

SKRIPSI

**STUDI RESPON SPEKTRUM GEMPA PADA JEMBATAN
BAROMBONG KOTA MAKASSAR DENGAN
MENGUNAKAN METODE ELASTIC EQUIVALENT
LINEAR**

Disusun dan diajukan oleh:

ANDI ALIFIA RAMADHANTI HARIS

D011 20 1121



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

GOWA

2024



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI RESPON SPEKTRUM GEMPA PADA JEMBATAN BAROMBONG KOTA MAKASSAR DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELASTIC EQUIVALENT LINEAR

Disusun dan diajukan oleh

ANDI ALIFIA RAMADHANTI HARIS
D011 20 1121

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 14 Agustus 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Sipil



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng.
NIP: 196805292002121002

Menyetujui,
Dosen Pembimbing



Dr. Eng. Ir. Ardy Arsyad, S.T., M.Eng.S.c.
NIP: 197607072005011002



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Andi Alifia Ramadhanti Haris

NIM : D011201121

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

STUDI RESPON SPEKTRUM GEMPA PADA JEMBATAN BAROMBONG
KOTA MAKASSAR DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELASTIC
EQUIVALENT LINEAR

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

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

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

Apabila di kemudian 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, 14 Agustus 2024

Yang Menyatakan



Andi Alifia Ramadhanti Haris



ABSTRAK

ANDI ALIFIA RAMADHANTI HARIS. *Studi Respon Spektrum Gempa Pada Jembatan Barombong Makassar dengan Menggunakan Metode Elastic Equivalent Linear* (dibimbing oleh Dr. Eng. Ardy Arsyad, S.T., M.Eng.Sc.)

Secara geografis, Jembatan Barombong yang terletak di Kota Makassar terletak jauh dari sumber gempa tektonik utama Pulau Sulawesi, dapat dikatakan sebagai wilayah yang aktivitas kegempaan cukup kecil, tetapi bukan berarti bebas dari potensi gempa yang merusak. Endapan permukaan yang lunak cenderung memiliki efek pembesaran (amplifikasi) dan penurunan (de-amplifikasi) perambatan gelombang seismik yang merambat dari dasar batuan (*bedrock*) ke permukaan tanah. Maka untuk memperkecil resiko bahaya gempa bumi di Kota Makassar khususnya di sekitar Jembatan Barombong Makassar, perlu dilakukan studi respon spektrum menggunakan metode Elastik Ekuivalen Linear (EL).

Dalam melakukan penelitian ini, analisis respon spektrum dilakukan dengan menggunakan *software* DEEPSOIL dengan metode elastik ekuivalen linear. Parameter tanah diperoleh melalui pengujian lapangan dan laboratorium. Selain itu, dalam memperoleh nilai V_s , maka dilakukan korelasi dengan nilai N-SPT melalui *software* NovoSPT. Serta terdapat data gempa hasil rekaman BMKG pada tahun 2015 yang diskalakan menjadi data gempa deterministik dan data gempa periode ulang 2500 tahun. Hasil analisis respon spektrum ini kemudian dibandingkan dengan respon spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019.

Berdasarkan hasil analisis diperoleh bahwa kondisi tanah pada Jembatan Barombong Kota Makassar adalah Tanah Sedang (SD) dan dapat menyebabkan amplifikasi. Faktor amplifikasi untuk gempa deterministik pada periode pendek (0,2 detik) berkisar antara 1,114 – 1,494 dan pada periode panjang (1 detik) berkisar antara 1,292 – 1,360. Sedangkan faktor amplifikasi untuk gempa periode ulang 2500 tahun pada periode pendek (0,2 detik) berkisar antara 1,093 – 1,228, pada periode panjang (1 detik) berkisar antara 1,517 – 1,757. Perbandingan percepatan spektra untuk gempa deterministik dari penelitian pada periode pendek dan periode panjang lebih kecil dari nilai percepatan spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019. Sedangkan untuk periode ulang gempa 2500 tahun diperoleh pada periode pendek lebih besar daripada nilai percepatan spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019, sedangkan untuk periode panjang hanya arah utara – selatan yang nilainya lebih besar dari nilai percepatan spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019.

Kata Kunci: Gempa Bumi, Amplifikasi, Respon Spektrum, DEEPSOIL



ABSTRACT

ANDI ALIFIA RAMADHANTI HARIS. *Study of Seismic Site Response in Makassar Barombong Bridge Using Elastic Equivalent Linear Method* (supervised by Dr. Eng. Ardy Arsyad, S.T., M.Eng.Sc.)

Geographically, the Barombong Bridge located in Makassar City is far from the main source of the Sulawesi Island's tectonic earthquake, which can be said to be a region with relatively small earthquakes, but it does not mean free from potentially devastating seismic effects. Soft surfaces tend to have the effect of amplification and de-amplification of seismic wave retrenchment from the bottom of the rock to the soil surface. In order to minimize the risk of earthquake hazards in the city of Makassar especially around the bridge of Barombong Makassar, it is necessary to study the spectral response using the Elastic Equivalent Linear (EL) method.

In carrying out this research, the spectrum response analysis is performed using DEEPSOIL software with the linear equivalent elastic method. Soil parameters are obtained through field and laboratory testing. In addition, in obtaining the V_s value, correlation is performed with the N-SPT value through the NovoSPT software. As well as earthquake data from BMKG recordings in 2015 that are scaled into deterministic earthquakes data and 2500 year period seismic data. The results of this spectral response analysis are then compared with the spectrum response design based on SNI 1726:2019.

Amplification factor for deterministic earthquakes in the short period (0.2 seconds) ranges between 1,114 – 1,494 and in the long period (1 second) ranges between 1,292 – 1,360. Whereas for the earthquake re-period of 2500 years in the short period (0,2 seconds) the amplification factor ranges from 1,093 – 1,228, in the longer period (1 seconds) ranges from 1,517 – 1,757. The comparison of spectral acceleration for the deterministic seismic of the study in a short period and a long period is smaller than the value of the spectrum of design according to SNI 1726:2019. Meanwhile the re-period of 2500 years of earthquakes obtained in a short period greater than the acceleration value of the spectrum design based on SNI 1726:2019, while for the long period only the north-south direction of which the value is greater that of the acceleration of the design spectrum according to SNI 1726.2019

Keywords: Earthquake, Amplification, Response Spectrum, DEEPSOIL



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xv
KATA PENGANTAR.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Definisi Gempa Bumi.....	4
2.1.1. Klasifikasi Gempa Bumi	4
2.2 Sejarah Kegempaan di Indonesia	5
2.3 Sejarah Kegempaan di Kota Makassar.....	7
2.4 Kecepatan Gelombang Geser (Vs).....	8
2.4.1 Korelasi Kecepatan Gelombang Geser dengan Nilai N-SPT.....	9
2.5 NovoSPT	10
2.5.1 Database Korelasi Antara Kecepatan Gelombang Geser dengan N-SPT.....	10
2.6 Analisis Respon Situs Terhadap Gempa.....	12
2.6.1 Analisis Respon Situs dengan Metode Elastik Ekuivalen Linear	14
2.7 DEEPSOIL	22
2.7.1 Metode Perhitungan Respon Spektrum.....	22
2.7.2 Model Tanah.....	23
2.7.3 Aturan Masing dan Non-Masing.....	26
2.7.4 Kurva Referensi	29
BAB III METODE PENELITIAN.....	40
3.1 Lokasi Penelitian	40
3.2 Pengumpulan Data	40
3.3 Peralatan yang Digunakan.....	48
3.4 Penentuan Parameter Spektral Desain Berdasarkan SNI 1726:2019	48
3.5 Flowchart Penelitian.....	53
3.6 Prosedur Penggunaan Software DEEPSOIL	54
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	65
Analisis Respon Spektrum	65
4.1.1. Time History	65
4.1.2. Response Spectra	69
4.1.3. Profile Plots.....	75



4.2.	Perbandingan Hasil Penelitian dengan SNI 1726:2019.....	78
4.2.1.	Perbandingan Hasil Penelitian dengan SNI 1726:2019 untuk Gempa Deterministik	78
4.2.2.	Perbandingan Hasil Penelitian dengan SNI 1726:2019 untuk Gempa Periode Ulang 2500 Tahun	79
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		81
5.1.	Kesimpulan.....	81
5.2.	Saran	82
DAFTAR PUSTAKA		83
LAMPIRAN.....		85



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Peta Tektonik Wilayah Indonesia dari Data Geodetik 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 <i>Sliprate</i> -nya	8
Gambar 5.	Proses Pembiasan yang Menghasilkan Perambatan Gelombang Hampir Vertikal di Dekat Permukaan Tanah	13
Gambar 6.	Representasi Skema Pemodelan Ekuivalen-Linear dari Perilaku Tegangan-Regangan Tanah : (a) Histeresis geser-tegangan-ketegangan loop (b) Plot Kurva dan Rasio Redaman (DR) yang Dinormalisasi (G/G_{max}) atau Modulus Reduction (MR)	17
Gambar 7.	Iterasi Menuju Modulus Geser yang Kompatibel dengan Regangan dan Rasio Redaman dalam Analisis Linier Ekuivalen.....	18
Gambar 8.	Pengaruh Berbagai Faktor Pada Modulus Geser Pasir (Berdasarkan Hardin dan Drnevich)	31
Gambar 9.	Variasi Modulus Geser dengan Regangan Geser Untuk Pasir.....	31
Gambar 10.	Pengaruh Berbagai Faktor Pada Rasio Redaman Untuk Pasir	32
Gambar 11.	Pengaruh <i>Confining Pressure</i> Pada Rasio Redaman Pasir Jenuh (Berdasarkan Hardin dan Drnevich).....	33
Gambar 12.	Pengaruh <i>Confining Pressure</i> Pada Rasio Redaman Pasir Kering ..	33
Gambar 13.	Rasio Redaman Untuk Pasir	34
Gambar 14.	Estimasi (a) Pengurangan Modulus yang Dinormalisasi dan (b) Kurva Redaman Material.....	36
Gambar 15.	Pengaruh Rasio Overkonsolidasi pada (a) Modulus yang Dinormalisasi Reduksi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi.....	37
Gambar 16.	Pengaruh Frekuensi Pemuatan pada (a) Pengurangan Modulus yang Dinormalisasi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi	38
Gambar 17.	Pengaruh Jumlah Siklus Pemuatan pada (a) Modulus yang Dinormalisasi Reduksi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi.....	38
Gambar 18.	Lokasi Penelitian.....	40
Gambar 19.	Data Borelog	41
Gambar 20.	<i>Time History</i> Gempa Deterministik	43
Gambar 21.	<i>Time History</i> Gempa Periode Ulang 2500 Tahun	43
Gambar 22.	Aplikasi NovoSPT	44
	23. <i>Input Data</i>	45
	24. Tampilan Memilih Korelasi Untuk Berbagai Paramater Tanah.....	45
	25. Korelasi V_s dengan N-SPT dari Berbagai Sumber untuk Berbagai Jenis Tanah.....	46



Gambar 26. Plot Grafik Vs Pada Setiap Kedalaman Tanah.....	46
Gambar 27. Spektrum Respons Desain	51
Gambar 28. Spektrum Respon Desain Jembatan Barombong Makassar untuk Kelas SD Tanah Sedang berdasarkan PUSKIM	51
Gambar 29. Spektrum Respon Desain Jembatan Barombong untuk Kelas SD Tanah Sedang.....	52
Gambar 30. <i>Flowchart</i> Penelitian.....	53
Gambar 31. Aplikasi DEEPSOIL	54
Gambar 32. Pemilihan Tipe Analisis	55
Gambar 33. Profil Tanah.....	55
Gambar 34. Layer Properties pada Lapisan Pertama dengan Kurva Referensi Seed and Idriss (Mean)	57
Gambar 35. Kurva G/Gmax pada Lapisan Pertama dengan Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Mean)	57
Gambar 36. Kurva Damping Ratio pada Lapisan Pertama dengan Kurva Referensi Seed and Idriss 1970 (Mean)	58
Gambar 37. Layer Properties pada Lapisan Kedua dengan Kurva Referensi Darendeli, 2001.....	58
Gambar 38. Kurva G/Gmax pada Lapisan Kedua dengan Kurva Referensi Darendeli, 2001.....	59
Gambar 39. Kurva Damping Ratio pada Lapisan Kedua dengan Kurva Referensi Darendeli, 2001.....	59
Gambar 40. Layer Properties pada Lapisan Ketiga dengan Kurva Referensi Seed and Idriss (Mean)	60
Gambar 41. Layer Properties pada Lapisan Bedrock	60
Gambar 42. Plot Profil Tanah	61
Gambar 43. Pemilihan <i>Input Motion</i>	61
Gambar 44. Definisi Kontrol Analisis	62
Gambar 45. <i>Analysis Running</i>	63
Gambar 46. Hasil Analisis	64
Gambar 47. <i>Time History</i> Gempa Deterministik dengan V_S Bedrock 760 m/s Pada Arah (a) Horizontal Timur – Barat (b) Horizontal Utara – Selatan (c) Vertikal Atas – Bawah.....	66
Gambar 48. <i>Time History</i> Gempa Periode Ulang 2500 Tahun dengan V_S bedrock 760 m/s Pada Arah (a) Horizontal Timur – Barat (b) Horizontal Utara – Selatan (c) Vertikal Atas – Bawah	68
Gambar 49. <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Timur – Barat.....	70
Gambar 50. <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Horizontal Utara – Selatan.....	70
Gambar 51. <i>Response Spectra</i> Gempa Deterministik pada Arah Vertikal Atas – Bawah	71
Gambar 52. <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 2500 Tahun Pada Arah Horizontal Timur – Barat.....	73



Gambar 53. <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 2500 Tahun Pada Arah Horizontal Utara – Selatan.....	73
Gambar 54. <i>Response Spectra</i> Gempa Periode Ulang 2500 Tahun Pada Arah Vertikal Atas – Bawah.....	74
Gambar 55. <i>Profile Plots</i> Gempa Deterministik Pada Arah Horizontal Timur – Barat.....	76
Gambar 56. <i>Profile Plots</i> Gempa Deterministik Pada Arah Horizontal Utara – Selatan.....	76
Gambar 57. <i>Profile Plots</i> Gempa Deterministik Pada Arah Vertikal Atas – Bawah	76
Gambar 58. <i>Profile Plots</i> Gempa Periode Ulang 2500 Tahun Pada Arah Horizontal Timur – Barat.....	77
Gambar 59. <i>Profile Plots</i> Gempa Periode Ulang 2500 Tahun Pada Arah Horizontal Utara – Selatan.....	77
Gambar 60. <i>Profile Plots</i> Gempa Periode Ulang 2500 Tahun Pada Arah Vertikal Atas – Bawah	78
Gambar 61. Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Secara Deterministik dengan SNI 1726:2019	79
Gambar 62. Perbandingan Respon Spektrum Permukaan Gempa Periode Ulang 2500 Tahun dengan SNI 1726:2019	80



DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Korelasi Antara N-SPT dan Nilai V_s	11
Tabel 2.	Perhitungan Nilai N-SPT Rata-Rata.....	41
Tabel 3.	Data Uji Laboratorium.....	42
Tabel 4.	Kecepatan Gelombang Geser (V_s) Rata-Rata	47
Tabel 5.	Klasifikasi Situs Berdasarkan SNI 1726:2019	47
Tabel 6.	Koefisien Situs, F_a	48
Tabel 7.	Koefisien Situs, F_v	49
Tabel 8.	Parameter Spektral Desain berdasarkan SNI 1726:2019.....	50
Tabel 9.	Properti Tanah Tiap Lapisan.....	56
Tabel 10.	Nilai PGA dan Faktor Amplifikasi Gempa Deterministik.....	67
Tabel 11.	Nilai PGA dan Faktor Amplifikasi Gempa Periode Ulang 2500 Tahun.....	69
Tabel 12.	Faktor Amplifikasi Gempa Deterministik	71
Tabel 13.	Faktor Amplifikasi Gempa Periode Ulang 2500 Tahun	74



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
ξ	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>
τ	Tegangan geser
G_0	Modulus geser awal
γ	Regangan geser
β	Parameter kurva tegangan-regangan
s	Parameter kurva tegangan-regangan
γ_r	Regangan referensi (%)
σ'_v	Tegangan vertikal efektif
b	Parameter tergantung tekanan/regangan referensi
	Parameter tergantung tekanan/kurva redaman
	Tegangan geser maksimum



θ_τ	Fungsi kurva fitting dari model GQ/H yang dinormalisasi
$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$	Parameter kurva fitting dari fungsi θ_τ untuk model GQ/H yang dinormalisasi
$F(\gamma_m)$	Faktor reduksi yang dihitung sebagai fungsi dari γ_m
ξ_{Masing}	Redaman histeretik yang dihitung menggunakan aturan Masing berdasarkan kurva reduksi modulus
γ_m	Regangan geser maksimum yang dialami pada waktu tertentu
$G(\gamma_m)$	Modulus geser saat γ_m
P_1, P_2, P_3	Parameter <i>fitting</i>
γ_{rev}	Regangan geser balik
τ_{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
γ_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 di ukur di laboratorium
$G_{max lab}$	Modulus regangan kecil yang diukur di laboratorium
$G_{max field}$	Modulus regangan kecil yang diukur di lapangan
e	<i>Void ratio</i>
	<i>Overconsolidation Ratio</i>



a	Parameter yang bergantung pada indeks plastisitas tanah
σ'_m	Rata-rata tegangan efektif utama (psf)
K_2	Parameter yang dipengaruhi oleh regangan
λ_{max}	Rasio redaman maksimum
N	Jumlah siklus pemuatan
σ'_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 (%)
γ_d	<i>Dry density</i> (gr/cm ³)
Cu	<i>Shear Strength</i>
φ'	<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
	Parameter respon spektral pada periode pendek



S_S	Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek
S_1	Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1 detik
MCE_R	<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 Borlog Hasil Pengujian SPT 85



KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrahiim

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan dengan baik Tugas Akhir dengan judul **“Studi Respon Spektrum Gempa Pada Jembatan Barombong Makassar dengan Menggunakan Metode Elastic Equivalent Linear”**. Tak lupa pula penulis kirimkan shalawat serta salam kepada Nabiullah Muhammad Shallallahu ‘Alaihi Wa Sallam beserta keluarga, sahabat, dan orang-orang yang istiqamah mengikutinya hingga hari ini.

Tugas Akhir ini dibuat sebagai salah satu syarat menyelesaikan studi strata satu di Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Dalam penyusunan skripsi ini tidak dapat dipungkiri terdapat kesulitan yang dihadapi penulis. Namun berkat dukungan dan arahan dari berbagai pihak penulis mampu melewati kesulitan tersebut. Penulis menyampaikan teruma kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu, khususnya kepada:

1. Kedua orang tua saya tercinta, Ayahanda Andi Haris, Ibunda Ruhana, serta saudara-saudari saya A. Muh. Atila Haris dan A. Putrizky Ilmi Haris atas kasih sayang dan dukungan yang tak terbendung kepada saya.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Prof. Dr. H. Muh. Wihardi Tjaronge, S.T., M. Eng. Selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Dr. Eng. Ardy Arsyad, S.T., M.Eng.Sc., selaku pembimbing yang telah meluangkan banyak waktu serta memberikan arahan, saran dan juga nasehat sejak awal penelitian hingga penyelesaian tugas akhir ini.
5. Dosen dan staf pengajar, serta pegawai Departemen Teknik Sipil yang telah memberikan segala ilmu pengetahuan dan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung selama proses perkuliahan.

...ra-saudariku ENTITAS, yang selalu berbagi cerita, menghadirkan canda
...ya, senantiasa memberikan semangat, dan kebersamai selama
...mpuh perkuliahan.



7. Nurul Azisah Nasir sebagai teman sekaligus saudara yang sudah menemani, mendengar, dan memberikan semangat yang luar biasa bagi penulis sejak SMA.
8. Raiza Hasina Putri, Amaliah Ramadhani, Muh. Fadli Alkautsar yang telah memberikan banyak warna dan cerita selama masa perkuliahan.
9. A. Ariqah Hanafia, A. Ersyaputri, Muchlisa Aulia, Nurul Ainnayah, Putri Anugrah, dan Rivaldo Haurissa selaku teman SMA penulis, yang hingga saat ini selalu memberikan canda tawa, semangat, dan juga dukungan.
10. Aisa, Agung Dwi Putra, dan Wirda Aulia selaku rekan tim Geoteknik Gempa 2020 atas kerja sama yang sangat baik dan telah banyak memberikan dukungan, banyak semangat, serta menjadi sarana diskusi yang luar biasa bagi penulis.
11. Kak Mufidatul, Kak Sara, Kak Mutiara, Kak Jaemshon, Kak Yusril, Kak Taufiq, Kak Sultan, Nushrah, Melda, Kelvin, Tenriyana, Septi, Aldrin, Michael selaku rekan Asisten Laboratorium Mekanika Tanah yang senantiasa membantu, menyemangati, dan menambah wawasan penulis.
12. Teman-teman KKD Geoteknik, yang telah memberikan semangat serta saran dan masukan.
13. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu-persatu dengan semua bantuan dan dukungan yang diberikan hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.

Tiada kata yang dapat mendeskripsikan rasa terima kasih penulis selain memohon kepada Allah Subhaanahu Wa Ta'ala agar selalu melimpahkan kasih sayang-Nya kepada kita semua, Aamiin. Akhir kata penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun akan menyempurnakan penulisan skripsi ini serta bermanfaat bagi penulis dan para pembaca.

Gowa, 14 Agustus 2024

Andi Alifia Ramadhanti Haris



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang berada di pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu lempeng Hindia-Australia, lempeng Pasifik, dan lempeng Eurasia. Berdasarkan kondisi tersebut, Pulau Sulawesi memiliki aktivitas kegempaan yang tinggi, itu disebabkan karena Pulau Sulawesi merupakan pusat benturan dari ketiga lempeng tektonik yang melewati Indonesia. Pertemuan tiga lempeng tersebut berakibat pada cukup besarnya potensi Indonesia mengalami gempa bumi.

Lokasi tinjau penelitian ini adalah Kota Makassar atau lebih tepatnya berada di Jembatan Barombong Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Secara geografis, Kota Makassar terletak jauh dari sumber gempa tektonik utama Pulau Sulawesi, yaitu Palu-Koro Sulawesi Tengah dan zona subduksi Sulawesi Utara. Akan tetapi, Kota Makassar dikelilingi oleh patahan-patahan yang mengakibatkan seringnya terjadi gempa secara tiba-tiba. Patahan-patahan tersebut, seperti Patahan Walanae di Teluk Bone, Patahan Matano di Danau Matano, dan Patahan Sorowako di Luwu Timur. Maka dari itu, Kota Makassar dapat dikatakan sebagai wilayah yang aktivitas kegempaanannya cukup kecil, tetapi bukan berarti bebas dari potensi gempa yang merusak.

Dilihat dari kondisi geologi dan kegempaanannya, Kota Makassar sebagian besar dibangun di atas endapan aluvium berumur holosen. Endapan permukaan yang lunak cenderung memiliki efek pembesaran (amplifikasi) dan penurunan (de-amplifikasi) perambatan gelombang seismik yang merambat dari dasar batuan (*bedrock*) ke permukaan tanah. Karena adanya efek pembesaran tersebut, maka akan memberikan dampak kerusakan yang cukup serius.

Gempa bumi berkekuatan 5,9 SR pernah mengguncang barat daya Sulawesi Selatan pada 12 Desember 2010, di mana pusat gempa berada di wilayah laut yaitu pada posisi 6,11 LS dan 117,55 BT atau berjarak 232 km arah barat daya dari Kota

serta berjarak 265 km arah timur dari Sumbawa Besar Nusa Tenggara dan kedalaman 19 km dari permukaan laut. Selain itu, untuk waktu yang terdahulu terdapat beberapa peristiwa gempa bumi dengan kekuatan > 6 SR yang



terjadi di sekitar lajur sesar Walanae, seperti gempa Bulukumba (1828), gempa Tinambung (1967), gempa Majene (1969), gempa Mamuju (1972, 1974), serta gempa Pinrang (1997). Gempa-gempa tersebut dapat memberikan dampak kerusakan bagi Kota Makassar, baik itu kerusakan struktur maupun kerusakan infrastruktur.

Maka untuk memperkecil resiko bahaya gempa bumi di Kota Makassar khususnya di sekitar Jembatan Barombong Makassar, perlu dilakukan upaya studi kegempaan, salah satunya yaitu studi respon spektrum menggunakan *software* DEEPSOIL dengan metode Elastik Ekuivalen Linear (EL). Untuk menunjukkan respon endapan tanah di Kota Makassar terhadap gempa bumi, maka studi respon spektrum ini tepat untuk dilakukan. 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 memberi informasi mengenai respon spektrum dan memperkecil resiko bahaya gempa di Kota Makassar khususnya sekitar Jembatan Barombong Makassar.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, maka dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kondisi profil endapan tanah pada Jembatan Barombong Kota Makassar berdasarkan data geoteknik?
2. Bagaimana pengaruh kondisi tanah terhadap respon spektrum gempa pada Jembatan Barombong Kota Makassar dengan menggunakan metode Analisis Respon Elastik Ekuivalen Linear?
3. Bagaimana perbandingan antara respon spektra permukaan Jembatan Barombong 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 sebagai berikut:

1. Mengetahui profil endapan tanah pada Jembatan Barombong Kota Makassar berdasarkan data geoteknik.
2. Mengetahui pengaruh kondisi tanah terhadap respon gempa pada Jembatan Barombong Kota Makassar dengan menggunakan metode Analisis Respon Elastik Ekuivalen Linear.
3. Mengetahui perbandingan antara respon spektra permukaan Jembatan Barombong 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 adalah sebagai berikut:

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 Jembatan Barombong 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 Jembatan Barombong tahun 2023.
2. Data gempa berupa *time history* gempa pada Kota Makassar yang diperoleh dari BMKG Wilayah IV Makassar.

Analisis respon spektrum dilakukan dengan metode Analisis Respon Elastik Ekuivalen Linear menggunakan *software* DEEPSOIL (University of Illinois at Urbana-Champaign).



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Gempa Bumi

Gempa bumi merupakan peristiwa terjadinya getaran atau guncangan di permukaan bumi yang disebabkan oleh pelepasan energi dari dalam secara tiba-tiba sehingga menciptakan gelombang seismik. Berdasarkan peristiwa penyebab terjadinya gempa dibagi menjadi 3 (tiga), yaitu gempa vulkanik akibat aktivitas gunung api; gempa tektonik akibat adanya dislokasi pergeseran lapisan bumi secara tiba-tiba karena adanya tarikan atau tekanan; serta gempa reruntuhan atau terban akibat tanah longsor dan runtuhnya atap gua atau terowongan di bawah tanah.

2.1.1. Klasifikasi Gempa Bumi

Lebih jelasnya, berdasarkan penyebab terjadinya, gempa dibagi menjadi 3 (tiga), yaitu:

a. Gempa Bumi Tektonik

Gempa bumi tektonik merupakan gempa bumi yang disebabkan oleh dislokasi atau perpindahan pergeseran lapisan bumi yang tiba-tiba terjadi dalam struktur bumi sebagai akibat adanya tarikan atau tekanan. Pergeseran lapisan bumi dapat secara vertikal ataupun horizontal (Almufid & Lukiyono, 2015).

Pada kulit bumi, proses geologi seperti terkekang dan terkumpulnya tegangan serta regangan sering terjadi. Apabila terjadi peningkatan pada tegangan dan regangan tersebut, hal itu dapat melampaui batas kekuatan ambang lapisan bumi kemudian akan terjadi perbesaran (dilatasi) sepanjang bidang-bidang terlemah, itulah yang disebut sebagai patahan. Gempa bumi di Indonesia, sebagian besar merupakan gempa bumi tektonik.

b. Gempa Bumi Vulkanik

Gempa bumi vulkanik merupakan gempa bumi yang disebabkan oleh meningkatnya fluida pada gunung api, baik itu berupa gas, uap, ataupun magma yang berasal dari dalam bumi menuju ke atas



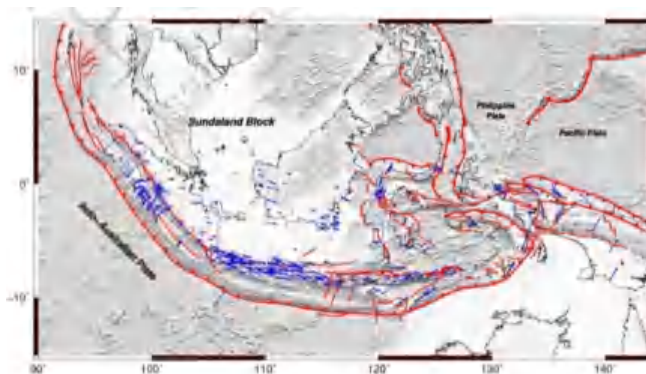
(permukaan bumi). Gempa bumi vulkanik merupakan gempa bumi yang tergolong lemah, sehingga kerusakan dan kerugian material lebih diakibatkan oleh bahan-bahan hasil letusan.

c. Gempa Bumi Reruntuhan atau Terban

Gempa bumi reruntuhan dapat dikatakan jarang terjadi dan kekuatan yang dihasilkan dari gempa ini cukup lemah. Gempa reruntuhan umumnya terjadi pada daerah-daerah yang terdapat reruntuhan tanah, seperti daerah kapur, gua kapur, dan daerah pertambangan.

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).



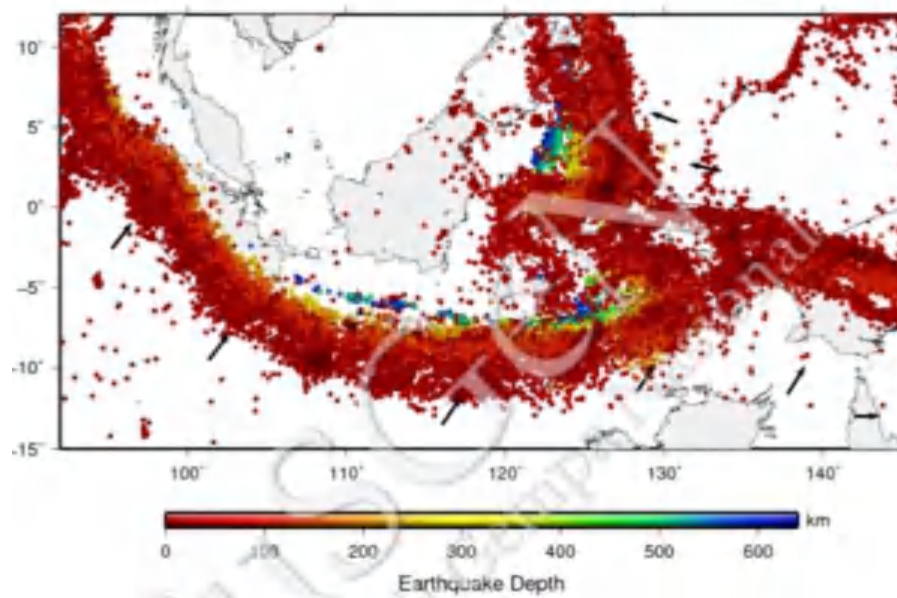
Tim Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

r 1. Peta Tektonik Wilayah Indonesia dari Data Geodetik 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

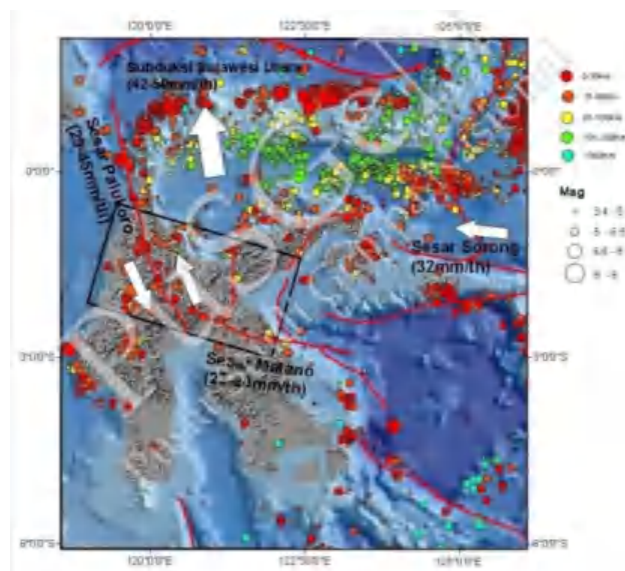
Zona pertemuan antar lempeng membentuk palung (*trench*) yang disebut zona subduksi dan merupakan zona sumber gempa bumi di laut. Akibat tumbukan lempeng tersebut, terbentuk sesar aktif baik yang terdapat di darat maupun di lautan. Sesar aktif pada lempeng benua diantara zona subduksi dan rangkaian Busur Vulkanik Indonesia, serta zona prisma 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).

2.3 Sejarah Kegempaan di Kota Makassar

Pulau Sulawesi tersusun oleh tatanan tektonik yang kompleks. Strukturstruktur 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).

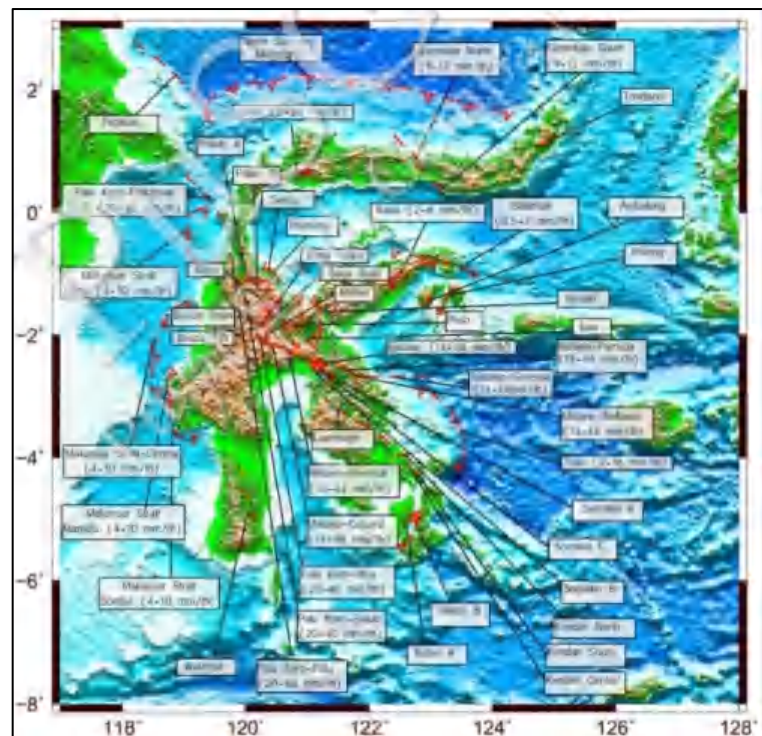


Tim Pusat Studi Gempa Nasional (2017)

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 sinsistral (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

Kecepatan Gelombang Geser (V_s)

Amplitudo gerakan tanah akibat terjadinya gempa pada permukaan sangatlah



dipengaruhi oleh sifat tanah itu sendiri, seperti kepadatan (*density*) dan kecepatan gelombang geser (*shear wave*) di permukaan tanah. Di bidang ilmu geofisika, dalam menentukan karakteristik dinamik tanah di suatu daerah, maka harus didasarkan dari kecepatan rata-rata gelombang geser. Nilai kecepatan gelombang geser biasanya disimbolkan dengan V_s .

Dalam menentukan jenis tanah, seperti tanah keras, tanah sedang, atau tanah lunak, kecepatan gelombang geser diperlukan. Nilai V_s bergantung dengan kondisi fisik batuan sehingga dapat diprediksi berdasarkan parameter geologi dan morfologi.

Hasil analisis kecepatan gelombang geser dapat digunakan untuk mengetahui bagaimana potensi kerusakan apabila gempa bumi terjadi. Hal tersebut disebabkan karena kerusakan akibat gempa tidak hanya dipengaruhi oleh jarak episenter dan magnitudo gempa, tetapi kondisi tanah dari lokasi tersebut juga sangat mempengaruhi. Maka dari itu, pemetaan nilai kecepatan gelombang geser (V_s) diperlukan dalam menggambarkan kondisi lokasi daerah tersebut. Semakin besar nilai V_s dari suatu daerah maka guncangan yang diakibatkan oleh gempa makin lemah.

2.4.1 Korelasi Kecepatan Gelombang Geser dengan Nilai N-SPT

Di Indonesia, pengukuran kecepatan gelombang geser (V_s) biasanya menggunakan pengukuran geofisika, seperti *Seismic Down Hole* dan *Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW)*. Meskipun demikian, peratan pengukuran yang sebelumnya disebutkan, tidaklah tersedia cukup banyak hingga menyebabkan pengukuran tersebut umunya sangatlah mahal dilakukan. Di samping itu, metode *Standard Penetration Method (SPT)* merupakan pengukuran yang paling sering dilakukan karena peralatannya sangat banyak tersedia dan cukup mudah dilakukan.

Banyak ahli dan *engineers* telah melakukan beberapa penelitian untuk menghasilkan korelasi nilai SPT untuk menghitung nilai gelombang geser (V_s). Banyak korelasi yang tersedia yang untuk jenis tanah tertentu, tetapi banyak juga korelasi yang tersedia tanpa batasan jenis tanah tertentu. Pada penelitian ini korelasi nilai kecepatan gelombang geser (V_s) dengan



nilai N-SPT dihasilkan melalui *software* NovoSPT.

2.5 NovoSPT

Perkembangan teknologi yan ada seperti perangkat lunak atau *software*, sangatlah membantu dalam menentukan rentang nilai korelasi dari parameter tanah, salah satunya adalah NovoSPT. Aplikasi NovoSpt merupakan perngkat lunak geoteknik yang mudah untuk digunakan untuk mencari parameter-parameter tanah berdasarkan jumlah pukulan SPT. Dalam penelitian ini, parameter tanah yang dimaksud adalah nilai kecepatan gelombang geser (V_s).

Software ini dibuat berdasarkan lebih dari 70 makalah yang diterbitkan dan buku referensi geoteknik dan mengumpulkan lebih dari 320 korelasi SPT dengan berbagai sifat tanah. Setelah melakukan penginputan jenis tanah dan nilai SPT, maka program ini dapat menampilkan hasil korelasi untuk beberapa jenis parameter tanah dari beberapa teori. Berikut merupakan beberapa rumus perhitungan korelasi nilai V_s berdasarkan nila N-SPT dari beberapa peneliti pada *software* NovoSPT.

2.5.1 Database Korelasi Antara Kecepatan Gelombang Geser dengan N-SPT

Dalam memperkirakan nilai kecepatan gelombang geser (V_s) berdasarkan dari jumlah pukulan SPT, terdapat 59 persamaan yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai V_s . Korelasi yang dihasilkan oleh Kanai dll (1966) merupakan korelasi terlama, sedangkn korelasi terbaru dihasilkan oleh Unal Dikmen (2008).

Hampir sebagian besar korelasi yang dihasilkan dari studi kasus berdasarkan pengujian lapangan pada daerah geografi tertentu. Korelasi tersebut diketahui sesuai dengan area tersebut. Misalnya, Anbazhagan dan Sitharam (2008) yang menghasilkan korelasi untuk tanah di Bangalore, dan *National Centre for Researh on Earthquake* (NCREE) yang menghasilkan korelasi berdasarkan 200 *boreholes* di Taiwan. Maka, persamaan-persamaan korelasi tersebut bisa saja tidak sesuai pada daerah-daerah lain dan harus digunakan dengan hati-hati.



Jadi, meskipun banyak persamaan yang tersedia dan dihasilkan untuk memperkirakan nilai kecepatan gelombang geser (V_s), maka tergantung *geotechnical engineer* yang harus berhati-hati mengaplikasikan persamaan korelasi tersebut dan harus memilih yang manakah paling sesuai dalam menentukan V_s berdasarkan hasil SPT. Berikut merupakan persamaan korelasi V_s dengan nilai SPT.

Tabel 1. Korelasi Antara N-SPT dan Nilai V_s

Author(s)	All soils	Sand	Silt	Clay
1 Shibata (1970)	–	$V_s = 31.7 N^{0.54}$	–	–
2 Ohba and Toriuma (1970)	$V_s = 84 N^{0.31}$	–	–	–
3 Imai and Yoshimura (1975)	$V_s = 76 N^{0.33}$	–	–	–
4 Ohta <i>et al</i> (1972)	–	$V_s = 87.2 N^{0.36}$	–	–
5 Fujiwara (1972)	$V_s = 92.1 N^{0.337}$	–	–	–
6 Ohsaki and Iwasaki (1973)	$V_s = 81.4 N^{0.39}$	–	–	–
7 Imai <i>et al</i> (1975)	$V_s = 89.9 N^{0.341}$	–	–	–
8 Imai (1977)	$V_s = 91 N^{0.337}$	$V_s = 80.6 N^{0.331}$	–	$V_s = 80.2 N^{0.292}$
9 Ohta and Goto (1978)	$V_s = 85.35 N^{0.348}$	–	–	–
10 Seed and Idriss (1981)	$V_s = 61.4 N^{0.5}$	–	–	–
11 Imai and Tonouchi (1982)	$V_s = 97 N^{0.314}$	–	–	–
12 Sykora and Stokoe (1983)	–	$V_s = 100.5 N^{0.29}$	–	–
13 Jinan (1987)	$V_s = 116.1(N+0.3185)^{0.202}$	–	–	–
14 Okamoto <i>et al</i> (1989)	–	$V_s = 125 N^{0.3}$	–	–
15 Lee (1990)	–	$V_s = 57.4 N^{0.49}$	$V_s = 105.64 N^{0.32}$	$V_s = 114.43 N^{0.31}$
16 Athanasopoulos (1995)	$V_s = 107.6 N^{0.36}$	–	–	$V_s = 76.55 N^{0.445}$
17 Sisman (1995)	$V_s = 32.8 N^{0.51}$	–	–	–
18 Iyisan (1996)	$V_s = 51.5 N^{0.516}$	–	–	–
19 Kanai (1966)	$V_s = 19 N^{0.6}$	–	–	–
20 Jafari <i>et al</i> (1997)	$V_s = 22 N^{0.85}$	–	–	–
21 Kiku <i>et al</i> (2001)	$V_s = 68.3 N^{0.292}$	–	–	–
22 Jafari <i>et al</i> (2002)	–	–	–	$V_s = 27 N^{0.73}$
23 Hasancebi and Ulusay (2006)	$V_s = 90 N^{0.309}$	$V_s = 90.82 N^{0.319}$	–	$V_s = 97.89 N^{0.269}$
24 Ulugergerli and Uyanik (2007)	$V_{SU} = 23.291 \ln(N) + 405.61$ $V_{SL} = 52.9 e^{-0.011N}$	–	–	–

Sumber: Dikmen, U (2009)

2.5.1.1 Korelasi Hasancebi dan Ulusay (2007)

Korelasi nilai kecepatan gelombang geser (V_s) dengan nilai SPT yang dihasilkan oleh Hasancebi dan Ulusay (2007) merupakan lanjutan dari penelitian terkait amplifikasi yang dilakukan sebelumnya (Hasancebi 2005). Lokasi penelitian dengan aktivitas seismik yang tinggi di Yenisehir, ditemukan berada pada dataran aluvial yang berlokasi di kawasan Marmara, Turki.

Yenisehir berlokasi pada kawasan *first-degree earthquake* di Turki.

Lokasi penelitian ini dikelilingi dengan beberapa patahan aktif. Pada tahun 1999, Gempa Kocaeli di kawasan Marmara, menghasilkan banyaknya korban jiwa dan kerusakan parah pada struktur bangunan, yang terasa hingga



di Yenisehir.

Penelitian yang dilakukan Hasancebi dan Ulusay (2007) ini menggabungkan 97 data (V_s dan N-SPT). Korelasi yang dihasilkan berasal dari analisis regresi sederhana untuk *database* yang telah ada. Karena beberapa data berasal dari lapisan lanau sudah tersedia, maka kategori tersebut tidak dimasukkan dalam evaluasi. Maka dihasilkan 3 kategori tanah, seperti berikut.

Untuk semua jenis tanah :

$$V_s = 90N^{0,309} \quad (r = 0,73) \quad (1)$$

Untuk tanah berpasir :

$$V_s = 90,8N^{0,319} \quad (r = 0,65) \quad (2)$$

Untuk tanah lempung :

$$V_s = 97,9N^{0,269} \quad (r = 0,75) \quad (3)$$

2.6 Analisis Respon Situs Terhadap Gempa

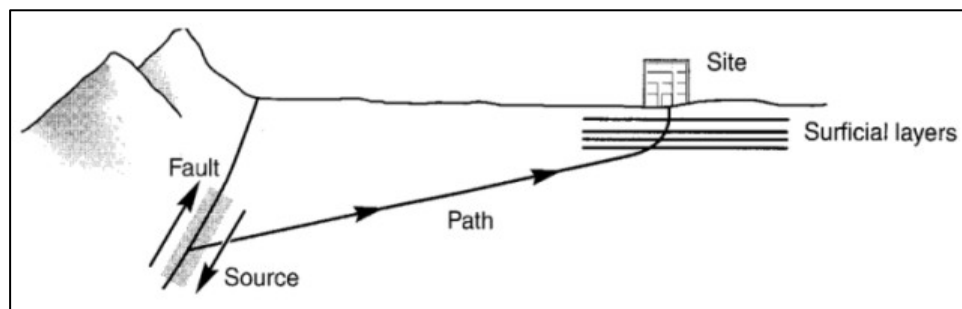
Menurut Prawirodikromo (2017), respon spektrum adalah spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik/plot antara periode getaran struktur dan respon maksimumnya pada rasio redaman dan beban gempa tertentu. Sedangkan menurut Mario Paz and Leigh (2004), respon spektrum adalah plot respon maksimum (perpindahan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

sumbernya ke segala arah. Saat mencapai batas antara bahan geologis berbeda, gelombang dipantulkan dan dibiaskan. Karena kecepatan 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.

kan analisis biasanya melibatkan operator ke pusat komputer, mengetik (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).

2.6.1 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:

1. Kolom tanah 1-D dimodelkan sebagai kontinum berlapis horizontal.
2. 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).
3. Skema solusi iteratif yang didefinisikan secara unik digunakan untuk menggabungkan variasi nonlinier dan spasial atau waktu aktual dalam sifat tanah.
4. 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.

5. 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.

6. 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 $0,4\%$)
7. 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.
8. 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

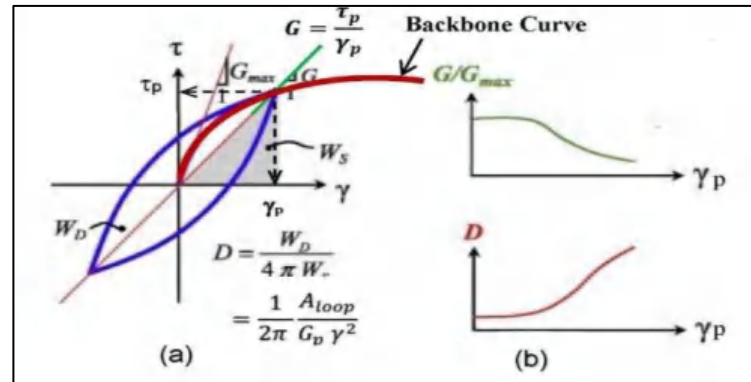


parameter ini tidak berubah dari yang awalnya ditentukan saat guncangan tanah berlangsung. Ini juga berarti bahwa kurva regangan tegangan geser tanah linier pada awal gerakan dan tetap linier selama seluruh periode guncangan. Tidak ada degradasi dalam kekakuan tanah atau perubahan redaman tanah yang 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)

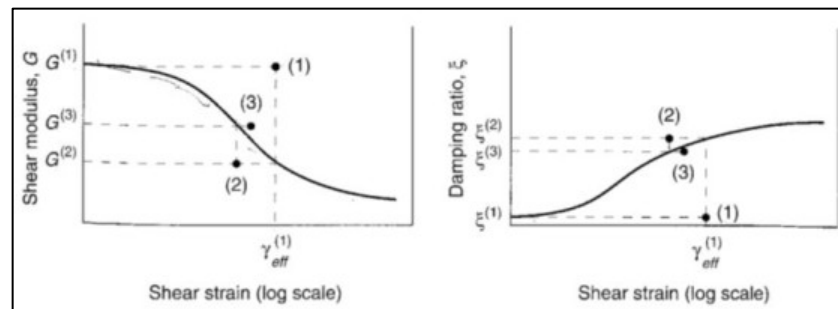
Gambar 6. Representasi Skema Pemodelan Ekuivalen-Linear dari Perilaku Tegangan-Regangan Tanah : (a) Histeresis geser-tegangan-ketegangan loop (b) Plot Kurva dan Rasio Redaman (DR) yang Dinormalisasi (G/G_{max}) atau Modulus Reduction (MR)

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 (ξ), sebagai rasio redaman yang menghasilkan kehilangan energi yang sama dalam siklus tunggal seperti loop histeresis aktual.

Karena pendekatan linier mensyaratkan bahwa G dan ξ 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 besarnya 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 linier 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 ξ 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 ξ 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 ξ 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 nonlinear 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 ($<0,3 - 0,4 \text{ g}$) 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 nonlinear 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.

2.7 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.

2.7.1 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) :

$$H(f) = \frac{-f_n^2}{(f^2 - f_n^2) - 2i\xi f f_n} \quad (4)$$

di mana :

$$f_n = \text{frekuensi alami osilator, } f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\xi = \text{rasio redaman, } \xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

k = kekakuan sistem

m = massa

c = redaman kental

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

2.7.2 Model Tanah

2.7.2.1 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 (β) dan s yang menyesuaikan bentuk *backbone curve* (Hashash et al., 2020) :

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s} \quad (5)$$

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



$$\gamma_r = \textit{Reference Strain} \left(\frac{\sigma'_v}{\textit{Reference Stress}} \right)^b \quad (6)$$

di mana :

σ'_v = tegangan vertikal efektif

Reference Stress = tegangan vertikal efektif saat $\gamma_r = \textit{Ref. Stress}$

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) :

$$\xi = \textit{Small Strain Damping Ratio} \left(\frac{1}{\sigma'_v} \right)^d \quad (7)$$

di mana 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 (β), parameter kurva tegangan-regangan (s), parameter tergantung tekanan (regangan referensi) (b), tegangan referensi, dan parameter tergantung tekanan (kurva redaman) (d) (Hashash et al., 2020).

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

Menurut Darendeli (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 τ_{max} dalam persamaan (6)). Parameter pemasangan kurva θ_1 melalui θ_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 τ_{max} , dan θ_1 melalui θ_5 diperlukan untuk membangun kekuatan geser terkoreksi kekuatan geser - kurva regangan geser. Memperoleh τ_{max} mudah dan pengguna hanya perlu menentukan kekuatan geser dari material tanah yang disimulasikan pada regangan besar. Parameter θ_1 melalui θ_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 θ_1 melalui θ_5 . Nilai-nilai ini dapat langsung digunakan dalam bahan histeretik tanah tanpa harus menentukan kekuatan geser acuan - kurva regangan geser. Model material menggunakan τ_{max} , G_0 , dan θ_1 melalui θ_5 untuk membangun kurva kuat geser-regangan geser menggunakan fungsi berikut (Groholski et al, 2016)

:

$$\theta_\tau = \theta_1 + \theta_2 \left\{ \frac{\theta_4 \times \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}}{\theta_3 \theta_5 + \left(\theta_4 \times \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}\right)} \right\} \quad (8)$$

di mana :

θ_τ = fungsi kurva fitting dari model GQ/H yang dinormalisasi

γ_r = regangan referensi, $\gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_0}$

γ = regangan geser

$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ = parameter kurva fitting dari fungsi θ_τ



untuk model GQ/H yang dinormalisasi

Setelah θ_τ ditentukan, kurva kuat geser-regangan geser dibangun sebagai berikut :

$$\tau = \tau_{max} \left[\frac{1}{\theta_\tau} \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right) - \sqrt{\left\{ 1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right\}^2 - 4 \times \theta_\tau \times \frac{\gamma}{\gamma_r}} \right\} \right] \quad (9)$$

di mana :

τ = tegangan geser

τ_{max} = tegangan geser maksimum

θ_τ = fungsi kurva fitting dari model GQ/H yang dinormalisasi

γ = regangan geser

γ_r = regangan referensi, $\gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_0}$

2.7.3 Aturan Masing dan Non-Masing

2.7.3.1 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.

2.7.3.2 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 :

$$\xi_{Masing\ Hysteretic} = F(\gamma_m) * \xi_{Masing} \quad (10)$$

di mana :

- $F(\gamma_m)$ = faktor reduksi yang dihitung sebagai fungsi dari γ_m
 ξ_{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 :

$$F(\gamma_m) = P_1 - P_2(1 - G(\gamma_m)/G_0)^{P_3} \quad (11)$$

di mana,

- γ_m = regangan geser maksimum yang dialami pada waktu tertentu
 $G(\gamma_m)$ = modulus geser saat γ_m
 $P_1, P_2,$ dan P_3 = parameter fitting

Dengan pengaturan $P_1 = 1$ dan $P_2 = 0$, 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) :

$$F(\gamma_m) = P_1(G(\gamma_m)/G_0)^{P_2} \quad (12)$$

di mana,

γ_m = regangan geser maksimum yang dialami pada waktu tertentu

$G(\gamma_m)$ = modulus geser saat γ_m

P_1 dan P_2 = parameter *fitting*

Dengan pengaturan $P_1 = 1$ dan $P_2 = 0$, 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) :

$$\tau = F(\gamma_m) \left[2 \frac{G_0 \left(\frac{\gamma - \gamma_{rev}}{2} \right)^s}{1 + \beta \left(\frac{\gamma - \gamma_{rev}}{2\gamma_r} \right)^s} - \frac{G_0(\gamma - \gamma_{rev})}{1 + \beta \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_r} \right)^s} \right] + \frac{G_0(\gamma - \gamma_{rev})}{1 + \beta \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_r} \right)^s} + \tau_{rev} \quad (13)$$

di mana,

$F(\gamma_m)$ = faktor reduksi

G_0 = modulus geser awal

γ = regangan geser

γ_r = regangan geser referensi

β = faktor tanpa dimensi

s = eksponen tanpa dimensi

γ_{rev} = regangan geser balik

τ_{rev} = tegangan geser balik



2.7.4 Kurva Referensi

2.7.4.1 Seed dan Idriss (1970)

Studi mengenai modulus tanah dan faktor redaman untuk menganalisis respons dinamis telah dilakukan oleh Seed dan Idriss (1970). Dari studi tersebut, diketahui bahwa kasus respon tanah yang melibatkan tidak adanya perpindahan tanah residual, respon 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 seperti *strain amplitude* (γ), *effective mean principal stress* (σ'_m), *void ratio* (e), *number of cycles of loading* (N), serta *degree of saturation* untuk tanah kohesif (S). Sementara itu, terdapat pula faktor lain yang tidak terlalu signifikan seperti *octahedral shear stress*, *overconsolidation ratio* (OCR), *effective stress strength parameter* (c' dan ϕ'), serta faktor waktu. Untuk menentukan nilai dari modulus geser maksimum (pada regangan nol) dan variasi nilai modulus dengan regangan untuk semua jenis tanah dapat digunakan persamaan berdasarkan Hardin and Drnevich (1970) dalam Seed and Idriss (1970)

$$G_{max} = 14750 \times \frac{(2.973-e)^2}{1+e} (OCR)^a (\sigma'_m)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Di mana :

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



e = void ratio

OCR = overconsolidation ratio

a = parameter yang bergantung pada indeks plastisitas tanah

σ'_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) :

$$G = 100K_2(\sigma'_m)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Di mana :

G = modulus geser

K_2 = parameter yang dipengaruhi oleh regangan

σ'_m = rata-rata tegangan efektif utama (psf)

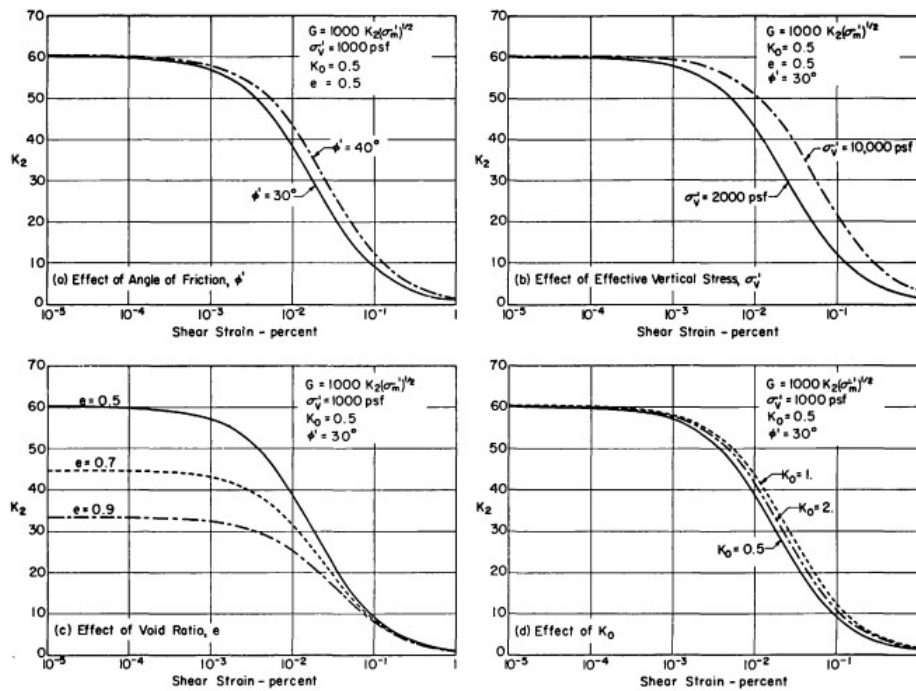
Pengaruh angka pori dan amplitudo regangan dapat dinyatakan melalui pengaruhnya terhadap parameter K_2 . Pengaruh faktor lain terhadap K_2 dapat diilustrasikan oleh hasil pada Gambar 8 yang dihitung menggunakan hubungan yang disarankan oleh Hardin dan Drnevich. Plot disajikan untuk menunjukkan pengaruh ϕ' , tegangan vertikal efektif ($\sigma v'$), K_0 , dan void ratio pada perhitungan hubungan antara K_2 dan amplitudo regangan. Dapat dilihat bahwa :

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

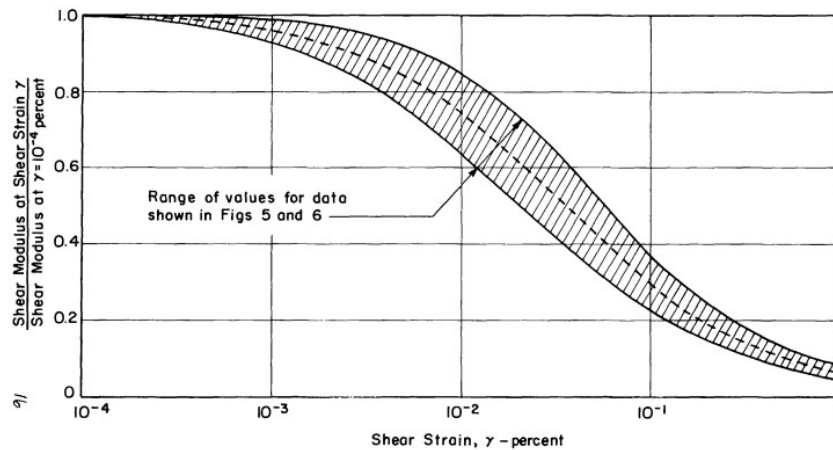


dapat dipertimbangkan untuk ditentukan terutama oleh void ratio atau kerapatan relatif dan amplitudo regangan dari gerakan.

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 9.



Gambar 8. Pengaruh Berbagai Faktor Pada Modulus Geser Pasir (Berdasarkan Hardin dan Drnevich)



Gambar 9. 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 σ_v' dan K_0), rasio pori dan jumlah siklus sangat penting, sedangkan tegangan geser oktahedral, sudut gesekan dan derajat kejenuhan memiliki efek yang lebih rendah. Seperti dalam penentuan modulus, efek dari variasi ukuran butiran dianggap relatif tidak signifikan.

Perhitungan efek dari faktor-faktor di atas pada hubungan antara rasio redaman dan amplitudo regangan geser, seperti yang ditentukan oleh Hardin Drnevich ditunjukkan pada Gambar 10. Jelas bahwa pengaruh atau ϕ' , K_0 , angka pori, dan derajat kejenuhan relatif kecil, dapat dilihat dari persamaan untuk rasio redaman maksimum (Seed and Idriss, 1970) :

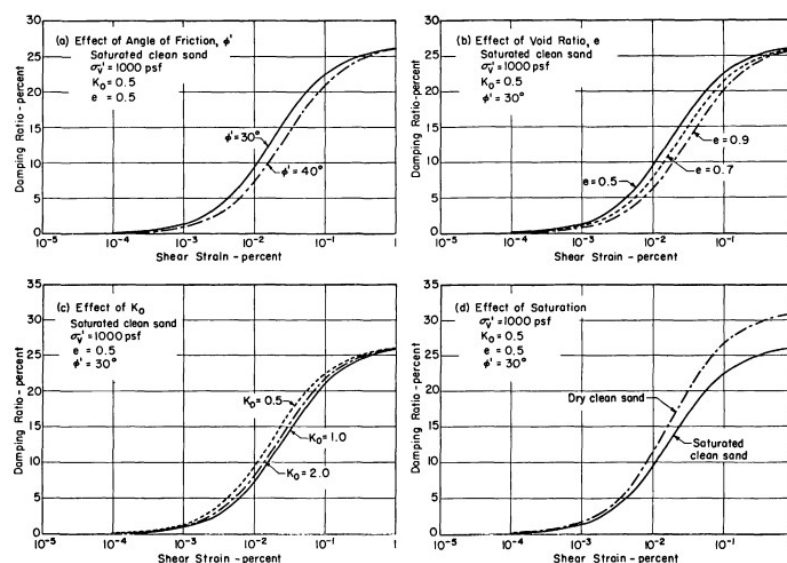
$$\lambda_{max} \cong 30 - 1.5 \log_{10} N \quad (16)$$

Di mana :

λ_{max} = rasio redaman maksimum

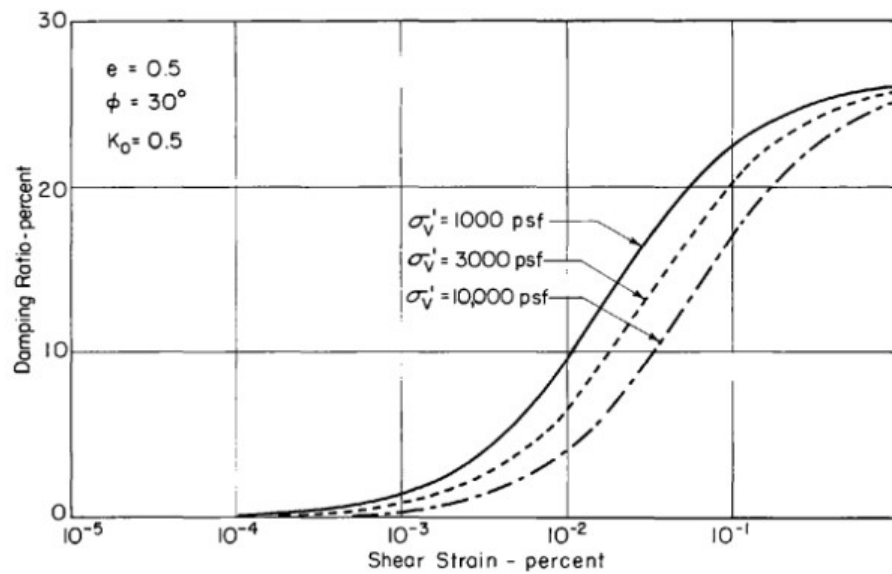
N = jumlah siklus

Nilai λ ditentukan untuk sekitar $N = 5$ siklus, nilai untuk jumlah siklus lainnya dalam kisaran 5 sampai 30 tidak akan berbeda secara signifikan. Dengan demikian, faktor utama yang mempengaruhi hubungan antara rasio redaman dan regangan geser adalah *vertical confining pressure* σ_v' . Pengaruh faktor ini ditunjukkan pada Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12.

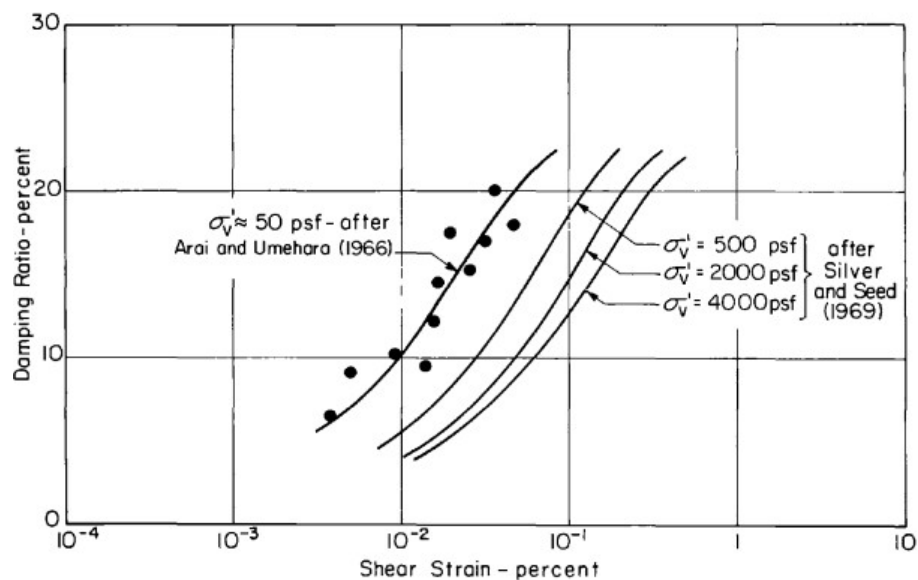


Gambar 10. Pengaruh Berbagai Faktor Pada Rasio Redaman Untuk Pasir





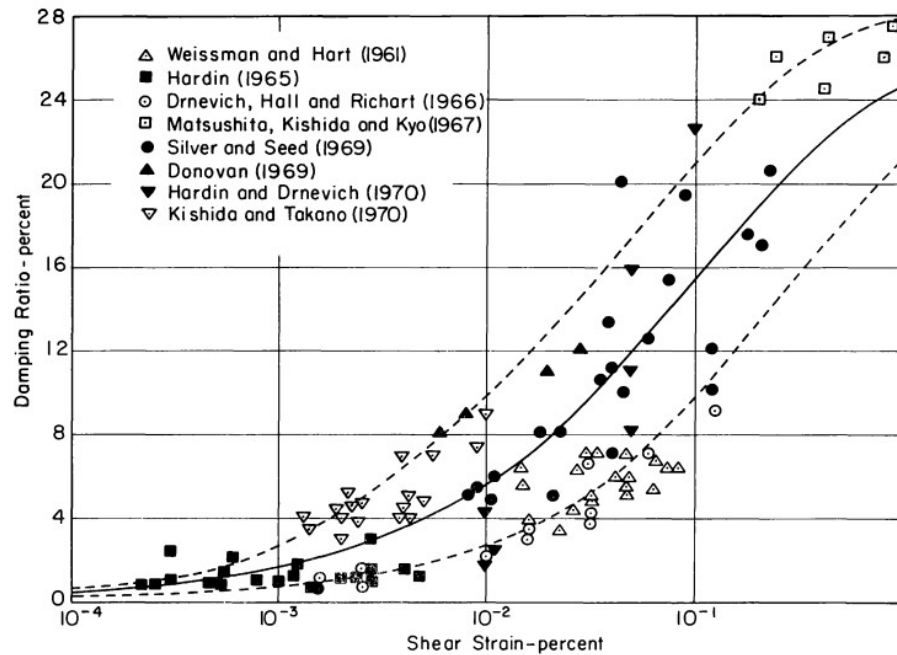
Gambar 11. Pengaruh *Confining Pressure* Pada Rasio Redaman Pasir Jenuh
(Berdasarkan Hardin dan Drnevich)



Gambar 12. Pengaruh *Confining Pressure* Pada Rasio Redaman Pasir Kering

Berdasarkan beberapa penyelidikan sebelumnya tentang rasio redaman pasir, maka hasil penelitian Seed and Idriss ini dirangkum dalam Gambar 13. 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 13 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.



Gambar 13. Rasio Redaman Untuk Pasir

2.7.4.2 Darendeli 2001

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

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 * PI * OCR^{\phi_3}) * \sigma'_0{}^{\phi_4} \quad (17)$$

$$a = \phi_5 \quad (18)$$

$$D_{min} = (\phi_6 + \phi_7 * PI * OCR^{\phi_8}) * \sigma'_0{}^{\phi_9} * [1 + \phi_9 * \ln(frg)] \quad (19)$$

$$b = \phi_{11} + \phi_{12} * \ln(N) \quad (20)$$



Di mana :

σ'_0 = rata-rata tekanan pembatas efektif (atm)

PI = plastisitas indeks tanah (%)

OCR = *overconsolidation ratio*

frg = frekuensi pemuatan

N = jumlah siklus pemuatan

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 (1972) dalam Derendeli (2001).

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (21)$$

$$D_{Adjusted} = b * \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{0,1} * D_{Masing} + D_{min} \quad (22)$$

Di mana :

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

γ = regangan geser (%)

γ_r = regangan referensi (%)

a = koefisien kelengkungan

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

b = koefisien penskalaan

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

Kurva redaman material berdasarkan Masing (1926) :

$$D_{Masing} = c_1 D_{Masing,a=1,0} + c_2 D_{Masing,a=1,0}^2 + c_3 D_{Masing,a=1,0}^3 \quad (23)$$



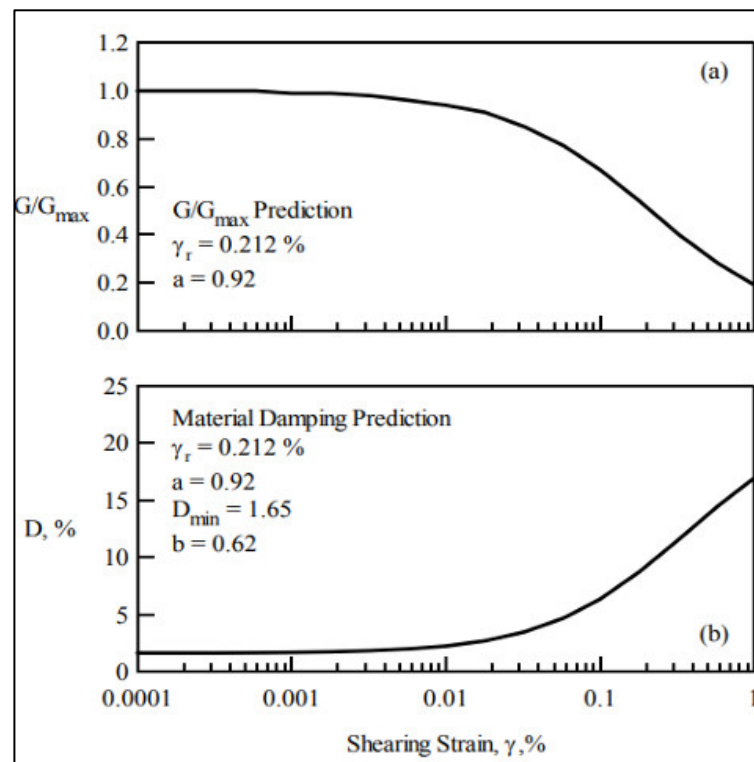
$$D_{Masing,a=1,0} = \frac{100}{\pi} \left[4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma_r}} - 2 \right] \quad (24)$$

$$c_1 = -1,1143a^2 + 1,8618a + 0,2523 \quad (25)$$

$$c_2 = 0,0805a^2 - 0,0710a - 0,0095 \quad (26)$$

$$c_3 = -0,0005a^2 + 0,0002a + 0,0003 \quad (27)$$

Gambar 14 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.

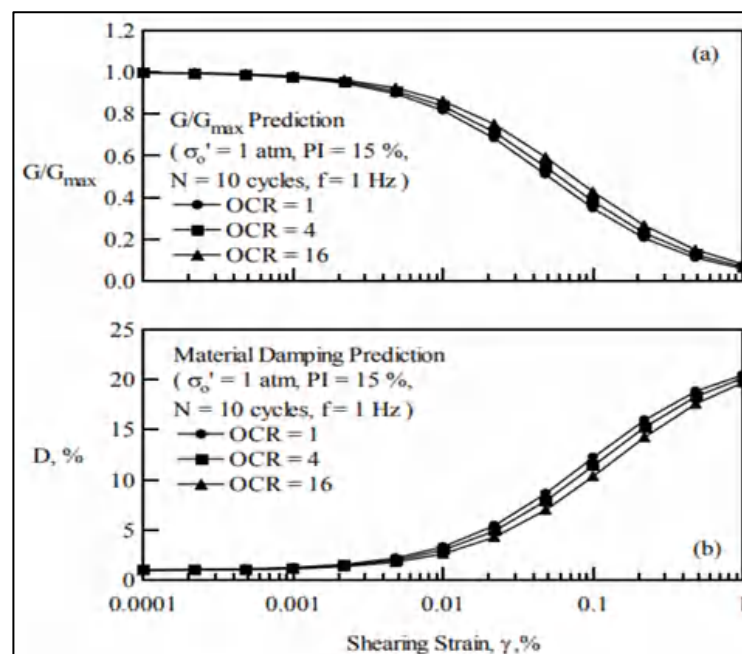


Gambar 14. Estimasi (a) Pengurangan Modulus yang Dinormalisasi dan (b) Kurva Redaman Material

Perilaku nonlinier yang diprediksi oleh model didasarkan pada data yang dikumpulkan melalui amplitudo regangan geser mulai dari 1×10^{-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.

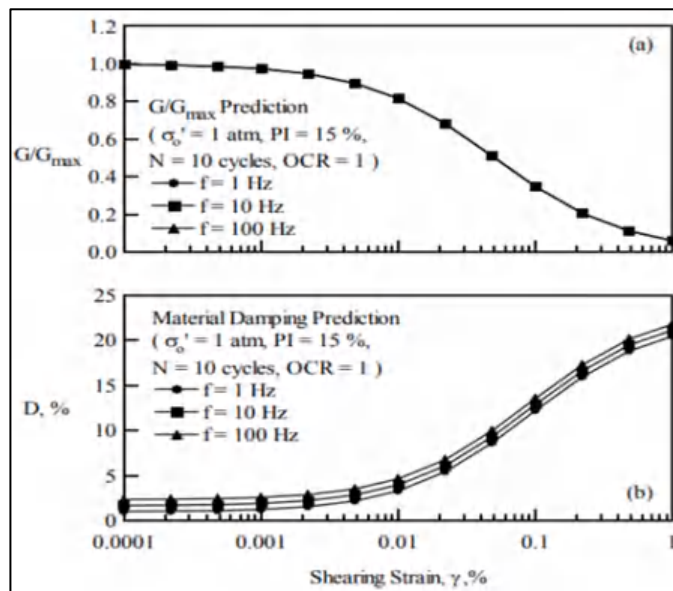
Hasil penelitian menunjukkan bahwa efek dari rasio overkonsolidasi, frekuensi pemuatan dan jumlah siklus pemuatan pada perilaku tanah dinamis tidak diucapkan untuk tanah yang kompeten (yang tidak menunjukkan perubahan volume besar ketika dipotong pada strain kurang dari 1%). **Gambar 15** menyajikan 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).



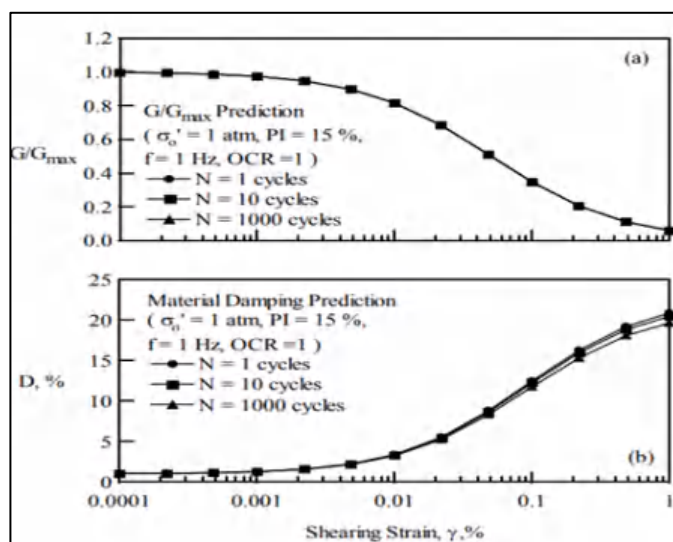
Gambar 15. Pengaruh Rasio Overkonsolidasi pada (a) Modulus yang Dinormalisasi Reduksi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi



Gambar 16 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).



Gambar 16. Pengaruh Frekuensi Pemuatan pada (a) Pengurangan Modulus yang Dinormalisasi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi



Gambar 17. Pengaruh Jumlah Siklus Pemuatan pada (a) Modulus yang Dinormalisasi Reduksi dan (b) Kurva Redaman Material yang Diprediksi Oleh Model yang Dikalibrasi



Pada **Gambar 17**, 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).

