SKRIPSI

STUDI RESPON SPEKTRUM GEMPA PADA KOTA MAMUJU MENGGUNAKAN METODE *NONLINEAR*

Disusun dan diajukan oleh:

RIZQHIE WIRYADIPUTRA SURYADI D011 19 1130



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN GOWA 2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI RESPON SPEKTRUM GEMPA PADA KOTA MAMUJU MENGGUNAKAN METODE NONLINEAR

Disusun dan diajukan oleh

RIZQHIE WIRYADIPUTRA SURYADI D011191130

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 20 November 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Ir. Ardy Arsyad, ST. M.Eng.Sc NIP. 197607072005011002



Ir. Ariningsih Suparti, ST, MT NIP. 197307122000032002



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;Nama: Rizqhie Wiryadiputra SuryadiNIM: D011 19 1130Program Studi: Teknik SipilJenjang: S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

"Studi Respon Spektrum Gempa Pada Kota Mamuju Menggunakan Metode Nonlinear"

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

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

Gowa, November 2024



ABSTRAK

RIZQHIE WIRYADIPUTRA SURYADI. Studi Respon Spektrum Gempa Pada Kota Mamuju Menggunakan Metode Nonlinear (dibimbing oleh Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST, M.Eng.Sc dan Ir. Ariningsih Suprapti, ST. MT)

Mamuju merupakan daerah di Pulau Sulawesi yang terkenal dengan risiko gempa bumi yang tinggi. Salah satu peristiwa gempa paling signifikan terjadi pada 15 Januari 2021 dengan magnitudo 6,2. Pusat gempa berada di 2.97 LS dan 118.99 BT kedalaman 21 kilometer dan di darat sekitar 6 kilometer timur laut Majene. Kondisi tanah Mamuju yang lunak dapat memperparah dampak gempa bumi, karena tanahnya cenderung labil dan kurang mampu menahan guncangan gempa. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan informasi ilmiah yang lebih baik tentang spektrum respons seismik berdasarkan kondisi tanah kota Mamuju. Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah metode NL (Nonlinear), dimana metode tersebut digunakan untuk mengetahui kondisi tanah sebenarnva vang digambarkan dalam bentuk dapat kurva dengan mempertimbangkan parameter tanah nonlinear di wilayah kota Mamuju.

Parameter yang diperoleh ialah data geoteknik berupa data SPT (*Standard Penetration Test*), data laboratorium, dan data MASW (*Multichannel Analysis Surface Waves*) dari geofisika, kemudian data tersebut di uji dengan *software* DEEPSOIL dengan metode Nonlinear untuk mendapatkan Analisis Respon Situs. Komponen data gempa yang di pakai di antara lainnya ialah data gempa wilayah Mamuju tahun 2021 seperti Komponen Horizontal East-West (HNE), Komponen North-South (HNN), dan Komponen Up-Down Vertical (HNZ) yang hasilnya akan di bandingkan dengan SNI 1726:2019.

Hasil dari perbandingan tersebut di dapatkan bahwa nilai PSA (*Peak Surface Acceleration*) untuk komponen Horizontal East-West (HNE) sebesar 0,822 g - 1,046 g pada periode 0,2 detik dan 1,695 g - 1,890 g pada periode 1 detik, untuk Komponen Horizontal North-South (HNN) sebesar 0,678 - 0,734 pada periode 0,2 detik dan 1,778 g - 1,886 gpada periode 1 detik, dan Komponen Up-Down Horizontal (HNZ) 1,066 g - 1,352 gpada periode 0,2 detik dan 1,502 - 1,610 pada periode 1 detik. Hasilnya diperoleh nilai percepatan spectral desain di bawah nilai percepatan spektral desain berdasarkan SNI 1726:2019 yaitu 0,88g.

Kata Kunci: Gempa Bumi, Mamuju, Analisis Respon Situs, Percepatan Spektra

ABSTRACT

RIZQHIE WIRYADIPUTRA SURYADI. Study of Seismic Site Response in Mamuju Using Nonlinear Method (supervised by Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST, M.Eng.Sc and Ir. Ariningsih Suprapti, ST. MT)

Mamuju is an area on the island of Sulawesi which is known for its high earthquake risk. One of the most significant earthquake events occurred on January 15, 2021 with a magnitude of 6.2. The epicenter was at 2.97 South Latitude and 118.99 East Longitude at a depth of 21 kilometers and on land about 6 kilometers northeast of Majene. The soft soil conditions of Mamuju can exacerbate the impact of earthquakes, because the soil tends to be unstable and less able to withstand earthquake shocks. The purpose of this study is to provide better scientific information about the seismic response spectrum based on the soil conditions of Mamuju city. In this study the method used is the NL (Nonlinear) method, where the method is used to determine the actual soil conditions which can be described in the form of a curve taking into account nonlinear soil parameters in the Mamuju city area.

The parameters obtained are geotechnical data in the form of SPT data (*Standard Penetration Test*), laboratory data, and MASW data (*Multichannel Analysis Surface Waves*) from geophysics, then the data is tested with *software* DEEPSOIL with the Nonlinear method to obtain Site Response Analysis. The earthquake data components used include earthquake data for the Mamuju region in 2021 such as the East-West Horizontal Component (HNE), the North-South Component (HNN), and the Up-Down Vertical Component (HNZ) whose results will be compared with SNI. 1726:2019.

The result of this comparison is that the PSA value (*Peak Surface Acceleration*) for the Horizontal East-West (HNE) component of 0.822 g - 1.046 g in a period of 0.2 seconds and 1.695 g - 1.890 g in a period of 1 second, for the Horizontal North-South Component (HNN) of 0.678 - 0.734 in a period of 0, 2 seconds and 1.778 g - 1.886 g in a 1 second period, and the Up-Down Horizontal Component (HNZ) 1.066 g - 1.352 g in a 0.2 second period and 1.502 - 1.610 in a 1 second period. The result is that the design spectral acceleration value is below the design spectral acceleration value based on SNI 1726:2019, which is 0.88 g.

Keywords: Earthquake, Mamuju, Site Response Analysis, Spectral Acceleration

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i	
PERNYATAAN KEASLIANii		
ABSTRAK	iii	
ABSTRACT	iv	
DAFTAR ISI	. v	
DAFTAR GAMBAR	vii	
DAFTAR TABEL	. x	
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xi	
DAFTAR LAMPIRAN	civ	
KATA PENGANTAR	xv	
BAB I PENDAHULUAN	. 1	
1.1 Latar Belakang	. 1	
1.2 Rumusan Masalah	. 3	
1.3 Tujuan Penelitian	. 3	
1.4 Manfaat Penelitian	. 3	
1.5 Ruang Lingkup	. 4	
1.6 Sistematika Penulisan	. 4	
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	. 6	
2.1 Gempa Bumi	. 6	
2.2 Sejarah Kegempaan Indonesia	. 6	
2.3 Kondisi Geologi dan Tektonik Sulawesi	. 9	
2.4 Sejarah Kegempaan Mamuju	11	
2.5 Local Site Effect	12	
2.6 Analisis Respon Situs terhadap gempa	13	
2.6.1 Analisis Respon Situs dengan Metode Non Linear	15	
2.7 DEEPSOIL		
2.7.1 Perkembangan DEEPSOIL 1		
2.8 Metode Perhitungan Respon Situs	20	
2.8.1 Frequency-domain solution	20	
2.8.2 Backbone Curves	20	
2.8.2.1 Hyperbolic / Pressure-Dependent Hyperbolic (MKZ)	20	
2.8.2.2 Generalized Quadratic/Hyperbolic (GQ/H) Model with Shear		
Strength Control	22	
2.8.3 Reference Curve	23	
2.8.3.1 Seed & Idris (1970)	23	
2.8.3.2 Darendeli (2001)		
2.8.4 Non-Masing Unload-Reload Rules	36	
2.8.4.1 MRDF-UIUC	37	
2.8.4.2 MRDF-Darendeli	37	
BAB 3 METODE PENELITIAN/PERANCANGAN	39	
3.1 Lokasi Penelitian	39	
3.2 Pengumpulan Data	39	
3.2.1 Data Penyelidikan Tanah	39	
3.2.2 Time History	41	

3.2.3 Data Kecepatan Gelombang Geser (Vs)	43
3.3 Klasifikasi Situs Tanah Berdasarkan SNI 1726:2019	46
3.4 Alat dan Bahan Yang Digunakan	49
3.5 Flow Chart	50
3.5 Penggunaan Aplikasi DEEPSOIL	51
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Time History	55
4.1.1 Komponen Horizontal East-West (HNE)	55
4.1.2 Komponen Horizontal North-South (HNN)	56
4.1.3 Komponen Up-Down Vertical (HNZ)	58
4.2 Respon Spectra	59
4.2.1 Komponen Horizontal East-West (HNE)	60
4.2.2 Komponen Horizontal North-South (HNN)	62
4.2.3 Komponen Up-Down Vertical (HNZ)	64
4.3 Profile Plots	67
4.3.1 Komponen Horizontal East-West (HNE)	67
4.3.2 Komponen Horizontal North-South (HNN)	68
4.3.3 Komponen Up-Down Vertical (HNZ)	69
4.4 Perbandingan dengan SNI 1726-2019	71
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	72
5.1 Kesimpulan	72
5.2 Saran	73
DAFTAR PUSTAKA	74
Lampiran	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Peta tektonik wilayah Indonesia dari data geodetic hingga tahun	
2016, (vektor kecepatan pada referensi system IIRF, dalam Iim	_
Pusat Studi Gempa Nasional, 2017)	7
Gambar 2. Gempa di Indonesia hasil relokasi hingga 2016 (Katalog PuSGen,	
dalam Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017)	8
Gambar 3. Peta sumber gempa Indonesia (Tim Revisi Peta Gempa Indonesia,	
2010). Diantaranya ialah Penamaan dari setiap sesar yang ada di	
Indonesia dan terlihat pergerakannya	8
Gambar 4. Grafik nilai indeks risiko Provinsi Sulawesi Barat dari Tahun 2015	
sampai dengan tahun 2021	9
Gambar 5. Peta guncangan (shakemap) gempa bumi Sulawesi Barat 15 Januari	
2021	11
Gambar 6. Proses pembiasan yang menghasilkan perambatan gelombang	
hampir vertikal di dekat permukaan tanah (Kramer, 1996)	. 14
Gambar 7. Software DEEPSOIL.	. 16
Gambar 8. Kurva histeresis hubungan tegangan regangan pada amplitude	
regangan berbeda	24
Gambar 9 Pengaruh dari berbagai faktor terhadan modulus geser pasir	
(berdasarkan Hardin dan Drnevich)	26
Gambar 10 Variasi modulus geser dengan regangan geser untuk nasir	27
Gambar 11 Pengaruh dari berbagai faktor terbadan rasio redaman pasir	21
(berdasarkan Hardin dan Drnevich)	28
Comber 12 Pasio rendomen untuk pasir	20
Cambar 12. Kasio rendalitali untuk pasii	29
material	27
Combar 14 Efal radio availagi rada (a) modulus radulainarmal dan (b)	32
Cambar 14. Elek fasio overkonsildasi pada (a) modulus reduksinormai dan (b)	^
Combon 15. Efiliar and a company of the second states of the second stat	. 33
Gambar 15. Elek jumian sikius pembebanan pada (a) modulus reduksinormal	24
dan (b) kurva redaman material	. 34
Gambar 16. Etek tekanan pembatas pada (a) modulus reduksi normaldan (b)	25
kurva redaman material	35
Gambar 17. Lokasi Penelitian Jalan Simboro, Kec. Simboro Dan Kepulauan,	• •
Kabupaten Mamuju, Sulawesi Barat (Google Earth)	. 39
Gambar 18. Borlog SPT	40
Gambar 19. Hasil Pengujian Laboratorium	41
Gambar 20. Time History Komponen HNE	42
Gambar 21. Time History Komponen HNN	42
Gambar 22. Time History Komponen HNZ	43
Gambar 23. Survei Pengujian MASW di Mamuju	44
Gambar 24. Survei Pengujian MASW di Mamuju	. 44
Gambar 25. Survei Pengujian MASW di Mamuju	. 45
Gambar 26. Data Kecepatan Gelombang Geser (Vs)	. 46
Gambar 27. Spektrum Respon Desain	. 49
Gambar 28. Flow Chart	50
Gambar 29. Select Jenis Analisis. (DEEPSOIL)	. 51

Gambar 30. Select Default Working Directory (DEEPSOIL)	. 52
Gambar 31. Tambahkan layer dan masukkan informasi yang di minta di tabel	
(DEEPSOIL)	. 52
Gambar 32. Masukkan informasi yang di butuhkan bedrock.(DEEPSOIL)	. 53
Gambar 33. Pilih input motion (DEEPSOIL)	. 53
Gambar 34 Click Plot (DEEPSOIL)	. 54
Gambar 35. Output Settings (DEEPSOIL)	. 54
Gambar 36. Time History Komponen HNE (Perbandingan antara kurva	
referensi Seed & Idriss (1970) Upper Limit, Mean, atau Lower	
Limit pada lapisan permukaan)	. 56
Gambar 37. <i>Time History</i> Komponen HNE (Perbandingan antara nilai Vs	
bedrock 700 m/s atau 2500 m/s)	56
Gambar 38. <i>Time History</i> Komponen HNN (Perbandingan antara kurva	
referensi Seed & Idriss (1970) Unner Limit Mean atau Lower	
Limit pada lapisan permukaan)	57
Gambar 30 Time History Komponen HNN (Perhandingan antara nilai Vs	
bedrock 700 m/s atau 2500 m/s)	50
Comber 40 Time History Komponen UNZ (Derbandingen entere laure	. 30
Calibar 40. Time History Komponen HNZ (reformuligan antara kuiva	
Limit node lenison normuleeen)	50
Limit pada tapisati permukaan)	. 39
Gambar 41. <i>Time History</i> Komponen HNZ (Perbandingan antara nilai vs	
$\frac{bearock}{100 \text{ m/s atau } 2500 \text{ m/s}}$. 39
Gambar 42. Response Spectra Komponen HNE (Perbandingan antarakurva	
referensi Seed & Idriss (1970) Upper Limit, Mean, atau Lower	(1
Limit pada lapısan permukaan)	. 61
Gambar 43. <i>Response Spectra</i> Komponen HNE (Perbandingan antara nilai Vs	
<i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	. 62
Gambar 44. Response Spectra Komponen HNN (Perbandingan antarakurva	
referensi Seed & Idriss (1970) Upper Limit, Mean, atau Lower	
Limit pada lapisan permukaan)	. 63
Gambar 45. Response Spectra Komponen HNN (Perbandingan antaranilai Vs	
<i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	. 64
Gambar 46. Response Spectra Komponen HNZ (Perbandingan antarakurva	
referensi Seed & Idriss (1970) Upper Limit, Mean, atau Lower	
Limit pada lapisan permukaan)	. 66
Gambar 47. Response Spectra Komponen HNZ (Perbandingan antaranilai Vs	
bedrock 700 m/s atau 2500 m/s)	. 66
Gambar 48. Profile Plots Komponen HNE (Perbandingan antara kurva	
referensi Seed & Idriss (1970) Unner Limit. Mean. atau Lower	
Limit pada lapisan permukaan)	67
Gambar 49 Profile Plots Komponen HNF (Perbandingan antara nilai Vs	
bedrock 700 m/s atau 2500 m/s)	68
Comber 50 Profile Plats Komponen HNN (Perhandingan antara laura	. 00
referenci Seed & Idriss (1070) Unner Limit Moon atom Lower	
Limit nada lanisan permukaan)	60
Combon 51 Ducto Dista Komponen IDN (Derbor Sincer et	. 09
badroak 700 m/a atou 2500 m/a)	(0)
<i>оеагоск 1</i> 00 m/s atau 2000 m/s)	. 69

Gambar 52. Profile Plots Komponen HNZ (Perbandingan antara kurva	
referensiSeed & Idriss (1970) Upper Limit, Mean, atau Lower	
<i>Limit</i> pada lapisan permukaan)7	70
Gambar 53. Profile Plots Komponen HNZ (Perbandingan antara nilai Vs	
<i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	70
Gambar 54. Perbandingan Respons Spektra Permukaan berdasarkan Gempa	
Mamuju 15 Januari 2021 dengan Respons Spektra Desain SNI	
1726:2019	71

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Sejarah bencana gempa bumi di Sulawesi Barat pada periode tahun	
1820 s.d 2021 10)
Tabel 2. Klasifikasi Situs Tanah SNI 1726:2019 40	5
Tabel 3. Koefisien Situs Fa	3
Tabel 4. Koefisien Situs Fv	3
Tabel 5. PGA dan Faktor Amplifikasi Komponen Horizontal East-West (HNE)	
	5
Tabel 6. PGA dan Faktor Amplifikasi Komponen Horizontal North-South	
(HNN)	1
Tabel 7. PGA dan Faktor Amplifikasi Komponen Up-Down Vertical (HNZ) 58	3
Tabel 8. PSA dan Faktor Amplifikasi Komponen Horizontal East-West (HNE)	
)
Tabel 9. PSA dan Faktor Amplifikasi Komponen Horizontal North-South	
(HNN)	2
Tabel 10. PSA dan Faktor Amplifikasi Komponen Up-Down Vertical (HNZ) 63	5
Tabel 6. PGA dan Faktor Amplifikasi Komponen Horizontal North-South (HNN)	7 3) 25

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
EQL	Elastic Equivalent Linear
NL	Non Linear
SPT	Standart Penetration Test
MASW	Multichannel Analysis Surface Waves
SA	Batuan keras
SB	Batuan
SC	Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak
SD	Tanah sedang
SE	Tanah lunak
SF	Tanah khusus yang membutuhkan investigasi
	geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-
	situs
HNE	Horizontal East-West
HNN	Horizontal North-South
HNZ	Up-Down Vertical
PGA	Peak Ground Acceleration (g)
PSA	Peak Spectral Acceleration (g)
MCE _R	Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted
Vs	Kecepatan gelombang geser (m/s)
Vs ₃₀	Kecepatan gelombang geser dari permukaan
	tanahhingga kedalaman 30 meter (m/s)
Ampv	Faktor amplifikasi
Т	Tegangan geser
σ_{v}	Tegangan vertikal efektif
σ_m '	Mean effective confining pressure (atm)
γ	Regangan geser (%)
γ _r	Regangan referensi (%)
Yeff	Regangan geser efektif (%)

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

G	Modulus geser
G _{max}	Modulus geser maksimum
G *	Modulus geser kompleks
G	Modulus geser normal
G _{max}	
$\phi_1 - \phi_5$	Parameter yang menghubungkan kurva modulus
	reduksi dengan tipe tanah dan pembebanan
$\phi_6 - \phi_{12}$	Parameter yang menghubungkan kurva redaman
	dengan tipe tanah dan pembebanan
£	Rasio redaman (%)
D _{min}	Jumlah siklus pembebanan
f	Frekuensi pembebanan
Ν	Jumlah siklus pembebanan
Т	Periode (s)
<i>G</i> _s	Spesific gravity
ω	Kadar air (%)
Ywet	Wet density (g/cm ³)
Ydry	Dry density (g/cm ³)
e	Void ratio
S	Degree of Saturation
LL	Liquid Limit (%)
PL	Plastic Limit (%)
PI	Plasticity Index (%)
OCR	Overconsolidation Ratio
С	<i>Cohesion</i> (kg/cm ²)
S _s	Percepatan batuan dasar pada periode pendek
<i>S</i> ₁	Percepatan batuan dasar pada periode 1 detik
SM _S	Parameter respons spektral percepatan pada periode
	pendek
SM ₁	Parameter respons spektral percepatan pada periode
	1 detik

 F_a Faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada
getaran periode pendek F_v Faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili
getaran periode 1 detik

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Profil Bor-log SPT	77
Lampiran 2 Data Pengujian Berat Jenis	78
Lampiran 3 Data Pengujian Berat Isi	79
Lampiran 4 Data Pengujian Batas-Batas Atterberg	80
Lampiran 5 Data Pengujian Triaksial	83

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas berkat, rahmat,karunia, dan izinnya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul "Studi Respons Spektrum Gempa pada Kota Mamuju Menggunakan Metode*Nonlinear*" sebagai salah satu syarat yang harus di penuhi untuk menyelesaikan studi di Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil UniversitasHassanuddin.

Penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak yang selalu mendukung dan memotivasi kepada penulis. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sebagai bentuk apresiasi penulis kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung dalamproses penggarapan tugas akhir ini, yaitu kepada:

- 1. Kedua orang tua tercinta, **Ayahanda Dr. Suryadi Lambali, MA** dan **Ibunda Dra. Dwikora Daud, MM** atas kasih sayang, doa, nasehat, dan segala dukungan kepada penulis.
- 2. Kedua Kakak tersayang, Ade Ciptapratama, S. KM dan Muhammad Rizal, S. IP., M.I.R. atas dukungan dan motivasi yang selalu di berikan kepada penulis.
- 3. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 4. **Bapak Prof. Dr. H. Muh. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dan Bapak **Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T., M.T.**, selaku Sekertaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 5. **Bapak Dr. Eng. Ardy Arsyad, S.T., M.Eng.Sc.,** selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk memberikan arahan serta bimbingan kepada penulis hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
- 6. **Ibu Ir.Ariningsih Suparti, S.T., MT.,** selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktu untuk memberikan arahan serta bimbingan kepada penulis hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
- 7. **Bapak Prof. Dr. Eng. Tri Harianto, S.T., M.T., IPU, AER** selaku Kepala Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
- 8. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 9. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 10. Teman-teman tim penelitian Tugas Akhir; **Mufidatul Azmi Kaharuddin, Yurinda Bintan Patandean,** dan **Ariyanti Herlota** yang telah berjuang bersama dan saling memberikan bantuan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

- 11. Teman-teman **KKD Geoteknik 2019**, yang selalu memberikan bantuan dan motivasi untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
- 12. Seluruh teman-teman **Teknik Sipil Angkatan 2019** selaku keluarga kedua yang memberikan warna yang begitu indah, kebersamaan yang tidak akan terlupakan, dukungan yang tiada henti, semangat, dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
- 13. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu dengan semua bantuan dan dukungan yang diberikan.
- 14. Dan yang terakhir, kepada diri saya sendiri, **Rizqhie Wiryadiputra Suryadi**, terima kasih sudah bertahan sejauh ini, terima kasih tetap berusaha sampai di titik ini, walau sering kali merasa putus asa atas apa yang diusahakan dan belum berhasil, namun terima kasih tetap menjadi seseorang yang selalu bangkit tanpa mengenal lelah untuk terus mencoba. Terima kasih karena telah memutuskan untuk tidak menyerah apapun proses yang telah di jalani selama penyusunan skripsi ini dan telah menyelesaikan sebaik dan semaksimal mungkin, ini merupakan pencapaian yang patut dirayakan untuk diri sendiri. Apapun kekurangan dan kelebihanmu, mari merayakan diri sendiri.

Pada penelitian ini, Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, karena itu saran dan kritik dari pembaca sangat diharapkan sebagai masukan untuk penulis kedepannya. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat tidak hanya bagi penulis namun kepada semua pembaca.

Gowa, November 2024

Penulis

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kabupaten Mamuju merupakan kabupaten yang terletak di provinsi Sulawesi Barat, Indonesia. Dimana Kabupaten Mamuju merupakan pusat pemerintahan sekaligus pusat administrasi dari provinsi Sulawesi Barat. Kota Mamuju secara geografis terletak di ujung barat Pulau Sulawesi. Di Utara terdapat Teluk Mamuju dan di Selatan terdapat Teluk Lebani. Topografi Kota Mamuju membentang dari pantai hingga pegunungan. Ketinggian kawasan perkotaan Mamuju berkisar antara 0 hingga 1.500 meter di atas permukaan laut (mdpl), dengan titik tertinggi di Gunung Adang Batambalo.

Berdasarkan kajian seismotektonik, Pulau Sulawesi dihimpit oleh Lempeng Eurasia, Indo-Australia, Pasifik, serta Lempeng Filipina yang mengakibatkan pulau Sulawesi sangat labil (Timbuleng,2020). Sedikitnya terdapat 9 elemen dan struktur tektonik di wilayah pulau Sulawesi yang dapat menyebabkan gempa bumi dan tsunami yaitu Tusukan Walanae, Tusukan Palu-Koro, Tusukan Matano-Lawanoppo, Tusukan Kolaka, Tusukan Paternoster, Tusukan Gorontalo, sesar naik Batui-Balantak, subduksi Lempeng Samudera Sulawesi, dan subduksi Lempeng Maluku. Daerah Mamuju merupakan salah satu wilayah yang mempunyai sesarsesar besar berhubungan langsung dengan arah sebaran pusat gunung api. Dimana hal itu menggambarkan bahwasanya daerah mamuju merupakan wilayah yang rawan akan gempa bumi. Beberapa gempa besar yang pernah terjadi di Daerah Mamuju dengan kekuatan > 6 SR yaitu gempa bumi pada tahun 1971, 1974, dan yang terbaru adalah gempa bumi pada tahun 2021 lalu dengan magnitudo 6,2 dimana pusat gempa berada pada koordinat 2.97 LS dan 118.99 BT di Timur Laut Majene pada kedalaman 21 km (BMKG,2021). Selain itu, gempa tektonik yang terjadi di Palu-Donggala juga mengguncang separuh Sulawesi termasuk Sulawesi Barat dengan magnitudo 7,7 dan episentrum yang berada pada 0.18 LS dan 119.85 BJ pada 2018 (BMKG,2018).

Getaran tanah yang kuat akibat gempa dapat menyebabkan kerusakan struktur yang serius karena mencakup area yang luas, sehingga perancangan bangunan dan analisis struktur dinamis penting untuk dilakukan, karena gerak permukaan tanah digunakan sebagai gerak input. Saat terjadi gempa, gelombang gempa pada batuan akan merambat secara vertikal ke permukaan tanah, dimana besar rambatan ini sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah. Secara geologi, sebagian besar Kota Mamuju secara geologis tersusun oleh batuan Formasi Vulkanik Adangi berupa tuff lapili, breksi bercampur lahar, batu pasir dan batu lumpur. Berada di atas endapan aluvium yang rawan terhadap patahan seismik dan cenderung memiliki efek amplifikasi (pembesaran) dan de-amplifikasi (penurunan) pada perambatan gelombang seismik.

Berdasarkan hal tersebut, perlu untuk dilakukan kajian studi respon spektrum pada Kota Mamuju untuk memberikan informasi ilmiah mengenai spektrum respon kegempaan berdasarkan kondisi tanahnya. Metode yang digunakan untuk menganilisis hal tersebut adalah metode NL (*Nonlinear*), dimana metode tersebut digunakan untuk mengetahui kondisi tanah sebenarnya yang dapat digambarkan dalam bentuk kurva dengan mempertimbangkan parameter tanah nonlinear.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah :

- 1. Bagaimana kondisi tanah pada titiklokasi penelitian berdasarkan data geoteknik dan geofisika?
- Bagaimana pengaruh tanah lokal terhadap amplifikasi gelombang gempa 15 januari 2021 M 6.2 di mamuju?
- Bagaimana perbandingan antara respons spektra permukaan pada lokasi penelitian berdasarkan metode analisis *Nonlinear* dengan respons spectra desain berdasarkan SNI 1726:2019?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

- Mengetahui kondisi tanah pada titik lokasi penelitian berdasarkan data geoteknik dan geofisika.
- Mengetahui pengaruh tanah lokal terhadap amplifikasi gelombang gempa 15 januari 2021 M 6.2 di mamuju.
- Mengetahui perbandingan antara respons spektra permukaan pada lokasi penelitian berdasarkan metode analisis *Nonlinear* dengan respons speKtra desain berdasarkan SNI 1726:2019.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun Manfaat dari penelitian ini antara lain :

- Nilai amplifikasi gempa berdasarkan jenis tanah dan kedalamannya dapat digunakan sebagai acuan dalam aturan tata ruang dan perencanaan bangunan tinggi yang aman terhadap getaran gempa di Mamuju.
- Sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya terkait analisis respons situs terhadap gempa.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pembahasan dari penelitian ini adalah :

- Data penyelidikan tanah berupa N-SPT dan data laboratorium merupakan data tanah mamuju pada titik penelitian tahun 2021.
- Data kecepetan gelombang geser (Vs) di dapatkan melalui survei lapangan Multichannel Analysis Surface Waves (MASW) Mamuju pada Maret 2023.
- Data gempa berupa *time history* gempa Mamuju pada 15 Januari 2021 yang direkam oleh BMKG.
- 4. Analisis respon situs dilakukan dengan metode *Nonlinear* menggunakan *software* DEEPSOIL (University of Illinois at Urbana-Champaign).

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan disusun agar penyusunan tugas akhir dapat lebih terarah dan sistematis pada inti permasalahan dan kerangka isi. Gambaran umum mengenai isi penelitian ini dapat di tuliskan sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Menjelaskan latar belakang penelitian ini dilakukan, rumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan penelitian.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Memaparkan teori-teori dasar dan tinjauan umum sehubungan dengan judul penulisan yaitu Studi Respon Spektrum Gempa pada Kota Mamuju Menggunakan Metode Non-linear.

BAB III : METODE PENELITIAN

Menerangkan teknis penelitian yang dilakukan serta cara pengolahan data hasil penelitian.

BAB IV : HASIL PEMBAHASAN

Menyajikan data hasil penelitian dan analisis data untuk mencapai hasil penelitian.

BAB V : PENUTUP

Menerangkan tentang kesimpulan hasil analisis data penelitian dan saran sebagai hasil pandangan penelitian yang diperlukan untuk penelitian lebih lanjut dari tugas akhir ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gempa Bumi

Gempa bumi merupakan bencana alam yang terjadi ketika pergerakan antara dua lempeng tektonik bergerak secara bersamaan. Pergerakan ini mengakibatkan getaran atau gesekan yang kuat pada lempeng tektonik, hal ini menimbulkan guncangan yang menghancurkan bangunan di permukaan bumi disertai suara keras akibat gempa bumi. Pergerakan antara kedua lempeng tektonik yang cepat maupun lambat dapat menimbulkan getaran yang disebut episentrum gempa. Gempa bumi juga di definisikan peristiwa kerusakan dan keruntuhan bangunan akibat gempa yang disebabkan oleh bangunan yang tidak dapat memprediksi gerakan tanah (ground motion) Peak Ground Acceleration (PGA) yang di akibatkannya. Besarnya getaran tanah yang disebabkan oleh gempa bumi dipengaruhi tiga hal, sumber gempa (source), jalur rambat gelombang (path), dan pengaruh kondisi tanah setempat (site). Jelas bahwa sumbernya adalah gempa besar dan dekat menyebabkan getaran tanah yang kuat. Hal yang sama berlaku untuk kondisi tanah setempat berupa endapan sedimen yang tebal dan lunak juga menimbulkan fenomena penguatan meningkatkan nilai getaran di permukaan.

2.2 Sejarah Kegempaan Indonesia

Indonesia memiliki risiko bencana yang tinggi karena letak geologis dan geografis negara ini. Kondisi tektonik Indonesia yang berada pada pertemuan lempeng-lempeng utama dunia dan beberapa lempeng atau *micro-block* yang lebih kecil membuat wilayah ini rawan terhadap banyak gempa bumi. Geologi Indonesia terletak di pertemuan empat lempeng utama yaitu di Eurasia, Indo-Australia, Filipina, dan Pasifik membuat Indonesia rentan terhadap bencana Gempa bumi.

Wilayah Indonesia berisiko tinggi terhadap gempa bumi. Pasalnya, seluruh wilayah Indonesia terletak pada "*Ring of Fire*" atau Cincin Api Pasifik yang aktif akibat pergerakan lempeng tektonik. Proses ini menimbulkan getaran dan menimbulkan ancaman gangguan jiwa dan kerusakan infrastruktur bangunan.

Dampak dari risiko tersebut dapat dikurangi sedini mungkin melalui penanganan bencana yang terkoordinasi dan akurat. Sebagai upaya untuk meminimalisir dampak gempa bumi di wilayah Indonesia, maka dibentuklah wadah kegiatan formal penanggulangan bencana dan penelitian yaitu Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN). PuSGeN mencakup kegiatan seismik yang melibatkan ilmuwan, peneliti dan pakar/profesional yang berkecimpung dalam ilmu dan teknologi seismik.

Studi lebih lanjut dengan menggunakan data geodetik, geologi dan seismologi menunjukkan bahwa tektonik Indonesia dapat dibagi menjadi beberapa lempeng kecil, yaitu Burma, Sunda, Laut Banda, Laut Maluku, Timor, Vogelkopf, Maoke dan Woodlark. (Gambar 1)



Sumber : Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

Gambar 1. Peta tektonik wilayah Indonesia dari data geodetic hingga tahun 2016, (vektor kecepatan pada referensi system ITRF, dalam Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017)

Akibat proses tektonik yang terjadi, gempa bumi sering terjadi di sebagian besar wilayah Indonesia, seperti terlihat pada (Gambar 2). Salah satu sumber gempa yang teridentifikasi dengan jelas adalah zona subduksi aktif di Indonesia bagian barat dan timur. Selain itu, energi yang tersisa dari proses tumbukan lempeng menyebabkan gangguan berupa sesar di darat maupun di laut di beberapa pulau dan





Sumber : Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

Gambar 2. Gempa di Indonesia hasil relokasi hingga 2016 (Katalog PuSGen, dalam Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017)



Sumber : Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

Gambar 3. Peta sumber gempa Indonesia (Tim Revisi Peta Gempa Indonesia, 2010). Diantaranya ialah Penamaan dari setiap sesar yang ada di Indonesia dan terlihat pergerakannya

2.3 Kondisi Geologi dan Tektonik Sulawesi

Letak geografis Provinsi Sulawesi Selatan berada pada 0° 12' - 3° 38' LS dan 118° 43' 15" – 119° 54' 3" BT, luas 16.787,18 km². Provinsi Sulawesi Barat terdiri dari 6 (enam) kabupaten, yaitu: daerah Majene, Polewali Mandar (Polman), Mamasa, Mamuju, Pasangkayu dan Mamuju Tengah. Topografi Provinsi Sulawesi Barat terdiri dari laut dalam, dataran rendah dan dataran tinggi dan bergununggunung dan kesuburannya tinggi, apalagi letaknya yang sangat strategis di persimpangan Segitiga Emas Sulawesi Selatan, Kalimantan Timur dan Sulawesi Tengah melalui pantai barat. Berdasarkan Indeks Risiko Bencana Indonesia (IRBI) 2021, indeks risiko Provinsi Sulawesi Barat sebesar 164,85 (tinggi). Seperti yang terlihat pada (Gambar 4).



Sumber : Indeks Resiko Bencana Indonesia (2021)

Gambar 4. Grafik nilai indeks risiko Provinsi Sulawesi Barat dari Tahun 2015 sampai dengan tahun 2021

Sejarah Kebencanaan mencatat bahwa bencana gempa bumi di Sulawesi Barat tanggal 15 Januari 2021 bukan pertama kalinya terjadi, setidaknya di Sulawesi Barat pernah terjadi gempa $M \ge 6$ skala Richter pada tahun 1820, 1969, 1976, 1984 ditunjukkan pada (Tabel 1). Pada tahun 1820 terjadi gempa bumi yang disertai tsunami di wilayah Makassar. Pada tanggal 11 April 1976 terjadi gempa di Polewali Mandar 6,3 SR yang menyebabkan tsunami dan 13 orang tewas. Pada tanggal 23 Februari 1969, gempa bermagnitudo 6,9 SR di kedalaman 13 kilometer mengakibatkan tsunami setinggi 4 meter hingga 100 meter bahkan menewaskan 64 orang dan hilang, 97 luka-luka, 1.287 rumah rusak di Kecamatan Malunda. Pada 8 Januari Tahun 1984 terjadi gempa bumi berkekuatan 6,7 skala Richter menyebabkan ratusan kematian di Kabupaten Majene dan Mamuju. Dan yang terakhir pada tanggal 15 Januari 2021, gempa berkekuatan 6,2 skala Richter terjadi di Mamuju mengakibatkan 46 kematian, 826 terluka dan sekitar 15.000 orang mengungsi di Kabupaten Majene dan Mamuju.

Tabel 1. Sejarah bencana gempa bumi di Sulawesi Barat pada periode tahun 1820 s.d 2021

Tahun	Jenis Bencana
1820	Gempa bumi disertai tsunami
23 Februari 1969	Gempa bumi disertai tsunami
11 April 1976	Gempa bumi disertai tsunami
8 Januari 1984	Gempa bumi
15 Januari 2021	Gempa bumi tidak berpotensi
	tsunami

Sumber : PENDIPA Jurnal of Science Education (2021)

Di tahun 2021 gempa bumi terjadi sebanyak 2 kali (besar) yaitu pada hari Kamis tanggal 14 Januari 2021 dengan gempa bermagnitudo 5.9 SR di kedalaman 10 km dengan lokasi: 2,99 LS, 118,89 BT (pusatnya berada di 4 km barat laut Majene). Keesokan harinya, Jumat, 15 Januari 2021 pada pukul 01:28:17 WIB kembali terjadi gempa dengan Magnitudo 6.2 SR pada kedalaman





Sumber : BMKG (2021)

2.4 Sejarah Kegempaan Mamuju

Mamuju adalah ibu kota provinsi Sulawesi Barat yang merupakan salah satu pusat pertumbuhan ekonomi, perdagangan, industri, pariwisata dan titik referensi untuk kota lainnya di Provinsi Sulawesi Barat. Mamuju merupakan area yang relatif sensitif terhadap gempa bumi, karena Mamuju dikelilingi sesar yang aktif, antara lain Sesar Makassar, yaitu terletak di bagian barat daya Kabupaten Mamuju, Termasuk sesar Walanae dan Lawanopo bagian tenggara, patahan Matano, yang berada di dalam timur, Sesar Poso, yang terletak di timur laut dan Sesar Palu Koro

Gambar 5. Peta guncangan (shakemap) gempa bumi Sulawesi Barat 15 Januari 2021

terletak di utara. Kabupaten Mamuju dan Mamuju Tengah adalah area seismik yang nilainya Peak ground boost hingga 463 galon (Harimelab, 2009).

Pada tanggal 14 Januari 2021 dengan gempa bermagnitudo 5.9 SR di kedalaman 10 km dengan lokasi: 2,99 LS, 118,89 BT (pusatnya berada di 4 km barat laut Majene). Kemudain disusul pada hari Jumat, 15 Januari 2021 pada pukul 01:28:17 WIB kembali terjadi gempa dengan Magnitudo 6.2 SR pada kedalaman 10 km berdasarkan lokasi: 2,98 S, 118,94 E. Dampak yang di berikan gempa bumi di Mamuju ini telah mengakibatkan kerusakan ratusan bangunan dan korban jiwa. Jumlah korban yang teridentifikasi di Kab. Majene yaitu 8 orang dan Kab. Mamuju 34 orang meninggal dunia. Total jumlah yang teridentifikasi di kedua kabupaten ialah 42 korban jiwa, luka berat yang teridentifikasi sebanyak 189 orang dan luka ringan berjumlah 637 orang. Jumlah pengungsi di Kab. Majene berjumlah \pm 15.000 orang mengungsi di beberapa titik pengungsian. Pada Juni 2020 potensi Jumlah Penduduk di Kabupaten Majene berjumlah 59.543 Jiwa, Kabupaten Mamuju berjumlah 144.377 Jiwa.

2.5 Local Site Effect

Daerah perkotaan dengan populasi besar pada sedimen lunak seperti contohnya lembah dan muara memiliki struktur tanah yang cenderung menjadi lebih kuat gelombang seismiknya (Bard, 1998). Respon tanah terhadap getaran tergantung pada komposisi tanah (Novianita, 2009). Tingkat kerusakan yang disebabkan oleh gempa bumi di tingkat lokal terpengaruh Intensitas, jarak ke pusat gempa, periode ulang, struktur dan litologi di bawah permukaan tanah. Dari berbagai macam gempa bumi yang merusak di dunia, di perlihatkan bahwa kerusakan yang terjadi di daerah dataran aluvial lebih merusak jika di bandingkan daerah perbukitan (Nakamura, 2000). Litologi lunak cenderung merespon periode getaran yang panjang (frekuensi rendah) dan sebaliknya. Dalam penelitian rekayasa kegempaan, batuan yang lebih lunak memiliki risiko lebih besar terguncang oleh gelombang seismik karena lebih kuat daripada batuan yang lebih padat. Fenomena ini sering disebut sebagai perkuatan tapak (site effect), mengingat respon tanah terhadap getaran bergantung pada komposisi tanahnya (Novianita, 2009).

Site effect di implementasikan sebagai transformasi dari karakteristik gelombang amplitudo, kandungan frekuensi dan durasi atas kondisi lapisan yang berada di bawah permukaan dengan topografi permukaan tanah. Karakteristik geologi di permukaan berperan penting dengan getaran seismik tanah (Sungkowo, 2016). Site effect akan terjadi apabila kontras impedansi antara lapisan tanah bawah permukaan dengan batuan dasar (bedrock). Site effect pada lapisan sedimen permukaan ditentukan dengan membandingkan faktor amplifikasi gerakan horizontal terhadap faktor amplifikasi dari gerakan vertikal (Daryono dkk, 2009).

2.6 Analisis Respon Situs terhadap gempa

Analisis Respon Situs (*Site Respon Analysis*) ialah metode menganalisis struktur secara dinamis dalam suatu model matematika struktural yang diterapkan pada spektrum dan desain *respons seismic*. Berdasarkan hal ini, respon spektral terhadap gerakan tanah dasar melalui beberapa getaran yang dapat digabungkan untuk membentuk satu getaran dari masing-masing variasi responsnya. Metode ragam Respon Situs digunakan untuk menghitung analisis struktur yang divisualkan kedalam bentuk kurva antara periode struktur dengan nilai percepatan bangunan ketika terdampak beban gempa.

Menurut Kramer (1996) Analisis respons tanah satu dimensi didasarkan pada asumsi bahwa semua batas adalah horizontal dan sebagian besar respons sedimen tanah disebabkan oleh gelombang yang menjalar secara vertikal dari batuan dasar di bawahnya. Analisis reaksi tanah satu dimensi mengasumsikan bahwa permukaan tanah dan batuan dasar memanjang secara horizontal hingga tak terhingga. Metode berdasarkan asumsi ini telah ditunjukkan untuk memprediksi respon tanah dari respon terukur dalam banyak kasus. Ketika patahan pecah di bawah permukaan bumi, gelombang tubuh merambat ke segala arah dari sumbernya. Ketika mereka mencapai batas antara bahan geologis yang berbeda, gelombang dipantulkan dan dibiaskan. Karena kecepatan perambatan gelombang dari material yang lebih dangkal biasanya lebih lambat dari pada material di bawahnya, sinar miring yang menumbuk batas lapisan horizontal biasanya dipantulkan secara vertikal. Ketika cahaya mencapai permukaan bumi, sering dibelokkan ke arah yang hampir vertikal oleh banyak pembiasan (Gambar 6).



Sumber : Kramer (1996)

Gambar 6. Proses pembiasan yang menghasilkan perambatan gelombang hampir vertikal di dekat permukaan tanah (Kramer, 1996)

Analisis respons situs sudah memasuki perencanaan geoteknik pada awal 1970-an dengan pengembangan SHAKE. Dalam beberapa tahun terakhir, program respons situs lainnya telah tersedia, seperti QUAD-4 dan FLUSH. Analisis respons situs non-linier tersedia segera setelah SHAKE dengan kode seperti CHARSOIL, DESRA, dan MASH. Penggunaan kode-kode ini harus dilihat dalam konteks peralatan komputer yang tersedia, kode dikembangkan dan diterjemahkan pada komputer mainframe, masukan biasanya melalui kartu berlubang dan keluaran berupa angka yang dicetak pada lembaran kertas besar yang dilipat. Melakukan analisis biasanya melibatkan mengemudi ke pusat data, menulis file input (diformat penuh) ke kartu berlubang, menjalankan input melalui pembaca kartu, menunggu beberapa jam (jika tidak dalam semalam) untuk menyelesaikan tugas, dan merencanakan secara manual berkas data. Hasil pada kertas grafik. Analisis respons jaringan menjadi lebih mudah dengan perangkat input/output yang lebih baik, bahkan lebih mudah dengan munculnya komputer pribadi, dan bahkan lebih mudah dengan pengembangan antarmuka pengguna grafis. Pada awal tahun 1980 Kompiler Fortran memungkinkan untuk mem-porting setidaknya program respons situs satu dimensi dari mainframe ke PC, dengan program analisis multidimensi di kemudian hari. Kode respons situs berbasis Windows sekarang tersedia dengan templat model tanah terintegrasi dan kemampuan grafis yang kaya untuk memplot jumlah input dan output (Kramer dkk, 2004).

2.6.1 Analisis Respon Situs dengan Metode Non Linear

Analisis Nonlinier (NL) memecahkan persamaan gerak dalam domain waktu menggunakan metode β Newmark (implisit) atau metode Heun (eksplisit). Alasan utama untuk menggunakan pendekatan linier adalah bahwa pendekatan ini nyaman secara komputasi dan memberikan hasil yang masuk akal dalam beberapa kasus praktis (Kramer 1996). Namun, dalam rekayasa geoteknik, perilaku tanah nonlinier dan inelastis sudah mapan. Perilaku tegangan-regangan tanah yang tidak linier dalam analisis dinamik berarti bahwa modulus geser tanah selalu berubah. Inelastis berarti bahwa tanah dibongkar di sepanjang jalur yang berbeda dari jalur beban dan energi dihamburkan pada titik kontak antar partikel. Analisis domain waktu dan domain frekuensi digunakan untuk menjelaskan efek nonlinier dalam masalah respons situs. Analisis satu dimensi perambatan gelombang geser pada media tanah bertingkat menggunakan metode linier nonlinier dan ekivalen dalam domain waktu dan frekuensi. Dibandingkan dengan pengamatan seismik, analisis nonlinier lebih cocok dengan rekaman yang diamati daripada analisis linier ekuivalen. (Kramer 1996) mengembangkan pendekatan nonlinear. Ini karena hubungan teganganregangan nonlinear dan inelastis dilacak dalam serangkaian langkah linier inkremental kecil. Media tanah dibagi menjadi sublapisan, perpindahan mutlak uj didefinisikan pada sublapisan ke-j (antarmuka) dan tegangan geser sj didefinisikan pada titik tengah setiap antarmuka. Seperti dijelaskan oleh (Kramer 1996), perilaku tiang pancang tanah di bawah pembebanan dinamis diatur oleh persamaan gerak.

Metode Nonlinear menyimpulkan tegangan-regangan histeretik reaksi tanah. Metode Nonlinear mampu menunjukkan perilaku tanah yang akurat dan realistis daripada metode Elastic Equivalen Linear. Profil tanah dimodelkan dengan massa yang disamakan. Profil tanah dapat dimodelkan dengan menggunakan lumped mass, pendekatan massa yang disamakan adalah lapisan tanah terhubung ke massa nodal yang berdekatan. Gerakan seismic diterapkan di dasar lubang bor dan persamaan mekanik integrasi gerak menggunakan metode Newmark-β untuk menghitung respon lapisan tanah. Model serupa dapat dibangun menggunakan elemen hingga program menggunakan jenis elemen dan material yang tersedia model. Model bahan histeretik adalah ditandai dengan kurva tulang punggung, dan satu set aturan histeresis. Dasar profil tanah dapat dimodelkan sebagai batas transmisi atau refleksi. Itu tergantung pada jenis input gerakan tanah dan rasio impedansi di dasar profil tanah. Batas transmisi kondisi diterapkan dengan pemodelan batuan dasar menggunakan peredam kental yang menyerap energi radiasi, dan gerakan tanah input diterapkan sebagai riwayat geser kekuatan (Lysmer, 1978). Batas refleksi kondisi dimodelkan dengan menerapkan input secara langsung rangkaian waktu akselerasi di pangkalan.

2.7 DEEPSOIL



Gambar 7. Software DEEPSOIL

DEEPSOIL merupakan 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 ekuivalen 1-D termasuk konvolusi dan dekonvolusi, dan 1 -D analisis domain waktu dan frekuensi linier. DEEPSOIL dikembangkan di bawah arahan Prof. Youssef M.A. Hashash bekerja sama dengan beberapa mahasiswa pascasarjana dan sarjana termasuk Duhee Park, Chi-Chin Tsai, Camilo Phillips, David R. Groholski, Daniel Turner, Michael Musgrove, Byungmin Kim dan Joseph Harmon, Okan Ilhan, dan Guangchao Xing di Universitas Illinois di Urbana-Champaign. Manual ini dikembangkan bekerja sama dengan para siswa ini serta Maria Kontari dan Hua Shao.

DEEPSOIL telah dikembangkan di UIUC sejak tahun 1998. Motif di balik pengembangan DEEPSOIL adalah untuk membuat analisis respon situs mudah diakses oleh mahasiswa, peneliti dan insinyur di seluruh dunia dan untuk mendukung kegiatan penelitian di UIUC. Penggunaan DEEPSOIL bisa digunakan untuk melakukan analisis Equivalent Linear (EL) bersama dengan analisis respons situs NonLinear (NL). DEEPSOIL memungkinkan pengguna memperoleh hasil analisis EL secara otomatis saat analisis NL dipilih, tanpa profil EL terpisah.

2.7.1 Perkembangan DEEPSOIL

DEEPSOIL awalnya dikembangkan pada Tahun 1998 sampai 1999 sebagai program MATLAB dan kemudian di sekitar Tahun 1999 di tingkatkan ke program berbasis C untuk meningkatkan efisiensi komputasi. Berikut adalah beberapa versi perkembangan aplikasi DEEPSOIL:

• DEEPSOIL v1.0:

Versi pertama DEEPSOIL dengan fungsi analisis linier setara dan model hiperbolik bergantung tekanan baru untuk analisis nonlinier. Kemampuan linier yang sesuai didasarkan pada karya perintis Idriss dan Seed (1968) dan Seed dan Idriss (1970) yang disajikan dalam program SHAKE yang banyak digunakan (Schnabel et al., 1972) dan versi terbarunya SHAKE91 (Idriss dan Matahari, 1992). Model hiperbolik bergantung tekanan baru dari Park dan Hashash (2001) digunakan dalam analisis nonlinear. Model ini memperluas model hiperbolik yang disajikan oleh Matasovic (1992) dan digunakan dalam kode respons situs D-MOD nonlinier, yang pada gilirannya merupakan modifikasi dari model hiperbolik yang diusulkan oleh Konder dan Zelasko (1963). Lee dan Finn (1975, 1978) sebelumnya menggunakan model hiperbolik dengan kriteria serupa pada program DESRA. Model hiperbolik awalnya diusulkan oleh Duncan dan Chang (1970) dan digunakan dalam karya lain seperti Hardin dan Drnevich (1972) dan Finn et al (1977).

• DEEPSOIL v2.0-2.6:

Di DEEPSOIL (Hashash and Park, 2002; Park and Hashash, 2004) memperkenalkan versi Rayleigh yang lengkap dan diperluas dengan *user interface*. Ini sebagian didasarkan pada temuan Clough dan Penzien (1993) dan Hudson et al. (1994) diimplementasikan dalam program QUAD4-M. Pengembangan dan modifikasi tambahan dilakukan di DEEPSOIL dan sangat diuntungkan dari proyek PEER Lifeline "Benchmark for Nonlinear Ground Response Analysis Procedures (PEER 2G02)".

• DEEPSOIL v3.0-3.7:

Peningkatan lebih lanjut telah dilakukan pada *user interface* dan kemampuan untuk menghasilkan/mengurangi tekanan air pori. Model tekanan pori yang saat ini digunakan termasuk model yang sama yang diperkenalkan oleh Matasovic (1992), Matasovic dan Vucetic (1993, 1995) dan digunakan dalam program D_MOD. Model disipasi saat ini yang digunakan dalam DEEPSOIL didasarkan pada pertimbangan FDM.

• DEEPSOIL v3.5:

Model konstitutif baru untuk tanah telah diperkenalkan untuk secara signifikan meningkatkan kecocokan kurva reduksi modulus target dan kurva redaman (Phillips dan Hashash, 2008). Sebuah fitur baru diimplementasikan dalam antarmuka pengguna, yang memungkinkan pengguna untuk secara otomatis menghasilkan parameter model hiperboliknya menggunakan berbagai metode (Phillips dan Hashash, 2008).

• DEEPSOIL v3.7:

Model pembangkitan tekanan air pori baru untuk pasir, model GMP (Green et al., 2000), telah ditambahkan dengan berbagai peningkatan antarmuka pengguna dan kemampuan untuk mengekspor data keluaran ke file Microsoft Excel.

• DEEPSOIL v4.0:

User interface DEEPSOIL telah sepenuhnya ditulis ulang. DEEPSOIL sekarang memiliki kemampuan multi-core secara signifikan mempercepat jalannya analisis mode batch, Menambahkan pengelola pembaruan untuk memberi tahu pengguna saat versi terbaru DEEPSOIL tersedia, Menambahkan prosesor gerak dan konverter gerak PEER.

• DEEPSOIL v5.0:

Memperbarui DEEPSOIL UI dan *Calculator*. Pengenalan jendela properti dinamis baru yang sangat meningkatkan kegunaan, Versi pertama DEEPSOIL yang secara native mendukung Windows 64-bit. Hal ini membuat analisis lebih cepat dan memungkinkan pergerakan yang sangat panjang.

• DEEPSOIL v6.0:

DEEPSOIL calculator dan *user interface* telah sepenuhnya ditulis ulang dari awal, menghasilkan perangkat lunak yang jauh lebih cepat. Banyak fitur baru telah diperkenalkan dan alur kerja analitik baru telah diperkenalkan.

• DEEPSOIL v6.1:

Model GQ/H Nonlinear telah ditambahkan ke DEEPSOIL, memungkinkan pengguna menentukan kekuatan tanah dalam model hiperbolik umum.

• DEEPSOIL v7.0:

Dan yang dipakai pada penelitian ini Versi 7.0, Versi terbaru *software* DEEPSOIL, meninjau aliran program dan menambahkan fungsi baru. Pembaruan utama dalam versi 7.0 di antaranya adalah pembagian profil tanah input secara otomatis untuk mencapai diskritisasi yang tepat berdasarkan frekuensi target propagasi maksimum, kemampuan untuk melakukan ketebalan lapisan, kecepatan gelombang geser dan pengacakan kurva dinamis dari profil tanah, output dalam format basis data relasional sehingga memungkinkan pengguna untuk mengambil data dalam jumlah besar secara efisien, *user interface* yang didesain ulang, pilihan beberapa bahasa pengguna, tampilan/tampilan simultan dari beberapa gerakan.

2.8 Metode Perhitungan Respon Situs

2.8.1 Frequency-domain solution

Di dalam Frequency domain solution, gerakan input *Fourier Amplitude Spectrum* (FAS) dimodifikasi oleh fungsi transfer yang didefinisikan berdasarkan Chopra (1995) dalam Hashash et al. (2020) :

$$H(f) = \frac{-f_{n^2}}{(f^2 - f_{n^2}) - 2i\xi f f_n}$$
(1)

Yang di mana f_n merupakan frekuensi alami osilator yang dihitung sebagai $f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$ dan ξ adalah damping ratio di hitung sebagai $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ Menggunakan frequency domain solution memerlukan pengalihan FFT (*Fast Fourier Transform*) antara domain frekuensi, tempat fungsi transfer osilator diterapkan, dan domain waktu, tempat respons puncak osilator diperkirakan. Dalam domain frekuensi gerakan tanah, solusi domain frekuensi akurat.

2.8.2 Backbone Curves

2.8.2.1 Hyperbolic / Pressure-Dependent Hyperbolic (MKZ)

DEEPSOIL berisi model hiperbolik yang bergantung pada tekanan. Model hiperbolik yang dimodifikasi yang dikembangkan oleh Matasovic (1993) didasarkan pada model hiperbolik oleh Konder dan Zelasko (1963) tetapi menambahkan dua parameter tambahan beta (β) dan s yang menyesuaikan bentuk Backbone Curves (Hashash et al., 2020) :

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta (\frac{\gamma}{\gamma_r})^s} \tag{2}$$

Yang dimana

 G_0 = modulus geser awal,

 τ = kekuatan geser,

 γ = regangan geser.

Beta, s, dan γ_r masing-masing adalah parameter model. Tidak ada korelasi antara tekanan kritis dan tegangan geser. Aplikasi DEEPSOIL memperluas model untuk memungkinkan pengikatan dengan membuatnya bergantung pada tekanan kurungan γ_r (Hashash et al., 2020).

$$\gamma_r = Reference \, Strain \, \left(\frac{\sigma'_v}{Reference \, Stress}\right)^b \tag{3}$$

di mana $\sigma v'$ adalah tegangan normal efektif. Tegangan referensi adalah tegangan efektif normal di mana $\gamma_r = Ref Stress$. Model ini disebut "model hiperbolik yang bergantung pada tekanan". Model hiperbolik termodifikasi yang bergantung pada tekanan hampir linier pada regangan kecil dan memiliki redaman histeresis nol pada regangan kecil. Peredam regangan kecil harus ditambahkan secara terpisah untuk mensimulasikan perilaku tanah yang sebenarnya. Ini menunjukkan pelemahan bahkan pada regangan yang sangat kecil (Hashash dan Park, 2001). Redaman regangan kecil didefinisikan sebagai (Hashash et al., 2020):

$$\xi = \text{Small Strain Damping Ratio} \left(\frac{1}{\sigma'_{\nu}}\right)^{a}$$
(4)

Di sini, d dapat diatur ke nol jika regangan rendah, redaman bebas tekanan diinginkan.

2.8.2.2 Generalized Quadratic/Hyperbolic (GQ/H) Model with Shear Strength Control

Menurut Darendeli (2001), kurva kekuatan geser-regangan geser dibuat berdasarkan data yang diperoleh secara eksperimen. Pada regangan kecil, data dikumpulkan menggunakan uji kolom resonansi, dan pada regangan geser menengah, hasil uji geser puntir digunakan. Nilai diekstrapolasi ke tingkat regangan besar. Ekstrapolasi ini dapat menyebabkan underestimasi atau overestimasi kekuatan geser pada regangan besar. Oleh karena itu, koreksi kekuatan geser diperlukan untuk memperhitungkan kekuatan geser yang benar pada regangan besar (Phillips dan Hashash 2009). Model kuadratik/hiperbolik umum yang diusulkan oleh (Groholski et al. 2016) mencakup kurva referensi (mirip dengan Darendeli (2001)) berisi skema pemasangan kurva yang secara otomatis mengoreksi . Parameter pemasangan kurva θ_1 hingga θ_5 digunakan untuk mempertahankan kurva reduksi modulus yang diperoleh dari studi referensi sebanyak mungkin dan mengoreksi nilai regangan besar berdasarkan kekuatan geser tarik besar yang dilaporkan. Model material menggunakan τ_{max} , G_0 , dan θ_1 hingga θ_5 untuk membangun kurva kekuatan geser - regangan geser menggunakan fungsi berikut (Groholski et al, 2016):

$$\theta_{\tau} = \theta_1 + \theta_2 \times \frac{\theta_4 \times (\frac{\gamma}{\gamma_r})^{\theta_5}}{\theta_3^{\theta_5} + \theta_4 \times (\frac{\gamma}{\gamma_r})^{\theta_5}}$$
(5)

Di mana γ_r adalah regangan referensi dan dihitung sebagai berikut: $\gamma_r = \tau_{max}/G_0$. Setelah θ_{τ} ditentukan, kurva kekuatan geser-regangan geser dibangun sebagai berikut:

$$\tau = \tau_{max} \times \left[\frac{1}{\theta_r} \times \left\{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) - \sqrt{\left\{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}\right\}^2 - 4 \times \theta_\tau \times \frac{\gamma}{\gamma_r}\right\}}\right]$$
(6)

2.8.3 Reference Curve

2.8.3.1 Seed & Idris (1970)

Studi modulus tanah dan faktor redaman untuk analisis respon dinamis dilakukan oleh Seed & Idriss (1970). Studi tersebut menyimpulkan bahwa pada respon tanah yang tidak melibatkan perpindahan tanah sisa, respon utama ditentukan oleh modulus geser dan sifat redaman tanah dalam situasi pembebanan siklik simetris. Sebagian besar lantai menunjukkan hubungan tegangan-regangan dalam bentuk kurva linier, seperti yang ditunjukkan pada (Gambar 8). Modulus geser biasanya dinyatakan dalam modulus garis potong yang ditentukan oleh titik ekstrim loop histeresis, di mana faktor redaman adalah proporsional ke area dalam loop histeresis. Modulus geser dan faktor redaman ini bergantung pada jumlah tegangan yang ditentukan oleh loop histeresis. Dengan demikian, modulus geser dan koefisien redaman ditentukan sebagai fungsi dari regangan yang diinduksi dalam sampel tanah.



Sumber : Seed & Idris (1970)Gambar 8. Kurva histeresis hubungan tegangan regangan pada amplitude regangan berbeda

Penelitian sebelumnya Hardin dan Drnevich (1970) telah melakukan kajian yang komprehensif mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi koefisien geser tanah dan koefisien redaman. Studi ini menjelaskan bahwa faktor utama yang mempengaruhi modulus geser dan faktor redaman adalah: amplitudo tegangan (γ), tegangan utama rata-rata efektif (σ 'm), rasio pori (e), jumlah siklus pembebanan (N), dan derajat kejenuhan tanah kohesif (S). Sementara itu, ada faktor lain yang tidak terlalu signifikan, seperti: tegangan geser oktahedral, overconsolidation ratio (OCR), parameter tegangan tarik efektif (c' dan ϕ ') dan faktor waktu.

Sebuah hubungan ditunjukkan untuk menentukan nilai geser maksimum modulus (pada dasarnya pada regangan nol) dan perubahan modulus muat nilai untuk semua jenis tanah dapat menggunakan persamaan berdasarkan Hardin and Drnevich (1970) dalam Seed and Idriss (1970):

$$G_{max} = 14760 \times \frac{(2,973-e)^2}{1+e} (OCR)^a (\sigma'_m)^{\frac{1}{2}}$$
(7)

Yang dimana,

G_{max} = modulus geser maksimum (psf),

e = void ratio,

OCR = overconsolidation ratio,

a = parameter yang bergantung pada indeks plastisitas tanah,

 σ'_{m} = mean principal effective stress (psf).

Penyelidikan Seed & Idris (1970) menunjukkan nilai modulus elastisitas yang kuat untuk pasir. Hal tersebut diipengaruhi oleh tekanan kritis, amplitudo regangan dan porositas (atau berat jenis), tetapi tidak terlalu terpengaruh oleh perubahan ukuran partikel properti, biasanya modulus geser dan tekanan kritis dihubungkan dengan persamaan (Seed and Idriss, 1970):

$$G = 100 K_2(\sigma'_m)^{\frac{1}{2}}$$
(8)

sehingga pengaruh void ratio dan amplitudo regangan dapat diekspresikan melalui pengaruhnya terhadap parameter K2.

Pengaruh faktor lain terhadap K2 dapat dijelaskan sebagai berikut. (Gambar 9) hasil dihitung menggunakan hubungan yang diusulkan oleh Hardin dan Dornevich. Sebuah diagram yang menunjukkan ϕ ', tegangan vertikal efektif (σ '_v), K₀, dan *void ratio* pada perhitungan hubungan antara K₂ dan amplitudo regangan dapat kita lihat bahwa:

- a) Pada regangan yang sangat rendah (γ ≤ 10⁻³ persen), K₂ hanya bergantung pada *void ratio* (e).
- b) Pada regangan menengah $(10^{-3} < \gamma < 10^{-1} \text{ persen})$ variasi K₂ dengan regangan hanya sedikit dipengaruhi oleh *vertical stress*, dan sangat sedikitoleh variasi ϕ ' dan K₀. Namun, nilai K₂ masih sangat dipengaruhi oleh *void ratio*.
- c) Pada regangan yang sangat tinggi ($\gamma > 10^{-1}$ persen), nilai K₂ sedikit dipengaruhi oleh *vertical stress* tetapi pada dasarnya tidak bergantung pada K₀, ϕ ' dan e.

Oleh karena itu, untuk alasan praktis dipertimbangkan untuk ditentukan terutama oleh *void ratio* atau kerapatan relatif dan amplitudo regangan dari pergerakan.



Sumber : Seed & Idris (1970)

Gambar 9. Pengaruh dari berbagai faktor terhadap modulus geser pasir (berdasarkan Hardin dan Drnevich)

Berdasarkan beberapa data dari uji laboratorium, hubungan antara faktorfaktor ini dapat ditetapkan. Dapat disimpulkan bahwa dengan pendekatan ini,



(Gambar 10) dapat menunjukkan hubungan antara modulus dan tegangan geser pada tegangan sangat rendah di pasir.

Menyelidiki faktor-faktor yang mempengaruhi rasio redaman pasir, Hardin dan Drnevich menyimpulkan bahwa tegangan utama rata-rata efektif (atau σ'_v dan K₀), rasio pori dan jumlah siklus sangat penting, sedangkan geser oktahedral menekankan sudut gesekan dan derajat kejenuhan memiliki pengaruh yang lebih kecil. Seperti penentuan modulus, pengaruh variasi ukuran butir dianggap relatif tidak signifikan.

Menghitung dampak dari faktor-faktor di atas terhadap hubungan itu ditentukan antara rasio redaman dan amplitudo regangan. Hal tersebut di tunjukkan Hardin dan Drnevich pada (Gambar 11). Jelas bahwa σ' , K₀, rasio pori dan derajat kejenuhan relatif kecil dapat ditemukan dari persamaan untuk rasio redaman maksimum (Seed and Idriss, 1970):

$$\lambda_{max} = 30 - 1.5 \log_{10} N \tag{9}$$

Jika nilai λ ditentukan untuk kira-kira N=5 siklus, nilai untuk siklus lainnya antara 5 dan 30 tidak berbeda secara signifikan. Oleh karena itu, faktor utama yang

Sumber : Seed & Idris (1970) Gambar 10. Variasi modulus geser dengan regangan geser untuk pasir



mempengaruhi hubungan rasio redaman dan tegangan geser adalah tekanan pengekang vertikal (σ 'v).

Sumber : Seed & Idris (1970)

Gambar 11. Pengaruh dari berbagai faktor terhadap rasio redaman pasir (berdasarkan Hardin dan Drnevich)

Dari penelitian sebelumnya tentang rasio redaman pasir, hasil penelitian ini dirangkum dalam (Gambar 12). Perkiraan rasio atas dan bawah ditunjukkan oleh garis putus-putus dan rasio rata-rata semua data uji ditunjukkan oleh garis utuh. Dengan rasio rata-rata ini, nilai rasio redaman dapat ditentukan dengan akurasi yang cukup. Kurva pada (Gambar 10) dan (Gambar 12) juga memberikan dasar untuk memperkirakan hubungan antara atenuasi dan rasio tegangan untuk pasir tertentu, dibatasi oleh data uji yang tersedia. Jika nilai indeks redaman ditentukan pada tingkat tegangan 0,1 sampai 0,5 persen, seseorang dapat memperkirakan kemungkinan redaman pada beban lain dengan menarik garis melalui titik data yang mungkin sejajar dengan kurva.



Sumber : Seed & Idris (1970)

Gambar 12. Rasio rendaman untuk pasir

2.8.3.2 Darendeli (2001)

Darendeli (2001) memprediksi perilaku tanah nonlinier menggunakan model terkalibrasi dalam studinya tentang pengembangan modulus tereduksi dan kurva redaman. Karena prediksi didasarkan pada model yang dikalibrasi menggunakan semua data yang kredibel, efek dari beberapa parameter tanah seperti geologi, kehalusan partikel, ukuran partikel, kekakuan partikel, dan lainlain, diabaikan dalam model tersebut. Satu-satunya indikator karakteristik tanah yang digunakan untuk mengevaluasi perilaku nonlinier adalah indeks plastisitas (PI).

Perhitungan untuk menentukan regangan referensi, faktor kelengkungan, rasio redaman bahan tegangan rendah dan faktor skala menggunakan nilai parameter model yang telah ditentukan di antara lainnya berdasarkan Hardin and Drnevich (1972b) dalam Derendeli (2001) sebagai berikut :

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 \times PI \times OCR^{\phi^3}) \times \sigma_0'^{\phi^4} \tag{10}$$

$$a = \phi_5 \tag{11}$$

$$D_{min} = \left(\phi_6 + \phi_7 \times PI \times OCR^{\phi^8}\right) \times \sigma_0'^{\phi^9} \times \left[1 + \phi_{10} \times In(frq)\right] \quad (12)$$

$$b = \phi_{11} + \phi_{12} \times In(N) \tag{13}$$

Yang dimana,

 σ' = mean effective confining pressure (atm),

PI = plastisitas tanah (%),

OCR = rasio overkonsolidasi,

frq = frekuensi pembebanan,

N = jumlah siklus pembebanan,

$$\phi_1 = 0.0352,$$

$$\phi_2 = 0.0010,$$

$$\phi_3 = 0.3246$$

$$b_4 = 0.3483,$$

$$\phi_5 = 0.9190,$$

$$\Phi_6 = 0.8005,$$

$$\phi_7 = 0.0129,$$

 $\Phi_8 = -0.1069,$ $\Phi_9 = -0.2889,$

$$\phi_{10} = 0.2919,$$

 $\phi_{11} = 0.6329$,

 $\phi_{12} = -0.0057.$

Ketika parameter model regangan referensi, faktor kurva, rasio redaman material kecil dan faktor skala telah dihitung dengan indeks plastisitas dan di bawah kondisi pembebanan tertentu, modulus reduksi normal dan kurva redaman material dapat diperkirakan dengan berdasarkan Hardin and Drnevich (1972b) dalam Derendeli (2001) sebagai berikut :

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \tag{14}$$

$$D_{Adjusted} = b \times \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{0,1} \times D_{Masing} + D_{min}$$
(15)

Yang dimana,

 $\frac{G}{G_{max}} = modulus \ geser \ normal$ $\gamma = \text{shearing strain (\%)},$ $\gamma_r = \text{reference strain (\%)},$ a = curvature coefficient,

D_{min} = small-strain material damping ratio (%),

b = scaling coefficient,

DAdjusted = scaled and capped material damping (%),

Kurva redaman material berdasarkan Masing (1926):

$$D_{Masing} = c_1 D_{Masing,a=1,0} + c_2 D_{Masing,a=1,0}^{2} + c_3 D_{Masing,a=1,0}^{3} (\%)$$
(16)

$$D_{Masing,a=1,0} = \frac{100}{\pi} \left[4 \frac{\gamma - \gamma_r In\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} - 2 \right] (\%)$$
(17)

 $c_1 = -1.1143a_2 + 1.8618a + 0.2523,$ $c_2 = 0.0805a_2 - 0.0710a - 0.0095,$ $c_3 = -0.0005a_2 + 0.0002a + 0.0003.$

(Gambar 13) menunjukkan faktor reduksi normal dan kurva atenuasi material untuk jenis tanah dan kondisi pembebanan untuk Lempung, PI = 60%, OCR = 4, tegangan efektif 4 atm untuk sepuluh siklus beban pada frekuensi 10 Hz.



Sumber : Darendeli (2001)

Gambar 13. Estimasi (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material

Gambar 14 menunjukkan pengaruh rasio overkonsolidasi pada perilaku tanah non-linear yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi. Ditemukan bahwa peningkatan rasio pengerasan berlebih menyebabkan perubahan kecil pada modulus reduksi normal dan kurva redaman material pada amplitudo regangan yang lebih tinggi dan sedikit penurunan rasio redaman pada material regangan rendah. Efek ini lebih terasa pada bahan dengan plastisitas tinggi.



Sumber : Darendeli (2001)

Gambar 14. Efek rasio overkonslidasi pada (a) modulus reduksinormal dan (b) kurva redaman material

Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan pengaruh frekuensi beban dan jumlah siklus beban. Model tersebut diformulasikan dengan mengabaikan pengaruh kedua variabel tersebut pada kurva modulus reduksi normal, seperti yang ditunjukkan pada (Gambar 15a) dan (Gambar 16a). (Gambar 15b) menunjukkan pengaruh frekuensi pembebanan yang diprediksi oleh model terkalibrasi pada material kurva redaman. Pada gambar ini, peningkatan derajat redaman material pada elongasi rendah dapat diamati dengan meningkatnya laju pembebanan. Pada saat yang sama, (Gambar 16b) menunjukkan pengaruh jumlah siklus beban pada material kurva redaman. Peningkatan jumlah siklus menghasilkan sedikit pengurangan faktor skala, yang menghasilkan sedikit pengurangan tingkat redaman material pada beban tinggi.

Pengaruh tekanan pembatas (confining pressure) pada modulus reduksi normal dan kurva atenuasi material, diprediksi oleh model empat parameter yang dikalibrasi, ditunjukkan pada (Gambar 17). Model tersebut menunjukkan perubahan modulus reduksi normal dan kurva atenuasi untuk tingkat ketegangan material yang lebih besar dengan meningkatnya tekanan pembatas dan penurunan simultan dalam tingkat redaman material dengan tegangan rendah.



Sumber : Darendeli (2001)

Gambar 15. Efek jumlah siklus pembebanan pada (a) modulus reduksinormal dan (b) kurva redaman material



Shearing Strain, y,%

Sumber : Darendeli (2001)

Gambar 16. Efek tekanan pembatas pada (a) modulus reduksi normaldan (b) kurva redaman material



Sumber : Darendeli (2001)

Efek plastisitas tanah pada (a) modulus reduksi normaldan (b) kurva redaman material

2.8.4 Non-Masing Unload-Reload Rules

Model non-Masing yang termasuk dalam DEEPSOIL adalah model MRDF hiperbolik yang bergantung pada tekanan (Phillips dan Hashash, 2009). Model ini diimplementasikan sebagai faktor reduksi yang secara efektif memodifikasi aturan mazing. Dengan memperkenalkan faktor reduksi, modulus reduksi dan kurva redaman dapat disesuaikan secara bersamaan. Perilaku redaman berdasarkan Philips and Hashash (2009) dalam Hashash et al. (2020) sebagai berikut :

$$\xi_{MasingHysteristic} = F(\gamma_{\max}) \times \xi_{Masing}$$
(18)

Dimana $F(\gamma m)$ adalah faktor reduksi yang dihitung sebagai fungsi dari γm , tegangan geser maksimum dalam tanah pada titik waktu tertentu, ξ_{Masing} dihitung menggunakan aturan Masing berdasarkan kurva reduksi modulus elastisitas redaman Hysteresis. Dua formulasi $F(\gamma m)$ diimplementasikan dalam DEEPSOIL dan dijelaskan pada bagian berikut.

2.8.4.1 MRDF-UIUC

Model hiperbolik yang bergantung pada tekanan MRDF (Phillips dan Hashash, 2009) yang tersedia di DEEPSOIL memungkinkan untuk memasukkan faktor reduksi ke dalam model hiperbolik. Format faktor reduksi berdasarkan Philips and Hashash (2009) dalam Hashash et al. (2020) sebagai berikut :

$$F(\gamma_m) = P_1 - P_2 (1 - G(\gamma_M)/G_0)^{P_3}$$
(19)

Dimana γm adalah tegangan geser maksimum yang terjadi pada waktu tertentu, $G(\gamma m)$ adalah modulus geser pada γm , dan P_1 , P_2 , dan P_3 adalah parameter fitting. Jika Anda menetapkan $P_1 = 1$ dan $P_2 = 0$, faktor penyusutan akan menjadi 1 (terlepas dari nilai P_3) dan model akan menyusut ke kriteria Extended Masing.

2.8.4.2 MRDF-Darendeli

Model MRDF hiperbolik yang bergantung pada tekanan (Phillips dan Hashash, 2009) juga dapat digunakan dengan formula alternatif untuk faktor reduksi. Sebuah alternatif adalah susunan kata yang diusulkan oleh Darendeli pada tahun 2001. Formulasi ini adalah model hiperbolik yang dimodifikasi secara empiris untuk memprediksi respons dinamis nonlinear dari berbagai jenis tanah. Model yang dikembangkan diimplementasikan sebagai faktor reduksi bentuk sebagai berikut (Hashash et al., 2020):

$$F(\gamma_M) = P_1 (P_1 (G(\gamma_m)/G_0)^{P_2}$$
(20)

Dimana γm adalah tegangan geser maksimum yang terjadi pada waktu tertentu, $G(\gamma m)$ adalah modulus geser pada γm , dan P_1 dan P_2 adalah parameter fitting. Jika Anda menetapkan $P_1 = 1$ dan $P_2 = 0$, faktor penyusutan akan menjadi 1, dan model akan menyusut ke kriteria Extended Masing.