

Pengaruh Kedalaman dan Kecepatan Gelombang Geser Batuan Dasar terhadap Respons Tanah Menggunakan Mikrotremor di ITS Surabaya

Muhammad Alif Fahrizi dan Saifuddin

Departemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: saifuddin@its.ac.id

Abstrak—Penelitian ini membahas tentang pengaruh kedalaman batuan dasar terhadap karakteristik amplifikasi tanah dengan pendekatan linear dan *equivalent-linear* di ITS Surabaya, menggunakan data mikrotremor. Profil kecepatan geser (V_S) tanah di lokasi penelitian diperoleh menggunakan pemodelan inversi *horizontal to vertical spectral ratio* dari mikrotremor dengan asumsi enam lapisan. Berdasarkan SNI-1726-2019, suatu lapisan tanah dikategorikan sebagai batuan dasar jika V_S lapisan tersebut melebihi 760 m/s. Dari hasil inversi diperoleh, V_S lebih besar dari 760 m/s setelah lapisan kedua. Sehingga, gelombang sintetik (*input motion*) diletakkan pada *bedrock* dengan kedalaman yang berbeda-beda untuk menentukan amplifikasi tanah. Parameter-parameter yang digunakan berupa *Fourier amplitude ratio* (FAR), *psuedo spectral acceleration* (PSA), dan *ground motion proxy*. Hasil akhir dari penelitian berupa pengaruh kedalaman *bedrock* terhadap terhadap respons tanah. Didapatkan bahwa pada pendekatan linear maupun *equivalent-linear*, semakin dalam batuan dasar, semakin tinggi puncak dari *Fourier amplitude ratio* (FAR), dan *psuedo spectral acceleration* (PSA). Pendekatan linear menghasilkan FAR dengan 4 puncak, dengan 3 puncak berada pada periode <0,5 s dan puncak terakhir berada di periode 0,75-1,25 s. Pendekatan *equivalent-linear* mendapatkan FAR dengan 1 puncak yang berada di periode 0,85-1,29 s. Hal ini disebabkan adanya energi hilang akibat *damping* pada periode rendah. Pada analisis *ground motion proxy*, didapatkan nilai *peak ground acceleration* (PGA), *peak ground velocity* (PGV), dan *peak ground displacement* (PGD) pada pendekatan linear terus meningkat seiring naik ke permukaan dari batuan dasar, namun pada pendekatan *equivalent-linear*, *ground motion proxy* mengalami penurunan dan kenaikan yang bervariasi pada kedalaman 40 meter. Hal ini disebabkan oleh nonlineartitas tanah berada di kedalaman hingga 40 meter.

Kata Kunci—Fourier Amplitude Ratio, Ground Response Analysis, Ground Motion Proxy, HVSR, Pseudo Spectral Acceleration.

I. PENDAHULUAN

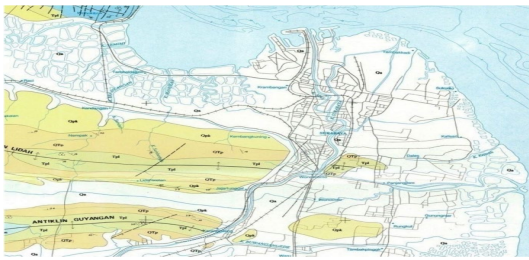
EFEK situs lokal perlu diperhitungkan ketika memberikan penilaian risiko bencana seismik [1]. Getaran akibat gempa dapat diamplifikasi oleh tanah lunak pada situs, seperti yang terjadi pada gempa di Mexico tahun 1985, Armenian tahun 1988, Loma Prieta tahun 1989, Newcastle tahun 1989, dan Kobe 1995. Profil batuan dasar (*bedrock*) dan sedimen di atasnya memberikan kontribusi kepada efek amplifikasi tanah [2-4]. Lapisan sedimen dibawah permukaan umumnya memiliki struktur yang lebih lunak dibandingkan batuan dasar sehingga deposit yang dihasilkan berupa amplifikasi gelombang seismik. Efek dari kedalaman *bedrock* ditunjukkan dengan pola kerusakan dari gempa di Northridge, Sherman Oaks, dan Santa Monica, California [2]. Dari hal yang telah disebutkan, dilakukanlah penelitian ini yang ditujukan untuk mengetahui respons tanah terhadap

kedalaman *bedrock* di ITS Surabaya.

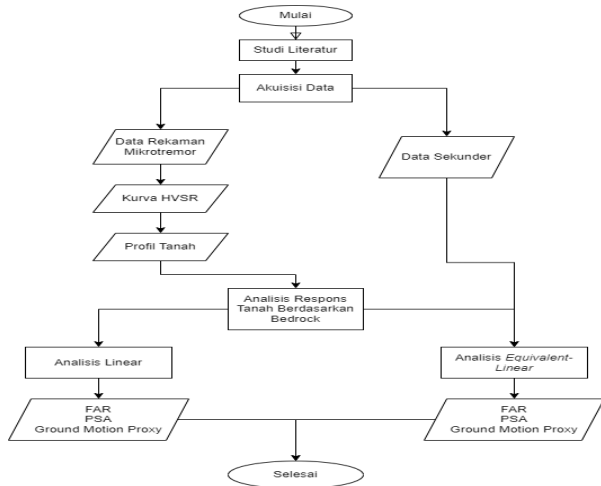
Surabaya memiliki lapisan litosfer berupa cekungan endapan aluvial dan batu pasir dengan sedimen berupa batu gamping dan lempung [5]. Menurut Pusat Studi Gempa Nasional, Surabaya diprediksi berkemungkinan mengalami gempa dengan magnitudo sebesar 6,5 karena sesar Kendeng [6]. Hal ini dikarenakan suatu wilayah dengan kondisi geologi berupa endapan aluvial, tuff dan batu pasir mempunyai potensi bahaya lebih besar terhadap efek intensitas getaran tanah akibat amplifikasi dan interaksi getaran tanah terhadap bangunan karena gempa bumi [7]. Lebih lanjut, lokasi ITS berdasarkan peta referensi yang ditunjukkan oleh Gambar 1 berada di daerah alluvial [5]. Dari hal tersebut, terdapat kemungkinan adanya amplifikasi gelombang seismik yang berbahaya di ITS. Selain itu, kedalaman *bedrock* juga mempengaruhi amplifikasi dengan alasan panjangnya amplifikasi yang terjadi di tanah di atas *bedrock* [8]. Untuk itu, *profiling* tanah dan estimasi kedalaman *bedrock* diperlukan untuk pencegahan juga terjadi bencana seismik di ITS.

Ketika terjadi gempa, terdapat dua jenis gelombang yang dihasilkan: gelombang badan dan gelombang permukaan. Secara singkat, gelombang badan menjalar di interior bumi dan gelombang permukaan menjalar di permukaan bumi. Gelombang badan menjalar di interior bumi memiliki dua tipe: gelombang-P dan gelombang-S. Gelombang-P biasa dikenal dengan gelombang primer yang mana cara rambat dari gelombang-P adalah gelombang longitudinal. Dikarenakan material geologis lebih kaku terhadap kompresi, gelombang-P menjalar lebih cepat dibandingkan gelombang seismik yang lain, yang mana menghasilkan gelombang-P datang mendahului gelombang seismik lain di permukaan. Kecepatan gelombang-P didefinisikan sebagai V_P [9]. Gelombang-S biasa disebut gelombang *shear* (geser) dengan cara rambat dari gelombang transversal. Hal ini mengakibatkan gelombang-S dapat dibagi menjadi dua: gelombang SH (pergerakan horizontal) dan gelombang SV (pergerakan vertikal). Gelombang-S dapat menyebabkan deformasi pada material yang dilewatinya. Gelombang-S tidak dapat merambat melalui fluida dikarenakan tidak adanya *shearing stiffness*. Kecepatan gelombang-S didefinisikan sebagai V_S .

Gelombang permukaan adalah hasil dari interaksi dari gelombang badan dengan permukaan dan lapisan-lapisan permukaan. Untuk kebutuhan keteknikan, terdapat dua jenis gelombang permukaan yang paling penting: gelombang Rayleigh dan gelombang Love. Gelombang Rayleigh merupakan gabungan gelombang-P dan gelombang SV di permukaan dengan melibatkan gerakan partikel secara



Gambar 1. Peta Geologi Surabaya.



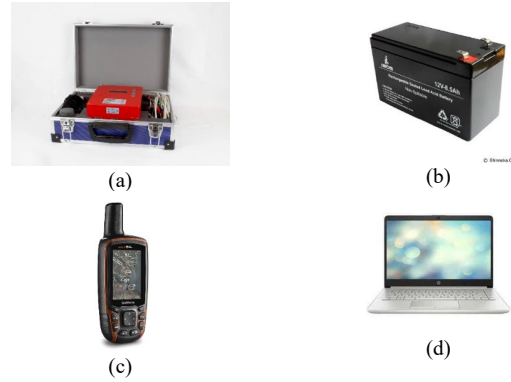
Gambar 2. Flowchart Penelitian.

horizontal dan vertikal. Gelombang Love merupakan interaksi gelombang SH dengan permukaan dengan hanya melibatkan gerakan partikel secara horizontal [9].

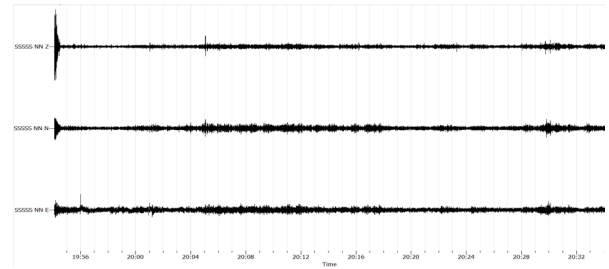
Batuan dasar (*bedrock*) adalah lapisan batuan di bawah muka tanah yang memiliki kecepatan rambat gelombang geser vs yang mencapai 750 m/detik dan tidak ada lapisan batuan lain di bawahnya yang memiliki nilai kecepatan rambat gelombang geser yang kurang dari itu.

Mikrotremor merupakan salah satu fenomena alam yang digunakan dalam bidang geofisika. Mikrotremor (*ambient noise*) merupakan getaran tanah yang terjebak di lapisan sedimen permukaan. Getaran ini berasal dari fenomena alam seperti angin, gelombang laut, dan dapat pula disebabkan oleh aktivitas manusia. Prinsip pengukuran mikrotremor adalah perekaman getaran tanah dalam waktu tertentu untuk mendapatkan nilai dari parameter yang berhubungan dengan getaran tanah, seperti frekuensi natural, estimasi amplifikasi, karakteristik getaran, dan titik lemah dari setiap jenis tanah dan struktur. Salah satu metode yang memanfaatkan mikrotremor adalah HVSR (*horizontal to vertical spectral ratio*) [10]. HVSR pertama kali diperkenalkan oleh Nogoshi dan Igarashi pada penelitiannya pada tahun 1970 [11], yang selanjutnya dikembangkan oleh Nakamura pada tahun 1989 [10]. Metode ini digunakan untuk mendapatkan estimasi amplifikasi dan frekuensi natural dari lokasi pengukuran. Untuk menggunakan metode ini, diperlukan alat yang dapat merekam mikrotremor secara horizontal dan vertikal. Oleh karena itu, dibutuhkan 3 komponen dari alat pengukur getaran yakni *north-south*, *east-west*, dan *up-down*. Hasil akhir dari metode HVSR berupa kurva yang dapat merepresentasikan estimasi amplifikasi tanah dan frekuensi natural dari lokasi pengukuran mikrotremor.

Untuk mendapatkan profil tanah dari kurva HVSR, dibutuhkan langkah inversi. Pada penelitian ini digunakan inversi yang menganggap HVSR merupakan hasil dari



Gambar 3. (a) Satu set microtremor portable tipe SARA SL06, (b) Aki kering 12V, (c)GPS, (d) Laptop.



Gambar 4. Data mikrotremor dengan arah (Z) *up-down*, (N) *north-south*, dan (E) *east-west*.

gelombang permukaan dan badan yang dipelopor oleh Garcia-Jerez, et.al (2016) yang tertera pada persamaan (1) [12].

$$\left[\frac{H}{V} \right] (x; \omega) \equiv \sqrt{\frac{2P_1(x; \omega)}{P_3(x; \omega)}} = \sqrt{\frac{2Im[G_{11}(x; x; \omega)]}{Im[G_{33}(x; x; \omega)]}} \quad (1)$$

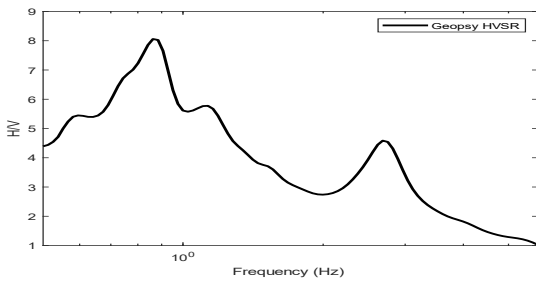
dengan $P_1(x; \omega)$ dan $P_3(x; \omega)$ merupakan PSD (*power spectral densities*) ke arah mendatar dan vertikal di titik x pada sumbu kartesian. Didapatkan nilai PSD bernilai proporsional dengan bagian imajiner dari komponen diagonal dari tensor Green di x ketika kedua sumber dan penerima berpapasan, $Im[G_{mm}(x; x; \omega)]$ [12-13].

Digunakan anggapan bahwa semua lapisan di atas *bedrock* homogeneous, elastis, dan isotropik. Masing-masing lapisan memiliki nilai V_S , V_P , ρ , dan h . Nilai-nilai inilah yang akan didapatkan setelah melakukan inversi HVSR. Nilai ini didapatkan dari perhitungan $Im[G_{11}(x; x; \omega)]$ dan $Im[G_{33}(x; x; \omega)]$ yang tertera pada persamaan (2) dan (3).

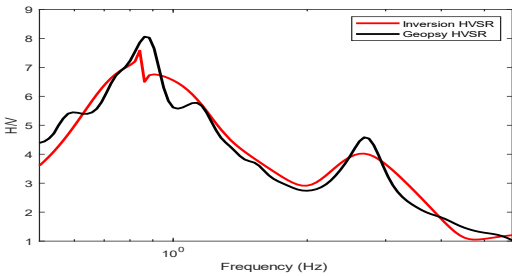
$$Im[G_{11}(x; x; \omega)] = Im[G_{22}(x; x; \omega)] \\ = -\frac{1}{4} \left(\underbrace{\sum_m \chi_m^2 A_{Rm}}_{\text{Rayleigh}} + \underbrace{\sum_m A_{Lm}}_{\text{Love}} \right) \\ + \underbrace{\frac{1}{4\pi} \int_0^{\omega/\beta_N} Re[f_{PSV}^H(k) + f_{SH}(k)]_{4th} dk}_{\text{body waves}} \quad (2)$$

$$Im[G_{33}(x; x; \omega)] = -\frac{1}{2} \left(\underbrace{\sum_m A_{Rm}}_{\text{Rayleigh}} \right) \\ + \underbrace{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega/\beta_N} Re[f_{PSV}^V(k)]_{4th} dk}_{\text{body waves}} \quad (3)$$

dengan χ_m merupakan elipsitas gelombang rayleigh, A_{Rm} merupakan mode gelombang rayleigh, A_{Lm} adalah mode gelombang love, f_{PSV}^H merupakan mode gelombang badan P dan SV yang mengarah ke bidang horizontal, f_{SH} adalah



Gambar 5. HVSR.



Gambar 6. Perbandingan HVSR hasil inversi dengan HVSR.

mode gelombang badan SH, dan f_{PSV}^V ialah mode gelombang badan P dan SV yang mengarah ke bidang vertikal. Informasi dari nilai V_S , V_P , ρ , dan h di tiap lapisan terkandung pada nilai A_{Rm} , A_{Lm} , f_{PSV}^H , f_{PSV}^V , f_{SH} [13].

Setelah didapatkan profil tanah, analisis respons tanah dilakukan pada profil tersebut. Terdapat dua pendekatan analisa respons tanah, yakni pendekatan linear dan non-linear. Pendekatan linear adalah pendekatan paling sederhana untuk mendapatkan *transfer function*. Pada pendekatan linear, dianggap properti dinamik pada tanah (*damping* dan *shear modulus*) tidak berubah terhadap perubahan *shear strain* tanah. Properti dinamik dari tanah akan berubah seiring dengan *strain*. Namun, pendekatan linear sering digunakan mendapatkan *transfer function*.

Karena pendekatan linear kurang tepat untuk digunakan di banyak kasus, dilakukan pendekatan tambahan pada pendekatan linear. Untuk memperhitungkan perubahan properti dinamik tanah, pada *equivalent* linear menggunakan satu nilai *shear modulus* dan *damping* yang merepresentasikan nilai rata-rata *shear response* pada gempa. Untuk mendapatkan *shear modulus* (G) dan *damping* (ξ), diperlukan perhitungan yang merepresentasikan *shear strain* dari tanah menggunakan gelombang yang dapat diproduksi secara matematis yang biasa disebut *effective shear strain*. Karena adanya perbedaan gelombang yang dihasilkan oleh alam dan matematis, didapatkan estimasi yang menunjukkan energi dari kedua gelombang pada persamaan (4).

$$\gamma_{eff} = R_y(\gamma_{max}) \tag{4}$$

dengan perhitungan R_y pada persamaan (5)

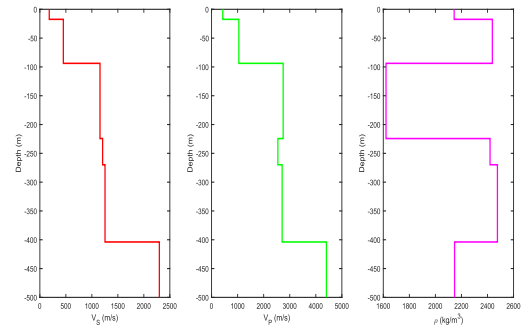
$$R_y = \frac{Magnitudo - 1}{10} \tag{5}$$

dengan γ_{eff} merupakan *shear strain* efektif, γ_{max} merupakan *shear strain* maksimal, dan R_y merupakan rasio dari γ_{eff} dan γ_{max} .

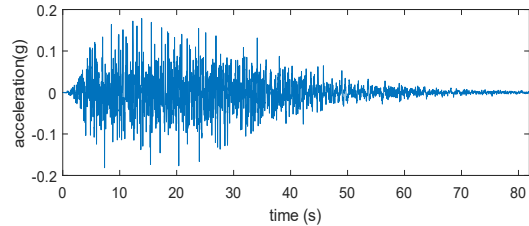
II. METODOLOGI

A. Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini ditujukan



Gambar 7. Model inversi HVSR.



Gambar 8. Input motion sintetik.

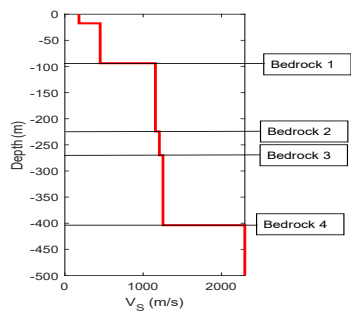
untuk akuisisi data mikrotremor. Alat-alat yang digunakan terdapat pada Gambar 3. Peralatan yang digunakan antara lain: satu set *microtremor portable* tipe SARA SL06 sebagai alat yang merekam mikrotremor dengan 3 komponen (utara-selatan, timur-barat, atas-bawah), aki kering 12V sebagai sumber daya *microtremor portable*, GPS (*global positioning system*) sebagai penentuan titik koordinat dan arah mata angin, dan laptop sebagai alat untuk melihat data rekaman secara langsung pada saat pengukuran berlangsung.

B. Langkah Kerja

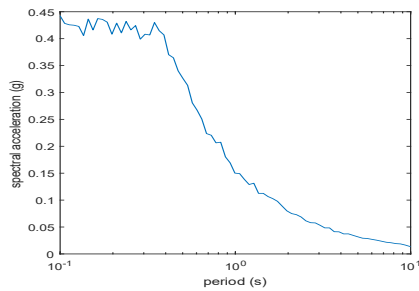
Penelitian ini menggunakan dua data, yakni data primer dan data sekunder. Data primer berupa rekaman mikrotremor dan data sekunder berupa data jenis tanah yang didapatkan dari Laboratorium Mekanika Tanah, Teknik Sipil ITS. Akuisisi data pada penelitian ini berupa pengambilan data rekaman mikrotremor. Pengukuran dilakukan di ITS, Keputih, Kecamatan Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur. Akuisisi data mikrotremor dilakukan dengan cara meletakkan alat mikrotremor di permukaan tanah dengan syarat alat harus mendarat. Pengukuran berlangsung 40 menit dan dilaksanakan pada dini hari untuk menghindari noise yang ditimbulkan oleh kegiatan manusia. Hasil pengukuran berupa rekaman mikrotremor ke arah horizontal (utara-selatan dan timur-barat) dan arah vertikal (atas-bawah). Setelah data diperoleh, data mikrotremor akan melalui beberapa proses untuk menjawab dari tujuan penelitian ini. Proses-proses tersebut adalah HVSR, inversi HVSR, dan analisis respons tanah terhadap *bedrock*.

1) HVSR

HVSR merupakan singkatan dari horizontal to vertical spectral ratio. Data rekaman mikrotremor difilter untuk mendapatkan data mikrotremor yang memiliki noise kecil. Data mikrotremor dengan noise kecil ini akan melewati proses FFT (*fast fourier transform*) untuk mengubah domain waktu pada data menjadi frekuensi. Setelah itu, bagian horizontal digabungkan menggunakan pythagoras, kemudian bagian horizontal dibandingkan dengan bagian vertikal dan didapatkan kurva HVSR.



Gambar 9. Kedalaman *bedrock*.



Gambar 10. *Spectral acceleration* dari input motion sintetik.

2) *Inversi HVSR*

Setelah didapatkan kurva HVSR, proses inversi HVSR dilaksanakan. Tujuan dari inversi HVSR adalah untuk mendapatkan model profile tanah yang memungkinkan menghasilkan HVSR sesuai dengan kurva HVSR yang telah didapatkan. Inversi HVSR dilaksanakan dengan menggunakan algoritma Simulated annealing dengan *forward calculation* [12].

3) *Analisis respons tanah terhadap bedrock*

Setelah didapatkan profil tanah dari tahapan inversi HVSR, dapat ditentukan daerah *bedrock* sesuai dengan SNI-1726-2019. Lalu dari masing masing *bedrock* dianalisis respons tanahnya. Terdapat dua pendekatan yang digunakan pada penelitian ini, yakni pendekatan linear dan pendekatan *equivalent-linear*. Masing-masing pendekatan dianalisis bagaimana reaksi perbedaan kedalaman bedrock memengaruhi permukaan tanah. Analisis yang digunakan berupa *Fourier amplitude ratio*, *psuedo spectral acceleration*, dan *ground motion proxy* (PGA, PGV, dan PGD) dan didapatkan perbandingan dari efek kedalaman *bedrock*.

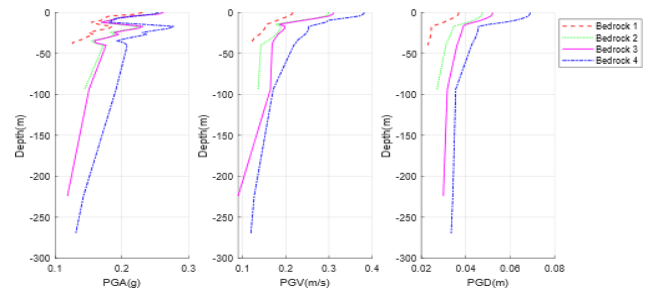
C. *Flowchart*

Flowchart terdapat pada Gambar 2.

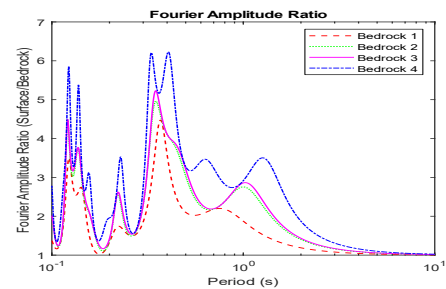
III. HASIL DAN DISKUSI

A. *Hasil Penelitian*

Penelitian ini menggunakan dua jenis data, yakni data primer dan data sekunder. Data primer berupa rekaman mikrotremor yang dilakukan pada daerah parkir stadion bola ITS dan data sekunder berupa data jenis tanah yang didapatkan dari laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil ITS. Data primer ditunjukkan pada Gambar 4 dan data sekunder ditunjukkan pada Tabel 1. Data primer digunakan untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser (V_s), densitas (ρ), beserta kedalaman lapisan dan data sekunder digunakan untuk mendapatkan jenis lapisan (contoh: pasir, lempung, dll). Data mikrotremor diolah menggunakan



Gambar 11. PGA, PGV, dan PGD Equivalent Linear.



Gambar 12. *Fourier amplitude ratio Linear*.

metode HVSR melalui software Geopsy dan didapatkan kurva HVSR yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Kurva HVSR memiliki frekuensi fundamental di 0,89 Hz dengan nilai H/V 8,06 dan di frekuensi tinggi terdapat peak di frekuensi 2,68 Hz dengan nilai H/V 4,58. Lalu, kurva HVSR di inversi untuk mendapatkan profil tanah di lokasi penelitian. Kurva HVSR hasil inversi dibandingkan dengan kurva HVSR ditunjukkan pada Gambar 6 dan didapatkan nilai misfit sebesar 18,9. Model yang didapatkan dari inversi HVSR ditunjukkan pada Gambar 7.

Merujuk ke pengertian *bedrock* yang ditetapkan oleh referensi SNI-1726-2019, *bedrock* merupakan lapisan yang memiliki V_s lebih dari 760 m/s. Maka dari hasil inversi yang memenuhi kriteria *bedrock* adalah lapisan ke-3 hingga lapisan *bedrock* sesuai model inversi. Pada penelitian ini terdapat 4 *bedrock*, yakni lapisan ke-3 sebagai *bedrock* 1, lapisan ke-4 sebagai *bedrock* 2, lapisan ke-5 sebagai *bedrock* 3, dan lapisan *bedrock* sebagai *bedrock* 4. Penjelasan secara visual dapat dilihat pada Gambar 9. Setelah didapatkan berbagai *bedrock*, dianalisis soil response dari ke-empat *bedrock* untuk mendapatkan informasi pengaruh kedalaman *bedrock* terhadap *soil response*. Jenis analisis yang digunakan ialah analisis linear dan *equivalent linear*. Dari masing-masing analisis, didapatkan *Fourier amplitude ratio*, *psuedo spectral acceleration*, dan *ground proxy motion* di tiap *bedrock* untuk mengetahui bagaimana soil response di tiap *bedrock*.

B. *Pembahasan*

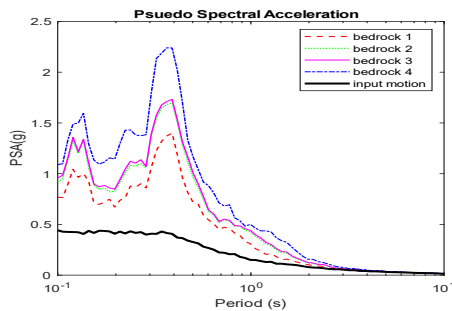
Pada penelitian ini, digunakan *input motion* sintetik untuk mendapatkan respons tanah. *Input motion* sintetik yang digunakan berasal dari batas aman *spectral acceleration* untuk bangunan di surabaya yang didapatkan dari Direktorat Bina Teknik Pemukiman dan Perumahan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Nilai *spectral acceleration* dan *input motion* ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 10.

Pada analisis linear, dianggap tanah memiliki nilai *shear modulus* dan *damping* yang tetap seiring bertambahnya *shear strain*. Profil tanah yang digunakan pada analisis linear

Tabel 1.

Data sekunder jenis lapisan tanah

Kedalaman (m)	Jenis Lapisan
2	Pasir
4.5	Lempung
7	Pasir
9.5	Pasir
12	Pasir
14.5	Pasir
17	Pasir
19.5	Pasir
22	Lempung
24.5	Lempung
27	Lempung
29.5	Pasir
32	Lempung
34.5	Lempung
37	Lempung
40	Pasir



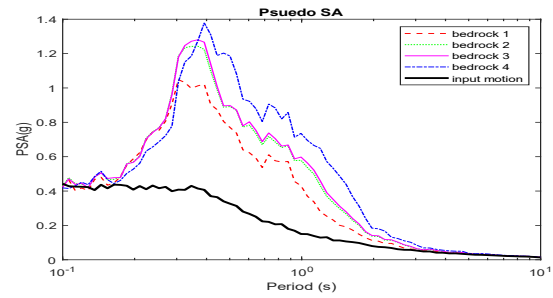
Gambar 13. PSA Linear.

didapatkan dari hasil inversi HVSr. Dari profil ini, dianalisis soil response dan didapatkan amplifikasi tanah/*Fourier amplitude ratio* pada Gambar 12. Terlihat *Fourier amplitude ratio* pada masing-masing *bedrock* memiliki puncak pada periode sekitar 0,26 s hingga 0,54 s. *Bedrock* 1, 2, 3, dan 4 memiliki nilai amplifikasi masing-masing sebesar 4,47, 4,96, 5,22, dan 6,23. Terlihat bahwa semakin dalam *bedrock*, semakin besar juga nilai amplifikasinya. Hal ini didasari dengan adanya perbedaan peletakan kedalaman input motion. Pada kasus *bedrock* 4, input motion bermula di *bedrock* 4 dan mengalami amplifikasi sebanyak jumlah lapisan di atasnya yang mengakibatkan gelombang seismik pada permukaan teramplifikasi lebih banyak dibandingkan dengan kasus *bedrock* yang lainnya.

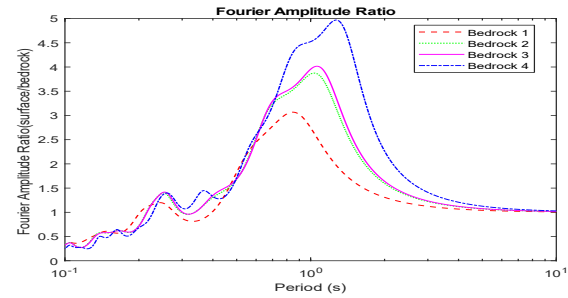
Nilai amplifikasi pada tiap *bedrock* dipengaruhi oleh kontras impedansi antar lapisan. Kontras impedansi antar lapisan ditunjukkan oleh perbedaan nilai V_s pada tiap lapisan dengan lapisan di atas atau dibawahnya. Hal ini yang menyebabkan perbedaan nilai amplifikasi antar *bedrock* 4 yang memiliki nilai V_s 2298,2 m/s dan *bedrock* 3 yang memiliki nilai V_s 1253,1 m/s lebih besar dibandingkan perbedaan nilai amplifikasi antar *bedrock* 3 yang memiliki nilai V_s 1253,1 m/s dan *bedrock* 2 yang memiliki nilai V_s 1206,89 m/s. Perbedaan yang menonjol juga ditunjukkan pada nilai amplifikasi *bedrock* 2 dan *bedrock* 1 yang memiliki nilai V_s 1206,89 m/s dan 1156,70 m/s.

Setelah mendapatkan *Fourier amplitude ratio*, gelombang di permukaan (output motion) dapat dengan mengalikan input motion dengan *Fourier amplitude ratio*. Gambar PSA analisis linear ditunjukkan pada Gambar 13.

Pada Gambar 13, terdapat dua puncak pada PSA di masing-masing *bedrock*, puncak pertama berada di periode sekitar 0,13 s dan puncak kedua berada di periode sekitar 0,39 s. Ketinggian PSA sesuai dengan *Fourier amplitude ratio*



Gambar 14. PSA Equivalent Linear.



Gambar 15. Fourier amplitude ratio Equivalent Linear.

yang telah dibahas sebelumnya, dengan *bedrock* 4 memiliki PSA tertinggi, *bedrock* 3 dan 2 memiliki PSA yang mirip, dan *bedrock* 1 yang memiliki PSA terkecil.

Selain FAR dan PSA, untuk mendapatkan seismic hazard assessment diperlukan juga ground motion proxy (PGA, PGV, dan PGD). Hasil plot dari PGA, PGV, dan PGD menggunakan pendekatan linear di tiap lapisan di masing-masing *bedrock* terdapat pada Gambar 18.

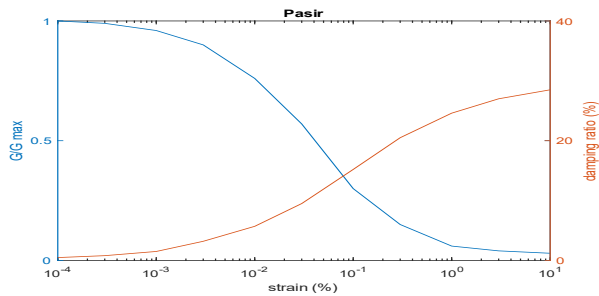
PGA merupakan akselerasi gelombang seismik tertinggi di lapisan tertentu, PGV adalah kecepatan gelombang seismik tertinggi di lapisan tertentu, dan PGD merupakan perpindahan tertinggi di lapisan tertentu. Ketiga hal ini dapat dijadikan penilaian kebencanaan seismik.

Ke-empat *bedrock* mengalami kenaikan PGA yang signifikan di kedalaman 17,42 m. Penyebab dari kenaikan PGA yang tinggi ini disebabkan kontras impedansi antar lapisan yang berada di kedalaman di 17,42 m yang mana merupakan perbatasan antara lapisan 1 dan lapisan 2. Pada permukaan, nilai PGA dari *bedrock* 1, 2, 3 dan 4 adalah 0,41 g, 0,53 g, 0,55 g, dan 0,67 g. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin dalam *bedrock*, semakin besar juga semakin besar nilai PGA yang terdapat di permukaan.

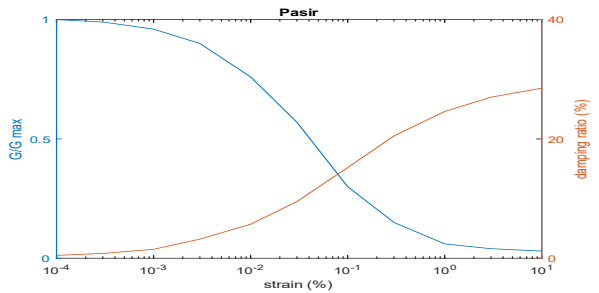
Nilai PGV di permukaan sebesar 0,25 m/s, 0,31 m/s, 0,31 m/s dan 0,44 m/s untuk *bedrock* 1, *bedrock* 2, *bedrock* 3, dan *bedrock* 4. Masing-masing *bedrock* mengalami kenaikan yang signifikan seperti yang terjadi pada Gambar 18 juga pada kedalaman 17,42 m. Hal ini disebabkan oleh kontras impedansi antar lapisan di kedalaman 17,42 m.

Nilai PGD pada permukaan pada *bedrock* 1, 2, 3, dan 4 sebesar 0,03 m, 0,042 m, 0,047 m, dan 0,05 m. Hasil ini menunjukkan bahwa kedalaman *bedrock* memengaruhi nilai PGD. Kenaikan nilai PGD di tiap lapisan dari *bedrock* ke permukaan disebabkan oleh kontras impedansi antar lapisan, oleh karena itu, terlihat perubahan nilai PGD di tiap batas lapisan.

Pada analisis *Equivalent-Linear*, bagian yang dianggap tidak linear berada pada lapisan tanah dengan kedalaman 40 meter. Jenis lapisan yang digunakan didapatkan dari data sekunder. Analisis *equivalent-linear* adalah analisis dengan memanfaatkan nilai kurva *damping* dan *shear modulus* untuk



Gambar 16. Kurva Damping dan Shear modulus Pasir (Seed dan Idris,1971).

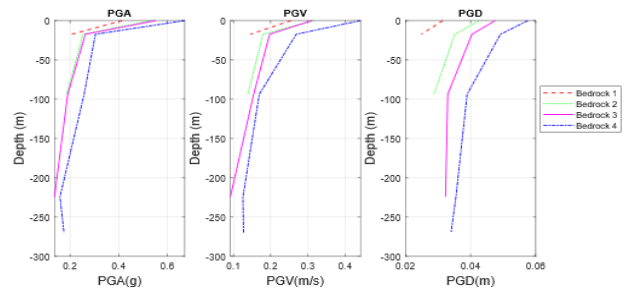


Gambar 17. Kurva Damping dan Shear modulus lempung.

mendapatkan *damping* dan *shear modulus* pada lapisan yang terkena *strain*. Kurva *damping* dan *shear modulus* yang digunakan didapatkan dari Seed dan Idris, 1970 untuk jenis lapisan pasir dan untuk lapisan lempung digunakan referensi Vucetic dan Dobry, 1991. Masing-masing kurva *damping* dan *shear modulus* ditunjukkan pada Gambar 16 dan Gambar 17. Didapatkan hasil plot dari *Fourier amplitude ratio* ditunjukkan pada Gambar 15.

Pada Gambar 15, terlihat pada periode rendah, FAR di pendekatan *equivalent-linear* rendah dibandingkan dengan pendekatan linear pada. Hal ini dikarenakan efek *damping* berpengaruh lebih besar pada periode kecil, sehingga terjadi kehilangan energi yang mengakibatkan nilai FAR pada periode kecil rendah. Amplifikasi dari masing-masing *bedrock* terdapat di periode 0,86 s hingga 1,27 s. *Bedrock 1* memiliki amplifikasi sebesar 3,08 pada periode 0,86 s, *bedrock 2* memiliki amplifikasi sebesar 3,87 pada periode 1,04 s, *bedrock 3* memiliki amplifikasi sebesar 4,01 pada periode 1,05 s, dan *bedrock 4* memiliki amplifikasi sebesar 4,97 pada periode 1,27 s. Dari gambar hasil plottingan FAR, didapatkan bahwa nilai amplifikasi *bedrock* semakin besar seiring bertambahnya kedalaman *bedrock*. Hal ini dikarenakan adanya kontras impedansi yang mengakibatkan *input motion* teramplifikasi. Dikarenakan hal ini, jika dibandingkan kasus *bedrock 3* dan *bedrock 4*, lapisan tanah paling bawah di kasus *bedrock 4* telah mengalami amplifikasi diakibatkan perbedaan impedansi antara *bedrock* dengan lapisan tanah paling bawah, yang mana pada kasus *bedrock 3*, *input motion* dimulai dari lapisan *bedrock*. Oleh karena itu, terdapat perbedaan antara nilai amplifikasi *bedrock 3* dan 4. Hal ini juga menyebabkan *bedrock 1* memiliki amplifikasi lebih kecil dibandingkan *bedrock* setelahnya.

Besarnya perbedaan nilai amplifikasi, dipengaruhi oleh besarnya perbedaan kontras impedansi yang ditunjukkan oleh nilai V_s antar lapisan. Pada *bedrock 3* dan 4 terlihat perbedaan *Fourier amplitude ratio* yang signifikan dikarenakan oleh besarnya perbedaan nilai V_s di *bedrock 4* dengan *bedrock 3*. Untuk *bedrock 2* dan 3, perbedaan *Fourier amplitude ratio* tidak signifikan disebabkan oleh kecilnya perbedaan nilai V_s



Gambar 18. PGA, PGV, dan PGD Linear.

pada *bedrock 2* dan *bedrock 3*. Pada *bedrock 1* dan 2, terlihat *Fourier amplitude ratio* yang memiliki perbedaan yang tinggi seperti pada *bedrock 3* dan 4, hal yang menyebabkannya juga nilai V_s yang memiliki perbedaan yang cukup tinggi.

Selain amplifikasinya yang berbeda, periodenya juga memiliki perbedaan. Seiring bertambahnya kedalaman, semakin jauh juga jarak yang ditempuh gelombang seismik.

Dengan mengalikan *Fourier amplitude ratio* dikenakan di input motion, didapatkan pseudo spectral acceleration. Hasil plot pseudo spectral acceleration terdapat pada Gambar 14, menunjukkan bahwa *bedrock 1, 2, 3,* dan 4 memiliki puncak PSA masing-masing 1,04 g, 1,24 g, 1,28 g, 1,37 g pada periode 0,30 s, 0,36 s, 0,37 s, 0,39 s. Hasil ini sesuai dengan yang didapatkan pada *Fourier amplitude ratio*, dimana *bedrock 4* memiliki PSA tertinggi disusul oleh *bedrock 3, 2,* dan 1. Terlihat puncak dari PSA berada pada sekitar 0.3 - 0.4 s. Puncak dari *Fourier amplitude ratio* dan PSA berada di periode yang berbeda dikarenakan input motion mulai menurun di periode 0,43 s, tetapi tetap terlihat kenaikan nilai PSA pada periode 0,61 s hingga 0,87 s yang didukung oleh tingginya input motion.

Selain perhitungan *Fourier amplitude ratio* dan PSA, dilakukan juga perhitungan PGA, PGV, dan PGD (ground motion proxy). Nilai PGA, PGV, dan PGD menggunakan pendekatan *equivalent-linear* terdapat pada Gambar 11. Keempat *bedrock* mengalami perubahan nilai yang tidak linear pada kedalaman 40 m keatas. Penyebab dari perubahan PGA ini adalah lapisan dengan pendekatan *equivalent-linear* berada hingga kedalaman 40 m dari permukaan. Pada pendekatan linear, didapatkan bahwa semakin mendekati permukaan nilai PGA semakin besar. Namun hal ini tidak didapati di pendekatan *equivalent-linear* dikarenakan adanya energi yang hilang pada lapisan 40 m teratas. Nilai PGA di permukaan pada *bedrock 1, bedrock 2, bedrock 3,* dan *bedrock 4* sebesar 0,230 g, 0,259 g, 0,262 g, dan 0,254 g. PGA di permukaan pada *bedrock 4* tidak memiliki nilai tertinggi diantara *bedrock* lainnya dikarenakan semakin besar *shear strain* yang diterima oleh lapisan, maka semakin besar juga energi yang hilang. Nilai PGV ditunjukkan pada Gambar 11. Nilai PGV di permukaan sebesar 0,21 m/s, 0,30 m/s, 0,31 m/s dan 0,38 m/s untuk *bedrock 1, bedrock 2, bedrock 3,* dan *bedrock 4*. Nilai dari PGV di tiap lapisan lebih bervariasi seiring naik ke permukaan dibandingkan pada pendekatan linear yang ditunjukkan pada Gambar 18. Nilai PGV yang bervariasi ini disebabkan oleh efek nonlinieritas tanah yang menyebabkan adanya *damping*.

Pada Gambar 11, nilai PGD pada permukaan pada *bedrock 1, 2, 3,* dan 4 sebesar 0,036 m, 0,047 m, 0,052 m, dan 0,068 m. Hasil ini menunjukkan bahwa kedalaman *bedrock* memengaruhi nilai PGD. Kenaikan nilai PGD di tiap lapisan dari *bedrock* ke permukaan disebabkan oleh kontras

impedansi antar lapisan, oleh karena itu, terlihat perubahan nilai PGD di tiap batas lapisan.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut: (1) Pengaruh kedalaman *bedrock* terhadap periode dominan dan amplifikasi tanah yang didapatkan adalah semakin besar periode dominan semakin dalam *bedrock* dan semakin besar amplifikasi tanah semakin besar juga kedalaman *bedrock*. Amplifikasi yang semakin naik seiringnya pertambahan kedalaman disebabkan oleh model hasil inversinya memiliki nilai V_S yang semakin tinggi juga seiring bertambahnya kedalaman. Periode dominan pada pendekatan linear berada di periode yang lebih kecil dibandingkan dengan periode dominan pada pendekatan equivalent-linear. Penyebab dari pergeseran periode dominan pada pendekatan equivalent-linear adalah *shear* modulus yang mengakibatkan menurunnya V_S . (2) Pengaruh kedalaman *bedrock* terhadap peak ground acceleration, peak ground velocity, dan peak ground displacement adalah semakin besar nilai dari ground motion proxy, semakin besar juga kedalaman *bedrock*. Nilai ground motion proxy pada pendekatan linear menunjukkan semakin besar kedalaman *bedrock*, semakin besar juga ground motion proxy. Pada pendekatan equivalent-linear, terdapat penurunan nilai ground motion proxy akibat dari damping yang menyebabkan hilangnya energi dari motion.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Aki, "Local site effects on weak and strong ground motion," *Tectonophysics*, vol. 218, no. 1-3, pp. 93-111, Feb. 1993, doi: 10.1016/0040-1951(93)90262-I.
- [2] R. W. Graves, A. Pitarka, and P. G. Somerville, "Ground-motion amplification in the Santa Monica area: effects of shallow basin-edge structure," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 88, no. 5, pp. 1224-1242, 1998.
- [3] J. P. Narayan and P. V. P. Rao, "Two and half dimensional simulation of ridge effects on the ground motion characteristics," *Pure Appl. Geophys.*, vol. 160, no. 8, pp. 1557-1571, Aug. 2003, doi: 10.1007/s00024-003-2360-x.
- [4] J. P. Narayan, "Study of basin-edge effects on the ground motion characteristics using 2.5-D modelling," *Pure Appl. Geophys.*, vol. 162, no. 2, pp. 273-289, Feb. 2005, doi: 10.1007/s00024-004-2600-8.
- [5] Sukardi, *Peta Geologi Lembar Surabaya & Sapulu*, Jawa. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1992.
- [6] P. S. G. Nasional, *Peta Sumber dan Bahaya Gempa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan, Perumahan dan Permukiman Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, ISBN : 978-602-5489-01-3, 2017.
- [7] Y. Nakamura, "Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications," in *12th World Conference Earthquake Engineering 2000*, 2000, p. 8.
- [8] B. Setiawan, M. Jaksa, M. Griffith, and D. Love, "Estimating bedrock depth in the case of regolith sites using ambient noise analysis," *Eng. Geol.*, vol. 243, pp. 145-159, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.enggeo.2018.06.022.
- [9] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- [10] Y. Nakamura, E. D. Gurler, J. Saita, and S. D. Antonio Rovelli, "Vulnerability Investigation of Roman Colosseum using Microtremor," in *12th World Conference Earthquake Engineering 2000*, 2000, p. 9.
- [11] M. Nogoshi and T. Igarashi, "On the propagation characteristics of microtremor," *Zisin (Journal Seismol. Soc. Japan. 2nd ser.)*, vol. 23, no. 4, pp. 264-280, 1970, doi: 10.4294/zisin1948.23.4_264.
- [12] A. García-Jerez, J. Piña-Flores, F. J. Sánchez-Sesma, F. Luzón, and M. Pertón, "A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption," *Comput. Geosci.*, vol. 97, pp. 67-78, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.cageo.2016.06.016.
- [13] J. Piña-Flores *et al.*, "The inversion of spectral ratio H/V in a layered system using the diffuse field assumption (DFA)," *Geophys. J. Int.*, vol. 208, no. 1, pp. 577-588, Jan. 2017, doi: 10.1093/gji/ggw416.