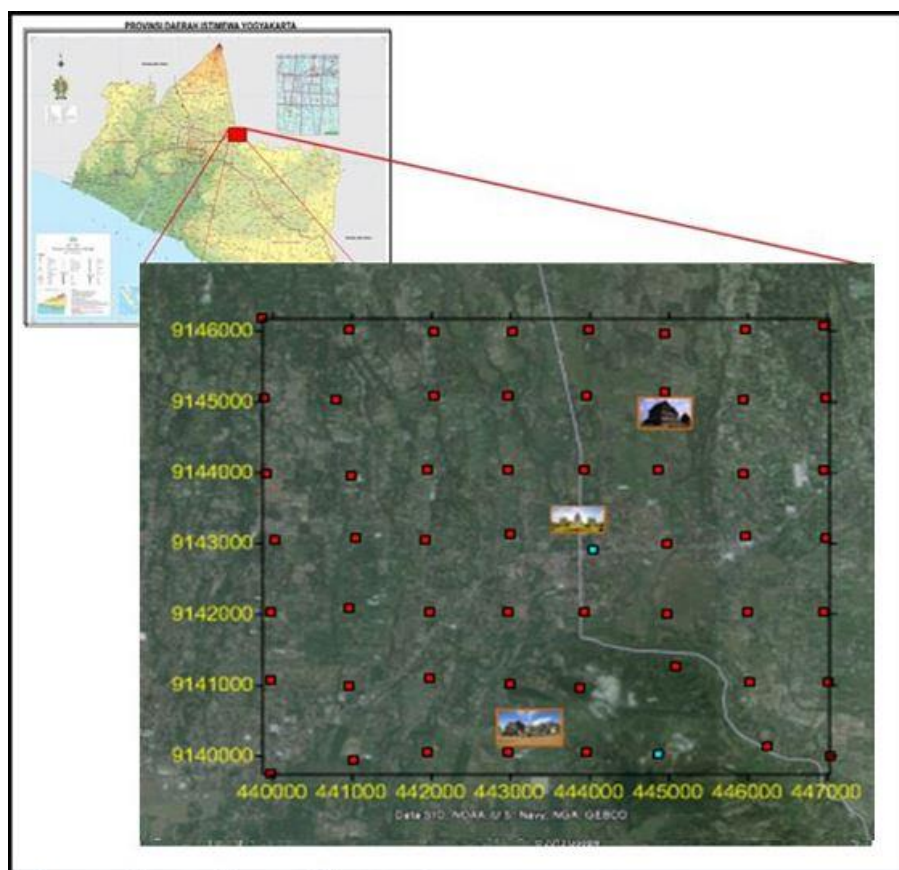
Pegunungan Selatan, dan dapat dibagi menjadi dua zona yang dominan memiliki lapisan piroklastik, yaitu Zona Solo dan Zona Pegunungan Selatan. Zona ini ditempati oleh kerucut Gunung Merapi dan sisa *volcanic ash* Merapi yang dominan di yang merupakan dataran Yogyakarta-Surakarta (± 100 m sampai 150 m) yang kemudian juga tersusun oleh endapan aluvium asal Gunung Merapi. Berdasarkan latar belakang inilah, diperlukan pendekatan berdasarkan parameter fisis terhadap batuan yang ada di wilayah penelitian melalui mikrotremor guna mengetahui pengaruh gelombang gempa terhadap potensi likuefaksi yang ada.

III. METODE

Metode akuisisi mikroseismik dilakukan pada wilayah 7×6 km² dengan 56 titik pengukuran yang dipisahkan sejauh 1 km di setiap poinnya dengan distribusi *normal gridding* (Gambar 2). Di setiap titik dilakukan pengukuran selama 70 menit dengan nilai *sampling rate* 100 Hz berdasarkan eksperimental Nguyen (2009) [8]. Setiap poin pengukuran didesain atau dipilih berdasarkan keberadaan *free-field* untuk menghindari pengaruh *noise* yang disebabkan oleh pohon, fitur topografi, dan aktifitas manusia yang menghasilkan gelombang gangguan [9]. *Raw data* yang dihasilkan akan diolah pada *software* Geopsy untuk mengesttrak komponen *signal broadband* Vp dan Vs menjadi nilai frekuensi dan amplifikasi.

Pemrosesan data (*data processing*) untuk mendapatkan nilai HVSR di setiap titik dilakukan dengan cara berikut: data disaring antara 1 dan 25 Hz oleh *band-pass 4 Butterworth filter*, setelah itu *mean* dan *tren linier* dihapus, kemudian disetiap komponen dari sinyal yang direkam akan dibatasi (*windowing*) dalam deret waktu 10 detik dan untuk setiap *window* waktu, FFT (*Fast Fourier Transform*) dihitung dan dihaluskan [10].

Untuk setiap jendela waktu (*filtering*), rasio spektral antara spektrum rata-rata dari komponen horisontal di atas spektrum komponen vertikal dihitung, menghasilkan nilai HVSR yang didapat dari nilai standar deviasi. Analisis HVSR keseluruhan dilakukan dari 56 pengukuran mikrotremor pada medan bebas. Tiga kriteria untuk kurva HVSR yang baik didasarkan pada hubungan frekuensi puncak dengan panjang gelombang, dengan dihitung nilai standar deviasi dari amplitudo puncak [11].



Gambar-2. Desain survei wilayah penelitian di sekitar area Prambanan, Kabupaten Sleman, Yogyakarta. Titik merah merupakan titik pengukuran yang berjumlah 56 titik dengan spasi 1 km di setiap titik pengukurannya

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Distribusi Nilai Frekuensi Dominan (f_0)

Gambar 3 menunjukkan distribusi frekuensi dominan berdasarkan hasil pengolahan data dan analisis HVSR. Berdasarkan peta distribusi tersebut, nilai frekuensi dominan relatif seragam dan berkisar antara 1-18 Hz. Sementara itu, frekuensi dominan gempa secara teori Nakamura berkisar antara 5-15 Hz [11]. Nakamura mengungkapkan bahwa f_0 memiliki hubungan dengan kedalaman batuan dasar atau *bedrock* dengan hubungan semakin kecil nilai f_0 , semakin besar kedalaman batuan dasar. Area yang ditandai oleh tanda oval kuning sampai merah rentan terhadap kerusakan gempa. Hal ini disebabkan oleh rentang frekuensi gempa yang sama dengan daerah rawan ini, sehingga ada kemungkinan resonansi dapat terjadi selama gempa.

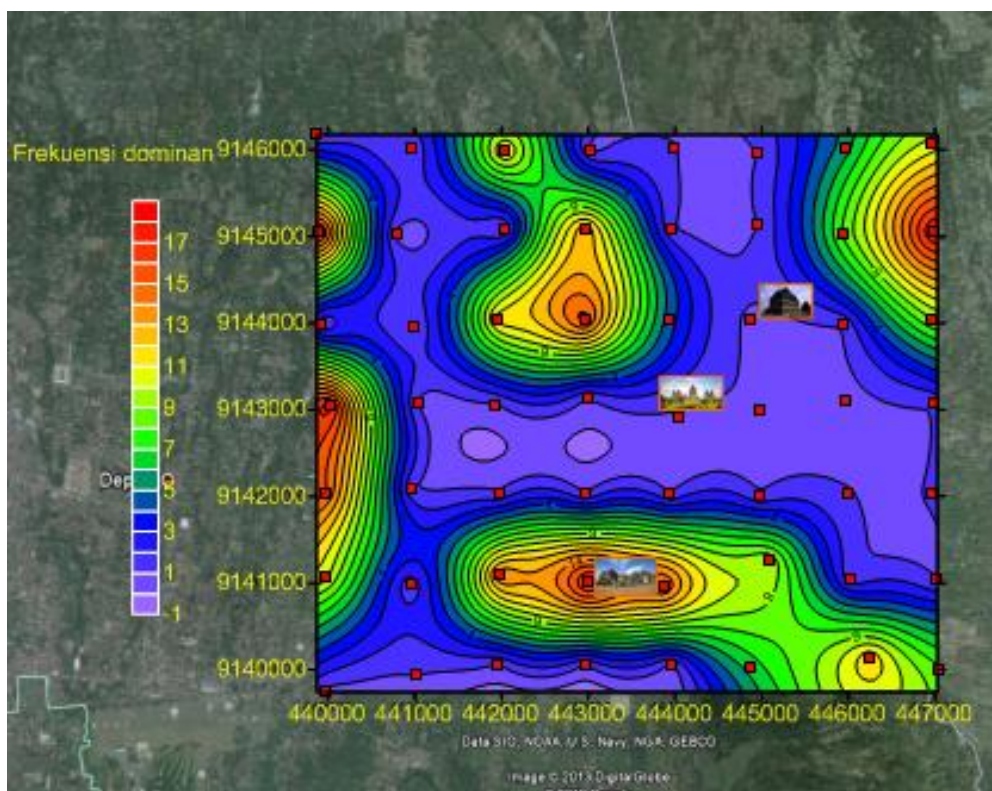
B. Distribusi Nilai Faktor Amplifikasi (A_m)

Gambar 4 menunjukkan faktor amplifikasi (A_m) atau rasio puncak spektrum HVSR di lokasi penelitian, yang menghasilkan nilai dari 1 hingga 7.

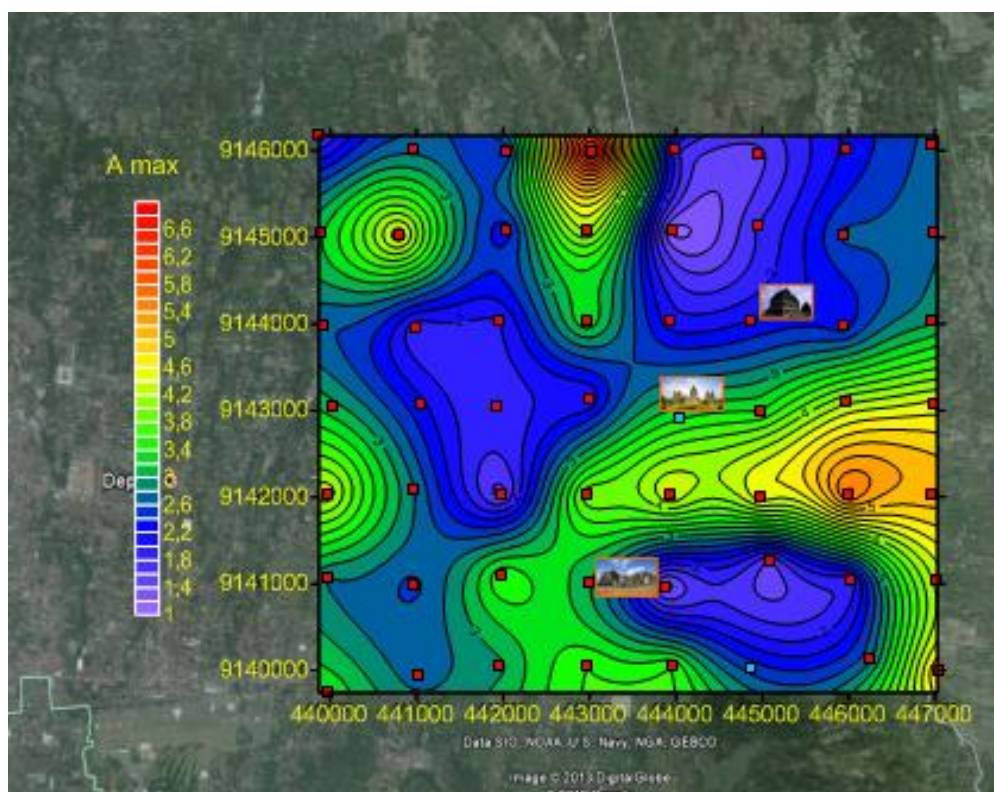
Area yang ditandai oleh tanda oval merah adalah amplifikasi tinggi, yang artinya bahwa daerah tersebut mungkin rusak oleh gempa akibat simpangan amplifikasi yang tinggi. Faktor amplifikasi tinggi ($A_m > 4$) ditemukan hampir di semua area penelitian.

Distribusi faktor amplifikasi tinggi di seluruh area pengukuran menunjukkan bahwa efek topografi bukan satu-satunya faktor yang mengendalikan faktor amplifikasi, akan tetapi lebih didominasi pada keberadaan properti fisis batuan yang lebih dominan.

Berdasarkan hasil studi ini, terdapat beberapa hubungan lokal antara amplifikasi (A_m) dan frekuensi dominan (f_0) sebagai indikator relatif dari keberadaan potensi gerakan tanah. Referensi [12] menjelaskan bahwa faktor amplitudo/amplifikasi tergantung pada kontras impedansi pada batuan. Sehingga, potensi keberadaan likuefaksi dan kerentanan tanah akan dilihat pada nilai amplifikasi yang semakin besar. Klasifikasi nilai amplifikasi berdasarkan [12], menunjukkan hubungan eksperimental pada studi kali ini, dimana studi kali ini masuk pada nilai amplifikasi tinggi karena di atas 4 (Tabel-1).



Gambar-3. Peta distribusi nilai f_0 (frekuensi dominan), menunjukkan keberadaan dominan frekuensi yang berkaitan dengan ketebalan *bed rock* atau batuan dasar, berdasarkan 56 poin pengukuran. Dapat dilihat bahwa frekuensi dominan daerah penelitian berada pada kisaran 1 – 18 Hz, yang mana masuk pada frekuensi rentan gempa berdasarkan Nakamura [10].



Gambar-4. Peta distribusi nilai A_m (amplifikasi), menunjukkan keberadaan nilai rasio puncak HVSR di lokasi penelitian, berdasarkan sebaran 56 titik pengukuran. Nilai A_m pada studi kali ini berkisar antara 4 sampai 7, yang tersebar dominan di wilayah timur penelitian.

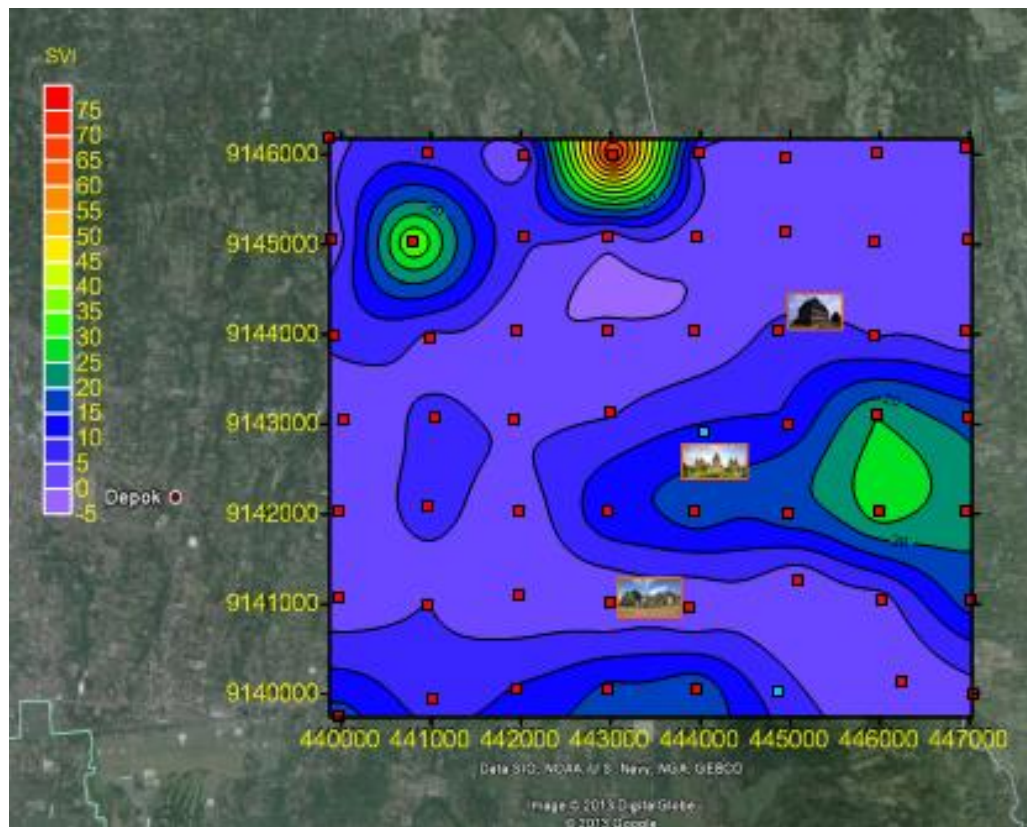
Tabel-1. Klasifikasi nilai amplifikasi [12]

Zona	Klasifikasi	Faktor Amplifikasi
1	Rendah	$A < 3$
2	Sedang	$3 \leq A < 6$
3	Tinggi	$6 \leq A < 9$
4	Sangat Tinggi	$A \geq 9$

C. Distribusi Nilai Indeks Kerentanan Gempa (*Seismic Vulnerability Index*) / (K)

Parameter indeks kerentanan gempa (K), yang menggabungkan antara A_m dan f_0 untuk mengidentifikasi area di mana bahaya dan kerusakan seismik yang lebih besar. Nakamura menunjukkan bahwa beberapa peristiwa gempa bumi yang merusak menunjukkan daerah-daerah yang sering terkena kerusakan besar, disebabkan oleh gempa bumi yang memiliki nilai SVI (*Seismic Vulnerability*

Index) antara 20-100. Sedangkan untuk daerah yang tergolong aman dari kerusakan, memiliki SVI di bawah 5. Hal ini menunjukkan bahwa daerah yang terkena dampak oleh kerusakan besar akibat gempa Yogyakarta pada tahun 2006 memiliki nilai lebih dari 6 SVI [13]. Gambar-5 menunjukkan bahwa candi prambanan (terletak di tengah peta), yang menunjukkan rentan terhadap efek gempa karena mengandung nilai SVI di sekitar 10-15. Sementara itu, dua candi lainnya (Candi Plaosan di utara peta dan Candi Ratu Boko di selatan peta) relatif aman karena mengandung nilai SVI rendah (1-5). Berdasarkan hasil SVI, didapatkan bahwa, potensi terjadinya likuefaksi berada di wilayah utara Prambanan dengan indeks SVI 6, dan berpotensi memanjang ke wilayah di sebelah baratnya, berdasarkan hasil distribusi nilai SVI [14].



Gambar-5. Peta distribusi nilai SVI (*Seismic Vulnerability Index*) berdasarkan 56 titik pengukuran. Menunjukkan distribusi nilai SVI tinggi berada di sebelah barat laut dan timur wilayah pengukuran (di luar keberadaan Candi)

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data yang diolah, dapat diidentifikasi beberapa kesimpulan penting dalam studi ini. Karakter kerentanan tanah berhubungan dengan nilai frekuensi dominan (f_0), amplifikasi tanah (A_0), dan indeks kerentanan seismik (*seismic*

vulnerability index). Hubungan tersebut dapat digunakan untuk merumuskan apakah suatu wilayah berpotensi mengalami gerakan tanah secara lateral (likuefaksi) yang secara potensi dapat berpengaruh pada keberadaan situs Candi Prambanan. Berdasarkan analisis data mikroseismik (simpangan standar deviasi), didapatkan beberapa titik zona

rawan bencana di wilayah utara dan timur titik pengukuran. Secara detail, hal ini ditunjukkan oleh peta distribusi nilai SVI di sekitar candi Prambanan yang berada pada range 20-100, khususnya di sebelah utara berada pada nilai di atas 75, yang memungkinkan peluang terjadinya likuefaksi lebih tinggi dengan syarat adanya gempa besar (*major earthquakes*) disertai dengan pori batuan yang terisi dengan fluida.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] National Institute for Cultural Heritage, Japan Center for International Cooperation in Conservation National Research Institute for Cultural Properties. Reconstructive Supporting Report on the Prambanan World Heritage Site. 2008; 35-71.
- [2]. Telford WM, Geldart LP, Sheriff RE, Keys DA. Applied geophysics book, 2nd Edition. Cambridge University Press, Cambridge: London. 1990.
- [3]. Suwarno, Sutomo, Aditama MR. The Analysis of the Landslide Vulnerability Sub Watershed Arus in Banyumas Regency. *Journal of Geographia Technica*. 2019; 14(2) 112-119.
- [4]. Pischiutta M, Fondriest M, Demurtas M, Magnoni F, Di Toro G, Rovelli A. Structural Control on The Directional Amplification of Seismic Noise. Campo Imperatore, Central Italy. 2017; The University of Manchester.
- [5]. Warnana DD, Soemitro R, Utama W. Application of Microtremor HVSr Method for Assessing Site Effect in Residual Soil Slope. *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS*. 2015; 11(4).
- [6]. Aditama MR, Khan J, O' Neill J, Sismanto. Structural framework and its compartmentalisation within the associated uncertainties: A case study from the Staffjord Reservoir, Northern North Sea. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; Vol. 1367.
- [7]. Rahmad HH, Supriyadi, Nur KN, Rohmaniyah F, Percepatan Tanah Berdasarkan Data Mikrosesimik Wisata Bantir Sumowono, Semarang. *UNNES Physics Journal*. 2017; UJP (6)1.
- [8]. Nguyen, F, Teerlynck H., Van Rompaey G, Van Camp M, Jongmans D. Use of microtremor measurement for assessing site effects in Northern Belgium-interpretation of the observed intensity during the Ms5.0. Earthquake. *Journal of Seismology*. 2009; 8(1) : 41-56.
- [9]. Dewi, TS, Kusumayudha SB, Purwanto HS. Zonasi Rawan Bencana Tanah Longsor dengan Metode Analisis GIS: Studi Kasus Daerah Semono dan Sekitarnya, Kecamatan Bagelen Kabupaten Purworejo Jawa Tengah. Thesis. Jurusan Teknik Geologi: UPN "Veteran" Yogyakarta; 2017.
- [10]. Nakamura Y. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of RTRI, Railway Technical Research Institute (RTRI)*, 1989; 30(1).
- [11]. Daryono, Sutikno J. Sartohadi, Dulbahri, KS Brotospito. Efek tapak lokal di Graben bantul berdasarkan pengukuran mikrotremor, *International Conference Earth Science and Technology, Yogyakarta*. 2009; 2(1).
- [12]. Setiawan JR. Mikrozonasi Seismitas Daerah Yogyakarta dan Sekitarnya. Tesis. Bandung: Institut Teknologi Bandung; 2009.
- [13]. Syaifuddin F, Bahri AS, Lestari W, Pandu J. Microtremor study of Gunung Anyar mud volcano, Surabaya, East Java. *AIP Conference Proceedings*. 2016; 1730(1).
- [14]. Irayani Z, Permanajari I, Haryadi A, Wihantoro, Aziz AN, Investigasi Bidang Gelincir Tanah Longsor dengan Metode Tahanan Jenis dan Pengujian Sifat Plastisitas Tanah di Bukit Pawinihan Desa Sijeruk, Kecamatan Banjarnangu, Kabupaten Banjarnegara. *Jurnal Ilmiah Dinamika Rekayasa*. 2016; 12(2).

