

**ANALISIS PERBANDINGAN KERENTANAN BANGUNAN GEDUNG
BERDASARKAN DATA MIKROTREMOR SIANG DAN MALAM**

(Skripsi)

Oleh
Vivi Anita Sari
1715051005



**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

ANALISIS PERBANDINGAN KERENTANAN BANGUNAN GEDUNG BERDASARKAN DATA MIKROTREMOR SIANG DAN MALAM

Oleh

Vivi Anita Sari

Telah dilakukan penelitian mengenai analisa tingkat kerentanan bangunan BMKG Wilayah III Denpasar Bali pada waktu siang dan malam hari yang berdasarkan dari pengolahan data mikrotremor menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* HVSR untuk mendapataka nilai frekuensi natural tanah dan *Floor Spectral Ratio* FSR untuk mendapataka nilai frekuensi natural bangunan, nilai frekuensi digunakan untuk melakukan analisis resonansi dan indeks kerentanan pada tanah dan bangunan. Data mikrotremor yang digunakan merupakan data pengukuran menggunakan alat accelometer dengan empat titik pengukuran dengan tiga titik pada gedung yang terletak di lantai 1, 2 dan 3, serta satu pada lubang bor diluar gedung, dengan waktu pengukuran pada siang hari pukul 12.00 – 15.00 WITA dan pada malam hari pukul 00.00 – 03.00 WITA. Dari penelitian tersebut didapatkan nilai frekuensi tanah pada siang hari lebih besar yaitu 3,15 hz dan malam hari 1,63 hz, frekuensi bangunan pada siang hari didapatkan nilai yang lebih kecil daripada malam hari yaitu dengan rentang 0,57 – 1,22 hz dan malam hari dengan rentang nilai 0,72 – 1,58 hz. Tingkat resonansi yang didapatkan pada siang hari lebih tinggi yaitu berkisar antara 61% - 84% dan malam harinya didapatkan 40% - 73%. Untuk tingkat kerentanan tanah didapatkan 0,97 pada siang hari dan 1,33 pada malam hari yang tergolong dalam resiko rendah, untuk tingkat kerentanan bangunan berkisar 0,46 – 3,82 pada siang hari dan 0,18 – 2,09 pada malam hari.

Kata kunci : Mikrotremor, HVSR, FSR, Gempa bumi

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF BUILDING VULNERABILITIES BASED ON DAY AND NIGHT MICROTREMOR DATA

By

Vivi Anita Sari

Research has been carried out regarding the level of vulnerability of BMKG Region III Denpasar Bali buildings during the day and night based on microtremor data using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) method for soil and Floor Spectral Ratio (FSR) for buildings, from the processing the dominant frequency value was obtained to carry out resonance analysis and vulnerability indices on soil and buildings. The microtremor data used is measurement data using an accelerometer with four measurement points with three points on the building, namely on the 1st, 2nd and 3rd floors, as well as one point in the drill hole outside the building, with measurement times during the day at 12.00 - 15.00 WITA and at evening 00.00 – 03.00 WITA. From this research, it was found that the ground frequency value was greater during the day, namely 3.15 Hz and 1.63 Hz at night, the building frequency during the day was found to be a smaller value, namely with a range of 0.57 – 1.22 Hz and at night with a value range of 0, 72 – 1.58 Hz. The resonance level obtained during the day is higher, ranging from 61% - 84% and at night it is found at 40% - 73%. For the level of soil vulnerability during the day, it was found to be 0.97 and at night 1.33 which was classified as low risk, for the level of building vulnerability it was around 0.46 – 3.82 during the day and 0.18 – 2.09 at night.

Keyword : Microtremors, HVSr, FSR, Earthquakes

**ANALISIS PERBANDINGAN KERENTANAN BANGUNAN GEDUNG
BERDASARKAN DATA MIKROTREMOR SIANG DAN MALAM**

Oleh
VIVI ANITA SARI

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

2024

Judul Skripsi : **ANALISIS PERBANDINGAN KERENTANAN BANGUNAN GEDUNG BERDASARKAN DATA MIKROTREMOR SIANG DAN MALAM**

Nama Mahasiswa : **Oivi Anita Sari**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1715051005

Program Studi : Teknik Geofisika S-1

Jurusan : Teknik Geofisika

Fakultas : Teknik



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si.
NIP 19730716 200012 1 002

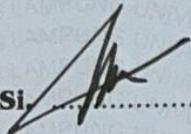
Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.
NIP 19750911 200012 1 002

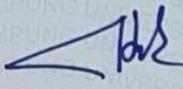
2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

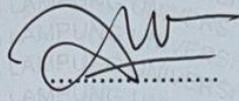
Dr. Karyanto, S.Si., M.T.
NIP 19691230 199802 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

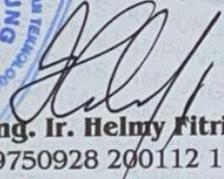
Ketua : Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si. 

Sekretaris : Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si. 

**Penguji
Bukan Pembimbing : Rustadi, S.T., M.T.** 

2. Dekan Fakultas Teknik




Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 03 Juni 2024

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis bukan merupakan karya dari orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagai mana disebutkan dalam daftar pustaka, selain itu saya menyatakan juga bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

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

Bandar Lampung, 12 Juni 2024



Vivi Anita Sari

1715051005

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Vivi Anita Sari, Lahir di Lampung Timur 26 Oktober 1999. Merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Ngajiyono dan Ibu Ginatun. Rekam jejak pendidikan dari Taman Kanak-kanak di TK PKK Taman Asri pada tahun 2004, kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 3 Taman Asri pada tahun 2005 hingga 2011, kemudian penulis melanjutkan ke tingkat sekolah menengah di SMP Negeri 2 Purbolinggo pada tahun 2011 hingga 2014, kemudian dilanjutkan ke sekolah tingkat atas di SMA Negeri 1 Purbolinggo Lampung Timur pada tahun 2014 hingga 2017. Pada tahun 2017 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang pendidikan perguruan tinggi di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.

Selama menjalani masa perkuliahan penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi sebagai anggota maupun pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (HIMA TG BHUWANA). Selama terlibat aktif di HIMA TG BHUWANA, penulis dipercaya mengemban amanah sebagai Anggota Dana dan Usaha pada periode kepengurusan 2019 – 2020.

Pada tahun 2020 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Pangkal Mas Mulya Kecamatan Mesuji Timur Kabupaten Mesuji Provinsi Lampung. Lalu pada November 2020 melaksanakan Kerja Praktek dengan judul laporan “**Analisis Kecepatan Gelombang Geser (Vs30) Dan Amplifikasi Di Area Pembangunan Rumah Sakit Universitas Lampung Berdasarkan Data**

Mikrotremor” Selanjutnya pada April 2022 penulis melaksanakan Tugas Akhir sebagai bahan untuk mendukung penulisan Skripsi. Sehingga penulis dapat menyelesaikan jenjang perguruan tinggi dengan menamatkan program sarjana melalui Skripsi dengan judul “**Analisis Perbandingan Kerentanan Bangunan Gedung Berdasarkan Data Mikrotremor Siang Dan Malam**”.

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur, kan ku persembahkan skripsi ini kepada :

Allah SWT

Atas segala nikmat dan berkah yang senantiasa
aku rasakan dalam menyelesaikan skripsiku ini

Kedua Orang Tuaku Tersayang

Ayahanda Tercinta Bapak Ngajioni

Ibunda Tercinta Ibu Ginatun

Berkat Do'a dan kemurnian cinta kasih sayang. Terimakasih atas segala jerih
payah ayah dan ibu hingga kebutuhanku dapat dipehuhi. Semuanya takkan
terbalas, namun akan selalu ku ingat sampai kapanpun, hingga tak terbatas sampai
nyawa lepas dikandung badan.

Keluarga Besar Bapak Ngajiono

Terimakasih atas segala bentuk dukungan. Kebersamaan dari kita kecil
hingga sekarang takkan lekang oleh waktu.

Teknik Geofisika Universitas Lampung 2017

Suka dan duka telah kita lewati bersama, tawa dan kasih kalian tidak akan pernah
aku lupakan. Aku bangga telah memiliki kalian.

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung

MOTO

**“JIKA ANDA TIDAK BISA MELAKUKANNYA DENGAN BAIK,
LAKUKANLAH DENGAN CINTA”**

-Mother Teresa-

**“SAYA BISA MENERIMA KEGAGALAN, TAPI SAYA TIDAK
MENERIMA SEGALA HAL YANG TIDAK PERNAH DIUSAHAKAN”**

-Micheal Jordan-

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penyusunan Laporan Skripsi dengan judul “**Analisis Perbandingan Kerentanan Bangunan Gedung Berdasarkan Data Mikrotremor Siang Dan Malam**” telah selesai dengan sebaik-baiknya. Terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan laporan ini. Penulis pun menyadari mungkin masih terdapat kekurangan di dalam Laporan Skripsi ini, sehingga sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga semua yang tertulis di dalam laporan ini dapat memberikan manfaat kepada siapapun, baik kalangan umum maupun akademisi untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, November 2024

Penulis,

Penulis

SANWACANA

Puji Syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT karena dengan rahmat dan karunia-Nya sehingga sampai saat ini penulis masih diberikan kenikmatan dan kesehatan. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada tauladan kita Nabi Agung Muhammad SAW, yang telah menuntun manusia menuju jalan kebahagiaan hidup di dunia dan di akhirat.

Alhamdulillah penulis telah berhasil menyelesaikan laporan penelitian Kerja Praktik yang berjudul “**Analisis Perbandingan Kerentanan Bangunan Gedung Berdasarkan Data Mikrotremor Siang Dan Malam**” sebagai salah satu syarat untuk memenuhi salah satu mata kuliah wajib Skripsi pada jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

Tersusunnya laporan ini berkat bantuan berbagai pihak yang telah mendorong dan membimbing penulis, baik tenaga, ide-ide, maupun pemikiran. Pada kesempatan kali ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu hingga selesainya penulisan Skripsi ini, dan kepada:

1. Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa dan Rasullullah Muhammad SAW atas segala rahmat dan hidayah-Nya selama pengolahan dan penyelesaian Skripsi..
2. Kedua Orang Tuaku yang telah memberikan motivasi, doa, serta dukungan selama penyelesaian Skripsi.
3. Bapak Dr. Karyanto, S.Si., M.T selaku ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.SI., selaku Pembimbing 2 yang telah memberikan banyak motivasi dan bimbingan yang sangat baik.

5. Bapak Rustadi, S.Si., M.T. selaku Penguji yang telah memberikan banyak masukan dan koreksi dalam penyusunan skripsi ini.
6. Seluruh Dosen - Dosen Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati terimakasih untuk semua ilmu yang telah diberikan.
7. Seluruh Staf Tata Usaha dan Laboran Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
8. Teman-temanku tercinta yang telah menemani, memberikan semangat, dan memotivasi dalam penyelesaian Skripsi.
9. Seluruh Civitas Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung dan semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian Skripsi.

Semoga Allah SWT memberikan balasan yang berlipat ganda kepada semuanya. Demi perbaikan selanjutnya saran dan kritik yang membangun akan penulis terima dengan senang hati. Akhirnya, hanya kepada Allah SWT penulis serahkan segalanya, mudah-mudahan dapat bermanfaat khususnya bagi penulis umumnya bagi semua.

DAFTAR ISI

	halaman
KATA PENGANTAR.....	iii
SANWACANA	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL	ix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Lokasi Penelitian	5
2.2 Geologi Regional.....	6
2.3 Stratigrafi.....	7
2.4 Fisiografi	9
2.5 Tektonik.....	9
III. TEORI DASAR.....	10
3.1 Gelombang Seismik	10
3.2 Mikrotremor	12
3.3 <i>Mikroearthquake</i>	14
3.4 Mikroseismik.....	15
3.5 HVSR	15

3.3	FSR (<i>Floor Spectral Ratio</i>)	17
3.4	Frekuensi Alami Tanah	17
3.5	Frekuensi Alami Bangunan	19
3.7	Vs30.....	19
3.6	Amplifikasi.....	22
3.7	Resonansi.....	23
3.8	Indeks Kerentanan	24
3.9	Accelometer.....	25
3.10	Seismografit.....	26
IV.	METODOLOGI PENELITIAN	27
4.1	Waktu dan Tempat Pelaksanaan.....	27
4.2	Alat dan Bahan	28
4.3	Diagram Alir.....	28
4.4	Prosedur Penelitian.....	30
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN	35
5.1	Hasil Penelitian.....	35
5.1	Frekuensi dan Amplifikasi Natural Tanah	35
5.2	Frekuensi Natural Bangunan	37
5.3	Resonansi.....	42
5.4	Indeks Kerentanan Tanah	45
5.5	Indeks Kerentanan Bangunan.....	46
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	49
6.1	KESIMPULAN	49
6.2	SARAN	50
	DAFTAR PUSTAKA	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Peta Administrasi Daerah Bali	5
Gambar 2. Peta Geologi Daerah Penelitian.....	6
Gambar 3. Gelombang Primer	10
Gambar 4. Gelombang Sekunder	11
Gambar 6. Gelombang <i>Love</i>	12
Gambar 7. Gelombang <i>Rayleigh</i>).....	12
Gambar 8. Perbedaan sinyal tremor dan gempa bumi.	14
Gambar 9. Skema Peletakan <i>Accelerometer</i>	28
Gambar 10. Diagram Alir	29
Gambar 11. Tampilan Menu Pemotongan Data.....	30
Gambar 12. Tampilan Menu Filter Sinyal	30
Gambar 13. Tampilan Pemilihan Sinyal	31
Gambar 14. Tampilan Penghalusan Sinyal	32
Gambar 15. Contoh Hasil Pengolahan HVSR	32
Gambar 16. Contoh Hasil Pengolahan FSR.....	34

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Stratigrafi Pulau Bali.....	8
Tabel 2. Tabel Klasifikasi Tanah Berdasarkan Nilai Frekuensi Dominan.....	18
Tabel 3. Klasifikasi Jenis Batuan berdasarkan <i>Uniform Building Code</i> (UBC) ..	21
Tabel 4. Stratigrafi tanah berdasarkan Eurocode 8	21
Tabel 5. Klasifikasi Nilai Dari Factor Amlifikasi.....	23
Tabel 6. Klasifikasi nilai indeks kerentanan tanah.....	24
Tabel 7. Jadwal kegiatan penelitian	27
Tabel 8. Nilai frekuensi tanah rata-rata.....	36
Tabel 9. Hasil HVSR Tanah Tiap Jam.....	37
Tabel 10 . Hasil FSR Lantai 1	38
Tabel 11. Frekuensi bangunan Lantai 2	39
Tabel 12. Frekuensi bangunan Lantai 3	40
Tabel 13. Nilai Rata-Rata Frekuensi Tiap Lantai Waktu Siang.....	41
Tabel 14. Hasil Resonansi Lantai 1.....	43
Tabel 15 . Hasil Resonansi Lantai 2.....	43
Tabel 16. Hasil Resonansi Lantai 3.....	44
Tabel 17. Rata-Rata Nilai Resonansi Siang Hari	44
Tabel 18. Rata-Rata Nilai Resonansi Malam Hari.....	44
Tabel 19. Indeks Kerentanan Tanah.....	45
Tabel 20. Rata-Rata Indeks Kerentanan Tanah.....	46
Tabel 21. Indeks Kerentanan Bangunan Lantai 1	46
Tabel 22. Indeks Kerentanan Bangunan Lantai 2	46
Tabel 23. Indeks Kerentanan Bagunan Lantai 3	47
Tabel 24. Indeks Kerentanan Bangunan Rata-Rata Waktu Siang.....	47
Tabel 25. Indeks Kerentanan Bangunan Rata-Rata Waktu Malam	47

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bali merupakan wilayah yang memiliki perkembangan yang sangat pesat yang ditunjukkan dengan kepadatan penduduk serta pembangunan infrastruktur yang cukup pesat terutama di Kabupaten Denpasar, bangunan merupakan salah satu infrastruktur yang menjadi sasaran utama bagi bencana alam yang sering terjadi, terutama bencana gempa bumi dan gerakan tanah sehingga dapat menimbulkan kerusakan terhadap struktur bangunan terutama bangunan bertingkat. Salah satunya pada gedung BMKG wilayah III Denpasar Bali yang merupakan gedung dengan cukup banyaknya aktivitas manusia, dan juga letaknya yang berada dekat dengan jalan raya.

Agar tidak terjadi apa-apa, agar struktur bangunan tetap aman maka rencana pembangunannya harus diperhitungkan dengan sangat matang. Salah satu faktor penting yang dapat digunakan untuk memprediksi risiko gempa suatu bangunan adalah dengan mengukur resonansi antara frekuensi alami bangunan dengan tanah di bawahnya. Jika nilai frekuensi bangunan mendekati frekuensi karakteristik material di bawahnya, maka getaran seismik akan beresonansi dengan bangunan sehingga meningkatkan tekanan pada bangunan dapat menggunakan metode mikrotermal untuk mengetahui resonansi bangunan.

Mikrotremor biasa disebut juga sebagai *ambient noise* yang merupakan getaran konstan yang kecil pada tanah dan lantai yang diakibatkan oleh angin kencang, pasang surut air laut, efek angin pada bangunan atau pohon, mesin industri, mobil,

aktivitas manusia, gelombang laut dan lain sebagainya (Sungkono,dkk., 2011). Pada frekuensi rendah yaitu di bawah 1 Hz, sumber mikrotremor adalah alam. Gelombang laut menimbulkan getaran lingkungan dengan 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 berhubungan dengan aktivitas atmosfer. Angin dan air dapat menghasilkan frekuensi tinggi di atas 1 Hz. Pada frekuensi tinggi yaitu diatas 1 Hz, sumber utamanya adalah aktivitas manusia seperti lalu lintas kendaraan, mesin dan lain-lain. Letak sumbernya biasanya di permukaan tanah dan bervariasi menurut siang dan malam (SESAME European project, 2005).

Sumber getaran yang paling umum dapat menyebabkan gangguan pada aplikasi bangunan adalah aktivitas manusia, biasanya berjalan kaki, mesin industri dan kendaraan. Meskipun besarannya kecil, getaran yang disebabkan oleh berjalan dapat menimbulkan gangguan. Seseorang yang berjalan dengan kecepatan yang teratur menerapkan fungsi pemaksaan yang terus berulang secara berkala ke lantai dengan, hal tersebut dapat mengakibatkan penumpukan respon yaitu resonansi.

Untuk mengetahui pengaruh aktivitas manusia terhadap nilai frekuensi natural bangunan dilakukan analisis ambient noise, salah satu tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh berkurangnya aktivitas manusia dengan mengukur ambient noise suatu tempat. Pengukuran ambient noise umumnya digunakan untuk mengetahui jenis tanah di suatu tempat beserta gangguan rata-rata yang terjadi seperti pasang surut, kendaraan, aktivitas manusia, dan lain-lain. Dengan melakukan pengolahan data mikrotremor dengan metode *HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)* untuk data tanah dan analisis *FSR (Floor Spectral Ratio)* untuk data bangunan untuk mendapatkan nilai frekuensi natural bangunan dan tanah, sehingga dapat didapatkan nilai resonansi dan kerentanan dari bangunan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapakah nilai frekuensi alami tanah dan bangunan (f_0) dan faktor amplifikasi tanah (A_0) pada gedung.
2. Bagaimanakah tingkat resonansi dan kerentanan bangunan.
3. Bagaimana perbandingan nilai frekuensi, amplifikasi, resonansi, kerentanan tanah dan bangunan pada gedung disaat tidak ada aktivitas (malam) dan adanya aktivitas (siang).

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan nilai frekuensi alami tanah (f_0) dan amplitudo tanah (A_0) pada daerah penelitian.
2. Mendapatkan nilai frekuensi alami bangunan (f_0) dan faktor amplitudo bangunan (A_0) gedung BMKG wilayah III Denpasar, Bali.
3. Mengetahui nilai resonansi bangunan gedung berdasarkan nilai frekuensi alami bangunan dan tanah.
4. Menentukan tingkat kerentanan tanah dan gedung pada tiap lantai

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian terletak di wilayah Denpasar, Bali.
2. Data yang digunakan dalam studi ini merupakan data sekunder mikrotremor pengukuran gedung BMKG Wilayah III Denpasar.
3. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan metode HVSR dan FSR.
4. Kualifikasi bangunan merupakan gedung berlantai 1, 2 dan 3.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

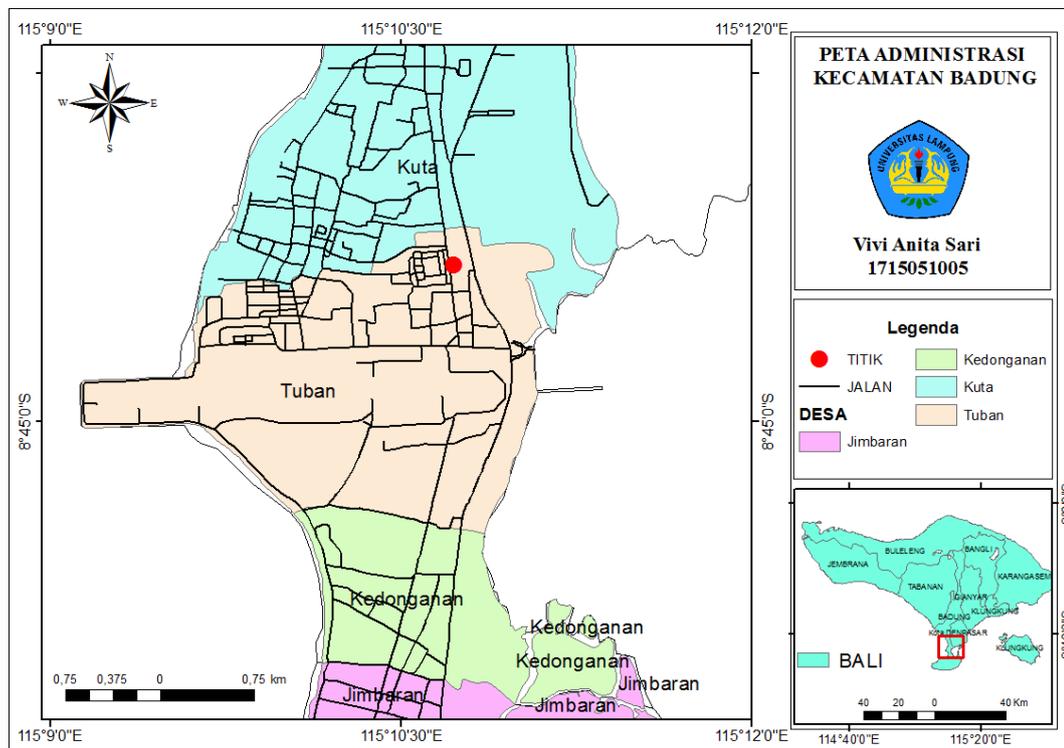
1. Memberikan informasi tentang frekuensi alami bangunan dan frekuensi alami tanah pada gedung BMKG wilayah III Denpasar, Bali.

2. Memberikan informasi nilai resonansi bangunan gedung gedung BMKG wilayah III Denpasar, Bali.
3. Memberikan informasi mengenai tingkat kerentanan bangunan gedung gedung BMKG wilayah III Denpasar, Bali.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lokasi Penelitian

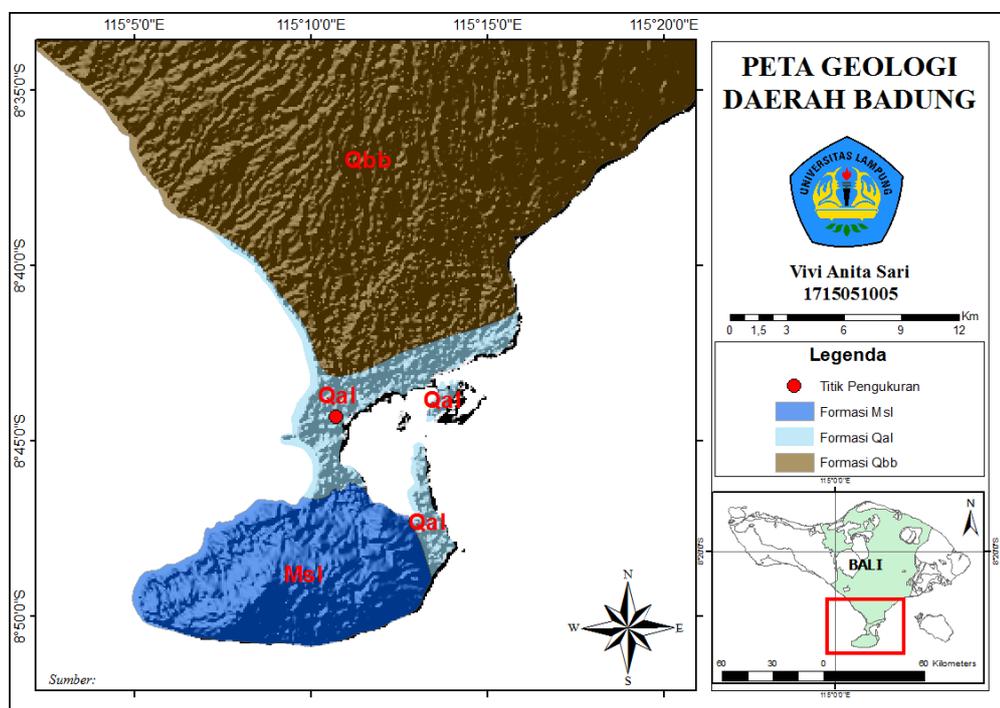
Penelitian dilakukan gedung BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika) wilayah III Denpasar yang terletak di Jl. Raya Tuban, Kuta, Kaen Badung, Provinsi Bali. Secara geografis terletak pada koordinat $8^{\circ}44'19.7088''$ Lintang Selatan dan $115^{\circ}10'43.6614''$ Bujur Timur, seperti yang terlihat pada **Gambar 2**.



Gambar 1. Peta Administrasi Daerah Bali

2.2 Geologi Regional

Kondisi geologi regional Pulau Bali memiliki jenis batuan lava batal dan breksi yang disisipi dengan batuan gamping yang terbentuk karena adanya kegiatan di lautan selama kala miosen bawah. Pada bagian selatan terdapat pengendapan batuan gamping yang membentuk formasi selatan. Untuk jalur yang berbatasan dengan tepi utamanya terdapat pengendapan sedimen yang lebih halus, pengendapan tersebut muncul kepermukaan pada kala pliosen serta memiliki umur yang masih muda, dengan batuan tertua berumur miosen.



Gambar 2. Peta Geologi Daerah Penelitian

Berdasarkan Pada **Gambar 2.** Kota Denpasar dan Badung Selatan terdiri dari 3 (tiga) formasi batuan yakni:

1. Formasi Selatan (Msl)

Formasi ini tersingkap di semenanjung Bali bagian selatan dan Nusa Penida yang berumur tersier, dengan formasi batu gamping dengan karakteristik lahan pegunungan kapur selatan yakni terdiri atas koral dan *marl*, dimana kapur koral berkembang menjadi topografi berbukit.

2. Formasi Aluvial (Qa)

Formasi aluvial yang berumur kuartar dengan litologi lempung, lanau, kerikil, kerakal dan pasir. Dataran aluvial merupakan daerah penimbunan (sedimentasi) dan pada dasarnya terbentuk oleh proses fluvial (bentukan lahan terjadi akibat proses air mengalir baik yang memusat (sungai) maupun oleh aliran permukaan bebas (Suprpto Dibyosaputro, 1997). Wilayah ini meliputi Kuta dan Denpasar Selatan. Tofografi wilayah aluvial ini landai hingga datar dan terdiri dari endapan material fluvio vulkanik. Karakteristik tanah banyak dipengaruhi oleh tumpukan material vulkanis yang mengalami pelapukan dan endapan luapan air sungai yang membawa sedimen saat banjir sehingga struktur endapan pada dataran aluvial berlapis horizontal pada elevasi yang rendah.

3. Formasi Tufa dan Endapan Vulkanik Gunung Buyan, Bratan dan Batur (Qbb)

Formasi ini berumur kuartar, endapan vulkanik ini menutupi hampir 70 % wilayah Kota Denpasar, berupa batuan gunung api hasil dari yang terdiri dari tufa dan breksi, lahar, kerikil, pasir.

2.3 Stratigrafi

Struktur geologi regional Bali diawali dengan aktivitas laut pada masa Miosen Bawah, yang menghasilkan breksi dengan sisipan batugamping dan lava bantal. Serta endapan batuan kapur pada bagian selatan, setelah itu mengalami pengendapan membentuk formasi Selatan. Pada bagian utara terdapat endapan sedimen yang lebih halus. Pada akhir zaman Pliosen, semua daerah sedimen mengalami pengangkatan ke permukaan laut dan terjadi pergeseran yang menyebabkan terdapatnya beberapa sesar. Masa Pliosen pada daerah lautan sebelah utara terjadi pengendapan Formasi Asah. Pada daerah barat laut sebagian dari batuan terangkat ke permukaan laut. Semakin ke barat pengendapan dari batuan karbonatan lebih dominan, pada masa akhir Pliosen terangkat dan tersesarkan.

Di daerah daratan banyak terdapat aktivitas gunung api yang berjajar dari barat hingga ke timur yang meliputi Gunung Merbuk, Gunung Patas, Gunung Batukaru, Gunung Batur, Gunung Abang, Gunung Agung, Gunung Bisbis, dan Gunung Seraya. Secara garis besar batuan di Bali dapat dibedakan menjadi beberapa satuan, yaitu:

Tabel 1. Stratigrafi Pulau Bali

Kala Geologi	Formasi
Kuarter	Batuan gunung api dari kerucut subresen Gunung Pohen, Gunung Sangiang, Gunung Lesung. <i>Lava</i> dari Gunung Pawon. Batuan dari gunung api Gunung Batukaru. Batuan gunung api Gunung Agung. Batuan gunung api Gunung Batur. Tufa dari endapan lahar Buyan Bratan dan Batur.
Kuarter Bawah	Formasi Palasari : konglomerat, batu pasir, batu gamping terumbu. Batuan gunung api Gunung Sraya, batuan gunung api Buyan-Bratan Purba dan Batur Purba. Batuan gunung api Jembrana : lava, breksi, dan tufa dari Gunung Klatakan, Gunung Merbuk, Gunung Patas dan batuan yang tergabung
Pliosen	Formasi Asah : lava, breksi, tufa batu apung, dengan isian rekahan batu gampingan. Formasi Prapat Agung : batu gamping, batu pasir gampingan, Napal. Batuan gunung api Pulaki : lava dan breksi.
Miosen - Pleosen	Formasi Selatan : batu gamping
Miosen Tengah - Atas	Formasi Sorga : tufa, batu pasir, napal.
Miosen Bawah - Atas	Formasi Ulukan : breksi gunung api, <i>lava</i> , tufa dengan sisipan batu gamping.

2.4 Fisiografi

Bali merupakan wilayah yang sebagian besar wilayahnya mempunyai pegunungan dan perbukitan serta pegunungan dari barat hingga timur, dan terdapat gunung berapi yang masih aktif yaitu Gunung Batur dan Gunung Agung. Secara geografis Bali bagian tengah terbagi menjadi dua wilayah, yaitu wilayah selatan dan utara. Wilayah selatan bercirikan dataran rendah yang luas dan landai, sedangkan wilayah utara bercirikan dataran rendah sempit di kaki perbukitan dan perbukitan di sekitarnya.

Sebagian besar wilayah Bali memiliki kemiringan 0-2% hingga 15-40% dan sebagian wilayah lainnya memiliki kemiringan lebih dari 40%. Lahan dengan kemiringan 0-2% mendominasi di pesisir selatan Bali dan sebagian kecil di pesisir utara. Daerah dengan kemiringan 2-15% berada di wilayah Padang, Tabanan, Gianyar, Buler dan pesisir. Bali Tengah memiliki kemiringan 15-40% yang meliputi rangkaian perbukitan dari barat hingga timur. Daerah yang kemiringannya lebih dari 40% merupakan daerah pegunungan dan perbukitan dari.

2.5 Tektonik

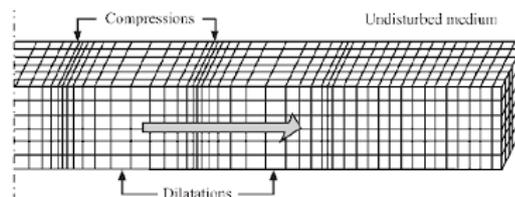
Bali merupakan bagian dari kepulauan Sunda Kecil yang terbentuk dari proses subduksi antara lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia cenderung bergerak ke utara dan lempeng Eurasia bergerak ke selatan. Proses subduksi lempeng Indo-Australia relatif terhadap lempeng Eurasia yang memiliki kecepatan 7 cm per tahun, yang mengakibatkan adanya sesar aktif struktur geologi dan aktivitas vulkanik di Bali. Letak Pulau Bali terletak di antara dua sumber seismik di selatan dan utara, yaitu gempa *subduction slab* di selatan dan sesar Flores belakang busur di timur laut Bali (Daryono, 2011).

III. TEORI DASAR

3.1 Gelombang Seismik

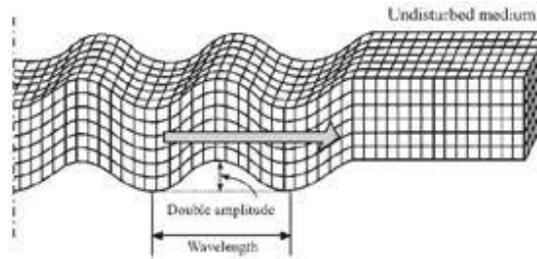
Gelombang seismik merupakan gelombang yang menjalar di dalam bumi, yang disebabkan karena adanya deformasi struktur di bawah bumi akibat adanya tekanan ataupun tarikan karena sifat elastisitas kerak bumi (Kusumawati, 2014). Gelombang seismik dibedakan menjadi dua tipe gelombang, yakni gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*).

Gelombang badan atau *Body wave* merupakan gelombang yang menjalar dalam media elastik dan arah perambatannya ke seluruh bagian dalam bumi. Berdasarkan arah penjalarnya gelombang ini dibedakan menjadi gelombang primer (P) dan gelombang sekunder (S).



Gambar 3. Gelombang Primer (Elnashai dan Sarno, 2008)

Pada **Gambar 4** menunjukkan gelombang primer, Gelombang primer (P) tersebut memiliki kecepatan rambat paling besar dibandingkan gelombang seismik yang lain, dapat merambat melalui media padat dan cair seperti lapisan batuan air atau lapisan cair bumi. Kecepatan gelombang P dalam padatan sekitar 1,8-7 km/detik.

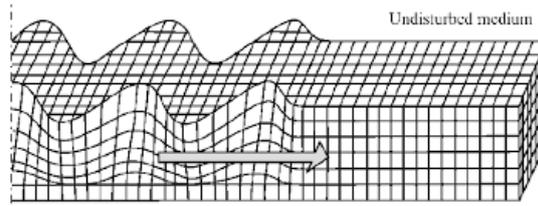


Gambar 4. Gelombang Sekunder (Elnashai dan Sarno, 2008)

Pada **Gambar 5** menunjukkan gelombang sekunder, Gelombang S (sekunder) ini memiliki cepat rambat yang lebih lambat dibandingkan gelombang P dan hanya dapat merambat pada medium padat saja, Gelombang S tegak lurus terhadap arah rambatnya (Elnashai dan Sarno, 2008).

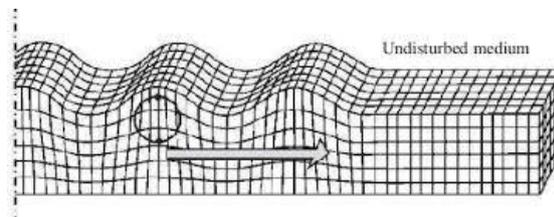
Gelombang permukaan adalah gelombang yang merambat di permukaan bumi. Gelombang ini bergerak lebih lambat dari gelombang badan, tetapi menyebabkan kerusakan yang lebih besar. Pada saat merambat, gelombang memiliki frekuensi yang lebih rendah tetapi amplitudo yang lebih besar karena efek permukaan bebas (terdapat perbedaan sifat elastis) (Susilawati, 2008). Berdasarkan jenis dari gelombang permukaan ada dua yaitu Gelombang *Love* dan *Rayleigh*.

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) yang dapat ditunjukkan pada **Gambar 6**. Kecepatan gelombang di permukaan (VL) adalah $\pm 2,0 - 4,4$ Km/s (Hidayati, 2010). Gelombang ini dibentuk oleh interferensi gelombang yang dipantulkan pada gelombang sekunder horizontal (SH) pada lapisan di dekat permukaan bumi. Gerak partikel medium saat melewati gelombang Love dan gelombang SH akan sama, tetapi amplitudo akan berkurang dengan bertambahnya kedalaman, gelombang ini memiliki efek pada bangunan seperti goyangan atau guncangan secara mendatar pada dasarnya, sehingga memiliki potensi untuk membuat bangunan mengalami kerusakan (Pawirodikromo, 2012).



Gambar 6. Gelombang *Love* (Elnashai dan Sarno, 2008)

Gelombang *Rayleigh* merupakan gelombang yang penjalarannya di permukaan membuat seperti berbentuk elips dan arahnya gerak mundur. Kecepatan pada gelombang Rayleigh dalam satu medium yang sama lebih kecil bila berbanding dengan kecepatan gelombang geser. Kecepatan di dalam bumi (V_R) adalah $\pm 2,0 - 4,2$ Km/s (Hidayati, 2010). Gelombang Rayleigh memiliki ciri dengan amplitudo yang besar dan frekuensi yang kecil (Telford dkk., 1990) dapat dilihat pada **Gambar 7**. Gelombang *rayleigh* terbentuk dari interferensi gelombang pantul pada gelombang Primer dan gelombang Sekunder Vertikal (SV) yang sudut datangnya lebih besar dari sudut kritis, gelombang ini dapat menjalar pada medium cair. Pengaruh dari gelombang ini akan berkurang secara cepat menurut kedalaman lapisan tanah (Pawirodikromo, 2012).



Gambar 7. Gelombang *Rayleigh* (Elnashai dan Sarno, 2008)

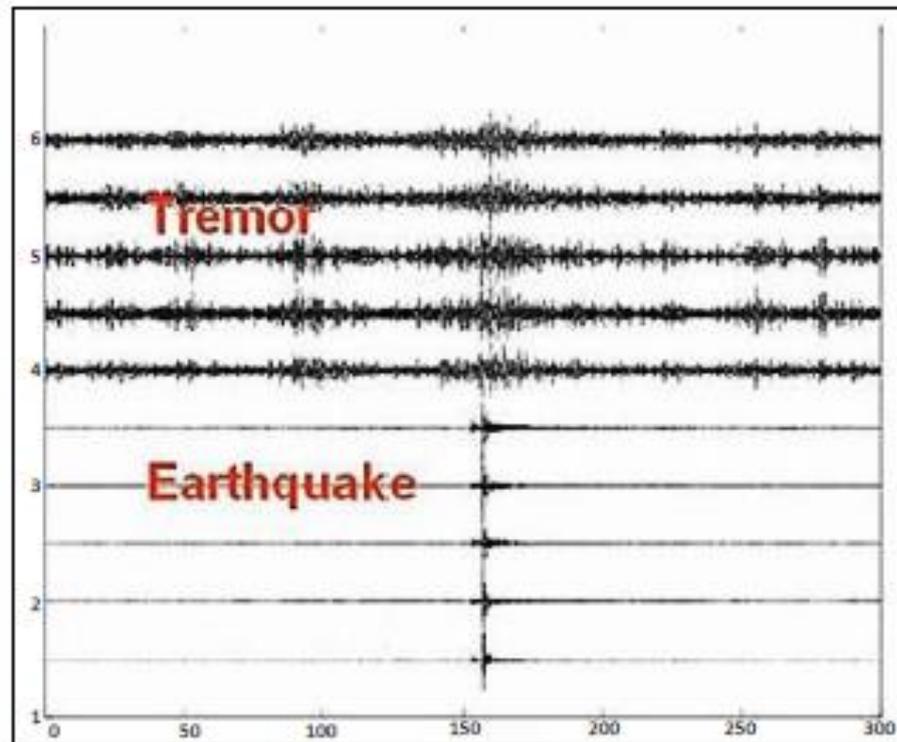
3.2 Mikrotremor

Mikrotremor merupakan getaran harmonik sangat kecil yang terjadi secara terus menerus, yang terperangkap di lapisan permukaan sedimen, dan dipantulkan oleh bidang batas dengan nilai frekuensi yang tetap dan aktivitas lainnya di bumi. Getaran dapat disebabkan oleh aktivitas alam maupun buatan manusia. Peristiwa yang menimbulkan getaran buatan adalah pergerakan kendaraan, industri dan aktivitas manusia lainnya di permukaan tanah. Sedangkan fenomena alam yang menimbulkan getaran adalah tekanan atmosfer, angin, hujan, dan gelombang laut.

Mikrotremor memiliki nilai frekuensi yang lebih tinggi dari getaran gempa bumi, dan memiliki periode kurang dari 0,1 detik yang secara umum 0,05 – 2 detik. Untuk periode mikrotremor bisa memiliki periode panjang 5 detik dan amplitude berkisar antara 0,1 – 2,0 mikron. Sinyal mikrotremor dapat terpengaruh karena aktivitas manusia yang dapat menimbulkan getaran, namun pengaruh yang diberikan sangatlah kecil terhadap mikrotremor dengan nilai frekuensi dibawah 0,1 Hz dan sebaliknya. Sumber mikrotremor yang berasal dari alam yaitu gelombang air laut serta kondisi meteorologi secara luas memiliki nilai frekuensi kurang dari 1 Hz, untuk sumber mikrotremor yang berasal dari alam yaitu aktivitas meteorologi lokal seperti angin dan aliran air memiliki nilai frekuensi dengan rentang 1 – 5 Hz, dan sumber mikrotremor yang memiliki nilai frekuensi tinggi yaitu lebih dari 5 Hz sumber utamanya yaitu aktivitas manusia.

Secara umum untuk merekam mikrotremor memerlukan seismometer dengan tiga komponen yaitu NS (*north-south*), EW (*east-west*), dan vertikal (*up-down*) atau dapat juga menggunakan accelerometer dengan 3 komponen. Pada saat melakukan perekaman mikrotremor dilakukan pengukuran secara langsung karena yang direkam yaitu gelombang yang berasal dari alam, sehingga tidak memerlukan sumber buatan. Mikrotremor dapat digunakan pada bidang perancangan bangunan tahan gempa, dimana digunakan untuk menyelidiki struktur bangunan dan mendapatkan nilai alami frekuensi dari bangunan untuk mencegah terjadinya resonansi yang dapat memperbesar amplifikasi getaran bila terjadi bencana alam seperti gempa bumi atau angin kencang.

Dalam kajian teknik gempa, litologi yang lebih lunak mempunyai risiko lebih besar untuk terguncang oleh gelombang seismik karena mengalami amplifikasi gelombang yang lebih besar dibandingkan batuan yang lebih padat. Gempa bumi dan tremor mudah dibedakan dengan melihat rekaman seismograf. Tremor merupakan getaran yang terus menerus, tidak diketahui dengan jelas darimana getaran itu bermula. Getaran gempa bumi berupa getaran yang besar dan terjadi secara tiba-tiba, seperti yang terlihat pada **Gabambar 8**.



Gambar 8. Perbedaan sinyal tremor dan gempa bumi (Subardjo,dkk. 2005).

3.3 Mikroearthquake

Mikroearthquake merupakan gelombang yang sama dengan gelombang gempa dengan frekuensi yang lebih kecil dari gelombang gempa, gelombang ini tidak merusak dan membahayakan. gempa-mikro (microearthquake) memiliki frekuensi kejadian yang sangat sering (sekitar 1000 hingga 8000 per hari) sehingga gempa mikro sangat baik digunakan sebagai metode untuk mempelajari struktur bawah permukaan yang bersifat lokal. Gempa mikro seringkali terjadi di banyak lapangan panas bumi, salah satunya disebabkan oleh pergerakan fluida melalui patahan pada sistem panas bumi. frekuensi dan amplitudo yang kecil sehingga sering tidak dapat terdeteksi oleh manusia dan tidak akan menyebabkan dampak yang dapat merusak atau membahayakan manusia. Karena nilai frekuensi dan amplitudo *microearthquake* ini kecil, manusia tidak perlu menyiapkan Langkah untuk mitigasi dampak dari gelombang ini. *Microearthquake* berbeda dengan mikroseismik dimana mikroseismik memiliki karakteristik sendiri dan tidak berasal dari gempa bumi (Haerudin, dkk, 2019).

3.4 Mikroseismik

Mikroseismik adalah gelombang yang memiliki frekuensi dan amplitudo yang kecil sehingga belum tentu dapat dirasakan oleh manusia. Metode mikroseismik banyak digunakan dalam eksplorasi gas bumi, minyak bumi, dan panas bumi. Menurut Julian dan Flouger (2009), secara umum, sinyal mikroseismik hampir sama dengan sinyal dari gempa tektonik. Akan tetapi, pada analisis sinyal gempa tektonik nilai magnitudonya diatas 5 SR, sedangkan analisis gempa mikro memiliki magnitudo kurang dari 3 SR (Haerudin, dkk, 2019).

3.5 HVSR

Metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) merupakan metode yang menunjukkan hubungan antar struktur bawah tanah dengan cara membandingkan rasio spektrum Fourier komponen horizontal sinyal mikrotremor terhadap komponen vertikalnya (Nakamura, 1989). Metode HVSR memberikan parameter penting yaitu nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi yang berkaitan dengan parameter fisik bawah tanah, dan periode dominan suatu lokasi pada dasarnya dapat diperkirakan dari rasio H/V puncak mikrotremor.

Pada metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) terdapat 2 data komponen horizontal EW dan NS dan satu data komponen vertikal. Faktor amplifikasi dari gerakan horizontal dan vertikal di permukaan tanah sedimen berdasarkan pada gerakan seismik di permukaan tanah yang bersentuhan langsung dengan batuan dasar di area cekungan dilambangkan dengan T_H dan T_V (Nakamura, 2000). Besarnya faktor amplifikasi horizontal T_H adalah:

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (1)$$

Dengan S_{HS} adalah spektrum dari komponen gerak horizontal di permukaan tanah, dan S_{HB} adalah spektrum dari komponen gerak horizontal pada dasar lapisan tanah. Besarnya faktor amplifikasi vertikal T_V adalah:

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2)$$

Dengan S_{VS} adalah spektrum dari komponen gerak vertikal di permukaan tanah, dan S_{VB} adalah spektrum dari komponen gerak vertikal pada dasar lapisan tanah 0,2-20,0 Hz, sehingga rasio spektrum antara komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar mendekati nilai satu.

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \approx 1 \quad (3)$$

Karena rasio spektrum antara komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar mendekati nilai satu, sehingga hanya ada pengaruh yang disebabkan oleh struktur geologi lokal atau site effect (T_{SITE}) menunjukkan puncak amplifikasi pada frekuensi dasar dari suatu lokasi. Dengan melakukan pensubtitusian Persamaan (2), (3) ke Persamaan (4), maka diperoleh:

$$T_{SITE} = \frac{S_{HV}}{S_{VS}} \quad (4)$$

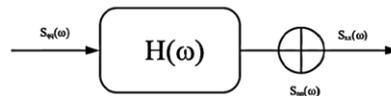
Persamaan tersebut menjadi dasar perhitungan rasio spektrum mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya (HVSr), sehingga dapat dinyatakan dengan Persamaan (5).

$$HVSr = T_{SITE} = \frac{\sqrt{(S_{utara-selatan})^2 + (S_{barat-timur})^2}}{S_{vertikal}} \quad (5)$$

Data mikrotremor tersusun atas beberapa jenis gelombang, tetapi yang utama adalah gelombang *Rayleigh* yang merambat pada lapisan sedimen diatas batuan dasar. pengaruh dari gelombang *Rayleigh* pada rekaman mikrotremor besarnya sama untuk komponen vertikal dan horizontal saat rentang frekuensi

3.3 FSR (*Floor Spectral Ratio*)

Metode FSR yaitu metode fungsi transfer dari tiap lantai antara spektral bangunan dan spektral tanah. Fungsi transfer dari struktur telah diperkirakan oleh rasio spektral struktur dan spektral tanah atau spektral bidang bebas, ini disebut *floor spectral ratio* (FSR). Metode ini merupakan standar untuk evaluasi kekuatan bangunan yang disebabkan getaran seismik dan karakteristik pembangunan yang dapat dilakukan dengan pencatatan rekaman mikrotremor (Gosar, 2010). Metode FSR (*Floor Spectral Ratio*) digunakan untuk melakukan analisis dan mengetahui frekuensi natural dan amplifikasi pada bangunan. Konsep dari metode FSR ditunjukkan sebagai berikut:



Dimana $H(\omega)$ adalah karakter bangunan (amplifikasi bangunan), S_{qq} respon getaran dari bangunan, dan S_{xx} respon getaran dari bangunan setelah terjadi getaran seismik.

3.4 Frekuensi Alami Tanah

Frekuensi alami atau frekuensi dominan adalah jumlah gelombang yang terjadi selama selang waktu tertentu, dan jumlah gelombang dipengaruhi oleh kecepatan rata-rata dan ketebalan sedimen di bawah permukaan. Frekuensi alami tanah merupakan nilai frekuensi yang sering terjadi sehingga diakui sebagai nilai frekuensi lapisan batuan pada suatu daerah. Nilai frekuensi alami tanah dapat mengetahui karakteristik jenis batuan di suatu daerah. (Lachet dan Brad 1994) melakukan percobaan simulasi menggunakan model struktur geologi sederhana yang menggabungkan variasi berlawanan dalam kecepatan gelombang geser dan ketebalan lapisan tanah.

Nilai frekuensi natural tanah mempengaruhi tebal tidaknya lapisan sedimen pada suatu daerah. Semakin rendah nilai frekuensi natural tanah maka lapisan sedimen

di daerah tersebut semakin tebal dan semakin besar nilai frekuensi natural tanah maka lapisan sedimennya akan semakin tipis. Hal tersebut juga dapat menunjukkan kedalaman dari batuan yang lebih keras dapat dilihat pada **Tabel 1** tentang klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi dominan mikrotremor di bawah ini.

Tabel 2. Tabel Klasifikasi Tanah Berdasarkan Nilai Frekuensi Dominan Mikrotremor Oleh Kanai (Kanai, 1993).

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

3.5 Frekuensi Alami Bangunan

Frekuensi natural adalah getaran yang terjadi pada suatu bangunan setiap detik. Nilai frekuensi karakteristik bangunan berbeda-beda dan sebagian besar bergantung pada ketinggian bangunan. Getaran alami pada gedung tinggi lebih lambat dibandingkan pada gedung rendah (Tipler, 1991). Respon bangunan terhadap getaran bergantung pada frekuensi alami bangunan. Apabila terjadi gempa bumi atau gangguan berupa getaran struktur suatu bangunan dengan frekuensi alami (f_0) sama dengan nilai frekuensi alami tanah (f_t), maka akan mengalami resonansi sehingga terjadi penguatan gelombang seismik pada daerah tersebut. Efek resonansi memperkuat getaran gempa dan menyebabkan bangunan runtuh saat getaran gempa kuat.

Nilai frekuensi alami gedung dapat diperoleh dengan menggunakan analisa FSR, dimana hasil dari analisis spektrum frekuensi dari setiap lantai hingga tanah di bawahnya untuk mendapatkan nilai frekuensi alami bangunan dapat dilakukan dengan perhitungan menggunakan persamaan (8) dan (9)

$$f_0(FSR) = \frac{f_b NS}{f_t NS} \quad (6)$$

$$f_0(FSR) = \frac{f_b EW}{f_t EW} \quad (7)$$

Keterangan:

f_b = nilai dari frekuensi bangunan.

f_t = nilai dari frekuensi tanah.

NS dan EW = komponen dari data.

3.7 Vs30

Vs30 merupakan rata-rata kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter dari permukaan tanah yang telah banyak digunakan di *Ground Motion Prediction Equations* (GMPEs), meskipun sendiri tidak bisa mewakili *site effect* karena kecepatan gelombang *shear* hingga kedalaman 30 meter dari permukaan, kedalaman *bedrock* dan rasio impedansi antara lapisan tanah dan *bedrock*,

semuanya berkontribusi secara signifikan terhadap *respons site* (Nurrahmi dkk., 2015).

Penetapan jenis tanah yaitu antara tanah keras, tanah sedang dan tanah lunak dapat ditentukan dengan kecepatan rambat gelombang geser (V_s). Nilai V_{s30} ini bergantung pada kondisi fisik batuan sehingga dapat diprediksi berdasarkan parameter geologi dan morfologi. Elevasi atau ketinggian berhubungan erat dengan kekerasan batuan. Pelapukan berlangsung secara intensif pada puncak bukit sedangkan sedimentasi berada pada tingkat yang paling rendah. Secara sederhana dapat dikatakan bahwa batuan yang berada di puncak bukit merupakan batuan yang keras dan tahan terhadap pelapukan, sedangkan cekungan yang berada di daerah yang lebih rendah merupakan endapan muda yang lunak.

Ketebalan sedimen dapat diestimasi dengan rasio spektrum H/V. Dari metode HVSR berdasar dari terperangkapnya suatu getaran gelombang geser pada suatu medium sedimen di atas *bedrock*. Besarnya frekuensi dominan pada bawah permukaan tanah dinyatakan dengan Persamaan (8) (Nakamura, 2008).

$$f_0 = \frac{V_s}{4h} \quad (8)$$

Dengan f_0 , V_s , h berturut-turut menunjukkan frekuensi dominan, kecepatan gelombang geser dan ketebalan sedimen sehingga dapat dilihat pada Persamaan (9)

$$V_{s30} = f_0(4h) \quad (9)$$

Proses dari suatu perencanaan struktur bangunan tahan gempa dapat dipengaruhi dari lokasi dan kondisi batuan bawah permukaan. Getaran yang diakibatkan dari gempa cenderung akan membesar pada batuan lunak apabila dibandingkan pada batuan keras atau padat. Proses penentuan dapat dilihat dari klasifikasi jenis batuan tersebut berdasar dari data batuan pada kedalaman 30 meter (Nurrahmi dkk., 2015). **Tabel 3** merupakan klasifikasi jenis batuan berdasarkan nilai V_{s30} , **Tabel 4** merupakan klasifikasi Stratigrafi tanah berdasarkan Eurocode 8.

Tabel 3. Klasifikasi Jenis Batuan berdasarkan *Uniform Building Code* (UBC) (Nurrahmi, dkk., 2015)

Tipe Batuan	Profil Jenis Batuan	Nilai Vs30
A	<i>Hard Rock</i> (Batuan Keras)	>1500 m/s
B	<i>Rock</i> (Batuan Sedang)	760 – 1500 m/s
C	<i>Very Dense Soil and Soft Rock</i> (Tanah Keras dan Batuan Lunak)	360 – 760 m/s
D	<i>Stiff Soil</i> (Tanah Sedang)	180 – 360 m/s
E	<i>Soft Soil</i> (Tanah Lunak)	<180 m/s

Tabel 4. Stratigrafi tanah berdasarkan Eurocode 8 (Mufida, dkk., 2013)

Tipe Tanah	Uraian Gambar Stratigrafi	Nilai Vs30
A	Batuan atau formasi batuan lainnya	>800
B	Endapan sand atau clay yang sangat padat, gravel, pada ketebalan beberapa puluh meter, ditandai dengan peningkatan sifat mekanik terhadap kedalaman	360 – 180
C	Endapan sand padat atau setengah padat yang tebal, gravel atau clay padat dengan ketebalan beberapa puluhan hingga ratusan meter.	180 – 360
D	Endapan tanah kohesi rendah sampai sedang (dengan atau tanpa beberapa lapisan kohesi rendah), atau terutama pada tanah kohesi renda	<180
E	Lapisan tanah terdiri dari aluvium pada permukaan dengan nilai Vs tipe C atau D dengan ketebalan bervariasi antara 5 m dan 20 m, di bawah tanah ini berupa material keras dengan Vs > 800 m/s.	< 100 (Indikasi)
S1	Endapan terdiri dari atau mengandung ketebalan lapisan minimal 10 m, pada tanah lempung lunak	

Tipe Tanah	Uraian Gambar Stratigrafi	Nilai V_{s30}
	atau lempung lanuan dengan indeks plastisitan dan kadar air yang tinggi.	
S2	Endapan tanah likuifiable, dari clay yang sensitif, atau tanah lain yang tidak termasuk dalam tipe A-E atau S1.	

Analisis dari kecepatan gelombang geser dapat mengetahui potensi kerusakan apabila terjadi gempa bumi. Hal ini disebabkan karena dampak kerusakan suatu tempat gempa bumi tidak hanya berdasarkan jarak episenter dan besar kekuatan gempa, tetapi juga kondisi lokal daerah setempat. Salah satu metode yang dapat menggambarkan kondisi lokal daerah setempat adalah pemetaan nilai kecepatan gelombang geser (V_{S30}). Guncangan lebih kuat terjadi pada daerah dengan nilai V_{S30} yang rendah (Susilanto, dkk., 2015).

3.6 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).

Nilai amplifikasi tinggi menunjukkan kontras impedansi yang tinggi, yang artinya densitas (ρ) antar lapisan sangat berbeda. Dalam analisa resiko gempa bumi, kontras impedansi tinggi mengakibatkan resiko yang tinggi apabila terjadi gempa bumi. Nilai amplifikasi dipengaruhi oleh kecepatan gelombang., apabila kecepatan gelombang semakin kecil maka amplifikasi semakin besar. Amplifikasi

berhubungan dengan tingkat kepadatan batuan, berkurangnya kepadatan batuan dapat meningkatkan nilai amplifikasi karena pada batuan yang kurang padat (sedimen lunak) akan memperlama durasi gelombang menjalar di lokasi tersebut dan memperbesar amplitudo gelombangnya, sehingga terjadi guncangan terhadap bangunan di atas permukaan. Hal ini yang dapat menyebabkan tingkat potensi resiko bencana gempa bumi semakin besar (Nakamura, 2000). Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Klasifikasi Nilai Dari Factor Amplifikasi (Marjiyono, 2016)

Zona	Nilai Faktor Amplifikasi	Keterangan Resiko
1	< 3	Rendah
2	3 – 6	Sedang
3	6 – 9	Tinggi
4	>9	Sangat Tinggi

3.7 Resonansi

Resonansi merupakan suatu peristiwa ikut bergetarnya suatu benda karena memiliki frekuensi atau periode yang sama atau hampir mendekati. Bangunan dapat mengalami resonansi jika frekuensi natural struktur bangunan sama dengan frekuensi getaran tanah atau getaran gempa bumi. Semakin besar nilai resonansi maka semakin baik karena frekuensi natural gedung semakin menjauhi nilai frekuensi natural tanah. Nilai dari resonansi bangunan ditentukan berdasarkan spektrum pada setiap komponen (NS dan EW). Resonansi dapat digunakan untuk menentukan kemungkinan sebuah bangunan beresonansi dalam gempa bumi (Gosar, dkk., 2010). Terdapat beberapa klasifikasi, yaitu :

1. Resonansi tingkat rendah ($R > 25\%$)
2. Resonansi tingkat sedang ($15\% < R < 25\%$)
3. Resonansi tingkat tinggi ($R < 15\%$)

Untuk menghitung indeks resonansi bangunan menggunakan persamaan seperti berikut.

$$R = \left| \frac{fb - ft}{ft} \right| \times 100 \% \quad (10)$$

Dimana:

R = Resonansi

fb = Frekuensi alami bangunan

ft = frekuensi alami tanah

3.8 Indeks Kerentanan

Tingkat kerusakan bangunan berbanding lurus dengan indeks kerentanan tanah (Kg). Secara matematis rumus indeks kerentanan tanah dapat dirumuskan dalam persamaan (11) (Nakamura, 2000).

$$Kg = \frac{Am^2}{f0} \quad (11)$$

Keterangan:

Kg : Indeks kerentanan tanah.

Am : Puncak spektrum HVSR.

$f0$: Nilai frekuensi dominan.

Nilai dari indeks kerentanan tanah diklasifikasikan untuk menentukan tingkat rawan kerusakan yang dapat terjadi akibat gempa dengan klasifikasi pada Tabel 6.

Tabel 6. Klasifikasi nilai indeks kerentanan tanah (Marjiyono, 2016)

Zona	Nilai Kg
Rendah	< 3
Sedang	5 – 6
Tinggi	>6

Indeks kerentanan bangunan dapat diperkirakan dari deformasi struktur yang terkait dengan gerakan seismik dari tanah dan dari lapisan karakteristik dinamik struktur. Untuk dapat memperkirakan tingkat kerusakan struktur bangunan akibat

terjadinya gempa bumi, perlu diketahui daya tahan antara struktur dan tanah secara benar. Nilai indeks kerentanan bangunan K_b ditentukan berdasarkan Persamaan (10) yang ditemukan oleh (Sato, dkk, 2008) sebagai berikut:

$$K_b = \frac{A}{4\pi^2 f_0^2 h} \quad (12)$$

Dengan A merupakan nilai amplifikasi dari bangunan, f_0 merupakan nilai frekuensi bangunan dari analisis FSR, dan h merupakan ketinggian bangunan. Secara teknis beberapa faktor penyebab kerentanan bangunan adalah sebagai berikut:

1. Lokasi / topografi berpotensi menyebabkan terjadinya perbedaan penurunan dan menghasilkan getaran yang lebih besar dibandingkan di kawasan dataran.
2. Penggunaan bahan material dan bentuk dari bangunan yang tidak sesuai dengan yang direncanakan.
3. Kualitas dari struktur bangunan yang digunakan tidak memadai dan tidak sesuai dengan tingkat kerawanan pada daerah setempat terhadap bencana gempa bumi.
4. Kondisi atau keadaan bangunan yang sudah tidak terawat.

Nilai kemungkinan kerusakan setiap bangunan itu berbeda-beda, hal ini disebabkan karena jarak dari pusat gempa, kondisi tanah, topografi, dan jenis tanah yang terdapat di bawah masing-masing bangunan juga berbeda.

3.9 Accelometer

Accelometer merupakan suatu sensor yang dipakai untuk melakukan pengukuran kecepatan suatu objek. Accelometer dapat mengukur percepatan dinamis dan juga statis. Pengukuran dinamis adalah pengukuran percepatan pada objek bergerak sedangkan pengukuran statis adalah pengukuran terhadap gravitasi bumi. Prinsip kerja dari accelometr adalah prinsip percepatan, misalkan suatu per yang memiliki beban dilepaskan kemudian beban bergerak dengan suatu percepatan sampai

dengan suatu kondisi tertentu hingga berhenti. Apabila terjadi guncangan maka beban akan berayun kembali.

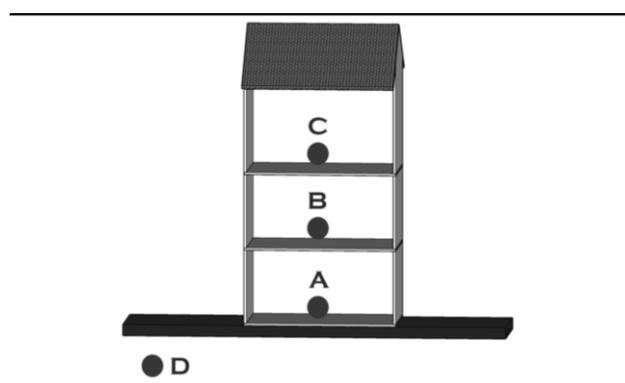
3.10 Seismografit

Seismometer (bahasa Yunani: seismos: gempa bumi dan metero: mengukur) adalah alat atau sensor getaran, yang biasanya dipergunakan untuk mendeteksi gempa bumi atau getaran pada permukaan tanah. Prinsip kerja seismograf mengembangkan kerja dari bandul sederhana. Ketika mendapatkan usikan atau gangguan dari luar seperti gelombang seismik maka bandul akan bergetar dan merekam datanya seperti grafik. Ada pola yang sama menyerupai gerakan bolak-balik dari grafik yang terekam dalam seismograf. Gerakan bolak-balik tersebut dinamakan getaran.

4.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data skunder berupa data mikrotremor pengukuran di BMKG wilayah III Denpasar Bali menggunakan *accelerometer* dan *accelerometer borehole* pada tanggal 31 juli 2020 untuk data *borhole* dan tanggal 24 September 2020 untuk data gedung, seperti terlihat pada Gambar 9.



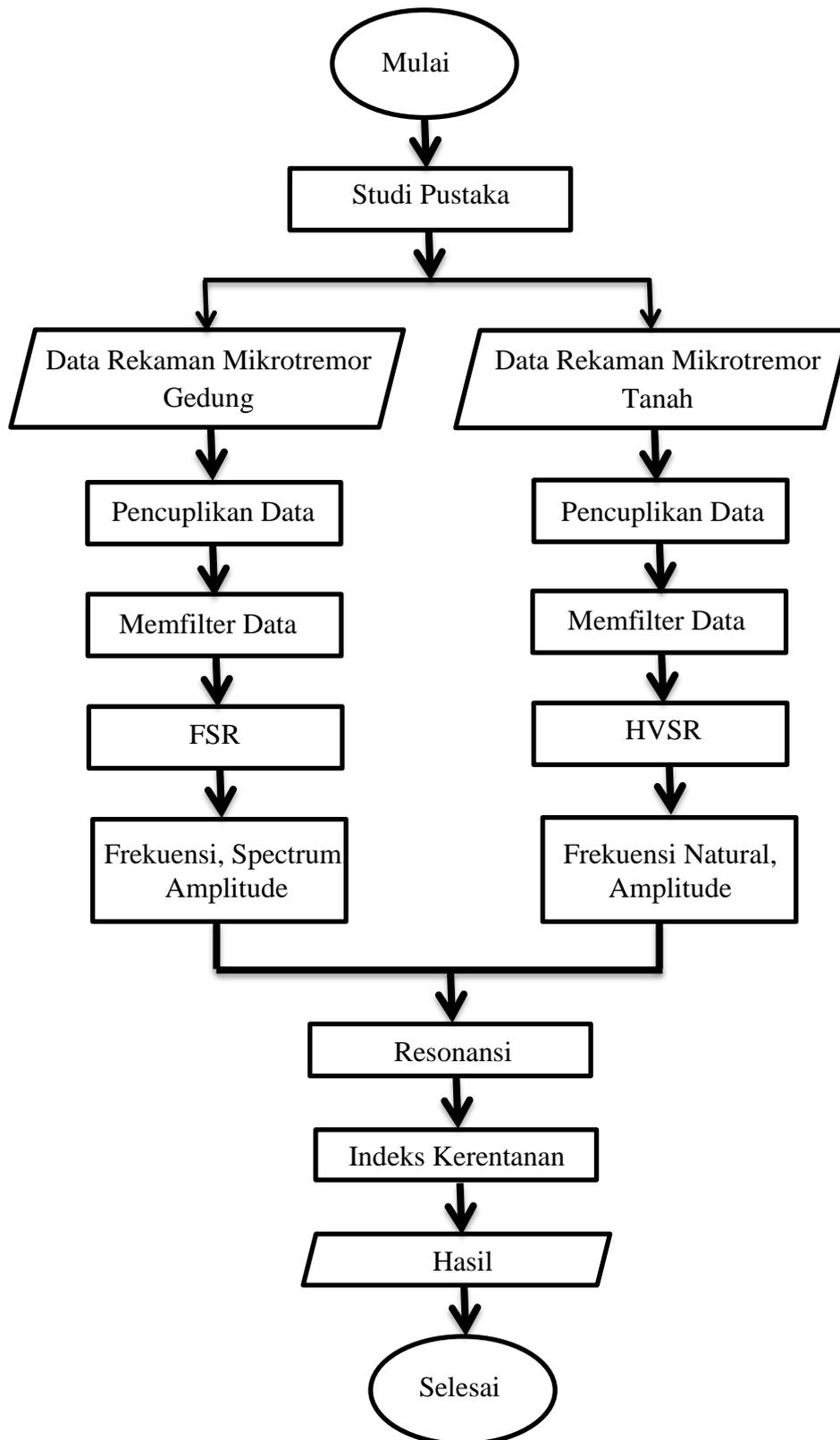
Gambar 9. Skema Peletakan *Accelerometer*

Dimana A merupakan lokasi dari akselerometer pada lantai 1 dengan tinggi bangunan 9 meter, B merupakan lokasi dari akselerometer pada lantai 2 dengan tinggi bangunan 13 meter, C merupakan lokasi dari akselerometer pada lantai 3 dengan tinggi bangunan 16,5 meter, dan D merupakan lokasi dari akselerometer lubang bor yang terdapat pada permukaan tanah.

2. Laptop serta perangkat lunak yang digunakan yaitu:
 - a. *Software Geopsy*,
 - b. *Software excel*
 - c. *Software Word*

4.3 Diagram Alir

Adapun diagram alir yang dilakuakn pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



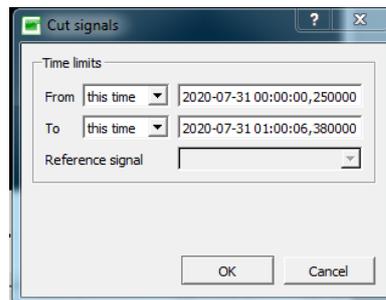
Gambar 10. Diagram Alir

4.4 Prosedur Penelitian

Langkah kerja untuk menganalisis data pada penelitian ini adalah:

1. Pencuplikan Data

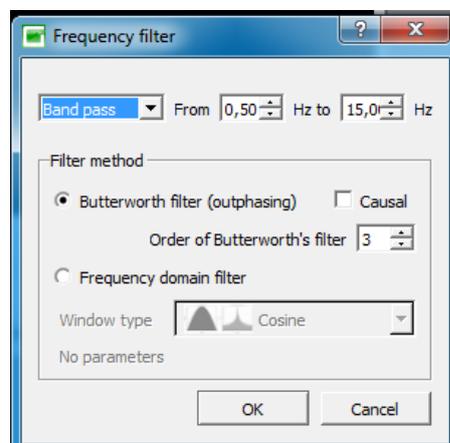
Pencuplikan data dilakukan sebagai tahapan awal pada pengolahan data yang dilakukan menggunakan *software geopsy*. Tahapan pencuplikan data dilakukan untuk mencuplik sinyal mikrotremor dilakukan pada setiap jam dengan rentang waktu pukul 00:00 – 04:00 WITA dan pada pukul 12:00 – 15:00 WITA.



Gambar 11. Tampilan Menu Pemotongan Data

2. *Band Pass Filter*

Pada pengolahan data *band pass filter* dilakukan untuk menyaring frekuensi pada rentang tertentu atau menyimpan sinyal berdasarkan batas frekuensi yang di inginkan atau ditentukan. Pada pengolahan data ini dilakukan *band pass filter* dengan rentang frekuensi batas bawah 0,50 Hz dan batas atas 15 Hz, dengan metode filter yang digunakan yaitu *butterworth's filter*.



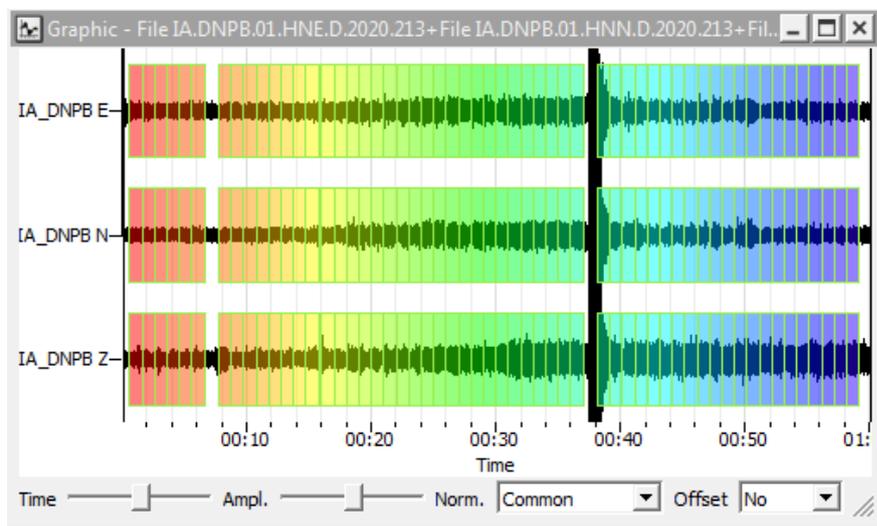
Gambar 12. Tampilan Menu Filter Sinyal

3. Pengolahan Data Mikrotremor Pada Tanah

Pengolahan data mikrotremor untuk tanah dilakukan menggunakan *software geopsy 4.1.1*, pengolahan dilakukan menggunakan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) untuk mendapatkan nilai frekuensi natural tanah (f_0), dengan mengimput data *borhole* dan melakukan FFT menggunakan *tool H/V* pada *software geopsy*. Berikut merupakan langkah dalam melakukan pengolahan data mikrotremor pada tanah:

a) *Windowing*

Windowing berfungsi untuk memilah antara sinyal tremor dengan *event transient*. Lebar *windowing* yang digunakan yaitu selama 60 *second*.



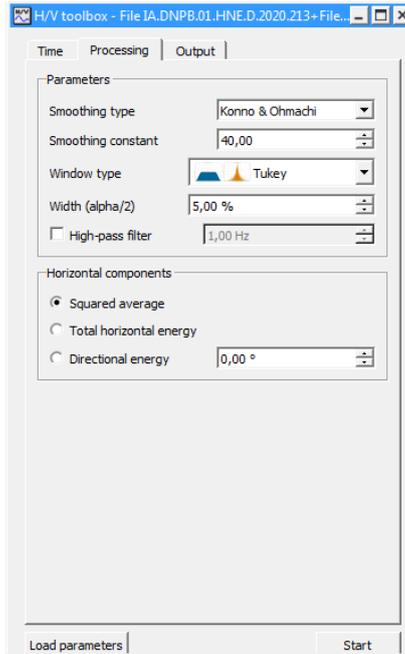
Gambar 13. Tampilan Pemilihan Sinyal

b) *Fourier Transform*

Setelah melakukan *windowing* maka tahap selanjutnya yaitu *fourier transform* dimana proses mengubah data dari yang mulanya domain waktu ke domain frekuensi (spektrum).

c) *Smoothing*

Setelah melakukan *fourier transform* maka tahap selanjutnya yaitu *smoothing*. Proses *smoothing* dilakukan untuk menghaluskan hasil dari proses *fourier transform* menggunakan *filter Konno-Ohmachi*.



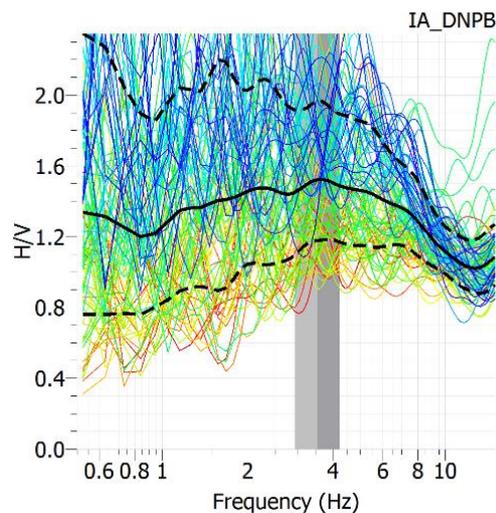
Gambar 14. Tampilan Penghaluysan Sinyal

d) Penggabungan komponen horizontal dan vertikal

Setelah dilakukan *smoothing*, kemudian dilakukan analisis rasio amplitudo spektrum *fourier* horizontal dan vertikal.

e) Frekuensi alami tanah (f_0) dan Amplifikasi tanah (A_0)

Hasil dari pengukuran HVSR yaitu nilai frekuensi alami tanah dan nilai amplifikasi tanah seperti **Gambar 10**.



Gambar 15. Contoh Hasil Pengolahan HVSR

4. Pengolahan Data Mikrotremor Pada Bangunan

Pengolahan data mikrotremor untuk bangunan dilakukan menggunakan *software geopsy 4.1.1*, pengolahan dilakukan menggunakan metode FSR (*Floor Spectral Ratio*) dengan *tool Spectrum* yang terdapat pada *software geopsy*. Untuk mendapatkan nilai frekuensi spectrum, data yang digunakan merupakan data dari pengukuran gedung lantai 1, 2 dan 3. Analisis yang dilakukan hanya menggunakan komponen spektrum horizontal (*east-west* dan *north-south*) dari *ambient noise* yang terjadi (Gosar, et al., 2010). Berikut merupakan langkah dalam melakukan pengolahan data mikrotremor pada bangunan:

a) **Windowing**

Windowing berfungsi untuk memilah antara sinyal tremor dengan *event transient*. Lebar *windowing* yang digunakan yaitu selama 25 *second*.

b) **Fourier Transform**

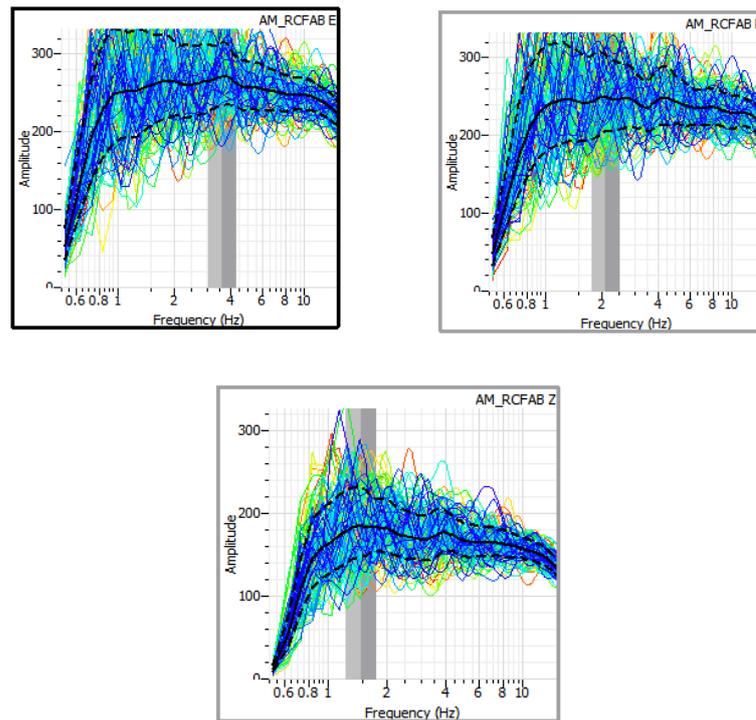
Setelah melakukan *windowing* maka tahap selanjutnya yaitu *fourier transform* dimana proses mengubah data dari yang mulanya domain waktu ke domain frekuensi (spektrum).

c) **Smoothing**

Setelah melakukan *fourier transform* maka tahap selanjutnya yaitu *smoothing*. Proses *smoothing* dilakukan untuk menghaluskan hasil dari proses *fourier transform* menggunakan *filter Konno-Ohmachi* dengan koefisien *bandwidth* sebesar 40s.

d) **Frekuensi spectrum (f₀) dan Amplitudo (A₀)**

Hasil dari pengukuran FSR yaitu nilai frekuensi spectrum komponen NS dan EW serta nilai amplitudo seperti **Gambar 11**.



Gambar 16. Contoh Hasil Pengolahan FSR

5. Perhitungan resonansi bangunan

Perhitungan resonansi bangunan dilakukan menggunakan persamaan (2), dimana menggunakan nilai frekuensi alami pada bangunan di setiap lantainya dan nilai frekuensi alami pada tanah. Perhitungan resonansi bangunan berguna untuk melihat persentase tingkat resonansi bangunan bila terjadi gempa.

6. Perhitungan indeks kerentanan tanah dan bangunan

Perhitungan indeks kerentanan tanah menggunakan nilai frekuensi alami tanah dan amplifikasi pada tanah yang didapatkan dari pengolahan frekuensi alami pada tanah. Sedangkan indeks kerentanan bangunan menggunakan persamaan (5) dimana dilakukan perhitungan pada setiap lantainya. Data yang digunakan untuk menghitung indeks kerentanan bangunan yaitu nilai frekuensi gedung dan amplitudo.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 KESIMPULAN

Adapaun kesimpulan pada penelitian ini adalah:

1. Nilai frekuensi tanah yang didapatkan dari pengolahan HVSR pada waktu siang hari lebih besar dari malam hari yaitu dengan rata-rata 3,15 hz dengan amplitude 1,62. Sedangkan untuk malam hari didapatkan nilai rata-rata yaitu 2,29 dan amplitude 1,63
2. Frekuensi bangunan yang didapatkan dari pengolahan FSR pada siang hari lebih kecil dari pada malam hari yaitu dengan rentang nilai 0,57 – 1,22 hz pada komponen EW, 0,39 – 1,35 pada komponen NS dan 0,45 – 0,51 komponen Z. Sedangkan nilai frekuensi bangunan yang didapatkan dari pengolahan FSR pada malam hari yaitu dengan rentang nilai 0,72 – 1,58 hz pada komponen EW, 0,53 – 2,06 pada komponen NS dan 0,55 – 0,73 komponen Z.
3. Nilai resonansi rata-rata pada penelitian ini didapatkan dengan resonansi siang hari yang lebih tinggi dari malam hari yaitu berkisar antara 61% - 84% dan untuk malam harinya didapatkan resonansi berkisar antara 40% - 73%, yang termasuk dalam resonansi rendah.
4. Nilai kerentanan tanah yang didapatkan rata-rata yaitu 0,97 pada siang hari dan 1,33 pada malam hari, termasuk dalam klasifikasi rendah.
5. Nilai kerentanan bangunan berkisar antara 0,46 – 3,82 pada waktu siang hari dan untuk malam hari 0,18- 2,09.

6.2 SARAN

Saran dari penelitian ini adalah perlu dilakukannya pengukuran pada satuhari di hari libur dan satu hari di hari yang tidak libur untuk perbandingan yang lebih akurat. Serta dilakukan pengolahan dengan metode yang lain seperti RDM.

DAFTAR PUSTAKA

- Daryono. 2011. Identifikasi Sesar Naik Belakang Busur (Back Arc Thrust) Daerah Bali Berdasarkan Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar. *Artikel Kebumihan, Badan Meteorologi dan Geofisika*, hal. 1-4.
- Elnashai, A. S., and Sarno, L. D. 2008. *Fundamental of Earthquake Engineering*. Second Edition. UK: John Wiley & Sons.
- Gadallah, R.M dan Fisher, R. 2009. *Exploration Geophysics*. Springer. Berlin.
- Gosar, A. 2010. *Site effects and Soil-Structure Resonance Study in The Kobarid Basin (NW Slovenia) Using Microtremor*. *Geofisika*, vol.28 2011.
- Haerudin, N., Alami, F., Dan Rustadi.2019. *Mikroseismik, Mikrotremor, Microearthquake Dalam Ilmu Kebumihan*. Pusaka Media.
- Kanai, K. 1983. *Seismilogy In Engineering*. Tokyo University. Tokyo.
- Kusumawati, N. 2014. Analisis Struktur Lapisan Tanah Berdasarkan Ketebalan Sedimen Dan Identifikasi Resiko Gempabumi Di Kabupaten Kulon Progo Menggunakan Mikrotremor. *Skripsi*. Universitas Negeri Yogyakarta. Yogyakarta.
- Lachet, C, dan Brad, P.Y. 1994. Numerical and Theoretical Investigation On the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. *J. Phys. Earth*. 42.
- Marjiyono. 2016. Potensi Penguatan Gelombang Gempa Bumi oleh Sedimen Permukaan Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi* 7(3). Pusat Survei Geologi: 135-144.
- Mufida, A., Santosa, B. J., Warnana, D. D. 2013. Profiling Kecepatan Gelombang Geser (Vs) Surabaya Berdasarkan Pengolahan Data Mikrotremor. *JurnalSains dan Seni Pomits Vol. 2 No. 2*.

- Nakamura, Y. 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor On the Ground Surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)*, Vol.30, No 1. 1989. Japan.
- Nakamura, Y. 2000. *Clear Identification Of Fundamental Idea Of Nakamura's System And Data Research Co.Ltd*, 3-25.
- Nakamura, Y. 2008. On The H/V Spectrum. *The 4th Word Conference On Earthquake Engginering*. Beijing, China.
- Nurrahmi., Efendi, R. dan Sandra. 2015. Analisis kecepatan gelombang geser Vs30 menggunakan metode refraksi mikrotremor (ReMi) di Kelurahan Talise. *Jurnal Gravitasi*, 14(1).
- Pawirodikromo, W. 2012. *Seismologi Teknik Dan Rekayasa Kegempaan*. Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Sato, K., Pellegrino, M., Nakagawa, T., Nakagawa, T., Vosshall, L., & Touhara, K. 2008. Insect olfactory receptors are heteromeric ligand-gated ion channels. *Nature*, 452(7190), 1002–1006.
- SESAME. 2005. *Practical User Guidelines and Software for The Implementation of the H/V Ratio Technique: Measuring Conditions, Processing Method and Results Interpretation*. USA : Berkeley.
- Subardjo. 2008. Parameter Gempabumi. *Materi Diklat Teknik*. Bmkg Jakarta.
- Sungkono dan Santoso, B.J. 2011. Karakteristik Kurva *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*: Kajian Literatur dan Pemodelan. *Jurnal Neutrino* 4(1). Institut Teknologi Surabaya: 1-15.
- Suprpto D. 1997. *Geomorfologi Dasar*. Yogyakarta. Fakultas Geografi UGM.
- Susilanto, P., dan Ngadmanto, D. 2015. Analisis Kecepatan Gelombang Geser (VS) di Cilacap, Jawa Tengah sebagai Upaya Mitigasi Gempabumi. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika (JMG) Vol 16 No 1: 57-64*
- Susilawati. 2008. Penerapan Penjalaran Gelombang Seismik Gempa pada Penelaahan Struktur Bagian dalam Bumi. *Skripsi*. Universitas Sumatera Utara. Sumatera Utara.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E. 1990. *Applied Geophysics. Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- Tipler, P.A. 1991. *Fisika Untuk Sains Dan Teknik (Jilid 1 ed)*. Jakarta: Erlangga.