

PEMANFAATAN METODE HVSR UNTUK STUDI KARAKTERISTIK TANAH DI TANJUNG KEMALA DAERAH KABUPATEN TANGGAMUS

Junita Cintia Dewi Br Pinem^{1*}, Alhada Farduwin¹, Yudha Styawan¹

¹Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Industri-Institut Teknologi Sumatera Lampung
e-mail : alhada.farduwin@tg.its.ac.id

Abstrak.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengidentifikasi karakteristik tanah di Kabupaten Tanggamus, tepatnya pada Desa Tanjung Kemala, dengan fokus pada parameter penting seperti indeks kerentanan seismik (K_g), amplifikasi (A_0), dan frekuensi natural (f_0). Karakteristik tanah ini sangat penting dalam menentukan zona rawan seismik yang dapat memengaruhi keputusan dalam pemilihan lokasi pembangunan. Data untuk penelitian ini diperoleh melalui pengukuran mikrotremor yang dilakukan menggunakan alat Raspberry Shake 3D pada 24 lokasi observasi, yang tersebar dengan interval sebesar 0,5 km. Analisis data dilakukan dengan menggunakan *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR), yang memungkinkan penilaian A_0 dan f_0 . Luaran dari analisis ini memperlihatkan f_0 yang bervariasi di antara 0,52 Hz dan 21,73 Hz, sedangkan A_0 berkisar antara 1,97 hingga 7,66 kali, dan nilai 0,71 hingga 37,34 dari K_g . Data ini mengungkapkan bahwa daerah dengan K_g rendah terletak di bagian timur dan timur laut, sedangkan daerah dengan K_g tinggi ditemukan di bagian barat laut dan tengah barat daya. Selain itu, pengukuran ketebalan lapisan sedimen berdasarkan nilai kecepatan gelombang geser sepanjang kedalaman 30 meter yang dirata-ratakan (V_{s30}) dengan hasil antara 83,67 m/s hingga 1380,82 m/s, dengan dominasi tipe C yang menunjukkan tanah yang sangat padat. Temuan ini sangat berharga untuk memberikan wawasan yang mendalam mengenai potensi risiko seismik dan mempertimbangkan aspek-aspek penting dalam perencanaan dan pembangunan yang lebih aman di kawasan tersebut.

Kata Kunci: Amplifikasi, Frekuensi Natural, Indeks Kerentanan Seismik, Mikrotremor, V_{s30}

Abstract.

This research aims to evaluate and identify soil characteristics in Tanggamus Regency, specifically in Tanjung Kemala Village, focusing on important parameters such as the seismic vulnerability index (K_g), amplification (A_0), and natural frequency (f_0). These soil characteristics are crucial in determining seismic hazard zones that can influence decisions in site selection for construction. The data for this study was obtained through microtremor measurements conducted using Raspberry Shake 3D devices at 24 observation locations, spaced at intervals of 0.5 km. Data analysis was performed using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method, allowing for the assessment of A_0 and f_0 . The analysis results showed f_0 ranging between 0.52 Hz and 21.73 Hz, while A_0 ranged from 1.97 to 7.66 times, and K_g values ranged from 0.71 to 37.34. This data reveals that areas with low K_g are located in the east and northeast, while areas with high K_g are found in the northwest and central southwest. Additionally, sediment layer thickness measurements based on shear wave velocity values averaged over a depth of 30 meters (V_{s30}) ranged from 83.67 m/s to 1380.82 m/s, predominantly indicating very dense soil (type C). These findings are valuable for providing deep insights into seismic risk potential and considering important aspects in safer planning and development in the area.

Keywords: Amplification, Microtremor, Natural Frequency, Seismic Vulnerability Index, V_{s30}

PENDAHULUAN

Salah satu provinsi yang terletak di bagian selatan Pulau Sumatera adalah Lampung. Provinsi ini secara geografis berada di antara 105°45'-103°48' BT dan 3°45'-6°45' LS. Selain itu, daerah ini diapit oleh dua lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia, serta dilintasi oleh beberapa sesar besar Sumatera, termasuk segmen Semangko, Kumering, dan Sunda. Selain itu, keberadaan jalur Bukit Barisan turut berkontribusi terhadap aktivitas seismik di daerah ini, yang menjadikan Provinsi Lampung rentan terhadap bencana gempa bumi.

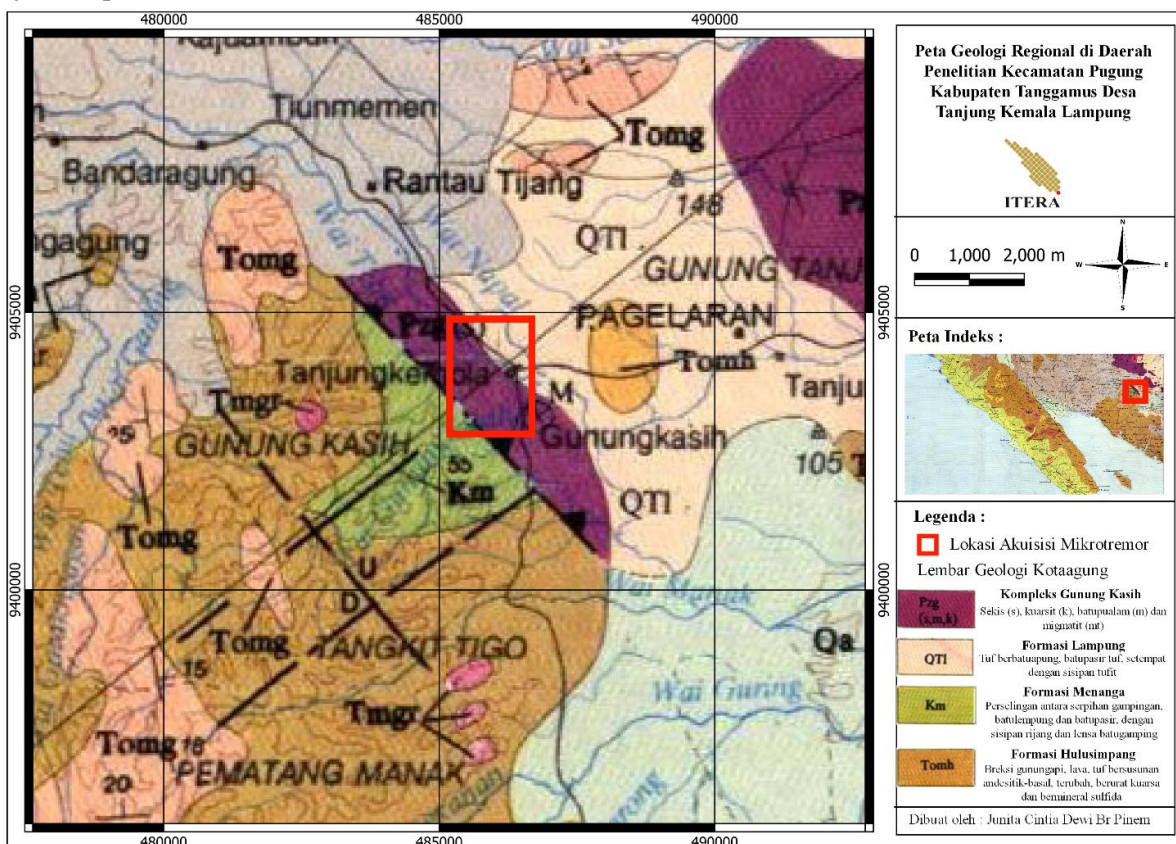
Terdapat beberapa faktor yang dapat mengakibatkan tingkat kerusakan muncul akibat terjadinya gempa bumi, dan faktor-faktor tersebut mencakup kondisi geologi, integritas struktural bangunan, dan sifat-sifat

geoteknikal dari wilayah tersebut. Kondisi geologi dan geoteknik dari suatu lokasi sangat tergantung pada karakteristik tanah di area tersebut, yang sering disebut sebagai efek situs lokal (Ngadmanto dkk., 2022).

Penelitian ini menggunakan data mikrotremor yang telah direkam dan diolah dengan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) untuk mengkarakterisasi efek tanah atau situs lokal. Metode HVSR dipilih karena ekonomis, ramah lingkungan, menggunakan peralatan sederhana yang mudah diakses, dan dapat diterapkan di wilayah perkotaan. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Nakamura (1989) dan digunakan untuk evaluasi struktur lapisan bawah permukaan dengan membandingkan rasio amplitudo pada komponen horizontal dan vertikal dalam domain frekuensi. Parameter yang dihasilkan dalam metode HVSR meliputi nilai frekuensi natural (f_0) dan amplifikasi (A_0) (Nakamura, 1989).

Penelitian di daerah Tanjung Kemala memiliki urgensi yang penting karena belum pernah dilakukan kajian terkait metode HVSR sebagai upaya mitigasi bencana di wilayah tersebut, sementara pentingnya mitigasi bencana sangat diperlukan mengingat kompleksitas geologi di daerah penelitian (Amin dkk., 1993). Kompleksitas geologi ini meningkatkan potensi risiko bencana, seperti gempa bumi, yang dapat memengaruhi struktur dan keberlanjutan masyarakat setempat. Metode HVSR berhasil mengidentifikasi karakteristik geologi, dinamika lapisan tanah, dan potensi bahaya, serta risiko bahaya kerentanan tanah di daerah penelitian, yang telah dibuktikan oleh penelitian Winardi dkk. (2022) dan Rananda dkk. (2020). Sehingga, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi distribusi f_0 , A_0 , K_g , dan V_{s30} di daerah Tanjung Kemala. Dengan memahami karakteristik tanah dan kerentanan seismik di daerah tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang berguna untuk perencanaan pembangunan infrastruktur yang lebih aman dan meminimalisir kerusakan bangunan saat terjadi gempa bumi.

Penelitian ini dilakukan di Desa Tanjung Kemala, Kecamatan Pugung, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Peta geologi Lembar Kotaagung dari portal Geomap Pusat Survei Geologi ESDM (2010) dan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Geologi Regional Kotaagung (dimodifikasi dari Amin dkk. (1993)), dengan kotak merah merupakan lokasi penelitian

Kompleks Gunung Kasih adalah formasi batuan metamorf yang terdiri dari beberapa unit yang diberi nama berdasarkan wilayah penyebarannya. Di dalam kompleks ini, terdapat batuan sekis pelitan dan sedikit gneiss yang tidak dapat dipisahkan dalam penamaannya. Pada Peta Geologi Lembar Kotaagung, Kompleks Gunung Kasih dibagi menjadi beberapa satuan batuan. Satuan Sekis Way Galih terdiri dari sekis amfibol hijau dan amfibolit ortogenesis, sedangkan Satuan Batupualam Trimulyo terdiri dari batupualam (marmer) dan sekis. Selain itu, ada Satuan Kuarsit Sidodadi yang mengandung kuarsit dengan sisipan sekis-kuarsit serisit, serta Satuan Migmatit Jundeng yang terdiri dari granitoid, sekis, dan gneiss yang diterobos oleh urat granit (Amin dkk., 1993).

Mikrotremor dipengaruhi oleh faktor alam seperti gelombang laut dan fenomena meteorologi dalam skala luas yang umumnya mempunyai frekuensi yang rendah, di bawah 1 Hz. Sedangkan pada rentang frekuensi sedang, sekitar 1-5 Hz, mikrotremor dapat berasal dari sumber alam seperti kondisi meteorologi lokal, atau dari aktivitas manusia seperti kepadatan penduduk. Pada frekuensi tinggi, yang melebihi 5 Hz, sumber utamanya biasanya berasal dari aktivitas manusia seperti kendaraan, mesin, dan pabrik (Mirzaoglu, 2003). Sumber mikrotremor dapat diklasifikasikan berdasarkan nilai frekuensinya sebagaimana dijelaskan oleh Gutenberg (1958) dan Asten (1978) yang diimplementasikan pada Ariyanto dkk. (2024).

Metode HVSR terbukti efektif dalam menganalisis karakteristik lapisan tanah permukaan karena mampu mendeteksi frekuensi resonansi alami lapisan tanah, sifatnya yang non-invasif (tidak memerlukan pengeboran) dan ekonomis, serta kemampuannya mengidentifikasi stratifikasi tanah dan efek situs lokal (*site effect*). Karakteristik tanah adalah variasi karakteristik getaran tanah, termasuk amplitudo, durasi, dan distribusi frekuensi (Sungkowo, 2016). Adapun *site effect* disini meliputi nilai f_0 yang berhubungan dengan ketebalan sedimen, A_0 yang berhubungan dengan kekompakan suatu lapisan, K_g yang berhubungan dengan risiko kerentanan suatu daerah, dan V_{s30} yang berhubungan dengan jenis dan tipe tanah.

Mikrozonasi adalah metode yang membagi wilayah besar menjadi sub wilayah yang lebih kecil berdasarkan kriteria atau parameter tertentu. Dalam mikrozonasi mikrotremor, pertimbangan mencakup berbagai faktor seperti karakteristik getaran tanah, f_0 , A_0 , K_g , V_{s30} , dan ketebalan lapisan sedimen di bawah permukaan. Mikrozonasi mikrotremor berguna untuk mengevaluasi respons dan perilaku lapisan tanah atau sedimen terhadap gempa bumi. Informasi ini dapat digunakan untuk mengurangi risiko kerusakan akibat gempa bumi, misalnya dengan memilih konstruksi yang sesuai di wilayah yang rentan secara seismik. Perbedaan lapisan tanah atau sedimen di bawah permukaan dapat menyebabkan amplifikasi atau pembesaran gelombang gempa bumi. Daerah dengan lapisan lunak cenderung lebih rentan terhadap kerusakan saat terjadi gempa bumi dibandingkan dengan daerah yang memiliki lapisan keras atau kompak (Pawirodikromo, 2012).

Frekuensi natural mengacu pada frekuensi yang paling umum muncul dan dianggap mewakili karakteristik lapisan batuan. Informasi mengenai jenis dan karakteristik batuan dapat diperoleh dari nilai frekuensi natural (Bard, 1999). Frekuensi natural suatu daerah dipengaruhi oleh kecepatan gelombang geser dan ketebalan lapisan sedimen. Semakin tinggi kecepatan rata-rata, semakin besar frekuensi naturalnya. Sebaliknya, semakin tebal ketebalan sedimen, semakin kecil frekuensi naturalnya (Nakamura, 1989; Aki & Richards, 2002). Menurut klasifikasi Kanai (1983), nilai frekuensi natural dapat dikelompokkan berdasarkan jenis tanah, sebagaimana ditunjukkan pada Ariyanto dkk. (2024).

Amplifikasi tanah terjadi ketika gelombang seismik melewati lapisan sedimen yang memiliki densitas dan kecepatan penjalaran gelombang yang berbeda dibandingkan dengan batuan dasar, sehingga mempengaruhi intensitas gelombang tersebut. Semakin besar perbedaan antara kedua parameter tersebut, semakin tinggi nilai amplifikasi perambatan gelombang yang terjadi. Pentingnya efek lokal amplifikasi dan frekuensi natural dalam upaya mitigasi bencana di suatu lokasi tidak dapat diabaikan, seperti yang diungkapkan oleh Nakamura (1989). Terdapat empat zona klasifikasi nilai amplifikasi menurut Setiawan (2009) yang dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi A_0 (Setiawan, 2009)

Zona	Klasifikasi	Nilai A_0
4	Sangat Tinggi	Lebih dari 9
3	Tinggi	6 s.d. 9
2	Sedang	3 s.d. 6
1	Rendah	Kurang dari 3

Indeks Kerentanan Seismik (K_g) mengindikasikan sejauh mana lapisan tanah permukaan rentan terhadap perubahan bentuk saat terjadi gempa, seperti yang dijelaskan oleh Nakamura (2008) pada penelitiannya mengenai *H/V Spectrum* pada tahun 2008. Konsep kerentanan seismik digunakan untuk mengukur sejauh mana tanah maupun struktur rentan yang terhadap gempa bumi. Kerentanan seismik memiliki manfaat dalam memprediksi zona-zona yang rentan mengalami kerusakan saat terjadi gempa, seperti yang disebutkan oleh Saita dkk. (2004), serta Gurler dkk. (2000). Menurut penelitian Nakamura (2008), kerentanan terhadap gempa dapat dihitung dengan memperoleh kuadrat faktor amplifikasi dan membaginya dengan frekuensi natural. Adapun klasifikasi nilai indeks kerentanan seismik dapat ditemukan pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi indeks kerentanan seismik (Refrizon dkk., 2013)

Tipe	Nilai K_g	Keterangan
I	$K_g < 3$	Indeks Kerentanan Seismik Rendah
II	$3 < K_g < 6$	Indeks Kerentanan Seismik Sedang
III	$K_g > 6$	Indeks Kerentanan Seismik Tinggi

Persamaan 1 menunjukkan bahwa nilai K_g akan meningkat seiring bertambahnya nilai A_0 dan nilai f_0 yang kecil. Sebaliknya, nilai K_g akan berkurang jika nilai A_0 kecil dan nilai f_0 yang besar. Adapun untuk menghitung K_g adalah sebagai berikut (Nakamura, 1997)

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0} \tag{1}$$

V_{s30} merupakan kecepatan gelombang geser atau sekunder yang menjadi parameter utama dalam mendefinisikan sifat dan karakteristik dari dinamika tanah. Gelombang geser dibutuhkan untuk menganalisis dan mengevaluasi permasalahan dari lapisan tanah dan sedimen yang terletak di atas permukaan batuan dasar. Kecepatan gelombang geser dapat diidentifikasi melalui penjalaran gelombang seismik yang bergerak tegak lurus terhadap arah rambatnya. Nilai kecepatan gelombang geser menggambarkan sifat dari pergeseran tanah (Sungkowo, 2016). Adapun dalam menentukan nilai V_{s30} menurut NEHRP (2000) pada Persamaan (2), dengan h_i dan v_i adalah ketebalan dan kecepatan pada lapisan i . Semakin besar nilai V_{s30} , maka semakin stabil tanah di suatu lokasi terhadap guncangan gempa.

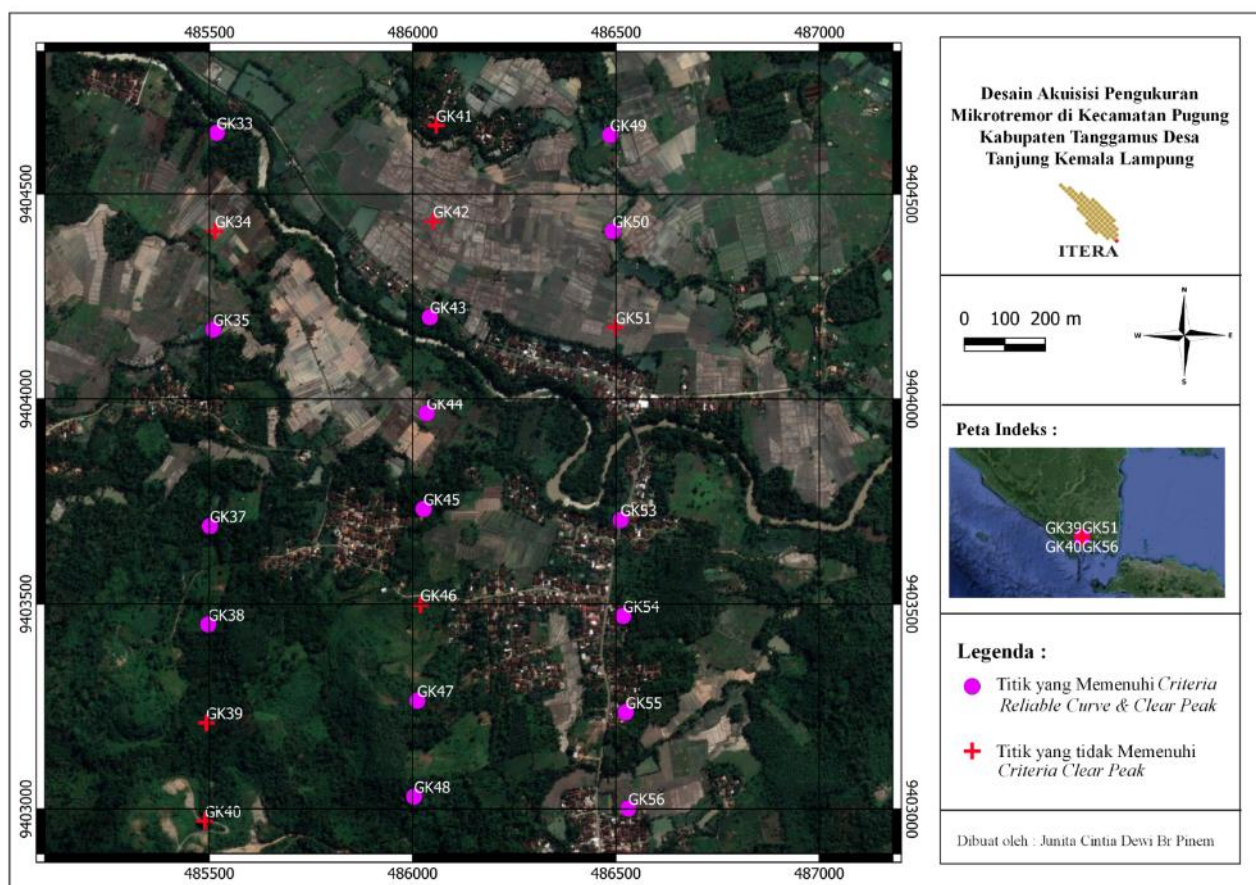
$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}} \tag{2}$$

Berikut ini merupakan klasifikasi dari nilai V_{s30} berdasarkan NEHRP (2000) yang membagi empat tipe tanah dan jenis tanah berdasarkan nilai kecepatan gelombang geser dari kedalaman 0 sampai 30 meter, yang

diterapkan pada Ariyanto dkk. (2024). Tipe-tipe tanah tersebut berupa batuan keras (A), batuan (B), tanah sangat padat atau batuan lunak (C), tanah sedang (D), dan tanah lunak (E). Sebagai contoh dari 5 tipe tanah, nilai $V_{s30} < 175$ m/s termasuk tanah lunak dengan tipe E, sedangkan 175 - 350 m/s merupakan tanah sedang dengan tipe D.

METODOLOGI

Pada penelitian ini digunakan data mikrotremor yang diperoleh dari hasil akuisisi di Desa Tanjung Kemala, Kecamatan Puhung, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Data tersebut kemudian diolah menggunakan metode HVSR. Jumlah data yang dipakai dalam penelitian ini sebanyak 24 titik. Dari hasil pengolahan terdapat 15 titik yang memenuhi kriteria dan 7 titik yang tidak memenuhi kriteria *reliable curve* dan *clarity* atau *clear peak* pada buku SESAME (2004), serta 2 titik yang dibuang karena tidak bisa dipakai sebab sinyal yang dihasilkan sangat buruk karena data tidak menerus dan putus-putus serta tidak lulus dalam *Quality Control* (QC) pada buku SESAME (2004). Titik pengukuran yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada peta desain akuisisi dari Gambar 2.



Gambar 2. Titik pengukuran yang digunakan dalam penelitian

Data mikrotremor diolah menggunakan *hvsrpy* yang mengacu pada penelitian Vantassel (2020), Cox dkk. (2020), Cheng dkk. (2020), Cheng dkk. (2021), dan SESAME (2004) untuk *package* pengolahan HVSR dalam bahasa *Python*. Dalam pengolahan tersebut terdapat beberapa pemrosesan untuk memperoleh kurva HVSR diantaranya, *windowing* untuk membagi sinyal menjadi beberapa bagian kecil yang bertujuan untuk mengekstrak sinyal mikrotremor dari data yang terekam dan mengurangi gangguan atau *noise* yang terdapat

pada sinyal tersebut. *Noise* dari sinyal mikrotremor dapat berupa lonjakan amplitudo yang mendadak. Proses *windowing* ini dilakukan dengan menerapkan jendela berlebar 60 detik Berdasarkan panduan SESAME (2004).

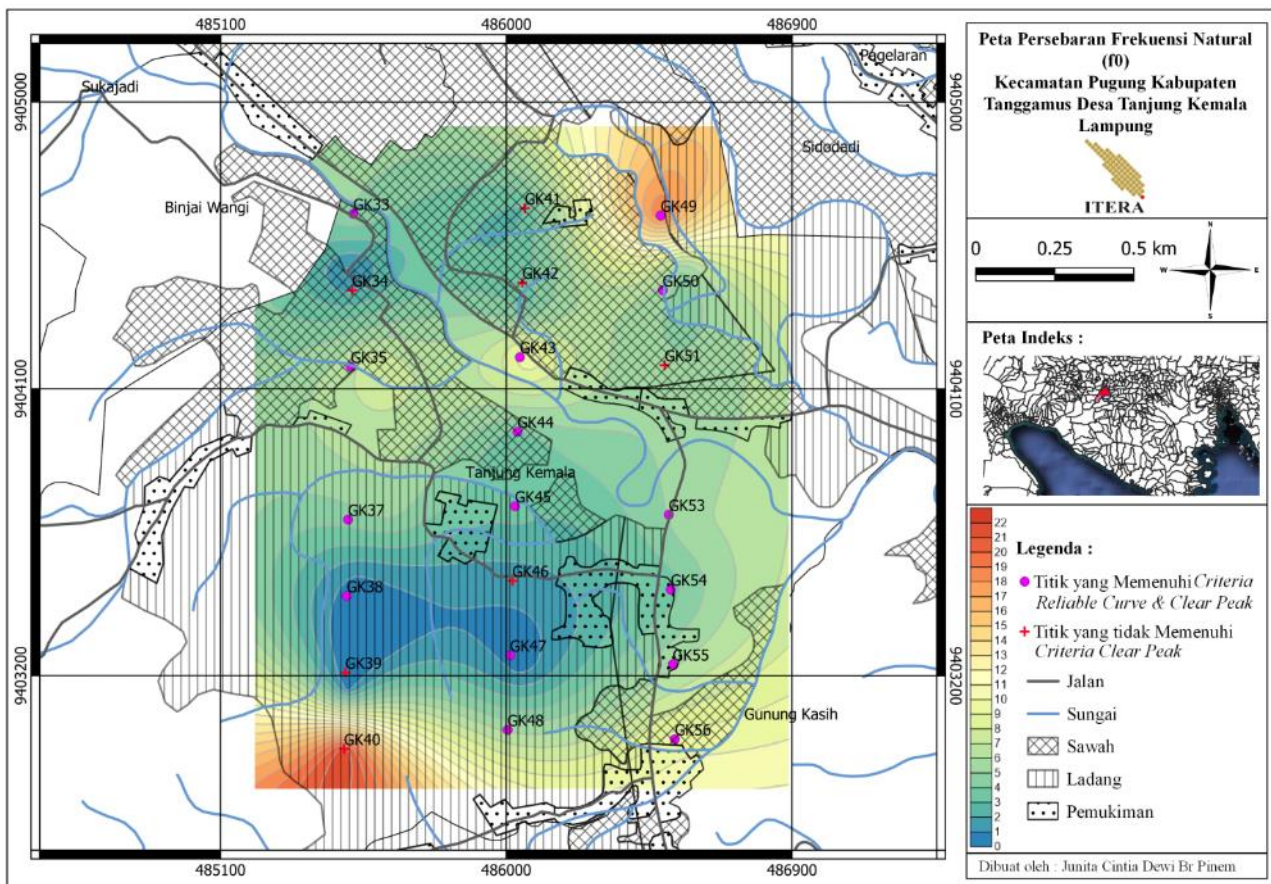
Selanjutnya ada proses *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengubah data dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Kemudian terdapat tahap *smoothing* menggunakan koefisien *bandwidth* sebesar 40 berdasarkan panduan Konno & Omachi (1998). Proses *smoothing* dilakukan untuk memperoleh kurva HVSR yang lebih *smooth* atau halus. Setelah itu dilakukan perhitungan H/V dan dilakukan *rejection* pada data yang dianggap buruk. Setelah itu akan memperoleh kurva HVSR yang akan diolah untuk memperoleh nilai f_0 , A_0 , K_g dan V_{s30} . Untuk memperoleh nilai V_{s30} , sebelumnya dilakukan proses inversi kurva HVSR menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) oleh Kennedy dan Eberhart (1995) dengan nilai *tunning parameters* $\omega = 0,8$; $a_1 = 1,8$ dan $a_2 = 2$. Nilai ini mengacu pada penelitian Farduwin dkk., (2021), Farduwin dan Yudistira (2021) dan Zaenudin dkk., (2022). Hasil inversi ini akan mendapatkan nilai ketebalan (h_i) dan kecepatan gelombang geser (v_s) disetiap lapisan. Kemudian dengan menggunakan persamaan 2, dapat dihitung nilai V_{s30} di setiap titik pengukuran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di Desa Tanjung Kemala, Kecamatan Pugung, Kabupaten Tanggamus menggunakan metode mikrotremor diperoleh beberapa parameter yaitu nilai Frekuensi Natural (f_0), Faktor Amplifikasi (A_0), Indeks Kerentanan Seismik (K_g), serta Kecepatan gelombang geser sampai kedalaman 30 meter (V_{s30}) yang diperoleh dari setiap titik pada daerah penelitian. Data pengukuran mikrotremor akan digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik tanah menggunakan metode *Horizontal To Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Hasil dari pengolahan data mikrotremor divisualisasikan dalam bentuk peta persebaran dari setiap parameter dan di *overlay* menggunakan peta geologi regional, serta diklasifikasikan berdasarkan tipe, jenis, dan rentang nilainya yang kemudian dipersentasekan dari seluruh total daerah penelitian.

Frekuensi natural sangat erat kaitannya dengan nilai ketebalan sedimen. Dengan ketebalan sedimen tebal menggambarkan tanah dengan lapisan lunak yang rawan terhadap bencana gempa dan tanah longsor. Sedangkan jika ketebalan sedimen tipis maka menggambarkan tanah dengan lapisan keras. Desa Tanjung Kemala, Kecamatan Pugung, Kabupaten Tanggamus memiliki nilai frekuensi natural yang beragam dengan nilai minimum sebesar 0,52 Hz yang terletak di sebelah barat laut pada titik GK34 dan di sebelah barat daya di sekitar titik GK38, GK39, GK46, dan GK47 yang ditandai dengan warna biru pada *color bar*. Sementara nilai maksimum 21,73 Hz yang terletak di sebelah timur laut pada titik GK49 dan barat daya tepatnya di titik GK40 yang ditandai dengan warna merah. Daerah yang memiliki nilai frekuensi natural rendah menunjukkan ketebalan sedimen yang relatif tebal dan daerah dengan nilai frekuensi natural yang tinggi menunjukkan ketebalan sedimen yang relatif tipis. Peta persebaran nilai frekuensi natural pada daerah penelitian dapat diamati pada Gambar 3.

Dari hasil Gambar 4 dengan mempertimbangkan klasifikasi yang telah disebutkan pada Ariyanto dkk. (2024) dapat dilihat pada daerah penelitian didominasi oleh sedimen menengah atau tipe II ditandai dengan warna kuning yang tersebar merata pada Formasi Kompleks Gunung Kasih (Pzg). Berdasarkan peta geologi regional kotaagung oleh Amin dkk. (1993) nilai ketebalan dari Formasi Pzg sekitar 2500 meter, ketebalan dari Formasi QT1 sekitar 200 meter dan ketebalan dari Formasi Km sekitar setengah dari formasi Pzg yaitu 1250 meter. Sementara itu daerah yang memiliki ketebalan sedimen yang sangat tebal yang ditandai dengan warna biru pada peta berada di bagian tengah pada Formasi Kompleks Gunung Kasih. Dari informasi nilai ketebalan formasi tersebut dapat diketahui bahwa Formasi Pzg lebih cenderung memiliki lapisan yang lunak hal ini diduga karena pada formasi ini telah mengalami pengangkatan ke atas permukaan yang menyebabkan bagian atasnya telah mengalami pelapukan sehingga menyebabkan ketebalan sedimen pada formasi ini menjadi sangat tebal.

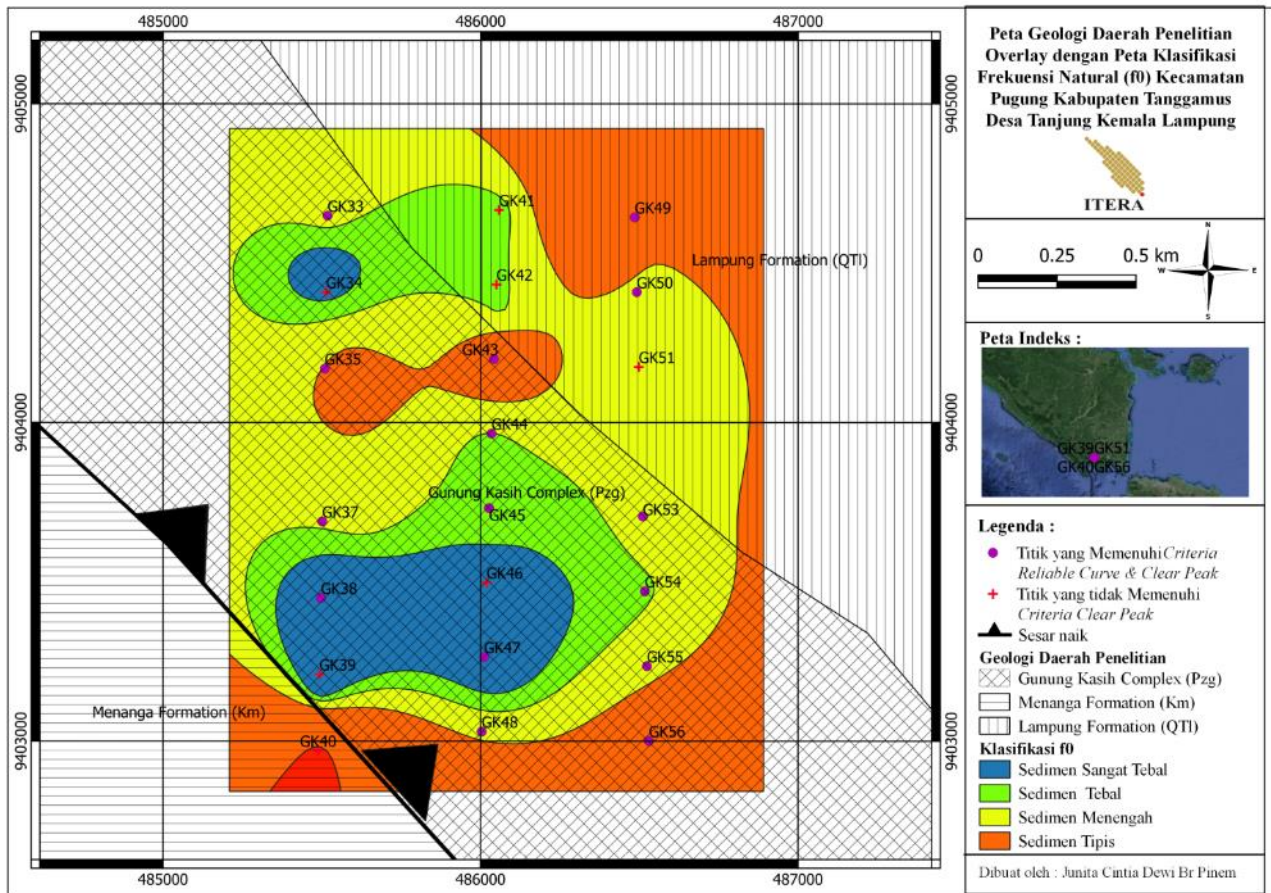


Gambar 3. Peta persebaran frekuensi natural (f_0)

Selain nilai frekuensi dominan, dari kurva H/V juga memperoleh nilai Amplifikasi (A_0). Amplifikasi berkaitan dengan penguatan gelombang seismik yang disebabkan oleh kontras impedansi antara lapisan *bedrock* atau batuan dasar di bawah dengan lapisan sedimen yang berada di atasnya. Nilai amplifikasi memiliki hubungan yang terbalik pada kecepatan gelombang geser, dimana semakin rendah kecepatan gelombang maka nilai amplifikasi cenderung lebih tinggi (Nakamura, 2008). Densitas atau kepadatan dari batuan di daerah penelitian mempengaruhi nilai kecepatan gelombang.

Dari persebaran nilai Amplifikasi (A_0) yang diperlihatkan pada Gambar 5, didapatkan bahwa nilai amplifikasi yang beragam mulai dari rendah, sedang dan tinggi dari rentang 1,9 sampai 7,6 kali penguatan. Kecepatan gelombang dipengaruhi oleh kerapatan atau densitas batuan, dimana saat densitas batuan di suatu daerah rendah, maka kecepatan gelombang yang melewati daerah tersebut akan melambat yang akan menghasilkan faktor penguatan yang semakin tinggi. Wilayah dengan nilai amplifikasi yang rendah berada pada wilayah bagian barat dan barat daya pada titik GK39 ditandai dengan warna biru. Wilayah yang memiliki nilai amplifikasi sedang terdapat pada bagian timur yaitu GK51 serta bagian tengah pada titik GK45 yang ditandai dengan warna kuning. Sedangkan wilayah yang memiliki nilai amplifikasi yang tinggi berada pada wilayah bagian timur laut pada titik GK49 dan tenggara pada titik GK55 ditandai dengan warna merah.

Nilai amplifikasi tinggi berpotensi menimbulkan kerusakan yang tinggi saat terjadi gempa bumi dan sebaliknya yang dimana hal ini dapat dipastikan melalui perhitungan indeks kerentanan seismik atau K_g nantinya. Secara teoritis saat nilai A_0 tinggi, maka kontras impedansi di daerah tersebut semakin tinggi, sedangkan saat nilai A_0 rendah, maka kontras impedansi di daerah tersebut semakin rendah, namun semuanya bergantung pada kecepatan gelombang gesernya untuk melihat apakah dia tersusun atas lapisan yang lunak atau kompak.



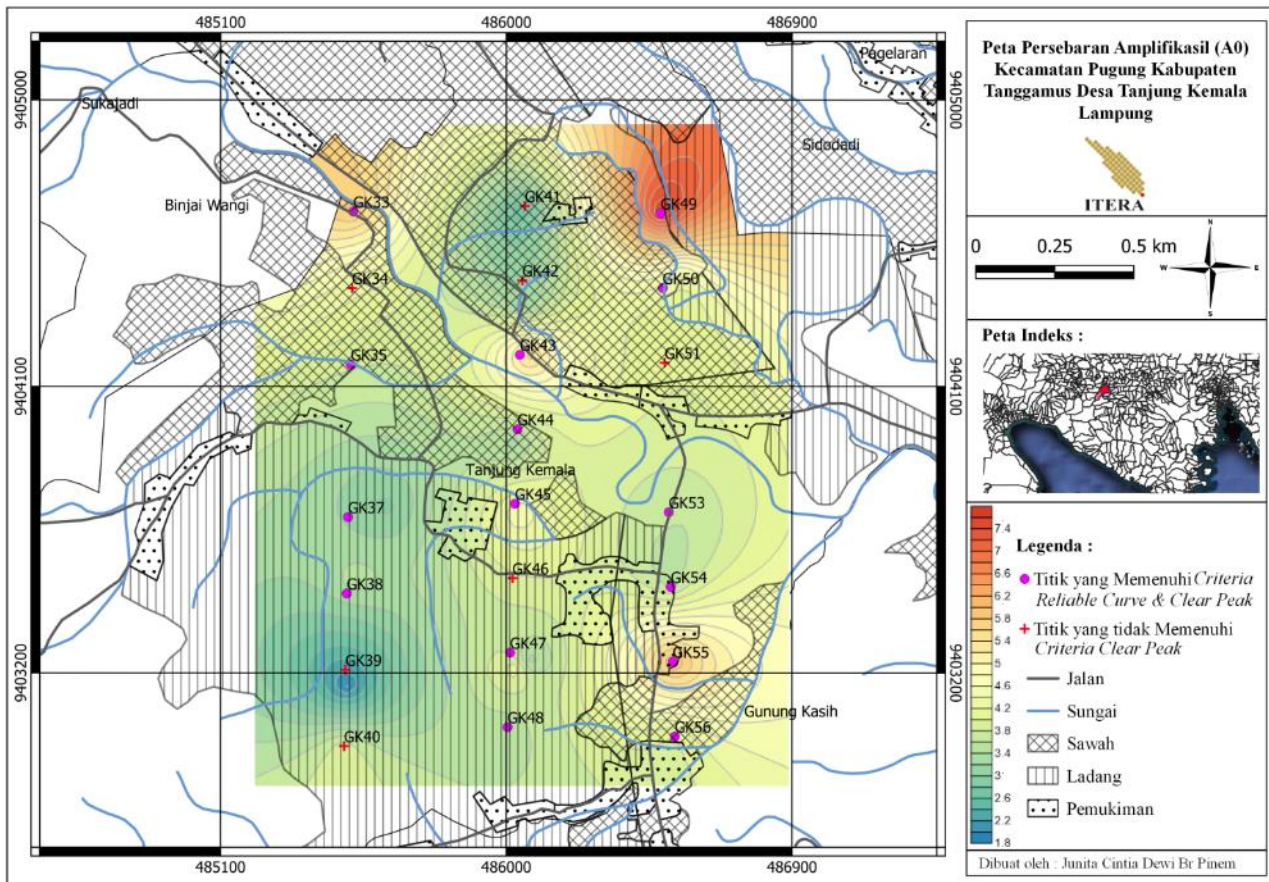
Gambar 4. Peta geologi daerah penelitian overlay dengan peta klasifikasi frekuensi natural (f_0)

Jika ditinjau berdasarkan peta *overlay* antara formasi geologi dan peta klasifikasi amplifikasi pada Gambar 6, lokasi penelitian didominasi oleh nilai amplifikasi yang sedang ditandai dengan warna kuning yang berada pada Formasi Kompleks Gunung Kasih (Pzg) dan Formasi Lampung (QTI). Nilai amplifikasi yang tinggi ditandai dengan warna oranye yang termasuk pada Formasi Lampung (QTI) dan Formasi Kompleks Gunung Kasih (Pzg). Sementara lokasi penelitian yang memiliki amplifikasi rendah yang ditandai dengan warna hijau pada peta termasuk Formasi Kompleks Gunung Kasih (Pzg) bagian tengah dan bagian barat daya.

Menurut Setiawan (2009) terdapat empat klasifikasi nilai amplifikasi yaitu daerah dengan nilai amplifikasi berkisar < 3 yang ditandai dengan warna hijau yang terletak di bagian barat daya pada peta, dimana daerah tersebut diinterpretasikan sebagai area yang memiliki kontras impedansi yang rendah antara lapisan dibawah dan lapisan yang berada diatasnya. Pada daerah dengan nilai yang terletak di bagian amplifikasi sedang berkisar 3 sampai 6 yang ditandai dengan warna kuning tersebar di hampir seluruh formasi pada peta, dan pada daerah dengan nilai yang terletak di pada nilai amplifikasi tinggi berkisar 6 sampai 9 yang ditandai dengan warna oranye yang terletak di bagian timur laut pada peta, dimana daerah tersebut diinterpretasikan memiliki kontras impedansi yang tinggi antara lapisan bawah dengan lapisan yang berada diatasnya, serta untuk klasifikasi nilai amplifikasi diatas 9 tidak terdapat pada penelitian ini.

Pada analisis peta frekuensi natural titik GK49 menunjukkan daerah dengan nilai frekuensi natural tinggi yang berarti daerah tersebut memiliki lapisan sedimen tipis serta didominasi pada batuan yang keras, namun pada peta faktor amplifikasi menunjukkan bahwa daerah tersebut justru memiliki faktor amplifikasi yang tinggi juga, dengan nilai amplifikasi pada titik GK49 tersebut adalah 7,66 yang berada pada Formasi Lampung (QTI) dan terdiri dari tuf berbatuapung, batupasir tuf dan setempat sisipan tufit. Maka daripada itu diindikasikan bahwa tingginya nilai faktor amplifikasi disebabkan oleh adanya kontras oleh lapisan di atasnya yang memiliki kecepatan tinggi serta densitas yang tinggi dan direpresentasikan memiliki lapisan sedimen

yang lunak, hal ini nantinya dapat dilihat dan dikorelasikan melalui variasi kecepatan gelombang geser untuk memvalidasi karakteristik tanah di daerah tersebut.



Gambar 5. Peta persebaran amplifikasi (A_0)

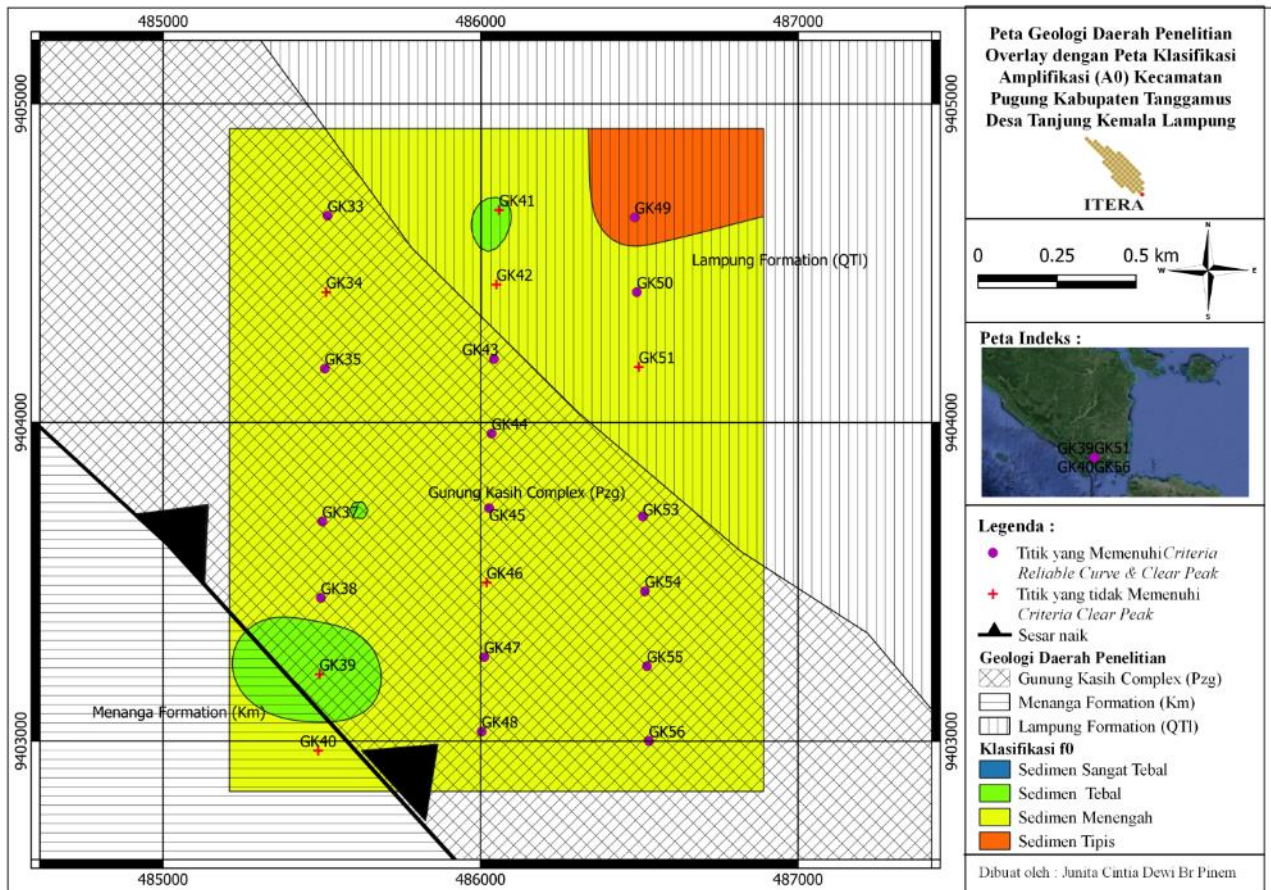
Dari Gambar 6 dapat kita lihat bahwa hubungan antara geologi regional dengan nilai amplifikasi sendiri kurang berpengaruh hal tersebut dikarenakan pada ketiga formasi rata-rata memiliki nilai amplifikasi yang berada pada klasifikasi sedang, hal tersebut dapat saja terjadi karena faktor setempat atau lokal dengan kondisi tersebut.

Informasi mengenai tingkat kerentanan lapisan permukaan tanah pada saat gempa bumi terjadi diperoleh melalui indeks kerentanan seismik. Oleh karena itu, nilai K_g dapat dimanfaatkan untuk menilai seberapa besar potensi kerusakan yang mungkin terjadi pada suatu wilayah, apakah tinggi atau rendahnya potensi tersebut. Nilai dari indeks kerentanan seismik diperoleh dengan cara menghitung menggunakan Persamaan (1). Pada persamaan tersebut dapat diketahui jika nilai dari frekuensi natural dan faktor amplifikasi sangat berdampak pada nilai indeks kerentanan seismik, dimana saat nilai amplifikasi tinggi dan frekuensi natural rendah maka nilai indeks kerentanan seismik akan meningkat begitu pula sebaliknya.

Gambar 7 merupakan peta distribusi nilai kerentanan seismik (K_g). Wilayah dengan nilai terendah sebesar 0,72 terletak di sebelah tenggara dan timur. Wilayah dengan nilai tertinggi sebesar 37 terletak di sebelah barat laut. Nilai indeks kerentanan seismik rendah berkaitan dengan lapisan yang kompak, sehingga apabila guncangan gempa bumi terjadi tidak terlalu memberikan dampak yang besar, sedangkan saat indeks kerentanan seismik tinggi, maka berkaitan dengan lapisan yang lunak, sehingga guncangan dari gempa bumi dapat memberikan kerusakan yang berarti.

Menurut Refrizon dkk. (2013) terdapat tiga klasifikasi indeks kerentanan seismik yaitu daerah dengan nilai kerentanan seismik berkisar lebih kecil dari 3 yang ditandai dengan warna hijau terletak di bagian timur pada peta, dimana daerah tersebut diinterpretasikan sebagai zona aman. Sementara itu pada daerah dengan

nilai kerentanan seismik berkisar 3 sampai 6 ditandai dengan warna kuning yang terletak di bagian tengah pada peta, daerah tersebut diinterpretasikan sebagai zona rawan. Pada daerah dengan nilai kerentanan seismik berkisar lebih besar dari 6 ditandai dengan warna oranye yang terletak di bagian barat pada peta, dimana daerah tersebut diinterpretasikan sebagai zona bahaya.



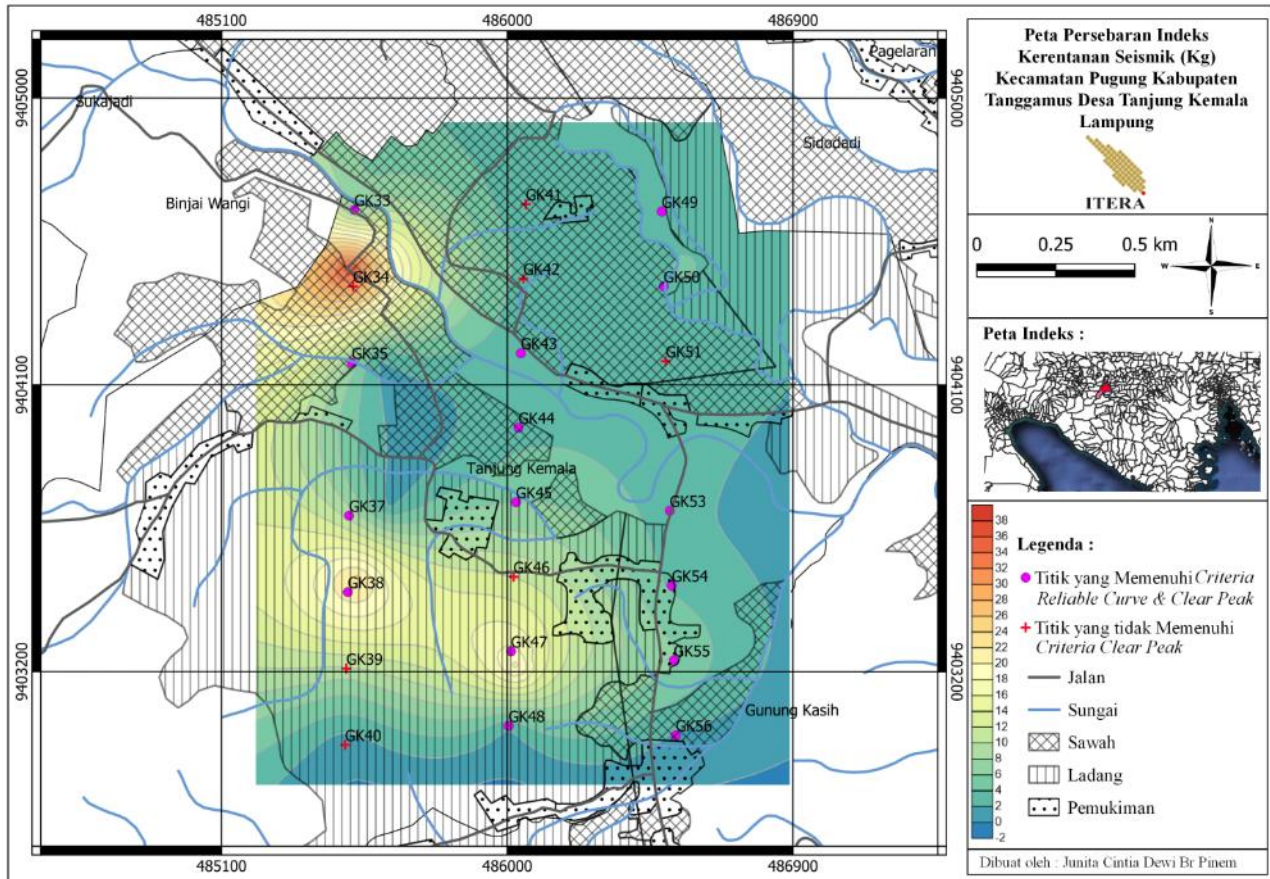
Gambar 6. Peta geologi daerah penelitian overlay dengan peta klasifikasi amplifikasi (A_0)

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa berdasarkan klasifikasi nilai K_g pada Tabel 2 diperoleh pada daerah penelitian zona yang mendominasi adalah zona aman ditandai dengan warna hijau di sebelah timur pada peta dan zona bahaya yang ditandai dengan warna oranye di sebelah barat pada peta. Zona bahaya tersebut perlu diperhatikan lebih lanjut walaupun pada daerah tersebut belum banyak pemukiman warga, agar kedepannya perlu ditinjau lebih lanjut dan dilakukan pertimbangan dalam pembangunan konstruksi yang lebih baik sebelum dilakukannya pembangunan di sekitar zona bahaya tersebut.

Rata-rata kecepatan gelombang geser pada kedalaman sampai 30 meter atau disebut V_{s30} diperoleh dari hasil pengolahan HVSR yang kemudian dilakukan inversi menggunakan *software ProHVSR*. Nilai V_{s30} digunakan untuk mengetahui ketebalan lapisan dan kecepatan gelombang, serta mengetahui jenis tanah berdasarkan nilai V_{s30} tersebut. Hasil dari persebaran nilai V_{s30} di daerah penelitian terdapat nilai yang terendah sampai yang tertinggi yaitu 83,67 m/s sampai 1380,82 m/s (Gambar 9). Berdasarkan nilai kecepatan gelombang geser akan diperoleh jenis batuan penyusun yang berasal pada setiap wilayah penelitian. Terdapat 5 kategori berdasarkan NEHRP (2000) sebagaimana yang diterapkan oleh Ariyanto dkk. (2024) yaitu tanah lunak, tanah sedang, tanah sangat padat, batuan, dan batuan sangat keras.

Nilai V_{s30} sangat rendah jika nilainya lebih kecil dari 175 m/s yang diidentifikasi sebagai Tanah Lunak atau berada pada Tipe E yang ditandai dengan warna biru. Nilai V_{s30} rendah jika nilainya dari rentang 175 sampai 350 m/s yang diidentifikasi sebagai Tanah Sedang atau berada pada Tipe D yang ditandai dengan warna biru sampai biru kehijauan. Nilai V_{s30} sedang jika nilainya dari rentang 350 sampai 750 m/s yang diidentifikasi

sebagai Tanah Sangat Padat atau berada pada Tipe C yang ditandai dengan warna hijau sampai kuning. Nilai V_{s30} tinggi jika nilainya dari rentang 750 sampai 1500 m/s yang diidentifikasi sebagai Batuan atau berada pada Tipe B dan ditandai dengan warna oranye sampai merah. Sementara itu pada hasil penelitian ini tidak memiliki nilai V_{s30} yang lebih besar dari 1500 yang diidentifikasi sebagai Batuan Keras atau pada Tipe A.

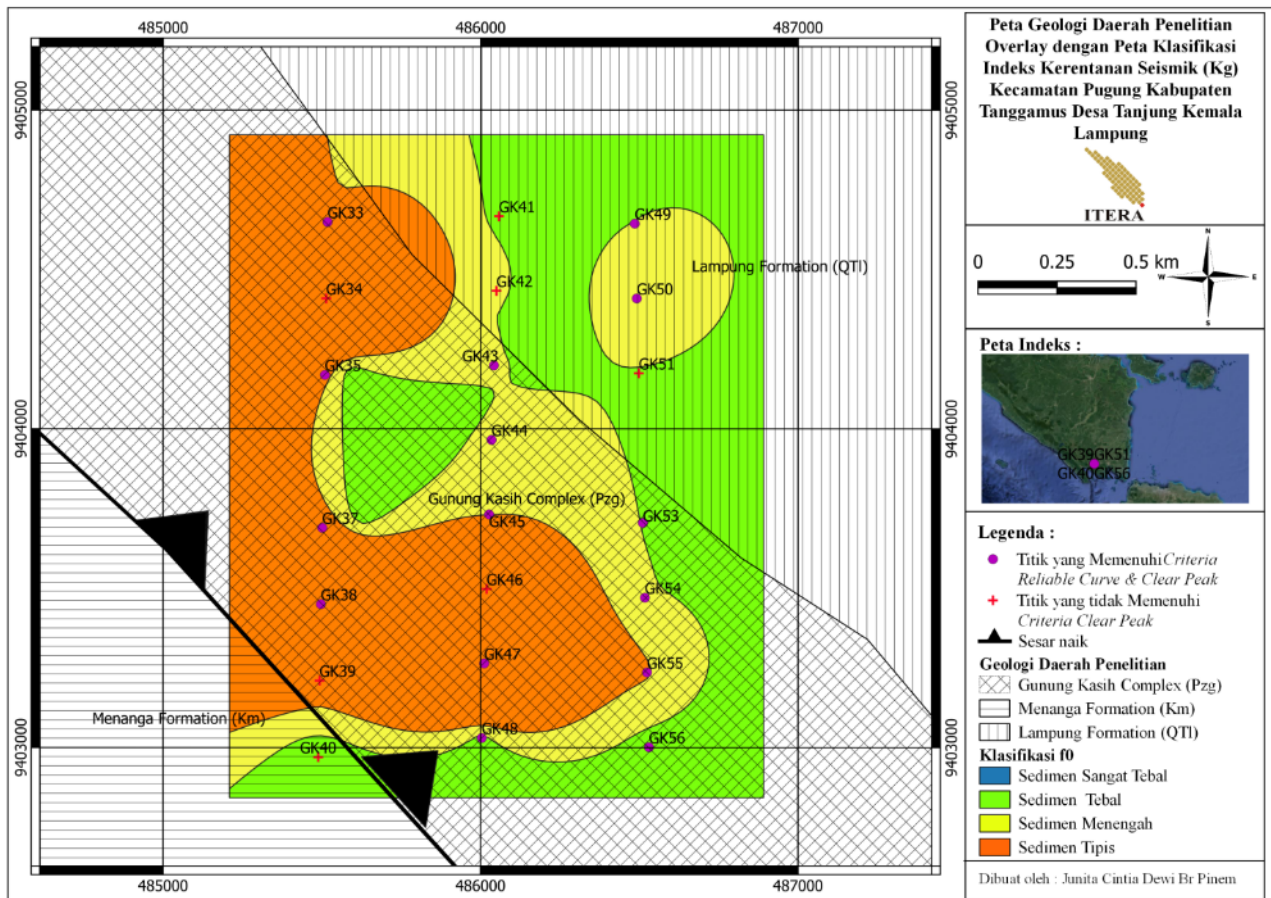


Gambar 7. Peta persebaran indeks kerentanan seismik (K_g)

Kecepatan gelombang geser sangat dipengaruhi oleh nilai densitas atau massa jenis batuan. Penelitian Ahmad (2011) menuliskan bahwa Formasi Kompleks Gunung Kasih (Pzg) yang tersusun oleh batuan metamorf dengan rata-rata densitas sekitar $2,9 \text{ g/cm}^3$, pada Formasi Lampung (QTI) yang tersusun oleh kumpulan batuan piroklastik memiliki rata-rata densitas sekitar $2,35 \text{ g/cm}^3$, dan pada Formasi Menanga (Km) yang tersusun oleh batuan sedimen memiliki rata-rata densitas sekitar $2,3 \text{ g/cm}^3$.

Gambar 10 merupakan *overlay* geologi daerah penelitian dengan peta klasifikasi V_{s30} menurut NEHRP (2000), diperoleh pada daerah penelitian didominasi oleh tanah sangat padat atau batuan lunak yang berada dalam Tipe C yang ditandai dengan warna kuning yang berada di sekitar Formasi Kompleks Gunung Kasih (Pzg) yang didominasi oleh batuan metamorf yang terdiri dari sekis, kuarsit, batupualam, dan migmatit dan Formasi Lampung (QTI) yang didominasi pada batuan piroklastik dan tersusun atas tuf berbatuapung, batupasir tuf dan setempat sisipan tufit.

Daerah yang diklasifikasi sebagai tanah yang lunak atau Tipe E berada pada Formasi Menanga (Km) yang tersusun atas perselingan antara serpih gampingan, batulempung dan batupasir, dengan sisipan rijang dan lensa batugamping, yang diindikasikan telah terjadi deformasi di sekitar jalur sesar tersebut. Dan hal ini harus menjadi perhatian dikarenakan daerah tersebut memungkinkan menimbulkan kerusakan yang besar saat terjadi gempa dikarenakan sedimennya yang lunak dan tebal. Akan tetapi karena pada Formasi Menanga (Km) ini hanya terdapat satu titik pengukuran hal ini tidak bisa dijadikan sebagai patokan dalam melakukan interpretasi.



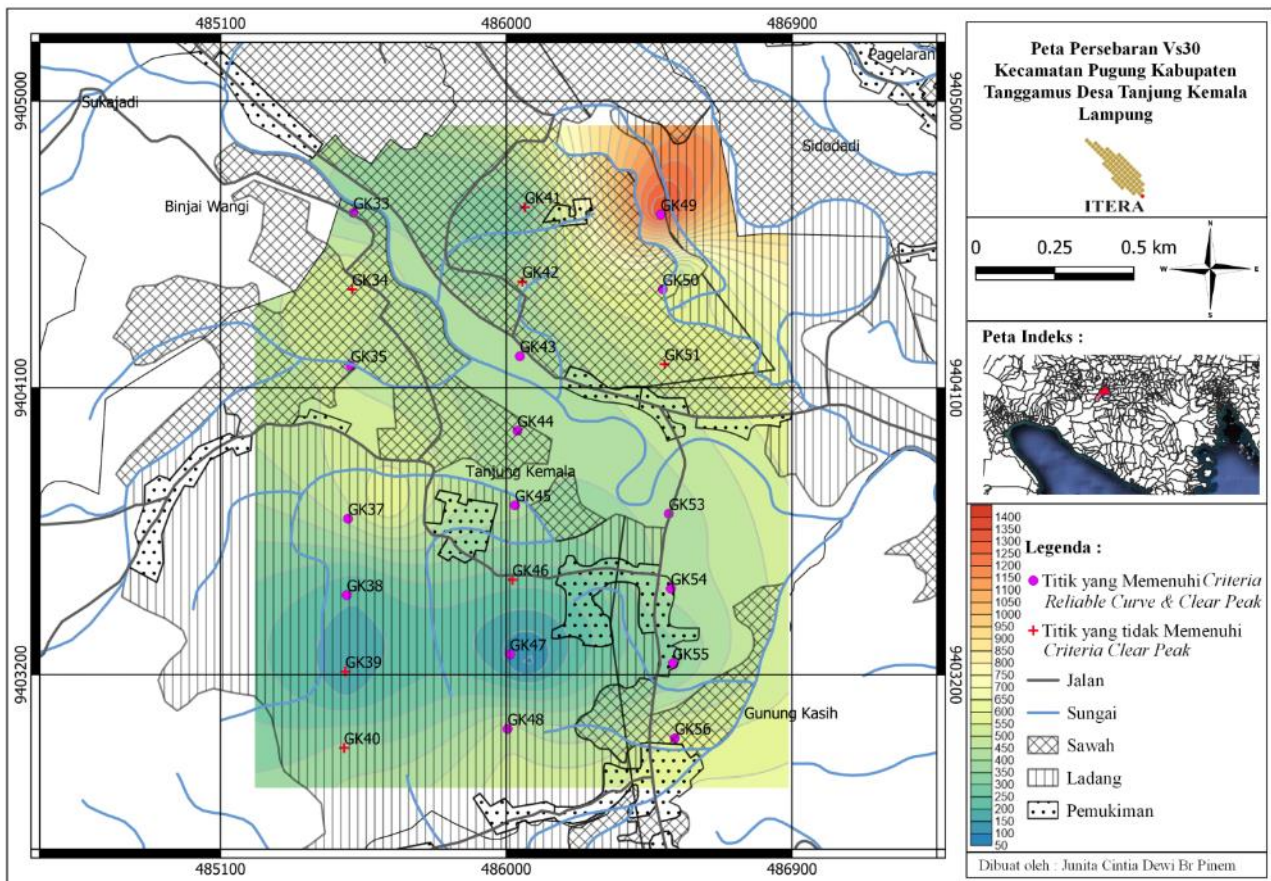
Gambar 8. Peta klasifikasi indeks kerentanan seismik (K_g)

Sebelumnya pada titik GK49 nilai frekuensi naturalnya yang tinggi, kemudian diikuti dengan nilai amplifikasi tinggi, dan indeks kerentanan tanah yang rendah, serta nilai V_{s30} yang tinggi dan memiliki tipe tanah yaitu B dengan jenis batuan, hal ini terjadi karena pada titik ini jika dilihat dari kurva ketebalan dan kecepatan saat mengolah V_{s30} diperoleh memiliki kontras yang sangat tinggi dengan lapisan yang ada di bawahnya pada ketebalan sedimen sangat tipis, yang mengartikan bahwa dititik tersebut memiliki lapisan sedimen yang tipis tetapi sangat lunak. Hal tersebut diindikasikan karena terdapat zona lemah dan telah mengalami deformasi pada daerah tersebut.

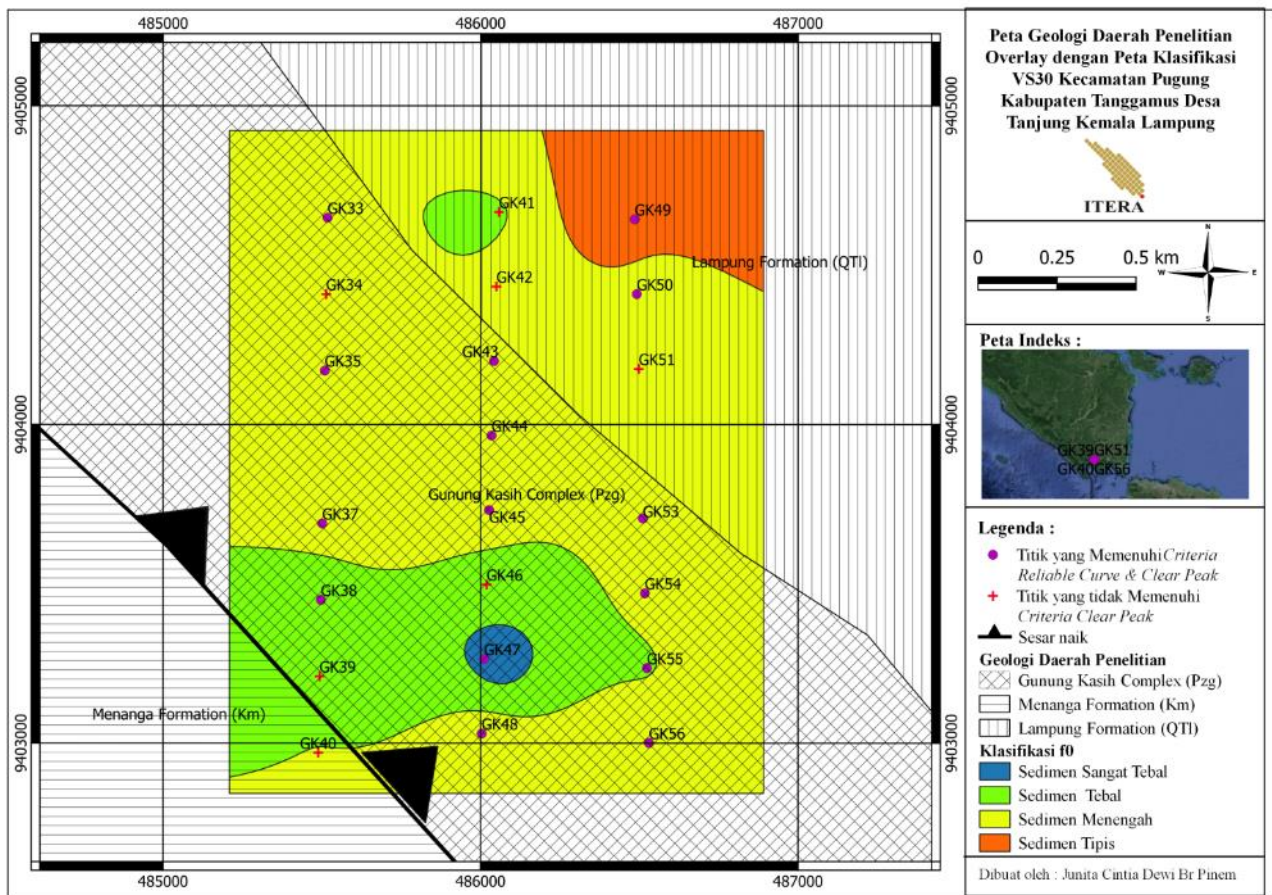
Dari hasil *overlay* antara peta klasifikasi indeks kerentanan seismik (K_g) dan peta klasifikasi kecepatan gelombang geser pada kedalaman 30 meter (V_{s30}) ditunjukkan pada Gambar 10, dimana gambar tersebut berfungsi untuk memudahkan dalam mengkorelasi antara nilai K_g dan nilai V_{s30} dalam upaya mitigasi bencana. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa terdapat zona yang bahaya atau nilai K_g tinggi yang ditandai dengan bintang hitam yang berada di sepanjang arah barat pada peta dan berkorelasi dengan nilai V_{s30} rendah dan sedang atau pada jenis tanah yang lunak, tanah sedang dan tanah sangat padat. Sementara itu pada zona yang aman atau dengan nilai K_g rendah yang ditandai dengan garis miring hitam yang berada di sepanjang arah timur pada peta dan berkorelasi dengan nilai V_{s30} sedang dan tinggi atau pada jenis tanah sangat padat dan batuan yang berhubungan dengan *bedrock* yang lebih dangkal. Dari hasil korelasi tersebut maka diidentifikasi menggunakan tabel klasifikasi nilai K_g dan nilai V_{s30} ke dalam Tabel 3 untuk melihat hubungan antara kedua parameter tersebut.

Tabel 3 menunjukkan hubungan antara nilai K_g dan nilai V_{s30} yang diperoleh pada daerah penelitian dimana pada bagian yang ditandai dengan warna merah merupakan klasifikasi yang tidak terdapat dalam peta. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa nilai V_{s30} yang tinggi menggambarkan lapisan *bedrock* atau

lapisan kompak yang mendominasi sehingga lapisan sedimen atau lapisan lunaknya tipis dan begitupun sebaliknya apabila nilai V_{s30} nya rendah. Sementara itu nilai K_g yang tinggi menggambarkan lapisan yang sangat lunak, hal ini disebabkan hubungan K_g dengan nilai amplifikasi yang berbanding lurus, sehingga apabila terdapat kontras impedansi atau perubahan dari lapisan yang kompak ke lapisan yang lunak maka nilai K_g akan semakin meningkat. Dari tabel tersebut daerah penelitian didominasi pada klasifikasi lapisan sedimen tipis, dan sangat lunak pada arah barat dan lapisan sedimen tipis dan tidak lunak pada arah timur. Dengan adanya peta dan tabel klasifikasi ini diharapkan dapat menjadi acuan sebelum dilakukannya pembangunan di sekitar area penelitian.



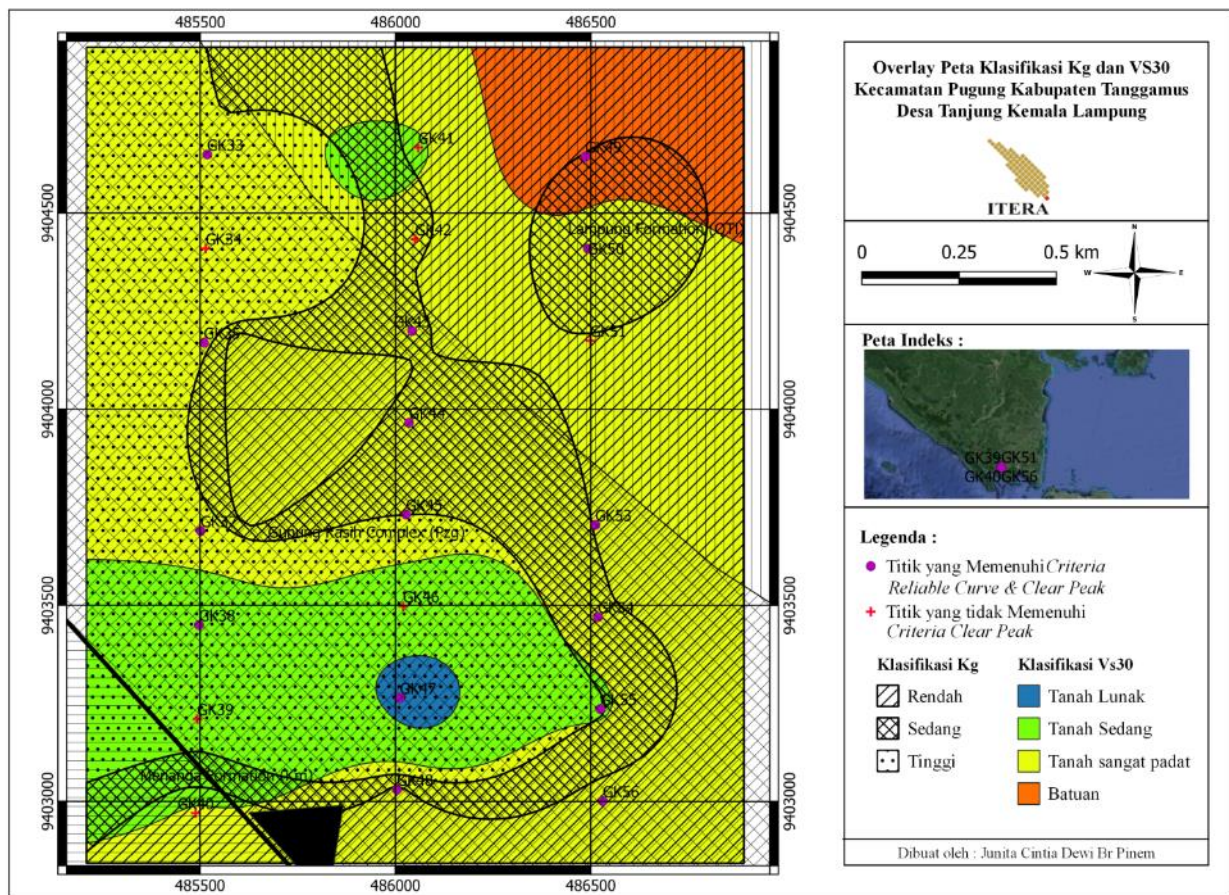
Gambar 9. Peta persebaran kecepatan gelombang geser (V_{s30})



Gambar 10. Peta geologi daerah penelitian overlay dengan peta klasifikasi V_{s30}

Tabel 3. Klasifikasi K_g dengan V_{s30} di daerah penelitian (warna merah menunjukkan informasi yang tidak terdapat pada hasil di daerah penelitian)

		Nilai K_g		
		Tinggi	Sedang	Rendah
Nilai V_{s30}	Batuan	Lapisan sedimen sangat tipis dan sangat lunak	Lapisan sedimen sangat tipis dan lunak	Lapisan sedimen sangat tipis dan tidak lunak
	Tanah Sangat Padat	Lapisan sedimen tipis dan sangat lunak	Lapisan sedimen tipis dan lunak	Lapisan sedimen tipis dan tidak lunak
	Tanah Sedang	Lapisan sedimen sedang dan sangat lunak	Lapisan sedimen sedang dan lunak	Lapisan sedimen sedang dan tidak lunak
	Tanah Lunak	Lapisan sedimen tebal dan sangat lunak	Lapisan sedimen tebal dan lunak	Lapisan sedimen tebal dan tidak lunak



Gambar 11. Overlay peta klasifikasi K_g dan V_{s30}

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Berdasarkan identifikasi dan analisis yang telah dilakukan di wilayah penelitian, diperoleh beberapa kesimpulan yaitu, distribusi nilai frekuensi natural di daerah penelitian memiliki kisaran dari 0,52 Hz sampai 21,73 Hz, yang tersebar hampir merata dan mendominasi pada Tipe II dengan ketebalan sedimen berada dalam klasifikasi ketebalan sedimen menengah. Sedangkan distribusi nilai amplifikasi berkisar 1,97 sampai 7,66 yang tersebar lebih banyak pada klasifikasi yang sedang. Nilai indeks kerentanan seismik di daerah penelitian berada antara 0,71 sampai 37,34. Nilai indeks kerentanan seismik didaerah penelitian didominasi pada klasifikasi rendah atau berada pada zona aman di arah timur dan klasifikasi tinggi atau berada pada zona bahaya di arah barat. Nilai kerentanan seismik tinggi di bagian tersebut diasumsikan karena batuan yang telah mengalami deformasi pada daerah tersebut. Dan diharapkan pada daerah tersebut perlu ditinjau lebih lagi sebelum dilakukannya pembangunan agar menghindari risiko kerusakan yang tinggi saat terjadi bencana gempa bumi. Dari hasil inversi *H/V Ratio* diperoleh rentang nilai V_{s30} dari 83,67 m/s sampai 1380,82 m/s. Nilai V_{s30} di daerah penelitian didominasi pada kategori Tipe C yang memiliki nilai 350 sampai 750 dan berada pada klasifikasi tanah yang sangat padat atau batuan lunak.

Dari hasil penelitian, diperoleh saran yang dapat dilaksanakan dalam penelitian selanjutnya yaitu, pada penelitian berikutnya, diharapkan dapat meningkatkan jumlah titik pada lokasi penelitian dengan spasi yang lebih kecil guna menghasilkan data yang lebih akurat dan dapat dikorelasi dengan geologi regional secara lebih rinci lagi, serta jika ingin memperoleh hasil yang lebih akurat dapat mengkorelasinya dengan data bor atau data metode geofisika lain di lokasi penelitian. Diharapkan pula pemerintah dan masyarakat dapat memberikan

perhatian khusus terhadap keadaan struktur atau fondasi bangunan yang sesuai dengan estimasi tingkat kerusakan bangunan berdasarkan indeks kerentanan seismik. Tindakan ini diharapkan dapat mengurangi potensi kerusakan yang disebabkan oleh gempa bumi.

Ucapan Terima Kasih

Program Studi Teknik Geofisika Institut Teknologi Sumatera yang telah memberikan kesempatan untuk menggunakan data pada penelitian ini. Terima kasih kepada Pak Alhada Farduwin, S.T., M.T dan Pak Yudha Styawan, S.T., M.Sc. atas bimbingan selama penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Z. (2011). *Studi Pendahuluan Metoda Gaya Berat Di Lampung Bagian Timur Dan Implikasinya Terhadap Potensi Migas Di Provinsi Lampung*.
- Aki, K., & Richards, P.G. (2002). *Quantitative Seismology*. University Science Books.
- Amin, T. C., Sidarto, S. S., & Gunawan, W. (1993). *Peta Geologi Regional Kotaagung, Sumatera Skala 1:250.000*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Ariyanto, A., Farduwin, A., Styawan, Y., Putri, I. A., Junian, W. E., Prasetyo, N., Rizki, R., & Wulandari, R. (2024). Pemetaan kerentanan seismik melalui analisis mikrotremor hvsr di wilayah kecamatan kemiling dan sekitarnya. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 10(2), 82–99. <https://doi.org/10.23960/jge.v10i2.393>
- Asten, M. W. (1978). Geological control on the three-component spectral of Rayleigh-wave microseisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(6), 1623–1636.
- Bard, P.Y. (1999). *Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?*. Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed), Balkema, Rotterdam, pp. 125-152.
- Cheng, T., Cox, B. R., Vantassel, J. P., & Manuel, L. (2020). A statistical approach to account for azimuthal variability in single-station HVSR measurements. *Geophysical Journal International*, 223(2), 1040–1053. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/gji/ggaa342>
- Cheng, T., Hallal, M. M., Vantassel, J. P., & Cox, B. R. (2021). Estimating Unbiased Statistics for Fundamental Site Frequency Using Spatially Distributed HVSR Measurements and Voronoi Tessellation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002551](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002551)
- Cox, B. R., ChengT, Vantassel, J. P., & Manuel, L. (2020). A statistical representation and frequency-domain window-rejection algorithm for single-station HVSR measurements. *Geophysical Journal International*, 221(3), 2170–2183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/gji/ggaa119>
- ESDM. (2010). *Peta Geologi Regional Daerah Lampung*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Farduwin, A., Antosia, R. M., Putri, I. A., Santoso, N. A., & Irawati, S. M. (2021). Inversi Data Geolistrik Menggunakan Particle Swarm Optimization: Studi Kasus Desa Gayau. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 7(2), 88–99. <https://doi.org/10.23960/jge.v7i2.118>
- Farduwin, A., & Yudistira, T. (2021). Shear velocity inversion from ambient seismic noise using RR-PSO: A case study of Nusa Tenggara Island. *Journal of Physics: Conference Series*, 1949(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1949/1/012022>
- Gurler, E., Nakamura, Y., Saita, J., & Sato, T. (2000). Local site effect of Mexico City based on microtremor measurement. 6th International Conference on Seismic Zonation,.
- Gutenberg, B. (1958). Caustics produced by waves through the Earth's core. *Geophysical Journal International*, 1(3), 238–248.
- Kanai, K. (1983). *Engineering Seismology*. University Of Tokyo.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). *Particle Swarm Optimization*. Purdue School of Engineering and Technology.
- Konno, K., & Omachi, T. (1998). Ground Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bull. Seism. Soc. Am*, 88(No.1), 228–241.
- Mirzaoglu. (2003). *Application of microtremors to seismic microzonin procedure*. 6(3), 143–156.
- Nakamura, Y. (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground*

surface. Quarterly Report of RTRI.

- Nakamura, Y. (1997). *Seismic Vulnerability for Ground and Structures using Microtremor*. World Congress on Railway Research.
- Nakamura, Y. (2008). *On the H/V Spectrum*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering.
- 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, 4.
- Ngadmanto Drajat, B. S. (2022). Seismic Hazard Analysis of Surface Level in Tasikmalaya City. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 4–5.
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi teknik and rekayasa kegempaan*.
- Rananda, E., Prabowo, L., Prabowo, A. P., Rasimeng, S., & Yogi, I. B. S. (2020). Analysis and Zonation of Land Vulnerability Areas in Pekon Karangrejo Ulubelu Tanggamus Using Microzonation Method. *Jurnal Geofisika*, 18, 14–18.
- Refrizon, Hadi, A. I., Lestari, K., & Oktari, T. (2013). Analisis Percepatan Tanah Maksimum dan Tingkat Kerentanan Seismik Daerah Ratu Agung Kota Bengkulu. *Prosiding Semirata FMIPA, Universitas Lampung*, 25–27.
- Saita, J., Bautista, M., & Nakamura, Y. (2004). *On Relationship Between The Estimated Strong Motion Characteristic of Surface Layer and The Earthquake Damage -Case Study at Intramuros, Metro Manila*. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver.
- SESAME. (2004). *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibration Measurement*. European Commission - Research General Directorate.
- Setiawan, J. (2009). *Mikrozonasi Seismisitas Daerah Yogyakarta Dan Sekitarnya*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Sungkowo, A. (2016). *Studi Kerentanan Sesimik dan Karakteristik Dinamik Tanah di Kota Yogyakarta dari Data Mikrotremor*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Vantassel, J. (2020). *jpyvantassel/hvsrpy: latest (Concept)*. Zenodo. <https://doi.org/http://doi.org/10.5281/zenodo.3666956>
- Winardi, D., Haerudin, N., Sapto, B., Sarkowi, M., & Erfani, S. (2022). Identifikasi Daerah Rawan Longsor Menggunakan Metode Horizontal to Vertical Spectral Rasio (HVSR) dan Pendekatan SIG di Kecamatan Semakai Kabupaten Tanggamus Provinsi Lampung. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 20.
- Zaenudin, A., Darmawan, I. G. B., 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*. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1815>
