

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kondisi geologi bawah permukaan merupakan salah satu faktor yang memengaruhi respons suatu wilayah terhadap guncangan gempa bumi. Salah satu aspek dalam studi geologi teknik dan seismik adalah kedalaman batuan dasar (*bedrock*), yaitu lapisan material keras yang menjadi pondasi bagi lapisan sedimen di atasnya. Kedalaman *bedrock* menjadi salah satu faktor penunjang dalam proses amplifikasi gelombang seismik, karena ketebalan sedimen di atasnya memungkinkan penguatan amplitudo gelombang dan menurunkan frekuensi natural tanah (Farid, 2011; Walisongo, 2020). Kawasan perkotaan Makassar, terkhusus di lingkungan Kampus Universitas Hasanuddin Tamalanrea, keberadaan sedimen aluvial berpotensi meningkatkan kerentanan terhadap bahaya gempa, terutama pada struktur bangunan dan infrastruktur. Secara geologis, wilayah Makassar tersusun atas beberapa satuan batuan penting, antara lain Formasi Camba (sedimen laut dengan sisipan vulkanik), Formasi Baturape Cindako (batuan vulkanik Kuartar), serta endapan aluvial yang terdiri dari kerikil, pasir, lempung, lumpur, dan gamping koral (Husain & Sultan, 2012).

Lapisan pelapukan awal yang banyak ditemukan di lapisan bagian atas memiliki karakteristik porositas rendah dan permeabilitas tinggi, mengindikasikan bahwa nilai kecepatan gelombang geser (V_s) yang rendah. Karakteristik tersebut memberikan kecenderungan lebih fleksibel terhadap guncangan dan menghasilkan nilai frekuensi dominan (f_0) yang rendah serta nilai amplifikasi HVSR yang tinggi (Farid, 2011). mengidentifikasi kondisi tersebut, digunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) sebagai pendekatan geofisika pasif yang non destruktif. Metode ini dikembangkan oleh Nakamura (1989), yang menunjukkan bahwa rasio spektral amplitudo antara komponen horizontal dan vertikal dari sinyal mikrotremor dapat merepresentasikan fungsi transfer gelombang geser antara lapisan sedimen dan *bedrock* (Teves-Costa et al., 1996).

Metode yang digunakan memungkinkan estimasi frekuensi dominan situs dan memberikan indikasi ketebalan lapisan sedimen berdasarkan respons resonansi terhadap gelombang mikro. Beberapa penelitian terdahulu telah menggunakan metode HVSR untuk karakterisasi bawah permukaan dan evaluasi risiko seismik di berbagai wilayah, seperti di kawasan Balaroa, Palu, dan Yogyakarta (Saptadji et al., 2018). Kebaruan yang dibawa dalam penelitian ini terletak pada penerapan metode HVSR untuk melakukan mikrozonasi dan mengestimasi kedalaman *bedrock* di wilayah Kampus Universitas Hasanuddin Tamalanrea.

Metode HVSR telah digunakan secara luas untuk memperoleh informasi mengenai ketebalan sedimen dan karakteristik bawah permukaan. Dalam penelitian ini, metode tersebut diterapkan untuk mengestimasi kedalaman batuan dasar di kawasan kampus Universitas Hasanuddin. Analisis dilakukan dengan menyusun profil kecepatan gelombang geser dari data mikrotremor serta zonasi spasial, sehingga hasilnya dapat memberikan gambaran kondisi bawah permukaan secara lebih detail dan mendukung kajian potensi risiko seismik di wilayah kampus.

1.2. Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

1. Menentukan frekuensi dominan (f_0) dan nilai *peak amplitude* (A_0) HVSr pada tiap titik pengukuran.
2. Mengestimasi kedalaman *bedrock* berdasarkan Profil V_s dari inversi kurva *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr)
3. Melakukan inversi kurva HVSr menggunakan Neighborhood Algorithm (NA) kemudian memperoleh profil kecepatan gelombang geser (V_s).

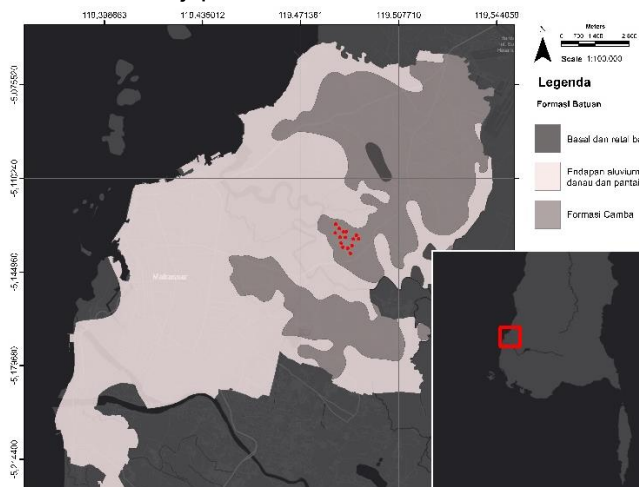
1.2.2 Manfaat

1. Diperolehnya informasi bawah permukaan kedalaman *bedrock* di kawasan kampus Unhas sebagai dasar untuk perencanaan konstruksi dan pengembangan wilayah.
2. Mendukung kegiatan mikrozonasi seismik dan mitigasi gempa di wilayah kampus Universitas Hasanuddin Tamalanrea.
3. Menjadi referensi metodologi penerapan HVSr dan inversi NA dalam studi geoteknik dan geofisika teknik dalam lingkup kampus.

1.3. Landasan Teori

1.3.1 Geologi Kota Makassar

Kota Makassar dan sekitarnya tersusun atas beberapa satuan batuan geologi utama, di antaranya satuan endapan aluvium, Formasi Camba, serta satuan basal dan retal basal. Formasi batuan tersebut tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1 Peta Geologi Kota Makassar

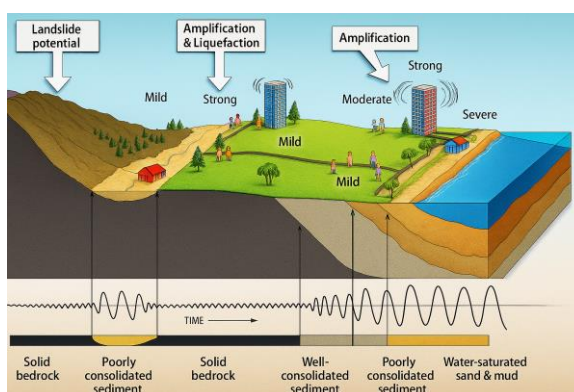
di bagian timur dan utara wilayah penelitian juga ditemukan Formasi Camba, formasi batuan sedimen berumur Tersier yang telah mengalami proses litifikasi. Formasi ini tersusun atas batupasir, batulempung, dan konglomerat, dan memiliki karakteristik yang lebih padat dibandingkan satuan aluvium. Di sisi barat dan selatan Kota Makassar juga dijumpai satuan basal dan retal basal yang merupakan produk aktivitas vulkanik masa

lalu. Batuan ini tersusun dari lava basaltik dan material piroklastik yang keras, dengan porositas rendah dan kekuatan gelombang geser tinggi, menjadikannya juga kandidat kuat sebagai batuan dasar (Syarifuddin, 2015).

Keberadaan satuan batuan yang berbeda ini memberikan kontras impedansi yang tinggi antara lapisan permukaan dan lapisan bawah, yang berkontribusi terhadap fenomena amplifikasi gelombang gempa. *bedrock* menjadi penting untuk mengetahui titik peralihan antara sedimen lunak dan batuan keras, yang dapat dilakukan melalui metode geofisika seperti HVSr. Kondisi geologi ini sangat berpengaruh terhadap penentuan parameter frekuensi dominan dan V_{s30} dalam kajian seismik mikrozonasi wilayah Kampus Universitas Hasanuddin. Peta distribusi formasi batuan di wilayah penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

1.3.2 *Bedrock*

Bedrock atau batuan dasar merupakan lapisan entitas padat dan kompak secara definitif seringkali terletak di bawah lapisan tanah atau sedimen yang lebih lepas dan tidak terkonsolidasi. Dalam dimensi geofisika, *bedrock* berperan sebagai batas dinamis antara lapisan sedimen yang responsif terhadap gelombang gempa dan lapisan batuan yang relatif stabil terhadap perambatan gelombang seismik. Karakteristik utama *bedrock* meliputi kekuatan mekanik yang tinggi, porositas rendah, dan kecepatan rambat gelombang geser *shear wave velocity* (V_s) yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan lapisan di atasnya. Berdasarkan hasil-hasil penelitian geofisika dan mikrozonasi seismik, beberapa studi mendefinisikan *bedrock* sebagai lapisan dengan $V_s > 500$ m/s, meskipun nilai ini dapat bervariasi tergantung pada kondisi geologi lokal (Putra et al., 2020)



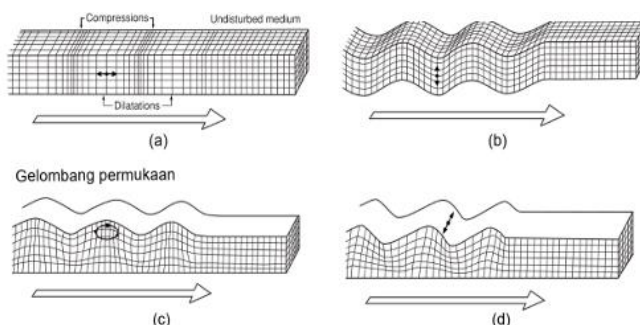
Gambar 2 Pengaruh *Bedrock* Terhadap respon gelombang

Dalam konteks sifat mekanik, lapisan *bedrock* dapat di definisikan dengan rentang kecepatan V_s antara 300 - 1000 m/s, tergantung tingkat pelapukan batuan keras. Namun, bagian yang memiliki $V_s \leq 500$ m/s umumnya dikategorikan sebagai *bedrock* yang lunak (*soft bedrock*). Hal Ini kemudian menjadi acuan bahwa ambang 500 m/s bisa digunakan sebagai indikator ketika membedakan antara *hard bedrock* dan *soft bedrock* (Park Seismic LLC.). yang menyatakan bahwa dalam praktiknya, banyak studi urban menggunakan batas $V_s = 500$ m/s untuk mengidentifikasi dasar dari sedimen seismik

aktif. Teknik ini menggunakan getaran mikrotremor untuk menentukan frekuensi dominan (f_0), yang berkorelasi dengan ketebalan sedimen di atas *bedrock* (Teves-Costa et al., 1996).

1.3.3 Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan vibrasi elastis yang merambat melalui bumi akibat dari pelepasan energi, baik secara alami seperti gempa bumi dan aktivitas vulkanik, maupun dari sumber buatan seperti peledakan, lalu lintas kendaraan, atau mesin industri. aplikasi yang berkaitan dengan karakterisasi bawah permukaan dan respons seismik lokal. gelombang seismik diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu gelombang badan (*body waves*) dan gelombang permukaan (*surface waves*). Gelombang badan terdiri atas gelombang primer (P wave) dan gelombang sekunder (S wave). Gelombang P adalah gelombang longitudinal yang merambat paling cepat di antara semua jenis gelombang seismik, dan memiliki arah rambat sejajar dengan arah getarannya. Gelombang ini dapat merambat melalui material padat, fluida, maupun gas. Sebaliknya, gelombang S merupakan gelombang transversal yang merambat lebih lambat daripada gelombang P dan hanya dapat menjalar melalui media padat. Gelombang S bergerak dengan arah tegak lurus terhadap arah perambatan, dan umumnya menyebabkan deformasi geser pada material yang dilewatinya (Valeria et al., 2019).



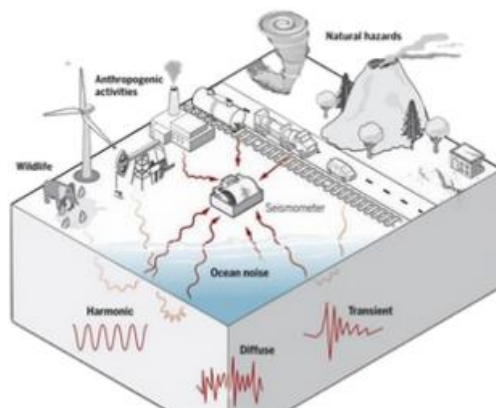
Gambar 3 Ilustrasi gerak partikel (a) gelombang P, (b) gelombang S, (c) gelombang Rayleigh, dan (d) gelombang Love

Berbeda dari gelombang badan, gelombang permukaan merambat di sepanjang permukaan bumi dan cenderung memiliki amplitudo lebih besar, serta efek kerusakan yang lebih nyata saat terjadi gempa. Terdapat dua jenis gelombang permukaan yang paling umum, yaitu gelombang *Rayleigh* dan gelombang *Love*. Gelombang *Rayleigh* memiliki pola perambatan elips retrograde, menyerupai gerakan air laut, dan terdiri atas komponen vertikal dan horizontal. Sedangkan gelombang *Love* hanya memiliki komponen horizontal yang tegak lurus terhadap arah rambatannya dan cenderung sangat merusak struktur bangunan. Mikrotremor berupa getaran tanah berfrekuensi rendah dan amplitudo sangat kecil yang terjadi secara kontinyu. Getaran ini tidak disebabkan oleh aktivitas tektonik, melainkan oleh sumber eksogen seperti ombak laut, angin, dan aktivitas manusia.

Kemudian Karena sifatnya yang stasioner dan tidak merusak, mikrotremor dapat dimanfaatkan dalam metode seismik pasif, khususnya HVSR, untuk mengevaluasi kondisi bawah permukaan. Dalam metode HVSR, analisis spektral dilakukan terhadap rasio amplitudo horizontal terhadap vertikal dari sinyal mikrotremor yang direkam di satu titik menggunakan sensor seismik tiga komponen. Puncak pada kurva HVSR yang diperoleh mencerminkan frekuensi dominan (f_0), yang biasanya diinterpretasikan sebagai frekuensi resonansi akibat kontras impedansi elastik antara lapisan sedimen dan batuan (Nakamura, 1989). Resonansi ini terjadi karena gelombang Rayleigh mengalami penguatan atau amplifikasi ketika merambat pada sedimen lunak yang menutupi batuan dasar atau *bedrock* yang secara fisis memiliki sifat yang lebih kaku.

1.3.4 Mikrotremor

Mikrotremor menjadi salah satu sumber data utama dalam eksplorasi struktur bawah permukaan, khususnya dalam pendekatan survei seismik pasif. Mikrotremor merujuk pada getaran kecil dan terus-menerus yang terjadi di permukaan bumi, umumnya memiliki amplitudo sangat rendah dalam skala mikrometer hingga milimeter. Tidak seperti gelombang seismik aktif yang berasal dari sumber buatan seperti palu atau ledakan, mikrotremor timbul dari berbagai sumber alami dan antropogenik yang bersifat kontinu dan menyebar luas, seperti aktivitas gelombang laut, angin, lalu lintas, hingga mesin industri (Arai & Tokimatsu, 2004; Mucciarelli et al., 2009).



Gambar 4 Ilustrasi Mikrotremor (Denolle et, al 2020)

Mikrotremor mengandung gelombang permukaan terutama *Rayleigh* dan sebagian *Love* serta komponen kecil dari gelombang badan. Karena mayoritas energi mikrotremor terkandung dalam gelombang *Rayleigh*, analisis terhadap data mikrotremor biasanya difokuskan pada informasi yang berkaitan dengan propagasi gelombang geser di dalam tanah. Ketika terdapat kontras impedansi antara lapisan sedimen dan batuan dasar, terjadi penguatan amplitudo gelombang pada frekuensi tertentu, yang dikenal sebagai resonansi lokal. Fenomena ini membuat mikrotremor menjadi bahan yang tepat untuk mengidentifikasi frekuensi dominan serta dinamika struktur bawah permukaan (Picozzi et al., 2005; Teves-Costa et al., 1996).

Pada metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), data mikrotremor digunakan untuk menghitung rasio spektral antara komponen horizontal dan vertikal dari getaran

tanah yang direkam menggunakan sensor seismik tiga komponen. Metode ini didasarkan pada prinsip bahwa amplitudo komponen horizontal akan menunjukkan peningkatan signifikan pada frekuensi resonansi, sedangkan amplitudo komponen vertikal relatif stabil. Hasil perbandingan tersebut menghasilkan kurva spektrum yang menunjukkan puncak pada frekuensi dominan (f_0), yang berkorelasi erat dengan ketebalan lapisan sedimen dan kedalaman batuan dasar (Fäh et al., 2001; Herak, 2008). Penggunaan mikrotremor dalam metode HVSR sangat populer karena karakteristiknya yang efisien, ekonomis, dan tidak membutuhkan sumber gelombang buatan. Teknik ini sangat sesuai untuk wilayah urban atau padat penduduk, di mana metode seismik aktif sulit diterapkan tanpa mengganggu aktivitas masyarakat. Selain sifatnya yang non-destruktif dan peralatannya yang sederhana, metode ini banyak diterapkan dalam kajian mitigasi bahaya gempa, mikrozonasi, investigasi tapak fondasi, serta eksplorasi sumber daya panas bumi (Bonnefoy-Claudet et al., 2006; SESAME Project, 2004).

1.3.5 Metode Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR)

Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) merupakan teknik dalam lingkup geofisika dan seismologi rekayasa guna memetakan kondisi bawah permukaan berdasarkan data mikrotremor, yaitu getaran kecil alami akibat ombak laut, angin, atau aktivitas manusia (Saka, 2018). Diperkenalkan oleh Nakamura pada 1989, metode ini membandingkan spektrum amplitudo gelombang mikrotremor antara komponen horizontal dan vertikal guna memperoleh frekuensi dominan lokal. Secara prinsip, amplitudo pada komponen horizontal meningkat signifikan saat terjadi resonansi tanah, sedangkan komponen vertikal relatif stabil. Oleh karena itu, rasio H/V menunjukkan puncak tajam pada frekuensi dominan (Ainy, 2017).

bagian berikut akan menjelaskan secara sistematis rekomendasi teknis akuisisi data sebagai tahap krusial dalam memperoleh hasil interpretasi bawah permukaan yang akurat. Dalam praktiknya, kurva HVSR diinterpretasikan berdasarkan bentuknya. Kurva dengan satu puncak tajam menunjukkan kontras impedansi tinggi, sedangkan kurva yang datar atau tidak memiliki puncak menandakan lapisan bawah yang homogen atau kompleksitas stratigrafi (Ainy, 2017). Metode ini melibatkan perbandingan intensitas sinyal mikrotremor komponen horizontal dengan komponen vertikal untuk mendapatkan rasio spektrum. Analisis spektrum HVSR melibatkan penggunaan metode *Fourier Transform* untuk mengubah sinyal mikrotremor dalam domain waktu menjadi domain frekuensi (Arinalofa G., 2020).

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1.1)$$

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi ft) dt - j \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin(2\pi ft) dt \quad (1.2)$$

Dimana $x(f)$ adalah sinyal dalam domain frekuensi, $x(t)$ adalah fungsi sinyal dalam domain waktu dan f adalah frekuensi. Untuk merepresentasikan fenomena ini secara kuantitatif, digunakan rumus rasio spektral antara komponen horizontal dan vertikal (HVSR) seperti yang dijelaskan (Farazi et al., 2023). dengan persamaan sebagai berikut:

$$HVS\!R = \frac{\sqrt{H_{NS}^2 + H_{EW}^2}}{V} \quad (1.3)$$

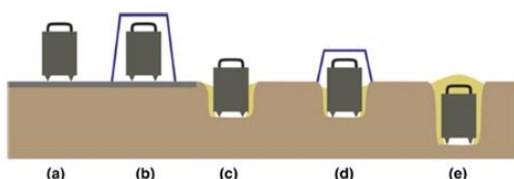
Dimana H_{NS} adalah spektrum komponen horizontal *north-south*, H_{EW} adalah spektrum komponen horizontal *east-west*, dan V adalah spektrum komponen vertikal.

Fast Fourier Transform (FFT) adalah algoritma yang digunakan untuk merepresentasikan sinyal dalam domain waktu ke domain frekuensi. Domain waktu merujuk pada periode yang diperlukan oleh sebuah gelombang untuk mencapai satu siklus penuh, sementara domain frekuensi mengacu pada jumlah siklus gelombang yang terjadi dalam satu detik. Frekuensi yang pada dasarnya merupakan kebalikan dari waktu, dinyatakan dalam *Hertz* (Hz), yaitu 1 per detik, dan hanya memiliki satu nilai (Subakti & Haurissa, 2022).

Tabel 1 Rekomendasi Akuisisi HVS $\!R$

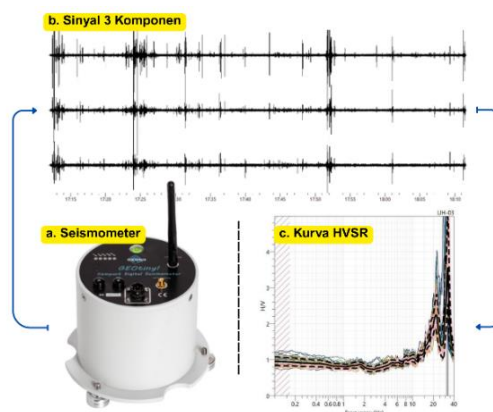
Tipe Parameter	Main recommendations	
Durasi pengukuran	Nilai minimum f_0 yang diharapkan [Hz]	Rekomendasi durasi minimal perekaman [min]
	0.2	30'
	0.5	20'
	1	10'
	2	5'
	5	3'
	10	2'
Jarak pengukuran	- o Mikrozonasi: mulai dengan jarak yang besar (misalnya 500 m), dan jika terjadi variasi lateral dari hasil, sempitkan jarak titik pengukuran, misalnya hingga 250 m. - o Respons site tunggal: jangan pernah menggunakan satu titik pengukuran untuk mendapatkan nilai f_0, buat setidaknya tiga titik pengukuran.	
Parameter perekaman	o Stabilkan posisi sensor dengan melakukan leveling.	
In situ soil sensor coupling	- o Tempatkan sensor langsung pada permukaan tanah. - o Hindari menempatkan sensor seismograf pada permukaan tanah lunak (lumpur, semaksemak) atau tanah lunak setelah hujan.	
Artificial soil-sensor coupling	- o Hindari plat/lempengan yang terbuat dari material lunak seperti karet atau busa. - o Pada kemiringan yang curam, di mana sulit untuk mendapatkan sensor dalam keadaan datar dengan baik, pasang sensor dalam timbunan pasir atau wadah yang diisi pasir. - o Pada salju atau es, pasang pelat logam atau kayu, atau wadah yang diisi dengan pasir untuk menghindari kemiringan sensor akibat pencairan es.	
Struktur terdekat	- o Hindari pengukuran dekat dengan bangunan, gedung bertingkat, dan pohon yang tinggi, jika tiupan angin di atas 5 m/s. Kondisi tersebut sangat mempengaruhi hasil analisa HVS$\!R$ - o Hindari pengukuran di lokasi bawah tanah, seperti parkir mobil, pipa air dan saluran pembuangan.	
Kondisi cuaca	- o Angin: Lindungi sensor dari angin (dengan kecepatan lebih dari 5 m/s). Ini membantu jika tidak ada bangunan di sekitarnya. - o Hujan: Hindari pengukuran pada saat hujan lebat. Hujan ringan tidak memberikan gangguan berarti. - o Suhu: Mengecek kondisi sensor dan mengikuti instruksi pabrik. - o Gangguan meteorologi: tunjukkan pada lembar lapangan apakah pengukuran dilakukan selama tekanan rendah.	
Gangguan	- o Sumber monokromatik: hindari pengukuran mikrotremor dekat dengan mesin, industri, pompa air, generator yang sedang beroperasi, dll. - o Sumber sementara: jika terdapat sumber getar transient (jejak langkah kaki, mobil, motor) tingkatkan durasi pengukuran untuk memberikan jendela/window yang cukup untuk analisis setelah gangguan tersebut hilang.	

Sumber : (Project SESAME, 2004)



Gambar 5 Rekomendasi Penempatan Sensor (Molnar et al., 2022).

Jika resonansi tanah bertepatan dengan resonansi bangunan, maka efek kerusakan akan menjadi lebih besar (Sungkono, 2011). Selain itu, metode HVSR juga digunakan dalam pemetaan zona bahaya longsor, pemodelan struktur geologi, serta survei awal potensi energi panas bumi dan air tanah (Subakti & Haurissa, 2022). Metode ini juga efektif di lingkungan tropis seperti Indonesia yang memiliki kondisi geologi kompleks. Penelitian di berbagai wilayah seperti Grobogan, Jayapura, dan Ambon menunjukkan hasil yang konsisten dalam mengidentifikasi struktur bawah permukaan dengan akurasi yang tinggi (Saka, 2018).



Gambar 6 Prosedur pengolahan HVSR

Secara teoritis, respon getaran tanah lunak ditandai dengan dominasi amplitudo gerak partikel pada arah horizontal dibandingkan dengan arah vertikal. Sebaliknya, pada tanah keras, amplitudo getaran antara arah horizontal dan vertikal cenderung seimbang (Alzahrani et al., 2022).

1.3.5.1 Parameter-parameter HVSR

a. Frekuensi Dominan (f_0)

Frekuensi dominan merupakan frekuensi yang paling menonjol atau sering muncul pada sinyal seismik di suatu lokasi pada gambar 5, frekuensi dominan mengacu pada grafik puncak yang ada pada kurva HVSR dan mencerminkan karakteristik dinamik dari struktur bawah permukaan pada wilayah tersebut (Partono et al., 2013). Nilai frekuensi ini secara umum berkaitan erat dengan ketebalan lapisan sedimen dan kecepatan rambat gelombang geser. Menurut Nakamura (2000), hubungan antara frekuensi dominan f_0 , kecepatan gelombang geser (V_s), dan ketebalan lapisan (H), dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$f_0 = \frac{V_s}{4A_0H} \quad (1.4)$$

Besarnya frekuensi dominan (f_0) berbanding terbalik dengan ketebalan lapisan sedimen (H). Frekuensi dominan menggambarkan kondisi fisik tanah di permukaan atau di bawah permukaan tanah, di mana nilai frekuensi dominan yang lebih rendah menunjukkan lapisan sedimen yang tebal di area tersebut dan sebaliknya

Tabel 2 Klasifikasi Nilai Frekuensi Dominan

Kategori	Nilai frekuensi dominan (Hz)	Klasifikasi	Deskripsi
Jenis I	10 - 20	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan Hard sandy, gravel, dll	Ketebalan sedimen permukaannya sangat tipis, didominasi oleh batuan keras
Jenis II	4 - 10	Batuan alluvial, dengan ketebalan 5 m. terdiri dari sandy-gravel, sandy hard clay, loam, dll	Ketebalan sedimen permukaannya masuk dalam kategori menengah 5-10 meter
Jenis III	2,5 - 4	Batuan alluvial, dengan ketebalan >5m terdiri dari sandy-gravel, sandy hard clay, loam, dll	ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10-30 meter
Jenis IV	<2,5	Batuan alluvial, yang terbentuk dari sedimentasi delta, top soil, lumpur, dll	Ketebalan sedimen permukaannya sangatlah tebal dengan kedalaman 30 meter atau lebih

Sumber ; (Zawawi et al., 2023)

b. Peak Amplitude (A_0)

Amplifikasi mengacu pada proses penguatan amplitudo gelombang saat merambat melalui suatu medium tertentu. Fenomena tersebut umumnya terjadi ketika gelombang seismik melewati lapisan tanah yang memiliki perbedaan sifat fisis secara signifikan dibandingkan lapisan sebelumnya. Perbedaan utama ini biasanya berupa kontras kekakuan antara lapisan, di mana gelombang yang berpindah dari lapisan keras ke lapisan yang lebih lunak akan mengalami peningkatan amplitudo atau penguatan gelombang (Mahajan et al., 2012). Semakin besar perbedaan sifat antara kedua lapisan, maka semakin besar pula efek amplifikasinya. Nilai *peak amplitude* ini menjadi parameter penting dalam penilaian respons seismik lokal, dan klasifikasinya dapat ditinjau melalui Tabel 3.

Tabel 3 Klasifikasi Nilai Amplifikasi

Kategori	Keterangan	Nilai Amplifikasi
I	Rendah	$A_0 < 3$
II	Sedang	$3 \leq A_0 < 6$
III	Tinggi	$6 \leq A_0 < 9$
IV	Sangat tinggi	$A_0 \geq 9$

Sumber ; (Zawawi et al., 2023)

1.3.6 Profil Kecepatan Gelombang Geser (V_s)

Kecepatan gelombang geser, atau dikenal sebagai *Shear Wave Velocity* (V_s), merupakan salah satu parameter utama dalam kajian geofisika yang sangat berperan dalam memahami sifat mekanik dan dinamika tanah di bawah permukaan. Nilai V_s merepresentasikan seberapa cepat energi gelombang transversal dapat merambat melalui suatu material, yang erat kaitannya dengan tingkat kekakuan dan densitas dari material penyusunnya (Subakti A., 2022). Dalam penerapan metode HVSR, profil V_s digunakan untuk mengaitkan nilai frekuensi dominan yang diperoleh dari hasil pengukuran mikrotremor dengan kedalaman lapisan yang memiliki perbedaan signifikan dalam impedansi, yang biasanya terjadi antara lapisan tanah lunak dan batuan keras. Hubungan ini secara umum dinyatakan melalui persamaan:

Tabel 4 Klasifikasi situs SNI 1726:2019

Kelas situs		V_s (ms)	N	Su (kPa)
Kode	deskripsi			
SA	Batuan keras	>1500	N/A	N/A
SB	Batuan	750 – 1500	N/A	N/A
SC	Tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak	350 – 750	>50	≥ 100
SD	Tanah sedang	175 – 350	15 – 50	50 – 100
		<175	<15	<50
SE	Tanah lunak	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir $su < 25$ kPa		
SF	Tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respon spesifik	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: • Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah ikuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah • Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) • Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7.5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) • Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $su < 50$ kPa		

Profil V_s diperoleh melalui proses inversi terhadap data HVSR. Proses ini bertujuan menyusun model bawah permukaan yang mampu memproduksi kurva HVSR sintesis dengan kecocokan maksimal terhadap data observasi. Inversi dilakukan dengan mempertimbangkan parameter awal seperti ketebalan lapisan, rasio Poisson, densitas material, serta nilai dugaan awal untuk V_s . Profil V_s dapat diperoleh melalui proses inversi data HVSR. Inversi ini bertujuan mencari model bawah permukaan yang mampu menghasilkan kurva HVSR sintesis paling mendekati kurva observasi. Inversi dilakukan dengan menggunakan parameter - parameter awal seperti ketebalan lapisan, rasio Poisson, densitas, dan nilai awal V_s (Sugianto & Refrizon, 2021).

1.3.7 Inversi Neighborhood Algorithm

Dalam kajian geofisika, inversi merupakan proses matematis untuk memperoleh informasi tentang struktur bawah permukaan dari data hasil pengamatan di permukaan bumi. Dalam penerapan *metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr), proses inversi digunakan untuk membangun profil kecepatan gelombang geser (V_s) dengan mencocokkan kurva HVSr hasil pengamatan dengan kurva sintetis yang dihasilkan dari model bawah permukaan. Karena hubungan antarameter dalam HVSr bersifat kompleks dan non linear, dibutuhkan algoritma yang mampu menjelajahi ruang parameter secara efisien (Sambridge, 1999).

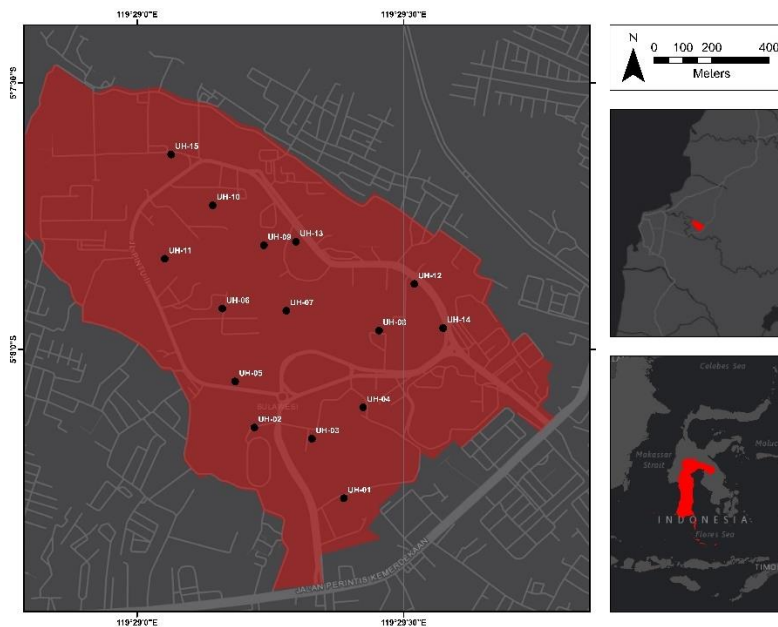
Salah satu pendekatan yang banyak digunakan dan terbukti efektif untuk tujuan tersebut adalah *Neighborhood Algorithm* (NA). Algoritma ini pertama kali dikembangkan oleh Sambridge (1999) untuk menyelesaikan masalah inversi non linear dalam geofisika. NA bekerja dengan mengevaluasi sejumlah model parameter awal, kemudian melakukan pencarian di sekitar model-model yang memiliki performa terbaik. Ruang lokal pencarian ini disebut "*neighborhood*", yang secara bertahap dieksplorasi lebih dalam, memungkinkan algoritma menemukan solusi global tanpa terjebak dalam minimum lokal. Pendekatan ini tidak memerlukan kalkulasi turunan fungsi objektif, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi dengan banyak parameter bebas seperti pada inversi HVSr. Penyempurnaan dari metode ini kemudian dikembangkan oleh Wathelet (2008), dengan memperkenalkan skema pemilihan parameter dan skala dinamis untuk meningkatkan efisiensi eksplorasi ruang model. Pada implementasinya dalam inversi HVSr, *Neighborhood Algorithm* digunakan untuk mencari kombinasi parameter bawah permukaan seperti ketebalan tiap lapisan, kecepatan V_s , densitas, dan rasio Poisson yang menghasilkan kurva HVSr sintetis paling mendekati kurva hasil pengukuran (Wathelet, 2008). Tingkat kecocokan antara data hasil model dan observasi dievaluasi dengan fungsi misfit, yang umumnya dituliskan sebagai:

$$misfit \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n^F} (x_{di} - x_{ci})^2}{\sigma_i^2 n^F}} \quad (1.5)$$

Fungsi *misfit* digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian antara data observasi dan data sintetis hasil perhitungan model inversi. Persamaan *misfit* diturunkan dari selisih kuadrat antara data observasi (x_{di}) dan data hasil perhitungan (x_{ci}) pada setiap frekuensi yang digunakan, dengan mempertimbangkan bobot berupa ketidakpastian data (σ^i). Nilai ini kemudian dinormalisasi terhadap jumlah frekuensi (n^F) sehingga menghasilkan ukuran yang proporsional. Dalam praktiknya, proses inversi menggunakan Neighborhood Algorithm dapat dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Dinver*, yang merupakan bagian dari paket perangkat lunak *Geopsy*. Melalui *Dinver*, pengguna dapat menentukan parameter awal berupa rentang nilai V_s , ketebalan tiap lapisan, serta estimasi densitas dan rasio Poisson. Selanjutnya, algoritma menghasilkan ribuan kemungkinan konfigurasi model bawah permukaan, mengevaluasi nilai misfit nya, dan memilih model dengan kecocokan terbaik untuk dijelajahi lebih lanjut.

BAB II METODOLOGI

2.1. Waktu dan Tempat



Gambar 7 Peta Titik Akuisisi

Penelitian dilakukan di kawasan Kampus Universitas Hasanuddin yang terletak di Kecamatan Tamalanrea, Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Lokasi ini berada pada kisaran koordinat $5^{\circ}8' - 5^{\circ}9'$ Lintang Selatan dan $119^{\circ}30' - 119^{\circ}31'$ Bujur Timur, dengan luas wilayah mencapai lebih dari 220 hektar. Secara morfologi, area kampus mencakup dataran aluvial, perbukitan rendah, serta sejumlah cekungan yang berpotensi menjadi tempat akumulasi sedimen kuartar.

Tabel 5 Linimasa Penelitian

Waktu					keterangan
Tahun	2024	2025			Akuisisi Data
Bulan	Januari	Mei	Juni	Juli	
Tanggal	5-7				
	9 Mei-30 Juli				Pengolahan dan Iterpretasi Data

2.2. Perangkat Penelitian

2.2.1 Alat

1. Geobit GEOTiny20 Digital Seismometer
2. Global Positioning System (GPS) GARMIN64s
3. Laptop
4. Lembar Akuisisi
5. Kompas Geologi

2.2.2 Perangkat Lunak

1. Geopsy 3.4.0 (3.5.2)
2. ArcGIS 1.08
3. Visual Studio Code

2.2.3 Bahan

1. Penelitian ini menggunakan 15 titik data primer yang tersebar di kawasan Kampus Universitas Hasanuddin, Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Titik-titik pengambilan data tersebut dipilih secara strategis dengan mempertimbangkan radius cakupan sensor untuk mewakili berbagai zona fungsional di dalam kampus, mencakup area dari setiap fakultas, serta sejumlah fasilitas umum seperti pusat kegiatan mahasiswa, ruang terbuka hijau (taman), dan zona perkuliahan terpadu.
2. Bahan peta: Peta batas administrasi Kota Makassar dan denah jalan serta rambu Makassar yang diperoleh dari *Basemap* pada *ArcGis* 1.08

2.3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dibagi menjadi tiga tahapan utama, yaitu tahap persiapan, tahap akuisisi data, dan tahap pengolahan serta interpretasi data, yang masing-masing dijelaskan sebagai berikut:

2.3.1 Tahap Pendahuluan

Tahapan awal melibatkan studi literatur mengenai metode HVSR serta identifikasi lokasi potensial untuk titik pengukuran berdasarkan distribusi fakultas dan fasilitas umum di Kampus Universitas Hasanuddin. Selain itu, dilakukan pula persiapan peralatan, uji coba sensor seismik tiga komponen, serta penyusunan jadwal pengambilan data di lapangan.

2.3.2 Tahap Akuisisi Data

Pengambilan data dilakukan menggunakan seismometer tiga komponen yang merekam getaran mikrotremor alami selama durasi diatas lembar rekomendasi SESAME (2004) (40 hingga 60 menit per titik). Total sebanyak 15 titik setelah pertimbangan kondisi lapangan. pengukuran dipilih secara merata di seluruh area kampus untuk mencakup kondisi bawah permukaan yang bervariasi. Setiap sensor diletakkan pada permukaan yang stabil dan bebas gangguan getaran lokal serta mengacu pada tabel rekomendasi akuisisi, serta direkam menggunakan perangkat lunak pendukung yang saling menunjang dengan GPS untuk pencatatan waktu dan posisi.

2.3.3 Tahap Pengolahan Data

Data mikrotremor yang telah direkam kemudian diproses menggunakan perangkat lunak *Geopsy*, yang mencakup langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Konversi format data Data rekaman dari seismometer tiga komponen diubah dari format trace ke format mseed menggunakan perangkat lunak *DataPro*. Langkah ini memastikan file akuisisi dapat diproses lebih lanjut di *Geopsy* tanpa masalah kompatibilitas.
- b. Analisis HVSR di *Geopsy* Pembagian window Rekaman dipotong menjadi segmen-segmen berdurasi 40 - 50 detik. Tiap segmen dipilih berdasarkan kriteria sinyal stabil,

kebisingan rendah, dan bebas dari gangguan transient. Perataan spektrum Untuk mendapatkan kurva H/V yang halus namun tetap mempertahankan resolusi frekuensi, diterapkan filter Konno-Ohmachi dengan parameter bandwidth sesuai kebutuhan. Transformasi Fourier Setiap segmen kemudian diubah ke domain frekuensi melalui Fast Fourier Transform (FFT). Spektrum horizontal rata-rata (H) dibagi spektrum vertikal (V) untuk memperoleh kurva H/V, dari mana frekuensi dominan (f_0) dan faktor *peak amplitude* (A_0) diekstrak.

- c. Inversi kurva HVSR dengan Neighborhood Algorithm Penyusunan model awal Berdasarkan data tipe tanah dan kedalaman lapisan, dibuat model awal yang mencakup rentang nilai kecepatan gelombang geser (V_s), densitas (ρ), rasio Poisson, dan ketebalan tiap lapisan. Rincian parameter model awal ini dirangkum pada Tabel 6 Proses inversi Neighborhood Algorithm kemudian digunakan untuk menyesuaikan model sintetik dengan kurva observasi, menghasilkan profil V_s terbaik yang merefleksikan struktur bawah permukaan di lokasi studi. Kurva HVSR hasil observasi kemudian diinversi menggunakan perangkat lunak Dinver (bagian dari paket Geopsy) untuk memperoleh model bawah permukaan berupa profil V_s (gelombang geser) terhadap kedalaman. Proses inversi dilakukan dengan pendekatan non-linear neighborhood algorithm (NA), dengan mendefinisikan parameter awal seperti ketebalan lapisan, V_s minimum-maksimum, serta nilai densitas dan V_p/V_s . Model terbaik dipilih berdasarkan kurva sintesis yang memiliki misfit terkecil terhadap kurva observasi.

Tabel 6 Parameter Inversi

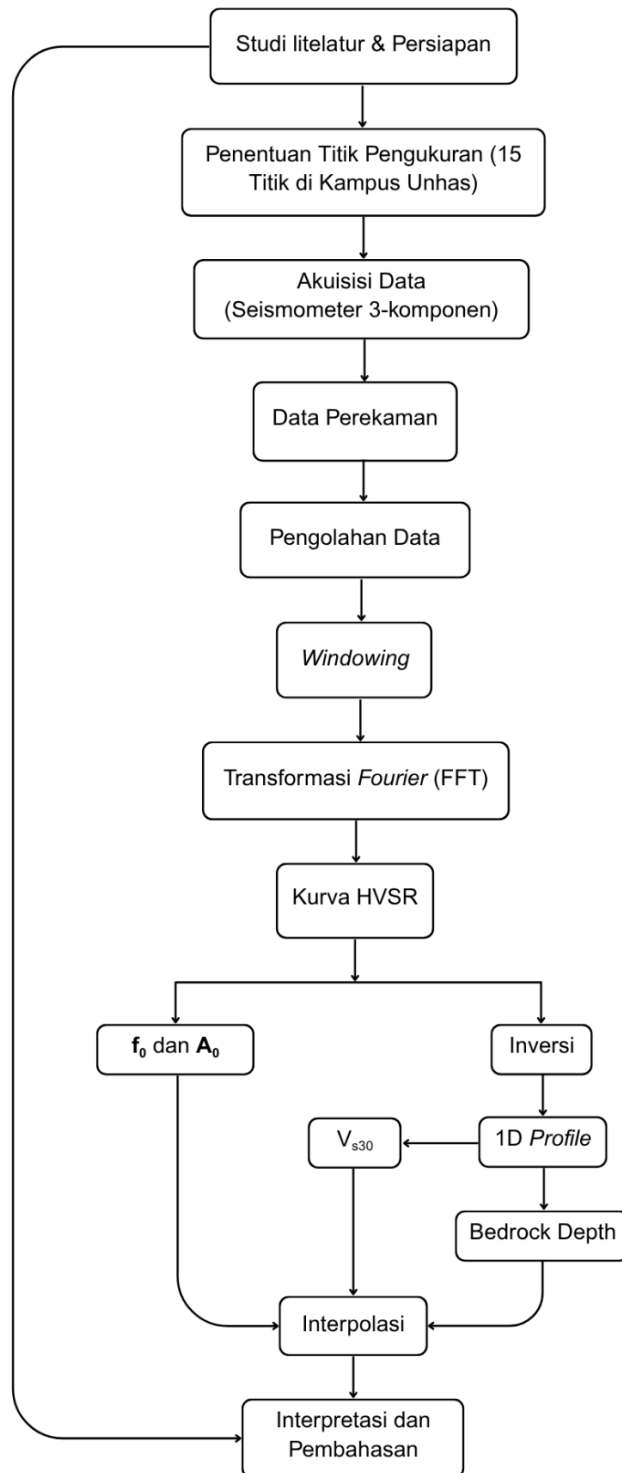
<i>Layer</i>	<i>Depth</i>	V_s	V_p	<i>Density</i>	<i>Poisson Ratio</i>
1	1 - 2	100 - 230	100 - 500	1000 - 2000	0,2 - 0,5
2	2 - 7	230 - 600	500 - 900	1000 - 2000	0,2 - 0,5
3	7 - 31	600 - 800	900 - 1400	1000 - 2000	0,2 - 0,5
4	31 - 50	800 - 1000	1400 - 3000	1500 - 2500	0,2 - 0,5
5	<i>Separuh Ruang</i>	1200 - 2000	3000 - 4000	1880 - 3000	0,2 - 0,5

- Proses inversi
Inversi dilakukan di Geopsy menggunakan *Neighborhood Algorithm*, yang secara iteratif mengeksplorasi berbagai kombinasi parameter model. Metode ini menghasilkan deretan model kandidat, lalu memilih model yang paling sesuai dengan kurva HVSR hasil pengamatan. Proses diperbarui berulang hingga konvergensi tercapai dan kesesuaian optimal antara model sintetik dan data observasi didapatkan.
- a. Pemetaan hasil atau Visualisasi data
Parameter kunci seperti frekuensi dominan (f_0), *peak amplitude* (A_0) dan nilai V_{s30} dari profil 1D setiap titik pengukuran diolah dalam *ArcGIS*. Pemetaan ini memvisualisasikan pola distribusi parameter dan mengidentifikasi area dengan potensi kerentanan seismik tinggi.

2.3.4 Estimasi Kedalaman *Bedrock*

Estimasi kedalaman *bedrock* dilakukan berdasarkan nilai dari V_s hasil inversi, dengan memperhatikan perubahan signifikan kecepatan gelombang geser sebagai indikasi transisi tiap objek lunak ke keras dalam hal ini 500 m/s.

2.3.5 Alur kerja penelitian



Gambar 8 Alur kerja Penelitian