

*Artikel***Identifikasi Karakteristik Tanah Menggunakan Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) di Daerah Sukabumi, Bandar Lampung****Ghevira Angelina Mirta¹, Alhada Farduwin^{1*}, dan Yudha Styawan¹**¹ Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia

* Korespondensi: alhada.farduwin@tg.itera.ac.id

Abstrak : Berdasarkan Perda Nomor 12 Tahun 2012 Bagian Wilayah Kota pada Kecamatan Sukabumi Provinsi Lampung memiliki fungsi utama sebagai kawasan industri menengah, sehingga informasi mengenai karakteristik tanah sangat penting untuk mitigasi bencana gempa bumi pada wilayah tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik tanah di Kecamatan Sukabumi dan sekitarnya berdasarkan nilai frekuensi natural (f_0), faktor amplifikasi (A_0), indeks kerentanan seismik (K_g), dan kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter (V_{S30}) sehingga diperoleh informasi terkait daerah yang rentan terhadap getaran gempa bumi sebagai upaya mitigasi bencana dan sebagai acuan dalam pembangunan penunjang infrastruktur. Penelitian ini dilakukan di 33 titik yang tersebar di Kecamatan Sukabumi dengan spasi antar titik sebesar 500 meter. Data hasil pengukuran dianalisis menggunakan metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai frekuensi natural bervariasi antara 0,5 – 13,5 Hz, nilai faktor amplifikasi bervariasi antara 1,6 – 6,5 kali penguatan, nilai indeks kerentanan seismik bervariasi antara 0,2 – 36 sekon, dan nilai kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter (V_{S30}) bervariasi antara 31 – 610 m/s. Berdasarkan klasifikasi nilai V_{S30} menurut NEHRP (1998), daerah penelitian didominasi oleh tipe batuan D (tanah sedang) yang didominasi pada arah utara daerah pengukuran sehingga daerah tersebut perlu diwaspadai apabila terjadi bencana gempa bumi.

Kata kunci: Sukabumi, Frekuensi natural, Faktor amplifikasi, Indeks kerentanan seismik, Kecepatan gelombang geser (V_{S30})

Abstract : Based on Regional Regulation Number 12 of 2012, the City Area in Sukabumi District, Lampung Province has the main function as a medium industrial area, so information regarding soil characteristics is very important for mitigating earthquake disasters in this area. This research aims to determine the characteristics of the soil in Sukabumi District and its surroundings based on the value of natural frequency (f_0), amplification factor (A_0), seismic vulnerability index (K_g), and shear wave velocity to a depth of 30 meters (V_{S30}) so that information can be obtained regarding areas that are vulnerable to earthquake vibrations as part of disaster mitigation efforts and as a reference in developing infrastructure. This research was carried out at 33 points spread across Sukabumi District with a spacing between points of 500 meters. The measurement data were analyzed using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method. The research results show that the natural frequency value varies between 0.5 – 13.5 Hz, the amplification factor value varies between 1.6 – 6.5 times the amplification, the seismic vulnerability index value varies between 0.2 – 36 second, and the shear wave velocity value to a depth of 30 meters (V_{S30}) varies between 31 – 610 m/s. Based on the V_{S30} value classification according to NEHRP (1998), the study area is dominated by rock type D (medium soil) which is dominated in the north of the measurement area so that this area needs to be watched out for if an earthquake occurs.

Keyword: Sukabumi, Natural frequency, Amplification factor, Seismic susceptibility index, Shear wave velocity (V_{S30})

PENDAHULUAN

Bencana alam merupakan sebuah fenomena atau kejadian yang terjadi di alam dan dapat disebabkan oleh beberapa hal termasuk lingkungan dan aktivitas manusia. Bencana alam paling berbahaya yang pernah melanda Indonesia adalah gempa bumi, tsunami, letusan gunung berapi, dan banjir. Wilayah Indonesia yang berada pada zona pertemuan tiga lempeng aktif yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik menyebabkan peristiwa bencana alam gempa bumi sering terjadi [1]. Salah satu pulau yang berada di wilayah tektonik aktif di dunia yaitu Pulau Sumatera. Menurut data dari BMKG periode 2009 – 2018 telah terjadi 5937 gempa yang terjadi di Pulau Sumatera dan dalam 20 tahun terakhir gempa dengan skala besar sering terjadi di Pulau Sumatera [2].

Menurut Kementerian ESDM, terdapat 6 dari 25 wilayah rawan gempa berada di Pulau Sumatera di antaranya Aceh, Jambi, Sumatera Barat, Sumatera Utara, Bengkulu, dan Lampung [3]. Provinsi Lampung adalah salah satu provinsi yang terletak di bagian selatan Pulau Sumatera serta dilalui jalur Bukit Barisan dan terdiri dari banyak patahan. Hal itu menyebabkan Provinsi Lampung berpotensi mengalami bencana alam seperti gempa bumi [4]. Berdasarkan Perda Nomor 12 Tahun 2012 Bagian Wilayah Kota pada Kecamatan Sukabumi Provinsi Lampung memiliki fungsi utama sebagai kawasan industri menengah dan pergudangan serta perdagangan atau jasa, sehingga informasi mengenai karakteristik tanah sangat penting untuk mitigasi bencana gempa bumi pada wilayah tersebut.

Untuk mengurangi risiko kerusakan akibat gempa bumi, penting untuk diperhatikan kondisi geologi dan bangunan, serta karakteristik tanah dalam pengembangan infrastruktur. Kondisi karakteristik lapisan tanah yang lunak akan mengakibatkan guncangan gempa yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi tanah yang keras [5]. Identifikasi dari karakteristik tersebut dapat dilakukan melalui penentuan nilai frekuensi natural (f_0). Kondisi lapisan tanah pada saat dilalui gelombang gempa akan mempengaruhi tingkat penguatan atau disebut juga faktor amplifikasi (A_0) [6]. Selain itu, nilai indeks kerentanan seismik (K_g) mampu memberikan gambaran tingkat kerentanan lapisan permukaan tanah terhadap penurunan tanah apabila terjadi gempa bumi [7]. Karakteristik tanah juga dapat diperkirakan menggunakan nilai kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter (V_{S30}) yang merupakan salah satu parameter penting dalam memprediksi getaran tanah akibat bencana gempa bumi [8].

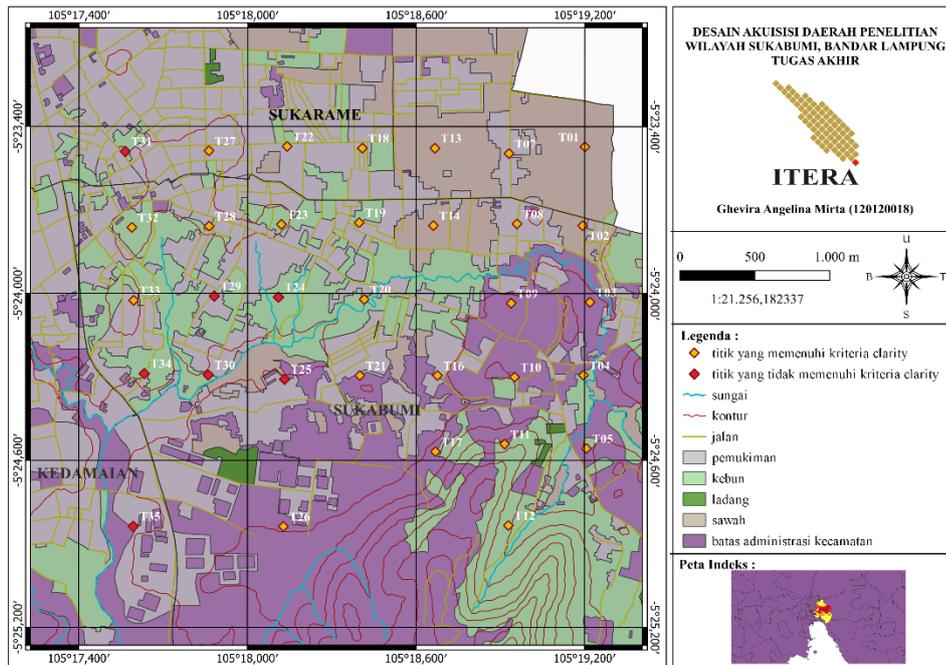
Berdasarkan uraian tersebut maka dilakukan penelitian menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) di daerah Sukabumi, Bandar Lampung. Metode HVSR merupakan teknik yang bisa digunakan untuk menilai berbagai sifat sedimen lunak dan tanah serta mengkarakterisasi faktor amplifikasi yang disebabkan oleh gempa bumi di dekatnya sehingga dapat dimanfaatkan sebagai upaya mitigasi bencana di daerah penelitian [9]. Beberapa peneliti telah menggunakan metode HVSR ini untuk menghitung rasio spektrum *Fourier* komponen horizontal dan vertikal dari sinyal mikrotremor dan digunakan untuk keperluan mitigasi kebencanaan [8, 10, 11].

METODE PENELITIAN

a. Akuisisi Data

Daerah yang dijadikan lokasi penelitian kali ini adalah di Kecamatan Sukabumi, Bandar Lampung dengan posisi $5^{\circ}40'70,96''$ LS, $105^{\circ}31'44,40''$ BT sampai $5^{\circ}40'29,41''$ LS, $105^{\circ}31'51,65''$ BT yang terdapat 33 titik pengukuran dengan lama pengukuran di tiap titik yaitu

40 – 45 menit dan menggunakan spasi antar titik sebesar 500 meter. Akuisisi data penelitian ini menggunakan alat mikrotremor 3 komponen dengan jenis *Raspberry Shake 3D Outdoor*, dimana alat ini lebih diperuntukkan untuk pengukuran di luar ruangan. Berdasarkan hasil akuisisi, telah diperoleh data lapangan yang kemudian digunakan dalam penelitian kali ini. Data tersebut merupakan data mikrotremor yang terdiri dari 3 komponen yaitu horizontal, vertikal *East-West*, dan vertikal *North-South* serta terekam dalam domain waktu.



Gambar 1. Desain akuisisi daerah penelitian

b. Pengolahan HVSR

Tahapan pengolahan data mikrotremor menggunakan *software python hvsrpy* yang dikembangkan oleh Joseph P. Vantassel di tahun 2019 – 2021 [12]. Dalam pengolahan ini menggunakan *window length* sebesar 60 detik. Proses *smoothing* juga dilakukan untuk memperoleh kurva yang halus dan frekuensi yang konstan dengan koefisien *bandwith* pada tahap *smoothing* sebesar 40. Jumlah standar deviasi yang digunakan selama proses *rejection* sebesar 2, semakin kecil nilai yang diberikan akan semakin banyak *window* yang *ter-reject*. Selain itu, *sampling rate* yang digunakan yaitu 0,5 – 15 Hz. Setelah diperoleh kurva HVSRs, didapatkan juga nilai f_0 yang dihasilkan dari nilai frekuensi pada puncak amplifikasi dan nilai A_0 yang dihasilkan dari median nilai amplitudo pada setiap frekuensi. Berdasarkan nilai f_0 dan A_0 yang telah didapat, dilakukan kalkulasi nilai Kg dengan menggunakan persamaan 1:

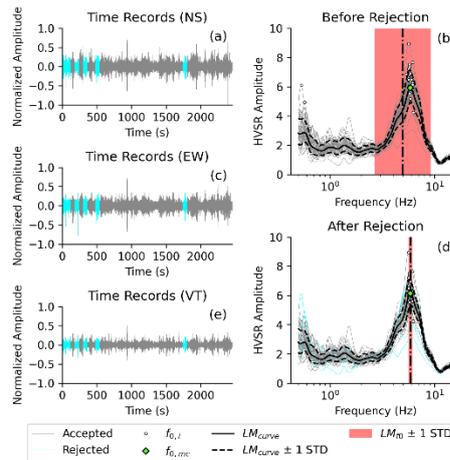
$$Kg = \frac{(A_0)^2}{f_0} \quad (1)$$

Keterangan :

Kg = Indeks kerentanan seismik (s)

A_0 = Faktor amplifikasi

f_0 = Frekuensi natural (Hz)



Gambar 2. Contoh kurva HVSr pada T20

c. Pengolahan Inversi *Genetic Algorithm* (GA)

Setelah diperoleh kurva HVSr, selanjutnya dilakukan proses inversi menggunakan algoritma genetik untuk mendapatkan parameter model berupa nilai ketebalan (H) dan kecepatan gelombang geser (V_s) pada tiap lapisan. Pendekatan algoritma genetik adalah strategi optimasi global yang mengambil inspirasi dari genetika dan seleksi alam untuk memperoleh individu atau solusi yang lebih baik (*survival for the fittest*) [13]. Pemilihan metode inversi algoritma genetik dikarenakan metode ini bagian dari kelompok *guided random search* atau pencarian acak terarah yang diharapkan mampu menjangkau semua solusi yang diberikan. Algoritma ini diterapkan dalam melakukan inversi kurva H/V menggunakan *software* ProHVSr berbasis *Matlab*. Untuk mendapatkan solusi terbaik, diatur ruang pencarian model untuk nilai ketebalan (H) dan kecepatan gelombang geser (V_s). Jumlah lapisan yang digunakan untuk proses inversi sebanyak 5 lapisan yang merujuk pada beberapa penelitian di antaranya yaitu [14, 15, 16, 17]. Berikut merupakan parameter yang digunakan dalam proses inversi:

Tabel 1. Parameter model yang digunakan dalam proses inversi GA

Parameter	Min	Max
H_1 (m)	0	10
H_2 (m)	0	15
H_3 (m)	0	20
H_4 (m)	0	20
H_5 (m)	0	30
V_{s1} (m/s)	10	500
V_{s2} (m/s)	10	500
V_{s3} (m/s)	10	1000
V_{s4} (m/s)	10	1500
V_{s5} (m/s)	10	2000

Menu untuk mengatur parameter membantu kita dalam memilih pengaturan ideal untuk inversi. Penelitian ini menggunakan parameter berikut: *Crossover* = 0,5 dan Probabilitas Mutasi = 0,15. Populasi diangkat sebanyak jumlah iterasi atau pengulangan. Secara teoritis, model yang dihasilkan akan semakin akurat jika semakin banyak jumlah populasi dan iterasi yang dilakukan. Namun hal ini akan mengakibatkan waktu komputasi yang diperlukan menjadi lebih lama. Proses inversi kurva H/V diperoleh nilai V_s dan H pada tiap lapisan yang kemudian

digunakan untuk menghitung nilai V_{S30} pada tiap titik pengukuran dengan menggunakan persamaan 2:

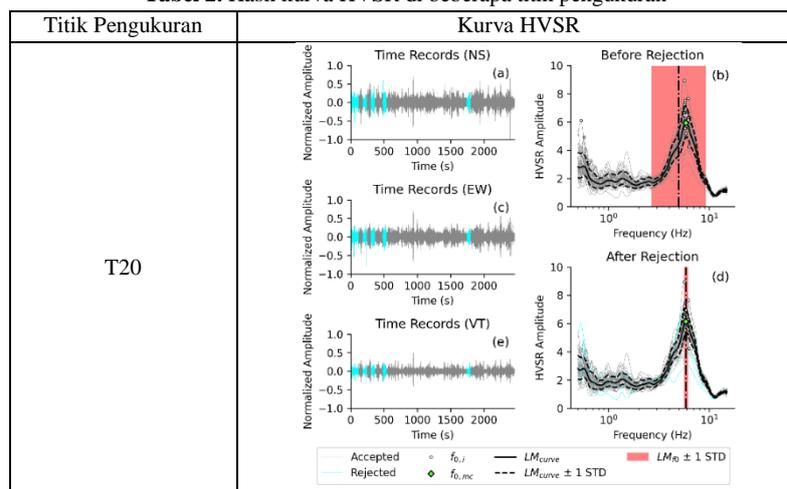
$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^x \frac{h_i}{V_i}} \quad (2)$$

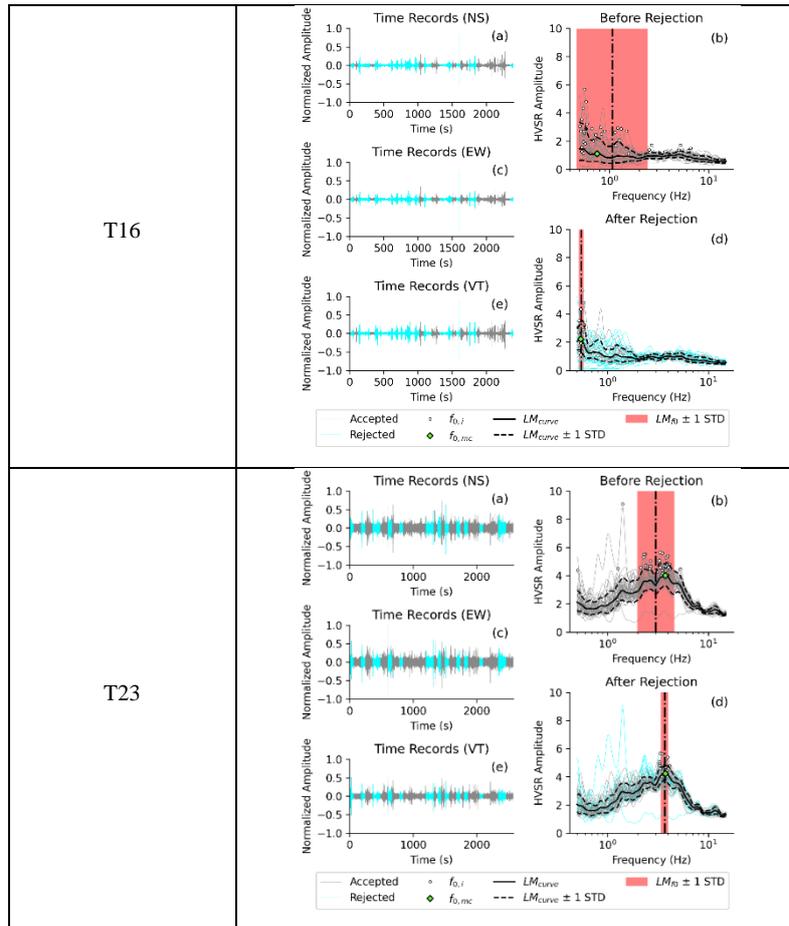
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Kurva HVSR

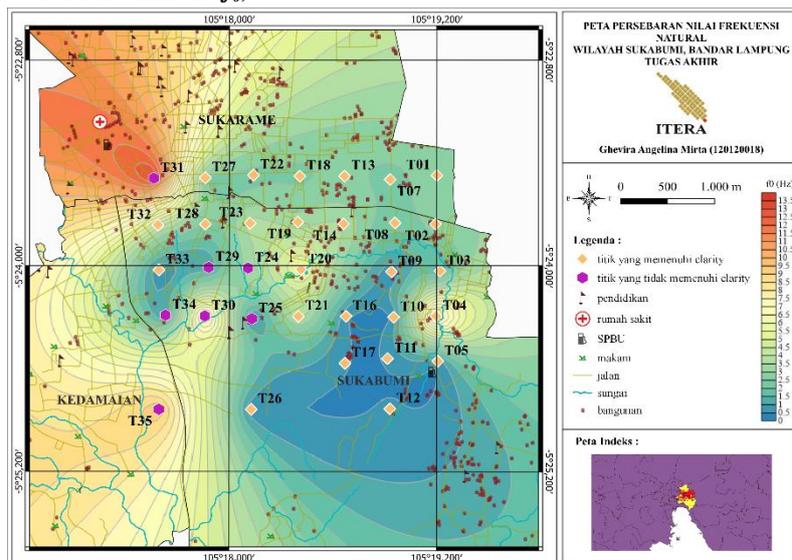
Berdasarkan pengolahan data mikrotremor 3 komponen, terdapat kurva *before rejection* (sebelum dilakukan rejeksi) dan *after rejection* (setelah dilakukan rejeksi). Kurva *before rejection* menunjukkan dalam perhitungan kurva HVSR menggunakan seluruh *window* yang ada tanpa membuang *window* yang terdapat noise. Sedangkan pada kurva *after rejection*, perhitungan kurva HVSR telah membuang *window* yang dianggap noise. Dalam penelitian ini kurva yang digunakan merupakan kurva hasil *after rejection*, karena telah menghilangkan pengaruh noise pada data perhitungan kurva HVSR. Hasil pengolahan kurva HVSR pada semua titik pengukuran diperoleh tiga jenis kurva, yaitu kurva *clear peak*, kurva datar dan kurva puncak lebar. Tabel 2 menggambarkan ketiga contoh tipe kurva HVSR dari hasil pengukuran yang dianggap telah mewakili semua titik pengukuran. Pada kurva HVSR di titik T20 merupakan kurva yang memiliki 1 puncak *clear peak*, dimana kurva ini mengindikasikan adanya kontras impedansi pada kedalaman tertentu sehingga gelombang yang melewati lapisan sedimen ini akan mengalami amplifikasi. Pada kurva HVSR di titik T16 merupakan jenis kurva datar yang di dapat dari hasil pengukuran, dimana kurva datar ini memiliki rasio H/V yang relatif datar pada seluruh rentang frekuensi. Kurva jenis ini menggambarkan kondisi batuan keras dan bebas dari amplifikasi apapun bahkan pada frekuensi tinggi. Pada kurva HVSR di titik T23 merupakan jenis kurva yang memiliki puncak lebar (*unclear broad peak*), dimana pada kurva ini memiliki kaitan dengan kemungkinan adanya cekungan atau lapisan batuan dasar yang memiliki kemiringan.

Tabel 2. Hasil kurva HVSR di beberapa titik pengukuran





Persebaran Nilai Frekuensi Natural (f_0)

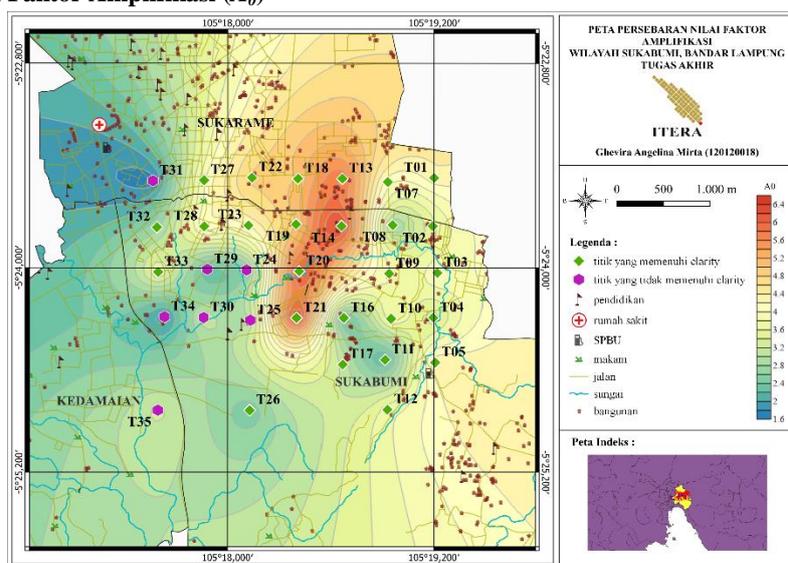


Gambar 3. Peta persebaran nilai f_0 pada daerah penelitian

Frekuensi natural merupakan frekuensi alami yang sudah ada pada suatu daerah. Berdasarkan Gambar 3, diperoleh nilai persebaran frekuensi natural yang bervariasi antara 0,5 – 13,5 Hz. Titik yang memiliki nilai frekuensi natural paling tinggi yaitu T31 yang berada di wilayah barat laut dan titik paling rendah yaitu T05 yang berada di wilayah tenggara. Frekuensi natural erat kaitannya

dengan ketebalan sedimen, dimana hubungan antara keduanya berbanding terbalik. Hal itu berarti frekuensi yang rendah berasosiasi pada ketebalan sedimen yang tebal atau dalam. Akan tetapi, berdasarkan penelitian [18] nilai frekuensi natural tidak hanya dipengaruhi oleh ketebalan sedimen tapi juga dikontrol oleh kecepatan gelombang geser. Sehingga dalam menentukan lapisan sedimen pada daerah penelitian, perlu dilakukan inversi untuk memperoleh nilai kecepatan gelombang geser bawah permukaan. Pada wilayah titik pengukuran didominasi oleh nilai frekuensi natural yang masuk ke dalam klasifikasi ketebalan sedimen permukaan yang sangat tebal.

Persebaran Nilai Faktor Amplifikasi (A_0)

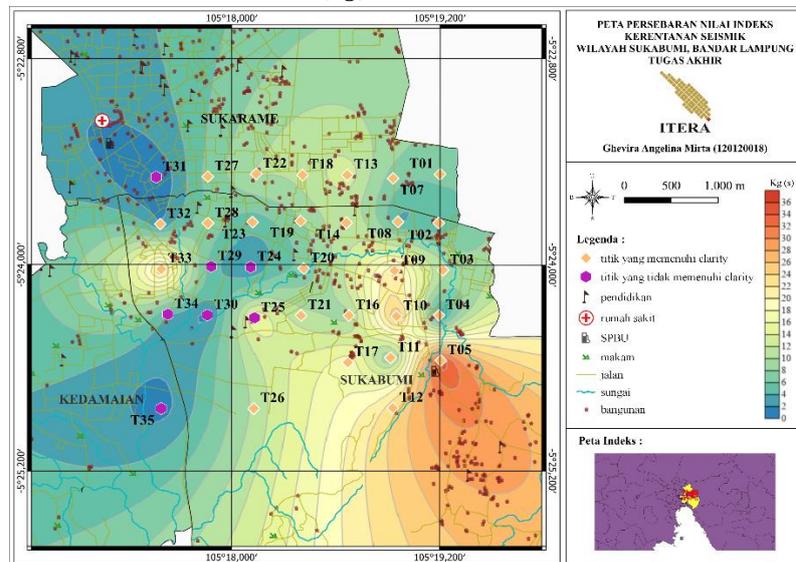


Gambar 4. Peta persebaran nilai A_0 pada daerah penelitian

Berdasarkan hasil pengolahan, didapatkan nilai puncak HVSR yang berkaitan dengan perbandingan antara kontras impedansi antara lapisan permukaan dengan lapisan yang berada di bawahnya. Perbedaan nilai puncak HVSR antar lapisan tersebut menandakan adanya perbedaan sifat fisik batuan, dimana pada batuan yang sama nilai puncak HVSR dapat bervariasi sesuai dengan tingkat deformasi dan pelapukan pada batuan tersebut. Nilai puncak HVSR tersebut kemudian diasumsikan juga sebagai faktor penguatan pada tanah di suatu daerah. Nilai tersebut kemudian dikaitkan dengan referensi tabel faktor amplifikasi sesuai dengan nilai faktor amplifikasi yang telah didapatkan. Menurut Nakamura [19] parameter puncak HVSR yang mampu merusak bangunan adalah berkisar lebih dari 3 dan berasosiasi dengan frekuensi yang rendah.

Berdasarkan Gambar 4, nilai persebaran faktor amplifikasi bervariasi antara 1,6 – 6,5 kali penguatan. Titik yang memiliki nilai faktor amplifikasi paling tinggi yaitu T21 yang berada di wilayah selatan dan titik paling rendah yaitu T31 yang berada di wilayah barat laut. Seperti yang diketahui bahwa gelombang seismik akan mengalami penguatan jika tanah yang dilalui oleh gelombang tersebut lebih lunak dibandingkan tanah yang ada di bawahnya. Dengan demikian daerah yang memiliki faktor amplifikasi yang tinggi maka dapat dipastikan ketika terjadi bencana gempa bumi, amplitudo gelombang seismiknya akan terbagi sehingga tingkat kekuatan gempa bumi dan kerusakan yang diterima akibat gempa bumi akan lebih tinggi dibandingkan daerah yang memiliki faktor amplifikasi yang rendah. Hal itu dikarenakan pada nilai amplifikasi yang tinggi terdapat lapisan sedimen yang lebih lunak di atas daripada lapisan sedimen di bawahnya.

Persebaran Nilai Indeks Kerentanan Seismik (K_g)



Gambar 5. Peta persebaran nilai K_g pada daerah penelitian

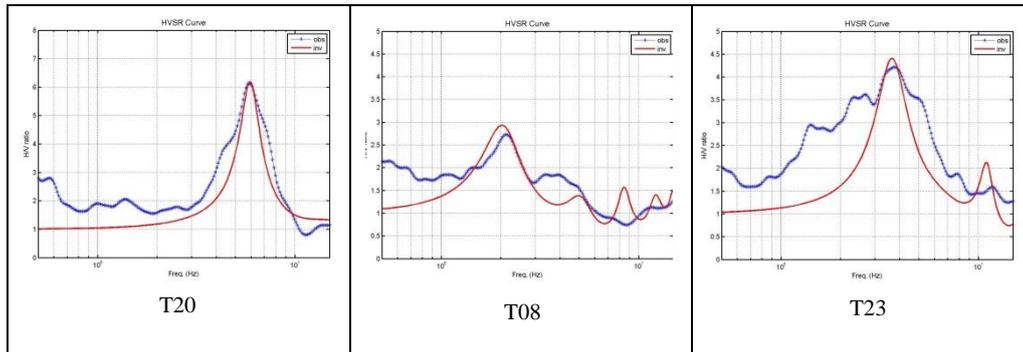
Berdasarkan Gambar 5, peta persebaran nilai indeks kerentanan seismik, diperoleh nilai persebaran indeks kerentanan seismik yang bervariasi antara 0,2 – 36. Titik yang memiliki nilai indeks kerentanan seismik paling tinggi yaitu T05 yang berada di wilayah tenggara dan titik paling rendah yaitu T31 yang berada di wilayah barat laut. Nilai indeks kerentanan seismik ini menunjukkan tingkat kerawanan suatu daerah terhadap getaran atau guncangan berdasarkan kondisi batuan di wilayah tersebut. Sehingga dapat dikatakan bahwa nilai indeks kerentanan seismik ini berbanding lurus dengan tingkat kerusakan suatu wilayah. Daerah yang terkena guncangan tinggi umumnya memiliki nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi karena karakteristik tanah yang lunak, begitupun sebaliknya.

Berdasarkan Persamaan (1), nilai ini diperoleh dari nilai faktor amplifikasi dan juga nilai frekuensi natural. Parameter-parameter tersebut memperjelas bahwa material penyusun tanah suatu wilayah akan mempengaruhi tingkat kerentanan seismik. Pada saat nilai faktor amplifikasi tinggi dan nilai frekuensi natural rendah, maka nilai indeks kerentanan seismik akan tinggi. Dari 33 titik pengukuran terdapat 22 titik yang memiliki nilai indeks kerentanan yang tinggi sesuai dengan zona klasifikasi yang berarti wilayah titik pengukuran didominasi oleh zona indeks kerentanan seismik yang tinggi.

Kurva Hasil Inversi

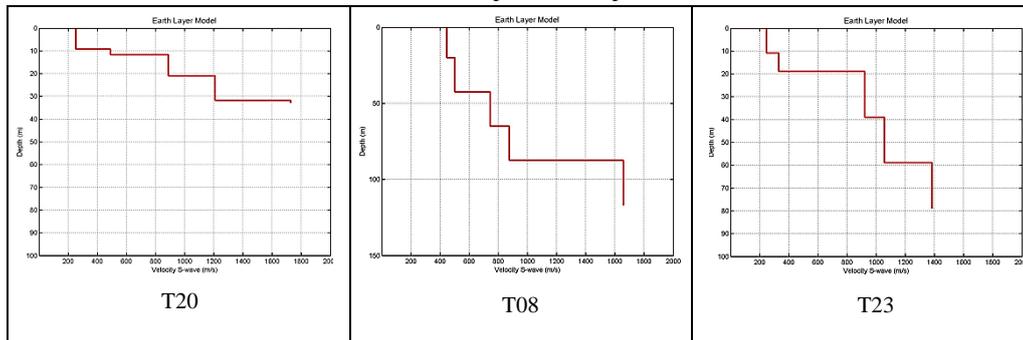
Berdasarkan Sungkono [18], dalam melakukan proses inversi dibutuhkan informasi parameter awal seperti nilai V_s , H , Q_p , dan Q_s , dimana dalam hal ini parameter V_s dan H diubah-ubah untuk mendapatkan hasil inversi yang terbaik. Sedangkan nilai Q_p dan Q_s diberi nilai yang konstan karena kedua parameter ini tidak memiliki perubahan signifikan yang akan mempengaruhi hasil inversi. Setelah diperoleh hasil yang terbaik, dilakukan perhitungan nilai V_{S30} yang kemudian digunakan untuk mengetahui tipe tanah di daerah penelitian. Berdasarkan Tabel 3 yang merupakan contoh kurva HVSR dari 3 titik pengukuran dapat terlihat bahwa kurva yang diperoleh sudah cukup mendekati hasil yang *fit* antara data observasi dan data kalkulasi.

Tabel 3. Kurva HVSR di lokasi penelitian (garis putus-putus berwarna biru) dan kurva HVSR hasil inversi (garis merah)



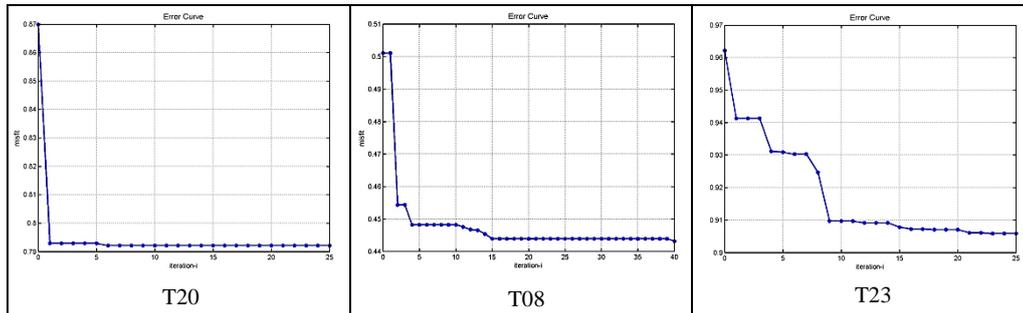
Berdasarkan Tabel 4 yang merupakan contoh model lapisan bawah permukaan hasil inversi berdasarkan nilai V_s terhadap kedalaman. Hasil inversi mampu memodelkan hingga kedalaman 150 meter dengan rata-rata kedalaman 77 meter. Pada T20 dan T08 kecepatan V_s meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya kedalaman, dimana pada titik ini memiliki 1 puncak dan terlihat perbedaan kontras impedansi antar lapisan. Pada T23 kecepatan V_s meningkat signifikan di beberapa lapisan, dimana titik ini memiliki puncak lebar sehingga diindikasikan terdapat kontras impedansi pada beberapa lapisan karena adanya lapisan batuan dasar (batuan yang memiliki nilai V_s dan densitas yang lebih kompak) yang memiliki kemiringan.

Tabel 4. Model lapisan bawah permukaan

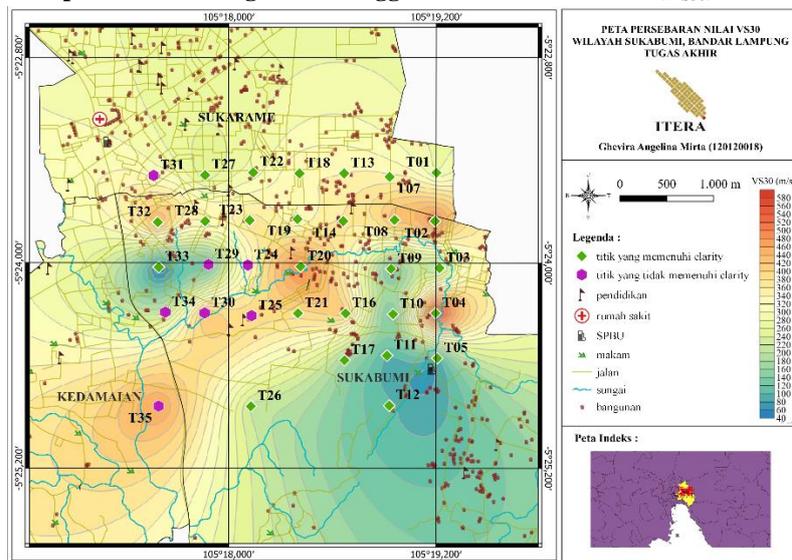


Berdasarkan Tabel 5 yang merupakan kurva *error* hasil inversi, terlihat dari ketiga titik yang ada sudah mencapai kekonvergenan pada iterasi ke-25. Pada saat proses inversi, sejumlah populasi akan dibangkitkan dengan jumlah iterasi yang digunakan. Populasi yang telah dibangkitkan tersebut akan meng-*update* model sampai batas maksimum iterasi yang digunakan.

Tabel 5. Kurva *error* hasil inversi



Persebaran Nilai Kecepatan Gelombang Geser Hingga Kedalaman 30 Meter (V_{S30})



Gambar 6. Peta persebaran nilai V_{S30} pada daerah penelitian

Berdasarkan pengolahan inversi, diperoleh nilai kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter (V_{S30}) dari 33 titik pengukuran. Pada proses inversi ini menggunakan *software ProHVSr*, dimana parameter yang dimasukkan berbeda-beda sampai mendapatkan kurva inversi HVSr yang cukup *fit* terhadap data observasi. Berdasarkan Gambar 6, yaitu peta persebaran nilai V_{S30} , diperoleh nilai persebaran V_{S30} yang bervariasi antara 31 – 610 m/s. Daerah yang memiliki nilai yang paling rendah ada pada titik T33 yang berada di wilayah barat dan daerah yang memiliki nilai yang paling tinggi ada pada titik T04 yang berada di wilayah timur. Berdasarkan klasifikasi NEHRP [20] mengenai klasifikasi jenis tanah berdasarkan nilai V_{S30} , wilayah titik pengukuran didominasi oleh tipe D (tanah sedang). Nilai V_{S30} yang tinggi biasanya terdapat di wilayah yang memiliki lapisan bawah permukaan yang keras, sedangkan nilai V_{S30} yang rendah biasanya terdapat di wilayah dengan lapisan bawah permukaan yang lunak.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan yaitu:

1. Peta persebaran frekuensi natural (f_0) didominasi dengan nilai kurang dari 2,50 Hz yang menunjukkan adanya lapisan sedimen permukaan yang sangat tebal. Dominasi nilai ini sebagian besar masuk ke dalam Formasi Lampung (QT1) dan Kuarsit Sidodadi (Pzgg). Berdasarkan nilai faktor amplifikasi (A_0) didominasi oleh nilai A_0 dengan tipe sedang.

2. Peta persebaran nilai indeks kerentanan seismik (K_g) menunjukkan daerah penelitian didominasi oleh zona kerentanan yang tinggi yang masuk ke dalam Formasi Lampung (QTI), Kuarsit Sidodadi (Pzgz), dan Batuan Granit Tak Terpisah (Tmgr).
3. Berdasarkan persebaran peta V_{S30} , nilai V_{S30} pada daerah penelitian bervariasi antara 31 – 610 m/s dan didominasi oleh tipe batuan D (tanah sedang).

PUSTAKA

- [1] Arifudin, A. M. (2021). Kecepatan Gelombang Geser (V_s) dan Ketebalan Sedimen (H) di Kabupaten Klaten Dari Data Mikrotremor. *Teknisia*, 26(1), 52 - 60.
- [2] Metrikasari, R., & Choiruddin, A. (2020). Pemodelan Risiko Gempa Bumi di Pulau Sumatera Menggunakan Model Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process. *JURNAL SAINS DAN SENI ITS*, 9(2), 102 - 107.
- [3] ESDM, K. (2013). *Pengenalan Gempa Bumi*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- [4] Yapie, T. A. (2015). Pemodelan Bahaya Seismik Berdasarkan Variabel Percepatan Getaran Tanah Maksimum, Frekuensi Dominan, dan Faktor Amplifikasi Dengan Menggunakan Simple Additive Weight (SAW). *UIN Sunan Kalijaga Journal*, 1 - 2.
- [5] Solikhin, A., & Suantika, G. (2008). *Laporan Penyelidikan Gempabumi Daerah Kabupaten Bandung dan Sekitarnya Jawa Barat*. Bandung: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.
- [6] Rahayu, T. S., Utami, H. A., Muharoroh, E., Nuarini, D. A., & Rasimeng, S. (2016). Analisis Resiko Gempa Bumi di Daerah Bandar Lampung Berdasarkan Metode Horizontal To Vertical Spectrum Ratio (HVSr) Mikrotremor. *Prosiding PIT Riset Kebencanaan ke-2 (IABI)*, 197 - 201.
- [7] Kurniawati, I., Wibowo, N. B., & Darmawan, D. (2017). Analisis Mikrotremor Untuk Mikrozonasi Indeks Kerentanan Seismik di Kawasan Jalur Sesar Sungai Oyo Yogyakarta. *Jurnal Fisika*, 6(2), 88 - 93.
- [8] Sunardi, B., Daryono, Arifin, J., Susilanto, P., Ngadmanto, D., Nurdiyanto, B., & Sulastrri. (2012). Kajian Potensi Bahaya Gempabumi Daerah Sumbawa Berdasarkan Efek Tapak Lokal. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 131 - 137.
- [9] Carniel, R., Malisan, P., Barazza, F., & Grimaz, S. (2008). Improvement of HVSr technique by wavelet analysis. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 28(4), 321 - 327.
- [10] Mirzaoglu, M., & Dykmen, U. (2003). Application of Microtremor to Seismic Microzoning Procedure. *Journal of The Balkan Geophysical Society*, 6(3).
- [11] Arifin, S. S., Mulyatno, B. S., Marjiyono, & Setianegara, R. (2014). Penentuan Zona Rawan Guncangan Bencana Gempa Bumi Berdasarkan Analisis Nilai Amplifikasi HVSr Mikrotremor dan Analisis Periode Dominan Daerah Liwa dan Sekitarnya. *J. Geofis. Eksplor*, 2(1), 30 - 40.
- [12] Vantassel, J. P. (2021, Oktober 12). *jpvantassel/hvsrpy: v1.0.0*. Diambil kembali dari zenodo.org: <https://zenodo.org/records/5563211>
- [13] Goldberg, D. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. *Addison Wesley*, 59 - 88.
- [14] Rizka, & Satiawan, S. (2019). Investigasi Lapisan Akuifer Berdasarkan Data Vertical Electrical Sounding (VES) dan Data Electrical Logging; Studi Kasus Kampus ITERA. *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY*, 17(2), 91 - 100.
- [15] Zaenudin, A., Darmawan, I. G., Farduwin, A., & Wibowo, R. C. (2022). Shear wave velocity estimation based on the particle swarm optimization method of HVSr curve inversion in Bakauheni district, Indonesia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 31(5), 480 - 493.
- [16] Paembonan, A. Y., Nugraha, P., Santoso, N. A., Firdaus, R., Ekawati, G. M., Rahmanda, V., & Amijaya, F. D. (2021). Investigasi Air Tanah Berdasarkan Nilai Resistivitas di Dusun Jatisari, Kabupaten Lampung Selatan. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 7(2), 100 - 110.
- [17] Nainggolan, B. F., Paembonan, A. Y., & Farduwin, A. (2024). Penerapan Metode Vertical Electrical Sounding (VES) Dalam Penentuan Kedalaman Akuifer di Kelurahan Sukarame. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 10(1), 24 - 36.
- [18] Sungkono. (2011). *Inversi Terpisah dan Simultan Dispersi Gelombang Rayleigh dan Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio Menggunakan Algoritma Genetik*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [19] Nakamura, Y. (2000). Clear Identification Of Fundamental Idea Of Nakamura's Technique And Its Application. *System and Data Research Co. Ltd.*, 3-25-3 Fujimidai, Kunitachi-Shi, Tokyo, Japan, 1 - 8.
- [20] NEHRP. (1998). *Site Classifications Taken from Table 1615 1.1 Site Class Definitions Published in 2000 International Building Code*. International Code Council.