

SKRIPSI

**STUDI RESPONS SPEKTRUM GEMPA PADA KOTA
MAMUJU MENGGUNAKAN METODE *ELASTIC
EQUIVALENT LINEAR***

Disusun dan diajukan oleh:

**MUFIDATUL AZMI KAHARUDDIN
D011 19 1095**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI RESPONS SPEKTRUM GEMPA PADA KOTA MAMUJU MENGGUNAKAN METODE *ELASTIC EQUIVALENT LINEAR*

Disusun dan diajukan oleh

MUFIDATUL AZMI KAHARUDDIN
D011 19 1095

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 12 Oktober 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Dr.Eng. Tri Harianto, ST, MT, IPU

NIP. 197203092000031002

Pembimbing Pendamping,



Dr.Eng. Ardy Arsyad, ST, M.Eng.Sc

NIP. 197607072005011002

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng

NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Mufidatul Azmi Kaharuddin

NIM : D011191095

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Studi Respons Spektrum Gempa pada Kota Mamuju Menggunakan Metode
Elastic Equivalent Linear

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, 12 Oktober 2023

Yang Menyatakan



Mufidatul Azmi Kaharuddin

ABSTRAK

MUFIDATUL AZMI KAHARUDDIN. *Studi Respons Spektrum Gempa pada Kota Mamuju Menggunakan Metode Elastic Equivalent Linear* (dibimbing oleh Tri Harianto dan Ardy Arsyad)

Mamuju merupakan salah satu daerah di Pulau Sulawesi dengan potensi gempa bumi yang tinggi. Pada 15 Januari 2021, terjadi gempa magnitudo 6.2 dengan pusat gempa pada kedalaman 21 km dan berada di darat 6 km arah timur laut Majene. Gempa ini menyebabkan kerusakan yang parah pada bangunan di wilayah Mamuju terutama pada kawasan pantai yang memiliki kondisi tanah lunak. Hal ini mengindikasikan bahwa pada gempa Mamuju 15 Januari 2021 tersebut, kerusakan yang terjadi akibat pengaruh kondisi tanah lokal (*local site effect*) di mana tingkat kerusakan struktur sangat terlokalisasi bergantung pada kondisi tanahnya. Oleh karena itu, dilakukan analisis respons situs untuk mengetahui pengaruh tanah lokal pada titik lokasi penelitian terhadap besar amplifikasi gelombang gempa yang terjadi di Mamuju.

Dalam penelitian ini, analisis respons situs dilakukan menggunakan *software* DEEPSOIL dengan metode *elastic equivalent linear*. Parameter tanah didapatkan melalui pengumpulan data geoteknik dan geofisika seperti *Standard Penetration Test* (SPT), uji laboratorium, dan survei *Multichannel Analysis Surface Waves* (MASW) yang kemudian disimulasikan dengan data gempa Mamuju tahun 2021 pada komponen *horizontal east-west* (HNE), *horizontal north-south* (HNN), dan *up-down vertical* (HNZ). Hasil yang didapatkan dibandingkan dengan respons spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019.

Analisis respons situs yang dilakukan menunjukkan bahwa kondisi tanah lunak menyebabkan terjadi amplifikasi di mana percepatan spektra pada permukaan lebih tinggi dibandingkan dengan pada batuan dasar (*bedrock*) dengan faktor amplifikasi berkisar antara 2.29-3.74 pada periode tertentu. Nilai PSA (*Peak Surface Acceleration*) yang didapatkan pada komponen *horizontal east-west* (HNE) sebesar 0.68 g, *horizontal north-south* (HNN) sebesar 0.50 g, dan *up-down vertical* (HNZ) sebesar 0.40 g. Hasil perbandingan respons spektra permukaan dengan respons spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019 menunjukkan bahwa nilai percepatan spektra yang didapatkan berada di bawah nilai percepatan spektra desain sebesar 0.88 g.

Kata Kunci: gempa bumi, *local site effect*, amplifikasi, respons situs, percepatan spektra

ABSTRACT

MUFIDATUL AZMI KAHARUDDIN. *Study of Seismic Site Response in Mamuju Using Elastic Equivalent Linear Method* (supervised by Tri Harianto and Ardy Arsyad)

Mamuju is one of the region in Sulawesi with a high potential for earthquakes. On January 15, 2021, a M 6.2 earthquake occurred with an epicenter at a depth of 21 km and inland located 6 km northeast of Majene. This earthquake caused severe damage to buildings in the Mamuju area, especially in coastal areas with soft soil conditions. This indicates that during the Mamuju earthquake on January 15 2021, the damage occurred due to local site effects where the level of structural damage was very localized depending on the soil conditions. Therefore, a site response analysis was carried out to determine the local soil effect at the point of research location on the amplification of the earthquake ground motion in Mamuju.

In this study, the site response analysis was performed using DEEPSOIL software with elastic equivalent linear method. Soil parameters were obtained through geotechnical and geophysical test results such as the Standard Penetration Test (SPT), laboratory tests, and the Multichannel Analysis Surface Waves (MASW) survey which were then simulated with the 2021 Mamuju earthquake data on the horizontal east-west (HNE), horizontal north-south (HNN), and up-down vertical (HNZ) component. The results obtained were compared with the designed response spectra based on SNI 1726:2019.

The site response analysis performed showed that soft soil conditions caused amplification where the spectral acceleration on the surface is higher compared to bedrock with the amplification factor ranging from 2.29-3.74 in certain periods. The PSA (Peak Surface Acceleration) value obtained for the horizontal east-west (HNE) component is 0.68 g, the horizontal north-south (HNN) is 0.50 g, and the up-down vertical (HNZ) is 0.40 g. The results of the comparison of surface spectral responses with design spectral responses based on SNI 1726:2019 show that the spectral acceleration values obtained are below the design spectral acceleration values of 0.88 g.

Keywords: earthquake, local site effect, amplification, site response, spectral acceleration

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
KATA PENGANTAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kondisi Tektonik dan Geologi Mamuju	5
2.2 Sejarah Kegempaan Mamuju	7
2.3 <i>Local Site Effect</i>	10
2.4 Analisis Respons Situs terhadap Gempa.....	16
2.5 DEEPSOIL.....	19
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	44
3.1 Lokasi Penelitian.....	44
3.2 Pengumpulan Data	44
3.3 Peralatan yang Digunakan.....	52
3.4 <i>Flowchart</i> Penelitian	53
3.5 Prosedur Penggunaan <i>Software</i> DEEPSOIL.....	54
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	70
4.1 <i>Time History</i>	70
4.2 <i>Response Spectra</i>	79
4.3 <i>Profile Plots</i>	91
4.4 Perbandingan dengan SNI 1726:2019.....	100
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	103
5.1 Kesimpulan	103
5.2 Saran.....	104
DAFTAR PUSTAKA	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Peta Sesar Aktif di Pulau Sulawesi	5
Gambar 2 Peta Geologi Lembar Mamuju	7
Gambar 3 Peta Pusat Gempa Bumi Merusak Pulau Sulawesi	8
Gambar 4 Peta Distribusi Gempa Bumi Mamuju dan Majene Periode 14-23 Januari 2021	9
Gambar 5 Peta Tingkat Guncangan (<i>Shakemap</i>) Gempa Bumi Mamuju 15 Januari 2021	10
Gambar 6 Faktor utama penyebab getaran tanah akibat gempa bumi	11
Gambar 7 (a) Peta V_{S30} Sulawesi Barat; (b) Titik-titik kerusakan berat akibat gempa Mamuju.....	12
Gambar 8 Model guncangan gempabumi pada periode gelombang 0 s (PGA), 0.1 s dan 0.4 s	13
Gambar 9 Ilustrasi amplifikasi	15
Gambar 10 Kurva hysteresis hubungan tegangan-regangan pada amplitude regangan berbeda.....	23
Gambar 11 Pengaruh dari berbagai faktor terhadap modulus geser pasir (berdasarkan Hardin dan Drnevich)	25
Gambar 12 Variasi modulus geser dengan regangan geser untuk pasir.....	26
Gambar 13 Pengaruh dari berbagai faktor terhadap rasio redaman pasir (berdasarkan Hardin dan Drnevich)	27
Gambar 14 Rasio redaman untuk pasir	28
Gambar 15 (a) Kurva tegangan-regangan siklus pertama; (b) Variasi parameter siklik dengan regangan geser siklik	29
Gambar 16 Korelasi G/G_{max} dan Indeks Plastisitas PI untuk tanah terkonsolidasi normal dan <i>overconsolidated</i>	32
Gambar 17 Korelasi λ dan Indeks Plastisitas PI untuk tanah terkonsolidasi normal dan <i>overconsolidated</i>	33
Gambar 18 Kurva hubungan antara G/G_{max} dengan γ_c dan λ dengan γ_c serta Indeks Plastisitas untuk tanah terkonsolidasi normal dan <i>overconsolidated</i>	34
Gambar 19 Estimasi (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material.....	36
Gambar 20 Efek rasio overkonsolidasi pada (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material	37
Gambar 21 Efek frekuensi pembebanan pada (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material	38
Gambar 22 Efek jumlah siklus pembebanan pada (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material	39
Gambar 23 Efek tekanan pembatas pada (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material	40
Gambar 24 Efek plastisitas tanah pada (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material.....	41
Gambar 25 Lokasi Penelitian	44
Gambar 26 Bor-log SPT (<i>Standard Penetration Test</i>).....	46

Gambar 27 <i>Time History</i> gempa Mamuju 15 Januari 2021 (a) Komponen HNE (b) Komponen HNN dan (c) Komponen HNZ.....	47
Gambar 28 Nilai Kecepatan Gelombang Geser (V_s)	48
Gambar 29 Spektrum Respon Desain	51
Gambar 30 <i>Flowchart</i> Penelitian	53
Gambar 31 Profil tanah BH 01.....	54
Gambar 32 <i>Analysis Type Definition</i>	55
Gambar 33 <i>Basic soil properties Layer 1 Embankment</i>	56
Gambar 34 <i>Basic soil properties Layer 2 Silty Sand</i>	57
Gambar 35 <i>Basic soil properties Layer 3 Soft Silty Clay</i>	57
Gambar 36 <i>Basic soil properties Layer 4 Medium Silty Clay</i>	58
Gambar 37 <i>Basic soil properties Layer 5 Stiff Silty Clay</i>	58
Gambar 38 <i>Soil model properties Layer 1 Embankment dengan reference curve</i> <i>Seed & Idriss, 1970 (Upper Limit)</i>	59
Gambar 39 <i>Soil model properties Layer 1 Embankment dengan reference curve</i> <i>Seed & Idriss, 1970 (Mean)</i>	59
Gambar 40 <i>Soil model properties Layer 1 Embankment dengan reference curve</i> <i>Seed & Idriss, 1970 (Lower Limit)</i>	60
Gambar 41 <i>Soil model properties Layer 2 Silty Sand dengan reference curve</i> <i>Seed & Idriss, 1970 (Upper Limit)</i>	60
Gambar 42 <i>Soil model properties Layer 2 Silty Sand dengan reference curve</i> <i>Seed & Idriss, 1970 (Mean)</i>	61
Gambar 43 <i>Soil model properties Layer 2 Silty Sand dengan reference curve</i> <i>Seed & Idriss, 1970 (Lower Limit)</i>	61
Gambar 44 <i>Soil model properties Layer 3 Soft Silty Clay dengan reference</i> <i>curve Darendeli, 2001</i>	62
Gambar 45 <i>Soil model properties Layer 4 Medium Silty Clay dengan reference</i> <i>curve Darendeli, 2001</i>	62
Gambar 46 <i>Soil model properties Layer 5 Stiff Silty Clay dengan reference</i> <i>curve Darendeli, 2001</i>	63
Gambar 47 Kurva Modulus Geser dan Rasio Redaman berdasarkan <i>Reference</i> <i>Curve</i>	64
Gambar 48 <i>Halfspace Definition Bedrock</i> dengan nilai V_s 700 m/s.....	65
Gambar 49 <i>Halfspace Definition Bedrock</i> dengan nilai V_s 2500 m/s.....	65
Gambar 50 <i>Soil Profile Plot</i>	66
Gambar 51 <i>Input Motion Selection (MAMUJU HNE)</i>	67
Gambar 52 <i>Input Motion Selection (MAMUJU HNN)</i>	67
Gambar 53 <i>Input Motion Selection (MAMUJU HNZ)</i>	68
Gambar 54 <i>Analysis Control Definition</i>	69
Gambar 55 <i>Results</i>	69
Gambar 56 <i>Time History</i> Komponen HNE (Perbandingan antara profil berdasarkan kurva referensi Seed & Idriss (1970) <i>Upper Limit</i> , <i>Mean</i> , atau <i>Lower Limit</i> pada lapisan permukaan)	71
Gambar 57 <i>Time History</i> Komponen HNE (Perbandingan antara nilai V_s <i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	72
Gambar 58 <i>Time History</i> Komponen HNN (Perbandingan antara profil berdasarkan kurva referensi Seed & Idriss (1970) <i>Upper Limit</i> , <i>Mean</i> , atau <i>Lower Limit</i> pada lapisan permukaan)	74

Gambar 59 <i>Time History</i> Komponen HNN (Perbandingan antara nilai V_s <i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	75
Gambar 60 <i>Time History</i> Komponen HNZ (Perbandingan antara profil berdasarkan kurva referensi Seed & Idriss (1970) <i>Upper Limit</i> , <i>Mean</i> , atau <i>Lower Limit</i> pada lapisan permukaan)	77
Gambar 61 <i>Time History</i> Komponen HNZ (Perbandingan antara nilai V_s <i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	78
Gambar 62 <i>Response Spectra</i> Komponen HNE (Perbandingan antara kurva referensi Seed & Idriss (1970) <i>Upper Limit</i> , <i>Mean</i> , atau <i>Lower Limit</i> pada lapisan permukaan)	81
Gambar 63 <i>Response Spectra</i> Komponen HNE (Perbandingan antara nilai V_s <i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	82
Gambar 64 <i>Response Spectra</i> Komponen HNN (Perbandingan antara kurva referensi Seed & Idriss (1970) <i>Upper Limit</i> , <i>Mean</i> , atau <i>Lower Limit</i> pada lapisan permukaan)	85
Gambar 65 <i>Response Spectra</i> Komponen HNN (Perbandingan antara nilai V_s <i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	86
Gambar 66 <i>Response Spectra</i> Komponen HNZ (Perbandingan antara kurva referensi Seed & Idriss (1970) <i>Upper Limit</i> , <i>Mean</i> , atau <i>Lower Limit</i> pada lapisan permukaan)	89
Gambar 67 <i>Response Spectra</i> Komponen HNZ (Perbandingan antara nilai V_s <i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	90
Gambar 68 <i>Profile Plots</i> Komponen HNE (Perbandingan antara kurva referensi Seed & Idriss (1970) <i>Upper Limit</i> , <i>Mean</i> , atau <i>Lower Limit</i> pada lapisan permukaan)	92
Gambar 69 <i>Profile Plots</i> Komponen HNE (Perbandingan antara nilai V_s <i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	93
Gambar 70 <i>Profile Plots</i> Komponen HNN (Perbandingan antara kurva referensi Seed & Idriss (1970) <i>Upper Limit</i> , <i>Mean</i> , atau <i>Lower Limit</i> pada lapisan permukaan)	95
Gambar 71 <i>Profile Plots</i> Komponen HNN (Perbandingan antara nilai V_s <i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	96
Gambar 72 <i>Profile Plots</i> Komponen HNZ (Perbandingan antara kurva referensi Seed & Idriss (1970) <i>Upper Limit</i> , <i>Mean</i> , atau <i>Lower Limit</i> pada lapisan permukaan)	98
Gambar 73 <i>Profile Plots</i> Komponen HNZ (Perbandingan antara nilai V_s <i>bedrock</i> 700 m/s atau 2500 m/s)	99
Gambar 74 Perbandingan Respons Spektra Permukaan berdasarkan Gempa Mamuju 15 Januari 2021 dengan Respons Spektra Desain SNI 1726:2019	101

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Klasifikasi Situs Berdasarkan Nilai V_s	14
Tabel 2 Efek dari penambahan berbagai faktor terhadap G_{\max} , G/G_{\max} , dan faktor redaman λ pada lempung <i>normally consolidated</i> dan <i>moderately overconsolidated</i>	30
Tabel 3 Hasil Pengujian Laboratorium	45
Tabel 4 Klasifikasi situs berdasarkan SNI 1726:2019	49
Tabel 5 Koefisien situs, F_a	50
Tabel 6 Koefisien situs, F_v	50
Tabel 7 Properti dasar tanah tiap lapisan	56
Tabel 8 PGA dan Faktor Amplifikasi Komponen <i>Horizontal East-West</i> (HNE)	70
Tabel 9 PGA dan Faktor Amplifikasi Komponen <i>Horizontal North-South</i> (HNN).....	73
Tabel 10 PGA dan Faktor Amplifikasi Komponen <i>Up-Down Vertical</i> (HNZ)....	76
Tabel 11 Perbandingan Percepatan Spektra pada Komponen <i>Horizontal East-West</i> (HNE)	80
Tabel 12 Perbandingan Percepatan Spektra pada Komponen <i>Horizontal North-South</i> (HNN).....	84
Tabel 13 Perbandingan Percepatan Spektra pada Komponen <i>Up-Down Vertical</i> (HNZ).....	88
Tabel 14 Perbandingan Faktor Amplifikasi pada Periode Pendek (F_a) dan Pada Periode 1 detik (F_v)	100

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
EQL	<i>Elastic Equivalent Linear</i>
NL	<i>Non Linear</i>
SPT	<i>Standart Penetration Test</i>
MASW	<i>Multichannel Analysis Surface Waves</i>
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	<i>Horizontal East-West</i>
HNN	<i>Horizontal North-South</i>
HNZ	<i>Up-Down Vertical</i>
PGA	<i>Peak Ground Acceleration (g)</i>
PSA	<i>Peak Spectral Acceleration (g)</i>
MCE _R	<i>Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted</i>
V _s	Kecepatan gelombang geser (m/s)
V _{s30}	Kecepatan gelombang geser dari permukaan tanah hingga kedalaman 30 meter (m/s)
Amp _v	Faktor amplifikasi
τ	Tegangan geser
σ_v'	Tegangan vertikal efektif
σ_m'	<i>Mean effective confining pressure (atm)</i>
γ	Regangan geser (%)
γ_r	Regangan referensi (%)
γ_{eff}	Regangan geser efektif (%)
G	Modulus geser

G_{\max}	Modulus geser maksimum
G^*	Modulus geser kompleks
$\frac{G}{G_{\max}}$	Modulus geser normal
$\phi_1 - \phi_5$	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
ξ	Rasio redaman (%)
D_{\min}	Rasio redaman material regangan kecil (%)
f	Frekuensi pembebanan
N	Jumlah siklus pembebanan
T	Periode (s)
G_s	<i>Spesific gravity</i>
ω	Kadar air (%)
γ_{wet}	<i>Wet density (g/cm³)</i>
γ_{dry}	<i>Dry density (g/cm³)</i>
e	<i>Void ratio</i>
S	<i>Degree of Saturation</i>
LL	<i>Liquid Limit (%)</i>
PL	<i>Plastic Limit (%)</i>
PI	<i>Plasticity Index (%)</i>
OCR	<i>Overconsolidation Ratio</i>
c	<i>Cohesion (kg/cm²)</i>
S_s	Percepatan batuan dasar pada periode pendek
S_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.....	108
Lampiran 2 Data Pengujian Berat Jenis	109
Lampiran 3 Data Pengujian Berat Isi	110
Lampiran 4 Data Pengujian Batas-Batas Atterberg	111
Lampiran 5 Data Pengujian Triaksial	114

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas berkat, rahmat, karunia, serta izinnya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Studi Respons Spektrum Gempa pada Kota Mamuju Menggunakan Metode *Elastic Equivalent Linear*” sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi di Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil Universitas Hassanuddin.

Selesainya tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak yang senantiasa memberikan dukungan 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 dalam proses penggarapan tugas akhir ini, yaitu kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Ayahanda Kaharuddin dan Ibunda Misbah Latief atas kasih sayang, doa, nasehat, dan segala dukungan kepada penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hassanuddin.
3. Bapak Prof. Dr. H. Muh. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng., selaku Ketua Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hassanuddin.
4. Bapak Prof. Dr. Eng. Tri Harianto, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk memberikan arahan serta bimbingan kepada penulis hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Bapak Dr. Eng. Ardy Arsyad, S.T., M.Eng.Sc., selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktu untuk memberikan arahan serta bimbingan kepada penulis hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Bapak Prof. Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, M.T., selaku Kepala Laboratorium Mekanika Tanah yang telah memberikan wawasan tambahan selama penulis menjadi asisten laboratorium.
7. Seluruh dosen, staff, dan karyawan Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hassanuddin yang telah banyak membantu dalam penulisan tugas akhir ini.
8. Sara Malisan Lati, Nursyifa Eka Nahdiyah, dan Amirah Kurnia Syahran yang senantiasa memberikan dukungan dan semangat kepada penulis sepanjang proses pengerjaan tugas akhir.
9. Teman-teman tim penelitian Tugas Akhir; Yurinda Bintang Patandean, Ariyanti Herlota, dan Rizqhie Wiryadiputra Suryadi yang telah berjuang bersama dan saling memberikan bantuan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
10. Keluarga besar Laboratorium Mekanika Tanah; Kak Zainal, Sara, Mutiara, Jaemshon, Sultan, Yayat, Yusril, Megumi, Nushrah, Kelvin, Aisa, Danti, dan Melda.
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.
13. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu dengan semua bantuan dan dukungan yang diberikan.

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, Mei 2023

Penulis

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pulau Sulawesi merupakan salah satu pulau di Indonesia dengan potensi gempa bumi yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh struktur geologi Pulau Sulawesi yang didominasi oleh sesar-sesar aktif, seperti sesar Gorontalo, sesar Palu-Koro, sesar Matano, sesar Lawanopo, dan sesar Walanae. Kejadian gempa bumi di Sulawesi dalam beberapa tahun terakhir antara lain adalah gempa yang terjadi di Mamuju pada 15 Januari 2021. BMKG mencatat bahwa gempa yang terjadi memiliki magnitudo 6,2 dengan pusat gempa pada kedalaman 21 km dan berada di darat 6 km arah timur laut Majene. Gempa bumi yang terjadi diklasifikasikan menjadi gempa bumi kerak dangkal dengan mekanisme pergerakan naik (*thrust fault*). Frekuensi gempa susulan yang terjadi sangat banyak dan menyebabkan kerusakan yang parah pada bangunan. Namun, tingkat kerusakan yang terjadi bervariasi dan bangunan dengan tingkat kerusakan tinggi kebanyakan tersebar pada daerah dengan kondisi tanah lunak.

Kerusakan yang terjadi akibat gempa bumi tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi atau struktur bangunan, kondisi tanah tempat didirikannya bangunan juga merupakan parameter penting karena dapat mempengaruhi intensitas gelombang gempa yang terjadi. Menurut Aki (1993), gerakan tanah akibat gelombang gempa pada umumnya dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu sumber seismik, penjalaran gelombang, dan kondisi tanah lokal. Pengaruh kondisi tanah lokal (*local site effect*) menjadi salah satu faktor yang signifikan. Hal ini dapat dilihat dari beberapa kejadian gempa bumi terdahulu seperti gempa Meksiko pada tahun 1985 dan gempa Loma Prieta pada tahun 1989. Gempa yang terjadi menyebabkan tingkat kerusakan struktur yang sangat terlokalisasi bergantung pada kondisi tanahnya. Gelombang gempa dapat mengalami peningkatan maupun penurunan intensitas saat mencapai permukaan bergantung pada lapisan tanah yang dilaluinya, efek ini dikenal dengan istilah amplifikasi tanah (*soil amplification*). Untuk mengetahui besar amplifikasi tanah pada suatu lokasi maka dilakukan *site response analysis*.

Site response analysis dapat digunakan untuk memprediksi karakteristik gelombang gempa yang merambat dari lapisan batuan dasar (*bedrock*) ke permukaan tanah dengan menggunakan parameter dinamik tanah seperti kecepatan gelombang geser dan modulus gesernya. Analisis ini penting dilakukan untuk mendapatkan respons spektrum gempa sebagai acuan dalam perancangan struktur. Beberapa penelitian terkait *site response analysis* antara lain adalah penelitian yang dilakukan oleh Misliniyati et al. (2019) terkait *one-dimensional seismic site response* berdasarkan kondisi tanah lokal di Jakarta. Penelitian dilakukan pada dua jenis profil tanah kohesif berbeda (*medium clay* dan *soft clay*) menggunakan metode *equivalent linear* (EQL) dan *non-linear* (NL). Melalui penelitian tersebut, didapatkan bahwa setiap parameter yang diteliti seperti kedalaman *bedrock*, nilai v_s (*shear wave velocity*), dan ketebalan lapisan tanah menghasilkan efek yang signifikan terhadap respons spektrum di permukaan tanah.

Dalam penelitian ini, akan dilakukan analisis respons situs berdasarkan kondisi tanah lokal di salah satu titik lokasi penelitian di Mamuju menggunakan *software* DEEPSOIL dengan metode *elastic equivalent linear*. Parameter dinamis tanah yang digunakan berupa kecepatan gelombang geser (v_s) yang didapatkan melalui data survei lapangan *Multichannel Analysis Surface Waves* (MASW). Profil tanah dimodelkan berdasarkan data hasil uji *Standard Penetration Test* (SPT) dan hasil uji laboratorium yang kemudian disimulasikan dengan data gempa Mamuju tahun 2021. Melalui analisis respons situs yang dilakukan, maka dapat diketahui pengaruh tanah lokal terhadap amplifikasi gelombang gempa pada lokasi penelitian.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kondisi tanah pada titik lokasi penelitian berdasarkan data geoteknik dan geofisika?
2. Bagaimana pengaruh tanah lokal pada lokasi penelitian terhadap amplifikasi gelombang gempa Mamuju M 6.2 15 Januari 2021?

3. Bagaimana perbandingan antara respons spektra permukaan pada lokasi penelitian berdasarkan metode analisis *elastic equivalent linear* dengan respons spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui kondisi tanah pada titik lokasi penelitian berdasarkan data geoteknik dan geofisika.
2. Mengetahui pengaruh tanah lokal pada lokasi penelitian terhadap amplifikasi gelombang gempa Mamuju M 6.2 15 Januari 2021.
3. Mengetahui perbandingan antara respons spektra permukaan pada lokasi penelitian berdasarkan metode analisis *elastic equivalent linear* dengan respons spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain:

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

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pembahasan dari penelitian ini adalah:

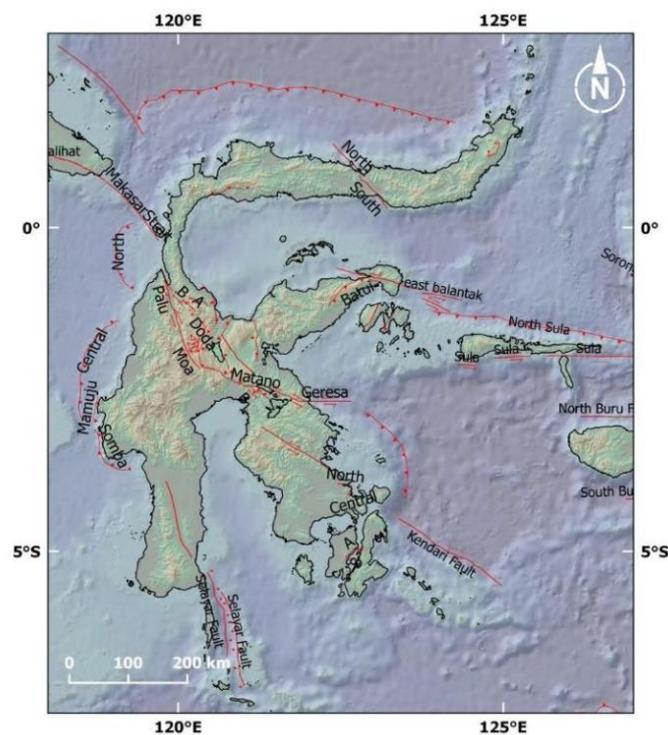
1. Analisis respons situs dilakukan pada satu titik lokasi penelitian di daerah Mamuju (BH 01). Data penyelidikan tanah berupa N-SPT dan data laboratorium merupakan data tanah pada titik penelitian tahun 2021.
2. Data kecepatan gelombang geser (V_s) didapatkan melalui survei *Multichannel Analysis Surface Waves* (MASW) yang dilakukan Maret 2023 pada lokasi penelitian.

3. Data gempa berupa *time history* gempa Mamuju pada 15 Januari 2021 yang direkam oleh BMKG pada Stasiun Dishub Mamuju Sulawesi (MMSN).
4. Analisis respons situs dilakukan dengan metode *elastic equivalent linear* menggunakan *software* DEEPSOIL (*University of Illinois Urbana-Champaign*) versi 7.0 dalam tahap pengembangan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Tektonik dan Geologi Mamuju

Pulau Sulawesi secara geologi memiliki tatanan yang kompleks karena merupakan tempat pertemuan tiga lempeng besar yaitu lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah utara, lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat dan lempeng Eurasia yang bergerak ke arah selatan-tenggara serta lempeng yang lebih kecil yaitu lempeng Filipina. Proses tumbukan keempat lempeng tersebut menyebabkan Pulau Sulawesi memiliki empat buah lengan dengan proses tektonik yang berbeda-beda membentuk satu kesatuan mosaik geologi. (Somptan, 2012). Pulau Sulawesi memiliki struktur sesar yang kompleks yang terdiri dari sesar aktif maupun sesar tidak aktif seperti sesar Palu-Koro, sesar Poso, sesar Matano, sesar Lawanopo, sesar Walanae, sesar Gorontalo, sesar Batui, sesar Tolo, sesar Makassar dan lain-lain seperti terlihat pada Gambar 1. Pada wilayah Sulawesi Barat terdapat dua jalur lipatan dan sesar naik, yaitu Jalur Lipatan dan Sesar Naik Mamuju serta Jalur Lipatan dan Sesar Naik Kalosi.



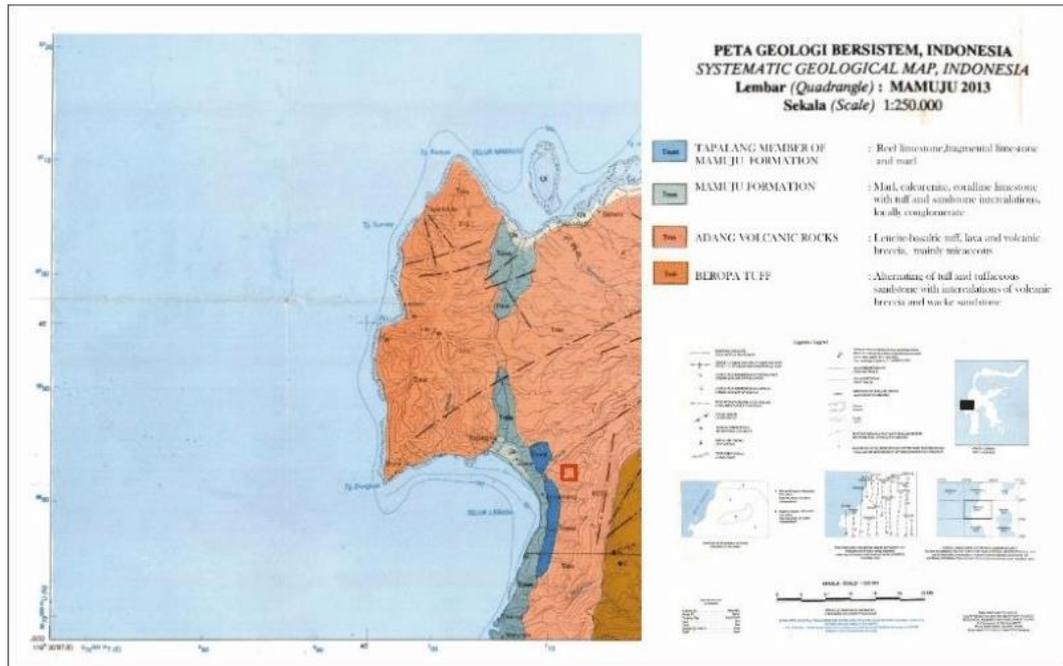
Sumber: Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

Gambar 1 Peta Sesar Aktif di Pulau Sulawesi

Sompotan (2012) menjelaskan bahwa Sulawesi dan pulau-pulau sekitarnya dibagi menjadi empat, yaitu Mandala Barat (*West & North Sulawesi Volcano-Plutonik Arc*), Mandala Tengah (*Central Sulawesi Metamorphic Belt*), Mandala Timur (*East Sulawesi Ophiolite Belt*), serta Fragmen Benua Banggai-Sula dan Tukang Besi. Sulawesi Barat termasuk ke dalam Mandala Barat yang memanjang dari lengan utara sampai dengan lengan selatan pulau Sulawesi. Wilayah Sulawesi Barat yang bergunung-gunung umumnya disusun oleh batuan berumur Tersier dan Pra-Tersier, sementara wilayah dataran luas merupakan daerah yang disusun oleh aluvium. Sebagian besar penduduk Sulawesi Barat bertempat tinggal di bagian dengan topografi lebih landai, yaitu di sekitar Mamuju dan sepanjang pantai Mamuju hingga Majene serta Campalagian dan Wonomulyo. Wilayah tersebut disusun oleh batuan yang secara umur lebih muda daripada wilayah lainnya.

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Mamuju oleh Ratman dan Atmawinata (1993), daerah Mamuju disusun oleh batuan Gunung Api Adang (Tma), batuan Gunung Api Talaya (Tmtv), batu gamping Formasi Mamuju (Tmm), batu gamping Anggota Tapalang Formasi Mamuju (Tmmt), dan endapan aluvium (Qal).

Batuan Gunung Api Talaya (Tmtv) tersusun atas breksi gunung api, tuf serta lava yang tersusun atas andesit-basal dan disisipi batu pasir dan napal serta batubara. Batuan Gunung Api Talaya menjari dengan batuan Gunung Api Adang (Tma) yang utamanya tersusun atas leusit-basalt, yang kemudian menjemari Formasi Mamuju (Tmm) berumur miosen akhir. Formasi Mamuju tersusun dari napal, batu pasir gampingan, nafal tufan, dan batu gamping pasiran yang disisipi tufa. Formasi ini beranggotakan Tapalang (Tmmt) yang terdiri atas batu gamping koral, batu gamping bioklastik, dan napal yang di dalamnya banyak moluska. Formasi Lariang tersusun atas batu pasir gampingan dan mikaan, batu lempung yang disisipi kalkarenit, konglomerat dan tuf yang berumur miosen akhir sampai pliosen awal. Pada formasi tersebut terendapkan batuan termuda yaitu aluvium (Qal) yang terdiri atas endapan-endapan sungai, pantai dan antar gunung (Sompotan, 2012).



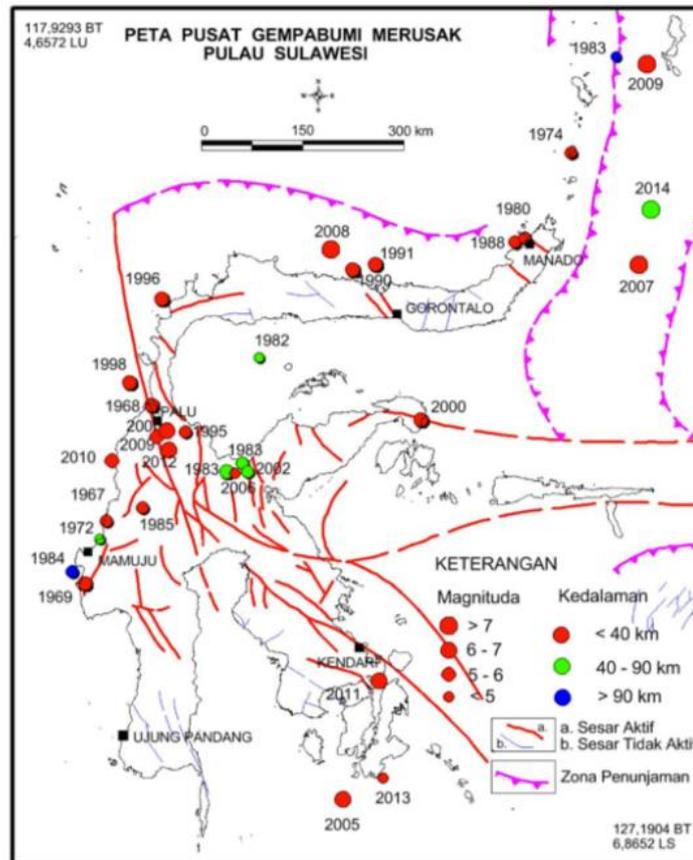
Sumber: Ratman dan Atmawinata (1993)

Gambar 2 Peta Geologi Lembar Mamuju

2.2 Sejarah Kegempaan Mamuju

Mamuju yang terletak di Sulawesi Barat merupakan salah satu wilayah dengan tingkat kerawanan gempa bumi yang cukup tinggi. Berdasarkan Indeks Risiko Bencana Indonesia (IRBI) 2021, Provinsi Sulawesi Barat memiliki nilai indeks risiko sebesar 164.85 yang termasuk dalam kelas risiko tinggi terhadap ancaman bencana seperti gempa bumi.

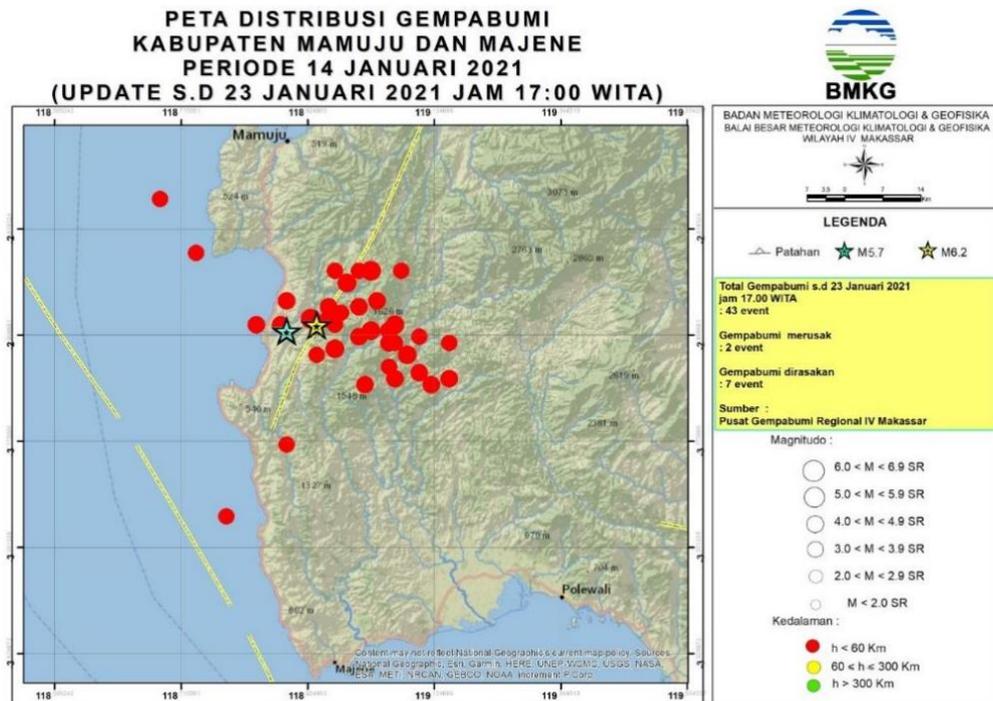
Berdasarkan data sejarah kegempaan, sebagian besar gempa bumi yang terasa signifikan hingga memiliki dampak merusak, di wilayah Sulawesi Barat disebabkan oleh aktivitas Sesar Naik Mamuju (*Mamuju Thrust*). Pada tanggal 11 April 1976, gempa bumi dengan kekuatan magnitude 6.3 di Polewali Mandar memicu kerusakan bangunan dan gelombang tsunami, di mana tercatat terdapat 13 orang meninggal. Pada tanggal 23 Februari 1969, gempa bumi dengan kekuatan magnitudo 6.9 di kedalaman 13 km kembali menyebabkan tsunami setinggi 4 meter yang menerjang kawasan Desa Maliaya, Taan, Tepalang, Malunda. Sebanyak 64 orang meninggal dan hilang serta 1.287 rumah rusak. Kemudian, pada tanggal 8 Januari 1984, gempabumi dengan kuatan magnitude 6.7 mengguncang Kabupaten Majene dan Mamuju menyebabkan ratusan korban jiwa (BMKG, 2021).



Sumber: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (2014)

Gambar 3 Peta Pusat Gempa Bumi Merusak Pulau Sulawesi

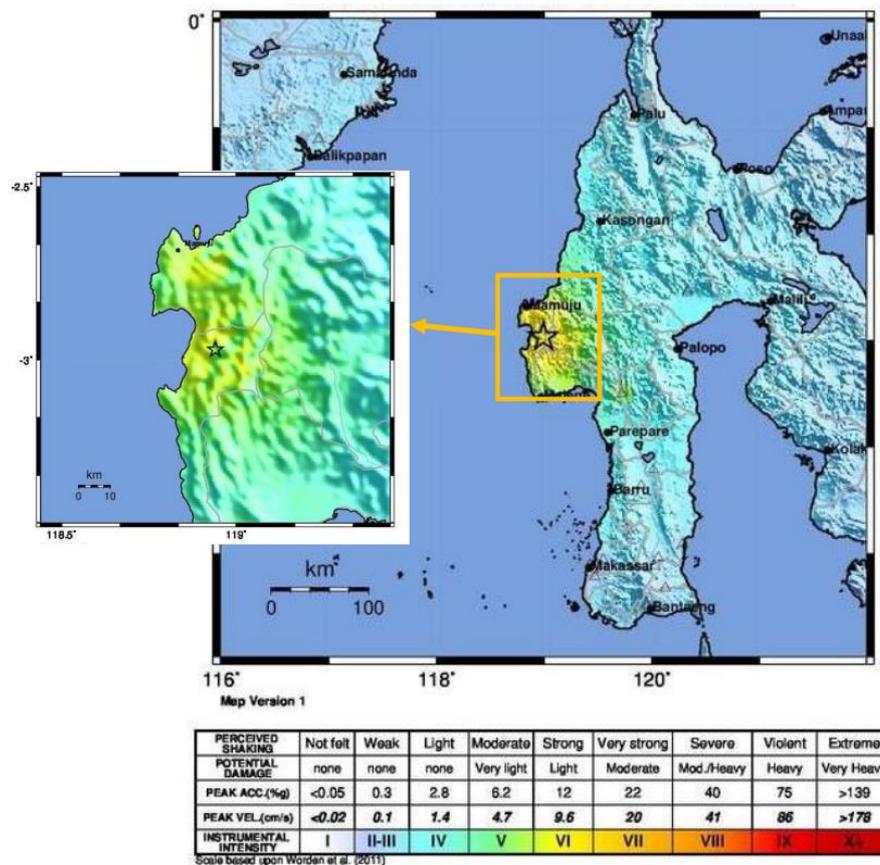
Pada Januari 2021, kembali terjadi gempa bumi di Sulawesi Barat tepatnya di Mamuju. BMKG mencatat bahwa gempa terjadi pada hari Jumat, 15 Januari 2021 dengan magnitudo sebesar 6.2. Pusat gempa bumi berada pada kedalaman 21 km dan berada di darat 6 km arah timur laut Majene, Provinsi Sulawesi Barat. Gempa bumi yang terjadi diklasifikasikan sebagai gempa bumi kerak dangkal atau *shallow crustal earthquake* dengan mekanisme pergerakan naik (*thrust fault*). Gempa Bumi ini merupakan gempa utama (*main shock*) dari gempa bumi yang terjadi pada tanggal 14 Januari 2021 dengan magnitudo 5.7 yang merupakan gempa bumi pendahulu (*fore shock*). Dalam perkembangannya, gempa bumi susulan terus berlangsung dengan magnitudo yang lebih kecil dan frekuensi kejadian yang semakin menurun. Tercatat sebanyak 34 gempa susulan yang terjadi hingga tanggal 23 Januari 2021.



Sumber: BMKG (2021)

Gambar 4 Peta Distribusi Gempa Bumi Mamuju dan Majene Periode
14-23 Januari 2021

Guncangan tanah akibat gempa bumi pada tanggal 15 Januari 2021 ini tergolong dalam intensitas tinggi, dapat dilihat dari *shakemap* pada Gambar 5. Gempa yang terjadi menimbulkan kerusakan yang parah dan juga korban jiwa. Daerah yang mengalami kerusakan paling parah adalah Mamuju, ibukota Sulawesi Barat. Berdasarkan laporan dari BNPB hingga Jumat, 22 Januari 2021, jumlah korban meninggal dunia adalah 91 orang, 9883 warga mengungsi dan 1150 unit rumah rusak.

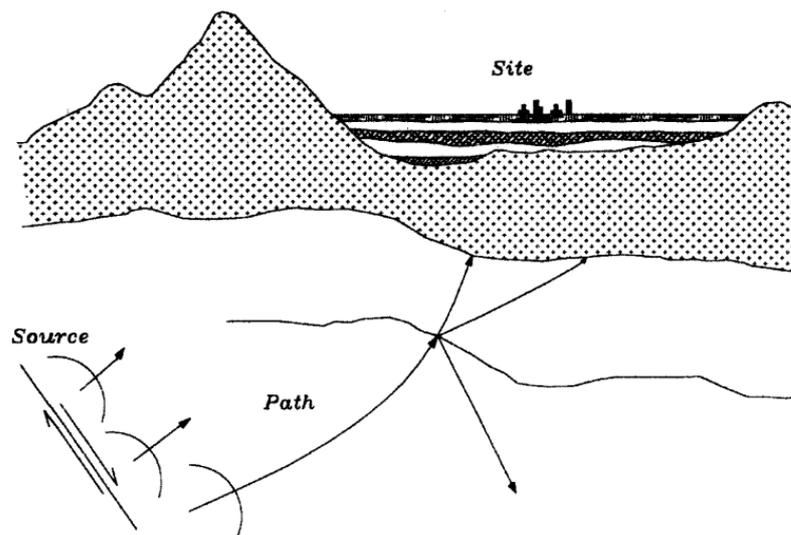


Sumber: BMKG (2021)

Gambar 5 Peta Tingkat Guncangan (*Shakemap*) Gempa Bumi Mamuju 15 Januari 2021

2.3 Local Site Effect

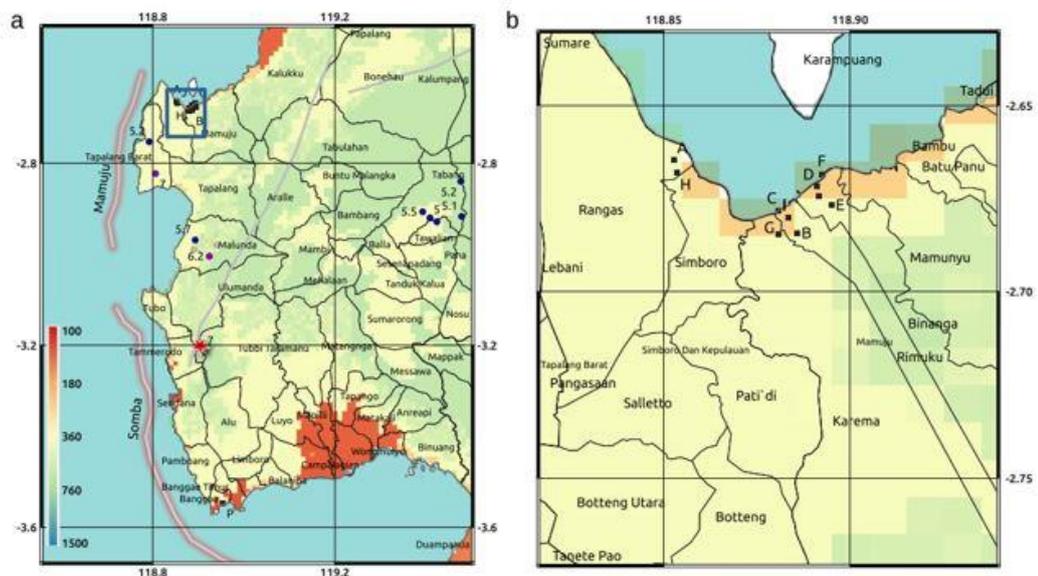
Kerusakan dan keruntuhan bangunan akibat gempa bumi terjadi karena bangunan tidak mampu mengantisipasi getaran tanah (*ground motion*) yang diakibatkan oleh gempa bumi. Besarnya getaran tanah akibat gempa bumi pada umumnya dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu sumber gempa (*source*), jalur penjalaran gelombang (*path*), dan pengaruh kondisi tanah setempat (*site*) (Aki, 1993). Kondisi tanah lokal (*local site effect*) menjadi salah satu faktor yang signifikan karena dapat mempengaruhi intensitas gelombang gempa yang sampai ke permukaan tanah.



Gambar 6 Faktor utama penyebab getaran tanah akibat gempa bumi

Kondisi geologi permukaan dan amplifikasi tanah merupakan parameter penting yang menentukan tingkat kerusakan atau intensitas gempa. Kerusakan yang terjadi berhubungan dengan kondisi tanah bawah permukaan. Tanah yang lunak (lapisan lapuk) akan memperkuat amplifikasi guncangan gempa daripada tanah yang padat (solid). Salah satu faktor untuk menentukan amplifikasi tanah adalah kecepatan gelombang geser (V_s) (Wibowo & Huda, 2020).

Local site effect dapat diamati pada beberapa kejadian gempa terdahulu seperti gempa Meksiko pada tahun 1985 dan gempa Loma Prieta pada tahun 1989 di mana gempa yang terjadi menyebabkan tingkat kerusakan yang sangat terlokalisasi. Begitu pula dengan gempa Mamuju yang terjadi pada Januari 2021, berdasarkan data kejadian diketahui bahwa daerah yang mengalami kerusakan paling parah adalah kawasan pantai yang termasuk ke dalam Desa/Kelurahan Rangas dan Simboro di Kecamatan Simboro serta Karema, Rimuku dan Binanga di Kecamatan Mamuju. Daerah tersebut terutama disusun oleh batuan lunak dengan V_s sekitar 180 m/s, berjarak sekitar 35 km dari episenter gempa bumi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 7. Sementara itu, jika dilihat dari tipologi bangunan, maka bangunan yang memiliki tinggi empat lantai atau lebih mengalami kerusakan berat atau runtuh seperti RS Mitra Manakarra, kantor PLN Mamuju, Hotel Matos, dan bangunan lima lantai di Jl. Dahlia (ESDM, 2021).



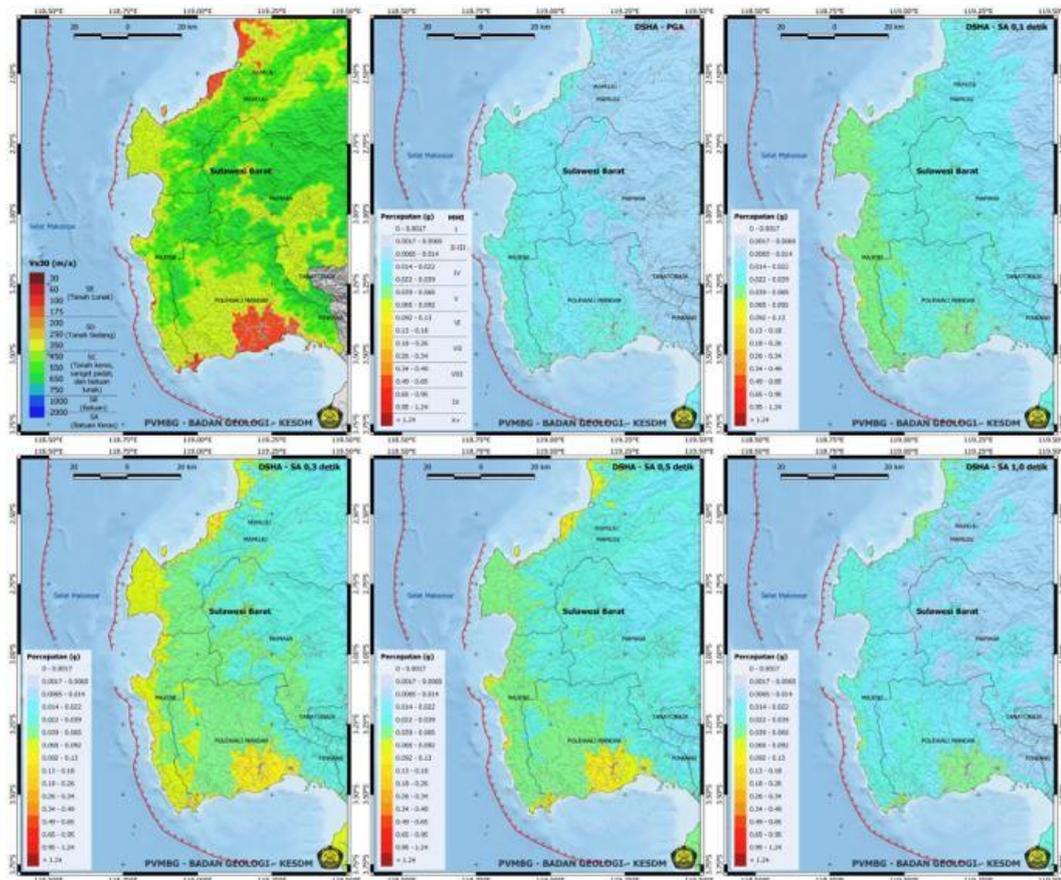
Sumber: ESDM (2021)

Gambar 7 (a) Peta V_{s30} Sulawesi Barat; (b) Titik-titik kerusakan berat akibat gempa Mamuju

Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral dalam artikel terkait kajian kejadian gempa bumi Mamuju Januari 2021 melakukan Model guncangan tanah untuk mengetahui periode gelombang gempa bumi penyebab runtuhnya bangunan tingkat 4-5 di Mamuju. Parameter yang digunakan adalah sebagai berikut: $strike/dip/rake=351^{\circ}/16^{\circ}/94^{\circ}$ dengan panjang dan lebar patahan 18 dan 10.5 km, diperoleh dengan persamaan Papazachos (2004). Patahan naik dengan dip ke arah timur, terletak di sebelah timur pantai barat, termasuk Mamuju, diasumsikan sebagai sumber gempa bumi. Model guncangan gempa bumi pada Gambar 8 menunjukkan bahwa percepatan tanah puncak (PGA) di pantai barat Sulawesi Barat yang berada di belakang patahan, ternyata mengalami guncangan lebih besar daripada daerah timur yang searah dengan dip patahan. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi geologi lokal tidak bisa diabaikan dalam menghitung bahaya gempa bumi.

Hasil model memperlihatkan bahwa daerah yang disusun oleh batuan lunak akan lebih besar daripada daerah yang tersusun oleh batuan keras. Resonansi gelombang gempa dengan periode 0,4 detik merambat secara efektif melalui timbunan sedimen tebal di lokasi tersebut. Jika di lokasi yang tersusun oleh sedimen lunak yang tebal tersebut didirikan bangunan dengan ketinggian sekitar 4-5 lantai,

maka gelombang gempa bumi akan beresonansi dengan periode alami gedung sehingga dapat memicu kerusakan parah hingga keruntuhan pada bangunan tersebut (ESDM, 2021)



Sumber: ESDM (2021)

Gambar 8 Model guncangan gempabumi pada periode gelombang 0 s (PGA), 0.1 s dan 0.4 s

2.3.1 Kecepatan Gelombang Geser (Vs)

Gelombang geser merupakan gelombang badan yang sering dinamakan sebagai gelombang S yang berarti sekunder atau *shear*. Dinamakan gelombang sekunder karena kecepatannya lebih rendah dibandingkan dengan gelombang P (primer atau *pressure*). Dalam medium yang padat, gelombang geser menjaral dengan kecepatan antara 3-4 km/detik. Ketika menjaral di bawah permukaan, gelombang geser memberikan regangan geser pada material yang dilaluinya, sehingga dinamakan gelombang geser. Gelombang geser merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan kekuatan guncangan gempa, amplifikasi

tanah, likuifaksi dan pemetaan kondisi bawah permukaan untuk kebutuhan bidang rekayasa (Rusdy, et al., 2016).

V_{S30} merupakan nilai kecepatan gelombang geser (*shear wave velocity*) hingga kedalaman 30 meter yang umumnya digunakan sebagai parameter dalam mengklasifikasikan bahaya seismik suatu wilayah dan standarisasi kode bangunan. Nilai V_{S30} . Data V_{S30} dapat diperoleh dengan pengukuran *active seismic* seperti *Multichannel Analysis Surface Waves* (MASW) atau *passive seismic* dengan pengukuran mikroseismik. Data V_{S30} dapat pula diperoleh dengan pendekatan model topografi seperti data V_{S30} yang disediakan oleh USGS (Wibowo & Huda, 2020).

Nilai V_{S30} dapat digunakan sebagai salah satu parameter dalam menentukan pengklasifikasian jenis tanah dan batuan berdasarkan kriteria SNI 1726:2019 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Perhitungan V_{S30} dapat diperoleh dengan persamaan:

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{si}}} \quad (1)$$

Dengan,

d_i = tebal setiap lapisan antara kedalaman 0 sampai 30 meter

V_{si} = kecepatan gelombang geser lapisan i (m/detik)

$\sum_{i=1}^n d_i$ = 30 meter

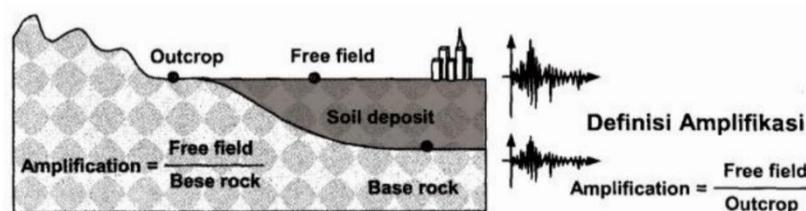
Tabel 1 Klasifikasi Situs Berdasarkan Nilai V_s

Kelas Situs	\bar{V}_s (m/detik)
SA (batuan keras)	>1500
SB (batuan)	750 sampai 1500
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750
SD (tanah sedang)	175 sampai 350
SE (tanah lunak)	<175

Sumber: SNI 1726:2019

2.3.2 Faktor Amplifikasi

Amplifikasi merupakan perbesaran gelombang seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan. Faktor amplifikasi dikontrol oleh adanya kontras impedansi antara lapisan lunak (sedimen) dengan *bedrock*. Gelombang seismik akan mengalami perbesaran jika merambat pada suatu medium ke medium lain yang lebih lunak dibandingkan dengan medium awal yang dilaluinya. Dengan demikian, tanah yang lunak akan menimbulkan intensitas gempa yang lebih besar dari batuan keras pada jarak dan sumber gempa yang sama. Nilai amplifikasi bisa bertambah, jika batuan telah mengalami deformasi (pelapukan, pelipatan atau pesesaran) yang mengubah sifat fisik batuan. Pada batuan yang sama, nilai amplifikasi dapat bervariasi sesuai dengan tingkat deformasi dan pelapukan pada tubuh batuan tersebut (Wibowo & Huda, 2020).



Gambar 9 Ilustrasi amplifikasi

Amplifikasi terjadi karena perbedaan kecepatan gerakan gelombang geser (V_s) di batuan dasar dan pada lapisan tanah (sedimen). Fujimoto dan Midorikawa (2006) menyarankan hubungan antara V_{s30} dan faktor amplifikasi dengan persamaan sebagai berikut:

$$\log(\text{ampv}) = 2.367 - 0.852 \log(V_{s30}) \quad (2)$$

Dengan,

V_{s30} = kecepatan gelombang S pada kedalaman 30 m (m/detik)

Ampv = faktor amplifikasi

Amplifikasi gerakan tanah akibat kondisi geologi lokal (kondisi topografi dan resonansi gerakan tanah) berperan penting dalam memperbesar kerusakan gempa. Selain itu, beberapa sifat fisik tanah seperti ketebalan, densitas, jenis, geometri dan topografi juga mempengaruhi faktor amplifikasi gerakan tanah akibat gempa. Amplifikasi gelombang seismik dapat terjadi karena beberapa sebab, di antaranya adanya lapisan lapuk yang terlalu tebal di atas lapisan keras pada suatu tempat,

suatu wilayah mempunyai frekuensi natural yang rendah, frekuensi natural gempa bumi dan geologi setempat sama atau mendekati sama, dan energi gempa terjebak di lapisan lapuk dalam waktu yang lama. Faktor penting yang digunakan untuk mengestimasi efek lokal yang diakibatkan oleh gempa bumi adalah hubungan antara frekuensi natural suatu bangunan dengan frekuensi natural lapisan tanah di bawahnya. Sehingga bisa diketahui nilai resonansi bangunan yang nantinya bisa diestimasi kerentanannya terhadap gelombang gempa (Wibowo & Huda, 2020).

2.4 Analisis Respons Situs terhadap Gempa

Site Specific Response Analysis adalah studi yang dilakukan dengan melakukan analisis perbesaran getaran gempa dari lapisan batuan dasar ke permukaan tanah. Percepatan spektra terdiri dari 3 jenis yaitu pada saat $T = 0$ detik, $T = 0,2$ detik, dan $T = 1$ detik (Wijaya, et al., 2013).

Menurut Prawirodikromo (2017), spektrum respons adalah spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik/plot antara periode getaran struktur T dan respons maksimumnya pada rasio redaman dan beban gempa tertentu. Sedangkan menurut Paz, et al. (2004), respons spektrum adalah plot respons maksimum (perpindahan maksimum, kecepatan, percepatan, atau kuantitas lain yang diinginkan) ke fungsi beban yang ditentukan untuk semua kemungkinan sistem derajat kebebasan tunggal. Maka dapat disimpulkan bahwa spektra respons adalah grafik antara periode getar struktur (pada sumbu x) dengan respons-respons maksimumnya (pada sumbu y) yang dapat berupa perpindahan maksimum, kecepatan maksimum ataupun percepatan maksimum massa struktur dengan sistem derajat kebebasan tunggal (Single Degree of Freedom, SDOF) (Kristiyanto, et al., 2022).

Analisis respons spektrum pada permukaan dilakukan dengan model profil tanah menggunakan riwayat waktu pada batuan untuk mendapatkan gerakan pada permukaan. Analisis respons tanah dapat diperkirakan dengan menggunakan metode analisis linear ekuivalen atau dengan cara analisis non-linear. Analisis parametrik dilakukan untuk mengakomodasi ketaktentuan sifat dinamis tanah. Analisis biasanya dibuat dengan estimasi terbaik (rata-rata) batas atas dan batas bawah sifat tanah. Dalam analisis respons spektrum, dapat digunakan berbagai jenis

software untuk metode analisis yang berbeda-beda, seperti SHAKE dan EERA untuk analisis linear ekuivalen, NERA untuk analisis non-linear, serta DEEPSOIL.

Respons spektra permukaan yang dianalisa secara statistik dapat dikembangkan untuk mendapatkan respons spektra permukaan rencana. Riwayat waktu yang diperoleh dari analisis respons tanah dapat digunakan sebagai riwayat waktu permukaan. Karena input respons spektra batuan mungkin tidak mendekati respons spektra desain batuan (khususnya bila menggunakan riwayat waktu alami), dianjurkan untuk mendapatkan rasio amplifikasi dari analisis respons permukaan terhadap respons spektra dari hasil perhitungan gerakan permukaan secara langsung. Rasio amplifikasi adalah rasio respons spektra pada permukaan tanah yang dihitung dari analisis respons permukaan dibagi respons spektra yang berkaitan dengan input gerakan batuan. Analisis statistika dapat dibuat dengan rasio amplifikasi atau beberapa metode lain. Estimasi respons spektra pada permukaan tanah kemudian diperoleh dengan mengalikan rasio amplifikasi dengan respons spektra di semua rentang periodanya. Respons spektra desain kemudian dikembangkan dengan memperhalus bentuk respons spektra permukaan estimasi seperti yang diinginkan. Riwayat waktu respons permukaan dapat digunakan langsung untuk mewakili gerakan permukaan atau dengan menggunakan riwayat waktu sintetik yang dikembangkan sesuai dengan desain respons spektra permukaan (Mina & Kusuma, 2013).

2.4.1 Analisis Respons Situs dengan Metode *Elastic Equivalent Linear*

Analisis respons spektrum dengan metode ekuivalen linear 1-D pertama kali diperkenalkan oleh Schnabel et al. pada tahun 1972, merupakan metode yang terkenal dan sering digunakan. Metode ini digunakan untuk memperkirakan transformasi gerakan gelombang gempa saat merambat ke permukaan melalui lapisan tanah. Pada metode ekuivalen linear, diasumsikan bahwa propagasi vertikal gelombang geser dari *uniform half-space* melalui lapisan horizontal dari profil tanah yang dimodelkan sebagai bahan visko-elastis memiliki rasio redaman konstan di semua frekuensi. Perhitungan dilakukan dalam domain frekuensi sehingga meningkatkan kecepatan dan stabilitas numerik perhitungan. Namun, untuk

memodelkan respons non-linier tanah di domain frekuensi, maka diperlukan prosedur iterasi (Lasley, et al., 2014).

Untuk setiap lapisan profil tanah, prosedur ekuivalen linear memperkirakan perilaku tegangan-regangan nonlinear dengan menggunakan reduksi modulus geser dan kurva redaman (*damping curves*). Prosedur iterasi digunakan untuk menentukan sifat-sifat tanah yang terdegradasi akibat induksi regangan nonlinear. Untuk iterasi pertama dari algoritma tersebut, respons dari profil tanah dihitung dengan menggunakan nilai regangan kecil dari modulus geser dan redaman.

Dengan menggunakan modulus geser awal dan nilai redaman, respons regangan geser riwayat waktu dihitung, di mana sifat-sifat tanah dipertahankan konstan dari awal sampai akhir gerakan gempa. Respons riwayat waktu dari tiap lapisan serta perwakilan nilai regangan geser γ_{eff} , ditentukan. Nilai regangan ini digunakan untuk menentukan nilai yang terdegradasi dari modulus geser dan redaman yang digunakan pada analisis iterasi berikutnya. Proses dilakukan berulang hingga nilai modulus dan redaman menyatu dengan kurva degradasi yang telah ditentukan. Secara historis, berbagai metode dan nilai telah digunakan untuk menghitung regangan geser efektif (γ_{eff}). Nilai regangan efektif sebesar 65% dari regangan geser maksimum adalah yang paling umum digunakan saat ini (Lasley, et al., 2014).

Lasley et al. (2014) telah mengumpulkan dari berbagai sumber untuk menentukan dasar dari algoritme ekuivalen linear. Algoritme ekuivalen linear membutuhkan iterasi hingga asumsi modulus geser dan redaman dari awal iterasi sesuai dengan modulus geser dan redaman dari regangan efektif yang dihitung. Kramer (1996) dan buku manual EERA memberikan persamaan untuk regangan geser domain waktu (*time-domain*) dalam suatu lapisan untuk gerakan harmonik. Namun, persamaan domain frekuensi (*frequency-domain*) untuk regangan geser pada suatu lapisan untuk gerakan non-harmonik tidak didefinisikan secara eksplisit dalam referensi tersebut. Adapun persamaan regangan di domain frekuensi adalah sebagai berikut:

$$\gamma_j(z_j, \omega) = ik_j^* \{A_j(\omega) \exp(ik_j^* z_j) - B_j(\omega) \exp(-ik_j^* z_j)\} \quad (3)$$

Di mana z_j adalah kedalaman dari atas lapisan j ; ω adalah larik frekuensi sudut diskrit yang ditentukan oleh transformasi Fourier dan panjang N_{FFT} ; (ω) dan (ω) adalah larik amplitudo dari gelombang geser harmonik naik dan turun lapisan j ; i adalah bilangan kompleks; dan k_j^* adalah bilangan gelombang kompleks dari lapisan $(\omega\sqrt{\rho/G^*})$. Demikian pula, persamaan tegangan geser domain frekuensi dalam suatu lapisan adalah:

$$\tau_j(z_j, \omega) = ik_j^* G_j^* \{A_j(\omega) \exp(ik_j^* z_j) - B_j(\omega) \exp(-ik_j^* z_j)\} \quad (4)$$

Di mana G_j^* adalah modulus geser kompleks dari lapisan. Beberapa *software* mungkin menggunakan G (modulus geser lapisan) melainkan G^* (modulus geser kompleks). Akibatnya, kurva tegangan-regangan dalam domain waktu menjadi garis lurus dengan kemiringan G , bukan merupakan deret dari *hysteresis loops*. Menggunakan G sebagai pengganti G^* tidak signifikan untuk menghitung akselerasi *time history* dan spektrum respons, tetapi penggunaan G^* sangat penting untuk menghitung energi yang hilang.

2.5 DEEPSOIL

Dalam penelitian ini, analisis respons spektrum akan dilakukan dengan menggunakan *software* DEEPSOIL. DEEPSOIL merupakan sebuah aplikasi yang pertama kali dikembangkan pada 1998 oleh Youssef M.A. Hashash di University of Illinois, Urbana-Champaign. DEEPSOIL adalah program analisis *site response* satu dimensi yang dapat melakukan: a) analisis 1-D nonlinear domain waktu dengan dan tanpa pembangkitan tekanan air pori, b) analisis ekuivalen linear 1-D domain frekuensi termasuk konvolusi dan dekonvolusi, dan c) analisis 1-D linear domain waktu dan domain frekuensi.

Lasley, et al. (2014) telah melakukan studi untuk membandingkan beberapa *software* analisis *site response* dengan metode *equivalent-linear* seperti SHAKE91, EERA, dan DEEPSOIL. Melalui studi tersebut, penulis membandingkan hasil komputasi seperti respons spektrum, modulus geser, serta rasio regangan terhadap profil tanah yang sama. DEEPSOIL memiliki beberapa kelebihan dibandingkan *software* sebelumnya (SHAKE91) seperti *graphic interface*, katalog modulus geser dan kurva *damping*, plot secara langsung ke Microsoft Excel, dan dapat digunakan

untuk menginput beberapa data gempa sekaligus. Berikut ini merupakan parameter-parameter penting dalam melakukan analisis respons spektrum dengan metode ekuivalen linear berdasarkan manual DEEPSOIL V7.0 (2020).

2.5.1 Metode Perhitungan Respons Spektrum

2.5.1.1 Frequency-domain solution

Dalam solusi domain-frekuensi, gerakan input *Fourier Amplitude Spectra* (FAS) dimodifikasi dengan fungsi transfer yang didefinisikan sebagai:

$$H(f) = \frac{-f_n^2}{(f^2 - f_n^2) - 2i\xi f f_n} \quad (5)$$

di mana f_n adalah frekuensi natural osilator yang dihitung sebagai $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$ dan ξ adalah rasio redaman dihitung sebagai $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$. Penggunaan solusi domain frekuensi membutuhkan FFTs (*Fast Fourier Transforms*) untuk bergerak di antara domain frekuensi, di mana fungsi transfer osilator berada diterapkan, dan domain waktu, tempat respons osilator puncak diperkirakan. Di atas frekuensi rentang gerak tanah, solusi frekuensi-domain ditetapkan.

2.5.2 Model Tanah (*Soil Models*)

2.5.2.1 Hyperbolic/Pressure-Dependent Hyperbolic (MKZ)

DEEPSOIL menggabungkan *pressure-dependent hyperbolic model*. 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 curve* sebagai berikut:

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad (6)$$

di mana G_0 = modulus geser awal, τ = kuat geser, γ = regangan geser. *Beta*, s , dan γ_r adalah model parameter masing-masing. Tidak terdapat sambungan antara tekanan pembatas dan tegangan geser.

DEEPSOIL memperluas model untuk memungkinkan penyambungan dengan membuat tekanan pembatas γ_r sebagai berikut (Hashash dan Park, 2001):

$$\gamma_r = \text{Reference Strain} \left(\frac{\sigma'_v}{\text{Reference Stress}} \right)^b \quad (7)$$

di mana σ'_v adalah tegangan vertikal efektif. Tegangan referensi adalah tegangan vertikal efektif di mana $\gamma_r =$ regangan referensi. Model ini disebut sebagai "*pressure-dependent hyperbolic model*".

Model ini hampir linear pada regangan kecil dan menghasilkan redaman histeretik nol. Redaman regangan kecil (*small strain damping*) harus ditambahkan secara terpisah untuk mensimulasikan perilaku tanah aktual yang menunjukkan redaman bahkan pada regangan yang sangat kecil (Hashash dan Park, 2001). Redaman regangan kecil didefinisikan sebagai:

$$\xi = \text{Small Strain Damping Ratio} \left(\frac{1}{\sigma'_v} \right)^d \quad (8)$$

di mana d dapat diatur ke nol jika diinginkan redaman regangan kecil yang bebas tekanan.

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

(Darendeli 2001) melakukan studi terkait kurva kuat geser - regangan geser berdasarkan data yang diperoleh secara eksperimental. Pada regangan kecil data dikumpulkan menggunakan uji kolom resonansi, dan pada tingkat regangan geser menengah digunakan hasil uji geser torsional. Nilai-nilainya diekstrapolasi pada tingkat regangan besar. Ekstrapolasi ini mungkin menghasilkan perkiraan lebih rendah atau lebih tinggi terhadap 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 *General Quadratic/Hyperbolic* yang diusulkan oleh (Groholski et al. 2016) memiliki skema *curve fitting* yang mengoreksi secara otomatis *reference curve* seperti Darendeli (2001) berdasarkan kekuatan geser yang ditentukan pada regangan besar (parameter τ_{\max} dalam persamaan 23). Parameter *curve fitting* θ_1 hingga θ_5 (persamaan 23) digunakan untuk menentukan kurva modulus reduksi yang diperoleh dari studi referensi sebanyak mungkin dan memodifikasi nilai regangan besar berdasarkan kekuatan geser regangan besar yang ditentukan.

Parameter τ_{max} , dan θ_1 sampai θ_5 diperlukan untuk menentukan kekuatan kurva kuat geser terkoreksi-regangan geser. Untuk memperoleh τ_{max} , perlu ditentukan kuat geser dari material tanah yang disimulasikan pada regangan besar. Parameter θ_1 sampai θ_5 bisa diperoleh berdasarkan studi referensi Groholski et al. (2016). Salah satu cara untuk mendapatkan parameter ini yaitu dengan menggunakan *reference curve* yang tersedia pada DEEPSOIL. Setelah membuan lapisan domain, GQ/H mengkalkulasi kurva kuat geser terkoreksi-regangan geser dan memberikan parameter θ_1 hingga θ_5 . Nilai-nilai ini dapat langsung digunakan dalam material histeretik tanah tanpa perlu mendefinisikan kurva kuat geser-regangan geser. Model material menggunakan τ_{max} , G_0 , dan θ_1 hingga θ_5 untuk membangun kurva kuat geser-regangan geser menggunakan fungsi berikut:

$$\theta_\tau = \theta_1 + \theta_2 * \frac{\theta_4 * \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}}{\theta_3^{\theta_5} + \theta_4 * \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}} \quad (9)$$

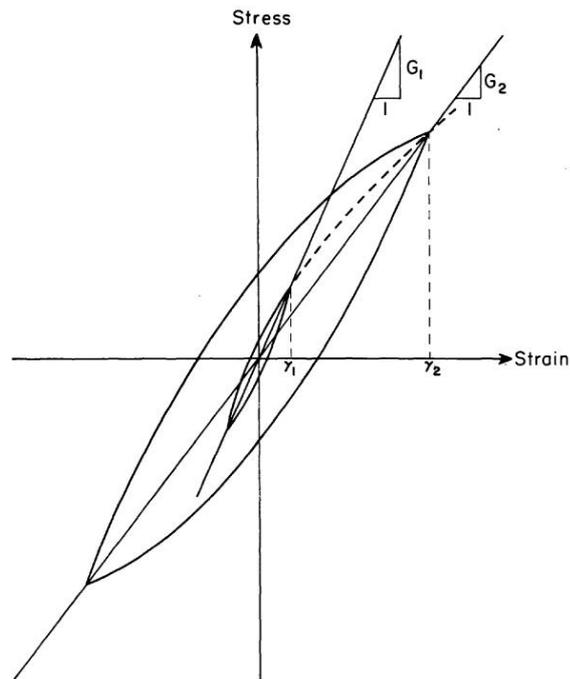
di mana γ_r adalah regangan referensi dan dihitung sebagai $\gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_0}$. Ketika θ_τ telah ditentukan, maka kurva kuat geser-regangan geser sebagai berikut:

$$\tau = \tau_{max} * \left[\frac{1}{\theta_\tau} * \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) - \sqrt{\left\{ 1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right\}^2 - 4 * \theta_\tau * \frac{\gamma}{\gamma_r}} \right\} \right] \quad (10)$$

2.5.4 Kurva Referensi (*Reference Curve*)

2.5.4.1 Seed dan Idriss (1970) untuk Pasir

Seed & Idriss (1970) telah melakukan studi terkait modulus tanah dan faktor redaman untuk analisis respons dinamis. Dalam studi tersebut, dinyatakan bahwa kasus respons tanah yang melibatkan tidak ada perpindahan tanah residual, respons utamanya ditentukan oleh modulus geser dan karakteristik redaman tanah dalam suatu kondisi pembebanan siklik simetris. Sebagian besar tanah memiliki hubungan tegangan-regangan dalam bentuk kurva linear seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Modulus geser biasanya diekspresikan sebagai modulus *secant* yang ditentukan oleh titik ekstrem pada *hysteretic loop* di mana faktor redaman sebanding dengan area di dalam *hysteretic loop* tersebut. Modulus geser dan faktor redaman ini bergantung pada besarnya regangan yang ditentukan *hysteretic loop*. Dengan demikian, baik modulus geser dan faktor redaman ditentukan sebagai fungsi dari regangan yang diinduksi dalam spesimen tanah.



Sumber: Seed & Idriss (1970)

Gambar 10 Kurva hysteresis hubungan tegangan-regangan pada amplitude regangan berbeda

Sebelumnya, telah dilakukan studi komprehensif tentang faktor-faktor yang mempengaruhi modulus geser dan faktor redaman tanah dilakukan oleh Hardin dan Drnevich (1970). Dalam penelitian ini, dijelaskan bahwa faktor-faktor utama yang mempengaruhi modulus geser dan faktor redaman antara lain; *strain amplitude* (γ), *effective mean principal stress* (σ'_m), *void ratio* (e), *number of cycles of loading* (N), serta *degree of saturation* untuk tanah kohesif (S). Sementara itu, terdapat pula faktor lain yang tidak terlalu signifikan seperti *octahedral shear stress*, *overconsolidation ratio* (OCR), *effective stress strength parameter* (c' dan ϕ'), serta faktor waktu.

Untuk menentukan nilai dari modulus geser maksimum (pada regangan nol) dan variasi nilai modulus dengan regangan untuk semua jenis tanah dapat digunakan persamaan:

$$G_{max} = 14670 \times \frac{(2.973-e)^2}{1+e} (OCR)^a (\sigma'_m)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

di mana G_{max} = modulus geser maksimum (psf), e = *void ratio*, OCR = *overconsolidation ratio*, a = parameter yang bergantung pada indeks plastisitas tanah, dan σ'_m = *mean principal effective stress* (psf).

Nilai modulus geser untuk pasir sangat dipengaruhi oleh tekanan pembatas (*confining pressure*), amplitudo regangan, dan *void ratio* (atau kepadatan relatif) tetapi tidak dipengaruhi secara signifikan oleh variasi ukuran butiran. Secara umum, hubungan antara modulus geser dengan tekanan pembatas ditunjukkan oleh persamaan:

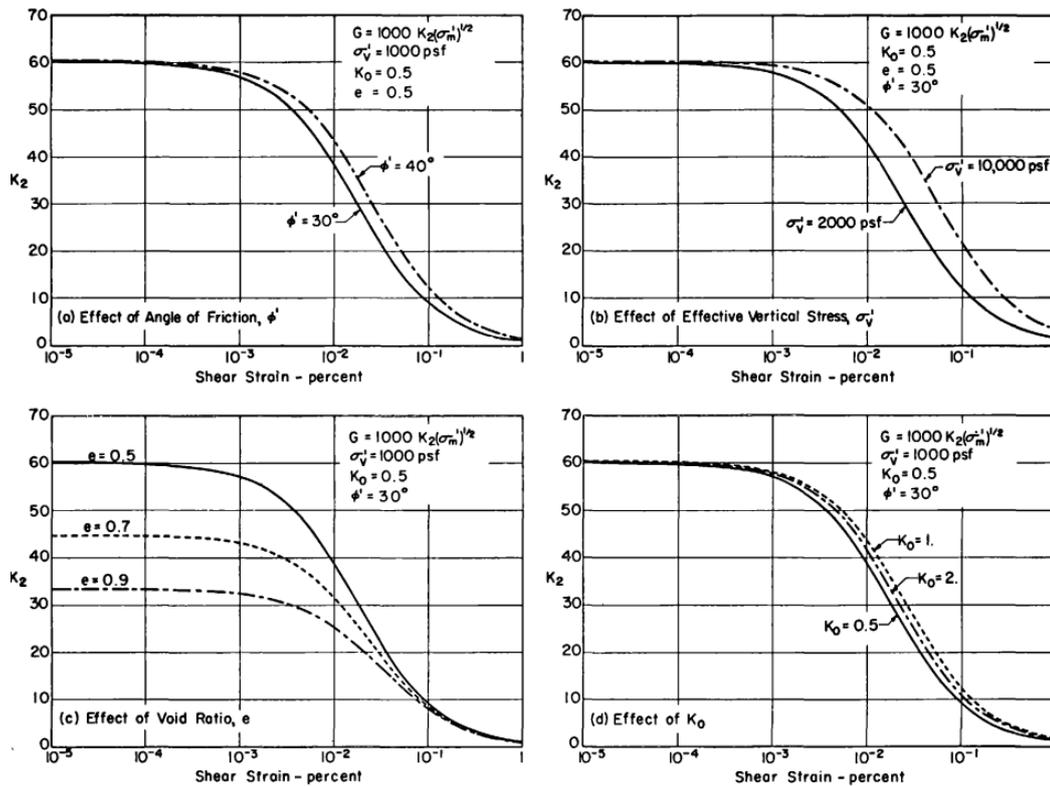
$$G = 100 K_2 (\sigma'_m)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

sehingga pengaruh *void ratio* dan amplitudo regangan dapat dinyatakan melalui pengaruhnya terhadap parameter K_2 .

Pengaruh faktor lain terhadap K_2 dapat diilustrasikan oleh hasil pada yang dihitung menggunakan hubungan yang disarankan oleh Hardin dan Drnevich. Plot disajikan untuk menunjukkan pengaruh ϕ' , tegangan vertikal efektif (σ'_v), K_0 , dan *void ratio* pada perhitungan hubungan antara K_2 dan amplitudo regangan. Dapat dilihat bahwa:

- a) Pada regangan yang sangat rendah ($\gamma \leq 10^{-3}$ persen), K_2 hanya bergantung pada *void ratio* (e).
- b) Pada regangan menengah ($10^{-3} < \gamma < 10^{-1}$ persen) variasi K_2 dengan regangan hanya sedikit dipengaruhi oleh *vertical stress*, dan sangat sedikit oleh variasi ϕ' dan K_0 . Namun, nilai K_2 masih sangat dipengaruhi oleh *void ratio*.
- c) Pada regangan yang sangat tinggi ($\gamma > 10^{-1}$ persen), nilai K_2 sedikit dipengaruhi oleh *vertical stress* tetapi pada dasarnya tidak bergantung pada K_0 , ϕ' dan e .

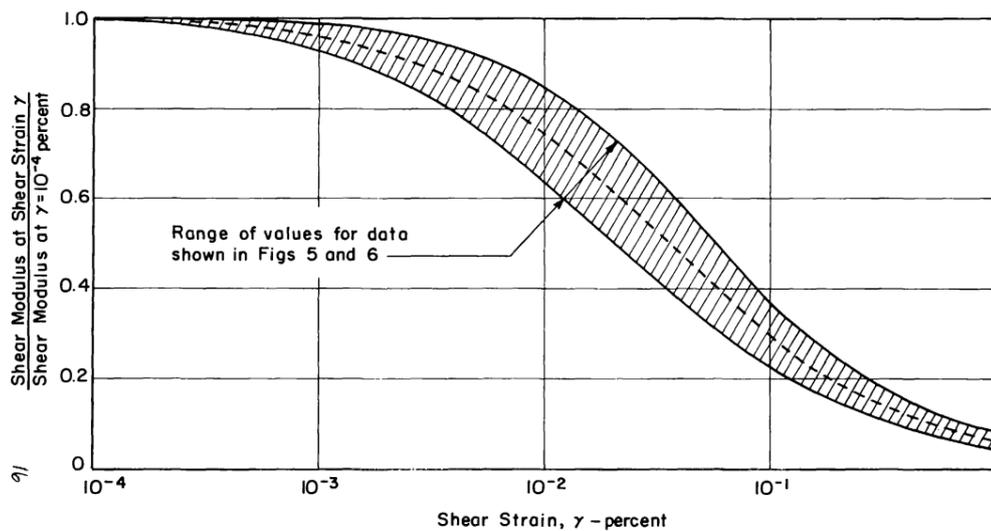
Jadi, untuk tujuan praktis nilai K_2 dapat dipertimbangkan untuk ditentukan terutama oleh *void ratio* atau kerapatan relatif dan amplitudo regangan dari gerakan.



Sumber: Seed & Idriss (1970)

Gambar 11 Pengaruh dari berbagai faktor terhadap modulus geser pasir (berdasarkan Hardin dan Drnevich)

Berdasarkan beberapa data yang telah dikumpulkan dari pengujian laboratorium, maka dapat dibuat suatu hubungan dari faktor-faktor tersebut. Dapat disimpulkan bahwa dari pendekatan tersebut, hubungan antara modulus dan regangan geser pada regangan yang sangat rendah untuk pasir dapat ditunjukkan pada Gambar 12.



Sumber: Seed & Idriss (1970)

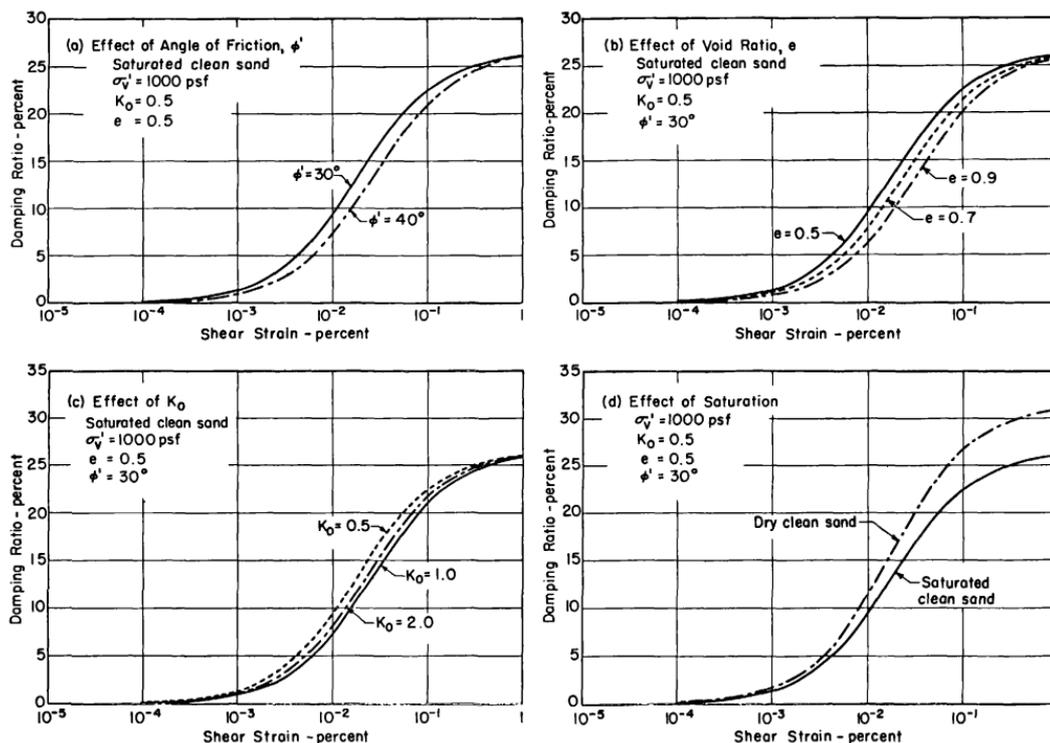
Gambar 12 Variasi modulus geser dengan regangan geser untuk pasir

Dari studi mereka tentang faktor-faktor yang mempengaruhi rasio redaman pasir, Hardin dan Drnevich menyimpulkan bahwa *effective mean principal stress* (atau σ'_v dan K_0), rasio pori dan jumlah siklus sangat penting, sedangkan tegangan geser oktahedral, sudut gesekan dan derajat kejenuhan memiliki efek yang lebih rendah. Seperti dalam penentuan modulus, efek dari variasi ukuran butiran dianggap relatif tidak signifikan.

Perhitungan efek dari faktor-faktor di atas pada hubungan antara rasio redaman dan amplitudo regangan geser, seperti yang ditentukan oleh Hardin-Drnevich ditunjukkan pada Gambar 13. Jelas bahwa pengaruh atau σ' , K_0 , angka pori, dan derajat kejenuhan relatif kecil, dapat dilihat dari persamaan untuk rasio redaman maksimum:

$$\lambda_{max} = 30 - 1.5 \log_{10} N \quad (13)$$

Bahwa jika nilai λ ditentukan untuk sekitar $N = 5$ siklus, nilai untuk jumlah siklus lainnya dalam kisaran 5 sampai 30 tidak akan berbeda secara signifikan. Dengan demikian, faktor utama yang mempengaruhi hubungan antara rasio redaman dan regangan geser adalah *vertical confining pressure* (σ'_v).

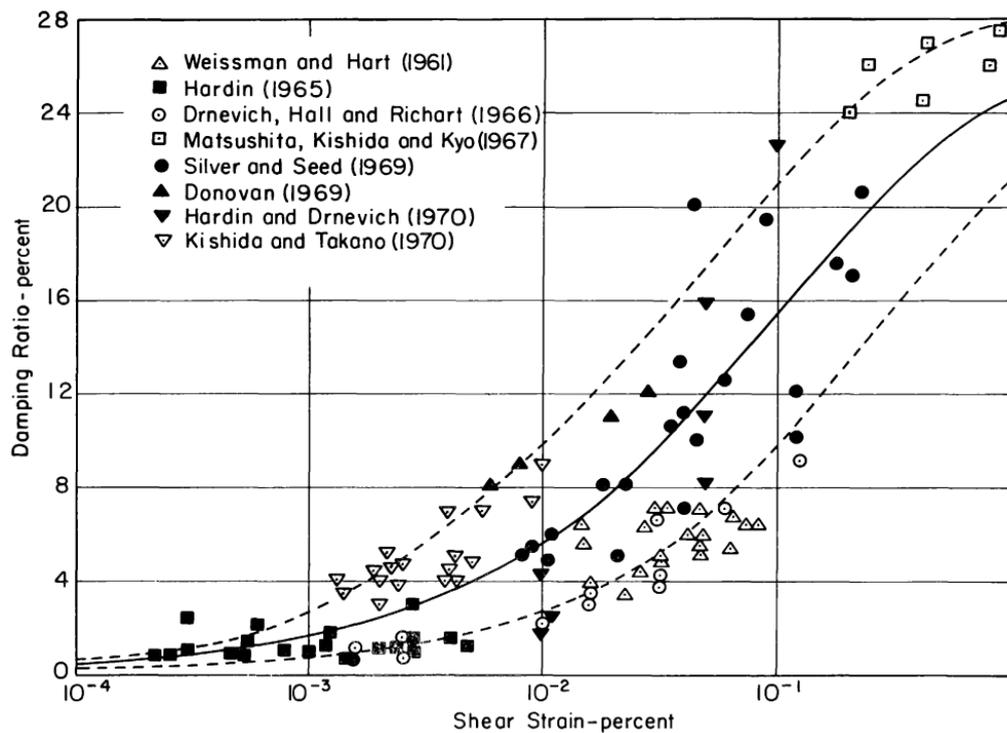


Sumber: Seed & Idriss (1970)

Gambar 13 Pengaruh dari berbagai faktor terhadap rasio redaman pasir (berdasarkan Hardin dan Drnevich)

Berdasarkan beberapa penyelidikan sebelumnya tentang rasio redaman pasir, maka hasil penelitian ini dirangkum dalam Gambar 14. Perkiraan hubungan batas atas dan bawah ditunjukkan oleh garis putus-putus dan hubungan rata-rata untuk semua data pengujian ditunjukkan oleh garis padat. Hubungan rata-rata ini adalah memungkinkan untuk memberikan nilai rasio redaman dengan akurasi yang cukup.

Kurva pada Gambar 12 Gambar 14 juga memberikan dasar untuk mengevaluasi hubungan antara rasio redaman dan regangan untuk pasir tertentu yang dibatasi data uji tersedia. Jika nilai rasio redaman pada tingkat regangan 0.1 sampai 0.5 persen ditentukan, kemungkinan rasio redaman di regangan lain dapat diasumsikan dengan menggambar garis melalui titik data yang diketahui sejajar dengan kurva.

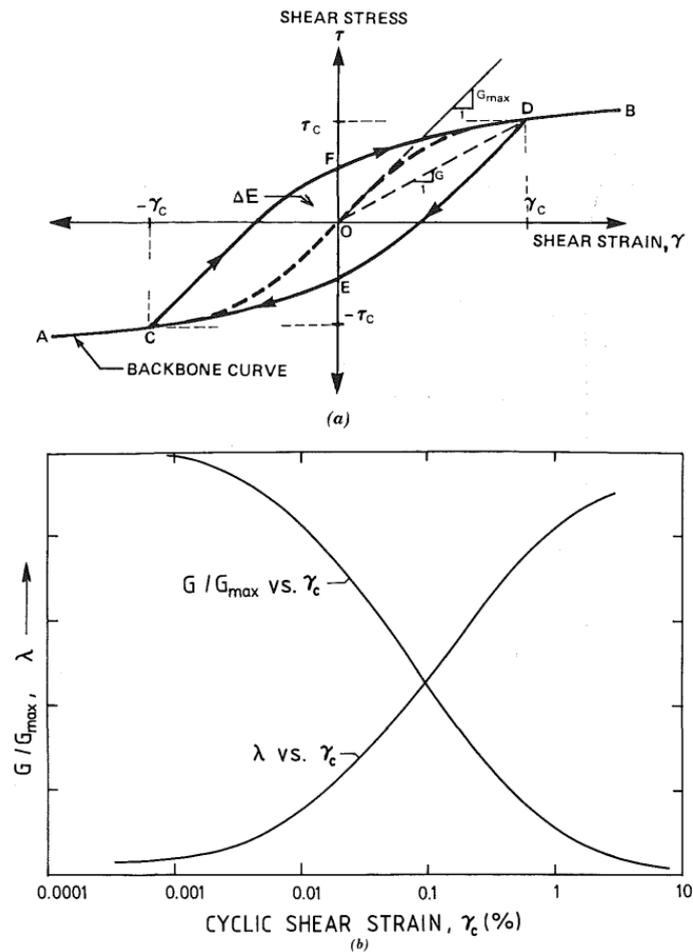


Sumber: Seed & Idriss (1970)

Gambar 14 Rasio redaman untuk pasir

2.5.4.2 Vucetic dan Dobry (1991) untuk Lempung

Vucetic dan Dobry (1991) melakukan study untuk mengetahui pengaruh indeks plastisitas (PI) terhadap parameter siklik tegangan-regangan tanah tersaturasi yang digunakan dalam analisis respons seismik tanah. Gambaran dasar hubungan tegangan-regangan ditunjukkan melalui kurva hysteresis pada Gambar 15 yaitu antara tegangan geser (τ) dan regangan geser (γ) untuk siklus pertama dari pembebanan geser siklik tidak langsung. Kurva hubungan ini terdiri dari kurva pembebanan awal (*initial loading*) OD, *unloading branch loop* DEC, dan *reloading branch* CFD. *Loop* pada kurva diidealkan menjadi simetris sempurna dan menutup pada titik D, yaitu degradasi kekakuan yang mungkin terjadi pada siklus pertama diabaikan, karena itu bagian positif dan negatif dari *backbone curve* diplot sepanjang jalur ACODB simetris. *Secant shear modulus* didefinisikan sebagai $G = \tau_c / \gamma_c$, di mana τ_c = amplitudo tegangan siklik sesuai dengan amplitudo regangan γ_c . Pada regangan yang sangat kecil $G = G_{max}$.



Sumber: Vucetic dan Dobry (1991)

Gambar 15 (a) Kurva tegangan-regangan siklus pertama; (b) Variasi parameter siklik dengan regangan geser siklik

Sebelumnya, telah dilakukan pula studi terkait efek dari faktor berbeda terhadap G_{max} , G/G_{max} , dan λ yang disimpulkan pada publikasi Dobry dan Vucetic (1987) seperti yang terlihat pada Tabel 2.

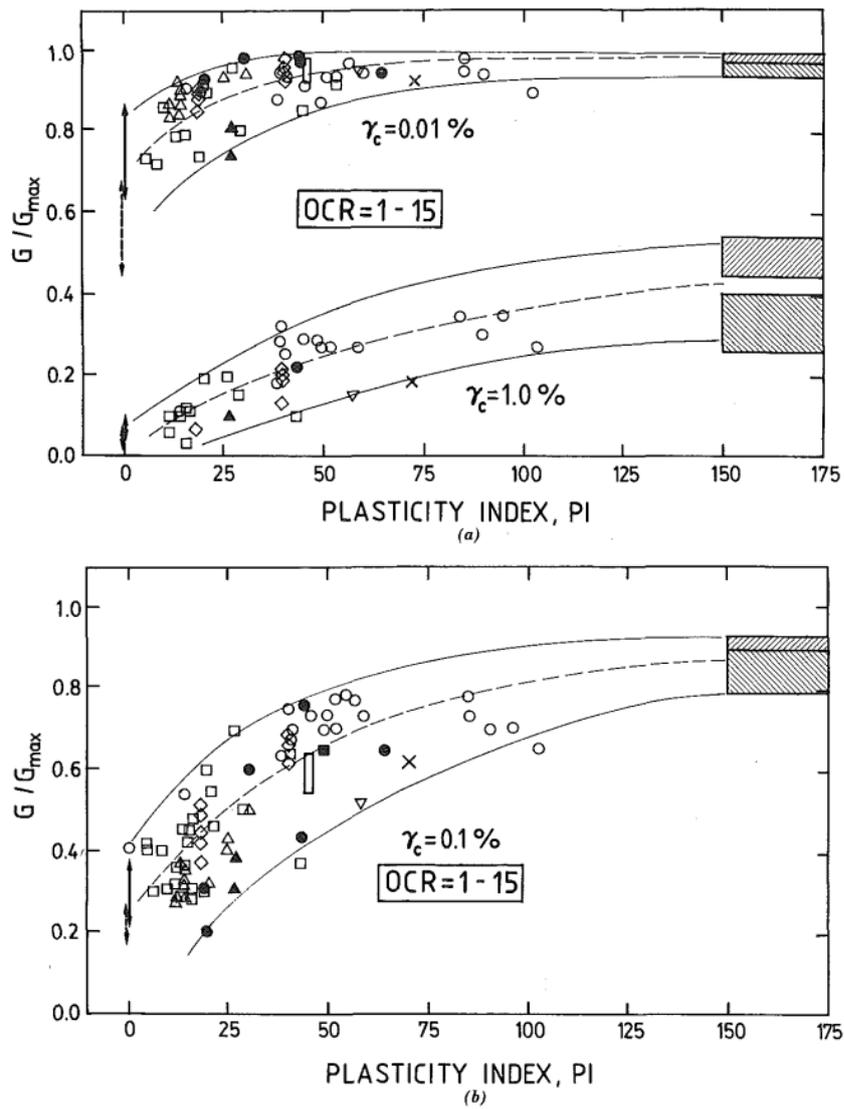
Tabel 2 Efek dari penambahan berbagai faktor terhadap G_{max} , G/G_{max} , dan faktor redaman λ pada lempung *normally consolidated* dan *moderately overconsolidated*

Faktor	G_{max}	G/G_{max}	λ
Confining pressure, $\bar{\sigma}_0$	Bertambah dengan $\bar{\sigma}_0$	Konstan atau bertambah dengan $\bar{\sigma}_0$	Konstan atau berkurang dengan $\bar{\sigma}_0$
Void ratio, e	Berkurang dengan e	Bertambah dengan e	Berkurang dengan e
Umur geologis, t_g	Bertambah dengan t_g	Kemungkinan bertambah dengan t_g	Berkurang dengan t_g
Sementasi, c	Bertambah dengan c	Kemungkinan bertambah dengan c	Kemungkinan berkurang dengan c
Overconsolidation, OCR	Bertambah dengan OCR	Tidak terpengaruh	Tidak terpengaruh
Indeks Plastisitas, PI	Bertambah dengan PI jika $OCR > 1$; Konstan jika $OCR = 1$	Bertambah dengan PI	Berkurang dengan PI
Cyclic strain, γ_c	-	Berkurang dengan γ_c	Bertambah dengan γ_c
Strain rate, $\dot{\gamma}$ (frekuensi pembebanan siklik)	Bertambah dengan $\dot{\gamma}$	G berkurang dengan $\dot{\gamma}$; G/G_{max} kemungkinan tidak terpengaruh jika diukur pada $\dot{\gamma}$ yang sama	Konstan atau kemungkinan bertambah dengan $\dot{\gamma}$

Jumlah siklus pembebanan, N	Berkurang setelah N siklus pada nilai γ_c tinggi tetapi kembali setelah beberapa waktu	Berkurang setelah N siklus pada nilai γ_c tinggi (G_{max} diukur sebelum siklus N)	Tidak signifikan terhadap nilai γ_c dan N sedang
---	---	---	---

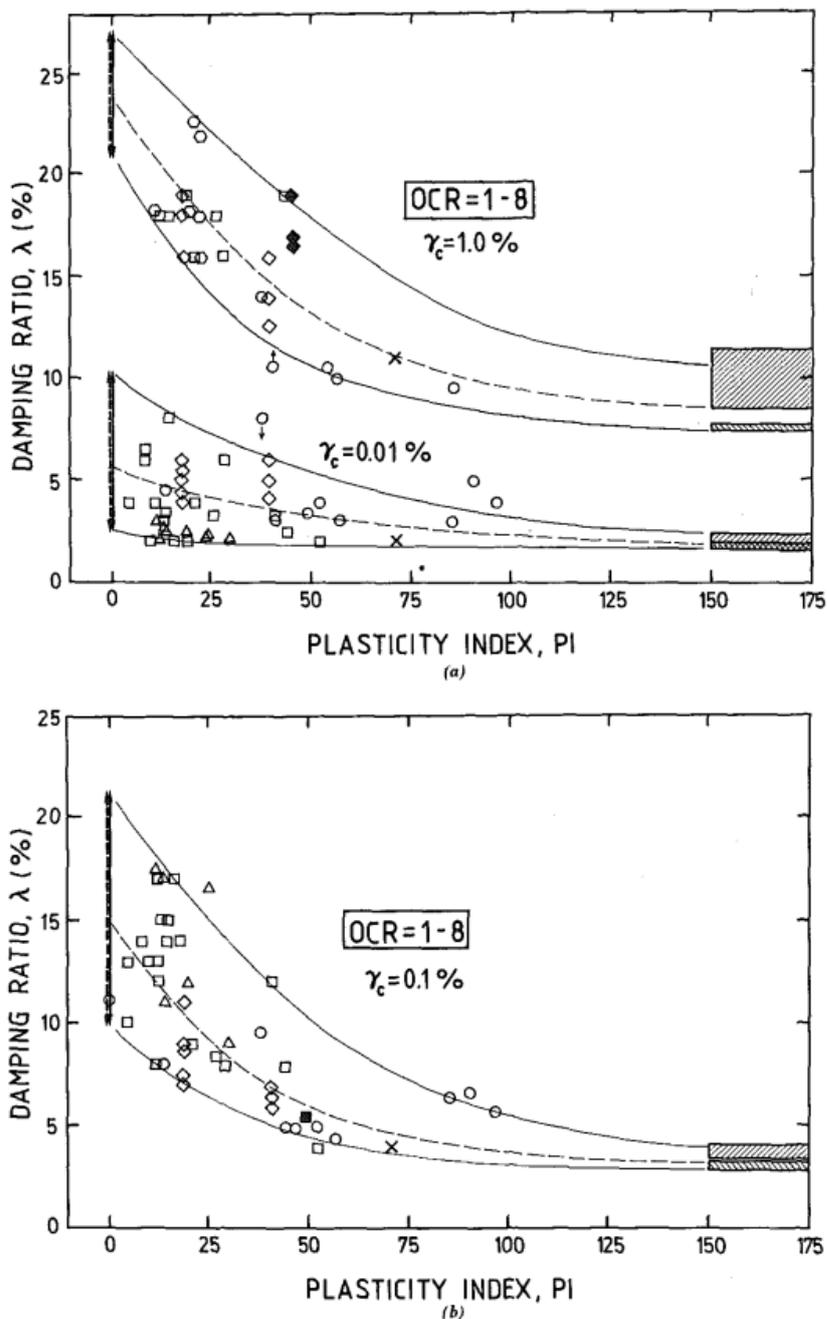
Sumber: Vucetic dan Dobry (1987)

Untuk menentukan pengaruh indeks plastisitas pada G/G_{\max} dengan kurva γ_c , data G/G_{\max} sesuai dengan tiga nilai γ_c , yaitu 0,01%, 0,1%, dan diplot terhadap nilai PI seperti pada Gambar 16. Jenis korelasi yang sama juga dikembangkan antara PI dan λ seperti terlihat pada Gambar 17. Dari gambar, terlihat bahwa diperoleh nilai G/G_{\max} dan λ dengan PI untuk γ_c yang konsisten.



Sumber: Vucetic dan Dobry (1991)

Gambar 16 Korelasi G/G_{\max} dan Indeks Plastisitas PI untuk tanah terkonsolidasi normal dan *overconsolidated*

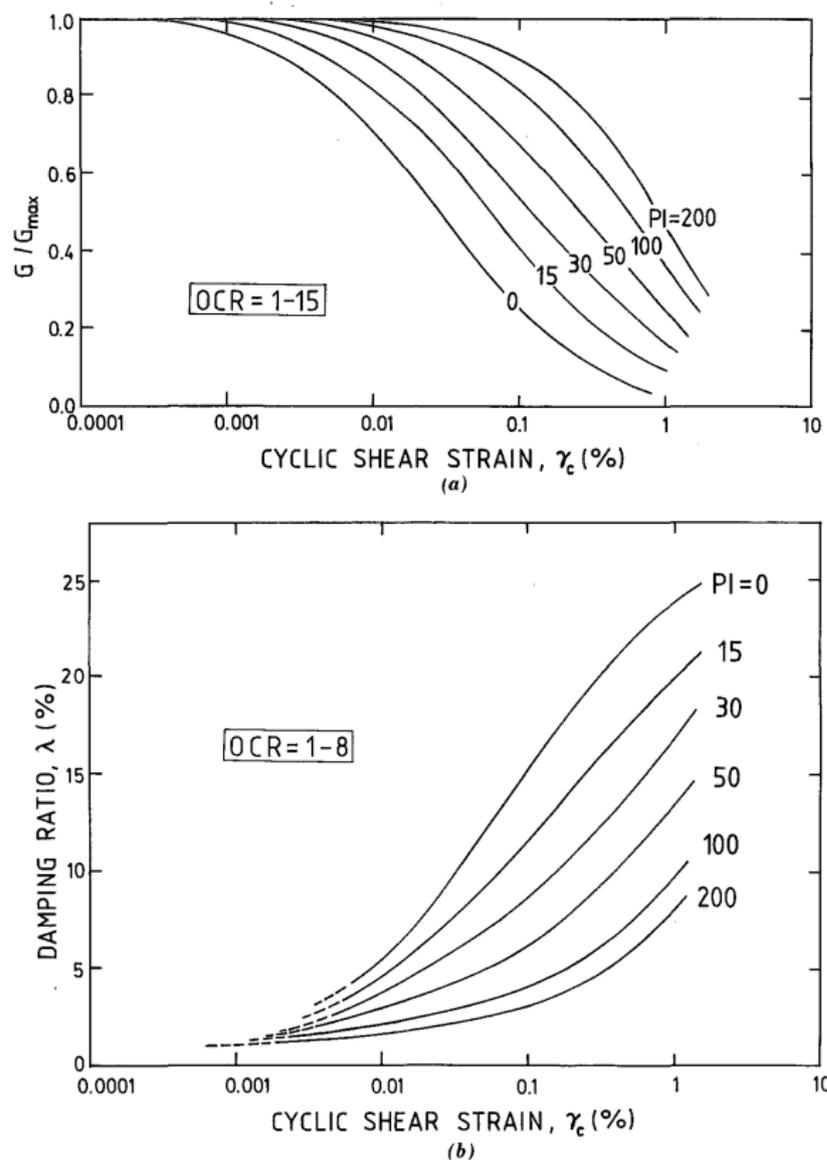


Sumber: Vucetic dan Dobry (1991)

Gambar 17 Korelasi λ dan Indeks Plastisitas PI untuk tanah terkonsolidasi normal dan *overconsolidated*

Dalam Gambar 16 dan Gambar 17, kurva representatif diplot dengan garis putus-putus yang menyatakan signifikansi, jumlah, dan distribusi titik data. Kurva pada Gambar 18 menunjukkan secara kuantitatif bagaimana kurva G/G_{max} bergerak ke atas dan kurva λ bergerak ke bawah berdasarkan peningkatan plastisitas tanah. Tanah nonplastis nonkohesif jenuh, seperti kerikil dan pasir dengan $PI = 0$, adalah

yang paling nonlinear pada tingkat regangan terkecil. Dengan demikian, tanah nonkohesif juga memiliki nilai redaman terbesar. Sebaliknya, tanah dengan plastisitas tinggi ($PI = 100-200$), berperilaku linear hingga $\gamma_c = 0,01\%$ dan akibatnya memiliki rasio redaman terkecil. Grafik pada Gambar 18 mewakili hasil utama dari penelitian ini. Grafik ini direkomendasikan untuk evaluasi respons siklik dari tanah berbutir halus jenuh yang sangat berguna untuk evaluasi respons seismik dan studi mikrozonasi suatu lokasi.



Sumber: Vucetic dan Dobry (1991)

Gambar 18 Kurva hubungan antara G/G_{max} dengan γ_c dan λ dengan γ_c serta Indeks Plastisitas untuk tanah terkonsolidasi normal dan *overconsolidated*

2.5.4.3 Darendeli (2001) untuk Pasir dan Lempung

Dalam studinya terkait pengembangan modulus reduksi dan kurva redaman, Darendeli (2001) melakukan prediksi perilaku tanah nonlinear menggunakan model terkalibrasi. Karena prediksi didasarkan pada model yang dikalibrasi menggunakan semua data yang kredibel, efek dari sejumlah parameter mengenai jenis tanah seperti geologi, partikel halus, ukuran partikel, kekakuan partikel, dan sebagainya diabaikan dalam model ini. Satu-satunya indikator karakteristik tanah yang digunakan dalam estimasi perilaku nonlinear adalah indeks plastisitas (PI).

Perhitungan yang digunakan untuk mengetahui regangan referensi, koefisien kurva, rasio redaman material regangan kecil, dan koefisien skala dengan menggunakan nilai parameter model yang telah ditentukan adalah sebagai berikut:

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 * PI * OCR^{\phi_3}) * \sigma_o'^{\phi_4} \quad (14)$$

$$a = \phi_5 \quad (15)$$

$$D_{min} = (\phi_6 + \phi_7 * PI * OCR^{\phi_8}) * \sigma_o'^{\phi_9} * [1 + \phi_{10} * \ln (frq)] \quad (16)$$

$$b = \phi_{11} + \phi_{12} * \ln (N) \quad (17)$$

di mana σ_o' = *mean effective confining pressure* (atm), PI = plastisitas tanah (%), OCR = rasio overkonsolidasi, frq = frekuensi pembebanan, N = jumlah siklus pembebanan, $\phi_1 = 0.0352$, $\phi_2 = 0.0010$, $\phi_3 = 0.3246$, $\phi_4 = 0.3483$, $\phi_5 = 0.9190$, $\phi_6 = 0.8005$, $\phi_7 = 0.0129$, $\phi_8 = -0.1069$, $\phi_9 = -0.2889$, $\phi_{10} = 0.2919$, $\phi_{11} = 0.6329$, dan $\phi_{12} = -0.0057$.

Setelah keempat parameter model (regangan referensi, koefisien kurva, rasio redaman material regangan kecil, dan koefisien skala) dihitung pada indeks plastisitas dan kondisi pembebanan tertentu, maka dapat diestimasi modulus reduksi normal dan kurva redaman material sebagai berikut:

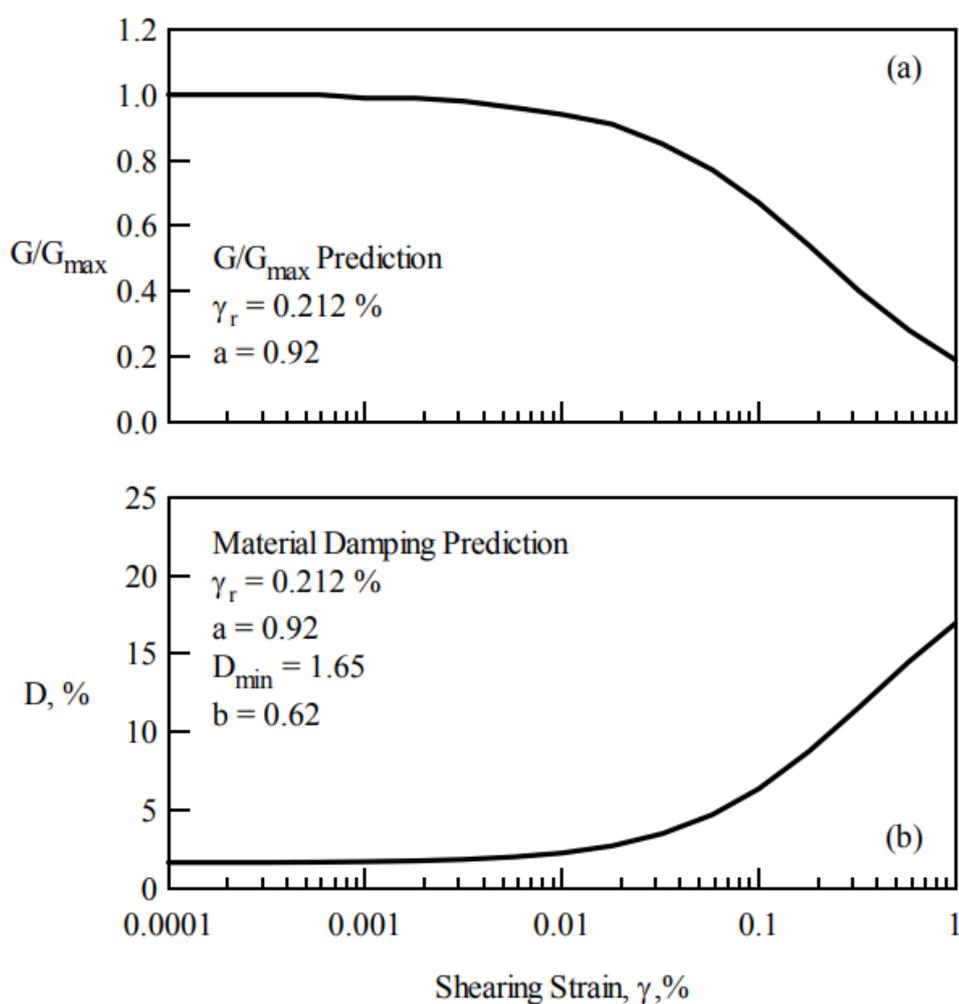
$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (18)$$

$$D_{Adjusted} = b * \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{0.1} * D_{Masing} + D_{min} \quad (19)$$

di mana $\frac{G}{G_{max}}$ = modulus geser normal, γ = regangan geser (%), γ_r = regangan referensi (%), a = koefisien kurva, D_{min} = rasio redaman material regangan kecil (%), b = koefisien skala, $D_{Adjusted}$ = redaman material terskalakan (%), D_{Masing} =

$$c_1 D_{Masing,a=1.0} + c_2 D_{Masing,a=1.0}^2 + c_3 D_{Masing,a=1.0}^3 \quad (\%), \quad D_{Masing,a=1.0} = \frac{100}{\Pi} \left[4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} - 2 \right] \quad (\%), \quad c_1 = -1.1143a^2 + 1.818a + 0.2523, \quad c_2 = 0.0805a^2 - 0.0710a - 0.0095, \quad \text{dan} \quad c_3 = -0.0005a^2 + 0.0002a + 0.0003.$$

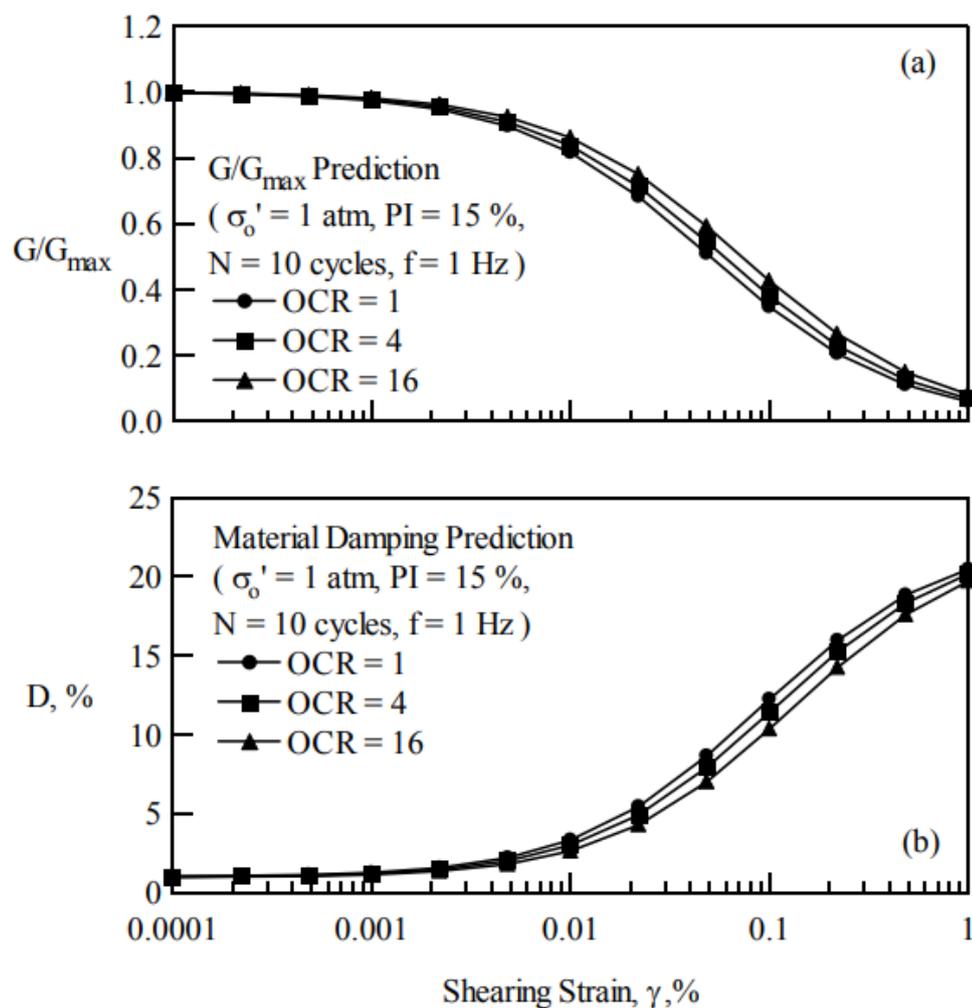
Gambar 19 menunjukkan modulus reduksi normal dan kurva redaman material untuk tipe tanah dan kondisi pembebanan pada tanah lempung dengan PI = 60%, OCR = 4, tegangan efektif 4 atm dengan sepuluh siklus pembebanan pada frekuensi 10 Hz.



Sumber: Darendeli (2001)

Gambar 19 Estimasi (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material

Gambar 20 menunjukkan efek dari rasio overkonsolidasi pada perilaku tanah nonlinear yang diprediksi oleh model terkalibrasi. Peningkatan rasio overkonsolidasi diamati menyebabkan sedikit pergeseran pada modulus reduksi normal dan kurva redaman material pada amplitudo regangan yang lebih tinggi, bersama dengan sedikit penurunan dalam rasio redaman material regangan kecil. Efek ini lebih terlihat pada material dengan plastisitas tinggi.

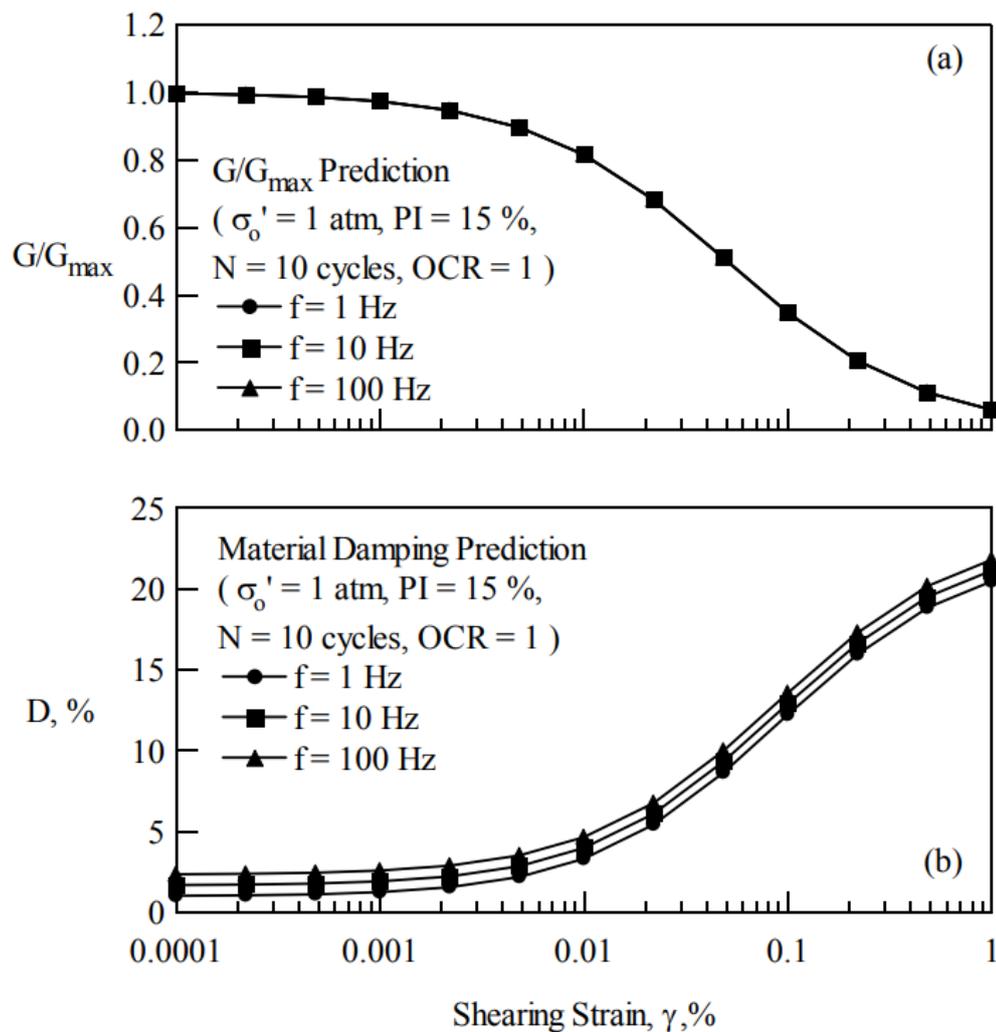


Sumber: Darendeli (2001)

Gambar 20 Efek rasio overkonsolidasi pada (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material

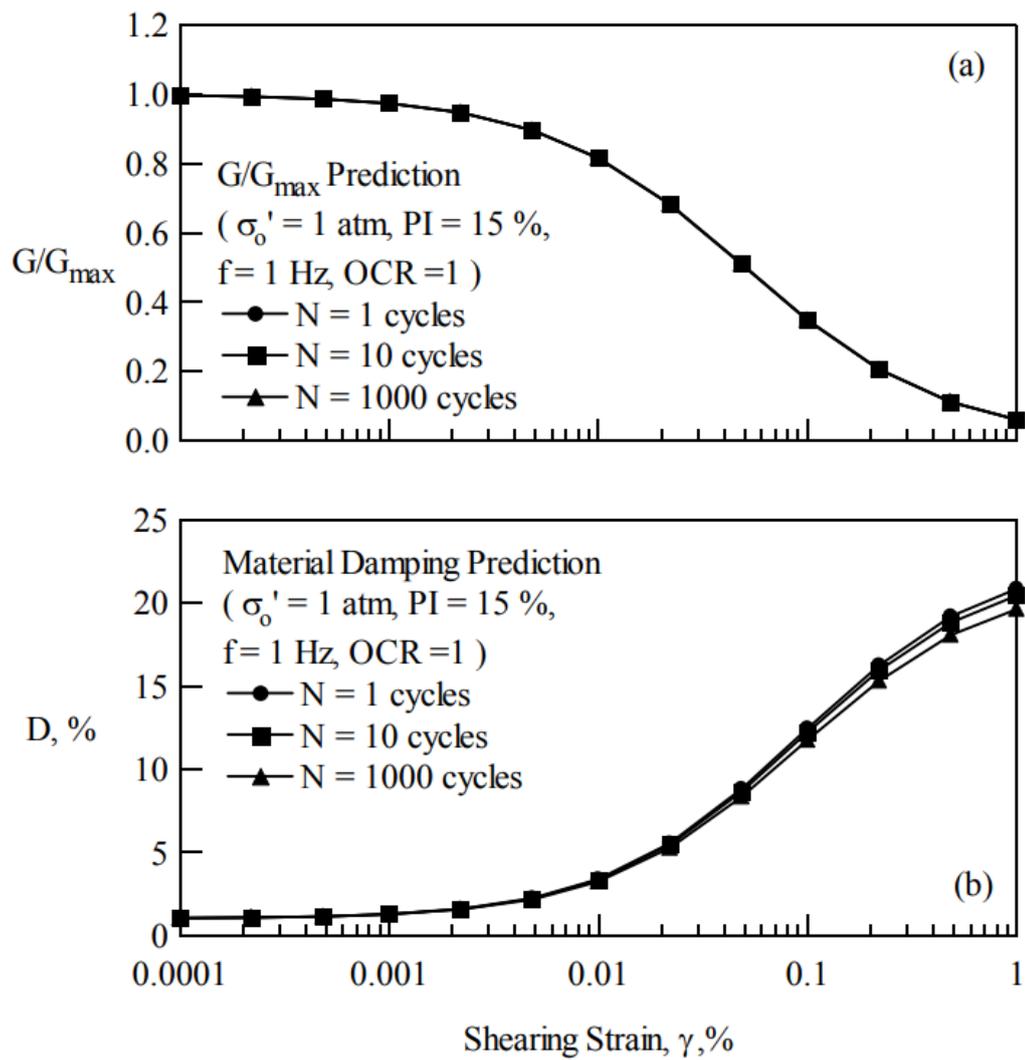
Pada Gambar 21 dan Gambar 22, pengaruh frekuensi pembebanan dan jumlah siklus pembebanan ditampilkan. Model dirumuskan dengan mengabaikan efek dari kedua variabel ini pada kurva modulus reduksi normal seperti pada Gambar 21a dan Gambar 22a..

Gambar 21b menyajikan pengaruh frekuensi pembebanan pada material kurva redaman yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi. Peningkatan rasio redaman material regangan kecil dengan peningkatan frekuensi pembebanan dapat diamati pada gambar ini. Sementara itu, pada Gambar 22b, pengaruh jumlah siklus pembebanan pada material kurva redaman disajikan. Peningkatan jumlah siklus menghasilkan sedikit penurunan pada koefisien skala yang menyebabkan sedikit penurunan rasio redaman material pada regangan tinggi.



Sumber: Darendeli (2001)

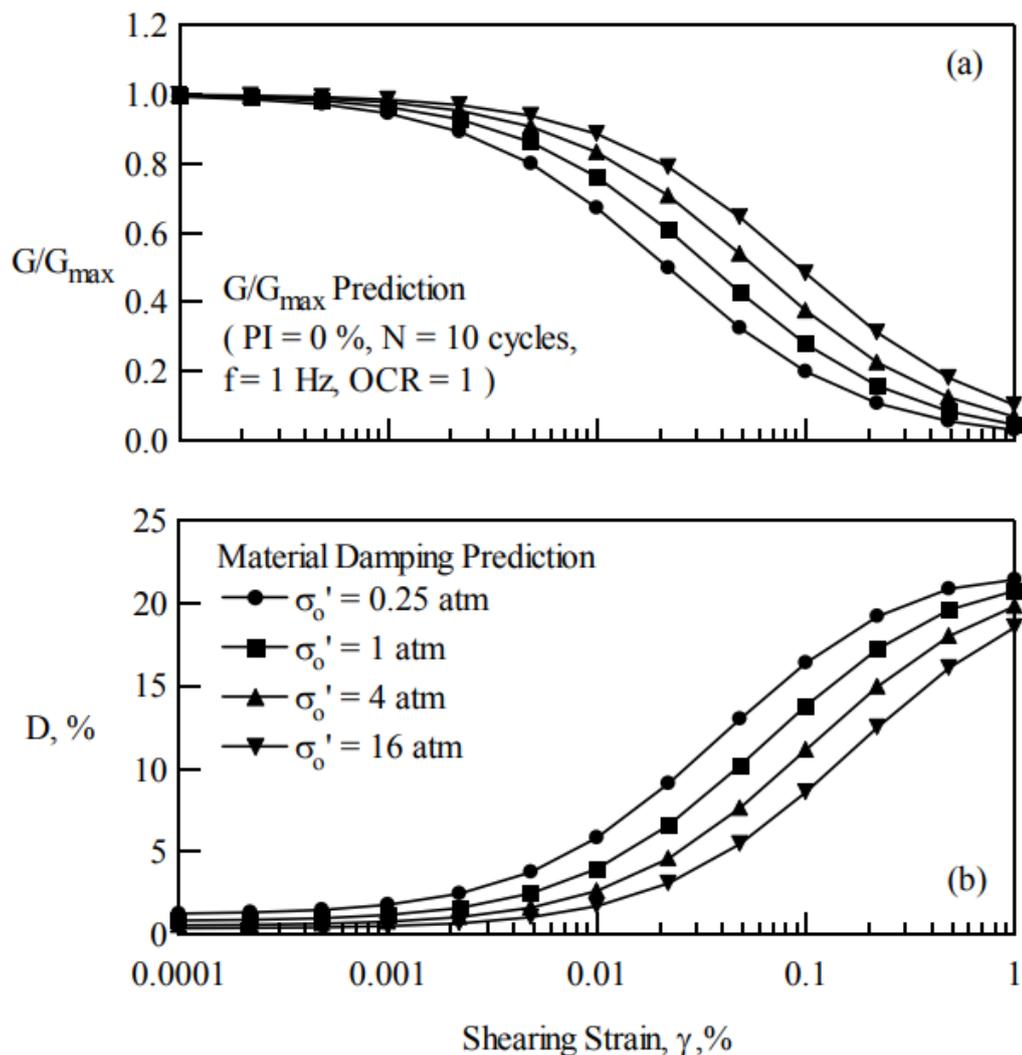
Gambar 21 Efek frekuensi pembebanan pada (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material



Sumber: Darendeli (2001)

Gambar 22 Efek jumlah siklus pembebanan pada (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material

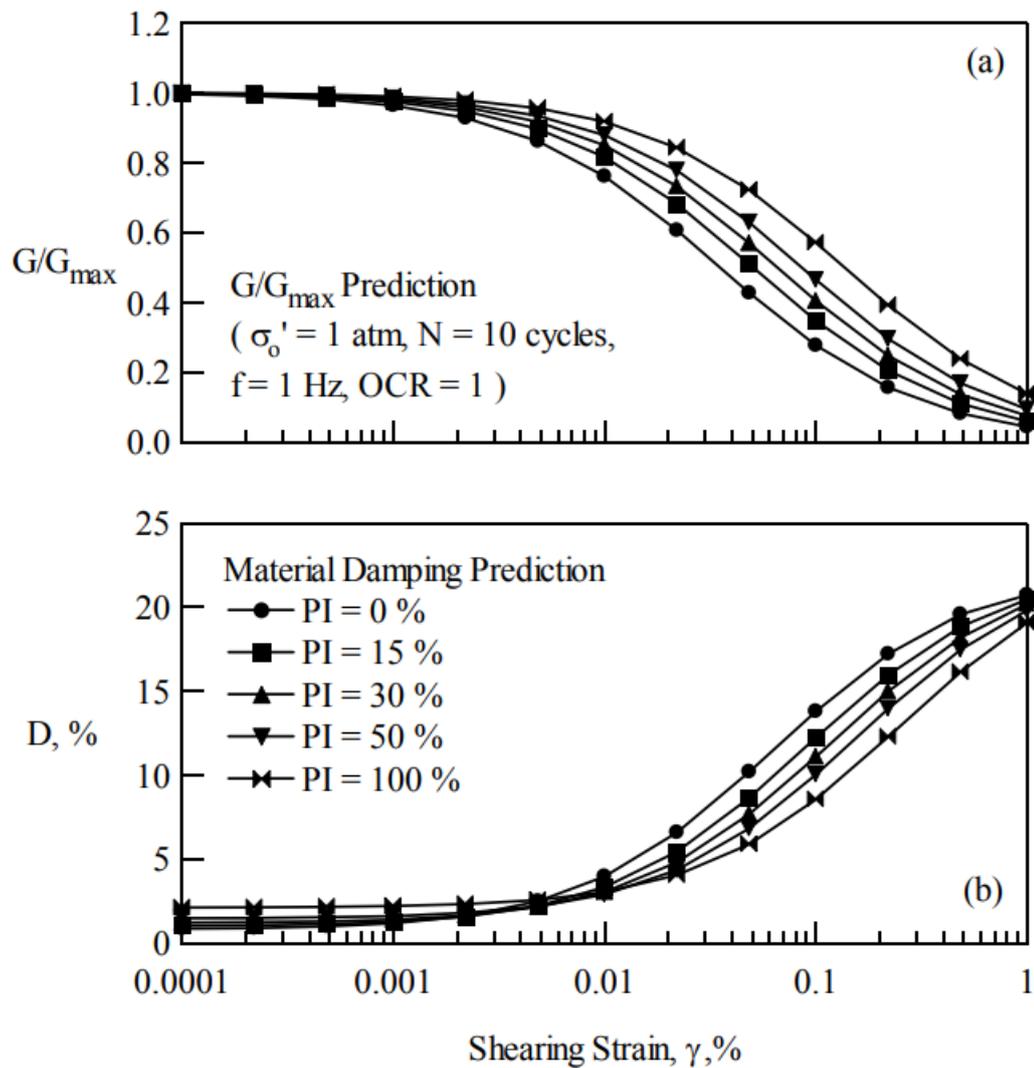
Pengaruh tekanan pembatas (*confining pressure*) pada modulus reduksi normal dan kurva redaman material yang diprediksi oleh model empat parameter yang dikalibrasi disajikan pada Gambar 23. Model menunjukkan pergeseran modulus reduksi normal dan kurva redaman material ke amplitudo regangan yang lebih tinggi dengan peningkatan tekanan pembatas bersama dengan penurunan simultan dalam rasio redaman material regangan kecil.



Sumber: Darendeli (2001)

Gambar 23 Efek tekanan pembatas pada (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material

Adapun pengaruh plastisitas tanah pada modulus reduksi normal dan kurva redaman material yang diprediksi oleh model empat parameter yang dikalibrasi disajikan pada Gambar 24. Model menunjukkan pergeseran dalam modulus reduksi normal dan kurva redaman material ke amplitudo regangan yang lebih tinggi dengan meningkatnya plastisitas tanah bersama dengan peningkatan simultan dalam rasio redaman material regangan kecil



Sumber: Darendeli (2001)

Gambar 24 Efek plastisitas tanah pada (a) modulus reduksi normal dan (b) kurva redaman material

2.5.3 Prosedur Penyesuaian Kurva (*Curve Fitting*)

DEEPSOIL memungkinkan pengguna menyesuaikan kurva tanah untuk menentukan parameter model tanah berdasarkan aturan *Masing* dengan pilihan antara lain: *MR* (prosedur untuk menentukan parameter paling sesuai untuk kurva modulus reduksi tetapi dengan kemungkinan ketidaksesuaian dengan kurva redaman), *MRD* (prosedur untuk menentukan parameter paling sesuai baik untuk kurva modulus reduksi maupun kurva redaman), serta *DC* (prosedur untuk menentukan parameter paling sesuai untuk kurva redaman tetapi dengan kemungkinan ketidaksesuaian dengan kurva modulus reduksi).

Terdapat pula model *Non-Masing* dalam DEEPSOIL yaitu *MRDF Pressure-Dependent Hyperbolic* (Phillips dan Hashash, 2009). Model ini diimplementasikan sebagai faktor reduksi yang secara efektif mengubah aturan *Masing*. Dengan memperkenalkan faktor reduksi, modulus reduksi dan kurva redaman dapat disesuaikan secara bersamaan. Perilaku redaman dimodifikasi sebagai:

$$\xi_{MasingHysteretic} = F(\gamma_{max}) * \xi_{Masing} \quad (20)$$

di mana $F(\gamma_m)$ adalah faktor reduksi yang dihitung sebagai fungsi dari γ_m , regangan geser maksimum dialami oleh tanah pada waktu tertentu, dan ξ_{Masing} adalah redaman histeretik yang dihitung dengan menggunakan aturan *Masing* berdasarkan kurva reduksi modulus. Dua formulasi untuk $F(\gamma_m)$ yang diimplementasikan dalam DEEPSOIL adalah sebagai berikut.

2.5.3.1 MRDF-UIUC

Model *MRDF Pressure-Dependent Hyperbolic* (Phillips dan Hashash, 2009) yang tersedia di DEEPSOIL memungkinkan untuk memasukkan faktor reduksi ke dalam model hiperbolik berupa:

$$F(\gamma_m) = P_1 - P_2(1 - G(\gamma_m)/G_0)^{P_3} \quad (21)$$

di mana γ_m adalah regangan geser maksimum yang dialami pada waktu tertentu, $G(\gamma_m)$ adalah modulus geser pada γ_m , dan P_1 , P_2 , dan P_3 adalah parameter penyesuaian.

2.5.3.2 MRDF-Darendeli

Model *MRDF Pressure-Dependent Hyperbolic* (Phillips dan Hashash, 2009) juga dapat digunakan dengan formulasi alternatif untuk faktor reduksi. Salah satu alternatif adalah formulasi yang diajukan oleh Darendeli, 2001. Formulasi ini merupakan model hiperbolik yang dimodifikasi secara empiris untuk memprediksi respon dinamis nonlinear dari jenis tanah yang berbeda. Model yang dikembangkan diimplementasikan sebagai faktor reduksi dengan bentuk:

$$F(\gamma_m) = P_1(G(\gamma_m)/G_0)^{P_2} \quad (22)$$

γ_m adalah regangan geser maksimum yang dialami pada waktu tertentu, $G(\gamma_m)$ adalah modulus geser pada γ_m , dan P_1 dan P_2 adalah parameter penyesuaian.