

Pemetaan Respons Dinamik Tanah Dan Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Di Wilayah Kertajati Menggunakan Metode *Horizontal-To-Vertical Spectral Ratio* (HVSR)

Firda Haifa Fadhillah^{1,*}, Tedi Yudistira^{2,*}, Yayan Sopyan^{3,*}

¹Program Studi Sarjana Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung

²Kelompok Keahlian Geofisika Global, Institut Teknologi Bandung

³Pusat Survei Geologi

*Email:22321004@mahasiswa.itb.ac.id

Submit: 2022-06-26 ; Revised: 2022-08-08 ; Accepted: 2022-08-27

Abstrak: Wilayah Kertajati adalah wilayah yang didominasi oleh kondisi geologi berupa batuan lunak yaitu batuan sedimen Kuartar Bawah (Qos) yang mengalami pelapukan pada sebagian besar daerah penelitian dan adanya kenampakan Endapan Aluvium (Qa) pada sisi tenggara. Kondisi batuan lunak yang berada di atas batuan yang lebih keras akan mengakibatkan amplifikasi saat terjadinya gempa bumi. Hal ini dikarenakan pada barat daya daerah penelitian terdapat Sesar Baribis yang menunjam dari Purwakarta dan Majalengka. Sesar ini juga diperkirakan sempat mengakibatkan gempa paling besar yang pernah tercatat di Pulau Jawa yang terjadi pada abad ke-17. Pada penelitian ini, pengolahan data mikrotremor dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) diharapkan dapat menjadi suatu upaya mitigasi bencana di wilayah Kertajati mengingat di wilayah tersebut juga telah dibangun Bandar Udara Internasional Jawa Barat (BIJB). HVSR adalah metode seismik yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik dinamik tanah berupa frekuensi dominan dan amplifikasi, serta dapat menghasilkan gambaran struktur seismik bawah permukaan. Dari hasil pengolahan data yang telah dilakukan diperoleh nilai frekuensi dominan bervariasi dengan rentang 0,6-18 Hz sedangkan nilai amplifikasi memiliki rentang 1,26-6,3. Frekuensi dominan bernilai rendah berada pada bagian tengah, Barat, dan bagian Tenggara dari daerah penelitian, hal ini mengindikasikan ketebalan lapisan sedimen yang relatif lebih besar. Sedangkan nilai amplifikasi bernilai tinggi dominan berada pada bagian tengah dan sisi utara dari daerah penelitian. Pada tahap selanjutnya, dilakukan inversi kurva HVSR menggunakan metode *Neighbourhood Algorithm* (NA) untuk mengetahui informasi nilai V_s bawah permukaan yang kemudian diasosiasikan dengan karakteristik lapisan soil bawah permukaan. Diperoleh nilai V_s berkisar antara 53-3027 m/s untuk rentang kedalaman hingga 610 m, dengan nilai relatif lebih rendah pada sisi tengah, tenggara, dan barat laut, daerah penelitian. Dilakukan juga pengelompokan jenis tanah dengan nilai rata-rata kecepatan gelombang V_s hingga kedalaman 30 m yang menunjukkan jenis tanah wilayah Kertajati berupa tanah sedang (SD) dan tanah padat atau batuan lunak (SC). **Kata kunci:** amplifikasi, frekuensi dominan, HVSR, jenis tanah, V_s^{30} , V_s

Abstract: Kertajati area is an area dominated by geological features in the form of soft rocks, namely Lower Quaternary sedimentary rocks (Qos) which have weathered in most of the research area and the appearance of Alluvium Deposits (Qa) on the southeast side. The condition of soft rock that is on top of the harder rock will result in amplification during an earthquake. Because in the southwest of the study area there is the Baribis Fault that subducts from Purwakarta and Majalengka. In this study, microtremor data processing with the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method is expected to be a disaster mitigation effort in the Kertajati area considering that the area has also been built West Java International Airport (BIJB). HVSR is a seismic method that can be used to identify dynamic characteristics of the soil in the form of dominant frequency and amplification, and can produce an image of the subsurface seismic structure. From the results of data processing that has been carried out, the dominant frequency values vary in the range of 0.6-18 Hz while the amplification values have a range of 1.26-6.3. The dominant low-value frequencies are on the southeast, southwest, and central part of the study area, indicating a relatively larger thickness of the sediment layer. While the high value amplification values are dominant on the north, southwest, and central parts of the study area. Then the inversion of the HVSR curve was carried out using the Neighborhood Algorithm method to find out the information on the subsurface V_s value which was then associated with the characteristics of the subsurface layer. The values of V_s ranged from 33-3027 m/s for a depth range of up to 610 m, with relatively lower values on the south, northwest, and central parts of the study area. Soil types were also grouped with an average value of V_s wave velocity to a depth of 30 m which indicated the soil types in the Kertajati area were medium soil (SD) and solid soil or soft rock (SC).

Keywords: amplification, HVSR, predominant frequency, soil type, V_s^{30} , V_s .

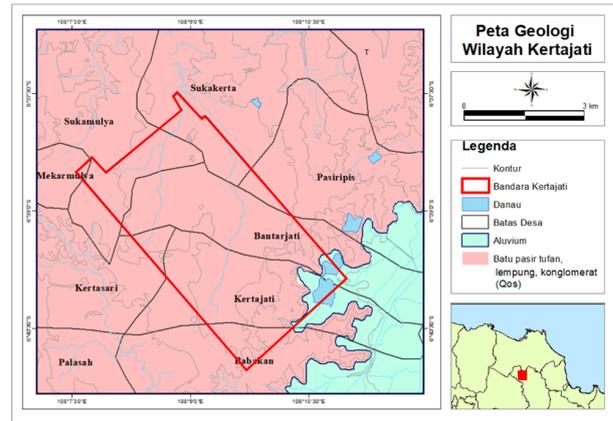
1 PENDAHULUAN

Wilayah penelitian berada di bagian barat laut dari Kecamatan Kertajati, Kabupaten Majalengka, sekitar 50,2 km di sebelah barat daya Kota Indramayu, Jawa Barat. Wilayah Kertajati memiliki litologi dominan berupa batuan sedimen Kuartar Bawah (Q_{os}) yang terdiri dari batu pasir tufan, pasir, lanau tufan, lempung, konglomerat, dan breksi tufan yang mengandung batu apung, seperti yang tersingkap di Desa Pasirpilis berupa pasir kasar dan Desa Kertajati berupa konglomerat. Pelapukan batuan ini berupa tanah residu (*residual soils*) berupa lempung coklat kekuningan yang plastis dan mengembang (Hasibuan dan Sudarsono, 2009). Menurut Nakamura (1989) lapisan lunak yang berada di atas lapisan yang lebih keras akan menghasilkan amplifikasi gelombang gempa. Selain itu, kenampakan wilayah Majalengka menurut Bemmelen (1949) terdapat Sesar Baribis membentang dari Purwakarta dan Majalengka. Pada abad ke-17 yaitu pada tanggal 5 Januari 1699 terjadi gempa paling besar yang pernah melanda Jawa (Musson, 2012; Albini dkk., 2013) dan kemungkinan terjadi karena Sesar Baribis (Nguyen dkk., 2015). Menurut Febyani dkk. (2020) nilai *Maximum Credible Earthquake* (MCE) atau gempa terbesar yang mungkin diakibatkan oleh Sesar Baribis di waktu yang akan datang berdasarkan data empiris panjang sesar dan literatur adalah sebesar 6,5 Mw. Oleh karena itu, pengolahan mikrotremor diharapkan dapat menjadi suatu upaya mitigasi bencana gempa di Kertajati mengingat di wilayah penelitian juga telah dibangun Bandar Udara Internasional Jawa Barat (BIJB). Keberadaan daerah penelitian pada suatu infrastruktur Bandara menyebabkan akuisisi data mikrotremor untuk dilakukan pengolahan menggunakan metode HVSR adalah metode yang tepat. Karena, tidak mengganggu infrastruktur yang ada serta dapat memetakan secara regional suatu wilayah. Akuisisi data mikrotremor juga dilakukan secara mudah, hemat biaya, serta dapat dilakukan di wilayah padat penduduk dan aseismik. Pengolahan menggunakan metode HVSR yang menghasilkan suatu kurva juga diharapkan dapat digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik dinamik bawah permukaan wilayah Kertajati yang berasosiasi dengan nilai frekuensi dominan (f_0) dan amplifikasi (A_0). Kurva HVSR yang didapatkan nantinya perlu dilakukan inversi hingga diperoleh model 1-D nilai kecepatan gelombang geser (V_s) terhadap kedalaman. Nilai kecepatan gelombang geser tersebut yang kemudian dimodelkan untuk melihat struktur kecepatan V_s bawah permukaan

2 BAHAN DAN METODE

2.1 Geologi Regional

Daerah studi merupakan dataran bergelombang dengan ketinggian 25-37,5 m diatas permukaan laut (dpl) dan kemiringan lereng kurang dari 3% ke arah Tenggara (Hasibuan dan Sudarsono, 2009). Geologi daerah penelitian terbagi atas dua kelompok yaitu, batuan sedimen Kuartar Bawah (Q_{os}) dan Endapan Aluvium (Q_a). Batuan sedimen Kuartar Bawah (Q_{os}) terdiri atas: batu pasir tufan, pasir, lanau tufan, lempung, konglomerat, dan breksi tufan yang mengandung batu apung. Hasil dari pelapukan jenis batuan tersebut berupa tanah residu (*residual soils*) yang terdiri dari lempung coklat kekuningan plastis dan mengembang. Ke-



Gambar 1. Peta geologi Kertajati Modifikasi Djuri (1995); Hasibuan dan Sudarsono (2009)

nampakan tersebut dapat terindikasi dari adanya keretakan pada bangunan yang berada diatas litologi tanah residu. Endapan Aluvium (Q_a) berumur Holosen terdapat di bagian tenggara daerah studi yang merupakan dataran banjir Sungai Cimanuk. Endapan aluvium terdiri atas: lempung, lanau, dan pasir endapan aluvium yang merupakan tanah tertransport (*transported soils*). Tanah ini berwarna abu-abu kehitaman (Hasibuan dan Sudarsono, 2009). Seperti terlihat pada Gambar 1 berikut.

Kenampakan sesar Baribis yang membentang dari Purwakarta ke Majalengka dan berdasarkan penelitian oleh Koulali dkk. (2017) melalui data GPS, sesar tersebut memiliki slip rate $5 \pm 0,2$ mm/tahun. Pada abad ke-17 yaitu pada tanggal 5 Januari 1699 terjadi gempa paling besar yang pernah melanda Jawa (Musson, 2012; Albini dkk., 2013) dan kemungkinan terjadi karena Sesar Baribis (Nguyen dkk., 2015). Catatan terbaru, menunjukkan peristiwa gempa bumi yang diakibatkan oleh Sesar Baribis juga pernah terjadi tepat di wilayah penelitian pada tahun 2017 dengan magnitudo 3. Sehingga memungkinkan gempa terjadi di waktu yang akan datang di wilayah penelitian. Pada wilayah penelitian terjadi pula semburan gas di Desa Sukaperna yang berjarak 20 km arah timur laut dari daerah penelitian. Semburan gas terbakar yang bercampur lumpur muncul di area bekas sumur minyak tua Pertamina. Lokasinya hanya berjarak 500 m dari pemukiman warga. Hal ini juga harus diperhatikan karena gas dari kedalaman tinggi pada umumnya bertekanan besar dan berpotensi menimbulkan bencana terhadap lingkungan sekitarnya (Humaida dkk., 2012).

2.2 Mikrotremor

Mikrotremor adalah suatu getaran yang memiliki periode pendek yang merupakan akumulasi akibat dari efek gelombang laut, interaksi angin dengan tanaman dan kegiatan atmosfer (Toiba dkk., 2016). Amplitudo dari mikrotremor sangatlah kecil yaitu memiliki displacement 10-4 hingga 10-2 mm sehingga biasanya manusia tidak bisa merasakan getarannya (Okada dan Suto, 2003). Kecilnya nilai amplitudo yang dihasilkan mengakibatkan data mikrotremor. Rekaman mikrotremor lebih baik direkam pada malam hari untuk menghindari artificial noise. Data mikrotremor dapat digunakan untuk melihat variasi karakteristik lapisan permukaan

an dengan menggunakan metode HVSR atau dapat disebut juga metode Nakamura. Karakteristik dinamik itulah nantinya digunakan untuk melihat kerusakan yang mungkin terjadi akibat bencana gempa bumi di suatu wilayah (Nakamura, 1989). Pada penelitian ini dilakukan pengolahan rekaman mikrotremor dengan durasi perekaman 30 menit untuk setiap stasiun pengukuran

2.3 Metode HVSR

Metode HVSR atau metode Nakamura adalah teknik untuk mengestimasi frekuensi resonansi dan amplifikasi dari gerakan tanah yang dipengaruhi oleh lapisan permukaan. Pengaruh itu dihitung dari pembagian antara spektrum dari komponen horizontal dengan spektrum komponen vertikal (Nakamura, 2008). Perhitungan nilai HVSR dapat dilakukan dengan persamaan 1 berikut:

$$HVSR(\omega) = \frac{A_H(\omega)}{A_v(\omega)} \quad (1)$$

dengan A_H adalah komponen horizontal spektrum amplitudo dari transformasi Fourier yang dirata-ratakan dari spektrum utara-selatan dan timur-barat. Sedangkan A_v adalah spektrum amplitudo pada arah vertikal. Puncak kurva HVSR berasosiasi dengan nilai amplifikasi (sumbu y) dan frekuensi dominan (sumbu x). Pembentukan kurva HVSR dilakukan dengan software Geopsy. Data mikrotremor dilakukan berbagai pengolahan parameter dengan pemilihan parameter menggunakan metode trial and error yang mengacu pada setting parameter dan quality kontrol dari hasil kurva dengan tetapan SESAME Project sebagai berikut: Frekuensi dominan(f_o) $\leq 10/\text{window length (lw)}$ $N_c(f_o) \leq 200$, dimana $N_c = \text{window length (lw)} \times \text{jumlah window (nw)} \times f_o \times \sigma A(f)$; 2 untuk $0,5 f_o \leq f_i \leq 2f_o$ jika $f_o \leq 0,5$ Hz $\sigma A(f)$; 3 untuk $0,5 f_o \leq f_i \leq 2f_o$ jika $f_o > 0,5$ Hz Penentuan karakteristik V_s bawah permukaan menggunakan metode HVSR yang dilakukan oleh Cipta dkk. (2018, 2021) diperoleh model kecepatan gelombang geser bawah permukaan yang cukup representatif dengan kenampakan sebenarnya, dan model yang dihasilkan dapat meresolusi dengan baik kenampakan geologi di bawah permukaan. Bahkan pada beberapa penampang vertikal yang dihasilkan oleh penelitian Cipta dkk. (2021) menunjukkan adanya kenampakan struktur sesar.

2.4 Frekuensi Dominan dan Amplifikasi

Nilai frekuensi dominan berasosiasi dengan ketebalan sedimen, semakin rendah nilai frekuensi dominan maka akan menghasilkan ketebalan sedimen yang lebih besar (Nakamura, 2008). Sedangkan, amplifikasi adalah peningkatan level guncangan tanah yang dirasakan akibat adanya kontras impedansi batuan dan akumulasi propagasi gelombang pada geometri cekungan. Amplifikasi merupakan cara yang efisien untuk mengidentifikasi resonansi frekuensi natural dari tanah (Rong dkk., 2017). Nilai amplifikasi dapat berubah apabila batuan mengalami deformasi (Marjiyono, 2012).

2.5 Inversi Neighbourhood Algorithm

Dalam geofisika salah satu cara pemodelan yang lazim adalah dengan melakukan inversi. Inversi adalah proses pencarian respons model yang memiliki kesesuaian dengan data pengamatan, kesesuaian ini umumnya dinyatakan dengan suatu fungsi objektif yang harus diminimumkan (Grandis, 2009). Inversi dilakukan untuk memperoleh informasi yang terkandung dalam kurva HVSR. Hasil proses inversi akan diperoleh parameter fisis berupa kedalaman lapisan bawah permukaan (h), kecepatan gelombang primer (V_p), dan kecepatan gelombang geser (V_s). Metode inversi pada penelitian ini menggunakan metode Neighbourhood Algorithm. Pada metode ini dilakukan pencarian model pada ruang parameter dengan menggunakan konsep geometri pada Voronoi cells. Secara lebih jelas inversi dengan Neighbourhood Algorithm dapat dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

- Membuat model awal sejumlah (n_s0) dalam ruang parameter
- Menghitung fungsi misfit untuk model awal (n_s0) yang baru terbentuk dan menentukan model dengan nilai misfit terkecil (n_r) dari semua model yang telah dibentuk pada tahap sebelumnya
- Membuat model baru dengan jumlah (n_s) menggunakan uniform random walk pada Voronoi cells dari tiap-tiap n_r yang dipilih
- Jika misfit terkecil yang didapatkan masih belum optimal (bernilai relatif besar) maka kembali ke tahapan kedua (tahap b).

Uniform random walk pada Voronoi cells terpilih dapat dilakukan dengan metode Gibbs Sampler. Sedangkan untuk menentukan nilai misfit dapat diperoleh dengan persamaan 2 berikut (Wathelet dkk., 2004)

$$misfit = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_f} \frac{(x_{obs1} - x_{cal1})^2}{\sigma_i^2 n_f}} \quad (2)$$

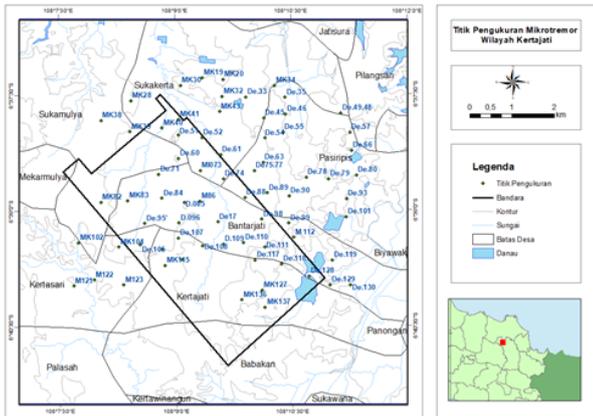
dengan x_{obs1} adalah data observasi pada frekuensi f_i , x_{cal1} adalah nilai data HVSR kalkulasi pada frekuensi f_i , σ_i adalah estimasi dari standar deviasi atau noise dari data observasi x_{obs1} pada frekuensi sampel tersebut, dan n_f adalah jumlah frekuensi sampel. Penggunaan metode neighbourhood algorithm pada proses inversi kurva HVSR dipilih karena parameter model awal menggunakan suatu rentang sehingga bersesuaian dengan ketidak tersediannya data pendukung seperti data borehole pada penelitian ini. Sehingga metode tersebut dianggap paling efektif

2.6 Kecepatan Gelombang Geser rata-rata Kedalaman 30 Meter (V_s^{30})

Nilai V_s^{30} adalah nilai rata-rata kecepatan gelombang geser (V_s) hingga kedalaman 30 m, yang dihitung berdasarkan waktu tempuh gelombang dari permukaan hingga kedalaman 30 m yang diperkenalkan pertama kali oleh Brown dkk. (2000). Kecepatan gelombang geser (V_s) telah lama dikenal sebagai parameter penting untuk mengevaluasi sifat dinamis tanah. Nilai V_s^{30} dapat dihitung dengan persamaan berikut.

Tabel 1. Pengelompokan parameter V_s berdasarkan penyelidikan nilai V_s oleh laboratorium SNI 1726, Badan Standarisasi Nasional

Tipe	Klasifikasi Site	V_s (m/s)
SA	Batuan keras	1500
SB	Batuan	750-1500
SC	Tanah sangat padat dan batuan lunak	350-750
SD	Tanah sedang	175-350
SE	Tanah lunak	175



Gambar 2. Sebaran titik pengukuran data mikrotremor di wilayah Kertajati yang berada tepat di lokasi adanya Bandar Udara Internasional Jawa Barat (BIJB)

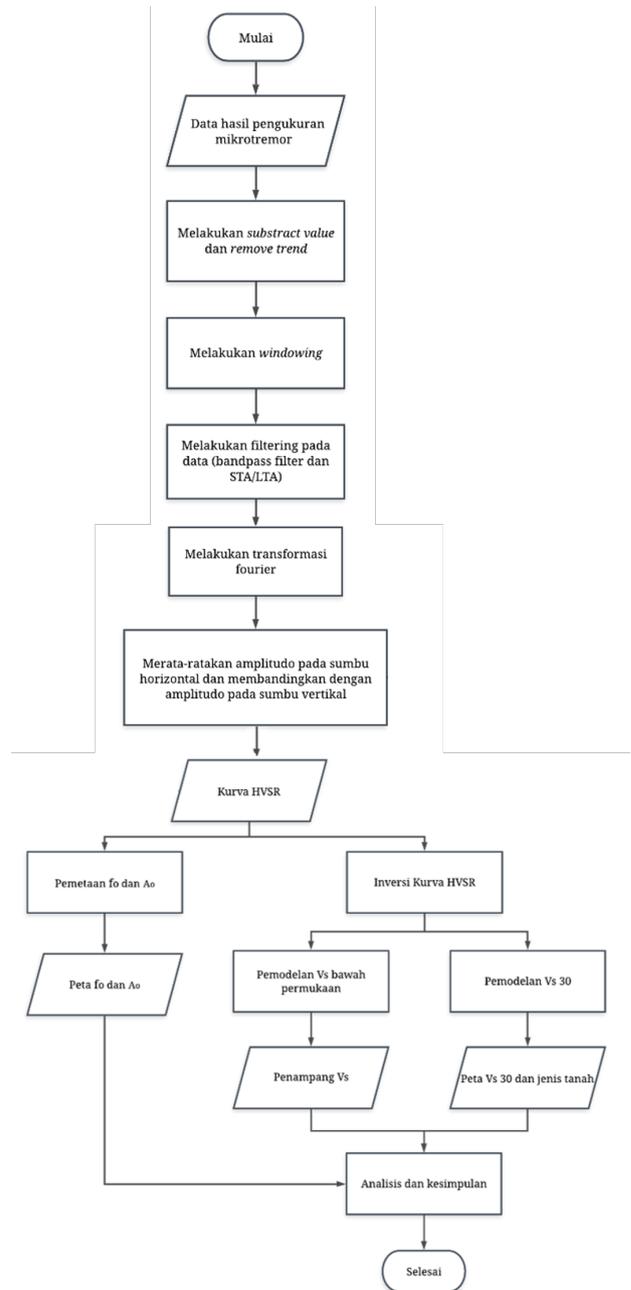
$$V_s^{30} = \frac{30}{\sum_{i=0}^N \left(\frac{h_i}{V_{si}} \right)} \quad (3)$$

dimana H_i adalah ketebalan (dalam meter) dan V_{si} adalah kecepatan gelombang geser untuk tiap lapisan ke- i dengan total sebanyak N -lapisan (Konno dan Kataoka, 2000). Berdasarkan nilai V_s^{30} tersebut dilakukan pengklasifikasian jenis tanah daerah penelitian berdasarkan klasifikasi oleh Badan Standarisasi Nasional, yang ditampilkan pada Tabel 1 berikut.

2.7 Pengolahan Data

Pada penelitian ini digunakan data rekaman mikrotremor di wilayah Kertajati hasil pengukuran pada tanggal 6-19 Agustus 2018 yang dilakukan oleh Pusat Survei Geologi (PSG) dengan cakupan wilayah sebesar 8x8 km. Pengukuran menggunakan seismometer LE-3D/5s MkIII broadband 3 komponen ini dilakukan pada waktu dini hingga pagi hari yaitu pukul 01.30 – 10.15 agar diharapkan dapat mengurangi noise akibat aktivitas manusia dan industri. Hasil pengukuran mikrotremor memiliki durasi ±30 menit tiap pengukuran dengan total pengukuran dilakukan pada 71 lokasi yang berbeda seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2

Tahap pengolahan data mikrotremor, analisis kerentanan wilayah Kertajati terhadap gempa bumi diperoleh dari beberapa hasil yang didapatkan yaitu peta frekuensi dominan, amplifikasi, V_s^{30} , dan model penampang V_s . Tahap pengolahan data mikrotremor secara menyeluruh dapat digambarkan seperti Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Tahap pengolahan analisis kerentanan wilayah Kertajati terhadap gempa bumi

Pembuatan kurva HVSR dari data mikrotremor ini dilakukan dengan software Geopsy. Parameter didapatkan dengan studi literatur serta *trial and error*. Penelitian ini menggunakan parameter bandpass filter 0.5-20 Hz, window length 20s, STA/LTA 0.2-2.5, dan menggunakan smoothing konno ohmachi. Kemudian dilakukan fourier transform untuk didapatkan spektrum. Dilakukan perhitungan untuk nilai spektrum amplitudo arah horizontal dengan metode *quadratic mean* dan membandingkan dengan spektrum amplitudo arah vertikal agar didapatkan nilai HVSR, yang berasosiasi dengan nilai frekuensi dominan. Selanjutnya dilakukan proses inversi. Proses inversi kurva HVSR menggunakan software Dinver. Proses inversi dilakukan pada kurva

Tabel 2. Nilai parameter model awal untuk proses inversi

Lapisan ke-	Vp(m/s)	Vs (m/s)	Kedalaman maksimum	Poisson's Ratio	Densitas (kg/m ³)
			(m)		
1	200-5000	50-750	100	0.2-0.5	2000
2		50-750	100		
3		50-3500	100		
4		50-3500	100		
5		50-3500	200		
6		50-3500	2000		
7		50-3500	Halfspace		
8		50-3500	Halfspace		

HVSR yang telah didapatkan pada pengolahan dengan software Geopsy. Parameter model awal ditentukan berdasarkan kondisi geologi pada penelitian sebelumnya, studi literatur, dan melakukan *trial and error*. Parameter model awal penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

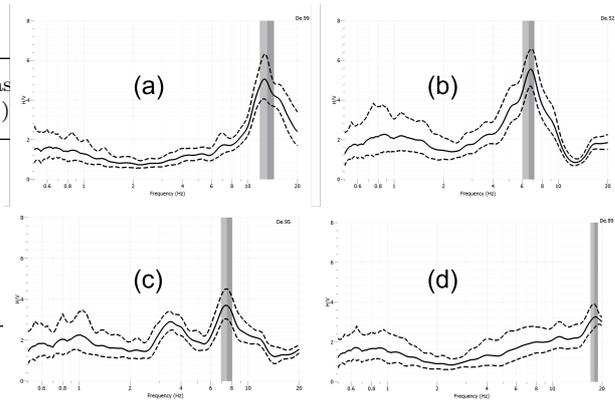
Hasil dari proses pengolahan kurva HVSR dan inversi kemudian dilakukan pemodelan. Peta f_0 , A_0 , dan V_s^{30} didapatkan dari interpolasi dengan metode Kriging menggunakan software Surfer 16 dan Arcmap 10.8. Pemodelan penampang horizontal dari V_s dibuat menggunakan software MATLAB, Surfer 16, dan Arcmap 10.8. Sedangkan, pemodelan penampang vertikal V_s dibuat dengan software MATLAB dan Rockworks 17

2.7.1 Hasil dan Diskusi

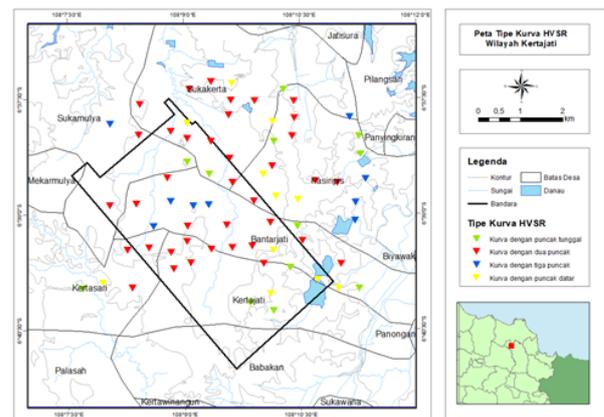
Dilakukan pengelompokan kurva HVSR dengan membandingkan secara kualitatif visual bentuk puncaknya. Dalam penelitian ini didapatkan bentuk kurva yang cukup bervariasi. kurva HVSR dapat dikelompokkan menjadi empat tipe ditunjukkan pada Gambar 4, pengelompokan didasarkan pada jumlah puncak dari kurva HVSR, yaitu: (1) kurva dengan puncak tunggal yang berada pada rentang frekuensi rendah atau frekuensi tinggi, pada frekuensi rendah yaitu < 2 Hz dengan bentuk cenderung melebar atau pada frekuensi tinggi yaitu > 4 Hz dengan bentuk cukup tajam maupun bentuk relatif melebar; (2) kurva dengan dua puncak, satu puncak berfrekuensi rendah yaitu pada frekuensi <2 Hz dan berbentuk cenderung melebar, diikuti dengan puncak lainnya yang berada pada frekuensi tinggi yaitu > 4 Hz dengan bentuk tajam maupun bentuk relatif melebar; (3) kurva dengan tiga puncak yang tiap puncaknya berada pada rentang frekuensi yang bermacam-macam; (4) kurva dengan bentuk relatif datar (tidak ada puncak dengan amplitudo > 3). Bentuk kurva cukup bervariasi, seperti pada Gambar 4 dengan distribusinya tiap kelompok ditampilkan pada Gambar 5

Keempat kelompok kurva HVSR berdasarkan jumlah puncaknya dilakukan pemetaan distribusi untuk tiap titik pengukuran. Keseluruhan kurva HVSR pada penelitian ini telah sesuai dengan empat syarat realibilitas dari SESAME Project.

Kurva HVSR yang berpuncak tajam dan sempit mengindikasikan adanya kontras impedansi yang tinggi (Gosar, 2010; Cipta dkk., 2018). Sedangkan, kurva dengan amplitudo kecil dan berbentuk cenderung melebar merefleksikan kontras impedansi yang lemah atau memiliki diskontinuitas yang bertahap (Cipta dkk., 2018). Tingginya variabilitas litologi dekat permukaan juga dapat menyebabkan rendahnya amplitudo pada puncak kurva HVSR (Uebayashi, 2003;

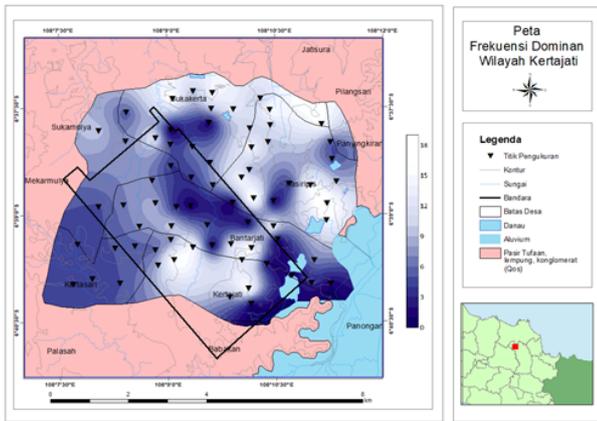


Gambar 4. Tipe kurva HVSR dari pengolahan mikrotremor wilayah Kertajati. (a) Kurva dengan puncak tunggal (data stasiun De.99) (b) Kurva dengan dua puncak (data stasiun De.52) (c) Kurva dengan tiga puncak (data stasiun De.95) (d) Kurva dengan puncak relatif datar (data stasiun De.89)

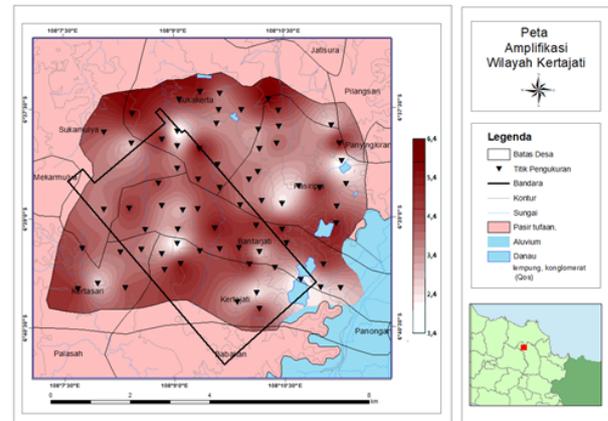


Gambar 5. Peta persebaran tipe kurva HVSR wilayah Kertajati, tipe didominasi titik pengukuran berwarna merah yang menunjukkan kurva HVSR dua puncak mendominasi daerah penelitian yang mengindikasikan adanya lapisan bawah permukaan yang kompleks (memiliki dua kontras impedansi dalam satu lokasi pengukuran)

Cipta dkk., 2018). Bentuk puncak melebar dan tidak simetri mengindikasikan variabilitas formasi dari batuan (Gosar, 2010; Cipta dkk., 2018). Sedangkan, kurva dengan bentuk datar (tidak memiliki amplitudo >3) merefleksikan kontras yang sangat lemah maupun kemungkinan tidak adanya kontras impedansi bawah permukaan dikarenakan adanya kompaksi batuan terjadi secara bertahap bersamaan dengan terkumpulnya material lapisan itu sendiri (Cipta dkk., 2018). Nilai frekuensi dominan pada wilayah Kertajati menunjukkan nilai yang rendah yaitu \approx 10 Hz pada sisi tengah, barat, dan tenggara daerah penelitian, sedangkan bernilai cukup tinggi yaitu 10-18 Hz pada bagian selatan dan timur laut. Frekuensi dominan yang rendah pada bagian tengah dan sisi barat daerah penelitian diduga karena kenampakan Batuan Sedimen Kuartar Bawah (Qos) berupa tanah residu di wilayah tersebut yang terdiri dari tiga lapisan tebal. Lapisan lempung sebagai lapisan teratas kemudian di bawahnya terdapat lapisan pasir lempungan, dan lapisan ketiga beru-



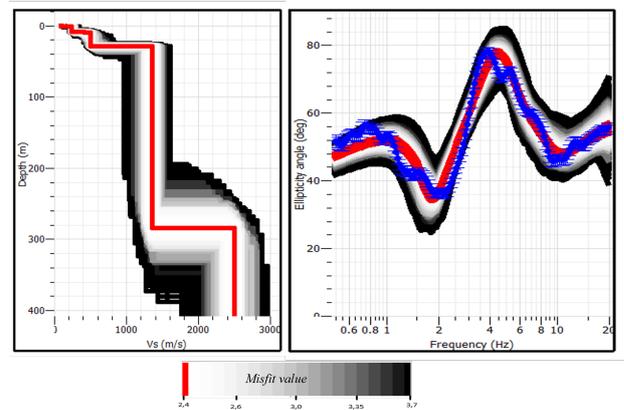
Gambar 6. Peta frekuensi dominan wilayah Kertajati, nilai frekuensi rendah yang berasosiasi dengan ketebalan lapisan sedimen besar berada di bagian tengah dan tenggara dari daerah penelitian



Gambar 7. Peta amplifikasi wilayah Kertajati, nilai amplifikasi tinggi mendominasi pada bagian tengah daerah dan utara penelitian

pa lapisan pasir dengan ketebalan cukup besar (lebih besar dari kedua lapisan di atasnya). yang kemudian di bawahnya berupa batuan dasar. Berdasarkan hasil uji penetrom dari penelitian sebelumnya, didapatkan penampang vertikal yang memperlihatkan lapisan pasir yang lebih tebal pada sisi tengah wilayah Kertajati (Sudarsono dan Hasibuan, 2011). Sedangkan nilai frekuensi dominan rendah pada sisi tenggara berasosiasi dengan Endapan Aluvium (Q_a) yang terdiri dari lapisan lanau, lanau pasiran, dan pasir yang cukup tebal (Sudarsono dan Hasibuan, 2011). Hal tersebut didapatkan dari penelitian uji penetrom yang memperlihatkan endapan aluvium memiliki ketebalan yang relatif lebih besar dibanding daerah sekitarnya. Uji penetrom atau uji sondir atau uji Cone Penetrometer Test (CPT), adalah uji yang digunakan melihat kekerasan batuan dari -nilai perlawanan konus tiap lapisan ketebalan 20 cm dan gesekannya juga dengan kecepatan penetrasi 15- 20 mm permenit. (LH, 1987).

Nilai amplifikasi pada wilayah Kertajati bernilai relatif tinggi yaitu berkisar antara 3-6.4 pada di sebelah utara dan bagian tengah dari daerah penelitian. Nilai amplifikasi yang tinggi pada sebelah utara kemungkinan berasosiasi dengan kedalaman dari lapisan sedimen dengan nilai V_s rendah (0-350 m/s) cukup tebal dibandingkan dengan wilayah sekitarnya, hal ini terlihat pada Gambar 13 (b). Penampang EE' menunjukkan ketebalan lapisan tanah lunak dan tanah sedang yang digambarkan dengan warna merah terlihat menebal ke arah utara dan pada penampang FF' berarah barat-timur yang membentang di sebelah utara dari daerah penelitian memiliki lapisan dengan nilai V_s pada rentang tersebut (0-350 m/s) cukup tebal terlihat di sepanjang lintasan. Sedangkan, nilai amplifikasi relatif tinggi di sisi tengah dari daerah penelitian berasosiasi dengan ketebalan sedimen yang cukup tinggi yang didukung oleh penelitian sebelumnya oleh Sudarsono dan Hasibuan (2011) yaitu karena Batuan Sedimen Kuartar Bawah (Q_{os}) berupa tanah residu di wilayah tersebut yang terdiri dari tiga lapisan tebal. Lapisan lempung sebagai lapisan teratas kemudian di bawahnya terdapat lapisan pasir lempungan, dan lapisan ketiga berupa lapisan pasir dengan ketebalan cukup besar. Sedangkan, nilai amplifikasi rendah dominan berada di sisi tenggara yang diduga berasosiasi dengan Endapan Aluvium (Q_a).



Gambar 8. Hasil inversi kurva HVSr pada stasiun MI073. (a) Model 1 dimensi V_s terhadap kedalaman (b) Kurva HVSr hasil inversi

Selanjutnya, hasil dari proses inversi dengan metode Neighbourhood Algorithm yang berupa model 1-D dari nilai V_s pada Gambar 8 dan kurva HVSr yang digambarkan dengan nilai eliptisitas dapat dilihat pada Gambar 8(b). Model 1-D dari nilai V_s terhadap kedalaman yang nantinya akan digunakan sebagai interpretasi berikutnya, adalah model yang menghasilkan kurva HVSr hasil kalkulasi dengan misfit minimum. Kurva HVSr dengan misfit minimum adalah kurva dengan nilai yang paling mendekati kurva HVSr hasil observasi. Kurva HVSr kalkulasi dengan misfit minimum didapatkan dari parameter (V_s , V_p , poisson ratio, dan kedalaman) yang paling sesuai dengan kenampakan bawah permukaan pada titik pengukuran. Parameter tersebut didapatkan dari pemilihan random (uniform random walk) berdasarkan rentang yang dibuat pada Tabel 2.

Pada Gambar 8 warna dari model dan kurva yang semakin gelap menunjukkan nilai misfit yang semakin besar dan warna merah adalah kurva atau model dengan misfit paling minimum pada data tersebut. Kemudian, yang ditunjukkan dengan warna biru adalah kurva HVSr hasil observasi. Berdasarkan model 1-D dari nilai V_s terhadap kedalaman dari hasil proses inversi tersebut didapatkan bahwa kecepatan gelombang geser (V_s) memiliki nilai yang sama

kin besar relatif dengan bertambahnya kedalaman, terukur di keseluruhan stasiun. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman lapisan bawah permukaan, semakin keras pula kenampakan litologinya. Seperti yang diungkapkan oleh Sudarsono dan Hasibuan (2011) yang menyebutkan bahwa wilayah Kertajati memiliki kenampakan dekat permukaan berupa tanah residu dan tanah tertransport yang lunak dan di bawahnya berupa batuan induk yang lebih keras. Dihasilkan pula penampang horizontal nilai V_s pada kedalaman 10, 25, 40, 80, 100, 250, dan 1000 m. Kedalaman 1000 diperoleh dari nilai V_s pada lapisan paling bawah yaitu lapisan ke-8 yang merupakan lapisan halfspace. Pada pemetaan penampang nilai V_s , lapisan berwarna merah merupakan lapisan yang memiliki nilai V_s kurang dari 750 m/s yang biasa disebut sedimen yang berada di atas *engineering rock*.

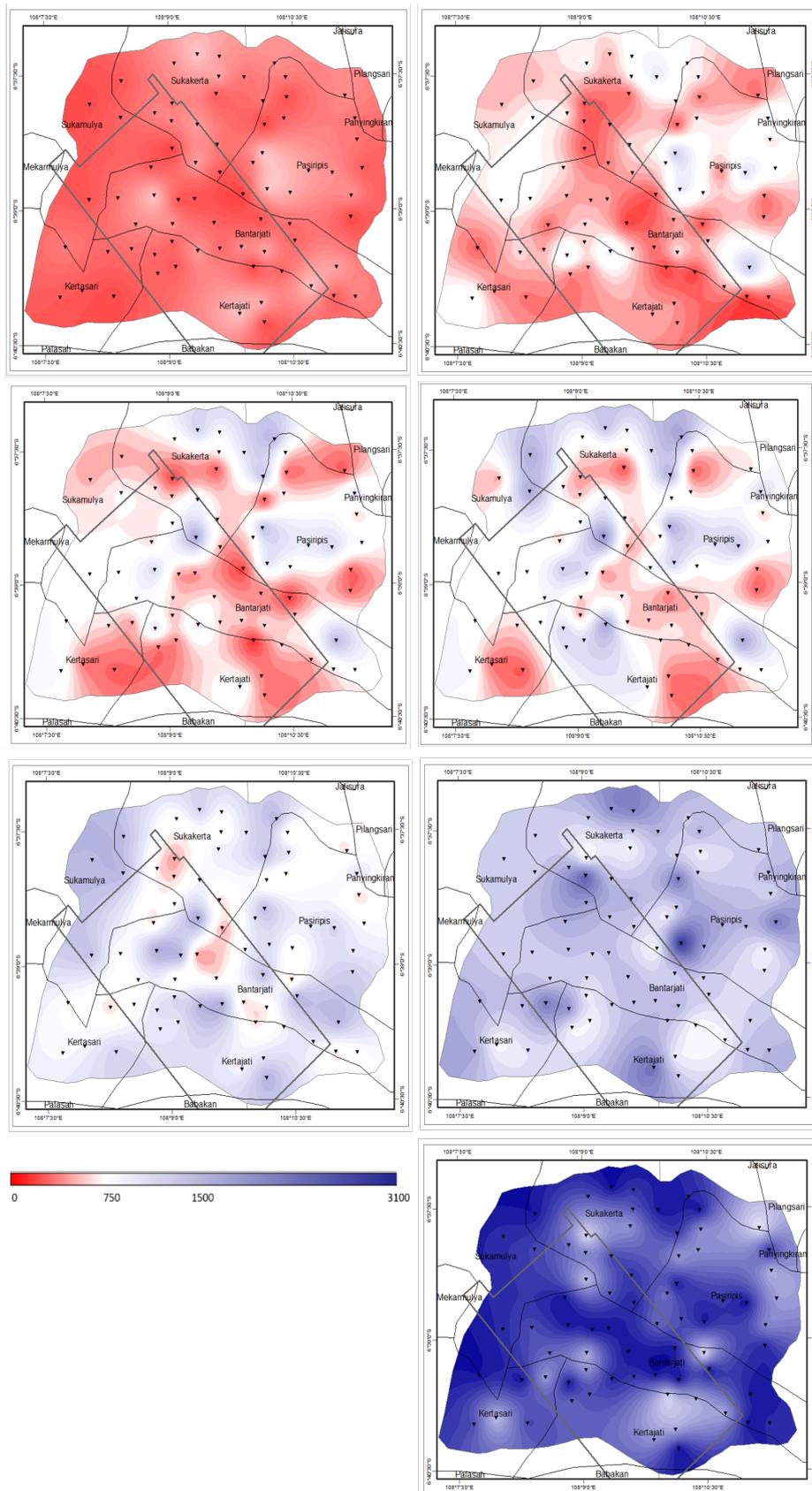
Berdasarkan peta penampang horizontal V_s dari beberapa kedalaman didapatkan bahwa pada kedalaman 10 m (Gambar 9 (a)) menunjukkan nilai V_s secara keseluruhan relatif bernilai kecil yaitu kurang dari 750 m/s. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa pada kedalaman 10 m wilayah penelitian secara keseluruhan berupa lapisan sedimen. Hal ini bersesuaian dengan kondisi geologi berupa tanah residu sedimen Kuartir Bawah (Qos) mempunyai kedalaman berkisar antara 2.4 m sampai 14.20 m yang memiliki sifat plastisitas yang tinggi (Hasibuan dan Sudarsono, 2011). Sehingga pada kedalaman 10 m masih terindikasi sebagai lapisan sedimen. Penampang horizontal V_s pada kedalaman 25 m (Gambar 9 (b)) didapatkan bahwa daerah penelitian masih didominasi kenampakan berupa lapisan sedimen yang memiliki nilai V_s kurang dari 750 m/s. Namun, di sebelah timur sudah terdapat kenampakan lapisan dengan nilai V_s pada rentang antara 750-1500 m/s yang merupakan *engineering bedrock*. Pada Gambar 9 (c) menampilkan penampang horizontal pada kedalaman 40 m menunjukkan lapisan dengan nilai V_s kurang dari 750 m/s masih mendominasi. Namun, pada sisi barat, timur, dan utara telah menunjukkan lapisan dengan V_s pada rentang 750-1500 m/s. Penampang horizontal kedalaman 80 m pada Gambar 9 (d) menunjukkan bahwa daerah penelitian masih menunjukkan kenampakan sedimen di beberapa tempat yaitu, di bagian tengah, barat daya, dan tenggara. Hal ini menunjukkan bahwa pada bagian tersebut memiliki ketebalan sedimen yang lebih besar. Peta penampang ini mendukung hasil dari nilai frekuensi dominan yang menunjukkan nilai relatif rendah sehingga berasosiasi dengan ketebalan sedimen yang relatif lebih besar. Penampang nilai V_s pada kedalaman 100 m (Gambar 9 (e)) didapatkan kenampakan lapisan sedimen dengan nilai V_s kurang dari 750 m/s hanya berada pada sisi tengah daerah penelitian yang mengindikasikan kemungkinan adanya ketebalan sedimen yang cukup besar pada titik tersebut. Hasil penampang horizontal pada kedalaman 250 m (Gambar 9 (f)) didominasi oleh lapisan dengan rentang V_s 750-1500 m/s. Sedangkan penampang horizontal pada kedalaman 1000 m (Gambar 9 (g)) didominasi oleh kenampakan batuan keras dengan nilai V_s lebih dari 1500 m/s. Selanjutnya, agar diperoleh model variasi kecepatan gelombang geser bawah permukaan (V_s) secara lebih terperinci maka dilakukan pemodelan V_s berupa penampang vertikal pada enam lintasan seperti pada Gambar 10 berikut.

Keenam lintasan tersebut dipilih karena melalui beberapa perubahan nilai yang signifikan, baik dari frekuensi dominan, amplifikasi, maupun penampang horizontal ke-

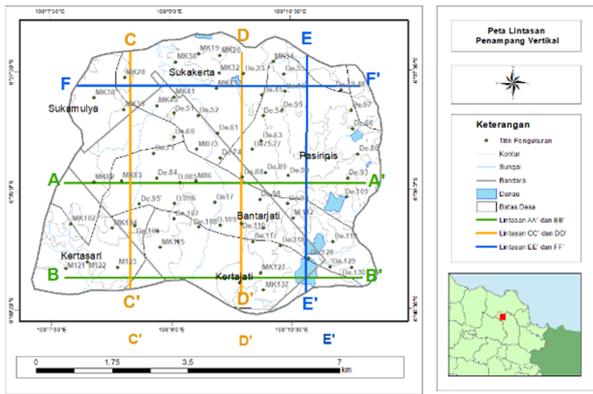
patan gelombang geser (V_s) tadi. Kemudian diperoleh penampang vertikal pada Gambar 11-13 (a) untuk penampang hingga maksimum kedalaman 610 m yang bersesuaian dengan kedalaman maksimum hasil inversi dan Gambar 11-13 (b) memiliki kedalaman maksimum 100 m agar didapatkan distribusi nilai V_s yang lebih terperinci.

Penampang vertikal V_s cukup dapat menampilkan variasi nilai V_s yang berubah terhadap kedalaman. Nilai V_s makin besar sebanding dengan kedalaman yang bertambah. Nilai dari kecepatan gelombang geser (V_s) ini berasosiasi dengan karakteristik dari lapisan bawah permukaan yang telah dikelompokkan oleh SNI. Penelitian ini menunjukkan bahwa kenampakan bawah permukaan wilayah penelitian yang menunjukkan kenampakan sedimen yaitu nilai V_s kurang dari 750 m/s pada kedalaman yang relatif kecil yaitu 20-100 m. Kemudian, hasil pemetaan V_s^{30} di daerah penelitian memiliki nilai berkisar antara 247-541 m/s. Nilai V_s^{30} dapat digunakan untuk mengklasifikasikan jenis tanah. Pada daerah penelitian dilakukan pengklasifikasian nilai V_s^{30} berdasarkan pengelompokan tanah dan batuan oleh SNI. Wilayah Kertajati digolongkan dalam dua jenis tanah yaitu tanah dengan nilai V_s pada rentang 175-350 m/s yang berasosiasi dengan tanah sedang (SD) dan jenis tanah sangat padat atau batuan lunak (SC) dengan nilai V_s pada rentang 350-750 m/s. Peta persebaran V_s^{30} dapat dilihat pada Gambar 14 berikut.

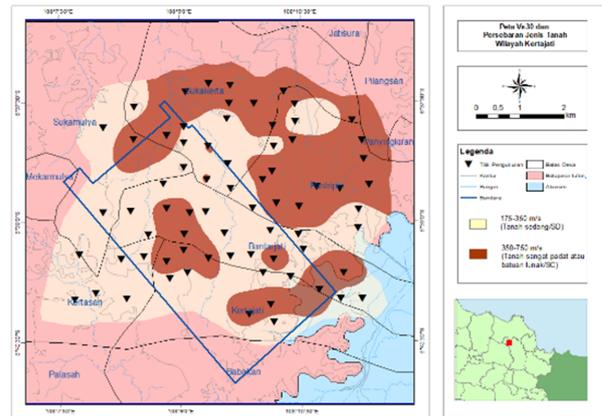
Secara lebih terperinci berdasarkan hasil pemetaan frekuensi dominan, didapatkan bahwa frekuensi dominan bernilai rendah berada pada sisi barat, tengah, dan tenggara dari daerah penelitian. Daerah tersebut sebagian besar berada pada sisi tenggara Desa Sukamulya, sisi timur Desa Kertasari, sisi tengah dan timur Desa Bantarjati, sisi selatan Desa Sukakarta, dan sisi timur Desa Kertajati. Sedangkan berdasarkan pemetaan persebaran nilai amplifikasi, didapatkan bahwa nilai amplifikasi relatif lebih tinggi pada bagian tengah dan utara daerah penelitian yang mencakup bagian tengah dari Desa Bantarjati dan sisi selatan serta tengah dari Desa Sukakarta. Sehingga didapatkan bahwa pada kenampakan geologi batuan yang sama dapat menunjukkan perbedaan respons dinamik terhadap guncangan yang berasal dari aktivitas kegempaan dengan relatif berbeda. Daerah dengan nilai frekuensi dominan rendah yang berasosiasi dengan nilai ketebalan sedimen yang relatif lebih tinggi didominasi oleh jenis sedimen berupa lapisan tanah padat atau batuan lunak (SC) yang berasosiasi dengan nilai V_s pada rentang 350-750 m/s. Menurut UBC (*Uniform Building Code*) karakteristik tanah dengan rentang nilai V_s antara 360-760 m/s berupa endapan pasir yang sangat padat, kerikil atau tanah liat yang sangat kaku. Hal ini berasosiasi dengan penelitian sebelumnya bahwa lapisan pasir dan lanau pasir menunjukkan kedalaman yang lebih besar pada sisi tengah yang berasosiasi dengan jenis batuan Sedimen Kuartir Bawah (Q_{oa}) dan tenggara yang berasosiasi dengan jenis Endapan Aluvium (Q_a) daerah penelitian. Diperolehnya informasi berupa jenis sites belum cukup untuk dapat menentukan pengaruhnya secara langsung terhadap bangunan di atasnya. Diperlukan investigasi geoteknik yang lebih mendalam untuk dapat menentukan tingkat keamanan lapisan tanah di bawahnya terhadap bangunan di atasnya.



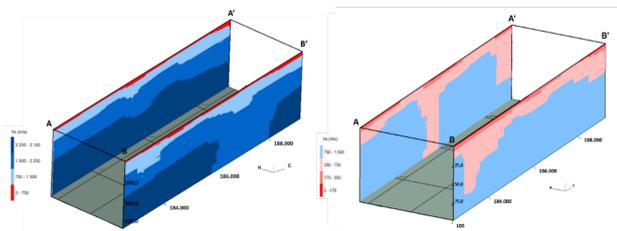
Gambar 9. Penampang horizontal nilai V_s pada kedalaman a) 10 m, b) 25 m, c) 40 m, d) 80 m, e) 100 m, f) 250 m, g) 1000 m.



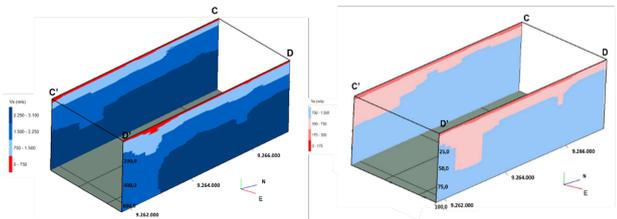
Gambar 10. Peta lintasan penampang vertikal, garis lintasan tersebut adalah lintasan yang akan digunakan untuk menampilkan penampang vertikal dari V_s pada Gambar 11, 12, dan 13



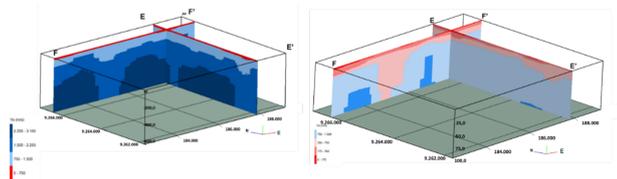
Gambar 14. Peta persebaran jenis tanah berdasarkan nilai V_s^{30} daerah Kertajati, daerah penelitian didominasi oleh dua jenis tanah yaitu tanah sedang dan batuan lunak



Gambar 11. Penampang vertikal V_s dari lintasan AA' dan BB' dengan arah barat-timur (a) Kedalaman maksimum 610 meter (b) Kedalaman maksimum 100 meter.



Gambar 12. Penampang vertikal V_s dari lintasan CC' dan DD' dengan arah utara-selatan (a) Kedalaman maksimum 610 meter (b) Kedalaman maksimum 100 meter



Gambar 13. Penampang vertikal V_s dari lintasan EE' dan FF' dengan arah utara selatan-timur barat (a) Kedalaman maksimum 610 meter (b) Kedalaman maksimum 100 meter

3 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data mikrotremor serta analisis yang diperoleh, maka dapat disimpulkan bahwa nilai frekuensi vibrasi dominan (f_0) wilayah Kertajati berkisar antara 0.63 – 18.63 Hz. Memiliki persebaran nilai frekuensi dominan rendah di sisi tenggara, barat, dan bagian tengah daerah penelitian. Sedangkan, nilai amplifikasi (A_0) berkisar antara 1.26 - 6.33, dengan nilai amplifikasi relatif sedang hingga tinggi tersebar di sisi utara, barat, dan bagian tengah daerah penelitian. Inversi kurva HVSR menghasilkan sebaran nilai Kecepatan gelombang geser (V_s) bawah permukaan di wilayah Kertajati yang berkisar antara 53 - 3027 m/s dengan rentang kedalaman hingga 610 m, dan persebaran nilai V_s relatif rendah pada sisi tenggara, barat daya dan bagian tengah daerah penelitian. Jenis tanah yang diperoleh berdasarkan klasifikasi nilai kecepatan gelombang geser (V_s) rata-rata hingga kedalaman 30 m. Nilai V_s^{30} di wilayah penelitian berkisar antara 247 – 541 m/s. Sehingga, didapatkan bahwa daerah penelitian terbagi dalam dua kelompok batuan. Nilai V_s^{30} dengan rentang 180-360 m/s merupakan kelompok tanah sedang (SD) yang dominan berada pada sisi barat daya dan sebagian kecil di sisi timur laut. Dan nilai V_s^{30} dengan rentang 350-750 m/s termasuk ke dalam jenis tanah sangat padat atau batuan lunak (SC) yang sebagian besar tersebar di sisi timur laut dan sebagian kecil di sisi tenggara daerah penelitian. Pada wilayah Kertajati, daerah dengan nilai frekuensi dominan (f_0) relatif rendah yang berasosiasi dengan nilai ketebalan sedimen yang relatif lebih tinggi didominasi oleh jenis sedimen berupa lapisan tanah padat atau batuan lunak (SC) yang berasosiasi dengan nilai V_s pada rentang 350-750 m/s.

Pada penelitian selanjutnya diharapkan dilakukan pengeboran di beberapa titik agar diperoleh data yang lebih valid sebagai dasar untuk penentuan parameter awal dari proses inversi. Kemudian, untuk dapat melakukan pengecekan kembali parameter yang tepat dapat dilakukan dengan melakukan perhitungan *Probability Density Function* (PDF). Selain itu, untuk diperoleh nilai karakteristik V_s bawah permukaan dapat juga dilakukan penelitian kembali dengan metode MASW (*Multi Channel Analysis of Surface Wave*). Untuk dapat mengetahui pengaruh karakteristik ta-

nah terhadap bangunan di atasnya dapat dilakukan penelitian mengenai investigasi geoteknik yang lebih spesifik. Untuk mengetahui efek semburan gas di Desa Sukapena yang berjarak 20 km arah timur laut dari daerah penelitian perlu dilakukan pengukuran data mikrotremor yang berada di sekitar titik semburan agar diperoleh data mikrotremor yang dipengaruhi oleh getaran dari semburan gas tersebut.

4 UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari program penelitian PPMI ITB Tahun 2021. Ucapan terima kasih penulis sampaikan juga untuk Pusat Survei Geologi (PSG) yang telah memberi akses data serta kerjasama penelitian yang telah dilakukan

Pustaka

- Albini, P. dkk. (2013): Global historical earthquake archive and catalogue (1000-1903). *Pavia, Italy*.
- Bemmelen, R.W.v. (1949): The geology of Indonesia. Govt. Printing Office The Hague.
- Brown, L., Diehl, J.G., Nigbor, R.L. dkk. (2000): A simplified procedure to measure average shear-wave velocity to a depth of 30 meters (vs30). *Proceedings of 12th world conference on earthquake engineering*, 1-8.
- Cipta, A. dkk. (2018): Seismic velocity structure of the jakarta basin, indonesia, using trans-dimensional bayesian inversion of horizontal-to-vertical spectral ratios. *Geophysical Journal International*, **215**(1), 431-449.
- Cipta, A. dkk. (2021): Unearthing the buried palu-koro fault and the pattern of damage caused by the 2018 sula-wesi earthquake using hvsr inversion. *Geological Society, London, Special Publications*, **501**(1), 185-203.
- Djuri, M. (1995): Peta geologi lembar arjawinangun, jawa, skala 1: 100.000. *Puslitbang Geologi, Bandung*.
- Febyani, S. dkk. (2020): Analisis kerentanan gempa pada jalur sesar baribis menggunakan metode microearthquake (meq). *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY*, **18**(1), 1-12.
- Gosar, A. (2010): Site effects and soil-structure resonance study in the kobarid basin (nw slovenia) using microtremors. *Natural hazards and earth system sciences*, **10**(4), 761-772.
- Grandis, H. (2009): Pengantar pemodelan inversi geofisika himpunan ahli geofisika indonesia (hagi).
- Hasibuan, G. dan Sudarsono, U. (2009): Geologi teknik daerah kertajati kabupaten majalengka, jawa barat. *Buletin Geologi Tata Lingkungan (Bulletin of Environmental Geology)*, **19**(3), 125-134.
- Humaida, H., Zaennudin, A. dan Sutaningsih, N. (2012): Semburan gas bercampur air di desa candi pari, kecamatan porong, kabupaten sidoarjo, jawa timur. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, **3**(1), 1-19.
- Konno, K. dan Kataoka, S. (2000): New method for estimating the average s-wave velocity of the ground. *Proc. of the 6th International Conf. on Seismic Zonation*.
- Koulali, A. dkk. (2017): The kinematics of crustal deformation in java from gps observations: Implications for fault slip partitioning. *Earth and Planetary Science Letters*, **458**, 69-79.
- LH, I.S. (1987): Penuntun praktis geoteknik dan mekanika tanah (penyelidikan lapangan dan laboratorium). *NOVA-Bandung*.
- Marjiyono (2012): Estimasi Karakteristik Dinamik Tanah dari Data Mikrotremor. Ph.D. thesis, Institut Teknologi Bandung.
- Musson, R. (2012): A provisional catalogue of historical earthquakes in indonesia. *British Geol Surv Open Rep OR/12/073, Edinburgh*.
- Nakamura, Y. (2008): On the h/v spectrum, the 14th world conference on earthquake engineering.
- Nakamura, Y. (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, **30**(1).
- Nguyen, N., Griffin, J., Cipta, A. dan Cummins, P.R. (2015): Indonesia's historical earthquakes. modelled sample for improving the national hazard maps. *Geoscience Australia*.
- Okada, H. dan Suto, K. (2003): The microtremor survey method. Society of Exploration Geophysicists.
- Rong, M. dkk. (2017): On the amplitude discrepancy of hvsr and site amplification from strong-motion observation on the amplitude discrepancy of hvsr and site amplification from strong-motion observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **107**(6), 2873-2884.
- Sudarsono, U. dan Hasibuan, G. (2011): Karakteristik geologi teknik tanah residu batuan sedimen kuartar bawah daerah kertajati, majalengka, jawa barat engineering geological characteristics of the residual soil, lower quaternary sediments in kertajati region, majalengka, west java. *Jurnal Geologi Indonesia*, **6**(3), 177-189.
- Toiba, Y., Sili, P.D., Maskur, M. dkk. (2016): Analisis mikrotremor kawasan palu barat berdasarkan metode horizontal to vertical spectral ratio (hvsr). *Gravitasi*, **15**(1).
- Uebayashi, H. (2003): Extrapolation of irregular subsurface structures using the horizontal-to-vertical spectral ratio of long-period microtremors. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(2), 570-582.
- Wathelet, M., Jongmans, D. dan Ohrnberger, M. (2004): Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near surface geophysics*, **2**(4), 211-221.