

**PERBANDINGAN METODE MULTI ANALYSIS SURFACE WAVE DAN
METODE HVSR DENGAN MENGIDENTIFIKASI KARAKTERISTIK
BAWAH PERMUKAAN JARINGAN MONITORING GEMPABUMI
WILAYAH JAWA TENGAH**

**Retno Yogi Widjayanti¹, Mochamad Aryono Adhi², Sigit Pramono³, Moh.
Iqbal Tawakal⁴, Adam Ardiansyah⁵, Aditya Setyo Rahman⁶**

Balai Besar Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika

Wilayah II Tangerang Selatan^{1,4}

Universitas Negeri Semarang^{1,2,5}

Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika Pusat Jakarta^{3,4,6}

retno_muslimah_ry@students.unnes.ac.id¹

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji kondisi bawah permukaan hingga kedalaman 30 meter untuk menilai potensi amplifikasi gelombang seismik yang merupakan faktor penting dalam ketahanan infrastruktur gempa. Penelitian ini menggunakan 2 metode yaitu metode *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) dan metode inversi *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) yang digunakan dalam menggambarkan karakteristik bawah permukaan berdasarkan parameter kecepatan gelombang geser (Vs). Metode MASW menggunakan 24 geofon dengan frekuensi 4,5 Hz, sementara metode HVSR memanfaatkan data hasil survey seismik single station 3 komponen stasiun jaringan pengamatan gempabumi dari stasiun pemantauan gempa di seluruh Jawa Tengah. Klasifikasi tanah dilakukan dengan merujuk standar SNI 1726-2019, yang memungkinkan penilaian potensi amplifikasi di berbagai lokasi. Situs referensi yang digunakan dalam penelitian ini mencakup MBJI (Banjarnegara), KWJI (Wonosobo), KBJN dan GTJI (Temanggung), GBJI (Batang), NSM01 (Semarang Tengah), SMRI dan SMRIB (Tembalang, Semarang), serta BOJI (Boyolali). Hasil analisis MASW mencatat nilai Vs30 terendah 165,1 m/s di NSM01 dan nilai tertinggi 1868 m/s di MBJI, sementara metode HVSR menunjukkan nilai Vs30 minimum sebesar 129,8 m/s di NSM01, yang diklasifikasikan sebagai Tanah Lunak (Kelas E). Hasil analisis dari dua metode MASW dan inversi HVSR menunjukkan hasil yang saling mengkonfirmasi terkait kondisi bawah permukaan tanah, sebaliknya hasil HVSR menunjukkan tanah Kelas C, yang menggambarkan kondisi Tanah Sangat Padat dan Batu Lunak. Variasi dalam jenis tanah ini membantu mengidentifikasi lokasi-lokasi yang rentan terhadap amplifikasi gelombang, seperti NSM01 dengan profil tanah lunak, dan lokasi dengan potensi amplifikasi lebih rendah seperti MBJI, yang memiliki lapisan bawah tanah tipe batuan. Hasil penelitian ini dapat bermanfaat dalam mendukung perencanaan konstruksi tahan gempa di Jawa Tengah.

Kata Kunci : Amplifikasi, MASW, HVSR, Shear wave , Vs30.

ABSTRACT

This research explores subsurface conditions up to a depth of 30 meters in order to evaluate the potential for seismic wave amplification, which is a critical factor in

earthquake-resilient infrastructure planning. Two geophysical approaches were employed : the Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) and the of the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSР). These methods were utilized to characterize the subsurface based on the shear wave velocity (Vs) parameter. The MASW technique was implemented using 24 geophones with a 4.5 Hz natural frequency. Meanwhile, the HVSР method used seismic data obtained from single-station, three-component earthquake monitoring networks distributed across Central Java. Soil classification followed the Indonesian National Standard (SNI) 1726:2019, enabling assessment of local site amplification potential. Key reference stations included MBJI (Banjarnegara), KWJI (Wonosobo), KBJN and GTJI (Temanggung), GBJI (Batang), NSM01 (Central Semarang), SMRI and SMRIB (Tembalang, Semarang), and BOJI (Boyolali). MASW analysis showed that the lowest Vs30 value was recorded at NSM01 (165.1 m/s), while the highest was observed at MBJI (1868 m/s). In comparison, the HVSР Inversion Results indicated a minimum Vs30 of 129.8 m/s at NSM01, which corresponds to Soft Soil (Class E). The Inversion Results from both MASW and HVSР were generally consistent in depicting subsurface conditions. Conversely, HVSР also identified some sites as Class C soils, representing Very Dense Soil and Soft Rock. This variation in soil types across the study sites highlights areas that are potentially more vulnerable to seismic wave amplification—such as NSM01, characterized by softer sediments—versus locations like MBJI, where the subsurface is dominated by rock formations with lower amplification risk. The findings of this study offer valuable insights for future earthquake-resistant construction planning in Central Java.

Keywords: Amplification, MASW, HVSР, Shear Wave, Vs30

PENDAHULUAN

Kondisi geologi daerah penelitian jaringan monitoring gempabumi wilayah Jawa bagian tengah merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki potensi bencana geologi yang sangat kompleks. Secara tektonik wilayah monitoring gempabumi wilayah Jawa Tengah berada dalam batas antara dua lempeng yang saling bertabrakan. Zona subduksi yang berada di selatan pulau Jawa sering menghasilkan gempa-gempa besar dan berpotensi tsunami.

Umumnya gempabumi dengan kekuatan besar bersumber dari zona megathrust, yaitu zona penunjaman yang mempunyai sudut tukik yang landai terhadap kedalaman. Beberapa kali terjadi kegempaan dan sumber-

sumber ancaman kegempaan terutama wilayah yang berada dekat sesar, untuk mendapatkan data dukung kegempaan tersebut maka BMKG memasang lokasi site sensor di beberapa wilayah yang tersebar terutama di Jawa Tengah dan sekitarnya dalam upaya mitigasi bencana.

Dari sebaran sensor di Jawa Tengah yang dipakai untuk referensi dalam penelitian ini mempunyai potensi sumber kegempaan wonosobo dan banjarnegara (Kalibening) untuk sensor-sensor di wilayah banjarnegara, Temanggung dan Wonosobo. Dan untuk wilayah semarang dan boyolali dapat mempelajari pencatatan gelombang seismik dengan melihat karakteristik sumber kegempaan dari jenis sumber gempa sesar ungaran 1 , ungaran 2, back

arc thrust semarang dan Subduksi selatan Jawa. (Gorstein & Ezersky, 2015).

Dalam kajian *local site* terkait latar belakang *site* sensor adapun referensi yang sudah dilakukan oleh M. A. M Ashraf et al (2018) sudah melakukan *Site Classification using Multichannel Channel Analysis of Surface Wave (MASW) method on Soft and Hard Ground*, Widjojo et al. telah melakukan Comparing Shear-Wave Velocity Determined By MASW With Borehole Measurement At Merapi Sediment In Yogyakarta, M. Muzli, et al. telah melakukan Pengukuran Vs30 Menggunakan Metode MASW untuk Wilayah Yogyakarta, Novien Ghoziana Indanartha, et al. (Mahasiswa Teknik Geofisika FTSLK-ITS) dengan MASW sudah melakukan Pemodelan Parameter Dinamis Tanah (Vs, G0) berdasarkan Data metode Multichannel Analysis Of Surface Wave (MASW) sebagai Evaluasi Tapak Lokal Surabaya yang mengkaji *site* secara umum.

Cipta et al. (2016) sudah melakukan Trans-dimensional Bayesian Inversion of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios. Geophysich. Dal Moro, G (2010) telah melakukan analisis mengenai Surface Wave dan HVSR, (Anggraeni et al., 2025) sudah melakukan Indeks Kerentanan Seismik berdasarkan Mikrotremor pada setiap satuan bentuk lahan di zona Graben Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta.

Tujuan dari adanya penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi kondisi tanah bawah permukaan apakah ada atau tidaknya potensi terjadinya perbesaran getaran atau amplifikasi gelombang gempabumi di lokasi sensor Jaringan Monitoring gempabumi BMKG referensi sebaran sensor di Jawa Tengah dengan membandingkan dua

metode yaitu MASW dan HVSR. Pengukuran dilakukan di lokasi sensor referensi pada jaringan akcelerometer BMKG karena untuk mengetahui potensi getaran atau amplifikasi getaran yang terekam pada sensor referensi tersebut. (Amirudin et al., 2023). Dari setiap lokasi sensor terpilih tersebut ditujukan untuk mengetahui karakteristik jenis tanah dari medium bawah permukaan.

Di tinjau dari sisi geologi daerah penelitian, Jawa Tengah memiliki kondisi geologi yang kompleks. Khususnya untuk daerah penelitian yang terletak di beberapa *site* shelter jaringan akcelerometer BMKG Jawa Tengah, kondisi geologi tersusun dari breksi gunung api (agglomerat), *lava andesitik hornblenda* dan tuf, membentuk sekuen atas formasi ligung pada *site* MBJI (Majalengka, Banjarnegara).

Pada *site* KWJI (Kertek, Wonosobo) dan KBJN (Kandangan, Temanggung) memiliki sifat litologi yang sama yaitu Lava andesitik augit-hipersten dan basaltik augit-olivin, breksi aliran, breksi piroklastik dan lahar. Untuk *site* GTJI (Gemawang, Temanggung) tersusun dari Batupasir, tuf breksi, batulempung dan aliran lava. GBJI (Gringsing, Batang) memiliki kesamaan geologi batuan dengan *site* NSM01 (Pendrikan Kidul, Semarang Tengah) yaitu Aluvium dengan struktur Kerakal, kerikil, pasir, lempung, lumpur, fragmen koral dan batuapung. *Site* SMRI dan SMRIB (Tembalang, Semarang) memiliki sifat batuan Formasi Kaligetas, dengan struktur geologi Breksi gunungapi, aliran lava, tuf, batupasir tufan dan batulempung. Serta *site* BOJI (Sawit, Boyolali) geologi batuannya berupa Endapan Gunungapi Muda G. Merapi/Bat Gnapi

Merbabu dimana litologinya Tuf tak terpisahkan, abu, breksi, aglomerat dan aliran lava. Dari kondisi geologi tersebut dapat mengakibatkan amplifikasi gelombang seismik yang terjadi jika ditemukan kondisi lokasi sensor dengan jenis tanah endapan (aluvial).

Tanah yang keras mempunyai kecepatan gelombang geser yang besar sehingga amplifikasi gelombang kemungkinan terjadi kecil sedangkan untuk tanah yang lunak mempunyai kecepatan gelombang geser yang rendah sehingga amplifikasi yang dihasilkan besar. (Aminah, et al., 2015) Hal ini disebabkan oleh perbedaan kecepatan gerakan gelombang geser dibatuan dasar dan pada lapisan tanah (sedimen).



Gambar 1.

Dokumentasi Penelitian Pengukuran MASW yang terletak di setiap sensor terpilih pada Jaringan Akcelerometer BMKG Jawa Tengah.

Berdasarkan tingkat seismisitas dan kerentanan gempa bumi di daerah penelitian serta perlunya mengkaji kualitas getaran seismik yang tertangkap oleh sensor, maka diperlukan upaya mitigasi dengan melakukan

penelitian mengenai karakterisasi *site effect* menggunakan metode MASW dibandingkan dengan metode HVSR. (Endekan, et al., 2023)

Berikut daerah penelitian yang dilakukan untuk mendapatkan profil karakteristik bawah permukaan berdasarkan jaringan akcelerometer BMKG Jawa Tengah di setiap sensor terpilih.

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah metode MASW (Multi Analysis Surface Wave) dan HVSR dimana metode MASW merupakan metode untuk mengetahui kecepatan gelombang permukaan pada kedalaman 30 meter. Dalam pengolahan data, MASW mengandung dua bagian mendasar yaitu untuk memproses data lapangan MASW dan mengevaluasi kurva dispersi curve eksperimental serta untuk perhitungan kurva dispersi teoritis dan evaluasi profil kecepatan gelombang geser dengan perhitungan ulang data eksperimen. Sedang metode analisis HVSR menurut Nakamura dapat mengetahui frekuensi alami dan faktor amplifikasi daerah setempat selain itu dapat mengestimasi indeks kerentanan tanah, dari hasil analisis melalui metode HVSR pada pengukuran Periode Dominan yang didapatkan dari hasil pengukuran alat Vibralog (*seismograph digital*) dilakukan dengan menggunakan aplikasi Geopsy dari SESAME European Project untuk mendapatkan Vs30. (Desmonda & Pamungkas, 2014).

Dimana di dalam prosesnya dilakukan tahapan *windowing*, *filtering* serta *smoothing* dengan kriteria menyesuaikan mikrotremor yang terekam lalu hasil pembacaan periode dominan akan diperbandingkan dengan

nilai Vs₃₀ berdasarkan persamaan empiris (Bard et al., 2004). Kelebihan *survey* MASW dibanding *survey* lainnya adalah selain dalam pelaksanaannya lebih mudah dan tidak membutuhkan waktu yang lama, juga tidak memerlukan lubang bor dalam menentukan titik pengukurannya.

Peralatannya pun tidak mengganggu jalur struktur lain di dalam tanah karena diletakkan di permukaan tanah, namun sudah dapat merekam sinyal gelombang yang dibutuhkan untuk menentukan karakteristik bawah permukaan. Sedang metode HVSR yang sering dikenal dengan metode Nakamura merupakan metode yang sangat efektif, ekonomis dan ramah lingkungan untuk mengestimasi karakteristik dinamik lapisan tanah permukaan dan efek geologi setempat (*local site effect*) akibat gempa bumi selain itu metode ini dapat digunakan untuk mengetahui ketebalan lapisan sedimen, sehingga dapat mengestimasi keberadaan bedrock di suatu tempat.

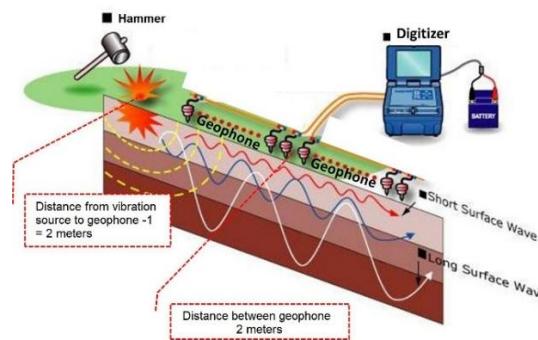
Peralatan utama yang digunakan dalam survey MASW adalah : 1) Palu 3 kg dan tatakan besi; 2) 24 buah sensor geofon dengan frekuensi 4.5 Hz; 3) Kabel data dan kabel take-out; 4) Seismograf dilengkapi software akuisisi dan analisa data; 5) Perangkat komputer : keyboard, mouse, dan flashdisk; 6) Sumber daya accu 12V 24 Ah. Sedang Peralatan yang digunakan dalam metode HVSR, yaitu berupa Vibralog yang merupakan seismograph digital dengan display dan keypad serta dilengkapi SD memory dimana di dalamnya terdapat proses akuisisi data, trigger, konfigurasi, amplifikasi, serta proses recording data secara kontinue.

Data hasil pengukuran seismik yang diperoleh dilapangan dari metode MASW maupun HVSR berupa data

dengan format dat atau seg yang nantinya melalui metode MASW akan di analisa menggunakan software SeisImager Pickwin untuk diperoleh data kecepatan gelombang geser (Vs₃₀). (Fabozzi, et al., 2021). Sedang melalui metode HVSR analisanya menggunakan software Geopsy dari SESAME European Project untuk mendapatkan nilai Vs₃₀ tersebut. Yang kemudian nantinya akan diperbandingkan dan diklasifikasi sesuai standar SNI 1726-2019. (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Pada awal pengolahan data dilakukan pengubahan pada nilai geometri untuk menentukan batas frekuensi dengan batas kecepatan fasa. Perangkat lunak tersebut. Pengambilan data dari daerah penelitian Vs₃₀ adalah nilai kecepatan rata-rata gelombang geser hingga pada kedalaman 30 meter dari permukaan tanah. Nilai Vs₃₀ dipergunakan dalam menentukan standar bangunan tahan gempa dan juga digunakan untuk penentuan klasifikasi batuan berdasarkan kekuatan getaran dari gempabumi akibat efek lokal. (Arai & Tokimatsu, 2005). Hal tersebut karena lapisan-lapisan batuan sampai kedalaman 30 meter saja yang menentukan pembesaran gelombang gempa. Untuk menentukan nilai kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter (Vs₃₀) dihitung menggunakan persamaan :

$$Vs_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{v_i} \right)}$$

Dimana h_i adalah ketebalan (dalam meter) dan V_i adalah kecepatan gelombang geser (dalam m/s) pada lapisan ke-i dari total N lapisan di atas 30 meter.



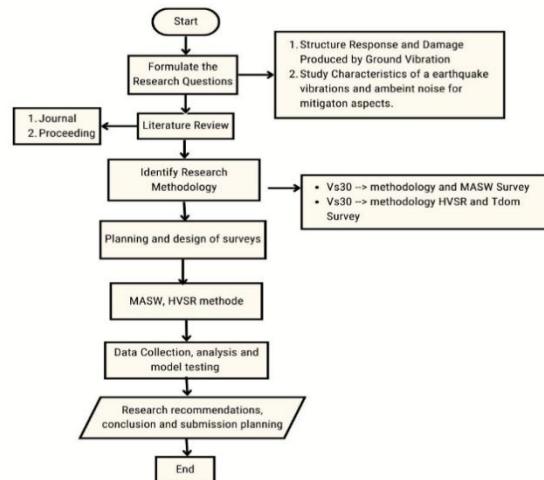
Gambar 2.
Skema peralatan dan setting survey MASW
(sumber : <http://www.masw.com>)

Dari skema tersebut dapat dijelaskan bahwa pukulan palu yang menumbuk tatakan besi menghasilkan gelombang permukaan Rayleigh, gelombang tersebut terdiri dari berbagai frekuensi dan rambatan dengan kecepatan serta kedalaman yang beragam. Dengan adanya perbedaan parameter tersebut menyebabkan terjadinya variasi waktu tiba dan frekuensi yang terekam pada 24 sensor gepon. Masing-masing sinyal geofon akan dikonversi dan diakuisisi dengan seismograf sehingga menghasilkan kurva jarak sumber getara ke tiap sensor geofon dengan waktu tiba gelombang dengan berbagai frekuensi yang beragam.

Dalam proses pengukurannya minimal dapat membentangkan kabel dengan jarak 2×24 meter (masing-masing kanan dan kiri) sesuai dengan jarak gepon terpasang dan ditambah 2 meter untuk terpasangnya palu beserta tatakan besi sebagai lokasi sumber aktif yang nantinya akan dipukulkan. Diusahakan dalam proses pemasangan alat MASW tersebut dipilih lokasi yang sepi (tidak banyak noise seperti kendaraan yang lalu lalang dan kebisingan lainnya) agar data yang didapatkan lebih maksimal.

Pukulan palu sebagai sumber aktif diberikan sebanyak 4 kali terhadap setiap titik pengukuran, di masing-masing sisi yang berbeda sebanyak 2 kali pukulan. Pengukuran tersebut dilakukan dengan tujuan untuk melihat konsistensi hasil yang didapat saat pengukuran dengan sumber pukulan yang berbeda.

Pengukuran dilakukan di beberapa lokasi daerah penelitian yang terletak di setiap sensor terpilih pada jaringan akcelerometer BMKG Jawa Tengah. Data gelombang permukaan didapatkan dari pengukuran dengan 24 buah geophone dengan jarak penerima 2 m (d_x) sedangkan jarak sumber offset 2 Total panjang sebaran penerima (L) adalah 48 m. Untuk frekuensi sampling sebesar 100 Hz, dan panjang rekaman sebesar $1/2$ lamda atau sekitar 24 meter.



Gambar 3.
Diagram alur penelitian menggunakan 2 metode

Berdasarkan pengolahan data yang dilakukan, untuk mendapatkan forward modelling dari gelombang Rayleigh yaitu dengan melakukan akuisisi seismik dimana sinyal gelombang yang berasal dari sumber akan tertangkap dan dilakukan

perekaman sinyal oleh penerima-penerima sinyal gelombang (Geophone).

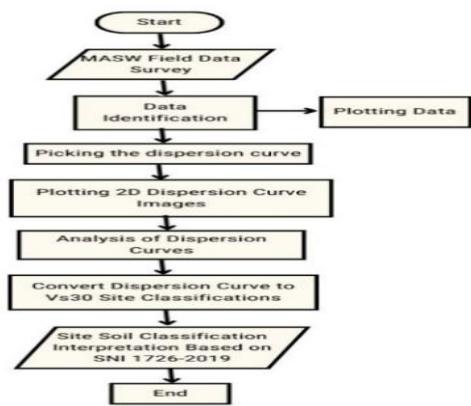
Sehingga hasil dari perekaman sinyal tersebut mendapatkan beberapa jenis-jenis gelombang seperti direct wave, gelombang refraksi, gelombang reflaksi, dan ground roll. Konsep dasar survey MASW dalam pengukuran Vs30 yaitu dengan memanfaatkan prinsip penjalaran gelombang permukaan Rayleigh atau Ground roll yang bersifat dispersif. Pada data rekaman sinyal tersebut terlihat adanya gangguan (noise) pada 4 geophone terakhir. Noise ini disebabkan karena adanya aktivitas transportasi pada lokasi pengukuran yang mana lokasi geophone terakhir berada dekat dengan jalan sehingga terjadilah noise tersebut.

Sebelum dilakukannya pengolahan selanjutnya, data seismik yang diperoleh dari lapangan perlu di transformasikan terlebih dahulu untuk menghasilkan citra spektrum dispersi kecepatan fase. Salah satu metode yang dapat digunakan dalam tahapan ini adalah metode transformasi geser fase (phase shift transformation). (Ardiansyah et al., 2024). Metode ini memiliki beberapa keunggulan untuk mengidentifikasi dan memisahkan jenis gelombang seismik dan sinyal derau. Setelah itu dilakukan Transformasi Fourier yang digunakan untuk mengubah data dari domain waktu menjadi domain frekuensi. (Gutenberg, 1958). Transformasi Fourier membagi sebuah sinyal menjadi frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial yang kompleks. Sehingga persamaan transformasi Fourier yang diperoleh yaitu:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad \dots\dots\dots(1)$$

Dengan $x(t)$ adalah sinyal dalam domain waktu, $e^{-j2\pi f t}$ adalah fungsi *kernel*, $X(f)$ adalah fungsi dalam domain frekuensi serta f adalah frekuensi. Persamaan ini digunakan untuk mentransformasikan sinyal dari domain waktu kedalam domain frekuensi.

Pada pertengahan hingga akhir tahun 1990-an, Park,Miller,Ziadan lainnya di *Geological Survey* mulai mengembangkan perangkat lunak SeisImager Pickwin yang sekarang populer untuk pemrosesan data gelombang permukaan multi-saluran dari aplikasi geoteknik. Selama perkembangan itu,ditemukan bahwa dua metode transformasi konvensional, f-k dan p-f, tidak memberikan resolusi yang memadai medan gelombang dalam kasus dimana ada sejumlah kecil saluran rekaman.



Gambar 4.
Diagram alur pengolahan data MAS
Metode ini terdiri dari 4 langkah yaitu: menerapkan persamaan transformasi *Fourier* ke bidang gelombang sepanjang sumbu waktu lalu mengubah data dari domain x-t ke domain x-f. (Park, C.B et al., 2001).

Selanjutnya dinormalisasikan kesatuan amplitudo, setelah itu mengubah satuan amplitudo dalam domain $x-f$ menjadi domain $f-k$ untuk menghasilkan *spectrum* 2D dari *amplitude* yang dinormalisasikan dalam domain $f-k$. Langkah terakhir yaitu mengubah domain $f-k$ menjadi domain $v-f$.

$$\sum_x^{\infty} e^{ikx} \left(\frac{V(k, f)}{\binom{u(x, f)}{U(x, f)}} \right) \dots \dots \dots \quad (2)$$

Tahapan pertama dari metode ini adalah memicking waktu tiba gelombang pada setiap trace data seismik atau biasa disebut dengan istilah dalam metode MASW ini adalah *Picking First Break* kemudian hasilnya akan disimpan ke dalam suatu file dimana hasil penyimpanan tersebut berisikan nomor trace dan waktu picknya. Tahapan selanjutnya adalah rekonstruksi kedalaman (*initial Model*), dimana dalam tahapan ini dilakukan pengolahan kembali hasil pickingan travel time sebelumnya dimana first break akan dianalisis ke dalam observasi melalui analisis kurna t-x.

Hasil dari perhitungan dengan menggunakan metode *inter cept time* yaitu mendapatkan nilai kedalaman lapisan pertama pada dua lintasan survey. Untuk kecepatan gelombang seismic lapisan pertama dan lapisan kedua didapatkan dari kurva *traveltime*. Pengolahan data dilakukan dengan metode ini sehingga mendapatkan hasil model penampang bawah permukaan untuk setiap lintasannya. Dengan pemodelan ini akan mendapatkan perbedaan kecepatan gelombang di lapisan pertama (V1) dan kecepatan gelombang di lapisan kedua(V2) serta kedalaman disetiap

lapisannya. Berdasarkan hasil *Initial Model* hubungan antara V_p dengan ρ dapat diperoleh melalui hubungan empiris berikut :

$$\rho = 0.31 V p^{0.25}$$

(3)

Sedangkan hubungan antara V_p dengan V_s dapat diperoleh melalui hubungan yaitu:

$$V_p = V_s \sqrt{2} \quad (4)$$

Untuk perhitungan kurva disperse teoritis, solusi dari persamaan *Rayleigh* yaitu $F_R(\lambda(z), G(z), \rho(z), k, \omega) = 0$ (5)

Dimana :

$F_R()$:	Fungsi Dispersi
$\lambda(z)$:	Parameter Konstanta Lame
$G(z)$:	(dari media
$\rho(z)$:	elastis heterogen
k	:	secara vertikal)
ω	:	Modulus Geser Kepadatan Massa (densitas) Bilangan Gelombang Frekuensi sudut

Selanjutnya parameter model akan diperbarui sampai garis kurv teoritis cukup dekat dengan garis kurva eksperimental. Dari perbandingan kurva teoritis dan kurva eksperimental yang menghasilkan *curve fitting*, selanjutnya dilakukan pemodelan kurva profil kecepatan gelombang geser dengan kedalaman. Dari tahapan ini dapat menentukan lapisan-lapisan tanah yang ada dibawah lokasi pengukuran dan juga komposisi batuan penyusunnya dengan membuat kurva profil kecepatan gelombang geser

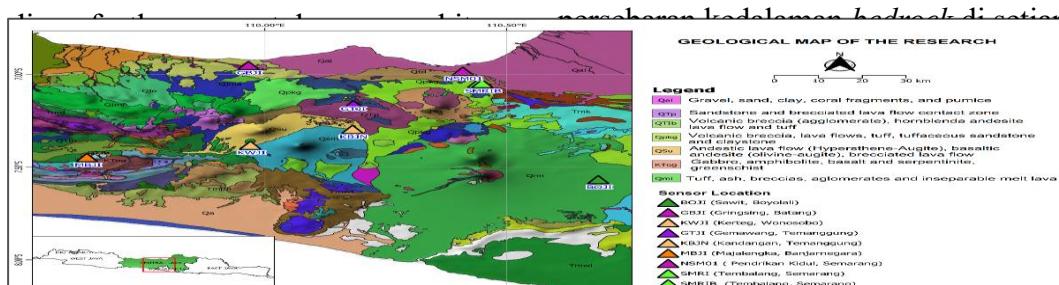
dengan kedalaman perbandingan dari eksperimental dan teoritis Perhitungan misfit untuk menyelesaikan permasalahan geofisika yaitu berdasarkan persamaan dibawah ini:

$$misfit = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_i - M_i}{\sigma_i} \right)^2}$$

Dimana N adalah jumlah titik data, D_i adalah data hasil inversi, M_i adalah model struktur tanah dan σ_i adalah standar deviasi dari data hasil proses modelling dengan $1 \leq i \leq N$. Jika nilai misfit belum sampai ke nilai terkecil maka dilakukan proses data dari model awal kembali. Hal ini dikarenakan masalah utama pada pendekatan modeling adalah teknik optimisasi untuk mencari model awal yang paling mungkin di antara banyak model lain dengan seefisien mungkin. Untuk mengetahui bagaimana kondisi geologi di suatu wilayah dapat dilakukan salah satu metode yang dapat menginterpretasikan gelombang seismik yang nanti hasilnya relatif belum smooth (gambaran kasar) yaitu Metode Intercept Time Method (ITM) dari MASW. Metode tersebut

di titik tertentu dan kedalaman.

Dalam menentukan struktur kecepatan bawah permukaan ada banyak metode geofisika yang digunakan. Namun dalam penelitian ini metode yang digunakan dalam perbandingan hasil tersebut adalah metode *inversi Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Inversi HVSR dinilai lebih efektif serta efisien terutama dalam pengukuran dan pengolahan data di lapangan karena merupakan pengembangan dari metode Nakamura yang mengidentifikasi lapisan sedimen dari rasio spektrum komponen terhadap komponen vertikal. Inversi HVSR dilakukan untuk memperoleh profil kecepatan gelombang geser atau satu dimensi di bawah stasiun seismik yang tersebar di wilayah Jawa Tengah. Menurut simulasi Monte Carlo model kecepatan berdasar pada nilai terbaik dari data *misfit* semua model lalu nilai kecepatan gelombang geser dirata-rata untuk menentukan Vs30 dan diklasifikasikan sesuai dengan ketentuan SNI 1726-2019 dalam menentukan jenis tanah. Pemodelan 3 dimensi disajikan untuk melihat



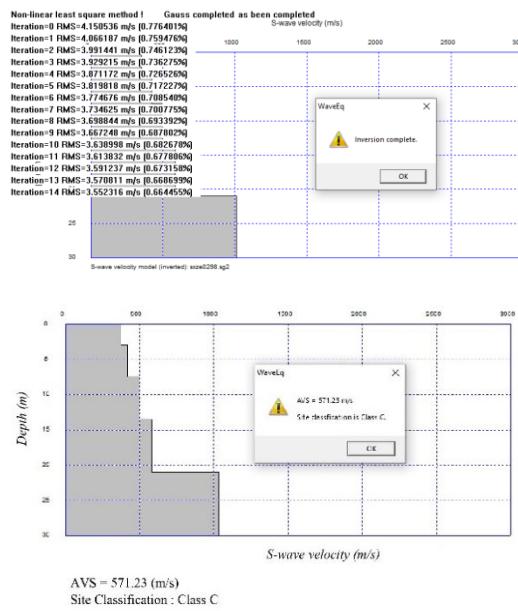
Gambar 5.
Peta Geologi Daerah Penelitian yang terletak di setiap sensor terpilih pada Jaringan akcelerometer BMKG Jawa Tengah.s

HASIL PENELITIAN

Tahapan selanjutnya

pada pengukuran MASW dilakukan pemodelan kurva profil kecepatan

gelombang geser dengan kedalaman seperti gambar berikut :



Gambar 6.
Kurva velocity kedalaman 30 meter (Vs30) dan RMS hasil inversi pada site SMRI (F-MIPA UNDIP, Semarang)

Gelombang dengan frekuensi yang rendah memiliki panjang gelombang yang panjang dengan kecepatan yang lebih tinggi sehingga kedalamannya lebih dalam. Sebaliknya, gelombang yang memiliki frekuensi yang tinggi memiliki panjang gelombang yang pendek dengan kecepatan yang rendah dan merambat dengan kedalaman yang dangkal.

Dari Gambar 6 dapat dijelaskan bahwa di lintasan ini menunjukkan adanya kedalaman 30 meter dan memiliki 6 lapisan dengan ketebalan yang berbeda-beda.

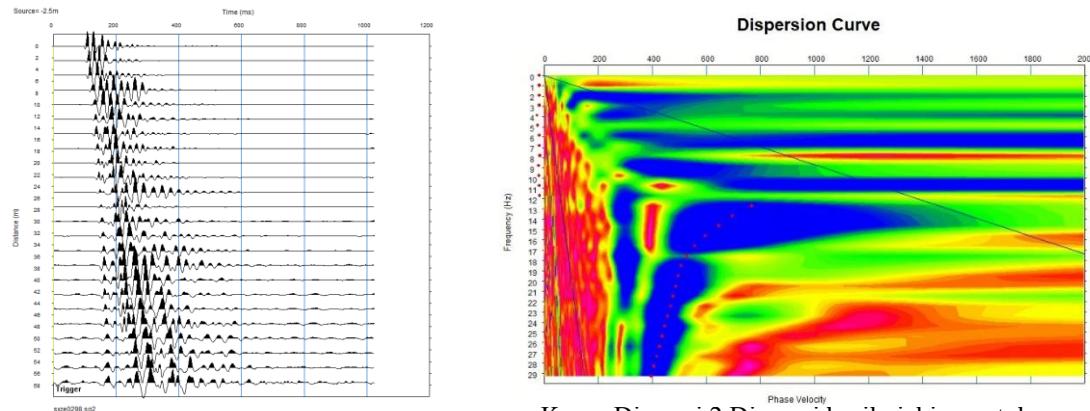
Dari setiap lintasan memiliki variasi nilai kecepatan Vs yang disebabkan oleh adanya karakteristik pada kecepatan rambat gelombang Vs yang bergantung pada material

penyusun di bawah permukaan bumi. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai kecepatan gelombang geser yang dihasilkan di bawah permukaan maka akan semakin sama jenis batuan penyusunnya.

Tabel 1.
Klasifikasi Tanah berdasarkan pada SNI 1726-2019

Klasifikasi Site	Vs (m/s)	\bar{N}	\bar{Su} (kPa)
A. Batuan Keras	$\bar{Vs} \geq 1500$	N/A	N/A
B. Batuan	750	N/A	N/A
C. Tanah keras, Sangat Padat dan Batuan lunak	$\frac{\bar{Vs}}{1500} < \bar{N} > 50$	$\bar{N} > 50$	$\bar{Su} \geq 100$
D. Tanah Sedang	350	15 < $\bar{N} \leq 50$	$50 < \bar{Su} \leq 100$
E. Tanah Lunak	$\frac{175}{350} < \bar{Vs} \leq 350$	$\bar{N} < 15$	$\bar{Su} < 0$
		$\bar{Vs} \leq 175$	

Sebagaimana ditunjukkan dalam Interpretasi klasifikasi tanah permukaan pada tabel klasifikasi pada SNI 1726-2019 mengenai Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung sesuai pada tabel 1. Pengukuran Vs30 untuk wilayah Jawa Tengah dilakukan dengan sample pengukuran di 9 titik pengukuran dalam satu dimensi (1D).



Gambar 7.
Data rekaman gelombang seismik site sensor SMRI menggunakan software SeisImager pickwin

Data sinyal di atas merupakan fungsi yang menggambarkan antara amplitudo getaran tanah terhadap waktu yang mana terdiri dari kumpulan beberapa gelombang harmonik yang mempunyai frekuensi, amplitudo dan fasa tertentu. Sinyal seismik tersebut dapat dimanfaatkan untuk distribusi frekuensi predominan pada setiap titik pengukuran.

Gambar 7 merupakan spektrum data pada saat sesudah dilakukan filtering menggunakan low pass filter serta initial mode untuk menyaring gelombang seismik dengan frekuensi rendah dan menampakkan frekuensi yang tinggi.

Filter tersebut sangatlah dibutuhkan untuk mendapatkan data gelombang permukaan yang mana karakteristik gelombang permukaan mempunyai frekuensi yang rendah dengan amplitudo yang besar karena dalam analisis MASW yang digunakan hanya data gelombang permukaan saja.

Dari gambar hasil low pass filter ini didapatkan data gelombang seismic yang hanya menyaring frekuensi dari 0-50 Hz.

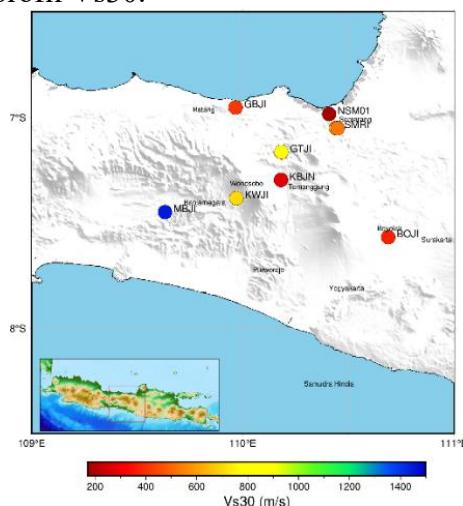
Kurva Dispersi 2 Dimensi hasil picking untuk site sensor SMRI (F-MIPA Undip, Semarang), sumbu X adalah phase velocity dan sumbu Y adalah frekuensi gelombang permukaan Rayleigh

Setelah dilakukan filtering maka akan dilakukan perhitungan pada gambar dispersi berupa picking spectrum kurva dispersi pada gambar dispersi. *Picking* ini dilakukan pada gambar disperse yang berwarna biru (titik-titik curv merah) karena mengindikasikan adanya nilai maksimum pada titik tersebut. Nilai maksimum ini biasanya berupa korelasi energi amplitudo yang tinggi, karena metode MASW memanfaatkan gelombang *Rayleigh* yang memiliki energy dengan amplitudo yang tinggi.

Perubahan warna menggambarkan variasi energy antar gelombang yang dihasilkan. Amplitudo yang tinggi merupakan suatu informasi variasi energy perlapisan dari perubahan elastisitas lapisan lunak atau keras dibawah permukaan, maka dari itu *picking* yang dilakukan hanya pada mode dasar dari gambar disperse saja yaitu pada gambar disperse yang memiliki frekuensi yang lebih kecil karena karakteristik dari gelombang permukaan yaitu memiliki amplitudo yang tinggi dan frekuensi yang rendah.

Hasil dari proses *picking* yang dilakukan berupa kurva disperse mode dasar yaitu kurva antara kecepatan gelombang *Rayleigh* dan panjang gelombang. Kurva disperse sendiri merupakan suatu kurva yang menggambarkan tentang perubahan antara kecepatan fase dengan frekuensi gelombang yang mana frekuensi akan berbanding terbalik dengan cepat rambat dan kedalaman target yang dicapai.

Keuntungan dari sifat dispersif ini adalah untuk mengidentifikasi ketebalan lapisan yang bersesuaian dengan kecepatan gelombang gesernya sehingga dapat diperoleh profil Vs30.

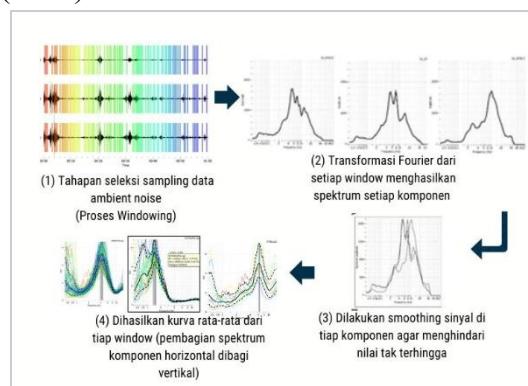


Gambar 9.
Hasil Pengukuran MASW Vs30 9 titik lokasi daerah penelitian. Gradasi warna menunjukkan perubahan nilai Vs30.

hingga 1868 m/s. Nilai terendah berada di site **NSM01** lokasinya di Pendrikan Kidul, Semarang Tengah tepatnya di Wisma Perdamaian Rumah Rakyat dan tertinggi berada di site **MBJI** tepatnya di lokasi Shelter Acelero Colocated Majalengka, Banjarnegara.

Data yang digunakan dalam metode HVSR menggunakan data

primer hasil pengukuran alat vibralog yang merupakan seismograph digital dengan display dan keypad serta dilengkapi SD memory. Selanjutnya data hasil pengukuran tersebut dianalisa menggunakan *software* Geopsy yang sudah umum digunakan dalam pengolahan data seismik terutama dalam menentukan spektrum HVSR. Secara garis besar tahapan analisa Geopsy dalam perhitungan HVSR yaitu diawali input data sinyal, *parameter setting*, *windowing*, *transformasi fourier*, *smoothing*, dan kurva h/v. Penentuan puncak kurva h/v disesuaikan dengan kriteria dari SESAME European Research Project (2004).



Gambar 10.
Langkah-langkah Pengolahan data dengan metode HVSR menggunakan software Geopsy.

Pada gambar di atas menjelaskan mengenai tahapan analisis HVSR menggunakan Geopsy. Proses *windowing* merupakan pemilihan jendela sinyal untuk memilih sinyal tremor dan meniadakan sinyal yang dianggap *transient* (sumber spesifik).

PEMBAHASAN

Windowing dapat dilakukan secara manual maupun *automatic*. Penentuan panjang *window* disesuaikan dengan target frekuensi

yang diinginkan. Sesuai rekomendasi dari SESAME *European Research Project* (2004) untuk penentuan panjang windows mengikuti kondisi $fo > 10 / lw$ ($fo = \text{frequensi of interes}$, $lw = \text{panjang windows}$). Jumlah windows minimal 10 dengan jumlah minimum signifikan cycles 200. Kemudian tiap window dilakukan *transformasi fourier* sehingga didapatkan spektrum fourier tiap komponen. *Transformasi fourier* merupakan teknik awal dalam setiap pengolahan data seismik. Hal ini dikarenakan sinyal seismik berupa sinyal dengan domain waktu. Untuk dapat dilakukan pemerosesan data maka perlu dikonversi kedalam domain frekuensi. Teknik yang paling umum ialah dengan *fast fourier transform* (FFT). Tiap spektrum dari komponen horizontal dan vertikal dilakukan *smoothing*, bertujuan agar puncak h/v tidak memperoleh harga tak terhingga (*infinity*).

Setiap komponen dilakukan *transformasi fourier* menghasilkan spektrum komponen horizontal *north-south* dan *east-west*, dan spektrum komponen vertikal. Spektrum komponen horizontal dirata-ratakan, kemudian dibagi dengan komponen vertikal sehingga memperoleh harga h/v pada frekuensi tertentu. Kurva h/v menunjukkan nilai frekuensi pada sumbu x dan faktor amplifikasi pada

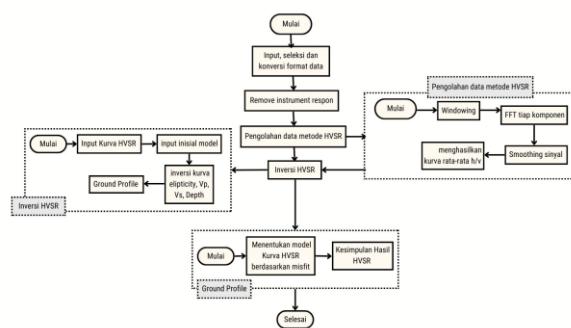
Diawali dengan tahapan input, seleksi dan konversi format data yang kemudian diteruskan proses pengolahan data dengan metode HVSR.

sumbu y. Pada Geopsy kurva h/v dikonversi dalam format hv (.hv) sebagai input *inversi* HVSR.

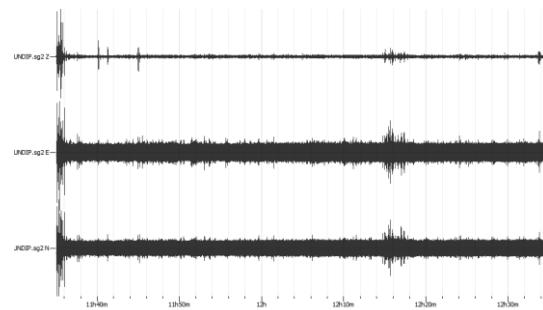
Pemrosesan *inversi* menggunakan tool dinver geopsy. Langkah awal dengan melakukan input data berupa kurva h/v hasil observasi. Kemudian input inisial parameter model seperti kecepatan gelombang P, kecepatan gelombang S, *poisson ratio*, dan *density*.

Proses iterasi dilakukan untuk mencari ruang model yang didasarkan prinsip pencarian Monte Carlo dengan meminimalkan fungsi ketidak cocokan (*misfit*).

Hasilnya berupa model kecapatan baru di tiap titik pengukuran. Proses ini dilakukan terhadap masing-masing titik pengukuran, sehingga menghasilkan *ground profile* sejumlah titik tersebut. (Farduwini, et al., 2024).



Gambar 11.
Diagram Alur Pengolahan Data HVSR

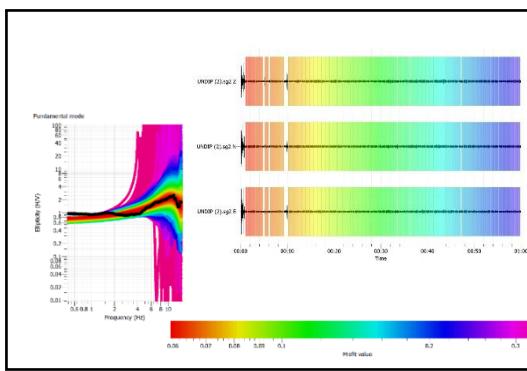


Gambar 12.
Data sinyal rekaman ambient noise di site sensor SMRI menggunakan software

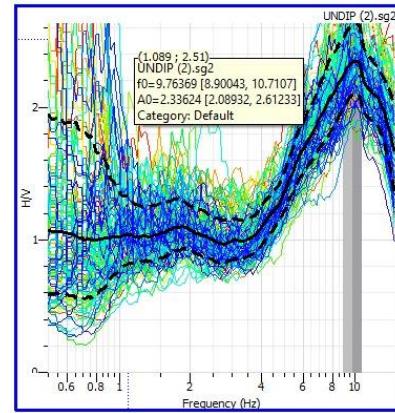
Geopsy

Data sinyal di atas merupakan sinyal rekaman ambient noise yang terekam oleh seismometer yang terdiri dari tiga komponen yaitu komponen vertikal (Z), komponen timur-barat (E-W), dan komponen horizontal utara-selatan (N-S). (Herak, M., 2008)

Contoh sinyal di atas merupakan pengambilan rekaman sinyal ambient noise di *site* sensor SMRI (Tembalong, Semarang). Pada proses pengolahan data metode HVSR melalui tahapan windowing, untuk pemrosesan HVSR perlu dilakukan konversi ke dalam domain frekuensi. Teknik yang paling umum adalah FFT (*Fast Fourier Transform*) tiap komponen. Tiap spektrum dari komponen horizontal dan vertikal perlu dilakukan proses *smoothing* sinyal yang bertujuan agar puncak h/v tidak memperoleh harga tak terhingga (*infinite*). Dalam hal ini proses *smoothing* menggunakan metode Konno dan Ohmachi pada *software Geopsy* hingga menghasilkan inversi kurva rata-rata h/v seperti gambar berikut :



Gambar 13.
Hasil proses windowing, smoothing hingga menghasilkan inversi kurva HVSR site sensor SMRI menggunakan software Geopsy

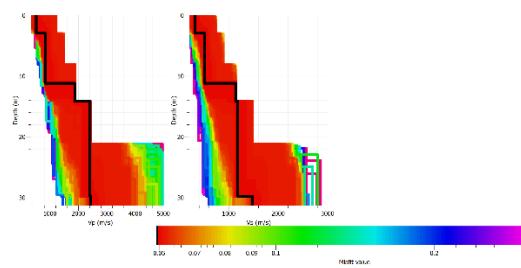


Gambar 14.
Penentuan f_0 dan A_0 pada kurva HVSR *site* sensor SMRI menggunakan software Geopsy

Pada *Software Geopsy* grafik kurva h/v terdiri dari kurva tiap *window* (kurva berwarna-warni), kurva rata-rata (kurva hitam tebal), kurva standar deviasi (kurva hitam putus-putus), dan rekomendasi puncak kurva (kotak hitam dan abu).

Penentuan nilai f_0 dan A_0 dapat mengikuti rekomendasi yang diberikan secara otomatis dari *Geopsy* atau sesuai interpretasi *user* berdasarkan data *input* pendukung seperti informasi geologi daerah pengukuran. (Fadhilah, et al., 2022)

Frekuensi natural (f_0) sesuai gambar di atas menunjukkan nilai sebesar 9,8 Hz dan puncak kurva (A_0) atau faktor Amplifikasi sebesar 2,3. Pada proses inversi HVSR dilakukan proses input insial model lalu menginversi kurva *ellipticity*, V_d , V_s , dan Depth hingga proses Ground Profile. Didalam proses *Ground Profile* dilakukan proses penentuan model kurva HVSR berdasarkan misfit.

**Gambar 15.**

Model 1D Kecepatan Gelombang Geser (Vs30) *site* sensor SMRI metode HVSR.

Hasil perhitungan rata-rata kurva h/v dalam penentukan hasil Vs30 dengan metode HVSR *site* sensor SMRI diperoleh nilai sebesar 631 m/s. Perbedaan variasi Vs30 mengikuti perbedaan litologi di setiap sensor seperti yang ditunjukkan gambar 5 Peta geologi daerah penelitian. Terdapat 6 litologi yang berbeda di masing-masing *site* sensor pada 2 metode tersebut di atas terdiri atas *site* MBJI (Majalengka, Banjarnegara) dengan nilai Vs30 metode MASW sebesar 1868 m/s memiliki geologi batuan formasi ligung dengan litologi Breksi gunung api (aglomerat), lava andesitik hornblenda dan tuf, membentuk sekuen atas Formasi Ligung. Pada *site* KWJI (Kertek, Wonosobo) metode MASW bernilai 699.3 m/s sedang metode HVSR sebesar 1228 m/s dan KBJN (Kandangan, Temanggung) dengan metode MASW bernilai 277.9 m/s sedang metode HVSR sebesar 340.9 m/s memiliki sifat litologi yang sama yaitu Lava

andesitik augit-hipersten dan basaltik augit-olivin, breksi aliran, breksi piroklastik dan lahar. Untuk *site* GTJI (Gemawang, Temanggung) metode MASW bernilai 807.6 m/s sedang metode HVSR sebesar 762.6 m/s tersusun dari Batupasir, tuf breksi, batulempung dan aliran lava. GBJI (Gringsing, Batang) bernilai 413.1 m/s menggunakan metode MASW memiliki kesamaan geologi batuan dengan *site* NSM01 (Pendrikan Kidul, Semarang Tengah) metode MASW bernilai 165.1 m/s sedang dengan metode HVSR sebesar 137.1 m/s yaitu Aluvium dengan struktur Kerakal, kerikil, pasir, lempung, lumpur, fragmen koral dan batuapung. *Site* SMRI bernilai 571.2 m/s dengan metode MASW sedang 631.1 m/s dengan metode HVSR dan SMRIB bernilai 526.4 m/s (Tembalang, Semarang) dengan metode MASW memiliki sifat batuan Formasi Kaligetas, dengan struktur geologi Breksi gunungapi, aliran lava, tuf, batupasir tufan dan batulempung. Serta *site* BOJI (Sawit, Boyolali) bernilai 373.4 m/s geologi batuannya berupa Endapan Gunungapi Muda G. Merapi/Batuhan Gunung api Merbabu dimana litologinya Tuf tak terpisahkan, abu, breksi, aglomerat dan aliran lava.

Dari kondisi geologi tersebut dapat mengakibatkan amplifikasi gelombang seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan batuan.

Tabel 2.

Tabel penelitian yang terletak di setiap sensor pada jaringan akcelerometer BMKG Jawa Tengah.

No	Site	Vs30 MASW	Vs30 HVSR	Class	Type
1	MBJI	1868	1581	A	Hard Rock (Batuan Keras)

2	KWJI	699,3	591	C	Hard Soil (Hard, very dense soil and soft rock) Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak
3	KBJN	277,9	340,9	D	Medium Soil (Tanah Sedang)
4	GTJI	807,6	762,6	B	Rock (Batuan)
5	GBJI	413,1	545,8	C	Hard Soil (Hard, very dense soil and soft rock) Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak
6	NSM01	165,1	137,7	E	Soft Soil (Tanah Lunak)
7	SMRI	571,2	631,1	C	Hard Soil (Hard, very dense soil and soft rock) Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak
8	SMRIB	526,4	636,4	C	Hard Soil (Hard, very dense soil and soft rock) Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak
9	BOJI	373,4	426,1	C	Hard Soil (Hard, very dense soil and soft rock) Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan terkait masalah yang dikemukakan adalah sebagai berikut; 1) Parameter yang dipakai pada metode ini adalah Vs30 (rata-rata kecepatan gelombang geser teratas sampai 30 m) merupakan standar internasional/ nasional untuk mengklasifikasikan kondisi situs dan digunakan SNI 1726:2019. Dari hasil pengukuran kecepatan gelombang geser (Vs) di setiap lokasi sensor, kita bisa mengetahui apakah tanahnya termasuk tanah keras, sedang, atau lunak sesuai standar SNI 1726:2019; 2) Umumnya, tanah keras punya Vs tinggi (lebih dari 360 m/s), tanah sedang punya Vs sedang, dan tanah lunak punya Vs rendah (kurang dari 180 m/s). Karakter ini penting karena tanah lunak cenderung memperkuat guncangan gempa, sedangkan tanah keras lebih meredamnya. Site MBJI (Banjarnegara) dikategorikan sebagai Tipe A (batuan keras) dengan formasi geologi berupa

batuan Formasi Ligung. Sementara itu, KWJI (Kertek, Wonosobo) diklasifikasikan sebagai Tipe C (tanah sangat padat dan batuan lunak), dan KBJN (Kandangan, Temanggung) sebagai Tipe D (tanah sedang) dengan formasi geologi Gunungapi Sindoro. Lokasi GTJI (Gemawang, Temanggung) dikategorikan sebagai Tipe B (batuan), dengan batuan Formasi Penyatan.

Perbandingan hasil pengukuran Vs30 antara metode MASW dan HVSR menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan pada beberapa lokasi, terutama pada wilayah dengan endapan aluvial. Site GBJI (Gringsing, Batang) diklasifikasikan sebagai Tipe C (tanah keras), sementara NSM01 (Semarang Tengah) dikategorikan sebagai tanah lunak (Tipe E). Site SMRI dan SMRIB (Tembalang, Semarang) serta BOJI (Sawit, Boyolali) memiliki klasifikasi Tipe C, dengan kesamaan geologi berupa Formasi Kaligetas dan Endapan Gunungapi Muda. Variasi ini menunjukkan bahwa terdapat lokasi

sensor yang berpotensi mengalami amplifikasi akibat kondisi tanah lunak, serta lokasi lain yang berpotensi meredam getaran karena berada pada tanah keras atau batuan. Di site NSM01, hasil HVSR menunjukkan nilai Vs30 yang lebih rendah dibandingkan MASW karena adanya lapisan sedimen alluvium tebal yang sangat lunak, yang memberikan efek resonansi dominan pada frekuensi rendah. Sebaliknya, di site GTJI, hasil Vs30 dari MASW lebih tinggi karena mendeteksi lapisan batuan keras dekat permukaan, sementara HVSR mungkin hanya mendeteksi lapisan tipis lunak di atasnya. Perbedaan ini memiliki konsekuensi penting; 1) Dalam mikrozonasi, hasil *joint analysis* (kombinasi) dari MASW dan HVSR lebih diandalkan karena masing-masing metode saling melengkapi; 2) Untuk keperluan klasifikasi tanah dan perencanaan bangunan tahan gempa (SNI 1726:2019), nilai Vs30 hasil MASW sering dijadikan rujukan utama, sementara HVSR digunakan untuk validasi site effect dan resonansi lokal; 3) Nilai frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi lokal (A_0) berdasarkan HVSR; 4) Kontribusi variasi Vs, f_0 , dan A_0 terhadap kerentanan seismik & risiko amplifikasi; 5) Integrasi antara metode MASW dan HVSR dapat digunakan untuk menghasilkan peta mikrozonasi seismik yang representatif serta mendukung perencanaan mitigasi risiko gempa bumi di Provinsi Jawa Tengah.

DAFTAR PUSTAKA

- Aminah, R., Sungkono, & Santosa, B. J. (2015). Pengembangan Inversi Gelombang Rayleigh pada Gibson Half-Space Berbasis Levenberg-Marquardt (L-M) Dan Singular Value Decomposition (SVD). *Jurnal Sains dan Seni Pomits*, 1, 1–10. <https://repository.its.ac.id/cgi/users/login>
- Amirudin, I. M., Madrinovella, I., & Palu, S. (2023). Seismic Vulnerability Analysis Using HVSR on The West Palu Bay Coastline. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment and Technology*, 8(2). <https://doi.org/10.25299/jgeet.2023.8.02.2.13879>
- Anggraeni, E. F., Supriyatna, M., Mahesa, M. P., Soni, U., & Nasruloh, R. (2025). Evaluasi Indeks Kerentanan Seismik dengan Metode HVSR. *Strength: Jurnal Penelitian Teknik Mesin*, 2(1), 33–41.
- Arai, H., & Tokimatsu, K. (2005). S-Wave Velocity Profiling By Joint Inversion of Microtremor Dispersion Curve and H/V Spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(5), 1766–1778. <https://doi.org/10.1785/0120040243>
- Ardiansyah, A., Adhi, M. A., Wibowo, N. B., Sarwi, S., Astuti, B., & Cindiwati, C. (2024). Seismic Vulnerability Microzonation Menggunakan HVSR di Wonosobo. *Jurnal Fisika UNNES*, 14(2). <https://journal.unnes.ac.id/journals/jf/article/view/10851>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung* (SNI 1726:2019). BSN.
- Bard, P., Duval, A., Koehler, A., & Rao, S. (2004). SESAME

- European Research Project, SESAME: Site Effects Assessment Using Ambient Excitations (Vol. D23.12, December, pp. 62). <https://sesame.geopsy.org/Deliverables/Del-D24-Wp13.pdf>
- Budi, R., Santoso, I., & Prasetya, A. (2021). Combination of Passive Seismic (HVSR) and Active Seismic (MASW) Methods To Obtain Shear Wave Velocity Model of Subsurface in Majalengka, Indonesia. *Journal of Applied Geophysics*. <https://www.doi.org/10.1088/1742-6596/1805/1/012002>
- C. B. Park, R. D. Miller, & Xia, J. (2001). Multichannel Analysis of Surface Waves. *Geophysics*, 64(3), 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Desmonda, N., Desmonda, N. I., & Pamungkas, A. (2014). Penentuan Zona Kerentanan Bencana Gempa Bumi Tektonik di Kabupaten Malang Wilayah Selatan. *Jurnal Teknik ITS*, 3(2), C107–C112. <http://ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/7232>
- Di Giacomo, D., Pierdominici, S., Stecchi, F., & Giocoli, A. (2020). Combined Use of Refraction Seismic, MASW, and Ambient Noise Array Measurements to Determine The Near-Surface Velocity Structure in the Selinunte Archaeological Park, SW Sicily. *Journal of Seismology*. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09909-4>
- Endekan, R. A., Tamuntuan, G. H., Tongkukut, S. H. J., & As'ari. (2023). Pemetaan Bawah Permukaan Melalui Pemodelan 3D Data Geolistrik Resistivitas Daerah Pra TPA Ilo-Ilo. In *Jurnal Lppm Bidang Sains Dan Teknologi* (Vol. 8, Issue 2, pp. 78–84). <https://doi.org/10.35801/jlppmsains.8.2.2023.48972>
- Fabozzi, S., Catalano, S., Falcone, G., Naso, G., Pagliaroli, A., Peronace, E., Porchia, A., Romagnoli, G., & Moscatelli, M. (2021). Stochastic Approach to Study The Site Response In Presence of Shear Wave Velocity Inversion: Application to Seismic Microzonation Studies in Italy. *Engineering Geology*, 280, 105914. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105914>
- Fadhilah, F. H., Yudistira, T., & Sopyan, Y. (2022). Pemetaan Respons Dinamik Tanah dan Pemodelan Struktur Bawah Permukaan di Kertajati Menggunakan Metode HVSR. *Jurnal Geofisika*, 20(2), 52–56. <https://doi.org/10.36435/jgf.v20i2.545>
- Farduwini, A., Dewi Pinem, J. C., & Styawan, Y. (2024). Pemanfaatan Metode HVSR untuk Studi Karakteristik Tanah di Tanjung Kemala, Kabupaten Tanggamus. *Jurnal Geosaintek*, 10(2), 106–122. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v10i2.1619>
- Gorstein, S., & Ezersky, M. (2015). Combination of HVSR and MASW Methods to Obtain Shear Wave Velocity Model of

- Subsurface in Israel.
International Journal of Geophysics.
<https://doi.org/10.15273/ijge.2015.01.004>
- Gutenberg, B. (1958). Caustics Produced By Waves Through The Earth's Core. *Geophysical Journal International*, 1(3), 238–248.
<https://academic.oup.com/gji/article-abstract/1/3/238/606145>
- Herak, M. (2008). Model HVSR – A Matlab Tool to model HVSR of Ambient Noise. *Computers & Geosciences*, 34, 1514–1526.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.009>