

**STUDI MITIGASI BENCANA GEMPABUMI DENGAN PEMETAAN
MIKROZONASI DAERAH MAKASSAR SULAWESI SELATAN
MENGUNAKAN DATA MIKROTREMOR BERDASARKAN
ANALISIS HVSR (*HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO*)**

(Skripsi)

Oleh

YENI PURNAMA SARI



**KEMENTRIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2016**

ABSTRACT

STUDY ON EARTHQUAKE DISASTER MITIGATION WITH REGIONAL MAPPING MICROZONATION MAKASSAR SOUTH SULAWESI MIKROTREMOR USING DATA BASED ON ANALYSIS HVSr (*HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRA RATIO*)

By

YENI PURNAMA SARI

Regional studies have been conducted in Makassar use data based on the analysis HVSr mikrotremor to get the value of the resonant frequency and amplification factor. This study aims to determine and describe the areas that are prone to earthquakes as mitigation, with microzonation mapping based on the parameters resonant frequency, the dominant period, V_{s30} (shear wave velocity), and the value associated with the amplification of the Regional geological data Makassar. The results showed that the area is Makassar is located in a zone with resonant frequency ranges from 0.65 Hz to 9.45 Hz, with values ranging from 0.78 to 6.32 amplification, then the dominant period is 0.11 second to 1, 54 seconds, and the value of shear wave velocity is 78 m/s up to 1134 m/s. So that the District Mamajang, District Mariso, and District Biringkanaya of almost the entire region has a severe impact that high that is located in zone III amplification high, with soil classification type IV rock type E form lithological rock alluvial soft thickness of 30 meters or more, so it needs special attention from the government in business development and community awareness of public facilities in response to the earthquake disaster that may suddenly occur. But there are also Regional Makassar considered safe ie areas which are recommended as the development region in the layout which has a level of vulnerability to lower the value of amplification ranging from 0,78 to 2,54 and are in the zone of the frequency of the high frequency range from 4 Hz to 10 Hz include Tamalate District and District Tallo.

Keywords : Microtremor, microzonation, amplification, Makassar

ABSTRAK

STUDI MITIGASI BENCANA GEMPABUMI DENGAN PEMETAAN MIKROZONASI DAERAH MAKASSAR SULAWESI SELATAN MENGUNAKAN DATA MIKROTREMOR BERDASARKAN ANALISIS HVSR (*HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRA RATIO*)

Oleh

YENI PURNAMA SARI

Telah dilakukan penelitian di Daerah Makassar menggunakan data mikrotremor berdasarkan analisis HVSR untuk mendapatkan nilai frekuensi resonansi dan faktor amplifikasi. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan dan menggambarkan daerah yang rawan terhadap gempabumi sebagai upaya mitigasi, dengan pemetaan mikrozonasi berdasarkan parameter frekuensi resonansi, periode dominan, V_{s30} (kecepatan gelombang geser), dan nilai amplifikasi yang dikaitkan dengan data geologi Daerah Makassar. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa Daerah Makassar berada pada zona dengan frekuensi resonansi berkisar antara 0,65 Hz hingga 9,45 Hz, dengan nilai amplifikasi berkisar 0,78 hingga 6,32. Kemudian nilai periode dominan yaitu 0,11 detik hingga 1,54 detik, dan nilai kecepatan gelombang geser yaitu 78 m/s hingga 1134 m/s. Sehingga Kecamatan Mamajang, Kecamatan Mariso, dan Kecamatan Biringkanaya merupakan daerah yang memiliki tingkat kerawanan tinggi yaitu berada pada zona III amplifikasi tinggi, dengan klasifikasi tanah jenis IV tipe batuan E berupa litologi batuan alluvial lunak berketebalan 30 meter atau lebih, sehingga perlu perhatian khusus dari pemerintah dalam usaha pengembangan fasilitas umum dan kesadaran masyarakat dalam menanggapi bencana gempabumi yang tiba-tiba dapat terjadi. Namun terdapat juga Daerah Makassar yang dianggap aman yaitu wilayah yang direkomendasikan sebagai wilayah pengembangan dalam tataruang yang memiliki tingkat kerawanan rendah dengan nilai amplifikasi berkisar antara 0,78 hingga 2,54 dan berada pada zona frekuensi tinggi berkisar 4 Hz hingga 10 Hz meliputi Kecamatan Tallo, dan pesisir pantai maupun bagian hulu sungai Kecamatan Tamalate.

Kata kunci : Mikrotremor, mikrozonasi, amplifikasi, Makassar

**STUDI MITIGASI BENCANA GEMPABUMI DENGAN PEMETAAN
MIKROZONASI DAERAH MAKASSAR SULAWESI SELATAN
MENGUNAKAN DATA MIKROTREMOR BERDASARKAN
ANALISIS HVSr (*HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO*)**

Oleh

YENI PURNAMA SARI

Skripsi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar
Sarjana Teknik

pada

Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2016**

**Judul Skripsi : STUDI MITIGASI BENCANA GEMPABUMI
DENGAN PEMETAAN MIKROZONASI
DAERAH MAKASSAR SULAWESI SELATAN
MENGUNAKAN DATA MIKROTREMOR
BERDASARKAN ANALISIS HVSR
(HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL
RATIO)**

Nama Mahasiswa : Yeni Purnama Sari

Nomor Pokok Mahasiswa : 1115051038

Jurusan : Teknik Geofisika

Fakultas : Teknik



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Rustadi, S.Si., M.T.
NIP 19720511 199703 1 000

Syamsurijal Rasimeng, M.Si.
NIP 19730716 200012 1 002

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

Bagus Sapto Mulyatno, S.Si., M.T.
NIP 19700120 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Rustadi, S.Si., M.T.



Sekretaris

: Syamsurijal Rasimeng, M.Si.



Penguji

Bukan Pembimbing

: Prof. Dr. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Dr. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.

NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 20 September 2016

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis bukan merupakan karya dari orang lain melainkan berdasarkan pemikiran saya sendiri, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana. Adapun kutipan tertentu dalam penulisan skripsi ini terdapat karya atau pendapat orang lain yang ditulis menurut sumbernya sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, Oktober 2016



Yeni Purnama Sari
NPM. 1115051038

RIWAYAT HIDUP



Penulis merupakan anak ke dua dari tiga bersaudara pasangan Bapak Tumino dan Ibu Siti Sopiya, lahir di Desa Seputih Banyak Lampung Tengah 15 Agustus 1993. Tetapi penulis dibesarkan dengan kasih sayang oleh Alm. Bani Bakri dan Ibu Siti Kamilah yang merupakan orangtua kedua hingga sekarang.

Penulis memulai pendidikan di TK Aisyah Bumi Athfal pada tahun 1998, kemudian melanjutkan Sekolah Dasar di SDN 3 Banjarrejo Lampung Timur pada tahun 1999, SMPN 1 Metro pada tahun 2005 dan meneruskan sekolah di SMAN 4 Metro pada tahun 2008 hingga akhirnya lulus tahun 2011.

Pada tahun 2011 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Universitas Lampung Fakultas Teknik Jurusan Teknik Geofisika melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan seperti Forum Silaturahmi dan Studi Islam Fakultas Teknik (FOSSI FT) sebagai anggota divisi Keputrian. Selain itu juga penulis aktif dalam organisasi kampus yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (HIMA TG) pada periode 2012/2013 dan 2013/2014 sebagai anggota SBM (Sosial Budaya Masyarakat). Pada bulan

November-Desember 2014 penulis melaksanakan praktek kerja lapangan di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Bandung dengan judul **“Analisis Energi Kumulatif Gempa Gunung Sinabung Sumatera Utara dari penentuan amplitude berdasarkan rekaman gelombang seismik periode September-Oktober 2013”** selama kurang lebih satu bulan. Pada tahun 2015 penulis melaksanakan Tugas Akhir (TA) selama kurang lebih 2 bulan di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Bandung dengan judul **“Studi Mitigasi Bencana Gempabumi Dengan Pemetaan Mikrozonasi Daerah Makassar Sulawesi Selatan Menggunakan Data Mikrotremor Berdasarkan Analisis HVSR (*Horizontal To Vertical Spectra Ratio*)”**. Hingga akhirnya penulis berhasil menyelesaikan pendidikan sarjananya pada bulan September tahun 2016.

Aku persembahkan karya kecil ini untuk:

Allah SWT

Ayahanda tercinta, Bapak Tumino

Ibunda terkasih, Ibu Siti Sopiya

Alm. Ayahanda Bani Bakri

Ibunda Siti Kamilah

Saudara kandungku,

Eka Wahyuni,

Ersa Yuliana

dan Keluarga besarku

Teknik Geofisika UNILA 2011

Keluarga Besar Teknik Geofisika UNILA

Almamater Tercinta UNILA

Sahabat-sahabatku dan orang-orang terkasih.

Sesungguhnya sholatku, ibadahku, hidup dan matiku hanya karena Allah SWT.

*Berangkat dengan penuh keyakinan. Berjalan dengan penuh keikhlasan.
Istiqomah dalam menghadapi cobaan.*

*Kalau tidak bisa berlari maka berjalanlah. Kalau berjalan terasa sulit
maka merangkaklah. Tapi jangan sekali-kali bergerak mundur.*

~Berani Berhijrah~

*Menuntut ilmu adalah taqwa, menyampaikan ilmu adalah ibadah,
Mengulang-ulang ilmu adalah dzikir, mencari ilmu adalah jihad.*

~Al Ghazali~

Rasulullah saw bersabda:

“Lakukanlah pekerjaan itu pada puncak kemampuanmu.”

(HR. Bukhari dan Muslim)

Tidak ada kata gagal dalam kamus hidup ini, yang ada hanyalah Belajar.

*Ku olah kata, ku baca makna, ku ikat dalam alinea, ku bingkai dalam
bab sejumlah enam, jadilah mahakarya, gelar sarjana ku terima,
orangtua, calon suami dan calon mertua pun bahagia.*

"MY TRIP LILLAHI TA'ALA"

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah *robbilalamin*, segala puji dan syukur bagi ALLAH SWT yang telah memberikan nikmat, karunia dan perlindungan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“STUDI MITIGASI BENCANA GEMPABUMI DENGAN PEMETAAN MIKROZONASI DAERAH MAKASSAR SULAWESI SELATAN MENGGUNAKAN DATA MIKROTREMOR BERDASARKAN ANALISIS HVSR (*HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO*)”** sebagai salah satu bagian dari kurikulum dan salah satu syarat bagi penulis untuk menyelesaikan studi sebagai Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Skripsi ini merupakan hasil kegiatan Tugas Akhir di PVMBG (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi) Bandung. Namun demikian, penulis menyadari masih banyak ketidaksempurnaan dan banyak kelemahan dalam laporan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar dapat memperbaiki dan menyempurnakan nya. Semoga Skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, Oktober 2016
Penulis,

Yeni Purnama Sari

SANWACANA

Skripsi yang berjudul: “**Studi Mitigasi Bencana Gempabumi Dengan Pemetaan Mikrozonasi Di Makassar Sulawesi Selatan Menggunakan Data Mikrotremor Berdasarkan Analisis HVSR (*Horizontal To Vertical Spectral Ratio*)**” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik, Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Penyusunan skripsi ini tidak akan terwujud tanpa adanya dukungan, bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. **Allah SWT** yang selalu mengawasi dan meridhoi setiap proses sampai skripsi ini selesai, sehingga tiada alasan bagi penulis untuk berhenti bersyukur “Alhamdulillah”.
2. **Nabi Muhammad saw** yang memberikan teladan kepada seluruh umatnya, terutama penulis untuk selalu ingin menjadi orang yang lebih baik lagi.
3. Kedua orang tua ku tercinta, **Ibu Siti Sopiya** dan **Bapak Tumino** serta kakak **Eka Wahyuni** dan adik **Ersa Yuliana** yang telah memberikan kasih sayang dan kesabaran serta doa yang terus di berikan tanpa rasa lelah.
4. Orang tua ke dua ku, **Ibu Siti Kamilah** dan (alm.) **Bapak Bani Bakri**, yang telah memelihara dan mendidik dengan penuh kasih. Terutama kepada Ibu

yang sudah bekerja keras selama menjadi orangtua tunggal, sungguh tidak akan terbalas dengan apapun atas semua perjuanganmu;

5. Saudaraku **Dina Nopiyana** dan **Santi Fadilah** yang selama ini menjadi teman dalam suka dan duka sekaligus memberikan semangat untuk menyelesaikan skripsi ini.
6. Bulekku **Siti Ropikiyah** yang senantiasa memberikan doa, dukungan moral maupun spiritual, dan nasehat pada penulis selama ini.
7. **Bapak Prof. Drs. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung sekaligus dosen penguji yang telah memberikan masukan dan nasehat, baik untuk skripsi ataupun untuk masa depan penulis.
4. **Bapak R. Bagus Sapto Mulyatno, S.Si., M.T** selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika yang telah memberikan motivasi selama masa perkuliahan.
5. **Bapak Syamsurijal Rasimeng, M.Si** sebagai pembimbing akademik sekaligus pembimbing 2 skripsi yang telah memberikan kritik saran sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
6. **Bapak Rustadi, S.Si., M.T** sebagai pembimbing 1 skripsi dikampus yang telah banyak memberikan masukan-masukan agar lebih baik lagi.
7. Seluruh Staf Tata Usaha Jurusan Teknik Geofisika Unila, **Pak Marsuno** dan **Mbak Dewiyang** telah memberi banyak bantuan dalam proses administrasi;
8. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi sebagai institusi yang telah memberi kesempatan untuk melaksanakan Tugas Akhir.
9. **Ibu Sri Hidayati** selaku Kepala Subbidang Gempabumi dan Tsunami yang telah mengizinkan dan membantu penulis dalam melaksanakan Tugas Akhir.

10. **Bapak Nia K Praja** dan **Bapak Baheramsyah Indra** selaku pembimbing lapangan di PVMBG yang telah sabar memberikan materi dan memberi masukan agar dapat menyelesaikan tugas akhir.
11. Penghuni ruangan 711 di Subbidang Gempabumi dan Tsunami (**Pak Heri, Pak Gangsar, Pak Deden, Pak Juanda, Pak Sugiharto, Pak Fatoni**) yang telah banyak membantu dan memotivasi penulis selama melaksanakan tugas akhir di PVMBG.
12. Penghuni ruangan 713 di Subbidang Gempabumi dan Tsunami (**Pak Cecep, Pak Imam, Pak Afif, Pak Robi**) yang sudah membantu dan memberikan ilmu selama penulis melakukan Tugas Akhir di PVMBG.
13. Bapak dosen Jurusan Teknik Geofisika atas didikan, bimbingan, serta ilmu pengetahuan yang telah diberikan.
14. Teman seperjuangan selama melaksanakan tugas akhir di PVMBG yaitu **Rahmi** dan **Asri** yang telah berbagi ilmu dan memotivasi penulis.
15. Sahabat seperjuangan **Rika, Lia, dan Fitri Wahyu** yang telah berbagi ilmu, canda tawa, serta memotivasi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
16. Teman-teman Teknik Geofisika 2011 yang telah memberikan dukungan dan keceriaan setiap harinya.
17. Kakak tingkat dan senior Teknik Geofisika angkatan 2007, 2008, 2009, 2010 yang telah memberikan banyak dukungan dan masukan yang sangat bermanfaat untuk penulis.
18. Adik-adik tingkat angkatan 2012, 2013, 2014 yang telah memberikan semangat.

19. Teman-teman alumni SMP Negeri 1 Metro: **Winie, Nindhita, Leni, Sucidan** teman-teman alumni SMA Negeri 4 Metro, khususnya: **Virona, Lita, Suprihatin, Juwita, Latifah, Atika, Ika** dan seluruh personil **POSFOR** yang tidak bisa dituliskan satu per satu, terima kasih untuk selalu memotivasi agar tetap semangat dalam menyelesaikan skripsi dan meraih kesuksesan.
20. Sahabat perjuangan pada saat KKN di Sumberagung, Bandar Lampung: **Mega, Deni, Yori, Junaidi** serta keluarga baru bu Lina dan Bapak.

Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi semua.

Bandar Lampung, Oktober 2016

Yeni Purnama Sari
1115051038

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRACT	i
ABSTRAK	ii
PERSETUJUAN	iii
PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN	v
RIWAYAT HIDUP	vi
PERSEMBAHAN	viii
MOTTO	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang.....	1
B. Batasan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Daerah Penelitian.....	5
B. Geologi Regional	6
C. Stratigrafi	10
D. Struktur Patahan	12
E. Riwayat Kegempaan	14
F. Penelitian terdahulu.....	15

III. TEORI DASAR

A. Konsep Gelombang Seismik	16
1. Gelombang seismik	17
B. Mikrotremor	25
1. Teknik perbandingan spektra mikrotremor	28
2. Penguatan guncangan tanah (amplifikasi).....	34
3. Frekuensi resonansi	35
4. Periode dominan.....	36
5. Kecepatan gelombang geser.....	38
C. Mikrozonasi.....	40
D. Upaya Mitigasi Bencana Gempabumi.....	40

IV. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian	42
B. Prosedur Penelitian.....	43
1. Pengukuran mikrotremor.....	43
2. Pengolahan data.....	44
C. Diagram Alir.....	49

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian	50
B. Analisis dan Pembahasan	50
1. Analisis HVSR (<i>Horizontal to Vertical Spectra Ratio</i>)	50
2. Efek tapak lokal gempabumi.....	51
3. Peta mikrozonasi gempabumi	52
a. Analisis nilai frekuensi resonansi	54
b. Analisis nilai periode dominan	58
c. Analisis nilai kecepatan gelombang geser (V_{s30})	62
d. Analisis nilai amplifikasi	67

VI. KESIMPULAN

A. Kesimpulan	72
B. Saran	74

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Tektonik kepulauan Indonesia	1
2. Daerah penelitian	6
3. Geologi daerah penelitian	8
4. Peta struktur dan gempabumi di Sulawesi	13
5. Penjalaran gelombang seismik.....	17
6. Ilustrasi gelombang primer	21
7. Ilustrasi gelombang sekunder	23
8. Ilustrasi gelombang <i>rayleigh</i>	24
9. Ilustrasi gelombang <i>love</i>	25
10. Perbedaan sinyal tremor dan gempa bumi	26
11. Perubahan nilai amplitudo gelombang mikrotremor terhadap waktu pada setiap jam yang diukur di Kota Kamonomiya selama 24 jam dan nilai frekuensi dominannya	27
12. Rasio Spektrum Horizontal–Vertikal di permukaan dan di batuan dasar pada Stasiun Kamonomiya setiap jam selama 24 jam	28
13. Ilustrasi penguatan gelombang komponen horizontal pada sedimen lunak	29
14. Proses penentuan frekuensi terhadap spektrum H/V dengan FFT	32
15. Program FFT	33
16. Prinsip dasar respon lokasi mikrotremor	38
17. Titik pengukuran mikrotremor.....	42
18. Satu set peralatan mikrotremor	43
19. Tampilan konversi data pada <i>spyder phyton</i>	44
20. Perangkat lunak <i>geopsy</i>	42
21. <i>Import</i> data mikrotremor	45
22. Tampilan <i>ambient noise</i>	46
23. Proses <i>smoothing</i> dan filter Konno-Ohmachi	46
24. Hasil kurva perbandingan spektra nilai H/V	47
25. Tampilan nilai frekuensi dominan dan H/V.....	47
26. Tampilan perhitungan nilai periode, V_{s30} , amplifikasi	48
27. Diagram alir penelitian.....	49
28. Peta zonasi frekuensi dominan Daerah Makassar.....	57
29. Peta zonasi periode dominan Daerah Makassar.....	61
30. Peta sebaran V_{s30} Daerah Makassar	62
31. Peta zonasi V_{s30} Daerah Makassar	66
32. Peta zonasi amplifikasi tanah Daerah Makassar	69

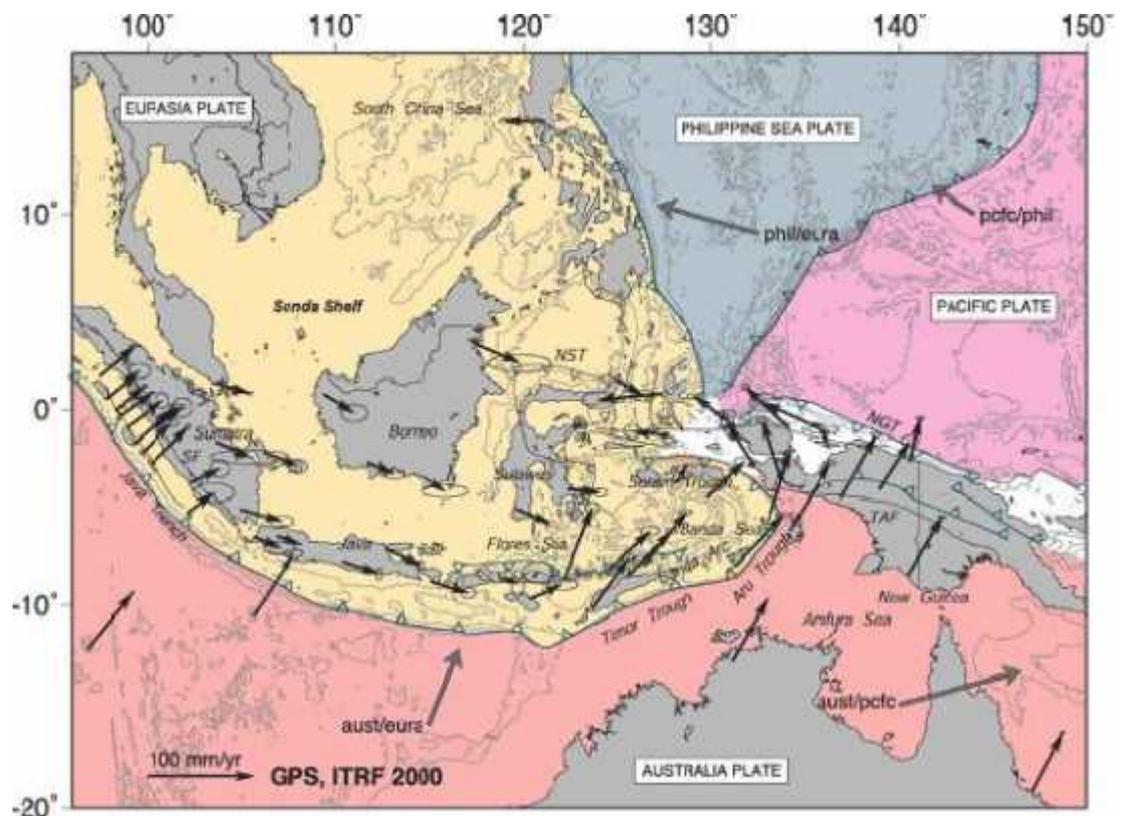
DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kecepatan rambat gelombang P dan S pada medium rambatnya	23
2. Pembagian zona amplifikasi tanah	35
3. Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi natural mikrotremor oleh Kanai	36
4. Klasifikasi tanah Kanai	37
5. Klasifikasi jenis tanah berdasarkan V_{s30}	40

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia secara geologis terletak pada pertemuan tiga lempeng besar yaitu Lempeng Benua Indo-Australia yang relatif bergerak ke arah utara, Lempeng Pasifik yang relatif bergerak ke arah barat, dan Lempeng Eurasia yang relatif bergerak ke arah barat serta satu lempeng mikro yaitu Lempeng Filipina (Pasau dan Tanauma, 2011), seperti pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Tektonik kepulauan Indonesia (Pasau dan Tanauma, 2011)

Fenomena tektonik tersebut menyebabkan daerah-daerah di Indonesia rawan terhadap bencana gempa bumi. Salah satu daerah yang berpotensi terjadi gempa, yaitu Sulawesi. Namun untuk daerah yang jauh dari fokus gempa tektonik maupun vulkanik dampak getarannya tidak secara langsung dirasakan, karena amplitudo getarannya semakin jauh semakin kecil. Namun demikian, bukan berarti daerah yang jauh dari pusat gempa tidak mengalami kerusakan. Bisa saja getaran-getaran yang kecil menyebabkan kekuatan bangunan berkurang sehingga usia bangunan menjadi lebih pendek. Apalagi jika getaran itu terjadi intensif seperti mikrotremor atau gempa-gempa kecil yang banyak diakibatkan oleh aktivitas manusia di permukaan bumi.

Di daerah yang jauh dari fokus gempa besar misalnya Daerah Makassar, getaran yang paling banyak mempengaruhi konstruksi bangunan adalah gempa mikro yang bersumber dari getaran mesin, angin, tumbuhan dan aktivitas manusia di permukaan bumi dan lain-lain. Sumber-sumber getaran yang ada di permukaan bumi dapat menyebabkan tanah di sekitarnya beresonansi. Resonansi yang terjadi pada lapisan tanah secara periodik atau konstan ini disebut mikrotremor (Syahrudin dkk, 2014).

Sehingga perlu dilakukan mitigasi untuk mengurangi resiko kerusakan yang ditimbulkan akibat gempa bumi. Hasil dari penelitian ini berupa peta mikrozonasi gempa bumi berdasarkan nilai frekuensi resonansi, periode dominan, V_{s30} (kecepatan gelombang geser pada kedalaman 30 meter), dan amplifikasi menggunakan data mikrotremor berdasarkan analisis HVSR. Selain itu untuk

membantu perencanaan pengembangan Daerah Makassar sebagai bahan pertimbangan untuk infrastruktur dan tata letak bangunan.

B. Batasan Masalah

Adapun penelitian ini terbatas pada informasi sebagai berikut:

1. Data yang digunakan adalah data sekunder berupa rekaman gelombang maupun koordinat daerah Makassar berdasarkan hasil pengukuran mikrotremor yang dilakukan oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bidang Mitigasi Gempa bumi dan Gerakan Tanah, Bandung.
2. Daerah penelitian terbatas pada wilayah kota Makassar dan sekitarnya yang terletak antara 5,3 LS hingga 5,26 LS dan 119,20 BT hingga 119,52 BT.
3. Pembuatan peta zonasi rawan bencana daerah Makassar berdasarkan periode dominan, V_{s30} (kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter), dan amplifikasi yang dikaitkan dengan data geologi.

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh gempabumi dengan menentukan nilai amplifikasi dan frekuensi resonansi Daerah Makassar.
2. Menentukan dan menganalisis nilai periode dominan untuk menggambarkan daerah-daerah di Makassar yang rawan terhadap gempabumi.

3. Menentukan dan menganalisis nilai V_{s30} (kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter) untuk mengetahui jenis tanah Daerah Makassar yang berpengaruh terhadap gempa bumi.
4. Menggambarkan dan menentukan zona di Daerah Makassar yang direkomendasikan sebagai pengembangan tata ruang wilayah dengan tingkat kerawanan rendah.

D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan berguna untuk :

1. Memberikan informasi tentang struktur lapisan tanah di Daerah Makassar yang dapat digunakan untuk dasar pembangunan infrastruktur maupun tata ruang wilayah.
2. Upaya tindakan mitigasi bencana tahap awal Daerah Makassar untuk mengurangi tingkat resiko terhadap bencana gempa bumi, dengan pembuatan peta mikrozonasi gempa yang diperlukan sebagai masukan dalam proses lanjutan kajian resiko bencana gempa bumi agar selanjutnya dapat diminimalisir kerugiannya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

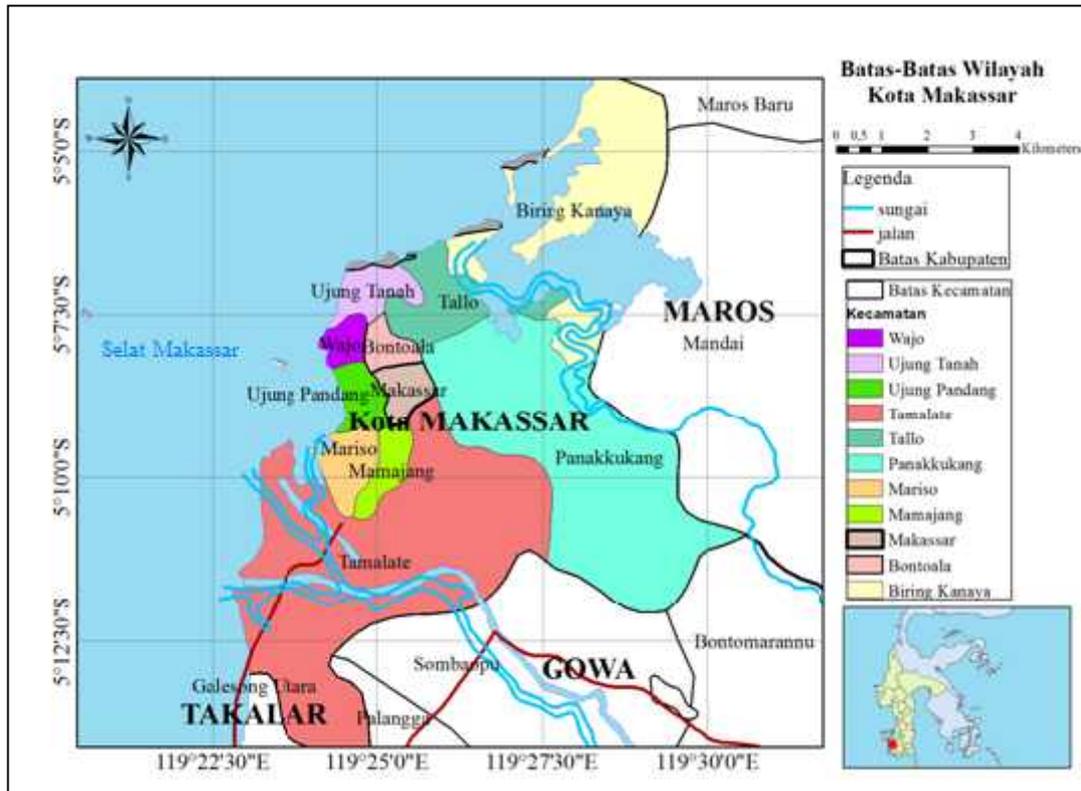
A. Daerah Penelitian

Daerah penelitian meliputi Daerah Makassar dan sekitarnya terletak antara 5,3 Lintang Selatan hingga 5,26 Lintang Selatan dan 119,20 Bujur Timur hingga 119,52 Bujur Timur, atau berada pada UTM antara 743824,56 hingga 779329,08 dan 9413741,44 hingga 9418032,16. Dan berada pada bagian barat daya Pulau Sulawesi dengan ketinggian dari permukaan laut berkisar antara 0-25 meter.

Batas-batas wilayah Makassar (**Gambar 2**) sebagai berikut:

- Sebelah Utara berbatasan dengan dan Kabupaten Maros.
- Sebelah Timur berbatasan dengan Kabupaten Maros dan Kabupaten Gowa.
- Sebelah Selatan berbatasan dengan Kabupaten Gowa.
- Sebelah Barat berbatasan dengan Selat Makassar.

Daerah Makassar terdiri dari 14 kecamatan yang merupakan salah satu kota pesisir yang ada di Indonesia yang memiliki garis pantai sepanjang 32 km dan mencakup 11 pulau-pulau kecil dengan luas keseluruhan mencapai 122.370 Ha atau sekitar 1,1% dari luas wilayah daratannya (Koddeng, 2011).



Gambar 2. Daerah penelitian (Suhendratman, 2013)

B. Geologi Daerah Penelitian

Batuan dasar Kota Makassar yang terletak di daerah sekitar Kabupaten Maros merupakan batuan gunungapi Formasi Camba yang terdiri dari breksi, lava, konglomerat dan tufa. Bentangan alam Kota Makassar berupa dataran pantai yang dijumpai di sebelah barat dan utara poros jalan utama Kota Makassar-Kabupaten Maros dan berbatasan langsung dengan dataran sungai dan dataran banjir.

Dataran sungai dan dataran banjir dijumpai di antara pedataran dua sungai besar yang membelah Kota Makassar yaitu Sungai Jeneberang dan Sungai Tallo. Dataran banjir menempati daerah sungai serta tinggian berlereng landai dijumpai

daerah bagian utara, timur dan selatan Kota Makassar yang meliputi daerah Biringkanaya dan Panakukang.

Berdasarkan peta geologi Kota Makassar seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3**, secara umum disusun atas 3 satuan batuan:

1. Satuan Alluvial, penyebaran satuan batuan alluvial mendominasi hampir seluruh wilayah kota dengan luas 11.693,83 ha. Penyebarannya meliputi daerah disekitar daratan sampai ke pantai.
2. Satuan Basal, penyebaran satuan batuan basal terdapat di dua wilayah kecamatan yaitu kecamatan Tamalate dengan luas 3,201 ha dan di Kecamatan Biringkanaya dengan luas 25,027 ha.
3. Batuan sedimen laut berselingan batuan gunung api Bawakaraeng, dan Formasi Camba yang terdiri dari lava, breksi, tufa dan konglomerat hasil erupsi Gunungapi Batturappe-Cindako berupa tufa dan breksi, penyebaran satuan batuan tufa dan breksi terdapat di Kecamatan Biringkanaya, Kecamatan Tamalate, dan Kecamatan Panakukang (Soehaimi, 2009).

Berdasarkan ciri jenis batumannya, secara umum batuan penyusun Daerah Makassar mempunyai sifat fisik keras dan padu. Di atas batuan tersebut dijumpai endapan yang berumur lebih muda yaitu endapan pasir pantai, endapan rawa, endapan delta, endapan limbah banjir dan endapan alur sungai. Selain itu dijumpai talus sebagai material sisa erosi permukaan yang terdiri atas krakal, kerikil, lempung, lumpur dan batu gamping koral yang terbentuk dalam lingkungan sungai, rawa, pantai dan delta.

Karakteristik litologi Daerah Makassar terbagi atas dua bagian yaitu:

1. Daerah aliran Sungai Jeneberang: bagian hulu daerah aliran Sungai Jeneberang disusun oleh batuan gunungapi yang terdiri dari aglomerat, breksi, lava, endapan lahar dan tufa.

Batuan gunungapi tersebut termasuk dalam batuan Gunungapi Batturappe Cindako dan batuan Gunungapi Lompobattang. Bagian tengah daerah aliran Sungai Jeneberang selain batuan gunungapi, dijumpai juga batuan sedimen laut dari Formasi Camba yang terdiri dari batupasir, batulempung, napal, batugamping, konglomerat dan breksi.

Bagian hilir Sungai Jeneberang tersusun atas endapan alluvial yang terdiri dari kerikil, pasir, lempung, lumpur, batugamping dan koral. Batuan yang menyusun daerah perairan pantai di sekitar muara Sungai Jeneberang adalah endapan aluvial pantai terdiri dari pasir, lempung dan lumpur.

2. Daerah pantai Kota Makassar: batuan yang menyusun pantai Kota Makassar berasal dari Formasi Camba yang berumur miosentengah sampai miosen akhir, batuan ini terdiri dari satuan batupasir, batulempung, tufa dan breksi. Bagian atas batuan yang berbentuk cekungan diisi oleh endapan pasir kasar dari Sungai Jeneberang dan endapan pasir halus dari Sungai Tallo sedangkan disepanjang pantai ditemukan pasir berbutir kasar dan halus yang berwarna abu-abu hingga kehitaman.

Secara umum geologi Kota Makassar tersusun oleh jenis tanah inceptisol yaitu jenis yang memiliki tingkat porositas yang rendah dan permeabilitas yang tinggi (ultisol). Jenis tanah yang demikian banyak mengandung lapisan tanah liat dan bersifat asam serta miskin unsur hara. Jenis tanah inceptisol dominan berada di bagian barat dan selatan Kota Makassar. Jenis tanah ini terdiri dari tanah aluvial, andosol, regosol dan glei humus. Jenis tanah ultisol dominan berada di sebelah utara Kota Makassar, jenis tanah ini termasuk di dalamnya podsolik merah kuning, latosol dan hidromorf kelabu. Pada bagian timur Kota Makassar jenis tanahnya merupakan kombinasi kedua jenis tanah inceptisol dan ultisol.

C. Stratigrafi

Berdasarkan peta geologi regional lembar Ujung Pandang, Benteng dan Sinjai, Sulawesi Selatan (Sukanto dan Supriatna, 1982) dan citra landsat Sulawesi bagian selatan, dinyatakan bahwa batuan penyusun Kota Makassar terdiri dari 3 (tiga) satuan batuan, yakni: Formasi Camba, Formasi Baturape Cindako, dan

satuan alluvial. Kemudian dikontrol oleh 5 periode tektonik yakni Oligo–Miosen, Miosen Tengah, Mio-Pliosen, Pilo-Plistosen dan Holosen.

Satuan batuan berumur Miosen Tengah sampai Pliosen menyusun Formasi Camba (Tmc) yang tebalnya mencapai 4.250 meter dan menindih tak selaras batuan-batuan yang lebih tua. Formasi Camba, merupakan batuan sedimen laut yang berselingan dengan batuan gunung api, menyebar dari Utara ke Selatan bagian sebelah Timur Kota Makassar.

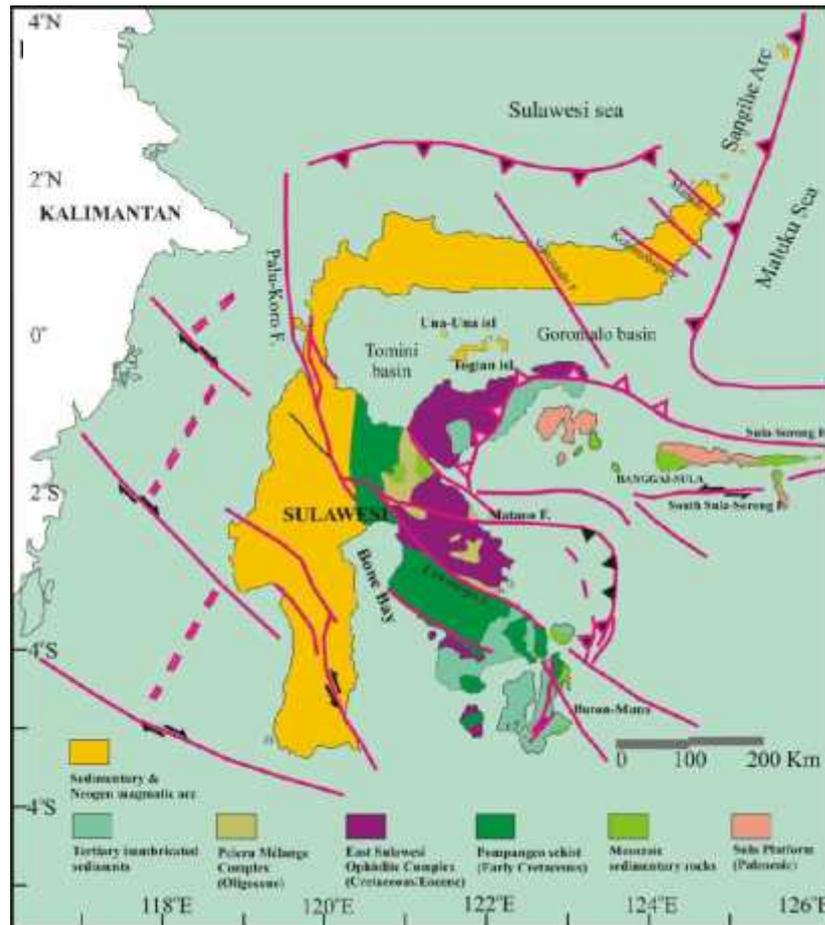
Batuan Vulkanik Camba merupakan batuan yang terbentuk pada sekuen pengendapan Tersier, yaitu berumur Miosen Akhir hingga Pliosen, terdiri dari tufa halus, tufa pasir, dan berselingan dengan lapili, di beberapa tempat dijumpai breksi vulkanik. Breksi vulkanik terdiri dari pecahan batuan andesit dengan ukuran komponen pasir sampai bongkah, dengan masa dasar tufa halus hingga kasar. Warna kelabu kecoklatan sampai kehitaman.

Formasi Baturape–Cindako merupakan batuan dari hasil erupsi gunung api baik berupa efusif maupun eksplosif, berumur Pliosen Akhir. Menyebar di bagian Selatan Kota Makassar. Satuan ini merupakan satuan batuan gunungapi yang berumur Kuartar (Plistosen), yang terdiri dari lelehan lava dan tersisip tufa halus sampai kasar, breksi vulkanik dengan kedudukan lapisan batuan Timur Laut–Barat Daya dengan kemiringan berkisar 12° - 14° ke arah Tenggara.

Aliran lava basal tersingkap berwarna abu-abu gelap, kompak dan pada bagian atasnya dijumpai lubang-lubang bekas pelepasan gas. Breksi vulkanik berwarna coklat kehitaman, terdiri dari pecahan andesit sampai basal dan batu apung, dan sangat lolos air, bagian permukaan bersifat lepas. Tufa berbutir kasar berwarna putih kekuningan, tersusun dari fragmen bahan beku, dengan masa dasar gelas, lunak, lolos air. Satuan aluvial yang terdiri dari kerikil, pasir, lempung, lumpur, dan batu gamping koral. (Husain dan Sultan, 2012).

D. Struktur Patahan

Berdasarkan data tektonik geologi dan kegempaan, maka daerah Sulawesi dapat diindikasikan memiliki 3 jenis sumber gempabumi yaitu sumber gempabumi patahan, sumber gempabumi penunjaman dan sumber gempabumi tersebar (*diffuse*). Lajur patahan kerak bumi dangkal daerah Sulawesi yang menimbulkan kejadian gempabumi berhubungan dengan kegiatan patahan, seperti seperti Patahan Walanae (Sulawesi Selatan), Palu Koro (dari Flores, Palu hingga Selat Makassar), Patahan Gorontalo, Patahan Batui (Sulawesi Tengah), patahan naik Selat Makassar dan Patahan Matano, Patahan Lawanoppo dan Kolaka (Sulawesi Tenggara) seperti pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Peta tektonik dan struktur Sulawesi (Pasau dan Tanauma, 2011)

Kejadian gempa bumi di Sulawesi Selatan dan sekitarnya terletak pada lajur gempa bumi dengan kedalaman sangat bervariasi dari dangkal hingga sedang (0-100km). Gempa bumi dangkal (0-33km) umumnya terletak pada lajur struktur Sesar Walanae yang berarah barat laut tenggara, mulai dari barat daya Kota Mamuju, Majene, Pinrang, Watansoppeng hingga Bulukumba dan menerus hingga pantai timur Pulau Selayar. Selain gempa bumi dangkal (0-33km), pada lajur ini juga berasosiasi gempa bumi berkedalaman sedang (33-100km).

Hal ini menunjukkan bahwa Sesar Walanae ini merupakan sesar dengan penetrasi cukup dalam. Diduga Sesar Walanae ini mempunyai kemiringan ke arah barat

dengan sudut lebih besar 60° . Beberapa gempa bumi lebih besar 6.0 SR pernah terjadi pada lajur ini, yaitu gempa bumi Bulukumba (1828), Tinambung (1967), Majene (1969), Mamuju (1972 dan 1974), serta gempa bumi Pinrang dan Tinabung memperlihatkan sesar mendatarnaik, blok sebelah barat cenderung bergerak mengiri dan naik. Daerah Makassar terletak pada jarak yang relatif jauh dari sumberseismik aktif. Walaupun demikian endapan permukaan yang lunak menyebabkan tanah di Makassar beresonansi dan mengamplifikasi gelombang akibat gempa bumi jauh, serta getaran mikrotremor yang bersumber dari dalam bumi (BMKG, 2006).

E. Riwayat Kegempaan

Wilayah Kota Makassar termasuk wilayah gempa zona 4 dan pernah terjadi gempa bumi pada periode tahun 1951–1960 sekitar 50 km dari pusat kota pada skala > 6 Skala Richter. Gempa bumi yang pernah terjadi di Selat Makassar terjadi pada 12 Desember 2010 dengan magnitudo 5,9 SR pusat gempa terletak 232 km ke arah baratdaya Makassar, berada pada daerah perpotongan patahan Selat Makassar dan patahan Laut Flores Barat. Tercatat di setiap stasiun pencatat gempa bumi stasioner di Sulawesi Selatan yaitu di BMKG Maros, BMKG Makassar, dan BMKG Gowa (Soehaimi, 2009).

F. Penelitian Terdahulu

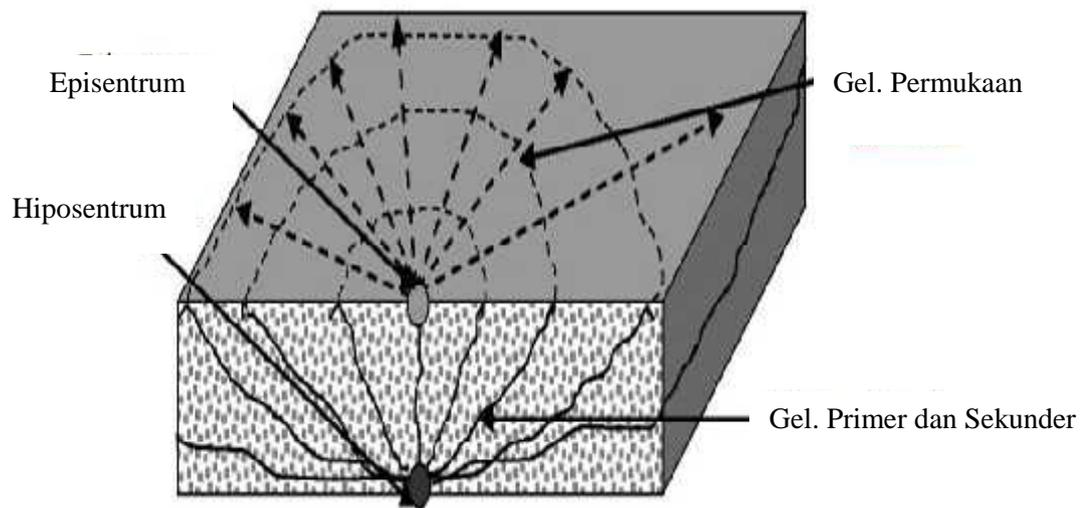
Berbagai penelitian mikrotremor pernah dilakukan di beberapa kecamatan di daerah Makassar diantaranya oleh Assegaf, 2014; Koddeng, 2011; Syamsuddin, 2014; Rahmatullah, 2013; Muqtadir, 2013; Suhendratman, 2013; dan Rusdin, 2015. Penelitian tersebut dapat dijadikan referensi umum mengenai daerah Makassar terkait mikrozonasi berbasis mitigasi gempa bumi menggunakan hasil pengukuran mikrotremor berdasarkan analisis HVSR.

III. TEORI DASAR

A. Konsep Gelombang Seismik

Gempa bumi umumnya menggambarkan proses dinamis yang melibatkan akumulasi *stress* (tekanan) dan pelepasan *strain* (regangan). Ketika gempa terjadi, gelombang yang merambat melalui sekitar kerak bumi disebut gelombang seismik. Gelombang seismik merupakan gelombang yang merambat melalui bumi. Perambatan gelombang ini bergantung pada sifat elastisitas batuan. Gelombang seismik merupakan gelombang yang merambat melalui bumi. Perambatan gelombang ini bergantung pada sifat elastisitas batuan.

Gelombang seismik termasuk dalam gelombang elastik karena medium yang dilalui yaitu bumi bersifat elastik. Oleh karena itu sifat penjalaran gelombang seismik bergantung pada elastisitas batuan yang dilewatinya. Penjalaran gelombang seismik ditunjukkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Penjalaran gelombang seismik (Beiser dan Arthur, 1999)

Penjalaran gelombang tersebut diawali dari hiposentrum yang terletak di dalam lapisan bumi. Dari hiposentrum muncul gelombang primer dan sekunder yang dirambatkan ke segala arah. Episentrum adalah suatu titik atau garis di permukaan bumi yang tepat berada di atas hiposentrum. Episentrum juga merupakan titik atau garis dimana getaran pertama kali muncul atau terjadi di permukaan bumi. Dari episentrum kemudian gelombang permukaan dirambatkan secara horizontal ke segala arah.

1. Gelombang Seismik

Gelombang seismik dapat dibedakan berdasarkan tempat penjarannya yaitu gelombang tubuh (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*).

- Gelombang Badan/ *Body Wave*

Gelombang badan adalah gelombang yang menjalar dalam media elastik dan arah perambatannya ke seluruh bagian di dalam bumi. Berdasarkan gerak partikel pada media dan arah penjarannya gelombang dapat dibedakan menjadi gelombang P dan gelombang S. Gelombang P disebut dengan gelombang kompresi/gelombang longitudinal. Gelombang ini memiliki kecepatan rambat paling besar dibandingkan dengan gelombang seismik yang lain, dapat merambat melalui medium padat, cair dan gas. Gelombang seismik pada keadaan tidak teredam dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (1)$$

dengan

$$\nabla = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2)$$

dengan ψ adalah suatu fungsi gelombang yang direalisasikan sebagai usikan yang menjalar, v adalah kecepatan gelombang (m/s), t adalah waktu (s).

Dalam bentuk tiga dimensi, komponen perpindahan titik P (x , y , dan z) ditulis dengan (u , v dan w), sehingga regangan normal tunjukkan oleh persamaan (5), regangan geser persamaan (6), sedangkan komponen regangan pada benda yang mengalami perpindahan secara rotasional ditunjukkan oleh persamaan (5).

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}; \epsilon_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \epsilon_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (4)$$

$$\theta_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right); \theta_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right); \theta_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Perubahan dimensi yang disebabkan oleh *strain* normal akan mengakibatkan perubahan volume. Perubahan volume per satuan volume disebut dilatasi (Δ), misal $\Delta = \theta$ (Telford, 1992).

$$\theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6)$$

Hubungan antara tegangan dan regangan yang menimbulkan pergeseran sederhana disebut modulus Rigiditas dinyatakan dalam persamaan 7. Hubungan antara konstanta elastik pada medium homogen isotropik saling terkait membentuk persamaan (8).

$$\mu = \frac{\text{Tegangan geser}}{\text{regangan}} = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (8)$$

Dengan λ dan μ disebut konstanta Lamé, dan μ menyatakan hambatan regangan geser. Persamaan rambat gelombang P dan S dapat diturunkan dari Hukum Hooke yang menyatakan hubungan tegangan (gaya per satuan luas) dan regangan (perubahan dimensi) sebagai:

$$\sigma_{ii} = \theta + 2\mu\varepsilon_{ii}; i = x, y, z \quad (9)$$

$$\sigma_{ij} = \mu\varepsilon_{ij}; j = x, y, z \text{ dan } i \neq j \quad (10)$$

Dalam hukum II Newton, gaya (F) adalah perkalian antara massa (m) dan percepatannya (a). Misal terdapat pergeseran (μ) sebagai akibat dari tekanan sepanjang sumbu-x, maka hukum Newton dapat dinyatakan dalam persamaan 11.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (11)$$

$$F = ma = \rho dx dy dz a = \rho dx dy dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (12)$$

Dengan ρ adalah massa jenis bahan. Persamaan (11) merupakan tekanan sepanjang sumbu-x dengan pergeseran u dan persamaan (12) merupakan tekanan dalam arah sumbu-z dengan pergeseran w .

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (14)$$

Gelombang yang merambat pada suatu media ke segala arah, secara tiga dimensi arah perambatan gelombang dinyatakan dengan sumbu x , y , dan z . Untuk menentukan persamaan gelombang ini, persamaan 11, 13, dan 14 masing-masing dideferensialkan terhadap x , y , dan z , sehingga diperoleh persamaan 16, 18, dan 20:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \mu \nabla^2 u \right\} \quad (15)$$

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \mu \nabla^2 v \right\} \quad (17)$$

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \mu \nabla^2 w \right\} \quad (19)$$

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (20)$$

Dengan menjumlahkan persamaan 16, 18, dan 20, maka:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (21)$$

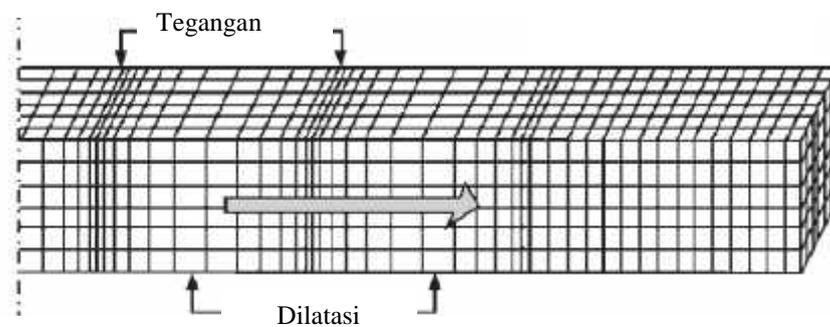
$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho} \nabla^2 \theta \quad (22)$$

Persamaan 22 merupakan persamaan gelombang P dengan kecepatan rambat yang ditunjukkan pada persamaan 23:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (23)$$

Dengan λ merupakan konstanta lame, μ merupakan modulus geser, dan ρ merupakan densitas.

Gambar 6 merupakan bentuk gelombang primer, dimana gerak partikel medium bergerak bolak-balik searah dengan arah rambat gelombang yang mempengaruhi pergerakan partikel tersebut.



Gambar 6. Ilustrasi gelombang primer (Elnashai dan Sarno, 2008)

Gelombang yang memiliki pergerakan partikel tegak lurus dengan arah penalaran gelombang, maka disebut dengan gelombang geser (gelombang sekunder atau *secondary wave* atau gelombang S. Ada dua komponen gelombang S, yaitu gelombang S untuk arah vertikal (*Shear Vertical*), dan gelombang untuk arah

horizontal (*Shear Horizontal*). Ke dua arah gelombang S ini saling tegak lurus.

Kecepatan rambat gelombang S (V_s) adalah:

Untuk mendapatkan persamaan gelombang S pada sumbu x , persamaan 13 diturunkan terhadap z , sehingga menghasilkan persamaan 24:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 \theta}{\partial y \partial z} + \mu \nabla^2 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (24)$$

dan persamaan 16 diturunkan terhadap y ,

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) = (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z \partial y} + \mu \nabla^2 \frac{\partial w}{\partial y} \quad (25)$$

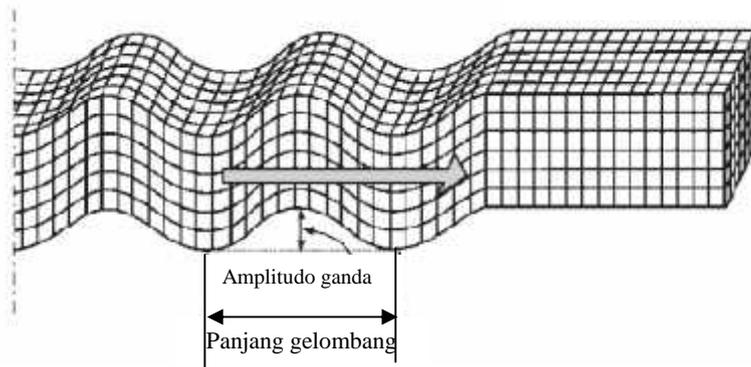
dengan mengurangkan persamaan 24 dan persamaan 25 maka:

$$\begin{aligned} \frac{2\partial^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)}{\partial t^2} &= 2 \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} &= \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \theta_x \end{aligned} \quad (26)$$

Persamaan 26 merupakan persamaan gelombang S dengan kecepatan rambat yang ditunjukkan pada persamaan 27:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (27)$$

Dengan μ adalah modulus geser dan ρ adalah densitas. Pada cairan atau gas modulus gesernya adalah nol, sehingga gelombang S tidak bisa merambat dalam medium tersebut (Brown, 2005). Adapun bentuk gelombang sekunder ditunjukkan pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Ilustrasi gelombang sekunder (Elnashai dan Sarno, 2008)

Pada **Tabel 1** merupakan perbandingan kecepatan rambat gelombang primer dengan kecepatan gelombang sekunder jika melalui material tertentu.

Tabel 1. Kecepatan rambat gelombang P dan S pada medium rambatnya (Febriana, 2007)

No	Material	Kecepatan V_p (m/s)	Kecepatan V_s (m/s)
1.	Udara	332	-
2.	Air	1400-1500	-
3.	Minyak bumi	1300-1400	-
4.	Besi	6100	3500
5.	Semen	3600	2000
6.	Granit	5500	2800-3000
7.	Basalt	6300	3200
8.	Batu pasir	1400-4300	700-2800
9.	Batu gamping	5900-6100	2800-3000
10.	Pasir (tidak jenuh)	200-1000	80-400
11.	Pasir (jenuh)	800-2200	320-880
12.	Tanah liat	1000-2500	400-1000

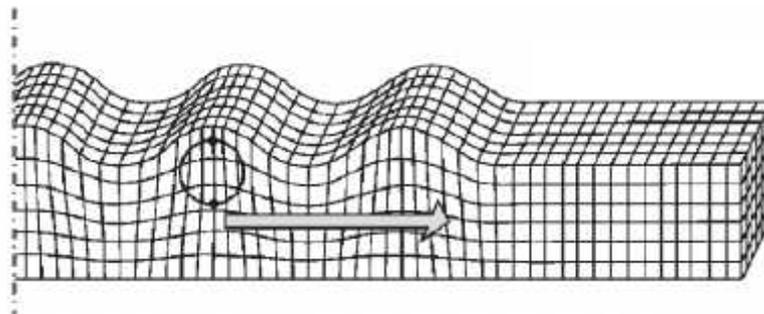
- Gelombang Permukaan (*surface wave*)

Gelombang permukaan merupakan gelombang seismik yang merambat secara paralel ke permukaan bumi tanpa adanya penyebaran energi ke dalam interior bumi. Berdasarkan pada sifat gerakan partikel media elastik, gelombang

permukaan merupakan gelombang yang kompleks dengan frekuensi yang rendah dan amplitudo yang besar, yang menjalar akibat adanya efek *free surface* dimana terdapat perbedaan sifat elastik (Susilawati, 2008). Jenis dari gelombang permukaan ada dua yaitu gelombang Reyleigh dan gelombang *Love*.

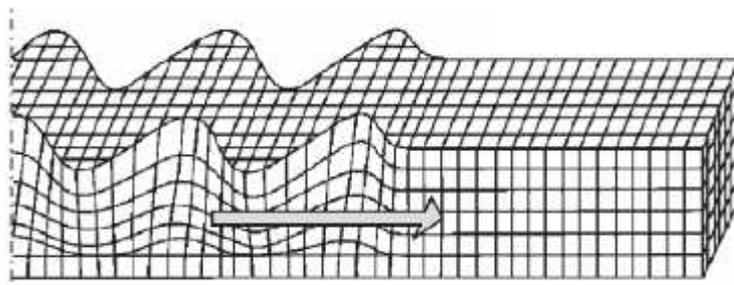
Gelombang *Reyleigh* merupakan gelombang permukaan yang Orbit gerakannya elips tegak lurus dengan permukaan dan arah penjarannya, seperti pada **Gambar 8**. Gelombang jenis ini adalah gelombang permukaan yang terjadi akibat adanya interferensi antara gelombang kompresi dengan gelombang geser secara konstruktif. Persamaan dari kecepatan gelombang *Reyleigh* (V_r) adalah sebagai berikut :

$$V_r = 0,92 \sqrt{V_s} \quad (28)$$



Gambar 8. Ilustrasi gelombang *rayleigh* (Elnashai dan Sarno, 2008)

Gelombang *Love* merupakan gelombang permukaan yang menjalar dalam bentuk gelombang transversal yang merupakan gelombang S horizontal yang penjarannya paralel dengan permukaannya (Gadallah dan Fisher, 2009) seperti pada **Gambar 9**.



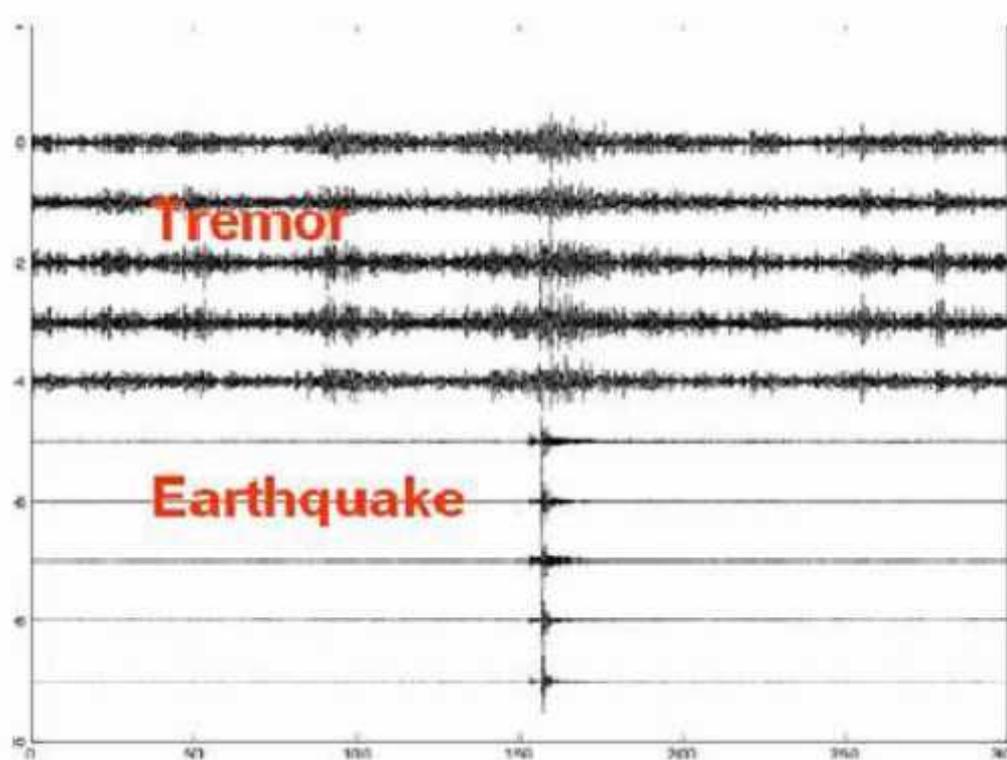
Gambar 9. Ilustrasi gelombang *love* (Elnashai dan Sarno, 2008)

B. Mikrotremor

Struktur bawah permukaan tanah dapat diketahui dengan survei pengukuran mikrotremor. Mikrotremor dikenal sebagai getaran alami (*ambient vibration*) berasal dari dua sumber utama yaitu alam dan manusia. Pada frekuensi rendah yaitu dibawah 1 Hz, sumber mikrotremor adalah alam. Gelombang laut menimbulkan *ambient vibration* dengan frekuensi sekitar 0.2 Hz sedangkan frekuensi sekitar 0.5 Hz dihasilkan oleh interaksi antara gelombang laut dan pantai. Pada frekuensi di bawah 0.1 Hz, mikrotremor diasosiasikan dengan aktivitas di atmosfer. Frekuensi tinggi, lebih dari 1 Hz bisa ditimbulkan oleh angin dan aliran air. Pada frekuensi tinggi yaitu lebih dari 1 Hz, sumber utamanya adalah aktifitas manusia seperti lalu lintas kendaraan, mesin dan lainnya (Takai dan Tanaka, 1961).

Sehingga mikrotremor dapat diartikan sebagai getaran harmonik alami tanah yang terjadi secara terus menerus, terjebak di lapisan sedimen permukaan, terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi yang tetap, disebabkan oleh getaran mikro di bawah permukaan tanah dan kegiatan alam lainnya. Gempa

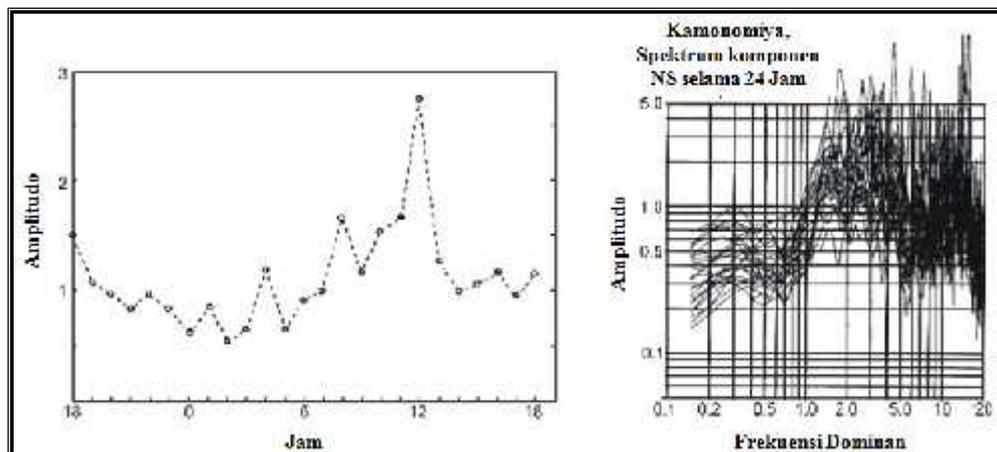
bumi dan tremor dapat dibedakan dengan mudah bila dilihat pada rekaman seismograf. Getaran tremor berupa getaran yang terus menerus, tidak dapat ditentukan dimana awal getarannya secara jelas. Getaran gempa bumi berupa getaran yang besar dan secara tiba-tiba, seperti pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Perbedaan sinyal tremor dan gempa bumi
(Ibrahim dan Subardjo, 2004)

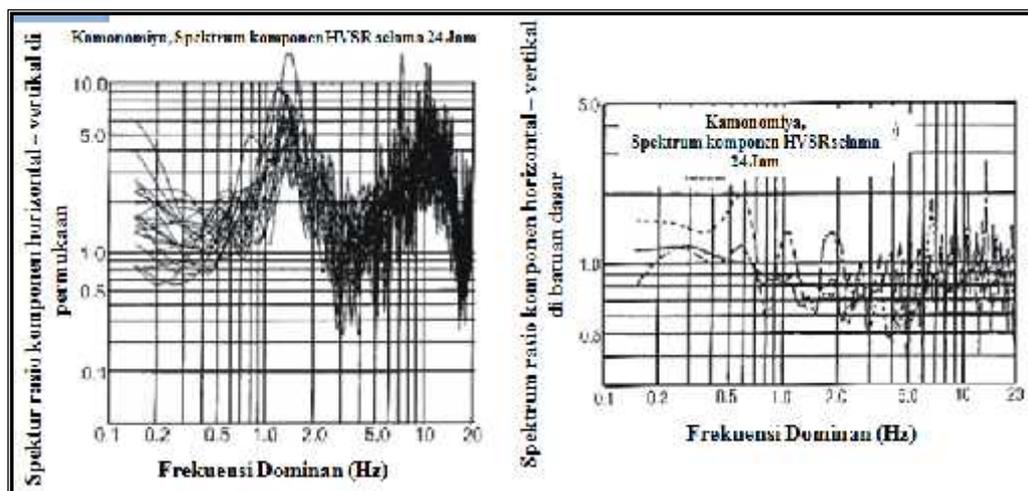
Amplitudo gelombang mikrotremor berubah terhadap waktu sesuai dengan tingkat intensitas sumber di permukaan, tetapi frekuensi/periode gelombang relatif tetap (Kanai, 1983 dan Nakamura, 1989). **Gambar 11** menunjukkan hasil pengamatan perubahan nilai amplitudo mikrotremor komponen horizontal utara–selatan pada setiap jam sepanjang hari di stasiun Kamonomiya beserta spektrumnya. Pada malam hari amplitudo mikrotremor relatif konstan karena intensitas kegiatan kota relatif rendah, sedangkan pada siang hari menunjukkan perubahan amplitudo yang

cukup besar. Puncak amplitudo menunjukkan puncak kegiatan kota. Dari gambar tersebut spektrum dapat dilihat bahwa nilai frekuensi dominan tidak menunjukkan perubahan yang berarti.



Gambar 11. Perubahan nilai amplitudo gelombang mikrotremor terhadap waktu pada setiap jam yang diukur di Kota Kamonomiya selama 24 jam dan nilai frekuensi dominannya (Nakamura, 1989)

Gambar 12 menunjukkan rasio spektrum komponen horizontal terhadap vertikal di permukaan dan di batuan dasar. Stabilitas karakteristik lokal dapat tercermin dengan jelas pada rasio ini, dimana nilai rasio spektrum di permukaan hampir tidak berubah secara signifikan walaupun nilai amplitudo sepanjang hari berubah cukup besar. Begitu pula nilai frekuensi dominan menunjukkan nilai yang stabil. Pada batuan dasar dapat dilihat rasio spektrum cenderung datar mendekati nilai 1, yang berarti gerak partikel pada komponen horizontal dan vertikal mendekati nilai yang sama.



Gambar 12. Rasio Spektrum Horizontal–Vertikal di permukaan dan di batuan dasar pada Stasiun Kamonomiya setiap jam selama 24 jam (Nakamura, 1989).

Lachet dan Brad (1994) melakukan uji simulasi dengan menggunakan 6 model struktur geologi sederhana dengan kombinasi variasi kontras kecepatan gelombang geser dan ketebalan lapisan *soil*. Hasil simulasi menunjukkan nilai puncak frekuensi berubah terhadap variasi kondisi geologi. Selain itu, Lachet dan Brad menyimpulkan bahwa gelombang yang cukup dominan di dalam gelombang mikrotremor disamping gelombang *Rayleigh* adalah gelombang geser.

1. Teknik perbandingan spektra nakamura (Analisis HVSR)

Metode HVSR biasanya digunakan pada seismik pasif (mikrotremor) tiga komponen. Metode ini juga dikenal sebagai metode Nakamura, seperti yang diperkenalkan oleh Nakamura (1989) dari ide dasarnya oleh Nogoshi dan Igarashi yang menunjukkan tingkat antara frekuensi puncak terendah HVSR dari gelombang *Rayleigh* dan frekuensi resonansi fundamental dari pengukuran situs.

Pada prinsipnya metode ini menghitung rasio spektrum antara komponen total resultan horizontal terhadap komponen vertikal.

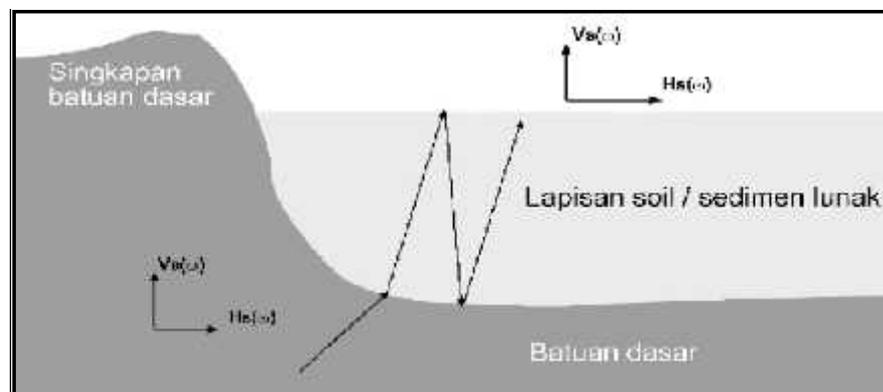
Menurut Nakamura, efek amplitudo dari sumber, A_S dapat dihitung dengan perbandingan:

$$A_S () = \frac{V_S(\omega)}{V_B(\omega)} \quad (29)$$

Dimana V_S adalah spektrum amplitudo dari komponen vertikal getaran pada permukaan, V_B adalah spektrum amplitudo dari getaran pada *half space*. Nakamura kemudian menetapkan estimasi dari respon lokasi S_E , dengan perbandingan:

$$S_E () = \frac{H_S(\omega)}{H_B(\omega)} \quad (30)$$

Dimana $H_S ()$ dan $H_B ()$ masing-masing adalah spektrum mikrotremor komponen horizontal di permukaan dan di batuan dasar. Pengukuran mikrotremor di batuan dasar diwakili oleh pengukuran di singkapan batuan dasar (**Gambar 13**).



Gambar 13. Ilustrasi penguatan gelombang komponen horizontal pada sedimen lunak (Marjiyono, 2010)

Untuk mengimbangi S_E dengan efek dari sumber, Lermo dan Chaves-Garcia (1993) menghitung fungsi respon lokasi modifikasi S_M yaitu:

$$S_M(\omega) = S_E(\omega) / A_S(\omega) \quad (31)$$

atau

$$S_M(\omega) = \frac{H_S(\omega)/V_S(\omega)}{H_B(\omega)/V_B(\omega)} \quad (32)$$

Dimana $S_M(\omega)$ adalah fungsi transfer untuk lapisan soil. Karena komponen mikrotremor pada batuan dasar sama ke segala arah maka nilai $\frac{H_B(\omega)}{V_B(\omega)} = 1$, sehingga persamaan 32 menjadi :

$$S_M(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)} \quad (33)$$

Dari persamaan 32, maka fungsi transfer untuk lapisan *soil* hanya bergantung pada hasil pengukuran di permukaan. Dalam pengamatan di lapangan ada dua komponen horizontal yang diukur yaitu komponen utara–selatan dan komponen barat–timur, sehingga komponen horizontal yang digunakan adalah resultan dari kedua komponen, yaitu ditunjukkan dalam persamaan 34.

$$S_M(\omega) = \frac{\sqrt{H_{SN}(\omega)^2 + H_{WE}(\omega)^2}}{V_S(\omega)} \quad (34)$$

Dimana $H_{SN}(\omega)$ adalah spektrum mikrotremor komponen horizontal utara–selatan dan $H_{WE}(\omega)$ adalah spektrum mikrotremor komponen horizontal barat–timur.

Teknik perbandingan spektra gelombang komponen horizontal terhadap vertikal (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) dari *noise* gelombang seismik dapat digunakan untuk memperkirakan kedalaman *bedrock* secara cepat. Metode H/V

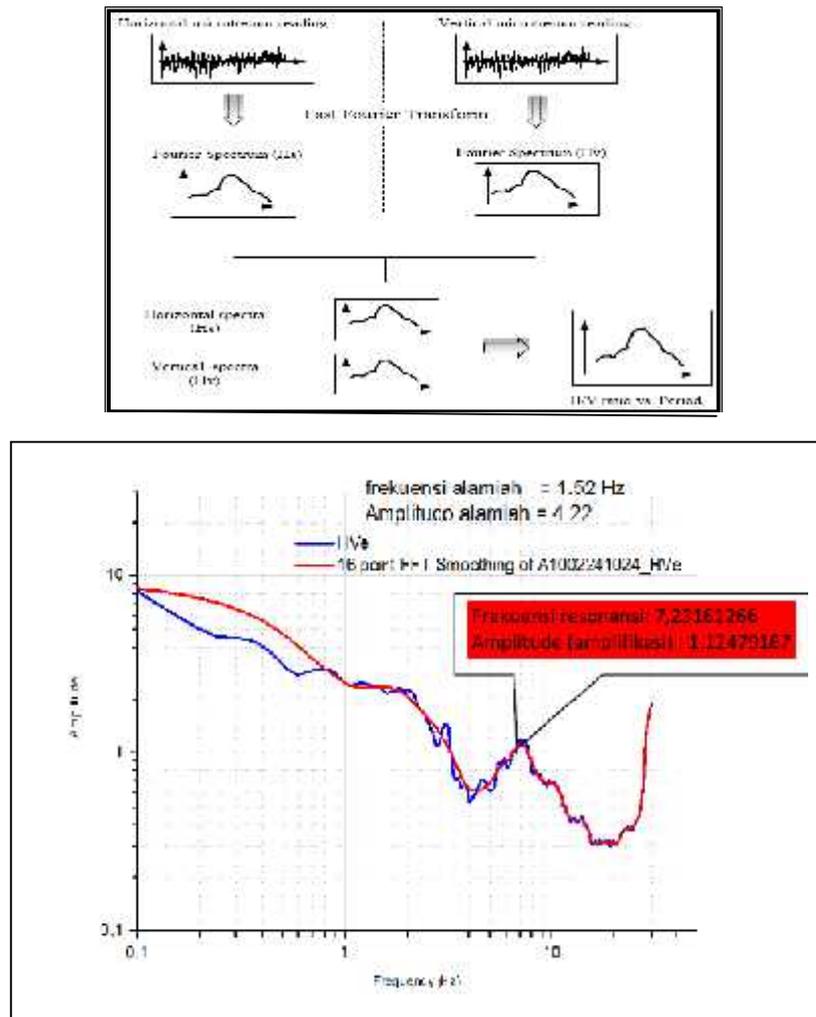
berguna untuk menunjukkan frekuensi resonansi dominan (f_0) dan nilai puncak HVSR (A), yang mempresentasikan karakteristik dinamis lapisan sedimen. Nakamura merumuskan metode ini berdasarkan 3 hipotesis utama yaitu:

1. *Ambient noise* atau bunyi alami yang ditimbulkan oleh refleksi dan refraksi gelombang geser (*shear wave*) dalam lapisan tanah dangkal dan oleh gelombang permukaan S.
2. Sumber *noise* lokal tidak mempengaruhi *ambient noise* pada bagian bawah struktur yang tidak terkonsolidasi.
3. Lapisan tanah yang rapuh atau lunak tidak menguatkan komponen vertikal dari *ambient noise*.
4. Parameter penting yang dihasilkan dari metode HVSR ialah frekuensi natural dan amplifikasi.

HVSR yang terukur pada tanah yang bertujuan untuk karakterisasi geologi setempat, frekuensi natural dan amplifikasi berkaitan dengan parameter fisik bawah permukaan. Sedangkan HVSR yang terukur pada bangunan berkaitan dengan kekuatan bangunan dan keseimbangan bangunan.

Nakamura (2000) berpendapat bahwa HVSR merupakan gelombang badan, sedangkan Bonnefoy-Clauded menunjukkan bahwa HVSR terdiri atas gelombang permukaan, dalam hal ini gelombang *Love* dan *Rayleigh*. Frekuensi HVSR sangat berkaitan dengan sifat fisik dari situs seperti ketebalan lapisan, densitas, atau kecepatan gelombang yang berguna untuk karakterisasi sifat fisik dari struktur geologi.

Hasil analisa tersebut menghasilkan spektrum mikrotremor dengan puncak spektrum pada frekuensi resonansinya. Adapun proses dalam penentuan spektrum H/V yang memperlihatkan hubungan antara perbandingan rasio *spektrum fourier* dari sinyal mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya (Nakamura, 1989) seperti pada **Gambar 14**.



Gambar 14. Proses penentuan frekuensi terhadap spektrum H/V dengan FFT (Aswandi, 2005)

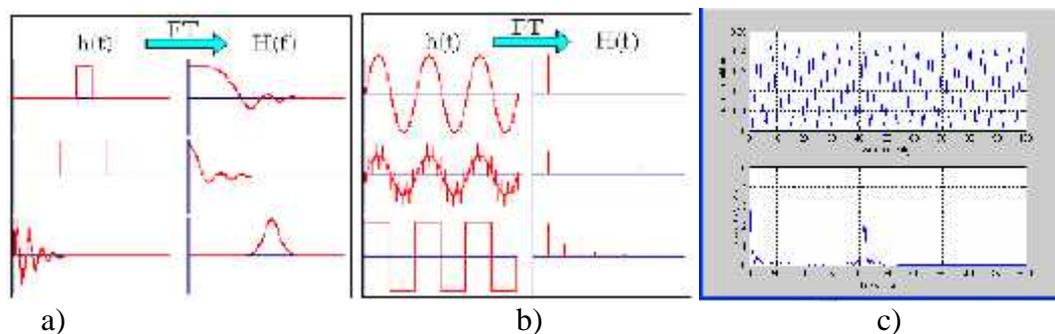
Pada proses penentuan puncak spektrum HVSR, terdapat fungsi algoritma FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk merepresentasikan sinyal dalam domain waktu menjadi spektrum dalam domain frekuensi. Transformasi Fourier membagi

sebuah sinyal menjadi frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial yang kompleks.

Domain waktu (periode) didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan sebuah gelombang untuk mencapai suatu gelombang penuh. Domain frekuensi didefinisikan sebagai jumlah gelombang yang terjadi dalam 1 detik. Frekuensi secara sederhana merupakan kebalikan dari waktu, sehingga waktu yang satuannya adalah detik (*second*) akan menjadi Hertz (1 per *second*) hanya akan memiliki tepat satu nilai spektrum. Transformasi Fourier dapat dituliskan dengan persamaan 35.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (35)$$

Dengan $X(t)$ adalah sinyal dalam domain waktu, $e^{-j2\pi ft}$ adalah fungsi *kernel*, $X(f)$ adalah fungsi dalam domain frekuensi, serta f adalah frekuensi. Persamaan (44) digunakan untuk mentransformasikan sinyal dari domain waktu ke dalam domain frekuensi. Ada pun kelas dasar dari algoritma FFT yaitu *decimation in time* (DIT) dan *decimation in frequency* (DIF) sebagai contoh bentuk gelombang konversi, seperti pada **Gambar 15**.



Gambar 15. Program FFT (*Fast Fourier Transform*). (a) Konversi domain waktu terhadap domain frekuensi (DIF). (b) Konversi domain frekuensi terhadap domain waktu (DIT). (c) contoh sinyal/gelombang konversi (Thomson, 1980)

2. Penguatan guncangan tanah (Amplifikasi)

Amplifikasi merupakan perbesaran gelombang seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan, dengan kata lain gelombang seismik akan mengalami perbesaran, jika merambat pada suatu medium ke medium lain yang lebih lunak dibandingkan dengan medium awal yang dilaluinya. Semakin besar perbedaan itu, maka perbesaran yang dialami gelombang tersebut akan semakin besar.

Nilai faktor penguatan (amplifikasi) tanah berkaitan dengan perbandingan kontras impedansi lapisan permukaan dengan lapisan di bawahnya. Bila perbandingan kontras impedansi kedua lapisan tersebut tinggi maka nilai faktor penguatan juga tinggi, begitu pula sebaliknya (Nakamura, 2000). Maka amplifikasi dapat dituliskan sebagai suatu fungsi perbandingan nilai kontras impedansi, yaitu:

$$A_0 = \left\{ \frac{\rho_b \cdot v_b}{\rho_s \cdot v_s} \right\} \quad (36)$$

Dimana A_0 adalah amplifikasi, ρ_b adalah densitas batuan dasar (gr/ml), merupakan kecepatan rambat gelombang di batuan dasar (m/detik), merupakan kecepatan rambat gelombang di batuan lunak (m/detik), merupakan rapat massa dari batuan lunak (gr/ml), (Ambarrini, 2014).

Adapun besaran amplifikasi menurut Wakamatsu (2006) dalam membuat *Hazard Zoning Map* untuk wilayah Jepang. Amplifikasi dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Log Amp} = 2.367 - 0.852 \log V_{S30} \pm 0.166 \quad (37)$$

3. Frekuensi resonansi

Frekuensi diartikan sebagai jumlah gelombang yang terjadi dalam satu detik. Frekuensi didefinisikan secara sederhana sebagai kebalikan dari waktu. Sehingga waktu yang satuannya adalah detik (*second*) akan menjadi Hertz (1-per *second*) hanya akan memiliki tepat satu nilai spektrum, yang dikenal dengan spektrum frekuensi (Parwatiningtyas, 2008). Struktur bangunan yang memiliki nilai f_0 sama dengan nilai f_0 tanah akan mengalami resonansi jika terjadi gempa bumi. Efek resonansi akan memperkuat getaran gempa bumi sehingga menyebabkan bangunan akan runtuh saat terjadi getaran gempa bumi kuat.

Sehingga setelah dilakukan survei mikrotremor, dianjurkan untuk membangun bangunan yang tidak sama dengan frekuensi natural tanah untuk menghindari terjadinya efek resonansi saat gempa bumi terjadi. Dari nilai frekuensi natural yang terukur di permukaan, dapat diketahui karakteristik batuan di bawahnya, hal tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2** tentang klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi natural mikrotremor berikut.

Tabel 2. Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi resonansi mikrotremor oleh Kanai (Arifin dkk, 2014)

Klasifikasi Tanah		Frekuensi natural (Hz)	Klasifikasi Kanai	Deskripsi
Tipe	Jenis			
Tipe IV	Jenis I	6,667 – 20	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan <i>Hard sandy, gravel</i> , dll	Ketebalan sedimen permukaannya sangat tipis, didominasi oleh batuan keras
	Jenis II	10 – 4	Batuan alluvial, dengan ketebalan 5m. Terdiri dari <i>sandy-gravel, sandy hard clay, loam</i> , dll.	Ketebalan sedimen permukaannya masuk dalam kategori menengah 5 hingga 10 meter
Tipe III	Jenis III	2,5 – 4	Batuan alluvial, dengan ketebalan >5m. Terdiri dari <i>sandy-gravel, sandy hard clay, loam</i> , dll.	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10 hingga 30 meter
Tipe II	Jenis IV	< 2,5	Batuan alluvial, yang terbentuk dari sedimentasi delta, top soil, lumpur, dll. Dengan kedalaman 30m atau lebih	Ketebalan sedimen permukaannya sangatlah tebal
Tipe I				

4. Periode dominan

Secara umum periode dominan didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan gelombang mikrotremor untuk merambat melewati lapisan endapan sedimen permukaan atau mengalami satu kali pemantulan terhadap bidang pantulnya ke permukaan. Periode dominan memiliki keterkaitan yang sangat dekat dengan ketebalan dan tingkat kekerasan lapisan sedimen lunak (*soft soil*). Daerah yang memiliki periode dominan tinggi umumnya memiliki kerentanan untuk mengalami kerusakan wilayah yang cukup tinggi jika terlanda gempa bumi.

Hal ini dikarenakan periode dominan berbanding lurus dengan nilai penguatan guncangan/amplifikasi (Arfin dkk, 2014). Nilai periode dominan juga mengindikasikan karakter lapisan batuan yang ada di suatu wilayah (**Tabel 3**).

Tabel 3. Klasifikasi tanah menurut Kanai (Arifin dkk, 2014)

Klasifikasi Tanah Kanai	Periode (T) detik	Keterangan	Deskripsi
Jenis I	< 0,25	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan <i>Hard sandy, gravel</i> .	Batuan Keras
Jenis II	0,25 – 0,5	Batuan alluvial, dengan ketebalan 5m. Terdiri dari <i>sandy-gravel, sandy hard clay, loam</i> .	Dilluvial
Jenis III	0,5 – 0,75	Batuan alluvial, hampir sama dengan jenis II, hanya dibedakan oleh adanya formasi <i>bluff</i> .	Alluvial
Jenis IV	Lebih dari 0,75	Batuan alluvial, yang terbentuk dari sedimentasi delta, top soil, lumpur, dll. Dengan kedalaman 30m atau lebih.	Alluvial lunak

Nilai periode dominan didapatkan berdasarkan perhitungan berikut,

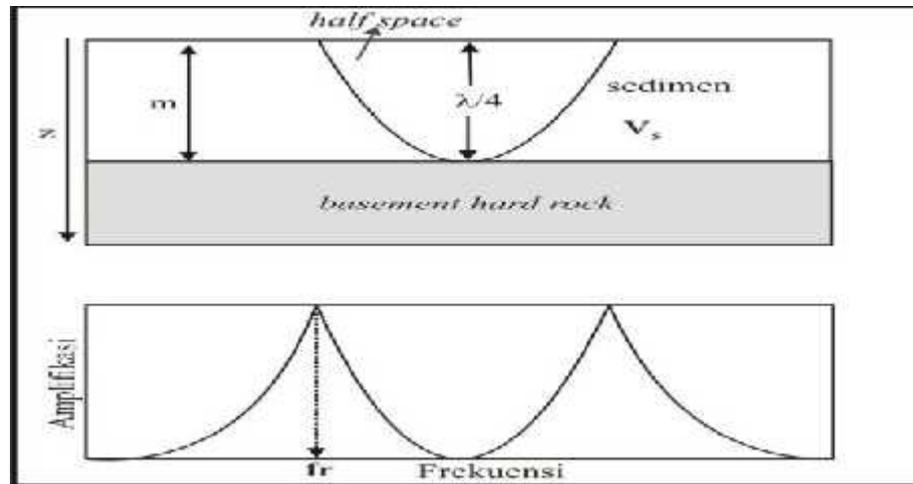
$$T_0 = 1/f_0 \quad (38)$$

Dimana, T_0 adalah periode dominan, f_0 adalah frekuensi dominan dan ketebalan lapisan sedimen dapat dihitung berdasarkan nilai frekuensi dominan tersebut.

5. Kecepatan gelombang geser (V_{s30})

Pada umumnya daerah rawan kerusakan bangunan akibat gempa bumi terjadi pada daerah sedimen lunak (misal: pasir, pasir lanauan, gambut) yang tebal atau sedimen lapuk yang terdapat di atas batuan yang keras. Prinsip dasar dari hubungan antara respon lokasi (frekuensi resonansi) dan ketebalan sedimen dapat

dijelaskan melalui sebuah model dua lapisan yang sederhana. Prinsipnya dapat dilihat pada **Gambar 16**.



Gambar 16. Prinsip dasar respon lokasi mikrotremor (Syahrudin dkk, 2014)

V_{s30} merupakan kecepatan gelombang geser hingga pada kedalaman 30 meter dari permukaan. Menurut Roser dan Gosar (2010) nilai V_{s30} ini dapat dipergunakan dalam penentuan standar bangunan tahan gempa. Nilai V_{s30} digunakan untuk menentukan klasifikasi batuan berdasarkan kekuatan getaran gempabumi akibat efek lokal. Menurut Wangsadinata (2006), bahwa hanya lapisan-lapisan batuan sampai kedalaman 30 meter saja yang menentukan pembesaran gelombang gempa. Nilai V_{s30} dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 39.

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i / V_s} \quad (39)$$

Dengan i adalah indeks pelapisan, m merupakan jumlah lapisan hingga kedalaman 30 meter, t_i adalah ketebalan lapisan ke- i dan V_{s30} adalah kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter.

Terdapat sebuah *basement hardrock* yang ditutupi oleh sedimen dengan ketebalan m dan kecepatan gelombang geser V_s . Frekuensi resonansi dari sistem terdapat pada lapisan yang ketebalannya adalah $\lambda/4$ atau biasa disebut lapisan *half-space*. Hal tersebut disebabkan karena pada ketebalan $\lambda/4$ terjadi amplitudo maksimum, maka akan terperangkapnya getaran gelombang geser (gelombang SH) pada medium sedimen di atas *bedrock*.

Diasumsikan bahwa kecepatan gelombang geser melewati lapisan pada ketebalan 30 meter dari permukaan, dikarenakan terjadi resonansi pada amplitudo maksimum sebesar $\lambda/4$ di lapisan sedimen. Sehingga persamaan yang terbentuk menjadi:

$$V_s = f \cdot \lambda \quad (40)$$

$$H = \lambda/4 \quad \text{sehingga,} \quad \lambda = 4H \quad (41)$$

$$V_{s30} = f \cdot 4h \quad (42)$$

Dengan f , V_s dan h berturut-turut menunjukkan frekuensi natural, kecepatan gelombang SH dan ketebalan sedimen. Dari persamaan tersebut, dapat disimpulkan bahwa frekuensi natural berbanding lurus terhadap kecepatan gelombang SH dan berbanding terbalik terhadap ketebalan sedimen (Syahrudin dkk, 2014). Pada dasarnya semakin keras suatu material tanah, maka kecepatan gelombang geser yang melaluinya semakin besar, pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Klasifikasi jenis tanah berdasarkan V_{s30} (FEMA 302, 1997)

Tipe batuan	Profil jenis batuan	V_{s30}
A	Batuan keras	> 1500 m/s
B	Batuan sedang	760-1500 m/s
C	Tanah keras dan batuan lunak	360-760 m/s
D	Tanah sedang	180-360 m/s
E	Tanah lunak	< 180

C. Mikrozonasi

Mikrozonasi mikrotremor adalah suatu proses pembagian area berdasarkan parameter tertentu memiliki karakteristik yang dipertimbangkan antara lain adalah getaran tanah atau frekuensi, faktor penguatan (amplifikasi) dan periode dominan. Secara umum, mikrozonasi mikrotremor dapat dikatakan sebagai proses untuk memperkirakan respon dan tingkah laku dari lapisan tanah atau sedimen terhadap adanya gempa bumi (Arifin dkk, 2014).

D. Upaya Mitigasi Bencana Gempabumi

Mitigasi adalah suatu proses tindakan pencegahan untuk meminimalkan dampak negatif bencana alam seperti gempa bumi terhadap manusia, harta benda, infrastruktur dan lingkungan, baik kesiapan ataupun tindakan-tindakan pengurangan resiko jangka panjangnya. Mitigasi mencakup perencanaan dan pelaksanaan tindakan-tindakan untuk mengurangi resiko yang terkait dengan bahaya-bahaya yang ditimbulkannya (Abdillah, 2010).

Dalam mendukung mitigasi bencana khususnya gempa bumi, perlu diketahui beberapa karakteristik dari gempa bahwa:

1. Berlangsung dalam waktu singkat, berpotensi berulang kembali (gempa susulan), dan belum dapat diprediksi/diperkirakan
2. Lokasi kejadian hanya tertentu saja.
3. Akibatnya dapat menimbulkan kerusakan.
4. Tidak dapat dicegah tetapi akibat yang ditimbulkan dapat dikurangi.

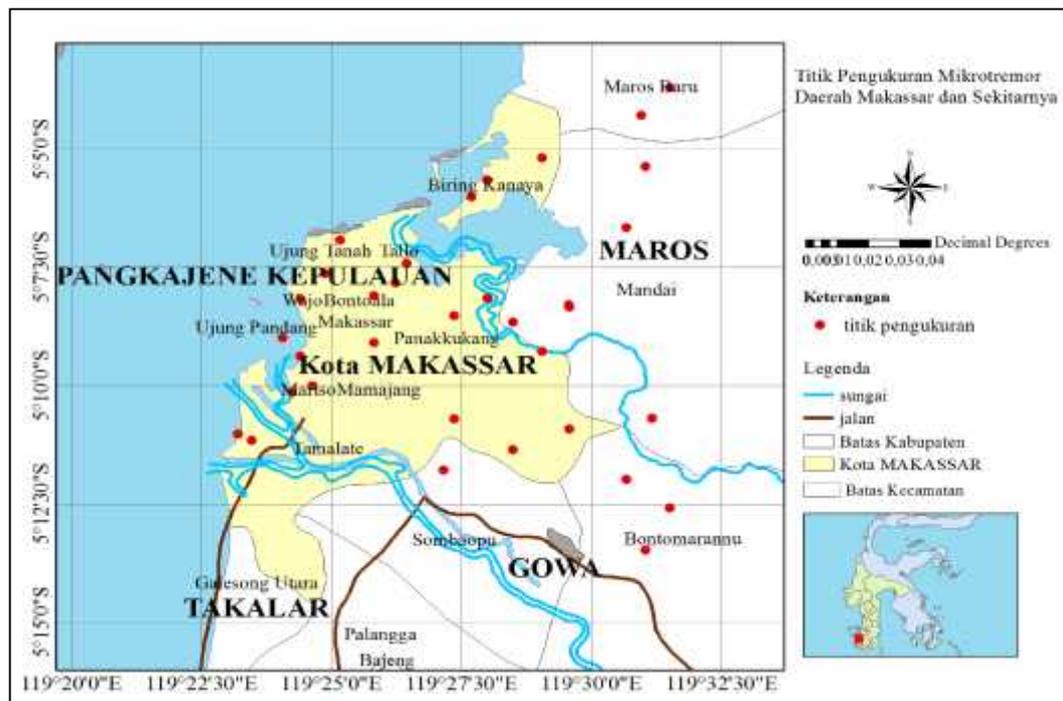
Resiko gempa bumi merupakan struktur dan kenampakan kerusakan akibat bencana gempa bumi yang menimpa masyarakat atau daerah setempat, seperti adanya suatu patahan aktif yang bergantung pada kondisi geologi setempat, kekuatan gempa bumi, tipe dari konstruksi dan struktur bangunan yang ada dengan lokasi bencana tersebut. Adapun upaya yang dilakukan dalam mitigasi untuk mencegah resiko gempa bumi yaitu:

1. Pemetaan daerah rawan gempa dan tsunami.
2. Memperhatikan kaidah konstruksi tahan gempa/tsunami dalam pembangunan.
3. Sosialisasi termasuk pemasangan pamflet dan poster mengenai gempa/tsunami.
4. Pembangunan sistem peringatan dini terhadap gempa/tsunami.
5. Pemasangan alarm tanda bahaya.
6. Membuat akses menuju dataran yang lebih tinggi/bukit terdekat.

IV. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder pengukuran mikrotremor di PVMBG (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi), pada bulan Agustus hingga Oktober 2015. Pengukuran mikrotremor yang dilakukan oleh PVMBG pada tanggal 09-13 September 2014 dengan titik pengukuran seperti pada **Gambar 17**. Total titik data mikrotremor mencapai 34 titik di daerah Makassar, Sulawesi Selatan.



Gambar 17. Titik pengukuran mikrotremor

B. Prosedur Penelitian

1. Pengukuran Mikrotremor

Pada proses pengambilan data mikrotremor diterapkan kaidah pengukuran mikrotremor yang dikeluarkan (SESAME, *Site Effect assessment using Ambient Excitations*, 2004). Durasi pengukuran tersebut adalah 30 menit pada interval sampling 100 Hz. Kaidah tersebut untuk meminimalkan kesalahan dari hasil analisis, sehingga didapatkan nilai frekuensi dan faktor amplifikasi yang mendekati sebenarnya. Adapun peralatan yang digunakan dalam pengukuran mikrotremor yaitu pada **Gambar 18** berikut.



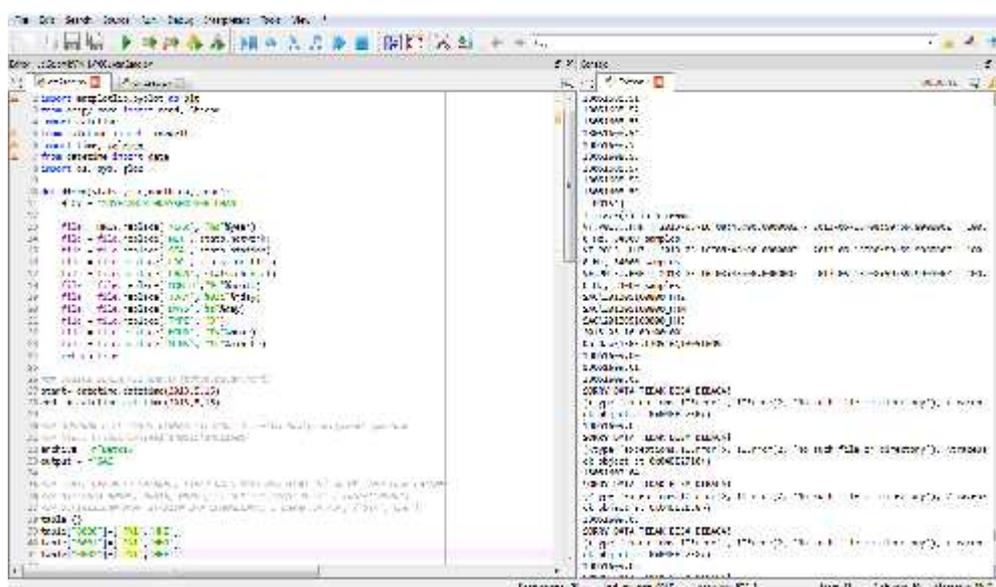
Gambar 18. Satu set peralatan mikrotremor (PVMBG)

Pengukuran mikrotremor menggunakan seismometer L4-3D, Logger datamark LS 8800, GPS, dan Laptop. Kemudian pengolahan data menggunakan *software spyder python, Geopsy, Surfer, Global Mapper, Arcgis*.

2. Pengolahan data

Data hasil pengukuran di lapangan adalah data getaran tanah dalam fungsi waktu, yang tidak dapat langsung digunakan karena masih dalam bentuk hexadesimal. Adapun proses pengolahannya adalah sebagai berikut:

- a. Data diolah menggunakan perangkat lunak *spyder python* untuk mengubah format (konversi) dari data mentah yang tersimpan pada seismometer menjadi data *.sac dengan memasukkan aplikasi DM2SAC (**Gambar 19**).



Gambar 19. Tampilan konversi data pada *spyder python*

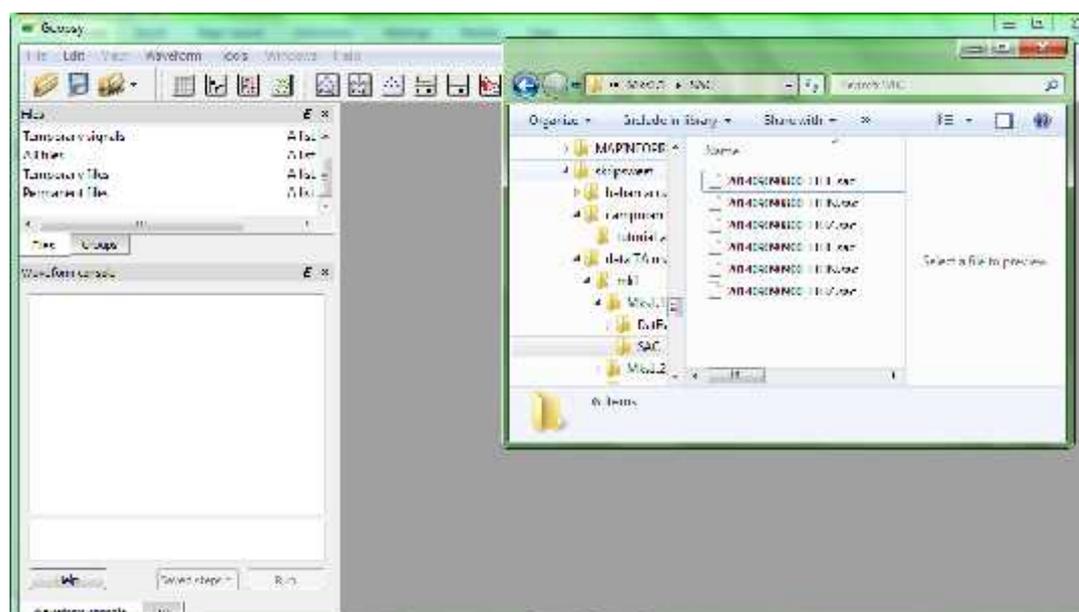
- b. Dalam data format *.sac (Data HHE, HHN, HHZ) selanjutnya diolah menggunakan perangkat lunak *Geopsy* (**Gambar 20**) untuk memperoleh nilai frekuensi resonansi dari hasil perbandingan spektra ambient noise.



Gambar 20. Perangkat lunak *geopsy*

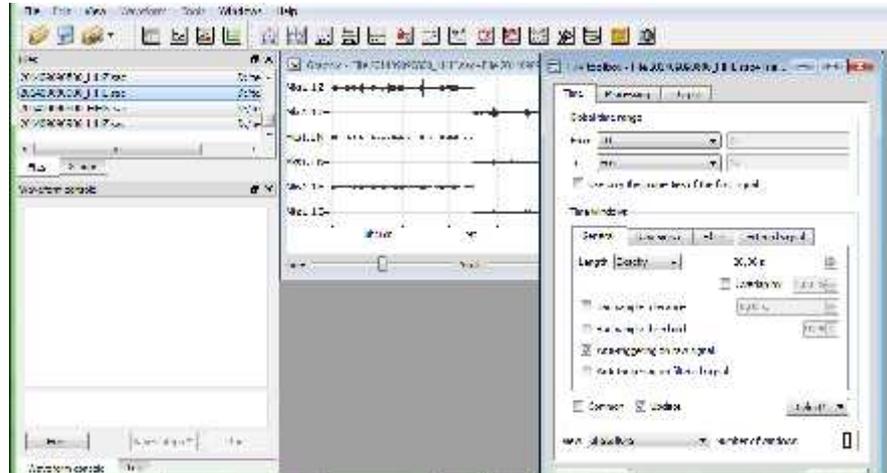
Secara umum proses analisis spektra pada Geopsy adalah sebagai berikut :

- a. Data rekaman mikrotremor (3 komponen) dalam format *.sac akan difilter menggunakan algoritma *anti-triggering* untuk menghindari bagian dari rekaman yang merupakan transient noise seperti pada **Gambar 21**.



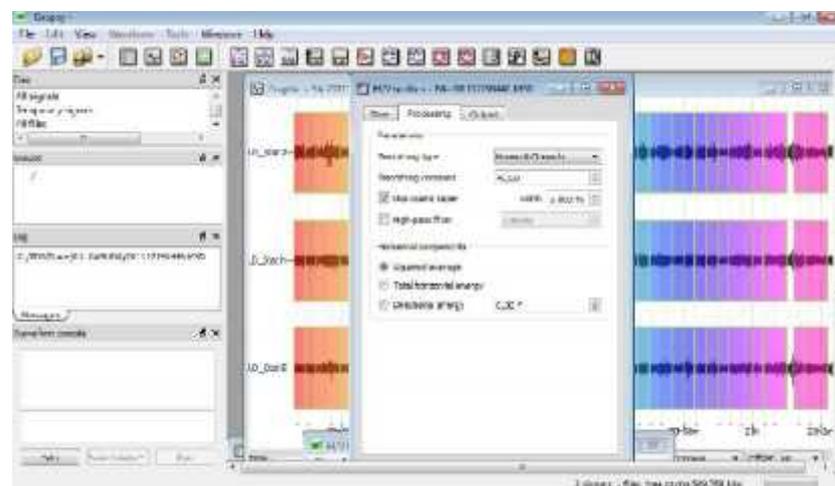
Gambar 21. *Import* data mikrotremor

- a. Setelah *transient noise* terdeteksi, maka selanjutnya bagian rekaman yang merupakan *ambient noise* dibagi ke dalam window waktu, panjang tiap window adalah 20 sekond (**Gambar 22**).



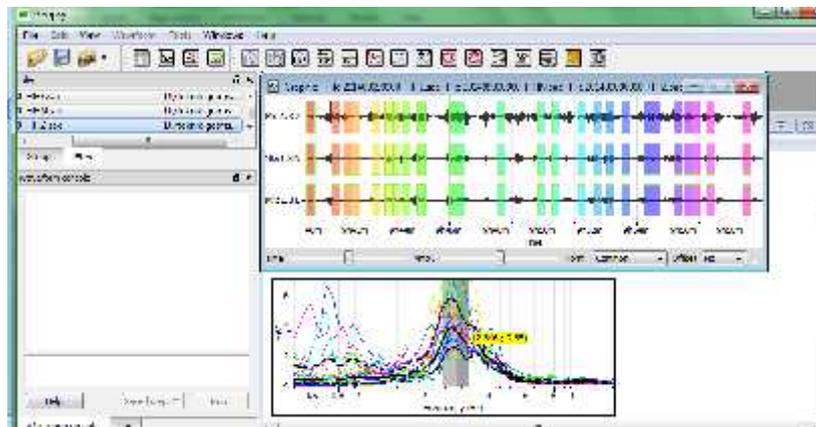
Gambar 22. Tampilan *ambient noise*

- b. Melakukan proses *smoothing* terhadap spektra amplitude untuk masing-masing window waktu, kemudian merata-ratakan kedua spektra horizontal dari masing-masing window waktu, dalam fungsi waktu tersebut yang diolah ke dalam domain frekuensi dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) seperti pada **Gambar 23**.



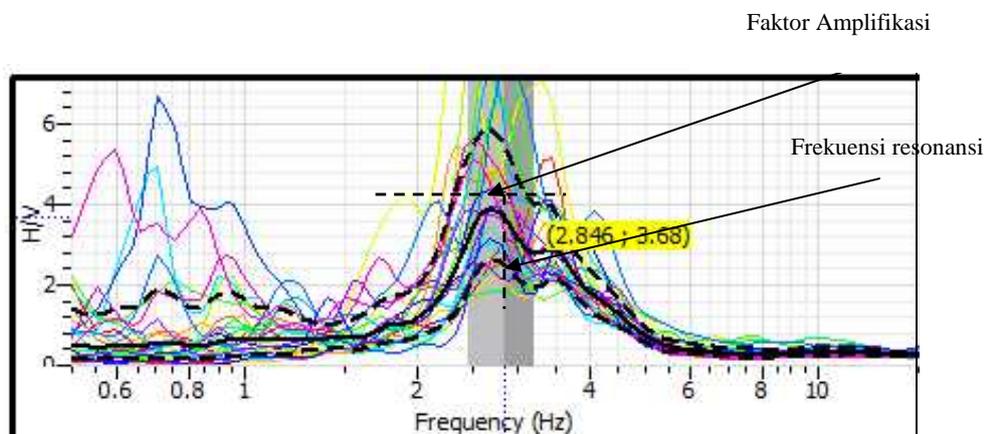
Gambar 23. Proses *smoothing* dan filter Konno-Ohmachi

- c. Menghitung rasio H/V untuk masing-masing window. Pada hasil perbandingan spektra nilai untuk masing-masing window diwakili oleh kurva berwarna-warni ditunjukkan pada **Gambar 24**.



Gambar 24. Hasil kurva perbandingan spektra nilai H/V

- d. Menghitung rata-rata rasio H/V dari semua window yang kemudian diwakili oleh kurva warna hitam. Dua garis putus-putus mewakili standar deviasi dari H/V. Nilai frekuensi adalah batas antara garis abu-abu tua dan garis abu-abu muda, yang terdapat pada area abu-abu merupakan rata-rata dari puncak frekuensi dan standar deviasi. Maka didapatkan nilai frekuensi dan nilai amplitudo (H/V) titik pengamatan tersebut (**Gambar 25**).



Gambar 25. Tampilan nilai frekuensi dominan dan nilai amplitudo (H/V)

- e. Kemudian memasukkan nilai frekuensi resonansi dan nilai H/V ke dalam Microsoft Excel, dan melakukan perhitungan untuk menentukan nilai periode dominan, V_{s30} , dan amplifikasi prediksi (**Gambar 26**).

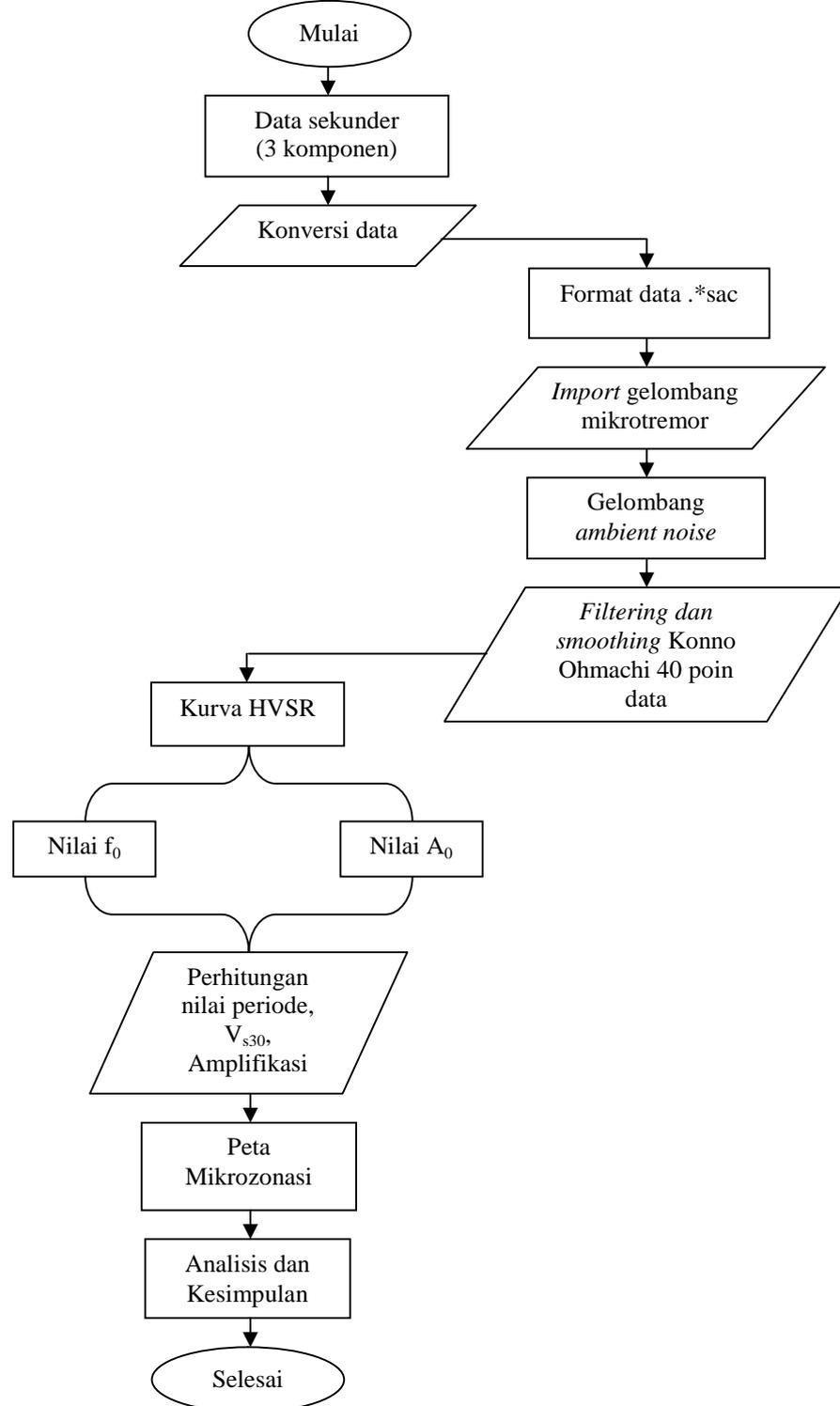
X	Y	Waktu	f_0	Amplitudo (h/v)	Periode dominan	V_{s30}	Amplifikasi
119.4195	-5.1153	8:55	1.332	4.66	0.750750751	159.84	3.630595908
119.4526	-5.1964	9:40	1.31	5.26	0.763358779	157.2	3.680517744
119.4667	-5.0943	10:35	2.67	3.68	0.374531835	160.2	3.623904467
119.4842	-5.0864	11:39	1.3	1.99	0.769230769	156	3.703717293
119.5159	-5.0715	12:28	2.89	1.3	0.346020761	173.4	3.396094321

Gambar 26. Tampilan perhitungan nilai periode, V_{s30} , amplifikasi

- f. Hasil dari perhitungan tersebut satu persatu di grid pada surfer dengan format *.grd.
- g. Selanjutnya dibuat peta mikrozonasi dengan *Software* ArcGIS berdasarkan parameter yaitu frekuensi resonansi, periode dominan, V_{s30} , dan amplifikasi.
- h. Kemudian melakukan analisis mengenai hasil yang diperoleh pada penelitian ini dengan data pendukung berupa geologi Daerah Makassar.

C. Diagram Alir

Berikut ini merupakan diagram alir penelitian yang terdapat pada **Gambar 27**.



Gambar 27. Diagram alir penelitian

VI. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data mikrotremor Daerah Makassar, maka dapat disimpulkan:

1. Berdasarkan analisis nilai frekuensi resonansi, bahwa zona rawan gempabumi tinggi berada di daerah yang memiliki frekuensi rendah mendominasi Daerah Makassar yaitu kurang dari 2,5 Hz yang berarti tersusun atas batuan alluvial dengan ketebalan sedimen berkisar 30 meter, terdapat pada Kecamatan Biringkanaya, Kecamatan Ujung Tanah, Kecamatan Wajo, Kecamatan Bontoala, Kecamatan Makassar, Kecamatan Ujung Pandang, sebagian Kecamatan Mariso, Kecamatan Mamajang, sebagian Kecamatan Tamalate, dan Kecamatan Panakukang dekat aliran Sungai Tallo.
2. Jika ditinjau dari nilai periode dominan bahwa daerah yang beresiko kerusakan cukup tinggi yaitu dengan nilai periode dominan tinggi sekitar lebih dari 0,75 detik terdiri dari lapisan *soft soil* yang berarti berada pada klasifikasi tanah jenis IV. Daerah tersebut yaitu Kecamatan Mamajang,

pesisir pantai Kecamatan Biringkanaya, Kecamatan Mariso, dan Kecamatan Tamalate.

3. Analisis kecepatan gelombang geser menunjukkan bahwa di Daerah Makassar yang berpengaruh terhadap kerusakan infrastruktur bangunan akibat gempa bumi, dengan nilai kurang dari 180 m/s yaitu tersusun atas sedimen yang lunak dengan tipe batuan E. Daerah yang dimaksud adalah Kecamatan Biringkanaya, Kecamatan Mamajang, sebagian Kecamatan Mariso, sebagian kecil terdapat di Kecamatan Tamalate.
4. Nilai amplifikasi yang tinggi di Daerah Makassar yaitu pada zona III berkisar 4 hingga 6,32 kali penguatan gelombang. Hal ini menandakan bahwa daerah tersebut berada pada tingkat resiko kerusakan tinggi jika diguncang gempa bumi, yaitu di Kecamatan Mamajang, bagian pesisir pantai Kecamatan Biringkanaya, Kecamatan Mariso, dan sebagian kecil Kecamatan Tamalate.
5. Kecamatan Mamajang, Kecamatan Mariso, dan Kecamatan Biringkanaya merupakan daerah yang memiliki tingkat kerawanan tinggi berdasarkan analisis frekuensi resonansi rendah berkisar kurang dari 2,5 Hz, periode tinggi lebih dari 0,75 detik, kecepatan gelombang geser rendah kurang dari 180 m/s, dan memiliki amplifikasi tinggi yaitu 4 hingga 6,32 yang berupa litologi batuan alluvial lunak berketebalan 30 meter atau lebih, sehingga perlu perhatian khusus dari pemerintah dalam usaha pengembangan fasilitas umum dan kesadaran masyarakat dalam menanggapi bencana gempa bumi yang tiba-tiba dapat terjadi.

6. Wilayah yang direkomendasikan sebagai wilayah pengembangan dalam tataruang adalah wilayah yang memiliki tingkat kerawanan yang rendah yaitu dengan nilai amplifikasi berkisar antara 0,78 hingga 2 dan berada pada zona frekuensi frekuensi tinggi berkisar 4 Hz hingga 10 Hz meliputi Kecamatan Tallo, dan pesisir pantai maupun bagian hulu sungai Kecamatan Tamalate.

B. Saran

Adapun untuk hasil penelitian yang lebih baik, dibutuhkan saran sebagai berikut:

1. Sebaiknya data pengukuran mikrotremor dilakukan pada malam hari agar data yang diperoleh benar-benar data getaran tanah tidak terganggu oleh *noise* yang terlalu banyak.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah.2010. *Analisis Keaktifan dan Resiko Gempa Bumi pada Zona Subduksi Daerah Pulau Sumatera dan Sekitarnya dengan Metode Least Square*. Jakarta: UIN Syarif Hidayatullah.
- Ambarrini, A. R. 2014. *Studi Kawasan Rawan Bencana Gempa Bumi di Kota Jayapura dan Sekitarnya berdasarkan Data Mikrotremor dengan Metode GMPE Boore dan Atkinson 2008*. Yogyakarta:UGM
- Arifin, S.S., Mulyatno, B.S., Marjiyono, dan Setianegara, R. 2014. *Penentuan Zona Rawan Guncangan Bencana Gempa Bumi Berdasarkan Analisis Nilai Amplifikasi HVSR Mikrotremor Dan Analisis Periode Dominan Daerah Liwa Dan Sekitarnya*. Teknik Geofisika:Universitas Lampung
- Assegaf, A. 2014. *Analisis Sedimen Kuarter Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor (Studi Kasus: Kabupaten Gowa dan Kota Makassar)*. Makassar:UNHAS
- Aswandi, L. 2005. *Mikrozonasi Kota Kendari dan Sekitarnya Menggunakan Analisis Mikrotremor*. Makassar: Skripsi Universitas Hasanudin
- Beiser, dan Arthur. 1999. *Konsep Fisika Modern*. Edisi Keempat. Jakarta:Erlangga
- BMKG. 2006. *InaTEWS – Konsep dan Implementasi*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
- Brown, A.R., 2005. *Understanding Seismic Attribute*. Geophysics. vol 66, No1, P.47-48.
- Elnashai, S. A., dan Sarno, D.L. 2008. *Fundamental of Earthquake Engineering*. Hongkong:Wiley
- Febriana. 2007. *Eksplorasi Seismik*. Unpad. Bandung
- FEMA 302. 1997. *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*. Washington, D. C: National Institute of Building Sciences

- Husain, J.R. dan Sultan. 2012. *Analisis Cutting Bor Dan Nilai Resistivity Batuan Untuk Penentuan Letak Pipa Saringan Pada Sumur Bor Di Daerah Kampus Unhas Tamalanrea Kota Makassar*. Makassar: Jurusan Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
- Ibrahim G., dan Subardjo. 2004. *Pengetahuan Seismologi*. Jakarta:Badan Meteorologi dan Geofisika
- Kanai, K. 1983. *Engineering Seismology*. Japan:University of Tokyo
- Koddeng, B. 2011. *Zonasi Kawasan Pesisir Pantai Makassar Berbasis Mitigasi Bencana*. Makassar:UNHAS
- Lachet, C. dan Brad, P.Y. 1994. *Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique*. Journal Physics of the Earth. 42, 377-397
- Lermo, J., Chavez, dan Garcia, F. J., 1993. *Are microtremors useful in site response evaluation?*Bull. Seis. Soc. America, 84, 1350-1364
- Marjiyono, 2010. *Estimasi Karakteristik Dinamika Tanah Dari Data Mikrotremor Wilayah Bandung*. Thesis ITB. Bandung.
- Muqtadir, H. 2013. *Zonasi Potensi Likuifaksi Kota Makassar Menggunakan Metode National Centre For Earthquake Engineering Research (Nceer)*. Makassar:UNHAS
- Nakamura, Y. 1989. *A Method for Dynamic Characteristic Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface*. QR Railway Technical Research Institute, 30(1), 25-33
- Nakamura, Y. 2000. *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Application*. Japan:Tokyo University
- Parwatiningtyas, D. 2008. *Perbandingan Karakteristik Lapisan Bawah Permukaan Berdasarkan Analisis Gelombang Mikrotremor Dan Data Bor*.Jurnal Ilmiah Universitas Indraprasta PGRI
- Pasau, G., dan Tanauma, A. 2011.*Pemodelan Sumber Gempa Di Wilayah Sulawesi Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Gempa Bumi*. Universitas San Ratulangi Manado:Fisika FMIPA
- Rahmatullah, F. S. 2013. *Studi Potensi Likuifaksi Berdasarkan Indeks Kerentanan Seismik Dan Percepatan Tanah Maksimum Kota Makassar*. Makassar:UNHAS
- Roser, J. dan Gosar, A. 2010. *Determination of V_{s30} for Seismic Ground Classifications In The Ljubljana Area*. Slovenia: Acta Geotechnica Slovenia

- SESAME. 2004. *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibration Measurements, Processing and Interpretation*, European Commission–Research General Directorate
- Soehaimi, A. 2009. *Seismotektonik dan Potensi Kegempaan Wilayah Makassar*. Jurnal Geologi Indonesia, Vol 3 No 1
- Suhendratman, A.P.2013. *Analisis Sedimen Kuartar Dan Zona Kerentanan Seismik Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor (Studi Kasus Kabupaten Gowa Dan Kota Makassar*. Makassar:UNHAS
- Sukamto, R., dan Supriatna, S. 1982. *Geologi Lembar Ujung Pandang, Benteng dan Sinjai*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi
- Susilawati. 2008. *Penerapan Penjalaran Gelombang Seismik Gempa pada Penelaahan Struktur Bagian dalam Bumi*. Sumatera Utara:Universitas Sumatera Utara
- Syahrudin, M.H., Aswad, S., Palullungan, E.F., Maria, dan Syamsuddin. 2014. *Penentuan Profil Ketebalan Sedimen Lintasan Kota Makassar Dengan Mikrotremor*. Makassar:UNHAS
- Syamsuddin. 2014. *Penentuan Profil Ketebalan Sedimen Lintasan Kota Makassar Dengan Mikrotremor*. Makassar:UNHAS
- Takai dan Tanaka, 1961. *On Microtremors VIII*. Tokyo: Bull. Earthquake Res. Inst. 39, 97-114
- Telford, W. M. 1992. *Applied Geophysics*. Inggris:Cambridge University Press London
- Thomson,W. T. 1980.*Theory Of Vibration With Application*. Prentice-Hall, Inc.
- USGS. 2007. *Global V_{s30} Map Server*. [http:// earthquake.usgs.gov/hazards/apps/Vs30/](http://earthquake.usgs.gov/hazards/apps/Vs30/) diakses pada tanggal 15 Mei 2016
- Wakamatsu, K., dan Matsuoka, M. 2006. *Development of the 7.5-Arc-Second Engineering Geomorphologic Classification Database and its Application to Seismic Microzoning*, Bulletin of.
- Wangsadinata, W. 2006. *Perencanaan Bangunan Tahan Gempa Berdasarkan SNI 1726-2002*. Jakarta: Shortcourse HAKI