

Skripsi Geofisika

**ANALISIS PERCEPATAN TANAH DAN *GROUND SHEAR STRAIN*
MENGUNAKAN METODE MIKROTREMOR DI AREA TERLIKUIFAKSI
PETOBO, PALU, SULAWESI TENGAH**



OLEH:

YUSRIL ASHAR ARFANDY

H061181325

PROGRAM STUDI GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2023

**ANALISIS PERCEPATAN TANAH DAN *GROUND SHEAR STRAIN*
MENGUNAKAN METODE MIKROTREMOR DI AREA TERLIKUIFAKSI
PETOBO, PALU, SULAWESI TENGAH**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains

Pada Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH:

YUSRIL ASHAR ARFANDY

H061181325

PROGRAM STUDI GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2023

HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISIS PERCEPATAN TANAH DAN *GROUND SHEAR STRAIN*
MENGUNAKAN METODE MIKROTREMOR DI AREA TERLIKUIFAKSI
PETOBO, PALU, SULAWESI TENGAH**

Disusun dan diajukan oleh:

YUSRIL ASHAR ARFANDY

H061181325

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan

Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 24 Januari 2023

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

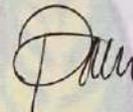
Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pertama



Dr. Erfan, M.Si
NIP. 196709032001121001



Andi Muhammad Pramatadie, ST., M.Eng., Ph.D
NIP. 198803242022055001

Mengetahui,

**Ketua Departemen Geofisika
Fakultas MIPA Unhas**



Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709291993031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yusril Ashar Arfandy

NIM : H061181325

Program Studi : Geofisika

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**“ANALISIS PERCEPATAN TANAH DAN *GROUND SHEAR STRAIN*
MENGUNAKAN METODE MIKROTREMOR DI AREA TERLIKUIFAKSI
PETOBO, PALU, SULAWESI TENGAH”**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain. Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 24 Januari 2023

Yang menyatakan



**YUSRIL ASHAR ARFANDY
H061181325**

SARI BACAAN

Kota Palu merupakan daerah dengan tingkat aktivitas seismik dan kerentanan terhadap resiko kegempaan yang tinggi akibat dilalui Sesar Palu-Koro. Salah satu fenomena merusak yang terjadi adalah likuifaksi di area Petobo yang disebabkan oleh Gempa Palu pada tahun 2018, sehingga diperlukan analisis tingkat kerentanan dan karakter dinamis tanahnya. Dalam menentukan kerentanan dan karakter dinamis tanah suatu tempat, diperlukan parameter berupa frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), dan periode dominan (T_0) yang diperoleh melalui metode mikrotremor HVSR, serta data kejadian gempa berupa jarak hiposentral dan magnitudo. Parameter periode dominan, jarak hiposentral, dan magnitudo digunakan untuk menghitung percepatan batuan dasar (a_0) dan percepatan tanah maksimum (a_{max}) yang kemudian dikonversi menjadi *peak ground acceleration* (PGA) dengan menggunakan persamaan empiris Kanai. a_{max} dan PGA lebih lanjut digunakan untuk menentukan kerentanan tanah daerah penelitian terhadap resiko akibat kegempaan. Parameter frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), dan percepatan batuan dasar (a_0) digunakan untuk menghitung nilai *ground shear strain* guna mengetahui karakter dinamis tanah di daerah penelitian. Analisis kerentanan resiko akibat kegempaan daerah penelitian didasarkan pada kaitan nilai a_{max} dan PGA terhadap skala MMI (*Modified Mercally Intensity*). Berdasarkan pengukuran mikrotremor yang dilakukan pada 33 titik, variasi nilai a_{max} area terlikuifaksi Petobo berkisar antara 64,380-353,818 gal terdiri dari bahaya seismik rendah dan tinggi dengan indeks seismik 2 dan 5. Nilai PGA berkisar antara 17,23 - 133,51 gal dengan rentang skala MMI berada antara IV-VI. Sementara itu, sebaran nilai *ground shear strain* berkisar antara $1,54 \times 10^{-4}$ - $1,10 \times 10^{-3}$ dengan fenomena retakan dan penurunan tanah serta sifat dinamis elasto-plastis dan elasto-plastis yang disertai efek perulangan. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi pembangunan infrastruktur bangunan maupun non-bangunan tahan gempa pada area terlikuifaksi Petobo.

Kata Kunci: Kota Palu, Mikrotremor, Percepatan Tanah, *Ground Shear Strain*, dan Bahaya Seismik.

ABSTRACT

Palu City is an area with a high level of seismic activity and vulnerability to seismic risk due to the Palu-Koro Fault. One of the destructive phenomena that occurred was liquefaction in the Petobo area caused by the Palu Earthquake in 2018, so it is necessary to analyze the level of vulnerability and the dynamic character of the soil. In determining the vulnerability and dynamic character of the soil of a place, parameters such as dominant frequency (f_0), amplification factor (A_0), and dominant period (T_0) obtained through the HVSr microtremor method are needed, as well as earthquake event data in the form of hypocentral distance and magnitude. The parameters of dominant period, hypocentral distance, and magnitude are used to calculate bedrock acceleration (a_0) and maximum ground acceleration (a_{max}) which are then converted into peak ground acceleration (PGA) using Kanai's empirical equation. a_{max} and PGA are further used to determine the susceptibility of the study area to risks due to seismicity. The parameters of dominant frequency (f_0), amplification factor (A_0), and bedrock acceleration (a_0) are used to calculate the ground shear strain value to determine the dynamic character of the soil in the study area. Risk vulnerability analysis due to seismicity of the study area is based on the relationship of a_{max} and PGA values to the MMI (Modified Mercally Intensity) scale. Based on microtremor measurements conducted at 33 points, the a_{max} value varies from 64.380 to 353.818 gal, with mild and severe seismic dangers for seismic indices 2 and 5. With an MMI scale ranging from IV to VI, the PGA value varies from 17.23 to 133.51 gal. Ground shear strain values vary from 1.54×10^{-4} to 1.10×10^{-3} , with fractures and settlement as well as elasto-plastic and elasto-plastic dynamic characteristics followed by looping effects. The findings of this research may be utilized to guide the construction of earthquake-resistant buildings and non-building infrastructure in the Petobo liquefaction zone.

Keywords: Palu City, Microtremor, Ground Acceleration, Ground Shear Strain, and Seismic Hazard.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis haturkan kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala tuhan pemilik alam semesta atas berkah, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat merampungkan tugas akhir berjudul “**Analisis Percepatan Tanah Dan Ground Shear Strain Menggunakan Metode Mikrotremor Di Area Terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah**”. Salam dan shalawat penulis haturkan kepada Baginda Nabi Muhammad Sallallahu Alaihi Wasallam sebagai suri tauladan dan contoh terbaik bagi seluruh ummatnya. Penghargaan sebesar-besarnya penulis berikan kepada Ibunda **Rosalina Assor** selaku ibu terbaik dan penyokong terbaik dalam seluruh kehidupan penulis yang tiada lelah mendukung dan memberikan kasih sayang tidak ternilai kepada penulis, untuk Ayahanda **Nursyam Arfandy** selaku penyokong kehidupan, penulis ucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya atas semua kerja keras dan semua pelajaran kehidupan yang telah diberikan, apresiasi sebesar-besarnya pula penulis berikan kepada adik **Mar’i Noval Arfandy** sebagai adik penulis yang banyak memberikan semangat dan koreksi kepada penulis.

Penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari arahan dan bimbingan dari banyak pihak, terima kasih sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada:

1. Bapak **Dr. Erfan, M.Si** selaku Pembimbing Akademik sekaligus Dosen Pembimbing Utama yang begitu banyak membantu dimulai dari awal hingga rampungnya Tugas Akhir ini. Terima kasih atas begitu banyak saran, kritik, juga bantuan yang telah diberikan.
2. Bapak **Andi Muhammad Pramatadie, ST., M.Eng., Ph.D** selaku dosen pembimbing pertama. Terima kasih atas banyak kritik membangun serta ilmu yang telah diberikan.
3. Bapak **Sofian S.Si** selaku pembimbing kedua. Terima kasih atas ilmu dan kebaikannya yang tidak pernah lelah menanggapi setiap pertanyaan penulis selama proses penulisan Tugas Akhir ini.

4. Bapak **Muh. Fawzy Ismullah M, S.Si., M.T** dan Ibu **Makhrani S.Si., M.Si** selaku dosen penguji. Terima Kasih banyak atas saran, masukan, dan ilmu yang telah diberikan yang membantu penulis dalam merampungkan penulisan Tugas Akhir ini.
5. Bapak **Hendrik Leopatty S.Si** selaku pembimbing lapangan yang selalu memberikan kemudahan serta arahan ketika melakukan akuisisi data di Stasiun Geofisika Kelas I Palu.
6. Kepada Bapak **Ahmad, Kak Abdul, Kak Choliq, dan Kak Mariska** yang telah banyak membantu dalam akuisisi data di lapangan.
7. Keluarga besar **H. Alle** dan Keluarga besar **Assor**. Terima kasih atas segala dukungan dan semangat yang telah diberikan.
8. **Muhammad Syaifullah** dan **Andri Moh. Wahyu Laode** selaku teman kelompok Kerja Praktek dan Tugas Akhir. Terima kasih atas kesediaan dan kebaikannya dalam menemani penulis selama merampungkan Tugas Akhir ini.
9. Teman-teman **Geofisika 2018, Fisika 2018, dan MIPA 2018** yang banyak membantu penulis selama mengenyam pendidikan S1 dari masa mahasiswa baru hingga selesai.
10. **Pace Squad** yang banyak membantu dan mendukung satu sama lain selama mengenyam pendidikan S1
11. Teman-teman **IPA 1 dan X.2** selaku teman-teman semasa SMA. Terima kasih atas bantuan dan juga dukungan yang diberikan selama ini.

Makassar, 24 Januari 2023



Penulis

DAFTAR ISI

SAMPUL

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN	Error! Bookmark not defined.
SARI BACAAN	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	2
I.3 Tujuan Penelitian	3
I.4 Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1 Tektonik dan Geologi Regional Daerah Penelitian	4
II.2 Gempa Bumi	7
II.3 Gelombang Seismik	9
II.3.1 <i>Body Waves</i>	9
II.3.2 <i>Surface Waves</i>	12
II.4 Likuifaksi	14
II.5 Percepatan Tanah	16
II.5.1 Percepatan Tanah Maksimum Kanai	17
II.5.2 <i>Peak Ground Acceleration</i>	22
II.6 Mikrotremor	23
II.7 Karakterisasi <i>Site</i> Berdasarkan Metode HVSR (<i>Horizontal to Vertical Ratio</i>)	24
II.7.1 Frekuensi Dominan	26

II.7.2 Periode Dominan.....	26
II.7.3 Faktor Amplifikasi	27
II.7.4 Indeks Kerentanan Seismik (Kg) dan <i>Ground Shear Strain</i>	28
II.8 Interpolasi Spline.....	30
II.9 Penelitian Terdahulu.....	31
II.9.1 Saputra dkk (2019).....	31
II.9.2 Zakia et al (2017)	32
BAB III METODE PENELITIAN	33
III.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	33
III.2 Alat dan Bahan.....	33
III.2.1 Alat.....	33
III.2.2 Bahan	37
III.3 Prosedur Penelitian.....	37
III.4 Bagan Alir Penelitian	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
IV.1 Analisis Data.....	41
IV.2 Peta Sebaran.....	47
IV.2.1 Peta Sebaran Percepatan Tanah Maksimum (a_{max}).....	47
IV.2.2 Peta Sebaran <i>Peak Ground Acceleration</i> (PGA).....	50
IV.2.3 Peta Sebaran <i>Ground Shear Strain</i>	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	57
V.1 Kesimpulan.....	57
V.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Tatanan tektonik Pulau Sulawesi dan pembagian segmentasi	
Sesar Palu Koro.....	5
Gambar II.2 Peta Geologi yang memperlihatkan lapisan penyusun dan struktur geologi yang terdapat di Sulawesi Tengah.....	6
Gambar II.3 Deformasi elastik dan <i>ground particle motions</i> pada Gelombang P dan Gelombang S	10
Gambar II.4 Deformasi elastik dan <i>ground particle motions</i> pada gelombang permukaan. (A) Gelombang Rayleigh, dan (B) Gelombang Love	13
Gambar II.5 <i>Ground motion time history</i> (komponen horizontal) dan spektrum respon percepatan kejadian gempa Westmorland.....	17
Gambar II.6 Spektra <i>displacement</i> dari <i>earthquake motion</i> bawah permukaan dalam.....	18
Gambar II.7 Spektra <i>velocity</i> dari <i>earthquake motion</i> bawah permukaan dalam dan rata-rata spektrum <i>velocity</i> dari <i>earthquake motion</i> bawah permukaan dalam.....	19
Gambar II.8 Rasio Spektral H/V dari suatu titik.....	26
Gambar III.1 Peta lokasi akuisisi data mikrotremor	33
Gambar III.2 Digital Portable Seismograph tipe TDL-303S.....	34
Gambar III.3 Seismometer tipe DS-4A.....	34
Gambar III.4 GPS.....	34
Gambar III.5 GPS Garmin Monterra.....	35
Gambar III.6 Kabel penghubung <i>digitizer</i> ke seismometer.....	35
Gambar III.7 Kabel penghubung <i>digitizer</i> ke laptop.....	35
Gambar III.8 Kompas Geologi.....	35

Gambar III.9 Laptop.....	36
Gambar III.10 Patok.....	36
Gambar III.11 Lembar Akuisisi.....	36
Gambar III.12 Bagan Alir	40
Gambar IV.1 Data sinyal rekaman mikrotremor <i>site</i> PTB_16	42
Gambar IV.2 Sinyal pada <i>Site</i> PTB_16 yang telah melalui proses <i>windowing</i> ...43	
Gambar IV.3 Standar nilai perbandingan amplitudo pendek dan panjang oleh <i>software</i> geopsy.....	43
Gambar IV.4 Proses penghalusan data dengan fungsi Konno-Ohmachi.....	44
Gambar IV.5 Kurva HVSR <i>site</i> PTB_17.....	44
Gambar IV.6 Peta sebaran periode dominan (T_0) area terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah.....	48
Gambar IV.7 Peta sebaran percepatan tanah maksimum (a_{max}) area terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah.....	49
Gambar IV.8 Peta sebaran <i>Peak Ground Acceleration</i> area terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah.....	51
Gambar IV.9 Peta sebaran nilai percepatan batuan dasar area terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah.....	53
Gambar IV.10 Peta sebaran nilai amplifikasi area terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah.	54
Gambar IV.11 Peta sebaran nilai indeks kerentanan seismik area terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah.....	55
Gambar IV.12 Peta sebaran <i>ground shear strain</i> di area terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Intensitas gempabumi skala MMI (<i>Modified Mercalli Intensity</i>)	8
Tabel 2.2 Kecepatan rambat gelombang P dan S pada medium rambatnya.....	11
Tabel 2.3 Tingkat bahaya seismik berdasar percepatan permukaan.....	22
Tabel 2.4 Klasifikasi getaran <i>ambient</i> seismik berdasarkan sumbernya.....	24
Tabel 2.5 Hubungan antara regangan dengan sifat dinamis tanah.....	28
Tabel 4.1 Tabel 4.1 Klasifikasi nilai percepatan tanah maksimum (a_{max}) di wilayah penelitian berdasarkan tabel 2.3.....	49
Tabel 4.2 Klasifikasi nilai percepatan tanah puncak (PGA) di wilayah penelitian berdasarkan Tabel 2.1.....	51
Tabel 4.3 Klasifikasi nilai <i>ground shear strain</i> di wilayah penelitian berdasarkan Tabel 2.5.....	56

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kota Palu, Sulawesi Tengah ialah daerah yang dilalui Sesar Palu-Koro yang memiliki panjang sekitar 500 kilometer mulai dari Selat Makassar sampai Pantai Utara Teluk Bone. Sesar ini melintas dari Teluk Palu masuk ke wilayah daratan, memotong jantung kota sampai ke Sungai Lariang di Lembah Pipikoro (Yolsal-Çevikbilen & Taymaz, 2019) mengakibatkan tingginya aktivitas seismik yang terjadi di daerah ini. Merujuk katalog gempa USGS dari tahun 2000 sampai 2018 terdapat lima gempa dengan magnitudo > 6 pada sepanjang Sesar Palu Koro, salah satunya adalah gempa palu 28 September 2018 pukul 18:02 waktu setempat dengan magnitudo 7.5 Mw yang mengakibatkan terjadinya tsunami dan juga likuifaksi di beberapa titik. Geologi regional daerah Palu dan sekitarnya didominasi oleh endapan kuartar yang terdiri atas endapan fluviatil dan aluvium. Kondisi alam tersebut memiliki beberapa potensi yang merugikan di antaranya adalah potensi likuifaksi (Widyaningrum, 2012).

Likuifaksi didefinisikan sebagai fenomena hilangnya kekuatan tanah akibat getaran gempa bumi. Likuifaksi terjadi pada tanah yang berpasir lepas dan jenuh air (Tohari dkk., 2015). Kelurahan Petobo menjadi salah satu area paling terdampak dari fenomena likuifaksi pada tahun 2018 dengan luas total longsor-likuifaksi di Petobo berkisar antara 1,43 km², dengan panjang keliling sekitar 6,7 km termasuk zona sumber longsoran, pergeseran, dan deposisi. Panjang longsor-likuifaksi diperkirakan lebih dari 2 km dari puncak longsoran di dekat saluran irigasi sampai dengan zona disposisi di batas barat daerah longsor. Longsor-likuifaksi umumnya mengalir dari timur ke barat, dengan gerakan terbesar terjadi di bagian utara dari longsoran (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2019).

Setelah mengalami likuifaksi di area Petobo, diperlukan peninjauan ulang mengenai kondisi tanahnya. Metode mikrotremor digunakan sebagai metode yang relevan dengan fokus utama dari penelitian ini, mikrotremor merupakan getaran harmonik

alami tanah yang terjadi secara terus menerus, terjebak di lapisan sedimen permukaan, terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi yang tetap, disebabkan oleh getaran mikro di bawah permukaan tanah dan kegiatan alam lainnya. Penelitian mikrotremor dapat mengetahui karakteristik lapisan tanah berdasarkan parameter periode dominannya dan faktor penguatan gelombangnya (amplifikasi) (Jamal dkk., 2017).

Jika ditelusuri lebih jauh nilai periode dominan akan sangat erat berkaitan dengan nilai percepatan tanah maksimum Kanai (a_{max}) yang mana melalui parameter tersebut dapat dinilai potensi kerusakan di suatu wilayah berdasarkan *seismic hazard index* (Kanai, 1983). Studi mengenai nilai percepatan tanah maksimum suatu wilayah merupakan hal penting dalam perencanaan serta pembangunan infrastruktur tahan gempa. Salah satu parameter penting dan juga sering digunakan untuk memetakan lokasi-lokasi yang rawan mengalami kerusakan ketika terjadi gempa bumi ialah percepatan tanah puncak atau *peak ground acceleration* (PGA) yang dapat diperoleh melalui konversi empiris dari percepatan tanah maksimum, untuk mengkuantifikasinya dapat digunakan hubungan PGA dengan *modified mercally intensity* atau lebih dikenal dengan skala MMI (Kapojos dkk., 2015). Selain nilai percepatan maksimum dan puncak tanah, terdapat juga satu parameter penting untuk menilai kerentanan suatu *site* ketika dikenai getaran yakni *ground shear strain* yang menunjukkan besarnya tingkat regangan atau tingkat deformasi pada material penyusun permukaan tanah saat terjadi gempabumi (Nakamura, 2000).

Dari penelitian ini akan didapatkan peta sebaran nilai percepatan tanah maksimum permukaan, *peak ground acceleration*, dan *ground shear strain* pada daerah terlikuifaksi Petobo akibat gempa 28 September 2018.

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana persebaran nilai percepatan tanah maksimum permukaan (a_{max}) di daerah terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah akibat gempa 28 September 2018.

2. Bagaimana persebaran nilai *Peak Ground Acceleration* di daerah terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah akibat gempa 28 September 2018.
3. Bagaimana persebaran nilai *Ground Shear Strain* di daerah terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah.

I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui persebaran nilai percepatan tanah maksimum permukaan (a_{max}) di daerah terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah akibat gempa 28 September 2018.
2. Untuk mengetahui persebaran nilai *Peak Ground Acceleration* di daerah terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah akibat gempa 28 September 2018.
3. Untuk mengetahui persebaran nilai *Ground Shear Strain* di daerah terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah

I.4 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup pada penelitian ini meliputi pengukuran *ambient noise* mikrotremor di area terlikuifaksi Petobo, Palu, Sulawesi Tengah yang menjadi data primer, dan data kejadian gempa Palu 2018 sebagai data sekunder, digunakan untuk menyelesaikan persamaan percepatan tanah empiris Kanai yang dapat dikonversikan menjadi PGA dan juga bersamaan dengan nilai indeks kerentanan seismik digunakan untuk mencari persebaran nilai *ground shear strain* di daerah penelitian, kemudian sebaran nilai dipetakan dan diinterpretasikan kondisi tanahnya. Manfaat dari penelitian ini ialah sebagai sarana untuk memberikan gambaran penerapan metode geofisika khususnya metode mikrotremor dan dapat menjadi referensi pembangunan infrastruktur bangunan maupun nonbangunan tahan gempa pada daerah kelurahan Petobo.

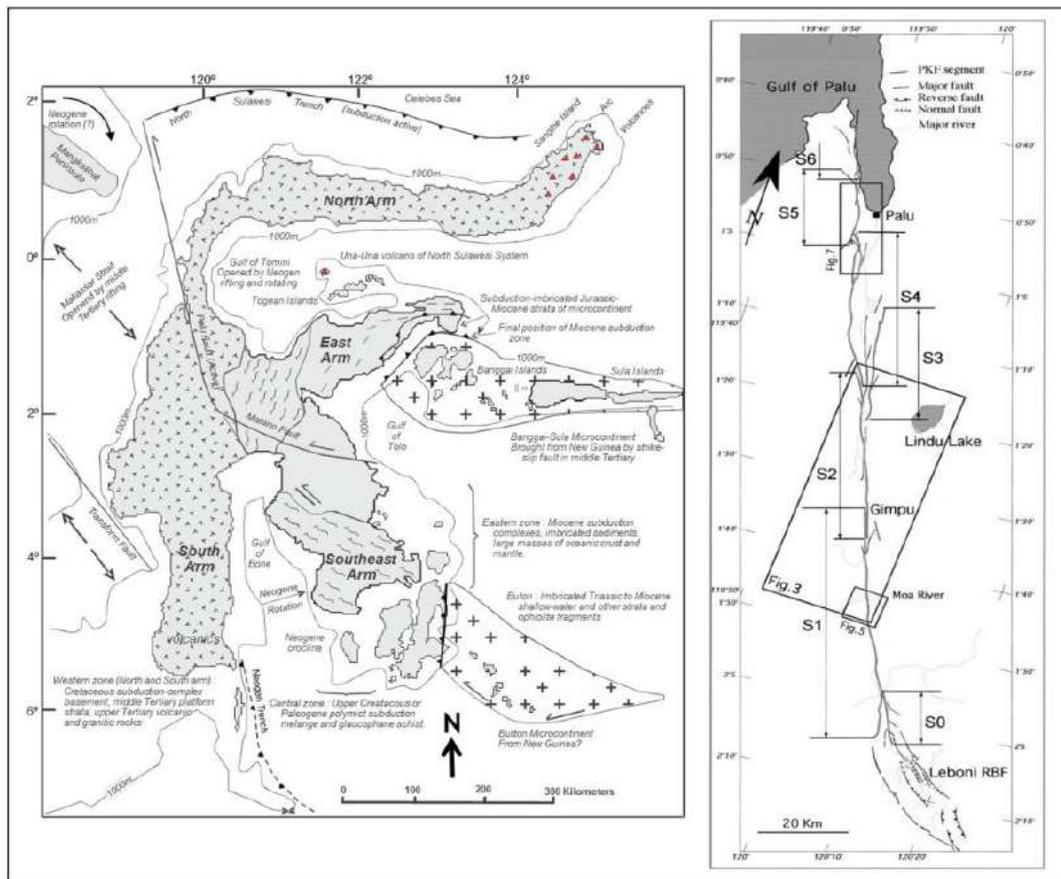
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Tektonik dan Geologi Regional Daerah Penelitian

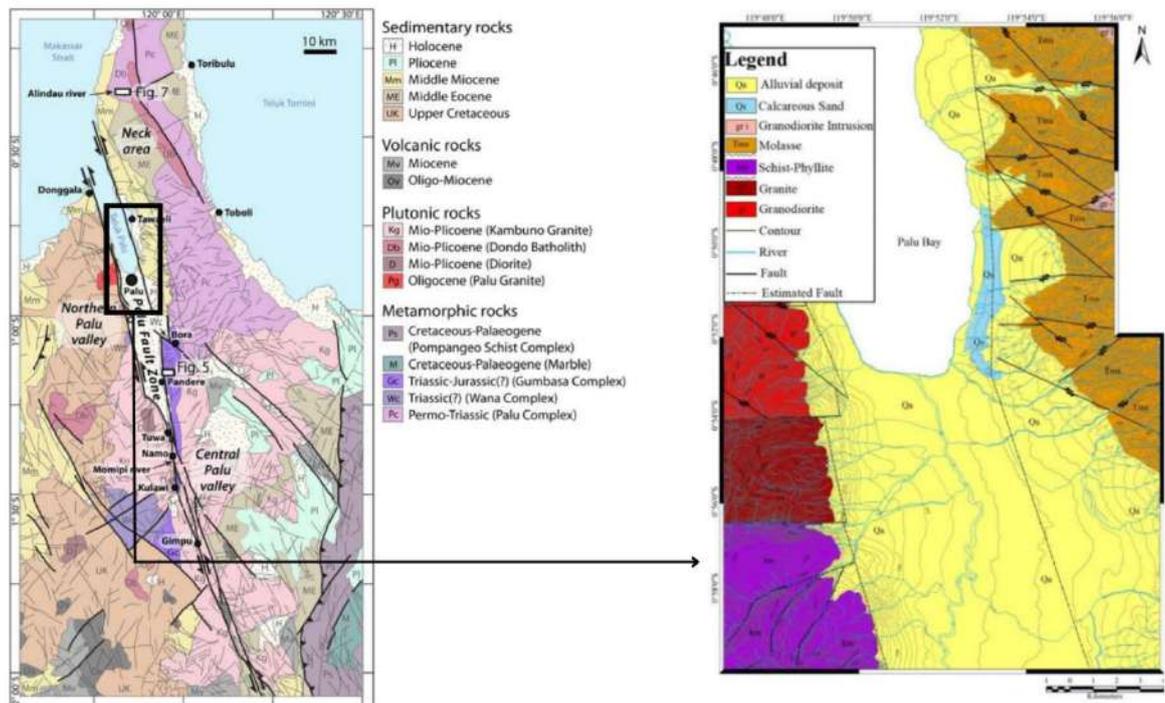
Sulawesi terletak di daerah Blok Sunda yang berdekatan dengan tiga lempeng tektonik sekaligus yaitu Lempeng Australia, Lempeng Filipina dan Lempeng Pasifik, yang dikenal sebagai persimpangan tiga lempeng. Persimpangan ini menyebabkan keadaan tektonik yang kompleks di Sulawesi, yang terakomodasi oleh sesar geser dan sesar naik. Salah satu struktur paling berpengaruh adalah Sesar Palu-Koro yang merupakan sesar aktif yang bergerak dengan kecepatan yang berbeda di bagian utara dan selatan yang menunjukkan aktivitas zona sesar tersebut. Sesar Palu-Koro adalah sesar bermekanisme geser mengiri yang memanjang pada arah utara-selatan dan melintasi Kota Palu. Laju geser Sesar Palu-Koro berdasarkan studi geologi, berupa interpretasi pergeseran objek geologi adalah maksimum 58 mm/tahun (Pusat Studi Gempa Nasional, 2018).

Kompleksitas geologi dan tektonik Sulawesi dapat terlihat dari bentuk pulau yang unik membentuk seperti huruf K dengan keempat lengan yang memiliki perbedaan proses tektonik antar satu lengan dengan lengan lainnya. Kekompleksan tersebut dikarenakan adanya interaksi antara tiga lempeng yang bergerak aktif, yaitu Lempeng Australia yang bergerak ke tengah, Lempeng Pasifik yang bergerak ke barat dan Lempeng Eurasia yang relatif bergerak ke selatan tenggara. Lengan Timur dan Lengan Tenggara ditempati oleh jalur batuan ophiolit (*Eastern Sulawesi ophiolite*) dan juga terdapat batuan lain yaitu mandala benua pindahan (*allochthonous continental terrains*) sekalipun dengan ukuran yang kecil (Surono dan Hartono, 2013).



Gambar II.1 Gambar kiri merupakan tatanan tektonik Pulau Sulawesi (Hamilton,1979), gambar kanan merupakan pembagian segmentasi Sesar Palu Koro (Bellier et al., 2001).

Berdasarkan peta tatanan tektonik pada Gambar II.1, Sesar Palu-Koro terdiri dari tujuh segmen yakni: S0, S1, S2, S3, S4, S5, dan S6 dengan variasi kelas tektonik tinggi dan menengah. Pada bagian selatan, yaitu segmen S0, S1, S2, dan S3, kelas tektoniknya cenderung lebih tinggi dibandingkan segmen pada bagian utara, yaitu S4, S5, dan S6. Kelas tektonik didasarkan pada pengukuran kuantitatif bentuk bentang lahan (*landscape*) yaitu berupa karakteristik ukuran, elevasi dan lereng. Semakin tinggi kelas tektoniknya kecenderungan potensi bahaya tektonik lebih tinggi (Supartoyo dkk., 2014).



Gambar II.2 Peta Geologi yang memperlihatkan lapisan penyusun dan struktur geologi yang terdapat di Sulawesi Tengah (Watkinson, 2011; Thein dkk., 2014).

Berdasarkan Peta Geologi pada Gambar II.2, wilayah Kota Palu dan sekitarnya merupakan suatu wilayah dataran aluvial yang memanjang berarah relatif utara-selatan dan dibatasi oleh lereng dan punggung di kedua sisi lembah yang di tengah-tengah lembahnya mengalir Sungai Salo Palu. Dataran ini didominasi satuan litologi aluvium berumur Holosen yang terdiri dari lumpur, lempung, pasir, kerikil dan kerakal, terdapat juga Formasi Pakuli yang berumur plistosen terdiri dari konglomerat dan batupasir setempat betulempung karbonan kemudian terdapat formasi yang lebih tua yang berumur Miosen Atas yaitu Formasi Lariang yang terdiri dari konglomerat, batupasir sisipan batulempung, tuf, batulumpur, batugamping, koral dan napal dibawahnya terdapat Kompleks Granit dan Kompleks Diorit serta batuan metamorfik dari Formasi Latimojong, Kompleks Wana dan Kompleks Gumbasa. Pada geomorfologi (Murtolo & Hasan, 1994) teridentifikasi keberadaan kipas-kipas aluvial pada sisi kanan dan kiri lembah Palu di mana pola aliran kipas aluvial ini mengarah ke Lembah Palu, Dari kondisi ini dapat diinterpretasikan bahwa proses sedimentasi sangat kuat mengarah ke arah Lembah

Palu dengan kemungkinan gerakan tanah pada wilayah-wilayah kontras topografi tinggi dan batuan yang tidak kompak.

Kondisi tektonik dan geologi di atas mengakibatkan wilayah Kota Palu dan sekitarnya menjadi sangat rentan terhadap bencana geologi, merujuk Peta Rawan Gempa Bumi Indonesia yang diterbitkan Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (2004), wilayah ini merupakan wilayah rawan gempabumi dengan skala VI-VII MMI. Demikian pula dari rekaman data kegempaan, tampak bahwa di wilayah ini telah terjadi tidak kurang dari 7 (tujuh) kali gempabumi merusak sejak tahun 1900 (Kusumah dkk., 2018).

II.2 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah berguncangnya bumi yang disebabkan oleh tumbukan antar lempeng bumi, sesar aktif, aktivitas gunung api atau runtuhannya batuan. Kekuatan gempabumi akibat aktivitas gunung api dan runtuhannya batuan relatif kecil. Kepulauan Indonesia terletak pada pertemuan 3 lempeng utama dunia yaitu Lempeng Australia, Eurasia, dan Pasifik. Lempeng Eurasia dan Australia bertumbukan di lepas pantai barat Pulau Sumatera, lepas pantai selatan Pulau Jawa, lepas pantai selatan kepulauan Nusa Tenggara, dan berbelok ke arah utara ke perairan Maluku sebelah selatan. Antara Lempeng Australia dan Pasifik terjadi tumbukan di sekitar Pulau Papua. Sementara pertemuan antara ketiga lempeng itu terjadi di sekitar Sulawesi. Hal ini mengakibatkan tingginya peristiwa gempa bumi pada pulau-pulau di sekitar pertemuan 3 lempeng itu. Akibat utama gempabumi adalah kerusakan bangunan karena guncangan tanah. Jatuhnya korban jiwa biasanya terjadi karena tertimpa reruntuhan bangunan, terkena longsor, dan kebakaran. Jika sumber gempabumi berada di dasar lautan maka bisa membangkitkan gelombang tsunami yang tidak saja menghantam pesisir pantai di sekitar sumber gempa tetapi juga mencapai beberapa kilometer ke daratan (Murtianto, 2010).

Intensitas dari gempa bumi dinyatakan bentuk skala MMI (*Modified Mercally Intensity*) digagas oleh G. Mercally pada tahun 1902 yang terdiri dari 12 tingkatan yang mewakili fenomena dan deskripsi tertentu seperti ditunjukkan Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Intensitas gempa bumi skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*) (Wald, 1999; Lowrie, 2007).

Skala MMI	PGA (Gal)	Efek yang dirasakan
I	< 1,7	Getaran tidak dirasakan kecuali dalam keadaan hening, dan hanya dirasakan oleh beberapa orang.
II	1,7 – 14	Getaran dirasakan oleh beberapa orang yang tinggal diam, lebih-lebih di rumah tingkat atas. Benda-benda ringan yang digantung terlihat bergoyang.
III	1,7 – 14	Getaran dirasakan di rumah tingkat atas. Terasa getaran seakan ada truk lewat, lamanya getaran dapat ditentukan.
IV	14 – 39	Pada siang hari dirasakan oleh orang banyak dalam rumah, di luar oleh beberapa orang, kendaraan yang sedang berhenti bergerak dengan jelas. Pada malam hari orang terbangun, piring dan gelas dapat pecah, jendela dan pintu berbunyi.
V	39 – 92	Getaran dirasakan oleh hampir semua penduduk, jendela kaca dan plester dinding pecah, barang-barang terpelanting, pohon-pohon tinggi tampak bergoyang.
VI	92 – 180	Getaran dirasakan oleh semua penduduk, kebanyakan terkejut dan lari ke luar, kadang-kadang meja kursi bergerak, plester dinding dan cerobong asap pabrik rusak. Terjadi kerusakan ringan.
VII	180 – 340	Semua orang ke luar rumah, kerusakan ringan pada rumah-rumah dengan bangunan dan konstruksi yang baik. Cerobong asap pecah atau retak-retak. Guncangan terasa oleh orang yang naik kendaraan.
VIII	340 – 650	Kerusakan ringan pada bangunan-bangunan dengan konstruksi yang kuat. Retak-retak pada bangunan yang kuat. Banyak kerusakan pada bangunan yang tidak kuat. Dinding dapat lepas dari kerangka rumah, cerobong asap pabrik-pabrik dan monumen-monumen. Meja kursi terlempar, air menjadi keruh, orang naik sepeda motor

		terasa terganggu.
IX	650 – 1240	Kerusakan pada bangunan yang kuat, rangka-rangka rumah menjadi tidak lurus, banyak lubang-lubang karena retak-retak pada bangunan yang kuat. Rumah tampak bergeser dari pondasinya, pipa-pipa dalam tanah putus.
X	>1240	Bangunan dari kayu yang kuat rusak, rangka-rangka rumah lepas dari pondasinya, tanah longsor di sekitar sungai dan tempat-tempat yang curam saat terjadi air bah.
XI	>1240	Bangunan-bangunan kayu sedikit yang tetap berdiri, jembatan rusak. Pipa dalam tanah tidak dapat dipakai sama sekali, tanah terbelah, rel melengkung sekali.
XII	>1240	Hancur sama sekali. Gelombang tampak pada permukaan tanah, pemandangan menjadi gelap, benda-benda terlempar ke udara

II.3 Gelombang Seismik

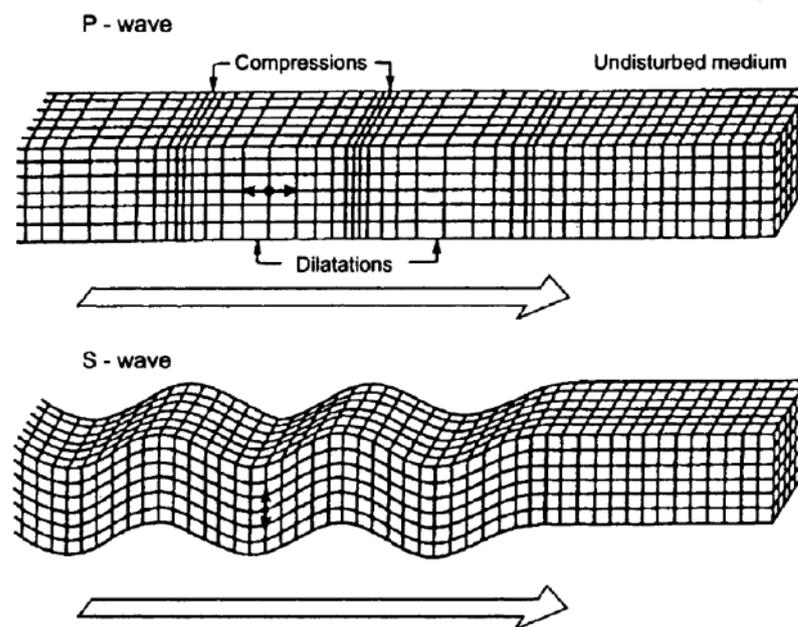
Gelombang seismik merupakan gelombang yang merambat ke seluruh bagian bumi akibat adanya suatu lapisan batuan yang patah atau adanya suatu ledakan. Gelombang seismik termasuk dalam gelombang elastik karena melalui medium bumi yang bersifat elastik, oleh karena itu perambatan gelombangnya bergantung pada elastisitas batuan yang dilaluinya (Nurdiyanto dkk., 2011). Jika suatu benda (solid) dikenai gaya pada permukaan maka benda tersebut akan mengalami perubahan bentuk. Namun ketika gaya yang bekerja telah hilang maka benda tersebut akan mampu kembali ke bentuk semula. Apabila gaya yang bekerja melebihi batas elastisitas benda, maka benda dapat mengalami deformasi.

Metode akuisisi seismik pada dasarnya sama dengan pengukuran seismologi gempa karena proses perambatan gelombang seismik bergantung pada sifat elastis dari batuan. Gelombang seismik dibedakan menjadi dua macam, yaitu gelombang badan (*body wave*) yang merambat di dalam interior bumi dan gelombang permukaan (*surface wave*) yang merambat di permukaan bumi (Telford et al., 1990).

II.3.1 *Body Waves*

Body Wave atau gelombang badan adalah gelombang yang memiliki karakteristik arah perambatannya masuk ke bawah permukaan bumi, *body wave* dibedakan menjadi 2 jenis yaitu gelombang primer (P) dan gelombang sekunder (S) (Telford et al., 1990).

Gelombang P (longitudinal) merupakan gelombang primer yang merambat lebih cepat dan datang pertama kali serta lebih tajam karena memiliki frekuensi lebih tinggi dengan kecepatan gelombang P dalam medium padat yakni sekitar 1.8 sampai 7 km/detik dengan periode berada diantara 5 sampai 10 ms, sedangkan tipe gelombang yang kedua, yaitu gelombang S yang merupakan gelombang transversal dimana gelombang ini datang setelah gelombang P dan ditandai dengan amplitudo yang lebih besar dari gelombang P dan kandungan frekuensinya lebih rendah, periodenya berkisar antara 11 sampai 13 ms (Afnimar, 2009).



Gambar II.3 Deformasi elastik dan *ground particle motions* pada Gelombang P dan Gelombang S (Reynolds, 1997)

Kecepatan propagasi *body wave* melalui material elastik dapat dituliskan sebagai berikut (Reynolds, 1997):

$$V = \left[\frac{\text{modulus elastis}}{\text{densitas}(\rho)} \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

Kecepatan gelombang P dituliskan sebagai berikut:

$$V_p = \left(\frac{k + 4\mu/3}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

dengan k adalah modulus bulk, μ adalah modulus geser dan ρ adalah densitas.

Kecepatan gelombang S dituliskan dituliskan sebagai berikut:

$$V_s = (\mu/\rho)^{1/2} \quad (2.3)$$

Perbandingan antara kecepatan gelombang P dan S didefinisikan sebagai Poisson's *ratio* dan dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{V_p}{V_s} = \left(\frac{1-\sigma}{1/2-\sigma} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

Pada Tabel 2.1 merupakan perbandingan kecepatan rambat gelombang primer dengan kecepatan gelombang sekunder jika melalui material tertentu.

Tabel 2.2 Kecepatan rambat gelombang P dan S pada medium rambatnya (Febriana, 2007).

NO.	Material	Kecepatan Vp (m/s)	Kecepatan Vs (m/s)
1	Udara	332	-
2	Air	1400-1500	-
3	Minyak bumi	1300-1400	-
4	Besi	6100	3500
5	Semen	3600	2000
6	Granit	5500	2800-3000
7	Basalt	6300	3200
8	Batupasir	1400-4300	700-2800
9	Batugamping	5900-6100	2800-3000
10	Pasir (Tidak Jenuh)	200-1000	80-400
11	Pasir (Jenuh)	800-2200	320-880

12	Tanah Liat	1000-2500	400-1000
----	------------	-----------	----------

Gelombang Primer (P) dapat menembus lapisan inti bumi. Sementara itu, gelombang Sekunder (S) tidak bisa menembus lapisan inti bumi karena sifat dari gelombang ini yang tidak bisa menembus media fluida.

II.3.2 Surface Waves

Surface Waves atau Gelombang permukaan adalah gelombang seismik dengan arah rambatan hanya sebatas pada permukaan medium, gelombang permukaan merupakan gelombang kompleks dengan frekuensi rendah dan amplitudo besar meski perambatannya lamban namun dapat menghasilkan kerusakan lebih besar. Gelombang permukaan menjalar akibat adanya *efek free surface* akibat perbedaan sifat elastik. Ada dua jenis gelombang permukaan yaitu gelombang Rayleigh dan gelombang Love (Telford et al., 1976).

Gelombang Rayleigh merupakan gelombang yang merambat pada permukaan bebas dengan medium homogen dan berlapis, gelombang rayleigh terbentuk oleh adanya interferensi konstruktif antara gelombang tekan dan gelombang geser. Gerak partikel gelombang ini adalah eliptik retrograd dengan sumbu mayor elips tegak lurus dengan permukaan dan arah penjarannya (Telford et al., 1990). Gelombang Rayleigh sendiri merupakan hasil konstruktif antara gelombang P dan S (Vertikal) dengan sebagian arah pergeserannya adalah arah permukaan dalam perambatannya serta sebagian lagi dalam bidang vertikal seperti ditunjukkan Gambar II.4 bagian (A), sehingga ketika mengamati seismograf gelombang ini hanya dapat diobservasi pada komponen vertikal.

Gelombang Rayleigh sendiri merambat dengan kecepatan sekitar 2,0-4,2 km/s dan dengan amplitudo yang mengecil secara eksponensial sebagai fungsi kedalaman. Menggunakan pendekatan oleh Elnashai & Luigi (2008), kecepatan dari gelombang Rayleigh dituliskan sebagai berikut

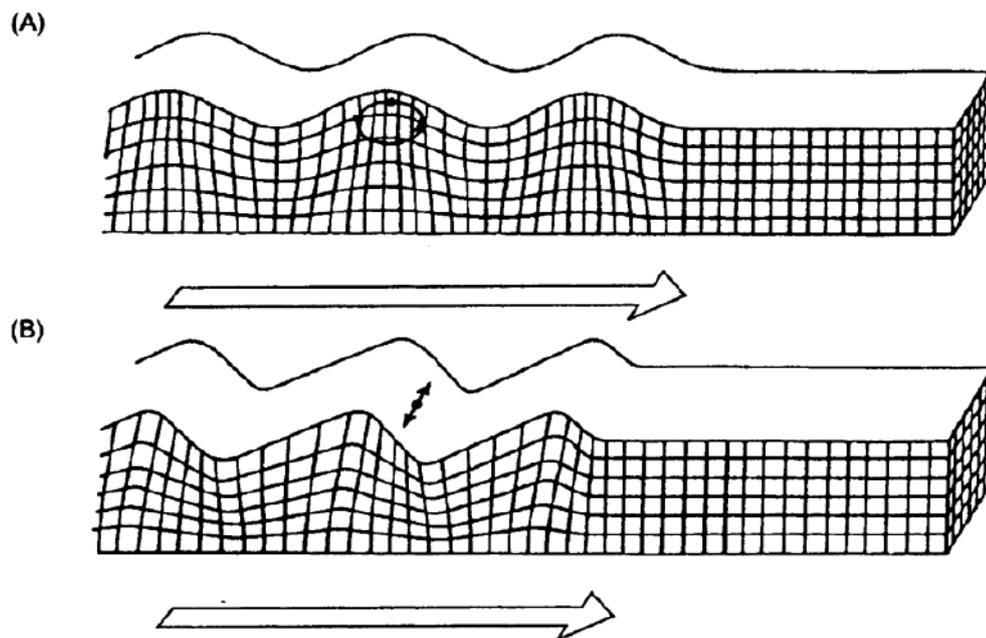
$$V_R = 0,92V_s \quad (2.5)$$

dengan V_R merupakan kecepatan gelombang Rayleigh dan V_s adalah kecepatan gelombang geser.

Gelombang Love adalah gelombang permukaan yang merambat dalam bentuk gelombang transversal berupa gelombang S Horizontal yang penjalarannya searah dengan permukaan mediumnya, kecepatan perambatan gelombang ini di permukaan bumi adalah 2-4,4 km/s (Braile, 2006). Gelombang Love sendiri lebih cepat dibandingkan Gelombang Rayleigh dan lebih dulu mencapai seismograf, jika diurutkan kecepatan perambatan gelombang berturut-turut adalah sebagai berikut (Elnashai & Luigi, 2008):

$$V_R < V_Q < V_S(\text{km/s}) \quad (2.6)$$

dengan dengan V_R adalah kecepatan gelombang Rayleigh, V_Q adalah kecepatan gelombang Love, V_S adalah kecepatan gelombang S. Ilustrasi gerak partikel gelombang Love ditunjukkan pada Gambar II.4 bagian (B).



Gambar II.4 Deformasi elastik dan *ground particle motions* pada gelombang permukaan. (A) Gelombang Rayleigh, dan (B) Gelombang Love (Reynolds, 1997)

II.4 Likuifaksi

Peristiwa likuifaksi adalah perilaku tanah di bawah beban siklik yang terjadi hanya dalam beberapa saat. Akibat beban siklik yang singkat tersebut, massa tanah dalam waktu yang singkat mengalami transisi dari keadaan padat menjadi keadaan cair atau memiliki konsistensi utama seperti cairan, Chandra (2017) dalam penelitiannya juga berpendapat bahwa likuifaksi terjadi pada lapisan tanah pasir yang memiliki porositas baik sehingga memiliki kemampuan untuk menyimpan dan mengalirkan air menyebabkan lapisan tersebut mudah untuk masuk dalam kondisi jenuh air, ini membuat tanah tidak lagi memiliki kestabilan sehingga tidak mampu menopang beban di atasnya. Peristiwa likuifaksi saat gempa dapat ditandai dengan adanya pergerakan tanah dalam arah horizontal, rembesan air keluar dari rekahan tanah, bergesernya bangunan miring atau turun, penurunan muka tanah, longsornya tanggul dan lereng. Pada bangunan yang berada pada daerah terlikuifaksi dapat berakibat terjadinya amblas, miring atau bergerak ke samping atau bahkan mengakibatkan keruntuhan bangunan tersebut (Hakam, 2013).

Syarat-syarat terjadinya likuifaksi, berdasarkan beberapa pengalaman terjadinya likuifaksi, maka para peneliti telah mengidentifikasi persyaratan-persyaratan yang memungkinkan terjadinya likuifaksi. Persyaratan-persyaratan tersebut di antaranya adalah sebagai berikut (Pawirodikromo, 2012):

1. Intensitas Gempa

Likuifaksi tidak selalu terjadi menyusul adanya gempa bumi. Pada hakekatnya terdapat suatu batas tertentu (threshold) yang mana likuifaksi tidak akan terjadi. Pada kondisi tanah/lingkungan yang memenuhi syarat ternyata tidak terjadi likuifaksi apabila:

- a. Magnitudo gempa kurang dari 5 ($M < 5$)
- b. Intensitas gempa kurang dari VI ($IMM < VI$)
- c. Gempa termasuk termasuk gempa dalam (kedalaman fokus > 70 km)

2. Jarak Episenter

Di samping persyaratan ukuran, intensitas dan kedalaman fokus, maka jarak episenter akan menentukan kemungkinan terjadinya likuifaksi. Berdasarkan hasil pengamatan lapangan lebih dari 100 tahun dan lebih dari 100 peristiwa likuifaksi menunjukkan bahwa likuifaksi tidak akan terjadi apabila jarak episenter lebih dari:

$$R = 0,82 \times 10^{0,862(M-5)} \text{ km} \quad (2.7)$$

Sebaliknya apabila jarak episenter kurang dari hasil persamaan di atas, maka likuifaksi besar kemungkinan akan terjadi.

3. Kedalaman Air Tanah Maksimum

Peristiwa likuifaksi terjadi karena tegangan air pori yang besar. Oleh karena itu likuifaksi tidak akan terjadi apabila tidak terdapat air tanah yang memungkinkan naiknya tegangan air pori tersebut. Berdasarkan pengalaman yang telah dicatat menunjukkan bahwa likuifaksi akan terjadi apabila kedalaman air tanah kurang dari kira-kira 3,0 meter dan likuifaksi tidak akan terjadi apabila kedalaman air tanah lebih dari 5,0 meter.

4. Karakteristik Butir-Butir Pasir

Jenis-jenis tanah yang memungkinkan untuk terjadi likuifaksi adalah pasir jenuh air, berdiameter halus sampai agak kasar maupun tanah pasir-silt terutama apabila sistem drainasenya tidak baik, ada beberapa kriteria yang membuat jenis-jenis tanah tersebut mengalami likuifaksi apabila:

1. Diameter tengah D_{50} antara 0,02 - 1,0 mm
2. Kandungan *finer*, butir $D < 0,005$ mm tidak lebih dari 20%
3. Koefisien keseragaman $D_{50}/D_{10} < 10$
4. Kepadatan relatif $D_r < 75\%$
5. Indeks plastisitas $IP < 13\%$

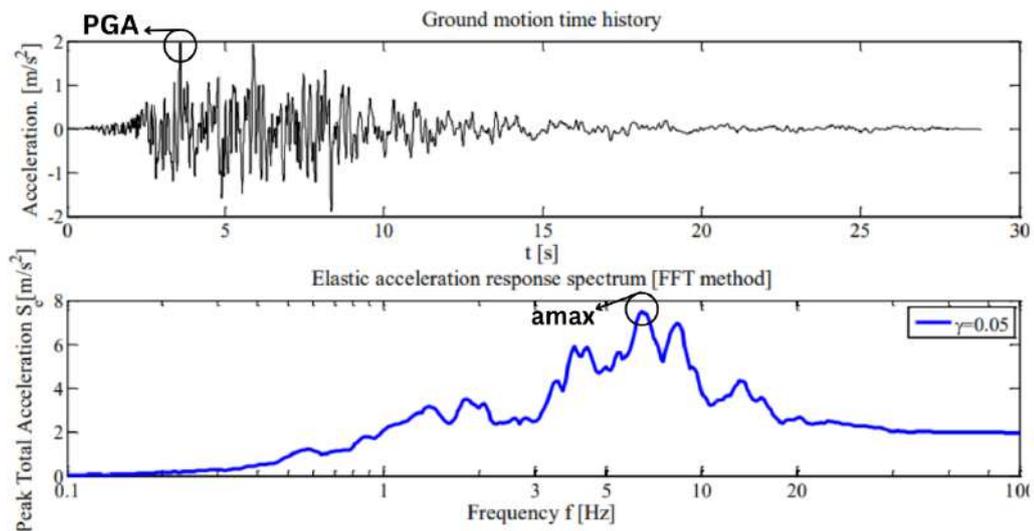
5. Rentang Lapis Likuifaksi

Selain persyaratan-persyaratan di atas, terdapat faktor lain yang akan mempengaruhi likuifaksi, yaitu *effective overburden pressure* atau ada yang menyebut tegangan vertikal efektif (*effective vertical stress*). Tegangan tanah ini dipengaruhi oleh kedalaman lapisan, semakin dalam lapisan maka semakin besar tegangan vertikal tanah. Tegangan vertikal tanah ini juga berpengaruh terhadap tegangan horisontal (*confining pressure*) tanah. Semakin dalam lapisan tanah maka semakin besar tegangan horisontal tanah dan semakin kecil kemungkinan terjadinya likuifaksi. Berdasarkan pengalaman likuifaksi yang telah terjadi di beberapa negara, umumnya likuifaksi terjadi pada lapisan tanah pasir lepas jenuh air yang kedalamannya kurang dari 15,0 meter. Secara teoritik lapisan $\pm 0,80$ m di dekat permukaan tanah kadang-kadang juga tidak terjadi likuifaksi, tetapi ikut terpengaruh lapisan di bawahnya.

II.5 Percepatan Tanah

Percepatan getaran tanah adalah salah satu fokus kajian dari setiap peristiwa gempa bumi yang terjadi untuk kemudian dipetakan percepatan tanah maksimumnya guna melihat lokasi yang terdampak gempa paling parah saat terjadi gempa. Parameter percepatan gelombang seismik atau dikenal dengan percepatan tanah adalah salah satu parameter penting dalam ranah *earthquakes engineering*, besar kecilnya percepatan tanah tersebut menunjukkan resiko gempabumi yang perlu diperhitungkan sebagai salah satu bagian dalam perencanaan bangunan tahan gempa (Ibrahim, 2004).

Contoh data rekaman *ground motion* ditunjukkan pada Gambar II.5 di bawah, menunjukkan data percepatan tanah dalam domain waktu dan spektra percepatan tanah dalam domain frekuensi yang ditransformasikan menggunakan *Fast Fourier Transform*, dapat terlihat nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) merupakan nilai percepatan yang ditunjukkan oleh puncak sinyal gempa dalam domain waktu dan percepatan tanah maksimum (a_{max}) merupakan nilai percepatan dari puncak sinyal gempa yang telah dispektralkan ke dalam domain frekuensi.



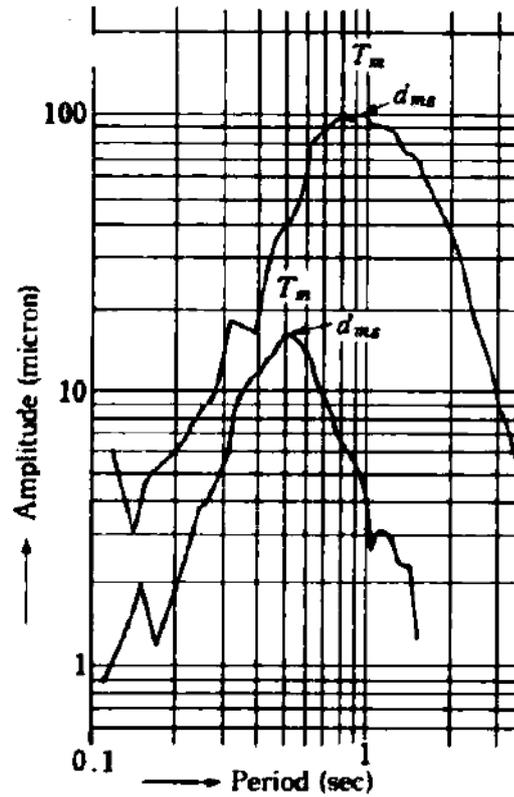
Gambar II.5 *Ground motion time history* (komponen horizontal) dan spektrum respon percepatan kejadian gempa Westmorland (Aldaikh *et al.*, 2012)

II.5.1 Percepatan Tanah Maksimum Kanai

Percepatan tanah permukaan di suatu tempat disebabkan oleh getaran seismik yang bergantung pada jenis perambatan gelombang seismik dan karakteristik lapisan tanah (*alluvial deposit*) di tempat tersebut. Getaran seismik yang melalui medium berupa *layer* (perlapisan) dengan karakteristik tertentu juga memberikan respon periode dominan (T_0) berbeda-beda yang juga mempengaruhi percepatan batuan dasar dan permukaan tanah tersebut (Kanai, 1983).

Persamaan empiris yang menggunakan data historis gempa dan data periode dominan tanah yang merupakan hasil dari kompilasi pengukuran menggunakan banyak seismograf adalah Persamaan Kanai. Parameter gempa yang diperlukan dalam perhitungan metode ini adalah magnitudo gempa (M) dan jarak hiposentral (R) diperoleh dari data kejadian gempa, dan nilai periode dominan tanah (T_0) diperoleh dari mikroseismik pengukuran di lapangan (Mala *et al.*, 2021).

Persamaan Kanai diturunkan berawal dari spektra *earthquake motion* batuan dasar seismik dengan kedalaman hiposenter 100 km (Kanai, 1983).



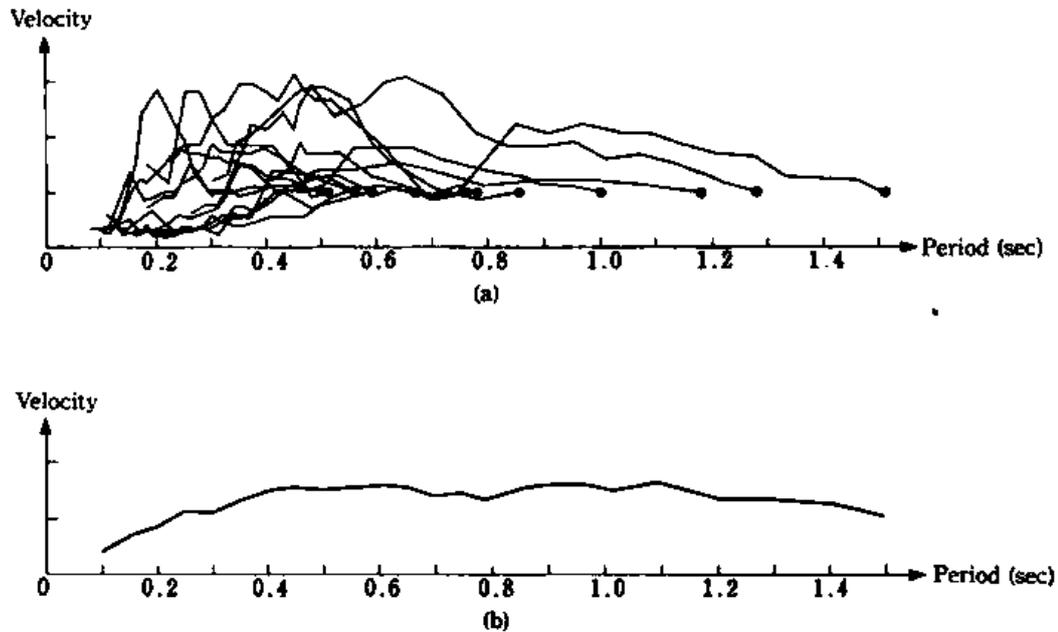
Gambar II.6 Spektra *displacement* dari *earthquake motion* bawah permukaan dalam

kemudian dengan metode *least square* didapat persamaan empiris

$$d_{ms} = 53 \times T_m^{2.56} \quad (2.8)$$

Dengan d_{ms} adalah *displacement (micro)* dan T_m adalah *periode (sec)*

Melalui data seismogram diatas dapat diperoleh spektra *velocity* sebagai berikut



Gambar II.7 (a) Spektra *velocity* dari *earthquake motion* bawah permukaan dalam
(b) rata-rata spektrum *velocity* dari *earthquake motion* bawah permukaan dalam

Nilai T_m untuk spektrum *displacement*, dan *velocity amplitude* untuk T_m pada setiap kejadian gempa adalah konstan, Gambar II.7 menunjukkan *velocity amplitude* untuk periode 0,05-0,2 detik dengan T_m hampir konstan dengan menghiraukan periode, maka didapat hubungan:

$$\frac{d_0}{T} (\equiv \text{kecepatan}) = \text{konstan} [(0,05\text{detik} \sim 0,2\text{detik}) < T < T_m] \quad (2.9)$$

Hubungan diatas mengindikasikan bahwa hukum energi equipartisi dapat diterapkan untuk *earthquake motion* bawah permukaan dalam

Selanjutnya Kanai (1983) memberikan hubungan antara magnitudo gempa (M), jarak hiposenter (x), dan spektrum *displacement* (d_m) sebagai berikut:

$$\log_{10} d_m = M - 1.73 \log_{10} \Delta + 0,83 \quad (2.10)$$

Dengan M adalah magnitudo gempa, Δ jarak episentral (km), dan amplitudo maksimum d_m (mikron), dengan mengasumsikan amplitudo di permukaan tidak berbeda jauh dengan amplitudo di bawah permukaan karena periode dari

gelombang dengan amplitudo maksimum adalah periode panjang, maka didapat hubungan berikut melalui persamaan (2.8) dan (2.10) untuk $\Delta (\equiv x) = 100 \text{ km}$:

$$\log_{10} T_m = 0.39M - 1.70 \quad (2.11)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.10) dan (2.11) maka dapat diperoleh persamaan:

$$\log_{10} \frac{d_m}{T_m} = 0,61M - 1.73 \log_{10} \Delta + 2.53 \quad (2.12)$$

Dari hubungan pada persamaan (2.9) dapat dituliskan:

$$\frac{d_m}{T_m} = \frac{d_0}{T} \quad (2.13)$$

Kemudian dari persamaan (2.12) dan (2.13), persamaan berikut dapat diperoleh:

$$d_0 = T \times 10^{0,61M - 1.73 \log_{10} x - 1.47} \quad (2.14)$$

Dengan menetapkan jarak episentral cukup jauh, maka digunakan jarak hiposentral (x) dalam km dan d_0 dikonversikan ke dalam satuan cm, berdasar persamaan (2.14), spektrum *velocity* v_0 (cm/s) dan spektrum *acceleration* a_0 (gal) dari *earthquake motion* batuan dasar seismik dengan jarak hiposentral lebih dari 10 km diperoleh sebagai berikut:

$$v_0 = 10^{0,61M - 1.73 \log_{10} x - 0.67} \quad (2.15)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \times 10^{0,61M - 1.73 \log_{10} x + 0.13} \quad (2.16)$$

Spektrum dari *earthquake motions* dapat diaplikasikan terhadap batuan dasar seismik dengan jarak episenter hingga 100 sampai 200 km yang diekspresikan sebagai berikut:

$$d_0 = T \times 10^{0,61M - \left(1.66 + \frac{3.60}{x}\right) \log_{10} x - \left(1.430 + \frac{1.83}{x}\right)} \quad (2.17)$$

$$v_0 = 10^{0,61M - \left(1.66 + \frac{3.60}{x}\right) \log_{10} x - \left(0.631 + \frac{1.83}{x}\right)} \quad (2.18)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{T} \times 10^{0,61M - \left(1,66 + \frac{3,60}{x}\right) \log_{10} x + \left(0,167 + \frac{1,83}{x}\right)} \quad (2.19)$$

Kemudian Kanai (1983) memberikan persamaan *ground vibration characteristics* G(T) yang dapat diaplikasikan pada rentang periode resonansi sebagai berikut:

$$G(T) = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{T}{T_G}\right)^2\right\}^2 + \left\{\frac{0,2}{\sqrt{T_G}} \left(\frac{T}{T_G}\right)\right\}^2}} \quad (2.20)$$

Spektrum dari *earthquake motion* di permukaan merupakan fungsi dari *earthquake motion* di batuan dasar dan *vibrational characteristics ground* atau dapat dituliskan sebagai:

$$\alpha_{\max} = G(T)\alpha_0 \quad (2.21)$$

$$= \left(\frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{T}{T_G}\right)^2\right\}^2 + \left\{\frac{0,2}{\sqrt{T_G}} \left(\frac{T}{T_G}\right)\right\}^2}} \right) \left(\frac{1}{T} \times 10^{0,61M - \left(1,66 + \frac{3,60}{x}\right) \log_{10} x + \left(0,167 + \frac{1,83}{x}\right)} \right)$$

untuk memperoleh *maximum acceleration* di permukaan maka diberlakukan nilai $T = T_G$ karena diasumsikan terjadi resonansi, hal ini berlaku pada lapisan sedimen karena lebarnya spektrum gelombang gempa, sehingga dapat diperoleh nilai percepatan tanah maksimum di permukaan sebagai berikut:

$$\alpha_{\max} = \frac{5}{\sqrt{T_G}} \times 10^{0,61M - \left(1,66 + \frac{3,60}{x}\right) \log_{10} x + \left(0,167 + \frac{1,83}{x}\right)} \quad (2.22)$$

Dengan memodifikasi persamaan percepatan maksimum tanah permukaan oleh Kanai (1983) diatas, maka dapat dituliskan ulang persamaan percepatan tanah maksimum sebagai berikut:

$$\alpha_{\max} = \frac{5}{\sqrt{T_0}} \times 10^{0,61M - \left(1,66 + \frac{3,60}{R}\right) \log_{10} R + \left(0,167 + \frac{1,83}{R}\right)} \quad (2.23)$$

Dengan α_{\max} (gal) adalah nilai percepatan tanah maksimum permukaan, α_0 (gal) adalah percepatan tanah pada batuan dasar, T_0 (detik) adalah periode dominan, M

(M_s) adalah magnitudo gelombang gempa permukaan, dan R adalah jarak hiposentral (km), dengan mengkonversikan percepatan maksimum oleh Kanai dari Gal ke dalam g ($g=9,8m/s^2$) menggunakan persamaan (2.24) di bawah maka nilai percepatan maksimum dalam satuan g dapat dikuantifikasi ke dalam bahaya seismik dan skala MMI yang ditunjukkan pada Tabel 2.3.

$$a(g) = \frac{a(\text{Gal})}{980} \quad (2.24)$$

Tabel 2.3 Tingkat bahaya seismik berdasar percepatan permukaan (Fauzi, 2001; Gianelli et al., 2020).

Tingkat Bahaya Seismik	α_{\max} (g)	Indeks Bahaya Seismik	Skala MMI
Tinggi	$\alpha_{\max} > 0,3g$	5	IX-XI
Sedang-Tinggi	$0,2g < \alpha_{\max} < 0,3g$	4(*)	VIII-IX
Sedang	$0,15g < \alpha_{\max} < 0,2g$	3(*)	VII-IX
Rendah	$0,05g < \alpha_{\max} < 0,15g$	2	VII-IX
Sangat Rendah	$\alpha_{\max} < 0,05g$	1	VI-VII

*untuk indeks 3 dan 4 pada kondisi air tanah dangkal maka digunakan indeks 5

Indeks bahaya seismik adalah gambaran seismitas yang ditentukan berdasarkan frekuensi dan energi yang dialarkan oleh kejadian gempa bumi, dengan mengetahui bahaya seismik di suatu tempat, maka dapat disesuaikan kekuatan infrastruktur yang akan dibangun terhadap kekuatan gempa bumi yang terjadi di daerah tersebut (Malik, 2010).

II.5.2 Peak Ground Acceleration

Peak Ground Acceleration atau percepatan tanah puncak adalah nilai percepatan getaran tanah yang terbesar yang terekam oleh akselograf di suatu tempat yang diakibatkan oleh gempabumi. Semakin besar nilai PGA yang pernah terjadi disuatu tempat, semakin besar bahaya dan resiko gempabumi yang mungkin terjadi (Putri dkk., 2017). Kramer (1996) menyebutkan bahwa percepatan tanah akibat gempabumi akan menunjukkan gaya inersia yang akan bekerja pada massa struktur.

Gaya inersia yang dimaksud adalah gaya yang timbul pada bangunan karena kecenderungan massa bangunan untuk mempertahankan dirinya. Namun hasil ini harus disesuaikan dengan keadaan geologi serta karakteristik dari zona seismik lokasi yang dijadikan daerah penelitian.

Percepatan tanah puncak merupakan salah satu parameter yang paling sering digunakan untuk menggambarkan gerakan tanah hasil dari kejadian gempa meskipun hanya berguna pada analisis struktur periode pendek ($T \lesssim 0,3$ detik) (Douglas, 2002).

PGA dapat dikuantifikasi ke dalam skala MMI merujuk ke Tabel 2.1, setelah menurunkan persamaan untuk nilai percepatan tanah maksimum permukaan (a_{\max}) maka dapat digunakan hubungan empiris antara a_{\max} dan PGA karena seperti yang dijeaskan pada Gambar II.5 bahwa a_{\max} dan PGA terekam dalam satu kejadian gempa, Booth (2007) memberikan hubungan empiris antara *peak SA* dan PGA sebagai berikut:

$$PGA = \frac{\text{peak SA}}{2.65} \quad (2.25)$$

Pada Gambar II.5 terlihat bahwa a_{\max} merupakan puncak maksimum dari spektrum percepatan hasil transformasi *ground motion time history* ke domain frekuensi, sehingga persamaan (2.25) dapat diubah menjadi:

$$PGA = \frac{a_{\max}}{2.65} \quad (2.26)$$

II.6 Mikrotremor

Mikrotremor merupakan getaran tanah mikro yang disebabkan oleh kegiatan manusia maupun muncul secara natural karena aktivitas alam. Mikrotremor merupakan getaran kontinyu dan sangat kecil yang berasal dari getaran aktivitas manusia, angin, lalu lintas, dan lain-lain (Kanai, 1983). Menurut Mirzaoglu dan Dykmen (2003) mikrotremor merupakan vibrasi tanah dengan *amplitude displacement* sekitar 0,1-1 mikron dengan *amplitude velocity* 0,001-0,01 cm/s.

Tabel 2.4 Klasifikasi getaran *ambient* seismik berdasarkan sumbernya (Ipmawan et al., 2018).

Nama	Mikroseismik	Mikrotremor
	Alam	Benda hidup/bergerak
Frekuensi	0.1-0.5 ke 1 Hz	0.5 ke 1-10 Hz
Sumber	Gelombang laut	Lalu lintas, industri dan aktivitas manusia
Gelombang tiba	Gelombang Permukaan	Gelombang permukaan dan gelombang badan
Variasi amplitude	Terkait dengan badai atau gelombang laut	Siang / malam, akhir pekan

Mikrotremor diperkenalkan pertama kali oleh Aki dan Kanai (1957) dengan tujuan untuk mempelajari serta mengetahui karakteristik dari batuan sedimen struktur tanah bawah permukaan berhubungan dengan daerah dinamis pada suatu titik pengukuran (Haerudin, 2019). Pada penelitian mikrotremor kita bisa memperoleh nilai berupa frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) kemudian secara sederhana nilai frekuensi dominan dapat kita ubah menjadi nilai periode dominan (T_0). Pada Penelitian mikrotremor berdasarkan parameter periode dominan dan amplifikasi maka dapat diketahui karakteristik lapisan tanah.

II.7 Karakterisasi *Site* Berdasarkan Metode HVSR (*Horizontal to Vertical Ratio*)

Metode HVSR merupakan salah satu metode pengolahan mikrotremor yang digunakan untuk memperkirakan struktur bawah permukaan dengan melihat puncak kurva HVSR. Metode ini bersifat pasif sehingga efektif dan murah untuk area penelitian yang padat penduduk seperti halnya di perkotaan. Selain itu metode ini juga merupakan salah satu cara yang efektif untuk mengkarakterisasi faktor amplifikasi akibat gempa lokal. Rekaman data dalam metode ini berasal dari *ambient noise* dengan respon berupa spektral tanah titik pengukuran (Iswanto dkk., 2019).

Pemodelan kurva HVSR sendiri memerlukan proses Transformasi Fourier dikarenakan data getaran atau *ambient noise* yang kita peroleh di titik pengukuran masih dalam domain waktu dan perlu diubah kedalam domain frekuensi terlebih dahulu menggunakan persamaan berikut (Rianta et al., 2019):

$$\begin{aligned} X(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi f t) dt - j \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin(2\pi f t) dt \end{aligned} \quad (2.27)$$

Dikarenakan data getaran mikrotremor yang diperoleh berupa data dengan tiga komponen maka fungsi untuk komponen *East-West*, *North-South*, dan *Up-Down* berturut-turut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$X(f)_{EW} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)_{EW} \cos(2\pi f t) dt - j \int_{-\infty}^{\infty} x(t)_{EW} \sin(2\pi f t) dt \quad (2.28)$$

$$X(f)_{NS} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)_{NS} \cos(2\pi f t) dt - j \int_{-\infty}^{\infty} x(t)_{NS} \sin(2\pi f t) dt \quad (2.29)$$

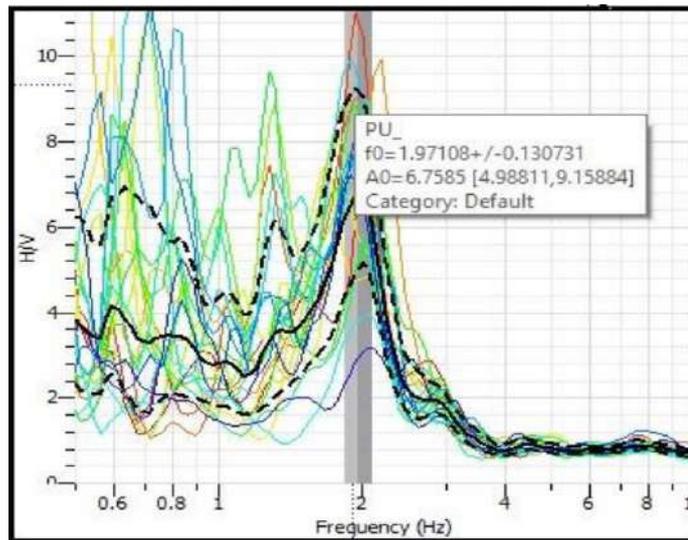
$$X(f)_{UD} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)_{UD} \cos(2\pi f t) dt - j \int_{-\infty}^{\infty} x(t)_{UD} \sin(2\pi f t) dt \quad (2.30)$$

dengan $X(f)$ adalah fungsi sinyal dalam domain frekuensi, $x(t)$ adalah fungsi sinyal dalam domain waktu dan f adalah frekuensi.

Menurut Putri et al. (2017) Metode ini membandingkan spektrum komponen horizontal terhadap komponen vertikal dari gelombang mikrotremor yang didominasi oleh gelombang permukaan, diduga bahwa periode puncak perbandingan H/V mikrotremor memberikan dasar dari periode gelombang S.

$$HVSR = \frac{\sqrt{(\text{Sutara-selatan})^2 + (\text{Sbarat-timur})^2}}{\text{Svertikal}} \quad (2.31)$$

Setelah mendapatkan nilai H/ V pada setiap frekuensi, dapat diperoleh kurva HVSR yang dapat dilihat pada Gambar II.8 dimana sumbu horizontal adalah frekuensi dan sumbu vertikal adalah faktor amplifikasi (H/ V) (Harsuko et al., 2020).



Gambar II.8 Rasio Spektral H/V dari suatu titik pengukuran (Gospodinov, 2018)

II.7.1 Frekuensi Dominan

Frekuensi didefinisikan secara sederhana sebagai kebalikan dari waktu. Sehingga waktu yang satuannya adalah detik (*second*) akan menjadi Hertz (1-per *second*) hanya akan memiliki tepat satu nilai spektrum sedangkan Frekuensi dominan adalah nilai frekuensi yang kerap muncul sehingga diakui sebagai nilai frekuensi dari lapisan batuan di wilayah tersebut sehingga nilai frekuensi dapat menunjukkan jenis dan karakteristik batuan tersebut (Yuliatwati dkk., 2019).

Frekuensi dominan tanah dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut (Nakamura, 2000):

$$f_0 = \frac{V_s}{4h} \quad (2.32)$$

Dengan f_0 adalah frekuensi dominan, V_s adalah kecepatan gelombang geser pada sedimen, dan h merupakan kedalaman batuan dasar.

II.7.2 Periode Dominan

Periode dominan adalah waktu yang diperlukan gelombang mikrotremor merambat pada lapisan endapan sedimen permukaan. Nilai periode dominan dapat

menunjukkan karakteristik suatu lapisan di bawah permukaan pada wilayah tertentu saat penelitian (Arifin dkk., 2014).

Dalam mencari nilai percepatan tanah di suatu tempat, perlu digunakan nilai periode dominan tanah di tempat itu, berdasarkan hubungan (Putri dkk., 2017):

$$T_0 = \frac{1}{f_0} \quad (2.33)$$

Dengan T_0 adalah periode (s), dan f_0 adalah frekuensi (Hz) maka nilai periode dominan tanah di suatu tempat dapat dicari dengan mencari nilai frekuensi dominannya terlebih dahulu.

II.7.3 Faktor Amplifikasi

Amplifikasi merupakan perbesaran gelombang tanah yang terjadi akibat adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan, dengan kata lain gelombang tanah mengalami perbesaran jika merambat pada suatu medium ke medium lain yang lebih lunak dibandingkan dengan medium awal yang dilaluinya (Putri dkk., 2017).

Hartati (2014) berpendapat bahwa faktor amplifikasi dipengaruhi oleh kecepatan gelombang, apabila kecepatan gelombang semakin kecil maka faktor amplifikasi semakin besar, hal ini menunjukkan bahwa faktor amplifikasi berhubungan dengan tingkat kepadatan batuan, dimana berkurangnya kepadatan batuan akan meningkatkan nilai faktor amplifikasi. Hal ini disebabkan oleh sedimen lunak yang memperlambat durasi gelombang yang menjalar di daerah tersebut, sehingga terjadi guncangan terhadap bangunan, begitu juga sebaliknya.

Dengan kata lain Amplifikasi juga merupakan fungsi perbandingan antar lapisan yang dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$A_0 = \frac{\rho_b V_b}{\rho_s V_s} \quad (2.34)$$

dengan untuk A_0 adalah faktor amplifikasi, ρ_b adalah densitas batuan dasar (gr/ml), V_b adalah kecepatan rambat gelombang batuan dasar (m/s), ρ_s adalah densitas

batuan lunak (gr/ml), dan V_s adalah kecepatan rambat gelombang batuan lunak (m/s).

Jika diasumsikan densitas batuan *basement* dan lapisan permukaan sama maka rumus amplifikasi dapat dituliskan sebagai berikut (Nakamura, 2000):

$$A_0 = \frac{V_b}{V_s} \quad (2.35)$$

II.7.4 Indeks Kerentanan Seismik (K_g) dan *Ground Shear Strain*

Indeks Kerentanan Tanah (K_g) merupakan indeks yang menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi saat terjadi gempa bumi, nilai ini didapat dari pergeseran regangan permukaan tanah dan strukturnya saat terjadi gempa bumi. Menurut Nakamura deformasi lapisan mulai terjadi saat gaya yang dihasilkan gempa bumi melebihi batas regangan (*strain*). Hubungan mengenai regangan dengan fenomena dan sifat dinamis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Hubungan antara regangan dengan sifat dinamis tanah (Nakamura, 1997).

Size of Strain γ	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Phenomena	Wave, Vibration		Crack, Settlement		Landslide, Soil Compaction, Liquefaction	
Dynamic Properties	Elasticity		Elasto-Plasticity		Collapse	
	Repeat- Effect, Speed- Effect of Loading					

Nilai K_g dapat dihitung dengan cara mencari terlebih dahulu nilai regangan geser tanahnya. Regangan geser rata-rata dari permukaan dapat dicari dengan persamaan (Nakamura, 2000):

$$\gamma = A_0 \frac{\delta}{h} \quad (2.36)$$

Dengan A_0 adalah amplifikasi, h adalah ketebalan lapisan permukaan, dan δ adalah *seismic displacement* dari *basement ground*.

Dari persamaan (2.35) dapat diperoleh nilai frekuensi alami (f_0) dengan mensubstitusi nilai V_b dan A_0 sebagai berikut:

$$f_0 = \frac{V_b}{4 A_0 h} \quad (2.37)$$

Dari persamaan (2.37) dapat diperoleh nilai ketebalan lapisan (h) sebagai berikut:

$$h = \frac{V_b}{4 A_0 f_0} \quad (2.38)$$

percepatan α_b pada batuan dasar dapat ditulis sebagai berikut (Nakamura, 2008):

$$\alpha_b = (2\pi f_0)^2 \delta \quad (2.39)$$

Maka didapatkan nilai δ sebagai berikut:

$$\delta = \frac{\alpha_b}{(2\pi f_0)^2} \quad (2.40)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.37) dan (2.38) ke dalam persamaan (2.36) maka diperoleh persamaan regangan geser tanah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{A_0 \left(\frac{\alpha_b}{(2\pi f_0)^2} \right)}{\frac{V_b}{4 A_0 f_0}} \\ \gamma &= \frac{A_0^2 \alpha_b}{f_0 \pi^2 V_b} \end{aligned} \quad (2.41)$$

dengan:

$$c = \frac{1}{\pi^2 V_b} \quad ; \quad K_g = \frac{A_0^2}{f_0} \quad (2.42)$$

Menggunakan tetapan $V_b = 600\text{m/s}$ maka diperoleh $\frac{1}{\pi^2 V_b} = 1.69 \times 10^{-6} \text{ (s/cm)}$ (Nakamura, 1977) kemudian dengan mensubstitusi persamaan (2.42) ke persamaan (2.41) maka diperoleh:

$$\gamma = c K_g \alpha_b \quad (2.43)$$

Nakamura (2000) berpendapat c bernilai konstan di hampir semua lokasi atau *site*. Nilai regangan geser juga bergantung pada efisiensi gaya seismik yang bekerja,

efisiensi disimbolkan e dalam % sehingga dapat dinyatakan bahwa nilai regangan geser efektif sebagai berikut (Nakamura, 2008):

$$\gamma_e = c K_g(e) \alpha_b \quad (2.44)$$

Nakamura (2008) juga memberikan nilai e sebesar 60% sebagai asumsi besar efisiensi gaya seismik yang mempengaruhi regangan geser tanah maka besar dari indeks kerentanan seismik efektif dapat dituliskan sebagai berikut:

$$K_g(e) = K_g \cdot 0,6 \quad (2.45)$$

Dikarenakan rumus regangan geser tanah membutuhkan nilai percepatan di batuan dasar maka persamaan (2.44) dapat diubah mengacu pada percepatan empiris Kanai pada persamaan (2.19) sebagai berikut:

$$\gamma_e = c (K_g(e)) \left(\frac{1}{T} 10^{0,6 \cdot 1 M - (1,66 + \frac{3,60}{R}) \log R + 0,167 + \frac{1,83}{R}} \right) \quad (2.46)$$

atau dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\gamma_e = c K_g(e) \alpha_0 \quad (2.47)$$

dengan γ adalah regangan geser tanah, K_g adalah indeks kerentanan seismik, dan α_0 adalah percepatan di batuan dasar dalam Gal (cm/s^2).

II.8 Interpolasi Spline

Dalam memetakan sebaran nilai percepatan tanah maksimum, *peak Ground acceleration* dan *ground Shear Strain* pada suatu area studi diperlukan sebuah metode interpolasi dalam hal ini ialah metode interpolasi spline. Metode Spline merupakan metode yang mengestimasi nilai dengan menggunakan fungsi matematik untuk meminimalisir total kelengkungan permukaan. Dalam ArcGIS, interpolasi Spline termasuk dalam fungsi radial dasar atau *Base Function Radial* (RBF). Metode interpolasi Spline memiliki kemampuan dalam memprediksi nilai minimum dan maksimum dengan efek *stretching* data. Persamaan yang digunakan

Spline adalah dengan menggunakan formula interpolasi permukaan, dengan rumus sebagai berikut (Kurniadi dkk., 2018):

$$S_{(x,y)} = T_{(x,y)} + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j) \quad (2.48)$$

Keterangan:

j: 1, 2, ...n

N: jumlah titik

λ_j : koefisien yang ditemukan dari sistem persamaan linear

r_j : jarak antara titik ke titik j

$T_{(x,y)}$ dan $R(r)$ didefinisikan secara berbeda, berdasarkan cara seleksi (*regularized spline* dan *tension spline*).

II.9 Penelitian Terdahulu

II.9.1 Saputra dkk (2019)

Saputra dkk (2019) melakukan penelitian tentang percepatan tanah maksimum di Kota Palu menggunakan data kejadian gempa. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai percepatan maksimum di permukaan di Kota Palu, daerah penelitian ini meliputi 8 kecamatan yaitu, Kecamatan Tawaeli, Kecamatan Palu Utara, Kecamatan Mantikulore, Kecamatan Palu Timur, Kecamatan Palu Selatan, Kecamatan Tatanga, Kecamatan Ulujati, dan Kecamatan Palu Barat. Tahapan penelitian ini menggunakan data kejadian gempa tahun 2000-2018 berupa magnitudo (M_s) dan jarak hiposenter (R) untuk menyelesaikan persamaan empiris percepatan tanah permukaan Mc. Guirre R.K (1963) dan Donovan (1973). Hasil penelitian ini menunjukkan rentang nilai percepatan tanah maksimum pada 8 kecamatan untuk persamaan Mc. Guirre yaitu 105,442-108,889 gal dan persamaan Donovan yaitu berkisar 112,832-116,585 gal dengan Skala MMI keseluruhan daerah penelitian berada pada skala MMI VI yaitu dampak terlihat adalah kerusakan ringan.

II.9.2 Zakia et al (2017)

Zakia et al. (2017) melakukan penelitian tentang regang geser tanah (*ground shear strain*) di Kota Palu menggunakan data mikrotremor. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai pergeseran tanah akibat penjalaran gelombang seismik, bertempat di 3 kecamatan yaitu Kecamatan Mantikulore, Kecamatan Palu Barat, dan Kecamatan Palu Timur. Tahapan penelitian berupa pengolahan data sekunder mikrotremor berupa frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0). Hasil penelitian menunjukkan nilai regangan geser di daerah penelitian berkisar antara $4,66 \times 10^{-6}$ sampai $1,00 \times 10^{-4}$. Dengan rentang nilai tersebut, daerah penelitian akan mengalami pergeseran dan sebagiannya hanya mengalami getaran tanah jika terjadi gempa.