

**SKRIPSI**

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

**Disusun dan diajukan oleh:**

**ARIYANTI HERLOTA  
D011 19 1008**



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

# LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

## STUDI RESPON SPEKTRUM GEMPA PADA KOTA MAKASSAR MENGGUNAKAN METODE *NONLINEAR*

Disusun dan diajukan oleh

**ARIYANTI HERLOTA**  
**D011 19 1008**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal 30 Agustus 2023  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



**Prof. Dr.Eng. Tri Harianto, ST, MT, IPU**  
NIP. 197203092000031002

Pembimbing Pendamping,



**Dr.Eng. Ir. 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 : Ariyanti Herlota  
NIM : D011191008  
Program Studi : Teknik Sipil  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Studi Respon Spektrum Gempa Pada Kota Makassar 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, 30 Agustus 2023

Yang Menyatakan



Ariyanti Herlota

## ABSTRAK

**ARIYANTI HERLOTA.** *Studi Respon Spektrum Gempa Pada Kota Makassar Menggunakan Metode Nonlinear* (dibimbing oleh Tri Harianto dan Ardy Arsyad)

Kota Makassar merupakan ibukota provinsi Sulawesi Selatan yang jauh dari pusat gempa tetapi kerusakan struktur yang disebabkan bisa berpotensi besar. Seperti halnya beberapa gempa bumi yang terjadi di Makassar dan gempa yang terjadi di Palu-Donggala yang juga mengguncang Kota Makassar. Kerusakan struktur yang serius sangat bergantung oleh kondisi tanah lokal karena mencakup area yang luas. Maka berdasarkan hal tersebut, dilakukan analisis respon spektrum menggunakan pendekatan *nonlinear* untuk mengetahui pengaruh kondisi tanah lokal terhadap besar amplifikasi yang terjadi.

Penelitian ini menggunakan parameter tanah yang diperoleh melalui pengumpulan data geoteknik dan geofisika seperti data borelog, uji laboratorium, dan data *Multichannel Analysis Surface Waves* (MASW) serta data gempa yang direkam oleh BMKG tahun 2015 pada komponen Horizontal Timur-Barat, Horizontal Utara-Selatan, dan Vertikal *Up-Down* yang kemudian diskalakan berdasarkan skenario gempa deterministik dan periode ulang 200 tahun. Software yang digunakan untuk analisis respon situs ini yaitu DEEPSOIL, menggunakan pendekatan *nonlinear* kemudian dibandingkan dengan hasil respon spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019.

Hasil menunjukkan bahwa berdasarkan SNI 1726:2019 kondisi tanah pada Kota Makassar berupa tanah lunak sesuai dengan nilai rata-rata N-SPT dan kecepatan gelombang geser. Kondisi tanah lokal ini menyebabkan amplifikasi dengan faktor amplifikasi untuk skenario gempa deterministik pada periode pendek berkisar antara 2.859-4.514, pada periode natural (0.2, 0.21, 0.39, 0.42) berkisar antara 3.178-8.751, dan pada periode 1 detik berkisar antara 1.482-2.057. Untuk skenario gempa periode ulang 200 tahun pada periode pendek terjadi de-amplifikasi yang berkisar antara 0.822-0.967 dengan faktor amplifikasi sebesar 1.288-4.108, pada periode natural (0.2, 0.25, 0.32, 0.37, 0.42, 0.53, 0.57, 0.6, 0.64) berkisar antara 1.591-5.454, dan pada periode 1 detik berkisar antara 1.563-3.141. Hasil pada skenario deterministik lebih rendah dibandingkan SNI 1726:2019 baik pada periode pendek maupun periode 1 detik sedangkan pada periode ulang 200 tahun lebih tinggi pada periode pendek dan lebih rendah dibandingkan hasil SNI 1726:2019 pada periode 1 detik.

**Kata Kunci:** gempa bumi, *local site effect*, respon spektrum, faktor amplifikasi

## ABSTRACT

**ARIYANTI HERLOTA.** *Study of Seismic Site Response in Makassar City Using Nonlinear Method* (supervised by Tri Harianto and Ardy Arsyad)

The city of Makassar is the capital of South Sulawesi province, which is far from the epicenter of the earthquake, but the structural damage caused can be potentially large. As was the case with several earthquakes that occurred in Makassar and the earthquake that occurred in Palu-Donggala which also shook Makassar City. Serious structural damage is highly dependent on local soil conditions because it covers a large area. So based on this, a response spectrum analysis using a nonlinear approach was conducted to determine the effect of local soil conditions on the amount of amplification that occurs.

This study uses soil parameters obtained through the collection of geotechnical and geophysical data such as borelog data, laboratory tests, and Multichannel Analysis Surface Waves (MASW) data as well as earthquake data recorded by BMKG in 2015 on the Horizontal East-West, Horizontal North-South, and Vertical Up-Down components which are then scaled based on deterministic earthquake scenarios and a 200-year return period. The software used for this site response analysis is DEEPSOIL, using a nonlinear approach and then compared with the results of the design spectra response based on SNI 1726:2019.

The results show that based on SNI 1726:2019 the soil conditions in Makassar City are soft soils according to the average values of N-SPT and shear wave velocity. These local soil conditions cause amplification with amplification factors for deterministic earthquake scenarios at short periods ranging from 2.859-4.514, at natural periods (0.2, 0.21, 0.39, 0.42) ranging from 3.178-8.751, and at 1 second periods ranging from 1.482-2.057. For the 200-year return period earthquake scenario, the de-amplification in the short period ranged from 0.822-0.967 with an amplification factor of 1.288-4.108, in the natural period (0.2, 0.25, 0.32, 0.37, 0.42, 0.53, 0.57, 0.6, 0.64) ranged from 1.591-5.454, and in the 1-second period ranged from 1.563-3.141. The results in the deterministic scenario are lower than SNI 1726:2019 both in the short period and 1 second period while in the 200-year return period it is higher in the short period and lower than the results of SNI 2726:2019 in the 1 second period.

Keywords: earthquake, local site effect, response spectrum, amplification factor

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR .....	vi
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
KATA PENGANTAR .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Manfaat Penelitian .....	2
1.5 Ruang Lingkup.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Gempa Bumi .....	4
2.2 Sejarah Gempa Indonesia.....	5
2.3 <i>Site Effect</i> .....	9
2.4 Analisis Respon Situs terhadap Gempa .....	13
2.5 DEEPSOIL.....	17
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	38
3.1 Lokasi Penelitian.....	38
3.2 Pengumpulan Data .....	38
3.3 Peralatan yang digunakan .....	44
3.4 Penentuan Parameter Spektral Desain Berdasarkan SNI 1726:2019.....	44
3.5 Flowchart Penelitian .....	48
3.4 Prosedur Penggunaan <i>Software</i> DEEPSOIL.....	49
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	63
4.1 Analisis Respon Spektrum .....	63
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	129
5.1 Kesimpulan .....	129
5.2 Saran.....	130
DAFTAR PUSTAKA .....	131

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Tatanan tektonik di Indonesia .....	5
Gambar 2 Peta sumber gempa Indonesia .....	6
Gambar 3 Peta seismisitas Indonesia sepanjang tahun 2022 .....	6
Gambar 4 Gempa yang terjadi di Sulawesi Selatan dengan kekuatan $> 4,5SR$ .....	8
Gambar 5 Peta geologi Sulawesi.....	9
Gambar 6 Representasi endapan tanah dalam hal sifat dinamis tanah.....	10
Gambar 7 Pengaruh jenis tanah terhadap perubahan percepatan.....	11
Gambar 8 Fungsi transfer.....	16
Gambar 9 <i>Normalized shear modulus reduction curve</i> .....	22
Gambar 10 <i>Material damping ratio increase curve</i> .....	22
Gambar 11 <i>Variation of shear modulus reduction curves with different values of the apparent small-strain shear modulus</i> .....	23
Gambar 12 Pengaruh berbagai faktor terhadap modulus geser pasir berdasarkan Hardin dan Drnevich .....	25
Gambar 13 Variasi modulus geser dengan regangan geser untuk pasir.....	26
Gambar 14 Pengaruh dari berbagai faktor rasio redaman pasir berdasarkan Hardin dan Drnevich .....	27
Gambar 15 Pengaruh tekanan pembatas vertikal terhadap rasio redaman pasir jenuh berdasarkan Hardin dan Drnevich.....	27
Gambar 16 Pengaruh tekanan pembatas vertikal terhadap rasio damping pasir kering.....	28
Gambar 17 Rasio redaman untuk pasir .....	29
Gambar 18 Estimasi (a) pengurangan modulus yang dinormalisasi dan (b) kurva redaman material untuk jenis tanah dan kondisi pembebanan .....	32
Gambar 19 Pengaruh rasio overkonsolidasi (a) modulus yang dinormalisasi reduksi dan (b) kurva redaman material yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi .....	33
Gambar 20 Pengaruh frekuensi pemuatan pada (a) pengurangan modulus yang dinormalisasi dan (b) kurva redaman material yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi .....	34
Gambar 21 Pengaruh jumlah siklus pemuatan pada (a) modulus yang dinormalisasi reduksi dan (b) kurva redaman material yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi .....	35
Gambar 22 Lokasi penelitian .....	38
Gambar 23 Susunan stratigrafi tanah .....	39
Gambar 24 Data gempa.....	40
Gambar 25 <i>Time history bedrock</i> (200 tahun) pada arah (a) horizontal Timur-Barat (b) horizontal Utara-Selatan (c) vertikal.....	41
Gambar 26 <i>Time history bedrock</i> (deterministik) pada arah (a) horizontal Timur-Barat (b) horizontal Utara-Selatan (c) vertikal .....	42
Gambar 27 Data MASW .....	42
Gambar 28 Spektrum respon desain Kota Makassar untuk tanah lunak.....	47
Gambar 29 Spektrum respons desain.....	47
Gambar 30 Bagan alir (flowchart) penelitian.....	48

Gambar 31 Aplikasi DEEPSOIL (Hashash et al., 2020) .....	49
Gambar 32 Pemilihan jenis analisis .....	50
Gambar 33 Jendela <i>layer properties</i> pada lapisan pertama .....	51
Gambar 34 Kurva G/Gmax pada lapisan pertama .....	52
Gambar 35 Kurva <i>Damping Ratio</i> pada lapisan pertama.....	52
Gambar 36 Jendela <i>layer properties</i> pada lapisan kedua.....	53
Gambar 37 Kurva G/Gmax pada lapisan kedua.....	53
Gambar 38 Kurva <i>Damping Ratio</i> pada lapisan kedua.....	54
Gambar 39 Jendela <i>layer properties</i> pada lapisan ketiga.....	54
Gambar 40 Kurva G/Gmax pada lapisan ketiga .....	55
Gambar 41 Kurva <i>Damping Ratio</i> pada lapisan ketiga.....	55
Gambar 42 Jendela definisi profil tanah.....	56
Gambar 43 Jendela <i>properties</i> pada lapisan <i>bedrock</i> .....	56
Gambar 44 Plot profil tanah.....	57
Gambar 45 Jendela <i>input motion</i> .....	57
Gambar 46 Pemilihan <i>input motion</i> .....	58
Gambar 47 Jendela definisi redaman kental/regangan kecil .....	59
Gambar 48 Jendela definisi kontrol analisis.....	59
Gambar 49 <i>Analysis running</i> .....	60
Gambar 50 Hasil plot <i>time histories</i> .....	61
Gambar 51 Hasil plot profil .....	61
Gambar 52 Hasil <i>response spectra</i> .....	61
Gambar 53 <i>Time history</i> deterministik dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s pada arah horizontal Timur-Barat.....	60
Gambar 54 <i>Time history</i> deterministik dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan.....	60
Gambar 55 <i>Time history</i> deterministik dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	61
Gambar 56 <i>Time history</i> deterministik dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s pada arah horizontal Timur-Barat.....	63
Gambar 57 <i>Time history</i> deterministik dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan.....	63
Gambar 58 <i>Time history</i> deterministik dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	64
Gambar 59 <i>Time history</i> deterministik dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s pada arah horizontal Timur-Barat.....	66
Gambar 60 <i>Time history</i> deterministik dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan.....	66
Gambar 61 <i>Time history</i> deterministik dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	67
Gambar 62 <i>Time history</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s pada arah horizontal Timur-Barat .....	69
Gambar 63 <i>Time history</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan .....	69
Gambar 64 <i>Time history</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s pada vertikal <i>Up-Down</i> .....	70
Gambar 65 <i>Time history</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s pada arah horizontal Timur-Barat .....	72



Gambar 66 <i>Time history</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan .....	72
Gambar 67 <i>Time history</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	73
Gambar 68 <i>Time history</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s pada arah horizontal Timur-Barat .....	75
Gambar 69 <i>Time history</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan .....	75
Gambar 70 <i>Time history</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	76
Gambar 71 <i>Response spectra</i> deterministik dengan $V_s$ bedrock 440 m/s pada arah horizontal Timur-Barat.....	79
Gambar 72 <i>Response spectra</i> deterministik dengan $V_s$ bedrock 440 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan.....	79
Gambar 73 <i>Response spectra</i> deterministik dengan $V_s$ bedrock 440 m/s pada arah vertikal.....	80
Gambar 74 <i>Response spectra</i> deterministik dengan $V_s$ bedrock 700 m/s pada arah horizontal Timur-Barat.....	82
Gambar 75 <i>Response spectra</i> deterministik dengan $V_s$ bedrock 700 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan.....	82
Gambar 76 <i>Response spectra</i> deterministik dengan $V_s$ bedrock 700 m/s pada arah vertikal.....	83
Gambar 77 <i>Response spectra</i> deterministik dengan $V_s$ bedrock 2500 m/s pada arah horizontal Timur-Barat.....	85
Gambar 78 <i>Response spectra</i> deterministik dengan $V_s$ bedrock 2500 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan.....	85
Gambar 79 <i>Response spectra</i> deterministik dengan $V_s$ bedrock 2500 m/s pada arah vertikal.....	86
Gambar 80 <i>Response spectra</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 440 m/s pada arah horizontal Timur-Barat .....	89
Gambar 81 <i>Response spectra</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 440 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan .....	89
Gambar 82 <i>Response spectra</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 440 m/s pada arah vertikal .....	90
Gambar 83 <i>Response spectra</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 700 m/s pada arah horizontal Timur-Barat .....	92
Gambar 84 <i>Response spectra</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 700 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan .....	92
Gambar 85 <i>Response spectra</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 700 m/s pada arah vertikal .....	93
Gambar 86 <i>Response spectra</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 2500 m/s pada arah horizontal Timur-Barat .....	95
Gambar 87 <i>Response spectra</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 2500 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan .....	95
Gambar 88 <i>Response spectra</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 2500 m/s pada arah vertikal .....	96
Gambar 89 <i>Profile plots</i> deterministik dengan $V_s$ bedrock 440 m/s pada arah horizontal Timur-Barat.....	99

Gambar 90	<i>Profil Plots</i> deterministik dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 440 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan.....	99
Gambar 91	<i>Profile Plots</i> deterministik dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 440 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	100
Gambar 92	<i>Profile Plots</i> deterministik dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 700 m/s pada arah horizontal Timut-Barat.....	100
Gambar 93	<i>Profile Plots</i> deterministik dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 700 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan.....	101
Gambar 94	<i>Profile Plots</i> deterministik dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 700 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	101
Gambar 95	<i>Profile Plots</i> deterministik dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 2500 m/s pada arah horizontal Timur-Barat.....	102
Gambar 96	<i>Profile Plots</i> deterministik dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 2500 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan.....	102
Gambar 97	<i>Profile Plots</i> deterministik dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 2500 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	103
Gambar 98	<i>Profile Plots</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 440 m/s pada arah horizontal Timut-Barat .....	103
Gambar 99	<i>Profile Plots</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 440 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan .....	104
Gambar 100	<i>Profile Plots</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 440 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	104
Gambar 101	<i>Profile Plots</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 700 m/s pada arah horizontal Timur-Barat .....	105
Gambar 102	<i>Profile Plots</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 700 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan .....	105
Gambar 103	<i>Profile Plots</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 700 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	106
Gambar 104	<i>Profile Plots</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 2500 m/s pada arah horizontal Timur-Barat .....	106
Gambar 105	<i>Profile Plots</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 2500 m/s pada arah horizontal Utara-Selatan .....	107
Gambar 106	<i>Profile Plots</i> periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ <i>bedrock</i> 2500 m/s pada arah vertikal <i>Up-Down</i> .....	107
Gambar 107	Perbandingan respon spektra permukaan secara deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Upper Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ <i>bedrock</i> 440 m/s .....	109
Gambar 108	Perbandingan respon spektra permukaan secara deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Upper Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ <i>bedrock</i> 700 m/s .....	110
Gambar 109	Perbandingan respon spektra permukaan secara deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Upper Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ <i>bedrock</i> 2500 m/s .....	111
Gambar 110	Perbandingan respon spektra permukaan secara deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Mean</i> ) 1970 dan $V_s$ <i>bedrock</i> 440 m/s.....	112

Gambar 111 Perbandingan respon spektra permukaan secara deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Mean</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 700 m/s.....	113
Gambar 112 Perbandingan respon spektra permukaan secara deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Mean</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 2500 m/s.....	114
Gambar 113 Perbandingan respon spektra permukaan secara deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Lower Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 440 m/s .....	115
Gambar 114 Perbandingan respon spektra permukaan secara deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Lower Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 700 m/s .....	116
Gambar 115 Perbandingan respon spektra permukaan secara deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Lower Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 2500 m/s .....	117
Gambar 116 Perbandingan respon spektra permukaan secara periode ulang 200 tahun dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Upper Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 440 m/s .....	119
Gambar 117 Perbandingan respon spektra permukaan secara periode ulang 200 tahun dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Upper Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 700 m/s .....	120
Gambar 118 Perbandingan respon spektra permukaan secara periode ulang 200 tahun dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Upper Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 2500 m/s .....	121
Gambar 119 Perbandingan respon spektra permukaan secara periode ulang 200 tahun dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Mean</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 440 m/s.....	122
Gambar 120 Perbandingan respon spektra permukaan secara periode ulang 200 tahun dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Mean</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 700 m/s.....	123
Gambar 121 Perbandingan respon spektra permukaan secara periode ulang 200 tahun dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Mean</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 2500 m/s.....	124
Gambar 122 Perbandingan respon spektra permukaan secara periode ulang 200 tahun dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Lower Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 440 m/s .....	125
Gambar 123 Perbandingan respon spektra permukaan secara periode ulang 200 tahun dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Lower Limit</i> ) 1970 dan $V_s$ bedrock 700 m/s .....	126
Gambar 124 Perbandingan respon spektra permukaan secara periode ulang 200 tahun dengan SNI 1726:2019 untuk kurva referensi Seed and Idriss ( <i>Lower Limit</i> ) 1970 $V_s$ bedrock 2500 m/s.....	127

## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Data laboratorium .....	39
Tabel 2 Site klasifikasi berdasarkan SNI 1726:2019 .....	43
Tabel 3 Koefisien situs $F_a$ .....	45
Tabel 4 Koefisien situs $F_v$ .....	45
Tabel 5 Parameter spektral desain berdasarkan SNI 1726:2019.....	47
Tabel 6 Input parameter .....	51
Tabel 7 PGA dan faktor amplifikasi untuk skenario gempa deterministik dengan $V_s$ bedrock 440 m/s .....	62
Tabel 8 PGA dan faktor amplifikasi untuk skenario gempa deterministik dengan $V_s$ bedrock 700 m/s .....	65
Tabel 9 PGA dan faktor amplifikasi untuk skenario gempa deterministik dengan $V_s$ bedrock 2500 m/s .....	68
Tabel 10 PGA dan faktor amplifikasi untuk skenario gempa periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 440 m/s pada periode pendek.....	71
Tabel 11 PGA dan faktor amplifikasi untuk skenario gempa periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 700 m/s .....	74
Tabel 12 PGA dan faktor amplifikasi untuk skenario gempa periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 2500 m/s .....	77
Tabel 13 Rekapitulasi faktor amplifikasi .....	78
Tabel 14 Faktor amplifikasi untuk skenario gempa deterministik dengan $V_s$ bedrock 440 m/s .....	81
Tabel 15 Faktor amplifikasi untuk skenario gempa deterministik dengan $V_s$ bedrock 700 m/s .....	84
Tabel 16 Faktor amplifikasi untuk skenario gempa deterministik dengan $V_s$ bedrock 2500 m/s .....	87
Tabel 17 Rekapitulasi faktor amplifikasi skenario gempa deterministik.....	88
Tabel 18 Faktor amplifikasi untuk skenario gempa periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 440 m/s .....	91
Tabel 19 Faktor amplifikasi untuk skenario gempa periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 700 m/s .....	94
Tabel 20 Faktor amplifikasi untuk skenario gempa periode ulang 200 tahun dengan $V_s$ bedrock 2500 m/s .....	97
Tabel 21 Rekapitulasi faktor amplifikasi skenario gempa periode ulang 200 tahun.....	98

## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
SR	Skala Richter
LS	Lintang Selatan
BT	Bujur Timur
NL	<i>Nonlinear</i>
$V_s$	Kecepatan gelombang geser (m/s)
MASW	<i>Multichannel Analysis Surface Waves</i>
$G_{max}$	Modulus geser maksimum
$\xi$	Damping
$f_0$	Frekuensi dominan tanah
SDoF	<i>Single Degree of Freedom</i>
$\tau$	Tegangan geser
$\gamma$	Regangan geser (%)
$\gamma_r$	Regangan referensi (%)
$H(f)$	Fungsi gerakan input (FAS) yang dimodifikasi oleh fungsi transfer
$k$	Kekakuan sistem
$m$	Massa
$c$	Redaman kental
$G_0$	Modulus geser awal
$f_n$	Frekuensi natural osilator
FFTs	<i>Fast Fourier Transforms</i>
$B$	Parameter kurva tegangan-regangan
$s$	Parameter kurva tegangan-regangan
$\sigma'_v$	Tegangan vertikal efektif
$b$	Parameter tergantung tekanan/regangan referensi
$d$	Parameter tergantung tekanan/kurva redaman
$\tau_{maks}$	Tegangan geser maksimum

---

$\theta_\tau$	Fungsi kurva fitting dari fungsi $\theta$ untuk model GQ/H yang dinormalisasikan
$\theta_1 - \theta_5$	Parameter yang menghubungkan kurva redaman dengan tipe tanah dan pembebanan
G	Modulus geser
E	Modulus Young
M	Modulus terbatas
$V_c$	Gelombang kompresi tidak dibatasi
$V_p$	Gelombang kompresi terbatas
$D_s$	Rasio redaman dalam geser
$D_c$	Rasio redaman dalam kompresi tidak dibatasi
$D_p$	Rasio redaman dalam kompresi terbatas
$\gamma_t^e$	Regangan ambang elastis
G-log $\gamma$	Kurva reduksi modulus geser
$G_{\text{field}}$	Modulus geser nonlinear yang digunakan untuk analisis di lapangan
$G_{\text{lab}}$	Modulus geser nonlinear yang diukur di laboratorium
$G_{\text{max lab}}$	Modulus regangan kecil yang diukur di laboratorium
$G_{\text{max field}}$	Modulus regangan kecil yang diukur di lapangan
e	<i>Void ratio</i>
OCR	<i>Overconsolidation Ratio</i>
a	Parameter yang bergantung pada indeks plastisitas tanah
$\sigma'_m$	Rata-rata tegangan efektif utama (psf)
$\sigma'_o$	Rata-rata tekanan pembatas efektif
$D_{\text{min}}$	Rasio redaman material regangan kecil (%)
$D_{\text{Adjusted}}$	Redaman berskala tertutup (%)
$D_{\text{Masing}}$	Estimasi redaman berdasarkan perilaku Masing
$K_2$	Parameter yang dipengaruhi oleh regangan
N	Jumlah siklus pemuatan
$\lambda_{\text{max}}$	Rasio redaman maksimum

---

---

PI	Indeks plastisitas (%)
frq	Frekuensi pemuatan
$\frac{G}{G_{max}}$	Modulus geser yang dinormalisasikan
$\gamma\gamma_m$	Regangan geser maksimum pada waktu tertentu
$\gamma_d$	<i>Dry density</i> (gr/cm <sup>3</sup> )
Cu	<i>Shear Strength</i>
$\phi'$	<i>Angle of Friction</i>
SA	Batuan keras
SB	Batuan
SC	Tanah keras, sangat padat dan dan batuan lunak
SD	Tanah sedang
SE	Tanah lunak
SF	Tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik situs
Fa	Koefisien faktor amplifikasi getaran pada periode pendek
Fv	Koefisien faktor amplifikasi getaran pada periode 1 detik
S <sub>MS</sub>	Parameter respon spektral pada periode pendek
S <sub>M1</sub>	Parameter respons spektral percepatan gempa MCE <sub>R</sub>
S <sub>S</sub>	terpetakan untuk periode pendek
S <sub>1</sub>	Parameter respons spektral percepatan gempa MCE <sub>R</sub> terpetakan untuk periode 1 detik
MCE <sub>R</sub>	<i>Maximum Considered Earthquake, Risk Targeted</i>
S <sub>DS</sub>	Parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek
S <sub>D1</sub>	Parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik
Sa	Respon spectral percepatan desain
	Periode getar fundamental struktur

---

---

T	Peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada
T <sub>L</sub>	peta transisi periode panjang wilayah Indonesia (SNI 1726:2019)
PGA	<i>Peak Ground Acceleration</i>
PSA	<i>Peak Surface Acceleration</i>

---



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Borelog.....	134
Lampiran 2 Data hasil pengujian <i>Unit Weight</i> .....	135
Lampiran 3 Data hasil pengujian <i>Atterberg Limits</i> .....	137
Lampiran 4 Data hasil pengujian <i>Triaxial (CU)</i> .....	138
Lampiran 5 Summary data hasil pengujian laboratorium .....	140

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Studi Respon Spektrum Gempa Menggunakan Metode Nonlinear” sebagai salah satu persyaratan akademik untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari banyak kesulitan dan kendala yang dihadapi saat proses penyusunan tugas akhir ini. Perjalanan yang dilalui penulis dalam menyelesaikan skripsi ini tidak lepas dari tangan-tangan berbagai pihak yang senantiasa memberikan bantuan baik berupa materi maupun dorongan moril. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yesus atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta, yaitu Ayahanda Paulus Lolo Tasik dan Ibunda Herice Pali’ yang senantiasa mendoakan dan memberikan dukungan baik secara materil maupun spiritual dan selalu menjadi tempat menyampaikan curahan hati selama menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, ST, MT selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.
4. Bapak Prof. Dr. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng, selaku ketua dan Bapak Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, ST, MT selaku Sekretaris Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.
5. Bapak Prof. Dr. Eng. Tri Harianto, ST, MT.IPU selaku dosen pembimbing I, atas segala arahan, bimbingan, dan wawasan, serta waktu yang telah diluangkan dari awal hingga terselesainya tugas akhir ini.
6. Bapak Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST, M.Eng.Sc selaku dosen pembimbing II, yang telah memberikan bimbingan, waktu, dan wawasan tambahan selama penelitian ini berlangsung.
7. Seluruh dosen, staf, dan karyawan Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar yang telah banyak membantu dalam mendukung penulisan tugas akhir ini.
8. Alya Ramadani, Meichin Wong Masiga, dan Pahrul, yang telah senantiasa menjadi sahabat yang baik dan menyenangkan selama masa perkuliahan, dan senantiasa meluangkan waktunya untuk menghibur dan mendengarkan curahan hati penulis.
9. Yurinda Bintan Patandean, Mufidatul Azmi Kaharuddin, dan Rizqhie Wiryadiputra Suryadi yang telah berjuang bersama menyelesaikan penelitian demi selesainya tugas akhir ini.
10. Keluarga KMKO SIPIL terkhusus Angkatan 2019 yang senantiasa memberikan dukungan dalam penyelesaian tugas akhir ini
11. Seluruh teman-teman Teknik Sipil Angkatan 2019

12. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu dengan semua bantuan dan dukungan yang telah diberikan hingga terselesainya tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga Tuhan membalas segala kebaikan yang telah diterima oleh penulis dari berbagai pihak yang telah membantu mempermudah penulisan dalam mengerjakan tugas akhir ini. Akhir kata penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan segala kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi penulis dan para pembaca.

Gowa, 30 Agustus 2023

Penulis

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Kota Makassar merupakan ibukota provinsi Sulawesi Selatan, tepatnya di bagian Timur Indonesia. Berdasarkan kajian seismotektonik, Pulau Sulawesi dihimpit oleh Lempeng Eurasia, Indo-Australia, Pasifik, serta Lempeng Filipina yang mengakibatkan Pulau Sulawesi sangat labil. Pulau Sulawesi juga memiliki segmen sesar aktif diantaranya yaitu sesar Palu-Koro, sesar Matano, sesar Soroako, dan lainnya.

Meskipun Kota Makassar merupakan kota yang jauh dari pusat gempa, namun kerusakan struktur yang disebabkan bisa berpotensi besar sehingga gempa yang jauh dari kota tersebut harus dihiraukan. Beberapa gempa yang pernah terjadi di Sulawesi Selatan dengan kekuatan  $> 6$  SR yaitu gempa bumi Majene (1969), gempa bumi Mamuju (1971, 1974), dan juga gempa bumi Pinrang (1997). BMKG juga mencatat gempa di sekitar Sulawesi Selatan yang mengguncang Kota Makassar yaitu gempa tektonik yang terjadi di Palu-Donggala dengan magnitudo 7,7 dan episentrum yang berada pada 0.18 LS dan 119.85 BT pada tanggal 28 September 2018.

Getaran tanah yang kuat akibat gempa dapat menyebabkan kerusakan struktur yang serius karena mencakup area yang luas, sehingga dalam perancangan bangunan, perkiraan pergerakan tanah sangat penting untuk dilakukan. Menurut Darendeli (2001) saat terjadi gempa, gelombang gempa pada batuan dasar (*bedrock*) akan merambat secara vertikal ke permukaan tanah, dimana besar rambatan ini sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah yang sering disebut sebagai *local site effect*. Secara geologi, sebagian besar Kota Makassar berada di atas endapan aluvium yang rawan terhadap patahan seismik dan cenderung memiliki efek amplifikasi (pembesaran) dan de-amplifikasi (penurunan) pada perambatan gelombang seismik.

Maka berdasarkan hal tersebut, penting untuk dilakukan studi respon spektrum pada Kota Makassar, salah satunya dengan metode *Nonlinear* (NL), dimana dengan metode *nonlinear*, kondisi tanah sebenarnya dapat digambarkan

dalam bentuk kurva dengan mempertimbangkan parameter tanah *nonlinear*. Dari hasil penelitian ini, diharapkan mampu memberikan informasi ilmiah mengenai nilai respon spektrum dalam perencanaan bangunan tahan gempa pada kota Makassar sesuai dengan analisis data DEEPSOIL.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana profil endapan tanah pada lokasi penelitian berdasarkan data geoteknik dan geofisika ?
2. Bagaimana pengaruh kondisi tanah terhadap respon gempa pada lokasi penelitian dengan menggunakan metode Analisis Respon *Nonlinear* ?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui profil endapan tanah pada lokasi penelitian berdasarkan data geoteknik dan geofisika
2. Mengetahui pengaruh kondisi tanah terhadap respon gempa pada lokasi penelitian dengan menggunakan metode Analisis Respon *Nonlinear*

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

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 respon situs terhadap gempa.

## **1.5 Ruang Lingkup**

Adapun Ruang lingkup pembahasan dari penelitian ini adalah :

1. Data tanah berupa data *borelog* dan data laboratorium merupakan laporan penyelidikan tanah pada Jl. Masjid Raya Makassar tahun 2021.

2. Data gempa berupa *time history* gempa yang direkam oleh BMKG Wilayah IV Makassar pada tahun 2015.
3. Data kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) diperoleh dari data hasil pengukuran *Multichannel Analysis Surface Waves* (MASW) oleh Geofisika UNHAS.
4. Analisis respon spektrum dilakukan dengan metode *nonlinear* menggunakan *software* DEEPSOIL (University of Illinois Urbana Champaign).
5. Dalam penelitian ini *pore water pressure* diabaikan dalam analisis.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Gempa Bumi**

Menurut Rante (2015), gempa bumi adalah guncangan tanah yang disebabkan oleh pelepasan energi secara tiba-tiba pada litosfer bumi, dimana energi ini muncul dari tekanan yang terbentuk selama proses interaksi antara kerak bumi dan bagian dalam bumi. Gempa bumi terjadi pada retakan di kerak bumi yang disebut patahan. Patahan terjadi karena batuan rapuh dan pecah akibat tekanan tinggi. Gempa bumi terjadi karena hasil energi dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik yang terpancar ke segala arah berupa gelombang gempa bumi (*seismic wave*) yang dirasakan sampai ke permukaan bumi.

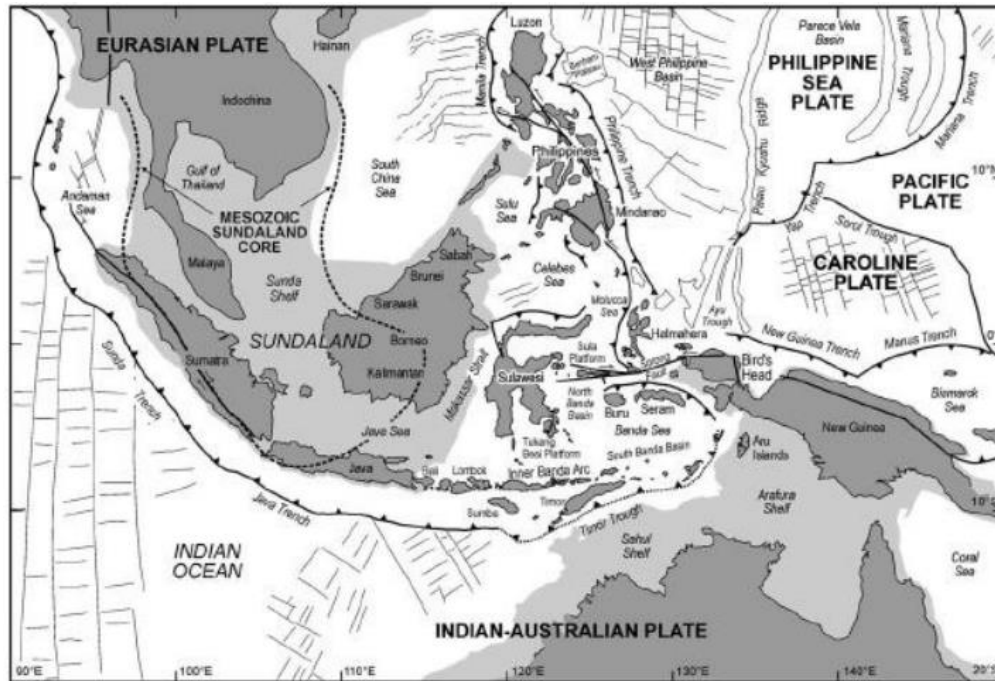
Tekanan yang berkembang pada daerah kerak bumi disebabkan oleh pergerakan lempeng bumi dimana tekanan pada suatu area batuan secara bertahap akan meningkat sedemikian rupa sehingga terjadi gerakan mendadak. Gerakan tersebut dapat menyebabkan patahan lain jika batuan patah pada titik terlemahnya. Ketika hal tersebut terjadi, semakin lama tekanan akan semakin meningkat sehingga mencapai keadaan dimana tekanan tersebut tidak dapat ditahan lagi oleh lempengan.

Menurut Sunarjo, dkk., (2012), gempa bumi dapat terjadi dimana saja dan kapan saja, namun konsentrasi gempa bumi cenderung terjadi pada tempat-tempat tertentu saja di muka bumi. Berdasarkan penyebabnya, ada 2 macam gempa yaitu gempa tektonik dan gempa vulkanik. Gempa bumi tektonik disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik secara tiba-tiba di kerak bumi sehingga menimbulkan gesekan yang menimbulkan getaran. Sedangkan gempa bumi vulkanik merupakan gempa yang terjadi akibat aktivitas magma di dalam gunung api dan sering disebut sebagai gempa gunung api karena terjadi setelah letusan gunung berapi.

Terjadinya gempa bumi berlangsung singkat, dengan kekuatan, waktu, dan lokasi yang tak diduga datangnya. Maka dari itu setiap daerah yang ditinjau akan diperoleh data yang berbeda sesuai waktu dan tempatnya.

## 2.2 Sejarah Gempa Indonesia

Secara geotektonik, Indonesia merupakan tempat pertemuan empat lempeng aktif di dunia yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Filipina. Hal ini menyebabkan Indonesia merupakan salah satu kawasan yang unik, dimana mengakibatkan terbentuknya tatanan struktur geologi tertentu..

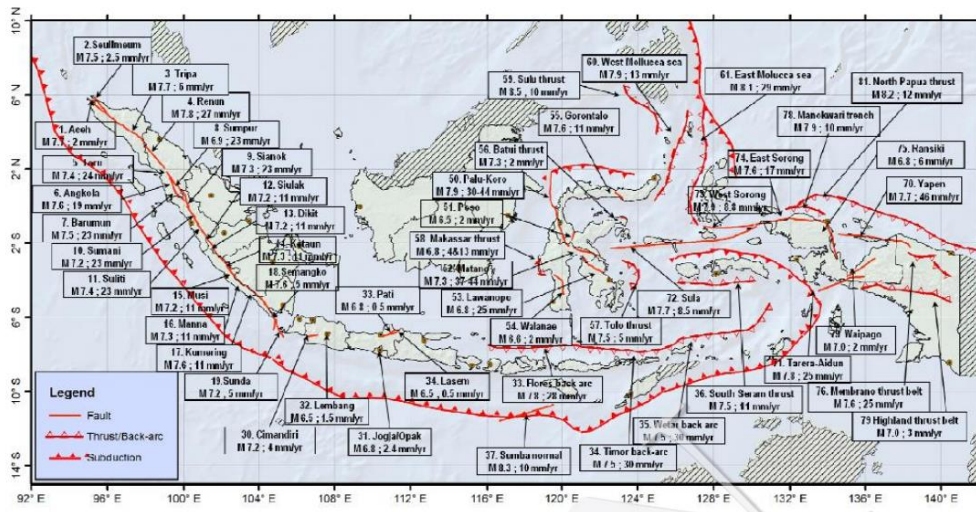


Sumber : Hall (2000)

Gambar 1 Tatanan tektonik di Indonesia

Adanya interaksi antara lempeng-lempeng ini akan menciptakan jalur yang disebut patahan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kondisi tektonik Indonesia bagian Barat sangat dipengaruhi oleh interaksi antara Lempeng Indo-Australia dan daratan Sunda. Sedangkan kondisi tektonik Indonesia bagian Timur dipengaruhi oleh interaksi Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Filipina sehingga menghasilkan tatanan struktur geologi yang kompleks (Supartoyo, 2014)

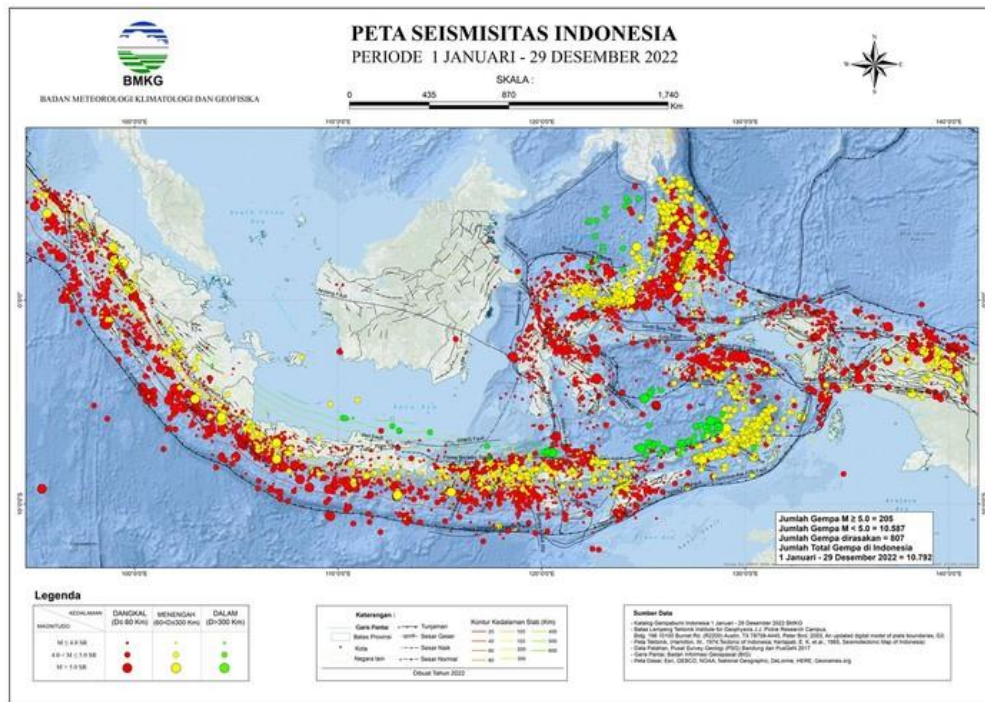




Sumber : Tim Revisi Peta Gempa Indonesia (2010)

Gambar 2 Peta sumber gempa Indonesia

Pada Gambar 3, titik-titik menunjukkan gempa bumi yang pernah terjadi di Indonesia sepanjang tahun 2022 dengan total gempa yang terjadi yaitu 10.792 gempa.



Sumber : BMKG (2022)

Gambar 3 Peta seismisitas Indonesia sepanjang tahun 2022

Salah satu dampak negatif akibat interaksi antar lempeng tersebut adalah Indonesia menjadi kawasan yang sangat rentan mengalami bencana gempa bumi. Pergerakan lempeng akan menyebabkan guncangan dan berdampak pada gangguan

kehidupan juga infrastruktur bangunan. Dampak gempa bumi terhadap bangunan disebabkan oleh beberapa faktor yaitu skala gempa, jarak *epicenter*, sumber, jenis lapisan tanah pada lokasi bangunan, dan juga kualitas bangunan.

### **2.2.1 Sejarah Kegempaan di Kota Makassar**

Kota Makassar sebagai ibu kota Provinsi Sulawesi Selatan terletak pada  $5^{\circ}09'41.7''$  LS dan  $119^{\circ}26'34''$  BT. Pulau Sulawesi terletak pada zona tektonik *microplate* yang sangat rentan terhadap pergerakan dan tumbukan tiga lempeng bumi yang akan menimbulkan fenomena geologi dan berdampak buruk bagi kehidupan manusia. Proses tektonik di wilayah Sulawesi telah berlangsung sejak zaman tersier hingga saat ini, sehingga pulau Sulawesi merupakan wilayah dengan fenomena geologi yang kompleks, sehingga kondisi kegempaan menjadi rumit.

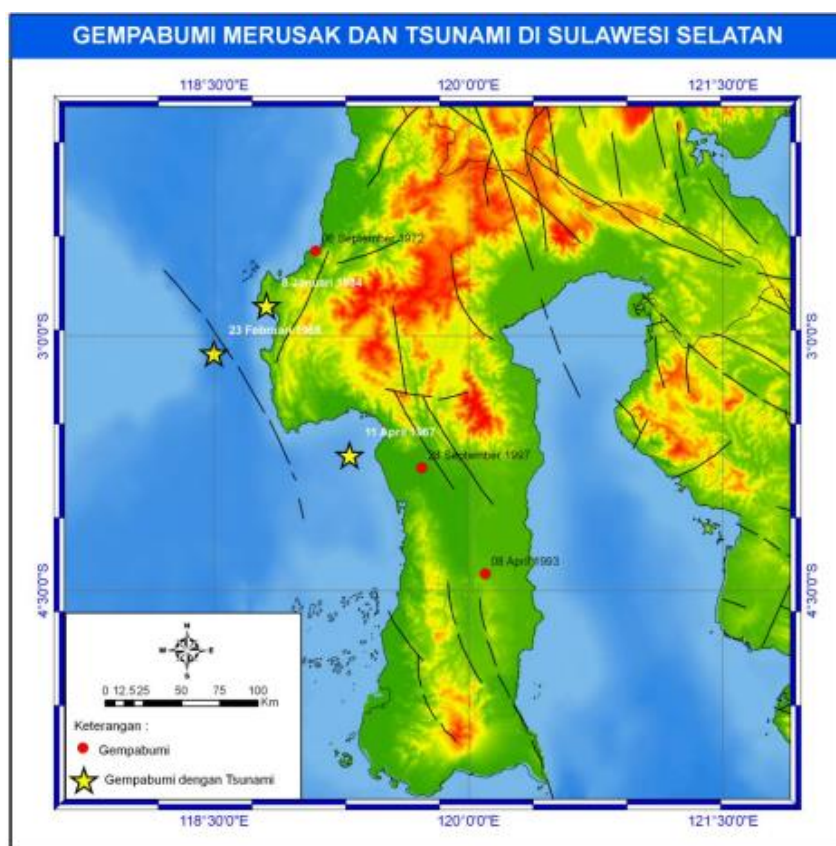
Menurut Husyain (2017), kondisi kegempaan suatu daerah sangat berhubungan dengan kondisi tektonik daerah tersebut, dengan kata lain semakin rumit dan kompleks proses tektonik yang terjadi pada suatu daerah, maka semakin tinggi kondisi kegempaan. Hal tersebut secara empiris maupun dengan cara teori telah banyak dibuktikan oleh banyak ahli di dunia yang menggunakan pendekatan teori tektonik lempeng. Dengan teori ini dijelaskan bahwa arus konveksi yang berada di astenosfer (lapisan bagian bawah bumi) bergerak dan ikut menggerakkan lapisan litosfer (lapisan bumi yang berbentuk lempeng) yang menyusun permukaan bumi.

Pergerakan lapisan litosfer ada yang bersifat saling menjauh (*divergen*), saling mendekat (*konvergen*) dan saling bersinggungan satu sama lain (*transform*). Masing-masing tipe pergerakan kemudian membentuk suatu morfologi yang berbeda. Semua jenis pergerakan di atas mempunyai kemungkinan untuk menghasilkan getaran yang apabila sampai dipermukaan bumi dan dirasakan manusia yang disebut dengan gempa. Gempa yang terjadi akibat proses ini disebut dengan gempa tektonik.

Menurut Kaharuddin (2011), pulau Sulawesi terletak pada zona pertemuan diantara tiga pergerakan lempeng besar yaitu pergerakan lempeng Hindia Australia dari selatan dengan kecepatan rata-rata 7cm/tahun, lempeng Pasifik dari Timur dengan kecepatan sekitar 6cm/tahun dan lempeng Asia bergerak relatif ke

Tenggara. Interaksi antar lempeng tentu sangat berpotensi untuk terjadinya gempa oleh karena itu gempa bumi yang terjadi di Sulawesi Selatan bukanlah merupakan hal yang aneh. Gempa bumi tersebut memungkinkan akan mempengaruhi getaran di wilayah Kota Makassar yang merambat dari batuan dasar hingga ke permukaan tanah.

Adapun gempa bumi dengan magnitude  $> 4,5$  SR yang pernah terjadi di Sulawesi Selatan yaitu gempa bumi Bulukumba (1828), Tinambung (1967), Majene (1969,1972), Mamuju (1972,1984), Bone (1993), dan Pare-pare (1997). Titik-titik gempa tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.

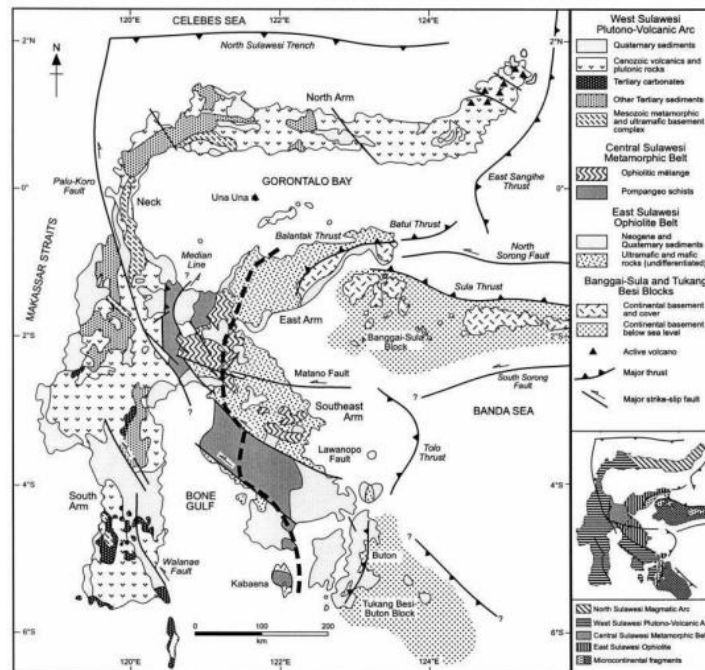


Sumber : Katalog BMKG (2010)

Gambar 4 Gempa yang terjadi di Sulawesi Selatan dengan kekuatan  $> 4,5$ SR

Kota Makassar terletak jauh dari sumber gempa dan tidak dilalui oleh jalur patahan (Gambar 5), tetapi meskipun begitu Kota Makassar dikelilingi oleh patahan yang sering memicu terjadinya gempa bumi, selain itu endapan permukaan yang lunak di Kota Makassar dapat menyebabkan terjadinya perbesaran getaran tanah yang disebabkan oleh gempa bumi yang jauh. Sehingga walaupun kecil

kemungkinan terjadinya gempa bumi besar di sekitar Kota Makassar, kerusakan akibat gempa jauh harus dihiraukan.



Sumber : Hall and Wilson (2000)

Gambar 5 Peta geologi Sulawesi

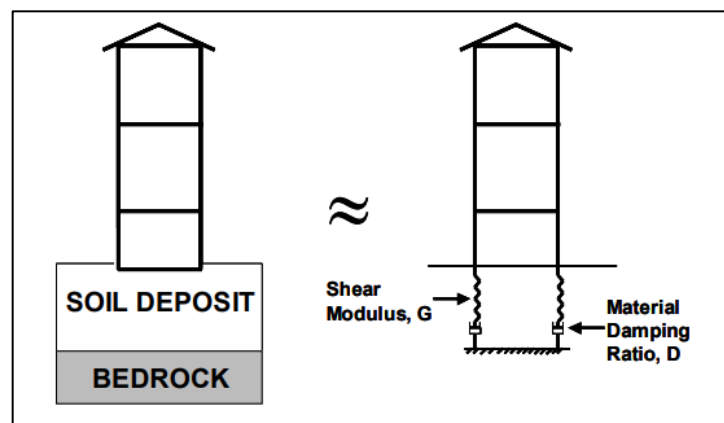
### 2.3 Site Effect

Gerakan tanah di bawah struktur akibat gempa sangat penting untuk diketahui. Beberapa parameter gerakan tanah yang paling penting adalah amplitude gerakan (percepatan puncak, kecepatan puncak, dan perpindahan puncak), kandungan frekuensi (spektrum Fourier, spektrum respons, dan periode dominan), dan durasi. Parameter ini dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu :

1. Efek sumber atau karakteristik gempa (percepatan puncak, kecepatan puncak, dan perpindahan puncak)
2. Efek jalur (jarak dari titik pelepasan energi)
3. Efek lokasi (karakteristik endapan tanah, topografi, dan kedekatan dengan tanah)

Menurut Sababurrohman (2020), karakteristik geologi permukaan dan geoteknik dari tanah berperan sangat penting dalam getaran seismik tanah. Variasi parameter getaran seperti amplitudo, kandungan frekuensi, dan durasi dikenal sebagai *site effect*. *Site effect* terjadi karena adanya perbedaan impedansi antara

lapisan tanah dengan batuan dasar (*bedrock*). Secara umum, *site effect* mengacu pada perubahan karakteristik gelombang karena kondisi lapisan tanah dan topografi permukaan. Perubahan ini bisa berupa amplifikasi atau de-amplifikasi pada semua frekuensi, tergantung pada berbagai parameter dinamik tanah seperti modulus geser maksimum ( $G_{max}$ ), kecepatan rambat gelombang geser ( $V_s$ ), dan damping ( $\xi$ ). Representasi parameter dinamik tanah pada endapan tanah dapat dilihat pada Gambar 6.



Sumber : Darendeli (2001)

Gambar 6 Representasi endapan tanah dalam hal sifat dinamis tanah

### 2.3.1 Local Site Effect

Kondisi tanah lokal memiliki pengaruh besar terhadap gerakan permukaan tanah dan kerusakan struktural yang disebabkan oleh peristiwa gempa apapun. Contoh kejadian gempa bumi yang membuktikan pengaruh amplifikasi akibat *local site effect* adalah gempa Meksiko 1985 dan gempa Loma Prieta 1989. Juga gempa bumi yang terjadi di India (Bihar-Nepal 1934, Bhuj 2001, Nepal 2015) juga membuktikan *local site effect* (Bajaj et al, 2017)

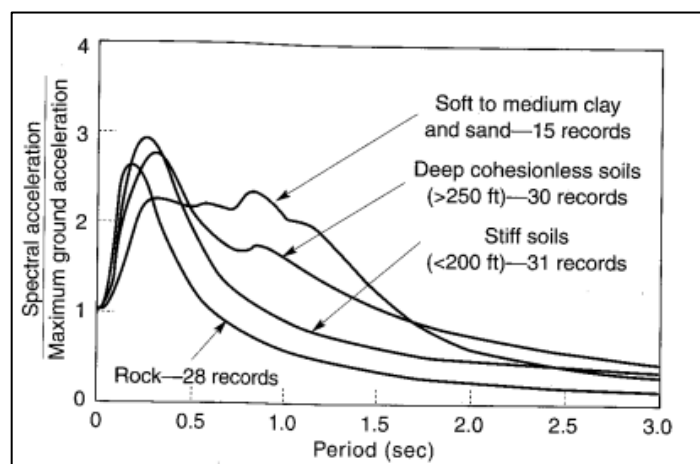
Salah satu masalah pada geoteknik kegempaan adalah respon tanah saat terjadi gempa bumi. Oleh karena itu, sifat dinamis tanah dijelaskan oleh sifat gerakan tanah saat terjadi gempa. Besarnya kerusakan bangunan akibat gempa tidak hanya disebabkan oleh kondisi atau kualitas bangunan. Kondisi geologi permukaan dan amplifikasi tanah juga merupakan parameter penting dalam menentukan tingkat kerusakan atau besarnya gempa bumi. Kerusakan yang terjadi berkaitan dengan kondisi lapisan tanah dibawahnya, tanah lunak (lapisan lapuk) akan meningkatkan

amplifikasi guncangan gempa dibandingkan dengan tanah padat (*solid*) (Ayubi, dkk., 2020)

Pengaruh dari kondisi geologi lokal dan tanah terhadap intensitas getaran gempa dan kerusakan yang ditimbulkan telah lama diketahui. Guthenberg (1927) dalam Thomso and Silva (2013), mengembangkan faktor amplifikasi dari rekaman *microseismik* pada lokasi-lokasi yang kondisi bawah permukaannya berbeda. Kondisi tanah local secara mendalam mempengaruhi semua karakteristik penting yaitu parameter amplitudo, kandungan frekuensi, dan durasi dari gerakan gempa. Besarnya pengaruh tergantung pada bentuk geometri dan sifat-sifat material bawah permukaan, kondisi topografi dan karakteristik *input motion*.

Setiap daerah memiliki karakteristik gerakan tanah yang berbeda-beda. Menurut Timbuleng (2020), salah satu efek yang ditimbulkan pada suatu daerah ketika terjadi gempa bumi adalah pergerakan tanah pada permukaan, dimana pergerakan tanah inilah yang dijadikan suatu acuan dalam mengidentifikasi gempa yang terjadi pada daerah tersebut, penyebaran pergerakan kecepatan tanah, dan dapat memprediksi intensitas dan magnitudo terjadinya gempa bumi pada waktu yang akan datang.

Pada kondisi tanah yang sebenarnya, jenis tanah atau batuan dan kepadatannya akan memberikan respon dinamis yang berbeda-beda. Kondisi tanah seperti lapisan tanah dan tebal lapisan tanah akan sangat mempengaruhi besar percepatan maksimum dan respon spektra yang terjadi dipermukaan (Misriani, 2019) dapat dilihat pada Gambar 7.



Sumber : Kramer (1996)

Gambar 7 Pengaruh jenis tanah terhadap perubahan percepatan

Bebapa faktor yang mempengaruhi gelombang seismik terhadap tanah meliputi jenis dan sifat tanah, kekuatan gempa, jarak dari pusat gempa, serta geometri dan sifat struktur atasnya. Ketika gelombang seismik merambat melalui lapisan-lapisan tanah yang berbeda, kecepatan dan arah gerak gelombang akan berubah-ubah dan akan mempengaruhi sifat-sifat mekanik tanah di bawah permukaan. Hal ini dapat menyebabkan efek amplifikasi dan de-amplifikasi pada tanah akibat gempa, yaitu meningkatkan atau menurunkan amplitudo gelombang di permukaan tanah.

Amplifikasi merupakan perbesaran gelombang seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan yang signifikan antara lapisan batuan dasar dan batuan sedimen, sehingga gelombang seismik akan mengalami perbesaran jika merambat pada suatu medium ke medium lain yang lebih lunak dibandingkan dengan medium awal yang dilaluinya. Semakin besar perbedaan itu maka perbesaran yang dialami gelombang tersebut akan semakin besar. Faktor amplifikasi memberikan gambaran tentang perubahan percepatan gerakan tanah dari batuan ke dasar permukaan. Pembesaran percepatan tanah dari batuan dasar ke permukaan disebabkan oleh perbedaan kecepatan gerakan gelombang geser ( $V_s$ ) di batuan dasar dan lapisan tanah (sedimen) (Ayubi dkk, 2020)

Ada 4 penyebab amplifikasi yaitu :

1. Adanya lapisan lapuk yang terlalu tebal di atas lapisan keras
2.  $f_0$  (frekuensi dominan tanah) rendah
3.  $f_0$  gempa dengan geologi setempat sama atau hampir sama
4. Gelombang gempa terjebak di dalam lapisan lapuk dalam waktu yang lama

Menurut Idriss (1970), efek amplifikasi terjadi ketika gelombang seismik melalui lapisan tanah yang mempunyai kecepatan yang lebih lambat, sehingga amplitudo gelombang akan meningkat ketika mencapai permukaan tanah. Sebaliknya, efek de-amplifikasi terjadi ketika gelombang seismik melalui lapisan tanah yang mempunyai kecepatan yang lebih cepat, sehingga amplitudo gelombang akan menurun ketika mencapai permukaan tanah. Amplifikasi itu sendiri merupakan dampak adanya *site effect* pada kondisi tanah permukaan.

## 2.4 Analisis Respon Situs terhadap Gempa

Respon situs merupakan perubahan karakteristik gelombang gempa bumi akibat pengaruh medium geologi, seperti ketebalan dan tipe lapisan tanah, yang terdapat di antara sumber gempa dan lokasi pengukuran. Respon situs dapat mempengaruhi intensitas gempa di lokasi pengukuran dan harus dipertimbangkan.

Analisis respon situs dapat digunakan untuk memprediksi perambatan karakteristik gelombang seismik dari batuan dasar ke permukaan tanah. Karakteristik gerakan tanah seismik pada setiap kedalaman sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah setempat. Analisis ini memperkirakan respon permukaan tanah akibat beban seismik, yang sangat penting untuk desain struktur dan geoteknik. Spektrum respon pada permukaan menggambarkan selubung respon puncak dari banyak sistem derajat kebebasan tunggal (*Single Degree of Freedom, SDoF*) yang dapat digunakan untuk merancang struktur tahan gempa (Misliniyati dkk, 2019).

*Site Specific Analysis* adalah studi yang dilakukan dengan melakukan analisis perbesaran getaran gempa dari lapisan batuan dasar ke permukaan tanah. Data yang didapatkan dari analisis ini adalah percepatan spektra dan faktor amplifikasi. Percepatan spektra terdiri dari 3 jenis yaitu pada saat  $T=0$  detik,  $T=0,2$  detik, dan  $T=1$  detik. Faktor amplifikasi adalah faktor pembesaran percepatan gempa yang terjadi pada permukaan tanah akibat jenis tanah tertentu (Wijaya dkk, 2013)

### 2.4.1 Analisis Respon Situs dengan Metode *Nonlinear*

Alternatif untuk pendekatan linear yang setara yang jauh lebih kompleks tetapi mendapatkan daya tarik adalah pendekatan *nonlinear* untuk respons situs. Respon situs *nonlinear* mengintegrasikan persamaan gelombang secara numerik dalam serangkaian langkah waktu kecil menggunakan pendekatan *Forward-different* yaitu metode perbedaan terbatas. Salah satu aspek terpenting dari pendekatan *nonlinear* adalah model konstitutifnya (perilaku bongkar muat).

Pada tahun 1960-an, metode *nonlinear* mulai diperkenalkan dalam analisis struktur oleh Nathan M. Newmark dan George Housner. Mereka mengamati bahwa perilaku struktur selama gempa bumi dapat lebih kompleks daripada yang diperkirakan dengan metode linier yang umum pada saat itu. Pada tahun 1970-an, Michael J. Symans dan ahli teknik sipil lainnya mulai menggunakan pendekatan



*nonlinear* dan mengembangkan model matematika yang dapat menggambarkan perilaku nonlinier pada struktur selama gempa bumi.

Menurut Kramer (1996), dalam analisis geoteknik metode *nonlinear* mulai diterapkan pada analisis respon situs pada tahun 1980-an. Pada saat itu, banyak studi dilakukan untuk memperbaiki metode analisis linier yang digunakan sebelumnya, yang tidak mempertimbangkan pengaruh deformasi plastis pada lapisan tanah selama gempa bumi. Pendekatan *nonlinear* pada analisis geoteknik memperhitungkan pengaruh perilaku material tanah yang nonlinier selama gempa bumi, diantaranya kegagalan material, deformasi plastis, dan redistribusi tegangan yang dapat terjadi pada lapisan tanah selama gempa bumi berlangsung.

Dalam bukunya, Kramer (1996) juga menjelaskan bahwa metode *nonlinear* pada analisis geoteknik didasarkan pada teori mekanika batuan dan tanah, yang menggambarkan perilaku nonlinier pada material tanah. Teori ini diterapkan pada analisis elemen hingga (*finite element analysis*) untuk menggambarkan respons lapisan tanah selama gempa bumi. Metode *nonlinear* dapat digunakan untuk memodelkan perilaku tanah yang nonlinier seperti pembukaan celah dan kegagalan material.

Sebagian besar kode *nonlinear* menggunakan beberapa modifikasi dari kriteria Masing :

1. Untuk pembebanan awal, kurva tegangan-regangan mengikuti kurva *back-bone*
2. Jika pembalikan tegangan terjadi pada titik yang ditentukan oleh  $(\gamma_r, \tau_r)$ , kurva tegangan-regangan mengikuti jalur yang diberikan oleh (Philips and Hashash, 2009) :

$$\frac{\tau - \tau_r}{2} = F_{bb} \left( \frac{\gamma - \gamma_r}{2} \right) \quad (1)$$

Dengan kata lain, kurva *unloading* dan *reloading* memiliki bentuk yang sama dengan kurva *back-bone* (dengan asal bergeser ke titik pembalikan pemuatan) tetapi diberi energi dengan faktor 2. Dua aturan pertama ini, yang menggambarkan perilaku Masing tidak cukup untuk menggambarkan respon tanah di bawah pembebanan siklik umum.

3. Jika kurva pembebanan atau pembebanan kembali melebihi regangan awal maksimum dan memotong kurva tulang punggung, kurva tersebut mengikuti kurva tulang punggung hingga pembalikan tegangan berikutnya.
4. Jika kurva pembebanan atau muat ulang memotong kurva bongkar atau memuat ulang dari siklus sebelumnya, kurva tegangan-regangan mengikuti siklus sebelumnya.

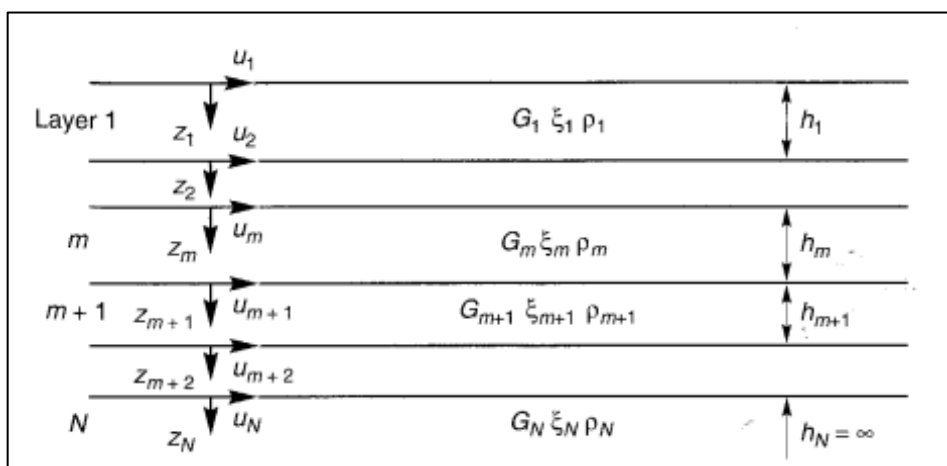
Hasil perbandingan antara metode *equivalent linear* dan *nonlinear* dalam beberapa penelitian (Kramer, 1996) yaitu

1. Sifat permanen dari analisis ekuivalen linear yaitu dapat menyebabkan korelasi resonansi yang kurang signifikan seperti amplifikasi tingkat tinggi yang dihasilkan dari komponen kuat dari gerakan input dengan salah satu frekuensi alami dari endapan tanah linear ekuivalen. Sedangkan sebenarnya kekakuan tanah nonlinier yang berubah selama durasi gempa sehingga tingkat amplifikasi tinggi yang dihasilkan tidak sesuai di lapangan.
2. Penggunaan regangan geser yang efektif dalam analisis ekuivalen linear dapat menyebabkan sistem terlalu lunak dan terlalu teredam ketika regangan geser puncak jauh lebih besar dari regangan geser lainnya atau menjadikan sistem yang kurang lunak dan kurang redaman ketika geser amplitudo regangan hampir seragam.
3. Metode nonlinear dapat dirumuskan dalam bentuk tegangan efektif untuk memungkinkan pemodelan pembangkitan, redistribusi, dan disipasi tekanan air pori berlebih selama dan setelah guncangan gempa. Metode ekuivalen linear tidak memiliki kemampuan ini.
4. Metode nonlinear memerlukan model tegangan-regangan atau konstitutif yang bisa diandalkan. Parameter menggambarkan model tersebut tidak ditetapkan sebaik yang ada pada model ekuivalen linear. Pengujian lapangan dan laboratorium yang substansial diperlukan untuk mengevaluasi parameter tanah nonlinear.
5. Perbedaan antara hasil analisis ekuivalen linear dan *nonlinear* bergantung pada tingkat nonlinieritas dalam respons tanah yang sebenarnya. Dimana tingkat regangan tetap rendah (profil tanah yang kaku atau gerakan input yang relatif lemah), kedua analisis dapat menghasilkan estimasi respon tanah yang

masuk akal. Tetapi untuk tingkat regangan tinggi, terutama dimana tegangan geser diinduksi mendekati kekuatan geser tanah yang tersedia, analisis nonlinear cenderung memberikan hasil yang signifikan.

Pendekatan ekuivalen linear menganggap bahwa  $G$  dan  $\xi$  konstan, yang artinya nilai parameter tidak berubah dari nilai yang ditentukan di awal saat guncangan berlangsung, sedangkan pada pendekatan nonlinear  $G$  dan  $\xi$  berubah-ubah sesuai dengan perilaku tegangan-regangan geser inelastic nonlinier dari tanah. Asumsi perilaku tegangan-regangan pada kedua pendekatan ini berbeda, dimana asumsi dari analisis ekuivalen linear memungkinkan analisis dilakukan dalam domain frekuensi dengan menggunakan fungsi transfer (Gambar 8) yang mudah dibangun, namun ini merupakan asumsi yang membatasi tanah pada kondisi sebenarnya, dimana perilaku tegangan-regangan geser tidak linier dan berubah seiring waktu dan seiring dengan berlangsungnya guncangan tanah selama peristiwa gempa bumi.

Dalam analisis *nonlinear*, hubungan tegangan-regangan geser tanah dimodelkan dan dimasukkan ke dalam analisis respon tanah dengan lebih mewakili perilaku siklik nonlinier yang sebenarnya dari tanah di lapangan ketika mengalami perambatan vertikal gelombang seismik selama peristiwa gempa bumi. Selain itu, persamaan gerak untuk gelombang geser seismik yang merambat secara vertikal diselesaikan dalam domain waktu, dimana respon tanah atau tanah dinamis diperoleh dengan merumuskan dan menyelesaikan sistem persamaan gerakan tanah yang digabungkan secara temporal.



Sumber : Kramer (1996)

Gambar 8 Fungsi transfer

## 2.5 DEEPSOIL

DEEPSOIL dikembangkan di bawah arahan Youssef M. A. Hashash (1998-1999) bekerja sama dengan beberapa mahasiswa pascasarjana dan sarjana termasuk Duhee Park, Chi-Chin Tsai, Camilo Philips, David R. Groholski, Daniel Turner, Michael Musgrove, Byungmin Kim dan Joseph Harmon, Okan Ilhan, dan Guangchao Xing pada Universitas Illinois di Urbana-Champaign.

DEEPSOIL adalah program analisis respons situs satu dimensi yang dapat melakukan :

1. Analisis domain waktu *nonlinier* 1-D dengan dan tanpa pembangkitan tekanan air pori
2. Analisis domain frekuensi linier ekuivalen 1-D termasuk konvolusi dan dekonvolusi
3. Analisis domain waktu dan frekuensi linier 1-D

Dalam penggunaan program DEEPSOIL sangat diperlukan pengetahuan dalam teori dan prosedur untuk seismic *site response analysis* dan rekayasa gempa geoteknik. Selain itu, perlu meninjau literatur yang relevan dan sesuai dalam mengembangkan input analisis dan interpretasi hasil.

### 2.5.1 Metode Perhitungan Respon Spektrum (Solusi Frekuensi Domain)

Dalam solusi frekuensi domain, gerakan input *Fourier Amplitude Spectra* (FAS) dimodifikasi oleh fungsi tranfer yang didefinisikan oleh Chopra (1995) dalam Hashash et al. (2020) sebagai:

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

Dimana  $f_n$  = frekuensi natural osilator ( $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$ ),  $\xi$  = redaman ( $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ ),  $k$  = kekakuan sistem,  $m$  = massa, dan  $c$  = redaman kental.

Penggunaan solusi frekuensi domain membutuhkan FFTs (*Fast Fourier Transforms*) untuk berpindah antara frekuensi domain, tempat fungsi transfer osilator diterapkan, dan domain waktu, tempat respons osilator puncak diperkirakan. Selama rentang frekuensi gerakan tanah, solusi frekuensi-domain tepat.

## 2.5.2 Model Tanah

### 2.5.2.1 Hyperbolic/Pressure-Dependent Hyperbolic (MKZ)

DEEPSOIL menggabungkan model hiperbolik yang bergantung pada tekanan. Model hiperbolik yang dimodifikasi ini dikembangkan oleh Matasovic (1993) dan didasarkan pada model hiperbola oleh Kunder dan Zelasko (1963), tetapi menambahkan dua parameter Beta ( $\beta$ ) dan  $s$  yang menyesuaikan bentuk *backbone curves* (Hashash et al., 2020) :

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad (3)$$

dimana :

$G_0$  = modulus geser awal

$\tau$  = tegangan geser

$\gamma$  = regangan geser

$\beta$ ,  $s$ , dan  $\gamma_r$  = parameter kurva tegangan-regangan

DEEPSOIL memperluas model untuk membatasi tekanan (Hashash et al., 2020) :

$$\gamma_r = \text{Reference Strain} \left( \frac{\sigma'_v}{\text{Reference Stress}} \right)^b \quad (4)$$

Dimana :

$\sigma'_v$  = tegangan vertikal efektif

*Reference Stress* = tegangan efektif vertikal dimana  $\gamma_r = \text{Ref. Stress}$

Model ini disebut sebagai *pressure-dependent hyperbolic model*. Model hiperbolik termodifikasi bergantung pada tekanan hampir linier pada regangan kecil dan menghasilkan redaman histerik nol pada regangan kecil. Peredam regangan kecil harus ditambahkan secara terpisah untuk mensimulasikan perilaku tanah sebenarnya yang menunjukkan redaman bahkan pada regangan yang sangat kecil menurut Hashash dan Park (2001) dalam Hashash et al. (2020). Redaman regangan kecil didefinisikan sebagai.

$$\xi = \text{Small Strain Damping Ratio} \left( \frac{1}{\sigma'_v} \right)^d \quad (5)$$

Dimana  $d$  dapat diatur ke nol jika diinginkan redaman regangan kecil yang bebas tekanan. Parameter yang akan didefinisikan selain properti layer yaitu

tegangan referensi, parameter kurva tegangan-regangan ( $\beta$ ), parameter kurva tegangan-regangan ( $s$ ), parameter tergantung tekanan/regangan referensi ( $b$ ), referensi tekanan, dan parameter yang bergantung pada tekanan/kurva redaman ( $d$ ).

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

Dalam studinya Darendeli (2001) menyajikan kurva kekuatan geser-regangan geser berdasarkan data eksperimen yang diperoleh. Pada regangan kecil, data dikumpulkan menggunakan uji kolom resonansi sampai taraf regangan geser menengah dengan uji geser torsional. Nilai diekstrapolasikan pada tingkat regangan besar. Dimana ekstrapolasi ini melebihi kekuatan geser pada regangan besar. Oleh karena itu, koreksi kekuatan geser diperlukan untuk menghitung kekuatan geser yang benar pada regangan besar. Model *Generalized Quadratic/Hyperbolic* diusulkan oleh Groholski et al (2016), model ini memiliki skema pemasangan kurva yang secara otomatis mengoreksi kurva referensi seperti Darendeli (2001) berdasarkan kekuatan geser yang ditentukan pada regangan. Parameter pemasangan kurva  $\theta_1$ - $\theta_5$  digunakan untuk melestarikan kurva reduksi modulus yang diperoleh dari sebanyak mungkin studi referensi dan memodifikasi nilai regangan besar berdasarkan kekuatan geser regangan besar yang ditentukan.

Parameter  $\tau_{maks}$  dan  $\theta_1 - \theta_5$  diperlukan untuk membangun kekuatan geser terkoreksi kekuatan geser-kurva regangan geser. Untuk memperoleh  $\tau_{maks}$  pengguna hanya perlu menentukan kekuatan geser dari material tanah yang disimulasikan pada regangan besar. Parameter  $\theta_1 - \theta_5$  diperoleh berdasarkan studi referensi oleh Groholski et al (2016). Salah satu cara mudah untuk mendapatkan parameter ini adalah dengan menggunakan DEEPSOIL. Pengguna dapat membuat domain berlapis dalam software ini dan memilih kurva referensi yang tersedia. Setelah membangun domain berlapis, pemasangan kurva GQ/H rutin menghitung kekuatan geser yang dikoreksi kekuatan geser-kurva regangan geser dan memberikan parameter  $\theta_1 - \theta_5$ . Nilai-nilai ini dapat langsung digunakan dalam bahan histeretik tanah tanpa harus menentukan kekuatan geser acuan-kurva regangan geser.

Model material menggunakan  $\tau_{maks}$ ,  $G_0$ , dan  $\theta_1 - \theta_5$  untuk membangun kurva kuat geser-regangan geser menggunakan fungsi berikut (Groholski et al., 2016):

$$\theta_{\tau} = \theta_1 + \theta_2 \times \frac{\theta_4 \times \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}}{\theta_3 \theta_5 + \theta_4 \times \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}} \quad (6)$$

dimana :

$\gamma_r$  = referensi regangan ( $\gamma_r = \tau_{maks}/G_0$ )

$\theta_{\tau}$  = fungsi kurva fitting dari model GQ/H yang dinormalisasikan

$\gamma$  = regangan geser

$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$  = parameter kurva fitting dari fungsi  $\theta$ , untuk model GQ/H yang dinormalisasikan

Setelah  $\theta_{\tau}$  ditentukan, kurva kekuatan geser-regangan geser didefinisikan sebagai berikut :

$$\tau = \tau_{max} \times \left[ \frac{1}{\theta_{\tau}} \times \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) - \sqrt{\left\{ 1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right\}^2 - 4 \times \theta_{\tau} \times \frac{\gamma}{\gamma_r}} \right\} \right] \quad (7)$$

dimana :

$\tau$  = tegangan geser

$\tau_{max}$  = tegangan geser maksimum

$\theta_{\tau}$  = fungsi kurva fitting dari model GQ/H yang dinormalisasikan

$\gamma$  = regangan geser

$\gamma_r$  = regangan referensi ( $\gamma_r = \tau_{maks}/G_0$ )

### 2.5.3 Kurva Reduksi Modulus Geser dan Damping

#### 2.5.3.1 Menq (2003)

Menq (2003) mengatakan bahwa sifat dinamis material geoteknik sering dinyatakan dalam hal kekakuan dan redaman material. Sifat-sifat ini digunakan untuk menentukan kecepatan dan peluruhan amplitudo gelombang tegangan saat mereka merambat melalui bahan geoteknik. Kekakuan dapat dinyatakan dalam modulus geser (G), modulus Young (E) dan modulus terbatas (M). Ketiga modulus ini terkait dengan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) gelombang kompresi tidak dibatasi ( $V_c$ ) dan gelombang kompresi terbatas ( $V_p$ ), masing-masing, sebagai :

$$G = \rho V_s^2 \quad (8)$$

$$E = \rho V_c^2 \quad (9)$$

$$M = \rho V_p^2 \quad (10)$$

di mana  $\rho$  adalah massa satuan total material. Redaman material, dinyatakan dalam rasio redaman juga dikaitkan dengan setiap jenis gelombang tegangan. Rasio redaman material adalah rasio redaman dalam geser ( $D_s$ ), rasio redaman dalam kompresi tidak dibatasi ( $D_c$ ), dan rasio redaman dalam kompresi terbatas ( $D_p$ ).

Tanah berperilaku nonlinier dalam geser karena amplitudo regangan melampaui regangan ambang elastis ( $\gamma_t^e$ ). Modulus geser menurun dan rasio redaman material meningkat dengan meningkatnya regangan geser di atas  $\gamma_t^e$ . Variasi modulus geser dan rasio redaman material dengan meningkatnya regangan geser penting untuk mengkarakterisasi perilaku tanah selama guncangan tanah yang kuat (gempa bumi). Karena sulit untuk melakukan uji dinamis nonlinier in-situ (di lapangan), sifat dinamis nonlinier untuk endapan lapangan umumnya diperoleh dengan memodifikasi yang diukur di laboratorium.

Kurva reduksi modulus geser ( $G - \log \gamma$ ) yang digunakan untuk analisis gerakan tanah dimodifikasi dari kurva reduksi modulus geser yang dinormalisasi yang diukur di laboratorium dengan modulus geser regangan kecil yang diukur di lapangan. Hubungan antara modulus geser nonlinier yang digunakan untuk analisis di lapangan ( $G_{field}$ ) dan modulus geser nonlinier yang diukur di laboratorium ( $G_{lab}$ ) dapat dinyatakan sebagai (Menq, 2003):

$$G_{field} = G_{lab} / G_{max,lab} \times G_{max,field} \quad (11)$$

dimana :

$G_{max,lab}$  = modulus regangan kecil yang diukur di laboratorium

$G_{max,field}$  = modulus geser regangan kecil yang diukur di lapangan

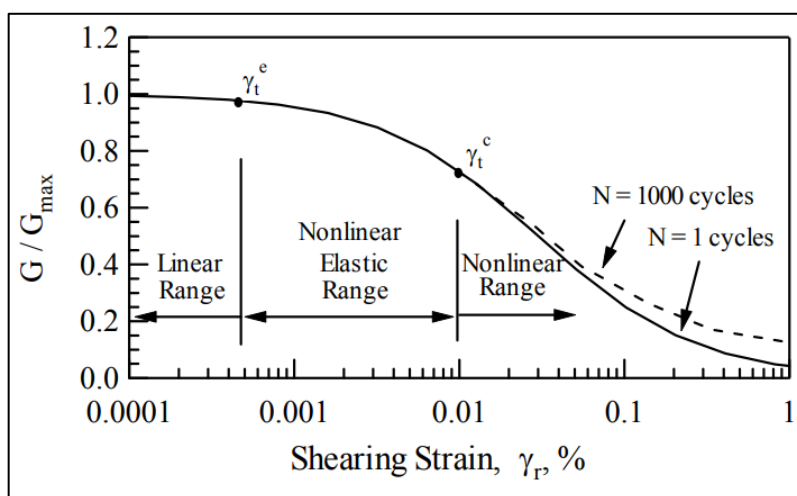
Karena tingkat kesulitan yang terkait dengan pengukuran redaman di lapangan, kurva rasio redaman material nonlinier yang diukur di laboratorium digunakan tanpa prosedur modifikasi yang ditetapkan. Oleh karena itu, evaluasi kurva  $G/G_{max} - \log \gamma$  dan  $D_s - \log \gamma$  adalah dua tujuan utama pengukuran laboratorium dinamis nonlinier.

Variasi modulus geser dan rasio redaman material dengan regangan geser umumnya disajikan dalam plot semi-logaritmik. Modulus geser dan rasio redaman material dalam rentang linier ditunjukkan dengan jelas, seperti halnya dalam kisaran nonlinier hingga regangan sekitar 1%. Kurva  $G/G_{max} - \log \gamma$  dan  $D_s - \log \gamma$  umumnya dipisahkan menjadi tiga rentang pada sebagian besar analisis teknik



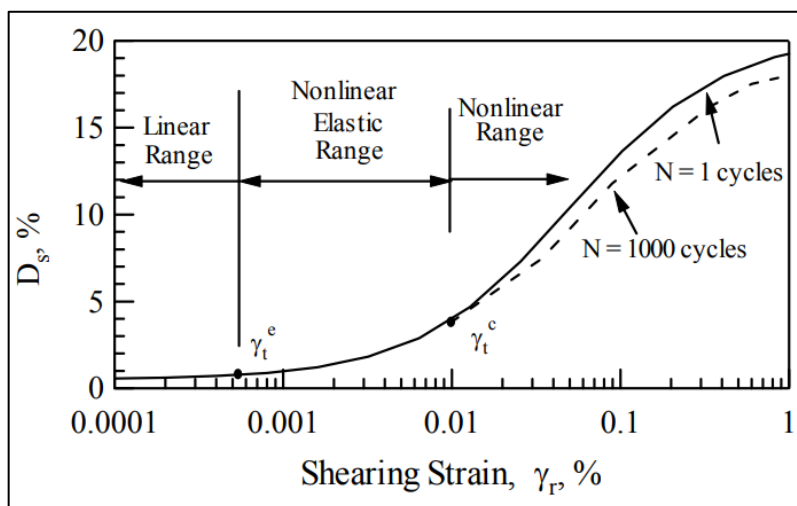
gempa yaitu gerakan tanah medan bebas. Ketiga rentangnya yaitu *linear*, *nonlinear elastic*, dan *nonlinear* yang diilustrasikan pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10, modulus geser berada pada nilai maksimum, dilambangkan sebagai  $G_{\max}$  dan rasio redaman material pada geser berada pada nilai minimum, dilambangkan sebagai  $D_{s,\min}$ , pada amplitude regangan lebih rendah dari regangan ambang elastis ( $\gamma_t^e$ ). rentang regangan antara ambang elastis dan siklik umumnya dilambangkan sebagai rentang nonlinear elastic. Dalam rentang regangan ini, modulus geser menurun dan rasio redaman material pada geser meningkat dengan meningkatnya regangan geser.



Sumber : Menq (2003)

Gambar 9 Normalized shear modulus reduction curve

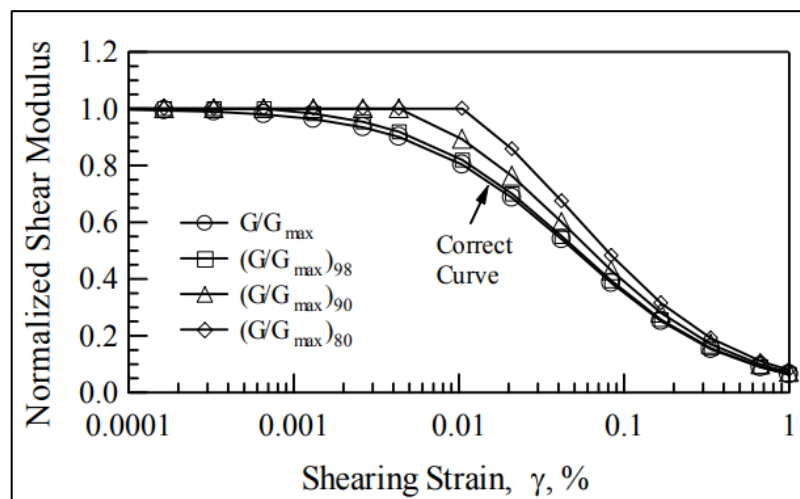


Sumber : Menq (2003)

Gambar 10 Material damping ratio increase curve

Namun, modulus geser dan rasio redaman material dalam geser pada dasarnya tidak terpengaruh oleh jumlah siklus pemuatan dalam kisaran *nonlinear elastic*. Karena amplitude regangan melebihi ambang siklik ( $\gamma_t^e$ ), modulus geser dan rasio redaman material dalam geser adalah fungsi dari siklus pemuatan, dan kisaran ini disebut rentang *nonlinear*.

Untuk mengevaluasi kurva  $G/G_{\max} - \log \gamma$  dengan benar, sangat penting untuk mengukur  $G_{\max}$  untuk melakukan pengukuran modulus dan redaman pada beberapa tingkat regangan di bawah  $\gamma_t^e$ . Modulus geser yang dinormalisasikan dilambangkan sebagai  $(G/G_{\max})_{98}$ ,  $(G/G_{\max})_{90}$ , dan  $(G/G_{\max})_{80}$  seperti yang diilustrasikan pada Gambar 11 dimana kurva modulus geser yang dinormalisasikan bergerak ke atas saat  $\gamma_L$  meningkat sehingga material tampak lebih linier.



Sumber : Menq (2003)

Gambar 11 Variation of shear modulus reduction curves with different values of the apparent small-strain shear modulus

### 2.5.3.2 Seed and Idriss (1970)

Menurut Seed and Idriss (1970), dalam kasus respon tanah yang tidak melibatkan perpindahan sisa tanah, maka respon ditentukan terutama oleh modulus geser dan karakteristik redaman tanah pada kondisi pembebanan siklik simetris. Sebagian besar tanah memiliki hubungan tegangan-regangan lengkung. Modulus geser biasanya dinyatakan sebagai modulus secant yang ditentukan oleh titik-titik ekstrem pada *hysteretic*. Modulus geser dan faktor redaman sangat bergantung pada besarnya regangan yang ditentukan *hysteretic loop* dan juga harus ditentukan sebagai fungsi regangan yang diinduksi dalam spesimen tanah atau endapan tanah.

Metode penentuan modulus geser dan karakteristik redaman dilakukan mulai dari uji laboratorium dan lapangan dengan berbagai macam prosedur seperti *direct determination of stress-strain relationships, forced vibration test, free vibration tests, field measurement of wave velocities, dan analysis of ground response during earthquake.*

Sebelumnya studi oleh Hardin dan Drnevich telah dilakukan dengan survei komprehensif tentang faktor-faktor yang mempengaruhi modulus geser dan faktor redaman tanah yaitu amplitudo regangan, rata-rata tegangan utama efektif, *void ratio*, jumlah siklus pemuatan, derajat kejenuhan untuk tanah kohesif. Selain itu, ada beberapa faktor yang kurang signifikan diantaranya tegangan geser octahedral, *overconsolidation ratio*, parameter kekuatan tegangan efektif, juga efek waktu. Untuk menentukan nilai modulus geser maksimum pada regangan nol dan variasi nilai modulus dengan regangan untuk semua jenis tanah, digunakan persamaan berdasarkan Hardin and Drnevich (1970) dalam Seed and Idriss (1970) :

$$G_{max} = 14760 \times \frac{(2.973-e)^2}{1+e} (OCR)^a (\sigma'_m)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

dimana :

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

$e$  = *void ratio*

OCR = *overconsolidation ratio*

$a$  = parameter yang bergantung pada indeks plastisitas tanah

$\sigma'_m$  = rata-rata tegangan efektif utama (psf)

Semua penyelidikan telah menunjukkan bahwa nilai modulus untuk pasir sangat dipengaruhi oleh tekanan pembatas, amplitudo regangan dan *void ratio* (atau kerapatan relatif) tetapi tidak secara signifikan oleh variasi karakteristik ukuran butir. Secara umum, modulus geser dan tekanan pembatas dihitung menggunakan persamaan oleh Seed and Idriss (1970) :

$$G = 100 K_2 (\sigma'_m)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

dimana :

$G$  = modulus geser

$K_2$  = parameter yang bergantung pada regangan

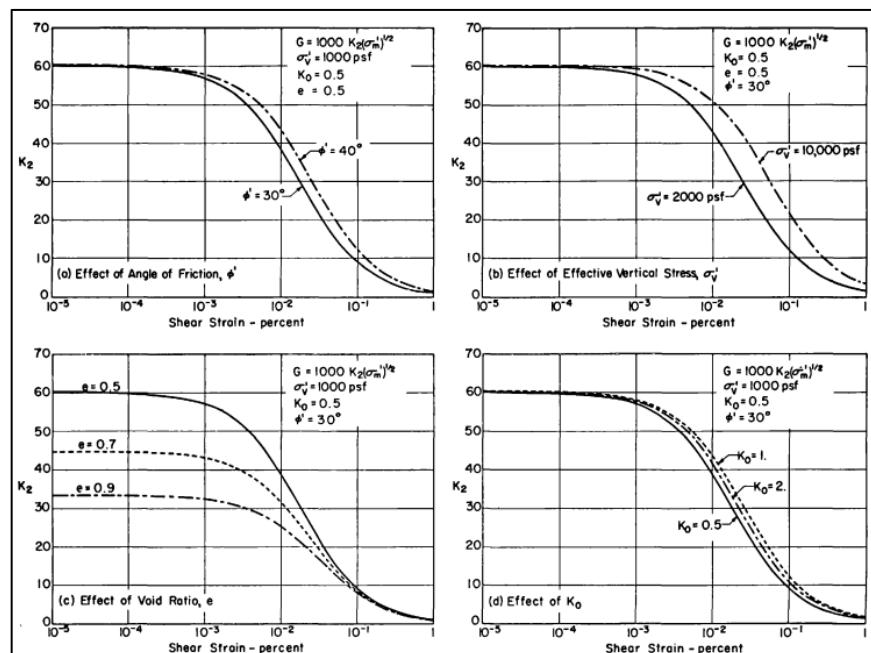
$\sigma'_m$  = rata-rata tegangan efektif utama

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

Pengaruh faktor-faktor lain pada  $K_2$ , dapat diilustrasikan oleh hasil pada Gambar 12 yang dihitung menggunakan hubungan yang disarankan oleh Hardin dan Drnevich. Plot disajikan untuk menunjukkan pengaruh  $\phi'$ , tegangan vertikal efektif ( $\sigma_v'$ ),  $K_0$ , dan void ratio pada hubungan  $K_2$  dan amplitudo regangan. Dapat dilihat bahwa :

1. Pada regangan yang sangat rendah ( $\gamma \leq 10^{-3} \%$ ),  $K_2$  hanya bergantung pada *void ratio* ( $e$ ).
2. Pada regangan menengah ( $10^{-3} < \gamma < 10^{-1} \%$ ) variasi  $K_2$  dengan regangan hanya sedikit dipengaruhi oleh tegangan vertikal dan sangat sedikit dipengaruhi oleh variasi  $\phi'$  dan  $K_0$ . Nilai  $K_2$  masih sangat dipengaruhi oleh *void ratio*.
3. Pada regangan yang sangat tinggi ( $\gamma > 10^{-1} \%$ ), nilai-nilai  $K_2$  sedikit dipengaruhi oleh tegangan vertikal tetapi pada dasarnya tidak bergantung pada  $K_0$ ,  $\phi'$ , dan  $e$ .

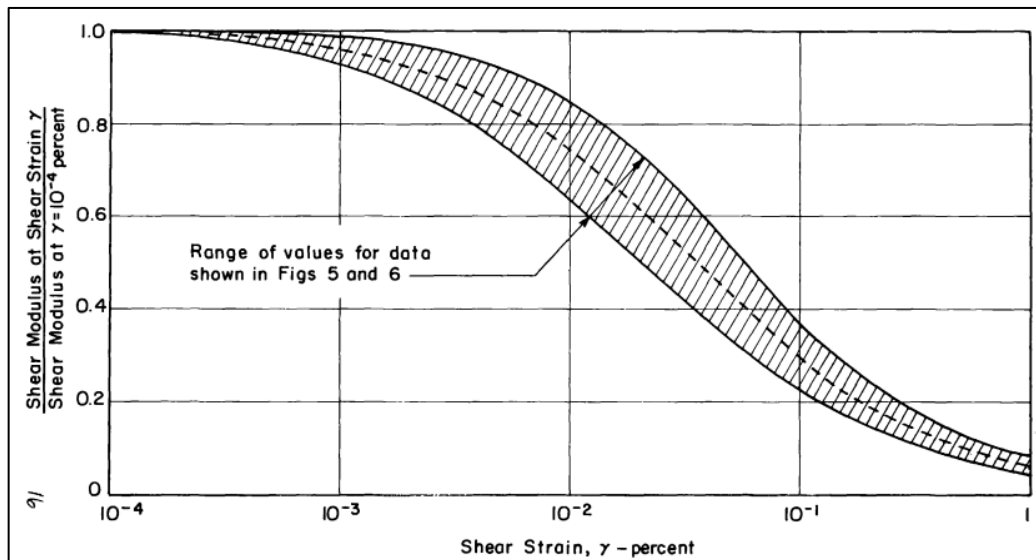
Jadi untuk tujuan praktis, nilai-nilai  $K_2$  dapat dianggap ditentukan oleh *void ratio* atau kerapatan relatif dan amplitudo regangan terhadap gerakan.



Sumber : Seed and Idriss (1970)

Gambar 12 Pengaruh berbagai faktor terhadap modulus geser pasir berdasarkan Hardin dan Drnevich

Pendekatan yang dekat dengan hubungan modulus dan regangan geser untuk setiap jenis pasir dapat diperoleh dengan menentukan modulus pada tingkat regangan yang sangat rendah dengan metode perambatan gelombang di lapangan kemudian mengurangi nilai ini untuk tingkat regangan lainnya sesuai dengan hasil yang ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 13.



Sumber : Seed and Idriss (1970)

Gambar 13 Variasi modulus geser dengan regangan geser untuk pasir

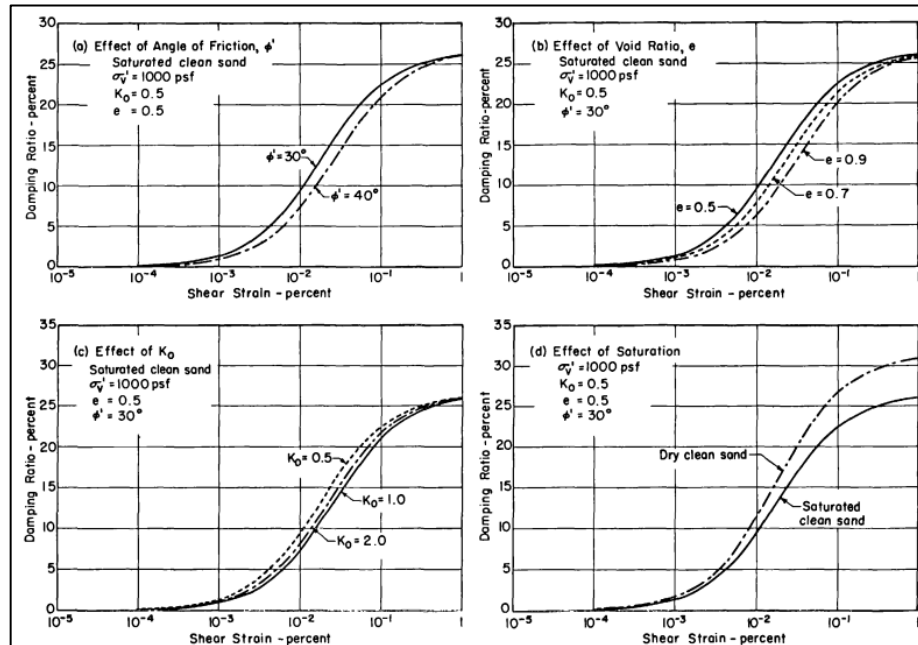
Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Hardin dan Drnevich (1970) tentang faktor-faktor yang memengaruhi rasio redaman pasir, disimpulkan bahwa regangan geser, rata-rata tegangan efektif utama ( $\sigma_v'$  dan  $K_0$ ), *void ratio*, dan jumlah siklus sangat penting, sedangkan tegangan geser oktahedral, sudut gesekan dan tingkat saturasi memiliki efek yang lebih rendah. Seperti halnya pada penentuan modulus, efek variasi karakteristik ukuran butiran dianggap relatif tidak signifikan.

Perhitungan efek dari faktor-faktor di atas pada hubungan antara rasio redaman dan amplitudo regangan geser sebagaimana ditentukan oleh hubungan Hardin-Drnevich ditunjukkan pada Gambar 14. Jelas bahwa pengaruh  $\phi'$ ,  $K_0$ , *void ratio* dan tingkat saturasi relatif kecil, dan dapat dilihat dari persamaan untuk rasio redaman maksimum menurut Hardin and Drnevich (1970) dalam Seed and Idriss (1970) :

$$\lambda_{max} \cong 30 - 1.5 \log_{10} N \quad (14)$$

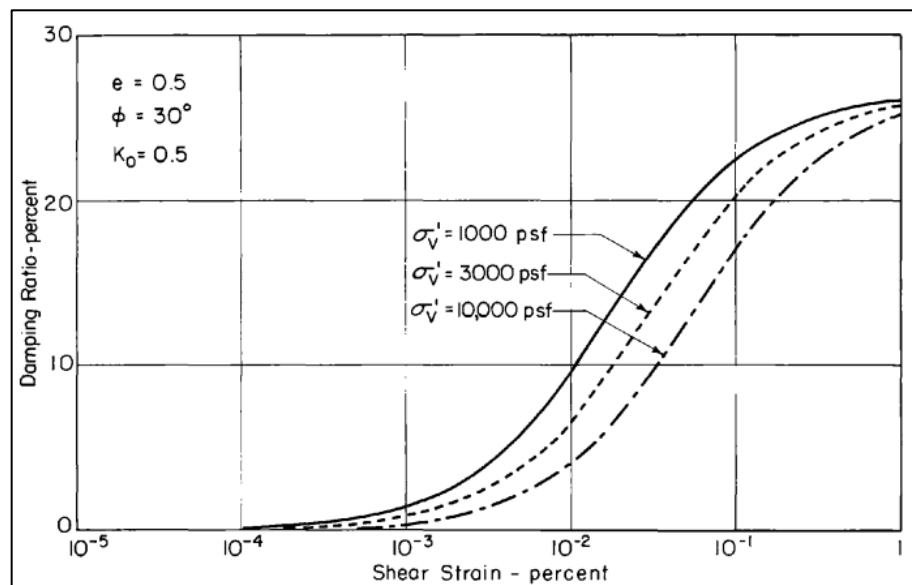
bahwa jika  $\lambda_{max}$  (rasio redaman maksimum) ditentukan untuk sekitar  $N=5$  siklus, nilai untuk jumlah siklus lain 5 hingga 30 tidak akan berbeda secara

signifikan. Dengan demikian faktor utama yang mempengaruhi hubungan antara rasio redaman dan regangan geser adalah tekanan pembatas vertikal ( $\sigma_v'$ ). Pengaruh faktor ini ditunjukkan pada Gambar 15 dan Gambar 16.



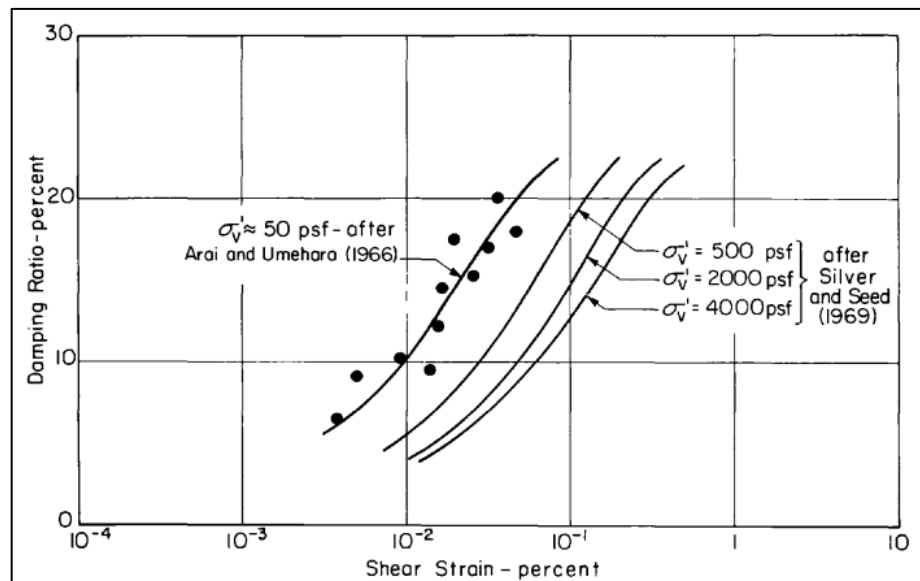
Sumber : Seed and Idriss (1970)

Gambar 14 Pengaruh dari berbagai faktor rasio redaman pasir berdasarkan Hardin dan Drnevich



Sumber : Seed and Idriss (1970)

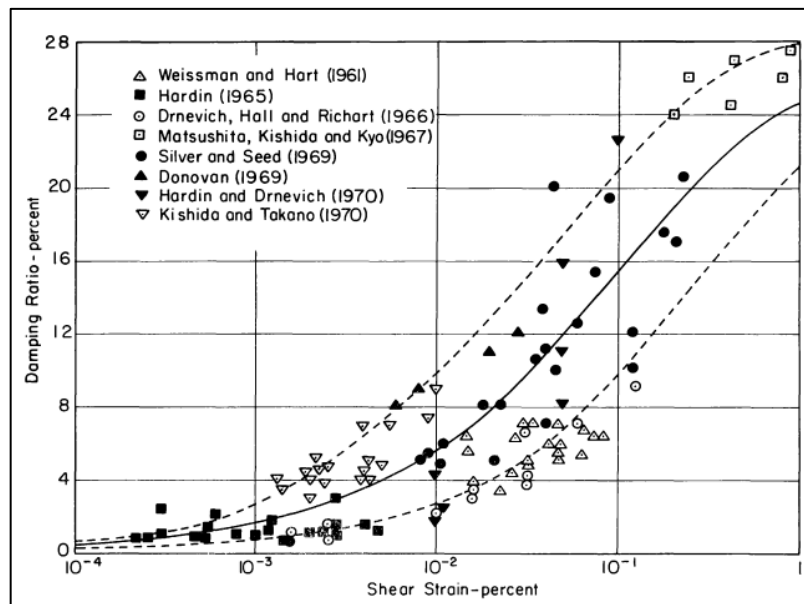
Gambar 15 Pengaruh tekanan pembatas vertikal terhadap rasio redaman pasir jenuh berdasarkan Hardin dan Drnevich



Sumber : Seed and Idriss (1970)

Gambar 16 Pengaruh tekanan pembatas vertikal terhadap rasio damping pasir kering

Dari beberapa penyelidikan sebelumnya mengenai rasio redaman pasir dan hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 17. Perkiraan hubungan batas atas dan bawah ditunjukkan oleh garis putus-putus dan hubungan rata-rata representatif untuk semua data uji ditunjukkan oleh garis padat. Hubungan rata-rata ini cenderung memberikan rasio redaman dengan akurasi yang cukup untuk tujuan praktis. Pada Gambar 17 juga memberikan dasar untuk mengevaluasi hubungan antara rasio redaman dan regangan untuk pasir tertentu yang tersedia dengan data uji terbatas. Jika nilai rasio redaman pada tingkat regangan 0.1 hingga 0.5 % ditentukan, kemungkinan rasio redaman pada regangan lain dapat diperkirakan dengan menarik garis melalui titik data yang diketahui dengan arah yang sejajar dengan kurva.



Sumber : Seed and Idriss (1970)

Gambar 17 Rasio redaman untuk pasir

### 2.5.3.3 Darendeli (2001)

Model yang digunakan untuk mengembangkan kurva empiris yang didasarkan pada model tanah hiperbolik yang awalnya dikembangkan oleh Hardin dan Drnevich. Hubungan hiperbolik dasar antara tegangan dan regangan sedikit dimodifikasi untuk mengakomodasi kesesuaian yang lebih baik dengan kurva modulus reduction yang diukur di laboratorium.

Persamaan kurva redaman material terkait dengan bentuk kurva reduksi modulus dengan asumsi validasi perilaku Masing dikombinasikan dengan dua parameter modifikasi. Untuk memulai, perilaku Masing digunakan untuk menghitung redaman material dengan mengevaluasi *hyteretic loop* yang harus terbentuk untuk kurva reduksi modulus yang diberikan dan *two-way stress reversals*. Kurva redaman material ini kemudian dimodifikasi menggunakan dua parameter agar sesuai dengan data laboratorium.

Prediksi didasarkan pada model yang dikalibrasi menggunakan semua data yang kredibel, efek dari sejumlah parameter mengenai jenis tanah diabaikan dalam model ini. Satu-satunya indikator karakteristik tanah yang digunakan dalam estimasi perilaku nonlinier adalah indeks plastisitas (PI).

Untuk menghitung regangan referensi, koefisien kelengkungan, rasio redaman material regangan kecil, dan koefisien penskalaan dengan mengganti



parameter ( $\phi_i$ ) dengan nilai rata-rata yang diperbaharui berdasarkan Hardin and Drnevich (1972b) dalam Darendeli (2001) sebagai berikut:

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 * PI * OCR^{\phi_3}) * \sigma_0'^{\phi_4} \quad (15)$$

$$a = \phi_5 \quad (16)$$

$$D_{min} = (\phi_6 + \phi_7 * PI * OCR^{\phi_8}) * \sigma_0'^{\phi_9} * [1 + \phi_{10} * \ln(freq)] \quad (17)$$

$$b = \phi_{11} + \phi_{12} * \ln(N) \quad (18)$$

dimana :

$\sigma_0'$  = rata-rata tekanan pembatas efektif (atm)

PI = plastisitas tanah (%)

OCR = *overconsolidation ratio*

freq = frekuensi pemuatan

N = jumlah siklus pemuatan

$\phi_1 = 0.0352$ ,  $\phi_2 = 0.0010$ ,  $\phi_3 = 0.3246$ ,  $\phi_4 = 0.3483$ ,  $\phi_5 = 0.9190$ ,  $\phi_6 = 0.8005$ ,  $\phi_7 = 0.0129$ ,  $\phi_8 = -0.1069$ ,  $\phi_9 = -0.2889$ ,  $\phi_{10} = 0.2919$ ,  $\phi_{11} = 0.6329$ , dan  $\phi_{12} = -0.0057$

Dengan cara ini, hubungan antara empat parameter model (regangan referensi, koefisien kelengkungan, rasio redaman material regangan kecil dan koefisien penskalaan), dan plastisitas tanah serta kondisi pemuatan dapat ditetapkan berdasarkan analisis statistik dari database. Hubungan ini juga disajikan dalam bentuk grafis untuk membantu pembaca dalam memahami karakteristik model dan dalam memanfaatkan model.

Setelah empat parameter model (regangan referensi, koefisien kelengkungan, rasio redaman material regangan kecil, dan koefisien penskalaan) dihitung untuk plastisitas tanah dan kondisi pembebanan, persamaan berikut dapat digunakan untuk memperkirakan pengurangan modulus yang dinormalisasi dan kurva redaman material menurut Hardin and Drnevich (1972b) dalam Darendeli (2001).

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (19)$$

$$D_{Adjusted} = b * \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{0.1} * D_{Masing} + D_{min} \quad (20)$$

dimana :

$\frac{G}{G_{max}}$  = modulus geser yang dinormalisasikan

$\gamma$  = regangan geser (%)

$\gamma_r$  = regangan referensi (%)

$a$  = koefisien kelengkungan

$D_{min}$  = rasio redaman material regangan kecil (%)

$b$  = koefisien penskalaan

$D_{Adjusted}$  = redaman material berskala tertutup (%)

Kurva redaman material berdasarkan Masing (1926) :

$$D_{Masing} = c_1 + D_{Masing,a=1.0}^2 + c_3 D_{Masing,a=1.0}^3 \quad (\%) \quad (21)$$

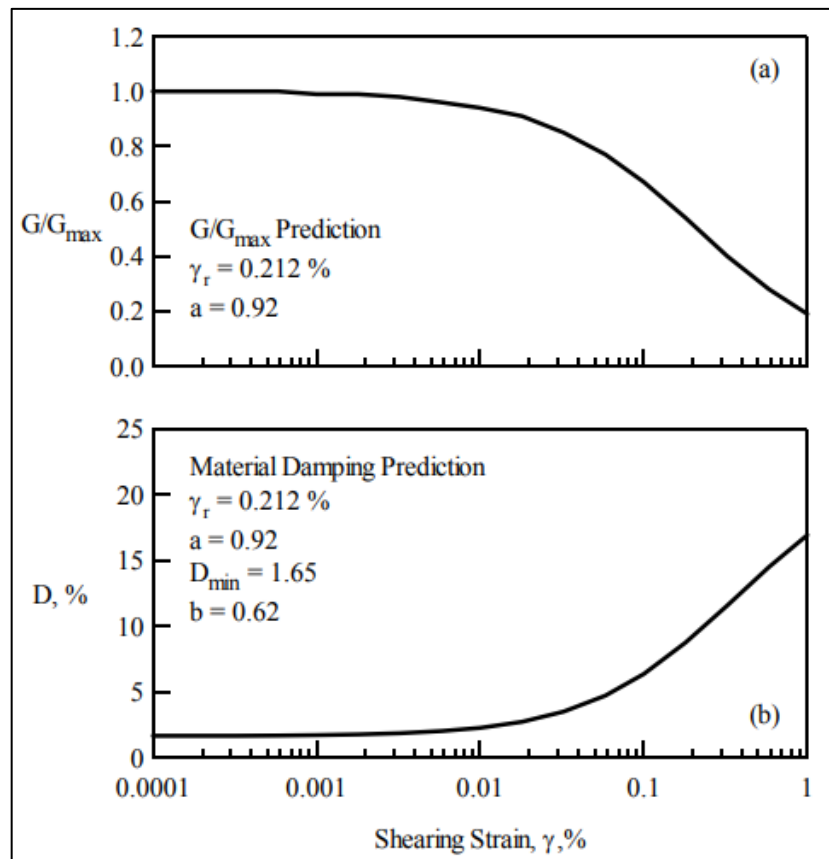
$$D_{Masing,a=1.0} = \frac{100}{\pi} \left[ 4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} - 2 \right] \quad (\%) \quad (22)$$

$$c_1 = -1.1143a^2 + 1.8618a + 0.2523 \quad (23)$$

$$c_2 = 0.0805a^2 - 0.071a - 0.0095 \quad (24)$$

$$c_3 = -0.0005a^2 + 0.0002a + 0.0003 \quad (25)$$

Gambar 18 menunjukkan pengurangan modulus yang dinormalisasi dan kurva redaman material untuk setiap jenis tanah dan kondisi pembebanan untuk tanah liat dengan  $PI = 60\%$  dan overkonsolidasi sedang ( $OCR = 4$ ) yang mengalami tegangan efektif rata-rata in-situ 4 atm dan sepuluh siklus pembebanan pada 10 Hz.



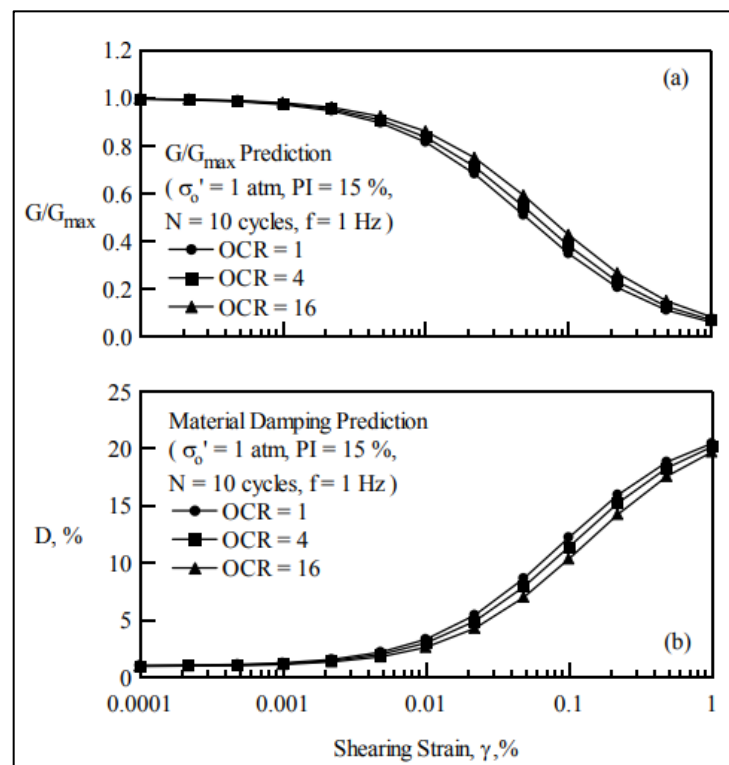
Sumber : Darendeli (2001)

Gambar 18 Estimasi (a) pengurangan modulus yang dinormalisasi dan (b) kurva redaman material untuk jenis tanah dan kondisi pembebanan

Penting untuk diketahui bahwa perilaku nonlinier yang diprediksi oleh model didasarkan pada data yang dikumpulkan melalui amplitudo regangan geser mulai dari  $1 \times 10^{-5}\%$  hingga kurang dari 1%. Akibatnya, ekstrapolasi kurva ke amplitudo regangan yang lebih tinggi tidak dianjurkan. Selain itu rasio redaman material yang diprediksi pada amplitudo regangan lebih dari 10% akan menurun ke nilai yang lebih kecil karena penyesuaian redaman yang memperkenalkan tutup pada redaman material. Akibatnya, model tidak boleh digunakan dalam pemodelan perilaku tanah pada tingkat regangan tinggi seperti itu kecuali hasilnya diverifikasi oleh tes tambahan yang dilakukan pada amplitudo regangan tinggi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efek dari rasio overkonsolidasi, frekuensi pemuatan, dan jumlah siklus pemuatan pada perilaku tanah dinamis tidak dilakukan untuk tanah yang kompeten yang tidak menunjukkan perubahan volume besar ketika dipotong pada regangan kurang dari 1%.

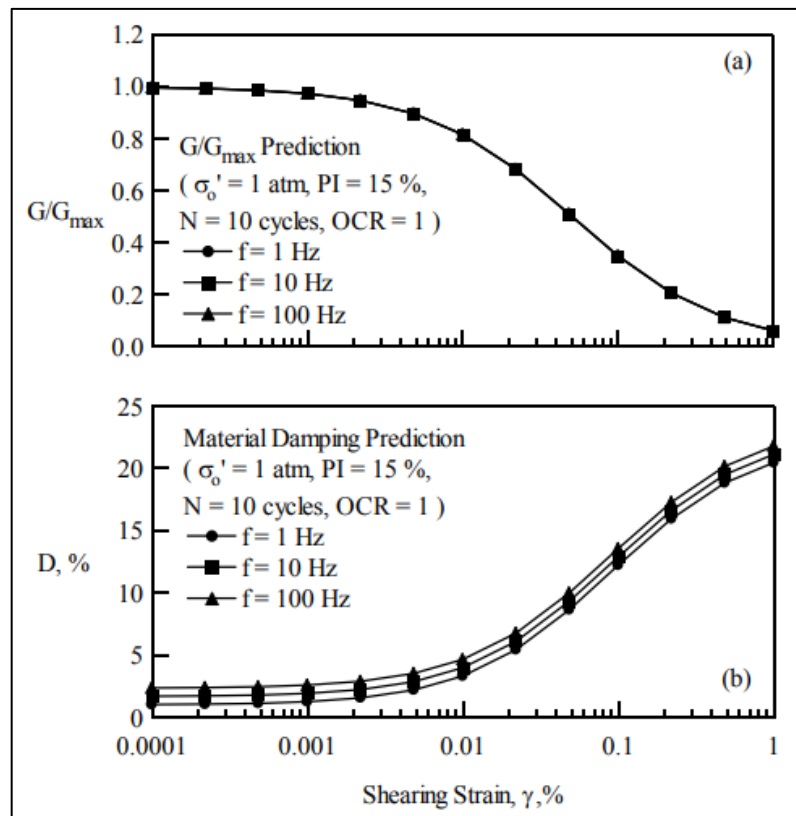
Gambar 19 menyajikan pengaruh rasio overkonsolidasi pada perilaku tanah nonlinier yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi. Peningkatan rasio overkonsolidasi diamati menghasilkan sedikit pergeseran pengurangan modulus yang dinormalisasi dan kurva redaman material ke amplitudo regangan yang lebih tinggi, bersama dengan sedikit penurunan rasio redaman material regangan kecil. Efek ini lebih terasa untuk bahan plastisitas tinggi. Tren ini konsisten dengan yang diusulkan oleh Hardin dan Drnevich (1972) dalam Hashash et al. (2020).



Sumber : Darendeli (2001)

Gambar 19 Pengaruh rasio overkonsolidasi (a) modulus yang dinormalisasi reduksi dan (b) kurva redaman material yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi

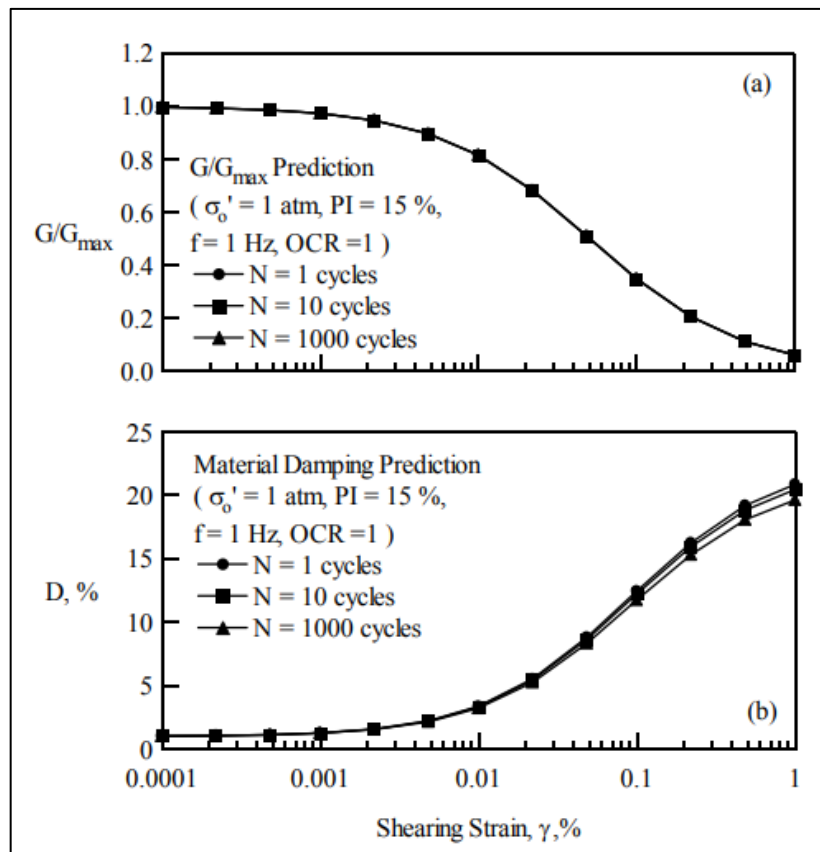
Pada Gambar 20(b) telah disajikan pengaruh frekuensi pemuatan pada kurva redaman material yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi. Peningkatan rasio redaman material regangan kecil dengan meningkatnya frekuensi pemuatan diamati pada gambar ini. Efek ini konsisten dengan tren yang dilaporkan dalam Stoke et al. (1999) dalam Hashash et al. (2020).



Sumber : Darendeli (2001)

Gambar 20 Pengaruh frekuensi pemuatan pada (a) pengurangan modulus yang dinormalisasi dan (b) kurva redaman material yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi

Gambar 21(b) menjadikan pengaruh jumlah siklus pembebanan pada kurva redaman material. Peningkatan jumlah siklus menghasilkan sedikit penurunan dalam koefisien penskalaan yang menyebabkan sedikit penurunan rasio redaman material pada regangan tinggi. Tren umum ini juga konsisten dengan tren yang dilaporkan dalam Hardin dan Drnevich (1972) dan Stoke et al. (1999) dalam Hashash et al. (2020).



Sumber : Darendeli (2001)

Gambar 21 Pengaruh jumlah siklus pemuatan pada (a) modulus yang dinormalisasi reduksi dan (b) kurva redaman material yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi

## 2.5.4 Perilaku Hyteretic (*Unload-Reload*)

### 2.5.4.1 Aturan Masing

Dalam menyesuaikan kurva tanah (menentukan parameter model yang paling cocok dengan kurva yang ditentukan), ada tiga opsi pilihan prosedur yang tersedia pada DEEPSOIL yaitu :

MR : Prosedur untuk menemukan parameter yang paling cocok untuk kurva *modulus reduction*

MRD : Prosedur untuk menemukan parameter yang paling cocok untuk kurva *modulus reduction* dan kurva damping

DC : Prosedur untuk menemukan parameter yang paling cocok untuk kurva damping

### 2.5.4.2 Aturan Non-Masing

Model *Non-Masing Unload-Reload Rules* yang termasuk dalam DEEPSOIL adalah model *Hyperbolic Pressure-Dependent MRDF*. Model ini diimplementasikan sebagai faktor reduksi yang secara efektif mengubah aturan Masing. Dengan memperkenalkan faktor reduksi, modulus reduksi, dan kurva redaman dapat dicocokkan secara bersamaan. Perilaku redaman dimodifikasi oleh Philips and Hashash (2009) dalam Hashash et al. (2020) sebagai :

$$\xi_{MasingHysteretic} = F(\gamma_{max}) \times \xi_{Masing} \quad (26)$$

Dimana  $F(\gamma_m)$  adalah faktor reduksi yang dihitung sebagai fungsi dari  $\gamma_m$ , regangan geser maksimum yang dialami tanah pada waktu tertentu, dan  $\xi_{masing}$  adalah redaman histeretik yang dihitung menggunakan aturan Masing, berdasarkan kurva reduksi modulus.

### 2.5.5 Fitting Procedure

#### 2.5.5.1 MRDF-UIUC

Model MRDF *Pressure-Dependent Hyperbolic* merupakan model yang tersedia di DEEPSOIL yang memungkinkan pengguna untuk memasukkan faktor reduksi ke dalam model hiperbolik. Faktor reduksi berdasarkan Philips and Hashash (2009) dalam Hashash et al. (2020) memiliki bentuk seperti :

$$F(\gamma_m) = P_1 - P_2(1 - G(\gamma_m)/G_0)^{P_3} \quad (27)$$

Dimana :

$\gamma_m$  = regangan geser maksimum pada waktu tertentu

$G(\gamma_m)$  = modulus geser pada  $\gamma_m$

$P_1, P_2,$  dan  $P_3$  = parameter yang pas

Dengan pengaturan  $P_1=1$  dan  $P_2=0$ , faktor reduksi sama dengan 1 (terlepas dari nilai  $P_3$ ) model direduksi menjadi kriteria perpanjangan *Extended Masing*.

#### 2.5.5.2 MRDF-Darendeli

Model MRDF *Pressure-Dependent Hyperbolic* oleh Philips and Hashash (2009) merupakan model dapat digunakan dengan formulasi alternatif untuk faktor reduksi. Salah satu alternatifnya adalah formulasi yang diajukan oleh Darendeli

(2001). Formulasi ini merupakan model hiperbolik yang dimodifikasi secara empiris untuk memprediksi respons dinamis nonlinier dari jenis tanah yang berbeda. Model yang dikembangkan diimplementasikan sebagai faktor reduksi dengan bentuk (Darendeli, 2001) :

$$F(\gamma\gamma_m) = P_1(1 - G(\gamma\gamma_m)/G_0)^{P_2} \quad (28)$$

Dimana :

$\gamma\gamma_m$  = regangan geser maksimum pada waktu tertentu

$G(\gamma\gamma_m)$  = modulus geser pada  $\gamma\gamma_m$

$P_1$  dan  $P_2$  = parameter yang pas dengan pengaturan  $P_1=1$  dan  $P_2=0$ , faktor reduksi sama dengan 1 dan model direduksi menjadi kriteria perpanjangan *Extended Masing*.