PEMETAAN ZONA KERENTANAN TANAH DAERAH SUMATERA BAGIAN SELATAN BERDASARKAN ANALISIS DATA MIKROTREMOR MENGGUNAKAN METODE HVSR DAN *PEAK GROUND ACCELERATION* (PGA)

(Skripsi)

Oleh

Sri Devi Rezeki
2015051073

JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024

PEMETAAN ZONA KERENTANAN TANAH DAERAH SUMATERA BAGIAN SELATAN BERDASARKAN ANALISIS DATA MIKROTREMOR MENGGUNAKAN METODE HVSR DAN *PEAK GROUND ACCELERATION* (PGA)

Oleh
SRI DEVI REZEKI

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung

JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024

ABSTRAK

PEMETAAN ZONA KERENTANAN TANAH DAERAH SUMATERA BAGIAN SELATAN BERDASARKAN ANALISIS DATA MIKROTREMOR MENGGUNAKAN METODE HVSR DAN *PEAK GROUND ACCELERATION* (PGA)

Oleh

SRI DEVI REZEKI

Sumatera bagian selatan terbagi menjadi tiga provinsi yakni Provinsi Lampung, Palembang, dan Bengkulu. Wilayah Sumatera bagian selatan rawan terjadi bencana alam gempa bumi. Hal ini dikarenakan daerah Sumatera bagian selatan dekat dengan sesar aktif dan zona subduksi. Penelitian ini bertujuan untuk analisis klasifikasi tanah berdasarkan nilai dari frekuensi dominan, dan periode dominan, malakukan analisis faktor amplifikasi, melakukan analisis indeks kerentanan seismik, dan menetapkan serta menganalisis nilai percepatan getaran tanah maksimum (PGA). Tahapan pada penelitian ini diawali dengan melakukan pengolahan sehingga mendapatkan nilai frekuensi dominan (*f0*), faktor amplifikasi (*A0*), periode dominan (*T0*), indeks kerentanan seismik (*Kg*), nilai PGA didapatkan menurut sumber gempa bumi pada daerah Sumatera bagian selatan dari tahun 1970 hingga 2024 dan menghitung nilai IMM. Persebaran frekuensi dominan berkisar 0.55 – 13.79 Hz, amplifikasi berkisar 1.25 – 8. 13 kali, periode dominan berkisar 0.09 sekon – 1.82 sekon, kemudian indeks kerentanan tanah berkisar 0.23 – 95.24, *peak ground acceleration* (PGA) berkisar 109 – 587 gal, dan intensitas gempa bumi maksimum memiliki nilai 8.5 SR. Berdasarkan nilai indeks kerentanan tanah dan sumber gempa yang terjadi maka wilayah penelitian termasuk wilayah yang rentan akan terjadinya bencana alam gempa bumi, dengan kerentanan tertinggi di daerah Liwa, Muara Dua, dan Pematang Sawah.

Kata kunci : Sumatera Bagian Selatan, Zona Subduksi, Klasifikasi Tanah, PGA

ABSTRACT

MAPPING THE GROUND VULNERABILITY ZONE OF THE SOUTHERN SUMATRA REGION BASED ON MICROTREMOR DATA ANALYSIS USING HVSR AND PEAK GROUND ACCELERATION (PGA) METHODS

By

SRI DEVI REZEKI

Southern Sumatra is divided into three provinces, namely Lampung, Palembang and Bengkulu Provinces. The southern part of Sumatra is prone to earthquake disasters because the southern part of Sumatra is close to active faults and subduction zones. This research aims to analyze soil classification based on the value of the dominant frequency, and the dominant period, perform amplification factor analysis, conduct seismic vulnerability index analysis, and determine and analyze the maximum ground vibration acceleration (PGA) value. The stages of this research begin with processing so as to obtain the value of the dominant frequency (f0), amplification factor (A0), dominant period (T0), seismic vulnerability index (Kg), PGA value obtained according to the earthquake source in the southern Sumatra region from 1970 to 2024 and calculate the IMM value. The distribution of the dominant frequency ranges from 0.55 to 13.79 Hz, amplification ranges from 1.25 to 8.13 times, the dominant period ranges from 0.09 secon to 1.82 secon, then the soil susceptibility index ranges from 0.23 to 95.24, peak ground acceleration (PGA) ranges from 109 to 587 gal, and the maximum earthquake intensity has a value of 8.5 SR. Based on the value of the soil susceptibility index and the source of the earthquake that occurred, the research area is a vulnerable area for earthquake natural disasters, with the highest vulnerability in the Liwa, Muara Dua and Pematang Sawah areas.

Keywords : Southern Sumatra, Subduction Zone, Soil Classification, PGA

Judul Skripsi	: **PEMETAAN ZONA KERENTANAN TANAH DAERAH SUMATERA BAGIAN SELATAN BERDASARKAN ANALISIS DATA MIKROTREMOR MENGGUNAKAN METODE HVSR DAN *PEAK GROUND ACCELERATION* (PGA)**
Nama Mahasiswa	: Sri Devi Rezeki
Nomor Pokok Mahasiswa	**2015051073**
Program Studi	: **Teknik Geofisika**
Fakultas	: **Teknik**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1	Pembimbing 2
Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU.	**Dr. Karyanto, S.Si., M.T.**
NIP. 197112101997021001	NIP. 196912301998021001

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

Dr. Karyanto, S.Si., M.T.
NIP. 196912301998021001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU.** .....

Sekretaris : **Dr. Karyanto, S.Si., M.T.** .....

Anggota : **Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T., CRP.** .....

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **28 Juni 2024**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa apa yang tertulis di dalam skripsi ini dengan judul "Pemetaan Zona Kerentanan Tanah Daerah Sumatera Bagian Selatan Berdasarkan Analisis Data Mikrotremor Menggunakan Metode Hvsr Dan *Peak Ground Acceleration* (Pga)" adalah hasil kerja saya sendiri yang berdasarkan pengetahuan dan data yang telah saya dapatkan. Karya ini tidak berisi material yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain buanlah hasil plagiat karya orang lain.

Demikianlah pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 11 Juli 2024
Penulis,

Sri Devi Rezeki
NPM 2015051073

RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama Sri Devi Rezeki, lahir di Bandar Lampung pada tanggal 22 Juni 2002 sebagai anak pertama dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Warta Purwanto dan Ibu Septiana Yanti. Penulis telah menempuh pendidikan di Sekolah Dasar di SD Muhammadiyah 1 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2014, lalu melanjutkan ke jenjang Sekolah Menengah Pertama di SMP Muhammadiyah 3 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2017, kemudian menempuh Pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Muhammadiyah 2 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2020. Pada tahun 2020 Penulis diterima pada Perguruan Tinggi Negeri sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Penulis aktif di organisasi kemahasiswaan seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (Anggota Dvisi Eksternal), di Universitas Lampung periode 2022 – 2023. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada Januari – Februari 2023 di Desa Labuhan, Kecamatan Pulau Pisang, Kabupaten Pesisir Barat, Lampung. Penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) pada Tahun 2023 pada Juli – Agustus di Kantor Pusat Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dengan judul "Analisis Karakteristik Lapisan Sedimen Dengan Menggunakan Data Mikrotremor Di Daerah Sumatera Bagian Selatan". Pada akhir masa studi penulis melakukan penelitian untuk memperoleh gelar sarjana teknik dengan judul "**Pemetaan Zona Kerentanan Tanah Daerah Sumatera Bagian Selatan Berdasarkan Analisis Data Mikrotremor Menggunakan Metode Hvsr Dan *Peak Ground Acceleration* (Pga)".**

PERSEMBAHAN

Saya Persembahkan Karyaku ini Untuk Kedua orang tua saya,
Papa dan Mama Tercinta dan Tersayang

Adik serta keluarga besarku Tercinta

Teknik Geofisika Universitas Lampung 2020
Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung
Almamater Tercinta Universitas Lampung

Semua yang terlibat dalam proses pembuatan dan penyusunan skripsi ini, saya ucapkan terima kasih

MOTTO

Tidak Peduli berapa kali orang mencoba mengkritikmu balas dendam terbaik adalah dengan membuktikan bahwa mereka salah. Tutup matamu dan nikmati Roller Coaster, inilah hidup".

"Maka Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan"
(Q.S Al-Insyirah, 94 : 5-6)

Selalu ada harga dalam sebuah proses. Nikmati saja Lelah-lelah itu. Lebarkan lagi rasa sabar itu. Semua yang kau investasikan untuk menjadikan dirimu serupa yang kau impikan, mungkin tidak akan selalu berjalan lancar. Tapi, gelombang-gelombang itu nantinya bisa kau ceritakan."

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya-lah saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **"PEMETAAN ZONA KERENTANAN TANAH DAERAH SUMATERA BAGIAN SELATAN BERDASARKAN ANALISIS DATA MIKROTREMOR MENGGUNAKAN METODE HVSR DAN *PEAK GROUND ACCELERATION* (PGA)"**. Skripsi ini dibuat untuk memenuhi tugas akhir perkuliahan dan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana di Program Studi Teknik Geofisika Fakultas Teknik Universitas Lampung. Selain itu, skripsi ini juga dibuat sebagai salah satu wujud implementasi dari ilmu yang didapatkan selama masa perkuliahan di Program Studi Teknik Geofisika Fakultas Teknik Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa skripsi masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis berharap dapat belajar lebih banyak lagi dalam mengimplementasikan ilmu yang didapatkan. Skripsi ini tentunya tidak lepas dari bimbingan, masukan, dan arahan dari berbagai pihak. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan bagi para pembaca pada umumnya.

Bandar Lampung, 11 Juli 2024

Penulis,

Sri Devi Rezeki

NPM. 2015051073

SANWACANA

Puji syukur senantiasa penulis haturkan kepada Allah *Subhanahu* Wa Ta'ala yang maha kuasa karena berkat rahmat dan hidayah serta karunia-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyusun skripsi dengan judul "Pemetaan Zona Kerentanan Tanah Daerah Sumatera Bagian Selatan Berdasarkan Analisis Data Mikrotremor Menggunakan Metode Hvsr Dan *Peak Ground Acceleration* (Pga)". Tak lupa pula shalawat serta salam yang selalu tercurahkan kepada junjungan kita nabi besar Muhammmad *Shallallahu 'alaihi wassallam* yang menjadi tauladan bagi kita. Terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini. Penulis pun menyadari masih terdapat kekurangan di dalam skripsi ini.

Pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar- besarnya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta yang selalu menjadi kebanggaan hidup penulis Papa Krisbiantoro dididi dan Mama Septiana Yanti yang telah memberikan dukungan, doa, serta mencintai dan menyayangi saya dengan sepenuh hati.
2. Kepada diri saya sendiri, Sri Devi Rezeki yang sudah mampu bertahan dan menyelesaikan tanggung jawab saya yaitu kuliah. Terima kasih karena terus berusaha dan tidak menyerah, serta senantiasa menikmati setiap prosesNya. Terima kasih sudah bertahan sampai sejauh ini.
3. Kepada Almh. Oma tersayang Siti Hara, penulis mengucapkan banyak terima kasih atas pengorbanan sejak penulis kecil hingga saat ini. Terimakasih yang telah menjadi sosok yang selalu semangat dan mendorong pendidikan dan kehidupan penulis sejak kecil. *Thank you for your abundance of effection, thank you for taking care of me since childhood like your own flesh and blood.*

4. Adik – adikku tersayang Wati Diana Tereskova, Susilo Bambang Yudhoyono, dan Atilla Darmawangsa, yang selalu memberikan semangat kepada penulis sehingga dapat selesai sampai di tahap ini.
5. Kepada keluarga besar tercinta yang telah memberikan doa, dorongan, dan motivasi untuk menyelesaikan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Eng., Ir. Helmy Fitriawan, ST., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
7. Bapak Dr. Karyanto, S. Si., M. T. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung sekaligus selaku dosen pembimbing kedua terimakasih atas kesediannya untuk meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan, arahan, kritik, masukan serta motivasi dengan penuh kesabaran dalam pengerjaan skripsi ini.
8. Bapak Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU. selaku dosen pembimbing pertama terimakasih atas kesediannya untuk meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan, arahan, kritik, masukan serta motivasi dengan penuh kesabaran dalam pengerjaan skripsi ini.
9. Bapak Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T., CRP. selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktunya, serta senantiasa memberikan saran dan masukan serta kritik yang berarti bagi penulis.
10. Bapak Sandri, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan arahan serta motivasi kepada penulis selama menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
11. Para dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang penulis hormati terima kasih untuk semua ilmu yang telah diberikan.
12. Sahabat SMA Elsa, Adelia, Geizka, dan Lia yang selalu memberikan semangat, meluangkan waktu untuk saling bertukar cerita, keluh kesah dan selalu memberikan dukungan.
13. Kepada seseorang yang tak kalah penting kehadirannya, Saiful Bahri terimakasih telah menjadi bagian dari perjalanan hidup saya. Berkontribusi banyak dalam penulisan skripsi ini, baik tenaga, waktu, maupun materi kepada saya. Telah menjadi rumah, mendukung dan memberikan semangat

pantang menyerah dan senantiasa sabar menghadapi saya. Terimakasih telah menjadi bagian perjalanan hidup saya hingga penyusunan skripsi ini.

14. Sahabat seperjuangan di bangku perkuliahan Cindi Fintasari Saragih Jawak, Dwi Mifathuljanah, dan Winda Aprilia Rosa, yang saya sayangi telah membersamai dalam empat tahun ini. Terima kasih telah menjadi teman berbagi cerita keluh kesah, suka dan duka, banyak membantu penulis dalam mengerjakan skripsi serta tak pernah henti memberikan dukungan dan saling menyemangati.
15. Keluarga besar Teknik Geofisika 2020 (Patakis), terima kasih telah membantu, memberikan semangat, dukungan, dan terima kasih untuk kebersamaan kalian.
16. Serta semua pihak yang terlibat, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Bandar Lampung, 11 Juli 2024

Penulis

Sri Devi Rezeki

NPM. 2015051073

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
HALAMAN PERSETUJUAN ..... **v**
HALAMAN PENGESAHAN ..... **vi**
PERNYATAAN ..... **vii**
RIWAYAT HIDUP ..... **viii**
PERSEMBAHAN ..... **ix**
MOTTO ..... **x**
KATA PENGANTAR ..... **xi**
SANWACANA ..... **xii**
DAFTAR ISI ..... **xv**
DAFTAR TABEL ..... **xviii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xix**
I. PENDAHULUAN
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Tujuan Penelitian 3
1.3. Batasan Masalah 4
1.4. Manfaat Penelitian 4
II. TINJAUAN PUSTAKA
2.1. Lokasi Daerah Penelitian 5
2.2. Geologi Regional 6
2.3. Tektonik Pulau Sumatera 8
2.4. Seismisitas 9

2.5. Sejarah Kegempaan 11
2.6. Penelitian Terdahulu 12
III. TEORI DASAR
3.1.Gempa Bumi 14
3.2. Teori Gelombang 15
3.2.1. Gelombang Transversal 15
3.2.2. Gelombang Longitudinal 15
3.3. Gelombang Seismik 18
3.3.1. Gelombang Badan (*Body Wave*) 19
3.3.2. Gelombang Permukaan (*Surface Wave*) 21
3.4. Mikrotremor 22
3.5. Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) 24
3.6. Frekuensi Dominan 28
3.7. Faktor Amplifikasi 30
3.8. Periode Dominan 32
3.9. Indeks Kerentanan Seismik 33
3.10. *Peak Ground Acceleration* (PGA) 37
3.11. Intensitas Seismik 39
IV. METODE PENELITIAN
4.1. Tempat dan Waktu Penelitian 40
4.2. Alat dan Bahan 40
4.3. Prosedur Penelitian 41
4.3.1. Pengolahan Data Mikrotremor 41
4.3.2. Penentuan nilai frekuensi dominan dan amplifikasi 41
4.3.3. Perhitungan periode dominan 42
4.3.4. Perhitungan indeks kerentanan tanah 42
4.3.5. Nilai Percepatan Getaran Tanah (PGA) 42
4.3.6. Overlay peta lokasi penelitian 44
4.4. Jadwal Kegiatan 45
4.5. Diagram Alir 46
V. HASIL DAN PEMBAHASAN
5.1. Peta Seismisitas Daerah Penelitian 48

5.2. Analisis Frekuensi Dominan 48
5.3. Analisis Faktor Amplifikasi 51
5.4. Analisis Periode Dominan 55
5.5. Analisis Indeks Kerentanan Tanah 58
5.6. Analisis Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA) 61
5.7. Analisis Intensitas Gempa Bumi 67
VI. KESIMPULAN
6.1.Kesimpulan 82
6.2.Saran 83
DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel Halaman

1. Klasifikasi Tanah berdasarkan Nilai Frekuensi Dominan 29
2. Klasifikasi Nilai Amplifikasi 32
3. Klasifikasi Tanah 33
4. Klasifikasi nilai kerentanan gempa 37
5. Intensitas Seismik 39
6. Data Penelitian 40
7. *Software* yang digunakan dalam Penelitian 41
8. Klasifikasi Nilai PGA berdasarkan BMKG 44
9. Pelaksanaan Kegiatan Penelitian 45
10. Klasifikasi nilai frekuensi dominan pada daerah penelitian 51
11. Klasifikasi nilai A_0 pada daerah penelitian 53
12. Klasifikasi nilai T_0 pada daerah penelitian 56
13. Klasifikasi nilai *Kg* pada daerah penelitian 59
14. Perhitungan nilai PGA dan IMM 62
15. Klasifikasi nilai PGA pada daerah penelitian 64
16. Klasifikasi IMM pada daerah penelitian 68
17. Klasifikasi Nilai f_0, A_0, T_0, Kg, PGA, dan IMM 71

DAFTAR GAMBAR

Gambar Halaman

1. Peta lokasi daerah penelitian 5
2. Peta geologi daerah penelitian 7
3. Peta tektonik Indonesia 8
4. Peta seismisitas Indonesia 2023 10
5. a) merupakan gelombang longitudinal dan b) merupakan gelombang transversal. 16
6. Pemantulan gelombang 16
7. Pembiasan gelombang 17
8. Lenturan gelombang 17
9. Interferensi gelombang 18
10. Ilustrasi Gerak Gelombang Primer 20
11. Ilustrasi gerak gelombang sekunder 20
12. Ilustrasi gerak gelombang *Rayleigh* 21
13. Ilustrasi gerak gelombang *Love* 22
14. Tampilan sinyal mikroseismik 22
15. Konsep dasar amplifikasi gelombang seismik 31
16. *Surface ground deformation* 34
17. Diagram alir penelitian 47
18. Peta seimisitas gempa bumi daerah penelitian 48
19. Peta persebaran frekuensi dominan Sumatera bagian selatan 50
20. Peta persebaran amplifikasi Sumatera bagian selatan 54
21. Peta persebaran periode dominan Sumatera bagian selatan 57
22. Peta persebaran indeks kerentanan tanah Sumatera bagian selatan . 60
23. Peta persebaran *peak ground acceleration* (PGA) Sumatera bagian selatan 66
24. Peta persebaran intensitas gempa bumi Sumatera bagian selatan 70

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Wilayah Indonesia adalah titik pertemuan tiga lempeng utama yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik (Harijono, 2010). Indonesia merupakan negara yang terletak pada cincin api Pasifik (rangkaian jalur gunung api aktif yang tersebar di seluruh lempeng bumi) dan terletak pertemuan tiga lempeng tektonik aktif yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik. Ketiga lempeng tersebut bergerak relatif satu sama lain. Tumbukan lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia yang berdampak pada wilayah Indonesia bagian barat (Sumatera, Jawa dan Nusa Tenggara), sedangkan tumbukan kedua lempeng dengan lempeng Pasifik berdampak pada wilayah Indonesia bagian timur (Irian dan Maluku bagian utara).

Proses pergerakan lempeng tektonik ini menjadikan Indonesia sebagai wilayah yang rawan terhadap bencana alam dan gempa tektonik. Salah satunya adalah wilayah Pulau Sumatera, khususnya Sumatera bagian selatan. Hal ini disebabkan karena adanya zona subduksi Lempeng Indo-Australia yang bergerak di barat daya hingga Lempeng Eurasia yang tersisa sebelah timur laut. Dengan demikian kegempaan wilayah Sumatera bagian selatan sebagai penyebab terjadinya bencana alam gempa bumi cukup tinggi. Selain itu, Sumatera bagian selatan juga dilalui beberapa sesar salah satunya sesar semangko. Dengan adanya jalur sesar pada wilayah tersebut rentan akan terjadinya bencana gempa.

Gempa bumi merupakan getaran tanah yang disebabkan oleh percepatan energi yang dilepaskan, energi ini menyebar ke segala arah dari pusat sumbernya. Gempa bumi merupakan peristiwa alam yang saat ini belum dapat diprediksi secara akurat kapan dan seberapa kuat gempa akan terjadi. Gempa bumi merupakan salah satu bencana yang harus diwaspadai karena selain tidak dapat diprediksi, gempa juga dapat menyebabkan kerusakan bahkan dapat menimbulkan korban jiwa.

Penelitian terdahulu terkait gempa bumi khususnya dari beberapa stasiun *accelererograph,* telah dilakukan oleh (Agnes dkk., 2019) dengan menggunakan pendekatan *Peak Ground Acceleration* (PGA) sebagai salah satu indikator untuk mempelajari tingkat kerusakan tanah akibat getaran gempa bumi. Hasil dari penelitian tersebut menghasilkan atenuasi PGA pada Stasiun Wilayah Lampung, dan Zonasi percepatan tanah maksimum. Dari penelitian tersebut dapat memberikan informasi tambahan tentang pengelolaan seismik gempa bumi di masa depan.

Metode geofisika yaitu mikrotremor yang dapat digunakan untuk mendeteksi bawah permukaan yang menggunakan getaran yang disebabkan oleh aktivitas manusia dan fenomena alam (aliran air, angin, fluktasi tekanan atmosfer, dan gelombang laut). Analisa mikrotremor ini memanfaatkan metode HVSR (*Horizontal To Vertical Spectra Ratio*). Metode HVSR merupakan metode yang memperoleh frekuensi dominan dan amplifikasi sebagai parameter dalam menghitung indeks kerentanan tanah untuk mengetahui karakteristik tanah di daerah tersebut dan salah satu cara mengetahui kondisi geologi setempat digunakan untuk mengkarakterisasi struktur tanah (Nakamura,1989). Kemudian dilakukan *Peak Ground Acceleration* (PGA) merupakan salah satu indikator yang digunakan untuk mempelajari tingkat kerusakan tanah akibat gempa bumi. Hal ini bertujuan untuk mempelajari percepatan gempa maksimum (PGA) dan zona intensitas gempa berdasarkan data historis gempa pada tahun 1970 hingga tahun 2024. Dengan menghitung percepatan maksimum tanah pada suatu wilayah,

maka dapat diketahui wilayah mana saja yang rentan mengalami kerusakan jika terjadi gempa bumi.

Oleh karena itu metode HVSR sangat cocok digunakan dalam penelitian ini karena dapat digunakan dalam perancangan bangunan tahan gempa yaitu mengetahui periode dominan tanah setempat untuk menghindari resonansi dan menentukan jenis tanah berdasarkan tingkat kekerasan. Maka dari itu metode HVSR terhadap penelitian juga dapat mengetahui tentang kondisi geologi permukaan sebagai dasar untuk menentukan tingkat kerentanan tanah pada daerah Sumatera bagian selatan. Harapannya, penelitian ini dapat menjadi masukan dalam mitigasi bencana gempa bumi, dan sebagai informasi untuk pembangunan di daerah penelitian.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan nilai frekuensi dominan, amplifikasi, periode dominan, indeks kerentanan tanah, percepatan getaran tanah maksimum (PGA), dan intensitas gempa bumi.
2. Menganalisis persebaran nilai frekuensi dominan dan periode dominan pada daerah penelitian.
3. Menganalisis amplifikasi dan indeks kerentanan tanah pada daerah penelitian.
4. Menganalisis nilai percepatan getaran tanah aksimum (PGA) dan intensitas gempa wilayah Sumatera bagian selatan.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari pengukuran HVSR di 14 titik stasiun pengukuran Daerah Sumatera bagian selatan.
2. Data yang digunakan merupakan data gempa yang diambil dari USGS pada tahun 1970 hingga 2024.
3. Penelitian ini dilakukan untuk penyediaan informasi berupa peta nilai frekuensi, faktor amplifikasi, dan *peak ground acceleration* pada wilayah penelitian yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk menentukan daerah rawan gempa.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah memperoleh informasi mengenai daerah rawan gempa khususnya di daerah Sumatera bagian selatan serta mengetahui lapisan bawah permukaan lokasi penelitian pada Daerah Sumatera bagian selatan berdasarkan data tahun 2023. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan suatu referensi untuk penelitian selanjutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

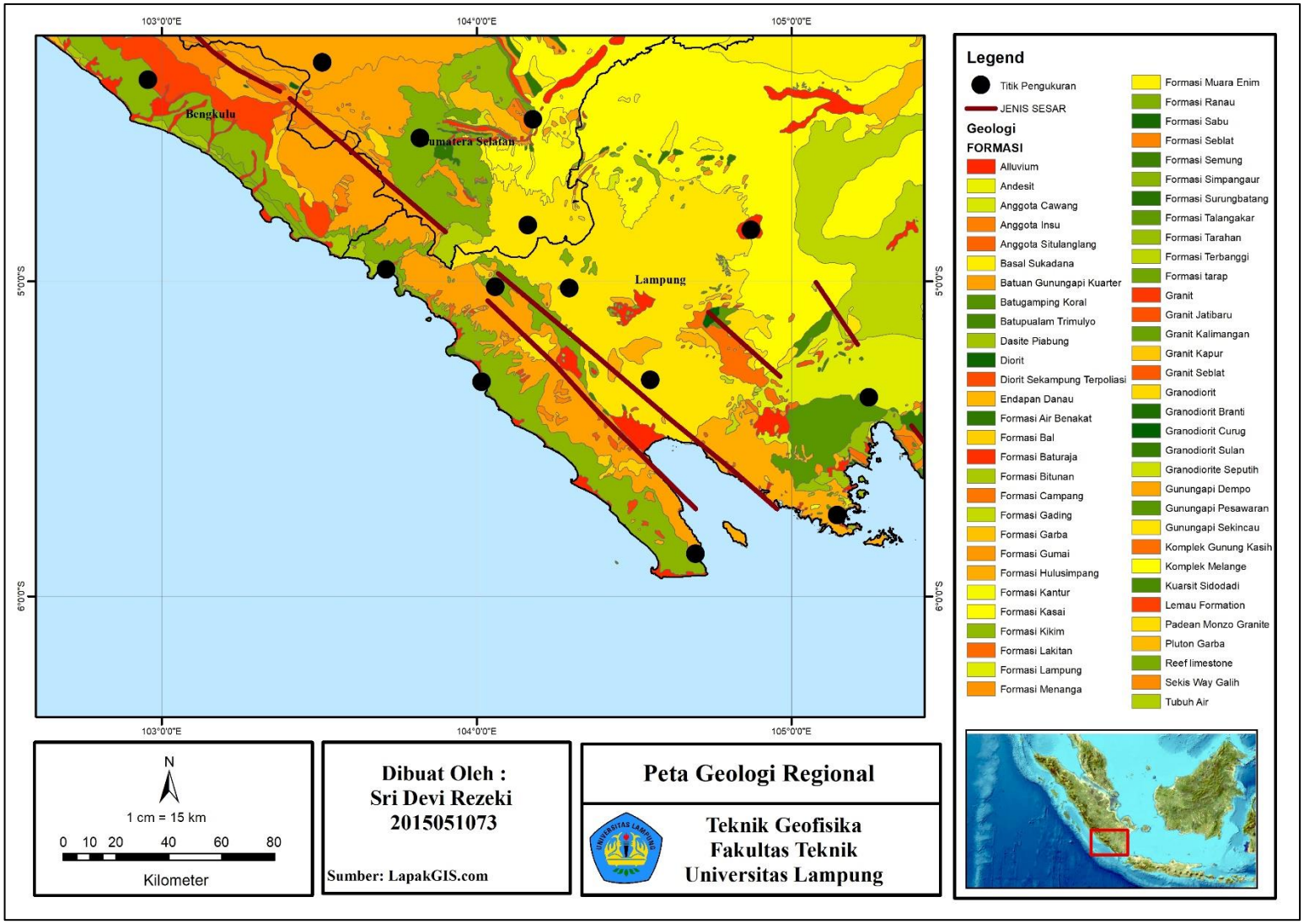
2.1. Lokasi Daerah Penelitian

Lokasi wilayah penelitian secara administratif berada di Pulau Sumatera bagian selatan, Tempat ini terletak pada koordinat geografis 4˚0’ LS – 6˚ 0’LS dan 102˚40’ BT−108˚30’BT yang meliputi Sumatera bagian selatan yaitu Lampung, Palembang, dan Bengkulu. Kelompok geologi di wilayah ini adalah kelompok sedimen, vulkanik dan instrusif. Peta wilayah penelitian dapat ditunjukkan pada **Gambar 1.**

Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian (ESRI, 2023)

2.2.Geologi Regional

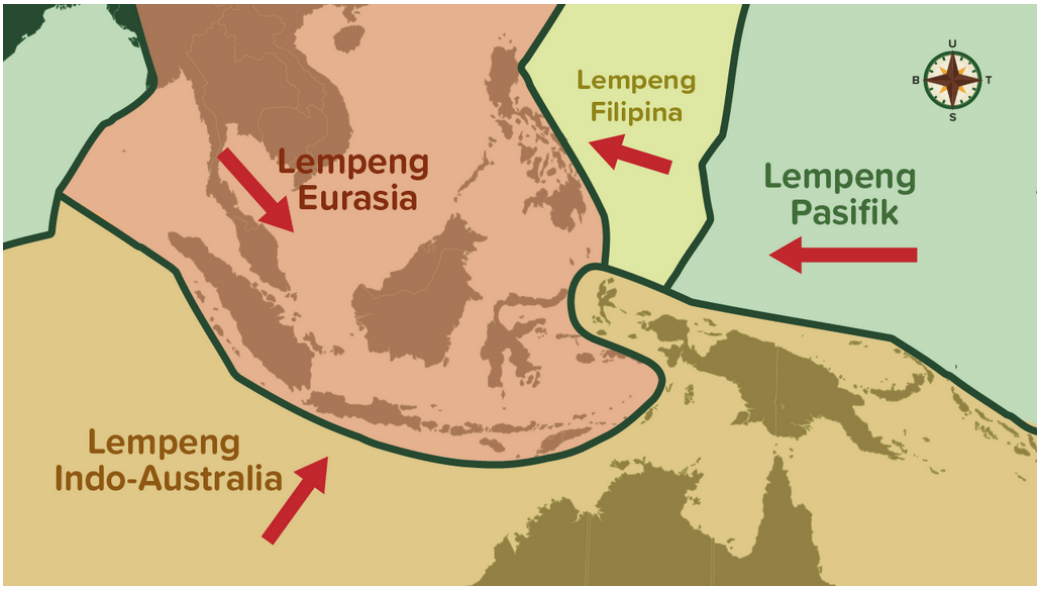
Lokasi penelitian terdapat pada lembar Sumatera bagian selatan yang dapat dilihat pada **Gambar 2.** Secara garis besar Sumatera bagian selatan dapat dibedakan menjadi tiga satuan morfologi, yaitu satuan dataran rendah di bagian timur dan timur laut, satuan dataran tinggi di bagian tengah dan barat daya, satuan perbukitan bergelombang di bagian tengah dan sedikit di bagian selatan. Struktur Pulau Sumatera saat ini didominasi oleh efek subduksi timur laut yang menunjamkan lempeng Hindia. Pulau Sumatera dan terpotong oleh Sesar Sumatera (Semangko) yang panjangnya 1.650 kilometer dan merupakan sesar aktif, dibuktikan dengan sejarah gempa bumi di Pulau Sumatera. Sesar Sesar Semangko merupakan sesar *dextral strike dip* kanan yang membentang dari barat laut ke arah tenggara melalui Bukit Barisan (Barber et al., 2005). Zona Sesar Sumatera terbentang dari Aceh hingga Lampung di Sumatera bagian barat. Selatan dari Suoh, ruas Semangko terbagi menjadi dua bagian, yaitu ruas Semangko Barat dan ruas Semangko Timur. Ruas Semangko Barat berlanjut di dasar laut sebelah barat Teluk Semangko dan menjadi dua cabang yang berputar dengan arah jarum jam menuju zona subduksi Selat Sunda hingga membentuk Graben laut dalam (Natawidjaja, 2018). Segmen Komering adalah bagian atau ruas dari Sesar Sumatra yang membentang sepanjang 150 km dari kawasan Bukit Kampak barat laut Kota Bintuhan hingga cekungan Suoh di Lampung Barat (Bellier dan Sébrier, 1994; Ariwibowo dkk., 2017). Ujung barat laut sesar ini mencerminkan wilayah yang terkena dampak komponen kontraksi. Di tengah sesar, terdapat Danau Ranau atau kaldera yang dilalui oleh sesar segmen Komering. Di bagian selatan, diketahui juga terdapat sesar aktif yani sesar Liwa. Sedangkan di bagian ujung tenggara, terdapat lembah *step-over* (tekukan) Suoh yang menjadi batas ujung sesar sekaligus memisahkan segmen Kumering dengan segmen semangko di Lampung.



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian (Modifikasi dari Sukamto,dkk., 1996)

2.3.Tektonik Pulau Sumatera

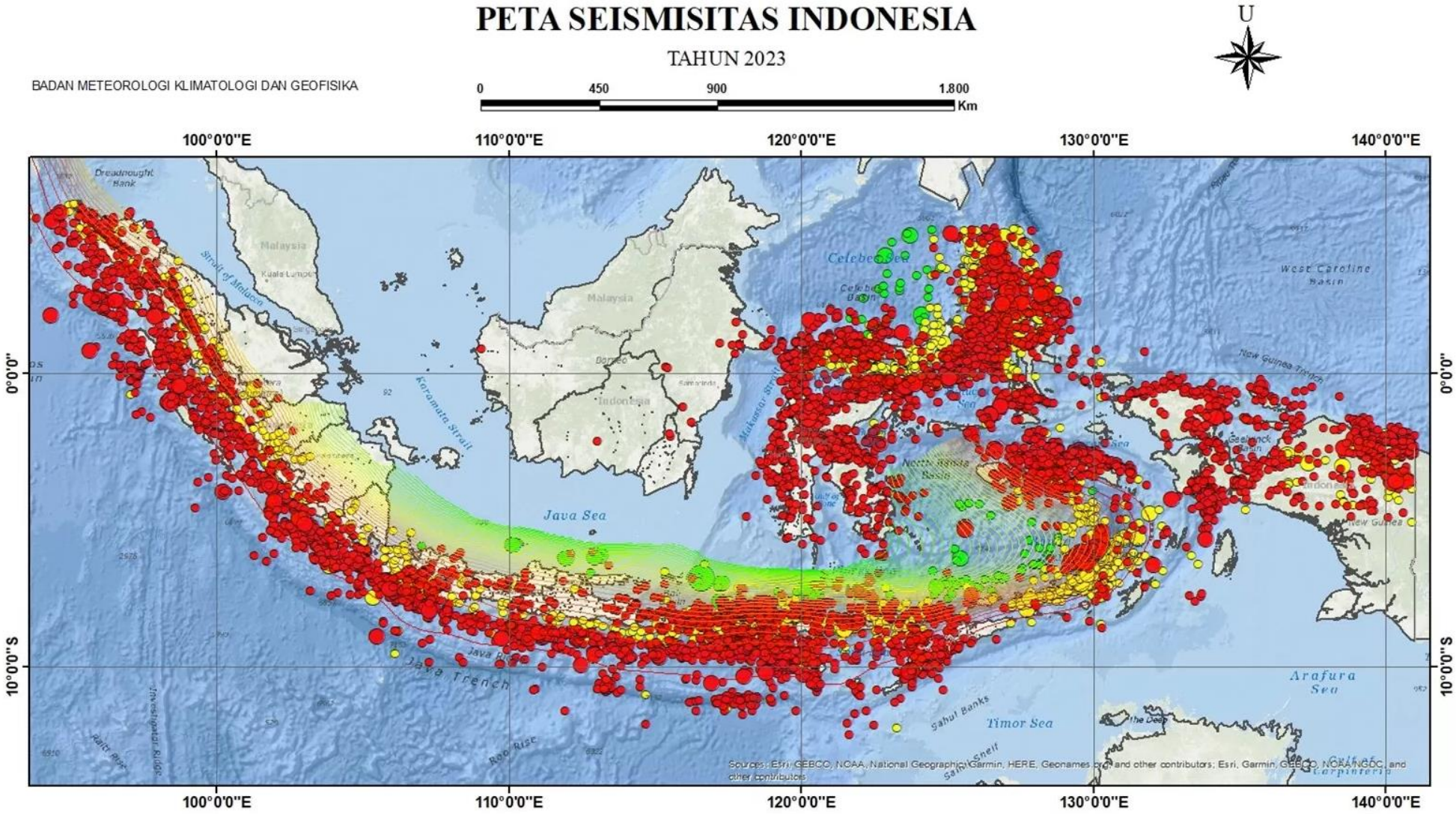
Lempeng Hindia dan Lempeng Australia mengalami pergerakan relatif ke utara di bawah Lempeng Eurasia dengan kecepatan 6 cm per tahun. Pulau Sumatera terletak di antara kedua lempeng tersebut, sehingga di sebelah baratnya terdapat zona kontak antara lempeng Indo-Australia dan Eurasia yang disebut zona subduksi. Lempeng benua sudah berumur tua dan tebal mengandung busur vulkanik, berkapur dan tersier. Intrusi batuan sedimen lunak yang sangat tebal pada zona subduksi Sumatera terdorong ke atas, yang kemudian membentuk rangkaian puau-pulau, salah satunya adalah Pulau Sumatera. Tumbukan lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia berdampak pada wilayah Indonesia bagian barat (Sumatera, Jawa dan Nusa Tenggara), sedangkan tumbukan kedua lempeng tersebut dan lempeng Pasifik berdampak pada wilayah Indonesia bagian timur (Irian dan Maluku bagian Utara). Garis subduksi membentang di sepanjang pantai barat Sumatera. Dengan adanya jalur subdukdi ini, sebagian besar wilayah Sumatera, khususnya Sumatera bagian selatan, sangat rentan terhadap risiko gempa bumi. Gambaran mengenai tektonik dan lempeng tektonik kepulauan Indonesia disajikan pada **Gambar 3.**



Gambar 3. Peta tektonik Indonesia (Harmadhoni, 2011)

2.4. Seismisitas

Indonesia merupakan salah satu wilayah yang paling rawan gempa. Hal ini ditunjukkan dengan adanya gempa bumi yang terjadi di Indonesia beberapa tahun terakhir. Gempa bumi yang terjadi di dekat batas lempeng samudera dan menukik ke bawah lempeng benua diklasifikasikan sebagai zona subduksi. Dalam penelitian ini penulis menggunakan data gempa wilayah Bengkulu, Lampung dan Sumatera Selatan. Zona subduksi Sumatera termasuk wilayah yang cukup sering melepaskan energi gempa bumi, Peta seismisitas Indonesia 2023 menunjukkan aktivitas seismik sangat tinggi di Indonesia. Hampir seluruh wilayah Indonesia merupakan daerah rawan gempa dengan contoh diperlihatkan pada **Gambar 4.** Hal ini diakibatkan karena pergerakan relatif antara lempeng Indonesia dengan sesar regional dan lokal mengakibatkan terjadi gempa bumi setiap tahun (BMKG, 2010). Salah satunya daerah Sumatera bagian selatan mempunyai tingkat yang tinggi terhadap seismisitas.



Gambar 4. Peta seismisitas Indonesia 2023 (BMKG, 2023)

2.5. Sejarah Kegempaan

Pada Sumatera, gerakan lempeng Hindia dan lempeng Australia menyebabkan lempeng tersebut bertabrakan serta menyebabkan subduksi sehingga menimbulkan sejumlah pulau depan non-vulkanik (P. Simeulue, P. Nias, P. Banyak, P. Siberut, P. Batu dan P. Enggano), Pegunungan Bukit Barisan dengan zona vulkanik di tengahnya, dan Sesar Besar Sumatera, Sesar aktif yang memisahkan Pulau Sumatera dari Teluk Semangko sampai Banda Aceh. Patahan besar ini meluas ke Laut Andaman dan Burma. Sesar aktif ini diprediksi bergerak sekitar sebelas sentimeter per tahun dan rawan terhadap gempa bumi dan tanah longsor.

Gempa terbesar yang terjadi di Lampung yaitu 6.5 SR yang berdampak di Kabupaten Lampung Barat, Kota Liwa terjadi pada 15 februari tahun 1994 berdampak kerusakan yang parah. Gempa bumi tidak hanya mengakibatkan kerugian materi, namun juga memakan korban jiwa sebanyak 207 orang, baik dewasa maupun anak-anak, dengan Desa Pasar Liwa di Kecamatan Balikbukit menjadi daerah yang paling terkena dampaknya.

Menurut laporan, gempa berpusat di Sesar Semangko di Samudera Hindia yang meratakan hampir seluruh bangunan permanen Liwa. Ratusan warga tewas dan jumlah korban luka mencapai sekitar 2.000 orang. Rata-rata, orang mengalami tewas dan banyak luka-luka di beberapa desa dan kelurahan di Lampung Barat. Menurut informasi, warga yang terancam kehilangan rumah mencapai kurang lebih 75.000.

Pada tanggal 12 September 200, terjadi gempa besar berkekuatan 7.9 SR, di wilayah Bengkulu. Episentrum gempa terletak sekitar 10 km di bawah permukaan tanah, kurang lebih 105 km dari bibir pantai. Peristiwa tersebut terjadi di pesisir utara Bengkulu, menewaskan 14 orang, melukai 38 orang, dan merusak lebih dari 27.000 rumah di sekitar Muko-muko.

Pada tanggal 5 Maret 2010, gempa bumi Sumatera Selatan berkekuatan 6.8 SR terjadi di lepas pantai Sumatera, Indonesia. Episentrum gempa terletak pada 135 kilometer sebelah barat Bengkulu, 315 kilometer tenggara dari

Padang, Indonesia, dan 685 kilometer barat laut dari ibu kota Indonesia, Jakarta. Gempa tersebut menimbulkan kepanikan namun tidak menimbulkan kerusakan atau korban jiwa.

2.6. Penelitian Terdahulu

Aprilianto dkk. (2016) melakukan penelitian mengenai pemodelan *Ground motion di* wilayah Sumatera Selatan didasarkan pada analisis bahaya gempa seismik probabilistik, yang menghasilkan percepatan getaran tanah (PGA), yang kemudian dengan menggunakan analisis *Nonlinear Earthquake site Response Analyses* (NERA) menghasilkan pemodelan gerakan tanah. Dengan menggunakan metode tersebut, BH – 01 yang diperoleh pada proses PSHA mempunyai nilai puncak percepatan tanah sebesar 0.248 g dan nilai gempa maksimum sebesar 7.2 SR, serta BH – 08 dengan nilai percepatan getaran tanah maksmium sebesar 0.27112 g memiliki nilai maksimum. Nilainya 7 SR dan didominasi oleh gempa bumi yang berasal dari sumber gempa bumi *background*. Selain itu, nilai maksimum *ground motion* permukaan di titik BH – 01 memiliki nilai 0,41 g, pada batuan dasar senilai 0,248 g, dan nilai maksimum gerak tanah sintetik permukaan di titik BH-08 sebesar 0,49 g dan terdapat nilai *ground motion* sebesar 0,2711 g pada batuan dasar.

Windiyanti dkk. (2019) Penelitian ini menggunakan pendekatan *Peak Ground Acceleration* (PGA) sebagai salah satu indikator untuk mengetahui tingkat kerusakan tanah akibat getaran gempa bumi, dan bertujuan untuk mengetahui zona puncak percepatan tanah (PGA) dan intensitas gempa berdasarkan data historis dari tahun 1990-2017, dan data *accelerograph* 2008-2017. Hasil penelitian setelah dilakukan analisa menunjukkan bahwa nilai PGA di wilayah Lampung bervariasi antara antara -9 gal hingga 270 gal. Di wilayah Lampung, luas percepatan tanah maksimum dibagi menjadi tiga zona. Artinya, zona pertama memiliki nilai PGA -9 hingga 2,9 gal dan zona kedua memiliki nilai PGA -9 hingga 2,9 gal intensitas gempa I-II MMI untuk daerah Bandar Lampung dan Kota Bumi. PGA wilayah Kota Agung MMI sebesar 2,9 – 88 gal pada intensitas III-V MMI, dan zona 3 dengan

nilai PGA 167 – 270 gal pada intensitas VII-VIII MMI. Hal ini disebabkan gempa memiliki sumber di laut bagian barat (Samudera Hindia).

Febriani dkk. (2013) Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kerentanan gempa dan nilai PGA Kota Bengkulu karena wilayah tersebut sangat rentan terhadap gempa bumi. Data dikumpulkan dari 21 titik pengukuran menggunakan seismometer DS-4A. Nilai periode dominan dihitung dengan menggunakan teknik HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Metode empiris Kanai digunakan untuk menghitung nilai PGA gempa bumi 4 Juni 2000 berkekuatan 7.9 SR. Hasil pengolahan data menunjukkan nilai PGA Kota Bengkulu berkisar antara 292 gal hingga 852 gal dan nilai kerentanan seismik berkisar antara 0.3 hingga 20.8. Dengan menggunakan nilai PGA dan Indeks Kerentanan Seismik, dibuat rekomendasi perencanaan tata ruang wilayah studi untuk meminimalkan tingkat kerusakan, korban jiwa dan korban jiwa akibat gempa bumi di masa depan.

III. TEORI DASAR

3.1. Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran pada tanah yang disebabkan oleh gerakan tiba-tiba akibat keruntuhan batuan yang melampaui batas elastisitasnya (Benyamin dkk., 2014). Teori *elastic rebound* menyatakan bahwa gempa bumi merupakan fenomena alam yang disebabkan oleh pelepasan energi secara tiba-tiba dari batuan yang regang secara elastis di litosfer, semakin banyak energi yang dilepaskan maka semakin kuat pula gempa yang terjadi (Ibrahim dan Subardjo, 2005). Sedangkan menurut Lutgens (1982) gempa bumi adalah getaran bumi yang disebabkan oleh seumbernya ke segala arah.

Gempa bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber penyebab terjadinya (Ibrahim dan Subardjo, 2003):

1. Gempa bumi Runtuhan merupakan gempa bumi yang diakibatkan oleh runtuhnya lubang-lubang di dalam bumi seperti gua, tambang dan lain-lain.
2. Gempa bumi Vulkanik merupakan gempa bumi yang diakibatkan oleh pergerakan magma akibat aktivitas gunung berapi.
3. Gempa bumi Tektonik adalah gempa bumi yang diakibatkan oleh aktivitas sesar akibat perlipatan dan pembentukan kerak bumi. gunung dan sebagainya. Gempa bumi tektonik adalah gempa bumi yang penting terjadi secara keseluruhan.

Gempa bumi dapat dikelompokkan Berdasarkan kedalamannya (Ibrahim dan Subardjo, 2005):

1. Gempa bumi dalam, yaitu gempa bumi yang jarak atau kedalaman hiposenternya lebih dari 300 km di bawah permukaan.
2. Gempa bumi sedang, yaitu gempa bumi dengan jarak hiposenter atau kedalaman antara 70 hingga 300 km di bawah permukaan.
3. Gempa bumi dangkal, yaitu gempa bumi yang jarak hiposenter atau kedalamannya kurang dari 70 km di bawah permukaan.

3.2. Teori Gelombang

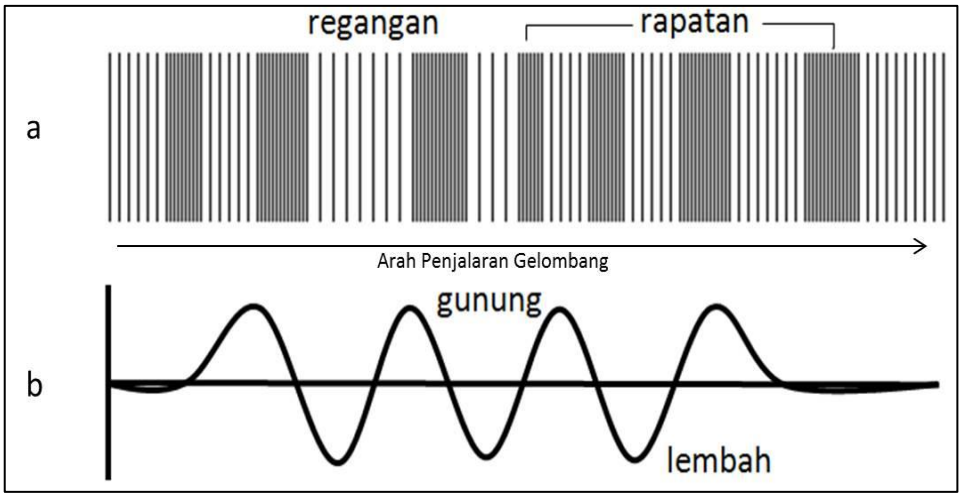
Gelombang adalah perambatan diakibatkan oleh kerusakan pada medium. Peristiwa rambatan ini tidak melibatkan perubahan secara permanen pada materi medium. Menurut arah getarannya, gelombang dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

3.2.1. Gelombang Transversal

Gelombang transversal adalah gelombang yang arah getarnya tegak lurus dengan arah rambatnya, sehingga gelombang ini mempunyai bentuk yang bergelombang dan berlembah. Gelombang ini memerlukan bahan padat agar dapat merambat secara efektif. Hal ini mengakibatkan gelombang merambat secara tidak efisien melalui bahan cair dan gas. Gelombang transversal relatif lebih lemah daripada gelombang longitudinal (Crawford, 1968). Gelombang transversal antara lain gelombang di tali dan gelombang pada permukaan air.

3.2.2. Gelombang longitudinal

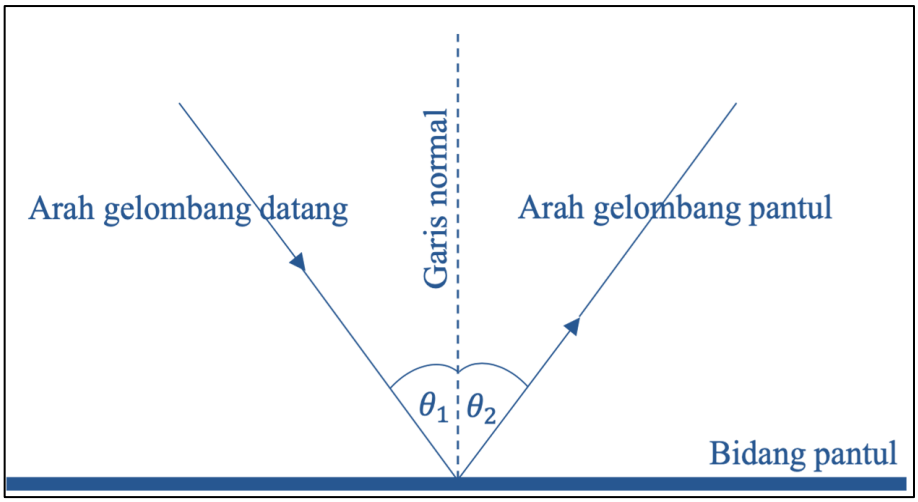
Gelombang longitudinal adalah gelombang yang arah getarnya berhimpit atau sama dengan arah rambat gelombang. Gelombang-gelombang bukanlah rangkaian puncak maupun lembah, melainkan kerapatan dan keregangan. Gelombang ini disebut juga gelombang kerapatan partikel bervariasi seiring dengan gerak gelombang. Gelombang tersebut mampu menjalar pada materi cair dan padat (Pain, 2021). Contoh gelombang seperti pada gelombang pegas. Pergerakan partikel kedua gelombang ini dapat dilihat pada **Gambar 5.**



Gambar 5. a) Gelombang longitudinal dan b) Gelombang transversal.

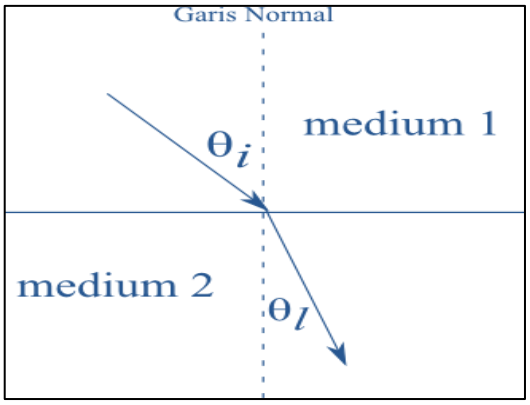
Gelombang mempunyai sifat umum yaitu :

1. Gelombang refleksi adalah fenomena di mana gelombang memantul kembali saat mereka bertemu dengan batas antara dua medium dengan sifat yang berbeda. Ini terjadi ketika gelombang yang datang mengenai suatu permukaan dan sebagian atau seluruhnya dipantulkan kembali ke arah asalnya.



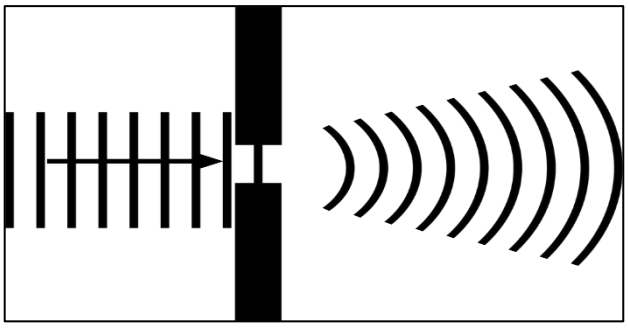
Gambar 6. Pemantulan gelombang

2. Pembiasan atau refraksi. Ketika gelombang melalui batas antara media dengan kecepatan perambatan yang berbeda, kecepatan gelombang akan berubah, yang menyebabkan gelombang membengkok atau berubah arah. Hal ini terjadi karena cepat rambat gelombang bergantung pada sifat medium tempat gelombang tersebut merambat, seperti massa jenis dan elastisitasnya.



Gambar 7. Pembiasan gelombang

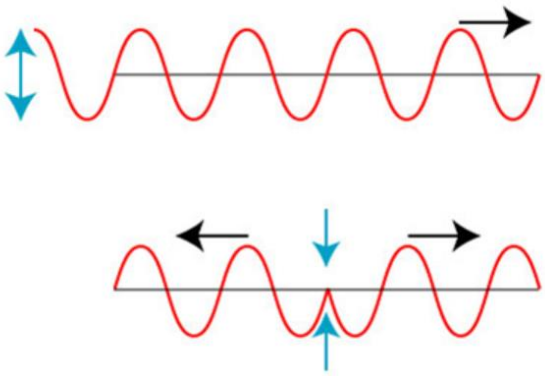
3. Lenturan atau difraksi, ketika gelombang bertemu dengan penghalang atau celah pada jalur perambatannya, sebagian energi gelombang bisa melengkung melewati penghalang tersebut. Besarnya efek difraksi tergantung pada ukuran relatif dari celah atau penghalang dan panjang gelombang dari gelombang yang bergerak.



Gambar 8. Lenturan gelombang

4. Gelombang juga dapat mengalami penggabungan, disebut juga dengan interferensi. Gelombang interferensi merupakan fenomena dimana dua atau lebih gelombang bertemu dan berinteraksi saat melewati satu titik di ruang. Interferensi dapat menghasilkan penambahan atau pengurangan amplitudo gelombang, tergantung pada fase relatif gelombang-gelombang tersebut saat bertemu. Interferensi terjadi ketika gelombang-gelombang tersebut memiliki frekuensi yang sama atau mendekati, dan bertemu dalam satu titik.

interferensi dapat dilihat dalam pola-pola yang terbentuk oleh gelombang. Gelombang interferensi dapat dibagi menjadi dua jenis yakni interferensi destruktif dan interferensi konstruktif.



Gambar 9. Interferensi gelombang

3.3. Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah gelombang yang merambat melewati medium bumi. Perambatan gelombang ini tergantung pada sifat elastis batuan. Contoh dari gelombang seismik yaitu gempa bumi. Menurut (Nurdiyanto dkk., 2011), gelombang seismik adalah gelombang yang menjalar ke seluruh bumi karena adanya patahnya lapisan batuan atau adanya ledakan, seperti pergerakan lempeng, letusan Gunung Merapi, runtuhnya bangunan, dan sebagainya.

Gelombang seismik dibedakan berdasarkan tempat rambatnya, yakni gelombang badan dan gelombang permukaan. Gelombang badan adalah gelombang yang arah rambatnya berada di bawah permukaan, terdiri atas gelombang kompresional (gelombang longitudinal atau gelombang P) dan gelombang geser (gelombang transversal atau gelombang *S*). Gelombang *P* mempunyai ciri-ciri yaitu arah gerak partikel dalam medium searah dengan arah rambat gelombang, sedangkan arah rambat gelombang *S* tegak lurus terhadap gerak partikel dalam medium. Gelombang permukaan adalah gelombang seismik yang arah rambatnya hanya di batas permukaan medium.

Sifat pergerakan partikel media elastisitas, gelombang permukaan adalah gelombang kompleks berfrekuensi rendah dan amplitudo tinggi merambat karena pengaruh permukaan bebas (*free surface*) dimana terdapat perbedaan sifat elastisitas. Ada dua jenis dari gelombang permukaan yaitu gelombang *Rayleigh* dan gelombang *Love* (Telford dkk., 1976).

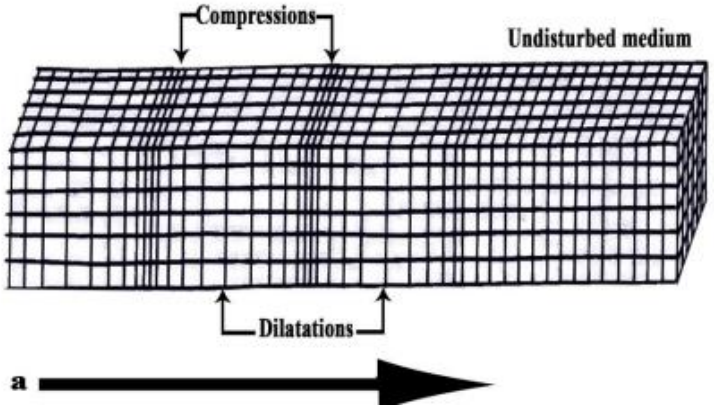
3.3.1. Gelombang badan (*Body Wave*)

Gelombang badan adalah gelombang yang merambat dalam media elastik dan perambatannya menyeluruh di bumi. Berdasarkan pergerakan partikel di lingkungan dan arah pergerakannya, gelombang dibagi menjadi atas gelombang *P* dan *S*.

- Gelombang *P*, atau gelombang primer adalah gelombang pertama yang diukur dengan seismometer. Hal ini dikarenakan gelombang *P* mempunyai kecepatan yang tinggi dibandingkan dengan gelombang seismik lainnya. Cara rambat gelombang *P* adalah longitudinal, yaitu gelombang yang arah gerak partikel sejajar dengan arah rambatnya. Gelombang *P* ini dapat merambat pada semua jenis media. Arah rambat gelombang *P* melewati medium mengalami tekanan dan regangan secara spiral, sering dinamakan dengan *Push-Pull Wave* atau *Compressional Wave*. **Persamaan 1** untuk kecepatan gelombang *P* adalah:

$$V_P = \alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \qquad (1)$$

Keterangan: V_P = Kecepatan gelombang P
λ = Konstanta lame
μ = Rigiditas
ρ = Densitas (massa jenis) batuan

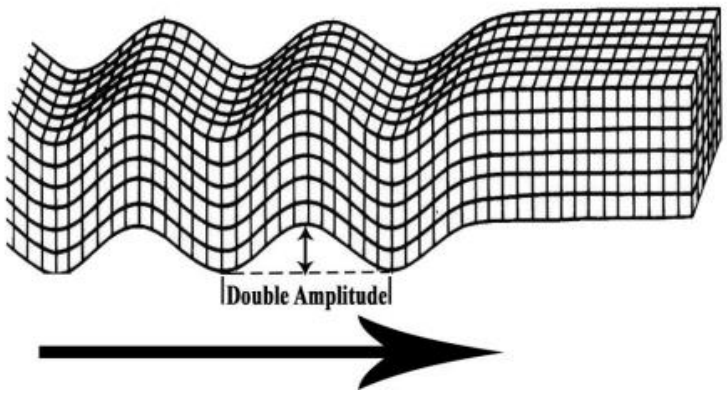


Gambar 10. Ilustrasi Gerak Gelombang Primer (Hidayati, 2010)

- Gelombang *S* disebut juga gelombang sekunder adalah gelombang yang kecepatannya lebih rendah dibandingkan gelombang P. Gelombang *S* ini adalah gelombang transversal, yaitu gelombang yang arah gerak partikelnya tegak lurus terhadap arah geraknya. Gelombang ini tercatat pertama kali di alat seismometer setelah gelombang *P* karena waktu rambatnya lebih lambat. Gelombang *S* ini tidak dapat merambat pada medium cair dan hanya dapat merambat pada medium padat. Persamaan kecepatan gelombang *S* adalah:

$$V_S = \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \qquad (2)$$

Keterangan: V_S = Kecepatan gelombang S
μ = Rigiditas
ρ = Densitas (massa jenis) batuan

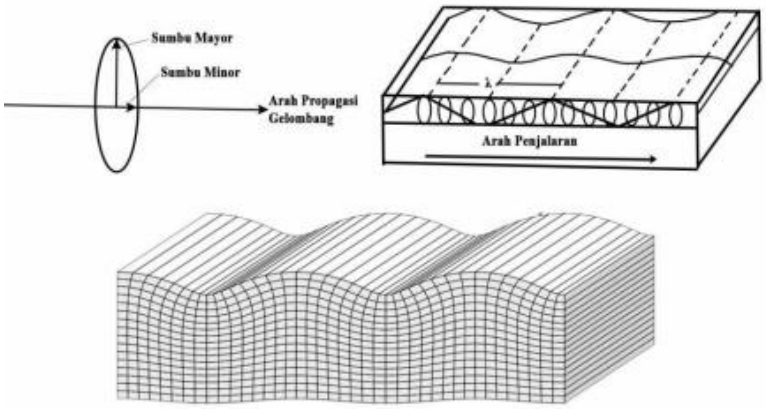


Gambar 11. Ilustrasi gerak gelombang sekunder (Hidayati, 2010)

3.3.2. Gelombang permukaan (*Surface Wave*)

Gelombang permukaan (*surface wave*) adalah gelombang kompleks dan mempunyai frekuensi rendah serta amplitudo besar, yang merambat oleh efek permukaan bebas dan mempunyai perbedaan sifat elastis. Gelombang ini dapat menunjukkan struktur mantel atas dan permukaan kerak bumi. Sifat dan pergerakan partikel media di permukaan mirip dengan gelombang *P* dan *S*. Berdasarkan sifat gerak partikel medium elastis, terdapat dua jenis gelombang permukaan yaitu gelombang *Rayleigh* dan gelombang *Love*.

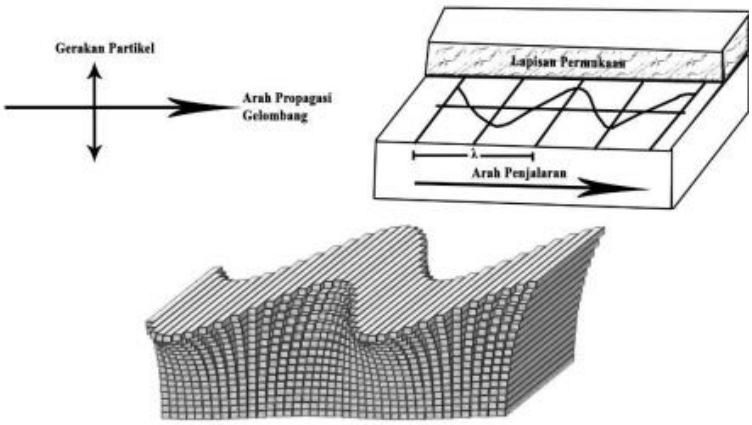
- Gelombang *Rayleigh* adalah gelombang yang merambat hanya pada suatu permukaan dan hanya dapat merambat pada medium padat dan arah gerak partikel berlawanan arah rambatnya. Gerak partikel gelombang *Rayleigh* adalah gabungan gerak partikel gelombang *P* dan gelombang *S*. Ilustrasi pergerakan gelombang *Rayleigh* dapat dilihat pada **Gambar 12.**



Gambar 12. Ilustrasi gerak gelombang *Rayleigh* (Hidayati, 2010)

- Gelombang *Love* merupakan gelombang yang merambat hanya pada lapisan batas permukaan dan hanya merambat secara horizontal. Gelombang *Love* merupakan gelombang permukaan yang gerak partikelnya mirip dengan gelombang *S*, yaitu terjadi secara tegak lurus atau transversal. Gelombang *Love* adalah gelombang permukaan yang amplitudonya terus meningkat seiring bertambahnya kedalaman gelombang dan gelombang ini adalah gelombang permukaan terbesar.

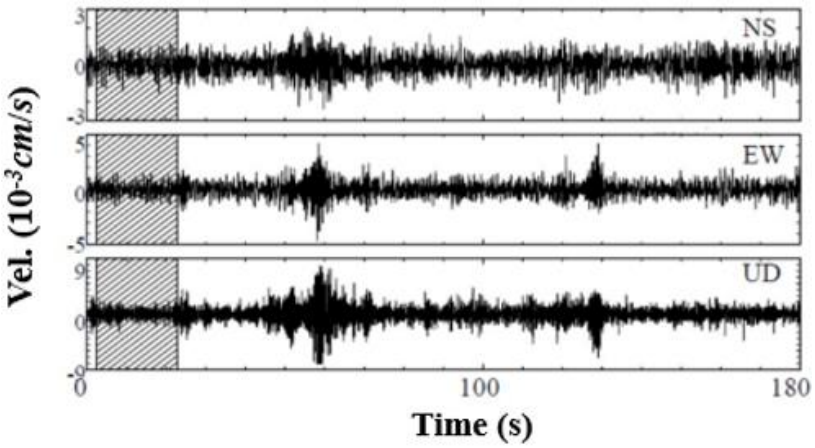
Dapat dilihat Ilustrasi Gerak Gelombang *Love* pada **Gambar 13.**



Gambar 13. Ilustrasi gelombang *Love* (Hidayati, 2010)

3.4. Mikrotremor

Mikrotremor merupakan metode yang menggunakan getaran yang disebabkan oleh aktivitas manusia serta fenomena alam (aliran air, angin, tekanan atmosfer, dan gelombang laut) dapat menentukan lokasi permukaan. Pengukuran metode ini biasanya mirip dengan pengukuran seismik. Sinyal dihasilkan dapat memberikan informasi contohnya sumber gelombang, redaman pada dgelombang, dan keadaan titik dari pengukuran. contohnya, gempa bumi sangat penting untuk memantau reservoir non-konvensional seperti shale gas untuk mengkarakterisasi rekahan dan menentukan potensi produksi sumur di masa depan. (Zheng dkk., 2016).



Gambar 14. Tampilan sinyal mikroseismik

Mikrotremor diakibatkan karena getaran kecil dan aktifitas alami pada bawah permukaan, terperangkap pada lapisan sedimen, terpantulkan karena frekuensi yang tetap dari bidang batas lapisan, dikarenakan adanya getaran mikro di permukaaan tanah dan kegiatan alam. Penelitian rekayasa gempa bumi menunjukkan bahwa batuan lunak mempunyai faktor amplifikasi dari gelombang yang lebih tinggi daripada batuan sehingga lebih rentan terguncang oleh gelombang seismik disebabkan mengalami amplifikasi gelombang yang lebih tinggi dibandingkan pada batuan yang kompak (Kanai, 1983).

Mikrotremor juga digunakan misalnya untuk monitoring *unconventional reservoirs* seperti laut menghasilkan *ambient vibration* serta memiliki frekuensi kurang lebih 0.2 Hz sedangkan frekuensi kurang lebih 0.5 Hz dihasilkan oleh interaksi gelombang laut dengan pantai. Pada frekuensi di bawah 0.1 Hz, mikrotremor dihubungkan dengan aktivitas atmosfer. Angin dan air dapat menghasilkan frekuensi tinggi di atas 1 Hz. Pada frekuensi tinggi yaitu di atas 1 Hz, sumber utamanya dari aktivitas manusia seperti lalu lintas kendaraan, mesin, dan lain-lain. Lokasi sumbernya biasanya di permukaan tanah dan bervariasi antara siang dan malam (SESAME European project, 2004).

Terdapat dua metode survei mikrotremor cara yang pertama adalah cara pendekatan perekaman yang dilakukan secara bersamaan oleh dua atau secara sekaligus. Salah satu tempat perekaman sebaiknya berada pada area batuan keras, sehingga tidak menunjukkan amplifikasi frekuensi akibat gerakan tanah. Rasio spektrum yang diperoleh di tempat lain dibandingkan dengan rasio spektrum yang terekam pada batuan keras untuk mengetahui respons lokasi terhadap mikrotremor. Pendekatan lain dikenalkan oleh Nakamura pada tahun 1989 dengan metode analisis. Nakamura berasumsi bahwa rasio spektral horizontal dan vertikal mikrotremor meningkat pada frekuensi resonansi dan menunjukkan puncak pada frekuensi tersebut. Nakamura berasumsi bahwa *H/V* mencerminkan tingkat faktor amplifikasi

gerakan tanah. Dengan menggunakan metode tersebut pengukuran tidak harus dilakukan karena batuan keras (*hard rock*) (Nakamura 1989).

3.5. Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR)

Nakamura (1989) mengusulkan metode HVSR untuk memperkirakan frekuensi dominan dan amplifikasi geologi lokal dari data mikrotremor. Metode ini juga dapat berfungsi untuk menentukan lokasi daerah rawan kerusakan bangunan yang disebabkan oleh pengaruh lokal, interaksi antara bangunan serta tanah, dan kekuatan bangunan. HVSR adalah cara untuk memahami sifat struktur bawah tanah tanpa meganggu pada strukturnya. Metode ini adalah metode yang menunjukkan hubungan antar struktur bawah tanah dengan cara membandingkan rasio komponen horizontal sinyal mikrotremor dengan spektrum Fourier komponen vertikal (Nakamura, 1989). Metode HVSR dapat digunakan untuk menunjukkan jenis tanah berdasarkan nilai frekuensi dominan, yang tentunya sangat berguna dalam pengaplikasian bawah tanah seperti klasifikasi kerentanan tanah atau sebagai referensi untuk konstruksi tahan gempa (Haeruddin dkk., 2020).

Metode HVSR memperoleh parameter penting yakni nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi yang berkaitan dengan parameter fisik bawah permukaan. Metode HVSR dapat memberikan informasi mengenai fenomena frekuensi resonansi bawah permukaan tanpa harus menggunakan acuan dari batuan *bedrock*, yaitu dengan mengukur satu lokasi dan memperoleh tiga komponen yaitu vertikal, horizontal utara-selatan, dan horizontal timur-barat. Metode ini juga dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi respon resonansi pada lembah sedimen atau cekungan yang berisi sedimen. Cara ini merupakan cara yang efektif, hemat biaya, dan ramah lingkungan yang dapat digunakan pada kawasan pemukiman.

Metode HVSR dilakukan dengan mengestimasi rasio komponen vertikal spektrum Fourier terhadap komponen horizontal. Frekuensi natural lokal adalah frekuensi puncak pertama dari rasio HVSR, dan rasio HVSR terhadap

frekuensi natural merupakan nilai amplifikasi geologi lokal (SESAME, 2004).

Prinsip kerja metode HVSR adalah memanfaatkan getaran harmonis alami dari bumi. Metode HVSR merupakan metode yang membandingkan rasio komponen horizontal terhadap komponen vertikal dari sinyal mikroseismik yang diukur. Data yang diperoleh dengan metode HVSR berupa nilai frekuensi natural (f_0) dan nilai amplifikasi (A_0). Kedua data ini dapat diolah lagi untuk mendapatkan indeks kerentanan seismik (K_g) dan ketebalan lapisan pelapukan (H) (Nakamura, 2000). Parameter penting yang diperoleh dengan metode HVSR adalah frekuensi natural dan amplifikasi. Tujuan pengukuran HVSR di bawah tanah adalah untuk mengkarakterisasi geologi lokal, frekuensi natural dan amplifikasi yang terkait dengan parameter fisik bawah permukaan tanah (Herak, 2008).

Metode HVSR sangat berguna dalam mengidentifikasi respon resonansi cekungan yang terkandung sedimen. Fenomena resonansi lapisan sedimen adalah terperangkapnya gelombang seismik pada lapisan permukaan yang disebabkan oleh adanya kontras impedansi lapisan sedimen dengan batuan keras yang lebih dalam. Interferensi antar gelombang seismik yang terperangkap dalam lapisan sedimen berkembang menuju resonansi yang terkait dengan karakteristik lapisan sedimen (Daryono, 2010). Metode ini membuat beberapa asumsi bahwa:

a. Mikrotremor sebagian besar terdiri dari gelombang geser.
b. Komponen vertikal gelombang tidak mengalami amplifikasi lapisan sedimen dan hanya komponen horizontal yang teramplifikasi.
c. Pada batuan dasar, tidak ada amplitudo yang bekerja pada arah tertentu yang spesifik pada *bedrock* dengan getaran ke segala arah.
d. Gelombang *Rayleigh* diasumsikan sebagai noise atau kebisingan mikrotremor dan sebuah metode untuk menghilangkan efek gelombang *Rayleigh.*

Metode HVSR terdapat dua data komponen horizontal EW dan NS serta satu data komponen vertikal. Penggabungan dua data horizontal, biasanya dilakukan dalam fungsi frekuensi berdasarkan aturan Phytagoras. Dinyatakan secara matematis pada **Persamaan 3.**

$$(Rf) = \sqrt{\frac{H_{EW^2}(f) + H_{NS^2}(f)}{V_{UD}(f)}} \quad (3)$$

Keterangan:

$R(f)$ = Spektrum rasio HVSR

$H_{EW^2}(f)$ = Spektrum komponen barat-timur,

$H_{NS^2}(f)$ = Spektrum komponen horizontal utara-selatan

$V_{UD}(f)$ = Spektrum komponen vertikal.

Site Effect (T_{SITE}) pada permukaan lapisan sedimen biasanya ditunjukkan dengan cara membandingkan faktor amplifikasi pergerakan horizontal dan vertikal pada permukaan lapisan sedimen.

$$T_{SITE} = \frac{T_H}{T_V} \quad (4)$$

Keterangan:

T_H = Faktor amplifikasi horizontal

T_V = Faktor amplifikasi vertikal

Faktor amplifikasi dicatat untuk pergerakan horizontal dan vertikal permukaan tanah sedimen berdasarkan pergerakan seismik permukaan tanah yang bersentuhan langsung dengan batuan dasar di daerah cekungan (Nakamura, 2000).

Besarnya faktor amplifikasi horizontal T_H adalah:

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (5)$$

Keterangan:

S_{HS} = Spektrum dari komponen gerak horizontal pada permukaan tanah

S_{HB} = Spektrum dari komponen gerak horizontal pada dasar lapisan tanah

Besarnya faktor amplifikasi vertikal T_V adalah:

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (6)$$

Keterangan:

S_{VS} = Spektrum dari komponen gerak vertikal pada permukaan tanah

S_{VB} = Spektrum dari komponen gerak vertikal pada dasar lapisan tanah

Gelombang *Rayleigh* mendominasi data mikrotremor dibandingkan dengan beberapa jenis gelombang yang lainnya. Pengaruh gelombang *Rayleigh* terhadap rekaman mikrotremor sama untuk komponen vertikal dan horizontal pada rentang frekuensi 0.2 Hz hingga 20.0 Hz, sehingga perbandingan spektrum komponen horizontal dan vertikal batuan dasar mendekati satu:

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \approx 1 \quad (7)$$

Mensubstitusikan persamaan amplifikasi horizontal dan amplifikasi vertikal pada persamaan tersebut, maka amplifikasi horizontal (S_{HV}) dan vertikal (S_{VS}) pada permukaan tanah sedimen, diperoleh:

$$T_{SITE} = \frac{S_{HV}}{S_{VS}} \quad (8)$$

Persamaan ini menjadi dasar untuk menghitung rasio spektrum mikrotremor dari komponen horizontal hingga komponen vertikalnya (HVSR), sehingga dinyatakan sebagai **Persamaan 9.**

$$HVSR = T_{SITE} = \sqrt{\frac{f(S_{US)2} + (S_{BT)2}}{S_V}} \quad (9)$$

Keterangan:

S_{US} = Nilai amplitudo spektrum komponen Utara-Selatan

S_{BT} = Nilai amplitudo spektrum komponen timur-barat

SV = Nilai amplitudo spektrum komponen vertikal

Persamaan 9 menjadi dasar untuk menghitung rasio spektrum mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya atau Horizontal (HVSR).

3.6. Frekuensi Dominan (f_0)

Frekuensi dominan merupakan nilai frekuensi yang sering muncul, sehingga disebut dengan nilai frekuensi lapisan batuan pada suatu daerah, sehingga nilai frekuensi dapat memberikan informasi mengenai jenis dan sifat batuan. Dalam kajian teknik gempa, litologi yang lebih lunak memiliki risiko lebih besar jika terguncang oleh gelombang seismik karena mengalami amplifikasi gelombang yang lebih besar dibandingkan batuan yang lebih kompak atau padat. Nakamura (2008) menjelaskan bahwa nilai faktor amplifikasi pada lokasi tertentu dapat ditentukan dengan melihat ketinggian puncak spektrum kurva HVSR. Jika nilai faktor amplifikasi diketahui, maka frekuensi dominan diketahui dengan menarik garis lurus ke bawah dari titik puncak.

Pengolahan dengan metode HVSR menghasilkan nilai frekuensi dominan atau frekuensi natural dan memperoleh nilai amplifikasi dengan menggunakan *software* pengolahan konsep konsep transformasi Fourier untuk memperoleh nilai frekuensi dominan. Pada tahun 1949, Lachet dan brad melakukan uji simulasi menggunakan enam model struktur geologi sederhana yang menggabungkan variasi berlawan dalam kecepatan gelombang geser dan ketebalan lapisan tanah (Arifin, 2014). Nilai frekuensi

dominan mengacu pada kedalaman permukaan pantulan gelombang bawah permukaan, yang mewakili batas antara sedimen lepas dan batuan keras. Semakin rendah frekuensi pantulan gelombang maka semakin tebal sedimennya dan semakin dalam permukaan pantulan gelombangnya. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai frekuensi puncak berubah seiring perubahan geologi. Kanai (1983) juga mengklasifikasikan jenis tanah berdasarkan frekuensi mikroseismik dominan seperti terlihat pada **Tabel 1.**

Tabel 1. Klasifikasi Tanah berdasarkan Nilai Frekuensi Dominan menurut (Kanai, 1983)

Klasifikasi Tanah		**Frekuensi Natural (*Hz*)**	**Penyusun**	**Deskripsi**
Tipe	**Jenis**			
Tipe IV	Jenis I	6,67 – 20	batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan *hard sandy, gravel*, dan lainnya	ketebalan sedimen permukaan sangat tipis, didominasi oleh batuan keras
	Jenis II	4 – 6,67	batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan *hard sandy, gravel*, dan lainnya	ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori menengah, 5 – 10 m
Tipe III	Jenis III	2,5 – 4	batuan aluvial, dengan ketebalan lebih dari 5 m. terdiri dari *sandy gravel, sandy hard clay, loam*, dan lainnya	ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10 – 30 m
Tipe II Tipe I	Jenis IV	kurang dari 2,5	batuan *alluvial*, yang terbentuk dari sedimentasi delta, *top soil*, lumpur, dan lainnya. Kedalaman ≥ 30 m	ketebalan sedimen permukaan sangatlah tebal

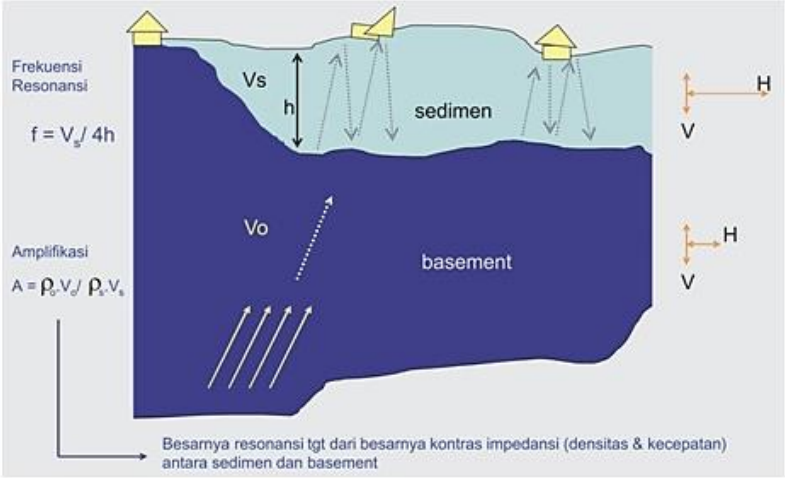
3.7. Faktor Amplifikasi (A_0)

Faktor amplifikasi adalah peningkatan ukuran gelombang seismik karena adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan. Dengan kata lain, gelombang seismik diperkuat ketika merambat dari satu medium ke medium lain yang lebih lunak dari medium asli yang dilaluinya. Semakin besar perbedaannya, semakin tinggi perbesaran yang diterima gelombang tersebut. Nilai faktor amplifikasi permukaan tergantung pada perbandingan kontras impedansi lapisan permukaan dan lapisan di bawahnya. Jika rasio kontras impedansi antara kedua lapisan tinggi maka nilai faktor amplifikasi juga tinggi dan sebaliknya (Nakamura, 2000).

Amplifikasi adalah penguatan gelombang seismik yang disebabkan oleh perbedaan signifikan antar lapisan. Meningkatnya percepatan tanah dari batuan dasar ke permukaan disebabkan oleh adanya perbedaan kecepatan gerak gelombang geser (*Vs*) antara batuan dasar dan lapisan tanah (sedimen). Nilai *Vs* makin menurun dari batuan dasar hingga ke permukaan. Menurunnya ilai *Vs* disebabkan kecilnya nilai modulus geser (μ) dan faktor redaman sehingga meningkatkan percepatan tanah. Semakin besar. Semakin besar nilai faktor amplifikasi maka semakin besar pula percepatan pergerakan tanah pada lapisan permukaan (Partono dkk., 2013).

Faktor amplifikasi berbanding lurus dengan rasio spektral horizontal dan vertikal (*H/V*). Amplifikasi nilainya dapat bertambah jika batuan mengalami deformasi (pelapukan, pelipatan atau patah) sehingga mengubah sifat fisik batuan. Bahkan pada batuan yang sama, nilai amplifikasi dapat berubah tergantung tingkat deformasi dan pelapukan (Marjiyono, 2010).

Nilai faktor amplifikasi tanah dengan perbandingan kontras impedansi lapisan permukaan dan lapisan di bawahnya saling berkaitan dapat dilihat pada **Gambar 15.**



Gambar 15. Konsep dasar amplifikasi gelombang seismik (Arifin, 2014).

Faktor amplifikasi terjadi karena adanya empat alasan. Hal ini antara lain lapisan pelapukan yang terlalu tebal di atas lapisan keras di suatu tempat, frekuensi natural yang rendah, frekuensi natural gempa bumi dan geologi lokal sama atau hampir sama, serta energi gempa yang terperangkap di lapisan hancur untuk waktu yang lama. Ketika mengevaluasi dampak lokal dari gempa bumi, faktor penting adalah adalah hubungan antara frekuensi natural bangunan dan frekuensi natural lapisan tanah di bawahnya. Untuk mengetahui nilai resonansi suatu bangunan yang kemudian menilai kerentanannya terhadap gelombang gempa.

Faktor amplifikasi gelombang gempa dapat terjadi melalui dua cara yang dapat merusak bangunan. Pertama, gelombang terperangkap pada lapisan lunak, oleh karena itu gelombang terbentuk dalam superposisi antar gelombang, jika gelombang mempunyai frekuensi yang relatif sama maka terjadi proses resonansi gelombang gempa bumi. Dampak dari proses resonansi ini, gelombang-gelombang ini saling menguatkan. Kedua, adanya kesamaan frekuensi natural geologi dan bangunan setempat. Hal ini menciptakan resonansi antara bangunan dan tanah setempat. Oleh karena itu, getaran tanah di dalam bangunan menjadi lebih kuat (Nakamura, 2000). Klasifikasi nilai faktor amplifikasi terdapat pada **Tabel 2.**

Tabel 2. Klasifikasi Nilai Amplifikasi (Setiawan, 2009)

Zona	Klasifikasi	Nilai Amplifikasi
1	rendah	A<3
2	sedang	3≤A<6
3	tinggi	6≤A<9
4	sangat tinggi	A≥9

3.8. Periode Dominan (T_0)

Periode dominan (T_0) adalah waktu yang diperlukan suatu getaran untuk merambat melalui suatu lapisan sedimen permukaan atau satu kali pantulan dari bidang pantul. Periode dominan yang diperoleh dari hasil perhitungan dapat berfungsi untuk menentukan sifat-sifat kelas tanah atau lapisan tanah (Ambarsari, 2017). Klasifikasi Tanah terdapat pada **Tabel 3.**

Periode dominan dihasilkan dari getaran yang sangat kecil dan terus menerus akibat aktivitas manusia dan pengaruh alam. Batuan lunak mempunyai periode dominan yang panjang dan sebaliknya batuan keras mempunyai periode dominan yang pendek (Edwiza dan Novita, 2008).

Periode dominan dapat dihitung nilainya menggunakan **Persamaan 10.**

$$T_0 = \frac{1}{f_0} \tag{10}$$

Keterangan:

T_0 = Periode dominan

f_0 = Frekuensi dominan

Tabel 3. Klasifikasi Tanah Kanai – Omote Nakajima (Ambarsari, 2017)

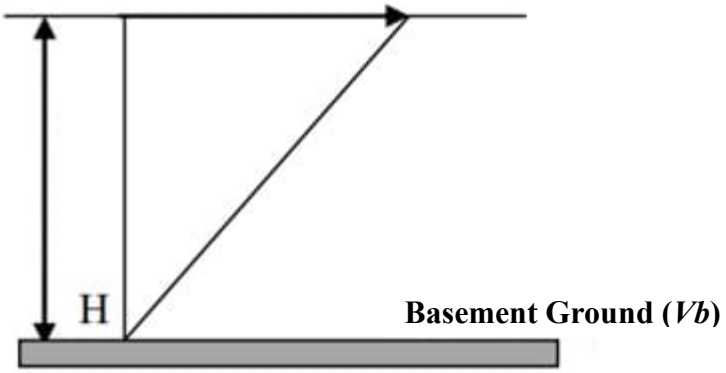
Klasifikasi Tanah Kanai	Omote-Nakajima	Periode (S)	Keterangan	Karakter
Jenis I		0,05 – 0,15	batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan pasir berkerikil keras	keras
Jenis II	Jenis A	0,15 – 0,25	batuan *alluvial* dengan ketebalan 5 m. Terdiri dari pasir berkerikil (*sandy gravel*), lempung keras (*sandy hard clay*), tanah liat, lempung (*loam*)	sedang
Jenis III	Jenis B	0,25 – 0,40	batuan aluvial hampir sama dengan jenis II hanya dibedakan oleh adanya formasi *buff*	lunak
Jenis IV	Jenis C	lebih dari 0,40	batuan *alluvial* terbentuk dari sedimentasi delta, *top soil*, lumpur, humus, endapan lumpur yang tergolong ke dalam tanah lembek dengan kedalaman 30 m atau lebih	sangat lunak

3.9. Indeks Kerentanan Seismik (K_g)

Indeks kerentanan seismik (K_g) adalah indeks yang menunjukkan kerentanan tanah permukaan terhadap deformasi pada saat terjadi gempa bumi (Nakamura, 2008). Indeks kerentanan seismik diperoleh dari perpindahan regangan tanah dan strukturnya saat terjadi gempa bumi. Menurut Nakamura (2008), kerusakan akibat gempa bumi terjadi ketika kekuatan gempa melebihi batas dari regangan sehingga mengakibatkan deformasi lapisan tanah permukaan.

Indeks kerentanan seismik adalah indeks yang menggambarkan tingkat kerentanan lapisan permukaan suatu wilayah terhadap deformasi tanah pada saat terjadi gempa bumi (Motamed dkk., 2007). Daerah dengan indeks kerentanan seismik rendah hanya mengalami sedikit kerusakan akibat gempa bumi. Pada saat yang sama, wilayah dengan indeks kerentanan seismik yang tinggi kemungkinan besar mengalami kerusakan akibat gempa bumi.

Wilayah dengan indeks kerentanan seismik rendah hanya mengalami sedikit kerusakan akibat gempa bumi, sedangkan wilayah dengan indeks kerentanan seismik tinggi mempunyai risiko tinggi terhadap kerusakan akibat gempa bumi. Indeks kerentanan seismik yang tinggi biasanya terdapat pada wilayah yang frekuensi dominan yang rendah. Artinya lapisan sedimen yang relatif tebal yang menutupi batuan dasar mempunyai kerentanan gempa yang tinggi (Saaduddin, 2015).



Gambar 16. *Surface ground deformation* (Nakamura, 2000)

Kerentanan tanah juga harus diperhitungkan dengan nilai perpindahan regangan tanah (γ) pada saat terjadi gempa bumi (Nakamura, 1997). Ketika menentukan indeks kerentanan seismik, penting untuk memperhatikan s*hear strain* pada tanah. **Gambar** 16 di atas menunjukkan deformasi akibat dari *shear strain* pada tanah, nilai γ ditunjukkan pada **Persamaan 11.**

$$\gamma = A_m \times \frac{d}{H} \tag{11}$$

Keterangan:

A_m = Indeks faktor amplifikasi

d = Jarak pergeseran

h = Ketebalan lapisan sedimen.

Kecepatan tanah dan gelombang dasar sebagai *Vb* dan *Vs,* sedangkah frekuensi dominan ditunjukkan dalam **Persamaan 12.**

$$f_0 = \frac{V_b}{4A_m \times h} \tag{12}$$

Keterangan:

f_0 = Frekuensi dominan

V_b = Kecepatan gelombang S di batuan dasar

A_m = Amplifikasi

h = Ketebalan sedimen.

Nilai percepatan tanah dibawah permukaan (α_b) dirumuskan sebagai berikut.

$$\alpha_b = (2\pi f_0)^2 \times d \quad (13)$$

Keterangan:

α_b = Percepatan getaran tanah maksimum dibawah dasar

f_0 = Frekuensi dominan

d = Jarak pergeseran.

Sehingga untuk mencari perpindahan seismik dapat menggunakan rumus sebagai berikut.

$$d = \frac{\alpha_b}{(2\pi f_0)^2} \quad (14)$$

Keterangan:

d = Jarak pergeseran

α_b = Percepatan getaran tanah maksimum dibawah dasar

f_0 = Frekuensi dominan.

Sehingga untuk persamaan bisa disubtitusikan ke persamaan, ditunjukkan oleh **Persamaan 15.**

$$\gamma = \left[\frac{A_m \times \alpha_b}{(2\pi f_0)^2}\right] \times \left[4A_g \times \frac{f_0}{V_b}\right] \quad (15)$$

Keterangan:

A_m = Amplifikasi

α_b = Percepatan getaran tanah maksimum dibawah dasar

f_0 = Frekuensi dominan

V_b = Kecepatan gelombang S di batuan dasar.

Menghitung *ground shear strain* lapisan tanah permukaan di suatu daerah akibat gempa bumi (Nakamura, 1997) dapat dilihat pada **Persamaan 16.**

$$\gamma = K_g \frac{\alpha_b}{\pi^2 V_b} \quad (16)$$

Keterangan:

K_g = Indeks kerentanan seismik

V_b = Kecepatan gelombang geser saat di bedrock

α_b = Percepatan getaran tanah maksimum dibawah dasar.

Nilai K_g menunjukkan nilai yang terukur untuk menghitung tingkat ketahanan atau lapisan bumi. Indeks kerentanan seismik K_g bergantung pada kondisi lapisan tanah. Dihitung menggunakan rumus yang terdapat pada **Persamaan 17.**

$$K_g = \frac{{A_0}^2}{f_0} \quad (17)$$

Keterangan:

K_g = Indeks kerentanan seismik

${A_0}^2$ = Amplifikasi dan f_0 adalah frekuensi dominan.

Adapun pengklasifikasian nilai kerentanan tanah (K_g) di tunjukkan pada **Tabel 4** berikut ini.

Tabel 4. Klasifikasi Nilai Kerentanan Gempa (Refrizon, dkk. 2013)

Kerentanan Tanah (K_g)	**Keterangan Resiko**
< 3	Rendah
3 – 6	Menengah
> 6	Tinggi

3.10. *Peak Ground Acceleration* (PGA)

Salah satu parameter terpenting dalam mengestimasi kerentanan gempa bumi adalah percepatan maksimum getaran tanah yang terjadi pada daerah rawan gempa, karena menggambarkan intensitas gempa yang terjadi pada daerah tersebut. Percepatan getaran tanah maksimum adalah nilai maksimum percepatan getaran tanah tertinggi akibat gelombang gempa bumi yang pernah terjadi pada suatu lokasi tertentu (Edwiza and Novita,

2008). Menurut Kanai, percepatan maksimum getaran tanah (PGA) dapat dilihat dari perambatan gelombang seismik pada batuan bedrock dari pusat gempa hingga karakteristik lapisan tanah di daerah penelitian. Karakteristik lapisan tanah ditentukan oleh periode dominan tanah pada saat terjadinya getaran gempa bumi.

PGA dinyatakan dalam satuan percepatan gravitasi (*Gravitational Acceleration* = gal) atau cm/s^2. Nilai percepatan tanah maksimum yang dihasilkan memberikan informasi mengenai tingkat risiko bencana. Nilainya dapat digunakan dalam pencegahan bencana, perancangan struktur bangunan dan perencanaan wilayah. Nilai percepatan maksimum dipetakan dengan skala besar untuk wilayah dengan periode ulang yang berbeda-beda. Nilai percepatan maksimum tanah dapat dihitung dengan dua cara, yaitu: menggunakan alat *accelerograf* dan menghitung menggunakan perhitungan empiris. Bila jaringan *accelerograf* tidak mendukung hal ini perhitungan empiris menjadi alternatif. Cara pendekatan metode empiris tersebut tidak selalu benar, tetapi cukup memberikan gambaran mengenai percepatan maksimum tanah (Ibrahim dan Subardjo, 2003).

Nilai PGA dapat dihitung berdasarkan sejarah gempa yang pernah terjadi di wilayah tersebut. Besarannya tergantung pada jenis gempa, magnitudo, episenter, dan jenis struktur batuan di daerah tersebut. PGA hanya memberikan informasi tingkat puncak gempa. Percepatan tanah maksimum, respon spektral gempa dan riwayat percepatan seismik merupakan pemilihan parameter gerakan tanah yang sangat penting dalam perencanaan beban gempa. Jika parameter yang digunakan sedikit, analisisnya tidak menjadi lebih rumit dan sebaliknya.

Semua gempa bumi menyebabkan suatu pergerakan tanah, kekuatan percepatan tanah sangat perlu dalam perencanaan pembangunan. Semakin tinggi nilai PGA suatu lokasi, maka semakin parah pula potensi kerusakan yang ditimbulkan akibat gempa bumi. Pengukuran nilai PGA dilakukan

dengan cara empiris dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa persamaan yang diturunkan dari besaran dan intensitas gempa.

Percepatan maksimum getaran tanah harus memperhitungkan ukuran magnitudo dan jarak dari pusat gempa serta periode dominan bumi. Berdasarkan uraian tersebut, salah satu cara untuk menghitung puncak percepatan maksimum tanah (PGA) adalah dengan menggunakan Metode Kanai.

$$\alpha = \frac{5}{\sqrt{T_g}} 10^{0.61M-\left(1.66+\frac{3.6}{R}\right)logR+0.67-\frac{1.83}{R}} \quad (18)$$

Keterangan:

α = PGA dalam gal

Tg = Periode dominan tanah dalam detik

M = Magnitudo dalam Skala *Richter*

R = Jarak hiposenter dalam km

3.11. Intensitas Gempa Bumi

Intensitas gempa bumi dihitung berdasarkan dari kerusakan yang terjadi pada suatu wilayah dan bangunan di sekitarnya akibat gempa bumi. Skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*) adalah skala intensitas yang sering digunakan di Indonesia. Dapat dilihat pada **Tabel 5** menunjukkan hubungan antara nilai percepatan tanah dengan intensitas seismik gempa bumi.

Persamaan intensitas gempa bumi berdasarkan persamaan Wald (Ibrahim dan Subardjo, 2005).

$$IMM = 3{,}66\ log\ \alpha - 1{,}66 \quad (19)$$

Keterangan:

I_{MM} = Intensitas gempa menurut skala MMI

α = Percepatan tanah maksimum (gal).

Tabel 5. Intensitas Seismik (BMKG, 2024)

Skala BMKG	Warna	Percepatan Tanah (gal)	Skala MMI	Deskripsi
I	Putih	< 2. 9	I – II	tidak dirasakan atau dirasakan hanya beberapa orang tetapi terekam oleh alat.
II	Hijau	2.9 – 88	III – V	Dirasakan orang banyak tetapi tidak menimbulkan kerusakan. Benda-benda ringan yang digantung bergoyang dan jendela kaca bergetar.
III	Kuning	89 – 167	VI	bagian non struktur bangunan mengalami kerusakan ringan, seperti retak rambut pada dinding, atap bergeser ke bawah dan sebagian berjatuhan.
IV	Jingga	168 – 564	VII – VIII	banyak Retakan terjadi pada dinding bangunan sederhana, sebagian roboh, kaca pecah. Sebagian plester dinding lepas. Hampir sebagian besar atap bergeser ke bawah atau jatuh. Struktur bangunan mengalami kerusakan ringan sampai sedang.
V	Merah	> 564	IX – XII	sebagian besar dinding bangunan permanen roboh. Struktur bangunan mengalami kerusakan berat.

IV. METODE PENELITIAN

4.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun penelitian Tugas Akhir ini dilaksanakan di:

Tempat : Laboratorium Geofisika Geothermal, Teknik Geofisika, Universitas Lampung

Alamat : Gedung Teknik Geofisika - Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 35142

Tanggal : Januari 2024 – Juni 2024

4.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 6** dan **Tabel 7.**

Tabel 6. Data Penelitian

No	Data	Sumber Data
1	Data Mikrotremor	Data ini berupa hasil pengukuran mikrotremor tahun 2023 sebanyak 14 stasiun titik pengukuran Daerah Sumatera bagian selatan.
2	Peta Lembar Geologi	Peta geologi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Peta Geologi Lembar Sumatera bagian selatan

Tabel 7. *Software* yang digunakan dalam Penelitian

No	*Software*	Fungsi
1	Laptop	Digunakan untuk pengolahan data penelitian
2	Geopsy	Digunakan untuk mengolah data Mikrotremor yaitu mendapatkan nilai frekuensi dominan dan amplifikasi.
3	Arcgis 10.3	Berfungsi dalam pembuatan peta lokasi penelitian, peta geologi dan analisis SIG lainnya.
4	Surfer 13	Digunakan untuk mengolah data mikrotremor yaitu dalam membuat peta kontur sebaran nilai frekuensi dominan, amplifikasi, periode dominan dan indeks kerentanan seismik, PGA, dan IMM.
5	*Microsoft Excel*	Digunakan untuk menghitung nilai periode dominan, indeks kerentanan seismik, PGA, serta IMM

4.3. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

4.3.1. Pengolahan Data Mikrotremor

Pengolahan sinyal mikrotremor ini dilakukan pengolahan menggunakan *Software Geopsy*. Data mikrotremor yang dipilih yaitu data yang tidak memiliki noise. Pemilihan sinyal tanpa noise (*windowing*) menggunakan cut gelombang. Hasil dari pengolahan data mikrotremor yang dilakukan adalah grafik hubungan nilai *H/V* dan frekuensi sehingga dari grafik tersebut akan didapatkan nilai frekuensi dominan (f_0) serta nilai amplifikasi (A_0).

4.3.2. Penentuan nilai Frekuensi dominan dan Amplifikasi

Frekuensi dominan dan amplifikasi dihasilkan oleh puncak tertinggi HVSR yang ada pada kurva HVSR. Dari penelitian yang disebutkan (Juan Pandu dkk., 2012) memperlihatkan frekuensi dominan HVSR

tergantung dari kedalaman bedrock, dimana frekuensi dominan tidak sebanding dengan ketebalan sedimen dan sebanding lurus dengan kecepatan gelombang geser. Kemudian frekuensi dominan dan amplifikasi berfungsi untuk penentuan nilai indeks kerentanan seismik. Setelah diketahui nilai frekuensi dominan dan amplifikasi di setiap titiknya, setelah itu kita dapat membuat peta kontur dari nilai f_0 dan A_0 dengan *software* surfer.

4.3.3. Perhitungan periode dominan

Langkah selanjutnya adalah menghitung nilai periode dominan pada Microsoft excel. Kemudian nilai periode dominan didapatkan dengan cara 1 dibagi dengan nilai frekuensi dominan. Nilai periode dominan yang diperoleh dari perhitungan yang dilakukan dapat berfungsi untuk menentukan kelas tanah atau sifat-sifat dari lapisan pada tanah. Setelah mendapatkan nilai periode dominan kita menghitung nilai indeks kerentanan tanah. Setelah mendapatkan nilai periode dominan kita melakukan gridding pada *software* surfer untuk memperoleh peta kontur periode dominan.

4.3.4. Perhitungan indeks kerentanan tanah

Indeks kerentanan tanah (*Kg*) berguna untuk indentifikasi wilayah yang rawan terhadap pergerakan tanah (Nakamura, 1997). Indeks kerentanan ini didapatkan dari frekuensi dominan dan amplifikasi. Selanjutnya kita membuat peta kontur pada *software* Surfer.

4.3.5. Nilai Percepatan Getaran Tanah (PGA)

Pengolahan nilai PGA dilakukan atas beberapa analisis serta perhitungan, sebagai berikut:

a. Dalam menentukan pergerakan tanah maksimum (PGA) pada titik pengukuran dibutuhkan data gempa bumi di wilayah yang memiliki magnitudo besar. Penelitian ini memiliki tujuan ntuk mengkaji zona percepatan tanah maksimum serta intensitas gempa bumi mngacu pada data historis kejadian gempa bumi dari tahun 1970-2024.

Perhitungan percepatan tanah maksimum dengan persamaan Kanai serta menentukan faktor periode dominan tanah di wilayah Sumatera bagian selatan.

b. Menentukan episenter dan hiposenter, yaitu dengan proyeksi dari titik (hiposenter) suatu gempa bumi ke permukaan. Menentukan nilai PGA yang dibutuhkan adalah jarak dari pusat gempa hingga lokasi titik ukur (R).

Maka besaran nilai R ditentukan dengan **Persamaan 20.**

$$R = \sqrt{(X^1 + X^2)^2 + (Y^1 + Y^2)^2} \qquad (20)$$

Keterangan:

(x^2,y^2) = Koordinat sumber gempa bumi

(x,y) = Koordinat titik pengamatan.

Menentukan model percepatan tanah ini dilakukan dengan metode Kanai (1996), yakni:

$$\alpha = \frac{5}{\sqrt{T_g}} 10^{0.61M - \left(1.66 + \frac{3.6}{R}\right) logR + 0.67 - \frac{1.83}{R}} \qquad (21)$$

Keterangan:

α = PGA dalam gal

Tg = Periode dominan tanah dalam detik

M = Magnitudo dalam Skala *Richter*

R = Jarak hiposenter dalam km

Untuk memudahkan pada proses analisis, nilai percepatan getaran tanah maksimum (PGA) pada titik penelitian diklasifikasikan. Dapat dilihat pada **Tabel 8.**

Tabel 8. Klasifikasi Nilai PGA menurut BMKG

Kelas	PGA (gal)	Klasifikasi
I	< 2,9	sangat kecil
II	2,9 – 88	kecil
III	89 – 167	sedang
IV	168 – 564	besar
V	>564	sangat besar

c. Setelah kita mendapatkan nilai PGA selanjutnya menghitung nilai intensitas gempa bumi (I_{MM}).

Persamaan intensitas gempa bumi berdasarkan persamaan Wald.

$$IMM = 3{,}66\ log\ \alpha - 1{,}66 \quad (22)$$

Keterangan:

I_{MM} = Intensitas gempa menurut skala MMI

α = percepatan tanah maksimum (gal)

4.3.6. Overlay peta lokasi penelitian

Hasil dari nilai percepatan getaran tanah maksimum (PGA) setelah itu dibuat peta persebaran pada lokasi penelitian. Nilai indeks kerentanan tanah dan nilai percepatan getaran tanah maksimum dioverlay dengan peta daerah penelitian. Lokasi penelitian berada pada Sumatera bagian selatan, yang memiliki .shp menggunakan *software* ArcGis 10.3.

4.4. Jadwal kegiatan

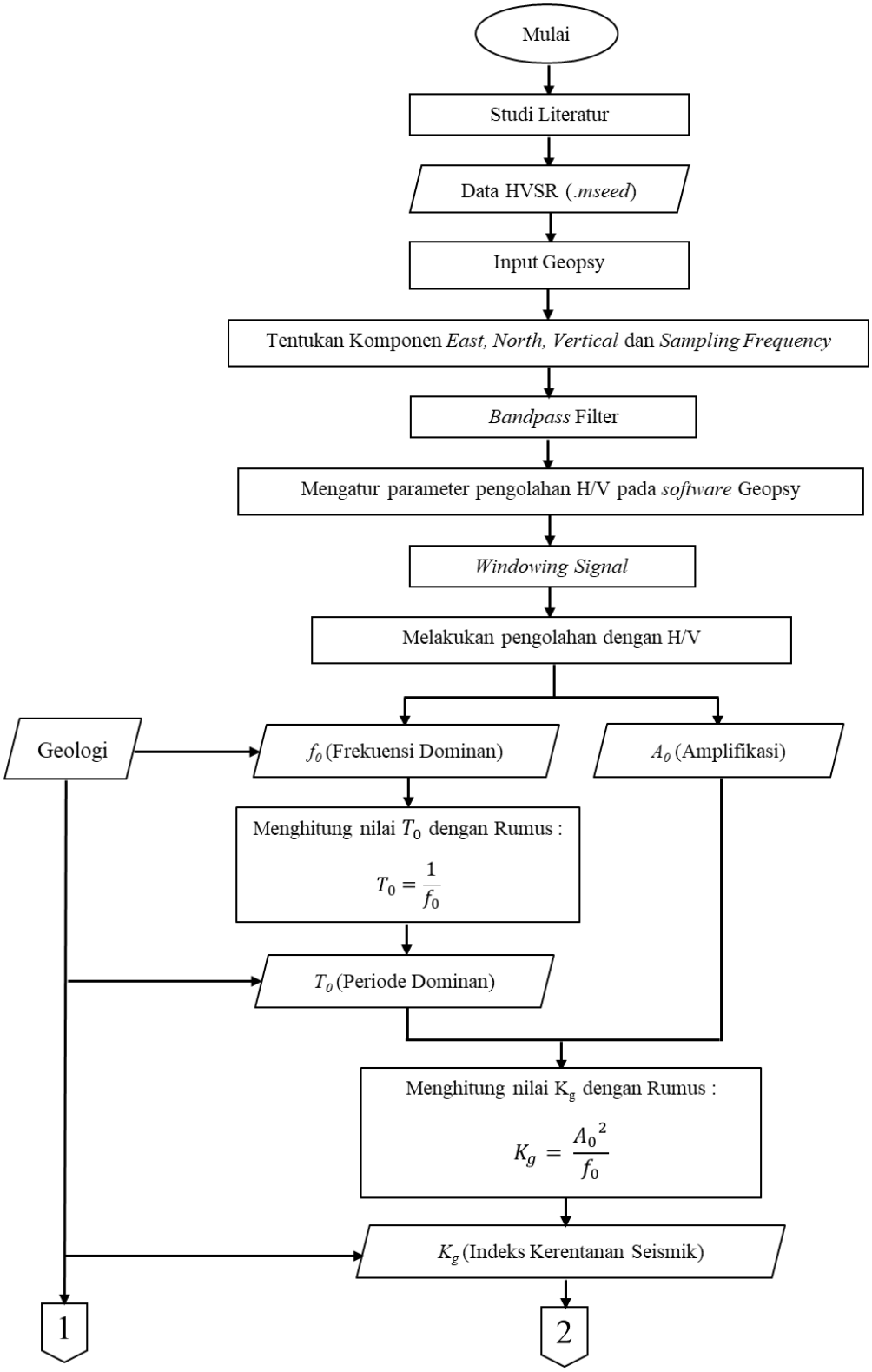
Adapun jadwal kegiatan pada penelitian Tugas Akhir ini dapat dilihat pada **Tabel 9.**

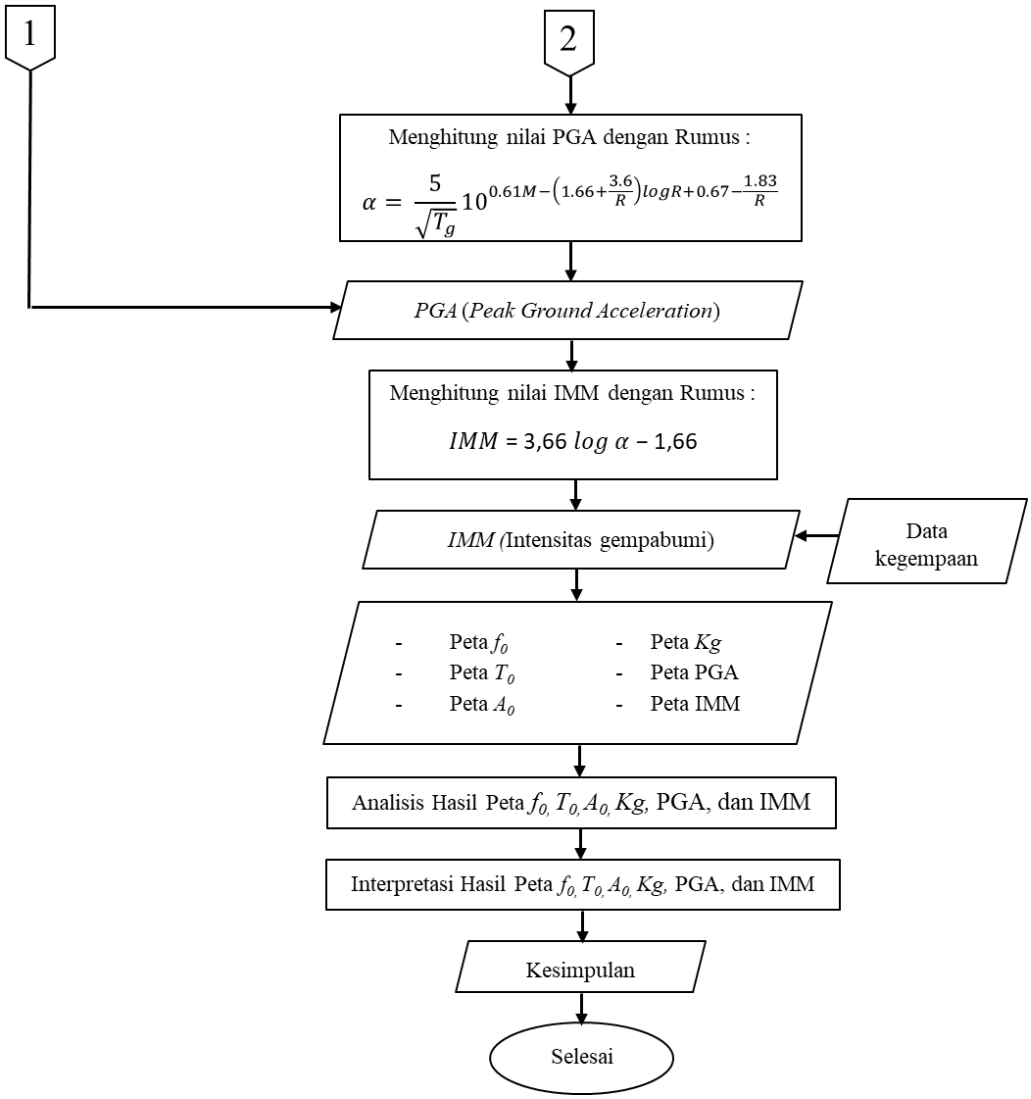
Tabel 9. Pelaksanaan Kegiatan Penelitian

Kegiatan	Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur																								
Persiapan Data Mikrotremor																								
Pengolahan Data Mikrotremor																								
Penyusunan Laporan dan Bimbingan Usul																								
Seminar Usul																								
Bimbingan Hasil																								
Seminar Hasil																								
Revisi dan Persiapan Sidang Komprehensif																								
Sidang Komprehensif																								

4.5. Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut dapat dilihat pada **Gambar 17.**





Gambar 17. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang berjudul "Pemetaan Zona Kerentanan Tanah Daerah Sumatera bagian selatan Berdasarkan Analisis Data Mikrotremor Menggunakan Metode Hvsr Dan *Peak Ground Acceleration* (PGA)", dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan nilai yang diperoleh dari Daerah penelitian Sumatera bagian selatan yaitu frekuensi dominan (f_0) antara 0.55 – 13.79 Hz, amplifikasi (A_0) antara 1.25 – 8.13 kali, periode dominan (T_0) antara 0.09 sekon – 1.82 sekon, kemudian indeks kerentanan tanah (Kg) antara 0.23 – 95.24, *peak ground acceleration* (PGA) antara 109 – 587 gal, dan intensitas gempa bumi maksimum memiliki nilai 8.5 SR terjadi di daerah Punduh Pedada, Lampung.
2. Berdasarkan persebaran frekuensi dominan dan periode dominan di Daerah Sumatera bagian selatan didominasi oleh klasifikasi tanah jenis I, II, dan IV yaitu dengan jenis batuan keras dan sedang. Terlihat pada titik pengukuran Muara Dua, Punduh Pedada, Banding Agung dan Lemong memiliki nilai periode dominan yang rendah berbanding terbalik dengan nilai frekuensi dominan yang tinggi jika nilai frekuensi tinggi menandakan daerah tersebut memiliki ketebalan sedimen yang sangat tipis dan didominasi batuan keras.
3. Daerah Sumatera bagian selatan yang memiliki nilai faktor amplifikasi tinggi yaitu Daerah Liwa, Banding Agung, dan Pematang Sawah, sedangkan untuk nilai indeks kerentanan tanah pada daerah penelitian didominasi rendah apabila indeks kerentanan rendah maka pada daerah penelitian memiliki tingkat kerentanan yang rendah dan terdapat indeks

kerentanan tanah yang tinggi berada pada Daerah Bandar Lampung, Liwa, Banding Agung, Muara Dua, dan Pematang Sawah.

4. Berdasarkan penentuan PGA daerah Sumatera bagian selatan dapat disimpulkan berada pada rentang sedang hingga tinggi sehingga risiko kerusakan dari gempa bumi cukup tinggi, sedangkan intensitas gempa bumi pada daerah penelitian ada beberapa titik berada pada rentang tinggi hal ini berkolerasi dengan nilai PGA yang tinggi di daerah penelitian seperti, Muara Dua, Punduh Pedada, dan Lemong. Dapat disimpulkan bahwa pada daerah penelitian berdasarkan skala intensitas gempa bumi besar dengan skala 5 hingga 6 SR di daerah Liwa, Sekincau, dan Pesisir Selatan; dengan skala 6 hingga 7 SR di daerah Bandar Lampung, Rawas Hulu, Muara Dua dan Pematang Sawah; sedangkan pada skala intensitas terbesar dengan skala 7 hingga 8 SR di daerah Ulu Belu, Manna, Kotabumi, Banding Agung, Lemong, Muara Dua, dan Punduh Pedada.

6.2.Saran

Saran yang dapat diberikan dari hasil penelitian ini yaitu sebagai berikut;

1. Untuk meningkatkan akurasi model yang lebih baik disarankan untuk memperkecil jarak antar titik pengambilan data dan diperlukan data observasi yang banyak sehingga data yang dihasilkan lebih akurat.
2. Perlu dilakukan penelitian yang lebih detail untuk karaterisktik tanah dan litologi di daerah Sumatera bagian selatan.

DAFTAR PUSTAKA

Ambarsari, D. (2017). Analisis Mikrotremor Dengan Metode HVSR Untuk Mikrozonasi Kabupaten Gunungkidul Yogyakarta. *Tugas Akhir*. Repository ITS. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.

Aprillianto, S., Santosa, B. J., dan Sunardi, B. (2016). Ground Motion Modeling Wilayah Sumatera Selatan Berdasarkan Analisis Bahaya Gempa Probabilistik. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, *5*(2).

Aribowo, S., Muslim, D., Natawidjaja, D. H., dan Daryono, M. R. (2017). Sub-Segmentasi Sesar Pada Segmen Kumering Antara Danau Ranau Hingga Lembah Suoh, Lampung Barat Subdivision Of Segmentation In Kumering Segment Between Ranau Lake To Suoh Valley, West Lampung. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, *8*(1), 31-46.

Arifin, S. S. (2014). Penentuan Zona Rawan Guncangan Bencana Gempa Bumi Berdasarkan Analisis Nilai Amplifikasi HVSR Mikrotremor dan Analisis Periode Dominan Daerah Liwa dan Sekitarnya. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, *2*(01), 30-40.

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2010). *Indonesia Rawan Gempabumi & Tsunami.* Diakses dari https://inatews.bmkg.go.id pada tanggal 20 Januari 2024.

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2023). *Peta Aktivitas Gempabumi di Indonesia 2019.* Diakses dari https://inatews.bmkg.go.id pada tanggal 25 Januari 2024.

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2024). Skala Intensitas Gempabumi.. Diakses dari https://inatews.bmkg.go.id pada tanggal 12 Februari 2024.

Barber, A.J., Crow, M. J. dan Milsom, J. S., (2005). Introduction and previous research. In A.J. Barber, M.J. Crow, dan J.S. Milsom (Ed.). *Sumatera: Geology, Resources and Tectonic Evolution. Geological Society Memoirs,* 31, 1-6. London: The Geological Society.

Benyamin, Magetsari, N. A., Harsolumakso, A. H., dan Abdullah. C. I. (2014). *Modul Kuliah Geologi Fisik*. Bandung: ITB.

Bellier, O., dan Sébrier, M. (1994). Relationship between tectonism and volcanism along the Great Sumatran Fault Zone deduced by spot image analyses. *Tectonophysics*, 233(3-4): 215–231.

Crawford, F. (1968). *Waves: Barkely physics course*. 3rd Edition. California: University of California.

Daryono. (2010). *Zona Rawan "Local Site Effect" Gempabumi di Yogyakarta*. Yogyakarta: BMKG

Edwiza, D., dan Novita, S. (2008). Pemetaan Percepatan Tanah Maksimum dan Intensitas Seismik Kota Padang Panjang Menggunakan Metode Kanai. *Jurnal Teknika Unand*, *2*(29), 111-118.

Febriani, Y., Daruwati, I., dan Hatika, R. G. (2013). Analisis Nilai Peak Ground Acceleration dan Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Data Mikroseismik pada Daerah Rawan Gempabumi di Kota Bengkulu. *Edu Research*, *2*(2), 85-90.

Haeruddin, N., Alami, F., dan Yogi, I. B. S. (2020). The effect site analysis based on microtremor data using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method in the Bandar Lampung City. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1572, No. 1, p. 012075). IOP Publishing.

Harijono, S. W. B. (2010). InaTEWS, *Indonesia tsunami early warning system: konsep dan implementasi*. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia.

Harmadhoni, D. (2011). Analisis mekanisme Fokus gempa Di Blitar – Jawa Timur 17 Mei 2011 (*Skripsi*), UIN Syarif Hidayatullah, Jakarta.

Herak, M. (2008). ModelHVSR—A Matlab® tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise. *Computers & Geosciences*, *34*(11), 1514-1526.

Hidayati, S. (2010). *Pengenalan Seismologi Gunungapi*, *Diklat Pelaksana Pemula Pengamat Gunungapi Baru.* Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Bandung.

Ibrahim, G. dan Subardjo. (2003). *Pengetahuan Seismologi.* Badan Meteorologi dan Klimatologi. Manado, Indonesia.

Ibrahim, G. dan Subardjo. (2005). *Pengetahuan Seismologi.* Badan Meteorologi dan Geofisika.

Kanai, K. (1983). *Seismology in Engineering*. Tokyo University: Japan.

Lutgens. (1982). *Essentials of Geology*. A Bell & Howell Company. Colombus, Ohio 4316

Marjiyono. (2010). Estimasi Karakteristik Dinamika Tanah Dari Data Mikrotremor Wilayah Bandung. *Thesis*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.

Motamed, R., Ghalandarzadeh, A., Tawhata, I., dan Tabatabaei, S. H. (2007). Seismic microzonation and damage assessment of Bam city. southeastern Iran. *Journal of Earthquake Engineering*. *11*(1), 110-132.

Nakamura, Y. (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface.* Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30(1).

Nakamura, Y. (1997). Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor. In *World congress on railway research in Florence, Italy*.

Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. In *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering* (Vol. 2656, pp. 1-8).

Nakamura, Y. (2008). On the H/V Spectrum. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing.

Natawidjaja, D. H. (2018). Updating active fault maps and sliprates along the Sumatran Fault Zone, Indonesia. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 118, p. 012001). IOP Publishing.

Nurdiyanto, B., Hartanto, E., Ngadmanto, D., Sunardi, B., dan Susilanto, P. (2011). Penentuan tingkat kekerasan batuan menggunakan metode seismik refraksi. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, *12*(3).

Pain, H. J. (2021). The Physics of Vibration And Wave Sixth Edition. Formerly of Department of Physics: Imperial College of Science and Technology, London.

Pandu, J., Bahri, A.S., dan Wahyudi. (2012). Analisa Mikrotremor HVSR untuk Memetakan Potensi Likuifaksi Di Daerah Pesisir Kec. Pacitan. *J. Fis. dan Apl.*

Partono, W., Irsyam, M., Pabandiyani, S,R.W., dan Maarif, S. (2013). Aplikasi Metode HVSR pada Perhitungan Faktor Amplifikasi Tanah di Kota Semarang. *Jurnal MKTS VOLUME 19, NO 2*.

Refrizon., Hadi, A.I., Lestari, K., dan Oktari, T. (2013). Analisis Percepatan Tanah Maksimum dan Tingkat Kerentanan Seismik Daerah Ratu Agung Kota Bengkulu. *Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung*, Bandar Lampung, 323-328.

Saaduddin, S. dan Marjiyono. (2015). Pemetaan indeks kerentanan seismik Kota Padang dan korelasinya dengan titik kerusakan gempabumi 30 September 2009. *Prosiding Seminar Nasional Kebumian ke-8.* Universitas Gajah Mada. Yogyakarta (pp. 459-466).

SESAME. (2004). *Guidelines For The Implementation Of The H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations*. Europe: SESAME Europen research project.

SESAME European Project. (2004). *Implementation of the H/V spectral Ratio Technique on Ambient Vibrationsmeasurements*, *Processing and Interpretations*. Deliverable D23.12.

Setiawan, J. H. (2009). Mikrozonasi Seismisitas Daerah Yogyakarta dan Sekitarnya. *Thesis*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.

Sugianto, N., Farid, M., dan Suryanto, W. (2016). Local geology condition of bengkulu city based on seismic vulnerability index (Kg). *ARPN J. Eng. Appl. Sci*. *11*(7), 4797-4803.

Sukamto, R., Ratman, N., dan Simandjuntak, T.O., (1996). *Peta Geologi Indonesia*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., dan Keys, D. A. (1976). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. London.

Wangsadinata, W. (2006). *Perencanaan bangunan tahan gempa berdasarkan SNI 1726-2002.* Shortcourse HAKI 2006. Jakarta.

Windiyanti, A. C., Karyanto, K., Rustadi, R., dan Rudianto, R. (2019). Analisis Zona Rawan Gempabumi Daerah Lampung Berdasarkan Nilai Percepatan Tanah Maksimum (PGA) dan Data Accelererograph Tahun 2008-2017. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, *3*(2), 17-27.

Zheng, Y., Wang, Y., dan Chang, X. (2016). Wave equation based microseismic source location and velocity inversion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *261*, 46-53.