

**SKRIPSI**

**STUDI RESPON SPEKTRUM GEMPA PADA KOTA  
MAKASSAR MENGGUNAKAN METODE ELASTIK  
EQUIVALENT LINEAR**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**YURINDA BINTAN PATANDEAN  
D011 19 1045**



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

## LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

### STUDI RESPON SPEKTRUM GEMPA PADA KOTA MAKASSAR MENGGUNAKAN METODE ELASTIK *EQUIVALENT LINEAR*

Disusun dan diajukan oleh

**YURINDA BINTAN PATANDEAN**  
**D011 19 1045**

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. Ir. Abd. Rahman Djamaluddin, MT**

NIP. 195910101987031003

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 : Yurinda Bintang Patandean

NIM : D011191045

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Studi Respon Spektrum Gempa pada Kota Makassar Menggunakan Metode  
Elastik 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.

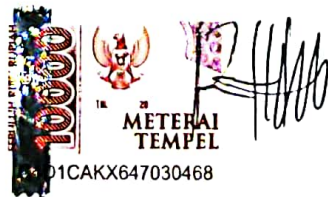
Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul 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, 30 Agustus 2023

Yang Menyatakan



Yurinda Bintang Patandean

## ABSTRAK

**YURINDA BINTAN PATANDEAN.** *Studi Respon Spektrum Gempa pada Kota Makassar Menggunakan Metode Elastik Equivalent Linear* (dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. Abd. Rahman Djamaluddin, MT dan Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST, M.Eng.Sc)

Kota Makassar sebagai ibukota provinsi Sulawesi Selatan terletak relatif jauh dari sumber seismik aktif namun bisa saja mengalami dampak gempa bumi yang dapat menyebabkan kerusakan struktur dan kerugian besar. Endapan permukaan yang lunak di Kota Makassar berpotensi menyebabkan efek pembesaran (amplifikasi) dan penurunan (de-amplifikasi) perambatan gelombang seismik yang merambat dari dasar batuan (*bedrock*) ke permukaan tanah. Oleh karena itu, dilakukan analisis untuk mengetahui pengaruh kondisi tanah terhadap besarnya amplifikasi melalui analisis respon spektrum menggunakan metode elastik ekuivalen linear.

Pada penelitian ini, analisis respon spektrum dilakukan menggunakan *software* DEEPSOIL dengan metode elastik ekuivalen linear. Parameter tanah yang digunakan diperoleh melalui pengumpulan data geoteknik berupa data borelog dan data uji laboratorium. Selain itu, digunakan juga data geofisika berupa data kecepatan gelombang geser yang diperoleh dari hasil pengukuran *Multichannel Analysis Surface Waves* (MASW) serta data gempa hasil rekaman BMKG pada tahun 2015 yang diskalakan menjadi data gempa deterministik dan data gempa periode ulang 200 tahun. Hasil analisis respon spektrum ini kemudian dibandingkan dengan respon spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019.

Dari hasil analisis diperoleh bahwa kondisi tanah Kota Makassar berupa tanah lunak menyebabkan amplifikasi. Faktor amplifikasi untuk gempa deterministik pada periode pendek berkisar antara 2.726 – 4.397 dan pada periode panjang berkisar antara 1.458 – 2.005. Sedangkan faktor amplifikasi untuk gempa periode ulang 200 tahun pada periode pendek berkisar antara 1.715 – 2.428 dan pada periode panjang berkisar antara 1.706 – 2.566. Perbandingan respon spektra yang diperoleh dari penelitian dengan respon spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019 menunjukkan bahwa hasil untuk gempa deterministik pada periode pendek dan periode panjang lebih kecil dari nilai percepatan spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019. Sedangkan hasil untuk gempa periode ulang gempa 200 tahun pada periode pendek lebih besar dan pada periode panjang lebih kecil daripada nilai percepatan spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019.

**Kata Kunci:** gempa bumi, respon spektrum, amplifikasi, percepatan spektra

## ABSTRACT

**YURINDA BINTAN PATANDEAN.** *Study of Seismic Site Response in Makassar City Using Elastic Equivalent Linear Method* (supervised by Prof. Dr. Ir. Abd. Rahman Djamaluddin, MT dan Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST, M.Eng.Sc)

Makassar City as the capital of South Sulawesi province is located relatively far from active seismic sources but may experience the impact of an earthquake which can cause structural damage and large losses. Soft surface deposits in Makassar City have the potential to cause amplification and de-amplification effects on the propagation of seismic waves that propagate from the bedrock to the ground surface. Therefore, an analysis was carried out to determine the effect of soil conditions on the amount of amplification through spectrum response analysis using the elastic equivalent linear method.

In this study, spectrum response analysis was performed using DEEPSOIL software with the elastic equivalent linear method. The soil parameters used were obtained through collecting geotechnical data in the form of borelog data and laboratory test data. In addition, geophysical data is also used in the form of shear wave velocity data obtained from the results of Multichannel Analysis Surface Waves (MASW) measurements as well as earthquake data recorded by BMKG in 2015 which was scaled to deterministic earthquake data and 200 year return period earthquake data. The results of this spectrum response analysis are then compared with the design spectral response based on SNI 1726:2019.

From the results of the analysis it was found that the soil conditions in Makassar City are soft soil causing amplification. The amplification factor for deterministic earthquakes in short periods ranges from 2.726 – 4.397 and in long periods ranges from 1.458 – 2.005. While the amplification factor for earthquakes with a return period of 200 years in the short period ranges from 1,715 – 2,428 and in the long period ranges from 1,706 – 2,566. Comparison of the response spectra obtained from the study with the design spectral response based on SNI 1726:2019 shows that the results for deterministic earthquakes in the short period and 1 second period are smaller than the design spectral acceleration values based on SNI 1726:2019. Meanwhile the results for the 200 year earthquake return period in the short period it is greater and in the 1 second period it is smaller than the design spectral acceleration value based on SNI 1726:2019.

Keywords: earthquake, response spectrum, amplification, acceleration spectra

## 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.....	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Defenisi Gempa Bumi.....	4
2.2. Sejarah Kegempaan Di indonesia.....	5
2.3. Analisis Respon Situs Terhadap Gempa .....	9
2.4. DEEPSOIL .....	18
BAB III METODE PENELITIAN.....	40
3.1 Lokasi Penelitian .....	40
3.2 Pengumpulan Data.....	40
3.3 Peralatan yang Digunakan .....	45
3.4 Penentuan Parameter Spektral Desain berdasarkan SNI 1726:2019 .....	45
3.5 Flowchart Penelitian .....	49
3.6 Prosedur Penggunaan Software DEEPSOIL .....	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	62
4.1. Analisis Respon Spektrum .....	62
4.2. Perbandingan Hasil Penelitian dengan SNI 1726:2019 .....	108
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	119
5.1 Kesimpulan.....	119
5.2 Saran .....	120
DAFTAR PUSTAKA .....	121

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Peta Tektonik Wilayah Indonesia dari Data Geodetic Hingga Tahun 2016.....	5
Gambar 2 Gempa di Indonesia Hasil Relokasi Hingga 2016 .....	6
Gambar 3 Struktur Geologi Regional di Pulau Sulawesi.....	7
Gambar 4 Peta Sesar Aktif di Sulawesi Beserta Nilai Sliprate-nya.....	8
Gambar 5 Proses Pembiasan yang Menghasilkan Perambatan Gelombang Hampir Vertikal di Dekat Permukaan Tanah.....	10
Gambar 6 Representasi Skema Pemodelan Ekuivalen-Linear dari Perilaku Stres-Regangan Tanah : (a) Histeresis geser-tegangan-ketegangan loop (b) Plot Kurva dan Rasio Redaman (DR) yang Dinormalisasi (G/Gmak) atau Modulus Reduction (MR) .....	13
Gambar 7 Iterasi Menuju Modulus Geser yang Kompatibel dengan Regangan dan Rasio Redaman dalam Analisis Linier Ekuivalen .....	14
Gambar 8 Kurva Reduksi Modulus Geser Normalisasi.....	26
Gambar 9 Kurva Rasio Redaman Material .....	27
Gambar 10 Variasi Kurva Reduksi Modulus Geser dengan Nilai Berbeda dari Modulus Geser Regangan Kecil yang Jelas .....	28
Gambar 11 Pengaruh Berbagai Faktor Terhadap Modulus Geser Pasir Berdasarkan Hardin Dan Drnevich .....	31
Gambar 12 Variasi Modulus Geser Dengan Regangan Geser Untuk Pasir.....	31
Gambar 13 Pengaruh Dari Berbagai Faktor Terhadap Rasio Redaman Pasir Berdasarkan Hardin Dan Drnevich .....	32
Gambar 14 Pengaruh Confining Pressure Terhadap Rasio Damping Pasir Jenuh Berdasarkan Hardin Dan Drnevich .....	33
Gambar 15 Pengaruh Confining Pressure Terhadap Rasio Damping Pasir Kering.....	33
Gambar 16 Rasio Redaman untuk Pasir.....	34
Gambar 17 Estimasi (a) Pengurangan Modulus yang Dinormalisasi dan (b) Kurva Redaman Material .....	36
Gambar 18 Pengaruh Rasio Overkonsolidasi pada (a) Modulus yang Dinormalisasi Reduksi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi .....	37
Gambar 19 Pengaruh Frekuensi Pemuatan pada (a) Pengurangan Modulus yang Dinormalisasi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi .....	38
Gambar 20 Pengaruh Jumlah Siklus Pemuatan pada (a) Modulus yang Dinormalisasi Reduksi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi .....	38
Gambar 21 Lokasi Penelitian .....	40
Gambar 22 Data Borelog .....	41
Gambar 23 <i>Time History</i> Gempa Deterministik .....	43
Gambar 24 <i>Time History</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun .....	43
Gambar 25 Data MASW.....	44
Gambar 26 Spektrum Respons Desain.....	47

Gambar 27 Spektrum Respon Desain Kota Makassar untuk Kelas SE-Tanah Lunak berdasarkan PUSKIM .....	48
Gambar 28 Spektrum Respon Desain Kota Makassar untuk Kelas SE-Tanah Lunak.....	48
Gambar 29 Bagan Alir (Flowchart) Penelitian .....	49
Gambar 30 Aplikasi DEEPSOIL .....	50
Gambar 31 Pemilihan Tipe Analisis .....	51
Gambar 32 Profil Tanah.....	51
Gambar 33 Layer Properties pada Lapisan Pertama dengan Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Lower Limit) .....	53
Gambar 34 Kurva G/Gmax pada Lapisan Pertama dengan Referensi Kurva Seed and Idriss 1970 (Lower Limit) .....	53
Gambar 35 Kurva Damping Ratio pada lapisan pert Lapisan Pertama dengan Referensi Kurva Seed and Idriss 1970 (Lower Limit) .....	53
Gambar 36 Layer Properties pada Lapisan Pertama dengan Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Mean).....	54
Gambar 37 Kurva G/Gmax pada Lapisan Pertama dengan Referensi Kurva Seed and Idriss 1970 (Mean).....	54
Gambar 38 Kurva Damping Ratio pada Lapisan Pertama dengan Referensi Kurva Seed and Idriss 1970 (Mean).....	54
Gambar 39 Layer Properties pada Lapisan Pertama dengan Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Upper Limit).....	55
Gambar 40 Kurva G/Gmax pada Lapisan Pertama dengan Referensi Kurva Seed and Idriss 1970 (Upper Limit).....	55
Gambar 41 Kurva Damping Ratio pada Lapisan Pertama dengan Referensi Kurva Seed and Idriss 1970 (Upper Limit).....	55
Gambar 42 Layer Properties pada Lapisan Kedua.....	56
Gambar 43 Kurva G/Gmax pada Lapisan Kedua .....	56
Gambar 44 Kurva Damping Ratio pada Lapisan Kedua.....	56
Gambar 45 Layer Properties pada Lapisan Ketiga .....	57
Gambar 46 Kurva G/Gmax pada Lapisan Ketiga .....	57
Gambar 47 Kurva Damping Ratio pada Lapisan Ketiga .....	57
Gambar 48 Layer Properties pada Lapisan Bedrock.....	58
Gambar 49 Plot Profil Tanah .....	58
Gambar 50 Pemilihan <i>Input Motion</i> .....	59
Gambar 51 Defenisi Kontrol Analisis.....	59
Gambar 52 Analysis Running .....	60
Gambar 53 Jendela Hasil Analisis .....	61
Gambar 54 <i>Time History</i> Gempa Deterministik dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 440 m/s pada Arah (a) Horizontal Timur - Barat (b) Horizontal Utara - Selatan (c) Vertikal Atas - Bawah.....	63
Gambar 55 <i>Time History</i> Gempa Deterministik dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 700 m/s pada Arah (a) Horizontal Timur - Barat (b) Horizontal Utara - Selatan (c) Vertikal Atas - Bawah.....	65
Gambar 56 <i>Time History</i> Gempa Deterministik dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 2500 m/s pada Arah (a) Horizontal Timur - Barat (b) Horizontal Utara - Selatan (c) Vertikal Atas - Bawah.....	67



Gambar 57 <i>Time History</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 440 m/s pada Arah (a) Horizontal Timur - Barat (b) Horizontal Utara- Selatan (c) Vertikal Atas - Bawah.....	70
Gambar 58 <i>Time History</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 700 m/s pada Arah (a) Horizontal Timur - Barat (b) Horizontal Utara - Selatan (c) Vertikal Atas - Bawah.....	72
Gambar 59 <i>Time History</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 2500 m/s pada Arah (a) Horizontal Timur - Barat (b) Horizontal Utara- Selatan (c) Vertikal .....	74
Gambar 60 <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 440 m/s.....	77
Gambar 61 <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Utara - Selatan dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 440 m/s.....	78
Gambar 62 <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Vertikal Atas – Bawah dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 440 m/s .....	78
Gambar 63 <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 700 m/s.....	80
Gambar 64 <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Utara- Selatan dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 700 m/s.....	81
Gambar 65 <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Vertikal Atas - Bawah dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 700 m/s.....	81
Gambar 66 <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 2500 m/s.....	83
Gambar 67 <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Utara - Selatan dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 2500 m/s.....	84
Gambar 68 <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Vertikal Atas – Bawah dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 2500 m/s.....	84
Gambar 69 <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 440 m/s .....	87
Gambar 70 <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Utara- Selatan dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 440 m/s.....	88
Gambar 71 <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Vertikal dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 440 m/s .....	88
Gambar 72 <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 700 m/s.....	90
Gambar 73 <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Utara- Selatan dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 700 m/s.....	91
Gambar 74 <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Vertikal Atas - Bawah dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 700 m/s.....	91
Gambar 75 <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 2500 m/s.....	93
Gambar 76 <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Utara- Selatan dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 2500 m/s.....	94
Gambar 77 <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Vertikal Atas – Bawah dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 2500 m/s .....	94
Gambar 78 <i>Profil Plot</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_{s\text{Bedrock}}$ 440 m/s .....	98

Gambar 79	<i>Profil Plot</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Utara-Selatan dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s .....	98
Gambar 80	<i>Profil Plot</i> Gempa Deterministik pada Arah Vertikal Atas - Bawah dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s .....	99
Gambar 81	<i>Profil Plot</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s .....	99
Gambar 82	<i>Profil Plot</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Utara-Selatan dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s .....	100
Gambar 83	<i>Profil Plot</i> Gempa Deterministik pada Arah Vertikal Atas – Bawah dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s .....	100
Gambar 84	<i>Profil Plot</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s .....	101
Gambar 85	<i>Profil Plot</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Utara-Selatan dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s .....	101
Gambar 86	<i>Profil Plot</i> Gempa Deterministik pada Arah Vertikal Atas - Bawah dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s .....	102
Gambar 87	<i>Profil Plot</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s .....	103
Gambar 88	<i>Profil Plot</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Utara- Selatan dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s .....	103
Gambar 89	<i>Profil Plot</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Vertikal Atas – Bawah dengan $V_s$ Bedrock 440 m/s .....	104
Gambar 90	<i>Profil Plot</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s .....	104
Gambar 91	<i>Profil Plot</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Utara- Selatan dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s .....	105
Gambar 92	<i>Profil Plot</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Vertikal Atas – Bawah dengan $V_s$ Bedrock 700 m/s .....	105
Gambar 93	<i>Profil Plot</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Timur - Barat dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s .....	106
Gambar 94	<i>Profil Plot</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Horizontal Utara - Selatan dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s .....	106
Gambar 95	<i>Profil Plot</i> Gempa Periode Ulang 200 Tahun pada Arah Vertikal Atas – Bawah dengan $V_s$ Bedrock 2500 m/s .....	107
Gambar 96	Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Secara Deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Lower Limit) dan $V_s$ Bedrock 440 m/s .....	108
Gambar 97	Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Secara Deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Lower Limit) dan $V_s$ Bedrock 700 m/s .....	109
Gambar 98	Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Secara Deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Lower Limit) dan $V_s$ Bedrock 2500 m/s .....	109
Gambar 99	Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Secara Deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Mean) dan $V_s$ Bedrock 440 m/s .....	110

Gambar 100 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Secara Deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Mean) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 700 m/s .....	110
Gambar 101 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Secara Deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Mean) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 2500 m/s .....	111
Gambar 102 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Secara Deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Upper Limit) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 440 m/s .....	111
Gambar 103 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Secara Deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Upper Limit) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 700 m/s .....	112
Gambar 104 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Secara Deterministik dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Upper Limit) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 2500 m/s .....	112
Gambar 105 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Lower Limit) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 440 m/s.....	113
Gambar 106 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Lower Limit) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 700 m/s.....	114
Gambar 107 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Lower Limit) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 2500 m/s .....	114
Gambar 108 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Mean) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 440 m/s.....	115
Gambar 109 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Mean) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 700 m/s.....	115
Gambar 110 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Mean) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 2500 m/s.....	116
Gambar 111 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Upper Limit) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 440 m/s.....	116
Gambar 112 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Upper Limit) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 700 m/s.....	117
Gambar 113 Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan SNI 1726:2019 untuk Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Upper Limit) dan $V_{s \text{ Bedrock}}$ 2500 m/s.....	117

## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Data Uji Laboratorium .....	42
Tabel 2 Site Klasifikasi Berdasarkan SNI 1726:2019 .....	44
Tabel 3 Table Koefisien situs $F_a$ .....	45
Tabel 4 Tabel Koefisien situs $F_v$ .....	46
Tabel 5 Parameter Spektral Desain berdasarkan SNI 1726:2019 .....	47
Tabel 6 Properti Tanah Tiap Lapisan .....	52
Tabel 7 PGA dan Faktor Amplifikasi Gempa Deterministik dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 440 m/s .....	64
Tabel 8 PGA dan Faktor Amplifikasi Gempa Deterministik dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 700 m/s .....	66
Tabel 9 PGA dan Faktor Amplifikasi Gempa Deterministik dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 2500 m/s .....	68
Tabel 10 Rekapitulasi Faktor Amplifikasi Gempa Deterministik .....	69
Tabel 11 PGA dan Faktor Amplifikasi Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 440 m/s .....	71
Tabel 12 PGA dan Faktor Amplifikasi Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 700 m/s .....	73
Tabel 13 PGA dan Faktor Amplifikasi Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 2500 m/s .....	75
Tabel 14 Rekapitulasi Faktor Amplifikasi Gempa Periode Ulang 200 Tahun .....	76
Tabel 15 Faktor Amplifikasi Gempa Deterministik dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 440 m/s .....	79
Tabel 16 Faktor Amplifikasi Gempa Deterministik dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 700 m/s .....	82
Tabel 17 Faktor Amplifikasi Gempa Deterministik dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 2500 m/s .....	85
Tabel 18 Rekapitulasi Faktor Amplifikasi Gempa Deterministik .....	86
Tabel 19 Faktor Amplifikasi Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 440 m/s .....	89
Tabel 20 Faktor Amplifikasi Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 700 m/s .....	92
Tabel 21 Faktor Amplifikasi Gempa Periode Ulang 200 Tahun dengan $V_{S_{\text{Bedrock}}}$ 2500 m/s .....	95
Tabel 22 Rekapitulasi Faktor Amplifikasi Gempa Periode Ulang 200 Tahun .....	96

## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
SR	Skala Richter
EL	Ekuivalen Linear
$V_s$	Kecepatan gelombang geser (m/s)
MASW	<i>Multichannel Analysis Surface Waves</i>
SDOF	<i>Single Degree of Freedom</i>
DGRA	<i>Dynamic Ground Response Analysis</i>
G	Modulus geser
D	Rasio redaman
$G_{max}$	Modulus geser maksimum
$\xi$	Rasio redaman
FAS	<i>Fourier Amplitude Spectra</i>
$H(f)$	Fungsi gerakan input yang dimodifikasi oleh fungsi transfer
$f_n$	Frekuensi alami isolator
k	Kekakuan sistem
m	Massa
c	Redaman kental
FFTs	<i>Fast Fourier Transforms</i>
$\tau$	Tegangan geser
$G_0$	Modulus geser awal
$\gamma$	Regangan geser
$\beta$	Parameter kurva tegangan-regangan
s	Parameter kurva tegangan-regangan
$\gamma_r$	Regangan referensi (%)
$\sigma'_v$	Tegangan vertikal efektif
b	Parameter tergantung tekanan/regangan referensi
d	Parameter tergantung tekanan/kurva redaman
$\tau_{max}$	Tegangan geser maksimum

$\theta_\tau$	Fungsi kurva fitting dari model GQ/H yang dinormalisasi
$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$	Parameter kurva fitting dari fungsi $\theta_\tau$ untuk model GQ/H yang dinormalisasi
$F(\gamma_m)$	Faktor reduksi yang dihitung sebagai fungsi dari $\gamma_m$
$\xi_{Masing}$	Redaman histeretik yang dihitung menggunakan aturan Masing berdasarkan kurva reduksi modulus
$\gamma_m$	Regangan geser maksimum yang dialami pada waktu tertentu
$G(\gamma_m)$	Modulus geser saat $\gamma_m$
$P_1, P_2, P_3$	Parameter <i>fitting</i>
$\gamma_{rev}$	Regangan geser balik
$\tau_{rev}$	Tegangan geser balik
E	Modulus Young
M	Modulus terbatas
Vc	Gelombang kompresi tidak dibatasi
Vp	Gelombang kompresi terbatas
Ds	Rasio redaman dalam geser
Dc	Rasio redaman dalam kompresi tidak dibatasi
Dp	Rasio redaman dalam kompresi terbatas
$\gamma_t^e$	Regangan ambang elastis
$G - \log \gamma$	Kurva reduksi modulus geser
$G_{field}$	Modulus geser nonlinear yang digunakan untuk analisis di lapangan
$G_{lab}$	Modulus geser nonlinear yang diukur di laboratorium
$G_{maxlab}$	Modulus regangan kecil yang diukur di laboratorium
$G_{maxfield}$	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)
$K_2$	Parameter yang dipengaruhi oleh regangan
$\lambda_{max}$	Rasio redaman maksimum
N	Jumlah siklus pemuatan
$\sigma'_0$	Rata-rata tekanan pembatas efektif (atm)
PI	Indeks plastisitas (%)
$frg$	Frekuensi pemuatan
$\frac{G}{G_{max}}$	Modulus geser yang dinormalisasi
a	Koefisien kelengkungan
$D_{Adjusted}$	Redaman material berskala dan tertutup (%)
$D_{min}$	Rasio redaman material regangan kecil (%)
$\gamma_d$	<i>Dry density</i> (gr/cm <sup>3</sup> )
Cu	<i>Shear Strength</i>
$\varphi'$	<i>Angle of friction</i>
UDS	<i>Undisturbed</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 respon spesifik situs
$F_a$	Koefisien faktor amplifikasi getaran pada periode pendek
$F_v$	Koefisien faktor amplifikasi getaran pada periode 1 detik
$S_{MS}$	Parameter respon spektral pada periode pendek
$S_{M1}$	Parameter respon spektral pada periode pendek

$S_s$	Parameter respons spektral percepatan gempa MCE <sub>R</sub> terpetakan untuk periode pendek
$S_1$	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>
$S_{DS}$	Parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek
$S_{D1}$	Parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik
$S_a$	Respon spectral percepatan desain
T	Periode getar fundamental struktur
$T_L$	Peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada peta transisi periode panjang wilayah Indonesia (SNI 1726 : 2019)
PGA	<i>Peak Ground Acceleration</i>
PSA	<i>Peak Surface Acceleration</i>
N-SPT	Nilai <i>Standard Penetration Test</i>



**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1 Data Borelog.....	123
Lampiran 2 Data Hasil Pengujian <i>Unit Weight</i> .....	124
Lampiran 3 Data Hasil Pengujian <i>Atterberg Limits</i> .....	126
Lampiran 4 Data Hasil Pengujian <i>Triaxial (CU)</i> .....	127
Lampiran 5 <i>Summary</i> Data Hasil Uji Laboratorium.....	129

## KATA PENGANTAR

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

Penulis menyadari dalam penyusunan tugas akhir ini banyak bantuan yang diterima dari berbagai pihak, baik itu berupa materi, pemikiran, moril, maupun dukungan lainnya. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian tugas akhir ini, yaitu kepada :

1. Tuhan Yesus atas segala berkat dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat dimampukan untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Keluarga tercinta, Papa Yohanis Peri Patana, Mama Asni Mangguali, Kakak Rinaldy Mangguali, serta Adik Mardian Patandean dan Dedy Arjuna yang senantiasa mendoakan, mendukung, dan membantu penulis dalam berbagai hal serta selalu menjadi penyemangat bagi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Prof. Dr. H. Muh. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng selaku Ketua dan Bapak Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T., M.T. selaku Sekretaris Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Abd. Rahman Djamaluddin, M.T. selaku dosen pembimbing I, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan arahan, bimbingan, serta wawasan kepada penulis hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
6. Bapak Dr. Eng. Ardy Arsyad, S.T., M.Eng.Sc selaku dosen pembimbing II, yang telah memberikan arahan, bimbingan, waktu, dan wawasan tambahan selama penelitian ini berlangsung hingga dapat terselesaikan.
7. Seluruh dosen, staf, dan karyawan Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.
8. Juan Kevin Arvito Aring yang senantiasa membantu, mendampingi, serta memberi dukungan dan semangat kepada penulis dalam berbagai hal dan kondisi hingga akhirnya tugas akhir ini dapat terselesaikan.
9. Milo, Onye, Goory, dan Dogy yang senantiasa menemani dalam berbagai kondisi dan menjadi teman yang baik bagi penulis dalam berbagai hal.
10. Teman-teman tim penelitian tugas akhir, Ariyanti Herlota, Mufidatul Azmi Kaharuddin, dan Rizdhie Wiryadiputra Suryadi yang telah telah berjuang bersama dan senantiasa memberikan bantuan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

11. Keluarga KMKO Sipil yang senantiasa memberikan dukungan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
12. Seluruh teman-teman Teknik Sipil Angkatan 2019 yang senantiasa memberikan bantuan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
13. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu dengan semua bantuan dan dukungan yang diberikan hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna, oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari pembaca untuk perbaikan ke depannya. Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan para pembaca.

Gowa, 30 Agustus 2023

Penulis

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Secara geografis, Kota Makassar terletak relatif jauh dari sumber seismik aktif namun dikelilingi oleh patahan-patahan yang sering menimbulkan gempa secara tiba-tiba. Patahan-patahan tersebut antara lain Patahan Walanae di Teluk Bone, Patahan Matano di Danau Matano, dan Patahan Soroako di Luwu Timur. Meskipun terletak relatif jauh dari sumber gempa tektonik utama Sulawesi seperti sesar Palu-Koro di Sulawesi bagian tengah dan zona subduksi di utara Sulawesi, Kota Makassar bukan berarti bebas dari potensi gempa merusak.

Kota Makassar bisa saja mengalami dampak gempa akibat gempa yang terjadi di sekitar lajur sesar Walanae seperti gempa-gempa yang pernah terjadi yaitu gempa Bulukumba (1828), gempa Tinambung (1967) dengan kekuatan 5,3 SR, gempa Majene (1969) dengan kekuatan 6,9 SR, serta gempa Mamuju (1972) dengan kekuatan 5,8 SR. Selain itu, gempa juga bisa terjadi di Selat Makassar seperti yang pernah terjadi pada 12 Desember 2010 dengan magnitudo 5,9 SR pada kedalaman 19 km dari permukaan laut yang berada sekitar 232 km barat daya Makassar dan 265 km timur laut Sumbawa Besar Nusa Tenggara Barat. Gempa yang terjadi pada lajur-lajur tersebut dapat memberikan dampak merusak pada wilayah Makassar.

Menurut Soehaimi (2009), batuan dasar penyusun daerah Makassar dan sekitarnya terdiri atas perselingan endapan hasil gunung api dan sedimen laut (Formasi Camba), lava, breksi, tufa, dan konglomerat hasil erupsi gunung api Baturape-Cindako. Berdasarkan ciri jenis batuanya, secara umum kedua macam batuan tersebut mempunyai sifat fisik keras dan padu. Di atas kedua macam batuan tersebut dijumpai batuan endapan yang berumur lebih muda, yakni endapan pasir pantai, endapan rawa, endapan delta, endapan limbah banjir, dan endapan alur sungai. Selain itu, dijumpai talus sebagai material sisa erosi permukaan. Endapan permukaan yang lunak di Kota Makassar ini cenderung memiliki efek pembesaran (amplifikasi) dan penurunan (de-amplifikasi) perambatan gelombang seismik yang merambat dari dasar batuan (*bedrock*) ke permukaan tanah. Karena efek

pembesaran ini dapat menyebabkan kerusakan yang serius maka perkiraan pergerakan tanah sangat penting untuk dilakukan.

Untuk mengurangi resiko bahaya gempa bumi di Kota Makassar, maka perlu dilakukan studi kegempaan, salah satunya yaitu Studi Respon Spektrum menggunakan *software* DEEPSOIL dengan metode Elastik Ekuivalen Linear (EL). Studi respon spektrum ini diperlukan untuk menunjukkan respon endapan tanah terhadap gempa bumi yang terjadi. Dengan metode elastik ekuivalen linear, parameter dinamis tanah yaitu modulus geser dan redaman diasumsikan konstan atau tidak berubah saat guncangan tanah berlangsung. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan informasi mengenai respon spektrum Kota Makassar untuk perencanaan bangunan tahan gempa agar dapat mengurangi resiko bahaya gempa di Kota Makassar.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Dari Latar belakang masalah di atas, maka dibuat rumusan masalah :

1. Bagaimana profil endapan tanah pada Kota Makassar berdasarkan data geoteknik dan geofisika ?
2. Bagaimana pengaruh kondisi tanah terhadap respon gempa pada Kota Makassar dengan menggunakan metode Analisis Respon Elastik Ekuivalen Linear ?
3. Bagaimana perbandingan antara respon spektra permukaan Kota Makassar berdasarkan Analisis Respon Elastik Ekuivalen Linear dengan respon spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019 ?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui profil endapan tanah pada Kota Makassar berdasarkan data geoteknik dan geofisika.
2. Mengetahui pengaruh kondisi tanah terhadap respon gempa pada Kota Makassar dengan menggunakan metode Analisis Respon Elastik Ekuivalen Linear.

3. Mengetahui perbandingan antara respon spektra permukaan Kota Makassar berdasarkan Analisis Respon Elastik Ekuivalen Linear dengan respon 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 acuan dalam aturan tata ruang dan perencanaan bangunan tinggi yang aman terhadap getaran gempa di Kota Makassar.
2. Sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya terkait dengan analisis respon situs terhadap gempa.

#### 1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pembahasan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Data tanah berupa data *borelog* dan data laboratorium merupakan data penyelidikan tanah yang dilakukan di Jl. Masjid Raya Makassar tahun 2021.
2. Data gempa berupa *time history* gempa pada Kota Makassar yang diperoleh dari BMKG Wilayah IV Makassar.
3. Data kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) diperoleh dari data hasil pengukuran *Multichannel Analysis Surface Wave* (MASW) yang dilakukan oleh Geofisika UNHAS.
4. Analisis respon spektrum dilakukan dengan metode elastik ekuivalen linear menggunakan *software* DEEPSOIL (University of Illinois at Urbana-Champaign)

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Defenisi Gempa Bumi**

Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Pergerakan lempeng-lempeng tektonik tersebut kemudian menghasilkan akumulasi energi yang dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempa sehingga efeknya sangat dirasakan hingga ke permukaan bumi. Penyebab gempa bumi dapat berupa dinamika bumi (tektonik), aktivitas gunung api, akibat meteor jatuh, longsor (di bawah muka air laut), dan ledakan bom nuklir di bawah permukaan. Gempa bumi tektonik merupakan gempa bumi yang paling umum terjadi dan merupakan getaran yang dihasilkan dari peristiwa pematahan batuan akibat benturan dua lempeng (Mustofa Nur, 2010).

Gempa bumi terjadi pada retakan dalam kerak bumi yang disebut patahan. Patahan terbentuk karena batuan rapuh dan pecah yang disebabkan oleh tekanan besar (meregang, menekan, atau memilin) yang mendesaknya. Tekanan yang timbul di daerah kerak ini disebabkan oleh pergerakan perlahan-lahan lempeng bumi. Gempa bumi terjadi ketika tekanan semakin meningkat di daerah batuan sampai pada tingkat tertentu sehingga terjadi pergerakan mendadak. Pergerakan mendadak ini dapat menciptakan patahan baru ketika batuan pecah pada titik terlemah, atau pergerakan menyebabkan batuan tergelincir di sepanjang patahan yang ada. Ketika ini terjadi, pelepasan energi yang dihasilkan oleh tekanan dilakukan oleh lempengan yang bergerak. Semakin lama tekanan itu membesar dan akhirnya mencapai keadaan dimana tekanan tersebut tidak dapat ditahan lagi oleh pinggiran lempengan (Husyain, 2017)

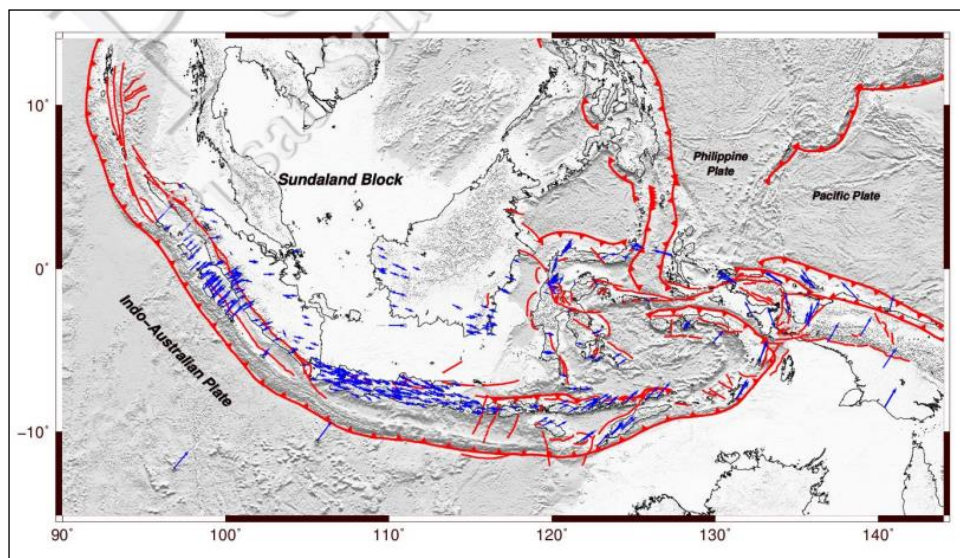
Menurut Ginanjar (2008), gempa berdasarkan waktu terjadinya dapat diklasifikasikan menjadi :

1. Gempa Utama (*mainshock*) yaitu gempa yang terjadi pada guncangan awal akibat deformasi karena adanya interaksi antar lempeng.

2. Gempa Susulan (*aftershock*) merupakan gempa yang terjadi setelah datangnya gempa utama. Gempa susulan dapat terjadi lebih dari satu kali pada wilayah yang sama dengan gempa utama.
3. Gempa Pendahuluan (*foreshock*) merupakan gempa yang mendahului gempa utama dengan magnitudo yang lebih kecil dan terjadi pada wilayah yang sama dengan gempa utama.

## 2.2. Sejarah Kegempaan Di Indonesia

Kepulauan Indonesia merupakan salah satu kawasan unik di dunia ini karena tempat bertemunya empat lempeng dunia, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, Lempeng Laut Philipina dan Lempeng Pasifik, sehingga menghasilkan pola dan tataan geologi yang rumit, terutama di kawasan Indonesia bagian timur. Berdasarkan pengaruh interaksi antara empat lempeng tersebut, secara umum wilayah Kepulauan Indonesia dapat dibagi menjadi dua, yaitu kawasan Indonesia barat dan kawasan Indonesia timur. Tektonik Indonesia bagian barat sangat dipengaruhi oleh interaksi antara Lempeng Indo-Australia dan daratan Sunda (Sunda land). Sedangkan tektonik di wilayah Indonesia bagian timur sangat dipengaruhi oleh interaksi Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik dan Lempeng Philipina yang menghasilkan tataan struktur geologi yang sangat kompleks. (Supartoyo,dkk., 2014).



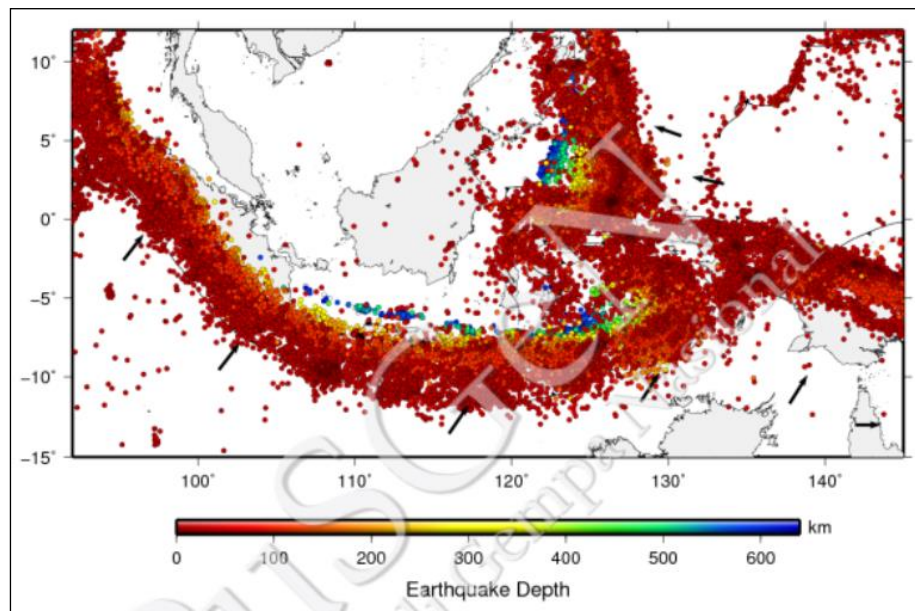
Sumber : Tim Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

Gambar 1 Peta Tektonik Wilayah Indonesia dari Data Geodetic Hingga Tahun 2016



Kondisi tektonik Indonesia yang terletak pada pertemuan lempeng besar dunia dan beberapa lempeng kecil atau microblocks menyebabkan daerah tersebut berpotensi mengalami banyak kejadian gempa. Penelitian lanjutan menggunakan informasi geodetik, geologis, dan seismologis menunjukkan bahwa tektonik di Indonesia dapat dibagi ke dalam beberapa lempeng kecil, yaitu Burma, Sunda, Laut Banda, Laut Maluku, Timor, Kepala Burung, Maoke, dan Woodlark.

Sebagai akibat dari proses tektonik yang terjadi, peristiwa gempa sering terjadi di sebagian besar wilayah Indonesia sebagaimana terlihat pada Gambar 2. Salah satu sumber gempa yang telah jelas teridentifikasi adalah zona subduksi aktif di bagian barat hingga bagian timur Indonesia. Selain itu, sisa energi dari proses tumbukan antar lempeng tersebut akan mengakibatkan adanya sesar di daratan atau lautan di beberapa pulau dan laut Indonesia.



Sumber : Tim Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

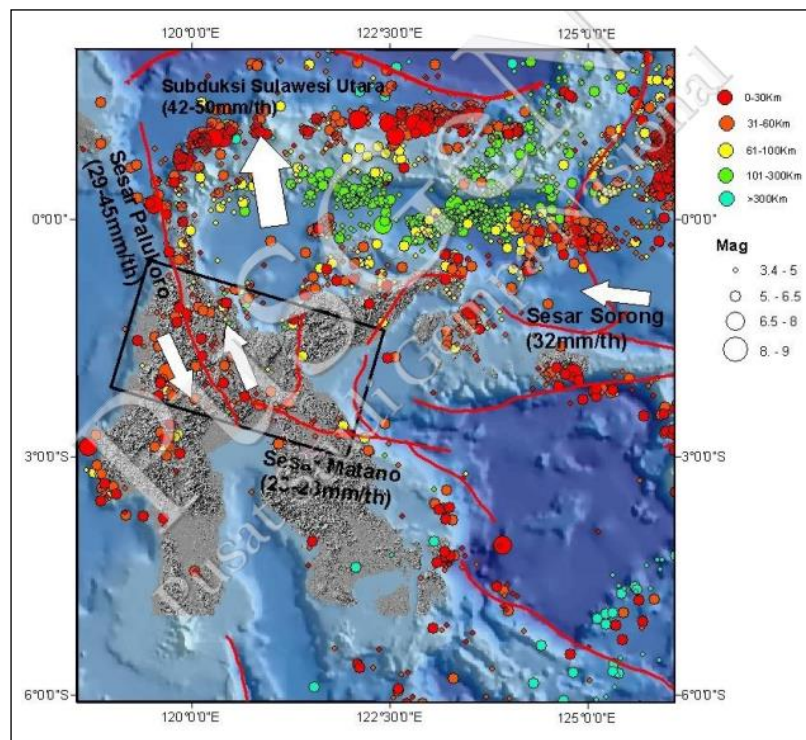
Gambar 2 Gempa di Indonesia Hasil Relokasi Hingga 2016

Zona pertemuan antar lempeng membentuk palung (trench) yang disebut zona subduksi dan merupakan zona sumber gempa bumi di laut. Akibat tumbukan antar lempeng tersebut, terbentuk sesar aktif baik yang terdapat di darat maupun di laut. Pada lempeng benua diantara zona subduksi dan rangkaian Busur Vulkanik terbentuk zona prismatik akresi dimana banyak terdapat sistem sesar aktif, pada umumnya merupakan sesar naik dan banyak dijumpai sebaran pusat gempa bumi. Sesar aktif tersebut baik yang terdapat di darat maupun di laut juga merupakan zona

sumber gempa bumi. Oleh karena itu wilayah yang berdekatan dengan sumber gempa bumi dapat digolongkan sebagai wilayah rawan bencana gempa bumi (Supartoyo,dkk., 2014).

### 2.2.1. Sejarah Kegempaan Kota Makassar

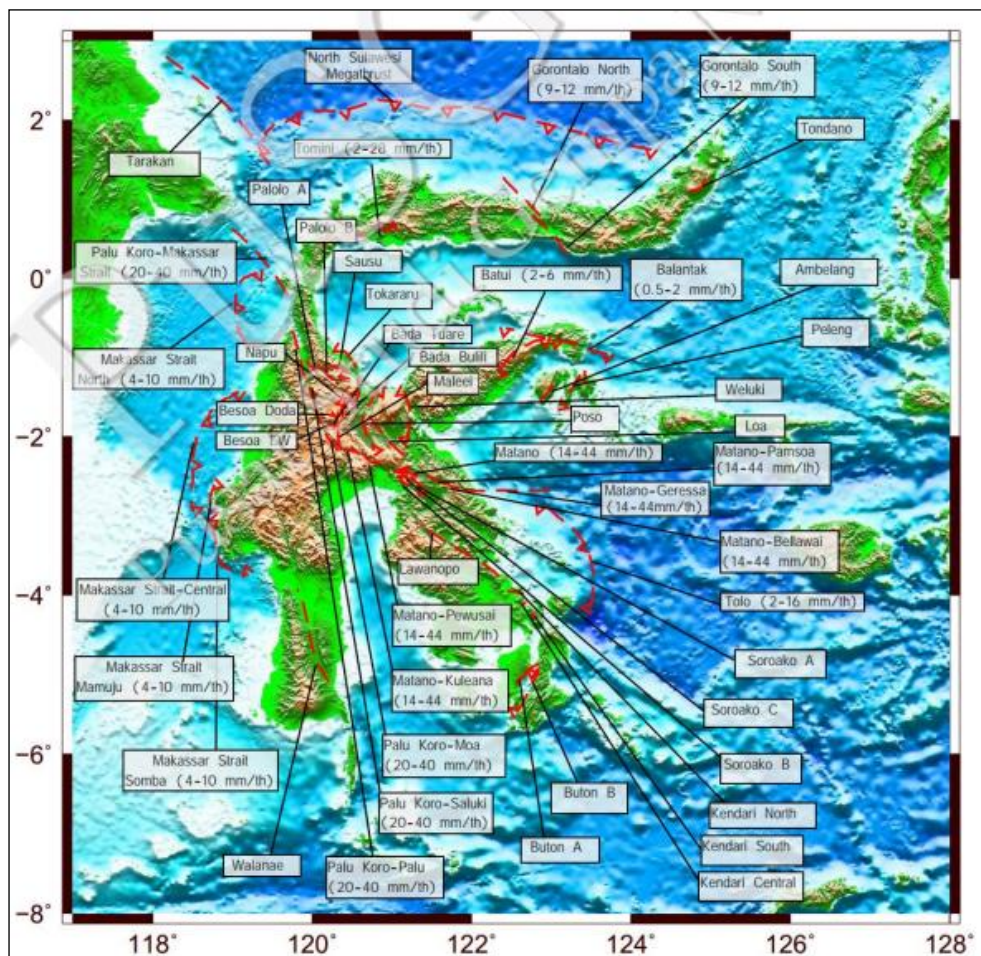
Pulau Sulawesi tersusun oleh tatanan tektonik yang kompleks. Struktur-struktur yang teridentifikasi di Sulawesi hingga saat ini masih aktif bergerak dan sering menghasilkan gempa. Pulau Sulawesi ini tersusun atas tatanan struktur geologi yang aktif bergerak dengan kecepatan pergeseran yang berbeda-beda (Gambar 3). Di sebelah utara Pulau Sulawesi terdapat North Sulawesi Subduction dengan kecepatan pergeseran geodetic 42-50 mm/th. Di darat terdapat Sesar Gorontalo yang memiliki kecepatan pergeseran 11 mm/th. Dari arah timur bergerak mendekat kemenerusan Sesar Sorong dengan besar pergeseran 32 mm/th. Di bagian tengah Pulau Sulawesi adalah Sesar Palukoro yang aktif bergerak dengan besar pergeseran geodetic 41-45 mm/th, dan pergeseran geologi 29 mm/th. Kemenerusan ke arah timur adalah Sesar Matano dengan besar pergeseran sekitar 20 mm/th (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017).



Sumber : Tim Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

Gambar 3 Struktur Geologi Regional di Pulau Sulawesi

Sulawesi terletak pada zona pertemuan tiga lempeng besar dunia atau yang lebih dikenal dengan nama *triple junction*. Studi kinematis dan geologi mendeklarasikan bahwa *triple junction* antarlempeng tersebut dipengaruhi oleh rotasi yang signifikan dari *microblok* di sekitar lempeng tersebut. Akibat *triple junction* adalah terjadinya pola deformasi yang kompleks di Sulawesi baik dalam bentuk sesar geser (*strike slip fault*) maupun sesar naik (*thrust fault*). Beberapa sesar tersebut aktif dan menyebabkan gempa. Sesar yang berdekatan dengan zona subduksi mempunyai pola *thrust* seperti Makassar, Tolo, dan Tomini. Adapun sesar darat yang terletak agak jauh dari zona subduksi mempunyai pola *strike slip* baik dengan pola sinsitral (mengiri) seperti Sesar Palu Koro maupun pola dekstral (menganan) seperti Sesar Gorontalo. Segmentasi Sesar di Sulawesi beserta nilai *sliprate* tiap sesarnya dapat dilihat pada Gambar 4 (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017).



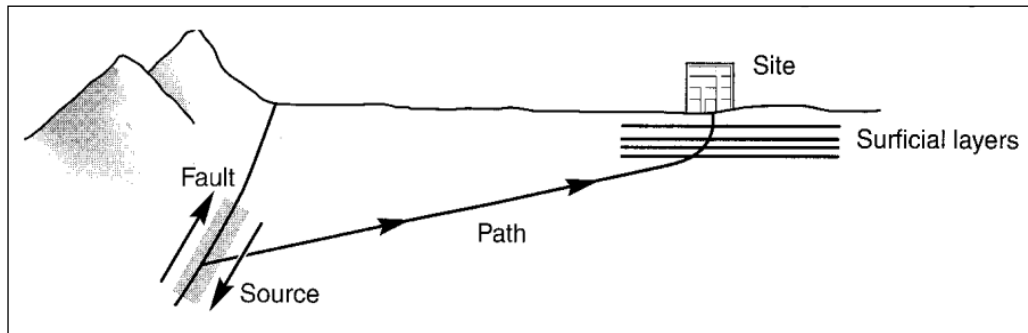
Sumber : Tim Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

Gambar 4 Peta Sesar Aktif di Sulawesi Beserta Nilai Sliprate-nya

### 2.3. Analisis Respon Situs Terhadap Gempa

Menurut Prawirodikromo (2017), respon spektrum adalah spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik/plot antara periode getaran struktur dan respon maksimumnya pada rasio redaman dan beban gempa tertentu. Sedangkan menurut Mario Paz and Leigh (2004), respon spektrum adalah plot respon maksimum (perpindahan maksimum, kecepatan, percepatan, atau kuantitas lain yang diinginkan) ke fungsi beban yang ditentukan untuk semua kemungkinan sistem derajat kebebasan tunggal. Maka dapat di simpulkan bahwa respon spektrum adalah grafik antara periode getar struktur (pada sumbu x) dengan respon-respon 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, dkk., 2022).

Ketika patahan pecah di bawah permukaan bumi, gelombang tubuh bergerak menjauhi sumbernya ke segala arah. Saat mencapai batas antara bahan geologis yang berbeda, gelombang dipantulkan dan dibiaskan. Karena kecepatan perambatan gelombang dari material yang lebih dangkal umumnya lebih rendah daripada material di bawahnya, sinar miring yang menumbuk batas lapisan horizontal biasanya dipantulkan ke arah yang lebih vertikal. Pada saat sinar mencapai permukaan tanah, banyak pembiasan sering membengkokkannya ke arah yang hampir vertikal (Gambar 5). Analisis respons tanah satu dimensi didasarkan pada asumsi bahwa semua batas adalah horizontal dan bahwa respons endapan tanah sebagian besar disebabkan oleh gelombang yang menyebar secara vertikal dari batuan dasar di bawahnya. Untuk analisis respons tanah satu dimensi, permukaan tanah dan batuan dasar diasumsikan memanjang tak terhingga dalam arah horizontal. Prosedur berdasarkan asumsi ini telah ditunjukkan untuk memprediksi respons tanah yang sesuai dengan respons terukur dalam banyak kasus (Kramer, 1996)



Sumber : Kramer (1996)

Gambar 5 Proses Pembiasan yang Menghasilkan Perambatan Gelombang Hampir Vertikal di Dekat Permukaan Tanah

Analisis *site response* mulai memasuki praktik rekayasa geoteknik sejak awal 1970-an dengan pengembangan SHAKE. Dalam beberapa tahun, program *site response* tambahan seperti QUAD-4 dan FLUSH telah tersedia. Analisis *site response* nonlinier tersedia segera setelah SHAKE dengan kode seperti CHARSOIL, DESRA, dan MASH. Penggunaan kode ini harus dipertimbangkan dalam konteks fasilitas komputer yang tersedia pada saat itu, kode dikembangkan dan dikompilasi pada komputer *mainframe*, input biasanya melalui kartu *punch*, dan *output* terdiri dari angka yang dicetak pada lembaran besar kertas lipat. Menjalankan analisis biasanya melibatkan *operator* ke pusat komputer, mengetik file *input* (dengan pemformatan sempurna) pada kartu *punch*, menjalankan *input* melalui pembaca kartu, menunggu beberapa jam (jika tidak dalam semalam) untuk pekerjaan dieksekusi, dan merencanakan secara manual hasilnya pada kertas grafik.

Analisis *site response* menjadi lebih mudah dengan munculnya perangkat *input/output* yang lebih baik, lebih mudah lagi dengan diperkenalkannya komputer pribadi, dan lebih mudah lagi dengan pengembangan antarmuka pengguna grafis. *Compiler Fortran* mengizinkan setidaknya program *site response* satu dimensi untuk dipindahkan dari komputer *mainframe* ke PC pada awal 1980-an, dengan program analisis multidimensi menyusul kemudian. Kode *site response* berbasis *Windows* kini tersedia dengan menu bawaan model tanah dan kemampuan grafis ekstensif untuk memplot kuantitas *input* dan *output* (Kramer,dkk.,2004).

### 2.3.1. Analisis Respon Situs dengan Metode Elastik Ekuivalen Linear

Analisis *Equivalent Linear* (EL) adalah jenis spesifik dari metode *Dynamic Ground Response Analysis* (DGRA), teori yang awalnya diusulkan oleh Idriss dan Seed (1968). Metode analisis ini pertama kali dikodekan ke dalam perangkat lunak SHAKE asli oleh Schnabel et al. (1972). Metode Ekuivalen Linear merupakan analisis tipe stress total. Berdasarkan (Caltrans, 2022) dalam metode analisis Ekuivalen Linear :

- Kolom tanah 1-D dimodelkan sebagai kontinum berlapis horizontal.
- Perilaku tegangan-regangan geser dinamis tanah dicirikan dengan menggunakan asumsi yang disederhanakan dan model bahan tanah "ekuivalen-linier" yang diformulasikan secara khusus. Persamaan gerak diselesaikan dalam domain frekuensi dengan mengasumsikan modulus geser tanah (G) dan rasio redaman (D) konstan (linier).
- Skema solusi iteratif yang didefinisikan secara unik digunakan untuk menggabungkan variasi nonlinier dan spasial atau waktu aktual dalam sifat tanah.
- Hanya dapat dilakukan dalam hal tekanan total.
- Metode ini tidak dapat dengan tepat memasukkan batas *inherent* yang dikenakan oleh kekuatan geser tanah pada respons dinamisnya.
- Karena asumsi dan keterbatasan penyederhanaan di atas, metode analisis ini tidak dapat menggabungkan dengan benar perilaku tanah berbasis tegangan yang sangat non-linier atau efektif yang mengalami guncangan seismik yang kuat ketika profil material bawah permukaan terdiri dari tanah lunak/lemah, termasuk tanah cair.
- Keakuratan metode ini, bahkan untuk tanah padat menurun ketika regangan geser yang dimobilisasi meningkat dan menjadi tidak dapat diterima untuk regangan geser sedang hingga besar (>0,1 hingga 0,4%)
- Selain itu, sebagai metode tegangan total, analisis EL tidak dapat menggabungkan efek penting dari generasi tekanan pori berlebih positif, termasuk pencairan di tanah berbutir kasar dan berbutir halus kontraktif dengan sedikit atau tanpa plastisitas serta degradasi tanah berbutir halus kohesif yang terjadi selama guncangan seismik. Oleh karena itu, analisis

EL dianggap tidak tepat untuk lokasi yang diprediksi mengalami pencairan tanah.

- Metode EL tidak memiliki fleksibilitas untuk menggabungkan model konstitutif tanah yang lebih maju dan terkini.

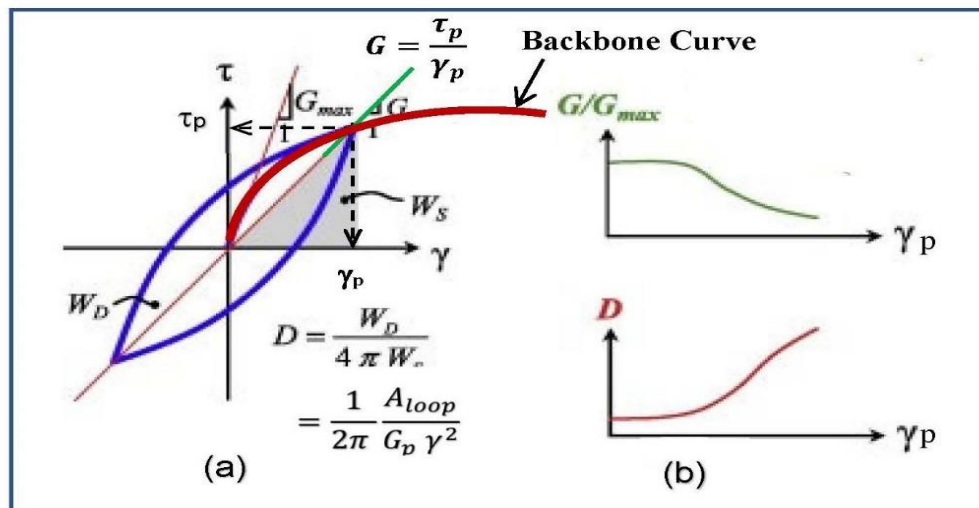
Metode *Equivalent-Linear* (EL) mendefinisikan dua parameter tanah, yaitu modulus geser ( $G$ ) dan rasio redaman ( $D$ ) untuk memodelkan perilaku tegangan-regangan geser dinamis tanah selama guncangan seismik. Dalam metode analisis EL, redaman histeretik yang ditunjukkan pada Gambar 6 (a) dimasukkan dalam rasio redaman kental ( $D$ ) dan kekakuan geser tanah ( $G$ ) dianggap sama dengan modulus geser sekan. Baik  $G$  dan  $D$  didefinisikan dalam hal tegangan geser puncak pada akhir siklus pemuatan. Dalam metode analisis EL, persamaan gerak untuk gelombang geser seismik yang merambat secara vertikal diselesaikan dalam domain frekuensi. Parameter model bahan tanah yang dibutuhkan untuk setiap lapisan tanah meliputi berat jenis total tanah, modulus geser tanah, rasio redaman tanah, dan modulus geser kompleks tanah.

Selama proses analisis EL, yang mencakup pengembangan seluruh riwayat waktu percepatan di permukaan tanah yang diberikan riwayat waktu percepatan *input* di dasar kolom tanah 1-D, parameter dinamis tanah  $G$  dan  $D$  diasumsikan konstanta (invarian waktu). Artinya, nilai-nilai parameter ini tidak berubah dari yang awalnya ditentukan saat guncangan tanah berlangsung. Ini juga berarti bahwa kurva regangan tegangan geser tanah linier pada awal gerakan dan tetap linier selama seluruh periode guncangan. Tidak ada degradasi dalam kekakuan tanah atau perubahan redaman tanah yang terjadi selama proses analisis semacam itu.

Skema analisis unik digunakan dalam metode EL untuk mengatasi keterbatasan dalam upaya untuk menggabungkan non-linearitas tanah. Analisis ini menggunakan prosedur berulang di mana percepatan tanah dan regangan geser pertama kali dievaluasi dengan menetapkan nilai perkiraan tertentu untuk  $G/G_{\max}$  dan  $D$  untuk lapisan tanah. Ini memecahkan persamaan gerak dengan mewakili efek gelombang geser seismik yang merambat secara vertikal dari dasar kolom tanah 1-D ke atas untuk nilai konstan  $G$  dan  $D$  yang ditetapkan ini. Dari hasilnya, regangan geser puncak tanah di setiap lapisan kemudian ditentukan. Berdasarkan

regangan geser puncak ini, parameter regangan geser efektif rata-rata untuk seluruh periode pengocokan dihitung untuk setiap peletakan tanah. Berdasarkan regangan geser efektif rata-rata yang dihitung ini, nilai  $G/G_{max}$  dan  $D$  yang dinormalisasi kompatibel dan dievaluasi untuk setiap lapisan tanah berdasarkan *Modulus Reduction* (MR) dan *Damping Ratio* (DR) masing-masing yang ditentukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 (b).

Analisis kemudian diulangi dengan menggunakan nilai  $G$  dan  $D$  yang diperbarui, dan satu set baru dari  $G$  dan  $D$  yang kompatibel dengan regangan geser yang ditentukan untuk setiap lapisan tanah. Proses ini diulangi sampai nilai-nilai  $G$  dan  $D$  yang sesuai dengan regangan geser pada akhir analisis menyatu dengan yang ditentukan pada awal dalam batas kecil yang dapat diterima.



Sumber : Caltrans (2022)

Gambar 6 Representasi Skema Pemodelan Ekuivalen-Linear dari Perilaku Stres-Regangan Tanah : (a) Histeresis geser-tegangan-ketegangan loop (b) Plot Kurva dan Rasio Redaman (DR) yang Dinormalisasi ( $G/G_{max}$ ) atau Modulus Reduction (MR)

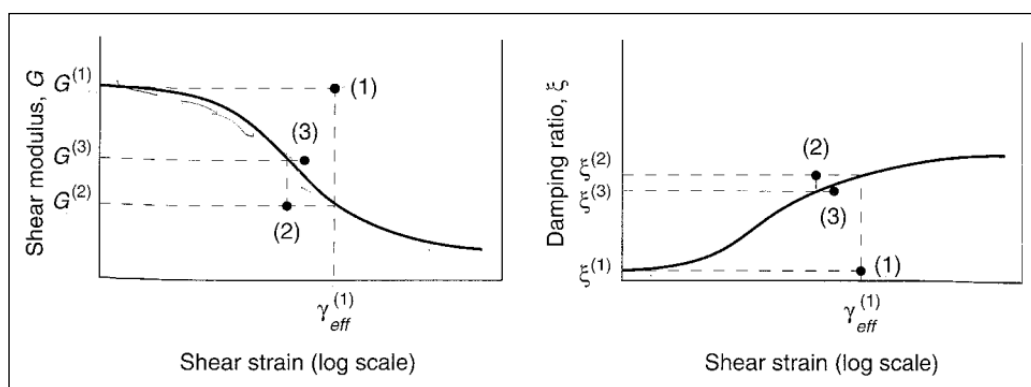
Menurut Kramer (1996), pendekatan linier harus dimodifikasi untuk memberikan perkiraan yang masuk akal dari respon tanah untuk masalah praktis yang menarik. Perilaku tegangan-regangan histeristik nonlinier sebenarnya dari tanah yang dibebani secara siklis dapat didekati dengan sifat-sifat tanah linier yang ekuivalen. Modulus geser linier ekuivalen ( $G$ ), umumnya diambil sebagai modulus geser garis potong dan rasio redaman linier ekuivalen ( $\xi$ ), sebagai rasio redaman



yang menghasilkan kehilangan energi yang sama dalam siklus tunggal seperti loop histeresis aktual.

Karena pendekatan linier mensyaratkan bahwa  $G$  dan  $\xi$  konstan untuk setiap lapisan tanah, masalahnya menjadi salah satu penentuan nilai yang konsisten dengan tingkat regangan yang diinduksi pada setiap lapisan. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan definisi objektif dari tingkat regangan. Tes laboratorium dari kurva pengurangan modulus dan rasio redaman telah dikembangkan menggunakan pemuatan harmonik sederhana dan mengkarakterisasi tingkat regangan dengan amplitudo regangan geser puncak. Akan tetapi, *time history* regangan geser untuk gerakan gempa tipikal sangat tidak teratur dengan amplitudo puncak yang hanya dapat didekati oleh beberapa paku dalam rekaman.

Karena tingkat regangan yang dihitung bergantung pada nilai properti linier ekuivalen, prosedur iteratif diperlukan untuk memastikan bahwa properti yang digunakan dalam analisis kompatibel dengan tingkat regangan yang dihitung di semua lapisan. Menggunakan estimasi awal,  $G^{(1)}$  dan  $\xi^{(1)}$ , analisis linear ekuivalen memprediksi regangan geser yang efektif,  $\gamma_{eff}^{(1)}$ . Karena regangan ini lebih besar dari pada yang sesuai dengan  $G^{(1)}$  dan  $\xi^{(1)}$ , diperlukan iterasi. Iterasi berikutnya menggunakan parameter,  $G^{(2)}$  dan  $\xi^{(2)}$ , yang kompatibel dengan  $\gamma_{eff}^{(1)}$ . Analisis linier ekuivalen diulangi dan parameter diperiksa sampai nilai  $G$  dan  $\xi$  yang kompatibel dengan regangan diperoleh. Mengacu pada Gambar 7, prosedur berulang beroperasi sebagai berikut :



Sumber : Kramer (1996)

Gambar 7 Iterasi Menuju Modulus Geser yang Kompatibel dengan Regangan dan Rasio Redaman dalam Analisis Linier Ekuivalen

1. Estimasi awal  $G$  dan  $\xi$  dibuat untuk setiap lapisan. Nilai perkiraan awal biasanya sesuai dengan tingkat regangan yang sama; nilai regangan rendah sering digunakan untuk estimasi awal.
2. Estimasi nilai  $G$  dan  $\xi$  digunakan untuk menghitung respons tanah, termasuk *time history* regangan geser untuk setiap lapisan.
3. Regangan geser efektif pada setiap lapisan ditentukan dari regangan geser maksimum dalam *time history* regangan geser yang dihitung.
4. Dari regangan geser efektif ini, dipilih nilai linear ekuivalen baru,  $G^{(i+1)}$  dan  $\xi^{(i+1)}$  untuk iterasi berikutnya.
5. Langkah 2 sampai 4 diulang sampai perbedaan antara modulus geser yang dihitung dan nilai rasio redaman dalam dua iterasi berturut-turut jatuh di bawah beberapa nilai yang telah ditentukan sebelumnya di semua lapisan. Meskipun konvergensi tidak mutlak dijamin, perbedaan kurang dari 5 sampai 10% biasanya dicapai dalam tiga sampai lima iterasi.

Meskipun proses iterasi terhadap sifat-sifat tanah yang kompatibel dengan regangan memungkinkan perilaku tanah nonlinier untuk didekati, penting untuk diingat bahwa metode respon kompleks masih merupakan metode analisis linier. Sifat-sifat tanah yang kompatibel dengan regangan adalah konstan sepanjang durasi gempa, terlepas dari apakah regangan pada waktu tertentu kecil atau besar. Metode tersebut tidak mampu merepresentasikan perubahan kekakuan tanah yang sebenarnya terjadi saat terjadi gempa.

Metode ekuivalen linier dikembangkan untuk menganalisis respon non-linier tanah menggunakan analisis domain frekuensi dengan bantuan fungsi transfer linier. Metode ekuivalen linear adalah metode pendekatan di mana perilaku non-linear tanah (yaitu, modulus geser dan redaman bergantung pada regangan) dimodelkan dalam bentuk sifat linier ekuivalen (modulus geser potong dan redaman yang tidak bergantung regangan untuk rentang regangan) sesuai dengan regangan geser efektif menggunakan prosedur iteratif. Prosedur iteratif diatur oleh target menemukan modulus geser yang kompatibel dan redaman untuk regangan geser efektif tertentu. Umumnya, regangan geser efektif dianggap 65% dari regangan geser maksimum yang dikembangkan pada lapisan. Meskipun metode ini nyaman secara komputasi dan memberikan hasil yang wajar, namun tidak mampu

merepresentasikan perubahan kekakuan tanah yang sebenarnya terjadi selama gempa (Kumar,dkk.,2014).

Model ekuivalen linear menggunakan pendekatan iteratif untuk mendekati perilaku nonlinear dan inelastis dari tanah. Modulus geser rata-rata,  $G_{sec}$ , digunakan selama seluruh siklus pemuatan untuk mendekati loop histeresis. Sementara parameter material ekuivalen linier yang disesuaikan secara iteratif agar konsisten dengan tingkat regangan geser efektif dapat ditemukan, analisisnya tetap linier. Metode ini efisien secara komputasi dan memberikan hasil yang masuk akal untuk banyak kasus, terutama untuk kasus di mana regangan kecil ( $<1-2\%$ ) dan akselerasi sederhana ( $<0,3-0,4$  g) berkembang (Kramer,dkk.,2004).

Pendekatan linier memungkinkan perhitungan gerakan batuan dasar dari gerakan permukaan bebas yang diberikan, atau dekonvolusi. Keandalan gerakan dekonvolusi harus dievaluasi secara hati-hati berdasarkan kasus per kasus. Ada beberapa batasan untuk menggunakan model ekuivalen linier. Karena modelnya linier, model ini tidak dapat digunakan untuk menghitung perpindahan permanen karena regangan geser kembali ke nol setelah pembebanan selesai. Linearitas yang melekat pada tanah juga dapat menyebabkan resonansi palsu yang tidak akan terjadi di lapangan. Selain itu, model linier ekuivalen tidak mampu memodelkan tekanan air pori karena pendekatan tegangan total digunakan dalam analisis. Pemilihan yang tepat dari regangan geser yang efektif diperlukan untuk mencegah pelunakan berlebih atau kurang dari respons (Kramer,dkk.,2004).

Meskipun metode linier ekuivalen dan nonlinier keduanya digunakan untuk menyelesaikan masalah analisis respons tanah satu dimensi, formulasi dan asumsi dasarnya sangat berbeda. Berdasarkan Kramer (1996), hasil analisis respons tanah ekuivalen linier dan nonlinier dibandingkan dalam beberapa kesempatan dengan kesimpulan umum sebagai berikut :

1. Linearitas *inheren* dari analisis ekuivalen linear dapat menyebabkan resonansi palsu (yaitu, amplifikasi tingkat tinggi yang dihasilkan dari kebetulan komponen kuat gerakan *input* dengan salah satu frekuensi alami dari endapan tanah ekuivalen linear). Karena kekakuan tanah nonlinier sebenarnya berubah selama durasi gempa besar, tingkat amplifikasi setinggi itu tidak akan berkembang di lapangan.

2. Penggunaan regangan geser yang efektif dalam analisis ekuivalen linier dapat menyebabkan sistem terlalu lunak dan teredam ketika regangan geser puncak jauh lebih besar daripada regangan geser lainnya, atau menjadi sistem yang kurang lunak dan kurang redaman ketika amplitudo regangan geser hampir seragam.
3. Analisis ekuivalen linear bisa jauh lebih efisien daripada analisis nonlinier, terutama ketika *input motion* dapat dicirikan dengan akurasi yang dapat diterima oleh sejumlah kecil istilah dalam deret *Fourier*. Sebagai contoh, sebagian besar gempa bumi mengandung energi gelombang elastis yang relatif kecil pada frekuensi di atas 15 sampai 20 Hz. Akibatnya, respon biasanya dapat dihitung dengan akurasi yang masuk akal dengan mempertimbangkan hanya frekuensi di bawah 15 hingga 20 Hz (atau lebih rendah, dalam beberapa kasus). Karena kekuatan, kecepatan, dan aksesibilitas komputer telah meningkat dalam beberapa tahun terakhir, signifikansi praktis dari perbedaan dalam efisiensi analisis respons tanah satu dimensi telah menurun secara substansial.
4. Metode nonlinier dapat dirumuskan dalam bentuk tegangan efektif untuk memungkinkan pemodelan pembangkitan, redistribusi, dan akhirnya disipasi tekanan air pori berlebih selama dan setelah guncangan gempa. Metode ekuivalen linear tidak memiliki kemampuan ini.
5. Metode nonlinier memerlukan model tegangan-regangan atau konstitutif yang andal. Parameter yang menggambarkan model tersebut tidak ditetapkan sebaik yang ada pada model ekuivalen linier. Program pengujian lapangan dan laboratorium yang substansial mungkin diperlukan untuk mengevaluasi parameter model nonlinier.
6. Perbedaan antara hasil analisis ekuivalen linier dan nonlinier bergantung pada tingkat nonlinieritas dalam respon tanah yang sebenarnya. Untuk masalah di mana tingkat regangan tetap rendah (profil tanah yang kaku dan/atau *input motion* yang relatif lemah), kedua analisis dapat menghasilkan estimasi respons tanah yang masuk akal. Untuk masalah yang melibatkan tingkat regangan tinggi, terutama masalah di mana tegangan geser yang diinduksi mendekati kekuatan geser tanah yang tersedia, analisis nonlinier cenderung memberikan hasil yang masuk akal.

Singkatnya, baik teknik linier maupun nonlinier dapat dan telah berhasil digunakan untuk analisis respons tanah satu dimensi. Penggunaan dan interpretasi masing-masing membutuhkan pengetahuan tentang asumsi yang mendasarinya, pemahaman tentang operasinya, dan pengakuan akan keterbatasannya. Tidak ada yang dapat dianggap ketat atau tepat secara matematis, namun keakuratannya tidak konsisten dengan variabilitas kondisi tanah, ketidakpastian sifat tanah, dan tersebar dalam data eksperimen yang menjadi dasar banyak parameter masukannya.

## 2.4. DEEPSOIL

DEEPSOIL dikembangkan di bawah arahan Prof. Youssef M.A. Hashash bekerja sama dengan beberapa mahasiswa pascasarjana dan sarjana di Universitas Illinois di Urbana-Champaign. DEEPSOIL telah dikembangkan di UIUC sejak tahun 1998. Versi DEEPSOIL yang dapat digunakan awalnya (sekitar 1998-1999) dikembangkan sebagai program MATLAB dan (sekitar 1999) kemudian dikembangkan kembali dengan berbasis C untuk meningkatkan efisiensi komputasi. Antarmuka pengguna visual ditambahkan segera setelah itu. Sejak itu, banyak perkembangan telah ditambahkan.

DEEPSOIL adalah program analisis site response satu dimensi yang dapat melakukan :

- a) Analisis domain waktu nonlinier 1-D dengan dan tanpa pembangkitan tekanan air pori,
- b) Analisis domain frekuensi linier ekuivalen 1-D termasuk konvolusi dan dekonvolusi, dan
- c) Analisis domain waktu dan frekuensi linier 1-D.

### 2.4.1. Metode Perhitungan Respon Spektrum

Salah satu metode yang paling umum digunakan dalam mengestimasi respon system Single Degree of Freedom (SDOF) untuk menghitung respon spektrum adalah *Frequency-domain solution*. Dalam *Frequency domain solution*, gerakan *input Fourier Amplitude Spectra* (FAS) dimodifikasi oleh fungsi transfer yang didefinisikan berdasarkan Chopra (1995) dalam Hashash et al. (2020) :

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

dimana :

$$\begin{aligned}
 f_n &= \text{frekuensi alami osilator, } f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m} \\
 \xi &= \text{rasio redaman, } \xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} \\
 k &= \text{kekakuan sistem} \\
 m &= \text{massa} \\
 c &= \text{redaman kental}
 \end{aligned}$$

Penggunaan *Frequency domain solution* membutuhkan FFTs (*Fast Fourier Transforms*) untuk berpindah antara *frequency-domain*, dimana fungsi transfer osilator diterapkan, dan *time-domain*, dimana respon osilator puncak diperkirakan.

## 2.4.2. Model Tanah

### 2.4.2.1. Hyperbolic / Pressure-Dependent Hyperbolic (MKZ)

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

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

dimana :

$$\begin{aligned}
 \tau &= \text{tegangan geser} \\
 G_0 &= \text{modulus geser awal} \\
 \gamma &= \text{regangan geser}
 \end{aligned}$$

$\beta$ ,  $s$ , dan  $\gamma_r$  adalah parameter model masing-masing. Tidak ada kopling antara tekanan pembatas dan tegangan geser. DEEPSOIL memperluas model untuk memungkinkan penggandengan dengan membuat  $\gamma_r$  tekanan pembatas bergantung sebagai berikut (Hashash et al., 2020) :

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

dimana :

$$\begin{aligned}\sigma'_v &= \text{tegangan vertikal efektif} \\ \text{Reference stress} &= \text{tegangan vertikal efektif saat } \gamma_r = \text{Ref. stress}\end{aligned}$$

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

$$\xi = \text{Small Strain Damping Ratio} \left(\frac{1}{\sigma'_v}\right)^d \quad (4)$$

dimana  $d$  dapat diatur ke nol jika diinginkan redaman regangan kecil yang bebas tekanan. Singkatnya, parameter yang akan didefinisikan selain properti layer adalah regangan referensi, parameter kurva tegangan-regangan beta ( $\beta$ ), parameter kurva tegangan-regangan ( $s$ ), parameter tergantung tekanan (regangan referensi) ( $b$ ), tegangan referensi, dan parameter tergantung tekanan (kurva redaman) ( $d$ ) (Hashash et al., 2020).

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

Menurut Darendel (2001), pada regangan kecil data dikumpulkan menggunakan uji kolom resonansi, dan menuju taraf regangan geser menengah digunakan hasil uji geser torsional. Nilai diekstrapolasikan pada tingkat regangan besar. Ekstrapolasi ini mungkin meremehkan atau melebih-lebihkan kekuatan geser pada regangan besar. Oleh karena itu, koreksi kekuatan geser diperlukan untuk memperhitungkan kekuatan geser yang benar pada regangan besar. Model Kuadrat/Hiperbolik umum yang diusulkan oleh Groholski et al (2016) memiliki skema pemasangan kurva yang secara otomatis mengoreksi kurva referensi (seperti Darendeli (2001)) berdasarkan kekuatan geser yang ditentukan pada regangan besar (parameter  $\tau_{max}$  dalam persamaan (6)). Parameter pemasangan kurva  $\theta_1$  melalui  $\theta_5$  (persamaan (5)) digunakan untuk melestarikan kurva reduksi modulus yang

diperoleh dari studi referensi sebanyak mungkin dan memodifikasi nilai regangan besar berdasarkan kekuatan geser regangan besar yang ditentukan (Hashash et al., 2020).

Parameter  $\tau_{max}$ , dan  $\theta_1$  melalui  $\theta_5$  diperlukan untuk membangun kekuatan geser terkoreksi kekuatan geser - kurva regangan geser. Memperoleh  $\tau_{max}$  mudah dan pengguna hanya perlu menentukan kekuatan geser dari material tanah yang disimulasikan pada regangan besar. Parameter  $\theta_1$  melalui  $\theta_5$  dapat diperoleh berdasarkan studi referensi Groholski et al (2016). Salah satu cara mudah untuk mendapatkan parameter ini adalah menggunakan DEEPSOIL (perangkat lunak analisis respons situs nonlinier 1-D). Pengguna dapat membuat domain berlapis dalam perangkat lunak DEEPSOIL dan memilih kurva referensi yang tersedia. Setelah membangun domain berlapis, rutin pemasangan kurva GQ/H menghitung kekuatan geser yang dikoreksi kekuatan geser - kurva regangan geser dan memberikan parameter  $\theta_1$  melalui  $\theta_5$ . Nilai-nilai ini dapat langsung digunakan dalam bahan histeretik tanah tanpa harus menentukan kekuatan geser acuan - kurva regangan geser. Model material menggunakan  $\tau_{max}$ ,  $G_0$ , dan  $\theta_1$  melalui  $\theta_5$  untuk membangun kurva kuat geser-regangan geser menggunakan fungsi berikut (Groholski et al, 2016) :

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

dimana :

$$\begin{aligned} \theta_\tau &= \text{fungsi kurva fitting dari model GQ/H yang dinormalisasi} \\ \gamma_r &= \text{regangan referensi, } \gamma_r = \tau_{max}/G_0 \\ \gamma &= \text{regangan geser} \\ \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5 &= \text{parameter kurva fitting dari fungsi } \theta_\tau \text{ untuk model GQ/H yang dinormalisasi} \end{aligned}$$

Setelah  $\theta_\tau$  ditentukan, kurva kuat geser-regangan geser dibangun sebagai berikut :

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



dimana :

- $\tau$  = tegangan geser
- $\tau_{max}$  = tegangan geser maksimum
- $\theta_{\tau}$  = fungsi kurva fitting dari model GQ/H yang dinormalisasi
- $\gamma$  = regangan geser
- $\gamma_r$  = regangan referensi,  $\gamma_r = \tau_{max}/G_0$

### 2.4.3 Aturan Masing dan Non-Masing

#### 2.4.3.1. Aturan Masing

Ketika pengguna ingin menyesuaikan kurva tanah (yaitu menentukan parameter model yang paling cocok dengan kurva yang ditentukan), opsi berikut tersedia :

- TN : Prosedur untuk menemukan parameter yang memberikan kecocokan terbaik untuk kurva reduksi modulus dengan ketidakcocokan kurva redaman yang berpotensi signifikan.
- MRD : Prosedur untuk menemukan parameter yang paling cocok untuk kurva modulus reduksi dan redaman.
- DC : Prosedur untuk menemukan parameter yang memberikan kecocokan terbaik untuk kurva redaman dengan potensi ketidaksesuaian kurva backbone yang signifikan.

#### 2.4.3.2. Aturan Non-Masing

Model non-Masing 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 berdasarkan Philips and Hashash (2009) dalam Hashash et al. (2020) sebagai berikut :

$$\xi_{MasingHysteretic} = F(\gamma_m) * \xi_{Masing} \quad (7)$$

dimana

- $F(\gamma_m)$  = faktor reduksi yang dihitung sebagai fungsi dari  $\gamma_m$

$\xi_{Masing}$  = redaman histeretik yang dihitung menggunakan aturan Masing berdasarkan kurva reduksi modulus

Dua formulasi untuk  $F(\gamma_m)$  diimplementasikan dalam DEEPSOIL dan dibahas pada bagian berikut :

1) MRDF-UIUC

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

$$F(\gamma_m) = P_1 - P_2(1 - G(\gamma_m)/G_0)^{P_3} \quad (8)$$

dimana :

$$\begin{aligned} \gamma_m &= \text{regangan geser maksimum yang dialami pada} \\ &\quad \text{waktu tertentu} \\ G(\gamma_m) &= \text{modulus geser saat } \gamma_m \\ P_1, P_2, \text{ dan } P_3 &= \text{parameter } fitting \end{aligned}$$

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

2) MRDF-Darendeli

Model MRDF *Pressure-Dependent Hyperbolic* Philips and Hashash (2009) juga 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 respon dinamis nonlinear dari jenis tanah yang berbeda. Model yang dikembangkan diimplementasikan sebagai faktor reduksi dengan bentuk (Hashash et al., 2020) :

$$F(\gamma_m) = P_1(G(\gamma_m)/G_0)^{P_2} \quad (9)$$

dimana :

$$\begin{aligned}\gamma_m &= \text{regangan geser maksimum yang dialami pada} \\ &\quad \text{waktu tertentu} \\ G(\gamma_m) &= \text{modulus geser saat } \gamma_m \\ P_1, \text{ dan } P_2 &= \text{parameter } fitting\end{aligned}$$

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

### 3) Non-Masing Unload-Reload Formulation

Persamaan unload-reload hiperbolik/tergantung tekanan yang) diubah dengan faktor reduksi  $F(\gamma_m)$  sebagai berikut (Hashash et al., 2020) :

$$\tau = F(\gamma_m) \left[ 2 \frac{G_0((\gamma - \gamma_{rev})/2)}{1 + \beta \left( \frac{(\gamma - \gamma_{rev})}{2\gamma_r} \right)^s} - \frac{G_0(\gamma - \gamma_{rev})}{1 + \beta \left( \frac{\gamma_m}{\gamma_r} \right)^s} \right] + \frac{G_0(\gamma - \gamma_{rev})}{1 + \beta \left( \frac{\gamma_m}{\gamma_r} \right)^s} + \tau_{rev} \quad (10)$$

dimana :

$$\begin{aligned}\gamma &= \text{regangan geser} \\ \gamma_r &= \text{regangan geser referensi} \\ \beta &= \text{faktor tanpa dimensi} \\ s &= \text{eksponen tanpa dimensi} \\ \gamma_{rev} &= \text{regangan geser balik} \\ \tau_{rev} &= \text{tegangan geser balik} \\ \gamma_m &= \text{regangan geser maksimum} \\ F(\gamma_m) &= \text{faktor reduksi} \\ G_0 &= \text{modulus geser awal}\end{aligned}$$

## 2.4.4 Kurva Referensi

### 2.4.4.1. Menq 2003

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 ( $V_p$ ), yang masing-masing dinyatakan sebagai berikut :

$$G = \rho V_s^2 \quad (11)$$

$$E = \rho V_c^2 \quad (12)$$

$$M = \rho V_p^2 \quad (13)$$

di mana  $\rho$  adalah massa satuan total material. Redaman material, dinyatakan dalam rasio redaman ( $D$ ), juga dikaitkan dengan setiap jenis gelombang tegangan. Rasio redaman material adalah : (1) dalam geser ( $D_s$ ), (2) dalam kompresi tidak dibatasi ( $D_c$ ), dan (3) dalam kompresi terbatas ( $D_p$ ).

Dalam hal dinamika tanah dan rekayasa gempa geoteknik, respons material geoteknik terhadap gerakan geser umumnya paling memprihatinkan. Oleh karena itu, kekakuan geser dan redaman geser adalah sifat dinamis yang diperlukan. Sifat-sifat ini dalam rentang regangan di mana mereka menunjukkan perubahan linier dan nonlinier umumnya disajikan dalam plot semi-logaritmik. Modulus geser dan rasio redaman material dalam geser dalam rentang linier ditunjukkan dengan jelas, dan variasi dalam rentang nonlinier diwakili dengan baik hingga regangan sekitar 0,5%.

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 insitu, 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) :

$$G_{field} = G_{lab} / G_{max,lab} \times G_{max,field} \quad (14)$$

dimana :

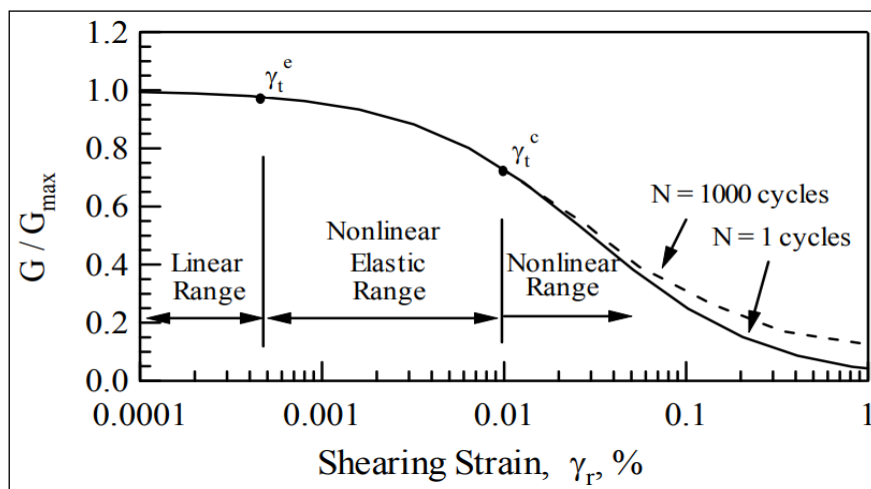
$G_{field}$  = modulus geser yang digunakan untuk analisis di lapangan

$G_{lab}$  = modulus geser yang diukur di laboratorium

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

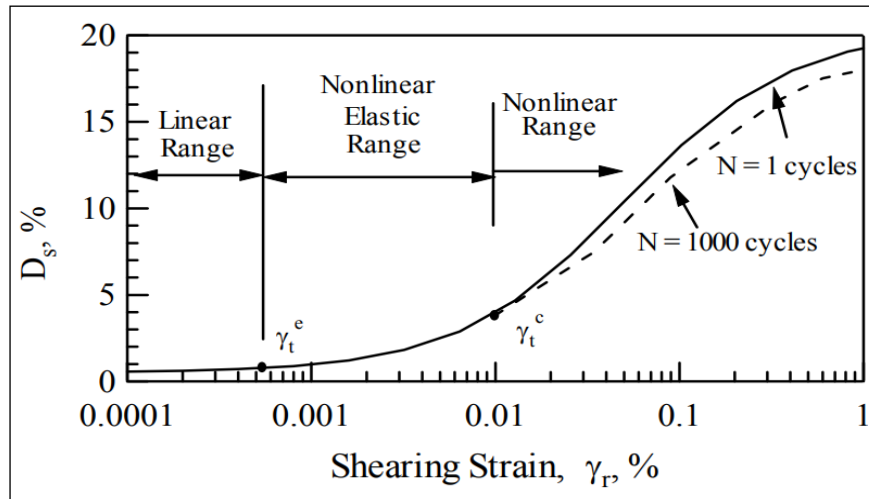
$G_{max,field}$  = modulus geser regangan kecil yang diukur di lapangan

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  $G - \log \gamma$  dan  $D_s - \log \gamma$  umumnya dipisahkan menjadi tiga rentang di sebagian besar analisis teknik gempa gerakan tanah medan bebas. Rentang ini adalah : linier, elastis nonlinier, dan nonlinier. Ketiga rentang ini diilustrasikan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Sumber : Menq (2003)

Gambar 8 Kurva Reduksi Modulus Geser Normalisasi



Sumber : Menq (2003)

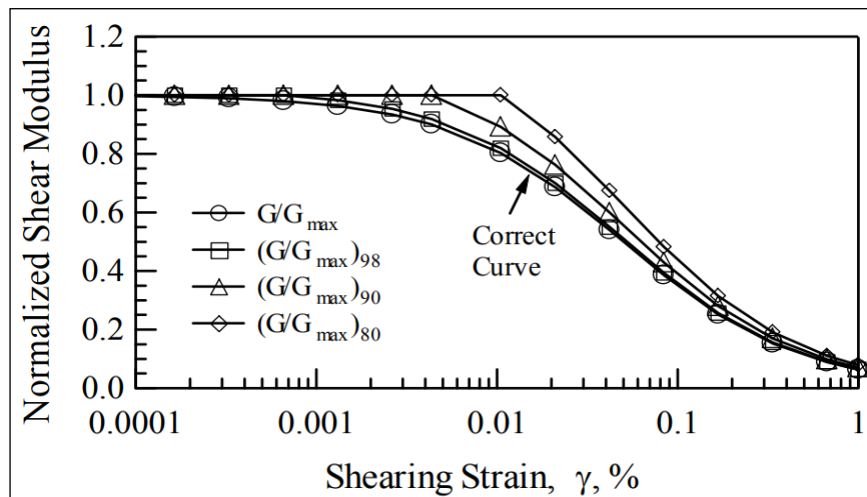
Gambar 9 Kurva Rasio Redaman Material

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, 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 amplitudo regangan lebih rendah dari regangan ambang elastis,  $\gamma_t^e$ . Rentang regangan antara ambang elastis dan siklik umumnya dilambangkan sebagai rentang "elastis nonlinier". Dalam rentang regangan ini, modulus geser menurun dan rasio redaman material pada geser meningkat dengan meningkatnya regangan geser.

Namun, modulus geser dan rasio redaman material dalam geser pada dasarnya tidak terpengaruh oleh jumlah siklus pemuatan dalam kisaran "elastis nonlinier". (Baik  $G_{max}$  dan  $D_{s,min}$  dipengaruhi oleh frekuensi pemuatan yang diabaikan). Karena amplitudo 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 nonlinier. Untuk tanah granular kering dengan kepadatan sedang, modulus geser menurun dan rasio redaman material meningkat dengan meningkatnya jumlah siklus pemuatan karena regangan geser melampaui  $\gamma_t^e$ . Perlu dicatat bahwa tanah berperilaku nonlinier baik dalam rentang "elastis nonlinier" dan nonlinier. Kedua rentang ini sering disebut sebagai rentang nonlinier dalam literatur. Modulus geser dalam rentang nonlinier dilambangkan sebagai  $G$ , dan rasio redaman material dalam geser dilambangkan sebagai  $D_s$ .

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  $\gamma_t^c$ . Serangkaian kurva reduksi modulus geser ditunjukkan pada Gambar 10. Dalam setiap kurva, regangan terkecil di mana  $G$  diberikan oleh batas bawah regangan geser,  $\gamma_L$ . Batas-batas ini dibatasi pada  $\gamma$  0,0007% : 0,004%; dan 0,01%. Modulus geser maksimum yang digunakan untuk normalisasi adalah modulus geser yang diukur pada  $\gamma_L$  dari setiap kurva, dan dilambangkan sebagai  $G_{\max, \gamma_L}$ . Dalam ketiga kurva ini, rasio antara nilai  $G_{\max, \gamma_L}$  (diukur pada  $\gamma = 0,0007\%$ ; 0,004%; dan 0,01%) dan nilai aktual  $G_{\max}$  masing-masing adalah 98%, 90%, dan 80%. Moduli geser yang dinormalisasi dilambangkan sebagai  $(G/G_{\max})_{98}$ ,  $(G/G_{\max})_{90}$ , dan  $(G/G_{\max})_{80}$  pada Gambar 10 untuk ketiga kurva ini. Seperti yang ditunjukkan pada gambar, kurva modulus geser yang dinormalisasi bergerak ke atas saat  $\gamma_L$  meningkat, karenanya, material tampak lebih linier.



Sumber : Menq (2003)

Gambar 10 Variasi Kurva Reduksi Modulus Geser dengan Nilai Berbeda dari Modulus Geser Regangan Kecil yang Jelas

#### 2.4.4.2. Seed and Idriss 1970

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 adanya 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. 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.

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* ( $\gamma$ ), *effective mean principal stress* ( $\sigma'_m$ ), *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  $\phi'$ ), 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 berdasarkan Hardin and Drnevich (1970) dalam Seed and Idriss (1970) :

$$G_{max} = 14750 \times \frac{(2.973-e)^2}{1+e} (OCR)^a (\sigma'_m)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

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 rasio pori (atau kerapatan relatif) tetapi tidak signifikan oleh variasi karakteristik ukuran butir. Telah ditemukan bahwa secara umum, modulus geser dan tekanan pembatas dihubungkan oleh persamaan (Seed and Idriss, 1970) :

$$G = 100 K_2 (\sigma'_m)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$



dimana :

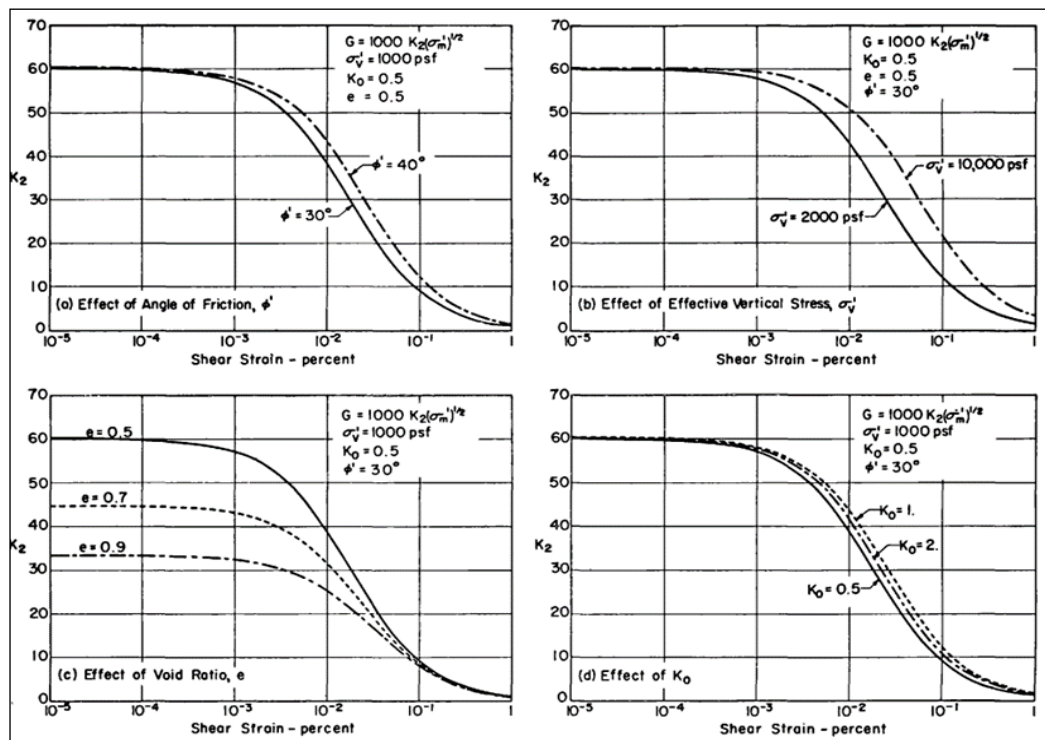
- $G$  = modulus geser  
 $K_2$  = parameter yang dipengaruhi oleh regangan  
 $\sigma'_m$  = rata – rata tegangan efektif utama

Pengaruh angka pori dan amplitudo regangan dapat dinyatakan melalui pengaruhnya terhadap parameter  $K_2$ . Pengaruh faktor lain terhadap  $K_2$  dapat diilustrasikan oleh hasil pada Gambar 11 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 perhitungan hubungan antara  $K_2$  dan amplitudo regangan. Dapat dilihat bahwa :

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

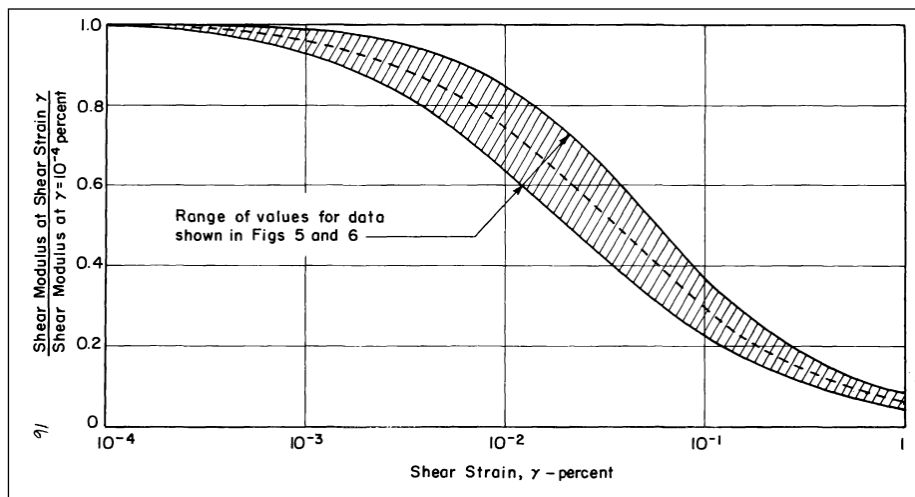
Jadi, untuk tujuan praktis nilai  $K_2$  dapat dipertimbangkan untuk ditentukan terutama oleh *void ratio* atau kerapatan relatif dan amplitudo regangan dari gerakan.

Perkiraan yang dekat dengan hubungan modulus vs regangan geser untuk setiap pasir dapat diperoleh dengan menentukan modulus pada tingkat regangan yang sangat rendah. dengan metode perambatan gelombang di lapangan, dan kemudian mengurangi nilai ini untuk tingkat regangan lainnya sesuai dengan hasil yang ditunjukkan oleh garis rata-rata (putus-putus) pada Gambar 12.



Sumber : Seed and Idriss (1970)

Gambar 11 Pengaruh Berbagai Faktor Terhadap Modulus Geser Pasir Berdasarkan Hardin Dan Drnevich



Sumber : Seed and Idriss (1970)

Gambar 12 Variasi Modulus Geser Dengan Regangan Geser Untuk Pasir

Dari studi tentang faktor-faktor yang mempengaruhi rasio redaman pasir, Hardin dan Drnevich menyimpulkan bahwa rata – rata tegangan efektif utama (atau  $\sigma_v'$  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.

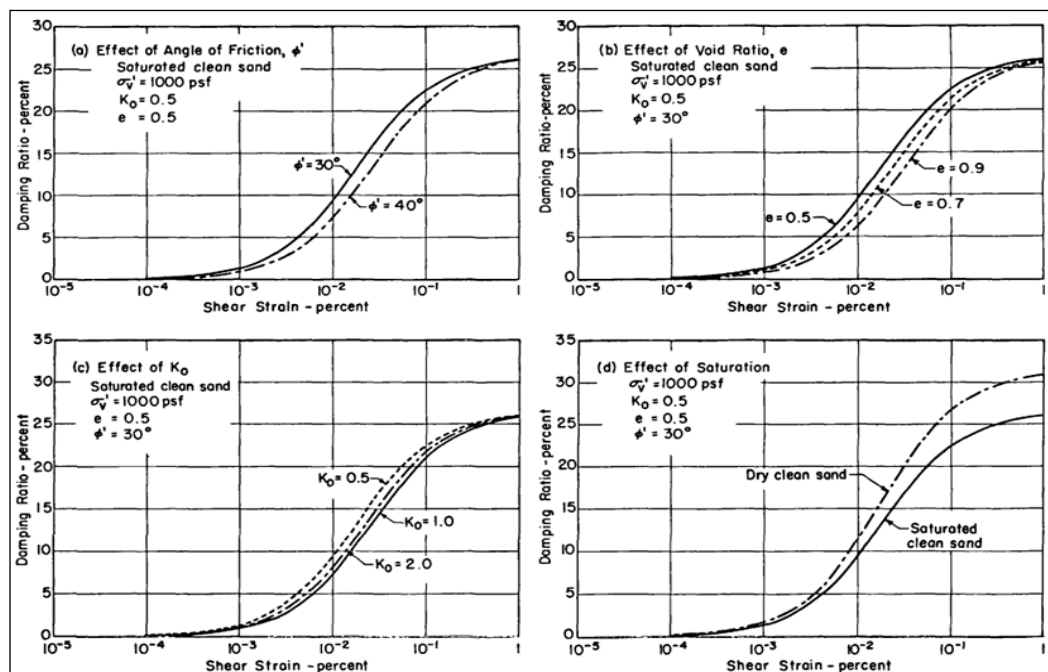
Perhitungan efek dari faktor-faktor di atas pada hubungan antara rasio redaman dan amplitudo regangan geser, seperti yang ditentukan oleh Hardin-Drnevich ditunjukkan pada Gambar 13. Jelas bahwa pengaruh atau  $\phi'$ ,  $K_0$ , angka pori, dan derajat kejenuhan relatif kecil, dapat dilihat dari persamaan untuk rasio redaman maksimum (Seed and Idriss, 1970) :

$$\lambda_{max} \cong 30 - 1.5 \log_{10} N \quad (17)$$

dimana :

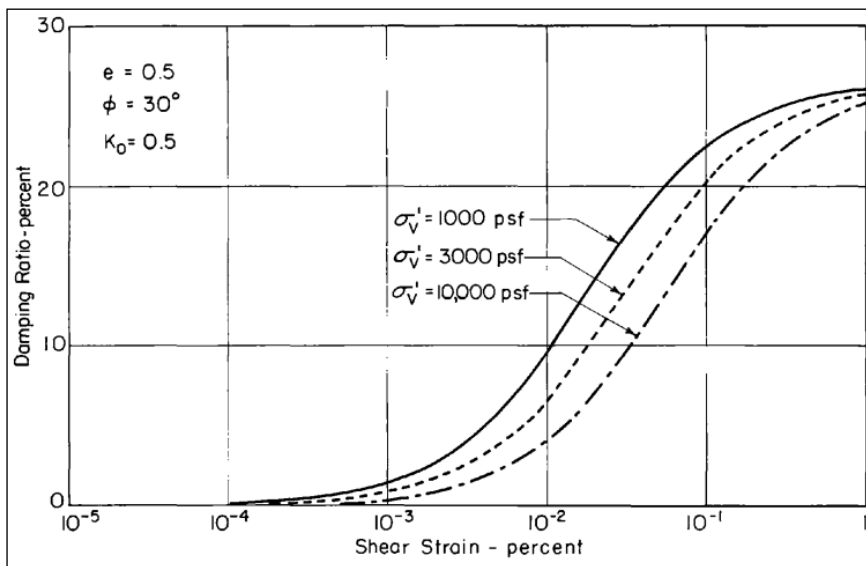
$$\begin{aligned} \lambda_{max} &= \text{rasio redaman maksimum} \\ N &= \text{jumlah siklus} \end{aligned}$$

Nilai  $\lambda$  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*  $\sigma_v'$ . Pengaruh faktor ini ditunjukkan pada Gambar 14 dan Gambar 15.



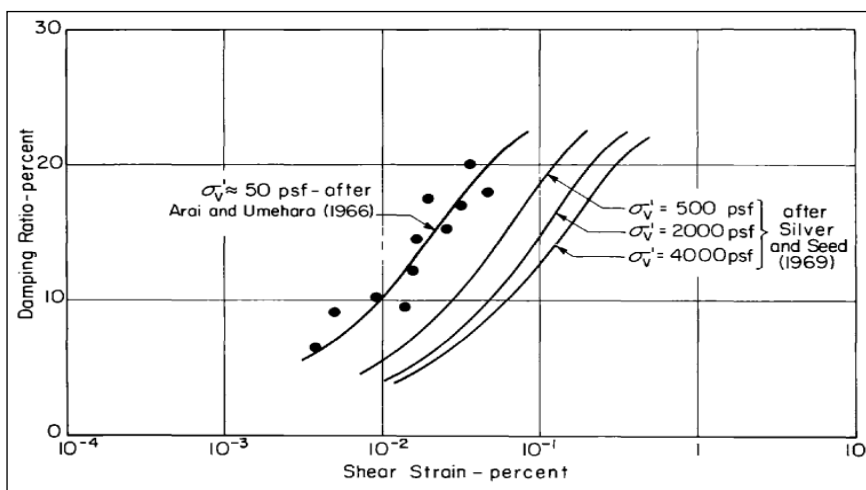
Sumber : Seed and Idriss (1970)

Gambar 13 Pengaruh Dari Berbagai Faktor Terhadap Rasio Redaman Pasir Berdasarkan Hardin Dan Drnevich



Sumber : Seed and Idriss (1970)

Gambar 14 Pengaruh Confining Pressure Terhadap Rasio Damping Pasir Jenuh Berdasarkan Hardin Dan Drnevich

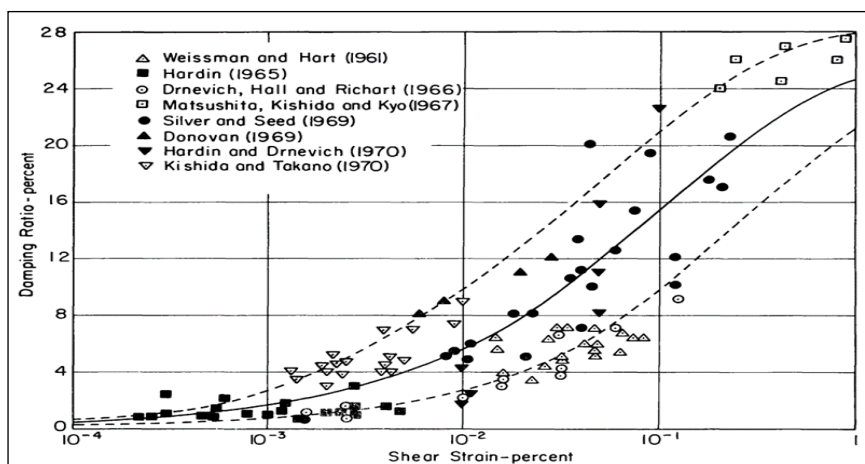


Sumber : Seed and Idriss (1970)

Gambar 15 Pengaruh Confining Pressure Terhadap Rasio Damping Pasir Kering

Berdasarkan beberapa penyelidikan sebelumnya tentang rasio redaman pasir, maka hasil penelitian ini dirangkum dalam Gambar 16. 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 memungkinkan untuk memberikan nilai rasio redaman dengan akurasi yang cukup. Kurva pada Gambar 16 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 and Idriss (1970)

Gambar 16 Rasio Redaman untuk Pasir

#### 2.4.4.3. Derendeli 2001

Untuk menghitung regangan referensi, koefisien kelengkungan, rasio redaman material regangan kecil dan koefisien penskalaan dengan mengganti parameter ( $\phi_i$ ) dengan nilai rata-rata yang diperbarui berdasarkan Hardin and Drnevich (1972b) dalam Derendeli (2001) sebagai berikut :

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 * PI * OCR^{\phi_3}) * \sigma_0'^{\phi_4} \quad (18)$$

$$a = \phi_5 \quad (19)$$

$$D_{min} = (\phi_6 + \phi_7 * PI * OCR^{\phi_8}) * \sigma_0'^{\phi_9} * [1 + \phi_{10} * \ln(frg)] \quad (20)$$

$$b = \phi_{11} + \phi_{12} * \ln(N) \quad (21)$$

dimana :

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

PI = plastisitas tanah (%)

OCR = *overconsolidation ratio*

*frg* = frekuensi pemuatan

*N* = jumlah siklus pemuatan

$\phi_1 = 0,0352$ ;  $\phi_2 = 0,0010$ ;  $\phi_3 = 0,3246$ ;  $\phi_4 = 0,3483$ ;  $\phi_5 = 0,9190$ ;  $\phi_6 = 0,8005$ ;  $\phi_7 = 0,0129$ ;  $\phi_8 = -0,1069$ ;  $\phi_9 = -0,2889$ ;  $\phi_{10} = 0,2919$ ;  $\phi_{11} = 0,6329$ ;  $\phi_{12} = -0,0057$ .

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.

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 berdasarkan Hardin and Drnevich (1972b) dalam Derendeli (2001).

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (22)$$

$$D_{Adjusted} = b * \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{0.1} * D_{Masing} + D_{min} \quad (23)$$

dimana:

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

$$\gamma = \text{regangan geser (\%)}$$

$$\gamma_r = \text{regangan referensi (\%)}$$

$$a = \text{koefisien kelengkungan}$$

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

$$b = \text{koefisien penskalaan}$$

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

Kurva redaman material berdasarkan Masing (1926) :

$$D_{Masing} = c_1 D_{Masing,a=1.0} + c_2 D_{Masing,a=1.0}^2 + c_3 D_{Masing,a=1.0}^3 \quad (\%) \quad (24)$$

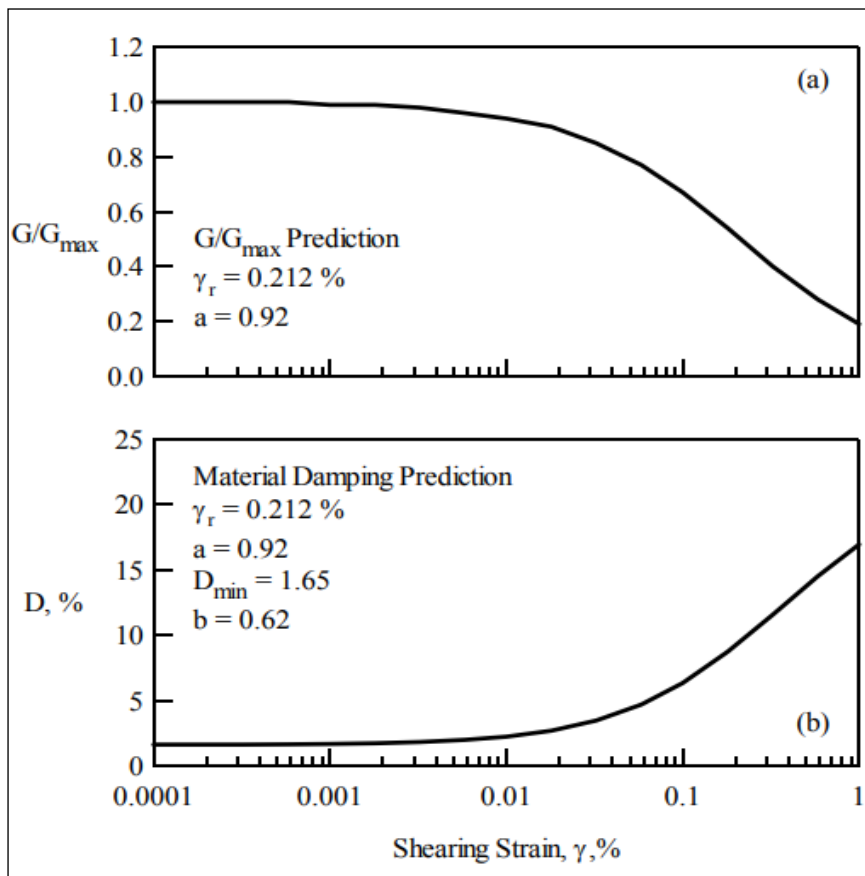
$$D_{Masing,a=1.0} = \frac{100}{\pi} \left[ 4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} - 2 \right] \quad (\%) \quad (25)$$

$$c_1 = -1,1143a^2 + 1,8618a + 0,2523$$

$$c_2 = 0,0805a^2 - 0,0710a - 0,0095$$

$$c_3 = -0,0005a^2 + 0,0002a + 0,0003$$

Gambar 17 menunjukkan pengurangan modulus yang dinormalisasi dan kurva redaman material untuk 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.



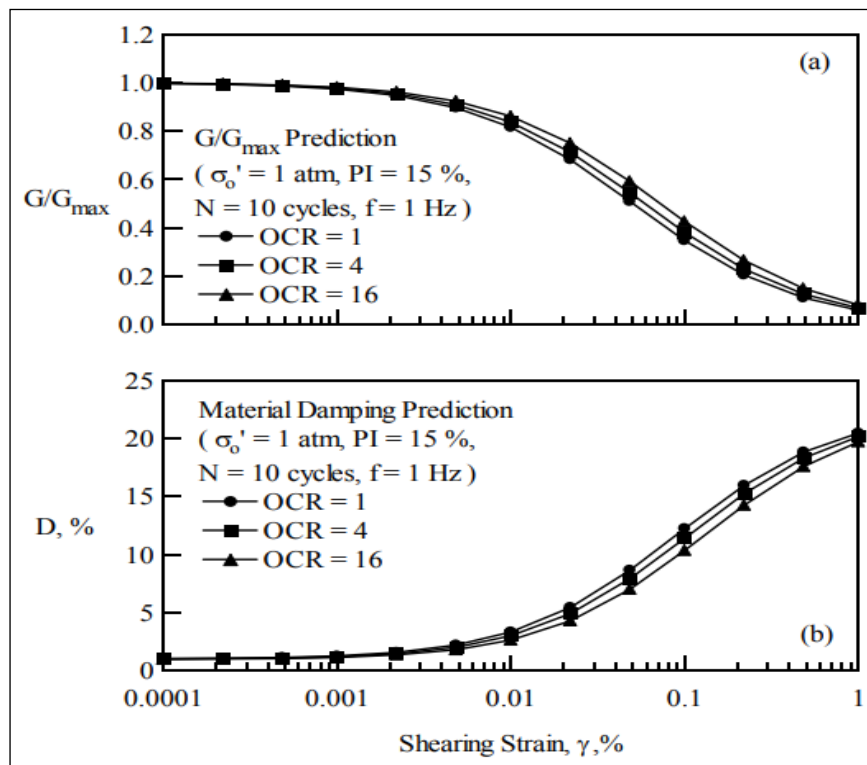
Sumber : Derendeli (2001)

Gambar 17 Estimasi (a) Pengurangan Modulus yang Dinormalisasi dan (b) Kurva Redaman Material

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 diucapkan untuk tanah yang kompeten (yang tidak menunjukkan perubahan volume besar ketika dipotong pada strain kurang dari 1%).

Gambar 18 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 (1972b).

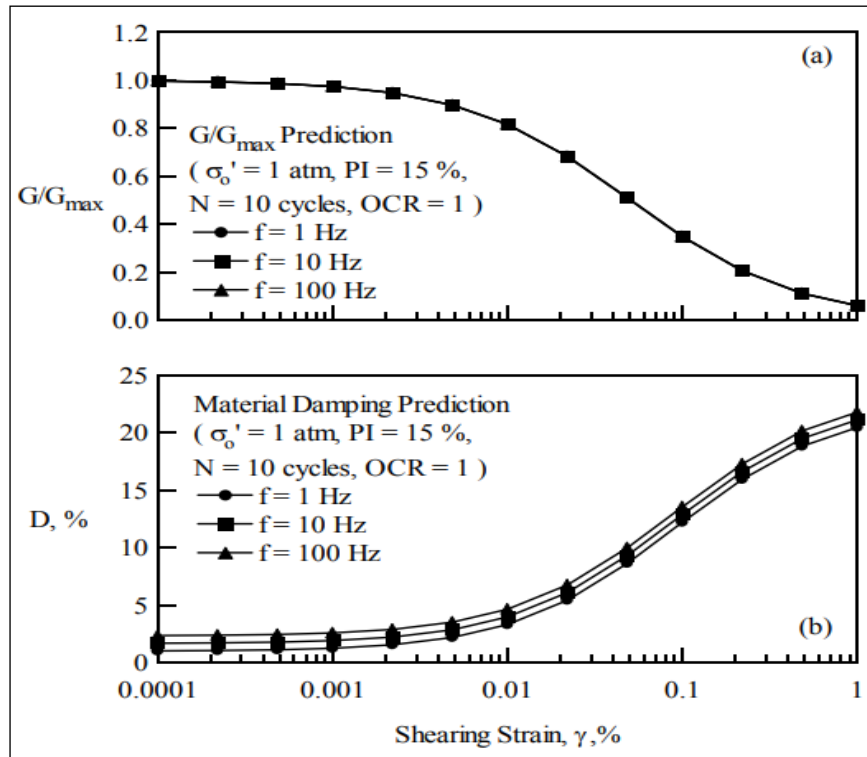


Sumber : Derendeli (2001)

Gambar 18 Pengaruh Rasio Overkonsolidasi pada (a) Modulus yang Dinormalisasi Reduksi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi

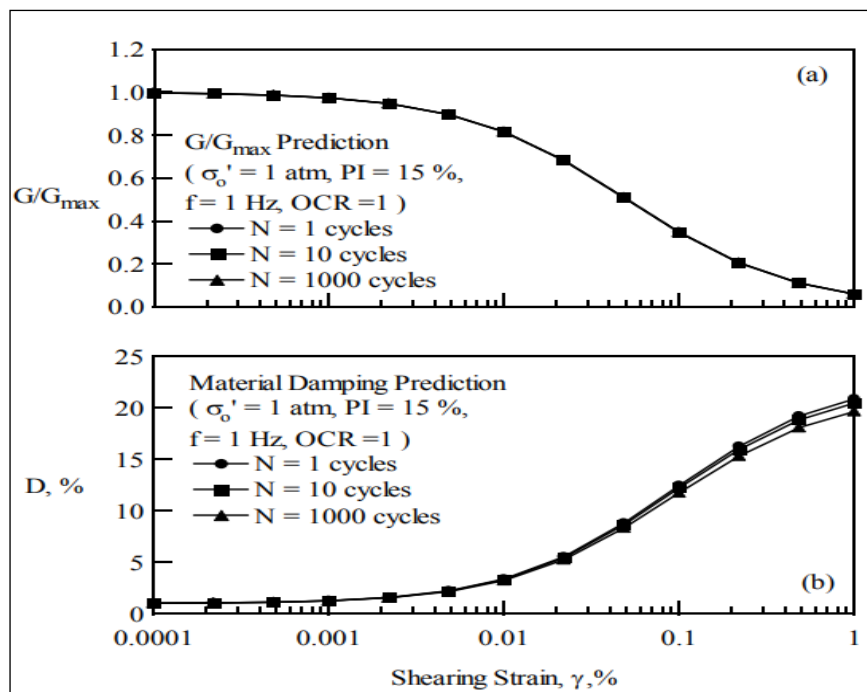
Gambar 19 menyajikan pengaruh frekuensi pemuatan pada kurva redaman material yang diprediksi oleh model yang dikalibrasi. Peningkatan rasio redaman material regangan kecil dengan meningkatnya frekuensi pemuatan diamati pada gambar ini. Efek ini konsisten dengan tren yang dilaporkan dalam Stokoe (1999).





Sumber : Derendeli (2001)

Gambar 19 Pengaruh Frekuensi Pemuatan pada (a) Pengurangan Modulus yang Dinormalisasi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi



Sumber : Derendeli (2001)

Gambar 20 Pengaruh Jumlah Siklus Pemuatan pada (a) Modulus yang Dinormalisasi Reduksi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi

Pada Gambar 20, pengaruh jumlah siklus pembebanan pada kurva redaman material disajikan. 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 (1972b) dan Stokoe (1999).