Skripsi Geofisika

SIMULASI SPEKTRA PERCEPATAN TANAH DI BEBERAPA LOKASI

KOTA PALU



OLEH:

ISWATUN KHAZANAH

H061181004

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

SIMULASI SPEKTRA PERCEPATAN TANAH DI BEBERAPA LOKASI KOTA PALU

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains Pada Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH:

ISWATUN KHAZANAH

H061181004

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

HALAMAN PENGESAHAN

SIMULASI SPEKTRA PERCEPATAN TANAH DI BEBERAPA LOKASI KOTA PALU

Disusun dan diajukan oleh:

ISWATUN KHAZANAH

H061181004

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 5 Agustus 2022

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pertama

Dr. Erfan Syamsuddin M.Si NIP.196709032001121001

<u>Muhammad FawzyIsmullah M., S.Si., M.T</u> NIP. 199111092019031010

Mengetahui, Ketua Departemen Geofisika Fakultas MIPA Unhas

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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: Iswatun Khazanah	
NIM	: H061181004	
Program Studi	: Geofisika	
Jenjang	: S1	

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

"SIMULASI SPEKTRA PERCEPATAN TANAH DI BEBERAPA LOKASI KOTA PALU"

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, 05 Agustus 2022



ISWATUN KHAZANAH H061181004

iv

SARI BACAAN

Kota Palu merupakan daerah yang aktivitas seismik dan proses deformasinya tinggi akibat aktivitas Sesar Palu Koro. Hal ini memerlukan site effect untuk mengetahui perbedaan respon getaran tanah akibat karakteristik formasi batuannya. Penentuan karakteristik dinamik tanah menggunakan metode mikrotremor HVTFA sedangkan inversi eliptisitas gelombang Rayleigh digunakan untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser (Vs). Waveform percepatan gempa diperlukan untuk melakukan proses spectral matching dan time history scaling menggunakan fungsi atenuasi, sehingga diperlukan waveform percepatan gempa lain yang diperkirakan memiliki mekanisme gempa yang sama dengan gempa terbesar terakhir yang dialami Kota Palu yakni Gempa Palu 28 September 2018. Proses ini digunakan untuk mendapatkan spektra percepatan batuan dasar. Spektra percepatan batuan dasar tersebut akan dinaikkan ke permukaan untuk mendapatkan waveform percepatan permukaan sintetik, profil peak ground acceleration (PGA) dan peak ground displacement (PGD). Analisis karakteristik tanah pada setiap lokasi site penelitian merujuk pada SNI 1726:2019 . Variasi klasifikasi site Kota Palu berdasarkan penelitian ini didominasi oleh kelas situs SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak) dan SD (tanah sedang). Nilai PGA batuan dasar saat kejadian gempa Palu 28 September 2018 pada lokasi penelitian sebesar 0.47 g dengan PGA permukaan 0.2 g dan puncak spektra percepatan pada periode 0.7-1 detik. Kaitan kerusakan struktur dengan besaran spektra percepatan dapat dilihat pada kerusakan bangunan pada site yang bersangkutan. Semakin besar nilai puncak spektra percepatan, maka semakin besar pula peluang kerusakan yang terjadi pada site pengambilan data. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi dalam restrukturisasi bangunan penting di Kota Palu dengan mempertimbangkan beban gempa yang dapat ditahan oleh bangunan. Kata kunci : Kota Palu, Klasifikasi site, Mikrotremor, Spectral Matching,

Kata kunci : Kota Palu, Klasifikasi site, Mikrotremor, Spectral Matching, Spektra Percepatan, Time History Scaling.

ABSTRACT

Palu City is an area with high seismic activity and deformation processes due to the activity of the Palu Koro Fault. This requires site effects to determine the difference in the response of ground vibrations due to the characteristics of the rock formations. Determination of the dynamic characteristics of the soil using the HVTFA microtremor method while the Rayleigh wave ellipticity inversion was used to obtain a shear wave velocity profile (Vs). The earthquake acceleration waveform is needed to perform the spectral matching process and time history scaling using the attenuation function, so another earthquake acceleration waveform is needed which is estimated to have the same earthquake mechanism as the last biggest earthquake experienced by Palu City, the Palu Earthquake 28 September 2018. This process is used to obtain bedrock acceleration spectra. The acceleration spectra of the bedrock will be raised to the surface to obtain a synthetic surface acceleration waveform, peak ground acceleration (PGA), and peak ground displacement (PGD) profiles. Analysis of soil characteristics at each research site location refers to SNI 1726:2019. The variation of the Palu City site classification based on this study was dominated by SC (hard soil, very dense soil, and soft rock) and SD (medium soil) site classes. The PGA value of bedrock during the Palu earthquake on September 28, 2018 at the research location was 0.47 g with a surface PGA of 0.2 g and peak acceleration spectra in the period of 0.7-1 seconds. The relationship between structural damage and the magnitude of the acceleration spectra can be seen in the damage to buildings at the site concerned. The greater the peak value of the acceleration spectra, the greater the chance of damage to the data collection site. The results of this study can be used as a reference in the restructuring of important buildings in Palu City by considering the earthquake load that the building can withstand.

Keywords: Palu City, Site Classification, Mikrotremor, Spectral Matching, Acceleration Spectra, Time History Scaling.

KATA PENGANTAR

Segala Puja dan puji syukur amat penulis agungkan kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan kekuatan dalam tataran rahmat, hidayah, maupun keberkahan-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Simulasi Spektra Percepatan Tanah di Beberapa Lokasi Kota Palu". Tak lupa pula shalawat serta salam penulis haturkan kepada Baginda Nabi Muhammad SAW selaku uswatun hasanah bagi seluruh ummatnya. Tidak ada habisnya membahas penelitian, begitupun untuk kali ini penulis katakan, tugas akhir hanyalah serangkaian bentuk penyelesaian masalah yang penulis hadapi dalam kehidupan kampus sebelum akhirnya benar-benar bertarung dalam kehidupan bermasyarakat, berbangsa, dan bernegara. Penghargaan tertinggi penulis serahkan kepada Bapak Alm. Mungsori yang selalu menjadi penyemangat penulis dalam menjalani kehidupan yang rumit ini, juga Ibu Fatmawati Hamzah yang sangat memberikan banyak pelajaran kepada penulis sampai akhirnya penulis bisa memahami bahwa manusia sulit untuk dipahami, kepada kedua saudari penulis yaitu Sri Wahyuningsih dan Alfi Sakinah Astuti yang selalu mengerti kondisi penulis dan tidak pernah absen untuk memberikan dukungan kepada penulis.

Dalam Penyusunan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapatkan bimbingan, kritik, dan saran yang membangun dari berbagai pihak. Olehnya itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. **Diri sendiri**. Sebagai pelaku dalam setiap perubahan dalam kehidupan penulis.

vii

- 2. Bapak Alm Prof. Dr. Dadang Ahmad Suriamiharja, M.Eng. selaku Pembimbing Akademik penulis yang selalu memberikan kritik dan masukan selama penulis mengenyam pendidikan di Universitas Hasanuddin. Terima Kasih atas segala harapan dan ilmu yang diberikan, sehingga penulis termotivasi untuk bisa menyelesaikan studi dengan baik.
- Bapak Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si selaku pembimbing utama penulis. Terima kasih untuk segala bimbingan, kritik, saran, serta ilmunya yang sangat bermanfaat sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
- 4. Bapak Muh. Fawzy Ismullah M, S.Si., M.T selaku pembimbing pertama penulis. Terima kasih untuk ilmu, bimbingan, saran, kritik, hingga "alarm" waktu yang diberikan, sehingga penulis bisa termotivasi untuk menyelesaikan skripsi dengan sebaik-baiknya.
- 5. Bapak Sofian S.Si selaku pembimbing kedua penulis. Terima kasih atas kebaikan hatinya untuk tidak pernah lelah menanggapi penulis yang banyak bertanya. Terima kasih juga telah menerima penulis untuk melakukan pengambilan data dan pengolahan data di Stasiun Geofisika Kelas I Palu.
- Bapak Syamsuddin S.Si., M.T dan Ibu Makhrani S.Si., M.Si selaku dosen penguji. Terima kasih atas pelajaran, ilmu, kritik dan saran yang membangun yang membantu penulis menyelesaikan skripsi ini.

- Bapak Hendrik Leopatty S.Si selaku pembimbing lapangan penulis yang selalu memberikan kemudahan kepada penulis ketika mengambil data di Stasiun Geofisika Kelas I Palu.
- Kepada Kakak-kakak Stasiun Geofisika Kelas I Palu, terkhusus kepada Kak Mariska dan Kak Abdul yang membantu penulis dalam pengambilan data di lapangan, terima kasih atas ilmunya serta bimbingan yang diberikan.
- 9. Bapak dan Ibu Dosen serta para staf akademik Departemen Geofisika FMIPA Unhas, yang telah memberikan arahan dan nasihat akademik selama penulis mengenyam pendidikan di Universitas Hasanuddin.
- Bapak Rozikan S.Kom selaku pembimbing Kerja Praktik mengenai Inundasi Tsunami di BMKG Pasuruan. Terima kasih atas ilmu yang diberikan kepada penulis.
- 11. Keluarga yang selalu mendukung penulis dalam keadaan suka maupun duka. Terima kasih untuk Om harar, Tante Uni, Tante Hamsina, Om Hamka, Om Anca dan Tante Hasma yang memberikan penulis arahan dan mengajarkan penulis mengenai tanggung jawab.
- 12. Kak Sultan, Oryza Sativa Putri Sultan, Nur Afiza Putri Sultan yang menjadi alasan penulis untuk tetap semangat dalam menyelesaikan studi.
- Sepupu-sepupu penulis, Kak Ika, Ical, Dini, Vira, Kak Ririn, Kak Putri, Kak Destri, Fawwaz, yang memberikan penulis bantuan baik materiil dan non-materiil.

- 14. Ayah Iskandar Hiriansyah, yang selalu memberikan penulis masukan, nasihat, dan tempat berbagi cerita sehingga penulis menjadi lebih pandai dalam memilah hal baik dan buruk.
- 15. Sahabat karib SMA **Nurhaliza A.** tercinta penulis, yang selalu menjadi tempat penulis untuk berkeluh kesah dan berbagi banyak hal.
- 16. YOSEPH dan SCIEDRONE sebagai keluarga penulis di SMAN 1 Barru, khususnya kepada Nurhaliza A., Ajeng Maulidya Nur, Syarina, Ervina Syarifuddin, dan Mutmainnah, serta para wali kelas dan guruguru yang selalu memberikan penulis pelajaran mengenai kehidupan.
- 17. Anggota Tim Bismillah Bisa, Zefanya Eveline Sharon Kailem dan Jihan Faruk Zubedi, sebagai teman Kuliah Praktik dan sahabat penulis yang sangat mengerti mengenai kondisi penulis. Terima kasih untuk nano-nano yang diberikan dari awal perkuliahan hingga saat ini.
- 18. Sektor Pelangi yaitu Zefanya, Jihan. Fya, Angput, dan Andri sebagai keluarga pertama penulis sewaktu masih menjadi mahasiswa baru hingga sampai saat ini.
- 19. Member Basecamp Salama, Jihan, Zefanya, Ainul, Fya, Jojo, Marni, Irma, Aini, Fira, Wilda, Sri dan Onding. Terima kasih untuk segala cerita yang ditorehkan di kehidupan kampus penulis.
- 20. **Member Kamar 107,** terima kasih untuk **Ilmi, Jihan, Zefa, Dena, dll.** sudah menjadi rumah bagi penulis.
- 21. **Himafi 2018** sebagai tempat memulai cerita, berbagi pengalaman, berbagai drama kehidupan juga, terima kasih untuk **Zefa , Jihan, Fya,**

- Ainul, Jojo, Marni, Irma, Fira, Wilda, Sri, Fhaika, Aini, Ilmi, Acam, Dena, Nunu, Vika, Yesi, Wibu, Geby, Milen, Suci, Mute, Nilam, Onding, Nisa, Yen, Juni, Kiki, Epe, Ayu, Ocha, Windy, Sheren, Dhea, Fina, Fiskah, Chana, Feni, Risda, Uli, Kutir, Sari, Firda, Cunni, Yuyun, Cica, Aqila, Angela, Azmi, Aulia, Dede, Justin, Hadi, Patan, Tater, Mulyanto, Hasnan, Heral, Ipul, Uci, Azlan, Sarwan, Wawan, Pian, Agung, Komang, Masdar, Yusran, Yansen, Syahrul, Indra, Slengos, Rana, Izzah, Afni, Dilla, Yusril dan Fauzan. Tetap semangat dengan jalan yang kalian tuju, tetap berproses dimanapun dan kapanpun itu. Salam "Satu Tekad Taklukkan Waktu"
- 22. Mipa 2018 terkhusus kepada teman-teman pengurus Pengurus BEM FMIPA Unhas Periode 2021/2022, Jalil, Dede, Alif, Milen, Chand, Lutfi, Andri, Yusuf, Heral, El, Icha, Pitto, Ninis, Geby, Wilda, Juni, Uci, Ardi, Azlan, Ipul, Syahrul, Kido, Onding, Marni, Wildawati, Umar, Hasnan, Aldo, Fina, Maya, Aqila, Acam, Justin, Inul, Agung, Farhan, Komang, Ail, Sarwan, Wawan, Zefa, Nunu, Sheren, Shamad, Ishak, Cilla, Firda, Spaer, Jojo, Yaya, Nasmah, Afni, Yuyun, Syara, Snufkin, Nando, Calli, Ana, Dena, Esri, Fira, Isa, Jihan, Fya, Marsya, Vivi, Ilmi, dan Vika. Terima kasih atas kebersamaannya dari Maba hingga saat ini, salam "Use Your Mind Be The Best" dan "Takkan Pudar".
- Bidang Kajian Strategis dan Advokasi BEM FMIPA Unhas Periode
 2021/2022 Terkhusus kepada Rahmat, Ainul, Wawan, Sarwan,

- Agung, Komang Nunu, Farhan dll. Terima kasih untuk bantuannya dalam menyukseskan segala kegiatan kerja dan tupoksi di BEM FMIPA Unhas. Terima kasih sudah saling menguatkan dan bahu-membahu.
- 24. Terima kasih pada Kakak MIPA 2015 (Kak Nuge, Kak Gustamin, Kak Novi, Kak Risna, Kak Hafis, Kak Erfi, Kak Jr, Kak Ashadi dll.) selaku Pengurus BEM Penulis, Kakak HIMAFI 2016 (Kak Arief, Kak Winda, Kak Mute, Kak Arya, Kak Aso, Kak Ulla, Kak Ayyub, Kak Agung, Kak Hira, Kak Fara, Kak Hasrina, dll.) selaku Pengurus Himpunan Penulis, dan Kakak HIMAFI 2017 (Kak Ate', Kak Uci, Kak Zahra, Kak Asni, Kak Azhardi, Kak Angga, Kak Syakira, Kak Ardi, Kak Agung, Kak Zahari, dll.) selaku Panitia yang telah banyak mengajarkan hal baik pada Penulis.
- 25. Adik-adik HIMAFI-HMGF 2019, Galib, Arsyih, Kamil, Haikal, Devi, Diki, Sarni, Patio, Nismul, Nude, Haerul, Cindy, Haidir, Alif, Ismi, Afikah, Lida, Indah, Mey, Dahlia, Akbar, Suleha, Jinaan, Kiya, Habib, Ila, Asyifah, Pipit, Ayul, Risda, Caca, Sindy, Dian, Fausta, Jack, Muji, Nanda, Yuli, Ashar, Sekar, Tiara, Dominikus, Gorki, Riman, Muly, Nur, Ita, Yusri, Jimbo, Alya, Nurul, Fara, Ikram, Israil, Asira, Nara, Rati B, Pitti, Ratih, Eni, Hajrul, Sire, Umni, Hajar, Tiche, Gisel, Mutiara, Rara, Gunawan, Mahar, Ririn, Enjel, Jasmine, Maria, Hartini, Yoriska, Agus, Nabila, Daya, Risma, Yuni, Salsa, Elivia, Atul, Septi, Lela, Dollo, dan Azizah. Terima kasih sudah memberikan warna-warni problematika dalam masa kepanitiaan

penulis di Himafi dan HMGF FMIPA Unhas, tetap "Bangkit dan Buktikan".

- 26. Adik-adik T20POSFER, Alghi, Toktok, Astri, Asmawan, Faiz, Guntur, Imran, Alif, Dayat, Ema, Aini, Aza, Asi, Echa, Angel, Ima, Mela, Lola, Resty, Gloria, Jane, Nisfit, Hasna, Rezky, Qalbi, Wulan, Mifta, Aan, Umi, Milka, Selfi, Aurel, Sandra, Regita, Indah, Fira, Merlia, Ica, Cholis, Magfirah, Datu, Emmi, Izzah, Tazkia, Ansya, Yudi, Ical, Awi, Yonas, Agung, Rianul, Dirham, Ila, Defina, Wikal, Gery, Hamman, Nikom, Rizka, Arpah dan Ihsan. Terima kasih telah menjadi adik-adik yang baik dan lucu, meskipun kadang agak nakal. Tetap semangat untuk berproses, di tataran himpunan maupun BEM. Tetap jadi adik-adik yang selalu membanggakan buat penulis.Tetap "Bersama Satukan Langkah"
- 27. Untuk 419 adik-adik MIPA 2021 terima kasih atas setiap pengalaman berharga selama Penulis menjadi Pengurus BEM FMIPA Unhas, tetap "Satu Asa Nyala Bersama".
- SEG Unhas SC terkhusus kepada teman-teman pengurus periode 2021/2022.
- 29. HMGI Pusat Kabinet Kencana Nusantara terkhusus kepada divisi akademik.
- 30. **SEGWN Indonesia** Sebagai tempat penulis untuk berkolaborasi dengan orang-orang hebat baik di dalam negeri maupun di luar negeri.

- 31. Teman-teman KKN Gel. 106 Posko 12 Tamalanrea, Khususnya kepada Jihan, Indah, Ume, Iska, Ame, dll. Terima kasih atas keseruan yang diberikan selama masa-masa KKN.
- 32. Teman-teman Kampus Mengajar 4 SMPN 19 Makassar, yakni Jumi, Juhaeni, Jeje, dan Jum, serta Ibu DPL kami Ibu Dyah Vitalocca. Terima kasih sudah mengisi hari-hari penulis, saling berbagi suka maupun duka bahkan sampai terdzholimi oleh beberapa oknum.
- 33. Teman-teman IKAB Unhas. Terkhusus kepada Terr, sebagai teman dekat penulis yang saling menyemangati dalam penyusunan tugas akhir.

Makassar, 05 Agustus 2022 enulis

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
SARI BACAAN	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
I.I Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Ruang Lingkup	3
1.5 Manfaat	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
II.1 Tatanan tektonik di wilayah penelitian	5
II.2 Sejarah gempa bumi di Sulawesi Tengah	6
II.3 Gelombang Seismik	7
II.3.1 Gelombang Badan (Body waves)	7
II.3.2 Gelombang Permukaan (Surface Waves)	8
II.4 Mikrotremor	10
II.5 Karakterisasi Site Berdasarkan Metode HVSR Mikrotremor	11
II.5.1 Frekuensi Dominan (f_0)	11
II.5.2 Amplifikasi (<i>A</i> ₀)	11
II.5.3 Periode Dominan (T_0)	12

II.5.4 Indeks Kerentanan Tanah (K Values from Ground (Kg)) dan
Regangan Geser Tanah (γ)13
II.6. Inversi Kurva HVSR19
II.6.1 Eliptisitas Gelombang Rayleigh19
II.6.2 Metode HVTFA19
II.7 Rambatan Gempa Satu Dimensi21
II.7.1 Konsepsi Analisis Rambatan Gempa Satu Dimensi21
II.7.2 Simulasi Rambatan Gempa dari Batuan Dasar ke Permukaan22
II.7.2.1 Rekaman/Data Percepatan Tanah Simulasi23
II.7.2.2 Spektra Percepatan Batuan Dasar Deterministik24
II.7.2.3 Spectral Matching dan Ground Motion Time History Scaling 30
II.7.2.4 Parameter dinamik tanah
II.7.2.5 Analisis Rambatan Gempa (Metode Equivalen Linear dan
Nonlinear)
BAB III METODE PENELITIAN
III.1 Metode Pendekatan dan Jenis Data
III.2 Lokasi Penelitian
III.3 Peralatan dan Bahan34
III.3.1 Peralatan34
III.3.2 Bahan
III.4 Pengolahan Data
III.4.1 Pengolahan Data Lapangan37
III.4.2 Analisis Data
III.4.3 Interpretasi Data
III.5 Prosedur Penelitian41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN42
IV.1 Profil Kecepatan Gelombang Geser dan Parameter Dinamik Tanah42
IV.2 Spektra percepatan tanah di batuan dasar
IV.3 Spektra percepatan tanah di permukaan56
IV.4 Kajian dampak gempa berdasarkan beban gaya dari nilai spektra
percepatan64

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
V.1 Kesimpulan	
V.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	70
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 (a) Peta geologi Pulau Sulawesi, (b) Peta geologi Kota Palu5
Gambar II.2 Modulus elastis medium (a) Modulus Young(E), (b) Modulus
Bulk (K), (c) Modulus Geser (μ), dan (d) Modulus Axial (Ψ)7
Gambar II.3 Penjalaran Gelombang S8
Gambar II.4 Penjalaran gelombang Rayleigh9
Gambar II.5 Inversi kurva HVSR (garis hitam) pada beberapa site
Gambar II.6 Analisis rambatan gempa satu dimensi
Gambar II.7 ground motion synthetic berupa data rekaman yang dinaikkan ke
permukaan23
Gambar III.1 Peta Lokasi Penelitian
Gambar III.2 Peralatan akuisisi mikrotremor dalam penelitian
Gambar IV.1 Profil <i>site</i> G01 hasil inversi
Gambar IV.2 Profil <i>site</i> G02 hasil inversi
Gambar IV.3 Profil <i>site</i> G03 hasil inversi
Gambar IV.4 Profil <i>site</i> G04 hasil inversi
Gambar IV.5 Target spektrum berdasarkan spektra percepatan tanah di batuan
dasar
Gambar IV.6 Kurva spektra percepatan tanah di permukaan menggunakan time
history nonlinear untuk site G0157
Gambar IV.7 Kurva spektra percepatan tanah di permukaan menggunakan time
history ekuivalen linear untuk site G0158

Gambar IV.9 Profil PGA Time history Nonlinear pada site G01 60

Gambar IV.10 Profil PGA Time history Ekuivalen Linear pada site G01.....61

Gambar IV.12 Profil PGD Time history Ekuivalen Linear pada site G01 64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hubungan regangan lapisan tanah dan lapisan batuan dimodifikas	si
dari Nakamura tahun 199714	4
Tabel 2.2 Klasifikasi situs berdasarkan SNI 1726:2019 17	7
Tabel 3.1 Tabel data akuisisi data mikrotremor	7
Tabel 4.1 Resume data profil Vs 47	7
Tabel 4.2 Karakteristik tanah berdasar data ambient noise mikrotremor	9
Tabel 4.3 Profil dan karakter dinamik tanah di site G01	0
Tabel 4.4 Profil dan karakter dinamik tanah di <i>site</i> G02	1
Tabel 4.5 Profil dan karakter dinamik tanah di site G03	2
Tabel 4.6 Profil dan karakter dinamik tanah di site G04	3
Tabel 4.7 Data waveform percepatan di batuan dasar	4
Tabel 4.8 Nilai spektra percepatan pada masing-masing site	4

BAB I

PENDAHULUAN

I.I Latar Belakang

Sulawesi Tengah khususnya Kota Palu merupakan daerah dengan aktivitas tektonik aktif di Indonesia, dan tercatat sebagai daerah rawan terjadi gempa bumi. Keseluruhan aktivitas tektonik tersebut memberikan efek domino yang menyebabkan daerah Sulawesi Tengah mengalami deformasi kerak bumi yang aktif, dan berimbas pada tingginya tingkat aktivitas seismik. Indikasi adanya aktivitas seismik yang tinggi dan proses deformasi di wilayah Sulawesi Tengah dapat dilihat pada morfologinya dan aktivitas beberapa sesar yang ada seperti Sesar Palu-Koro, Sesar Janedo, dan Sesar Poso (Jamidun dkk., 2019).

Berdasarkan katalog USGS, terhitung hingga tahun 2007 lebih dari seratus gempa bumi dengan magnitudo lebih dari 7 tercatat di Pulau Sulawesi. Gempa bumi terakhir dengan magnitudo besar di Kota Palu terjadi pada tanggal 29 September 2018 dengan magnitudo 7,4 merupakan gempa bumi dengan tingkat resiko terbesar yang pernah terjadi, dari segi korban jiwa hingga dari segi materialnya. Sebanyak 2.403 bangunan rusak, dan tercatat 1.636 korban jiwa yang meninggal dari 70.000 korban jiwa yang dievakuasi (BNPB Palu, 2018).

Metode mikrotremor digunakan sebagai upaya pengurangan resiko gempa bumi. Metode ini mempertimbangkan potensi bahaya gempa bumi secara menyeluruh dengan mengidentifikasi periode, frekuensi, dan amplifikasi untuk mengetahui karakteristik litologi struktur tanah setempat (Ayubi dkk, 2020). Perencanaan infrastruktur yang terkategorikan tahan gempa adalah percepatan tanah maksimum (*Peak Ground Acceleration/PGA*), respon spektra gempa (*seismic response spectra*), dan riwayat waktu percepatan gempa (*acceleration time histories*) di permukaan (Partono dkk., 2015).

Syarat perencanaan bangunan gempa di Indonesia, telah diatur dalam Standar Nasional Indonesia SNI 1726:2019 yang membahas mengenai tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. Beberapa penelitian terkait yang menggunakan metode mikrotremor antara lain; Thein dkk. (2014) menggunakan mikrotremor untuk menyelidiki struktur bawah permukaan dan parameter kuat gerakan tanah di Kota Palu, Ayubi dkk. (2020) menggunakan mikrotremor untuk zonasi site effect dan analisis bahaya penguatan gempa dengan menggunakan metode DSHA untuk menentukan PGA di Kabupaten Sumba Barat Daya, Sunardi dkk. (2018) menggunakan mikrotremor untuk pemetaan Vs30 dan klasifikasi tanah di bagian Selatan Kulon Progo, dengan menggunakan inversi eliptisitas gelombang rayleigh. Harnindra dkk. (2017) menggunakan analisis DSHA, data gempa pada daerah Sesar Kendeng, data inisial percepatan tanah, untuk menentukan target spektrum dan mencari ground acceleration pada permukaan berdasarkan analisis respon dinamik. Arfiadi & Satyarno (2013) membandingkan spektra desain yang ada dalam SNI 1726:2012 dengan spektra desain dalam SNI 03-1726- 2002 untuk 15 kota besar termasuk Kota Palu.

Hasil penelitian ini yaitu identifikasi PGA dan spektra percepatan pada bangunan gedung berupa hotel, dan bangunan nongedung berupa jembatan yang memiliki

efek kerusakan besar akibat gempa Palu 28 September 2018 yang dipengaruhi oleh keberadaan Sesar Palu-Koro.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah dijabarkan sebelumnya, maka dapat ditentukan rumusan masalah sebagai berikut:

- 1. Bagaimana karakteristik tanah dan profil kecepatan gelombang geser (Vs) dengan akuisisi data mikrotremor pada lokasi penelitian?
- Berapa nilai PGA dan spektra percepatan di beberapa lokasi Kota Palu akibat gempa palu 28 September 2018?
- 3. Bagaimana kaitan antara kerusakan struktur bangunan dengan besaran spektra percepatan?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

- 1. Memperoleh parameter karakteristik tanah dan profil kecepatan gelombang sekunder (Vs) dengan akuisisi data mikrotremor pada lokasi penelitian
- Mengetahui PGA dan spektra percepatan di beberapa lokasi Kota Palu akibat gempa palu 28 September 2018
- 3. Mengetahui kaitan kerusakan struktur dengan besaran spektra percepatan.

1.4 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup pada kegiatan meliputi, penelitian karakteristik tanah di lokasi penelitian menggunakan metode Nakamura berdasarkan data *ambient noise* mikrotremor terukur, jumlah titik ukur sebanyak 4 titik dan estimasi profil Vs bawah permukaan dilakukan dengan metode inversi eliptisitas gelombang Rayleigh yang diesktraksi dari spektrum *ambient noise* terukur. Simulasi spektra percepatan menggunakan metode rambatan gempa satu dimensi. Analisis parameter percepatan tanah dilakukan dengan metode *deterministic* (DSHA) menggunakan data gempa *real* pada beberapa kejadian gempa akibat sesar Palu-Koro. Analisis percepatan tanah riwayat waktu pada lokasi penelitian. Selanjutnya, analisis parameter spektra percepatan (T=0 detik/PGA, T=0.2 detik/percepatan spektra periode pendek, T=1 detik/percepatan spektra periode panjang) mengacu pada ketentuan yang diatur dalam SNI 1726-2019.

1.5 Manfaat

- 1. Bagi mahasiswa dapat menerapkan ilmu pengetahuan dan metode yang selama ini telah diterima di bangku kuliah agar dimanfaatkan dalam masyarakat
- Bagi masyarakat setempat penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi dalam melakukan pembangunan untuk menentukan beban gempa yang dapat ditahan oleh suatu bangunan.
- 3. Bagi pemerintah setempat penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam restrukturisasi bangunan penting dengan mempertimbangkan beban gempa yang dapat ditahan oleh bangunan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Tatanan tektonik di wilayah penelitian

Kompleksitas Sulawesi sebagai tempat pertemuan tiga lempeng besar, yakni Lempeng Indo Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Eurasia, bahkan lempeng kecil berupa Lempeng Filipina, menyebabkan Pulau Sulawesi memiliki empat buah lengan dengan perbedaan proses tektonik yang membentuk satu kesatuan mosaik geologi serta memiliki banyak lipatan dan sesar (Mason dkk., 2019).



Gambar II.1 (a) Peta geologi di Pulau Sulawesi, (b) Peta geologi Kota Palu (Thein dkk., 2014). Berdasarkan Peta Geologi Kota Palu pada Gambar II.1, Kota Palu sebagai daerah penelitian memiliki material penyusun utamanya adalah aluvial dan endapan pantai berumur Holosen yang terdiri atas pasir, lanau, kerikil, dan kerakal. Keberagaman ukuran material dengan lingkungan pengendapan delta, sungai dan laut dangkal

dianggap sebagai sedimen termuda di wilayah ini. Sebaran endapan aluvial dapat dilihat pada peta geologi II.1 bagian b. Selain itu keberadaan sesar Palu-Koro memberikan gambaran bahwa Kota Palu memiliki aktivitas seismik yang tinggi.

II.2 Sejarah gempa bumi di Sulawesi Tengah

Sulawesi Tengah, khususnya Kota Palu, memiliki sejarah kegempaan yang mencekam. Pada 1907, terjadi gempabumi, yang bersumber dari retakan sesar yang berarah tegak lurus Sesar Palu-Koro sekitar wilayah Kulawi hingga Lindu. Dua tahun berikutnya, terjadi gempabumi dengan kekuatan lebih besar yang menghancurkan seluruh wilayah tersebut. Selain itu, dahsyatnya gempa 1927 yang disertai tsunami hingga membuat puluhan warga kehilangan nyawa. Pada 1938 terjadi gempabumi hebat yang menyebabkan air laut naik. Kemudian, pada 10 Agustus 1968 terjadi gempa bermagnitudo 7,3 dengan pusat gempa di Laut Sulawesi dan menewaskan 200 orang.

Pada 14 Agustus 1968 terjadi gempabumi berkekuatan 7,4 Mw yang menghasilkan tsunami besar dan menenggelamkan Pulau Tuguan. Pada tahun 2012 juga terjadi gempa yang menimbulkan efek kerusakan tinggi. Kejadian tsunami pun terulang pada gempa Palu 28 September 2018 dengan Magnitudo 7.4, hingga memicu terjadinya likuifaksi dan menelan banyak korban jiwa. Tsunami tersebut juga menyebabkan runtuhnya badan Jembatan Palu IV/ Jembatan Ponulele, Hotel roaroa rata dengan tanah serta beberapa gedung dan hotel juga mengalami kerusakan-kerusakan, seperti Hotel The Sya (Kusumah dkk., 2018).

II.3 Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan suatu paket energi regangan dan elastis yang mengalami propagasi keluar sumber seismik seperti gempa bumi atau ledakan (Kearey dkk., 2002). Kecepatan propagasi gelombang seismik ditentukan oleh modulus elastisitas dan densitas bahan yang dilaluinya.



Gambar II.2 Modulus elastis medium (a) Modulus *Young*(E), (b) Modulus Bulk (K), (c) Modulus Geser (μ), dan (d) Modulus Axial (Ψ) (Kearey dkk., 2002).

Pada Gambar II.2 terdapat modulus-modulus yang mempengaruhi kecepatan propagasi gelombang seismik, yaitu modulus bulk, modulus geser, modulus axial dan modulus *young*. Ada dua tipe gelombang seismik, yaitu gelombang badan dan gelombang permukaan (Kearey dkk., 2002).

II.3.1 Gelombang Badan (*Body waves*)

Gelombang badan terdiri atas 2 jenis, yaitu gelombang primer (P) dan gelombang sekunder (S). Pada penelitian ini menggunakan gelombang sekunder (S). Gelombang S disebut juga sebagai gelombang *shear*, gelombang transversal, maupun gelombang rotasi dengan gerak partikelnya tegak lurus terhadap arah rambatnya (Braile, 2004).



Gambar II.3 Penjalaran Gelombang S (Haerudin dkk., 2019)

Pada Gambar II.3 ditunjukkan penjalaran gelombang S, gelombang S tidak dapat merambat pada medium cair (fluida), sehingga gelombang ini hanya terdeteksi pada inti bagian dalam bumi dengan kecepatan (Vs) $\pm 3,0-4,0$ km/s di kerak bumi, lebih besar dari 4,5 km/s di dalam mantel bumi, dan 2,5-3,0 km/s di dalam inti bumi. Gelombang S kecepatan lebih rendah daripada gelombang P sehingga gelombang S akan tiba setelah gelombang P tiba (Braile, 2004).

Kecepatan gelombang S (Vs), yang melibatkan regangan geser murni, dinyatakan dalam:

$$v_s = \left[\frac{\mu}{\rho}\right]^{1/2} \tag{2.3}$$

rasio kecepatan gelombang P dan S dinyatakan dalam:

$$\frac{v_p}{v_s} = \left[\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}\right]^{1/2} \tag{2.4}$$

dimana σ adalah *Poisson's ratio*.

II.3.2 Gelombang Permukaan (Surface Waves)

Perambatan gelombang permukaan lebih lambat dibandingkan dengan perambatan gelombang badan, namun menyebabkan lebih banyak kerusakan. Gelombang permukaan terdiri atas gelombang love (L) dan gelombang rayleigh (R). Pada penelitian ini menggunakan gelombang rayleigh, gelombang ini merupakan

gelombang permukaan yang gerak partikel medianya adalah kombinasi gerakan partikel yang diakibatkan oleh gelombang P dan S. Orbit gerakan partikel dari gelombang permukaan yaitu berupa gerakan eliptik dengan sumbu mayor elips tegak lurus terhadap permukaan dan tegak lurus terhadap arah penjalarannya. Terdapat dua ketentuan utama baru yang menyatakan bahwa bagian bumi berlapislapis dan tidak homogen. Selain itu, terdapat juga suatu perubahan dispersi kecepatan (*velocity dispersion*) (Haerudin dkk., 2019).



Gambar II.4 Penjalaran gelombang rayleigh (Haerudin dkk., 2019)

Penjalaran gelombang *rayleigh* ditunjukkan pada Gambar II.4, namun perlu diketahui bahwa penjalaran kedua gelombang tersebut (gelombang L dan R) tidak dapat tiba secara bersamaan dalam suatu stasiun, gelombang yang memiliki periode lebih panjang akan tiba lebih dahulu. Gelombang dengan periode panjang memiliki kecepatan yang tinggi. Perbedaan dari lapisan tersebut dapat ditentukan dengan struktur batuan. Struktur batuan aluvial ataupun struktur batuan yang cenderung lunak memiliki tingkat amplifikasi gelombang permukaan yang cukup tinggi maka akan menimbulkan getaran lebih kuat meskipun lokasi kerusakan cukup jauh dari sumber gempa bumi (Haerudin dkk., 2019).

Penelitian ini menggunakan gelombang permukaan, dalam hal ini gelombang

rayleigh, untuk mendapatkan nilai kecepatan gelombang geser (Vs), terhadap kedalaman. Nilai kecepatan gelombang geser dapat dijadikan acuan untuk mengetahui sifat struktur bawah permukaan, misalnya saja jenis batuan. Hal ini disebabkan karena gelombang rayleigh akan mengalami dispersi pada setiap perambatan gelombangnya yang melewati batas lapisan material bumi. Kecepatan gelombang geser (Vs) dan modulus geser (μ) merupakan parameter penting dan diperlukan dalam analisis respon dinamik tanah. Parameter ini digunakan untuk menentukan kekuatan goncangan gempa, amplifikasi tanah, likuifaksi dan pemetaan kondisi bawah permukaan untuk kebutuhan bidang rekayasa (Talumepa dkk., 2019).

Sifat kekakuan dari lapisan tanah dapat dinilai dari besarnya kecepatan gelombang geser (Vs). Nilai Vs yang semakin besar memberikan gambaran bahwa semakin besar juga nilai kekakuan tanahnya yang artinya semakin keras dan padat lapisannya (Valeria dkk., 2019).

II.4 Mikrotremor

Mikrotremor merupakan getaran konstan dari permukaan bumi, yang dapat ditimbulkan oleh peristiwa sengaja (buatan) maupun tidak disengaja (alam). Getaran yang dimaksud bukan merupakan peristiwa dengan durasi singkat seperti gempabumi dan ledakan (Seht & Wohlenberg, 1999).

Mikrotremor diterapkan untuk menentukan karakteristik dinamis (frekuensi predominan dan faktor amplifikasi) dari lapisan tanah menggunakan penjalaran gelombang seismik yang dipelopori oleh Kanai dan Tanaka pada tahun 1954 dan 1961. Beberapa parameter fisis yang dapat dilihat dari penjalaran gelombang tersebut adalah kecepatan gelombang seismik, variasi amplitudo, frekuensi serta periode gelombang (Syahruddin dkk., 2014).

II.5 Karakterisasi Site Berdasarkan Metode HVSR Mikrotremor

II.5.1 Frekuensi Dominan (f_0)

Pengolahan data dengan menggunakan metode HVSR akan menghasilkan nilai frekuensi dominan dan nilai amplifikasi dengan pengolahan *software* menggunakan konsep transfrormasi fourier. Frekuensi dominan merupakan frekuensi yang sering kali muncul. Tahun 1949 Lachet dan brad melakukan penelitian dan menemukan bahwa nilai puncak frekuensi akan berubah terhadap variasi geologi pada lokasi penelitian (Arifin dkk., 2014).

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

$$f_0 = \frac{v_s}{4h} \tag{2.5}$$

dengan f_0 merupakan frekuensi dominan, v_s merupakan kecepatan gelombang geser pada lapisan sedimen dan *h* merupakan kedalaman batuan dasar (*basement*).

II.5.2 Amplifikasi (*A*₀)

Salah satu cara yang dapat digunakan dalam mencari percepatan gerakan tanah pada permukaan adalah dengan menggunakan faktor amplifikasi. Faktor amplifikasi berguna dalam memberikan gambaran perubahan (dalam hal ini pembesaran) percepatan gerakan tanah dari batuan dasar ke permukaan. Hal ini diakibatkan karena adanya perbedaan kecepatan gerakan gelombang geser (Vs) di batuan dasar dan lapisan sedimen. Nilai Vs yang semakin kecil menyebabkan makin kecil pula nilai modulus geser dan faktor redaman, sehingga percepatan tanahnya akan makin membesar. Fungsi perbandingan kontras impedansi antar lapisan ditunjukkan pada persamaan berikut (Nakamura, 2000).

$$A_0 = \frac{\rho_b V_b}{\rho_s V_s} \tag{2.6}$$

Dimana untuk A_0 merupakan faktor amplifikasi, ρ_b merupakan densitas batuan dasar (gr/ml), V_b merupakan kecepatan rambat gelombang batuan dasar (m/s), ρ_s merupakan densitas batuan lunak (gr/ml), dan V_s merupakan kecepatan rambat gelombang batuan lunak (m/s). Jika densitas *basement* dan lapisan permukaan sama, maka faktor amplifikasinya adalah sebagai berikut (Nakamura, 2000).

$$A_0 = \frac{V_b}{V_s} \tag{2.7}$$

dengan A_0 merupakan faktor amplifikasi, V_b merupakan kecepatan rambat gelombang batuan dasar (m/s), dan V_s merupakan kecepatan rambat gelombang batuan lunak (m/s).

II.5.3 Periode Dominan (T₀)

Nilai periode dominan tanah merupakan parameter yang dibutuhkan dalam mencari nilai percepatan tanah (Arifin, dkk., 2014).

$$T_0 = \frac{1}{f} \tag{2.8}$$

Dimana periode dilambangkan oleh T(s), dan Frekuensi dilambangkan oleh f(Hz). Untuk mencari nilai frekuensi predominan tanah, dapat digunakan teknik *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Kondisi tanah pada suatu wilayah, mempengaruhi karakteristik gelombang gempa bumi saat gempa bumi tersebut terjadi. Diperlukan pula periode dominan bangunan (periode alami bangunan) untuk mengetahui gaya gempa yang dapat ditahan. Adapun persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut (UBC, 1997).

$$T_x = T_y = Ct(hn)\frac{3}{4}$$
 (2.9)

dengan,

hn= tinggi total bangunan (m)

Tx=Ty= periode getar alami fundamental (detik)

Ct= 0.0731 (Struktur beton bertulang)

Ct= 0.0853 (Struktur baja)

Ct= 0.0488 (Struktur lain)

Dalam penelitian ini, periode dominan digunakan untuk mencari nilai *tegangan geser tanah* akibat gaya gempa yang terjadi.

II.5.4 Indeks Kerentanan Tanah (*K Values from Ground* (Kg)) dan Regangan Geser Tanah (γ)

Indeks kerentanan tanah (Kg) dan regangan geser tanah (γ) merupakan parameter kerentanan yang saling berkaitan. Indeks kerentanan tanah menunjukan derajat karakter kerentanan tanah setempat tanpa pengaruh usikan getaran gempa sedangkan regangan geser tanah (γ) mengkuantifikasi nilai kerentanan terhadap pengaruh gaya gempa yang terjadi.

Modulus Geser			
(γ)	10-6	10 ⁻⁵ -10 ⁻³	10 ⁻² 10 ⁻¹
Efek dinamis	Gelombang, getaran	Rekahan, penurunan tanah	Longsor, kompaksi, likuifaksi
Fenomena	Elastitas	Elasto-plastis	Plastisitas (retak)

Tabel 2.1 Hubungan regangan lapisan tanah dan lapisan batuan dimodifikasi dari Nakamura tahun 1997 (Dindar dkk., 2017)

Nakamura (2000) menyatakan nilai regangan geser tanah (γ) dapat menggambarkan kemampuan lapisan material tanah untuk bergeser saat terjadi gempa, Ishihara (1996) menghubungkan nilai besaran ini dengan fenomena dan efek dinamis tanah setempat seperti pada Tabel 2.1.

Nakamura (2000) mengemukakan bahwa untuk mendapatkan nilai Kg, perlu dihitung regangan geser tanah. Besarnya nilai regangan geser rata-rata dari permukaan tanah dapat diestimasi menggunakan persamaan (Nakamura, 2000):

$$\gamma = A_0 \frac{\delta}{h} \tag{2.10}$$

dimana A_0 merupakan amplifikasi, h merupakan ketebalan lapisan permukaan δ merupakan *seismic displacement* dari *basement ground (basement)*.

Nilai kecepatan gelombang geser dari *basement* (Vb) dapat diperoleh dari persamaan (2.13) dengan melakukan pembagian nilai kecepatan gelombang geser lapisan permukaan (Vs) dengan faktor amplifikasi (A_0). Dari persamaan (2.10)

diperoleh nilai frekuensi alami (f_0) dari lapisan permukaan dengan mensubtitusi nilai Vb dan A_0 yang dirumuskan pada persamaan berikut (Nakamura 2000):

$$f_0 = \frac{V_b}{4A_0h}$$
(2.11)

dari persamaan (2.11), nilai ketebalan lapisan permukaan (h) diperoleh sebagai berikut :

$$h = \frac{V_b}{4A_0 f_0} \tag{2.12}$$

Percepatan α_b pada batuan dasar (*basement*) dapat ditulis sebagai (Nakamura, 2008) :

$$\alpha_b = (2\pi f_0)^2 \delta \tag{2.13}$$

Sehingga didapatkan persamaan, nilai δ dengan :

$$\delta = \frac{\alpha_b}{(2\pi f_0)^2} \tag{2.14}$$

Jika persamaan (2.12) dan (2.13) disubtitusi ke dalam persamaan (2.14), maka diperoleh persamaan regangan geser tanah (γ) sebagai berikut :

$$\gamma = \left(\frac{\frac{\alpha_{b}}{(2\pi f_{0})^{2}}}{\frac{V_{b}}{f_{0}4A_{0}}}\right)$$
(2.15)

$$\gamma = \frac{A_0^2 \alpha_b}{f_0 \pi^2 v_b} \tag{2.16}$$

dengan,

$$c = \frac{1}{\pi^2 v_b}$$
; $K_g = \frac{A_0^2}{f_0}$ (2.17)

selanjutnya, dilakukan subtitusi persamaan (2.17) ke persamaan (2.16), kemudian

diperoleh:

$$\gamma = cK_g \alpha_b \tag{2.18}$$

c merupakan nilai hampir konstan untuk berbagai lokasi/*site* (Nakamura, 2000). Jika efisiensi gaya seismik diterapkan dengan asumsi e% dari gaya statis, regangan geser efektif (γ_c) dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Nakamura, 2008):

$$\gamma = K_g(e)\alpha_b \tag{2.19}$$

$$K_g(e) = e \left(\frac{A_0^2 \alpha_b}{f_0 \pi^2 v_b} \right) \frac{1}{100}$$
(2.20)

regangan efektif diestimasikan dengan melakukan perkalian $K_g(e)$ terhadap percepatan maksimum dari batuan dasar dalam Gal (cm/s²) (Nakamura, 2008). Terdapat hubungan linier antara Kg dengan kerusakan akibat gempa bumi. Kerusakan akibat gempa bumi akan semakin besar jika nilai Kg di daerah tersebut cukup tinggi (Ipmawan dkk., 2019). Kemudian, regangan efektif (γ_e) bisa diperkirakan dengan mengalikan nilai Kg(e) dengan percepatan maksimum batuan dasar dalam Gal (cm/s²) (Nakamura, 2008).

II.5.5 Kecepatan Gelombang Geser Pada Kedalaman 30 Meter

Upaya yang bisa dilakukan dalam mitigasi gempa bumi salah satunya dengan menganalisis bahaya terjadinya gempa bumi. Sehingga diperlukan investigasi bawah permukaan untuk mengetahui bagaimana karakteristik dinamis tanah dengan memperkirakan nilai kecepatan dari gelombang geser. Dari kecepatan gelombang geser, dapat diketahui Vs10 dan Vs30. Vs10 dapat digunakan sebagai informasi tambahan untuk pra-desain struktur dan pengkondisian tanah. Sementara Vs30

umumnya digunakan dalam pengklasifikasian tanah untuk keperluan geoteknik. Nilai Vs30 merupakan nilai kecepatan rata-rata pada kedalaman 30 meter yang digunakan untuk menentukan kondisi lokal/setempat. Vs30 merupakan parameter penting dalam prediksi gerakan tanah maupun studi efek tanah lokal terhadap goncangan gempa bumi (Sunardi dkk., 2018). Wangsadinata (2006), mengungkapkan bahwa hanya lapisan-lapisan batuan sampai kedalaman 30 m saja yang menentukan pembesaran gelombang gempa. Klasifikasi tipe menggunakan Vs30 berdasarkan SNI 1726:2019 dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Nilai Vs30 diperoleh menggunakan persamaan (Rusydi dkk., 2018):

$$Vs30 = \frac{30}{\sum_{i=1}^{N} di/Vi}$$
(2.21)

dengan *i* adalah indeks pelapisan, n adalah merupakan jumlah lapisan hingga kedalaman 30 meter, d_i adalah ketebalan lapisan ke-*I*, Vi adalah kecepatan gelombang geser (m/s) dan Vs30 adalah kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter.

Kelas situs	$\overline{V_s}$ (m/s)	\overline{N} atau $\overline{N_{ch}}$	$\overline{\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{u}}}(kPa)$
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (Batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC(tanah keras, sangat	350 sampai 750	>50	≥100
padat dan batuan lunak)			
SD(tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (Tanah lunak)	<175	<15	<50

 Tabel 2.2 Klasifikasi situs berdasarkan SNI 1726:2019

Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m	
tanah dengan karakteristik sebagai berikut:	
Indeks plastisitas PI>20	
Kadar air, w $\ge 40\%$	
Kuat geser niralir $\overline{S_u}$ <25 kPa	
Setiap profil lapisan tanah dengan karakteristik berikut:	
Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban	
gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif,	
tanah tersementasi lemah	
Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan H	
> 3 m)	
Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan H>7.5 m	
dengan indeks plastisitas PI>75)	
Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan	
H>35 m dengan $\overline{S_u}$ <50 kPa	

Catatan: N/A= tidak dapat dipakai.

Indonesia sebagai negara dengan riwayat kegempaan yang sering terjadi, juga memiliki regulasi mengenai tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung yang diatur dalam SNI 1726:2019 sebagaimana yang dijelaskan pada Tabel 2.2. SNI 1726:2019 membagi klasifikasi tanah mulai dari tanah SA (batuan keras) hingga tanah SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0).

II.6. Inversi Kurva HVSR

II.6.1 Eliptisitas Gelombang Rayleigh

Metode alternatif sederhana yang dapat diterapkan dengan memanfaatkan eliptisitas gelombang rayleigh adalah pengukuran sensor seismik tunggal *(single* mikrotremor). Metode ini mengasumsikan bahwa gelombang permukaan yang terbentuk akibat interferensi gelombang-gelombang pantul P dan SV yang sudut datangnya diyakini melebihi sudut kritis. Gerak partikel medium saat dilewati oleh gelombang ini berbentuk elips merupakan kombinasi dari gerak partikel gelombang P dan SV. Rasio gerakan partikel vertikal dan horizontal inilah yang dikatakan sebagai eliptisitas gelombang Rayleigh (Sunardi dkk., 2018).

II.6.2 Metode HVTFA

Penelitian ini menggunakan metode HVTFA dalam meminimalisir efek dari gelombang *body* dan gelombang *love*. Representasi metode ini dihitung menggunakan CWT (*Continuous Wavelet Transform*) dengan fungsi nyata x(t) sehubungan dengan analisis wavelet $\psi(t)$ (Atashband & Esfanizadeh, 2012).

$$CWT_{\{x\}(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi * \left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$
(2.22)

dengan parameter a merupakan parameter dilatasi dan b merupakan parameter translasi. Jika t adalah waktu, maka skala a berbanding terbalik dengan frekuensi dan b merupakan parameter translasi dalam fungsi waktu.

$$\Psi(\mathbf{t})_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), (a, b \in \Re, a \neq 0)$$
(2.23)

Selanjutnya, representasi wavelet dari kedua komponen horizontal tersebut

digabung menjadi satu (CWT_H) dengan persamaan:

$$|CWT_H| = \sqrt{CWT_{NS}^2 + CWT_{EW}^2} \tag{2.24}$$

dimana CWT_{NS} dan CWT_{EW} merupakan representasi kompleks dari CWT untuk semua komponen horizontal (Atashband dan Esfanizadeh, 2012).

Inversi HVSR memerlukan beberapa parameter fisis lain. Algoritma yang terbentuk dibawah ini berusaha meminimalisir misfit antara puncak frekuensi kurva pengukuran eliptisitas dan salah satu mode fundamental teoritis RWE (*Rayleigh wave ellipticity*) untuk setiap model yang dihasilkan, didapatkan variasi Vp, Vs dan ρ terhadap kedalaman. Misfit antara puncak frekuensi observasi dan yang dimodelkan didefinisikan dalam persamaan berikut (Layadi, dkk., 2018):

$$Misfit = \frac{(f)observed(f)modelled}{(df)observed}$$
(2.25)

dengan $(f)_{observed}$ merupakan puncak frekuensi observasi $(df)_{observed}$ merupakan standar devviasi yang sesuai, dan $(f)_{modelled}$ merupakan puncak frekuensi dari model fundamental *rayleigh wave ellipticity*.

Parameter model awal mencerminkan karakteristik dinamis suatu tempat seperti Vp, Vs, *poisson's ratio*, dan *rock density*) berpengaruh dalam proses iterasi pencocokan kurva atau pendekatan model kondisi aktual. Dari model awal terbangun, perhitungan misfit bersesuaian dilakukan dengan menggunakan persamaan (Sunardi dkk., 2018) :

$$Misfit = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{D_i M_i}{\sigma i}\right)^2}$$
(2.26)

dengan *N* adalah jumlah titik data, D_i adalah data hasil inversi, M_i adalah model struktur tanah, dan σi adalah standar deviasi dari data hasil inversi dengan $1 \le i \le N$. Selanjutnya, misfit dengan nilai terendah ($0 \le misfit \le 1$) akan digunakan sebagai model terbaik (Sunardi dkk., 2018).



Gambar II.5 Inversi kurva HVSR (garis hitam) pada beberapa *site* (Jerez dkk., 2019). Gambar II.5 menjelaskan mengenai inversi kurva HVSR Kurva teoritis dan model yang diuji diberi warna sesuai dengan nilai misfitnya. Hasil inversi yang bersesuaian dengan kurva HVSR teoritis disorot dengan warna merah. Hasil ini kemudian akan dirata-ratakan menggunakan beberapa model yang terbentuk, yang kemudian akan menggambarkan mengenai kondisi tanah pada *site* bersangkutan (Jerez dkk., 2019).

II.7 Rambatan Gempa Satu Dimensi

II.7.1 Konsepsi Analisis Rambatan Gempa Satu Dimensi

Teori perambatan gelombang geser satu dimensi dikemukakan pertama kali oleh Kanai (1951) dan dikembangkan lebih lanjut oleh Lysmer, Seed, dan Schanbel (1972). Analisis terhadap perilaku struktur selama gempa bumi melibatkan dua hal, yaitu makanisme vibrasi (getaran) dan rambatan energi gempa. Energi gempa merambat dari pusat gempa ke pondasi bangunan melalui medium tanah dan akan diteruskan ke struktur atas.



Gambar II.6 Analisis rambatan gempa satu dimensi, dalam domain frekuensi (Tsai, 2019).

Model pendekatan rambatan gempa satu dimensi dikembangkan dengan mengambil asumsi model lapisan tanah dianggap horizontal. Dalam penelitian ini yang digunakan adalah analisis riwayat waktu (*time history analysis*).Gambar II.6 menjelaskan mengenai respon rambatan gempa satu dimensi dengan analisis frekuensi. Domain waktu yang ada diubah menjadi domain frekuensi melalui proses FFT. Penentuan kondisi lokal *site* didasarkan pada kecepatan gelombang geser dan *density* untuk penentuan jenis tanahnya (Tsai, 2019).

II.7.2 Simulasi Rambatan Gempa dari Batuan Dasar ke Permukaan

Hasil perambatan gelombang gempa melalui metode rambatan gempa satu dimensi akan merambatkan gempa dari batuan dasar ke lapisan permukaan tanah. *Ground motion synthetic* batuan dasar yang digunakan untuk perambatan gempa diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya (GMPE2West) yang mengadopsi pendekatan statistik agar *ground motion* yang dihasilkan di permukaan cocok dengan prediksi masalah respon struktur yang sebenarnya. Analisis ini dilakukan dengan menginput *motion* di batuan dasar yang telah dikembangkan berdasarkan metode deterministik. Ketika terdapat perbedaan antara kondisi tanah seperti jenis lapisan tanah dan tebal lapisan tanah akan sangat mempengaruhi besar percepatan maksimum yang dinaikkan di permukaan (Misriani, 2017).

II.7.2.1 Rekaman Data Percepatan Tanah Simulasi

Penggunaan data masukan (data *ground motion synthetic*) akan menjadi data *input* motion pada *software deepsoil*. Percepatan spektra terdiri dari 3 jenis yaitu pada saat T= 0 detik, T=0.2 detik, dan T=1 detik (Chopra, 1995).



Gambar II.7 ground motion synthetic berupa data rekaman yang dinaikkan ke permukaan (Misriani, 2017).

Penelitian ini menggunakan data gempa yang memiliki kondisi mekanisme gempa yang sama dengan gempa Palu 28 September 2018. Hasil penelitian ini akan mendapatkan percepatan tanah sintetik yang akan disimulasikan menggunakan beberapa data percepatan tanah dari beberapa gempa yang bersesuaian dengan gempa Palu 28 September 2018.

II.7.2.2 Spektra Percepatan Batuan Dasar Deterministik

Spektra percepatan batuan dasar ditentukan dengan metode deterministik menggunakan fungsi atenuasi sebagai persamaan *ground motion* gempa. Fungsi atenuasi merupakan persamaan untuk mengestimasikan tingkat goncangan tanah yang disebabkan oleh gempa. Fungsi ini menggunakan parameter magnitudo, jarak dari sumber ke lokasi pengamatan dan kondisi sumber gempa tersebut untuk mendefinisikan estimasi yang dilakukan (PUPR, 2017).

Pengembangan peta *Hazard* Gempa Indonesia menggunakan tiga persamaan GMPE untuk sumber gempa *shallow crustal fault* dan *shallow background* menggunakan persamaan baru oleh para peneliti. Ketiga persamaan tersebut dikembangkan oleh Boore-Atkinson NGA (2014), Campbell-Bozorgnia NGA (2014) dan Chiou-Youngs NGA (2014). Ketiga persamaan tersebut dikembangkan berdasarkan hasil penelitian tahun 2008. Secara umum ketiga persamaan GMPE dikenal sebagai Persamaan GMPE PEER NGA-West2 yang dkembangkan oleh *Project Lifelines Program of the Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER). Selain itu digunakan juga persamaan GMPE BC Hydro pada Peta *Hazard* Gempa Indonesia tahun 2017 (PUPR, 2017). Adapun pada penelitian ini, fungsi atenuasi yang digunakan adalah ASK14, BSSA14, CB14 dan CY14.

1) Persamaan GMPE Abrahamson, Silva dan Kamai (2014) NGA

Persamaan GMPE ASK14 dikembangkan oleh Norman Abrahamson, Walter Silva dan Ronnie Kamai dengan melakukan pengembangan dari penelitian PEER yang juga ditulis oleh (Abrahamson dkk., 2013). Terdapat beberapa pembaharuan yag mencakup 3 hal yaitu: (1) bentuk spektralnya tetap halus pada jarak yang pendek, (2) Perpindahan pada spektral mendatar pada periode panjang untuk magnitudo kecil, (3) Bentuk frekuensi tinggi tidak mengalami penurunan pada PGA hingga 300 km. Model ini mengunakan model regresi dengan menggunakan kumpulan data, termasuk M>3 dan Rrup<300 km

Model Untuk median ground motion

$$lnSa(g) = f_{1}(M, Rrup) + F_{RV}f_{7}(M) + F_{N}f_{8}(M) + F_{AS}f_{11}(CR_{jb}) + f_{5}(Sa_{1180}, V_{S30}) + F_{HW}f_{4}(R_{jb}, R_{rup}, R_{x}, R_{y0}, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_{6}(Z_{TOR}) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30}) + Regional(V_{S30}, R_{rup})$$
(2.27)

dengan,

M = Magnitudo momen

 CR_{jb} = Centroid R_{jb} (penjelasan pada gempa susulan bagian penskalaan dalam wooddell dan Abrahamson (2014)

 Z_{TOR} = Kedalaman dari puncak bidang rupture(Km)

- F_{RV} = 1 untuk 30° $\leq \lambda \leq 150^{\circ}$ dan F_{RV} =0 untuk yang lain (reverse dan reverseoblique)
- $F_N = 1$ untuk $-30^{\circ} \le \lambda \le -150^{\circ}$ dan $F_N = 0$ untuk yang lain (*normal faulting*)
- F_{AS} =1 untuk kelas 2, 0 untuk kelas 1 (*aftershocks*)

 R_{rup} = jarak terdekat ke bidang *rupture* (km)

- V_{S30} = kecepatan gelombang geser sampai kedalaman 30 m (m/s)
- Z_1 =Kedalaman hingga Vs=1.0 km/detik untuk *site* (m)
- Sa_{1180} = Spektral perceptaan puncak median (g) untuk V_{S30}=1180 m/s

F_{HW} = Hanging wall flag; 1 untuk lokasi pada patahan, 0 untuk yang lain. Batas

antara *footwall* dan *hanging wall* ditentukan oleh proyeksi vertikal pada bagian atas retakan. Untuk kemiringan 90°, $F_{HW}=0$

 R_{jb} = Jarak Joiner-Boore (km)

 R_x = Koordinat *site* (Km) tegak lurus terhadap *trace fault*

 R_{y0} = Jarak horizontal dari pengukuran *rupture* sejajar dengan *strike*

Dip= sudut lancip pada permukaan geologi dengan bidang horizontal (dalam derajat)

W=down-dip width dari bidang rupture (Km)

Model ini berlaku untuk jarak 0 – 300 km dan magnitude 3.0 - 8.5. Meskipun magnitude terbesar dalam kumpulan data NGA adalah M7.9 dianggap bahwa model tersebut dapat diekstrapolasi ke M8.5. Berkenaan dengan kondisi lokasi, model ini dianggap bisa diterapkan pada Vs₃₀ 180 m/s tetapi tidak dibatasi dengan baik untuk lokasi dengan Vs₃₀ 1000 m/s. Oleh karena itu, untuk kecepatan yang lebih tinggi, pertimbangkan untutk menyesuaikan bagian model dengan batasan yang lebih baik (misalnya Vs₃₀=760 m/s) menggunakan respons lokasi analitis.

2) Persamaan GMPE Boore, Stewart, Seyhan, dan Atkinson (2014) NGA

Persamaan BSSA14 dikembangkan oleh empat peneliti yaitu David M. Boore, Jonathan P. Stewart, Emel Seyhan, dan Gail M. Atkinson yang digunakan untuk gempa *fault* dan *shallow background*. Model regresi pada persamaan ini menggunakan data gerakan tanah yang memiliki rentang jarak antara 0 sampai dengan 400 km dengan magnitudo 3 sampai dengan 8.5 M untuk mekanisme kegempaan *strike-slip* dan *reverse-slip*. Sedangkan untuk mekanisme kegempaan normal-*slip* berkisar dari 3.5 sampai 7 M. Persamaan ini digunakan untuk kedalaman basin z_1 antara 0 sampai 3 km dengan nilai Vs₃₀ berada di rentang 150 sampai 1.500 m/s. Persamaan dan parameter dapat ditulis sebagai berikut. Fungsi F_E , F_P , dan F_S secara berurutan merupakan fungsi yang bergantung pada mekanisme sumber gempa, jarak sumber gempa, dan kondisi *site* (PUPR, 2017).

$$l_n Y = F_E(M, mech) + F_P(R_{IB}, M, region) + F_S(V_{S30}, R_{IB}, M, z_1) + \varepsilon_n \sigma(M, R_{IB}, V_{S30})$$
(2.28)

3) Persamaan GMPE Campbell-Bozorgnia (2014) NGA

Persamaan GMPE CB14 dikembangkan oleh Campbell-Bozorgnia pada tahun 2014 dan diberlakukan untuk sumber gempa yang berada pada area *shallow crustal* (*strike slip, reverse* dan gempa normal). Persamaan ini dikembangkan dengan model regresi dari data *strong-motion* yang dicatat diseluruh dunia. Menggunakan berbagai peristiwa gempa dengan magnitudo antara 3 sampai M_w = 7.9 Jarak sumber gempa yang dapat digunakan dengan persamaan ini maksimum 500 Km dengan jarak bidang *rupture* antara 0 sampai 80 Km.

$$lnY = \begin{cases} \ln PGA; & Y = PGA, T < 025\\ f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + fhyp_{hyp} + fdip_{fdip} + fattnf_{attn} \end{cases}$$
(2.29)

dengan,

 f_{mag} : fungsi yang nilainya bergantung pada besarnya magnitudo

- f_{dis} : fungsi kebergantungan pada sumber ke *site*
- f_{flt} : fungsi kebergantungan pada *style faulting*
- f_{hng} : fungsi kebergantungan pada efek hanging wall
- f_{site} : fungsi kebergantungan pada kondisi *site*
- f_{sed} : fungsi kebergantungan pada kondisi basin

- f_{hyp} : fungsi kebergantungan pada jarak hiposenter
- f_{dip} : fungsi kebergantungan pada sudut dip
- f_{attn} : fungsi kebergantungan pada *unelastic attenuation*

4) Persamaan GMPE Chiou-Youngs (2014) NGA

Persamaan ini digunakan untuk area *shallow crustal* (*strike slip, reverse*, dan gempa normal) yang diturunkan untuk percepatan tanah maksimum (PGA) dan *pseudo spectral acceleration* dengan nisbah redaman 5% dengan rentang periode dari 0.001-10 detik. Persamaan GMPE Chiou-Youngs (2014) NGA merupakan pengembangan dari persamaan Chiou-Youngs (2008) dengan tambahan informasi untuk pembuatan model koefisien, di mana jarak *rupture* yang digunakan hanya sampai dengan 70 km untuk menghindari bias. Persamaan ini diperoleh dari hasil pengolahan data pada tahun 2008 yang ditambah dengan data pencatatan sampai tahun 2013 yang berjumlah lebih dari 20.000 data dari 243 kejadian gempa di beberapa negara seperti California, Jepang, New Zealand, Taiwan, dan Turki dengan rentang magnitude antara 3.1 sampai 7.6 M_w. Persamaan GMPE ini dijabarkan sebagai berikut (Salsabil dkk., 2018).

$$\begin{split} n\left(y_{ref_{ij}}\right) &= c_1 + \left\{c_{1a} + \frac{c_{ic}}{\cosh\left(2\max(M_i - 4.5,0)\right)}\right\} F_{RVi} + \left\{c_{1b} + \frac{c_{1d}}{\cosh\left(2\max(M_i - 4.5,0)\right)}\right\} F_{NMi} + \left\{c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh\left(2\max(M_i - 4.5,0)\right)}\right\} \Delta Z_{TORi} + \left\{c_{11} + \frac{c_{11b}}{\cosh\left(2\max(M_i - 4.5,0)\right)}\right\} (\cos\delta_i)^2 + c_2(M_i - 6) + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln\left(1 + e^{C_n(C_M - M_i)}\right) + C_4 \ln\left(R_{RUPij} + C_5\cosh(C_6, \max(M_l - C_{HM}, 0))\right) + (C_{4a} - C_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUPij}^2 + C_{RB}^2}\right) + \left\{C_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh\left(\max(M_i - C_{\gamma 3}, 0)\right)}\right\} \cdot R_{RUPij} + \end{split}$$

$$c_{8}max\left(1-\frac{max(R_{RUPij}-40,0)}{30}\right)min\left(\frac{max(M_{i}-5.5,0)}{0.8},1\right)e^{-C_{8a}(M_{i}-C_{8b})}\Delta DPP_{ij}+c_{9}F_{HWij}cos\delta_{i}\cdot\left\{c_{9a}+(1-c_{9a})tanh\left(\frac{R_{RUPij}}{2}\right)\right\}\left\{1-\frac{\sqrt{R_{JBij}^{2}+Z_{TORi}^{2}}}{R_{RUPij}+1}\right\}$$
$$\ln\left(y_{ij}\right)=l_{n}\left(y_{ref_{ij}}\right)+\phi_{1}min\left(l_{n}\left(\frac{V_{530}}{1130}\right),0\right)+\phi_{2}\left\{e^{\phi_{8}(min\left(V_{s30j},1130\right)-360\right)}-c_{1}\right\}$$
$$e^{\phi_{8}(11360-360)}\left\{\cdot l_{n}\left(\frac{y_{ref_{ij}}e^{ni}+\phi_{4}}{\phi_{4}}\right)+\phi_{5}\left\{1-e^{-\Delta Z_{10j}/\phi_{6}}\right\}+\eta_{i}$$

dengan,

: magnitudo momen
: jarak terdekat ke bidang rupture (km)
: jarak Joiner-Boore (km)
: koordinat site (km) tegak lurus terhadap trace fault
: hanging wall flag; 1 untuk $RX > 0$ dan 0 untuk $RX < 0$
: sudut <i>dip rupture</i>
: kedalaman puncak <i>rupture</i> (km)
: 1 untuk $30^0 \leq \lambda \leq 150^0$ dan $F_{RV}=0$ untuk yang lain (reverse dan
reverse-oblique)
: 1 untuk -120° $\leq \lambda \leq$ -60° dan $F_{NM}=0$ untuk yang lain (normal dan
normal- <i>oblique</i>)
: kecepatan geser rata-rata untuk kedalaman tanah 30 m paling atas
(m/s)
: kedalaman dengan nilai kecepatan rambat gelombang geser 1 km/s
: nilai rata-rata Z _{1.0} untuk model spesifik California

DPP : *direct point* parameter untuk *directivity effect*

ΔDPP : nilai rata-rata DPP

II.7.2.3 Spectral Matching dan Ground Motion Time History Scaling

Analisis seismik yang digunakan untuk perancangan bangunan dan jembatan memerlukan penentuan beban seismik. Bergantung pada metode analisis, beban seismik dapat didefinisikan dalam bentuk spektrum respon desain yang representatif. Dalam perancangan fasilitas penting, untuk bangunan bertingkat tinggi dan struktur tidak beraturan, diperlukan analisis dinamik dan masukan beban seismik perlu didefinisikan dalam *Time History Acceleration* (Adekristi, 2013). Pada kenyataannya, data catatan gempa yang ada di Indonesia lebih banyak dalam bentuk informasi mengenai lokasi pusat gempa, magnitudo, kedalaman, dan mekanismenya, sedangkan data dalam bentuk riwayat waktu masih kurang. Hal ini disebabkan jumlah stasiun pencatat gempa di Indonesia yang masih sangat sedikit bila dibandingkan luas wilayah Indonesia. Alternatif solusi untuk hal tersebut adalah, menggunakan data riwayat waktu percepatan dari daerah yang memiliki kondisi geologi dan seismologi yang mendekati lokasi kajian.

Selanjutnya, perlu dilakukan analisis pergerakan tanah dengan penskalaan dari spectral target pada *site* yang dianalisis terhadap *time history* kejadian gempa yang memiliki kondisi sama dengan kondisi target (*Spectral Matching*). Selanjutnya, digunakan riwayat waktu percepatan (*ground motion time history scaling*) dari lokasi lain yang akan diskalakan sesuai dengan target parameter pergerakan batuan dasar (percepatan maksimum dan periode). Terakhir, kemudian membuat riwayat waktu percepatan sintetik yang disesuaikan dengan kondisi geologi dan seismologi

lokasi kajian (Harnindra dkk., 2017). Penskalaan *time history*/ sinyal dalam penelitian ini disesuaikan dengan gempa Palu 28 September 2018.

II.7.2.4 Parameter dinamik tanah

Parameter dinamik tanah diperlukan untuk melakukan analisis pada massa tanah yang mengalami beban dinamik seperti misalnya getaran akibat mesin, gelombang laut, ledakan kuat dan gempa. Karena sifat-sifat dinamik tanah bergantung kepada besarnya regangan, maka beberapa metode laboratorium maupun metode lapangan telah dikembangkan untuk mengantisipasi amplitudo regangan yang berbeda-beda. Beberapa parameter dinamis tanah antara lain, parameter static (*strength, deformation, etc.*), Modulus elastisitas, modulus geser, modulus young, *poisson's ratio, damping ratio,* dan *cyclic stress ratio*.

Analisis respon dinamik tanah sangat dipengaruhi oleh berat isi tanah, modulus geser dan *damping ratio*. Modulus geser terdiri atas dua jenis, yaitu modulus geser pada regangan kecil (<0.0001%, Gmax), modulus geser pada regangan besar (>0.0001% G). Nilai modulus geser berhubungan langsung dengan cepat rambat gelombang geser. *Damping ratio* (rasio redaman) merupakan salah satu indeks propertis tanah yang penting untuk memprediksi perilaku konstruksi bangunan yaitu berperan terhadap efektivitas isolasi dan disipasi beban getaran.

II.7.2.5 Analisis Rambatan Gempa (Metode Equivalen Linear dan Nonlinear) *Deepsoil* adalah program analisis respons situs satu dimensi yang dapat melakukan analisis domain waktu nonlinier 1-D dengan dan tanpa pembangkitan tekanan air pori, analisis domain frekuensi linier setara 1-D termasuk konvolusi dan dekonvolusi, dan analisis 1 -D waktu linier dan analisis domain frekuensi (Hashash, 2020).

Analisis perambatan gelombang gempa dapat dilakukan dengan dua cara yaitu menggunakan pendekatan ekivalen linear atau menggunakan metode nonlinear. Metode Ekivalen Linear menganalisis menggunakan domain frekuensi, sementara metode nonlinear menggunakan domain waktu. Kemudian, model ekivalen linear menggunakan prosedur iterasi untuk pemilihan modulus geser dan rasio redamannya (pendefinisiannya menggunakan titik-titik diskrit). Model Nonlinear dapat menggambarkan kondisi sesungguhnya di lapangan dengan mempertimbangkan kekakuan dari kondisi tanah aktual yang berubah sepanjang kejadian gempa yang menyebabkan kondisi amplifikasi yang sangat tinggi terjadi. Selain itu metode nonlinier dapat digunakan untuk memodelkan redistribusi atau dissipasi ekses tegangan air tanah selama dan setelah kejadian gempa bumi (Kramer, 1966).