

Artikel**Analisis Karakteristik Tanah Menggunakan Metode Horizontal To Vertical Spectral Ratio (Hvsr) pada Daerah Kotabaru, Jati Agung, Lampung Selatan**Ravika Glori Oktavia Hutagalung¹, Alhada Farduwin^{1*}, dan Yudha Styawan¹¹ Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera

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

Abstrak : Daerah Kotabaru, Kecamatan Jati Agung, Lampung Selatan salah satu daerah yang direncanakan untuk dibangun sebagai pusat pemerintahan di Provinsi Lampung, sehingga penting dilakukan penelitian untuk mengetahui karakteristik tanah di daerah tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik sifat lapisan bawah permukaan berdasarkan parameter Frekuensi Natural (f_0), Periode Dominan (T_0), Amplifikasi (A_0), Kerentanan Seismik (K_g) dan Kecepatan Gelombang Geser pada kedalaman 30 meter (V_{S30}). Untuk mendapatkan nilai V_{S30} , digunakan inversi dengan algoritma *Particel Swarm Optimization* (PSO). Pengukuran dilakukan di 27 titik yang tersebar di 4 desa yaitu Desa Gedung Agung, Desa Margodadi, Desa Gedung Harapan dan Desa Margo Lestari. Data mikrotremor yang telah didapatkan akan dianalisis dengan menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr). *Software* yang digunakan dalam melakukan pengolahan data ini yaitu *Ms. Excel, Surfer 13, QGIS* dan *ProHVSr*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai frekuensi natural berkisar 0,52 – 5,81 Hz, periode dominan berkisar 0,17 – 1,9 s, nilai amplifikasi berkisar 3,46 – 7,79, indeks kerentanan seismik berkisar 2,83 – 98,09. Nilai V_{S30} yang didapat berkisar antara 68,29 m/s sampai dengan 492,29 m/s yang tersusun atas batuan Tipe C (Tanah Keras dan Batuan Lunak), Tipe D (Tanah Sedang), dan Tipe E (Tanah Lunak).

Abstract: *Kotabaru area, Jati Agung sub-district, South Lampung is one of the areas planned to be built as the center of government in Lampung Province, so it is important to conduct research to determine the characteristics of the soil in the area. This research aims to identify the characteristics of the subsurface layer based on the parameters of Natural Frequency (f_0), Dominant Period (T_0), Amplification (A_0), Seismic Susceptibility (K_g) and Shear Wave Velocity at a depth of 30 meters (V_{S30}). To obtain the V_{S30} value, inversion with the *Particel Swarm Optimization* (PSO) algorithm was used. Measurements were carried out at 27 points spread across 4 villages, namely Gedung Agung Village, Margodadi Village, Gedung Harapan Village and Margo Lestari Village. The microtremor data that has been obtained will be analyzed using the *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) method. The software used in processing this data are *Ms. Excel, Surfer 13, QGIS* and *ProHVSr*. The results showed that the natural frequency value ranged from 0.52 - 5.81 Hz, the dominant period ranged from 0.17 - 1.9 s, the amplification value ranged from 3.46 - 7.79, the seismic vulnerability index ranged from 2.83 - 98.09. The V_{S30} values obtained ranged from 68.29 m/s to 492.29 m/s which are composed of rock type C (hard soil and soft rock), type D (medium soil) and type E (soft soil).*

Keywords: *Natural Frequency, Amplification, Seismic Susceptibility Index, V_{S30}*

PENDAHULUAN

Pemahaman terhadap karakteristik tanah di daerah Kotabaru, Kecamatan Jati Agung sangat penting karena akan memberikan informasi yang diperlukan dalam perencanaan pembangunan kota. Karakteristik tanah yang perlu diketahui adalah jenis dan tipe tanah berdasarkan nilai faktor amplifikasi yang menunjukkan tingkat pembesaran gelombang gempa di suatu lokasi, frekuensi natural menunjukkan frekuensi resonansi tanah, indeks kerentanan seismik menunjukkan tingkat kerentanan tanah terhadap gempa bumi, kecepatan gelombang geser menunjukkan sifat elastis tanah.

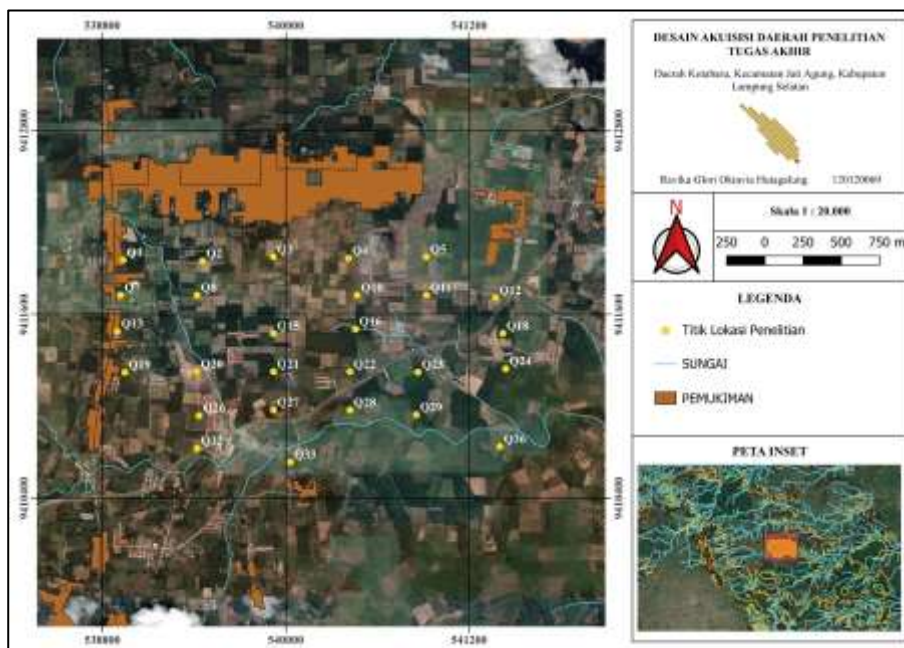
Penelitian ini menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) dalam perekaman data mikrotremor. Metode ini memanfaatkan nilai faktor amplifikasi (A_0) dan frekuensi natural tanah (f_0) untuk memperkirakan karakteristik geologi daerah penelitian. Metode ini dipilih

berdasarkan beberapa keunggulan seperti biaya yang relatif rendah, ramah lingkungan dan tidak menimbulkan dampak negatif, peralatan yang mudah digunakan dan mudah dipindahkan, dan pengukurannya cepat dan efisien [1, 2, 3]. Metode HVSR menggunakan prinsip penghitungan rasio spektrum yang diperoleh dari penjumlahan komponen horizontal dan vertikal. Nilai faktor amplifikasi pada suatu titik lokasi dapat dilihat dari puncak kurva HVSR yang telah diperoleh. Nilai frekuensi natural tanah atau periode dominan yang didapatkan dari kurva HVSR dikorelasikan pada ketebalan lapisan sedimen di daerah pengukuran [4]. Berdasarkan uraian ini, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik tanah berdasarkan parameter frekuensi natural (f_0), periode dominan (T_0), indeks kerentanan seismik (K_g), kecepatan V_{s30} dan jenis batuan berdasarkan nilai V_{s30} sebagai upaya untuk mitigasi dan data pendukung geoteknik.

METODE PENELITIAN

Akuisisi Data

Proses pengambilan data atau akuisisi lapangan dilakukan secara langsung di daerah penelitian, tepatnya di kawasan Kotabaru, Kecamatan Jati Agung, Lampung Selatan. Data tersebut berupa hasil perekaman gelombang/sinyal dalam bentuk *time* domain, yang diperoleh dari penggunaan seismometer tiga komponen *Raspberry Shake 3D Outdoor* dengan frekuensi sampling 100 Hz dan menyimpan data dalam format *.mseed*. Kegiatan ini berlangsung selama 10 hari yang dilakukan dari pagi hari pada pukul 07.00 WIB hingga jam 17.00 WIB. Jumlah titik pengukuran sebanyak 27 titik dengan durasi perekaman data dilakukan selama 40 menit di setiap titik yang tersebar di lokasi penelitian dengan jarak antar titik Barat-Timur sepanjang 500 meter dan jarak antar titik Utara-Selatan sepanjang 250 meter seperti pada **Gambar 1**. Suhu di lapangan selama melakukan pengukuran yaitu 26 derajat Celsius hingga 32 derajat Celsius dengan kecepatan angin rata-rata yaitu 10 km/jam. Kondisi tanah di lapangan relatif kering dan tidak keras. Densitas bangunan di sekitar pengukuran tersebar atau bahkan tidak ada, sehingga sumber *noise* yang terdapat pada data kebanyakan bersumber dari alam seperti pergerakan rumput atau pohon akibat angin dan sedikit yang bersumber dari aktivitas manusia seperti pejalan kaki dan kendaraan. Pengambilan data dilakukan dengan mengikuti panduan dari SESAME [5].



Gambar 1. Peta Desain Akuisisi daerah penelitian

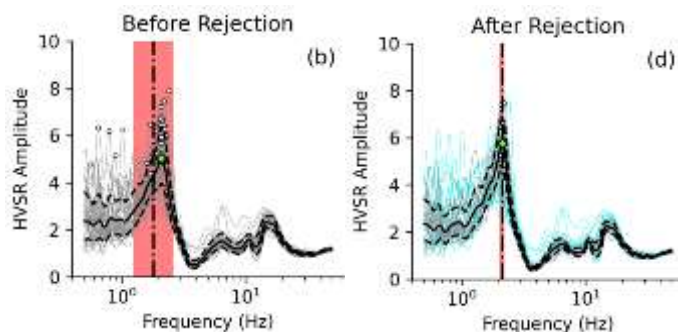
Pengolahan Data

Software yang digunakan untuk mengolah seismogram menjadi kurva HVSR yaitu menggunakan *hvsrpy* (<https://github.com/jpvantassel/hvsrpy.git>) pada bahasa pemrograman *Python*. Parameter pemrosesan yang digunakan adalah rentang filter frekuensi 0,5-50 Hz dan filter yang digunakan yaitu filter Bandpass dengan *low-cut* frekuensi 0,1, *high-cut* frekuensi 30, *filter order* 5 dan *Width of cosine taper* 0,1. Jumlah standar deviasi yang perlu dipertimbangkan selama *rejection* dengan nilai yang lebih kecil akan menolak lebih banyak *window*, sehingga digunakan $n = 2$. Data mikrotremor yang mencakup komponen vertikal, timur-barat, dan utara diukur dan diproses menggunakan *hvsrpy* pada bahasa pemrograman *Python* untuk menghasilkan kurva HVSR yang berisi informasi nilai frekuensi natural dan amplifikasi.

Untuk menghasilkan kurva HVSR, langkah-langkah yang diambil mencakup proses *windowing* sinyal yang bertujuan untuk membagi data menjadi beberapa *window* dengan lebar setiap *window* adalah 60 detik. Selanjutnya dilakukan proses FFT untuk mengubah domain waktu menjadi domain frekuensi, kemudian *smoothing* dengan *bandwidth* 40 [6], digunakan untuk mendapatkan kurva HVSR yang lebih halus, serta penggabungan komponen horizontal dan juga vertikal sesuai dengan Persamaan (1) dibawah yang ditentukan untuk mendapatkan kurva HVSR (Gambar 2).

$$HVSR = \frac{\sqrt{(S_{NS})^2 + (S_{EW})^2}}{S_V} \quad (1)$$

Dengan S_{NS} merupakan amplitudo spektrum frekuensi komponen Utara-Selatan, S_{EW} merupakan amplitudo spektrum frekuensi komponen Barat-Timur, dan S_V merupakan amplitudo spektrum frekuensi komponen Vertikal [7].



Gambar 2. Hasil kurva HVSR (Q29) sebelum dan sesudah *rejection*

Setelah kurva HVSR didapatkan, maka dilakukan penentuan nilai dari frekuensi natural dan amplifikasi yang ditunjukkan pada kurva dengan puncak tertinggi. Nilai frekuensi yang paling sering muncul ini berperan dalam mengidentifikasi karakteristik dan jenis batuan di suatu wilayah [8]. Menurut Nakamura [9], fenomena amplifikasi bisa terjadi ketika terjadi perbedaan yang signifikan antara lapisan-lapisan yang dilalui oleh gelombang seismik. Setelah mengetahui nilai frekuensi natural, periode dominan dapat dihitung dengan Persamaan (2) berikut.

$$T_0 = \frac{1}{f_0} \quad (2)$$

Dengan T_0 merupakan periode dominan, dan f_0 merupakan frekuensi natural.

Melalui nilai amplifikasi dan frekuensi natural, nilai indeks kerentanan seismik dapat didapatkan melalui Persamaan (3) berikut.

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0} \quad (3)$$

Dengan nilai indeks kerentanan seismik (K_g) dihitung berdasarkan nilai faktor amplifikasi (A_0) dan frekuensi natural (f_0). Indeks kerentanan seismik memetakan tingkat ketahanan tanah terhadap perubahan bentuk akibat gempa bumi. Wilayah dengan indeks rendah memiliki risiko kerusakan yang kecil, sedangkan wilayah dengan indeks tinggi berisiko mengalami kerusakan signifikan saat gempa bumi terjadi. Daerah dengan frekuensi gempa rendah umumnya memiliki tingkat indeks kerentanan seismik yang tinggi [10].

Inversi *Particle Swarm Optimization* (PSO)

PSO merupakan alternatif dari algoritma genetika dan sering digunakan dalam optimasi multi variabel. Pada PSO, kelompok partikel dengan ukuran tertentu ditempatkan pada lokasi acak dalam ruang multidimensi. Setiap partikel dalam sistem memiliki posisi dan kecepatannya sendiri. Ketika satu partikel menemukan jalur yang optimal atau efisien, partikel lain dalam kelompoknya, meskipun berada di lokasi yang berbeda, akan mengikuti jalur yang sama. Fenomena ini menunjukkan adanya sinergi dan komunikasi antar partikel dalam kelompoknya [11]. Algoritma PSO ini dipilih karena cepat dalam menuju konvergen, stabil dan tahan terhadap noise [12, 13]. Parameter *setting* dioptimalkan dalam proses inversi adalah Vs_min , Vs_max , H_min , H_max , Qp , Qs seperti pada **Tabel 1** di bawah.

Tabel 1. Parameter Setting pada proses Inversi

Vs_{min} (m/s)	Vs_{max} (m/s)	H_{min} (m)	H_{max} (m)	Qp	Qs	$n_{particle}$	n_{iter}	W	Cp	Cg
10	400	0.1	10	30	10					
10	500	0.1	20	30	10					
10	1000	0.1	30	30	10	100	25	0.8	1.8	2
10	1500	0.1	35	30	10					
10	2000	0.1	40	30	10					

Dari parameter-parameter tersebut, Vs dan H memiliki pengaruh paling signifikan terhadap bentuk kurva HVSR. Kemudian diberikan nilai tetap Qp dan Qs sebesar 30 dan 10 pada masing-masing lapisan, dimana jumlah model layer yang digunakan adalah 5 lapisan [13, 14]. Proses inversi berhenti saat fit antara data observasi dan data kalkulasi memenuhi kriteria, menghasilkan nilai Vs pada setiap lapisan. Nilai Vs tersebut digunakan untuk menghitung kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter menggunakan persamaan berikut.

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^m ti}{\sum_{i=1}^m ti/V_{Si}} \quad (4)$$

Dengan V_{S30} merupakan kecepatan Vs hingga kedalaman 30 m, m merupakan jumlah lapisan sampai kedalaman 30 m, i merupakan indeks per lapisan dan ti merupakan ketebalan lapisan ke- i .

Nilai V_{S30} sangat penting dalam bidang geoteknik untuk menggambarkan karakteristik lapisan bawah permukaan. Melalui nilai V_{S30} , kita dapat mengidentifikasi jenis batuan berdasarkan sifat kekakuan dan kekuatan gelombang geser [15] (Mucciarelli, 2008). Nilai V_{S30} juga dapat digunakan sebagai acuan dalam membangun bangunan yang tahan terhadap gempa bumi. Berikut **Tabel 2** yang menunjukkan nilai V_{S30} dan klasifikasi batumannya menurut *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NHERP) tahun 2000 [16].

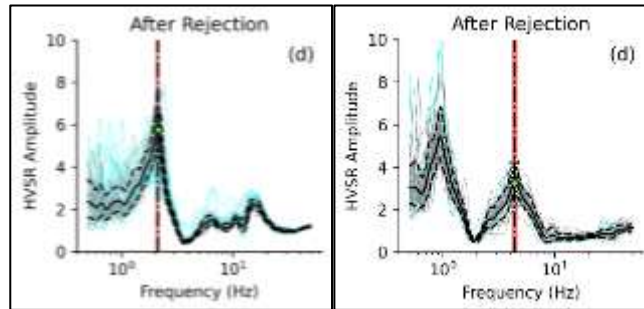
Tabel 2. Klasifikasi Batuan Berdasarkan V_{S30} [16]

No.	Tipe	Jenis Batuan	V_{S30}
1	A	<i>Hard rock</i> (batuan keras)	$V_{S30} > 1.500$ m/s
2	B	<i>Rock</i> (batuan sedang)	$750 < V_{S30} \leq 1.500$ m/s
3	C	<i>Very dense soil and soft rock</i> (tanah keras dan batuan lunak)	$350 < V_{S30} \leq 750$ m/s
4	D	<i>Stiff soil</i> (tanah sedang)	$175 < V_{S30} \leq 350$ m/s
5	E	<i>Soft soil</i> (tanah lunak)	$V_{S30} < 175$ m/s

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Jenis Kurva HVSR

Pada penelitian ini, dari 27 titik pengukuran ada 14 titik yang memenuhi kriteria *clear peak* dan ada 13 titik yang tidak memenuhi kriteria *clear peak* sesuai panduan SESAME [5]. Adapun dua jenis kurva yang dihasilkan yaitu kurva dengan satu puncak dan kurva dengan dua puncak. Kurva dengan satu puncak pada penelitian salah satunya ditunjukkan pada **Gambar 3**.

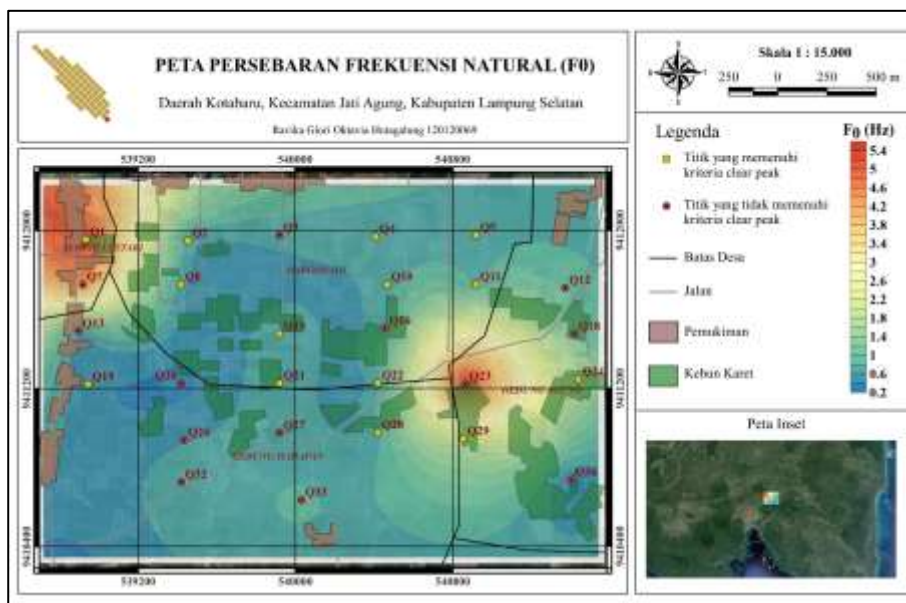


Gambar 3. Kurva Q29 dengan satu puncak (kiri) dan kurva Q15 dengan dua puncak (kanan)

Keberadaan satu puncak pada kurva HVSR menunjukkan karakteristik yang mengindikasikan bahwa adanya perbedaan lapisan secara signifikan. Keberadaan dua puncak pada kurva HVSR menunjukkan karakteristik khusus, yang mengindikasikan kemungkinan kontras impedansi di dua kedalaman berbeda, yaitu kedalaman dangkal dan kedalaman lebih dalam. Kemungkinan besar, bentuk kurva ini mencerminkan kondisi geologi di area tersebut, di mana terdapat sedimen tidak kompak di permukaan, sedimen yang lebih kompak di bawahnya, dan batuan dasar yang sangat kompak di bagian paling bawah.

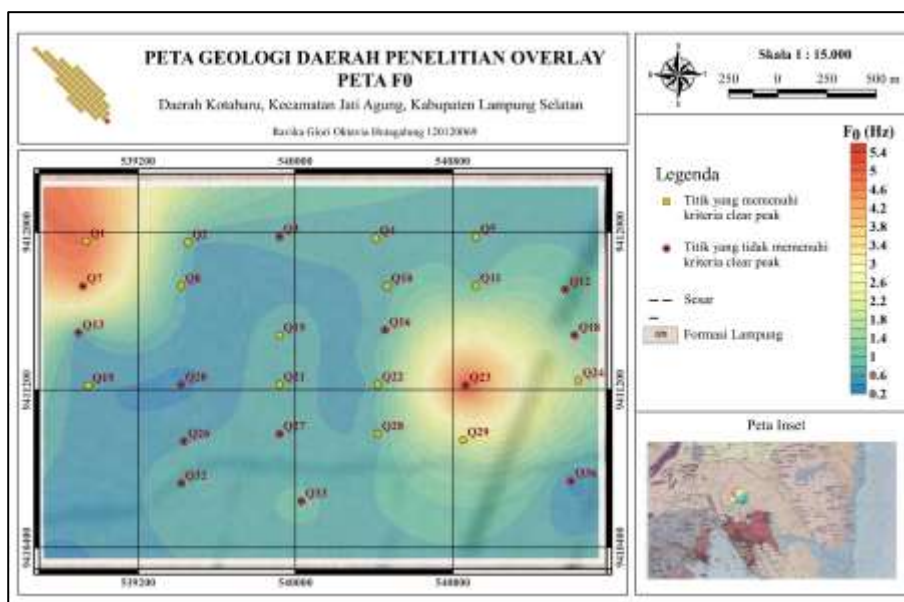
Analisis Sebaran Nilai Frekuensi Natural Tanah (f_0)

Frekuensi natural menunjukkan frekuensi di mana amplifikasi gelombang tanah mencapai puncaknya, seperti yang terlihat pada kurva HVSR. Peta sebaran tanah di Kotabaru, ditunjukkan pada **Gambar 4**. Nilai frekuensi natural di daerah penelitian berkisar antara 0.52 Hz sampai dengan 5.81 Hz. Dari peta frekuensi natural dapat dilihat daerah yang mempunyai nilai frekuensi tanah tinggi berada di titik Q1 dan Q7 yang terletak di Desa Margo Lestari pada arah Barat Laut dari peta dan di titik Q23 di Desa Gedung Harapan pada arah Timur dari peta. Selain dari ke tiga titik tersebut, memiliki frekuensi natural yang rendah menurut Kanai dan Tanaka [17] yaitu kurang dari 2.5 Hz.



Gambar 4. Peta Persebaran Frekuensi Natural (f_0) di daerah penelitian

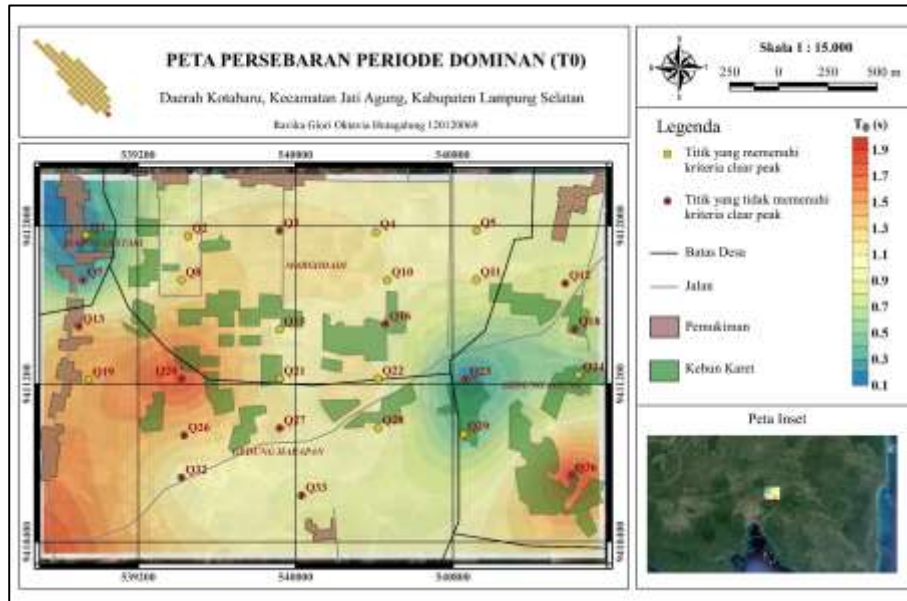
Berdasarkan peta *overlay* geologi dengan f_0 (**Gambar 5**), daerah penelitian wilayah Kotabaru terletak pada satu jenis formasi yaitu formasi Lampung (Qt1), dengan formasi tersebut tersusun atas batuan tuf riolitik, tuf berbatuapung, batu lempung tufaan, tuf padu tufit dan batu pasir tufaan. Frekuensi natural memiliki keterkaitan erat dengan dua faktor utama yaitu kecepatan gelombang geser dan juga ketebalan sedimen bawah permukaan (H). Di area sedimen dengan tingkat kekerasan dan jenis tanah yang serupa, frekuensi natural tinggi menunjukkan ketebalan sedimen yang rendah. Sebaliknya, frekuensi natural rendah menunjukkan ketebalan sedimen yang tinggi. Daerah penelitian dibagi menjadi dua tipe yaitu terdapat 24 titik pada tipe IV dengan nilai frekuensi naturalnya kurang dari 2,5 dengan ketebalan sedimen permukaan yang sangat tebal. Dan terdapat 3 titik pada tipe II dengan rentang nilai frekuensi naturalnya 4 – 6,67 dengan ketebalan sedimen permukaan tergolong menengah yaitu sekitar 5 – 10 meter.



Gambar 5. Peta *Overlay* Geologi Daerah Penelitian dengan f_0

Analisis Sebaran Nilai Periode Dominan (T_0)

Nilai periode dominan dan frekuensi natural memiliki hubungan yang erat. Periode dominan menunjukkan waktu yang dibutuhkan gelombang gempa bumi untuk merambat melalui lapisan bawah permukaan bumi. Persebaran periode dominan pada daerah penelitian memiliki nilai yang bervariasi yaitu sebesar 0,17 – 1,9 sekon. **Gambar 6** menunjukkan peta persebaran nilai periode dominan di daerah penelitian. Daerah yang memiliki nilai periode dominan yang rendah terdapat di 3 titik yaitu titik Q1 dan Q7 yang terdapat pada arah Barat Laut dan titik Q23 terdapat pada arah Timur peta. Nilai periode dominan tertinggi berada pada titik Q20 dan Q36 sedangkan nilai periode dominan terendah berada pada titik Q23. Berikut ini merupakan hasil dari pemetaan persebaran nilai Periode Dominan.

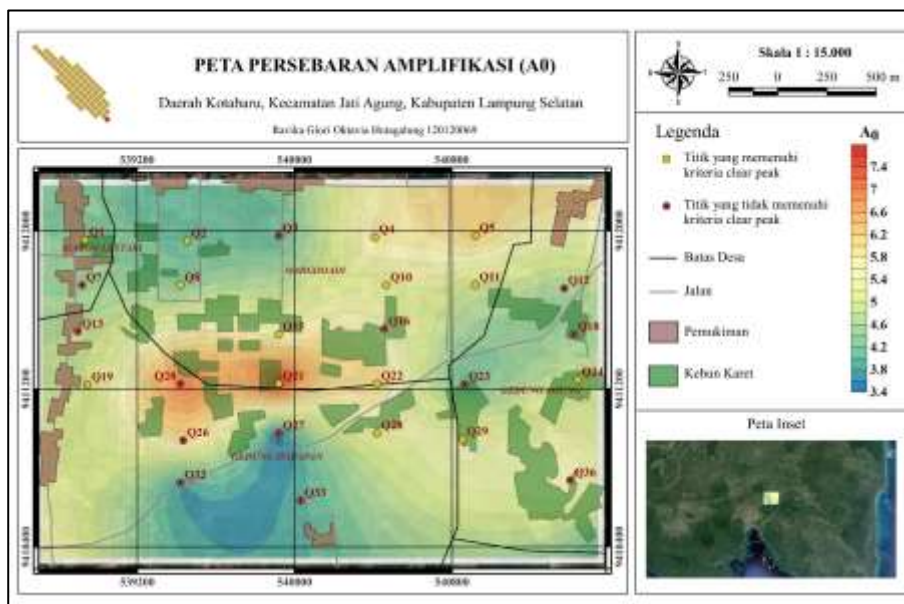


Gambar 6. Peta Persebaran nilai Periode Dominan (T_0) pada daerah penelitian

Klasifikasi tanah menurut Kanai dan Tanaka [17] serta Omete [18] merupakan salah satu metode untuk menentukan karakteristik tanah berdasarkan frekuensi dan periode dominan. Berdasarkan klasifikasi tersebut diketahui bahwa daerah dengan nilai periode dominan tinggi memiliki karakteristik tanah sangat lunak, sedangkan daerah dengan nilai periode dominan rendah memiliki karakteristik tanah keras. Kawasan dengan periode getaran dominan tinggi cenderung mengalami dampak kerusakan yang lebih parah akibat gempa. Daerah penelitian dibagi menjadi dua tipe yaitu terdapat 24 titik dengan nilai periode dominannya lebih dari 0,4 dengan karakter tanahnya yang sangat lunak. Dan terdapat 3 titik dengan rentang nilai periode dominannya 0,17 hingga 0,2 dengan karakter kekerasan tanahnya yaitu sedang.

Analisis Sebaran Nilai Amplifikasi (A_0)

Tingkat kerusakan bangunan akibat gempa bumi tidak hanya bergantung pada kekuatan gempanya, tetapi juga dipengaruhi oleh amplifikasi gelombang gempa yang terjadi dari batuan dasar (*bedrock*) hingga permukaan tanah. Faktor amplifikasi mewakili nilai puncak pada kurva HVSR. Nilai A_0 menunjukkan sifat fisik sedimen, yang berkaitan dengan tingkat kekerasan dan kelunakannya. Secara teoritis, besarnya nilai faktor amplifikasi menunjukkan ketebalan sedimen yang semakin lunak. Di sisi lain, nilai amplifikasi yang rendah menunjukkan sedimen dengan lapisan yang lebih keras. Semakin besar nilai faktor amplifikasi di suatu daerah, semakin tinggi pula potensi kerusakan bangunannya jika terkena guncangan gempa. Hal ini menunjukkan bahwa faktor amplifikasi merupakan salah satu faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam analisis kerentanan gempa bumi.

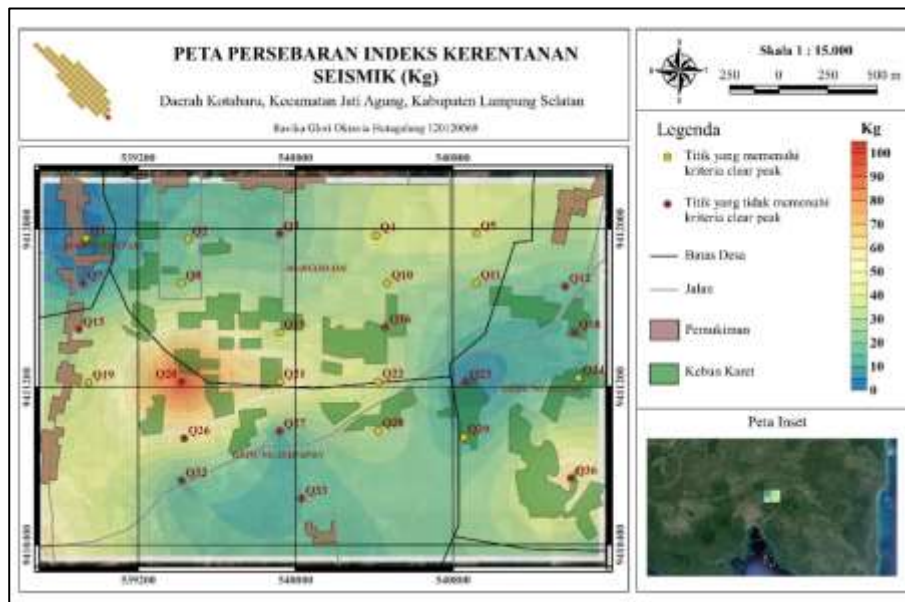


Gambar 7. Peta Persebaran Nilai Amplifikasi (A_0) pada daerah penelitian

Daerah dengan permukaan tanah yang tersusun atas sedimen lunak dan memiliki batuan dasar keras berpotensi mengalami kerusakan bangunan yang lebih parah akibat getaran gempa. Kondisi geologi seperti ini menghasilkan perbedaan impedansi (kontras) yang tinggi antara lapisan sedimen dan batuan dasar. Sebaran nilai faktor amplifikasi tanah di daerah Kotabaru ditunjukkan pada **Gambar 7**. Nilai faktor amplifikasi spektrum tanahnya berkisar antara 3,46 sampai dengan 7,79. Daerah dengan nilai A_0 sedang dengan rentang nilai A_0 dari 3 sampai dengan kurang dari 6 yaitu terdapat di 22 titik pengukuran. Sedangkan zona wilayah yang mempunyai nilai faktor amplifikasi tinggi dengan nilai faktor amplifikasi berkisar antara 6 sampai dengan 9 terdapat di 5 titik pengukuran. Puncak kurva HVSr, yang mewakili nilai faktor amplifikasi tanah, menunjukkan adanya variasi impedansi pada per lapisan tanah. Hal ini dapat disebabkan oleh perubahan kecepatan gelombang geser atau perubahan densitas tanah akibat variasi kekompakan batuan. Hal ini menjadikan tingginya nilai faktor amplifikasi tanah menandakan potensi kerusakan yang lebih besar akibat guncangan gempa bumi di daerah tersebut.

Analisis Sebaran Nilai Indeks Kerentanan Seismik (K_g)

Nilai indeks kerentanan seismik ditentukan oleh dua faktor utama, yaitu nilai faktor amplifikasi tanah dan periode dominan tanah. Daerah dengan nilai amplifikasi tinggi dan frekuensi natural rendah menunjukkan tingkat kerentanan seismik yang tinggi. Hal ini menandakan bahwa daerah tersebut lebih rentan mengalami kerusakan akibat gempa bumi. Daerah dengan kontras impedansi tinggi menunjukkan nilai amplifikasi yang tinggi pula. Sementara itu, daerah dengan ketebalan besar dan kekompakan tinggi memiliki nilai K_g yang kecil. Daerah dengan tingkat amplifikasi dan frekuensi natural yang rendah menunjukkan nilai indeks kerentanan seismik yang rendah pula. Untuk wilayah Kotabaru yang memiliki nilai indeks kerentanan seismik tinggi dapat disebabkan karena adanya kontras densitas lapisan lunak dan lapisan keras di bawahnya. Kontras impedansi berperan signifikan dalam meningkatkan nilai faktor amplifikasi tanah (A_0), yang berakibat pada nilai indeks kerentanan gempa yang tinggi di daerah tersebut.

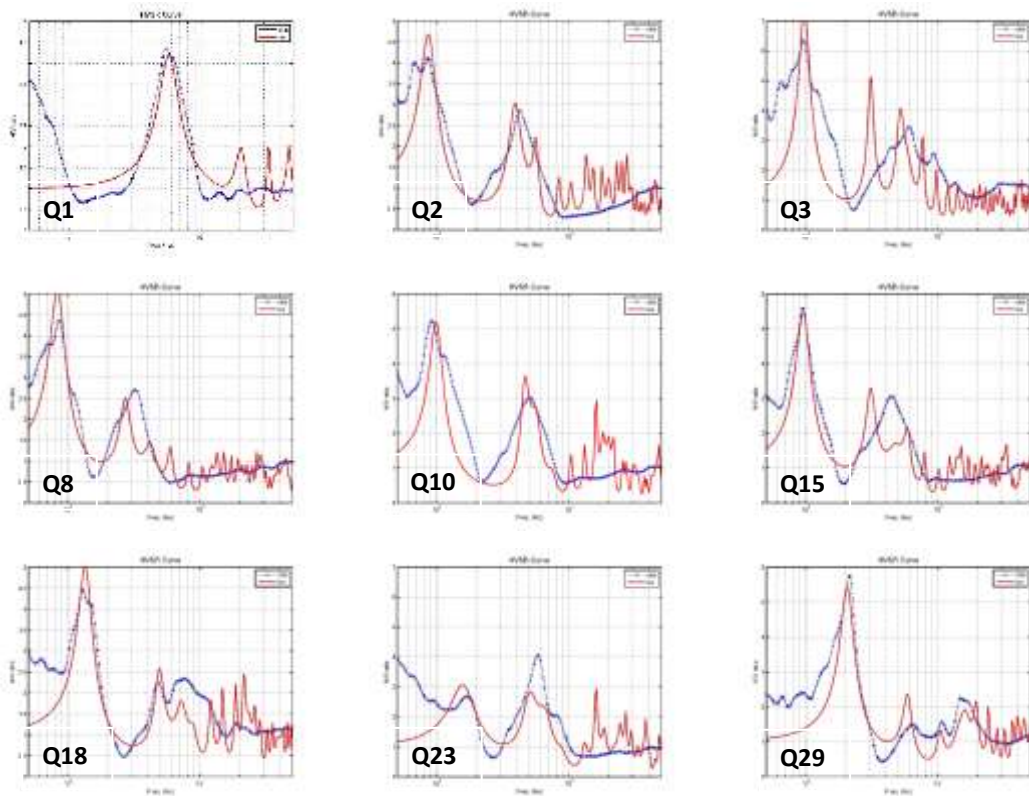


Gambar 8. Peta Persebaran Indeks Kerentanan Seismik (K_g) pada daerah penelitian

Berdasarkan analisis, kawasan penelitian memiliki tingkat kerentanan seismik yang tinggi, menunjukkan potensi kerusakan akibat gempa bumi yang lebih besar dibandingkan wilayah lain. **Gambar 8** memvisualisasikan hasil penelitian indeks kerentanan seismik tersebut. Nilai indeks kerentanan seismik tanah berkisar antara 2,83 sampai dengan 98,09. Nilai indeks kerentanan seismik rendah berada di titik Q23 dengan rentang nilai kurang dari 3. Nilai indeks kerentanan seismik sedang berada di titik Q1 dan Q7 dengan rentang nilai dari 3 hingga 6. Selain dari titik-titik tersebut, titik yang lainnya termasuk ke dalam kategori indeks kerentanan seismik dengan rentang nilai lebih dari 6.

Inversi Kurva HVSr

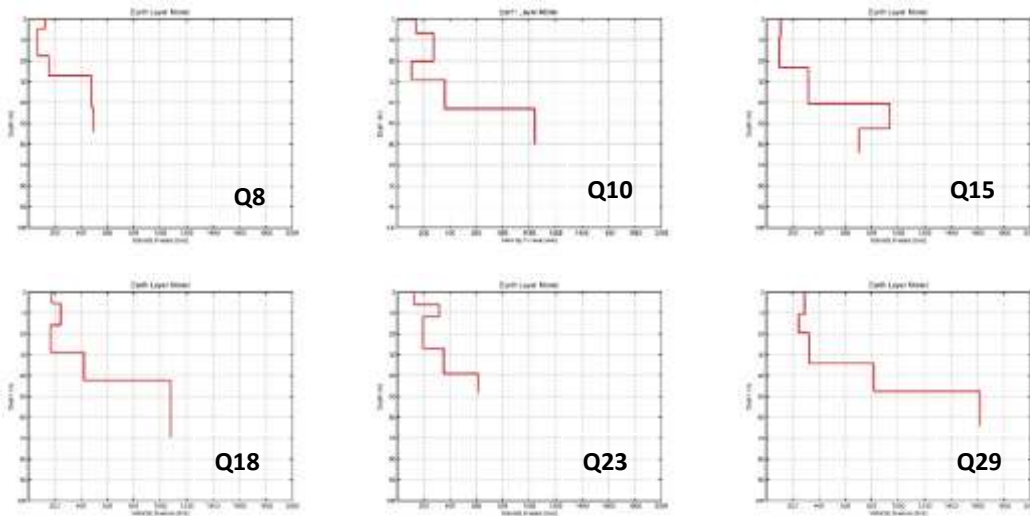
Hasil inversi menunjukkan kurva HVSr relatif sama antara kurva observasi dan kurva kalkulasi. Kurva HVSr di daerah Kotabaru didominasi oleh kurva dengan dua puncak dengan puncak tertinggi terdapat pada frekuensi natural yang rendah. Kurva dengan dua puncak tersebut menunjukkan adanya kontras impedansi pada kedalaman berbeda, atau memiliki tiga lapisan tanah dengan karakteristik yang berbeda. Kemungkinan besar, bentuk kurva ini mencerminkan kondisi geologi di area tersebut, di mana terdapat sedimen tidak kompak di permukaan, sedimen yang lebih kompak di bawahnya, dan batuan dasar yang sangat kompak di bagian paling bawah. Sementara itu kurva pada titik Q23 memiliki dua puncak, namun puncak tertingginya terdapat pada frekuensi yang tinggi yang artinya lapisan kerasnya terdapat pada lapisan pertama, dan lapisan yang lebih lunak di bawahnya. Kurva pada titik Q1 dan Q29 menunjukkan kurva dengan satu puncak yang jelas menunjukkan karakteristik yang mengindikasikan bahwa adanya perbedaan lapisan secara signifikan. Jika ada perubahan signifikan dalam struktur geologi di bawah permukaan tanah, seperti perbedaan dalam kedalaman batuan dasar atau keberadaan batuan yang berbeda.



Gambar 9. Kurva HVSR dari lapangan (garis merah) dan kurva HVSR terbaik dari proses inversi (garis biru)

Gambar 10 merupakan model pelapisan bawah permukaan berdasarkan profil nilai V_s terhadap kedalaman. Hasil inversi ini mampu memodelkan hingga kedalaman 120 meter, dengan rata-rata 60 meter. Berdasarkan **Gambar 10**, distribusi nilai V_s meningkat seiring bertambahnya kedalaman hingga kedalaman 60 meter. Kecepatan V_s meningkat signifikan pada kedalaman 40 hingga 50 meter. Pada kedalaman 0 – 20 meter didominasi oleh lapisan dengan nilai $V_s < 350$ m/s yang merupakan jenis tanah lunak hingga sedang. Kemudian pada kedalaman 30 meter mulai naik dari 300 m/s bahkan hingga 1200 m/s pada titik Q1 dan terus meningkat kecepatannya dari 400 m/s sampai 1600 m/s pada kedalaman 40 hingga 60 meter yang tergolong lapisan batuan yang lebih keras.

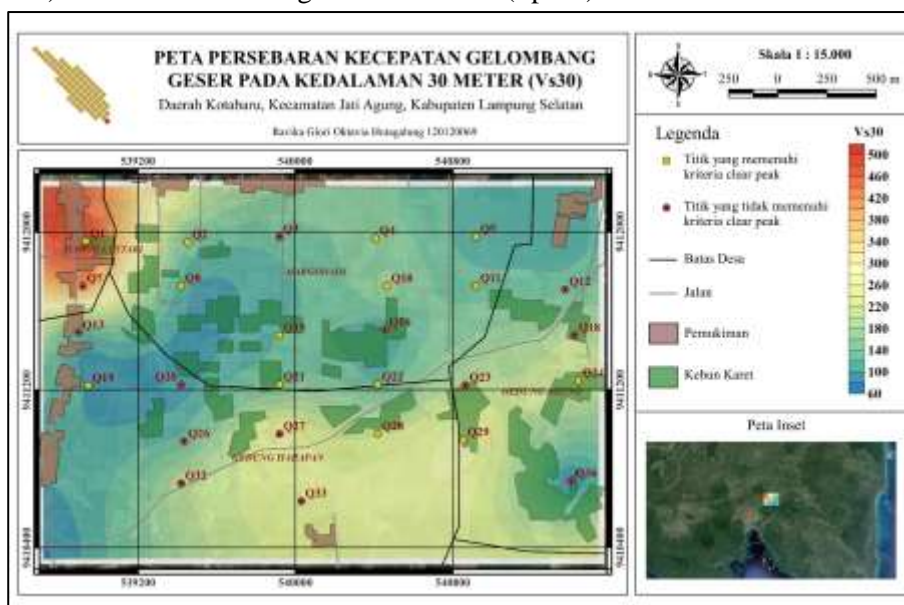




Gambar 10. Model V_s yang diperoleh dari proses inversi menggunakan algoritma PSO

Analisis Sebaran Kecepatan Gelombang Geser pada Kedalaman 30 Meter (V_{S30})

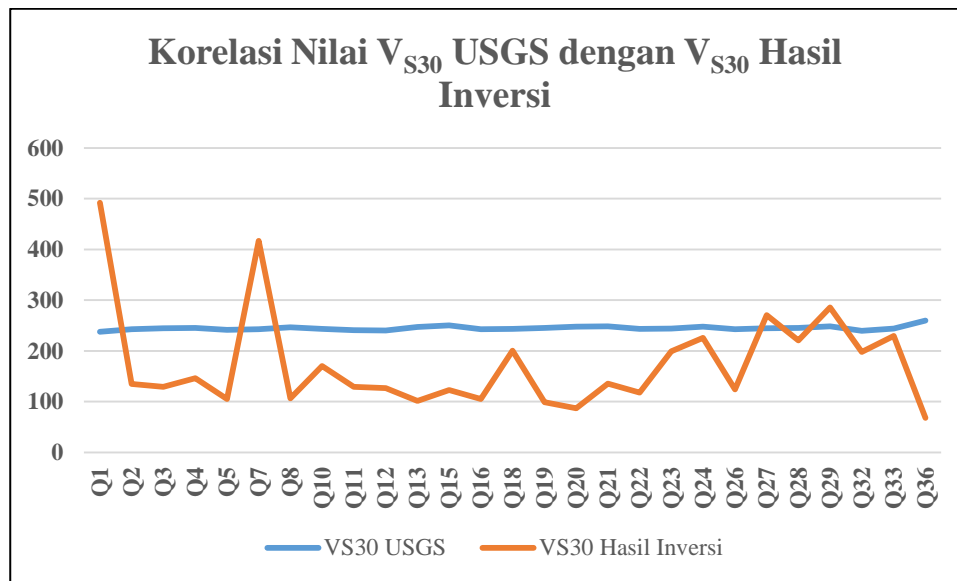
Nilai V_{S30} yang tinggi umumnya berada pada wilayah yang memiliki lapisan bawah permukaan yang keras, sedangkan nilai V_{S30} yang rendah umumnya berada pada wilayah yang memiliki lapisan bawah permukaan yang lunak. Daerah dengan kecepatan relatif tinggi berada di bagian Barat Laut di desa Margo Lestari. Wilayah dengan V_{S30} bernilai relatif rendah berada di desa Margodadi, bagian Barat desa Gedung Harapan, dan di bagian selatan desa Gedung Agung. Sebaran nilai kecepatan gelombang geser sampai pada kedalaman 30 meter rata-rata hasil inversi kurva HVSr ditunjukkan pada **Gambar 11**. Nilai V_{S30} berkisar antara 68,29 m/s sampai dengan 492,29 m/s. Berdasarkan klasifikasi NEHRP [16], nilai V_{S30} di Kotabaru menunjukkan bahwa tanah di daerah Kotabaru termasuk ke dalam tiga jenis dan tipe tanah yaitu tanah lunak (tipe E) , tanah sedang (tipe D) dan tanah keras dengan batuan lunak (tipe C).



Gambar 11. Peta Persebaran Kecepatan Gelombang Geser pada Kedalaman 30 meter (V_{S30}) pada daerah penelitian

Perbandingan Antara Nilai V_{S30} USGS (*United States Geological Survey*) dengan V_{S30} Hasil Inversi

Berdasarkan hasil pengolahan data di 27 lokasi pengukuran, menunjukkan bahwa nilai V_{S30} berada pada kisaran 68 - 492 m/s. Secara umum, nilai V_{S30} di daerah penelitian relatif rendah, dengan nilai rata-rata 175 m/s. Mengacu pada klasifikasi *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NHERP) tahun 2000, nilai V_{S30} untuk daerah penelitian berada pada tipe E (tanah lunak) sebanyak 17 titik, tipe D (tanah sedang) sebanyak 8 titik, dan tipe C (tanah keras dan batuan lunak) sebanyak 2 titik.



Gambar 12. Grafik perbandingan antara Nilai V_{S30} Hasil Inversi dengan USGS

Distribusi nilai V_{S30} yang dari hasil inversi memiliki nilai yang lebih rendah daripada model USGS, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 12**. Namun ada 4 titik yang memiliki nilai yang lebih besar dari V_{S30} USGS seperti Q1, Q7, Q27 dan Q29. Nilai V_{S30} dari model USGS merupakan proksi dari model kemiringan topografi yang dikembangkan oleh Allen & Wald [19]. Terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara nilai V_{S30} hasil inversi dengan nilai V_{S30} yang diprediksi dari proksi kemiringan lereng topografi, terutama pada daerah dataran tinggi yang memiliki kemiringan lereng landai. Nilai V_{S30} hasil penelitian ini berada pada kisaran 68 - 492 m/s tergolong ke dalam tipe E, D dan C, sedangkan model USGS memberikan nilai 238 – 259 m/s hanya termasuk ke dalam tipe D. Perbandingan hasil inversi dengan model USGS menunjukkan bahwa nilai estimasi V_{S30} berdasarkan model USGS tidak sesuai untuk wilayah penelitian dan V_{S30} hasil inversi lebih akurat dan dipercaya, dikarenakan data yang dilakukan inversi merupakan data yang diukur langsung di lapangan.

KESIMPULAN

Berikut merupakan kesimpulan dari hasil yang telah diperoleh:

1. Persebaran nilai frekuensi natural di daerah Kotabaru didominasi oleh nilai yang rendah atau bernilai kurang dari 2,5 Hz sebanyak 24 dari 27 titik pengukuran. Amplifikasi di daerah penelitian didominasi oleh nilai amplifikasi yang sedang atau berkisar 3 hingga 6 sebanyak 22 dari 27 titik pengukuran. Nilai periode dominan di daerah penelitian dominan berkisar lebih

dari 0,4 *second* sebanyak 24 titik. Nilai indeks kerentanan seismik di daerah penelitian didominasi oleh nilai yang tinggi atau bernilai lebih dari 6 sebanyak 24 titik.

2. Persebaran nilai kecepatan gelombang geser pada kedalaman 30 meter di daerah penelitian berkisar antara 68,29 m/s sampai dengan 492,29 m/s dan termasuk ke dalam tiga jenis dan tipe tanah yaitu tanah lunak (tipe E) , tanah sedang (tipe D) dan tanah keras dengan batuan lunak (tipe C).

PUSTAKA

- [1] A. Ariyanto dkk., "Pemetaan Kerentanan Seismik Melalui Analisis Mikrotremor Hvsr Di Wilayah Kecamatan Kemiling Dan Sekitarnya," JGE, vol. 10, no. 2, pp. 82–99, Jul. 2024, doi: 10.23960/jge.v10i2.393.
- [2] G. A. Mirta, A. Farduwin dan Y. Setyawan, "Identifikasi Karakteristik Tanah Menggunakan Metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) di Daerah Sukabumi, Bandar Lampung," vol. 11.
- [3] J. C. D. B. Pinem, A. Farduwin, dan Y. Styawan, "Pemanfaatan Metode Hvsr Untuk Studi Karakteristik Tanah Di Tanjung Kemala Daerah Kabupaten Tanggamus," jurgeo, vol. 10, no. 2, pp. 106–122, Aug. 2024, doi: 10.12962/j25023659.v10i2.1619.
- [4] Kencoro, G., M Farid, Hadi, A. I., Fadli, D. I., & Sedayu, A. (2023). Analisis Zona Rawan Gempa Bumi Di Kabupaten Bengkulu Selatan Berdasarkan Percepatan Tanah Puncak Menggunakan Formula Kanai. *Jurnal Kumparan Fisika*, 6, 75-82.
- [5] SESAME. (2004). *Guidelines For The Implementation Of The H/V Spectral Ratio Technique On Ambient Vibrations : Measurements, Processing And Interpretation. SESAME European Research Project.*
- [6] Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). *Ground Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio Between Horizontal to Vertical Components of Microtremor. Bulletin of the Seismological of America*, 228-241.
- [7] Neukirch, M., Jerez, A. G., Villasenor, A., Luzon, F., Ruiz, M., & Molina, L. (2021). *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Ambient Vibration Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Ambient Vibration. Sensors.*
- [8] Bard, P.-Y. (1994). *Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. Journal of physics of the Earth*, 377-397.
- [9] Nakamura, Y. (2000). *Clear Identification Of Fundamental Idea Of Nakamura's Technique And Its Application. System and Data Research Co. Ltd.*
- [10] Rofiki. (2020). Analisis Indeks Kerentanan Seismik Dengan Metode HVSr Di Kecamatan Wedi Kabupaten Klaten. Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta.
- [11] Firdaus, N. (2016). *Subsurface Imaging Of 'Lusi' Embankment Through Vertical Electrical Sounding Inversion Using Regressive-Regressive Particle Swarm Optimization.* Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [12] A. Farduwin dan T. Yudistira, "Shear velocity inversion from ambient seismic noise using RR-PSO: a case study of Nusa Tenggara Island," J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1949, no. 1, p. 012022, Jun. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1949/1/012022.
- [13] A. Zaenudin, I. G. B. Darmawan, A. Farduwin, dan R. C. Wibowo, "Shear wave velocity estimation based on the particle swarm optimization method of HVSr curve inversion in Bakauheni district, Indonesia," Turkish Journal of Earth Sciences, Jan. 2022, doi: 10.55730/1300-0985.1815.
- [14] A. Zaenudin, A. Farduwin, G. I. Boy Darmawan, dan Karyanto, "Shear wave velocity model using HVSr inversion beneath Bandar Lampung City," Earthquake Science, vol. 37, no. 4, pp. 337–351, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.eqs.2024.04.004.
- [15] Mucciarelli, M. O. (2008). *Assesment of Seismic Site Amplification and of Seismic Building Vulnerability in the Republic of Macedonia, Croatia and Slovenia. The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 12-17.
- [16] NEHRP. (2000). *Recommended Provisions For Seismic Regulations For New Buildings And Other Structures Part 2: Commentary. National Earthquake Hazards Reduction Program : A research and implementation partnership.*
- [17] K. Kanai and T. Tanaka, "Spectrum of strong earthquake ground motions," Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, vol. 39, pp. 85–130, 1961.
- [18] E. Omete, J. O. Oyenusi, and J. S. Ojo, "Site effect assessment using microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr) method in parts of Southwestern Nigeria," J. Appl. Geophys., vol. 159, pp. 103–113, 2018.
- [19] T. I. Allen and D. J. Wald, "On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (Vs30)," Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 99, no. 2A, pp. 935–943, Apr. 2009, doi: 10.1785/0120080255.