

TUGAS AKHIR

**MODIFIKASI *TIME HISTORY* PERMUKAAN
UNTUK PERENCANAAN GEDUNG DI PROVINSI
BENGKULU BERDASARKAN SNI 8899:2020
(*SURFACE TIME HISTORY MODIFICATION
FOR BUILDING DESIGN IN BENGKULU
BASED ON SNI 8899:2020*)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**EVAN FIKRI MAHENDRA
17511164**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2024**

TUGAS AKHIR

**MODIFIKASI *TIME HISTORY* PERMUKAAN
UNTUK PERENCANAAN GEDUNG DI PROVINSI
BENGKULU BERDASARKAN SNI 8899:2020
(*SURFACE TIME HISTORY MODIFICATION
FOR BUILDING DESIGN IN BENGKULU
BASED ON SNI 8899:2020*)**

Disusun oleh
Evan Fikri Mahendra
17511164

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil



Pembimbing

Penguji I

Penguji II

Elvis Saputra, S.T., M.T
NIK: 205111302

15.08.24

Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.
NIK: 165111301

15/8/2024

Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.
NIK: 185111304



Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

16/8/2024

Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)., IPM.
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Evan Fikri Mahendra
NIM : 17511164
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas : Universitas Islam Indonesia

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Laporan Tugas Akhir ini benar merupakan karya saya sendiri, bukan merupakan pembajakan tulisan maupun pemikiran orang lain yang saya klaim sebagai hasil atau pemikiran saya sendiri. Adapun di dalam karya Tugas Akhir ini terdapat bagian-bagian kutipan dari hasil karya orang lain yang saya tuliskan dengan referensi sumber sesuai norma, kaidah, dan etika dalam penulisan.

Jika di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan apabila Laporan Tugas Akhir ini merupakan hasil dari proses penjiplakan sepenuhnya yang melanggar peraturan sah dan hak kekayaan intelektual, Saya bersedia untuk menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang atas bentuk pertanggung jawaban dari perbuatan tersebut.

Yogyakarta, Juli 2024

Yang membuat pernyataan,



Evan Fikri Mahendra

17511164



Direktorat Perpustakaan Universitas Islam Indonesia
Gedung Moh. Hatta
Jl. Kaliurang Km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext.2301
F. (0274) 898444 psw.2091
E. perpustakaan@uii.ac.id
W. library.uui.ac.id

SURAT KETERANGAN HASIL CEK PLAGIASI

Nomor: 2424707055/Perpus./10/Dir.Perpus/VI/2024

Bismillaahirrahmaanirrahiim

Assalamualaikum Wr. Wb.

Dengan ini, menerangkan Bahwa:

Nama : EVAN FIKRI MAHENDRA
Nomor Mahasiswa : 17511164
Pembimbing : Elvis Saputra, S.T., M.T.
Fakultas / Prodi : Teknik Sipil dan Perencanaan/ TEKNIK SIPIL
Judul Karya Ilmiah : MODIFIKASI TIME HISTORY PERMUKAAN UNTUK
PERENCANAAN GEDUNG DI PROVINSI BENGKULU
BERDASARKAN SNI 8899:2020

Karya ilmiah yang bersangkutan di atas telah melalui proses cek plagiasi menggunakan **Turnitin** dengan hasil kemiripan (*similarity*) sebesar **13 (Tiga Belas) %**.

Demikian Surat Keterangan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, 7/30/2024

Direktur



Muhammad Jamil, SIP.

KATA PENGANTAR



Assalaamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh.

Alhamdulillahirabbil'alamiin, puji syukur saya panjatkan kepada Allah *Subhanahu wa ta'ala* atas segala rahmat, anugerah, dan hidayah-Nya, yang telah memberikan petunjuk, dan kemudahan sehingga dapat diselesaikannya Laporan Tugas akhir ini dengan tuntas. Tidak terlewat Shalawat serta salam saya curahkan kepada junjungan Nabi Besar kita, Nabi Muhammad ﷺ, beserta keluarga, para sahabat, dan penerusnya yang telah membawa Islam kepada seluruh umat manusia, menjadi suri tauladan, dan membimbing dalam menjalani kehidupan sehari-hari.

Laporan Tugas Akhir dengan judul “*Modifikasi Time History Permukaan Untuk Perencanaan Gedung di Provinsi Bengkulu Berdasarkan SNI:8899*” ini disusun dan diajukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam menulis Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi penulis, namun atas kritik, saran, harapan, kepercayaan, dan dorongan semangat dari berbagai pihak, karya ini akhirnya dapat diselesaikan. Oleh karena itu, dengan penuh rasa syukur, izinkan saya mengungkapkan terima kasih yang mendalam kepada:

1. Keluarga tercinta, kedua orang tua, Ibu Soniyatun S.Pd., dan Bapak Drs. Sutaryana yang saya sayangi dan saya banggakan. Terima kasih atas dukungan doa, moral, moril, dan materil yang tidak pernah berhenti mengalir. Serta atas harapan, kepercayaan, dan restunya yang telah diberikan dengan penuh kasih.
2. Kakak penulis, Tania Nugraheni Ayuningtyas, S.Par., M.Sc. beserta Nandra Khairisna S.H., M.Sc. atas saran, masukan, *counseling*, dan dorongan semangat yang kalian berikan, sehingga penulis dapat menemukan kembali bagian dari dirinya yang sempat menghilang.

3. Bapak Elvis Saputra, S.T., M.T., dosen pembimbing Tugas Akhir. Yang memberikan kesempatan, membantu, dan membimbing dengan tulus serta penuh kesabaran yang memungkinkan terselesaikannya Tugas Akhir ini.
4. Ibu Yunalia Muntafi S.T., M.T., Ph.D., Ketua Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Ibu Astriana Hardawati S.T., M.Eng. dan Bapak Anggit Mas Arifudin S.T., M.T. selaku dosen penguji yang saya hormati. Atas kesempatan, masukan, serta semangat yang membersamai penyelesaian karya Tugas Akhir ini.
6. Sahabat semasa di Delayota dan di UII, yang senantiasa bertukar kabar, saling mendukung, dan mendoakan satu sama lain.
7. Keluarga Kahanan Kos, Keluarga Jogjamu, Jogja Top Team Boxing Club, Canteen Boyz, The Good Omen, Akatsuki, FSTVLST, Tigapagi, dan semua pihak yang memberi doa baik serta semangat kepada penulis.
8. Amidala, untuk seorang gadis yang serayanya bunga matahari. *If we were ever to meet on a different time, tell me what could've been.*
9. Dan diri saya sendiri, Evan Fikri Mahendra. *You're the greatest project you will ever work on. Restart, Reshape, Refocus as many times as you need. Keep going, keep striving, remain steadfast. Just don't give up.*

Saya menginsafi bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kesempurnaan dan diliputi banyak kekurangan akibat keterbatasan yang dijumpai penulis. Segala kritik dan saran dengan rendah hati penulis terima dengan tangan terbuka demi dapat memperlengkap laporan ini. Saya berharap, Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membaca. Semoga Allah Al-Karim selalu melimpahkan karunia dan ilham-Nya yang tak terhingga kepada kita semua, Aamiin.

Wassalaamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, Juli 2024

Penulis

Evan Fikri Mahendra

MEMOAR

No, time doesn't haunt me. Rather, opportunity does.

I hope the Sun always rests gently on your shoulder.

My suffering did not make me anything;

I suffered, and then I made myself gentle and kind,

I made myself strong,

and I made myself good.

No matter what life throws at me,

I remain soft and resilient.

I don't care if bad things happen;

I know I'll be alright.

Joy will reveal itself after sorrow.

وَكَفَى بِاللَّهِ شَهِيدًا

"And sufficient is Allah as a Witness."



Atas nama tangis dan harapan,

Rekah

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	v
MEMOAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR NOTASI	xviii
ABSTRAK	xx
ABSTRACT	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.1.1 Pawirodikromo, Makrup, Teguh et. al. (2020)	6
2.1.2 Saputra dan Makrup (2021)	10
2.1.3 Rahayu dan Pawirodikromo (2023)	12
2.1.4 Sulistio, Makrup, Muntafi et. al. (2024)	15
2.2 Perbedaan Penelitian Terdahulu	16
BAB III LANDASAN TEORI	19
3.1 Gempa Bumi	19
3.2 Teori Lempeng Tektonik	20
3.2.1 Teori Continental Drift	22

3.2.2	Kondisi Tektonik di Indonesia	22
3.2.3	Kondisi Geologi di Provinsi Bengkulu	24
3.3	Gerak Tanah	25
3.3.1	Klasifikasi Gempa Bumi	26
3.3.2	Magnitude Gempa Bumi	28
3.3.3	Intensitas Gempa	30
3.4	Identifikasi Sumber Gempa	31
3.5	Permodelan Sumber Gempa	32
3.6	Karakteristik Sumber Gempa	36
3.6.1	<i>Useable Frequency</i>	36
3.6.2	Karakteristik <i>Pulse</i>	37
3.6.3	Klasifikasi Situs	38
3.7	<i>Time History</i>	39
3.8	Respon Spektrum	41
3.9	Analisis Deagregasi dalam Pemilihan Gerak Tanah	42
3.10	Level Bahaya	43
3.11	Parameter Intensitas Gerak Tanah	44
3.12	Kecepatan Gelombang <i>Shear</i> pada Kedalaman 30 Meter (V_{s30})	45
3.13	Amplifikasi	46
3.14	Periode Fundamental Pendekatan (T_a)	48
3.15	Respon Spektra Target	50
3.16	Pemilihan Gerak Tanah	52
3.16.1	Jumlah dan Pemilihan Komponen Gerakan Tanah Dasar	52
3.16.2	Kriteria Pemilihan Gerak Tanah	52
3.16.3	Durasi Gerak Tanah	52
3.17	Modifikasi Gerak Tanah	53
3.17.1	Rentang Periode Modifikasi	53
3.17.2	Penskalaan Amplitudo	53
3.17.3	Pencocokan Spektral	54
3.18	<i>Artificial Ground Motion</i>	56

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN	57
4.1 Pengumpulan Data Penelitian	57
4.2 Intrumen Penelitian	57
4.3 Tahapan Penelitian	58
4.3.1 Deagregasi <i>Hazard</i>	58
4.3.2 Menentukan Target Respon Spektrum	58
4.3.3 Pemilihan Gerak Tanah	59
4.3.4 Modifikasi Gerak Tanah	59
4.3.5 Penskalaan Amplitudo	60
4.3.6 Pencocokan Spektral	60
4.4 Bagan Alir Penelitian	62
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	63
5.1 Gambaran Umum	63
5.2 Deagregasi <i>Hazard</i>	64
5.2.1 Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i>	65
5.2.2 Sumber Gempa <i>Benioff</i>	69
5.2.3 Sumber Gempa <i>Megathrust</i>	73
5.3 Pemilihan Rekam Gerak Tanah	77
5.3.1 Pemilihan Rekam Gerak Tanah Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i>	83
5.3.2 Pemilihan Rekam Gerak Tanah Sumber Gempa <i>Benioff</i>	84
5.3.3 Pemilihan Rekam Gerak Tanah Sumber Gempa <i>Megathrust</i>	85
5.3.4 Pemilihan Rekam Gerak Tanah Sumber Gempa Kombinasi	86
5.4 Respon Spektra Target MCE_R	86
5.4.1 Penentuan Jenis Tanah	87
5.4.2 Penentuan Nilai Percepatan Tanah (S_s dan S_1)	88
5.4.3 Penentuan Nilai Koefisien Situs (F_a dan F_v)	89
5.4.4 Penentuan Parameter Percepatan Spektral Desain (S_{DS} dan S_{D1})	89
5.4.5 Penentuan Periode Fundamental Pendekatan (T_a)	90
5.4.6 Respons Spektrum Desain (DBE)	91
5.4.7 Rentang Periode Pencocokan	94

5.5	Modifikasi Gerak Tanah	95
5.5.1	Pencocokan Spektral Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i>	99
5.5.2	Pencocokan Spektral Sumber Gempa <i>Benioff</i>	107
5.5.3	Pencocokan Spektral Sumber Gempa <i>Megathrust</i>	115
5.5.4	Pencocokan Spektral Sumber Gempa Kombinasi	123
5.6	<i>Artificial Ground Motion Design</i>	131
5.6.1	<i>Shallow Crustal Artificial Ground Motion Design</i>	133
5.6.2	<i>Benioff Artificial Ground Motion Design</i>	135
5.6.3	<i>Megathrust Artificial Ground Motion Design</i>	137
5.6.4	<i>Artificial Ground Motion Design</i> Kombinasi	139
5.7	Implementasi <i>Artificial Ground Motion</i> Dalam Analisis Struktur	141
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		144
6.1	Kesimpulan	144
6.2	Saran	145
DAFTAR PUSTAKA		146
LAMPIRAN		149

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang	17
Tabel 3.1	Klasifikasi Situs SNI 1726:2019	38
Tabel 3.2	Vs30 Berdasarkan SNI 1729:2019	46
Tabel 3.3	Koefisien Situs Fa	47
Tabel 3.4	Koefisien Situs Fv	48
Tabel 3.5	Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung	48
Tabel 3.6	Nilai parameter periode pendekatan Ct dan x	49
Tabel 5.1	Deagregasi Hazard Rekaman Gempa	77
Tabel 5.2	Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i>	83
Tabel 5.3	Sumber Gempa <i>Benioff</i> .	84
Tabel 5.4	Sumber Gempa <i>Megathrust</i>	85
Tabel 5.5	Sumber Gempa Kombinasi	86
Tabel 5.6	Nilai Perhitungan Spektral Percepatan DBE dan MCER	93
Tabel 5.7	Nilai Kecocokan Tiap RSN <i>Shallow Crustal</i> Tertarget	102
Tabel 5.8	Nilai Kecocokan Tiap RSN <i>Benioff</i> Tertarget	110
Tabel 5.9	Nilai Kecocokan Tiap RSN <i>Megathrust</i> Crustal Tertarget	118
Tabel 5.10	Nilai Kecocokan Tiap RSN Kombinasi Crustal Tertarget	126

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Risk Targeted Spectra Demand (MCEr)</i>	8
Gambar 2.2	<i>Spectrum matching of 12 EQ records</i>	8
Gambar 2.3	<i>The acceleration time history of 12-EQ synthetic ground acceleration.</i>	9
Gambar 2.4	<i>The PGA of 12 synthetic ground motions (Left) & The A/V ratio of 12 synthetic ground motions (Right)</i>	9
Gambar 2.5	<i>Spectral Matching Provinsi Riau</i>	11
Gambar 2.6	<i>Ground Motion Sintetik Provinsi Riau</i>	11
Gambar 2.7	<i>Time History Plots pada Layer 1 dari Lokasi Penelitian</i>	13
Gambar 2.8	<i>Hasil dari Respon Spektra</i>	13
Gambar 2.9	<i>Hasil dari Triparte Graph</i>	14
Gambar 2.10	<i>Spectral Matching Kota Ambon</i>	16
Gambar 2.11	<i>Ground Motion Sintetik Kota Ambon</i>	16
Gambar 3.1	<i>Proses Deformasi Batuan Penyebab Terjadinya Gempa Bumi</i>	20
Gambar 3.2	<i>Arah Dan Kecepatan Gerakan Lempeng Tektonik</i>	21
Gambar 3.3	<i>Arah Gerakan Continental Drift</i>	22
Gambar 3.4	<i>Kondisi Tektonik Pulau Sumatra</i>	23
Gambar 3.5	<i>Riwayat Kegempaan Wilayah Provinsi Bengkulu</i>	25
Gambar 3.6	<i>Shallow Crustal Di Sekitar Pulau Sumatra</i>	33
Gambar 3.7	<i>Penampang Zona Subduksi Sumatra</i>	34
Gambar 3.8	<i>Sejarah Zona Robekan Gempa Sepanjang Megathrust Sumatra</i>	35
Gambar 3.9	<i>Perbandingan Spektrum Respons Gerak Tanah Shallow Crustal Dan Subduksi</i>	35
Gambar 3.10	<i>Ilustrasi Skematik Gerak Tanah Dengan Karakteristik Pulse</i>	37
Gambar 3.11	<i>Acceleration time-history graph of 1957 San Francisco</i>	40
Gambar 3.12	<i>Design Response Spectrum Plot</i>	41
Gambar 3.13	<i>Contoh Hasil Analisis Deagregasi Wilayah Jakarta (2500 Tahun) Pada Periode T=2s (Kiri) Dan T=5s (Kanan)</i>	45

Gambar 3.14	Parameter Gerak Tanah, Ss, Gempa Maksimum Yang Dipertimbangkan Resiko-Tertarget (Mcer) Wilayah Indonesia Spektrum Respons 0,2 Detik (Redaman Kritis 5%) Pada Kelas Situs Bc (Sbc)	51
Gambar 3.15	Parameter Gerak Tanah, S1, Gempa Maksimum Yang Dipertimbangkan Resiko-Tertarget (Mcer) Wilayah Indonesia Spektrum Respons 1 Detik..... (Redaman Kritis 5%) Pada Kelas Situs Bc (Sbc)	51
Gambar 3.16	Contoh Perbandingan Hasil Metode Pencocokan Spektral Ketat (Kiri) Dan Metode Pencocokan Spektral Rata-Rata (Kanan)	55
Gambar 3.17	Contoh Hasil Pencocokan Spektral Yang Benar	55
Gambar 3.18	Contoh Pembuatan Artificial Ground Motion Dengan Envelope	56
Gambar 4.1	Diagram Alir Penelitian	62
Gambar 5.1	Peta Deagregasi Magnitudo(M) Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i> Pada Percepatan Spektrum Puncak (Pga) Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	65
Gambar 5.2	Peta Deagregasi Magnitudo(M) Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 0,2-Detik Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	66
Gambar 5.3	Peta Deagregasi Magnitudo(M) Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 3-Detik Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	66
Gambar 5.4	Peta Deagregasi Jarak (R) Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i> Pada Percepatan Spektrum Puncak (Pga) Dengan Redaman 5% Untuk Periode Ulang 2500 Tahun	67
Gambar 5.5	Peta Deagregasi Jarak (R) Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 0,2-Detik Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	67
Gambar 5.6	Peta Deagregasi Jarak (R) Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 3-Detik Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	68

Gambar 5.7	Peta Deagregasi Magnitudo (M) Sumber Gempa <i>Benioff</i> Pada Percepatan Spektrum Puncak (Pga) Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	69
Gambar 5.8	Peta Deagregasi Magnitudo (M) Sumber Gempa <i>Benioff</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 0,2-Detik Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	70
Gambar 5.9	Peta Deagregasi Magnitudo (M) Sumber Gempa <i>Benioff</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 3-Detik Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	70
Gambar 5.10	Peta Deagregasi Jarak (R) Sumber Gempa <i>Benioff</i> Pada Percepatan Spektrum Puncak (Pga) Dengan Redaman 5% Untuk Periode Ulang 2500 Tahun	71
Gambar 5.11	Peta Deagregasi Jarak (R) Sumber Gempa <i>Benioff</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 0,2-Detik Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	71
Gambar 5.12	Peta Deagregasi Jarak (R) Sumber Gempa <i>Benioff</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 3-Detik Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	72
Gambar 5.13	Peta Deagregasi Magnitudo(M) Sumber Gempa <i>Megathrust</i> Pada Percepatan Spektrum Puncak (Pga) Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	73
Gambar 5.14	Peta Deagregasi Magnitudo(M) Sumber Gempa <i>Megathrust</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 0,2-Detik Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	74
Gambar 5.15	Peta Deagregasi Magnitudo(M) Sumber Gempa <i>Megathrust</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 3-Detik Dengan Redaman 5% Periode Ulang 2500 Tahun	74
Gambar 5.16	Peta Deagregasi Jarak (R) Sumber Gempa <i>Megathrust</i> Pada Percepatan Spektrum Puncak (Pga) Dengan Redaman 5% Untuk Periode Ulang 2500 Tahun	75

Gambar 5.17	Peta Deagregasi Jarak (R) Sumber Gempa <i>Megathrust</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 0,2-Detik Dengan Redaman 5% Untuk Periode Ulang 2500 Tahun	75
Gambar 5.18	Peta Deagregasi Jarak (R) Sumber Gempa <i>Megathrust</i> Pada Percepatan Spektrum Respon 3-Detik Dengan Redaman 5% Untuk Periode Ulang 2500 Tahun	76
Gambar 5.19	Filter Pencarian untuk Website PEER NGA-West	78
Gambar 5.20	Hasil Filter Pencarian untuk Website PEER NGA-West	79
Gambar 5.21	Filter Pencarian untuk Website UCLA-NHR3	80
Gambar 5.22	Hasil Filter Pencarian untuk Website UCLA-NHR3	81
Gambar 5.23	Isi dari satu data RSN yang diunduh dari PEER	82
Gambar 5.24	Peta Distribusi Tanah Pada Provinsi Bengkulu	88
Gambar 5.25	Respon Spektra Target DBE& MCE _R	94
Gambar 5.26	11 Pasang Data Rsn Untuk Cycle Gempa Kombinasi Terinput	95
Gambar 5.27	Define Target Spectrum Program <i>SeismoMatch</i> 2023	96
Gambar 5.28	Konfigurasi Pencocokan Untuk Program <i>SeismoMatch</i> 2023	97
Gambar 5.29	Proses Matching Menggunakan Program <i>SeismoMatch</i> 2023	98
Gambar 5.30	Hasil Matching Menggunakan Program <i>SeismoMatch</i> 2023	98
Gambar 5.31	Original Accelerogram Spectra Untuk Gempa <i>Shallow Crustal</i>	99
Gambar 5.32	Matched Accelerogram Spectra Untuk Gempa <i>Shallow Crustal</i>	100
Gambar 5.33	Perbandingan Spektra Gempa Asli Dengan Spektra Gempa Tercocokan Untuk Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i> Northridge Lancaster RSN 1025	100
Gambar 5.34	Perbandingan Spektra Target Dengan Spektra Gempa Tercocokan Rata-Rata Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i>	101
Gambar 5.35	<i>Time History</i> USA-Imp. Valley Coachella-166 X & Y	103
Gambar 5.36	<i>Time History</i> USA-Coalinga Parkfield-331 arah X & Y	103
Gambar 5.37	<i>Time History</i> USA-Coalinga Parkfield-332 arah X & Y	103
Gambar 5.38	<i>Time History</i> USA-Coalinga Parkfield-333 arah X & Y	104
Gambar 5.39	<i>Time History</i> Taiwan-SMART1I01-487 arah X & Y	104
Gambar 5.40	<i>Time History</i> Taiwan-SMART1M01-489 arah X & Y	104

Gambar 5.41	<i>Time History</i> USA-Palm Springs-515 arah X & Y	105
Gambar 5.42	<i>Time History</i> USA-Cape Mendocino-826 arah X & Y	105
Gambar 5.43	<i>Time History</i> USA-Northridge Covina-965 arah X & Y	105
Gambar 5.44	<i>Time History</i> USA-Northridge Lancaser-1025 arah X & Y	106
Gambar 5.45	<i>Time History</i> USA-Northridge Elizabeth Lake-1677 X & Y	106
Gambar 5.46	Original <i>Time History</i> Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i>	106
Gambar 5.47	Matched <i>Time History</i> Sumber Gempa <i>Shallow Crustal</i>	106
Gambar 5.48	Original Accelerogram Spectra Untuk Gempa <i>Benioff</i>	107
Gambar 5.49	Matched Accelerogram Spectra Untuk Gempa <i>Benioff</i>	108
Gambar 5.50	Perbandingan Spektra Gempa Asli Dengan Spektra Gempa Tercocokan Untuk Sumber Gempa <i>Benioff</i> Japan Iwate-Ichinobe 4003085	108
Gambar 5.51	Perbandingan Spektra Target Dengan Spektra Gempa Tercocokan Rata-Rata Sumber Gempa <i>Benioff</i>	109
Gambar 5.52	<i>Time History</i> Japan-Iwate Ichinohe-4003085 arah X & Y	111
Gambar 5.53	<i>Time History</i> Japan-Kise Totsukawa-4024099 arah X & Y	111
Gambar 5.54	<i>Time History</i> Japan-Kushiro Tokachi-4032629 arah X & Y	111
Gambar 5.55	<i>Time History</i> Cen.America & Mexico-105ACLS arah X & Y	112
Gambar 5.56	<i>Time History</i> Japan-Miyagi Miyako-4032594 arah X & Y	112
Gambar 5.57	<i>Time History</i> Japan-Iwate Ishidoriya-4012452 arah X & Y	112
Gambar 5.58	<i>Time History</i> Japan-Iwate Nishine-4012458 arah X & Y	113
Gambar 5.59	<i>Time History</i> Japan-Kise Tanabe-4029971 arah X & Y	113
Gambar 5.60	<i>Time History</i> Cen.America & Mexico-143-3295 arah X & Y	113
Gambar 5.61	<i>Time History</i> Japan-Nemuro Kushiro-4032761 arah X & Y	114
Gambar 5.62	<i>Time History</i> Japan-Kise Kamitonda-4024220 arah X & Y	114
Gambar 5.63	Original <i>Time History</i> Sumber Gempa <i>Benioff</i>	114
Gambar 5.64	Matched <i>Time History</i> Sumber Gempa <i>Benioff</i>	114
Gambar 5.65	Original Accelerogram Spectra Untuk Gempa <i>Megathrust</i>	115
Gambar 5.66	Matched Accelerogram Spectra Untuk Gempa <i>Megathrust</i>	116

Gambar 5.67	Perbandingan Spektra Gempa Asli Dengan Spektra Gempa Tercocokan Untuk Sumber Gempa <i>Megathrust</i> Japan-Tohoku Sendai 4001064	116
Gambar 5.68	Perbandingan Spektra Target Dengan Spektra Gempa Tercocokan Rata-Rata Sumber Gempa <i>Megathrust</i>	117
Gambar 5.69	<i>Time History</i> Japan-Tohoku Sendai-4001064 arah X & Y	119
Gambar 5.70	<i>Time History</i> S.America-CSCH-6001806 arah X & Y	119
Gambar 5.71	<i>Time History</i> Japan-Tokachi Mitsuishi-4028587 arah X & Y	119
Gambar 5.72	<i>Time History</i> Japan-Tokachi Tsurui-4022911 arah X & Y	120
Gambar 5.73	<i>Time History</i> Japan-Tokachi 42113 4032568 X & Y	120
Gambar 5.74	<i>Time History</i> Japan-Shibe North-4022908 arah X & Y	120
Gambar 5.75	<i>Time History</i> Japan-Shibe South-4022909 arah X & Y	121
Gambar 5.76	<i>Time History</i> Japan-Tokachi Honbetsu-4022992 arah X & Y	121
Gambar 5.77	<i>Time History</i> Japan-Tokachi Ikeda-4028572 arah X & Y	121
Gambar 5.78	<i>Time History</i> Japan-Tokachi Tohro-4028558 arah X & Y	122
Gambar 5.79	<i>Time History</i> Japan-Tokachi Shizunai-4028585 arah X & Y	122
Gambar 5.80	<i>Original Time History</i> Sumber Gempa <i>Megathrust</i>	122
Gambar 5.81	<i>Matched Time History</i> Sumber Gempa <i>Megathrust</i>	122
Gambar 5.82	<i>Original Accelerogram Spectra</i> Untuk Gempa Kombinasi	123
Gambar 5.83	<i>Matched Accelerogram Spectra</i> Untuk Gempa Kombinasi	124
Gambar 5.84	Perbandingan Spektra Gempa Asli Dengan Spektra Gempa Tercocokan Untuk Sumber Gempa USA-Coalinga 332	124
Gambar 5.85	Perbandingan Spektra Target Dengan Spektra Gempa Tercocokan Rata-Rata Sumber Gempa Kombinasi	125
Gambar 5.86	<i>Time History</i> USA-Imp.Valley Coachella-166 arah X & Y	127
Gambar 5.87	<i>Time History</i> USA-Coalinga Parkfield-332 arah X & Y	127
Gambar 5.88	<i>Time History</i> Taiwan-SMART1I01-487 arah X & Y	127
Gambar 5.89	<i>Time History</i> USA-Northridge Covina-965 arah X & Y	128
Gambar 5.90	<i>Time History</i> USA-Northridge Lancaster-1025 arah X & Y	128
Gambar 5.91	<i>Time History</i> Japan-Iwate Ichinoha-4003085 arah X & Y	128
Gambar 5.92	<i>Time History</i> Japan-Kise Totsukawa-4024099 arah X & Y	129

Gambar 5.93	<i>Time History</i> Japan-Iwate Nishine-4012458 arah X & Y	129
Gambar 5.94	<i>Time History</i> Japan-Tohoku Sendai-4001064 arah X & Y	129
Gambar 5.95	<i>Time History</i> Japan-Tokachi-4032568 arah X & Y	130
Gambar 5.96	<i>Time History</i> Japan-Tokachi Ikeda-4028572 arah X & Y	130
Gambar 5.97	<i>Original Time History</i> Sumber Gempa Kombinasi	131
Gambar 5.98	<i>Matched Time History</i> Sumber Gempa Kombinasi	131
Gambar 5.99	Data <i>Time Series</i> Untuk Masing-Masing Rsn <i>Shallow Crustal</i>	132
Gambar 5.100	Input <i>Time Series</i> Ke Aplikasi <i>SeismoSignal</i>	122
Gambar 5.101	<i>Time Series Windows Shallow Crustal</i>	133
Gambar 5.102	Fourier And Power Spectra <i>Windows Shallow Crustal</i>	133
Gambar 5.103	Ground Motion Parameters <i>Windows Shallow Crustal</i>	134
Gambar 5.104	Mean Matched <i>Shallow Crustal Time History Accelerograms</i>	134
Gambar 5.105	<i>Time Series Windows Benioff</i>	135
Gambar 5.106	Fourier And Power Spectra <i>Windows Benioff</i>	135
Gambar 5.107	Ground Motion Parameters <i>Windows Benioff</i>	136
Gambar 5.108	Mean Matched <i>Benioff Time History Accelerograms</i>	136
Gambar 5.109	<i>Time Series Windows Megathrust</i>	137
Gambar 5.110	Fourier And Power Spectra <i>Windows Megathrust</i>	137
Gambar 5.111	Ground Motion Parameters <i>Windows Megathrust</i>	138
Gambar 5.112	Mean Matched <i>Megathrust Time History Accelerograms</i>	138
Gambar 5.113	<i>Time Series Windows Kombinasi</i>	139
Gambar 5.114	Fourier And Power Spectra <i>Windows Kombinasi</i>	139
Gambar 5.115	Ground Motion Parameters <i>Windows Kombinasi</i>	140
Gambar 5.116	Mean Matched <i>Time History Accelerograms Kombinasi</i>	140

DAFTAR NOTASI

DBE	= Gempa Dasar Desain (<i>Design Basis Earthquake</i>). Gempa dasar desain yang dirancang untuk memastikan struktur dapat menahan gempa dengan probabilitas terjadinya 10% dalam 50 tahun, yang setara dengan periode ulang 475 tahun.
MCE _R	= Gempa maksimum yang dipertimbangkan dengan risiko tertarget (<i>Risk-targeted Maximum Considered Earthquake</i>). Gempa dengan intensitas ekstrem dan probabilitas terjadinya 2% dalam 50 tahun, setara dengan periode ulang 2.500 tahun, dirancang untuk memastikan struktur dapat menahan gempa yang sangat besar dan jarang terjadi.
FE	= <i>Finite Element</i> / Elemen Hingga
ME	= <i>Macro Element</i> / Elemen Makro
GMPE	= <i>Ground Motion Prediction Equation</i>
g	= Percepatan Gravitasi (m ² /s)
LTH	= <i>Linear Time History</i>
NLTH	= <i>Non Linear Time History</i>
M	= Magnitudo Sumber Gempa
M _B	= <i>Body-wave</i> Magnitude
M _i	= Magnitudo Sumber Gempa pada Tingkat- <i>i</i>
M _L	= Magnitude Lokal
M _S	= <i>Surface-wave</i> Magnitudo
M _w	= Momen Magnitudo
MMI	= <i>Modified Mercalli Intensity</i>
NGA West	= <i>Next Generation Attenuation models for the Western US</i>
NHR3	= <i>Natural Hazards Risk and Resiliency Research Center</i>
PGA	= <i>Peak Ground Acceleration</i>
PSHA	= <i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i>
PEER	= <i>Pacific Earthquake Engineering Research Center</i>
RSN	= <i>Regional Seismic Network</i>

R	= Jarak Sumber Gempa ke Lokasi Tinjauan
R_i	= Jarak Sumber Gempa ke Lokasi Tinjauan pada Tingkat- i
S_a RotD100	= Spektrum Respons percepatan spektral dengan orientasi sudut yang menghasilkan respons maksimum
S_a	= Respon Spektra Percepatan
S_{ai}	= Respon Spektra Percepatan pada Tingkat- i
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 1,0 detik.
F_a	= Faktor Amplifikasi Getaran Terkait Percepatan Pada Getaran Periode Pendek
F_v	= Faktor Amplifikasi Getaran Terkait Percepatan Pada Getaran Periode 1 Detik
S_{MS}	= Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek
S_{M1}	= Parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik
S_{DS}	= Parameter respons spektral percepatan desain periode pendek
S_{D1}	= Parameter respons spektral percepatan desain periode 1 detik
T	= Periode fundamental getaran
T_{1A}	= Periode getar fundamental terbesar untuk arah respons horizontal utama
T_{1B}	= Periode getar fundamental terkecil untuk arah respons horizontal utama
T_a	= Periode getar fundamental pendekatan
T_s	= Periode transisi s respons spektrum gempa
T_0	= Periode batas spektrum respons pemisah karakteristik
T_L	= Periode transisi karakteristik spektrum respons
USGS	= <i>United States Geological Survey</i>
UCLA	= <i>University California Los Angeles</i>
V_{s30}	= Kecepatan rambat gelombang geser rata-rata pada regangan geser yang kecil pada lapisan 30 m teratas

ABSTRAK

Indonesia terletak pada zona dengan aktivitas seismik yang tinggi karena adanya pertemuan beberapa lempeng tektonik utama yang berinteraksi. Bengkulu merupakan wilayah yang memiliki aktivitas seismik tinggi yang berada tepat di antara 2 jalur gempa, yaitu sepanjang Sesar Sumatra di sekeliling Bukit Barisan, dan pusat gempa sepanjang Sesar Mentawai yang berada di lempeng Indo–Australia. Hal tersebut menyebabkan Bengkulu memiliki kerentanan tinggi terhadap gempa bumi. Solusi untuk mengantisipasi kerentanan tersebut yaitu dengan adanya pencatatan data rekaman gerak tanah riwayat waktu (*Time History*) yang nantinya dapat digunakan sebagai modal untuk analisis gedung tahan gempa maupun pembuatan peta deagregasi *hazard*.

Proses modifikasi dari gerak tanah dilandaskan peraturan SNI 8899:2020 tentang Tata Cara Pemilihan dan Modifikasi Gerak Tanah Permukaan untuk Perencanaan Gedung Tahan Gempa. Deagregasi dilakukan dengan menentukan nilai Magnitude dominan, dan Jarak dominan yang sesuai dengan kondisi tanah dan Vs30 Provinsi Bengkulu. Pemilihan gerak tanah diambil dari website PEER untuk gempa *Shallow Crustal*, dan UCLA untuk gempa subduksi. Data tersebut kemudian dicocokkan dengan respons spektrum target MCE_R dengan periode ulang 2500 tahun. Dari hasil pencocokan, nantinya dapat dibuat menjadi *artificial ground motion* yang dapat digunakan dalam permodelan analisis gedung.

Dari ketiga jenis sumber gempa didapatkan hasil kecocokan terbaik berasal dari gempa kombinasi dengan *average misfits* sebesar 1,96175%. Untuk sumber gempa Shallow Crustal sebesar 2,7742%; gempa Benioff sebesar 2,5125%; dan gempa Megathrust sebesar 3,45124%. Hal tersebut membuktikan jika kombinasi antara ketiga sumber gempa memberikan gambaran yang paling komprehensif dan realistis tentang kondisi seismik di Provinsi Bengkulu.

Kata Kunci : Modifikasi Gerak Tanah Permukaan, Pencocokan Spektra, *NGA Attenuation*, *Time History*, *Artificial Ground Motion*

ABSTRACT

Indonesia is located in a zone with high seismic activity level due to the convergence of several major tectonic plates. Bengkulu Province is an area with high seismic activity, situated between two earthquake zones: along the Sumatra Fault surrounding the Bukit Barisan mountains and the earthquake center along the Mentawai Fault on the Indo-Australian plate. This makes Bengkulu highly vulnerable to earthquakes. One solution to anticipate this vulnerability is to record Time History ground motion data, which can later be used as a basis for earthquake-resistant building analysis and the creation of hazard deaggregation maps..

The process of modifying ground motion is based on the SNI 8899:2020 regulation regarding the Procedures for Selection and Modification of Surface Ground Motion for Earthquake-Resistant Building Design. Deaggregation is performed by determining the dominant Magnitude and dominant Distance values that match the soil conditions and Vs30 of Bengkulu Province. Ground motion selection is taken from the PEER website for Shallow Crustal earthquakes and UCLA for subduction earthquakes. This data is then matched with the target MCE_R response spectrum with a recurrence period of 2500 years. From the matching results, artificial ground motion can be created for use in building analysis modeling.

Out of the three types of earthquake sources, the combined source yielded the most accurate results, with an average misfit of 1.96175%. The Shallow Crustal source had an average misfit of 2.7742%, the Benioff source had 2.5125%, and the Megathrust source had 3.45124%. This indicates that using a combination of all three sources offers the most comprehensive and realistic representation of the seismic conditions in Bengkulu Province.

Keywords : *Surface Ground Motion Modification, Spectral Matching, NGA Attenuation, Time History, Artificial Ground Motion*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara geografis, Indonesia terletak pada lintasan Cincin Api Pasifik serta menjadi titik pertemuan antar lempeng bumi yang menyebabkan wilayah di Indonesia memiliki tingkat aktivitas seismik yang tinggi. Cincin api ini terbentuk akibat pergerakan lereng tektonik yang bertemu dan berinteraksi di sepanjang perbatasannya. Indonesia sendiri terletak pada pertemuan beberapa lempeng tektonik utama, meliputi Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Interaksi kompleks antara lempeng-lempeng ini menghasilkan tekanan dan pergerakan tektonik yang nantinya berpengaruh terhadap terjadinya aktivitas seismik di wilayah Indonesia. Batas lempeng yang paling menonjol dan mempengaruhi aktivitas seismik di Indonesia itu sendiri adalah zona Subduksi di mana lempeng Indo-Australia yang menunjam ke bawah lempeng Eurasia. Faktor geografis inilah yang menyebabkan Indonesia menjadi salah satu negara yang memiliki kerentanan tinggi khususnya terhadap gempa bumi di dunia. Pawirodikromo (2012) menjelaskan jika gempa bumi merupakan peristiwa bergetarnya permukaan tanah yang terjadi akibat pelepasan energi secara tiba-tiba dari pecah/slip massa batuan di lapisan kerak bumi.

Salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki aktivitas seismik yang cukup aktif yaitu di provinsi Bengkulu. Bengkulu secara geografis terletak tepat di antara 2 jalur gempa, yaitu pusat gempa di darat di sepanjang sesar Sumatra di sekeliling Bukit Barisan, dan pusat gempa sepanjang sesar Mentawai di Samudera Hindia yang berada di lempeng Indo-Australia (Supriani, 2009). Gempa bumi yang kerap terjadi di provinsi Bengkulu merupakan ancaman yang dapat mempengaruhi pertumbuhan ekonomi serta sosial di wilayah tersebut. Beberapa gempa berskala besar pernah terjadi di provinsi Bengkulu seperti gempa 4 Juni 2000 dengan kekuatan M_w 7.9, dan gempa 12 September 2007 dengan magnitude 8,4 M_w yang pernah terjadi dan meluluh-lantakkan wilayah tersebut akibat kedua gempa tersebut

terjadi diikuti oleh peristiwa geoteknik yang dikenal sebagai liquifaksi. Oleh karena hal tersebut, provinsi Bengkulu dapat dikategorikan sebagai salah satu daerah dengan kerawanan tinggi di Indonesia. Dengan demikian, adanya regulasi atau upaya untuk mitigasi mengatasi risiko bencana akibat gempa bumi di Indonesia khususnya di wilayah Bengkulu diperlukan.

Bentuk upaya untuk menanggulangi terjadinya risiko kerusakan bangunan tersebut yaitu dengan melaksanakan perencanaan dan manajemen yang baik sehingga kerugian serta korban jiwa yang timbul akibat dampak dari gempa bumi tersebut dapat dikurangi. Penanggulangan hal tersebut dapat dilakukan dengan merencanakan desain bangunan yang memenuhi kaidah-kaidah tahan gempa. Sehingga dapat diketahui apabila beban gempa menjadi salah satu factor utama untuk menentukan perhitungan keamanan dalam suatu perancangan bangunan. Beban gempa merupakan suatu beban yang masif dan waktu terjadinya sulit untuk diprediksi yang nantinya menjadi suatu beban horizontal yang harus ditanggung oleh bangunan.

Metode pembebanan gempa untuk bangunan terdiri dari dua metode analisis. Metode analisis statis yang terdiri dari *Static Equivalent* untuk permodelan linear, dan *Push-over* untuk permodelan non-linear. Sedangkan metode analisis dinamis yang terdiri dari *Respon Spectra* untuk permodelan linear, dan *Time History Analysis* untuk permodelan non-linear. Baik metode statis dan respon spektra merupakan metode yang umum digunakan di mana nilai kekuatan serta daktilitas keseluruhan bangunan dapat direpresentasikan dengan baik. Namun, pengaruh getaran yang lebih tinggi pada bangunan dan periode waktu dari gerakan tanah (*velocity pulse*) tidak dapat direpresentasikan dengan baik sehingga metode *Time History Analysis* dapat mengatasi keterbatasan metode tersebut. Keuntungan dari metode *Time History* yaitu kemampuan untuk memodelkan respons struktur lebih detail dan realistis terhadap getaran dinamis yang kompleks. Tetapi, metode ini juga memerlukan sumber data yang akurat, serta komputasi yang cukup intensif, sehingga penggunaanya dilakukan untuk proyek-proyek strategis ketika hasil yang diinginkan memiliki keakuratan yang tinggi.

Sejarah panjang Indonesia dalam menghadapi gempa bumi tidak selalu disertai dengan pencatatan data yang baik. Terbatasnya data mengenai riwayat gempa yang komprehensif dan berkualitas menyebabkan metode *Time History Analysis* relatif jarang untuk digunakan dalam permodelan gedung. Peraturan pemerintah yang sudah ada sekarang mengatur mengenai tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung yaitu SNI 1726:2019. Metode *Time History* digunakan untuk menganalisis respons dinamis struktur terhadap getaran gempa, yang berarti bukan hanya intensitas gempa yang diperhitungkan tapi juga seluruh kurva percepatan tanah sepanjang waktu. Data percepatan tanah ini didapat dari catatan gempa sebenarnya dari suatu lokasi tertentu maupun dapat disintesis melalui pendekatan secara numerik. SNI 1726:2019 juga mengharuskan permodelan gempa yang menggunakan catatan *Time History* agar dapat mencakup komponen horizontal dan vertikal, di mana memungkinkan untuk mempertimbangkan efek getaran di semua arah yang mungkin berbeda dalam intensitas dan durasi. Sebagai pendetailan mengenai tata cara pemilihan dan modifikasi tanah permukaan untuk perencanaan gedung tahan gempa pemerintah menerbitkan peraturan terbaru yang mendukung peraturan tersebut yaitu SNI 8899:2020.

Pada umumnya, penelitian mengenai *Time History* lebih banyak dilakukan untuk mengetahui nilai deagregasi *hazard*nya ataupun sebaliknya. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Saputra & Makrup (2021) di mana penelitian ini bertujuan untuk mengetahui deagregasi *hazard* dan rekomendasi gerak tanah sintetik di Provinsi Riau, selain itu Rahayu & Pawirodikromo (2023) juga telah melakukan penelitian serupa di mana *Time History* sintetik untuk wilayah Bogor yang ditinjau dengan menggunakan pendekatan deagregasi *hazard*. Dalam penelitian yang telah dilaksanakan oleh peneliti-peneliti sebelumnya, penelitian mengenai riwayat waktu lebih banyak membahas mengenai penggunaan *Time History linear*, di mana modifikasi riwayat gerak tanah diasumsikan menggunakan pendekatan linear yang dianggap berperilaku elastis sepanjang waktu, sedangkan di peraturan SNI 8899:2020 menjelaskan apabila gerak tanah dapat berperilaku elastis-plastis yang berarti hubungan antara gaya dan perpindahan tidak lagi linear.

Pendekatan non linear ini dapat menggunakan metode elemen hingga, metode iterasi, serta model plastisitas dimana bertujuan untuk memberikan prediksi yang lebih akurat untuk struktur yang mungkin mengalami deformasi besar ketika terjadi gempa.

Dari pemaparan tersebut, diperlukan adanya informasi lengkap tentang rekaman gerak tanah permukaan untuk wilayah Indonesia berdasarkan peta bahaya gempa sesuai dengan level bahaya yang diharapkan, spektrum respons untuk komponen gerak tanah vertikal, peta deagregasi, dan lain-lain, mengingat Provinsi Bengkulu memiliki riwayat pernah terjadi gempa bumi besar dan berada di wilayah yang memiliki aktivitas seismik yang tinggi. Penggunaan metode *Time History* yang sesuai dengan SNI 8899:2020 ini merupakan langkah penting dan acuan untuk memastikan bahwa struktur bangunan gedung dibangun dengan mempertimbangkan resiko gempa bumi yang pernah ada di wilayah tersebut. Tujuan akhir dari modifikasi gerak tanah ini nantinya dapat digunakan untuk mengetahui hasil analisis perilaku kegempaan di wilayah Bengkulu, serta modal untuk digunakan dalam melaksanakan permodelan dengan menggunakan pendekatan pembebanan *Time History analysis non linear*.

1.2 Rumusan Masalah

Dari gambaran singkat pada latar belakang di atas, maka permasalahan yang dijadikan fokus penelitian ini yaitu bagaimana hasil analisis dari modifikasi gerak tanah (*ground motion*) dan rekomendasi *artificial ground motion* dalam pembuatan data rekaman riwayat waktu (*Time History*) yang sesuai untuk Provinsi Bengkulu?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pokok permasalahan tersebut, tujuan dari penelitian ini yaitu untuk menentukan hasil analisis dari modifikasi gerak tanah (*ground motion*) dan rekomendasi *artificial ground motion* dalam pembuatan data rekaman riwayat waktu (*Time History*) yang sesuai untuk Provinsi Bengkulu.

1.4 Batasan Penelitian

Penelitian ini diberikan beberapa batasan dengan tujuan agar penelitian ini lebih terfokus dan sistematis. Batasan penelitian ini sebagai berikut:

1. Peta cakupan wilayah yang digunakan dalam penelitian ini adalah Provinsi Bengkulu.
2. Peraturan yang digunakan pada penelitian ini adalah:
 - a. SNI 1726-2019 tentang Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung.
 - b. SNI 8899-2020 tentang Tata cara pemilihan dan modifikasi gerak tanah permukaan untuk perencanaan gedung tahan gempa.
3. Data sumber gempa *Shallow Crustal* didapatkan dari website PEER-NGAwest.
4. Data sumber gempa subduksi didapatkan dari website UCLA-NHR3.
5. Jenis tanah ditentukan dengan metode pendekatan berdasarkan kecepatan gelombang geser dasar kedalaman 30m (V_s30) yaitu tanah sedang (SD).
6. Analisis *Time History* yang dilakukan menggunakan parameter Non Linear dengan jumlah data gerak tanah gerak tanah sebanyak 11 pasang.
7. Respon Spektra target diambil dari website RSA Ciptakarya 2021.
8. Analisis *spectral matching* untuk menentukan *artificial ground motion* di batuan dasar dilakukan menggunakan bantuan *software SeismoMatch*, dan *SeismoSignal*.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilaksanakannya penelitian ini, maka diharapkan agar hasil dari penelitian ini dapat memberi manfaat sebagai berikut.

1. Menjadi referensi baik untuk akademisi maupun pihak-pihak yang bergerak di baik di bidang teknik sipil maupun geoteknik.
2. Memberikan informasi mengenai usulan getaran tanah artifisial di Provinsi Bengkulu.
3. Menjembatani penelitian-penelitian dengan topik yang serupa, sehingga dapat dijadikan bahan masukan dan inovasi dalam mewujudkan bangunan dengan analisis pembebanan gempa khususnya pada analisis dinamis *Time History*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dari perkembangan ilmu keteknik sipil yang semakin baik, studi mengenai jenis pembebanan gempa dan perbandingannya sudah cukup sering untuk diteliti pada objek, lokasi, serta parameter pendukung lain yang berbeda. Hasil yang didapat dari penelitian terdahulu juga akan sangat berguna sebagai referensi untuk penelitian yang akan dilakukan sebagai tingkat pembanding maupun untuk penyempurna penelitian selanjutnya. Dari hal tersebut, berikut beberapa penelitian terdahulu yang dapat dijadikan referensi sebagai bahan untuk ditinjau dan dijadikan sebagai pembanding pada penelitian ini sebagai berikut:

2.1.1 Pawirodikromo, Makrup, Teguh et. al. (2020)

Pawirodikromo, Makrup, Teguh et. al. Melaksanakan penelitian dengan judul *Development of synthetic ground motion at a specific site in Yogyakarta town, Indonesia utilizing the PSHA Method*. Di mana penelitian ini menyajikan pembuatan gerakan tanah sintetis di Kota Yogyakarta dengan metode pendekatan analisis dinamis riwayat waktu dengan 11 pasang rekaman data gempa yang telah diolah menggunakan metode PSHA sehingga didapatkan gerak tanah sintetisnya.

Demonstrasi intensif mengenai kesesuaian antara spektrum respons dari gerakan tanah buatan dengan spektrum target dilakukan oleh Huang dan Wang. Selain mencocokkan spektrum, metode yang dikembangkan ini juga digunakan untuk mencocokkan kandungan energi (*energy compatible*) melalui pengukuran seismik Intensitas Arias. Proses keseluruhan ini disebut *energy compatible and spectrum compatible (ECSC)* dan dilakukan melalui skema iterasi.

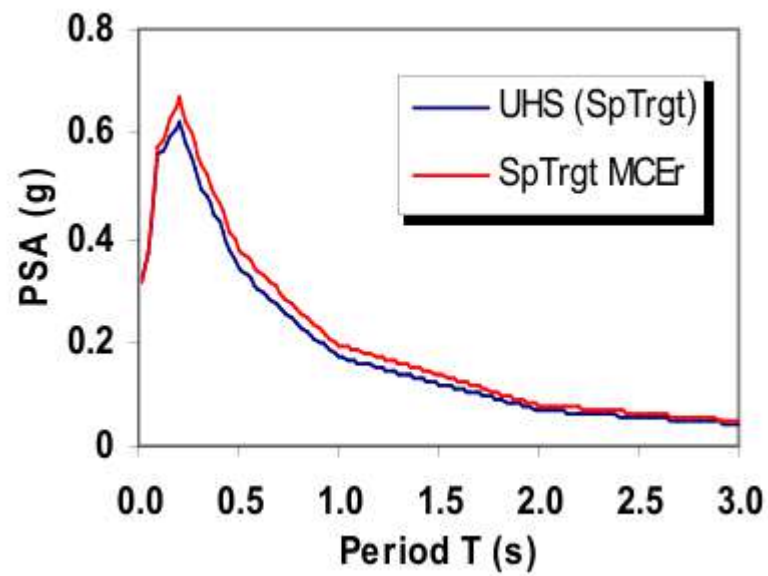
Dalam studi ini, 50 gerakan tanah simulasi dibuat dan dibandingkan dengan 50 gempa asli yang tercatat (PEER-NGA). Ke-50 gempa simulasi beserta pasangannya dari 50 gempa asli tercatat digunakan dalam analisis dinamis inelastis bangunan rangka beton bertulang 12 lantai. Hasil studi menunjukkan bahwa respons struktural akibat gerakan tanah yang dihasilkan oleh rekaman ECSC dan

PEER-NGA sangat konsisten. Metode ini berhasil menciptakan dan mensimulasikan kesesuaian antara gerakan simulasi dan gerakan nyata; namun, metode ini tidak menghasilkan spektrum target untuk tujuan desain.

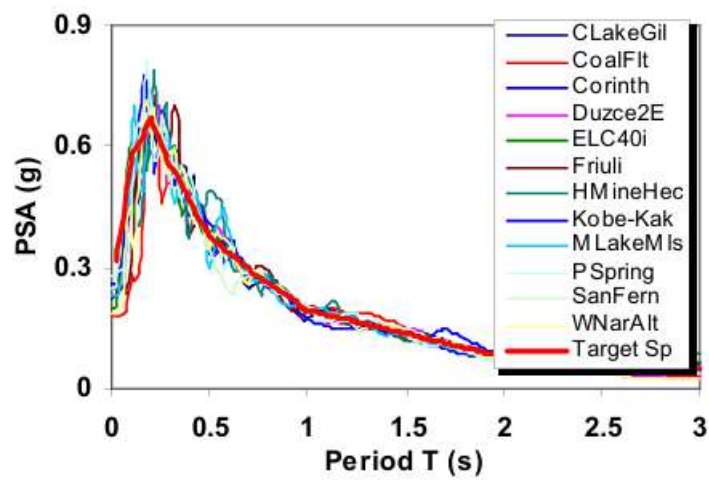
Faktor *directivity* (D_f) dan faktor risiko yang ditargetkan (R_f) masing-masing digunakan untuk menghitung spektral maksimum serta memastikan terjadinya risiko yang seragam terhadap keruntuhan bangunan. Nilai faktor *directivity* $D_f > 1,0$, sementara menurut SNI, faktor risiko yang ditargetkan untuk periode pendek dan panjang di kota Yogyakarta memiliki nilai $R_f < 1,0$. Dibandingkan dengan spektrum bahaya seragam, permintaan spektrum risiko yang ditargetkan rata-rata lebih besar sebesar 12,3% untuk seluruh periode T .

Hasil dari proses deagregasi menunjukkan bahwa magnitudo dominan dan jarak yang paling berkontribusi terhadap PGA di kota Yogyakarta adalah $M_D = 6,5$ dan $R_D = 14,5$ km. Nilai ini konsisten dengan karakteristik dan lokasi sesar Sungai Opak sebagai sumber utama gempa, yang sangat dekat dengan kota Yogyakarta. Gempa akibat aktivitas sesar umumnya jauh lebih kecil dibandingkan dengan gempa megathrust di zona subduksi.

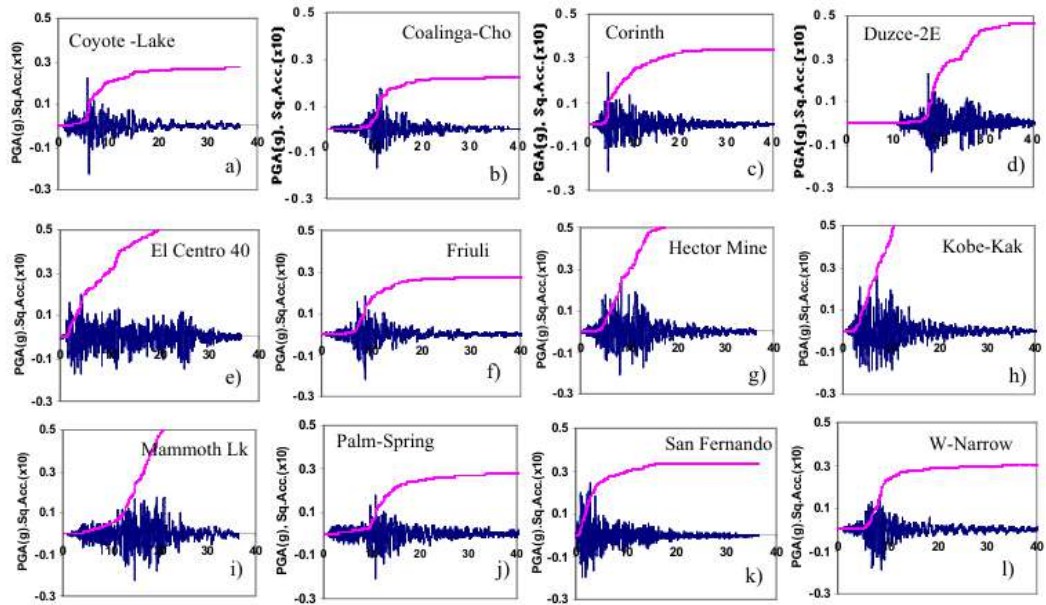
Berdasarkan M_D dan R_D , 12 *Synthetic Ground Motion* (SGM) telah diperoleh di mana spektranya telah sesuai dengan spektra target. Ke-12 SGM ini memiliki variasi PGA dan rasio A/V -nya. Karena spektra target pada level batuan dasar memiliki frekuensi tinggi, hampir keseluruhan dari 12 SGM yang dipilih juga memiliki frekuensi yang tinggi. Hasil pencocokan spektral dan pengujian durasi signifikan gempa D_{595} dari ke-12 gempa tersebut telah memenuhi persyaratan. Ke-12 SGM memiliki PGA sebesar 0,183 - 0,276g dengan rata-rata 0,232g, dan rasio $A/V = 0,771 - 2,117$, dengan rata-rata 1,329. Durasi signifikan SGM $t_e = D_{595} = 13,04-24,63$ detik (dengan rata-rata 15,92 detik) masih berada dalam rentang nilai, sesuai dengan perhitungan yaitu antara 10,53-25,95 detik.



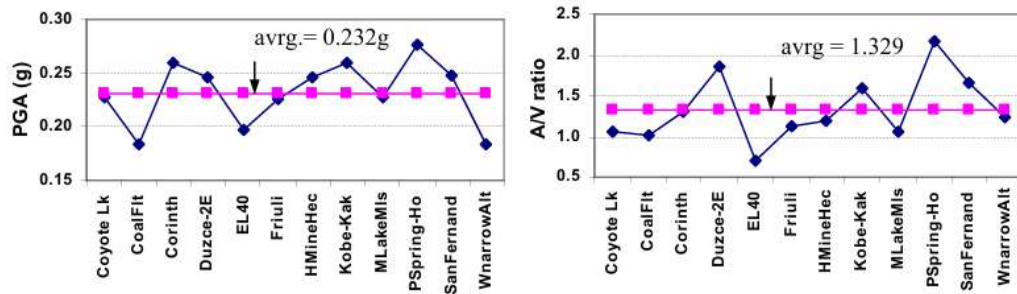
Gambar 2.1 Risk Targeted Spectra Demand (MCEr)



Gambar 2.2 Spectrum matching of 12 EQ records



Gambar 2.3 *The acceleration time history of 12-EQ synthetic ground acceleration.*



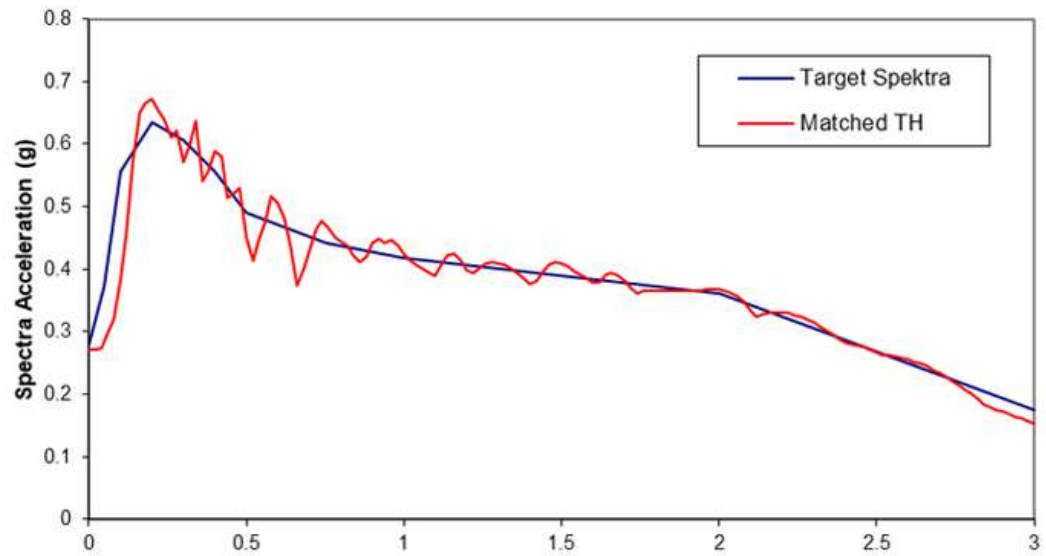
Gambar 2.4 *The PGA of 12 synthetic ground motions (Left) & The A/V ratio of 12 synthetic ground motions (Right)*

2.1.2 Saputra dan Makrup (2021)

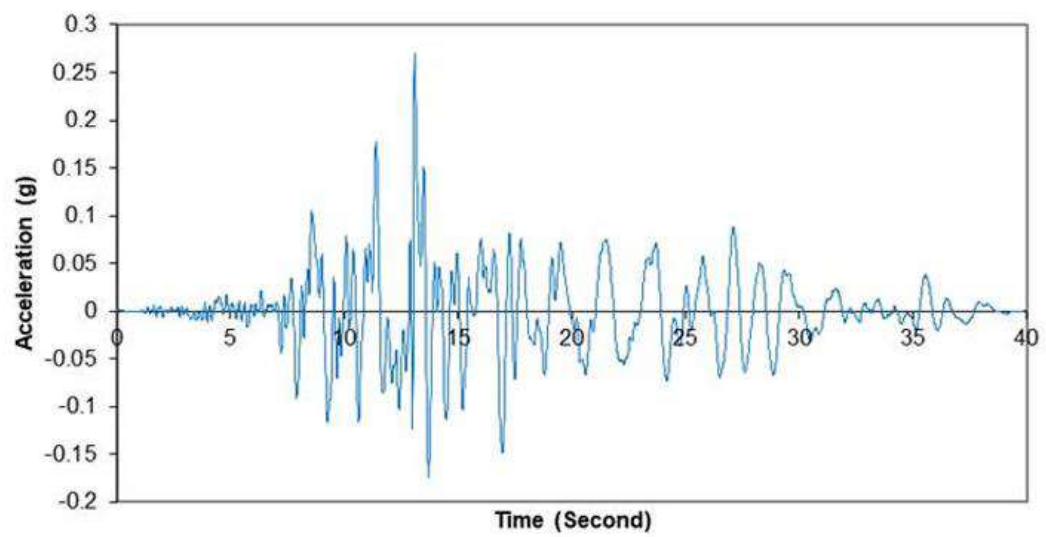
Saputra dan Makrup (2021), telah melaksanakan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui deagregasi *hazard* serta mendapatkan usulan pembuatan *ground motion* sintetik untuk Provinsi Riau yang nantinya ketersediaan rekaman gempa buatan dapat memberikan kemudahan pada pihak praktisi dalam mendesain gedung, terutama gedung-gedung tinggi. Penelitian ini dilaksanakan di Provinsi Riau dengan pengambilan data berada pada koordinat longitude 97.02 - 103.023 dan latitude -3.90 – 2.96. Berdasarkan USGS diperoleh data kejadian yang tercatat dari tahun 1963 – 2020 dengan magnitude ≤ 5 dan kedalaman < 300 km sebanyak ± 800 kejadian gempa di Provinsi Riau.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dengan melakukan pendekatan *Probabilistic Seismic Hazard* (PSHA), Data kejadian gempa yang dikumpulkan dalam penelitian ini diperoleh dari *United States of Geological Surveys* (USGS, n.d.) dengan data yang memiliki skala magnitude bervariasi yang nantinya dikonversi menjadi satu skala magnitude yaitu magnitude momen (M_w) yang setelahnya dipisahkan antara gempa utama dengan susulan menggunakan program ZMAP. Jenis sumber gempa yang dimodelkan terdiri dari sumber gempa subduksi dan sumber gempa fault/patahan yang model hitungan nantinya akan digunakan dalam analisis untuk menentukan tingkat risiko gempa dengan parameter representasi karakteristik masing-masing sumber gempa dari analisis data frekuensi kejadian gempa meliputi magnitude maksimum, slip rate, nilai a dan nilai b , serta rate.

Hasil dari analisis risiko gempa yang direpresentasikan dalam bentuk nilai percepatan di Provinsi Riau pada UHS memiliki nilai percepatan 0,27 g pada $T = 0$ detik, 0,64 g pada $T = 0,2$ detik, dan 0,41 g pada $T = 1$ detik. Sumber gempa yang paling berpengaruh terhadap risiko gempa di daerah ini adalah *Shallow Crustal* Barumun, dengan dominasi sebesar 63,68%. Berdasarkan hasil deagregasi *hazard* yang sesuai, *Time History* yang dipilih untuk menghasilkan gerakan tanah sintetik adalah *Time History* dari gempa Coalinga tahun 1983.



Gambar 2.5 Spectral Matching Provinsi Riau



Gambar 2.6 *Ground Motion Sintetik* Provinsi Riau

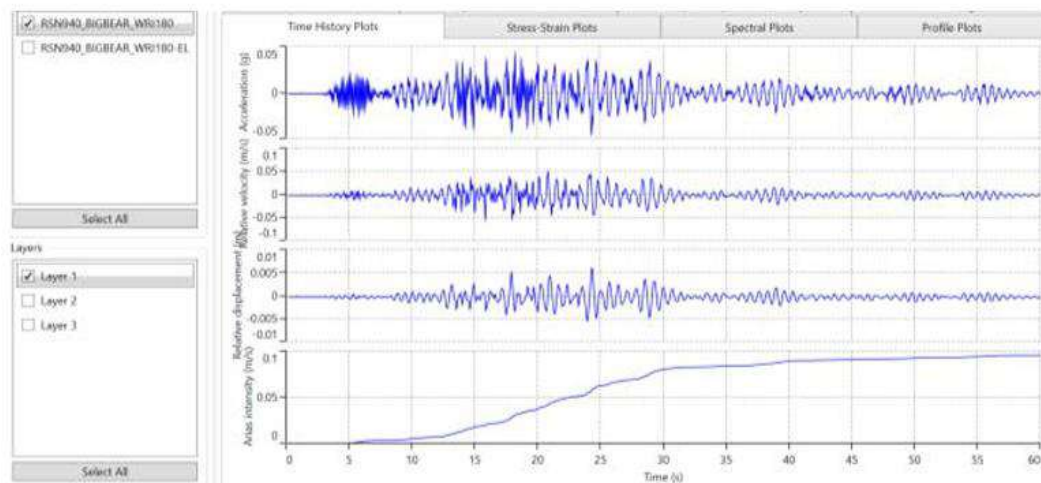
2.1.3 Rahayu dan Pawirodikromo (2023)

Rahayu dan Pawirodikromo telah melaksanakan penelitian dengan judul “*Time History Sintetik di Wilayah Bogor Ditinjau dari Deagregasi Hazard*”. Penelitian ini dilakukan bertujuan sebagai peningkatan riset mengenai gempa mutlak untuk mempertajam informasi kejadian gempa di masa yang akan datang. Selain itu juga digunakan sebagai bahan untuk merumuskan langkah yang diperlukan mulai dari rencana mitigasi, analisis risiko, hingga dengan mikrozonasi gempa. Di sisi lain juga dapat berguna untuk penataan ruang dan persyaratan pembangunan konstruksi di zona gempa.

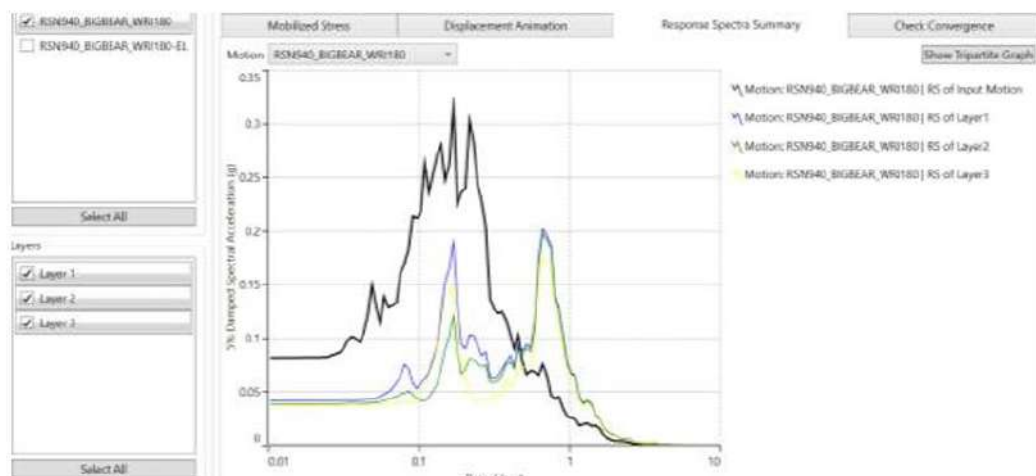
Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan pendekatan metode probabilistik, di mana metode penentuan gempa bumi memadukan aspek seismisitas berdasarkan data kejadian gempa dan informasi geologi pada patahan tertentu untuk memperkirakan gerak tanah dari persamaan hubungan atenuasi secara empiris yang dinyatakan dalam magnitude gempa, jarak, serta kondisi tanah dan geologinya. Penelitian ini menggunakan fungsi atenuasi serta memodelkan respon tanah dengan kategori non linear inelastik yang diolah menjadi triparti respons spektrum, yaitu spektrum 2D yang menghubungkan antara variabel bebas berupa periode getar struktur T dengan variabel terikat simpangan, kecepatan, dan percepatan maksimum. Ada 2 jenis sumber gempa yang akan dimodelkan dalam penelitian kali ini adalah sumber gempa subduksi dan sumber gempa *fault*/patahan. Setelah pengumpulan data selesai, dilanjutkan dengan pengolahan data gempa yang diawali dengan mengkonversi menjadi satu skala magnitude yaitu magnitude momen (M_w). Setelah proses konversi selesai dilanjutkan dengan memisahkan data gempa utama dan ikutan. Dari hasil analisis menggunakan program ZMAP diperoleh hasil dari proses declustering berupa gempa-gempa utama atau gempa yang independen (*mainshock*) yang berjumlah 475 kejadian (*event*).

Hasil penelitian dapat diperoleh bahwa bentuk nilai percepatan merespresentasikan risiko gempa untuk Bangunan Gedung di *Bogor Green Forest* yang *Uniform Hazard Spectrum* memiliki nilai percepatan $T = 0$ detik adalah 0.1845, $T = 0.2$ detik adalah 0.4276, dan $T = 1$ detik adalah 0.2671. Diprediksi memiliki kontribusi terbesar terhadap risiko gempa adalah sumber gempa Sesar

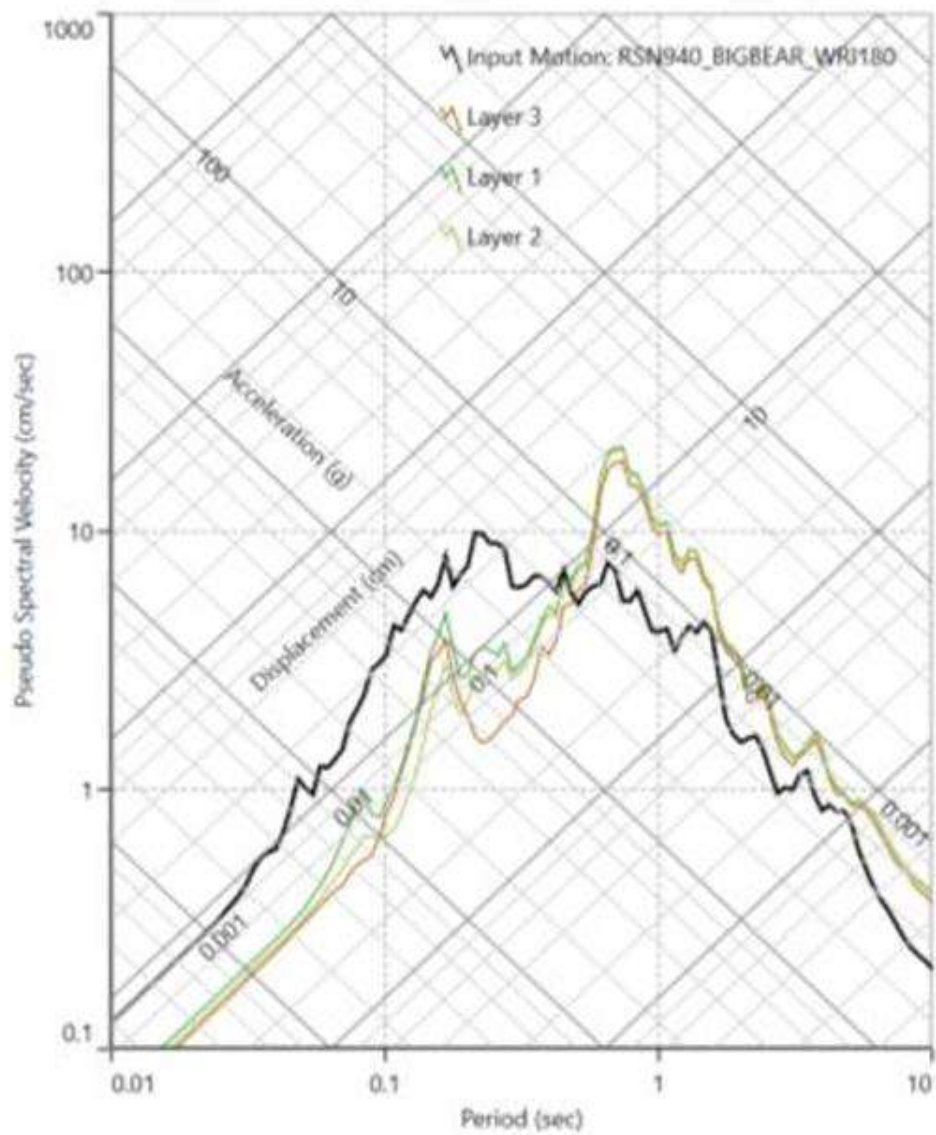
Cimandiri yang mendominasi sebesar 38,5508%. Hasil *Spectral Matching* dimasukkan seleksi motion yang berupa Big Bear01 1992 Wrightwood - Swarthout yang mempunyai magnitude 6.46 dengan mekanisme strike slip dan jarak 70.94 km yang kurang lebih sama dengan Deagregasi *Hazard* yang dimaksud. Hasil respons spektra memperlihatkan bahwa hasil dari gempa yang untuk *matching* begitu tinggi dan turun bertemu dengan respons spektra yang ada pada layer 1, 2, dan 3 di detik ke sekitar 0.74. dan Hasil dari *Triparte Graph* yaitu Akselerasi, Kecepatan dan Simpangan ada di hasil penelitian.



Gambar 2.7 Time History Plots pada Layer 1 dari Lokasi Penelitian



Gambar 2.8 Hasil dari Respon Spektra



Gambar 2.9 Hasil dari Triparte Graph

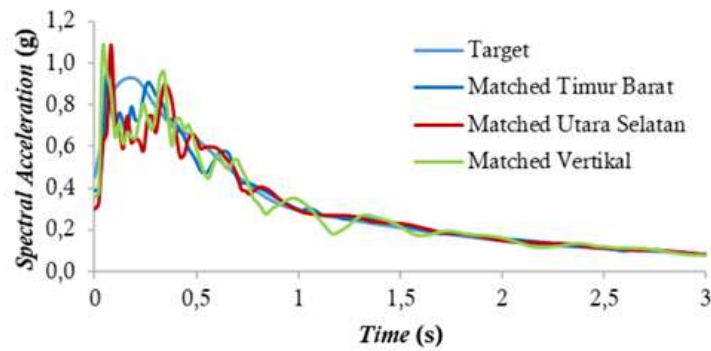
2.1.4 Sulistio, Makrup, Muntafi et.al (2024)

Sulistio, Makrup, Muntafi et.al telah melaksanakan penelitian dengan judul Analisis Hazard Gempa dan Usulan Ground Motion Sintetic Untuk Kota Ambon Dengan Menggunakan Metode Probabilistik Seismic Hazard Analysis (PSHA) pada tahun 2024. Penelitian ini berlatar belakang untuk mempertimbangkan nilai kerawanan bencana yang terjadi di Pulau Ambon, dengan mempertimbangkan tingkat bahaya gempa secara kuantitatif dengan mempertimbangkan aspek seismologi, aspek geologi, aspek geoteknik serta aspek struktur.

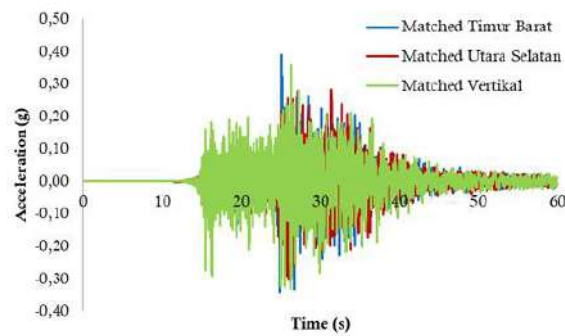
Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dengan pendekatan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* yang berguna untuk meminimalisir kerusakan yang ditimbulkan akibat gempa. Pengumpulan data gempa bersumber dari katalog gempa *National Earthquake Information Center* (NEIC-USGS) dengan data histori kejadian gempa diambil mulai dari 01 Januari 1963 hingga 30 Mei 2023 dengan luas wilayah yang ditinjau pada radius 500 km dari lokasi Penelitian.

Data gempa yang diperoleh dari katalog USGS, untuk daerah sekitar Kota Ambon dengan batas administrasi pada koordinat latitude 0,802 sampai -8,559 dan longitude 122,576 sampai 132,748 yang tercatat dari tahun 1963 sampai 2023 dengan magnitude gempa minimal 5 dan kedalaman maksimum 300 km yaitu kurang lebih sebanyak 3170 kejadian gempa. Data yang telah terseragamkan tersebut kemudian dicari nilai percepatan serta UHS menggunakan bantuan software SR Model yang kemudian dilakukan matching dengan spektra target dari rekaman gempa pilihan menggunakan bantuan software Seismomatch.

Hasil analisis risiko gempa yang digambarkan dalam bentuk nilai percepatan di Kota Ambon pada UHS pada $T = 0$ detik sebesar 0,455 g, pada $T = 0,2$ detik sebesar 0.927 g dan pada $T = 1$ detik sebesar 0,294 g. Sumber gempa yang diprediksi memiliki kontribusi terbesar terhadap resiko gempa di Kota Ambon adalah sumber gempa subduksi megathrust Laut Banda Utara dengan dominasi sebesar 94,987%.



Gambar 2.10 Spectral Matching Kota Ambon



Gambar 2.11 Ground Motion Sintetik Kota Ambon

2.2 Perbedaan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan tinjauan pustaka dari penelitian-penelitian terdahulu yang memiliki kemiripan topik bahasan dengan penelitian yang akan dilakukan. Adapun rangkuman dari perbandingan antara penelitian-penelitian tersebut disajikan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Penelitian Terdahulu					Penelitian Sekarang
Peneliti	Pawirodikromo, Makrup, Teguh et. al.	Saputra dan Makrup	Rahayu dan Pawirodikromo	Sulistio, Makrup, Muntafi et.al	Mahendra
Tahun	2020	2021	2023	2024	2024
Judul	<i>Development of synthetic ground motion at a specific site in Yogyakarta town, Indonesia utilizing the PSHA Method</i>	Deagregasi Hazard dan Rekomendasi Ground Motion Sintetik di Provinsi Riau	<i>Time History</i> Sintetik di Wilayah Bogor Ditinjau dari Deagregasi Hazard	Analisis Hazard Gempa dan Usulan Ground Motion Sintetik Untuk Kota Ambon Dengan Menggunakan Metode Probabilistik Seismic Hazard Analysis (PSHA)	Modifikasi <i>Time History</i> Permukaan Untuk Perrncanaan Gedung di Provinsi Bengkulu Berdasarkan SNI 8899:2020
Tools	<i>Manual Stochastic, Deterministic, Probabilistic Methods</i>	SRModel <i>SeismoMatch</i>	SRModel <i>SeismoMatch</i>	SRModel <i>ZMAP</i> <i>SeismoMatch</i>	<i>SeismoMatch</i> <i>SeismoSignal</i>
Lokasi	Yogyakarta	Riau	Bogor	Ambon	Bengkulu
Hasil	Berdasarkan MD dan RD, 12 Synthetic Ground Motion (SGM) telah diperoleh di mana spektranya telah sesuai dengan spektra target. Ke-12 SGM ini memiliki variasi PGA dan rasio A/V-nya. Karena spektra target pada level batuan dasar memiliki frekuensi tinggi,	Hasil dari analisis risiko gempa direpresentasikan dalam bentuk nilai percepatan di Provinsi Riau pada UHS memiliki nilai percepatan 0,27 g pada T = 0 detik, 0,64 g pada T = 0,2 detik, dan 0,41 g pada T = 1 detik.	Hasil penelitian diperoleh bahwa nilai percepatan meresrepresentasi risiko gempa untuk Bangunan Gedung di Bogor Green Forest. UHS memiliki nilai percepatan T = 0 detik adalah 0.1845, T = 0.2 detik adalah 0.4276, dan T = 1 detik adalah 0.2671.	Hasil analisis risiko gempa yang digambarkan dalam bentuk nilai percepatan di Kota Ambon pada UHS pada T = 0 detik sebesar 0,455 g, pada T = 0,2 detik sebesar 0.927 g dan pada T = 1 detik sebesar 0,294 g. Sumber gempa yang diprediksi memiliki	Hasil penelitian ini diharapkan diperoleh hasil yang lebih komprehensif dan realistis tentang kondisi seismic di Provinsi Bengkulu dengan modifikasi gerak tanah menggunakan <i>spectral matching</i> dan <i>artificial ground motion</i> yang

Lanjutan Tabel 2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Penelitian Terdahulu					Penelitian Sekarang
Hasil	hampir keseluruhan dari 12 SGM yang dipilih juga memiliki frekuensi yang tinggi. Hasil pencocokan spektral dan pengujian durasi signifikan gempa D595 dari ke-12 gempa tersebut telah memenuhi persyaratan. Ke-12 SGM memiliki PGA sebesar 0,183 - 0,276g dengan rata-rata 0,232g, dan rasio A/V = 0,771 - 2,117, dengan rata-rata 1,329. Durasi signifikan SGM $t_e = D595 = 13,04-24,63$ detik (dengan rata-rata 15,92 detik) masih berada dalam rentang nilai, sesuai dengan perhitungan yaitu antara 10,53-25,95 detik.		Diprediksi memiliki kontribusi terbesar terhadap risiko gempa adalah sumber gempa Sesar Cimandiri yang mendominasi sebesar 38,5508%. Hasil respons spektra memperlihatkan bahwa hasil dari gempa yang untuk matching begitu tinggi dan turun bertemu dengan respons spektra yang ada pada layer 1, 2, dan 3 di detik ke sekitar 0.74. dan Hasil dari Triparte Graph yaitu Akselerasi, Kecepatan dan Simpangan ada di hasil penelitian	kontribusi terbesar terhadap resiko gempa di Kota Ambon adalah sumber gempa subduksi megathrust Laut Banda Utara dengan dominasi sebesar 94,987%.	disesuaikan dengan respons spektrum target.

BAB III

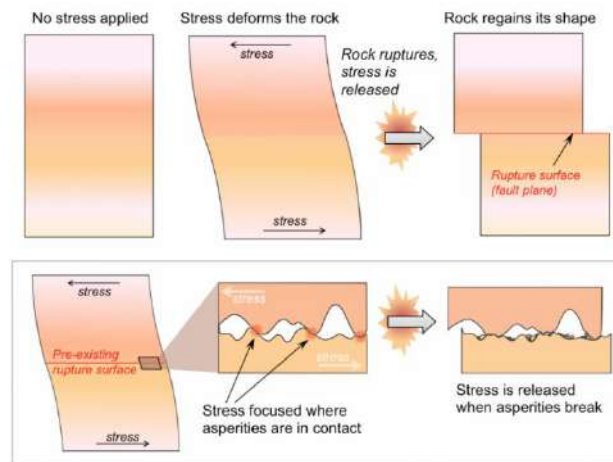
LANDASAN TEORI

3.1 Gempa Bumi

Pawirodikromo (2012) memberikan penjelasan apabila gempa bumi merupakan bergetarnya permukaan tanah yang diakibatkan oleh pelepasan energi secara tiba-tiba yang diakibatkan oleh pecah atau *slip*-nya massa batuan di lapisan kerak bumi. Energi yang terakumulasi dan terperangkap pada waktu yang lama kemudian terlepas dan merambat ke segala arah sampai ke permukaan tanah. Hal tersebut yang menyebabkan permukaan bergelombang dan mengakibatkan bangunan di atasnya bergetar. Gaya-gaya yang terjadi pada saat struktur bangunan bergetar tersebut ada karena kecenderungan massa bangunan untuk mempertahankan bentuk dari gerakan.

Bolt (1985) mengemukakan teori *Elastic Rebound* yang menyatakan bahwa gempa bumi merupakan suatu gejala alam yang ditimbulkan oleh pelepasan energi regangan elastis batuan, akibat adanya deformasi batuan yang terjadi di lapisan litosfer. Deformasi batuan tersebut terjadi akibat adanya tekanan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada lapisan bumi. Tekanan dan regangan yang terjadi secara terus menerus menyebabkan daya dukung dari batuan akan mencapai limit batas maksimumnya dan mulai terjadi pergeseran yang akhirnya terjadi patahan secara tiba-tiba.

Mekanisme dari gempa bumi secara singkat dapat dijelaskan sebagai 2 buah gaya yang bekerja dengan arah berlawanan pada batuan kulit bumi, batuan tersebut nantinya akan mengalami deformasi karena sifat elastis. Bila gaya yang bekerja pada batuan dalam waktu lama dan konstan, maka daya dukungnya akan mencapai batas maksimum dan mengalami pergeseran. Akibatnya batuan akan mengalami patahan tiba-tiba sepanjang bidang patahan, hingga batuan tersebut mengalami kondisi stabil kembali, namun sudah terjadi perubahan bentuk dan posisi. Ketika batuan mengalami gerakan yang tiba-tiba akibat pergeseran batuan, tekanan energi yang tersimpan akan dilepaskan dalam bentuk getaran *seismic* berupa gempa bumi.



Gambar 3.1 Proses Deformasi Batuan Penyebab Terjadinya Gempa Bumi

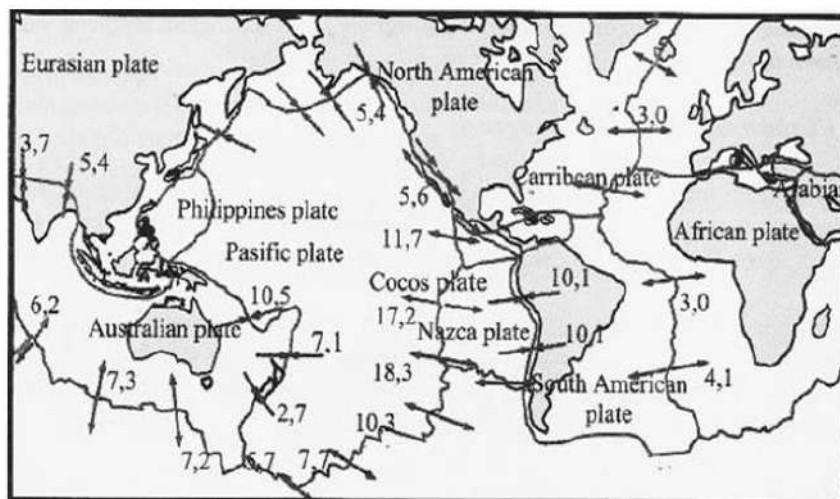
Setiap kejadian gempa bumi akan menghasilkan informasi *seismic* berupa rangkaian data gelombang *seismic* yang dapat dicatat atau direkam oleh seismograf. Rekaman dari rangkaian gelombang *seismic* tersebut disebut dengan seismogram. Setelah melalui proses pengumpulan, pengolahan, dan analisis data, maka akan didapatkan informasi mengenai parameter gempa bumi berupa waktu kejadian, lokasi episenter, hiposenter, dan magnitudonya.

3.2 Teori Lempeng Tektonik

Teori Lempeng Tektonik merupakan sebuah hasil dari pemikiran yang merubah paradigma mengenai pemahaman tentang litosfer bumi. Teori ini menjelaskan mengenai sifat dinamis yang membentuk kerak bumi yang disebabkan oleh gaya endogen yaitu di mana lapisan litosfer tidaklah suatu lapisan yang masif dan homogen, melainkan terbentuk dari lapisan yang masif dan pecah-pecah. Berpecahnya lapisan litosfer ini terjadi akibat faktor penyusutan bumi yang terjadi karena pendinginan luar dalam periode pembentukan lapisan bumi yang terjadi pada arah tangensial dan radial yang terkombinasikan dengan gaya gravitasi, sehingga dari interaksi lapisan tersebut memiliki kecenderungan tidak teratur pada bagian yang relatif lemah. Retakan/pecahnya lapisan litosfer ini mengakibatkan terbentuknya lempeng-lempeng litosfer di lapisan luar bumi yang disebut dengan lempeng tektonik.

Terdapat beberapa lempeng tektonik besar dan kecil yang tersebar di permukaan bumi, dan setiap lempeng tersebut memiliki karakteristiknya tersendiri, dalam teori ini dinyatakan bahwa pada perkembangan keilmuan kini, litosfer atau kerak bumi terbagi atas beberapa lempeng besar dan kecil seperti:

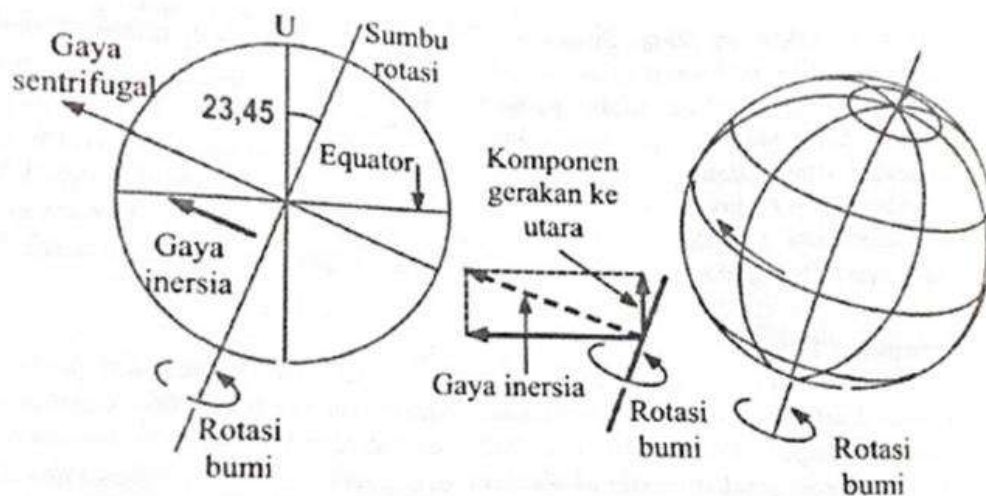
1. Lempeng Pasifik, (*Pacific Plate*) mencakup sebagian besar Samudra Pasifik dan area luas dari pinggiran Samudra Pasifik, termasuk tepi barat Amerika Utara, Amerika Selatan, dan kepulauan di sekitarnya.
2. Lempeng Eurasia, (*Eurasian Plate*) mencakup sebagian besar Eropa, Asia, dan Atlantik Utara.
3. Lempeng Afrika (*African Plate*) mencakup benua Afrika, sebagian dari Samudra Hindia, dan sebagian Atlantik Selatan
4. Lempeng India-Australia (*Indian-Australian Plate*) mencakup subkontinen India, Himalaya, sebagian besar Samudra Hindia, hingga benua Australia, dan Tasmania.
5. Lempeng Amerika Utara (*North American Plate*) mencakup Amerika Utara
6. Lempeng Amerika Selatan (*South American Plate*) mencakup Amerika Selatan, dan sebagian Atlantik Selatan.
7. Lempeng Antartika (*Antartic Plate*) meliputi benua Antartika dan perairan yang berdekatan.



Gambar 3.2 Arah dan Kecepatan Gerakan Lempeng Tektonik
(Sumber : Widodo, 2012)

3.2.1 Teori Continental Drift

Alfred Wageneer (1880-1930) mengemukakan bahwa konsep benua-benua di Bumi saat ini berawal dari satu super *continent* yang disebut dengan Pangea dan satu samudera yaitu Pathalasa. Terbentuknya pangea pada jutaan tahun lalu yang berinteraksi akibat gaya sentrifugal dari rotasi bumi serta *tidal force* antar planet yang mengakibatkan super-kontinen tersebut terpecah menjadi bagian-bagian yang lebih kecil yang kemudian bermigrasi (*drifted*) ke posisi seperti sekarang ini. Super-kontinen Pangea inilah yang menjadi bukti apabila jutaan tahun lalu, pangea tersebut terpecah dan kemudian mengalami pergerakan cenderung bergerak menuju barat – ke utara secara perlahan ke arah ekuator hingga mencapai posisi saat ini. Pergerakan menuju ekuator yang dipengaruhi oleh rotasi bumi serta gaya tarik bumi dan planet merupakan faktor terjadinya pergerakan tersebut.

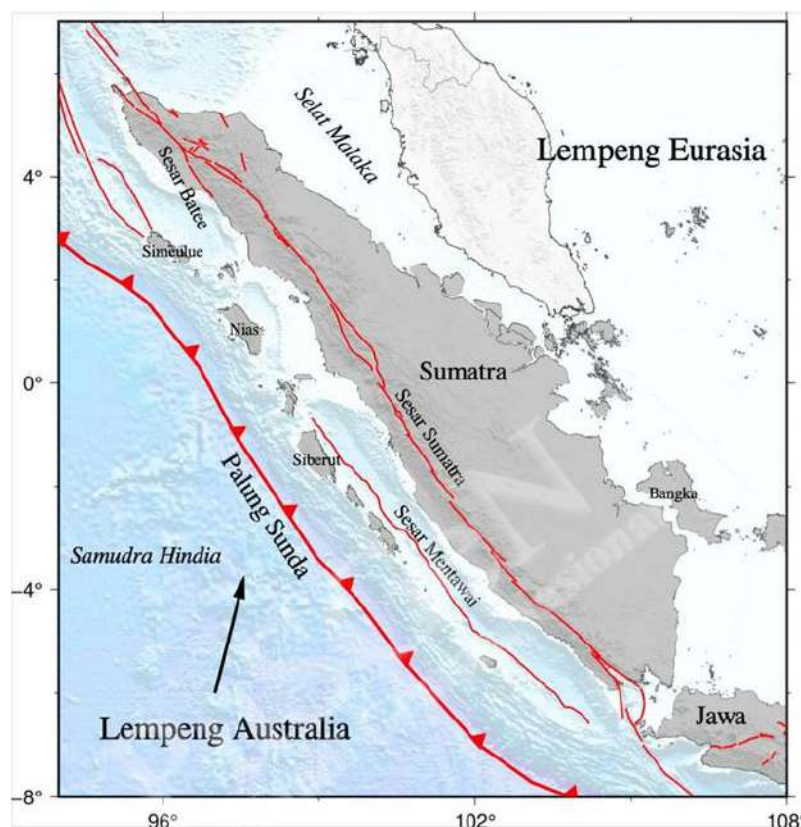


Gambar 3.3 Arah Gerakan Continental Drift
(Sumber: Widodo, 2012)

3.2.2 Kondisi Tektonik di Indonesia

Indonesia yang terletak di antara 6° LU dan 11° LS serta 95° BT dan 141° BT, menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara yang terletak di Cincin Api Pasifik dengan aktivitas seismik dan vulkanik yang tinggi. Gambaran dari kondisi tektonik Indonesia yang sangat aktif dan kompleks ini dari sisi tektonik dapat dibagi

menjadi 2 bagian yaitu tektonik Indonesia bagian barat, dan tektonik Indonesia bagian timur. Tektonik Indonesia bagian barat didominasi oleh konvergensi Lempeng India-Australia dengan Lempeng Eurasia yang membentang di sepanjang barat Sumatra dengan arah konvergensi yang menunjam relatif miring terhadap arah kelurusan palung, namun penunjaman lempeng hampir tegak lurus. Sedangkan tektonik Indonesia bagian timur lebih padat di sepanjang selatan Jawa, dua lempeng dominan berada di bawah laut banda yaitu dari selatan di Palung Timor dan Aru, serta dari utara di Palung Seram yang keduanya dipisahkan oleh sesar Tarera-Aiduna (Bock et al., 2003). Salah satu pulau di Indonesia yang memiliki potensi terjadinya gempa bumi yang tinggi yaitu Sumatra. Pulau Sumatra merupakan bagian dari subduksi lempeng Indo–Australia ke dalam lempeng benua Eurasia yang mengakibatkan tingginya potensi gempa dengan magnitudo yang besar di wilayah ini.



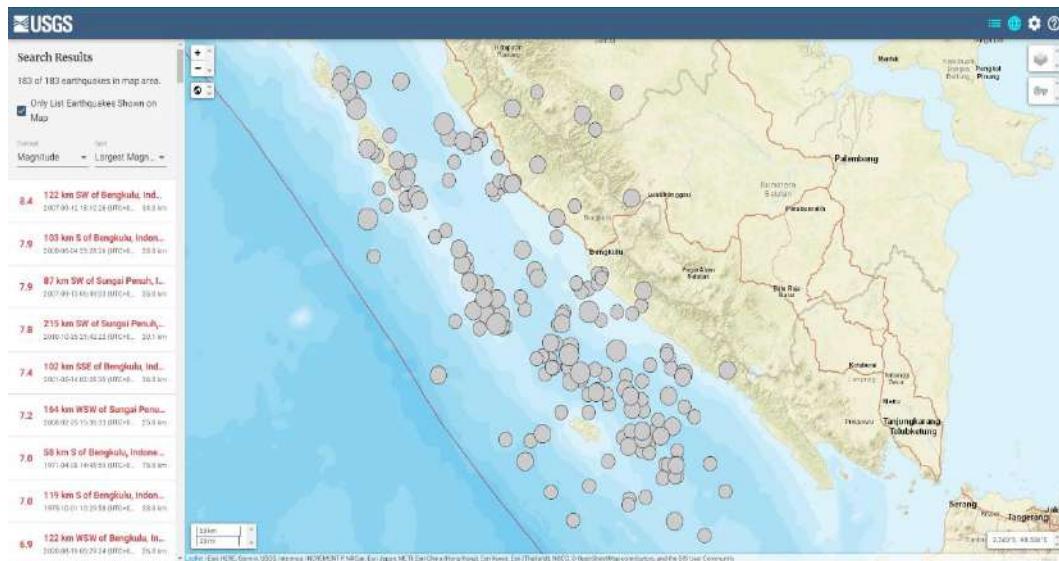
Gambar 3.4 Kondisi Tektonik Pulau Sumatra
(Sumber: PusGeN, 2017)

3.2.3 Kondisi Geologi di Provinsi Bengkulu

Provinsi Bengkulu secara geografis terletak pada 101°01'–103° 41' Bujur Timur dan 2° 16'–3°31' Lintang Selatan. Berdasarkan bentang alamnya, Bengkulu dilalui oleh dua jalur gempa utama, yaitu zona subduksi Sumatra dan patahan Mentawai yang berkontribusi besar terhadap aktivitas seismik di provinsi Bengkulu. Pusat gempa yang berada di darat terdapat di sepanjang sesar Sumatra di sekeliling Bukit Barisan, sedangkan pusat gempa untuk sesar Mentawai terletak di Samudera Hindia yang berada di lempeng Indo-Australia.

Posisi Provinsi Bengkulu yang berada di zona subduksi antara lempeng Indo-Australia dan Lempeng Euro-Asia mengakibatkan provinsi Bengkulu menjadi daerah yang sangat rentan terhadap bencana gempa bumi. Menurut catatan gempa bumi tektonik dari tahun 1900 hingga 2020, sekitar 95% sumber gempa berada di bawah Samudera Hindia yang berbatasan langsung dengan kota Bengkulu. Oleh karena itu wilayah pesisir merupakan wilayah pertama yang mengalami getaran gempa dan implikasinya lebih besar dibandingkan wilayah lain. Banyaknya titik abrasi di sepanjang pesisir Kota Bengkulu merupakan akibat dari kondisi kerentanan tanah yang muncul karena seringnya terjadi gempa bumi di wilayah tersebut. Rata-rata gempa yang terjadi di sekitar Kota Bengkulu dari tahun 1963 hingga 2011 adalah 25 kali/tahun dengan magnitudo 3,6 M_w - 7,9 M_w .

Dengan demikian, dapat diasumsikan secara umum bahwa kekuatan dan kualitas dari bangunan tergantung dari seberapa dekat suatu daerah dengan pusat kejadian gempa, kondisi geologi dan geotektonik lokasi bangunan, serta besarnya PGA dan indeks kerentanan seismik di daerah tersebut. Tingkat kegempaan yang tinggi di wilayah Bengkulu harus dianalisis dan perlu dilakukan mitigasi untuk meminimalisir dampak yang ditimbulkan.



Gambar 3.5 Riwayat Kegempaan Wilayah Provinsi Bengkulu
(Sumber: USGS)

3.3 Gerak Tanah

Gerak tanah atau *ground motion* merujuk pada peristiwa bergetarnya atau suatu rentetan gerakan tiba-tiba dari tanah yang bersifat transient yang terjadi di bawah permukaan bumi di mana energinya dapat menyebar ke segala arah sehingga dapat dirasakan hingga permukaan bumi berupa gelombang seismik. Gelombang tersebut terjadi karena pelepasan energi yang terbentuk akibat pergerakan lempeng bumi berupa lempeng yang saling mendekat (*convergen*), saling menjauh (*divergen*), dan saling melewati (*transform*) (Fadhilah, 2021). Gerak tanah atau umumnya disebut dengan gempa bumi dapat terjadi akibat adanya aktivitas lempeng, peristiwa vulkanik, reruntuhan, ledakan bom, jatuhnya meteorit, maupun aktivitas manusia lainnya.

Permukaan bumi merupakan suatu lapisan yang terdapat beberapa lempeng tektonik dengan ukuran yang sangat besar berupa lapisan keras dari litosfer yang berada di atas mantel bumi cair dan panas sehingga dapat bergerak dan berpotensi saling bertumbukan di daerah pertemuan antar lempeng. Pergerakan relatif dari lempeng tersebut berupa lempeng yang lebih rapat akan bertumbukan dengan lempeng yang lebih renggang yang nantinya akan bergerak mendesak ke bawah.

Dalam pergerakan lempeng ini dapat menyebabkan lempeng tersebut saling bergesekan, maupun terjadi penguncian. Pergerakan dari lempeng yang terjadi terus menerus dapat membentuk energi di bagian lempeng yang terkunci, dalam kondisi elastis, energi tersebut akan tetap tersimpan, namun apabila keadaan ini terlewati ke kondisi elasto-plastis bahkan ke keadaan runtuh sehingga ketika energi yang terakumulasi sudah tidak dapat ditahan, maka energi tersebut dapat terlepas dan disebarkan ke segala arah berupa gelombang seismik berbentuk gempa bumi yang besarnya tergantung dengan besar kecilnya daya tahan lempeng tersebut. Ketika gelombang tersebut telah mencapai permukaan bumi akan menyebabkan getaran yang sangat kuat sehingga dapat merusak vegetasi maupun kondisi topografi yang berada di atasnya. (Wibowo, 2016)

3.3.1 Klasifikasi Gempa Bumi

Gempa bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan penyebab terjadinya menjadi beberapa macam antara lain:

1. Gempa Tektonik (*Tectonic Earthquake*)

Gempa tektonik terjadi diakibatkan oleh gerakan lempeng tektonik yang saling bertemu (*convergent*), saling menggeser (*shear*), saling tarik (*tension*), maupun kombinasi antara satu sama lain. Dengan adanya interaksi antar plate yang saling membentur, menggeser, dan menarik akan mengakibatkan terjadinya akumulasi energi yang terkumpul, yang nantinya dapat dilepaskan secara tiba-tiba dalam bentuk gempa bumi.

2. Gempa Vulkanik (*Vulcanic Earthquake*)

Gempa vulkanik terjadi diakibatkan oleh aktivitas vulkanis dari gunung berapi, di mana energi panas dan tekanan dari aktivitas vulkanik yang melibatkan pergerakan magma, gas, dan material vulkanik lainnya di bawah permukaan bumi. Ketika tekanan di dalam gunung berapi meningkat atau terjadi perubahan yang cepat dalam kondisi geologis akan dapat menyebabkan gempa vulkanik terjadi.

3. Gempa Runtuhan (*Induced Earthquake*)

Gempa runtuhan dapat terjadi diakibatkan oleh aktivitas manusia seperti penambangan, pengisian air di *reservoir* yang dapat meningkatkan tekanan di

sekitar area, runtuhnya gua. Gempa bumi ini relatif jarang terjadi dan bersifat lokal dengan kejadian seperti tanah longsor, salju longsor, jatuhnya batu, dan lain-lain. Berdasarkan kedalamannya, Fowler (1990) mengklasifikasikan gempa dengan parameter sebagai berikut:

1. Gempa dangkal : < 70 Km
2. Gempa menengah : < 300 Km
3. Gempa Dalam : > 300 Km

Selain itu, Ginanjar (2009) telah mengklasifikasikan jenis gempa berdasarkan parameter waktu sebagai berikut:

1. Gempa Utama (*Mainshock*)

Gempa utama adalah gempa bumi yang terjadi dengan magnitudo terbesar dan paling signifikan dalam suatu rangkaian kejadian gempa bumi yang terjadi akibat terkumpulnya energi dari interaksi pada lempeng yang mengalami goncangan akibat deformasi antar lempeng.

2. Gempa Susulan (*Aftershock*)

Gempa susulan adalah gempa bumi yang terjadi setelah terjadi gempa utama (*mainshock*) dalam suatu rangkaian gempa bumi, yang frekuensi serta magnitude gempanya akan menurun seiring dengan waktu, serta berulang pada rentang waktu tertentu. Gempa ini terjadi di daerah yang sama atau dekat dengan episentrum gempa utama. Gempa susulan merupakan hasil dari penyesuaian atau redistribusi tekanan di dalam kerak bumi setelah gempa utama terjadi.

3. Gempa Pendahuluan (*Foreshock*)

Gempa pendahuluan merupakan gempa bumi kecil yang terjadi sebelum gempa utama dalam suatu rangkaian gempa bumi. Gempa ini terjadi di daerah yang sama atau dekat dengan episentrum gempa utama dan menjadi indikasi bahwa gempa utama akan segera terjadi. Gempa pendahuluan dapat memberikan peringatan dini atas potensi gempa utama yang akan terjadi, meskipun tidak semua rangkaian gempa utama diawali oleh gempa pendahuluan.

3.3.2 Magnitude Gempa Bumi

Magnitude gempa bumi merupakan ukuran energi total yang dilepaskan oleh gempa bumi yang diukur menggunakan skala seismik yaitu magnitudo. Skala ini memberikan gambaran angka tunggal yang dapat mencerminkan besaran gempa bumi yang terjadi dengan nilai semakin tinggi maka menunjukkan gempa yang terjadi semakin kuat. Skala besaran ini menyatakan skala kekuatan relatif gempa yang merupakan hasil dari pengukuran fase amplitudo gempa berdasarkan ukuran logaritmik dan kekuatan gempa. Skala magnitude sendiri dapat dibagi menjadi empat jenis yaitu:

1. Magnitude Lokal (ML)

Magnitude lokal merupakan ukuran kekuatan gempa bumi yang diukur berdasarkan amplitudo getaran yang tercatat pada seismograf di lokasi stasiun seismik terdekat dengan episentrum. Charles Richter (1935) mengemukakan metode perhitungan magnitude lokal dengan menggunakan data kejadian gempa di wilayah California dengan jarak episenter <100 Km menggunakan alat seismometer.

Perhitungan dari magnitude lokal dilakukan dengan memperhitungkan jarak episenter ke seismograf dan hasil dari pengukuran magnitude lokal didapatkan berdasarkan logaritma amplitudo maksimal yang berasal dari sinyal tercatat di seismograf melalui pendekatan untuk mengetahui besaran gempa terjadi. Dewasa ini, penggunaan magnitude lokal sudah mulai ditinggalkan karena pemakaian seismograf Woods–Anderson tidaklah terlalu akurat. Persamaan untuk mendapatkan nilai dari ML dapat dilihat sebagai berikut:

$$ML = \log A - 2.48 + 2.76 \log \Delta \quad (3.1)$$

Dengan:

A = Amplitudo maksimum gerakan tanah (μm)

Δ = Jarak dari stasiun ke pencatat sumber gempa (Km)

2. Magnitude *Body* (Mb)

Magnitude *body* merupakan pengukuran magnitudo gempa bumi dengan *body wave* yang didasarkan oleh jumlah energi total gelombang elastis yang dikirim dalam bentuk gelombang-P (*primer wave*) dan Gelombang-S (*secondary wave*). Lay–Wallace (1995) menjelaskan jika *body wave* merupakan rekaman amplitudo dari gelombang-P yang ditransfer dari dalam kerak bumi. Persamaan dari magnitude body dapat dilihat sebagai berikut:

$$M_b = \log A - \log T + 0.01 \Delta + 5.9 \quad (3.2)$$

Dengan:

A = Amplitudo gelombang primer (μm)

T = Periode gelombang primer (detik)

Δ = Jarak dari stasiun ke pencatat sumber gempa (Km)

3. Magnitude *surface* (Ms)

Magnitude *surface* merupakan metode perhitungan magnitude yang berasal dari pendekatan jumlah energi total gelombang *love* (L) dan gelombang *rayleigh* (R), yang diasumsikan bahwa hiposenter dangkal < 30 Km dan amplitudo maksimumnya terjadi pada periode 20 detik, jarak episenter lebih dari 600 Km seismogram periode panjang (*long-period seismogram*) dari gempa dangkal yang didominasi oleh gelombang permukaan. Persamaan dari Magnitude *surface* dapat dilihat sebagai berikut:

$$M_s = \log A_{20} + 1.66 \log \Delta + 2.0 \quad (3.3)$$

Dengan:

A_{20} = Amplitudo gelombang permukaan (mm per 20 detik)

Δ = Jarak episenter dari seismometer (Km)

4. Magnitude *Moment* (Mw)

Magnitude *moment* merupakan skala ukuran gempa menghubungkan antara sifat fisik dari sumber (M_0) dengan magnitude gempa bumi secara langsung. M_0 berupa momen seismik yang diestimasi dari dimensi pergeseran bidang sesar, maupun analisis karakteristik gelombang gempa yang direkam stasiun pencatat

dengan seismograf periode bebas (*broadband seismograph*). Kanamori (1977) merumuskan persamaan untuk mengatasi masalah saturasi dari gempa besar dan kuat untuk memotivasi pengembangan magnitude momen sebagai berikut:

$$M_w = \frac{\log M_o}{1.5} - 10.73 \quad (3.4)$$

Dengan

M_o = Seismic moment (dyne.cm)

3.3.3 Intensitas Gempa

Intensitas gempa merupakan suatu gambaran kualitatif dari besaran kerusakan yang ditimbulkan akibat gempa bumi di lokasi tertentu berdasarkan hasil pengamatan efek gempa terhadap manusia dan infrastruktur. Perhitungan dari intensitas gempa digunakan untuk mengukur seberapa besar kekuatan gempa yang terjadi selain dengan metode perhitungan magnitude. Magnitude merupakan hasil hesarnya energi terkumpul yang kemudian dilepaskan oleh sumber gempa, sedangkan intensitas merupakan besaran kerusakan dampak yang diukur secara makroseismik di lokasi tertentu.

Intensitas gempa juga digunakan sebagai perkiraan *strong ground motion* dan pembanding pengaruh gempa bumi di wilayah geografis yang berbeda. Skala yang digunakan untuk mengukur intensitas gempa pertama kali yaitu skala intensitas *Rossi-Forrel* dengan 10 (sepuluh) derajat skala berdasarkan pengamatan di negara-negara Eropa Barat, skala *Japan Meteorological Agency* (JMA) berdasarkan pengamatan di Jepang yang terdiri dari 8 (delapan) tingkat intensitas, skala *Medvedev-Sponheuer-Kronik* (MSK) yang dibuat berdasarkan pengamatan di Russia, serta Skala *Modified Mercalli* (MMI) yang berdasarkan pengamatan di Amerika Utara yang terdiri dari 12 (dua belas) tingkat intensitas dan dinyatakan dalam angka romawi.

3.4 Identifikasi Sumber Gempa

Gempa besar biasanya terjadi diakibatkan oleh pergeseran tiba-tiba dari lempeng tektonik yang mengakibatkan lepasnya energi yang sangat besar. Pergeseran ini terjadi pada daerah batas pertemuan antara dua lempeng, maupun pada patahan yang tampak di litosfer, seperti patahan San Andreas di California dan patahan Semangko di Sumatra. Identifikasi ini menggambarkan potensi suatu daerah tertentu terhadap lempeng yang memiliki karakteristik aktivitas gempa yang berbeda daripada lempeng di sekitarnya. Pergerakan relatif dari lempeng tektonik menghasilkan tiga jenis pertemuan lempeng yaitu:

1. Batas Transform (*Transform Boundaries*)

Batas transform terjadi diakibatkan oleh aktivitas dua lempeng yang bergerak secara horizontal yang saling bergeser satu sama lain yang tidak membentuk kerak baru/penelanan kerak lama di sepanjang sesar transform, sejajar namun berlawanan arah, serta mengalami papasan dan gesekan antar lempeng.

2. Batas Divergen (*Constructive Boundaries*)

Batas divergen terjadi akibat pertemuan dua lempeng yang bergesekan saling menjauhi. Pecahnya lempeng tektonik berakibat menipisnya lapisan litosfer dan terbelah hingga membentuk batas divergen. Batas ini biasa terjadi pada lempeng benua dan samudera. Aktivitas pada lempeng benua dapat membentuk sebuah lembah retakan (*Rift Valley*), sedangkan pada lempeng samudera dapat terjadi proses yang menyebabkan perluasan dasar laut (*seafloor spreading*).

3. Batas Konvergen/Destruktif (*Destructive Boundaries*)

Batas konvergen terjadi diakibatkan oleh dua lempeng tektonik yang tertelan (*consumed*) ke arah litosfer yang saling berinteraksi dan bertabrakan sehingga mengakibatkan lempeng-lempeng tersebut bergerak saling menumpu satu sama lain (*one slip beneath another*). Aktivitas tersebut disebut dengan subduksi yang merupakan aktivitas lempeng yang satu akan mendesak di bawah lempeng (*downgoing plate*) yang lain, sedangkan apabila di atas disebut (*overriding plate*). Zona subduksi merupakan zona di mana suatu lempeng samudera terdorong ke bawah lempeng benua atau lempeng samudera yang lain, Di zona subduksi inilah gempa bumi tektonik paling sering terjadi.

3.5 Permodelan Sumber Gempa

Zona sumber gempa merupakan area yang memiliki derajat gempa yang sama, di mana di setiap titik di zona tersebut mempunyai potensi yang sama terjadinya gempa di masa mendatang. Permodelan dari sumber gempa digunakan sebagai hubungan antara data kejadian gempa dengan model perhitungan yang digunakan dalam menentukan tingkat bahayanya.

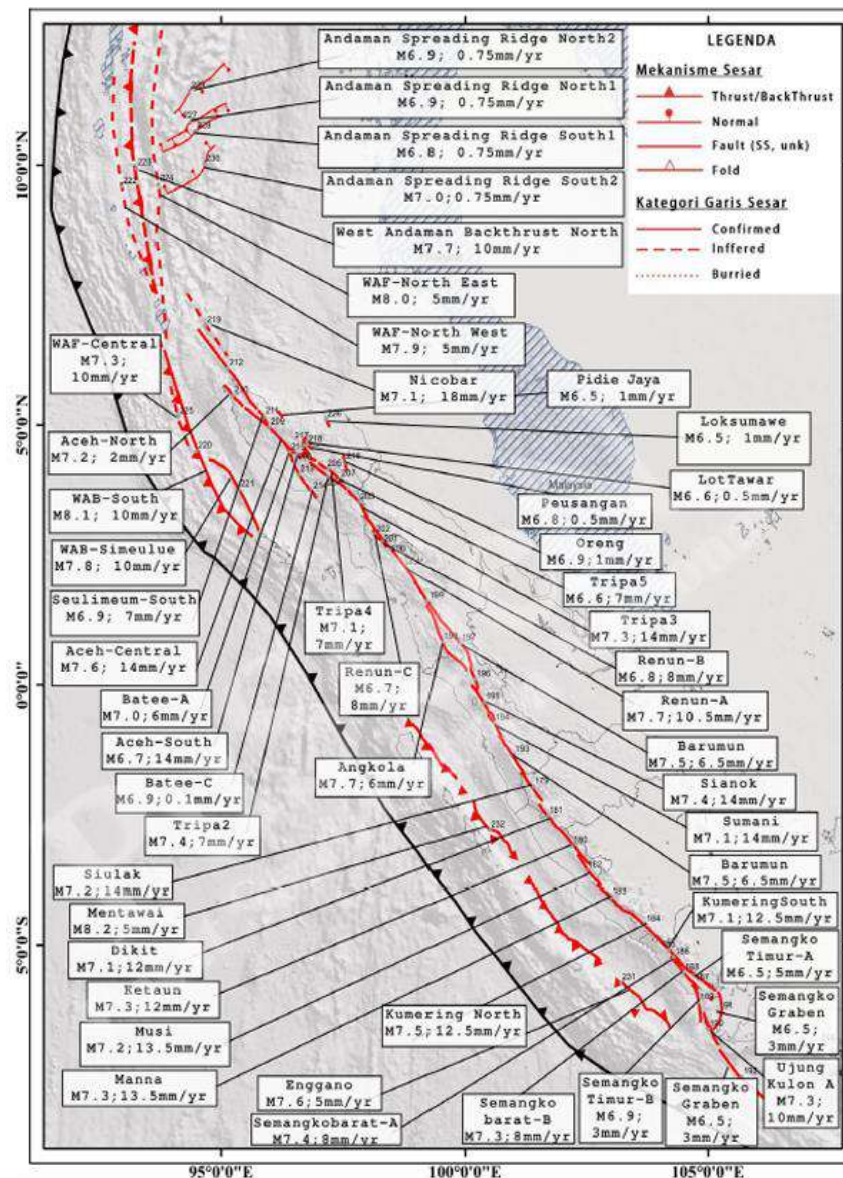
Interpretasi terhadap kondisi seismoteknik yang didapatkan dari informasi data geologi, geofisika, dan seismologi dapat dimodelkan sebagai sumber gempa dengan klasifikasi sebagai berikut:

1. Sumber Gempa Patahan (*Shallow Crustal*)

Sumber gempa *Shallow Crustal* meliputi kejadian gempa patahan lokal, dengan permodelan zona gempa yang terdiri dari arah, panjang patahan, koordinat, serta posisi kedalamannya. *Shallow Crustal* dapat dimodelkan sebagai sumber gempa tiga dimensi karena ddalam perhitungan probabilitas jarak yang dilibatkan merupakan jarak dari titik acuan ke hiposenter.

Konvergensi miring Indo-Australia dengan lempeng Eurasia juga mengakibatkan perpindahan lateral melintasi patahan Sumatra (Sieh dan Natawidjaja, 2000). Struktur sesar Sumatra sepanjang 1900 km ini menghasilkan pergerakan arah *strike* lateral kanan (*right lateral strike slip*). Laju slip di sepanjang patahan bervariasi dari 6 hingga 27 mm/tahun dengan laju slip yang semakin cepat ke barat (Petersen et al., 2004).

Di bagian selatan Sumatra, sesar Mentawai tumbuh sebagai backthrust yang menjadi batas antara prisma akresi dan cekungan busur muka (Singh dkk., 2010; Mukti dkk., 2012). Zona sesar Mentawai terbentuk akibat pertumbuhan sesar anjak yang bergerak maju ke arah busur sehingga struktur yang paling muda terbentuk di bagian timur (Mukti dkk., 2012).



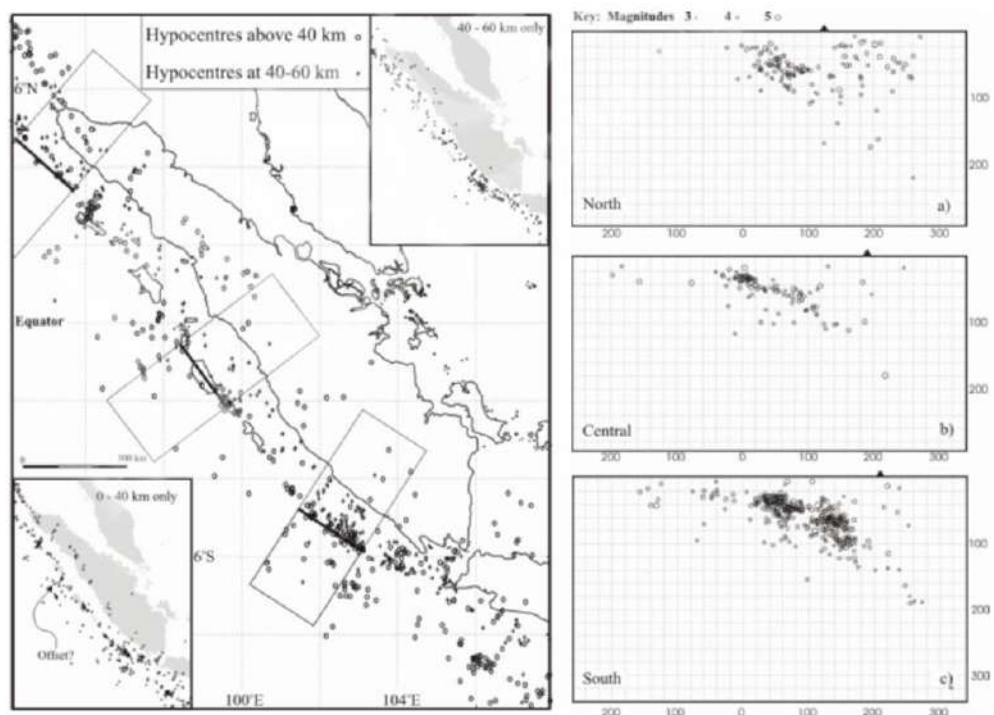
Gambar 3.6 Shallow Crust di Sekitar Pulau Sumatra
(Sumber: PuSGeN, 2017)

2. Sumber Gempa Subduksi

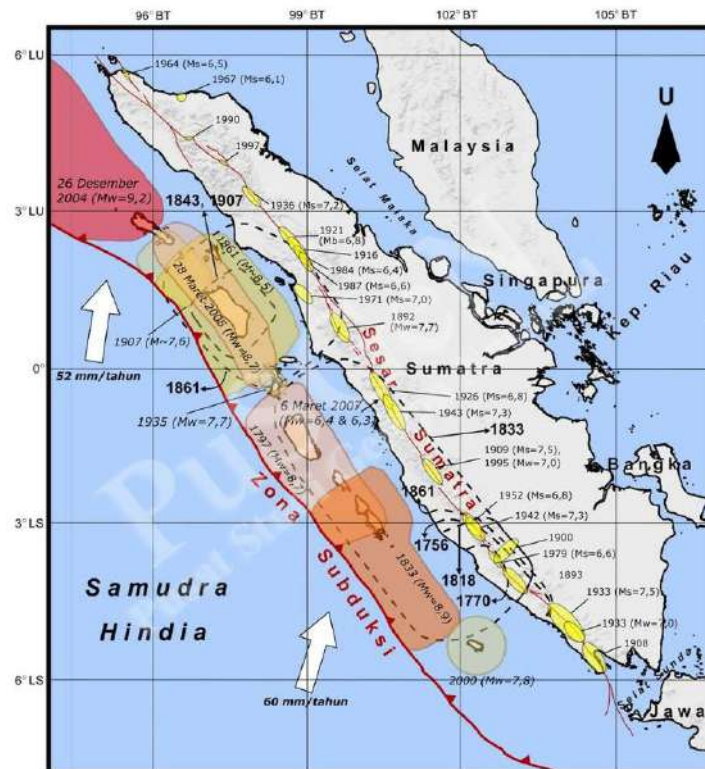
Segmen Sumatra merupakan salah satu margin tektonik lempeng paling aktif di dunia. Batas lempeng Sumatra berarah barat laut; namun, vektor pergerakan lempeng relatif (65 mm/tahun) antara lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia berorientasi pada N10°E (Huchon dan Le Pichon, 1984; Prawirodirdjo et al., 1997; Sieh et al., 1999).

Mekanisme gempa yang terjadi akibat sumber gempa subduksi meliputi *normal fault*, *thrust fault*, *strike slip*, dan *reverse slip* yang terjadi di sepanjang pertemuan lempeng. Zona dari subduksi sendiri dibagi menjadi dua gempa dalam yaitu zona *Benioff*/intraslab yang berada pada kedalaman lebih dari 50 km dan zona *Megathrust*/interplate yang berada di kedalaman kurang dari 50 km.

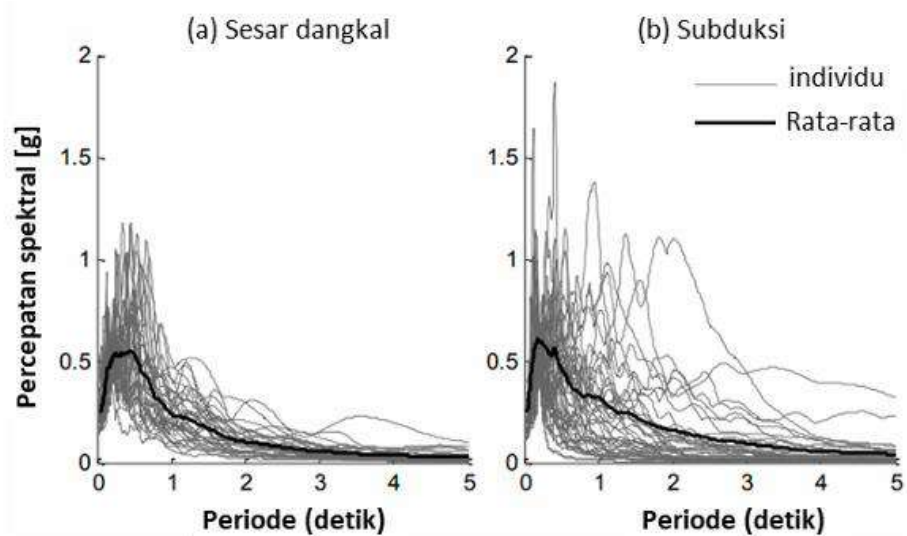
Identifikasi jenis mekanisme sumber gempa ditentukan menggunakan hasil dari kajian geologi yang sudah tersedia dalam peta sumber gempa yang digunakan sebagai data input untuk melakukan *Hazard Analysis* (Irsyam et.al, 2017).



Gambar 3.7 Penampang Zona Subduksi Sumatra
(Sumber: Engdahl et al., 1998)



Gambar 3.8 Zona Robekan Gempa Sepanjang Segmen *Megathrust* Sumatra
(Dimodifikasi dari Newcomb & McCann, 1987)



Gambar 3.9 Spektrum Respons Gerak Tanah *Shallow Crustal* dan Subduksi
(Sumber: Raghunandan, 2013)

3.6 Karakteristik Sumber Gempa

Penentuan karakteristik sumber gempa diperlukan untuk mengetahui parameter sumber gempa dalam langkah mitigasi yang bertujuan untuk mengurangi resiko bencana yang ditimbulkan. Salah satu metode pendekatan yang digunakan yaitu dengan menggunakan persamaan matematis yang ditunjukkan pada karakteristik sumber gempa, yaitu dalam distribusi frekuensi kejadian gempa untuk setiap magnitude dari masing-masing sumber gempa. Distribusi besaran ukuran gempa di zona sumber gempa diperhitungkan pada periode tertentu dengan menggunakan hukum pengulangan kejadian (*recurrence law*). Dalam analisis *seismic hazard*, terdapat beberapa metode *reccurence law* yang digunakan, diantaranya adalah *Gutenberg-Richter recurrence law* dan *characteristic recurrence law*.

Data mengenai frekuensi kejadian gempa dibutuhkan dalam analisis kegempaan yang bertujuan untuk mendapatkan karakteristik sumber gempa yang dapat ditampilkan dalam parameter sumber gempa. Parameter sumber gempa tersebut meliputi parameter a-b dan magnitude maksimum. Model empiris yang digunakan dalam pendekatan tersebut meliputi *truncated exponential* dan *characteristic* untuk mendapatkan nilai dari parameter a-b (Irsyam, 2010).

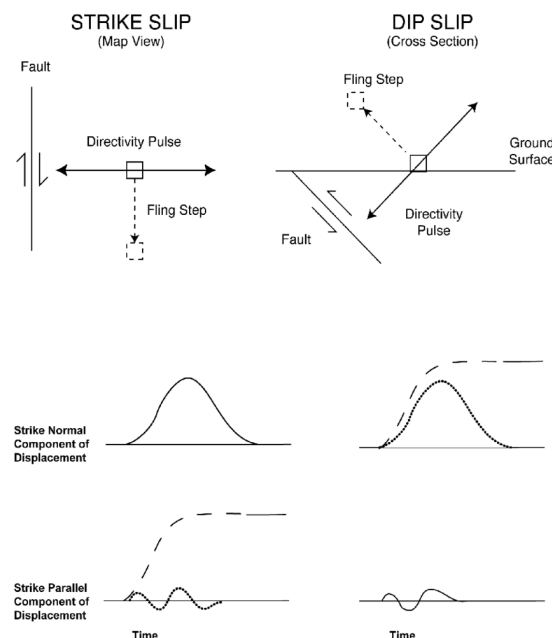
3.6.1 Useable Frequency

Dalam input analisis dinamik riwayat waktu haruslah menggunakan akselerogram terkoreksi. Akselerogram terkoreksi tersebut memiliki rentang *usable frequency* di mana bergantung pada penerapan koreksi menggunakan teknik *filtering*. Sehingga *usable frequency* menjadi parameter yang penting dalam pemilihan data serta dalam pemilihannya perlu dilakukan validasi apabila rekaman *usable frequency* telah terkoreksi pasca penyaringan, sehingga dapat mencakup rentang periode getar yang memiliki pengaruh besar terhadap respon bangunan.

3.6.2 Karakteristik *Pulse*

Karakteristik *Pulse* dari gempa atau yang biasa disebut sebagai *pulse-type ground motions* merupakan jenis gerakan tanah yang diakibatkan oleh gempa bumi yang merujuk pada gelombang seismik yang memiliki amplitudo besar serta periode panjang yang dihasilkan selama gempa bumi terjadi terutama di dekat sumber patahan aktif.

Gelombang ini dicirikan dengan adanya satu gelombang dominan yang menonjol, yang terdiri dari satu siklus besar di mana amplitudo meningkat tajam lalu menurun perlahan. Peningkatan amplitudo yang cepat (*rise time*) dan penurunan yang lebih lambat (*decay time*) mengakibatkan *pulse-type ground motion* menunjukkan asimetri dari gelombang itu sendiri. *Pulse-type motion* biasanya memiliki arah yang lebih dominan, sesuai dengan arah pergerakan patahan. Efek ini sering lebih jelas pada gempa dengan efek *directivity* yang kuat, di mana energi seismik terfokus ke arah tertentu. *Pulse-type motion* umumnya diamati di dekat sumber gempa (patahan aktif), dalam jarak beberapa kilometer. Intensitas dan karakteristik *pulse* ini berkurang seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber patahan.



Gambar 3.10 Ilustrasi Skematik Gerak Tanah Dengan Karakteristik *Pulse*
(Sumber: Sommerville, 2015)

3.6.3 Klasifikasi Situs

Klasifikasi situs dilakukan untuk mengidentifikasi serta mengelompokkan berbagai jenis tanah dan karakteristik geologi dari suatu lokasi yang ditinjau dengan tujuan untuk dapat menilai potensi risiko yang ditimbulkan dari gempa bumi sehingga dapat membantu dalam menentukan dampak yang mungkin ditimbulkan oleh gempa terhadap bangunan yang akan dibangun di wilayah tersebut.

Kondisi tanah pada situs yang ditinjau dapat memberikan pengaruh besar terhadap bentuk spektral dari gerak tanah. Namun bentuk spektral biasanya sudah dipertimbangkan secara eksplisit dalam peraturan prosedur pemilihan dan modifikasi gerak tanah sesuai dengan ASCE 7-16, di mana kriteria pemilihan dapat diterapkan saat mempertimbangkan parameter kelas situs sehingga dapat menghasilkan jumlah kandidat gerak tanah yang memadai.

Pemilihan dan modifikasi gerak tanah menunjukkan penerapan kriteria pemilihan dengan mempertimbangkan agar rekaman gerak tanah dengan kondisi tanah lebih dari satu kelas di luar kelas situs lokasi tinjauan, tidak ikut disertakan dalam rangkaian gerak tanah yang dipakai. Contohnya, untuk lokasi yang memiliki kelas situs SC, hanya rekaman gerak tanah dari kelas situs SB, SC, dan SD, yang dapat diikutsertakan dalam rangkaian gerak tanah (Zimmerman et. al, 2017).

Tabel 3.1 Klasifikasi Situs SNI 1726:2019

Kelas Situs	V_{S30} (m/s)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SA (Batuan Keras)	>1500	N/A	N/A
SB (Batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (Tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (Tanah Sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100

Lanjutan Tabel 3.1 Klasifikasi Situs SNI 1726:2019

Kelas Situs	V_{s30} (m/s)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SE (Tanah Lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralisir $\bar{S}_u < 25$ kPa		
SF (Tanah Khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{S}_u < 50$ kPa		

(Sumber: BSN, 2019)

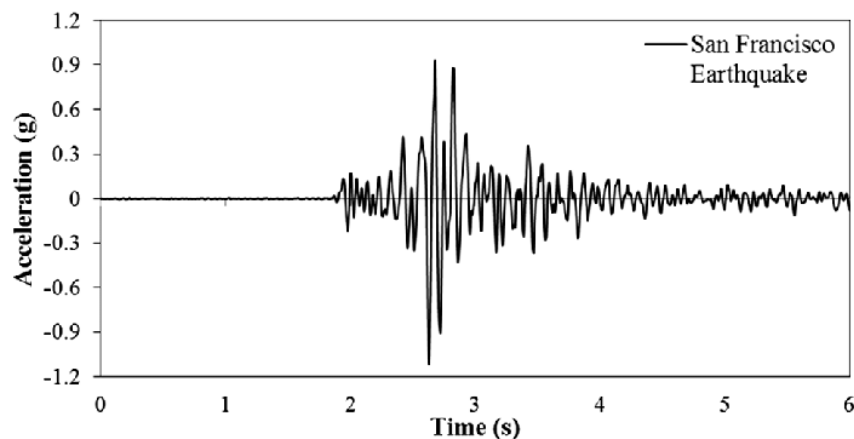
3.7 Time History

Analisis dinamik secara sederhana dapat diartikan sebagai perubahan yang terjadi seiring waktu. Beban dinamik adalah setiap beban yang berubah dalam besar, arah, atau posisinya sesuai waktu. Begitu pula, respons struktur terhadap beban dinamik, seperti lendutan dan tegangan yang terjadi, juga mengalami perubahan waktu atau memiliki sifat dinamik (Clough and Penzien, 1993).

Time History dalam ilmu kegempaan merujuk pada rekaman rinci dari gerakan tanah yang diukur selama kejadian gempa bumi, yang menunjukkan variasi percepatan, kecepatan, dan perpindahan tanah terhadap waktu. Data *Time History* ini diambil dari alat pengukur gempa atau *seismograf* yang merekam getaran tanah

secara kontinu selama berlangsungnya gempa, menghasilkan grafik *accelerogram* yang menggambarkan perubahan gerakan tanah setiap detik selama kejadian tersebut.

Analisis dinamik riwayat waktu percepatan gempa (*Time History*) merupakan salah satu metode analisis dinamik yang digunakan untuk menganalisis struktur terhadap gempa. Akeselerogram gempa yang digunakan dalam analisis respons dinamik riwayat waktu harus berasal dari rekaman gerakan tanah akibat gempa di lokasi dengan kondisi geologi, topografi, dan seismotektonik yang serupa. Dalam analisis dinamik riwayat waktu terhadap pengaruh gempa rencana pada taraf pembebanan gempa nominal, percepatan muka tanah asli dari gempa masukan harus diskalakan sehingga spektrum responsnya secara rata-rata mendekati level spektrum respons gempa batuan pada rentang periode yang signifikan dari respons struktur bangunan yang akan didesain (SNI 1726-2019 Pasal 6.10.1.1). Percepatan permukaan tanah direkam oleh alat *Strong Motion Accelerograph* yang dapat merekam percepatan permukaan tanah dalam tiga dimensi (dua arah horizontal dan satu arah vertikal).



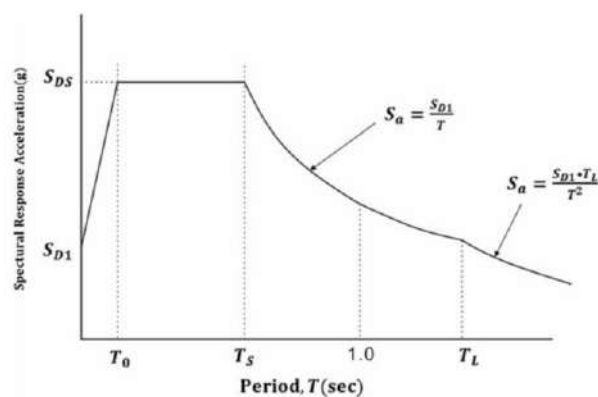
Gambar 3.11 Acceleration time-history graph of 1957 San Francisco
(Sumber: Kazaz et.al, 2006)

3.8 Respon Spektrum

Hasil dari deagregasi dalam analisis bahaya seismik dapat memberikan informasi tentang magnitudo dan jarak episenter dari gempa yang mewakili. Nilai-nilai ini digunakan sebagai dasar untuk memilih riwayat waktu (*time histories*) yang sesuai untuk lokasi sumber gempa dalam analisis bahaya seismik.

Respon spektra merupakan grafik yang menunjukkan reaksi maksimum dari sistem satu derajat kebebasan (*single degree of freedom*) terhadap beban dinamis sebagai fungsi dari frekuensi alami dan rasio peredaman sistem tersebut. Reaksi yang ditampilkan dalam respon spektra dapat berupa percepatan, kecepatan, dan *displacement* (Aldiamar, F., 2007).

Respon spektra juga dapat digambarkan dalam bentuk spektra *triparte* yang menunjukkan reaksi maksimum dalam hal percepatan, kecepatan, dan perpindahan pada satu grafik. Keuntungan dari pendekatan ini adalah memungkinkan identifikasi maksimum respon percepatan, kecepatan, dan perpindahan di seluruh rentang periode yang diinginkan. Untuk keperluan desain praktis, respon spektra desain sering kali dinormalisasi dengan nilai percepatan maksimum pada batuan dasar. Bentuk respon spektra desain dibuat lebih sederhana untuk memudahkan penentuan faktor beban gempa. Penyederhanaan ini dapat dilakukan dengan cara mengambil selubung dari respon spektra, atau dengan menghitung rata-rata respon spektra ditambah satu kali standar deviasi dari kumpulan respon spektra (Aldiamar, F., 2007).



Gambar 3.12 Design Response Spectrum Plot
(Sumber: Paz, M., et.al, IBC2018)

3.9 Analisis Deagregasi dalam Pemilihan Gerak Tanah

Salah satu dasar dari perhitungan *seismic hazard* yaitu dengan menghitung ancaman gempa berdasarkan pada kumpulan hasil dari semua kejadian gempa dan gerak tanah (*ground motion*) yang berpotensi dapat terjadi di masa mendatang. Sedangkan hasil dari analisis dengan kemungkinan magnitude dan jarak dari lokasi yang ditinjau ke sumber mana yang akan memberikan *hazard* terbesar pada site tidak terlihat jelas dalam PSHA. Makrup, L., (2009) menyimpulkan dengan kondisi semacam ini maka *Hazard Analysis* akan menjadi kurang lengkap dalam memberi informasi tentang magnitude (M) dan jarak (R) yang dominan dan tunggal dalam desain gempa.

Dalam berbagai parameter pemilihan dan modifikasi gerak tanah dapat ditentukan secara langsung kecuali pada parameter Magnitudo dan Jarak terhadap sumber gempa. Kedua parameter tersebut dibutuhkan penentuan menggunakan perpanjangan analisis PSHA, yaitu deagregasi. Informasi mengenai magnitudo dan jarak hanya diperoleh menggunakan analisis deagregasi sehingga informasi mengenai deagregasi menjadi sangat krusial dan menjadi salah satu fundamental dalam proses pemilihan *ground motion*.

Hasil dari deagregasi dalam pemilihan gerak tanah berupa pasangan M dan R yang dipengaruhi beberapa parameter, yaitu: mekanisme sumber, level bahaya, periode getar struktur, dan kelas situs. Dalam setiap jenis mekanisme sumber gempa memiliki GMPE (*ground motion prediction equation*) masing-masing dan unik. Untuk menentukan variasi dari intensitas gerak tanah berbagai mekanisme sumber gempa, penyusunan GMPE dikelompokkan berdasarkan jenis mekanisme sumber gempa. Variabel penting dalam persamaan GMPE untuk intensitas gerak tanah yaitu: respons percepatan spektral, periode getar struktur, dan kelas situs. Nilai dari respons percepatan spektral dari hasil analisis *hazard analysis* juga terintegrasi dengan suatu target level bahaya tertentu sehingga analisis deagregasi juga akan membutuhkan input berupa target level bahaya yang ditinjau.

3.10 Level Bahaya

Nilai dari percepatan spektral untuk suatu level bahaya gempa ditentukan melalui kruva bahaya yang telah dikembangkan menggunakan pendekatan probabilitas total dan menjadi salah satu komponen utama dari *hazard analysis*. Sehingga, level bahaya gempa, yang dapat dinyatakan dalam bentuk periode ulang gempa memiliki pengaruh terhadap hasil deagregasi M dan R.

Setiap desain seismik memiliki standar normatif untuk berbagai jenis struktur dengan ikut mencantumkan syarat target kinerja keruntuhan tertentu untuk mengetahui potensi dari dampak yang ditimbulkan terhadap bangunan dan menjaga probabilitas keruntuhan dalam suatu batas risiko yang dapat diterima. Level bahaya ditentukan melalui pertimbangan tingkat kepentingan struktur yang ditinjau serta dampaknya terhadap keselamatan masyarakat.

Beberapa kelas risiko yang digunakan menggunakan gempa dengan periode ulang tertentu dengan menerapkan pendekatan berbasis evaluasi esismik pada lebih dari satu level bahaya dengan sasaran tingkat performa yang berbeda. Sebagai contoh, ASCE 41-17 secara minimum memberikan syarat evaluasi pada periode ulang gempa 1000 tahun dengan sasaran tingkat performa *Collapse Prevention (CP)* dan 250 tahun dengan sasaran tingkat performa *Life Safety (LS)* untuk bangunan dengan kategori risiko I dan II.

Dalam evaluasi struktur jembatan juga diterapkan konsep serupa yaitu dengan diisyaratkan dua level bahaya untuk kebutuhan evaluasi, yaitu gempa dengan periode ulang 100 tahun dan 1000 tahun. Untuk memfasilitasi kebutuhan desain seismik dari berbagai jenis struktur di Indonesia secara komprehensif, peta deagregasi dibuat menjadi 6 tingkatan level bahaya, meliputi: Gempa dengan periode ulang: (1) 100 tahun, (2) 250 tahun, (3) 1000 tahun, (4) 2500 tahun, (5) 5000 tahun, (6) dan 10000 tahun.

3.11 Parameter Intensitas Gerak Tanah

Dalam intensitas gerak tanah tertentu, seperti percepatan puncak tanah (*peak ground acceleration*) atau respons percepatan spektral pada periode getar struktur tertentu menggunakan basis perancangan seismik yang ditentukan dengan mempertimbangkan karakteristik dinamik struktur yang ditinjau. Intensitas gerak tanah berupa percepatan puncak tanah (PGA) digunakan sebagai kebutuhan desain seismik yang sangat kaku, sedangkan intensitas gerak tanah yang berupa percepatan spektral digunakan dalam desain struktur yang lebih fleksibel seperti jembatan dan gedung *multi-storey*.

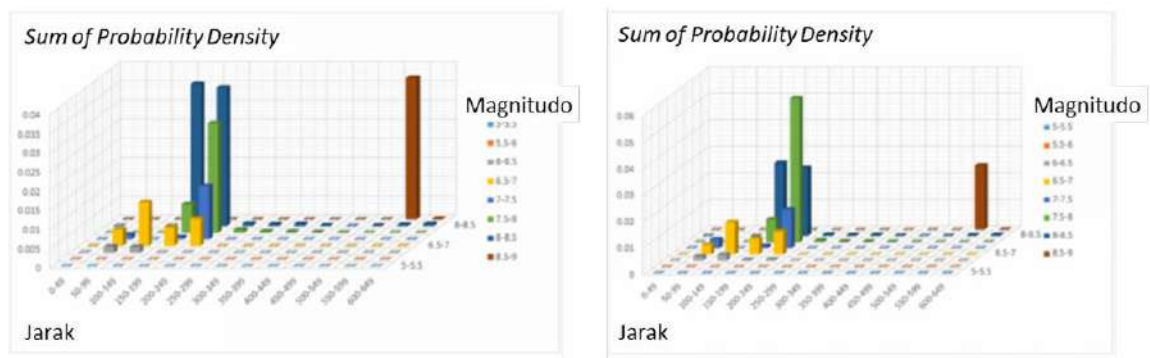
Nilai respons percepatan spektral ditentukan menggunakan GMPE dengan koefisien yang terdapat pada satu periode getar tertentu. Sejumlah GMPE yang digunakan dalam penyusunan peta gempa respons percepatan spektral di Indonesia untuk saat ini terbatas hanya berlaku untuk batas ambang atas nilai periode getar 3-detik, sehingga validitas hasil dari *hazard analysis* dan juga deagregasi M dan R menggunakan sejumlah GMPE tersebut dibatasi pada periode getar 3-detik.

Pada pengamatan hasil deagregasi di Indonesia, nilai M dan R untuk periode getar 0,2-detik memiliki perbedaan yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan hasil untuk periode getar 1-detik. Namun, nilai M dan R untuk periode getar 1-detik tidaklah memiliki perbedaan yang besar apabila dibandingkan dengan nilai untuk periode getar 3-detik. Sehingga dalam peta deagregasi terdapat 3 macam jenis untuk periode getar 0,2-detik, 1-detik, dan 3-detik.

Dalam catatan pengamatan hasil deagregasi di Indonesia dengan menggunakan GMPE yang memiliki catatan periode getar lebih besar dari 3-detik, deagregasi nilai M dan R untuk periode getar lebih besar dari 1-detik sudah tidak terlalu sensitif terhadap nilai dari periode getar. Sehingga, secara teori periode getar 3-detik dinilai sudah dapat mewakili struktur dengan periode getar menengah dan periode getar panjang. Namun juga dipertimbangkan bahwa proporsi kontribusi terhadap bahaya untuk setiap mekanisme sumber gempa juga dapat dipengaruhi oleh periode getar, yang dapat mempengaruhi proporsi mekanisme sumber yang digunakan sebagai rekomendasi dalam pemilihan gerak tanah.

Untuk mencakup kebutuhan desain seismik berbagai jenis struktur di Indonesia, peta deagregasi dibuat dalam 3 nilai intensitas gerak tanah:

1. Percepatan puncak tanah (PGA)
2. Respons percepatan spektral pada periode getar 0,2s (S_a 0,2-detik)
3. Respons percepatan spektral pada periode getar 3s (S_a 3-detik)



Gambar 3.13 Contoh Hasil Analisis Deagregasi Wilayah Jakarta (2500 Tahun) Pada Periode $T=2s$ (Kiri) Dan $T=5s$ (Kanan)
(Dimodifikasi dari SNI 8899:2020)

3.12 Kecepatan Gelombang *Shear* pada Kedalaman 30 Meter (V_{s30})

V_{s30} merupakan kecepatan gelombang geser rata-rata dalam 30 meter pertama (*Average Shear Wave Velocity over the first 30 meters*). Parameter ini merupakan hal penting dalam perhitungan geoteknik dan desain seismik yang digunakan untuk mengevaluasi sifat dinamis tanah dan dampaknya terhadap respons seismik suatu lokasi.

Dalam merumuskan kriteria desain seismik di suatu wilayah tertentu perlu penentuan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari dasar ke permukaan tanah untuk suatu *site*, maka *site* tersebut haruslah diklasifikasikan berdasarkan kekuatan gempa bumi akibat efek lokal didasarkan pada data V_{s30} yang diunduh dari USGS. Kecepatan gelombang (V_s) merupakan parameter untuk mengevaluasi sifat dinamika tanah.

Nilai dari kecepatan rata-rata *shear wave* (Gelombang-S) dari permukaan hingga kedalaman 30m (V_{s30}) juga digunakan sebagai parameter untuk analisis

kondisi geologi terhadap tingkat kerawanan akibat gempa bumi. Klasifikasi kelas situs menurut SNI 1726-2019 dapat dilihat pada tabel 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3.2 Vs30 Berdasarkan SNI 1726:2019

Kelas Situs	Deskripsi	V_{S30} (m/s)
SA	Batuan keras	$V_{S30} > 1500$
SB	Batuan	$750 \leq V_{S30} \leq 1500$
SC	Tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak	$350 \leq V_{S30} \leq 750$
SD	Tanah sedang	$175 \leq V_{S30} \leq 350$
SE	Tanah lunak	$V_{S30} < 175$

(Sumber: BSN, 2019)

3.13 Amplifikasi

Amplifikasi merupakan penguatan gelombang yang terjadi akibat perbedaan signifikan antara impedansi lapisan bawah dengan lapisan yang ada di atasnya. Amplifikasi tanah dapat terjadi apabila gelombang yang merambat di suatu lapisan yang lebih lunak daripada lapisan sebelumnya. Perbedaan impedansi dari lapisan tersebut yang semakin besar dapat mempengaruhi nilai amplifikasi yang semakin besar pula. Amplifikasi akibat pengaruh kondisi tanah setempat dapat diperoleh melalui 2 cara, yaitu berdasarkan data rekaman respon tanah akibat gempa dari tempat-tempat yang berbeda pada kejadian yang sama, dan berdasarkan analisis numerik rambatan gelombang geser dari tanah dasar hingga di permukaan tanah, Widodo (2012).

Koefisien amplifikasi dibutuhkan untuk konversi nilai S_s dan S_1 sesuai dengan keadaan tanah di lapangan. Berdasarkan SNI 03-1726-2019 tentang Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung, dalam menentukan respon spektrum di suatu wilayah, dibutuhkan nilai faktor amplifikasi gempa pada periode 1,0 detik dan 0,2 detik.

Terdapat 2 faktor amplifikasi yakni faktor amplifikasi getaran berdasarkan percepatan pada getaran periode 1,0 detik (F_v) dan faktor amplifikasi getaran

berdasarkan pada getaran periode 0,2 detik (F_a) nilai untuk masing-masing amplifikasi dapat dilihat pada tabel 3.3 dan 3.4.

Untuk menentukan parameter respon spektral percepatan pada periode 1 detik (S_{M1}) dan periode pendek (S_{MS}) yang diserasikan berdasarkan pengaruh kelas situs dapat ditetapkan dengan rumus berikut:

$$S_{MS} = F_a \times S_s$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1$$

Dengan:

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 1,0 detik.

Untuk menentukan parameter spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}), dan pada periode 1 detik (S_{D1}), harus ditentukan melalui rumus berikut.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}$$

Tabel 3.3 Koefisien Situs, F_a

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

(Sumber: BSN 2019)

Tabel 3.4 Koefisien Situs, F_v

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	$SS^{(a)}$					

(Sumber: BSN 2019)

3.14 Periode Fundamental Pendekatan (T_a)

Periode fundamental struktur, T , dalam arah yang dipertimbangkan harus dihitung berdasarkan sifat struktur dan karakteristik deformasi elemen pemikul dalam analisis yang teruji. Periode fundamental, T , tidak boleh melebihi hasil perkalian antara koefisien batas atas periode yang dihitung (C_u) dari tabel 3.5 dan periode fundamental pendekatan, T_a , yang ditentukan sesuai. Sebagai alternatif dalam analisis untuk menentukan periode fundamental struktur, T , diperbolehkan langsung menggunakan periode pendekatan bangunan, T_a .

Tabel 3.5 Koefisien Untuk Batas Atas Pada Periode Yang Dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

(Sumber: BSN 2019)

Periode fundamental pendekatan (T_a), dalam detik, harus ditentukan dari persamaan berikut:

$$T_a = C_t h_n^x$$

Dengan :

H_n merupakan ketinggian struktur (m), di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur dan koefisien C_t dan x ditentukan dari tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.6 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:		
• Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
• Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

(Sumber: BSN 2019)

Sebagai alternatif, diizinkan untuk menentukan periode fundamental pendekatan (T_a), dalam detik, dari persamaan berikut untuk struktur dengan ketinggian tidak melebihi 12 tingkat di mana sistem pemikul gaya seismik terdiri dari rangka pemikul momen yang seluruhnya beton atau seluruhnya baja dan rata-rata tinggi tingkat sekurang-kurangnya 3 m:

$$T_a = 0,1 N$$

Dengan:

$$N = \text{Jumlah Tingkat}$$

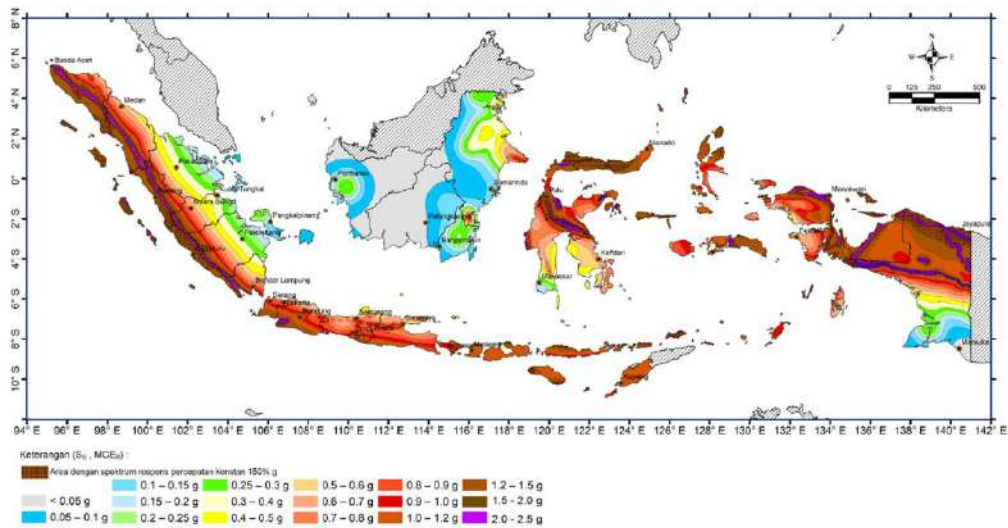
3.15 Respon Spektra Target

Respon spektra target merupakan respon spektra di batuan dasar dari seluruh mekanisme sumber gempa yang terdiri dari perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*), dan percepatan (*acceleration*) dari berbagai nilai periode T . Dalam analisis *Spectral matching*, Respon spektra target dijadikan patokan untuk mendapatkan gerak tanah yang sesuai untuk satu wilayah yang ditinjau dengan nilai Magnitude (M), dan Jarak (R).

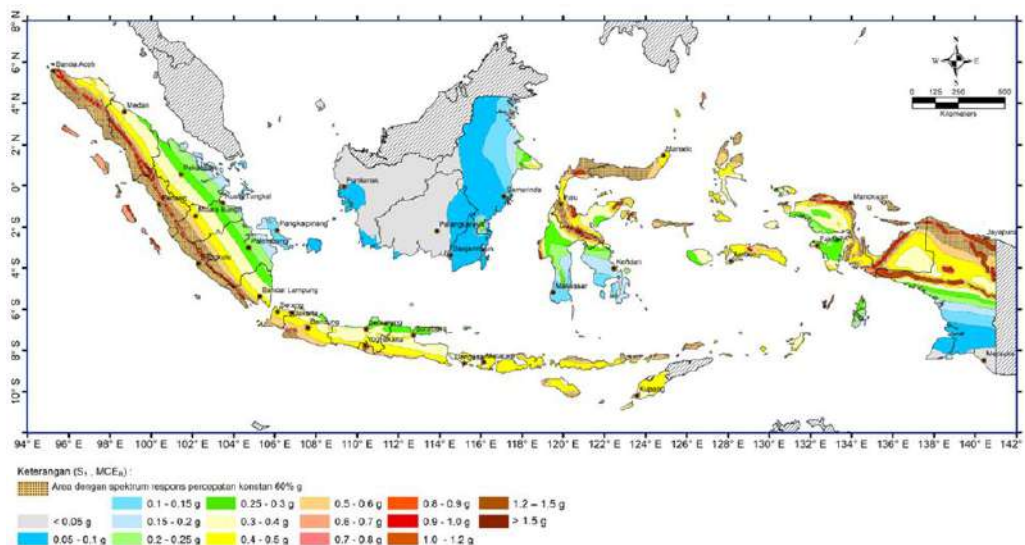
Respon spektra target untuk sumber gempa pada suatu daerah dapat ditentukan dengan menggunakan hasil dari analisis deagregasi, yang masing-masing sumber gempa ditentukan dengan perhitungan ulang respon spektra di batuan dasar di berbagai fungsi atenuasi yang digunakan masing-masing sumber gempa, dengan mempertimbangkan *logic tree models* yang digunakan yang selanjutnya diskalakan dengan nilai respon spektra gabungan dari hasil analisis *hazard* gempa yang telah diperoleh sebelumnya untuk periode ($T=0,2$ s), ($T=1$ s), dan ($T=3$ s).

Metode spektrum risiko seragam (UHS) merepresentasikan bahaya seismik yang diharapkan di suatu lokasi, yang menunjukkan bagaimana variasi dari intensitas dari gerakan tanah pada frekuensi atau periode yang berbeda untuk tingkat risiko tertentu. Mengacu pada SNI 1726:2019 untuk struktur pada semua kelas situs SA, SB, SC, SD dan SE, target respon spektrum MCE_R dapat didapatkan dengan mengalikan spektra respon desain (*Design Basis Earthquake*) dengan faktor 1,5 di mana faktor spektrum desain tersebut digunakan berdasarkan nilai dari parameter percepatan dan koefisien situs spesifik yang sudah tercantum dalam SNI 1726:2019.

Penggunaan UHS sebagai respon spektra target untuk basis seleksi dan modifikasi gerak tanah merupakan pendekatan yang prinsipnya cukup konservatif. Spektrum ini dibuat menggunakan *envelope* dari hasil analisis *hazard* gempa (PSHA dan DSHA) pada setiap periode. Dalam kondisi nyata, nilai respons percepatan pada kurva UHS permukaan untuk rentang periode struktur yang dikaji mungkin bisa saja hanya disebabkan dari sepasang gerak tanah individu.



Gambar 3.14 Parameter gerak tanah, S_s , gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko-tertarget (MCE_R) wilayah Indonesia spektrum respons 0,2 detik (redaman kritis 5%) pada kelas situs BC (S_{BC}) (SNI 1726:2019)



Gambar 3.15 Parameter gerak tanah, S_1 , gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko-tertarget (MCE_R) wilayah Indonesia spektrum respons 1 detik (redaman kritis 5%) pada kelas situs BC (S_{BC}) (SNI 1726:2019)

3.16 Pemilihan Gerak Tanah

Pemilihan gerak tanah (*ground motion*) merupakan tahap penting dalam desain seismik dan analisis risiko gempa. Proses ini melibatkan pemilihan rekaman gempa atau sintetik yang sesuai untuk digunakan dalam simulasi struktur dan evaluasi kinerja seismik.

3.16.1 Jumlah dan Pemilihan Komponen Gerakan Tanah Dasar

Mengacu pada SNI 1726:2019 Pasal 11.2.2, Serangkaian gerakan tanah setidaknya 11 pasang gerak tanah (*ground motion*) horizontal harus dipilih untuk setiap target spektrum respons. Setiap pasang gerak tanah tersebut harus terdiri dari dua komponen gerak tanah horizontal saling tegak lurus.

3.16.2 Kriteria Pemilihan Gerak Tanah

Pemilihan gerak tanah (*ground motion*) dilakukan dengan mempertimbangkan mekanisme sumber gempa, besaran magnitudo, dan jarak sesar atau sumber gempa yang mencerminkan kondisi seismik lokasi yang ditinjau. Jika memungkinkan, gerak tanah yang dipilih harus berasal dari hasil rekaman akselerometer yang terpasang di permukaan tanah. Namun, jika rekaman gerak tanah dengan jumlah yang disyaratkan tidak tersedia, diizinkan untuk menggunakan gerak tanah simulasi. Simulasi tersebut haruslah sesuai dan konsisten dengan nilai magnitudo, karakteristik sumber, jarak patahan, dan kondisi lokasi yang menentukan target respons spektrum.

3.16.3 Durasi Gerak Tanah

Durasi gerak tanah merujuk pada waktu total selama gempa terjadi, di mana gerakan tanah yang signifikan dapat dirasakan berupa periode dari awal sampai akhir gempa yang dapat mempengaruhi struktur dan infrastruktur.

Durasi gerak tanah harus dipertimbangkan dalam pemilihan gerak tanah. Parameter durasi signifikan dapat digunakan sebagai ukuran kuantitatif untuk menentukan kelaikan panjang durasi suatu gerak tanah.

3.17 Modifikasi Gerak Tanah

Modifikasi gerak tanah (*ground motion*) dilakukan untuk proses penyesuaian rekaman gempa agar lebih sesuai dengan kebutuhan analisis seismik pada lokasi dan struktur tertentu. Dengan memodifikasi rekaman gempa, analisis seismik dapat lebih akurat dan relevan, memastikan bahwa desain struktur memperhitungkan potensi efek gempa di lokasi tersebut dan meningkatkan keamanan bangunan terhadap risiko gempa bumi.

3.17.1 Rentang Periode Modifikasi

Prosedur modifikasi rekaman gerak tanah (*ground motion*) yang dicocokkan dengan respons spektrum target harus mengikuti rentang periode yang ditentukan dalam SNI 1726:2019 Pasal 11.2.3.1, yaitu antara $0,2T_{1B} - 2T_{1A}$, dimana T_{1A} merupakan periode fundamental terbesar dan T_{1B} merupakan periode fundamental terkecil untuk arah respons horizontal utama. Pengecualian untuk batas ambang atas rentang periode dapat dilakukan apabila dapat divalidasi secara analitis, sehingga batas ambang atas tersebut dapat diperkecil menjadi $1,5T_{1A}$. Rentang periode yang digunakan dalam modifikasi telah mencakup partisipasi massa 90 % di setiap arah horizontal utama.

3.17.2 Penskalaan Amplitudo

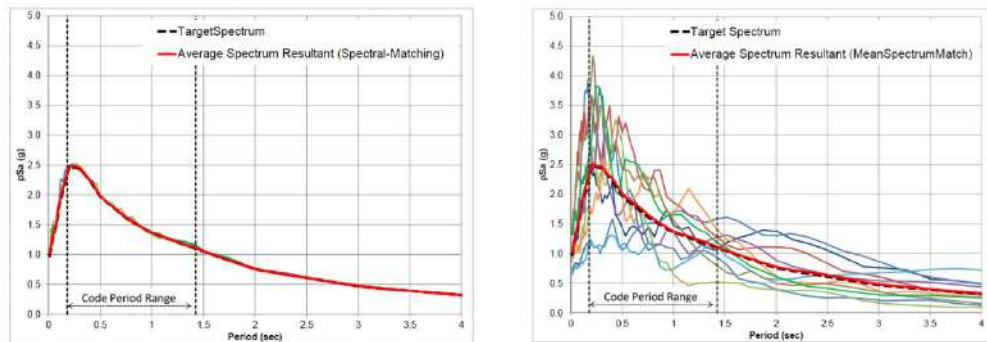
Untuk setiap pasang gerak tanah (*ground motion*), spektrum arah-maksimum harus dibuat dengan menggunakan dua komponen gerak horizontal secara simultan. Setiap pasang gerak tanah harus diskalakan menggunakan faktor skala yang sama untuk kedua komponen horizontal. Faktor skala untuk masing-masing pasang gerak tanah telah ditentukan sedemikian rupa sehingga rata-rata respons spektrum arah-maksimum dari semua gerak tanah mencapai lebih dari 90 % respons spektrum target pada rentang periode yang ditetapkan. Faktor skala yang digunakan harus berada dalam batasan yang memastikan bahwa gerak tanah yang telah diskalakan masih merepresentasikan karakteristik gerak tanah aktual secara memadai.

3.17.3 Pencocokan Spektral

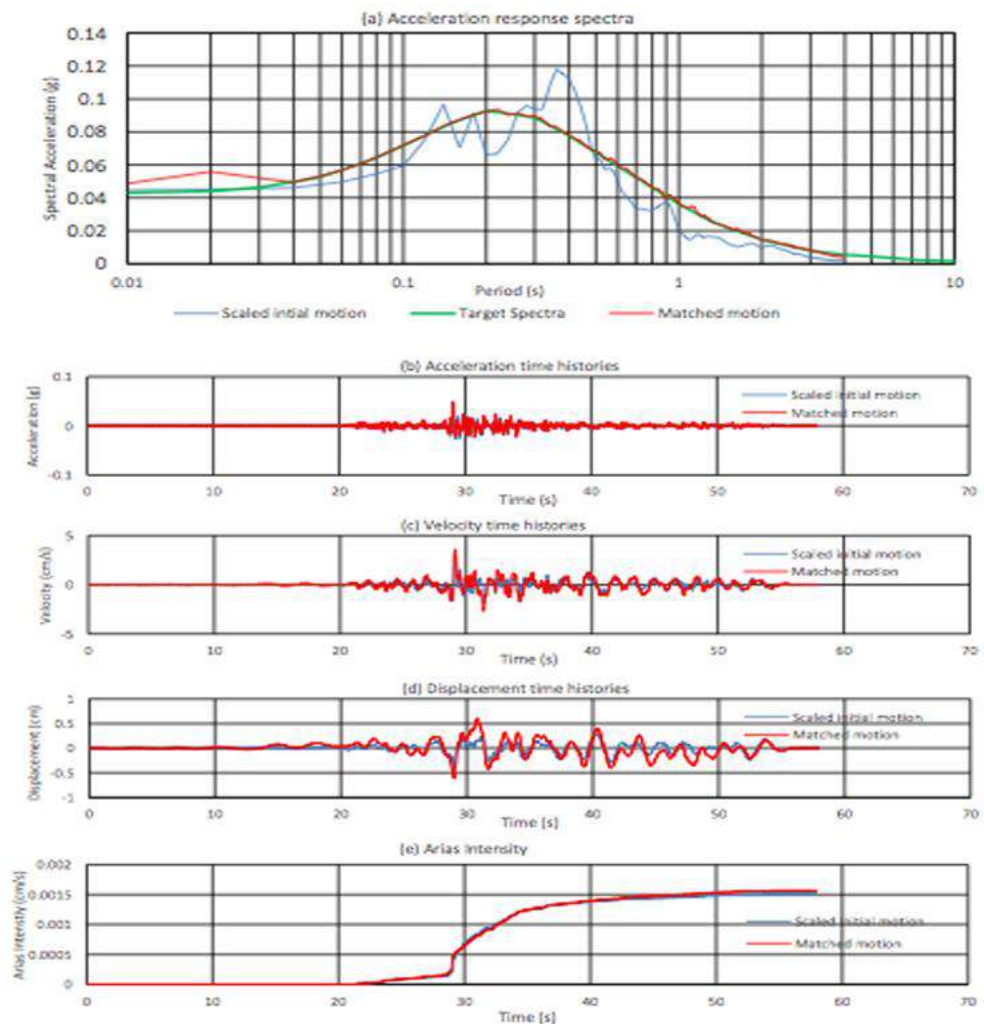
Pencocokan Spektral (*spectral matching*) melibatkan modifikasi dalam domain waktu dari percepatan riwayat waktu (*Time History accelertaion*) agar sesuai dengan spektrum target yang ditentukan berdasarkan metode yang diusulkan oleh Lilhanand dan Tseng (1987, 1988). Abrahamson (1993) menulis kode komputer pertama yang digunakan secara luas untuk penyesuaian spektral yang disebut RSPMatch. Kode ini kemudian diperbarui oleh Hancock et al. (2006).

Setiap pasang gerak tanah (*ground motion*) harus dimodifikasi dengan tujuan rata-rata respons spektrum untuk arah maksimum mencapai setidaknya 110% dari respons spektrum target pada rentang periode yang telah ditentukan. Agar mampu memenuhi persyaratan, dua metode pendekatan dapat digunakan, yaitu metode Pencocokan Spektral Ketat (*Tight Spectral Matching*), dan metode Pencocokan Spektral Rata-Rata (*Mean Spectrum Matching*). Pada metode Pencocokan Spektral Ketat, setiap nilai ordinat spektral dari respons spektrum individu dicocokkan dengan 110% dari nilai target respons spektrum. Sedangkan dalam metode Pencocokan Spektral Rata-Rata, nilai ordinat spektral rata-rata dicocokkan terhadap 110% dari nilai target respons spektrum. Hasil pencocokan spektral dianggap dapat diterima jika:

1. Spektrum tercocokkan memiliki kemiripan bentuk dengan spektrum target,
2. Karakteristik nonstasioner dari gerak tanah asli (*seed motion*) harus tetap dipertahankan, agar tidak terjadi perbedaan fase antara gerakan riwayat waktu tanah asli dengan riwayat waktu termodifikasi,
3. Intensitas Arias dari riwayat waktu gerakan tanah asli memiliki kemiripan dengan gerakan tanah termodifikasi.
4. Rata-rata respon spektra semua gerak tanah X memiliki max error $\pm 10\%$ terhadap rata-rata respon spektra gerak tanah X dan Y.
5. Rata-rata respon spektra semua gerak tanah Y memiliki max error $\pm 10\%$ terhadap rata-rata respon spektra gerak tanah X dan Y.



Gambar 3.16 Contoh Perbandingan Hasil Metode Pencocokan Spektral Ketat (Kiri) Dan Metode Pencocokan Spektral Rata-Rata (Kanan)

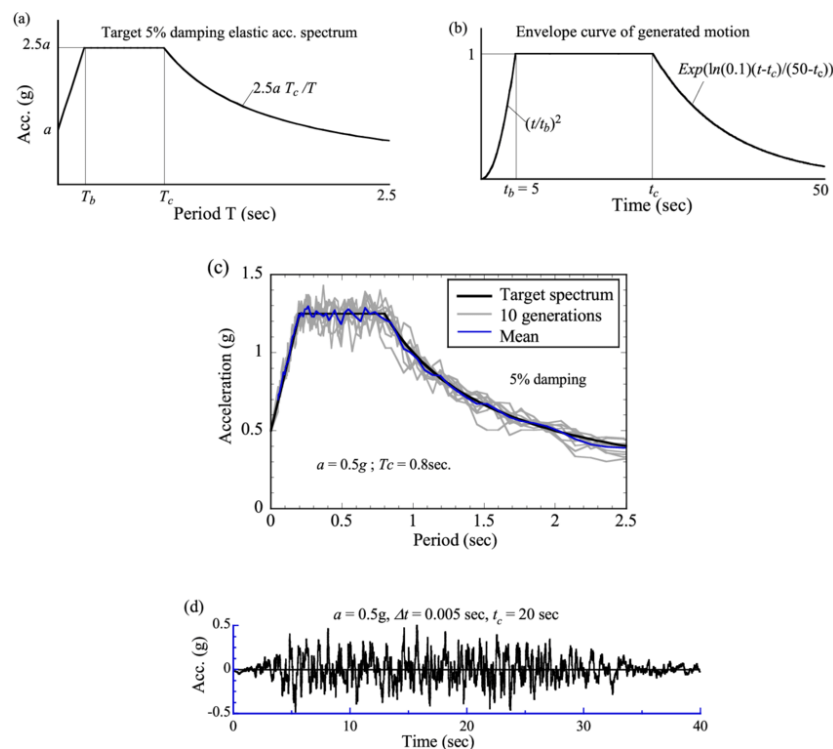


Gambar 3.17 Contoh Hasil Pencocokan Spektral Yang Benar
(Sumber: Mazzoni dkk, 2012)

3.18 Artificial Ground Motion

Gerak Tanah (*ground motion*) atau percepatan riwayat waktu merupakan bagian dari data gempa yang dibutuhkan dalam analisa perambatan gelombang geser (*shear wave*) seismik pada suatu kelas situs untuk digunakan dalam analisis dinamis akibat beban gempa dengan metode riwayat waktu (*Time History*) percepatan gempa. Data ini nantinya dapat memberikan gambaran kondisi geologi serta parameter-parameter lain yang berhubungan dengan peristiwa kegempaan, meliputi nilai maksimum percepatan gempa (*Peak Ground Acceleration*) di batuan dasar, frekuensi, dan durasi. Gerak tanah di batuan dasar dibuat dengan memperhitungkan kondisi tektonik, analisis *hazard* gempa, dan target spektra.

Terbatasnya catatan data gempa yang terdapat di Indonesia dalam bentuk riwayat waktu menyebabkan kurangnya informasi mengenai lokasi pusat gempa, magnitude, kedalaman, dan mekanisme dari gempa yang pernah terjadi. Pembuatan gerak tanah gempa *artificial* dapat dilakukan menggunakan bantuan program *SeismoSignal*.



Gambar 3.18 Contoh Pembuatan Artificial Ground Motion dengan Envelope
(Sumber: Van Thuat et.al 2019)

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Pengumpulan Data Penelitian

Pengumpulan Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data historis kejadian gempa dari tahun 1950 sampai tahun 2023 yang diperoleh dari PEER NGA-West untuk sumber gempa *Shallow Crustal* dan UCLA -NHR3 untuk sumber gempa subduksi dengan wilayah pengambilan data berada di Provinsi Bengkulu dengan batas koordinat 101°01'–103°41' Bujur Timur dan 2°16'–3°31' Lintang Selatan. Ketentuan data gempa yang digunakan sebagai pemilihan gerak tanah merupakan kejadian gempa dengan nilai M, R, Vs30 disesuaikan dengan peraturan yang tercantum pada Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa dengan periode ulang 2500, dan $T = 3,0$.

Metode pengumpulan data yang digunakan pada penelitian ini merupakan dengan data sekunder. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data pada Provinsi Bengkulu yang kemudian untuk data percepatan tanah (S_s dan S_1) pada kelas situs diperoleh dari website <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/> untuk SNI 1726:2019. Kemudian data kecepatan geser rata-rata tanah di kedalaman 30 m ($Vs30$) didapatkan dari website <https://www.usgs.gov/>

4.2 Instrumen Penelitian

Instrumen penting yang diperlukan dalam penelitian ini adalah seperangkat computer yang mendukung penggunaan beberapa *software* sebagai berikut:

1. Software *SeismoMatch*, yang dikembangkan oleh Seismosoft, digunakan untuk melakukan pencocokan spektra dari *seed motion* di batuan dasar.
2. Software *SeismoSignal*, yang dikembangkan oleh Seismosoft, digunakan untuk *me-generate* grafik akselerogram rata-rata.
3. Website PEER NGA West untuk pengambilan data gempa *Shallow Crustal*. (<https://ngawest2.berkeley.edu/>)

4. Website UCLA-NHR3 untuk pengambilan data gempa subduksi.
(<https://www.risksciences.ucla.edu/>)
5. Microsoft Word untuk penulisan laporan penelitian.
6. Microsoft Excel untuk pengolahan data.

4.3 Tahapan Penelitian

Proses ini melibatkan pemilihan rekaman gempa atau sintetik yang sesuai untuk digunakan dalam simulasi struktur dan evaluasi kinerja seismik.

4.3.1 Deagregasi *Hazard*

Deagregasi hazard dilakukan dengan menghitung tingkat bahaya gempa berdasarkan kumpulan data kejadian gempa dan prediksi gerakan tanah di masa depan dalam jangka waktu tertentu. hal ini berguna untuk menentukan tingkat bahaya di suatu lokasi dan mengidentifikasi gempa yang memberikan kontribusi terbesar terhadap bahaya tersebut, berdasarkan kemungkinan magnitudo (M) dan jarak (R) dari sumber gempa. Hasil dari deagregasi adalah memberikan gambaran umum tentang magnitudo (M) dan jarak sumber gempa (R) yang kemungkinan besar akan menyebabkan dampak atau kerusakan signifikan di suatu lokasi, serta laju tahunan rata-rata kejadian gempa berdasarkan fungsi magnitudo dan jarak.

4.3.2 Menentukan Target Respon Spektrum

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 11.2.1, target spektrum yang dipakai haruslah mengacu pada spektrum respons risiko seragam MCE_R pada permukaan tanah dengan redaman 5% berdasarkan nilai respons spektral percepatan dan koefisien-koefisien kelas situs yang berlaku dalam peraturan tersebut Pasal 6.2–Pasal 6.4. Respons spektrum desain (DBE) haruslah dibuat dengan menggunakan parameter nilai-nilai respons spektral percepatan untuk mendapatkan target respons spektrum MCE_R untuk Provinsi Bengkulu. Penentuan dari parameter tersebut didapatkan melalui website respon spektra (<http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021>).

4.3.3 Pemilihan Gerak Tanah

Mengacu pada SNI 1726:2019 Pasal 11.2.2, Serangkaian gerakan tanah setidaknya 11 pasang gerak tanah (*ground motion*) horizontal harus dipilih untuk setiap target spektrum respons. Setiap pasang gerak tanah tersebut harus terdiri dari dua komponen gerak tanah horizontal saling tegak lurus.

Data gempa yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil dari pemilihan gerakan riwayat waktu tanah asli (*seed motion*) yang dapat diambil dari rekaman gempa aktual masa lampau menggunakan simulasi numerik gerakan tanah dari katalog gempa dengan pengambilan data yang telah didapatkan dari deagregasi *hazard* berdasarkan buku analisis Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa. Seleksi gerak tanah dilakukan dengan mempertimbangkan hasil dari deagregasi yang sesuai dengan besaran magnitudo dominan, jarak dominan dari sumber gempa yang dapat mewakili kondisi kegempaan pada lokasi yang ditinjau.

Data yang diperoleh merupakan data sekunder di mana nilai dari parameter deagregasi sudah tersedia dengan format RSN dengan summary dari gempa yang didapatkan dari website PEER (<https://ngawest2.berkeley.edu/>) untuk sumber gempa *Shallow Crustal* dan untuk sumber gempa subduksi diperoleh dari website UCLA-NHR3 (<https://www.risksciences.ucla.edu/nhr3/nga-subduction/>).

4.3.4 Modifikasi Gerak Tanah

Prosedur modifikasi rekaman gerak tanah (*ground motion*) yang dicocokkan dengan respons spektrum target harus mengikuti rentang periode yang ditentukan dalam SNI 1726:2019 Pasal 11.2.3.1, yaitu antara $0,2T_{1B} - 2T_{1A}$, di mana T_{1A} adalah periode fundamental terbesar dan T_{1B} adalah periode fundamental terkecil untuk arah respons horizontal utama. Pengecualian untuk batas ambang atas rentang periode dapat dilakukan apabila dapat divalidasi secara analitis, sehingga batas ambang atas tersebut dapat diperkecil menjadi $1,5T_{1A}$. Rentang periode yang digunakan dalam modifikasi telah mencakup partisipasi massa 90 % di setiap arah horizontal utama.

4.3.5 Penskalaan Amplitudo

Untuk setiap pasang gerak tanah (*ground motion*), spektrum arah-maksimum harus dibuat dengan menggunakan dua komponen gerak horizontal secara simultan. Setiap pasang gerak tanah harus diskalakan menggunakan faktor skala yang sama untuk kedua komponen horizontal. Faktor skala untuk masing-masing pasang gerak tanah telah ditentukan sedemikian rupa sehingga rata-rata respons spektrum arah-maksimum dari semua gerak tanah mencapai lebih dari 90 % respons spektrum target pada rentang periode yang ditetapkan. Faktor skala yang digunakan harus berada dalam batasan yang memastikan bahwa gerak tanah yang telah diskalakan masih merepresentasikan karakteristik gerak tanah aktual.

4.3.6 Pencocokan Spektral

Setiap pasang gerak tanah harus dimodifikasi dengan tujuan rata-rata dari respons spektrum arah maksimum tidak kurang dari 110% respons spektrum target pada rentang periode yang ditentukan. Untuk memenuhi persyaratan, dapat digunakan dua jenis metode, yaitu metode Pencocokan Spektral Ketat (*Tight Spectral Matching*) dan metode Pencocokan Spektral Rata-Rata (*Mean Spectrum Matching*). Dalam metode Pencocokan Spektral Ketat, nilai ordinat spektral setiap respons spektrum individu dicocokkan dengan 110% dari nilai target respons spektrum. Sedangkan dalam metode Pencocokan Spektral Rata-Rata, nilai ordinat spektral rata-rata dicocokkan terhadap 110% dari nilai target respons spektrum. prosedur pencocokan spektral yaitu dilakukan dengan menggunakan software *SeismoMatch* 2023. Hasil pencocokan spektral dianggap dapat diterima jika:

1. Spektrum tercocokkan memiliki kemiripan bentuk dengan spektrum target,
2. Karakteristik nonstasioner dari gerakan tanah asli (*seed motion*) harus tetap dipertahankan, agar tidak terjadi perbedaan fase antara gerakan riwayat waktu tanah asli dengan riwayat waktu termodifikasi,
3. Intensitas Arias dari riwayat waktu gerakan tanah asli memiliki kemiripan dengan gerakan tanah termodifikasi.
4. Rata-rata respon spektra semua gerak tanah X memiliki max error $\pm 10\%$ terhadap rata-rata respon spektra gerak tanah X dan Y.

5. Rata-rata respon spektra semua gerak tanah Y memiliki max error $\pm 10\%$ terhadap rata-rata respon spektra gerak tanah X dan Y.

4.3.7 Pembuatan *Artificial Ground Motion*

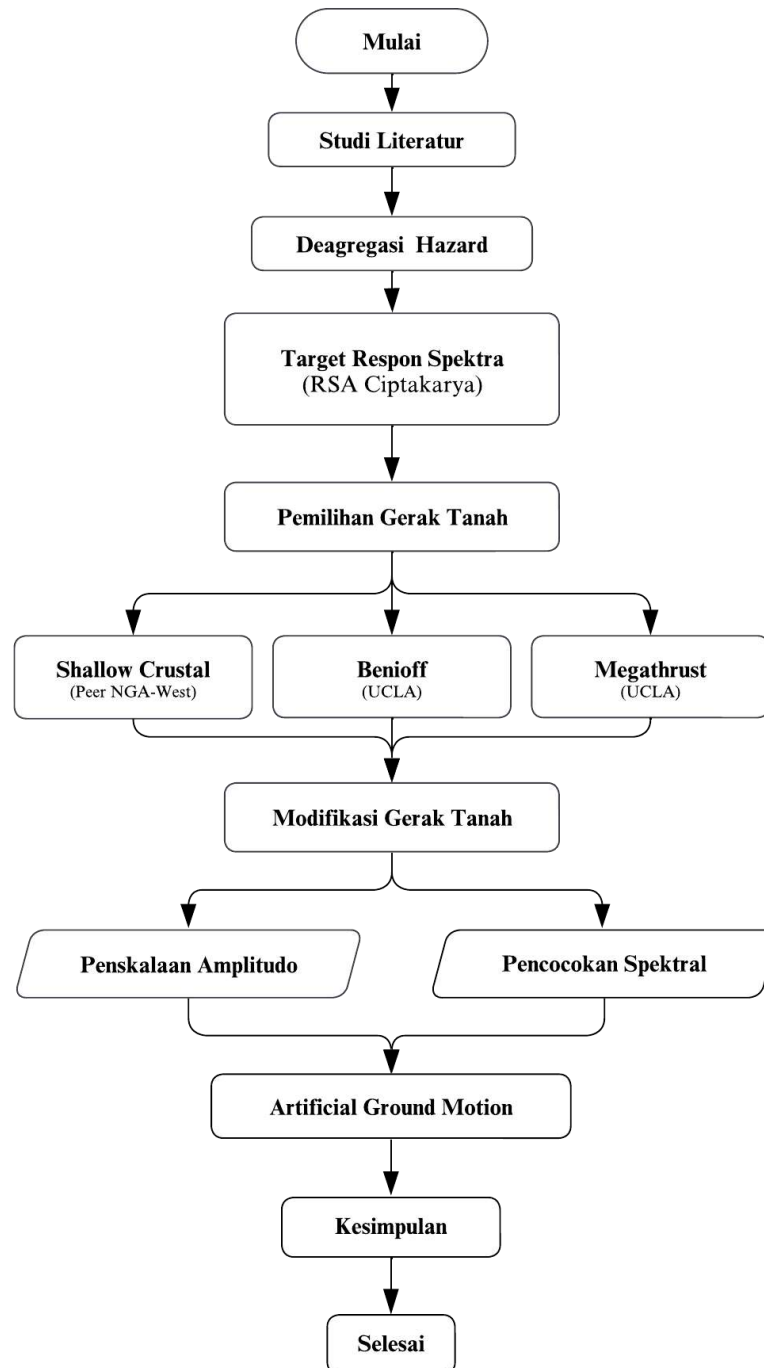
Penentuan percepatan *artificial Time History* menggunakan SNI 1726 2019 sebagai dasar digunakan *actual Time History* yang diambil dari katalog gempa PEER NGA-West dan UCLA NHR3 yang di asumsikan terjadi di batuan dasar. Rekaman gempa tersebut kemudian dirambatkan melalui media lapisan tanah ke permukaan. Respon Spektra Target yang dipakai adalah respon spektra desain SNI 1726-2019 untuk wilayah provinsi Bengkulu. Setelah itu hasil perambatan *Time History* di permukaan tanah dilakukan matching dengan respon spektra target yang menghasilkan *artificial Time History* di permukaan tanah.

Pembuatan *artificial ground motion* dilakukan dengan memperhitungkan data spektra gempa tercocokan masing-masing (*time series*) yang kemudian dirata-rata untuk didapatkan rata-rata spektra gempa tercocokan (*mean matched time series*). Data tersebut nantinya diinput ke dalam program *SeismoSignal 2024* untuk dapat diketahui bentuk dari kurva *accelerogram*-nya. Kurva tersebut merupakan data percepatan riwayat waktu (*Time History acceleration*) di batuan dasar yang dapat menggambarkan karakteristik dari data gempa artifisial yang diinginkan.

Hasil akhir dari pembuatan *artificial ground motion* adalah serangkaian rekaman *Time History* buatan serta nilai maksimum yang dapat digunakan untuk analisis dan desain seismik, serta memastikan bahwa struktur dibangun sesuai dengan standar keselamatan yang memadai untuk menghadapi gempa potensial.

4.4 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian dapat dilihat pada gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Diagram Alir Penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Gambaran Umum

SNI 8899:2020 menjelaskan mengenai tata cara pemilihan dan modifikasi gerak tanah permukaan untuk perencanaan gedung tahan gempa. Salah satu dari fokus dari peraturan ini membahas mengenai penggunaan *Time History* atau rekaman riwayat waktu yang berupa catatan perubahan percepatan tanah, kecepatan, dan *displacement* akibat gempa bumi apda lokasi tertentu selama gempa berlangsung. Modifikasi dari *Time History* permukaan ini melibatkan beberapa langkah dimulai dari pengumpulan data gempa, di mana data gempa diperoleh melalui katalog gempa PEER-NGAwest/UCLA-NHR3 (*Pacific Earthquake Engineering Research Center-New Generation Attenuation / University of California Los Angeles-Natural Hazard Risk and Resiliency Research Center*) yang relevan berdasarkan kondisi dan karakteristik tanah di Provinsi Bengkulu.

Pemrosesan data dilakukan dengan tahapan penskalaan yaitu dengan penyesuaian amplitudo rekaman gempa agar sesuai dengan spektrum respons target yang dihasilkan dari analisis deagregasi *hazard* seismik. Tahapan selanjutnya yaitu dilaksanakan *matching target spectrum* dengan tujuan agar rekaman gempa dapat sesuai dengan respon spektra desain yang ditentukan berdasarkan SNI 8899:2020. Spektrum ini ditentukan berdasarkan parameter seismik nilai percepatan tanah (S_s & S_1), penentuan jenis tanah, nilai koefisien situs (F_a & F_v), serta parameter percepatan spektral desain (S_{DS} & S_{MS}).

Implementasi dalam analisis struktur dari modifikasi gerak tanah ini nantinya dapat digunakan dalam proses *modeling* struktur gedung menggunakan bantuan program lanjutan seperti ETABS, SAP2000, maupun sejenisnya. Penerapan hasil dari rekaman *Time History* tercocokkan ini nantinya digunakan sebagai sumber pembebanan gempa dengan metode *Time History* yang memiliki karakteristik sebagai *non linear Time History*, yaitu perhitungan perilaku inelastis material struktur yang dapat memberikan gambaran lebih akurat tentang respons gedung terhadap gempa besar dibandingkan dengan metode pembebanan lain.

Hasil dari analisis tersebut nantinya dapat dievaluasi untuk memastikan bahwa gedung telah memenuhi kriteria desain yang ditetapkan oleh baik SNI 8899:2020 maupun SNI 1726:2019 dengan penyesuaian pada desain struktur untuk mencapai tingkat keamanan yang diinginkan.

5.2 Deagregasi *Hazard*

Deagregasi *Hazard* dilakukan bertujuan untuk menghitung level bahaya gempa berdasarkan kumpulan hasil dari kejadian gempa dan gerakan tanah yang mungkin terjadi di masa mendatang dengan lingkup periode ulang tertentu. Metode ini dilakukan dengan mengidentifikasi kejadian gempa yang memberikan kontribusi terbesar terhadap gerakan tanah dasar MCE_R pada periode yang dipilih. Dalam proses ini spektrum target harus dikembangkan untuk dapat menggambarkan satu atau lebih bentuk spektral yang sesuai dengan kombinasi nilai magnitudo dan jarak dominan. Proses pendekatan probabilistik digunakan dalam proses ini untuk dapat memperhitungkan semua kemungkinan dari tiap sumber gempa (*Earthquake Source*) berdasarkan parameter yang dimiliki.

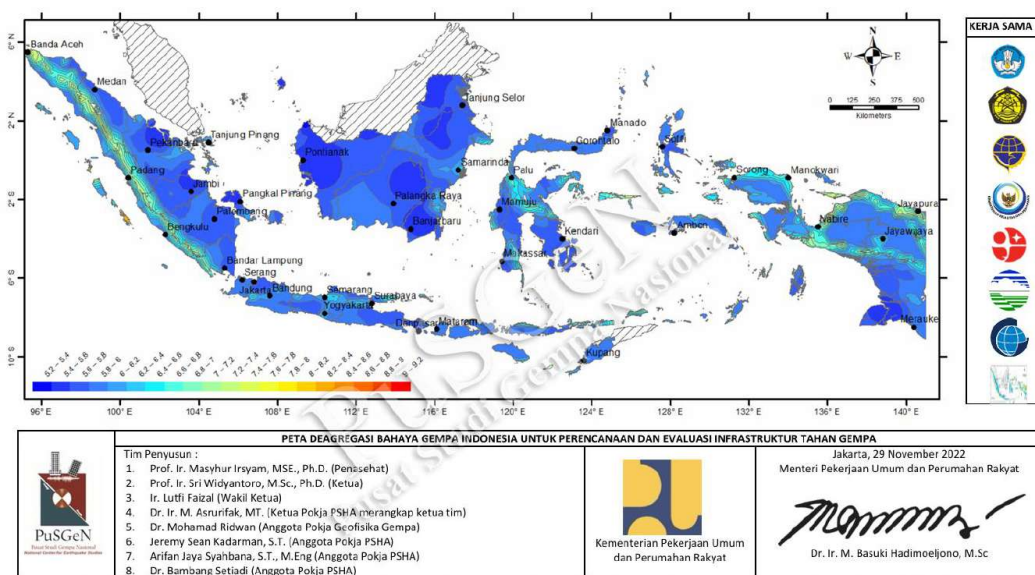
Tujuan dari deagregasi ini nantinya didapatkan suatu nilai dominan tertentu dari Magnitudo (M) dan Jarak ke lokasi dari sumber (R) yang kemungkinan besar akan memberikan dampak/kerusakan yang besar terhadap suatu site. Pengumpulan data seismik dalam deagregasi nantinya juga dapat mencakup sejarah gempa, serta informasi tentang sesar aktif dan potensi sumber gempa lainnya. Setelah dikumpulkan, data tersebut dikembangkan sebagai model *hazard* seismik berupa model sumber gempa, model frekuensi-magnitudo, dan model atenuasi.

Fungsi deagregasi yang digunakan pada penelitian ini merupakan turunan dari fungsi atenuasi yang telah diperhitungkan dalam pembuatan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia sehingga penggunaanya dapat dijadikan satu acuan yang valid. Dalam penelitian ini penghitungan *hazard* dilakukan berdasarkan pendekatan pembobotan dari buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Gempa.

5.2.1 Sumber Gempa *Shallow Crustal*

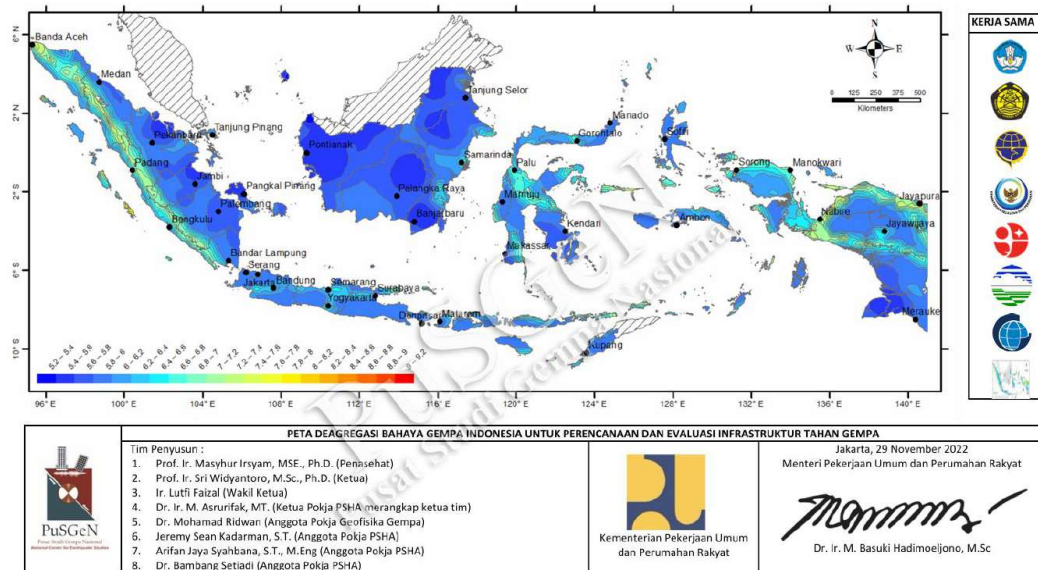
Pada zona *Shallow Crustal* dilakukan pengamatan pada level bahaya gempa PGA, 0.2 detik, dan 3 detik dengan redaman 5% untuk probabilitas 2% atau dengan periode ulang 2475 tahun, Vs30 yang digunakan merupakan situs Tanah Sedang dengan nilai Vs30 = 175-350 m/s. Kategori pemilihan respons percepatan periode getar pendek (PGA dan periode getar 0,2-detik) memberikan gambaran kontribusi bahaya gempa dangkal dengan magnitudo kecil hingga menengah, dan percepatan periode panjang (periode getar 3-detik) memberikan gambaran bahaya gempa dengan magnitudo besar dan dalam.

Untuk pemilihan nilai deagregasi magnitudo serta jarak sumber gempa *Shallow Crustal* didasarkan dari Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa yang dapat dilihat pada gambar berikut.



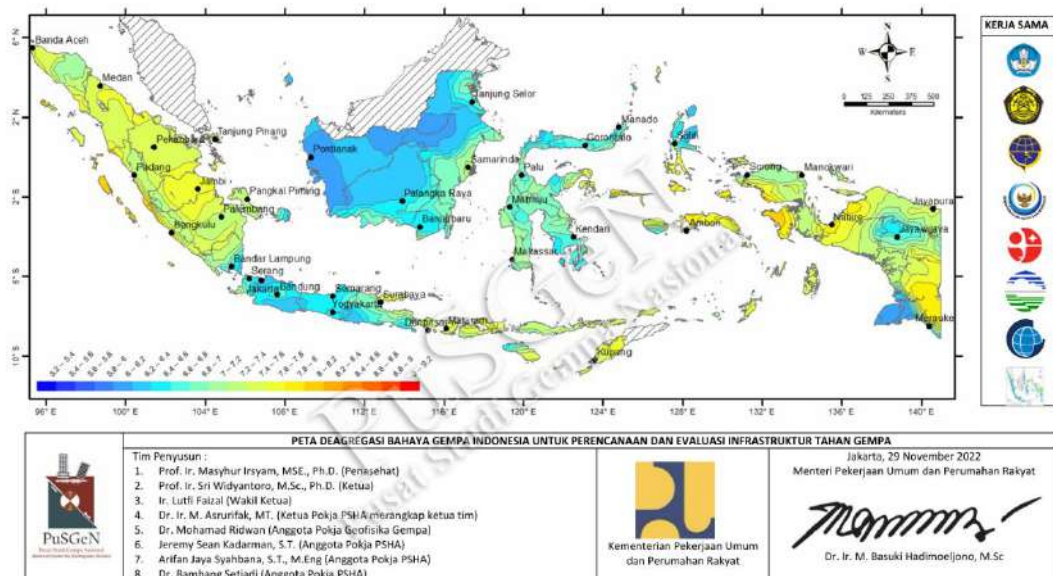
Gambar L2.64 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan puncak untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.1 Peta Deagregasi Magnitudo(M) sumber gempa *Shallow Crustal* pada percepatan puncak (PGA) untuk periode ulang 2500 tahun



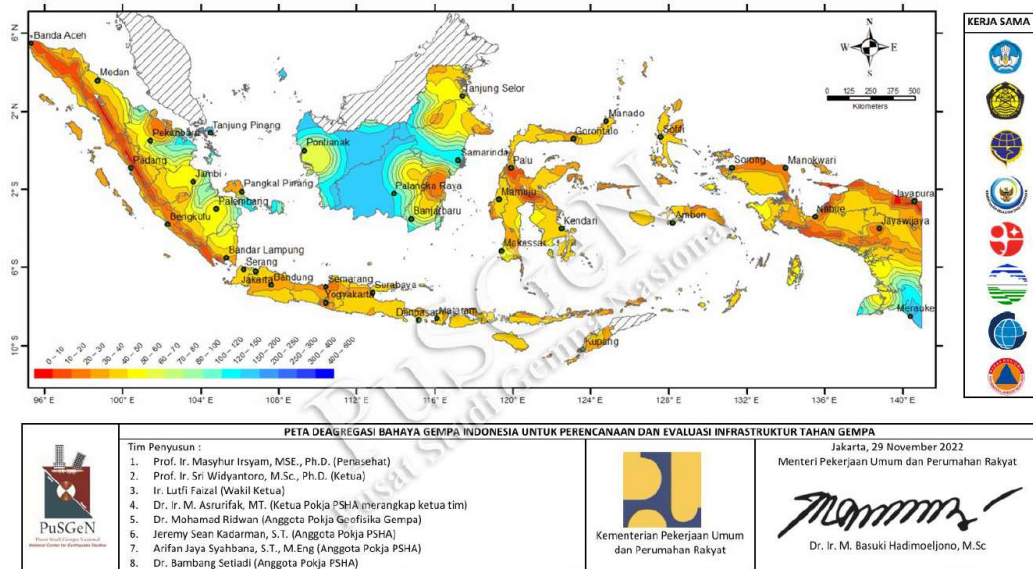
Gambar L2.65 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.2 Peta Deagregasi Magnitudo(M) sumber gempa *Shallow Crustal* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



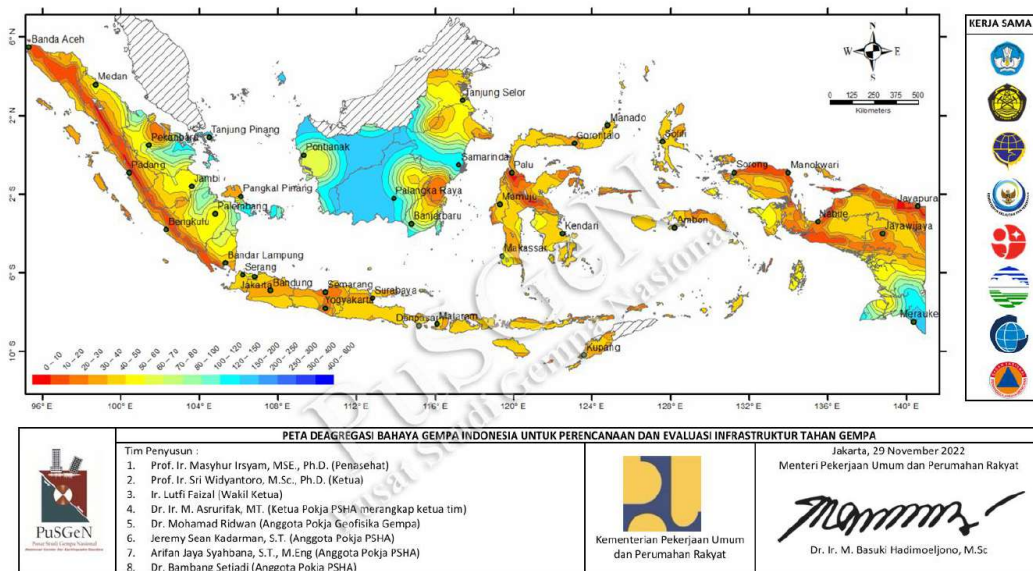
Gambar L2.66 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.3 Peta Deagregasi Magnitudo(M) sumber gempa *Shallow Crustal* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



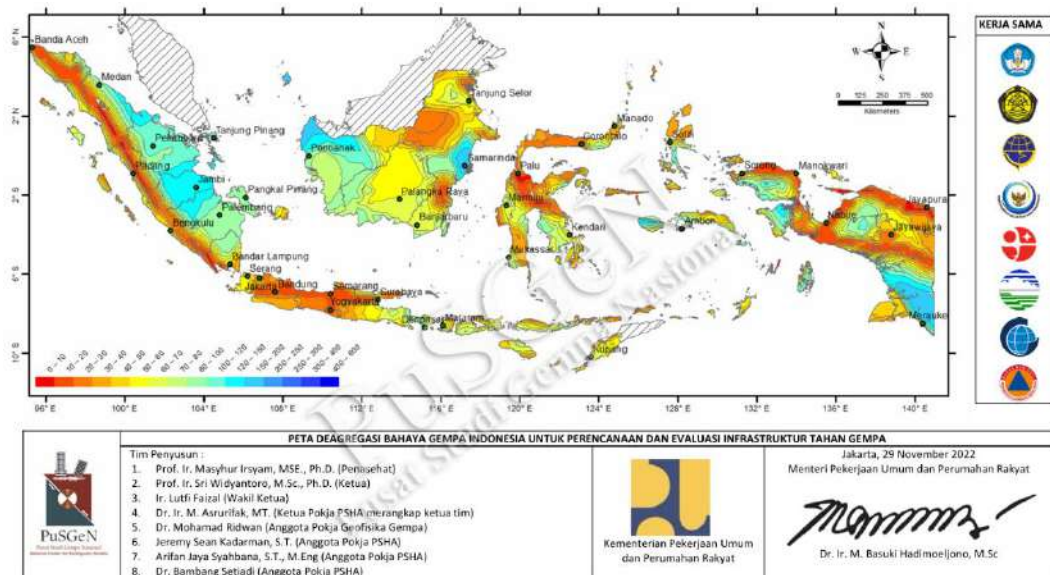
Gambar L2.46 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan puncak untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.4 Peta Deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Shallow Crustal* pada percepatan puncak (PGA) dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



Gambar L2.47 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.5 Peta Deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Shallow Crustal* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



Gambar L2.48 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

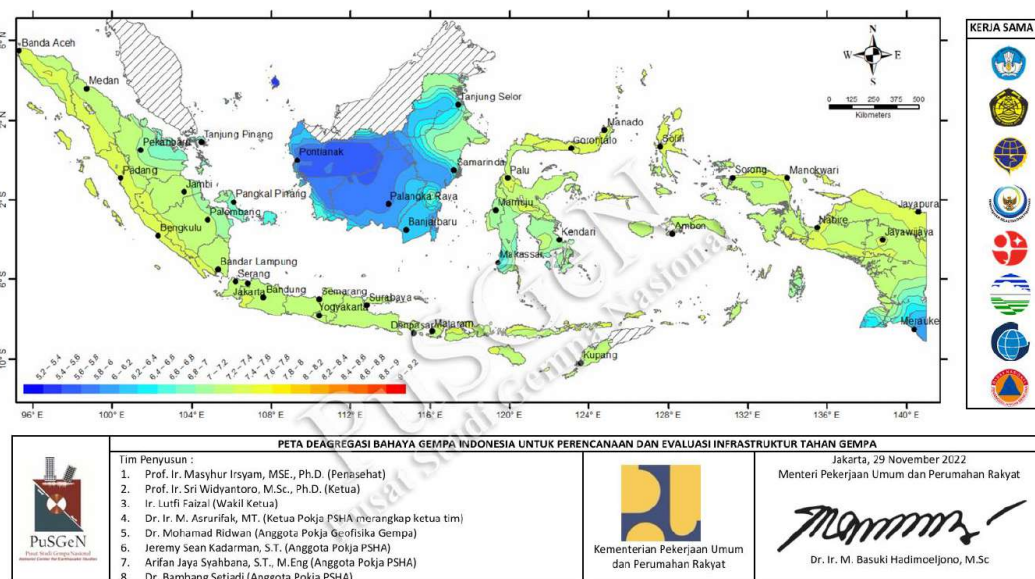
Gambar 5.6 Peta Deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Shallow Crustal* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Hasil dari analisis deagregasi gempa yang dilakukan berdasarkan panduan Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Gempa untuk wilayah Provinsi Bengkulu untuk sumber gempa *Shallow Crustal* dengan probabilitas 2% atau dengan periode ulang 2475 tahun, untuk $T = \text{PGA}$, didapatkan nilai *range* $M = 5,6-5,8$ dengan $R = 40-50$ km, untuk $T = 0,2$ detik, didapatkan nilai *range* $M = 6,8-7,0$ dengan $R = 50-60$ km, untuk $T = 3$ detik, didapatkan nilai *range* $M = 7,4-7,6$ dengan $R = 40-50$ km. V_{s30} yang digunakan merupakan situs Tanah Sedang dengan nilai $V_{s30} = 175-350$ m/s. Hasil dari deagregasi ini nantinya digunakan sebagai filter untuk mencari data gempa serupa dengan lokasi site yang pernah terjadi di seluruh dunia.

5.2.2 Sumber Gempa *Benioff*

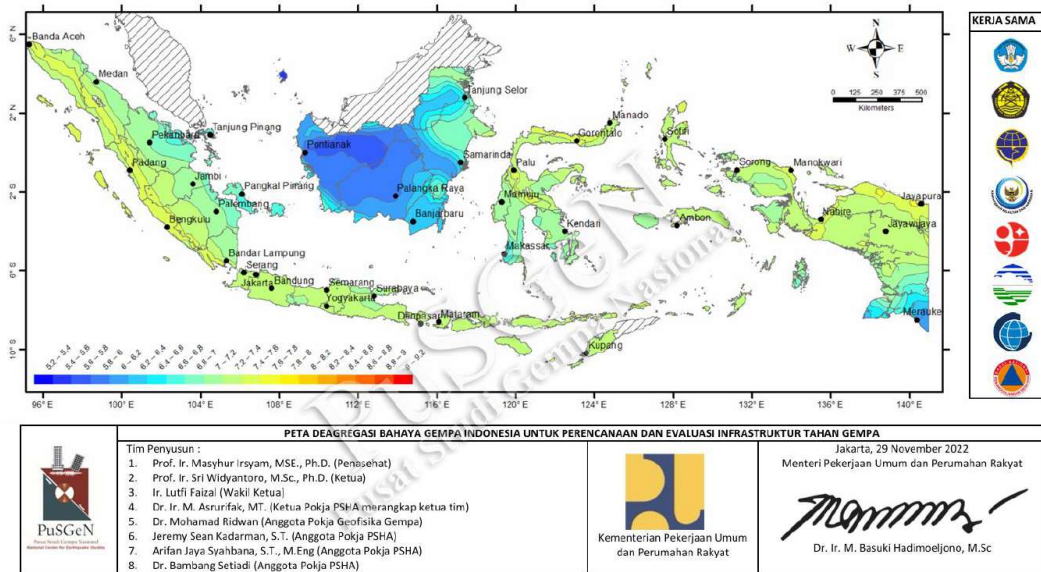
Pada zona *Benioff* dilakukan pengamatan pada level bahaya gempa PGA, 0.2 detik, dan 3 detik dengan redaman 5% untuk probabilitas 2% atau dengan periode ulang 2475 tahun, Vs30 yang digunakan merupakan situs Tanah Sedang dengan nilai Vs30 = 175-350 m/s. Kategori pemilihan respons percepatan periode getar pendek (PGA dan periode getar 0,2-detik) memberikan gambaran kontribusi bahaya gempa dangkal dengan magnitudo kecil hingga menengah, dan percepatan periode panjang (periode getar 3-detik) memberikan gambaran bahaya gempa dengan magnitudo besar dan dalam.

Untuk pemilihan nilai deagregasi magnitudo serta jarak sumber gempa *Benioff* didasarkan dari Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa yang dapat dilihat pada gambar berikut.



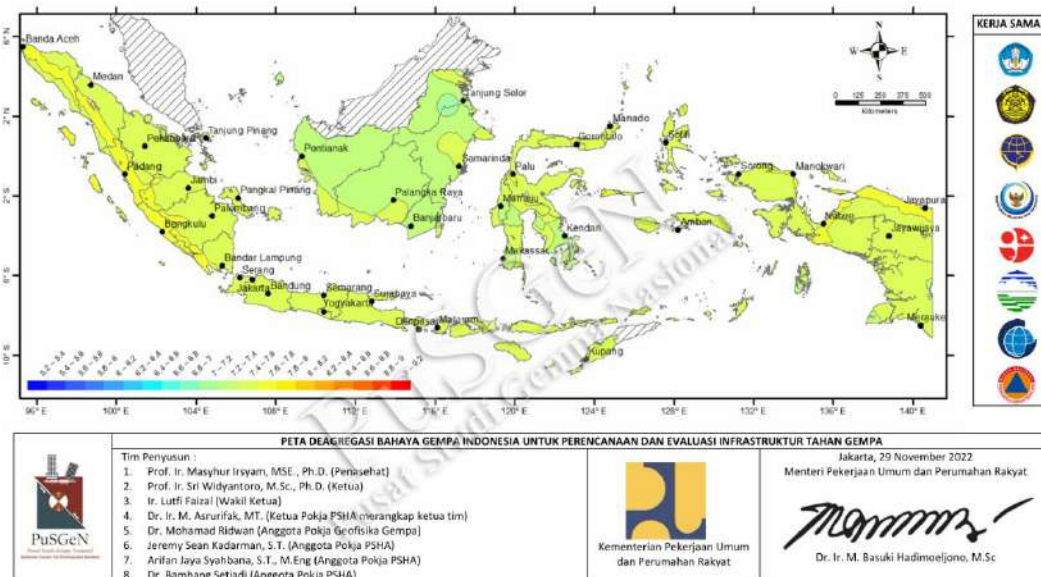
Gambar L2.28 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa *Benioff* pada percepatan puncak untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.7 Peta Deagregasi Magnitudo(M) sumber gempa *Benioff* pada percepatan puncak (PGA) dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



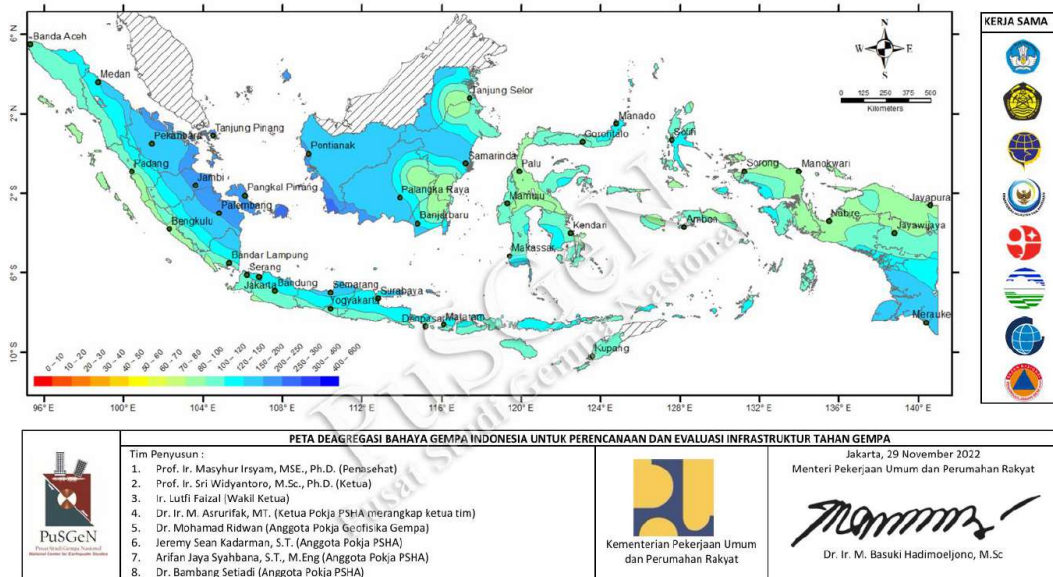
Gambar L2.29 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.8 Peta Deagregasi Magnitudo(M) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 0,2 Detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



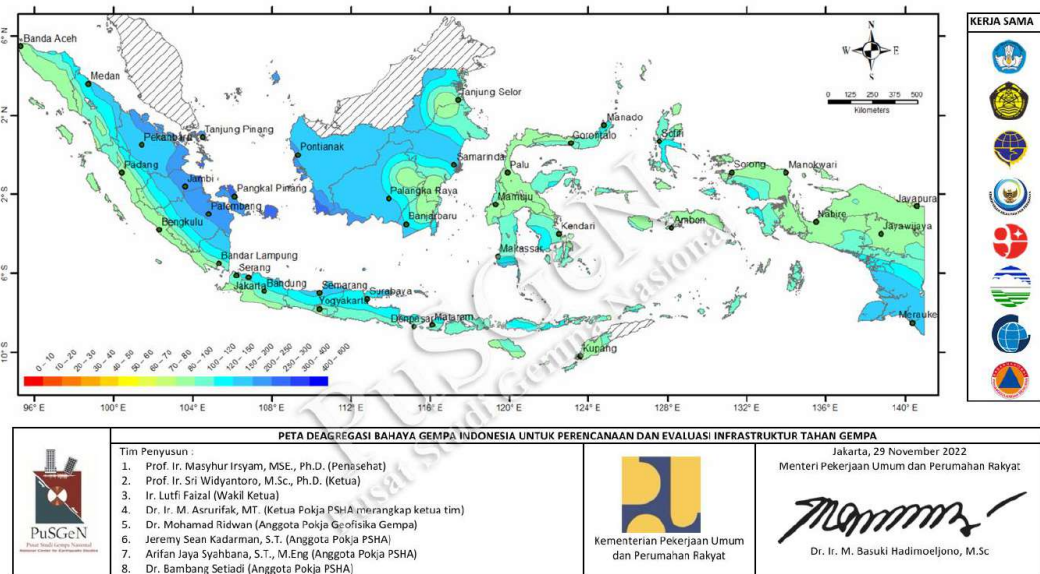
Gambar L2.30 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.9 Peta Deagregasi Magnitudo(M) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



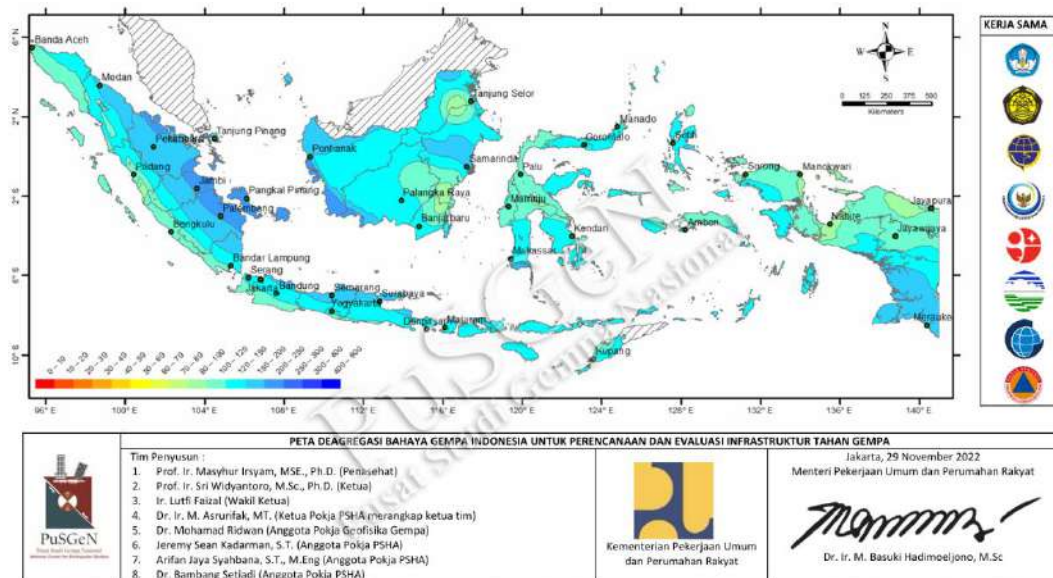
Gambar L2.10 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Benioff* pada percepatan puncak untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.10 Peta Deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Benioff* pada percepatan puncak (PGA) dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



Gambar L2.11 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.11 Peta Deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



Gambar L2.12 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

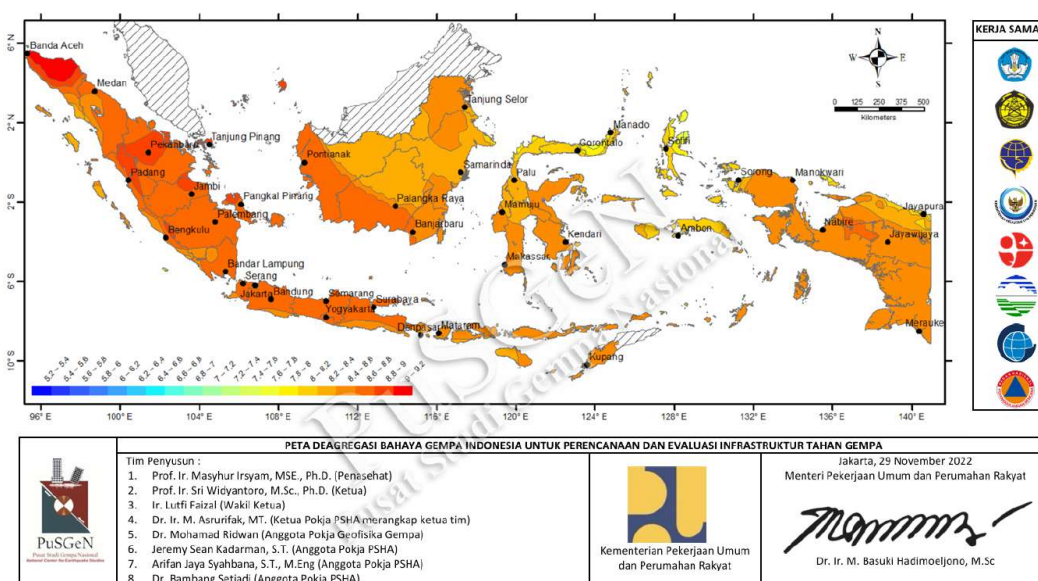
Gambar 5.12 Peta Deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Hasil dari analisis deagregasi gempa yang dilakukan berdasarkan panduan Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Gempa untuk wilayah Provinsi Bengkulu untuk sumber gempa *Benioff* dengan probabilitas 2% atau dengan periode ulang 2475 tahun, untuk $T = \text{PGA}$, didapatkan nilai *range* $M = 7,4-7,6$ dengan $R = 80-100$ km, untuk $T = 0,2$ detik, didapatkan nilai *range* $M = 7,4-7,6$ dengan $R = 80-100$ km, untuk $T = 3$ detik, didapatkan nilai *range* $M = 7,4-7,6$ dengan $R = 100-120$ km. V_{s30} yang digunakan merupakan situs Tanah Sedang dengan nilai $V_{s30} = 175-350$ m/s. Hasil dari deagregasi ini nantinya digunakan sebagai filter untuk mencari data gempa serupa dengan lokasi site yang pernah terjadi di seluruh dunia.

5.2.3 Sumber Gempa *Megathrust*

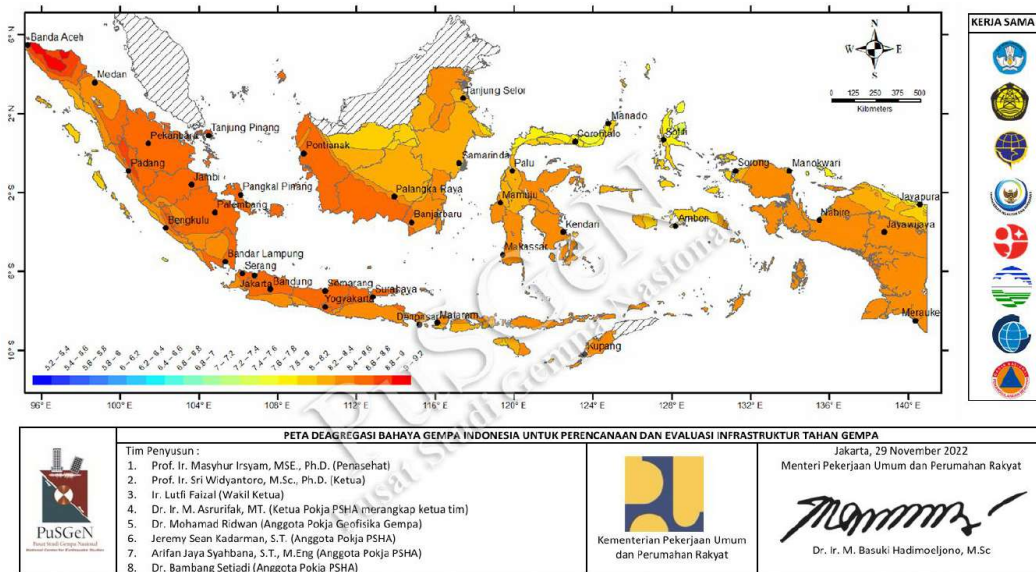
Pada zona *Megathrust* dilakukan pengamatan pada level bahaya gempa PGA, 0.2 detik, dan 3 detik dengan redaman 5% untuk probabilitas 2% atau dengan periode ulang 2475 tahun, Vs30 yang digunakan merupakan situs Tanah Sedang dengan nilai Vs30 = 175-350 m/s. Kategori pemilihan respons percepatan periode getar pendek (PGA dan periode getar 0,2-detik) memberikan gambaran kontribusi bahaya gempa dangkal dengan magnitudo kecil hingga menengah, dan percepatan periode panjang (periode getar 3-detik) memberikan gambaran bahaya gempa dengan magnitudo besar dan dalam.

Untuk pemilihan nilai deagregasi magnitudo serta jarak sumber gempa *Megathrust* didasarkan dari Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa yang dapat dilihat pada gambar berikut.



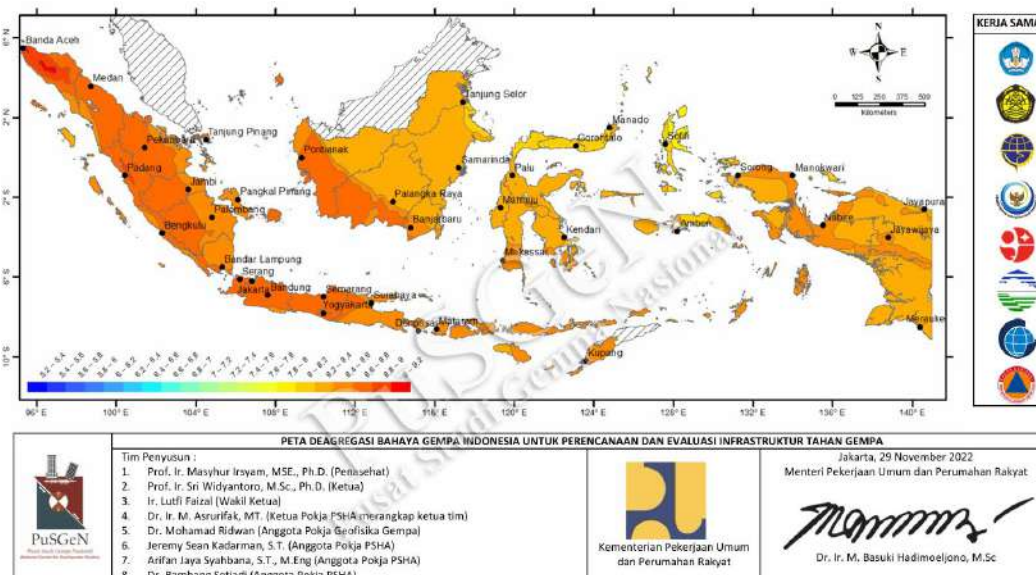
Gambar L2.100 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan puncak untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.13 Peta Deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan puncak (PGA) dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



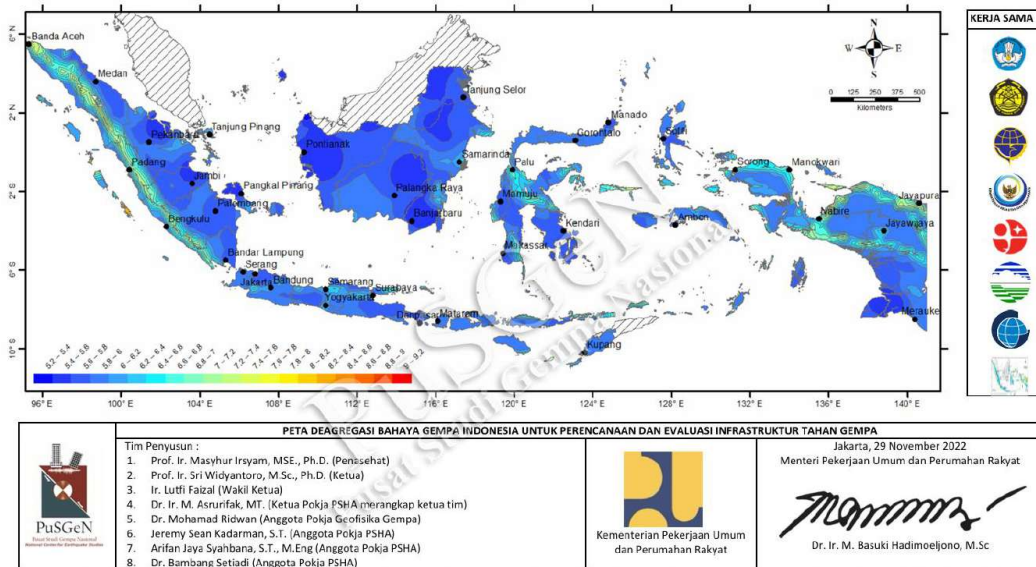
Gambar L2.101 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.14 Peta Deagregasi Magnitudo(M) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



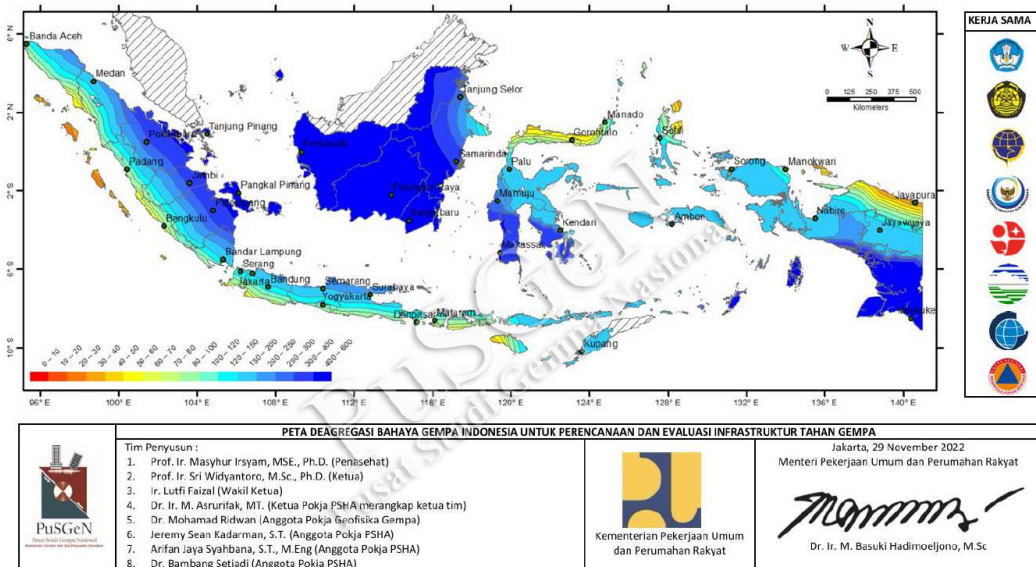
Gambar L2.102 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.15 Peta Deagregasi Magnitudo(M) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



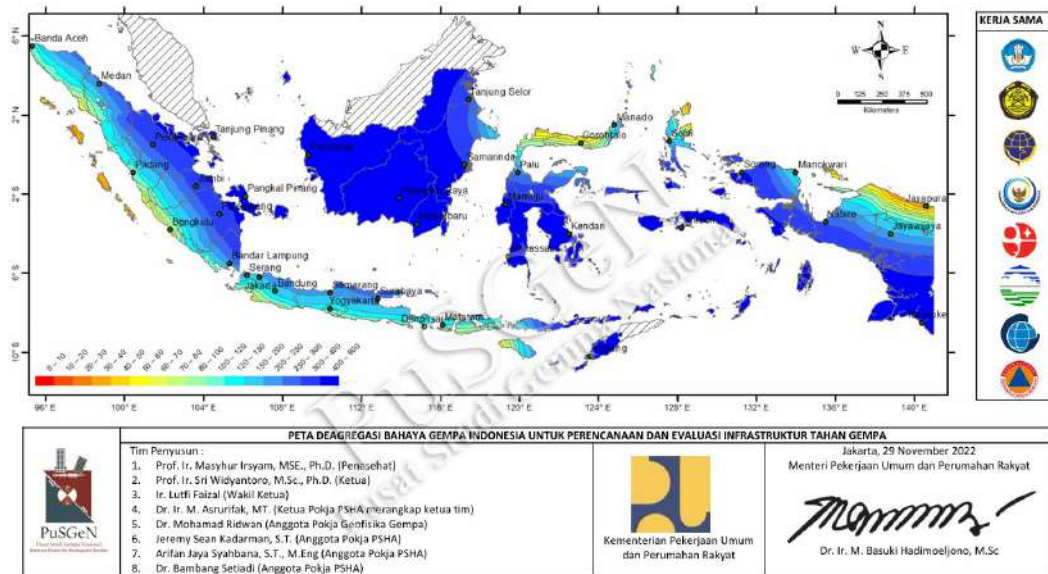
Gambar L2.64 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan puncak untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.16 Peta Deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan puncak (PGA) dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



Gambar L2.83 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.17 Peta Deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun



Gambar L2.84 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Gambar 5.18 Peta Deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Hasil dari analisis deagregasi gempa yang dilakukan berdasarkan panduan Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Gempa untuk wilayah Provinsi Bengkulu untuk sumber gempa *Megathrust* dengan probabilitas 2% atau dengan periode ulang 2475 tahun, untuk $T = \text{PGA}$, didapatkan nilai *range* $M = 8,4-8,6$ dengan $R = 70-80$ km, untuk $T = 0,2$ detik, didapatkan nilai *range* $M = 8,4-8,6$ dengan $R = 70-80$ km, untuk $T = 3$ detik, didapatkan nilai *range* $M = 8,4-8,6$ dengan $R = 70-80$ km. V_{s30} yang digunakan merupakan situs Tanah Sedang dengan nilai $V_{s30} = 175-350$ m/s. Hasil dari deagregasi ini nantinya digunakan sebagai filter untuk mencari data gempa serupa dengan lokasi site yang pernah terjadi di seluruh dunia.

Dari pemaparan di atas, berdasarkan buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Gempa untuk wilayah Provinsi Bengkulu untuk masing-masing sumber gempa dengan probabilitas 2% atau dengan periode ulang 2475 tahun diperoleh rincian sebagai berikut.

Tabel 5.1 Deagregasi Hazard Rekaman Gempa

Sumber	Magnitudo			Jarak (km)		
	PGA	0.2 detik	3 detik	PGA	0.2 detik	3 detik
<i>Shallow Crustal</i>	5,6-5,8	6,8-7,0	7.4-7.6	40-50	50-60	40-50
<i>Benioff</i>	7,4-7,6	7,4-7,6	7.4-7.6	80-100	80-100	100-120
<i>Megathrust</i>	8,4-8,6	8,4-8,6	8.4-8.6	70-80	70-80	70-80

Sumber: Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia (2022)

5.3 Pemilihan Rekam Gerak Tanah

Data gempa yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari hasil pemilihan gerakan riwayat waktu tanah asli yang diambil dari rekaman gempa aktual di masa lalu. Proses tersebut dilakukan dengan menggunakan simulasi numerik gerakan tanah dari katalog gempa dengan pengambilan data yang telah didapatkan dari deagregasi *hazard* berdasarkan penjelasan sub bab sebelumnya.

Data yang diperoleh merupakan data sekunder di mana nilai dari parameter deagregasi sudah tersedia dengan format RSN (*Regional Seismic Network*) yang didapatkan dari website PEER (*Pacific Earthquake Engineering Research Center*), untuk sumber gempa *Shallow Crustal* dan website UCLA NHR3 (*Natural Hazards Risks and Resiliency Research Center*) untuk sumber gempa subduksi dengan nilai pemilihan spektral rotasi digunakan RotD100 (*Rotation of Direction 100%*) di mana nilai ini diharapkan dapat memberikan nilai maksimum dari respon sehingga lebih aman. RotD100 diutamakan karena dalam penggunaanya untuk pendesainan struktur kritis atau penting dapat memberi nilai parameter keamanan lebih baik dibandingkan RotD50 yang digunakan pada desain yang lebih umum atau untuk memberikan gambaran umum mengenai perilaku seismik.

Dalam catatan pengamatan hasil deagregasi di Indonesia dengan menggunakan GMPE yang memiliki catatan periode getar lebih besar dari 3-detik,

deagregasi nilai M dan R untuk periode getar lebih besar dari 1-detik sudah tidak terlalu sensitif terhadap nilai dari periode getar. Sehingga, secara teori periode getar 3-detik dinilai sudah dapat mewakili struktur dengan periode getar menengah dan periode getar panjang.

Edit Search

Load Sample Input Values

Clear Input Values

Search

These characteristics are defined in the NGA-West2 Flatfile. You need to re-run Search when any of these parameters are updated.

Record Characteristics:

RSN(s) : RSN1,...RSNn

Event Name :

Station Name :

Search Parameters:

Fault Type :

Magnitude :

min,max

RJB(km) :

min,max

Rrup(km) :

min,max

Vs30(m/s) :

min,max

D5-95(sec) :

min,max

Pulse :

Additional Characteristics:

Max No. Records :

(<=100)

Suite

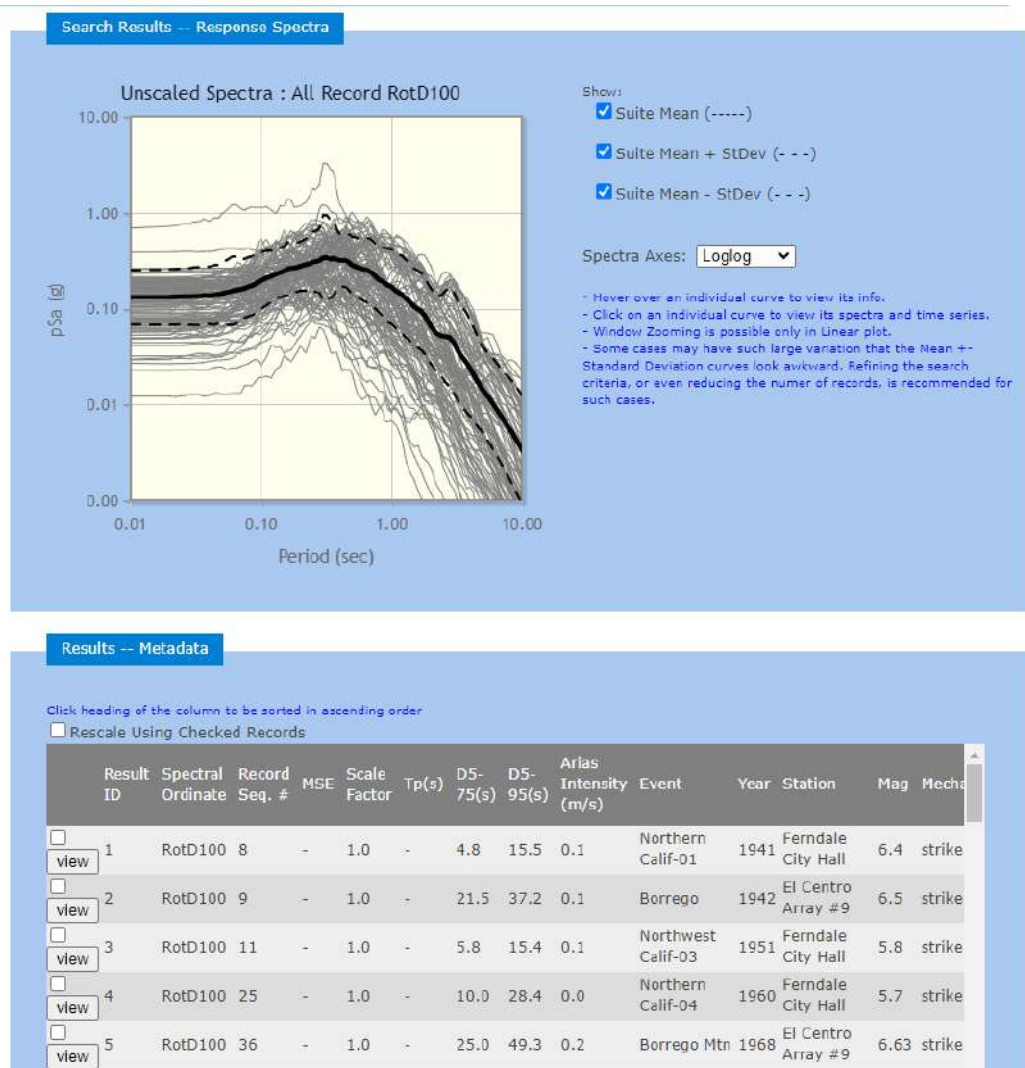
Spectral Ordinate :

Damping Ratio :

Suite Average :

Gambar 5.19 Filter Pencarian untuk Website PEER NGA-West
(Sumber: <https://ngawest2.berkeley.edu/>)

Pada gambar 5.19 dapat dilihat proses pencarian data *seed motion* untuk sumber gempa *shallow crustal* melalui portal katalog gempa PEER NGA-West (*Pacific Earthquake Engineering Research Center – New Generation Attenuation*). Dengan menginput parameter yang sesuai hasil deagregasi berupa rentang magnitude, rentang jarak rupture, nilai Vs30, serta memastikan kategori lain sudah sesuai dengan karakteristik gerak tanah yang diinginkan memiliki kemiripan dengan karakteristik gerak tanah lokasi site.



Gambar 5.20 Hasil Filter Pencarian untuk Website PEER NGA-West
(Sumber: <https://ngawest2.berkeley.edu/>)

Dalam kasus ini dengan menggunakan rentang pencarian sebesar 5,6-7,6 untuk magnitudo, 40-60 untuk jarak, dan Vs30 kelas situs SD didapatkan data gerak tanah sumber gempa *shallow crustal* seperti yang terlihat pada gambar 5.20. Selanjutnya data tersebut dapat diunduh dengan format berupa RSN (*Regional Seismic Network*) dalam bentuk *Rar* yang didalamnya terdapat 9 data dengan format 3 data AT2 untuk data percepatan, 3 data DT2 untuk data *displacement*, dan data 3 data VT2 untuk data kecepatan yang dapat dilihat pada gambar 5.23. Dalam input untuk program *SeismoMatch* digunakan format PEER yang merupakan *default* dari program dan merupakan kumpulan data yang sudah dilakukan *baseline correction*.

NGA-Subduction Web Portal: Ground-Motion Record Selection and Download

>>press here to return to NGA-Subduction Portal to START a New Project<<

Search Input

Show/Hide Search Input

Load Sample Values Clear Input

Event	Station	Path	Record
Magnitude (min,max) 7.4,7.6	Vs30 m/s (min,max) 175,350	Rrup, km (min,max) 80,100	Useable Period (min,max)
Earthquake Region All	Station Name (ex: Fukushima) 	VolcanicArcFlag of ClosestPoint All	Duration 5-95%, sec (min,max)
Earthquake Name (ex: Tohoku {2844986 = Maule}) 	Network All		PGA (T=0.01s) g (min,max)
Event Year (min,max) 	Station Latitude, deg (min,max) 		NGASubRSN (RSN1,RSN2...,RSNn)
Hypocenter Lat., deg (min,max) 	Station Longitude, deg (min,max) 		
Hypocenter Long., deg (min,max) 	VolcanicArcFlag of Station All		
Hypocenter Depth, km (min,max) 	Cascadia Basin Flag All		
Subducting Slab All	Cascadia Basin Name All		
Event Type All	Station NGASubSSN (SSN1,...) 		
VolcanicArcFlag of Hypocenter All			
Event NGASubEQID (EQID1,...) 			

Intensity Measure	Suite
Spectrum Resultant RotD100	Suite Average Arithmetic
Damping Ratio (5%) 0.05	Max # of Records (<=100)

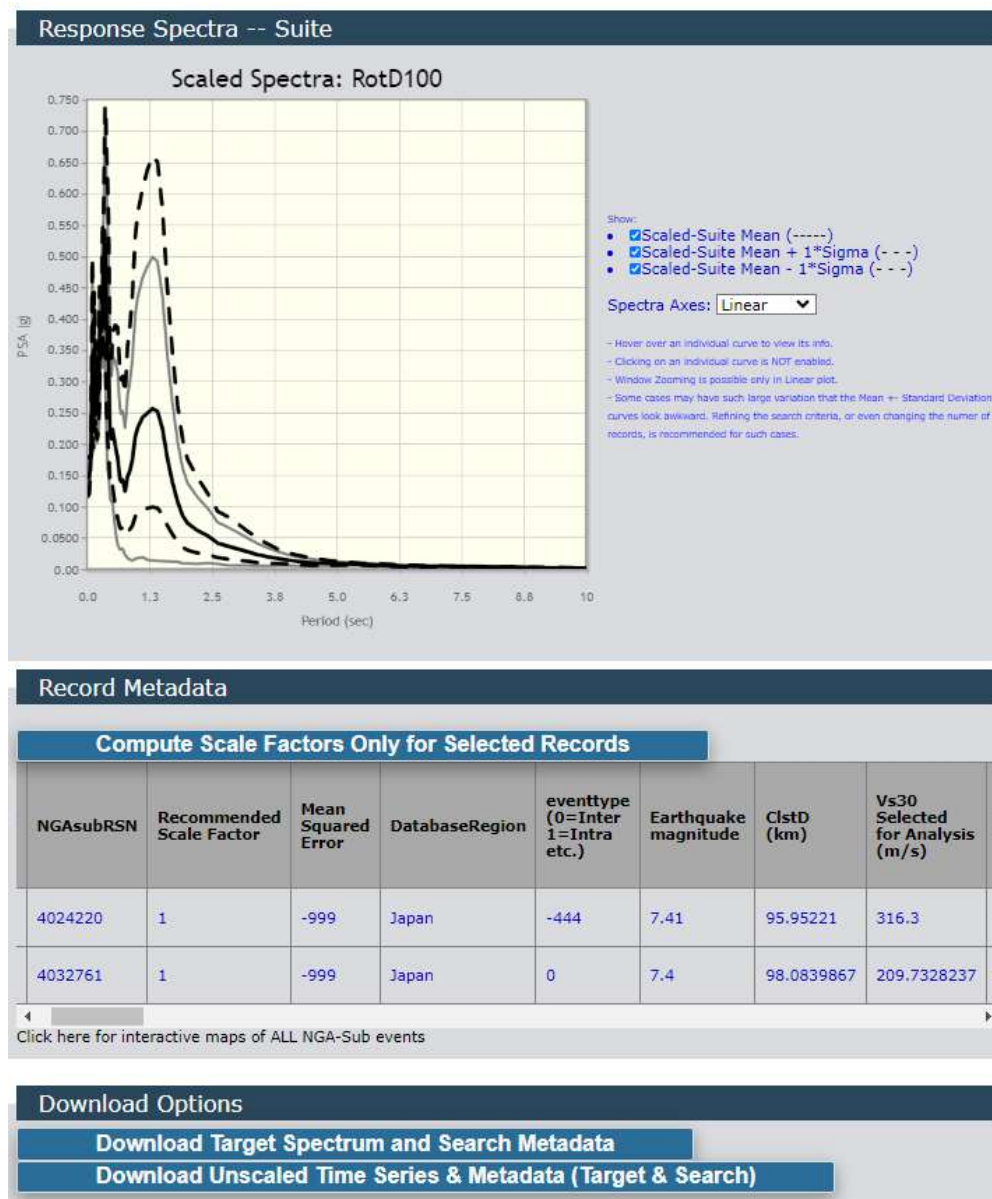
Search Database & Compute Scale Factors

Compute Scale Factors Only

Fill in only the cells that are needed to constrain the search!

Gambar 5.21 Filter Pencarian untuk Website UCLA-NHR3
(Sumber: <https://www.risksciences.ucla.edu/>)

Sama seperti untuk pencarian data gerak tanah (*seed motion*) *shallow crustal*, untuk pencarian gempa subduksi *benioff* & *megathrust* dengan menginput filter parameter pencarian ke website UCLA-NHR3 (*University of California, Los Angeles – Natural Hazards Risks and Resiliency Research Center*) seperti yang dapat dilihat pada gambar 5.21 di atas.

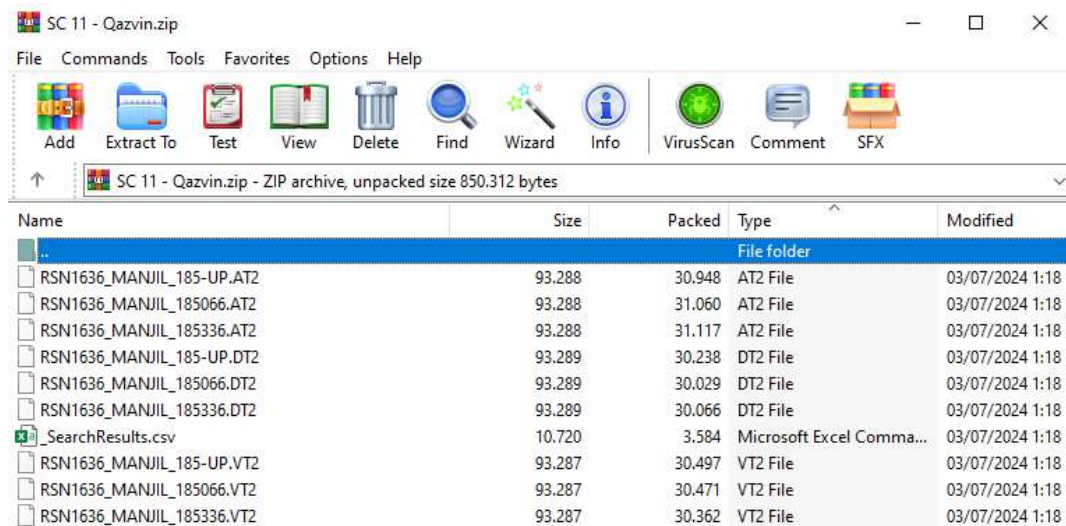


Gambar 5.22 Hasil Filter Pencarian untuk Website UCLA-NHR3

(Sumber: <https://www.risksciences.ucla.edu/>)

Dalam kasus ini dengan menggunakan rentang pencarian sebesar 7,4-7,6 untuk magnitudo, 80-120 untuk jarak, dan Vs30 kelas situs SD didapatkan data gerak tanah sumber gempa subduksi seperti yang terlihat pada gambar 5.23. Selanjutnya data tersebut dapat diunduh dengan format berupa RSN (*Regional Seismic Network*) dalam bentuk *Rar* yang didalamnya terdapat 9 data dengan format 3 data AT2 untuk data percepatan, 3 data DT2 untuk data *displacement*, dan data 3 data VT2 untuk data kecepatan yang dapat dilihat pada gambar 5.23. Dalam input

untuk program *SeismoMatch* digunakan format yang sama dengan *shallow crustal* yaitu PEER yang merupakan *default* dari program dan merupakan kumpulan data yang sudah dilakukan *baseline correction*.



Gambar 5.23 Isi dari satu data RSN yang diunduh dari PEER

Data yang nantinya digunakan untuk pencocokan terdiri dari 2 data AT2 untuk komponen gerak tanah arah horizontal seperti yang telah dijelaskan pada SNI 1726:2019 pasal 11.2.2. Penggunaan data akselerasi dikarenakan data AT2 merupakan data yang *compatible* dengan program *SeismoMatch* yang menyederhanakan proses dan mengurangi potensi kesalahan komputasi yang mungkin terjadi jika menggunakan beberapa jenis file dengan format input yang berbeda, serta memastikan konsistensi dalam pengolahan data. Untuk data AT2 arah vertikal dapat diabaikan dengan alasan struktur umumnya lebih sensitif terhadap beban horizontal dibandingkan vertikal. Beban horizontal dari gempa menghasilkan momen yang lebih besar dan menyebabkan gaya geser yang signifikan pada bangunan, yang merupakan penyebab utama kerusakan struktural. Data AT2 vertikal dapat digunakan apabila memang nilai ketelitian dari suatu beban itu sekiranya diperlukan, seperti untuk perancangan pembebanan gedung pencakar langit maupun bangunan fase non-linear lainnya.

5.3.1 Pemilihan Rekam Gerak Tanah Sumber Gempa *Shallow Crustal*

Setelah melaksanakan proses deagregasi, didapatkan parameter untuk penentuan data yang digunakan sebagai *seed motion* untuk modifikasi gerak tanah yaitu dengan rentang nilai magnitudo 5,6-7.6, jarak 40-60 Km, dan Vs30 175-350 m/s. Yang nantinya digunakan sebagai acuan dalam menentukan gerak tanah tanah yang sesuai dengan kondisi Provinsi Bengkulu. Data untuk sumber gempa *Shallow Crustal* didapatkan melalui laman PEER (<https://ngawest2.berkeley.edu/>) dengan memasukan parameter-parameter yang dimiliki, maka gerak tanah yang memiliki kemiripan dengan lokasi site dapat dihasilkan. Gerak tanah yang diambil merupakan data yang memiliki kedekatan magnitudo (M_w) dan jarak (R) terhadap hasil deagregasi. Data gerak tanah (*ground motion*) untuk sumber gempa *Shallow Crustal* dapat dilihat pada tabel 5.2 berikut.

Tabel 5.2 Sumber Gempa *Shallow Crustal*

No	RSN	Peristiwa	Lokasi	Tahun	M	R (km)	Vs30 (m/s)	Mekanisme
1	166	Imperial Valley 6	Coachella	1979	6,53	50,100	336,490	Strike Slip
2	331	Coalinga 1	Parkfield	1983	6,36	48,700	236,590	Reverse
3	332	Coalinga 1	Parkfield	1983	6,36	50,200	251,570	Reverse
4	333	Coalinga 1	Parkfield	1983	6,36	51,750	256,820	Reverse
5	487	SMART1I01	Taiwan	1985	5,8	41,740	275,820	Normal
6	489	SMART1M01	Taiwan	1985	5,8	41,820	268,370	Normal
7	515	Palm Springs	Colton Interchange	1986	6,06	52,410	274,980	Reverse Oblique
8	826	Cape Mendocino	Eureka Mrytle	1992	7,01	41,970	337,460	Reverse
9	965	Northridge 01	Covina Grand Ave	1994	6,69	57,510	346,620	Reverse
10	1025	Northridge 01	Lancaster Fox Airfield	1994	6,69	52,120	2668,650	Reverse
11	1677	Northridge 01	Elizabeth Lake	1994	5,93	43,400	326,190	Reverse Oblique

(Sumber: PEER NGA-West)

5.3.2 Pemilihan Rekam Gerak Tanah Sumber Gempa *Benioff*

Setelah melaksanakan proses deagregasi, didapatkan parameter untuk penentuan data yang digunakan sebagai *seed motion* untuk modifikasi gerak tanah yaitu dengan rentang nilai magnitudo 7.4-7.6, jarak 80-120 Km, dan Vs30 175-350 m/s. Yang nantinya digunakan sebagai acuan dalam menentukan gerak tanah tanah yang sesuai dengan kondisi Provinsi Bengkulu. Data untuk sumber gempa *Benioff* didapatkan melalui laman UCLA NHR3 (<https://www.risksciences.ucla.edu/>) dengan memasukan parameter-parameter yang dimiliki, maka gerak tanah yang memiliki kemiripan dengan lokasi site dapat dihasilkan. Gerak tanah yang diambil merupakan data yang memiliki kedekatan magnitudo (M_w) dan jarak (R) terhadap hasil deagregasi. Data gerak tanah (*ground motion*) untuk sumber gempa *Benioff* dapat dilihat pada tabel 5.3 berikut.

Tabel 5.3 Sumber Gempa *Benioff*

No	RSN	Peristiwa	Lokasi	Tahun	M	R (km)	Vs30 (m/s)	Mekanisme
1	4003085	Iwate-Ichinohe	Japan	2011	7,4	110,672	343,100	Interface Subd.
2	4024099	Kise-Totsukawa	Japan	2004	7,41	102,051	338,400	Interface Subd.
3	4032629	Kushiro-Tokachi	Japan	1993	7,59	122,433	317,1	Interface Subd.
4	3000371	105-ACLS	Cen. America & Mexico	2012	7,66	109,989	225,000	Interface Subd.
5	4032594	Miyagi-Miyako	Japan	1978	7,65	112,782	283,300	Interface Subd.
6	4012452	Iwate-Ishidoriya	Japan	2011	7,4	112,346	315,500	Interface Subd.
7	4012458	Iwate-Nishine	Japan	2011	7,4	117,740	297,5	Interface Subd.
8	4029971	Kise-Tanabe	Japan	2004	7,41	103,147	181,3	Interface Subd.
9	3001311	143-3295	Cen. America & Mexico	2014	7,32	113,647	281,000	Interface Subd.
10	4032761	Nemuro-Kushiro	Japan	1973	7,4	98,084	209,733	Interface Subd.
11	4024220	Kise-Kamitonda	Japan	2004	7,41	95,952	316,300	Interface Subd.

(Sumber: UCLA NHR3)

5.3.3 Pemilihan Rekam Gerak Tanah Sumber Gempa *Megathrust*

Setelah melaksanakan proses deagregasi, didapatkan parameter untuk penentuan data yang digunakan sebagai *seed motion* untuk modifikasi gerak tanah yaitu dengan rentang nilai magnitudo 8.4-8.6, jarak 70-80 Km, dan Vs30 175-350 m/s. Yang nantinya digunakan sebagai acuan dalam menentukan gerak tanah tanah yang sesuai dengan kondisi Provinsi Bengkulu. Data untuk sumber gempa *Megathrust* didapatkan melalui laman UCLA NHR3 (<https://www.risksciences.ucla.edu/>) dengan memasukan parameter-parameter yang dimiliki, maka gerak tanah yang memiliki kemiripan dengan lokasi site dapat dihasilkan. Gerak tanah yang diambil merupakan data yang memiliki kedekatan magnitudo (M_w) dan jarak (R) terhadap hasil deagregasi. Data gerak tanah (*ground motion*) untuk sumber gempa *Megathrust* dapat dilihat pada tabel 5.4 berikut.

Tabel 5.4 Sumber Gempa *Megathrust*

No	RSN	Peristiwa	Lokasi	Tahun	M	R (km)	Vs30 (m/s)	Mekanisme
1	4001064	Tohoku-Sendai	Japan	2011	9,12	78,116	288,200	Interface Subd.
2	6001806	CSCH	S. America	2010	8,81	96,804	315,000	Interface Subd.
3	4028587	Tokachi-Mitsuishi	Japan	2003	8,29	67,705	280,100	Interface Subd.
4	4022911	Tokachi-Tsurui	Japan	2003	8,29	77,410	326,200	Interface Subd.
5	4032568	Tokachi-42113	Japan	2003	8,29	79,646	318,689	Interface Subd.
6	4022908	Tokachi-Shibe N	Japan	2003	8,29	95,587	249,800	Interface Subd.
7	4022909	Tokachi-Shibe S	Japan	2003	8,29	84,967	289,200	Interface Subd.
8	4022992	Tokachi-Honbetsu	Japan	2003	8,29	75,523	337,300	Interface Subd.
9	4028572	Tokachi-Ikeda	Japan	2003	8,29	70,983	255,100	Interface Subd.
10	4028558	Tokachi-Tohro	Japan	2003	8,29	74,386	229,700	Interface Subd.
11	4028585	Tokachi-Shizunai	Japan	2003	8,29	79,196	226,700	Interface Subd.

(Sumber: UCLA NHR3)

5.3.4 Pemilihan Rekam Gerak Tanah Sumber Gempa Kombinasi

Untuk sumber gempa kombinasi digunakan 11 data dari sumber gerak tanah sebelumnya yang terdiri dari 5 data sumber gempa *shallow crustal* dengan error terkecil, 3 data gempa sumber gempa *benioff* dengan error terkecil, dan 3 data sumber gempa *megathrust* dengan error terkecil yang dikombinasikan untuk nanti dijadikan sebagai gambaran umum dari perilaku seismik untuk Provinsi Bengkulu. Gerak tanah yang diambil merupakan data yang memiliki kedekatan magnitude (M_w) dan jarak (R) terhadap hasil deagregasi. Data gerak tanah (*ground motion*) untuk sumber gempa Kombinasi dapat dilihat pada tabel 5.5 berikut.

Tabel 5.5 Sumber Gempa Kombinasi

No	RSN	Peristiwa	Lokasi	Tahun	M	R (km)	Vs30 (m/s)	Mekanisme
1	166	Imperial Valley 6	Coachella	1979	6,53	50,100	336,490	Strike Slip
2	332	Coalinga 1	Parkfield	1983	6,36	50,200	251,570	Reverse
3	487	SMART1101	Taiwan	1985	5,8	41,740	275,820	Normal
4	965	Northridge 01	Covina Grand Ave	1994	6,69	57,510	346,620	Reverse
5	1025	Northridge 01	Lancaster Fox Airfield	1994	6,69	52,120	2668,650	Reverse
6	4003085	Iwate-Ichinohe	Japan	2011	7,4	110,672	343,100	Interface Subd.
7	4024099	Kise-Totsukawa	Japan	2004	7,41	102,051	338,400	Interface Subd.
8	4012458	Iwate-Nishine	Japan	2011	7,4	117,740	297,500	Interface Subd.
9	4001064	Tohoku-Sendai	Japan	2011	9,12	78,116	288,200	Interface Subd.
10	4032568	Tokachi-42113	Japan	2003	8,29	79,646	318,689	Interface Subd.
11	4028572	Tokachi-Ikeda	Japan	2003	8,29	70,983	255,100	Interface Subd.

(Sumber: PEER NGA-West & UCLA NHR3)

5.4 Respon Spektra Target MCE_R

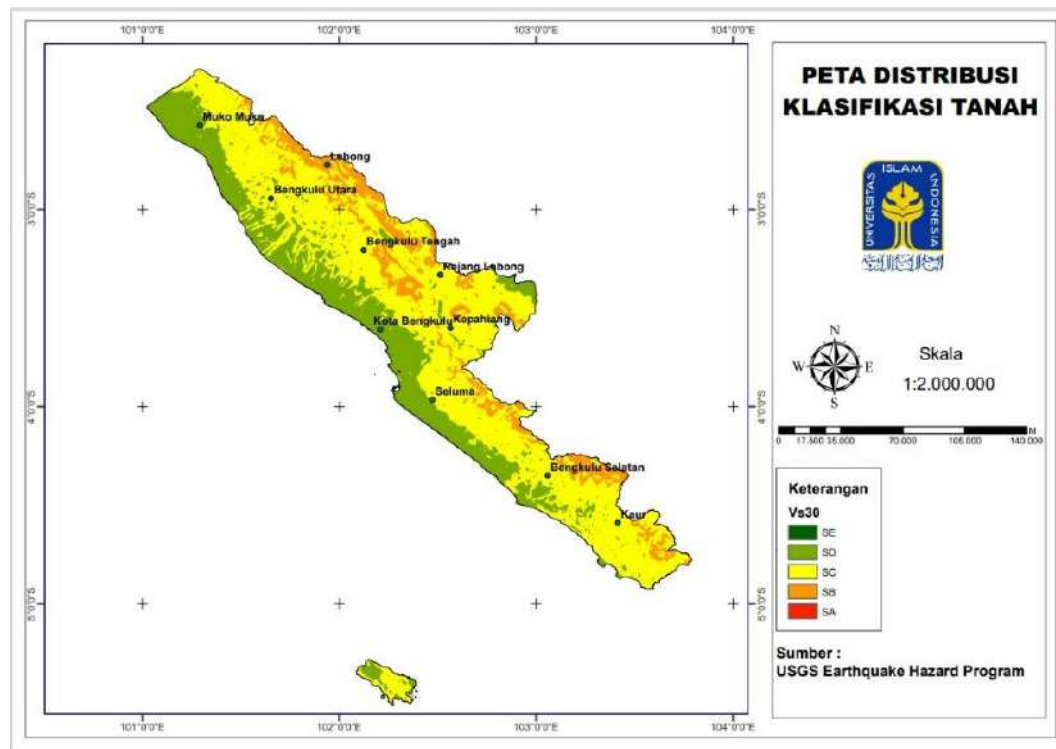
Untuk menentukan respons spektral gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget, diperlukan faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan 1 detik. Faktor tersebut meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan untuk getaran periode pendek (F_a), dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) disesuaikan dengan

pengaruh klasifikasi situs. Penentuan parameter tersebut didapatkan menggunakan aplikasi respon spektra yang dapat diakses secara online melalui website (<http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021>).

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 11.2.1, target respons spektrum gempa yang digunakan merupakan spektrum MCE_R pada permukaan tanah dengan redaman 5%. Dalam tahap ini, setiap pasang data gempa harus dimodifikasi untuk memastikan agar rata-rata dari respons spektra arah maksimum melebihi 110% dari target respons spektrum dalam rentang periode yang berlaku dengan intensitas arias yang mirip (SNI 8899:2020 pasal 8.3).

5.4.1 Penentuan Jenis Tanah

Kelas situs biasanya didapatkan melalui pengujian langsung di lapangan demi mendapatkan gambaran struktur tanah, namun metode tersebut kurang efisien untuk tinjauan wilayah yang luas karena membutuhkan waktu yang lama, biaya dan sumber daya yang banyak. Alternatif dari pengujian tersebut yaitu dengan menentukan kelas situs yang dilakukan dengan memanfaatkan data kecepatan gelombang geser kedalaman 30 meter dari permukaan (V_{s30}) dari website USGS. Dalam penentuan kelas situs ini digunakan metode pendekatan dengan memanfaatkan data V_{s30} dan diolah dengan bantuan ArcGIS yang sebelumnya pernah dilakukan oleh Rahmawati, 2022. Hal pertama yang dilakukan yaitu dengan mengunduh data V_{s30} (Kecepatan rambat gelombang geser rata-rata pada lapisan tanah dengan kedalaman 30m) di *website USGS Earthquake Hazard Program*. Data yang berupa *raster* tersebut perlu dilakukan pemetaan lebih lanjut menggunakan *software* ArcGis. Nilai V_{s30} pada Provinsi Bengkulu ($3^{\circ}47'44''$ S – $102^{\circ}15'33''$ E) didapatkan nilai sebesar 291,26358 m/detik yang dapat disimpulkan bahwa Provinsi Bengkulu memiliki jenis tanah sedang (SD).



Gambar 5.24 Peta Distribusi Tanah pada Provinsi Bengkulu

(Sumber: Rahmawati 2022)

5.4.2 Penentuan Nilai Percepatan Tanah (S_s dan S_1)

Parameter S_s (percepatan batuan dasar pada periode pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik) harus ditetapkan masing-masing dari respons spektral percepatan 0,2 detik dan 1 detik dalam peta gerak tanah seismic dengan kemungkinan 2 terlampaui dalam 50 tahun (MCE_R , 2% dalam 50 tahun). Penentuan nilai percepatan tanah di Provinsi Bengkulu yang sesuai dengan SNI 1726:2019 dengan menggunakan aplikasi respon spektra yang dapat diakses dari laman (<http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021>). Dari aplikasi tersebut diperoleh data percepatan gempa pada periode pendek (S_s) sebesar 1,500 g dan data parameter percepatan gempa pada periode 0,1 detik (S_1) sebesar 0,600 g.

5.4.3 Penentuan Nilai Koefisien Situs (F_a dan F_v)

Penentuan respons spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah, diperlukan faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik. Meliputi amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode pendek (F_a) dan amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Nilai dari F_a dan F_v dari Provinsi Bengkulu didapatkan sebesar, $F_a = 1,0$; dan $F_v = 1,7$.

5.4.4 Penentuan Parameter Percepatan Spektral Desain (S_{DS} dan S_{D1})

Penentuan respons spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah diperlukan factor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik (F_a) dan periode 1 detik (F_v). Berdasarkan SNI 1726:2019, parameter seismic Provinsi Bengkulu diketahui nilai $S_s = 1,500$ g dan $S_1 = 0,600$ g serta koefisien situs $F_a = 1$ dan $F_v = 1,7$. Maka Parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek (S_{DS}) dan periode 1 detik (S_{D1}) serta parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs dapat ditentukan dengan perhitungan berikut.

$$\begin{aligned} S_{MS} &= F_a \times S_s \\ &= 1,0 \times 1,5 \\ &= 1,5 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{M1} &= F_v \times S_1 \\ &= 1,7 \times 0,6 \\ &= 1,02 \text{ g} \end{aligned}$$

Untuk parameter percepatan spektral desain periode pendek (S_{DS}), dan pada periode 1 detik (S_{D1}), harus ditentukan melalui perumusan berikut:

$$\begin{aligned} S_{DS} &= \frac{2}{3} \times S_{MS} \\ &= \frac{2}{3} \times 1,5 \\ &= 1 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{D1} &= \frac{2}{3} \times S_{M1} \\
 &= \frac{2}{3} \times 1,02 \\
 &= 0,68 \text{ g}
 \end{aligned}$$

5.4.5 Penentuan Periode Fundamental Pendekatan (T_a)

Periode fundamental struktur, T , dalam arah yang ditinjau harus diperoleh menggunakan sifat struktur dan karakteristik deformasi elemen pemikul analisis yang teruji. Sebagai alternatif dalam melakukan analisis untuk menentukan periode fundamental struktur, T , diizinkan secara langsung menggunakan periode bangunan pendekatan (T_a), dalam detik dari persamaan berikut untuk struktur dengan ketinggian tidak melebihi 12 tingkat. Pada penelitian ini jumlah lantai (N) yang digunakan sebesar 10 tingkat.

$$\begin{aligned}
 T_a &= 0,1 N \\
 &= 0,1 \times 10 \\
 &= 1 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_0 &= 0,2 \times \frac{SD1}{SDS} \\
 &= 0,1360 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_s &= \frac{SD1}{SDS} \\
 &= 0,6800 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

$$T_{1A} = 1 \text{ detik}$$

$$T_{1B} = 1 \text{ detik}$$

$$T_{\text{MPMR } 90\%} = 0,9 \text{ detik}$$

Proses modifikasi rekaman gerak tanah untuk pencocokan dengan respons spektrum target harus dilakukan dalam rentang periode antara $0,2 T_{1B} - 2T_{1A}$, di mana T_{1A} merupakan periode fundamental terbesar dan T_{1B} merupakan periode fundamental terkecil untuk arah respons horizontal utama. Rentang periode yang digunakan dalam modifikasi harus mencakup partisipasi massa 90% di setiap arah horizontal utama.

5.4.6 Respons Spektrum Desain (DBE)

Berlandaskan pada SNI 1726:2019, untuk wilayah Bengkulu dengan kelas situs SD, target spektrum yang diterapkan mengacu pada spektrum respons risiko seragam MCE_R berdasarkan nilai respons spektral percepatan dan koefisien kelas situs sebagai berikut:

$$S_s = 1,5 \text{ g}; \quad F_a = 1; \quad S_{MS} = 1,5 \text{ g}; \quad S_{DS} = 1 \text{ g}$$

$$S_1 = 0,6 \text{ g}; \quad F_v = 1,7; \quad S_{M1} = 1,02 \text{ g}; \quad S_{D1} = 0,68 \text{ g}$$

Respons spektrum desain (DBE) digunakan sebagai prosedur perhitungan dikarenakan gerak tanah dari spesifik-situs tidak digunakan sehingga kurva spektrum respons desain harus dikembangkan dan dibuat menggunakan nilai parameter percepatan spektral desain sesuai dengan SNI 1729:2019 Pasal 6.4. Untuk mendapatkan target respons spektrum MCE_R , perhitungan dari respons spektrum desain tersebut digunakan dengan percepatan MCE_R pendek dan periode 1 detik.

$$\begin{aligned} T_0 &= 0,2 \times \frac{SD1}{SDS} \\ &= 0,2 \times \frac{1}{0,68} \\ &= 0,136 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{SD1}{SDS} \\ &= \frac{1}{0,68} \\ &= 0,68 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_a &= 0,1 \times N \\ &= 0,1 \times 10 \\ &= 1 \text{ detik} \end{aligned}$$

Pada periode yang memiliki nilai lebih kecil dari T_0 , Spektrum desain percepatan dihitung dengan persamaan:

$$S_a = S_{MS} \left(0,4 \times 0,6 \frac{T}{T_0} \right)$$

Sehingga $T < T_0$, untuk $T = 0,001$ detik didapatkan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} S_a &= S_{MS} \left(0,4 \times 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \\ &= 1,5 \times \left(0,4 \times 0,6 \frac{0,001}{0,136} \right) \\ &= 0,6009 \text{ g} \end{aligned}$$

Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, $S_a = S_{MS}$.

Sehingga $T_0 \leq T_s$, untuk $T = 0,136$ detik dan $T = 0,68$ detik didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} S_a &= S_{MS} \\ &= 1,5 \text{ g} \end{aligned}$$

Pada periode yang lebih besar dari T_s , tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , digunakan persamaan:

$$S_a = \frac{SM1}{T}$$

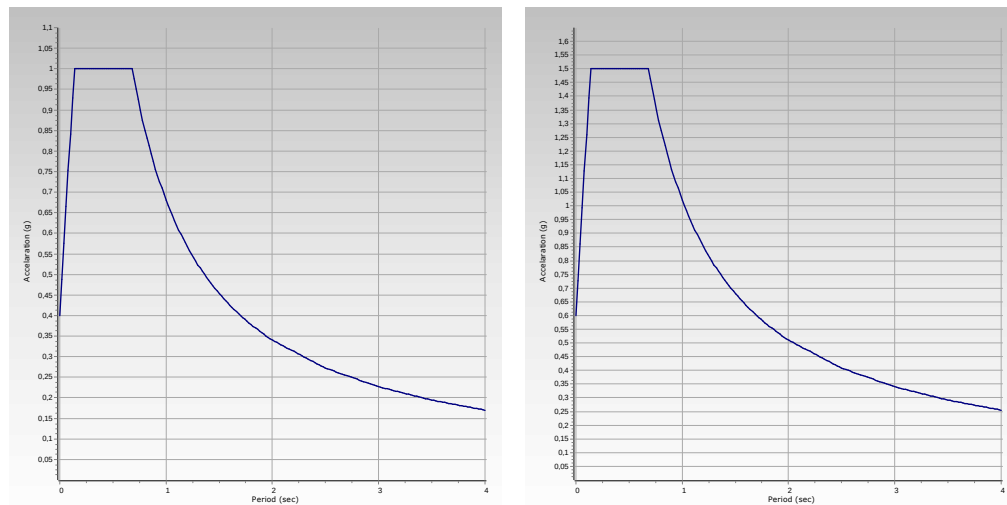
Sehingga $T_L \geq T > T_s$, untuk $T = 0,8$ detik didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} S_a &= \frac{SM1}{T} \\ &= \frac{1,02}{0,8} \\ &= 1,275 \text{ g} \end{aligned}$$

Untuk memperoleh respons spektrum target MCE_R , nilai respon spektrum desain (DBE) dikalikan dengan 1,5 sesuai dengan SNI 8899:2020 Pasal 6.8. sehingga didapatkan hasil perhitungan DBE dan MCE_R masing-masing yang dapat dilihat pada tabel 5.6 berikut.

Tabel 5.6 Nilai perhitungan spektral percepatan DBE dan MCE_R

T (s)	S_a (g)	
	DBE	MCE_R
0	0,4000	0,60000
0,001	0,4044	0,60090
0,1360	1,0000	1,50000
0,6800	1,0000	1,50000
0,8	0,8500	1,27500
0,9	0,7556	1,13333
1	0,6800	1,02000
1,1	0,6182	0,92727
1,2	0,5667	0,85000
1,3	0,5231	0,78462
1,4	0,4857	0,72857
1,5	0,4533	0,68000
1,6	0,4250	0,63750
1,7	0,4000	0,60000
1,8	0,3778	0,56667
1,9	0,3579	0,53684
2	0,3400	0,51000
2,5	0,2720	0,40800
3	0,2267	0,34000
3,5	0,194285714	0,29143
4	0,17	0,25500



Gambar 5.25 Respon Spektra DBE (Kiri) dan MCE_R (Kanan)

5.4.7 Rentang Periode Pencocokan

Setiap pasang gempa dengan masing-masing sumber gempa kemudian dilakukan penskalaan untuk mencapai kecocokan dengan respons spektrum target risiko seragam MCE_R dengan menggunakan metode penskalaan amplitudo yang memenuhi persyaratan yang mengacu pada SNI 1726:2019 pasal 11.2.3.2. Perbandingan yang digunakan yaitu $0,2 T_{1B}$ s.d $2,0 T_{1A}$ di mana telah sesuai dengan yang diijinkan dalam SNI 1726:2019 pasal 11.2.3.1 dengan validasi analisis dinamik yang sesuai dengan SNI 8899:2020 pasal 8.1. Periode fundamental struktur, T , dalam arah yang ditinjau harus diperoleh menggunakan sifat struktur dan karakteristik deformasi elemen pemikul analisis yang teruji. Sebagai alternatif dalam melakukan analisis untuk menentukan periode fundamental struktur, T , diizinkan secara langsung menggunakan periode bangunan pendekatan (T_a), dalam detik dari persamaan berikut untuk struktur dengan keitnggian tidak melebihi 12 tingkat. Pada penelitian ini jumlah lantai (N) yang digunakan sebesar 10 tingkat. Sebagai alternatif dalam pelaksanaan analisis untuk menentukan nilai periode fundamental struktur, T yang digunakan untuk menentukan Batas Atas ~ Batas Bawah diizinkan secara langsung menggunakan periode bangunan pendekatan yaitu dengan $T_a = 1$ detik.

$$\text{Batas Atas} = 2T_{1A}$$

$$= 2 \times 1$$

$$= 2 \text{ detik}$$

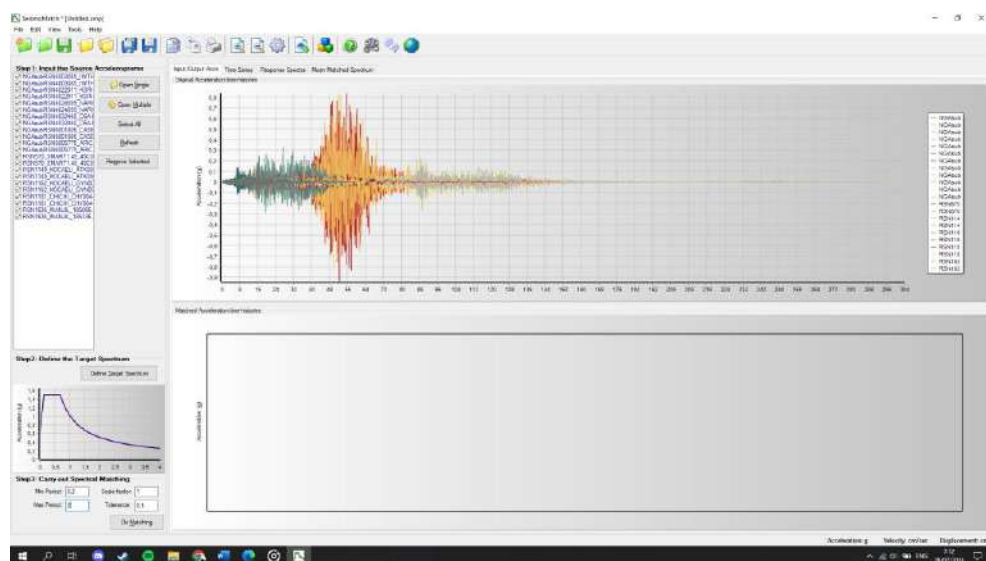
$$\text{Batas Bawah} = 0,2T_{1B}$$

$$= 0,2 \times 1$$

$$= 0,2 \text{ detik}$$

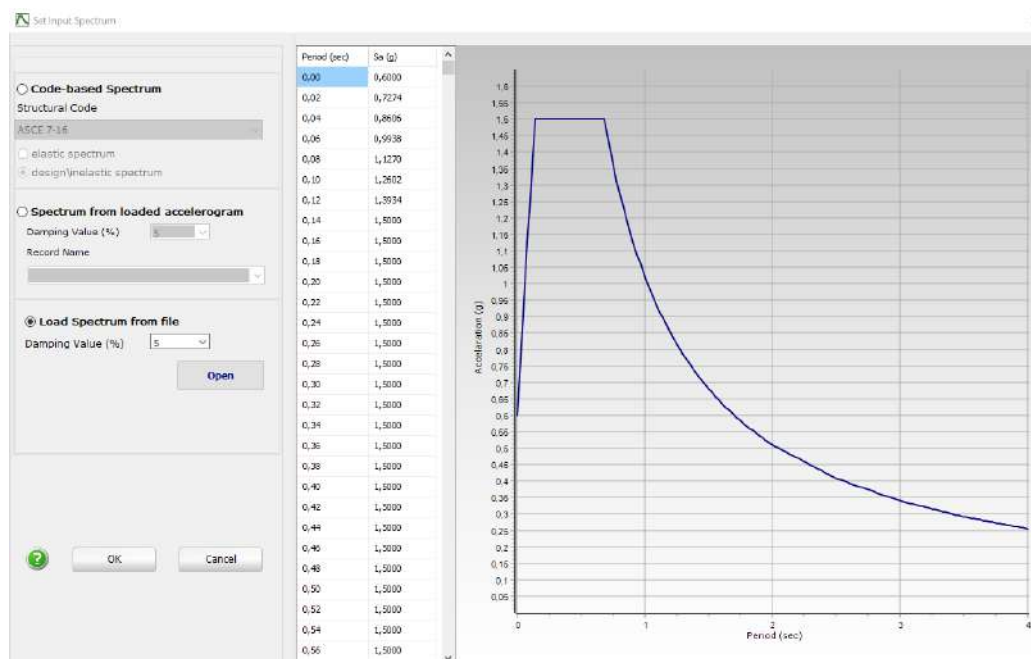
5.5 Modifikasi Gerak Tanah

Setelah tahapan penentuan nilai spektrum target dari rangkaian gerak tanah (*ground motion*), dapat dilaksanakan prosedur pencocokan spektral yaitu dilakukan dengan menggunakan *software SeismoMatch 2023*. Penskalaan dilakukan dengan menginput data dari RSN (*Regional Seismic Network*) untuk masing-masing sumber gempa dengan 4 cycle, yaitu *matching* 11 pasang data untuk sumber gempa *Shallow Crustal*, 11 pasang data untuk sumber gempa *Benioff*, 11 pasang data untuk sumber gempa *Megathrust*, dan 11 pasang data untuk sumber gempa kombinasi yang bertujuan untuk mendapatkan nilai spektrum rata-rata tercocok (*mean matched spectra*) dari serangkaian gerak tanah yang menunjukkan kemiripan dengan spektrum target.



Gambar 5.26 11 Pasang Data RSN untuk Cycle Gempa Kombinasi Terinput

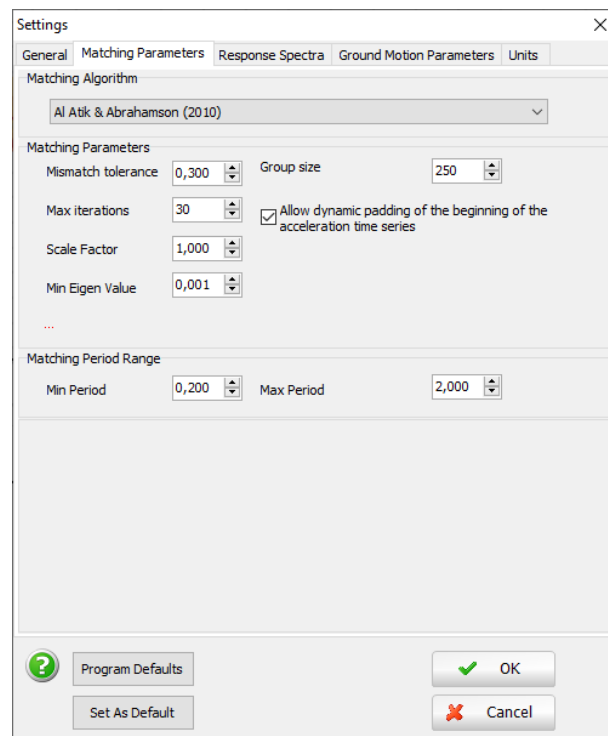
Satu RSN data gempa yang digunakan terdiri dari 2 jenis data, yaitu percepatan horizontal arah X dan arah Y dengan input *PEER-NGA format*. Satu cycle pencocokan terdiri dari 22 data percepatan gempa yang kemudian dicocokkan dengan input data spektra target melalui menu *define target* nilai MCE_R .



Gambar 5.27 Define Target Spectrum Program SeismoMatch 2023

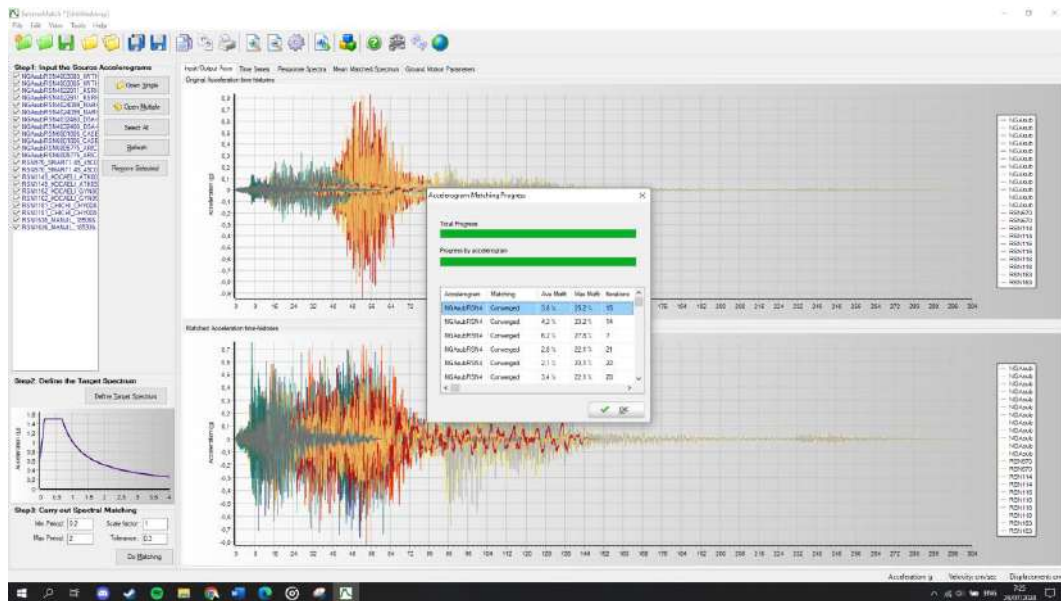
Metode pencocokan spektral yang digunakan yaitu berupa domain waktu menggunakan algoritma RSPMatch yang dikembangkan oleh Al Atik & Abrahamson (2010) di mana dalam modifikasi gerak tanah dilakukan dengan penambahan gelombang (*wavelet*) secara iteratif dan bertahap dimulai dari frekuensi tinggi hingga mencakup frekuensi rendah. Fungsi gelombang yang digunakan berupa *improved tapered cosine* yang dapat menghasilkan nilai integral percepatan, kecepatan, dan simpangan menjadi nol sehingga tidak lagi perlu koreksi garis dasar (*base line correction*) (Atik L. & Abrahamson N., 2010).

Nilai parameter yang digunakan dalam konfigurasi pencocokan yaitu nilai *Min Period* = 0,2; *Max Period* = 2; *Scale factor* = 1; *Max Iterations* = 30; dan *Mismatch Tolerance* yang digunakan senilai 0,3 dikarenakan keterbatasan lisensi yang digunakan penulis untuk mengakses aplikasi *SeismoMatch 2023*.

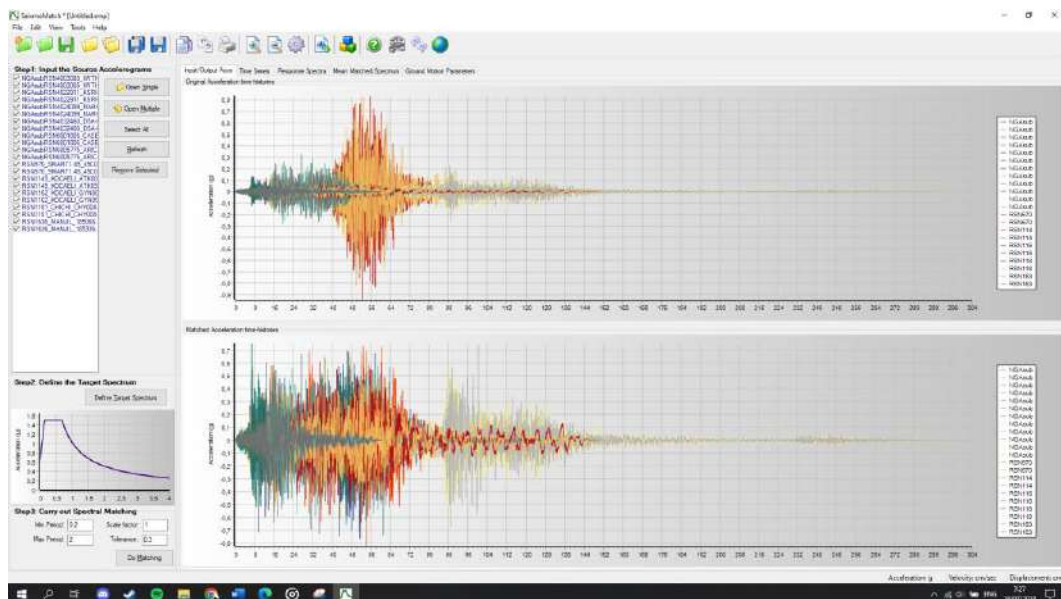


Gambar 5.28 Konfigurasi Pencocokan untuk Program *SeismoMatch 2023*

Setelah parameter-parameter yang diperlukan untuk pencocokan, selanjutnya dapat dilakukan pencocokan dengan respons spektrum target dengan opsi "*do matching*" yang terdapat pada kiri bawah *Windowss* program *SeismoMatch 2023*. Contoh dari *matching* spektral target dapat dilihat pada gambar 5.29 berikut.



Gambar 5.29 Proses Matching Menggunakan Program SeismoMatch 2023

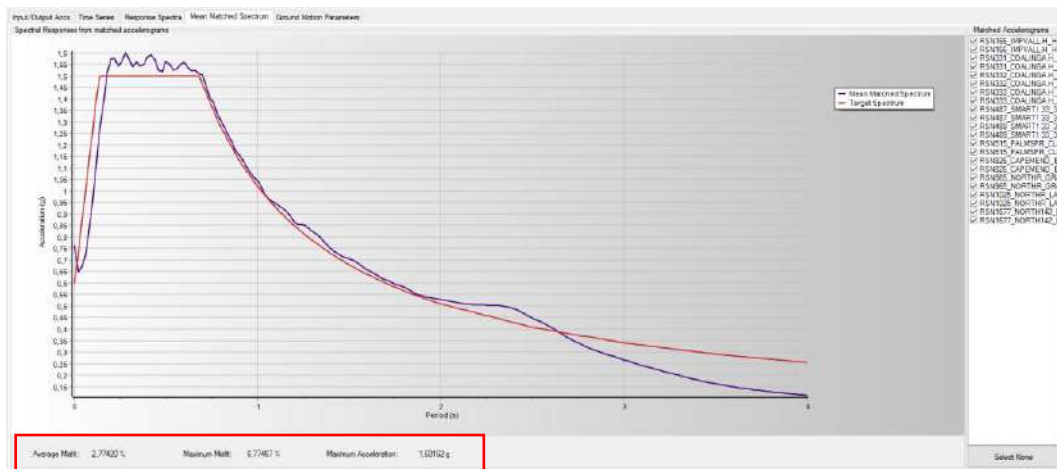


Gambar 5.30 Hasil Matching Menggunakan Program SeismoMatch 2023

Dari gambar 5.30 dapat dilihat dalam *default Windows* di mana grafik atas menunjukkan kolase dari masing-masing original RSN, dan grafik bawah menunjukkan kolase dari masing-masing RSN yang telah tercocokkan.

The graph displays the acceleration spectra for three different seismic records. The y-axis represents acceleration in g-units, ranging from 0.05 to 1.55. The x-axis represents the period in seconds, ranging from 0 to 4. The 'Target Spectrum' (red line) shows a peak acceleration of approximately 1.5 g at a period of about 0.2 seconds, followed by a gradual decay. The 'Spectrum from matched accelerogram' (green line) closely follows the target spectrum, with some minor fluctuations. The 'Spectrum from original accelerogram' (blue line) is much lower, with a peak acceleration of about 0.2 g at a period of 0.5 seconds, and remains significantly below the other two spectra across the entire period range.

Pada gambar 5.31 merupakan komparasi antara masing-masing *original* RSN terhadap spektra target, gambar 5.32 menampilkan komparasi antara masing-masing *matched* RSN terhadap spektra target, dan 5.33 menampilkan detail dari satu RSN yaitu dengan grafik biru mewakili spektra *original*, dan hijau mewakili *matched spektra* terhadap spektra target merah.



Gambar 5.34 Perbandingan Antara Spektra Target Dengan Spektra Gempa Tercocokan Rata-Rata (*Mean Matched Spectra*) Sumber Gempa *Shallow Crustal*

Hasil dari proses *matching* sumber gempa *Shallow Crustal* menunjukkan bahwa spektrum rata-rata gerak tanah termodifikasi memiliki kecocokan yang baik terhadap 110% target spektrum. Dari gambar 5.34 dapat dilihat apabila kurva dari spektra gempa tercocokan rata-rata (biru) sudah mendekati dengan kurva spektra target (merah) dengan nilai ketidakcocokan (*misfits*) senilai *Average misfit* = 2,77420% dan *Maximum misfit* = 6,77467% yang telah sesuai dengan peraturan untuk *Average misfits* < 10%, dan *Maximum misfits* < 30% dan nilai maksimum S_a = 1,60162 g. Hasil untuk nilai S_a masing-masing interval periode dari spektra gempa tercocokan rata-rata dapat dilihat pada Lampiran 1.

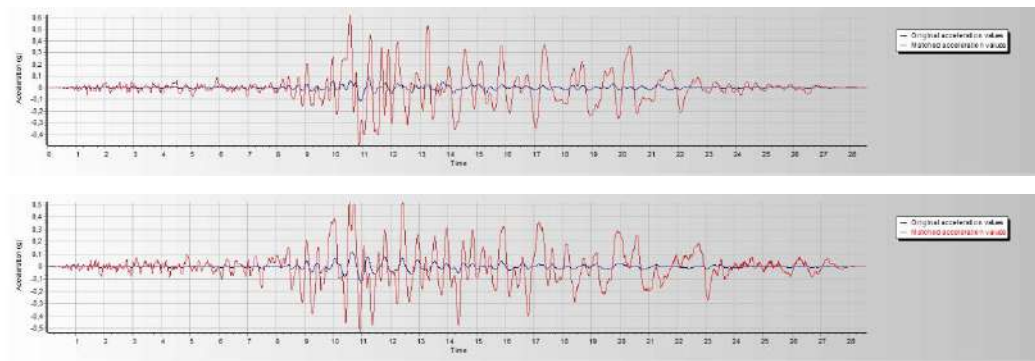
Dari proses *matching* tersebut, pada menu *matched spectrum* dapat diketahui nilai kecocokan dari masing-masing data atau *time series* terhadap respons spektrum target dengan pendekatan error berupa rata-rata ketidakcocokan (*average misfits*) serta nilai ketidakcocokan terbesar (*maximum misfit*) untuk sumber gempa *Shallow Crustal* yang dapat dilihat pada tabel 5.7 berikut.

Tabel 5.7 Nilai Kecocokan Tiap RSN *Shallow Crustal* Terhadap Spektra Target

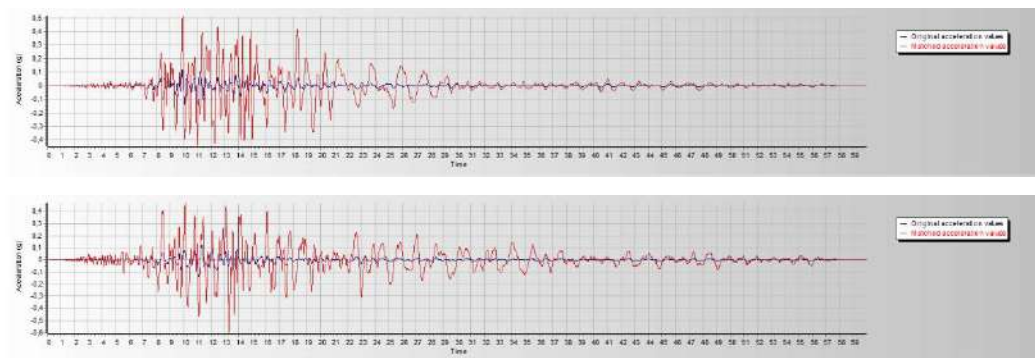
No	RSN	Event	Tahun	M	R (Km)	Average Misfits	Maximum Misfits
1	166	Imperial Valley 6	1979	6,53	50,100	2,607%	13,129%
2	331	Coalinga 1	1983	6,36	48,700	3,853%	14,988%
3	332	Coalinga 1	1983	6,36	50,200	3,618%	11,523%
4	333	Coalinga 1	1983	6,36	51,750	3,764%	18,911%
5	487	SMART1I01	1985	5,8	41,740	3,303%	12,170%
6	489	SMART1M01	1985	5,8	41,820	3,859%	19,152%
7	515	Palm Springs	1986	6,06	52,410	3,657%	17,574%
8	826	Cape Mendocino	1992	7,01	41,970	3,860%	15,956%
9	965	Northridge 01	1994	6,69	57,510	3,569%	14,940%
10	1025	Northridge 01	1994	6,69	52,120	3,603%	16,573%
11	1677	Northridge 01	1994	5,93	43,400	3,778%	12,903%

Dari tabel 5.7 di atas, dari ke-11 pasang data gempa telah memenuhi syarat yaitu untuk *average misfits* < 10% dan *Maximum Misfits* < 30% , di mana angka ini didasarkan pendekatan terhadap peraturan seperti ASCE 7, FEMA 365, maupun SNI 17266:2019 yang tidak diatur secara eksplisit melainkan nilai *average misfit* (10%) dianggap sebagai batasan untuk memastikan bahwa respons spektra tercocokkan sudah cukup mendekati dengan respon spektra target secara menyeluruh, sedangkan *maximum misfits* (30%) Mengizinkan deviasi yang lebih besar pada titik-titik tertentu (30%) sehingga dapat memberikan fleksibilitas untuk mengakomodasi variabilitas lokal atau ketidakpastian dalam data tanpa mempengaruhi keseluruhan performa seismik secara signifikan.

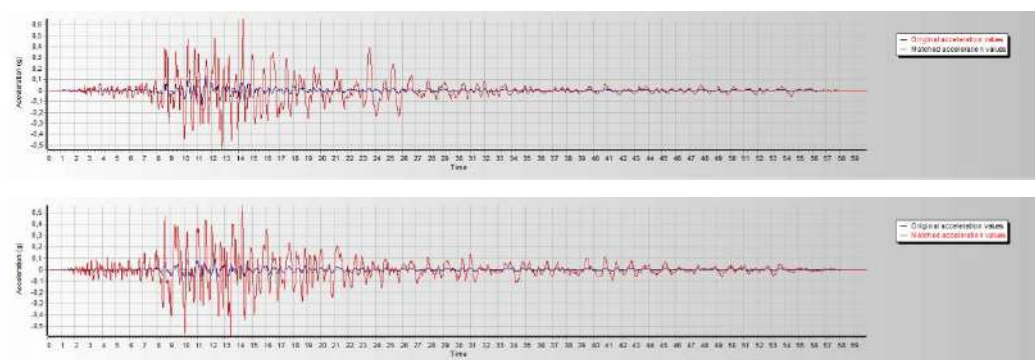
Untuk detail dari masing-masing *time series* RSN dapat dilihat pada grafik-grafik berikut dengan keterangan *original Time History* (biru), dan *matched Time History* (merah). Dengan grafik atas merupakan arah horizontal X dan grafik bawah merupakan arah horizontal Y.



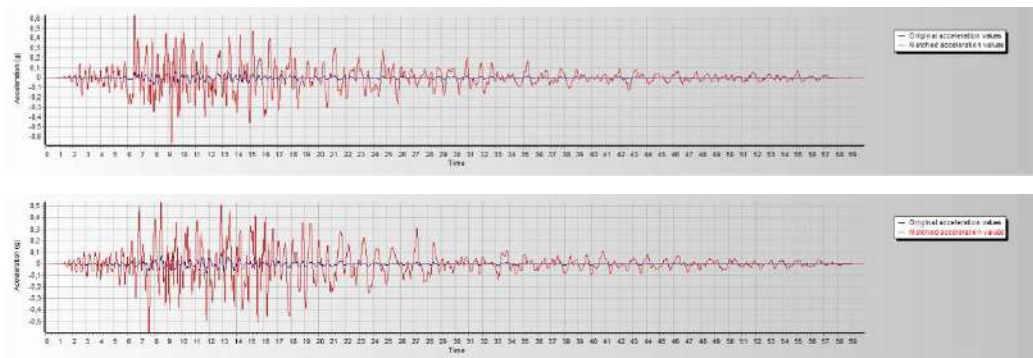
Gambar 5.35 *Time History* USA-Imp. Valley Coachella-166 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



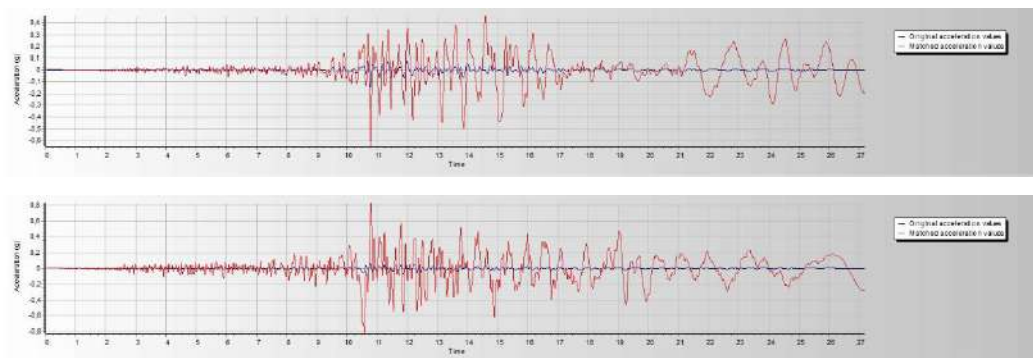
Gambar 5.36 *Time History* USA-Coalinga Parkfield-331 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



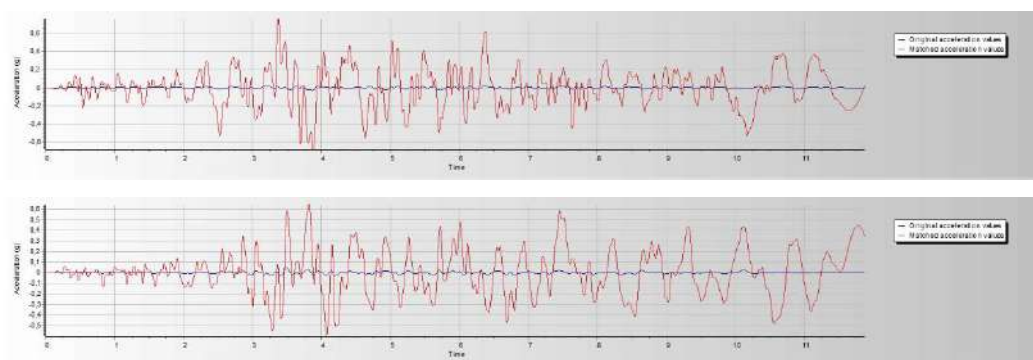
Gambar 5.37 *Time History* USA-Coalinga Parkfield-332 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



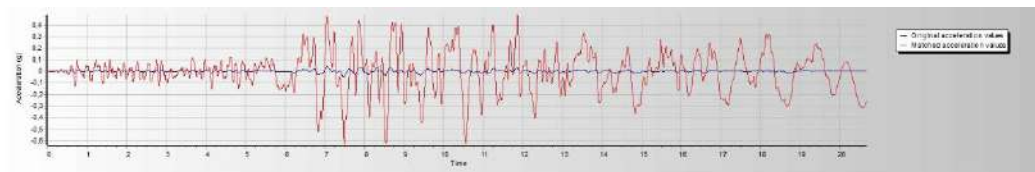
Gambar 5.38 Time History USA-Coalinga Parkfield-333 arah X↑ & Y↓



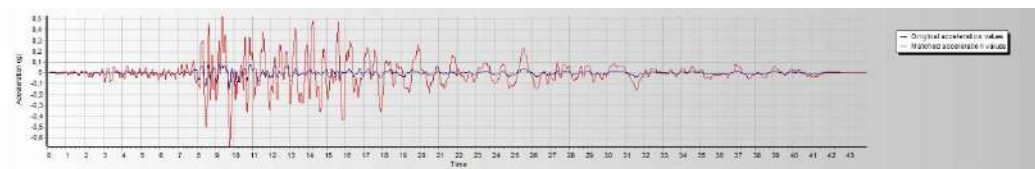
Gambar 5.39 Time History Taiwan-SMART1I01-487 arah X↑ & Y↓



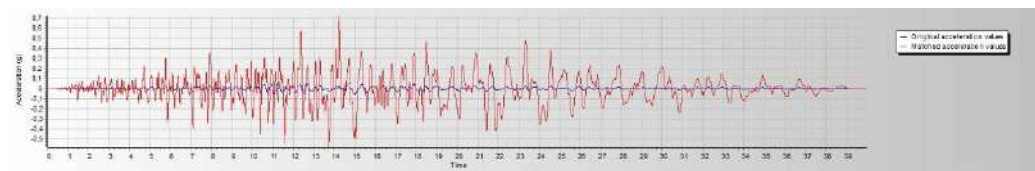
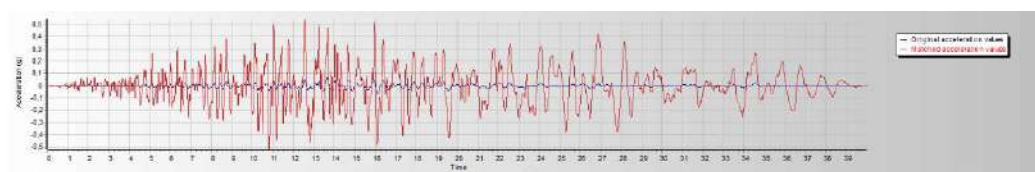
Gambar 5.40 Time History Taiwan-SMART1M01-489 arah X↑ & Y↓



Gambar 5.41 Time History USA-Palm Springs-515 arah X↑ & Y↓

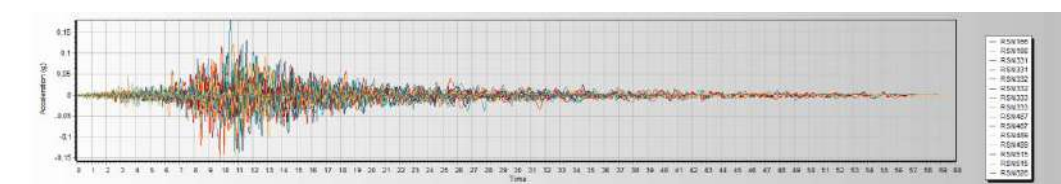


Gambar 5.42 Time History USA-Cape Mendocino-826 arah X↑ & Y↓



Gambar 5.43 Time History USA-Northridge Covina-965 arah X↑ & Y↓

Dari kurva yang telah dilampirkan di atas, dapat diambil visualisasi dari ke 11 pasang RSN yang disajikan dalam satu bentuk kolase sebagai berikut.

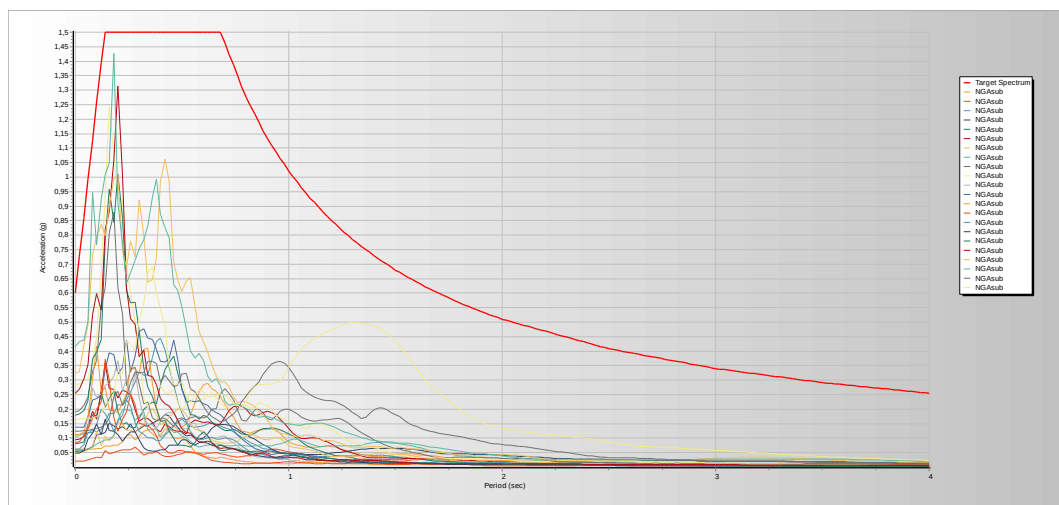


Gambar 5.47 Matched Time History Sumber Gempa Shallow Crustal

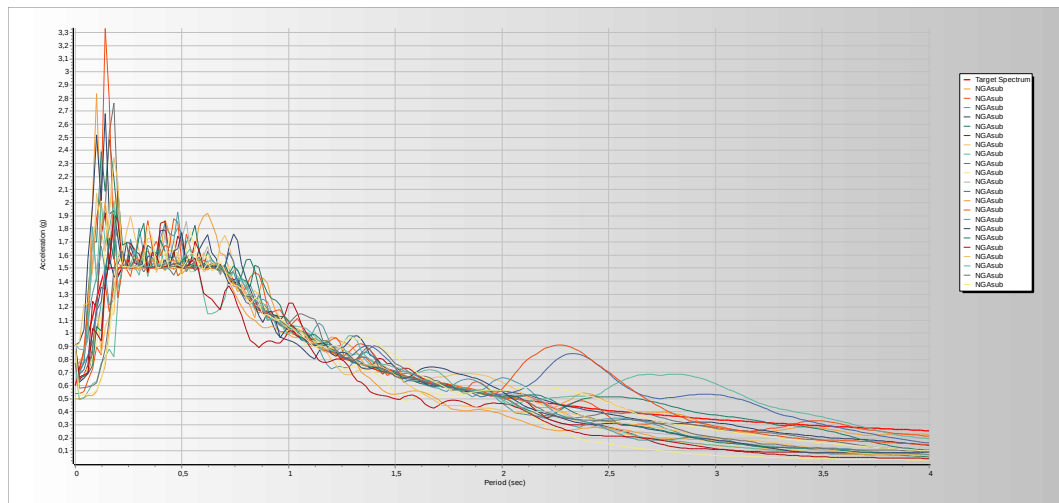
5.5.2 Pencocokan Spektral Sumber Gempa *Benioff*

Proses *matching* untuk sumber gempa *Benioff* dilakukan dengan menginput 11 pasang data RSN *Benioff* yang telah dipilih seperti yang terdapat pada tabel 5.3 ke dalam aplikasi *SeismoMatch* seperti yang telah dijelaskan di subbab sebelumnya. Setelah proses *matching* untuk 11 pasang data gempa *Benioff* selesai, didapatkan hasil berupa kurva *accelerogram* untuk masing-masing RSN yang telah tercocokkan (*Time Series matched accelerogram*), kurva spektra masing-masing RSN yang telah tercocokkan (*Response Spectra matched accelerogram*), serta kurva spektra rata-rata tercocokkan (*Mean matched spectrum*).

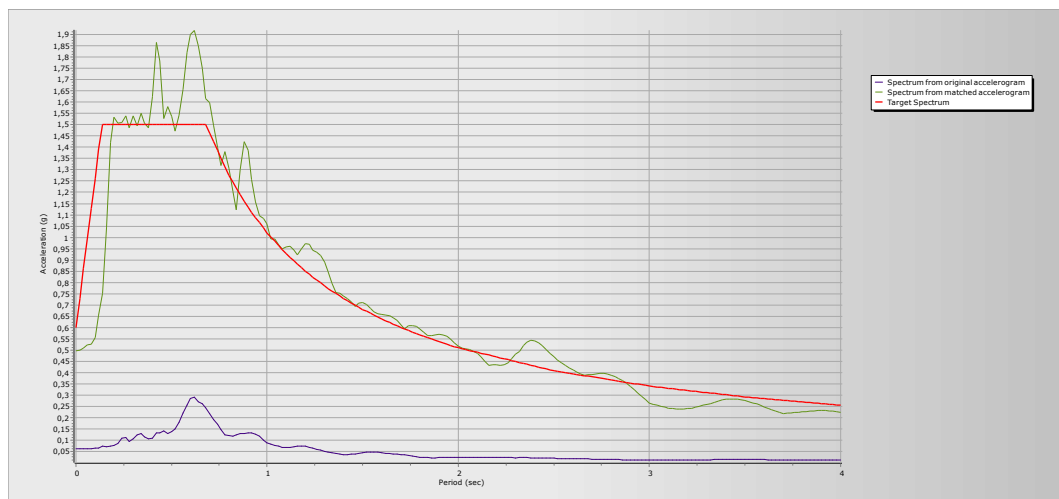
Selain hasil visual berupa kurva percepatan-periode, nilai dari spektra juga disajikan dengan bentuk tabel yang telah selesai memberikan perhitungan nilai untuk S_a yang telah tercocokkan yang dapat dilihat pada Lampiran 4. Kurva dari hasil pencocokan sumber gempa *Benioff* dapat dilihat pada gambar-gambar berikut.



Gambar 5.48 Original Accelerogram Spectra untuk Gempa *Benioff*

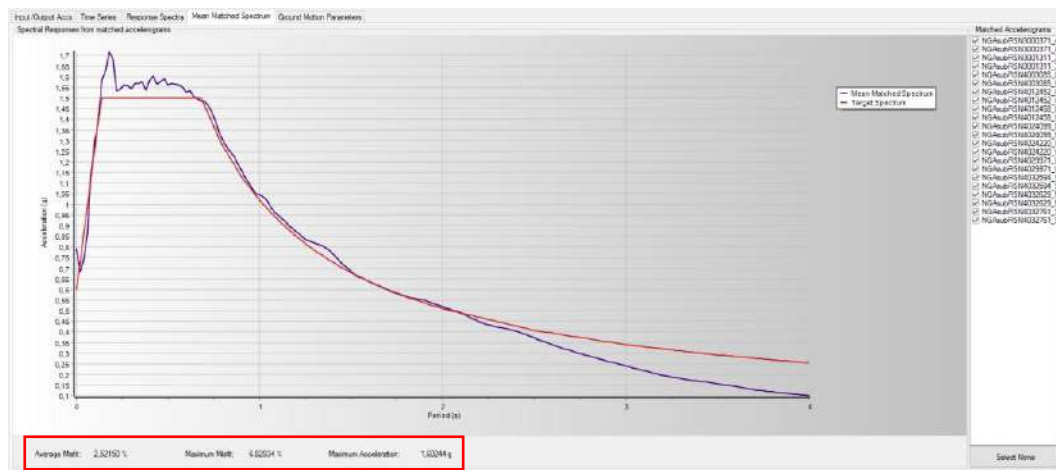


Gambar 5.49 Matched Accelerogram Spectra untuk Gempa Benioff



Gambar 5.50 Perbandingan Antara Spektra Gempa Asli Dengan Spektra Gempa Tercocokan untuk Sumber Gempa Benioff Japan Iwate-Ichinobe RSN 4003085

Pada gambar 5.48 merupakan komparasi antara masing-masing *original* RSN terhadap spektra target, gambar 5.49 menampilkan komparasi antara masing-masing *matched* RSN terhadap spektra target, dan 5.50 menampilkan detail dari satu RSN yaitu dengan grafik biru mewakili spektra *original*, dan hijau mewakili *matched spektra* terhadap spektra target merah.



Gambar 5.51 Perbandingan Antara Spektra Target Dengan Spektra Gempa Tercocokan Rata-Rata (*Mean Matched Spectra*) Sumber Gempa *Benioff*

Hasil dari proses *matching* sumber gempa *Benioff* menunjukkan bahwa spektrum rata-rata gerak tanah termodifikasi memiliki kecocokan yang baik terhadap 110% target spektrum. Dari gambar 5.51 dapat dilihat apabila kurva dari spektra gempa tercocokan rata-rata (biru) sudah mendekati dengan kurva spektra target (merah) dengan nilai error (*misfits*) senilai *Average misfit* = 2,515% dan *Maximum misfit* = 6,82934% yang telah sesuai dengan peraturan untuk *Average misfits* < 10%, dan *Maximum misfits* < 30% dan nilai maksimum $S_a = 1,60244$ g. Hasil untuk nilai S_a masing-masing interval periode dari spektra gempa tercocokan rata-rata dapat dilihat pada Lampiran 4.

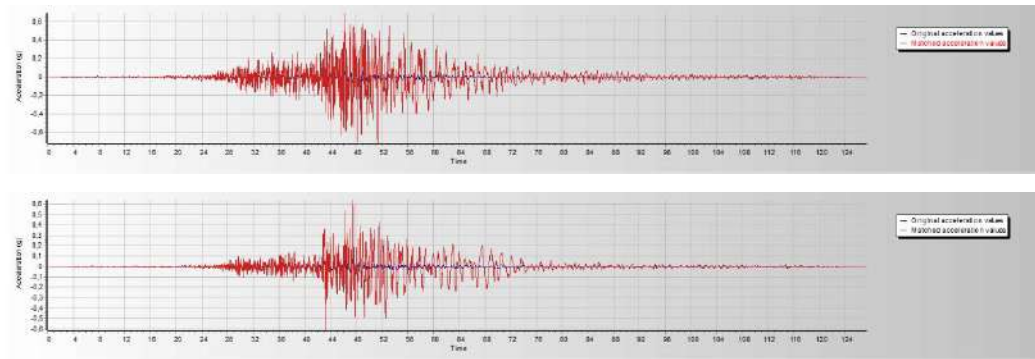
Dari proses *matching* tersebut, pada menu *matched spectrum* dapat diketahui nilai kecocokan dari masing-masing data atau *time series* terhadap respons spektrum target dengan pendekatan error berupa rata-rata ketidakcocokan (*average misfits*) serta nilai ketidakcocokan terbesar (*maximum misfit*) untuk sumber gempa *Benioff* yang dapat dilihat pada tabel 5.8 berikut.

Tabel 5.8 Nilai Kecocokan Tiap RSN *Benioff* Terhadap Spektra Target

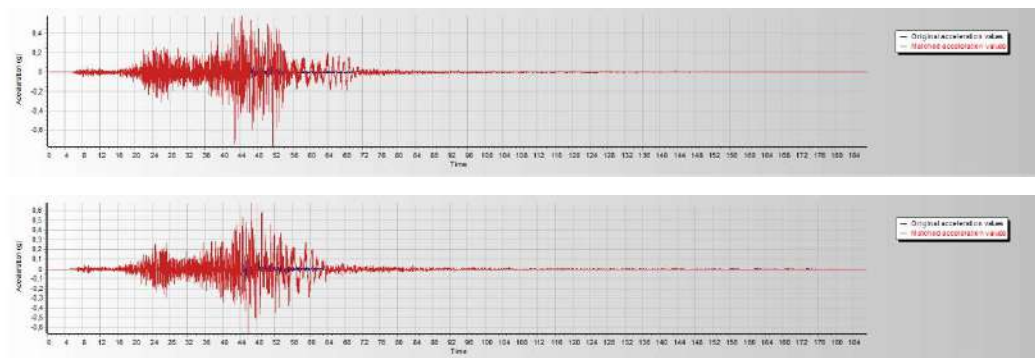
No	RSN	Event	Tahun	M	R (Km)	Average Misfits	Maximum Misfits
1	4003085	Iwate-Ichinohe	2011	7,4	110,672	4,246%	17,698%
2	4024099	Kise-Totsukawa	2004	7,41	102,051	2,676%	13,700%
3	4032629	Kushiro-Tokachi	1993	7,59	122,443	3,942%	14,754%
4	3000371	105 - ACLS	2012	7,66	109,989	5,700%	20,008%
5	4032594	Miyagi-Miyako	1978	7,65	112,782	5,660%	17,228%
6	4012452	Iwate-Ishidoriya	2011	7,4	112,346	5,105%	14,897%
7	4012458	Iwate-Nishine	2011	7,4	117,740	2,798%	10,009%
8	4029971	Kise-Tanabe	2004	7,41	103,147	5,459%	19,264%
9	3001311	143-3295	2014	7,32	113,647	5,750%	20,872%
10	4032761	Nemuro-Kushiro	1973	7,4	98,084	5,253%	24,270%
11	4024220	Kise-Kamitonda	2004	7,41	95,952	4,840%	13,884%

Dari tabel 5.8 di atas, dari ke-11 pasang data gempa telah memenuhi syarat yaitu untuk *average misfits* < 10% dan *Maximum Misfits* < 30% , di mana angka ini didasarkan pendekatan terhadap peraturan seperti ASCE 7, FEMA 365, maupun SNI 17266:2019 yang tidak diatur secara eksplisit melainkan nilai *average misfit* (10%) dianggap sebagai batasan untuk memastikan bahwa respons spektra tercocokkan sudah cukup mendekati dengan respon spektra target secara menyeluruh, sedangkan *maximum misfits* (30%) Mengizinkan deviasi yang lebih besar pada titik-titik tertentu (30%) sehingga dapat memberikan fleksibilitas untuk mengakomodasi variabilitas lokal atau ketidakpastian dalam data tanpa mempengaruhi keseluruhan performa seismik secara signifikan.

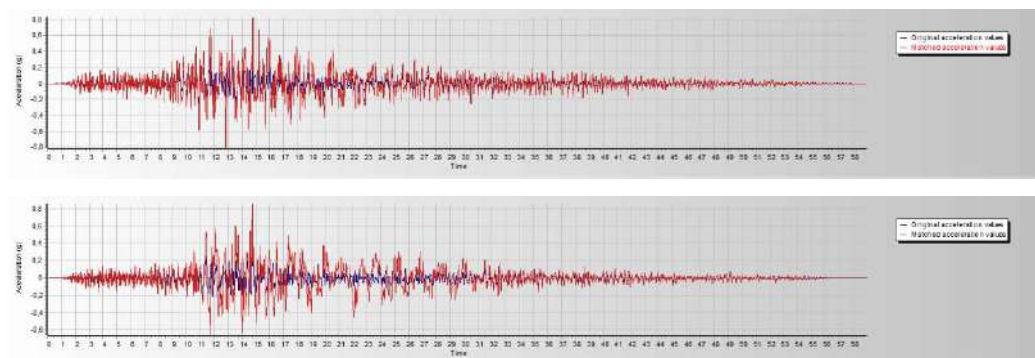
Untuk detail dari masing-masing *time series* RSN dapat dilihat pada grafik-grafik berikut dengan keterangan *original Time History* (biru), dan *matched Time History* (merah). Dengan grafik atas merupakan arah horizontal X dan grafik bawah merupakan arah horizontal Y.



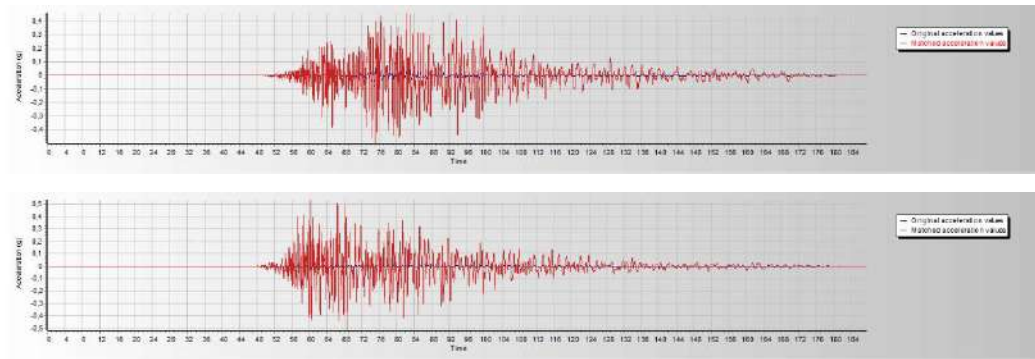
Gambar 5.52 Time History Japan-Iwate Ichinohe-4003085 arah X↑ & Y↓



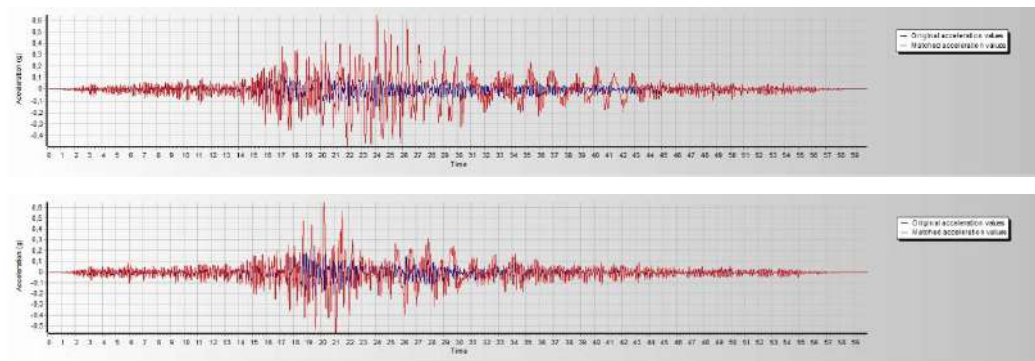
Gambar 5.53 Time History Japan-Kise Totsukawa-4024099 arah X↑ & Y↓



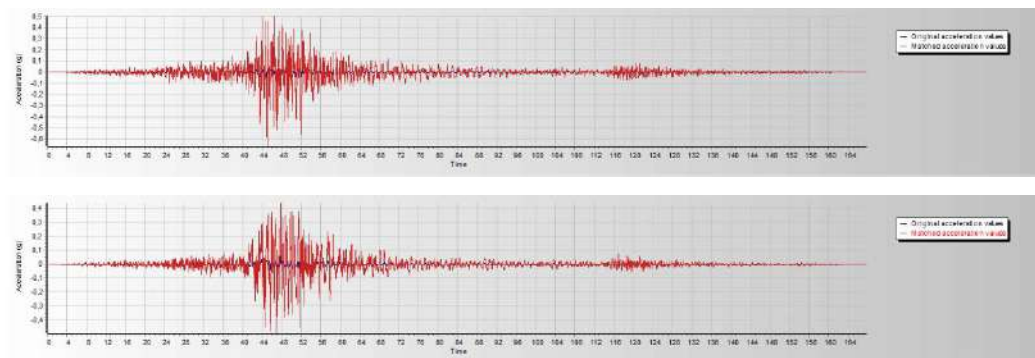
Gambar 5.54 Time History Japan-Kushiro Tokachi-4032629 arah X↑ & Y↓



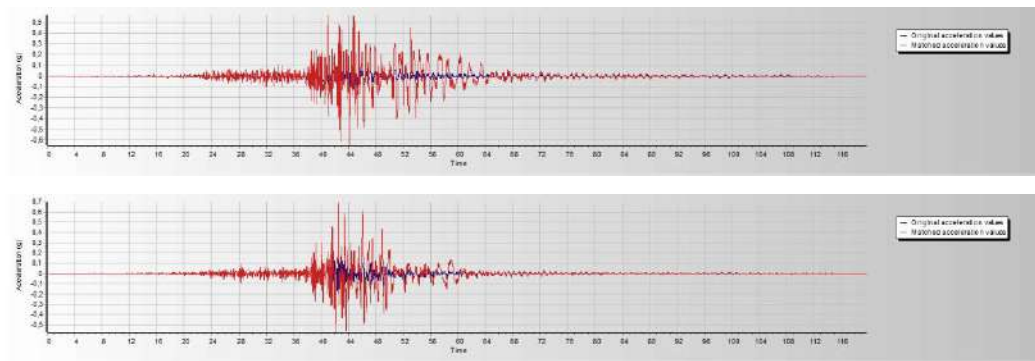
Gambar 5.55 Time History Cen.America & Mexico-105ACLS arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



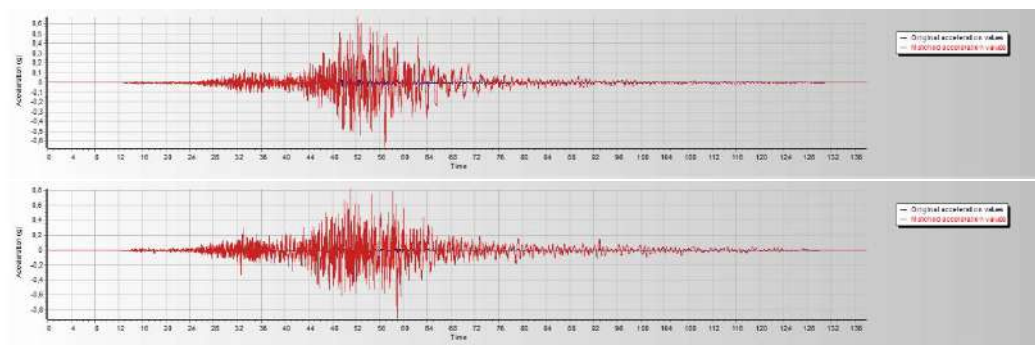
Gambar 5.56 Time History Japan-Miyagi Miyako-4032594 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



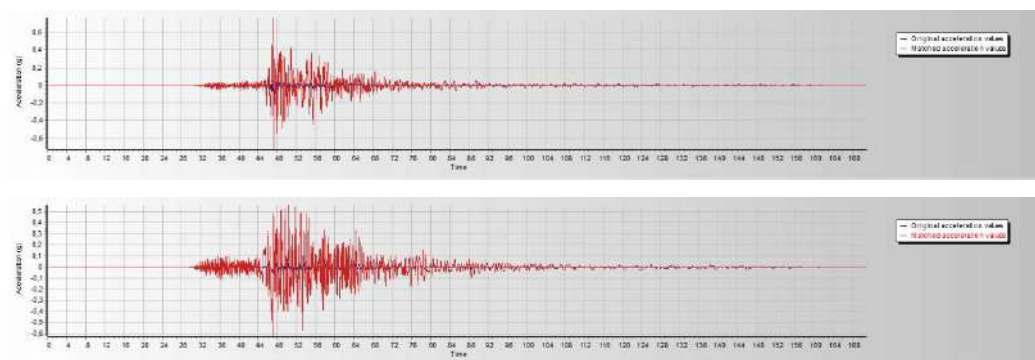
Gambar 5.57 Time History Japan-Iwate Ishidoriya-4012452 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



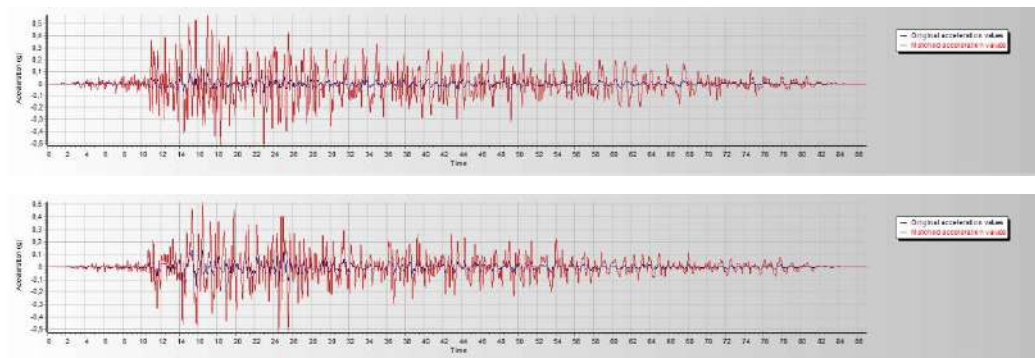
Gambar 5.58 Time History Japan-Iwate Nishine-4012458 arah X↑ & Y↓



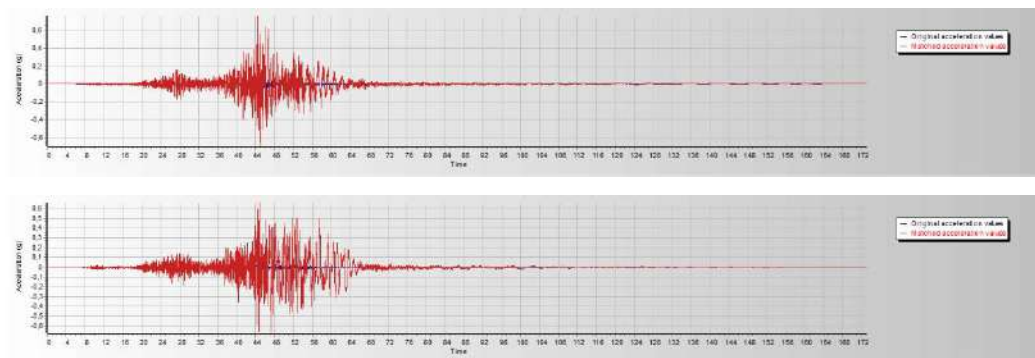
Gambar 5.59 Time History Japan-Kise Tanabe-4029971 arah X↑ & Y↓



Gambar 5.60 Time History Cen.America & Mexico-143-3295 arah X↑ & Y↓

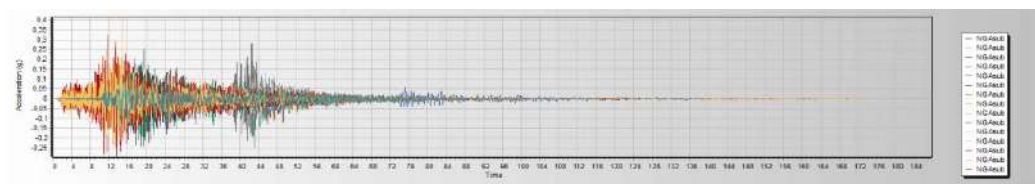


Gambar 5.61 Time History Japan-Nemur Kushiroo-4032761 arah X↑ & Y↓

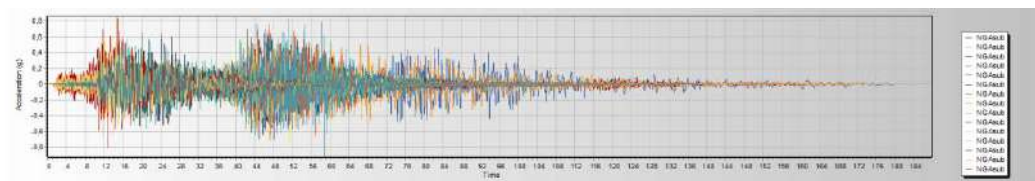


Gambar 5.62 Time History Japan-Kise Kamitonda-4024220 arah X↑ & Y↓

Dari kurva yang telah dilampirkan di atas, dapat diambil visualisasi dari ke 11 pasang RSN yang disajikan dalam satu bentuk kolase sebagai berikut.



Gambar 5.63 Original Time History Sumber Gempa Benioff

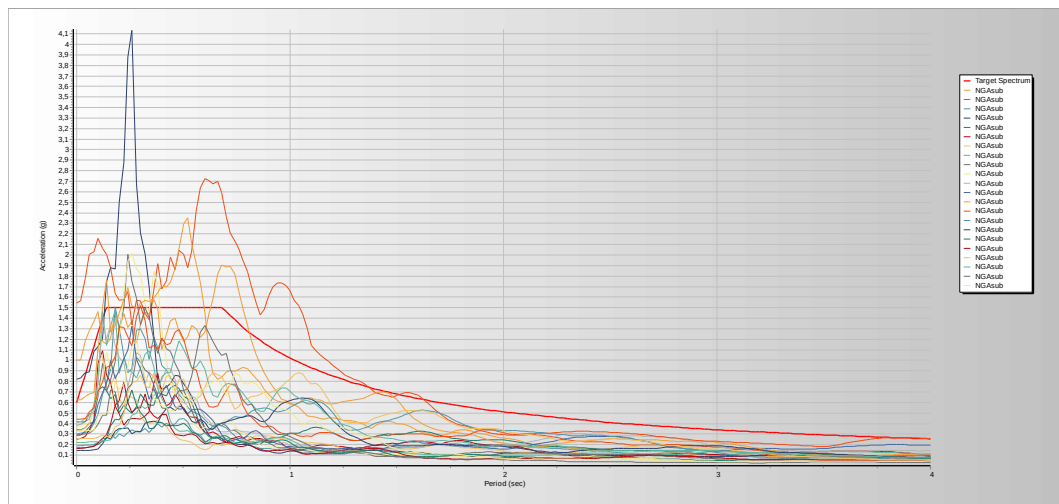


Gambar 5.64 Matched Time History Sumber Gempa Benioff

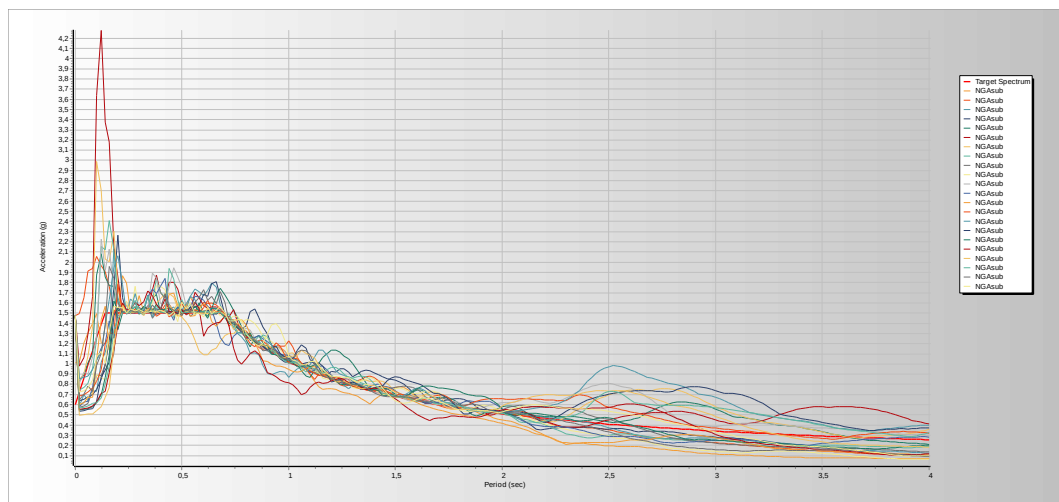
5.5.3 Pencocokan Spektral Sumber Gempa *Megathrust*

Proses *matching* untuk sumber gempa *Megathrust* dilakukan dengan menginput 11 pasang data RSN *Megathrust* yang telah dipilih seperti yang terdapat pada tabel 5.4 ke aplikasi *SeismoMatch* seperti yang telah dijelaskan di subbab sebelumnya. Setelah proses *matching* untuk 11 pasang data gempa *Megathrust* selesai, didapatkan hasil berupa kurva *accelerogram* untuk masing-masing RSN yang telah tercocokkan (*Time Series matched accelerogram*), kurva spektra masing-masing RSN yang telah tercocokkan (*Response Spectra matched accelerogram*), serta kurva spektra rata-rata tercocokkan (*Mean matched spectrum*).

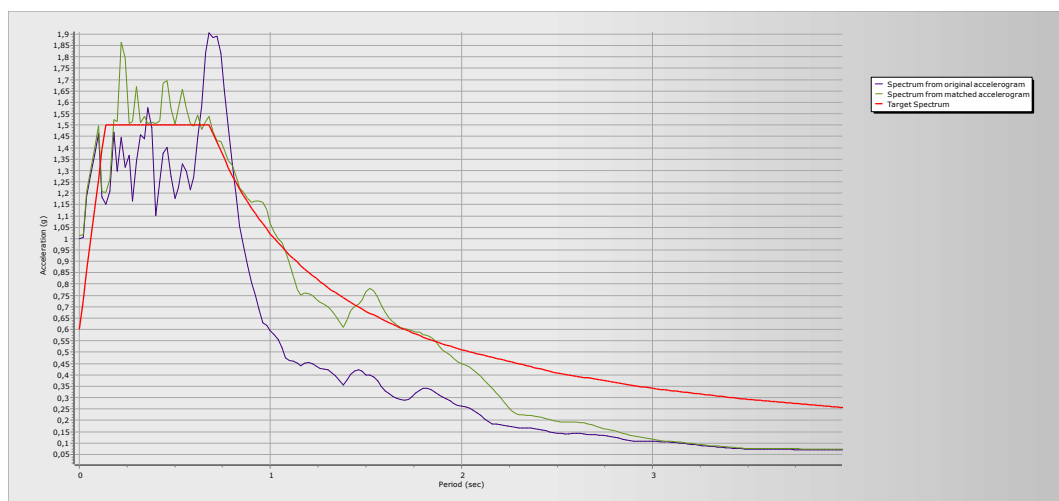
Selain hasil visual berupa kurva percepatan-periode, nilai dari spektra juga disajikan dengan bentuk tabel yang telah selesai memberikan perhitungan nilai untuk S_a yang telah tercocokkan yang dapat dilihat pada Lampiran 7. Kurva dari hasil pencocokan sumber gempa *Megathrust* dapat dilihat pada gambar-gambar berikut.



Gambar 5.65 Original Accelerogram Spectra untuk Gempa *Megathrust*



Gambar 5.66 Matched Accelerogram Spectra untuk Gempa Megathrust



Gambar 5.67 Perbandingan Antara Spektra Gempa Asli Dengan Spektra Gempa Tercocokan untuk Sumber Gempa Megathrust Japan-Tohoku RSN 4001064

Pada gambar 5.65 merupakan komparasi antara masing-masing *original* RSN terhadap spektra target, gambar 5.66 menampilkan komparasi antara masing-masing *matched* RSN terhadap spektra target, dan 5.67 menampilkan detail dari satu RSN yaitu dengan grafik biru mewakili spektra *original*, dan hijau mewakili *matched spektra* terhadap spektra target merah. Dengan grafik atas merupakan arah horizontal X dan grafik bawah merupakan arah horizontal Y.



Gambar 5.68 Perbandingan Antara Spektra Target Dengan Spektra Gempa Tercocokan Rata-Rata (*Mean Matched Spectra*) Sumber Gempa *Megathrust*

Hasil dari proses *matching* sumber gempa *Megathrust* menunjukkan bahwa spektrum rata-rata gerak tanah termodifikasi memiliki kecocokan yang baik terhadap 110% target spektrum. Dari gambar 5.68 dapat dilihat apabila kurva dari spektra gempa tercocokan rata-rata (biru) sudah mendekati dengan kurva spektra target (merah) dengan nilai error (*misfits*) senilai *Average misfit* = 3,45124% dan *Maximum misfit* = 6,44029% yang telah sesuai dengan peraturan untuk *Average misfits* < 10%, dan *Maximum misfits* < 30% dan nilai maksimum S_a = 1,59660 g. Hasil untuk nilai S_a masing-masing interval periode dari spektra gempa tercocokan rata-rata dapat dilihat pada Lampiran 7.

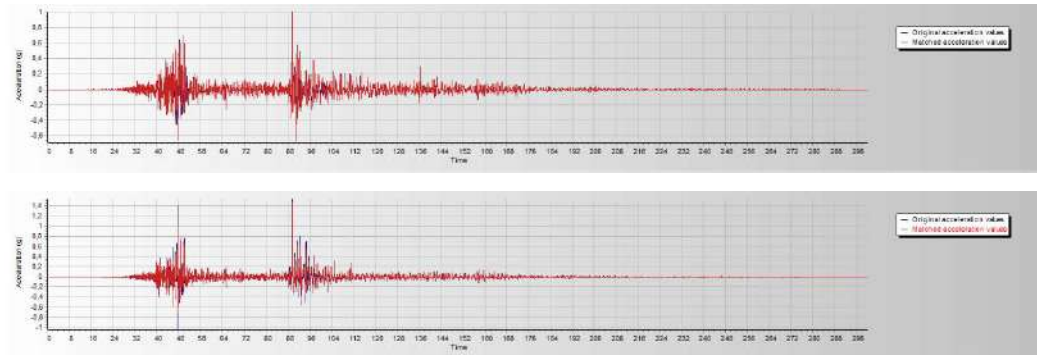
Dari proses *matching* tersebut, pada menu *matched spectrum* dapat diketahui nilai kecocokan dari masing-masing data atau *time series* terhadap respons spektrum target dengan pendekatan error berupa rata-rata ketidakcocokan (*average misfits*) serta nilai ketidakcocokan terbesar (*maximum misfit*) untuk sumber gempa *Megathrust* yang dapat dilihat pada tabel 5.9 berikut.

Tabel 5.9 Nilai Kecocokan Tiap RSN *Megathrust* Terhadap Spektra Target

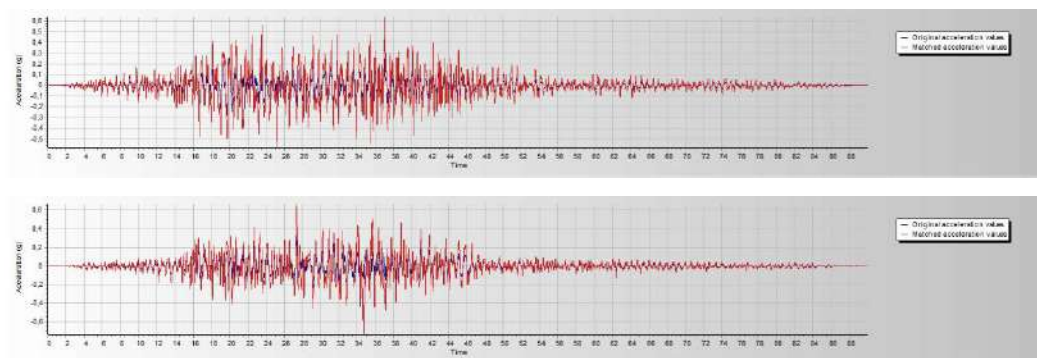
No	RSN	Event	Tahun	M	R (Km)	Average Misfits	Maximum Misfits
1	4001064	Tohoku-Sendai	2011	9,12	78,116	3,677%	12,475%
2	6001806	CSCH	2010	8,81	96,804	4,358%	16,176%
3	4028587	<u>Tokachi-Mitsuishi</u>	2003	8,29	67,705	4,534%	14,359%
4	4022911	Tokachi-Tsurui	2003	8,29	77,410	4,561%	13,745%
5	4032568	Tokachi-42113	2003	8,29	79,646	3,703%	17,275%
6	4022908	Tokachi-Shibe N	2003	8,29	95,587	5,869%	19,277%
7	4022909	Tokachi-Shibe S	2003	8,29	84,967	5,572%	19,183%
8	4022992	Tokachi-Honbetsu	2003	8,29	75,523	4,540%	15,627%
9	4028572	Tokachi-Ikeda	2003	8,29	70,983	2,349%	7,394%
10	4028558	Tokachi-Tohro	2003	8,29	74,386	5,201%	21,056%
11	4028585	Tokachi-Shizunai	2003	8,29	79,196	6,816%	24,889%

Dari tabel 5.9 di atas, dari ke-11 pasang data gempa telah memenuhi syarat yaitu untuk *average misfits* < 10% dan *Maximum Misfits* < 30% , di mana angka ini didasarkan pendekatan terhadap peraturan seperti ASCE 7, FEMA 365, maupun SNI 17266:2019 yang tidak diatur secara eksplisit melainkan nilai *average misfit* (10%) dianggap sebagai batasan untuk memastikan bahwa respons spektra tercocokkan sudah cukup mendekati dengan respon spektra target secara menyeluruh, sedangkan *maximum misfits* (30%) Mengizinkan deviasi yang lebih besar pada titik-titik tertentu (30%) sehingga dapat memberikan fleksibilitas untuk mengakomodasi variabilitas lokal atau ketidakpastian dalam data tanpa mempengaruhi keseluruhan performa seismik secara signifikan.

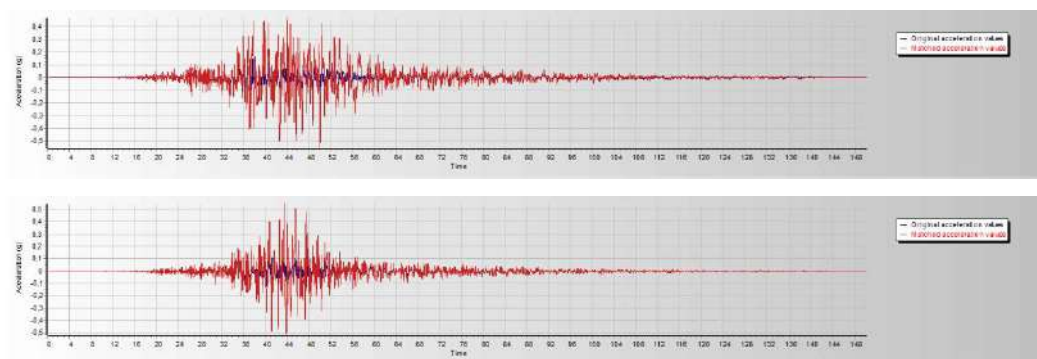
Untuk detail dari masing-masing *time series* RSN dapat dilihat pada grafik-grafik berikut dengan keterangan *original Time History* (biru), dan *matched Time History* (merah). Dengan grafik atas merupakan arah horizontal X dan grafik bawah merupakan arah horizontal Y.



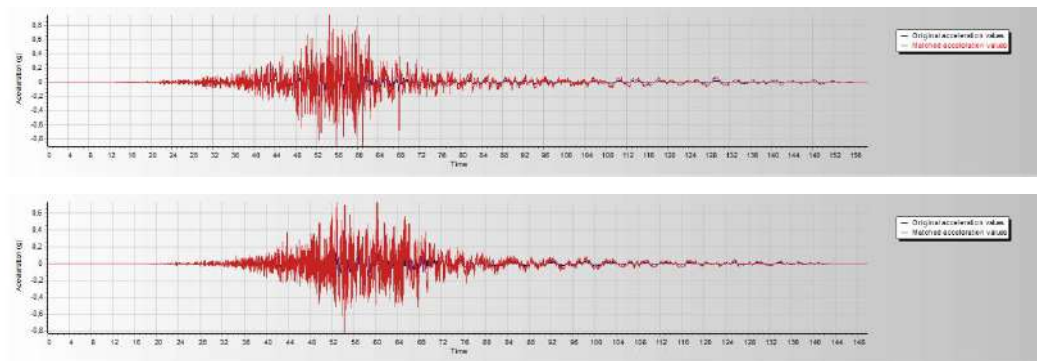
Gambar 5.69 Time History Japan-Tohoku Sendai-4001064 arah X $\uparrow$ & Y $\downarrow$



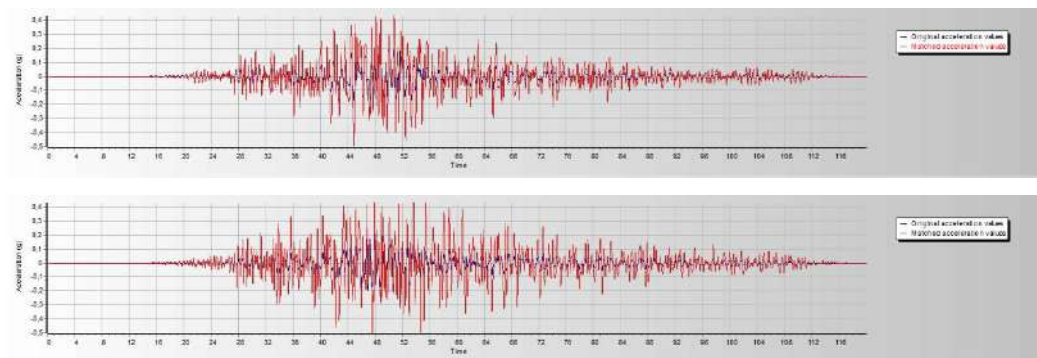
Gambar 5.70 Time History S.America-CSCH-6001806 arah X $\uparrow$ & Y $\downarrow$



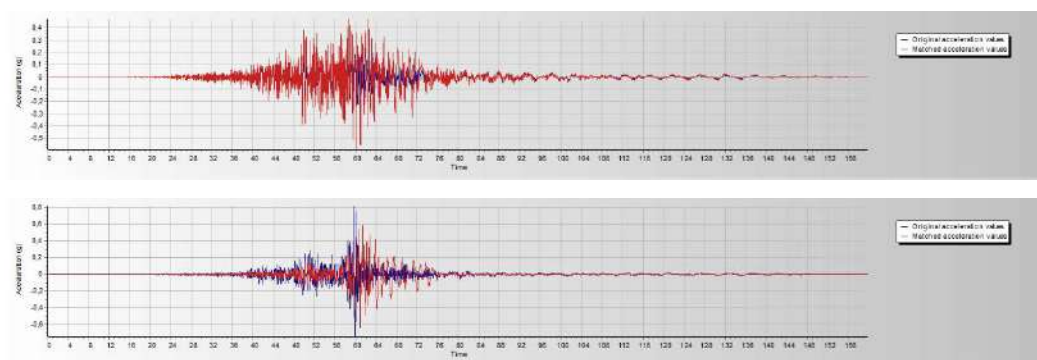
Gambar 5.71 Time History Japan-Tokachi Mitsubishi-4028587 arah X $\uparrow$ & Y $\downarrow$



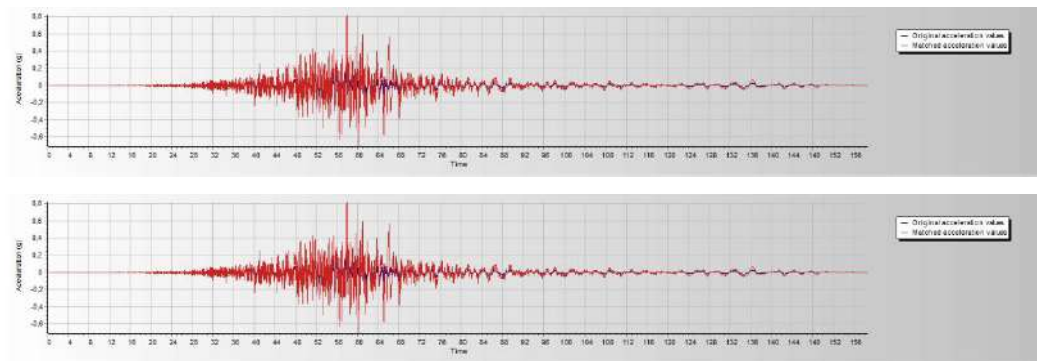
Gambar 5.72 Time History Japan-Tokachi Tsurui-4022911 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



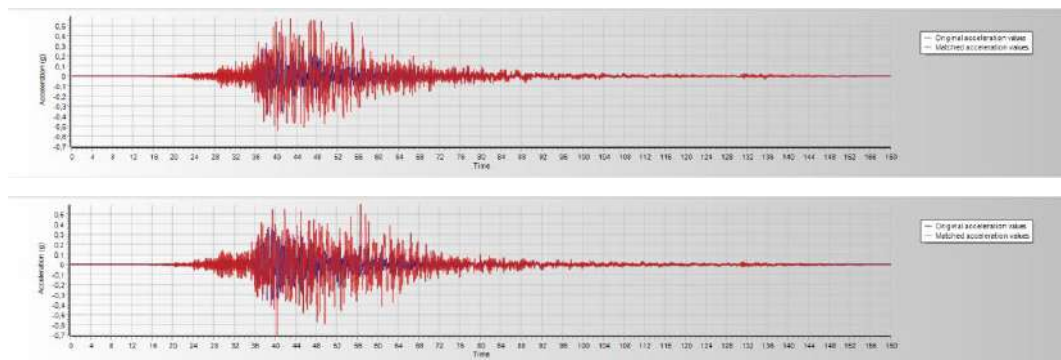
Gambar 5.73 Time History Japan-Tokachi 42113 4032568 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



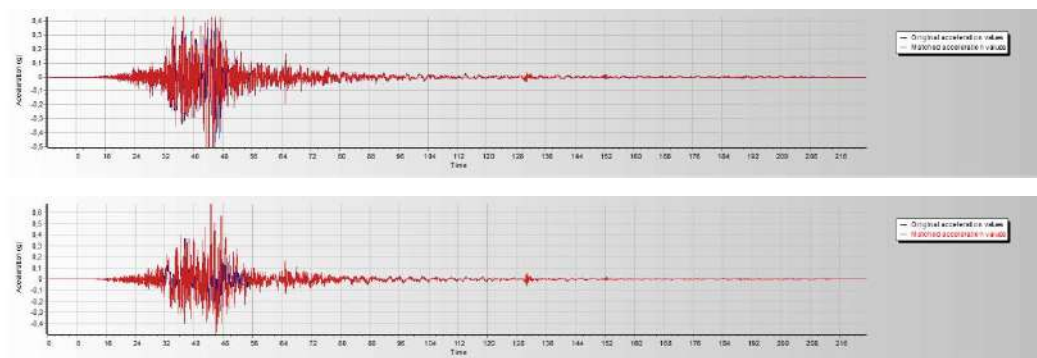
Gambar 5.74 Time History Japan-Shibe North-4022908 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



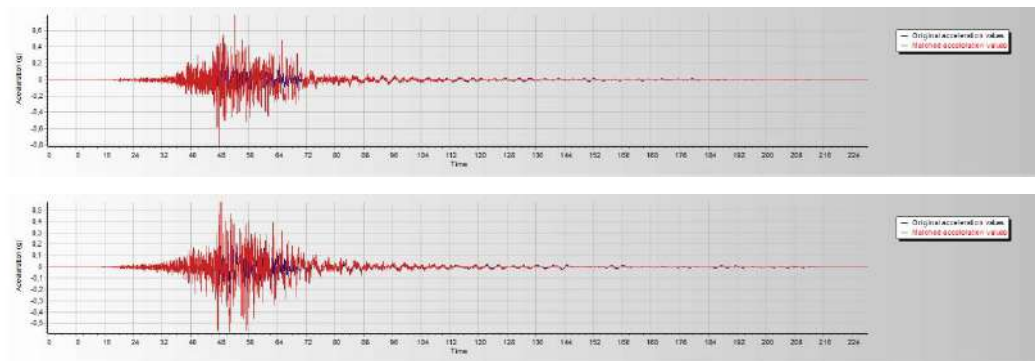
Gambar 5.75 Time History Japan-Shibe South-4022909 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



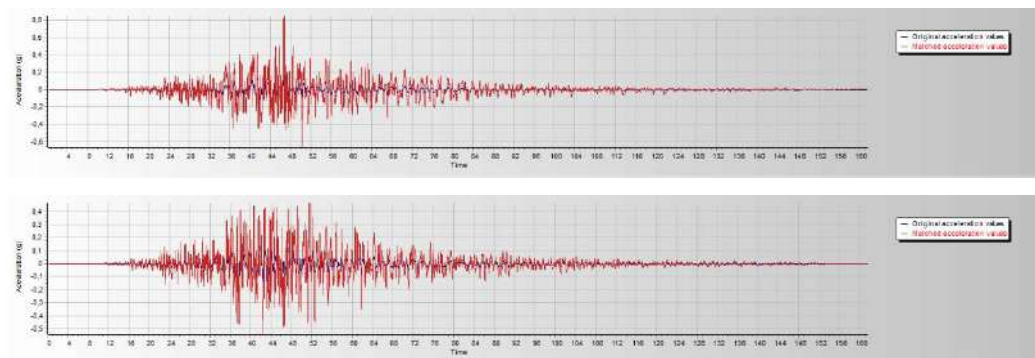
Gambar 5.76 Time History Japan-Tokachi Honbetsu-4022992 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



Gambar 5.77 Time History Japan-Tokachi Ikeda-4028572 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$

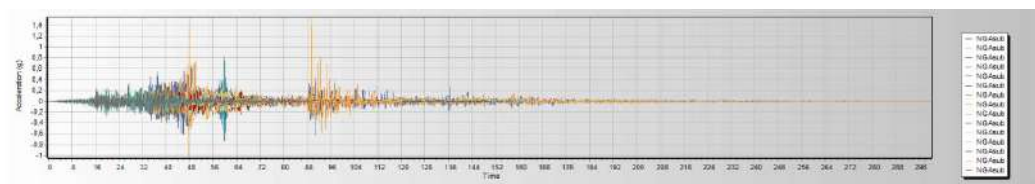


Gambar 5.78 Time History Japan-Tokachi Tohro-4028558 arah X $\uparrow$ & Y $\downarrow$

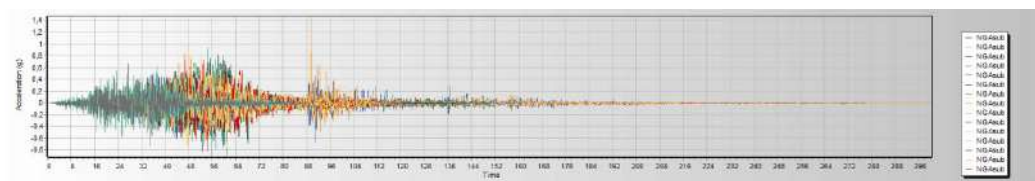


Gambar 5.79 Time History Japan-Tokachi Shizunai-4028585 arah X $\uparrow$ & Y $\downarrow$

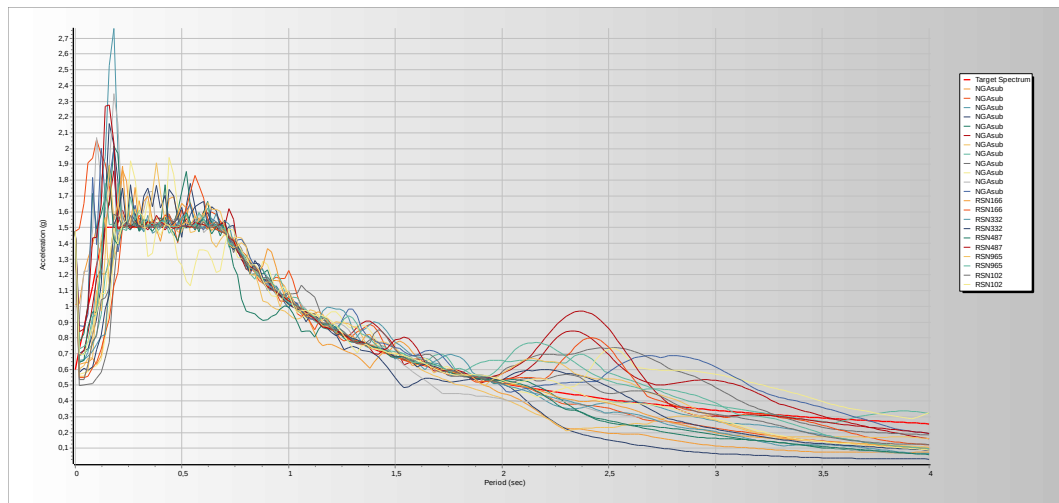
Dari kurva yang telah dilampirkan di atas, dapat diambil visualisasi dari ke 11 pasang RSN yang disajikan dalam satu bentuk kolase sebagai berikut.



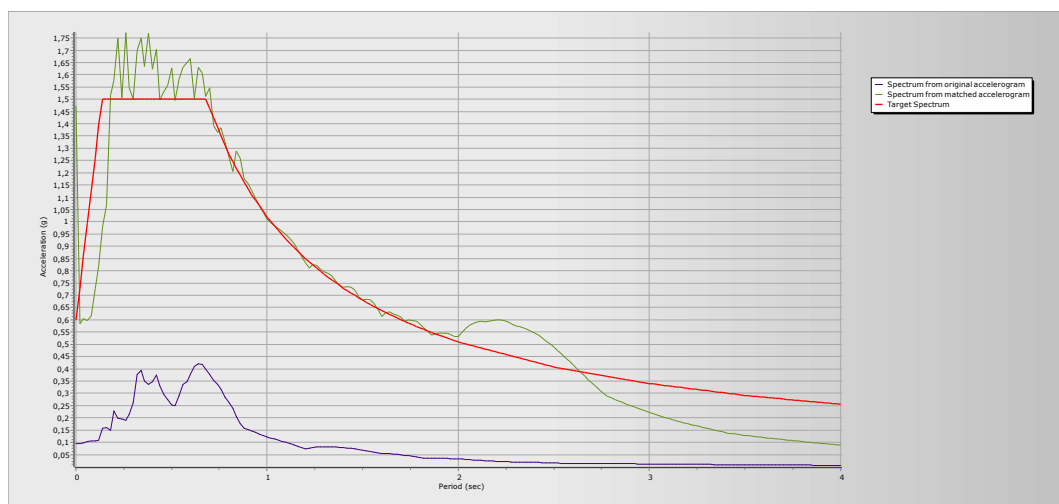
Gambar 5.80 Original Time History Sumber Gempa Megathrust



Gambar 5.81 Matched Time History Sumber Gempa Megathrust

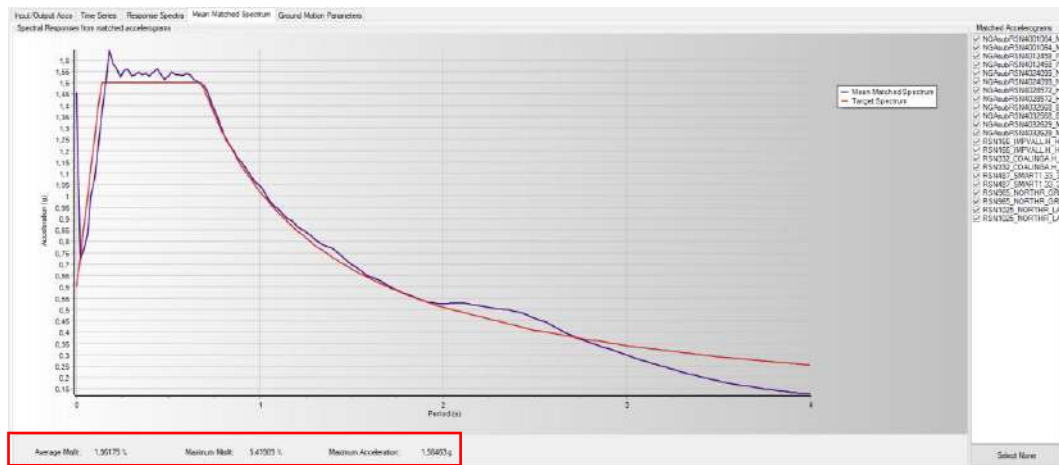


Gambar 5.83 Matched Accelerogram Spectra untuk Gempa Kombinasi



Gambar 5.84 Perbandingan Antara Spektra Gempa Asli Dengan Spektra Gempa Tercocokan untuk Sumber Gempa Coalinga 332

Pada gambar 5.82 merupakan komparasi antara masing-masing *original* RSN terhadap spektra target, gambar 5.83 menampilkan komparasi antara masing-masing *matched* RSN terhadap spektra target, dan 5.84 menampilkan detail dari satu RSN yaitu dengan grafik biru mewakili spektra *original*, dan hijau mewakili *matched spektra* terhadap spektra target merah.



Gambar 5.85 Perbandingan Antara Spektra Target Dengan Spektra Gempa Tercocokan Rata-Rata (*Mean Matched Spectra*) Sumber Gempa Kombinasi

Hasil dari proses *matching* sumber gempa *Kombinasi* menunjukkan bahwa spektrum rata-rata gerak tanah termodifikasi memiliki kecocokan yang baik terhadap 110% target spektrum sesuai dalam SNI 1726:2019 pasal 11.2.3.3. . Dari gambar 5.85 dapat dilihat apabila kurva dari spektra gempa tercocokan rata-rata (biru) sudah mendekati dengan kurva spektra target (merah) dengan nilai error (*misfits*) senilai *Average misfit* = 1,96175% dan *Maximum misfit* = 5,41909% yang telah sesuai dengan peraturan untuk *Average misfits* < 10%, dan *Maximum misfits* < 30% dan nilai maksimum $S_a = 1,56463$ g. Hasil untuk nilai S_a dari spektra gempa tercocokan rata-rata dapat dilihat pada Lampiran 10.

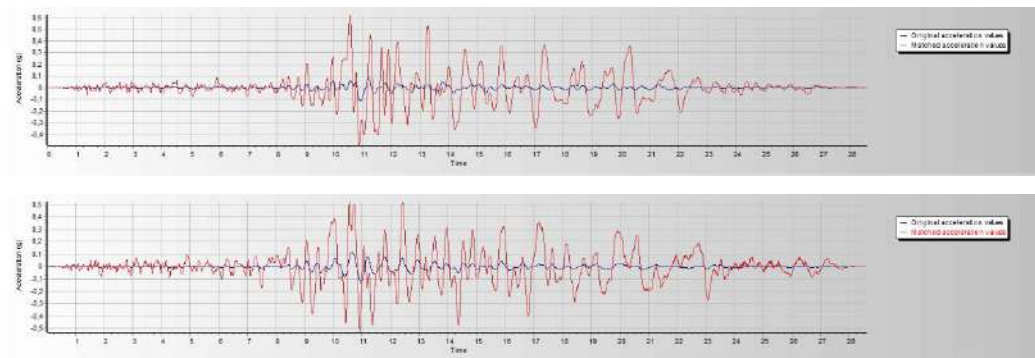
Dari proses *matching* tersebut, pada menu *matched spectrum* dapat diketahui nilai kecocokan dari masing-masing data atau *time series* terhadap respons spektrum target dengan pendekatan error berupa rata-rata ketidakcocokan (*average misfits*) serta nilai ketidakcocokan terbesar (*maximum misfit*) untuk sumber gempa *Kombinasi* yang dapat dilihat pada tabel 5.10 berikut.

Tabel 5.10 Nilai Kecocokan Tiap RSN Kombinasi Terhadap Spektra Target

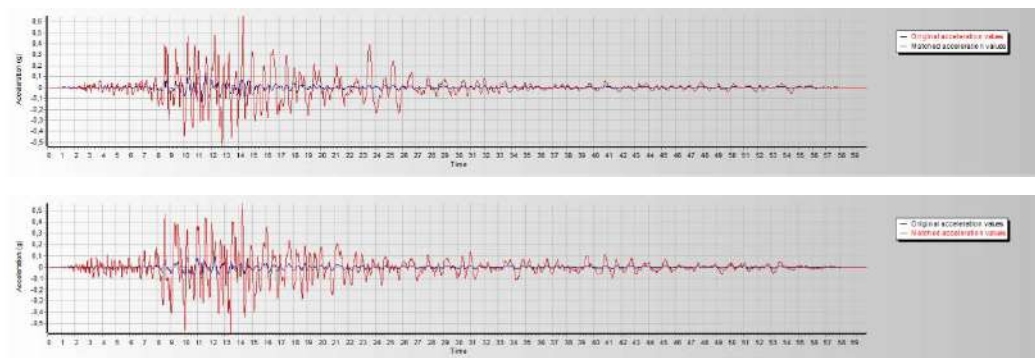
No	RSN	Event	Tahun	M	R (Km)	Average Misfits	Maximum Misfits
1	166	Imperial Valley 6	1979	6,53	50,100	2,607%	13,129%
2	332	Coalinga 1	1983	6,36	50,200	3,618%	11,523%
3	487	SMART1I01	1985	5,8	41,740	3,303%	12,170%
4	965	Northridge 01	1994	6,69	57,510	3,569%	14,940%
5	1025	Northridge 01	1994	6,69	52,120	3,603%	16,573%
6	4003085	Iwate-Ichinohe	2011	7,4	110,672	4,246%	17,698%
7	4024099	Kise-Totsukawa	2004	7,41	102,051	2,676%	13,700%
8	4012458	Iwate-Nishine	2011	7,4	117,740	2,798%	10,009%
9	4001064	Tohoku-Sendai	2011	9,12	78,116	3,677%	12,475%
10	4032568	Tokachi-42113	2003	8,29	79,646	3,703%	17,275%
11	4028572	Tokachi-Ikeda	2003	8,29	70,983	2,349%	7,394%

Dari tabel 5.10 di atas, dari ke-11 pasang data gempa telah memenuhi syarat yaitu untuk *average misfits* < 10% dan *Maximum Misfits* < 30% , di mana angka ini didasarkan pendekatan terhadap peraturan seperti ASCE 7, FEMA 365, maupun SNI 17266:2019 yang tidak diatur secara eksplisit melainkan nilai *average misfit* (10%) dianggap sebagai batasan untuk memastikan bahwa respons spektra tercocokkan sudah cukup mendekati dengan respon spektra target secara menyeluruh, sedangkan *maximum misfits* (30%) Mengizinkan deviasi yang lebih besar pada titik-titik tertentu (30%) sehingga dapat memberikan fleksibilitas untuk mengakomodasi variabilitas lokal atau ketidakpastian dalam data tanpa mempengaruhi keseluruhan performa seismik secara signifikan.

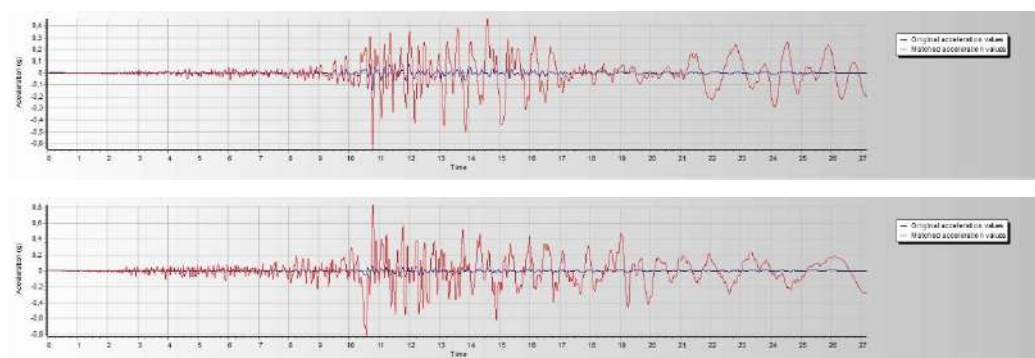
Untuk detail dari masing-masing *time series* RSN dapat dilihat pada grafik-grafik berikut dengan keterangan *original Time History* (biru), dan *matched Time History* (merah). Dengan grafik atas merupakan arah horizontal X dan grafik bawah merupakan arah horizontal Y.



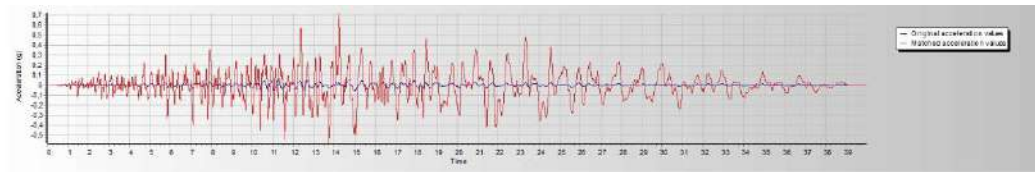
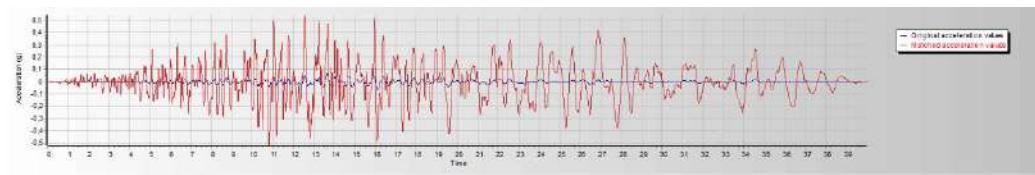
Gambar 5.86 Time History USA-Imp.Valley Coachella-166 arah X $\uparrow$ & Y $\downarrow$



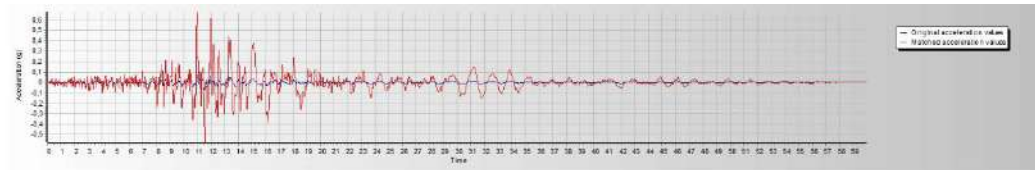
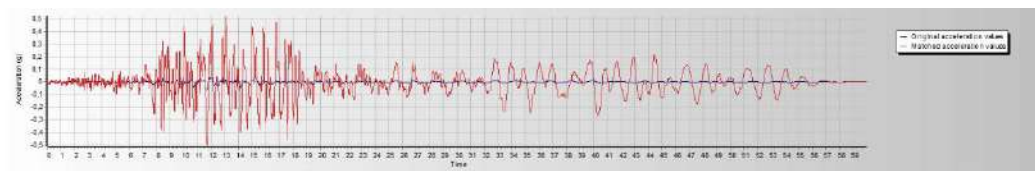
Gambar 5.87 Time History USA-Coalinga Parkfield-332 arah X $\uparrow$ & Y $\downarrow$



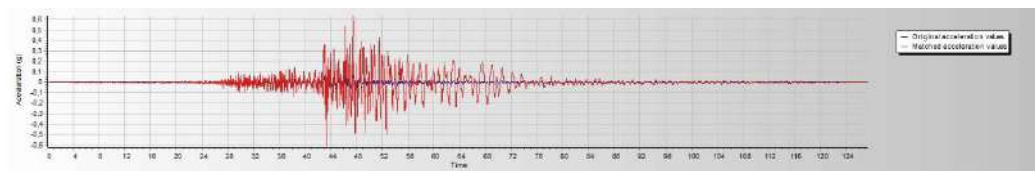
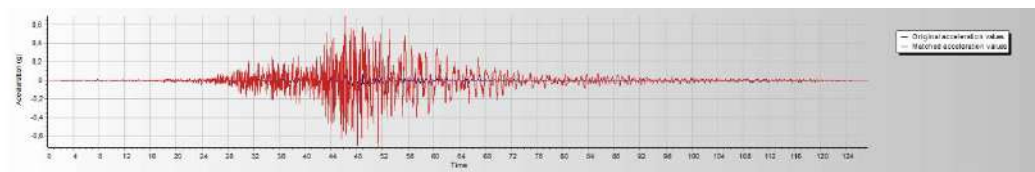
Gambar 5.88 Time History Taiwan-SMART1I01-487 arah X $\uparrow$ & Y $\downarrow$



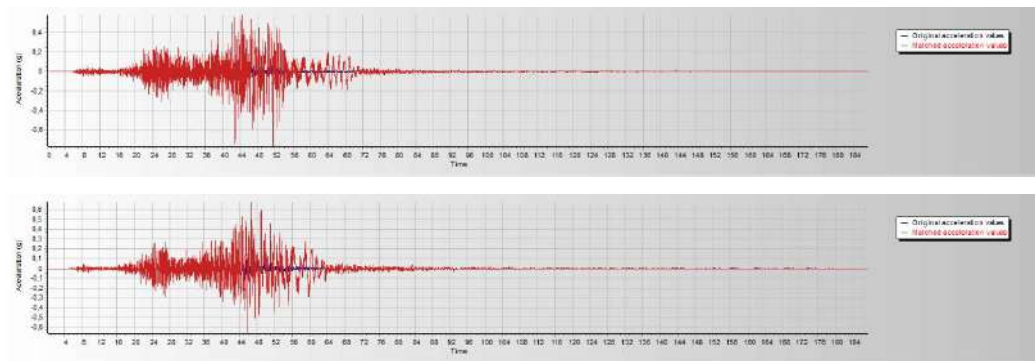
Gambar 5.89 Time History USA-Northridge Covina-965 arah X↑ & Y↓



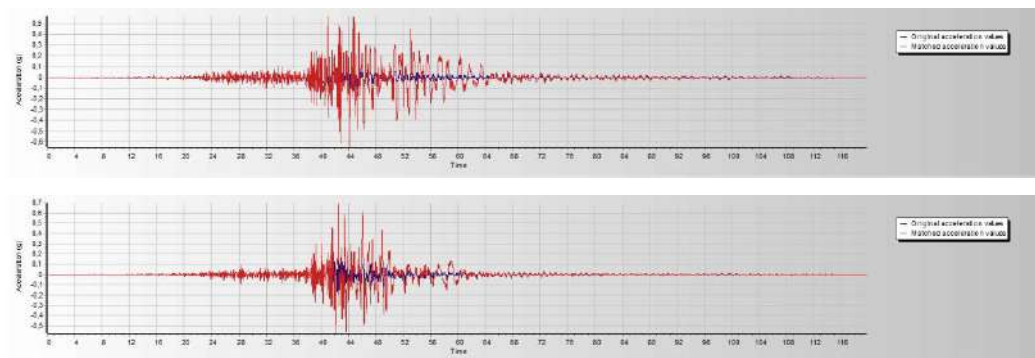
Gambar 5.90 Time History USA-Northridge Lancaster-1025 arah X↑ & Y↓



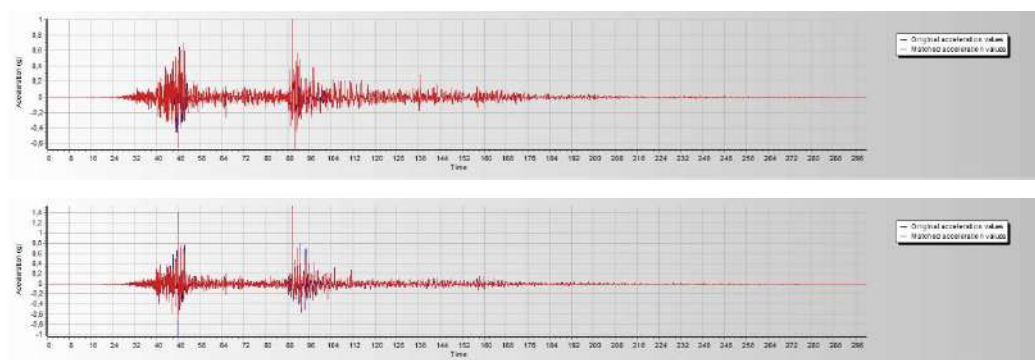
Gambar 5.91 Time History Japan-Iwate Ichinoha-4003085 arah X↑ & Y↓



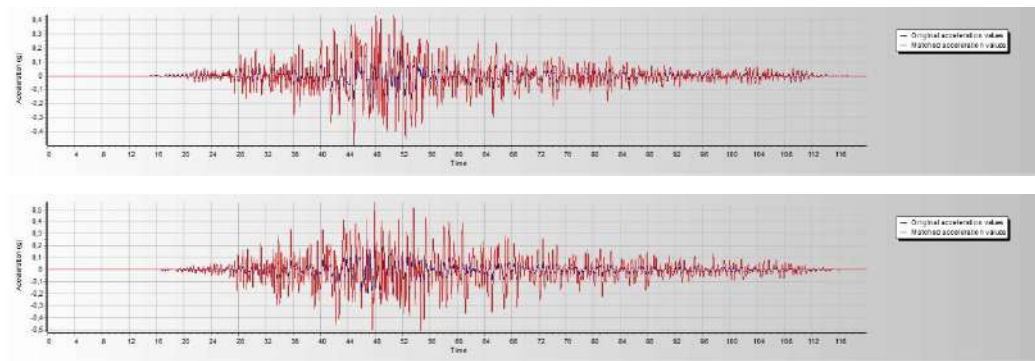
Gambar 5.92 Time History Japan-Kise Totsukawa-4024099 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



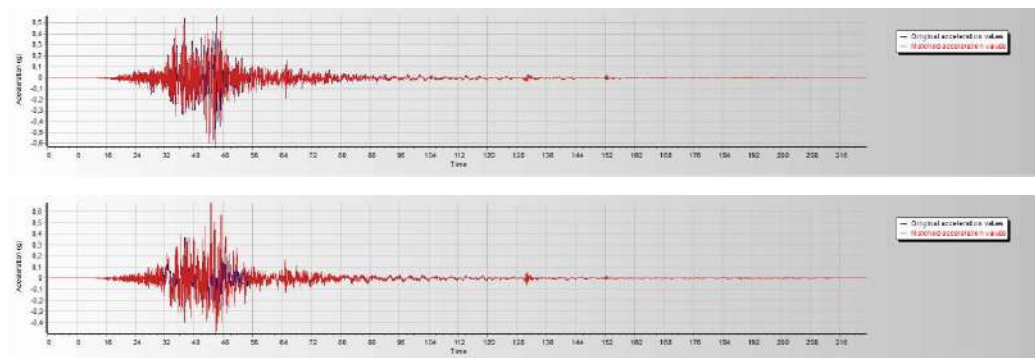
Gambar 5.93 Time History Japan-Iwate Nishine-4012458 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$



Gambar 5.94 Time History Japan-Tohoku Sendai-4001064 arah $X\uparrow$ & $Y\downarrow$

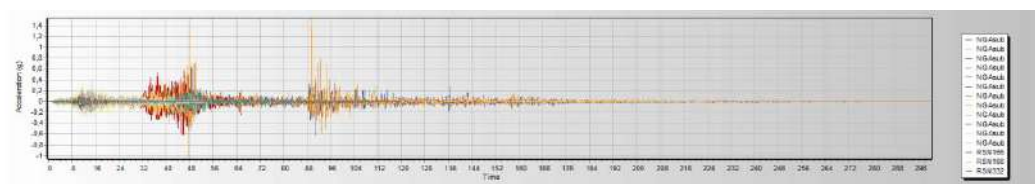


Gambar 5.95 Time History Japan-Tokachi-4032568 arah X↑ & Y↓

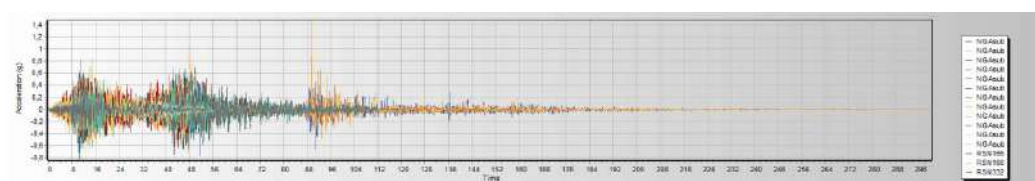


Gambar 5.97 Time History Japan-Tokachi Ikeda-4028572 arah X↑ & Y↓

Dari kurva yang telah dilampirkan di atas, dapat diambil visualisasi dari ke 11 pasang RSN yang disajikan dalam satu bentuk kolase sebagai berikut.



Gambar 5.97 Original Time History Sumber Gempa Kombinasi

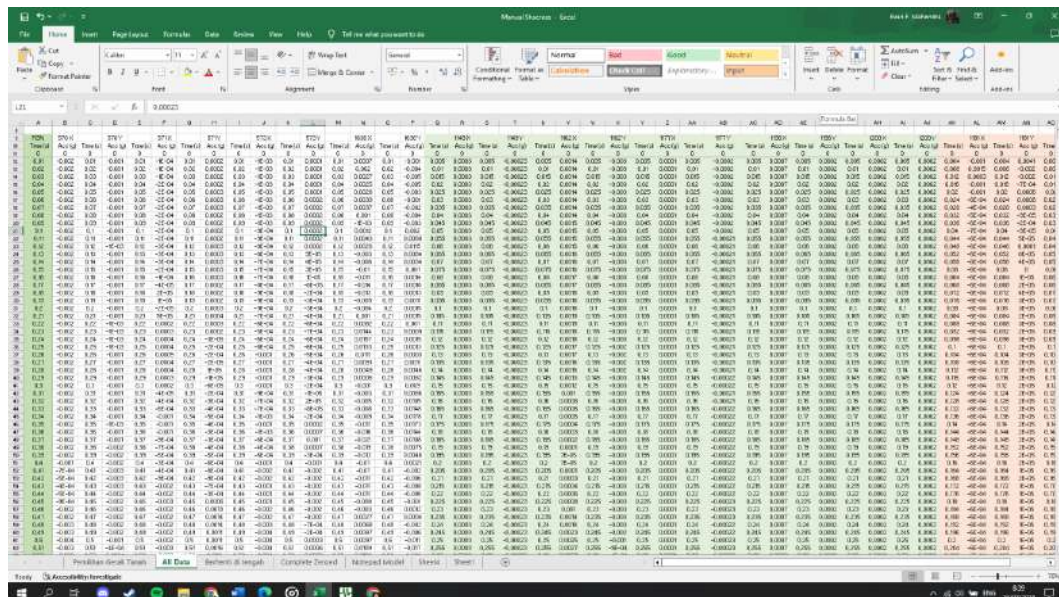


Gambar 5.98 Matched Time History Sumber Gempa Kombinasi

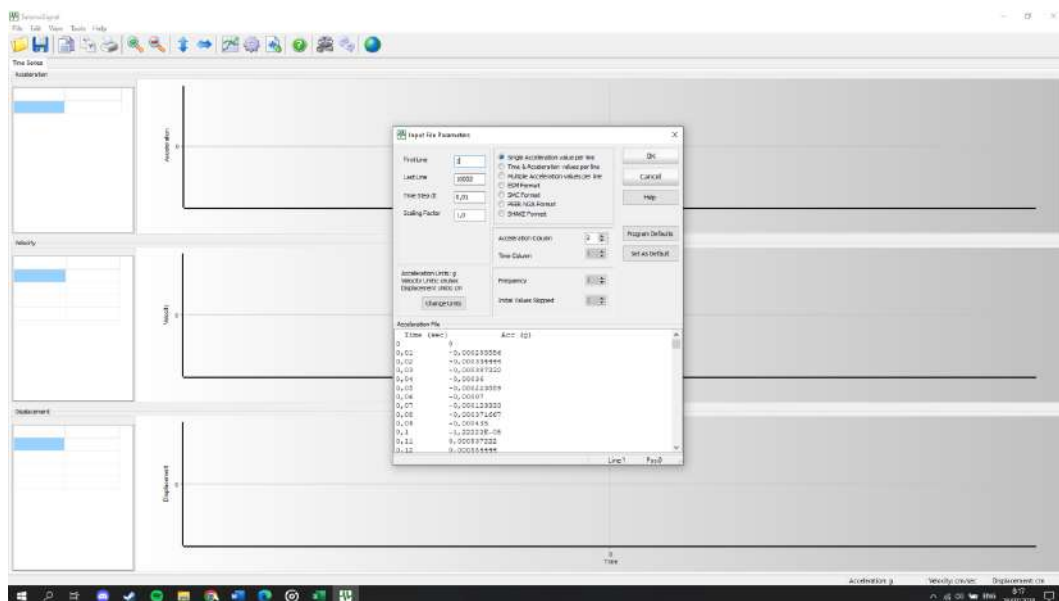
5.6 *Artificial Ground Motion Design*

Setelah proses pencocokan spektra selesai dan didapatkan data spektra gempa tercocokkan masing-masing RSN (*Respon Spectra Number*). Keterbatasan program *SeismoMatch* tidak memperhitungkan *time series* dari rata-rata gempa tercocokkan (*mean matched time series*) melainkan hanya memperhitungkan rata-rata spektrum respons tercocokkan (*mean matched spectra*), oleh karena itu diperlukan perhitungan manual untuk mendapatkan nilai *time series* rata-rata gempa tercocokkan yang selanjutnya data tersebut dapat digunakan untuk membuat kurva *Time History accelerogram* dengan menggunakan program *SeismoSignal* 2024. Gerak tanah (*ground motion*) merupakan data percepatan riwayat waktu (*Time History acceleration*) di batuan dasar yang merupakan bagian dari data gempa yang diperlukan untuk menganalisis perambatan gelombang geser seismik pada lapisan tanah. Data yang digambarkan dari hasil analisis ini berupa gambaran spesifik mengenai kondisi geologi dan parameter kegempaan, antara lain nilai maksimum percepatan gempa, durasi, dan frekuensi.

Untuk mengkonversi data spektra tercocokkan rata-rata menjadi data riwayat waktu, hal yang dilakukan pertama yaitu dengan melakukan perhitungan menggunakan *excel* dari data *time series* masing-masing RSN tercocokkan untuk tiap sumber gempa. Data tersebut berupa *time series* untuk arah Horizontal X, dan Horizontal Y yang masing-masing terdiri dari 10.000–50.000 jumlah data dengan nilai T dan percepatannya (S_a) untuk interval periode 0,01 detik yang dapat dilihat pada gambar 5.99. Perhitungan dilakukan dengan merata-rata sejumlah data tersebut. Setelah didapatkan nilai dari rata-rata keseluruhan *time series* RSN dari sumber gempa, selanjutnya data tersebut di-*export* ke dalam notepad untuk selanjutnya dapat dibuat grafik *accelerogram*-nya dengan menginput ke program *SeismoSignal* 2024 seperti yang diperlihatkan pada gambar 5.100.



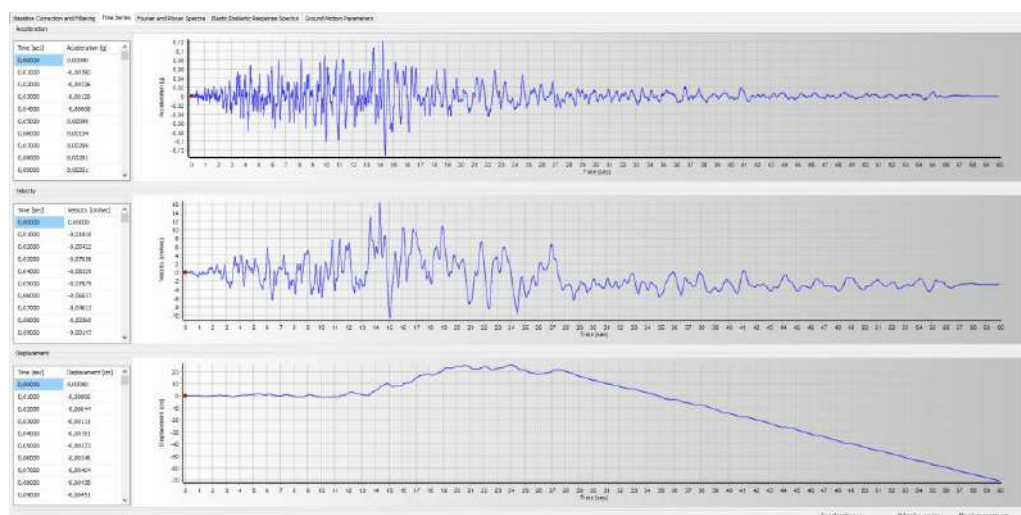
Gambar 5.99 Data Time Series Untuk Masing-Masing RSN Shallow Crustal



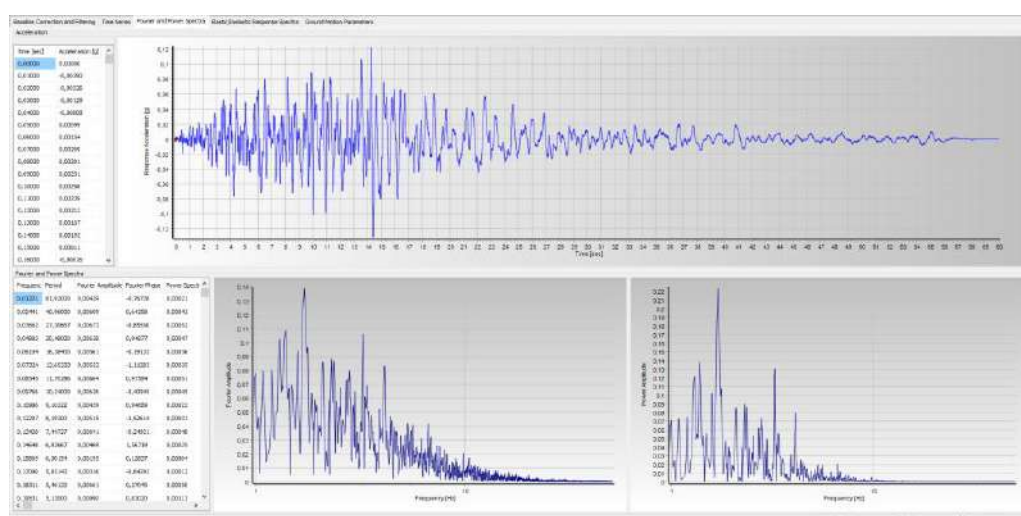
Gambar 5.100 Input Time Series Ke Aplikasi SeismoSignal

5.6.1 Shallow Crustal Artificial Ground Motion Design

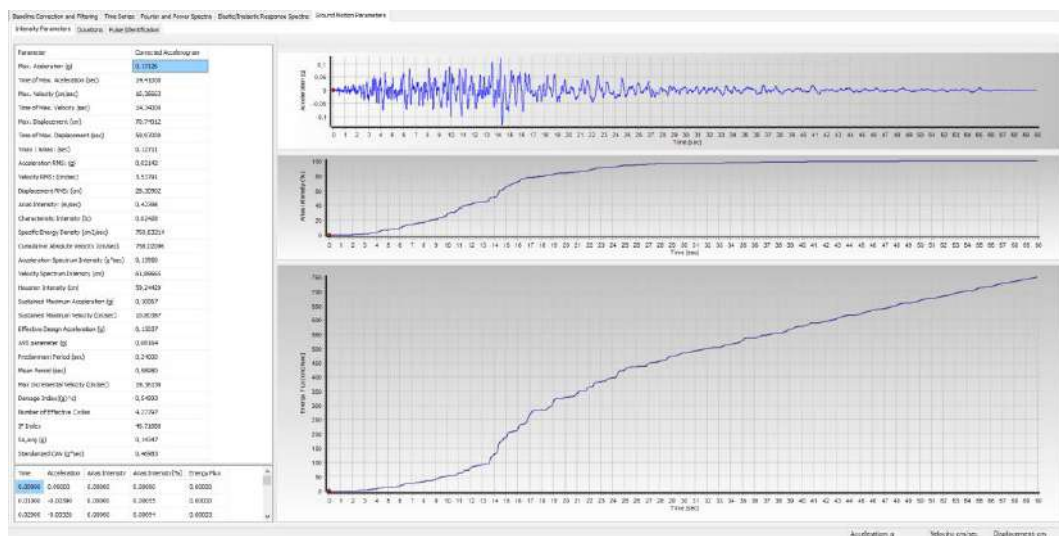
Setelah didapatkan data *time series* rata-rata dari *excel*. Dilakukan proses menginput data *time series* tercocok rata-rata ke dalam program *SeismoSignal 2024*. Hasil dari input tersebut berupa *Time History accelerograms* yang sebelumnya didapat dari pengolahan data dari *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)* yang sudah dilakukan *baseline correction* dan terfilter. *Accelerograms* untuk *time series* untuk rata-rata gempa tercocok *Shallow Crustal* serta frekuensi dari gempa tersebut dapat dilihat pada gambar 5.101 & 5.102 berikut.



Gambar 5.101 Time Series Windows Shallow Crustal



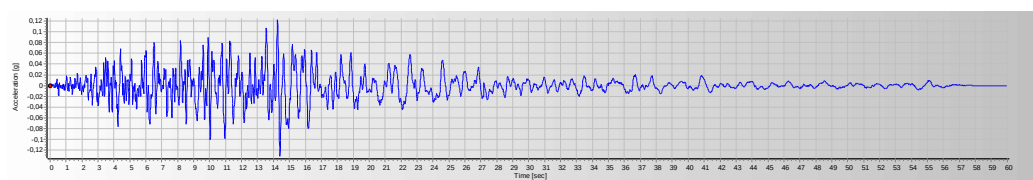
Gambar 5.102 Fourier and Power Spectra Windows Shallow Crustal



Gambar 5.103 Ground Motion Parameters Windows Shallow Crustal

Pada data sumber gempa *Shallow Crustal* data percepatan dibatasi hingga pada periode 60 detik dikarenakan setelah periode tersebut tidak lagi terdapat perubahan signifikan pada akselerogram di mana fase gempa telah mendekati 0 sehingga diasumsikan bahwa durasi gempa signifikan terjadi pada 60 detik awal gempa saja. Dari gambar 5.103 didapatkan nilai-nilai intensitas parameter yang garis besarnya didapatkan nilai *Max Acceleration* (PGA) = 0,13126 g dan *Arias Intensity* (AI) = 0,42398 m/s.

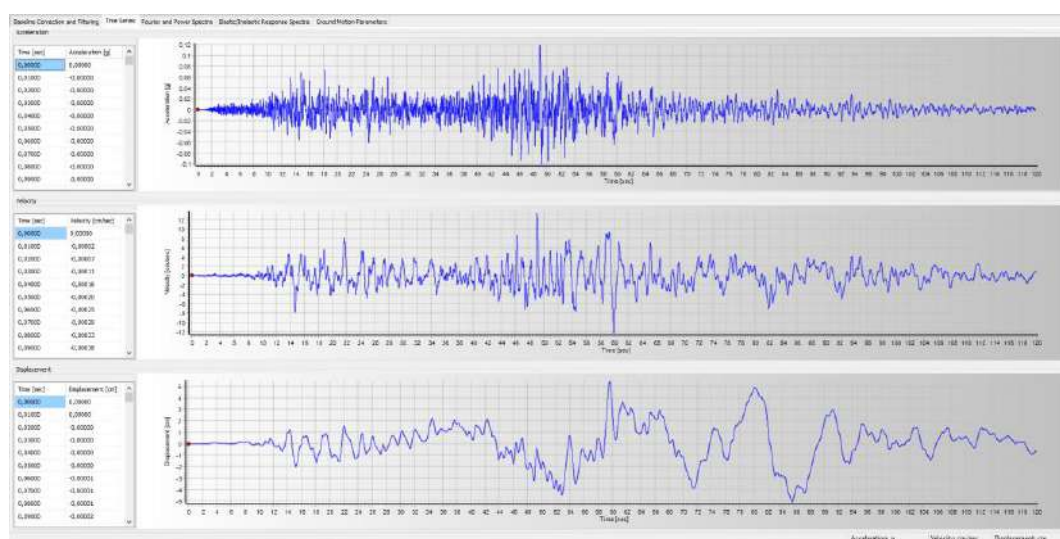
Gambaran detail mengenai *mean matched Time History accelerograms* untuk sumber gempa *Shallow Crustal* dapat dilihat pada gambar 5.104 berikut.



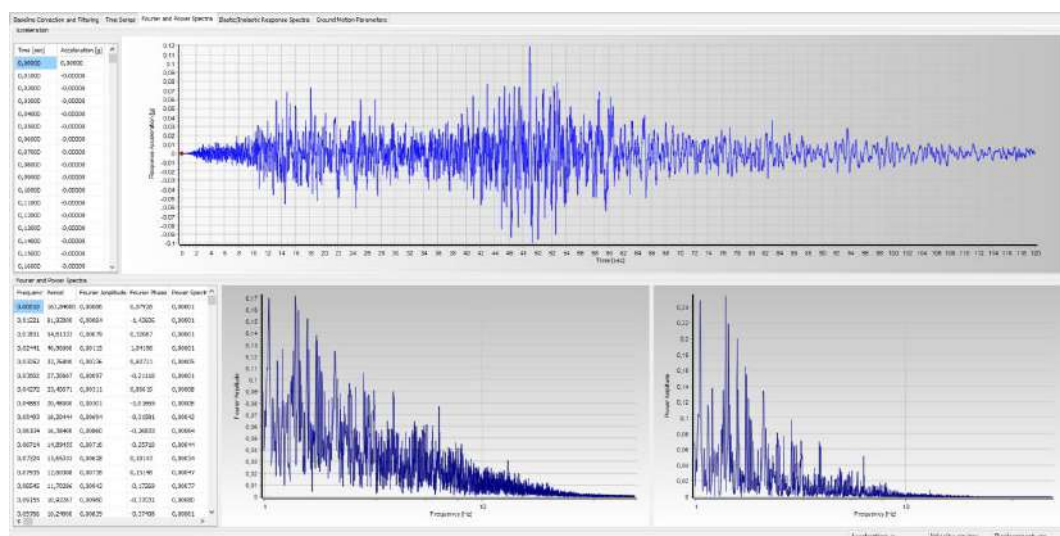
Gambar 5.104 Mean Matched Shallow Crustal Time History Accelerograms

5.6.2 Benioff Artificial Ground Motion Design

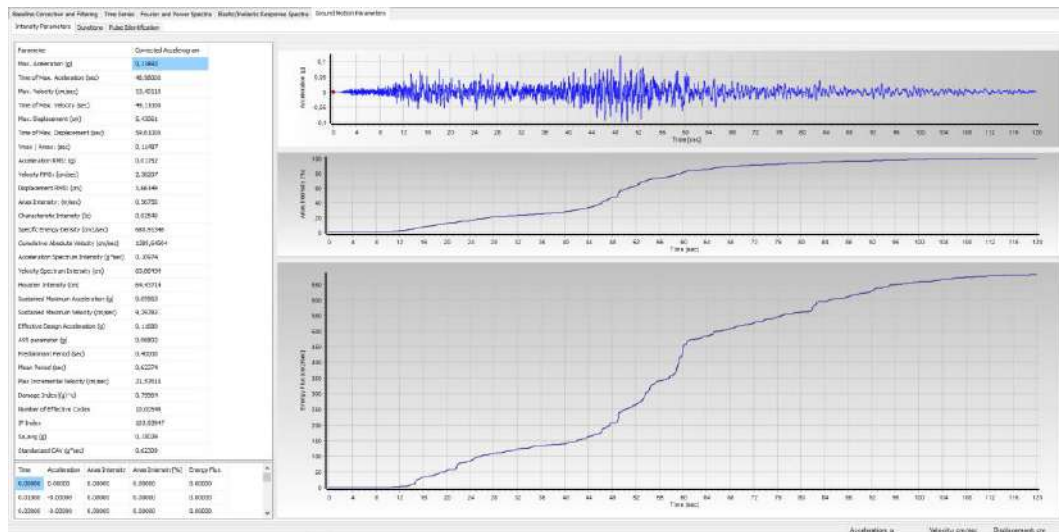
Setelah didapatkan data *time series* rata-rata dari *excel*. Dilakukan proses menginput data *time series* tercocok rata-rata ke dalam program *SeismoSignal 2024*. Hasil dari input tersebut berupa *Time History accelerograms* yang sebelumnya didapat dari pengolahan data dari *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)* yang sudah dilakukan *baseline correction* dan terfilter. *Accelerograms* untuk *time series* untuk rata-rata gempa tercocok *Benioff* serta frekuensi dari gempa tersebut dapat dilihat pada gambar 5.105 & 5.106 berikut.



Gambar 5.105 Time Series Windows Benioff



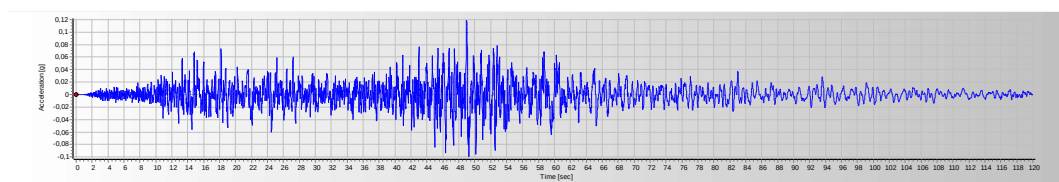
Gambar 5.106 Fourier and Power Spectra Windows Benioff



Gambar 5.107 Ground Motion Parameters Windows Benioff

Pada data *Benioff* data percepatan dibatasi hingga pada periode 120 detik dikarenakan setelah periode tersebut tidak lagi terdapat perubahan signifikan pada akselerogram di mana fase gempa telah mendekati 0 sehingga diasumsikan bahwa durasi gempa signifikan terjadi pada 120 detik awal gempa saja. Dari gambar 5.107 didapatkan nilai-nilai intensitas parameter yang garis besarnya didapatkan nilai *Max Acceleration* (PGA) = 0,11892 g dan *Arias Intensity* (AI) 0,56756 m/s.

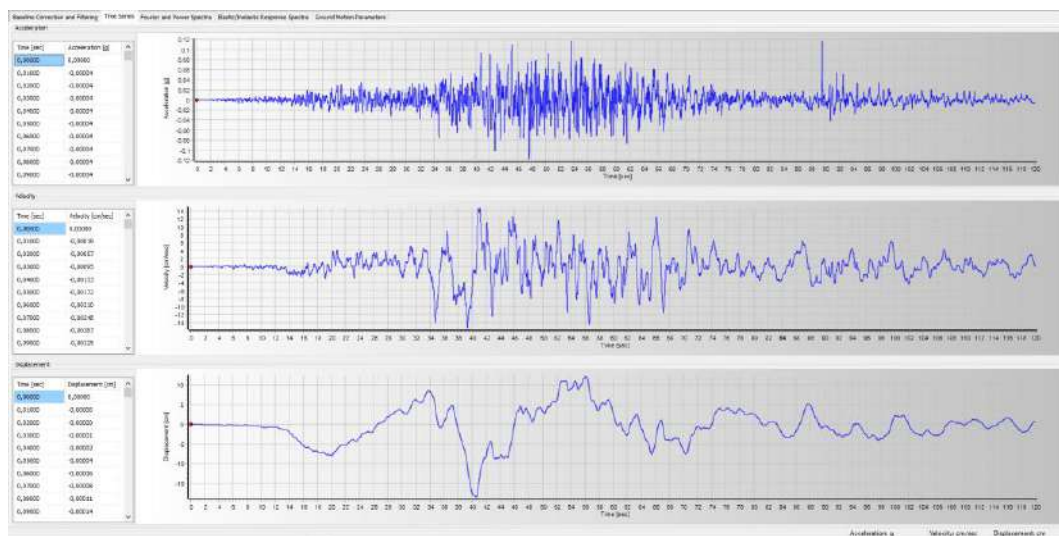
Gambaran detail mengenai *mean matched Time History accelerograms* untuk sumber gempa *Benioff* dapat dilihat pada gambar 5.108 berikut.



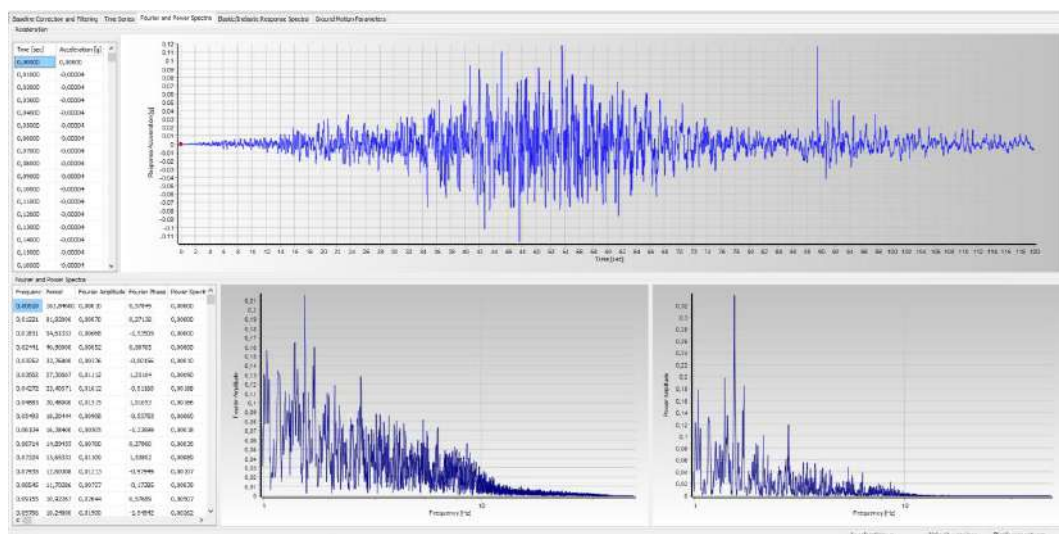
Gambar 5.108 Mean Matched Benioff Time History Accelerograms

5.6.3 Megathrust Artificial Ground Motion Design

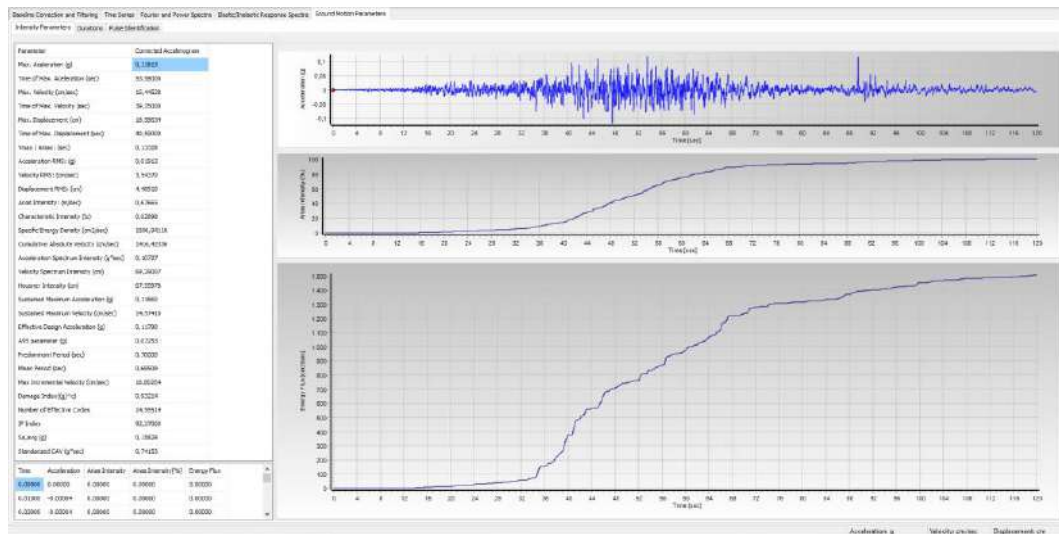
Setelah didapatkan data *time series* rata-rata dari *excel*. Dilakukan proses menginput data *time series* tercocok rata-rata ke dalam program *SeismoSignal 2024*. Hasil dari input tersebut berupa *Time History accelerograms* yang sebelumnya didapat dari pengolahan data dari *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)* yang sudah dilakukan *baseline correction* dan terfilter. *Accelerograms* untuk *time series* untuk rata-rata gempa tercocok *Megathrust* serta frekuensi dari gempa tersebut dapat dilihat pada gambar 5.109 & 5.110 berikut.



Gambar 5.109 Time Series Windows Megathrust



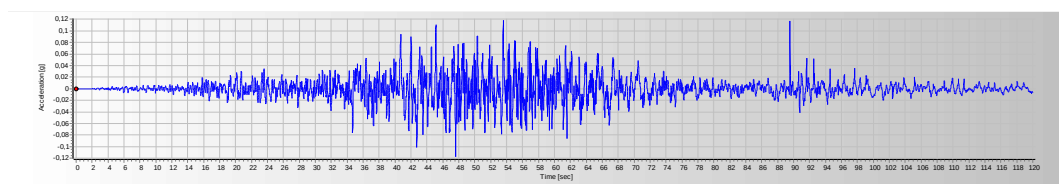
Gambar 5.110 Fourier and Power Spectra Windows Megathrust



Gambar 5.111 Ground Motion Parameters Windows Megathrust

Pada data *Megathrust* data percepatan dibatasi hingga pada periode 120 detik dikarenakan setelah periode tersebut tidak lagi terdapat perubahan signifikan pada akselerogram di mana fase gempa telah mendekati 0 sehingga diasumsikan bahwa durasi gempa signifikan terjadi pada 120 detik awal gempa saja. Dari gambar 5.111 didapatkan nilai-nilai intensitas parameter yang garis besarnya didapatkan nilai *Max Acceleration* (PGA) = 0,11813 g dan *Arias Intensity* (AI) 0,67665 m/s.

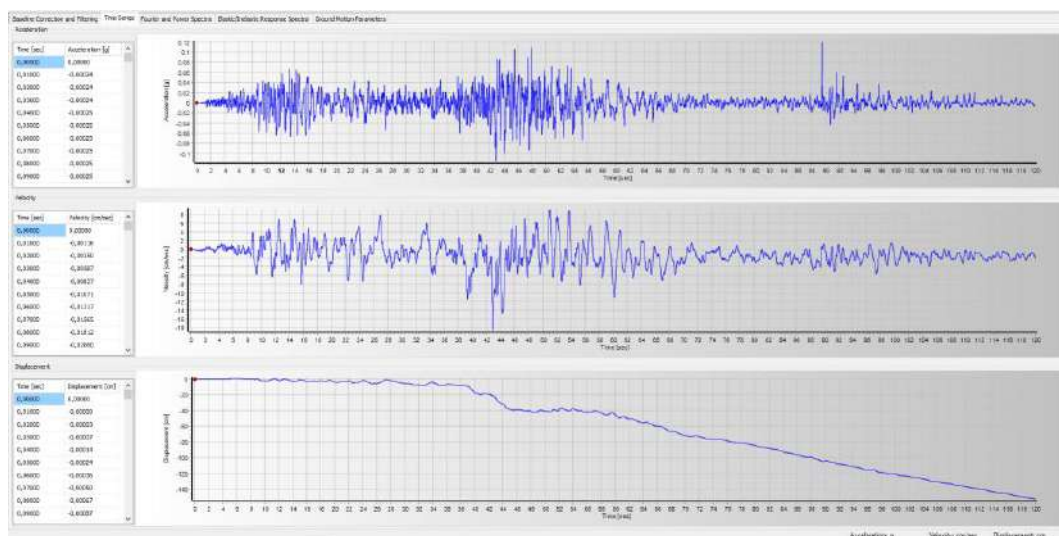
Gambaran detail mengenai *mean matched Time History accelerograms* untuk sumber gempa *Megathrust* dapat dilihat pada gambar 5.112 berikut.



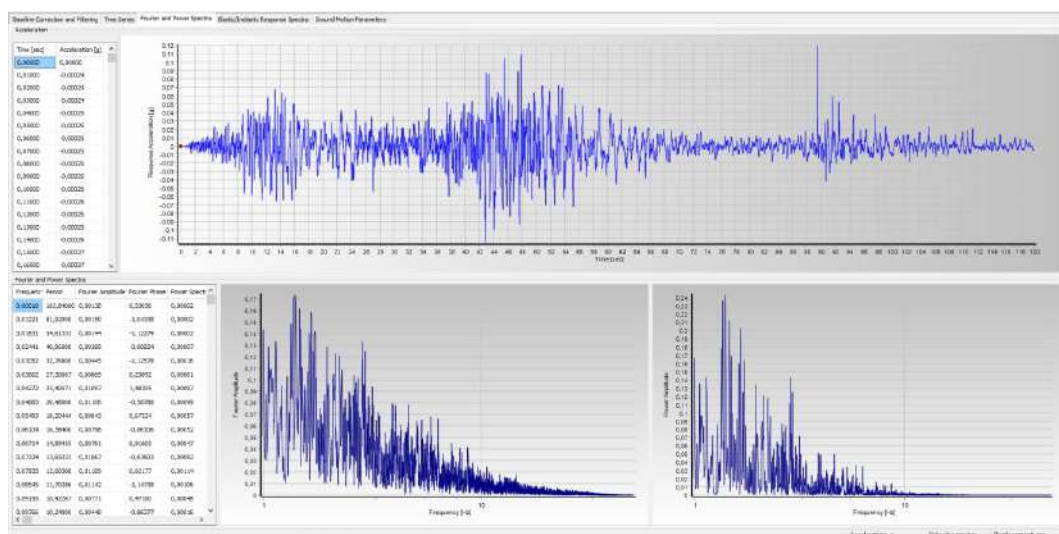
Gambar 5.112 Mean Matched Megathrust Time History Accelerograms

5.6.4 Artificial Ground Motion Design Kombinasi

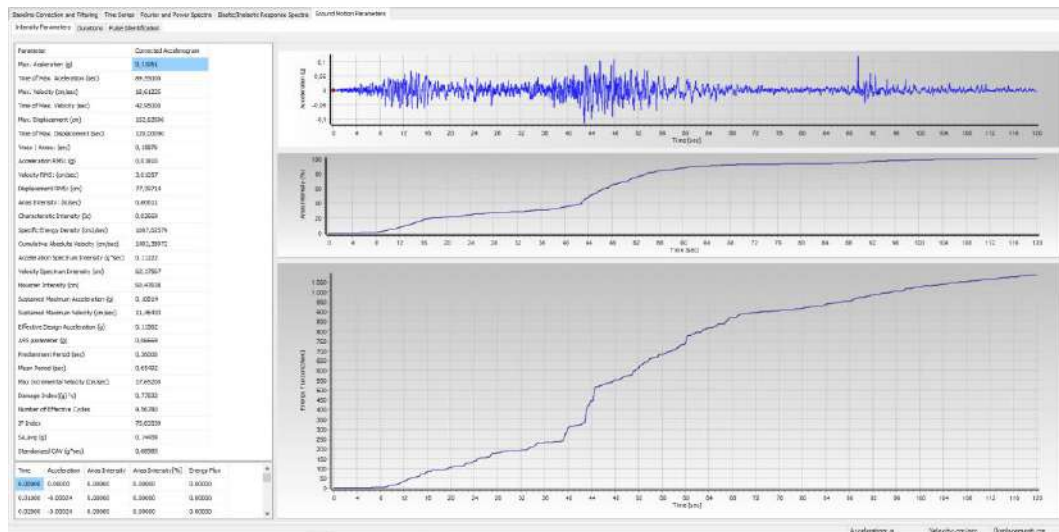
Setelah didapatkan data *time series* rata-rata dari *excel*. Dilakukan proses menginput data *time series* tercocok rata-rata ke dalam program *SeismoSignal 2024*. Hasil dari input tersebut berupa *Time History accelerograms* yang sebelumnya didapat dari pengolahan data dari *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)* yang sudah dilakukan *baseline correction* dan terfilter. *Accelerograms* untuk *time series* untuk rata-rata gempa tercocok Kombinasi serta frekuensi dari gempa tersebut dapat dilihat pada gambar 5.113 & 5.114 berikut.



Gambar 5.113 Time Series Windows Kombinasi



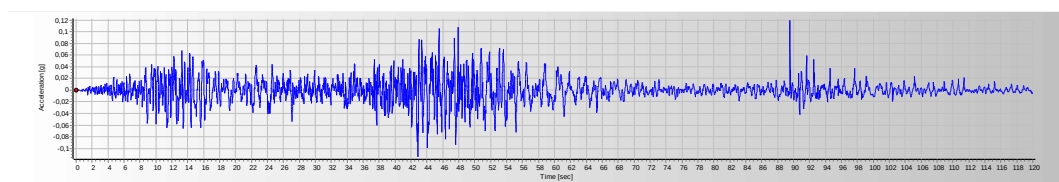
Gambar 5.114 Fourier and Power Spectra Windows Kombinasi



Gambar 5.115 Ground Motion Parameters Windows Kombinasi

Pada data Kombinasi data percepatan dibatasi hingga pada periode 120 detik dikarenakan setelah periode tersebut tidak lagi terdapat perubahan signifikan pada akselerogram di mana fase gempa telah mendekati 0 sehingga diasumsikan bahwa durasi gempa signifikan terjadi pada 120 detik awal gempa saja. Dari gambar 5.115 didapatkan nilai-nilai intensitas parameter yang garis besarnya didapatkan nilai *Max Acceleration* (PGA) = 0,11951 g dan *Arias Intensity* (AI) 0,60611 m/s.

Gambaran detail mengenai *mean matched Time History accelerograms* untuk sumber gempa kombinasi dapat dilihat pada gambar 5.116 berikut.



Gambar 5.116 Mean Matched Time History Accelerograms Kombinasi

5.7 Implementasi *Artificial Ground Motion* Dalam Analisis Struktur

Salah satu poin dari peraturan baik SNI 1726:2019 maupun SNI 8899:2020 menjelaskan bahwa gempa bumi sebagai beban dinamis yang diterapkan pada struktur bangunan, di mana gempa bumi terjadi dengan perubahan kecepatan dan percepatan tanah seiring waktu. Dari pemaparan analisis mengenai modifikasi gerak tanah permukaan tersebut, nilai dari hasil pencocokan spektral serta pembuatan gerak tanah artifisial tersebut nantinya dapat digunakan sebagai salah satu modal untuk melakukan analisis struktur bangunan maupun tanah. Gerak tanah (*ground motion*) atau akselerogram *Time History* permukaan yang telah dimodifikasi dan disesuaikan dengan kondisi spesifik situs tertentu, termasuk karakteristik tanah, serta perilaku seismiknya nantinya dapat membantu menganalisis struktur yang lebih akurat karena mempertimbangkan efek lokal yang mungkin mempengaruhi respon seismik struktur.

Penggunaan gerak tanah yang telah dimodifikasi dilakukan dengan menyesuaikan akselerogram asli dengan kondisi sesuai target spesifik situs dilakukan bertujuan untuk memperhitungkan efek tanah dan amplifikasi lokal, yang hasilnya adalah nilai gerak tanah permukaan yang lebih representatif dari potensi gerakan tanah yang dapat terjadi di site tersebut. Dengan memiliki gerak tanah termodifikasi ini, analisis dinamis struktur akan menjadi lebih relevan dan realistis.

Metode *Time History* digunakan untuk menganalisis respons dinamis struktur terhadap getaran gempa, yang berarti bukan hanya intensitas gempa yang diperhitungkan tapi juga seluruh kurva percepatan tanah sepanjang waktu. Data percepatan tanah ini didapat dari catatan gempa sebenarnya dari suatu lokasi tertentu maupun dapat disintesis melalui pendekatan secara numerik. SNI 1726:2019 juga mengharuskan permodelan gempa yang menggunakan catatan *Time History* agar mencakup komponen baik horizontal dan vertikal, dimana memungkinkan untuk mempertimbangkan efek getaran di semua arah yang mungkin berbeda dalam intensitas dan durasi.

Dengan memperhitungkan respon bangunan terhadap guncangan *seismic* yang telah dimodelkan, metode statik ekuivalen dan respon spektra merupakan metode analisis yang sudah umum digunakan, di mana nilai kekuatan serta

daktilitas keseluruhan bangunan dapat direpresentasikan dengan baik. Namun, pengaruh getaran yang lebih tinggi pada bangunan dan periode waktu dari gerakan tanah (*velocity pulse*) tidak dapat direpresentasikan dengan baik. Di sinilah metode *Time History Analysis* dapat mengatasi keterbatasan dari metode tersebut. Keuntungan dari metode analisis dinamis *Non Linear Time History* yaitu kemampuan untuk memodelkan respons struktur lebih detail dan realistis terhadap getaran dinamis yang kompleks serta mampu mempertahankan variasi naturalnya. Namun, metode ini juga memerlukan sumber data yang banyak dan akurat, serta komputasi yang cukup intensif, sehingga penggunaanya dilakukan untuk proyek-proyek strategis maupun penting ketika hasil yang diinginkan memiliki keakuratan yang tinggi.

Pengintegrasian hasil dari modifikasi gerak tanah permukaan ini dapat menggunakan beberapa program lanjutan seperti SAP2000, ETABS, OpenSees, dan sebagainya yang nantinya digunakan untuk melakukan simulasi respon struktur terhadap input pembebanan *Time History* termodifikasi. Akselerogram yang digunakan untuk permodelan gedung ini diharapkan mampu memberikan informasi lebih akurat mengenai nilai ketidakberaturan struktur baik secara horizontal maupun vertikal, seperti *displacement*, gaya dalam, *drift ratio*, *base shear*, momen, dan simpangan antar lantai dari bangunan yang nantinya dapat diketahui informasi mengenai bagaimana struktur akan berperilaku selama gempa bumi dengan karakteristik yang diinginkan terjadi.

Hasil dari analisis struktur yang menggunakan gerak tanah yang sudah dimodifikasi sangat penting dalam pengambilan keputusan desain dan retrofit struktur. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang respons struktur, dapat ditentukan apakah desain saat ini sudah memadai atau masih perlu dilakukan penyesuaian. Jika analisis menunjukkan bahwa struktur tidak memenuhi kriteria desain seismik yang diinginkan, maka langkah-langkah perbaikan atau penguatan dapat direncanakan dan dilaksanakan. Hasil ini juga dapat digunakan untuk menginformasikan strategi manajemen risiko gempa dan perencanaan mitigasi, memastikan bahwa struktur yang dibangun tidak hanya memenuhi standar

keselamatan tetapi juga memberikan perlindungan optimal terhadap gempa bumi di masa depan.

Selain itu hasil dari analisis ini dapat digunakan sebagai salah satu studi mengenai *hazard* dari gempa bumi melalui metode perhitungan/analisis *hazard* gempa yaitu *metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA). Metode ini diharapkan mampu untuk mengintegrasikan *hazard* dari suatu daerah terhadap berbagai sumber gempa lainnya. Metode ini juga dapat menyajikan probabilitas adanya kejadian gempa bumi pada kurun waktu tertentu serta memperhitungkan pengaruh faktor faktor ketidakpastian dalam analisis seperti ketidakpastian lokasi, ukuran, dan frekuensi kejadian gempa. Hasil dari PSHA nantinya dapat diolah lebih lanjut untuk menjadi deagregasi dan *Uniform Hazard Spectra* (UHS).

Pengolahan deagregasi lebih lanjut digunakan sebagai penentu jarak dan magnitude yang memberi kontribusi terhadap *hazard* dalam suatu periode ulang tertentu dan periode struktur yang ditinjau. Pengolahan *uniform hazard spectra* (UHS) dapat memberi referensi respon spektra yang menggambarkan satu kejadian gempa pada periode ulang yang ditinjau. Salah satu komponen dalam penyusunan peraturan kegempaan adalah tersedianya data dari gerak tanah dan respon spektra. Provinsi Bengkulu sendiri tidak memiliki cukup referensi mengenai ketersediaan data gerak tanah, sehingga pada SNI 1726-2019 dijelaskan untuk dapat menggunakan rekaman akselerogram dari gempa berbeda yang memiliki kemiripan karakteristik, karena pemakaian data gerak tanah yang diambil dari lokasi lain belum tentu sesuai untuk semua lokasi di Indonesia. Tujuan dari *probabilistic seismic hazard analysis* ini nantinya dapat digunakan sebagai gambaran tingkat kerentanan Provinsi Bengkulu yang dapat dipertimbangkan nantinya dalam penataan serta pengembangan wilayah lebih lanjut.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari ketiga jenis sumber gempa didapatkan hasil kecocokan terbaik berasal dari gempa kombinasi dengan *average misfits* sebesar 1,96175%. Untuk sumber gempa *Shallow Crustal* sebesar 2,7742%; gempa *Benioff* sebesar 2,5125%; dan gempa *Megathrust* sebesar 3,45124%. Hal tersebut membuktikan jika kombinasi antara ketiga sumber gempa memberikan gambaran yang paling komprehensif dan realistis tentang kondisi seismik di Provinsi Bengkulu.

Sumber gempa yang diprediksi memiliki kontribusi terbesar terhadap risiko gempa di Provinsi Bengkulu yaitu sumber gempa *Megathrust* di mana gempa Jepang - Tokachi Ikeda 4028572 memiliki kecocokan paling baik dibanding keseluruhan data yaitu berada di tingkat error 2,349% dengan magnitude dominan 8,29 dan jarak 70,983 Km. Untuk sumber gempa *Benioff* dominan yaitu Jepang – Kise Totsukawa 4024099 dengan tingkat error 2,676%, Magnitude 7,41 dan jarak 102,051 Km. Sedangkan untuk gempa *Shallow Crustal* dominan yaitu Imperial Valley 6 – Coachella 166 dengan tingkat error 2,607%, Magnitude 6,53 dan jarak 50,100 Km yang menjadi representasi dari deagregasi untuk Provinsi Bengkulu.

Hasil dari pembuatan *Artificial Ground Motion* didapatkan amplitudo maksimum dari *Time History* tercocok rata-rata untuk gempa *Shallow Crustal* didapat PGA sebesar 0,1312 g, gempa *Benioff* didapat PGA sebesar 0,1182 g, gempa *Megathrust* didapat PGA sebesar 0,11813 g, dan ketiga kombinasi gempa didapatkan nilai PGA sebesar 0,11951 g.

6.2 Saran

Adapun saran untuk dapat digunakan sebagai referensi maupun acuan untuk penelitian maupun analisis struktur yaitu sebagai berikut.

1. Penelitian lebih lanjut berkaitan tentang analisis *Time History Non Linear* yang dapat berupa analisis probabilitas seismik *hazard*, maupun deagregasi untuk pembuatan peta bahaya kegempaan.
2. Melakukan penelitian selanjutnya dengan menggunakan sumber gempa lainnya maupun pendekatan perhitungan yang berbeda untuk menganalisa lebih jauh kerawanan bencana kegempaan yang dapat terjadi di Provinsi Bengkulu.
3. Mengaplikasikan hasil dari penelitian ini untuk analisis struktur agar dapat dilihat validitas dari permodelan terhadap perilaku struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Asrurrifak, M., Irsyam, M., Budiono, B., Triyoyo, W., Meratia, W., Sengara, I.W., (2009). *Peta Spektra Hazard Indonesia Dengan Menggunakan Model Gridded Seismicity Untuk Sumber Gempa Background*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Asrurrifak. (2010). *Peta Respon Spektra Indonesia untuk Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa dengan Model Sumber Tiga Dimensi dalam Analisis Probabilistik*. Disertasi. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Alexander, N., Sukamta, D., Irsyam, M. (2019). *Pemilihan Dan Modifikasi Ground Motion Sesuai SNI 1726: 2019 Untuk Perancangan Gedung Tahan Gempa Indonesia*. Prosiding PIT XXIII, KOGEI XI. Jakarta.
- Baker, J.W. (2011). *Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection*. *Journal of Structural Engineering* 137(3):322-3311943.
- BSN. (2019). *SNI 1726: 2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung*. Badan Standarisasi Nasional: Jakarta.
- BSN. (2020). *SNI 8899: 2020 tentang Tata Cara Pemilihan dan Modifikasi Gerak Tanah Permukaan untuk Perencanaan Gedung Tahan Gempa*. Badan Standarisasi Nasional: Jakarta.
- Saputra, E., Makrup L., (2021). *Deagregasi Hazard dan Rekomendasi Ground Motion Sintetik di Provinsi Riau*. *Agregat* Vol. 6, No. 1, Mei 2021 ISSN 2541-0318.
- Sulistio, Makrup, Muntafi et.al., (2024). *Analisis Hazard Gempa dan Usulan Ground Motion Sintetik untuk Kota Ambon dengan Menggunakan Metode Probabilistik Seismic Hazard Analysis (PSHA)*. *Jurnal Sosial Teknologi* Vol 4, No. 2, Februari 2024 ISSN 2774-5155.

- Irsyam, M., Hendriyawan, Natawijaya, D.H., Widiyantoro, S., Asrurifak, M., Meilano, I., Triyoso, W., Hidayati, S., Rudiyanto, A., Sabaruddin, A., Faisal, L. (2017). *Development of New Seismic Hazard Maps of Indonesia 2017*. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul, South Korea.
- Kramer SL. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. 1st ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Makrup. (2013). *Seismic Hazard untuk Indonesia*. Edisi Pertama, Graha Ilmu: Yogyakarta.
- Mase, L. Z. (2018). *Reliability Study of Spectral Acceleration Designs Against Earthquakes in Bengkulu City, Indonesia*. International Journal of Technology, 9(5): 910-924.
- Mazzoni, S., Hachem, M., and Sinclair, M (2012). *An Improved Approach for Ground Motion Suite Selection and Modification for Use in Response History Analysis*. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisboa.
- Muntafi, Y., (2012) *Analisis Risiko dan Mikrozonasi Hazard Gempa Jakarta Metode Probabilitas Dengan Pemodelan Sumber Gempa Tiga Dimensi*, Tesis, Magister Teknik Sipil, Yogyakarta : Universitas Islam Indonesia.
- Pawirodikromo, Makrup, Teguh, et.al. (2020). *Development of synthetic ground motion at a specific site in Yogyakarta town, Indonesia utilizing the PSHA Method*. E3S Web Confrences 4th ICEEDM 2019, ISSN 22671242.
- PEER (2017). *Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Buildings version 2.03*, (Report No. 2017/06), Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.
- Pusat Studi Gempa Nasional (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Bandung, Indonesia: Pusat Litbang Perumahan dan

Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. ISBN: 978-602 5489-01-3.

PUSKIM. (2019). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2019*. Jakarta: Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Rahayu P., Pawirodikromo W., *Time History Sintetik di Wilayah Bogor Ditinjau Dari Deagregasi Hazard*. Jurnal Konstruksia Vol. 13 No.2 Juli 2023 e-ISSN : 2443-308X.

Rahmawati, Ria. (2022). *Komparasi Respon Struktur Gedung Di Provinsi Bengkulu Akibat Perubahan Peraturan Gempa*. Skripsi, Sarjana Teknik Sipil, Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia.

Widodo Pawirodikromo, (2012), *Seismology Teknik dan Rekayasa Kegempaan*, Cetakan I, Pustaka Pelajar, Yogyakarta.

Widodo, (2001), *Respon Dinamik Struktur Elastik*, Jurusan Teknik Sipil, FTSP, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Worden B, Gerstenberger M, Rhoades D, and Wald, D. (2012). *Probabilistic Relationship Between Ground Motion Parameters, and Modified Mercalli Intensity in California*. Bulletin of Seismological Society of America, 102(1): 204-221.

Youngs, R.P. and Coppersmith, K.J., (1985), *Implications of Fault Slip Rates and Earthquake Recurrence Models to Probabilistic Seismic Hazard Estimates*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 75, No. 4, pp. 939 964.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel Shallow Crustal Matched Spectra & Correction

Maximum Misfit : 6,77467 %

Average Misfit : 2,77420 %

Max Sa (g) : 1,60162 g

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
0	0,761	0,600	27%	0,66	1,526	1,500	2%
0,02	0,647	0,732	12%	0,68	1,508	1,500	1%
0,04	0,669	0,865	23%	0,7	1,504	1,457	3%
0,06	0,720	0,997	28%	0,72	1,451	1,417	2%
0,08	0,821	1,129	27%	0,74	1,407	1,378	2%
0,1	0,963	1,262	24%	0,76	1,381	1,342	3%
0,12	1,106	1,394	21%	0,78	1,339	1,308	2%
0,14	1,276	1,500	15%	0,8	1,304	1,275	2%
0,16	1,393	1,500	7%	0,82	1,272	1,244	2%
0,18	1,512	1,500	1%	0,84	1,243	1,214	2%
0,2	1,572	1,500	5%	0,86	1,213	1,186	2%
0,22	1,575	1,500	5%	0,88	1,175	1,159	1%
0,24	1,543	1,500	3%	0,9	1,157	1,133	2%
0,26	1,563	1,500	4%	0,92	1,136	1,109	2%
0,28	1,602	1,500	7%	0,94	1,106	1,085	2%
0,3	1,568	1,500	5%	0,96	1,080	1,063	2%
0,32	1,539	1,500	3%	0,98	1,060	1,041	2%
0,34	1,561	1,500	4%	1	1,046	1,020	3%
0,36	1,542	1,500	3%	1,02	1,019	1,000	2%
0,38	1,551	1,500	3%	1,04	0,986	0,981	0%
0,4	1,581	1,500	5%	1,06	0,969	0,962	1%
0,42	1,590	1,500	6%	1,08	0,955	0,944	1%
0,44	1,568	1,500	5%	1,1	0,944	0,927	2%
0,46	1,526	1,500	2%	1,12	0,934	0,911	3%
0,48	1,520	1,500	1%	1,14	0,921	0,895	3%
0,5	1,562	1,500	4%	1,16	0,910	0,879	4%
0,52	1,551	1,500	3%	1,18	0,890	0,864	3%
0,54	1,523	1,500	2%	1,2	0,868	0,850	2%
0,56	1,532	1,500	2%	1,22	0,854	0,836	2%
0,58	1,550	1,500	3%	1,24	0,855	0,823	4%
0,6	1,559	1,500	4%	1,26	0,850	0,810	5%
0,62	1,537	1,500	2%	1,28	0,838	0,797	5%
0,64	1,521	1,500	1%	1,3	0,827	0,785	5%

Lampiran 2 Lanjutan Tabel Shallow Crustal Matched Spectra & Correction

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
1,32	0,814	0,773	5%	2	0,529	0,510	4%
1,34	0,799	0,761	5%	2,02	0,526	0,505	4%
1,36	0,783	0,750	4%	2,04	0,523	0,500	5%
1,38	0,765	0,739	4%	2,06	0,519	0,495	5%
1,4	0,751	0,729	3%	2,08	0,516	0,490	5%
1,42	0,736	0,718	2%	2,1	0,514	0,486	6%
1,44	0,728	0,708	3%	2,12	0,511	0,481	6%
1,46	0,716	0,699	3%	2,14	0,510	0,477	7%
1,48	0,710	0,689	3%	2,16	0,508	0,472	8%
1,5	0,704	0,680	4%	2,18	0,507	0,468	8%
1,52	0,698	0,671	4%	2,2	0,505	0,464	9%
1,54	0,691	0,662	4%	2,22	0,505	0,459	10%
1,56	0,680	0,654	4%	2,24	0,504	0,455	11%
1,58	0,667	0,646	3%	2,26	0,504	0,451	12%
1,6	0,656	0,638	3%	2,28	0,504	0,447	13%
1,62	0,649	0,630	3%	2,3	0,503	0,443	13%
1,64	0,640	0,622	3%	2,32	0,502	0,440	14%
1,66	0,632	0,614	3%	2,34	0,501	0,436	15%
1,68	0,620	0,607	2%	2,36	0,498	0,432	15%
1,7	0,613	0,600	2%	2,38	0,494	0,429	15%
1,72	0,607	0,593	2%	2,4	0,489	0,425	15%
1,74	0,600	0,586	2%	2,42	0,482	0,421	14%
1,76	0,592	0,580	2%	2,44	0,474	0,418	13%
1,78	0,588	0,573	3%	2,46	0,466	0,415	12%
1,8	0,583	0,567	3%	2,48	0,457	0,411	11%
1,82	0,575	0,560	3%	2,5	0,449	0,408	10%
1,84	0,566	0,554	2%	2,52	0,441	0,405	9%
1,86	0,555	0,548	1%	2,54	0,433	0,402	8%
1,88	0,550	0,543	1%	2,56	0,425	0,398	7%
1,9	0,545	0,537	2%	2,58	0,417	0,395	6%
1,92	0,540	0,531	2%	2,6	0,409	0,392	4%
1,94	0,537	0,526	2%	2,62	0,399	0,389	3%
1,96	0,535	0,520	3%	2,64	0,390	0,386	1%
1,98	0,532	0,515	3%	2,66	0,379	0,383	1%

Lampiran 3 Lanjutan Tabel Shallow Crustal Matched Spectra & Correction

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
2,68	0,369	0,381	3%	3,36	0,187	0,304	38%
2,7	0,360	0,378	5%	3,38	0,183	0,302	39%
2,72	0,352	0,375	6%	3,4	0,179	0,300	40%
2,74	0,344	0,372	8%	3,42	0,176	0,298	41%
2,76	0,336	0,370	9%	3,44	0,172	0,297	42%
2,78	0,328	0,367	11%	3,46	0,169	0,295	43%
2,8	0,321	0,364	12%	3,48	0,166	0,293	44%
2,82	0,315	0,362	13%	3,5	0,162	0,291	44%
2,84	0,309	0,359	14%	3,52	0,159	0,290	45%
2,86	0,303	0,357	15%	3,54	0,156	0,288	46%
2,88	0,298	0,354	16%	3,56	0,154	0,287	46%
2,9	0,292	0,352	17%	3,58	0,151	0,285	47%
2,92	0,287	0,349	18%	3,6	0,149	0,283	48%
2,94	0,282	0,347	19%	3,62	0,146	0,282	48%
2,96	0,277	0,345	20%	3,64	0,144	0,280	49%
2,98	0,272	0,342	20%	3,66	0,142	0,279	49%
3	0,267	0,340	21%	3,68	0,140	0,277	50%
3,02	0,262	0,338	23%	3,7	0,138	0,276	50%
3,04	0,256	0,336	24%	3,72	0,136	0,274	51%
3,06	0,251	0,333	25%	3,74	0,133	0,273	51%
3,08	0,246	0,331	26%	3,76	0,132	0,271	51%
3,1	0,241	0,329	27%	3,78	0,130	0,270	52%
3,12	0,237	0,327	27%	3,8	0,128	0,268	52%
3,14	0,233	0,325	28%	3,82	0,126	0,267	53%
3,16	0,229	0,323	29%	3,84	0,124	0,266	53%
3,18	0,225	0,321	30%	3,86	0,123	0,264	54%
3,2	0,220	0,319	31%	3,88	0,121	0,263	54%
3,22	0,216	0,317	32%	3,9	0,119	0,262	54%
3,24	0,212	0,315	33%	3,92	0,118	0,260	55%
3,26	0,208	0,313	34%	3,94	0,116	0,259	55%
3,28	0,203	0,311	35%	3,96	0,115	0,258	55%
3,3	0,199	0,309	36%	3,98	0,113	0,256	56%
3,32	0,195	0,307	37%	4	0,112	0,255	56%
3,34	0,191	0,305	37%				

Lampiran 4 Tabel Benioff Matched Spectra & Correction

Maximum Misfit : 6,82934 %

Average Misfit : 2,52150 %

Max Sa (g) : 1,60244 g

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
0	0,790	0,600	32%	0,66	1,498	1,500	0%
0,02	0,685	0,732	6%	0,68	1,483	1,500	1%
0,04	0,734	0,865	15%	0,7	1,486	1,457	2%
0,06	0,865	0,997	13%	0,72	1,462	1,417	3%
0,08	1,132	1,129	0%	0,74	1,435	1,378	4%
0,1	1,298	1,262	3%	0,76	1,388	1,342	3%
0,12	1,375	1,394	1%	0,78	1,343	1,308	3%
0,14	1,587	1,500	6%	0,8	1,301	1,275	2%
0,16	1,634	1,500	9%	0,82	1,272	1,244	2%
0,18	1,717	1,500	14%	0,84	1,250	1,214	3%
0,2	1,683	1,500	12%	0,86	1,229	1,186	4%
0,22	1,536	1,500	2%	0,88	1,195	1,159	3%
0,24	1,539	1,500	3%	0,9	1,162	1,133	3%
0,26	1,563	1,500	4%	0,92	1,132	1,109	2%
0,28	1,558	1,500	4%	0,94	1,103	1,085	2%
0,3	1,544	1,500	3%	0,96	1,073	1,063	1%
0,32	1,569	1,500	5%	0,98	1,051	1,041	1%
0,34	1,568	1,500	5%	1	1,046	1,020	3%
0,36	1,577	1,500	5%	1,02	1,037	1,000	4%
0,38	1,536	1,500	2%	1,04	1,020	0,981	4%
0,4	1,581	1,500	5%	1,06	0,993	0,962	3%
0,42	1,602	1,500	7%	1,08	0,964	0,944	2%
0,44	1,566	1,500	4%	1,1	0,949	0,927	2%
0,46	1,578	1,500	5%	1,12	0,934	0,911	3%
0,48	1,592	1,500	6%	1,14	0,920	0,895	3%
0,5	1,563	1,500	4%	1,16	0,899	0,879	2%
0,52	1,569	1,500	5%	1,18	0,887	0,864	3%
0,54	1,566	1,500	4%	1,2	0,873	0,850	3%
0,56	1,563	1,500	4%	1,22	0,858	0,836	3%
0,58	1,551	1,500	3%	1,24	0,842	0,823	2%
0,6	1,527	1,500	2%	1,26	0,831	0,810	3%
0,62	1,534	1,500	2%	1,28	0,826	0,797	4%
0,64	1,509	1,500	1%	1,3	0,818	0,785	4%

Lampiran 5 Lanjutan Tabel Benioff Matched Spectra & Correction

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
1,32	0,812	0,773	5%	2	0,519	0,510	2%
1,34	0,806	0,761	6%	2,02	0,512	0,505	1%
1,36	0,797	0,750	6%	2,04	0,507	0,500	1%
1,38	0,784	0,739	6%	2,06	0,501	0,495	1%
1,4	0,771	0,729	6%	2,08	0,496	0,490	1%
1,42	0,752	0,718	5%	2,1	0,490	0,486	1%
1,44	0,732	0,708	3%	2,12	0,482	0,481	0%
1,46	0,713	0,699	2%	2,14	0,473	0,477	1%
1,48	0,703	0,689	2%	2,16	0,464	0,472	2%
1,5	0,687	0,680	1%	2,18	0,457	0,468	2%
1,52	0,670	0,671	0%	2,2	0,449	0,464	3%
1,54	0,659	0,662	1%	2,22	0,442	0,459	4%
1,56	0,654	0,654	0%	2,24	0,436	0,455	4%
1,58	0,647	0,646	0%	2,26	0,431	0,451	4%
1,6	0,637	0,638	0%	2,28	0,428	0,447	4%
1,62	0,629	0,630	0%	2,3	0,424	0,443	4%
1,64	0,623	0,622	0%	2,32	0,420	0,440	4%
1,66	0,615	0,614	0%	2,34	0,416	0,436	4%
1,68	0,606	0,607	0%	2,36	0,412	0,432	5%
1,7	0,598	0,600	0%	2,38	0,408	0,429	5%
1,72	0,590	0,593	1%	2,4	0,403	0,425	5%
1,74	0,584	0,586	0%	2,42	0,397	0,421	6%
1,76	0,577	0,580	0%	2,44	0,391	0,418	7%
1,78	0,572	0,573	0%	2,46	0,385	0,415	7%
1,8	0,567	0,567	0%	2,48	0,378	0,411	8%
1,82	0,562	0,560	0%	2,5	0,372	0,408	9%
1,84	0,558	0,554	1%	2,52	0,365	0,405	10%
1,86	0,555	0,548	1%	2,54	0,358	0,402	11%
1,88	0,553	0,543	2%	2,56	0,352	0,398	12%
1,9	0,550	0,537	2%	2,58	0,346	0,395	12%
1,92	0,545	0,531	3%	2,6	0,340	0,392	13%
1,94	0,538	0,526	2%	2,62	0,334	0,389	14%
1,96	0,531	0,520	2%	2,64	0,328	0,386	15%
1,98	0,525	0,515	2%	2,66	0,322	0,383	16%

Lampiran 6 Lanjutan Tabel Benioff Matched Spectra & Correction

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
2,68	0,317	0,381	17%	3,36	0,174	0,304	43%
2,7	0,311	0,378	18%	3,38	0,172	0,302	43%
2,72	0,305	0,375	19%	3,4	0,169	0,300	44%
2,74	0,300	0,372	19%	3,42	0,167	0,298	44%
2,76	0,295	0,370	20%	3,44	0,165	0,297	44%
2,78	0,291	0,367	21%	3,46	0,162	0,295	45%
2,8	0,286	0,364	21%	3,48	0,160	0,293	45%
2,82	0,282	0,362	22%	3,5	0,157	0,291	46%
2,84	0,277	0,359	23%	3,52	0,155	0,290	47%
2,86	0,272	0,357	24%	3,54	0,152	0,288	47%
2,88	0,268	0,354	24%	3,56	0,149	0,287	48%
2,9	0,263	0,352	25%	3,58	0,146	0,285	49%
2,92	0,259	0,349	26%	3,6	0,144	0,283	49%
2,94	0,255	0,347	27%	3,62	0,141	0,282	50%
2,96	0,250	0,345	27%	3,64	0,138	0,280	51%
2,98	0,245	0,342	28%	3,66	0,135	0,279	52%
3	0,240	0,340	29%	3,68	0,132	0,277	52%
3,02	0,236	0,338	30%	3,7	0,129	0,276	53%
3,04	0,232	0,336	31%	3,72	0,127	0,274	54%
3,06	0,227	0,333	32%	3,74	0,125	0,273	54%
3,08	0,223	0,331	33%	3,76	0,122	0,271	55%
3,1	0,219	0,329	34%	3,78	0,120	0,270	55%
3,12	0,214	0,327	34%	3,8	0,119	0,268	56%
3,14	0,210	0,325	35%	3,82	0,117	0,267	56%
3,16	0,206	0,323	36%	3,84	0,115	0,266	57%
3,18	0,201	0,321	37%	3,86	0,113	0,264	57%
3,2	0,197	0,319	38%	3,88	0,111	0,263	58%
3,22	0,194	0,317	39%	3,9	0,110	0,262	58%
3,24	0,190	0,315	40%	3,92	0,108	0,260	58%
3,26	0,187	0,313	40%	3,94	0,106	0,259	59%
3,28	0,184	0,311	41%	3,96	0,105	0,258	59%
3,3	0,180	0,309	42%	3,98	0,103	0,256	60%
3,32	0,178	0,307	42%	4	0,101	0,255	60%
3,34	0,176	0,305	42%				

Lampiran 7 Tabel Megathrust Matched Spectra & Correction

Maximum Misfit : 6,44029%

Average Misfit : 3,45124%

Max Sa (g) : 1,59660 g

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
0	-	-	-	0,66	1,522	1,500	1%
0,02	0,725	0,732	1%	0,68	1,515	1,500	1%
0,04	0,772	0,865	11%	0,7	1,468	1,457	1%
0,06	0,825	0,997	17%	0,72	1,421	1,417	0%
0,08	0,907	1,129	20%	0,74	1,396	1,378	1%
0,1	1,223	1,262	3%	0,76	1,362	1,342	2%
0,12	1,393	1,394	0%	0,78	1,328	1,308	2%
0,14	1,369	1,500	9%	0,8	1,289	1,275	1%
0,16	1,471	1,500	2%	0,82	1,264	1,244	2%
0,18	1,604	1,500	7%	0,84	1,240	1,214	2%
0,2	1,602	1,500	7%	0,86	1,216	1,186	3%
0,22	1,556	1,500	4%	0,88	1,181	1,159	2%
0,24	1,532	1,500	2%	0,9	1,152	1,133	2%
0,26	1,517	1,500	1%	0,92	1,132	1,109	2%
0,28	1,551	1,500	3%	0,94	1,118	1,085	3%
0,3	1,524	1,500	2%	0,96	1,087	1,063	2%
0,32	1,524	1,500	2%	0,98	1,058	1,041	2%
0,34	1,556	1,500	4%	1	1,036	1,020	2%
0,36	1,571	1,500	5%	1,02	1,022	1,000	2%
0,38	1,597	1,500	6%	1,04	1,013	0,981	3%
0,4	1,566	1,500	4%	1,06	0,991	0,962	3%
0,42	1,581	1,500	5%	1,08	0,974	0,944	3%
0,44	1,583	1,500	6%	1,1	0,960	0,927	4%
0,46	1,571	1,500	5%	1,12	0,949	0,911	4%
0,48	1,547	1,500	3%	1,14	0,938	0,895	5%
0,5	1,538	1,500	3%	1,16	0,916	0,879	4%
0,52	1,525	1,500	2%	1,18	0,900	0,864	4%
0,54	1,538	1,500	3%	1,2	0,883	0,850	4%
0,56	1,542	1,500	3%	1,22	0,869	0,836	4%
0,58	1,536	1,500	2%	1,24	0,859	0,823	4%
0,6	1,520	1,500	1%	1,26	0,845	0,810	4%
0,62	1,521	1,500	1%	1,28	0,832	0,797	4%
0,64	1,526	1,500	2%	1,3	0,816	0,785	4%

Lampiran 8 Lanjutan Tabel Megathrust Matched Spectra & Correction

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
1,32	0,804	0,773	4%	2	0,538	0,510	5%
1,34	0,795	0,761	4%	2,02	0,536	0,505	6%
1,36	0,786	0,750	5%	2,04	0,533	0,500	7%
1,38	0,776	0,739	5%	2,06	0,528	0,495	7%
1,4	0,772	0,729	6%	2,08	0,522	0,490	7%
1,42	0,765	0,718	6%	2,1	0,517	0,486	6%
1,44	0,750	0,708	6%	2,12	0,510	0,481	6%
1,46	0,737	0,699	6%	2,14	0,502	0,477	5%
1,48	0,726	0,689	5%	2,16	0,493	0,472	4%
1,5	0,716	0,680	5%	2,18	0,485	0,468	4%
1,52	0,706	0,671	5%	2,2	0,480	0,464	4%
1,54	0,696	0,662	5%	2,22	0,476	0,459	4%
1,56	0,689	0,654	5%	2,24	0,473	0,455	4%
1,58	0,683	0,646	6%	2,26	0,470	0,451	4%
1,6	0,675	0,638	6%	2,28	0,468	0,447	5%
1,62	0,668	0,630	6%	2,3	0,469	0,443	6%
1,64	0,661	0,622	6%	2,32	0,472	0,440	7%
1,66	0,651	0,614	6%	2,34	0,475	0,436	9%
1,68	0,643	0,607	6%	2,36	0,479	0,432	11%
1,7	0,636	0,600	6%	2,38	0,483	0,429	13%
1,72	0,625	0,593	5%	2,4	0,486	0,425	14%
1,74	0,614	0,586	5%	2,42	0,489	0,421	16%
1,76	0,604	0,580	4%	2,44	0,493	0,418	18%
1,78	0,593	0,573	3%	2,46	0,494	0,415	19%
1,8	0,581	0,567	3%	2,48	0,494	0,411	20%
1,82	0,573	0,560	2%	2,5	0,494	0,408	21%
1,84	0,566	0,554	2%	2,52	0,492	0,405	22%
1,86	0,562	0,548	3%	2,54	0,490	0,402	22%
1,88	0,558	0,543	3%	2,56	0,486	0,398	22%
1,9	0,554	0,537	3%	2,58	0,482	0,395	22%
1,92	0,551	0,531	4%	2,6	0,477	0,392	22%
1,94	0,548	0,526	4%	2,62	0,471	0,389	21%
1,96	0,544	0,520	5%	2,64	0,465	0,386	20%
1,98	0,540	0,515	5%	2,66	0,459	0,383	20%

Lampiran 9 Lanjutan Tabel Megathrust Matched Spectra & Correction

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
2,68	0,453	0,381	19%	3,36	0,271	0,304	11%
2,7	0,447	0,378	18%	3,38	0,268	0,302	11%
2,72	0,441	0,375	18%	3,4	0,265	0,300	12%
2,74	0,435	0,372	17%	3,42	0,262	0,298	12%
2,76	0,428	0,370	16%	3,44	0,259	0,297	13%
2,78	0,423	0,367	15%	3,46	0,256	0,295	13%
2,8	0,418	0,364	15%	3,48	0,252	0,293	14%
2,82	0,414	0,362	14%	3,5	0,249	0,291	14%
2,84	0,409	0,359	14%	3,52	0,246	0,290	15%
2,86	0,403	0,357	13%	3,54	0,242	0,288	16%
2,88	0,397	0,354	12%	3,56	0,239	0,287	16%
2,9	0,391	0,352	11%	3,58	0,237	0,285	17%
2,92	0,384	0,349	10%	3,6	0,235	0,283	17%
2,94	0,379	0,347	9%	3,62	0,232	0,282	18%
2,96	0,373	0,345	8%	3,64	0,230	0,280	18%
2,98	0,366	0,342	7%	3,66	0,227	0,279	19%
3	0,359	0,340	6%	3,68	0,225	0,277	19%
3,02	0,352	0,338	4%	3,7	0,223	0,276	19%
3,04	0,346	0,336	3%	3,72	0,221	0,274	19%
3,06	0,340	0,333	2%	3,74	0,219	0,273	20%
3,08	0,334	0,331	1%	3,76	0,218	0,271	20%
3,1	0,328	0,329	0%	3,78	0,216	0,270	20%
3,12	0,323	0,327	1%	3,8	0,215	0,268	20%
3,14	0,318	0,325	2%	3,82	0,214	0,267	20%
3,16	0,313	0,323	3%	3,84	0,212	0,266	20%
3,18	0,308	0,321	4%	3,86	0,211	0,264	20%
3,2	0,303	0,319	5%	3,88	0,209	0,263	20%
3,22	0,299	0,317	6%	3,9	0,208	0,262	20%
3,24	0,294	0,315	7%	3,92	0,207	0,260	20%
3,26	0,289	0,313	8%	3,94	0,207	0,259	20%
3,28	0,285	0,311	8%	3,96	0,208	0,258	19%
3,3	0,281	0,309	9%	3,98	0,207	0,256	19%
3,32	0,277	0,307	10%	4	0,207	0,255	19%
3,34	0,274	0,305	10%				

Lampiran 10 Tabel Kombinasi Matched Spectra & Correction

Maximum Misfit : 5,41909 %

Average Misfit : 1,96175 %

Max Sa (g) : 1,56463 g

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
0	1,453	0,600	142%	0,66	1,507	1,500	0%
0,02	0,723	0,732	1%	0,68	1,491	1,500	1%
0,04	0,763	0,865	12%	0,7	1,487	1,457	2%
0,06	0,830	0,997	17%	0,72	1,448	1,417	2%
0,08	1,002	1,129	11%	0,74	1,405	1,378	2%
0,1	1,083	1,262	14%	0,76	1,368	1,342	2%
0,12	1,214	1,394	13%	0,78	1,329	1,308	2%
0,14	1,372	1,500	9%	0,8	1,280	1,275	0%
0,16	1,507	1,500	0%	0,82	1,239	1,244	0%
0,18	1,643	1,500	10%	0,84	1,222	1,214	1%
0,2	1,583	1,500	6%	0,86	1,197	1,186	1%
0,22	1,565	1,500	4%	0,88	1,166	1,159	1%
0,24	1,525	1,500	2%	0,9	1,149	1,133	1%
0,26	1,554	1,500	4%	0,92	1,128	1,109	2%
0,28	1,562	1,500	4%	0,94	1,104	1,085	2%
0,3	1,530	1,500	2%	0,96	1,078	1,063	1%
0,32	1,535	1,500	2%	0,98	1,058	1,041	2%
0,34	1,548	1,500	3%	1	1,044	1,020	2%
0,36	1,534	1,500	2%	1,02	1,026	1,000	3%
0,38	1,542	1,500	3%	1,04	0,995	0,981	1%
0,4	1,530	1,500	2%	1,06	0,974	0,962	1%
0,42	1,548	1,500	3%	1,08	0,954	0,944	1%
0,44	1,561	1,500	4%	1,1	0,943	0,927	2%
0,46	1,539	1,500	3%	1,12	0,926	0,911	2%
0,48	1,515	1,500	1%	1,14	0,907	0,895	1%
0,5	1,526	1,500	2%	1,16	0,896	0,879	2%
0,52	1,546	1,500	3%	1,18	0,888	0,864	3%
0,54	1,536	1,500	2%	1,2	0,872	0,850	3%
0,56	1,534	1,500	2%	1,22	0,857	0,836	2%
0,58	1,534	1,500	2%	1,24	0,847	0,823	3%
0,6	1,540	1,500	3%	1,26	0,835	0,810	3%
0,62	1,535	1,500	2%	1,28	0,823	0,797	3%
0,64	1,515	1,500	1%	1,3	0,809	0,785	3%

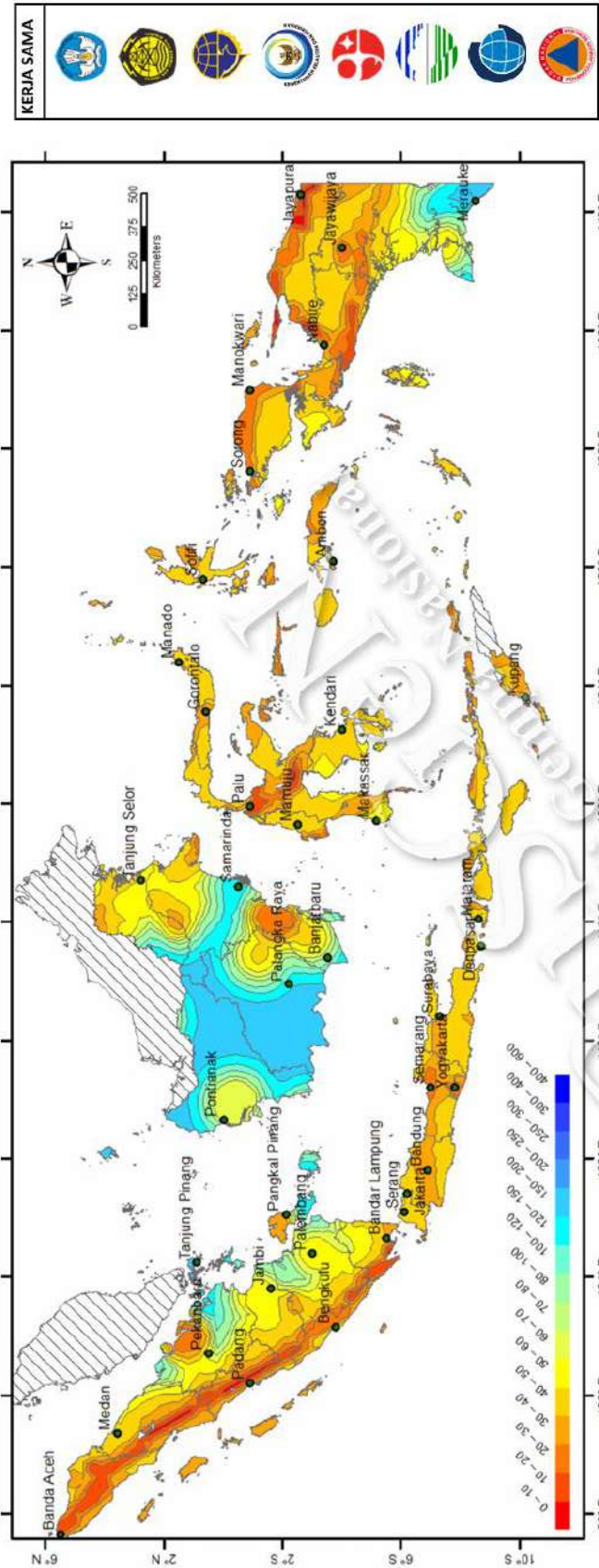
Lampiran 11 Lanjutan Tabel Kombinasi Matched Spectra & Correction

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
1,32	0,798	0,773	3%	2	0,526	0,510	3%
1,34	0,787	0,761	3%	2,02	0,526	0,505	4%
1,36	0,781	0,750	4%	2,04	0,527	0,500	5%
1,38	0,774	0,739	5%	2,06	0,528	0,495	7%
1,4	0,768	0,729	5%	2,08	0,528	0,490	8%
1,42	0,756	0,718	5%	2,1	0,529	0,486	9%
1,44	0,744	0,708	5%	2,12	0,527	0,481	10%
1,46	0,727	0,699	4%	2,14	0,524	0,477	10%
1,48	0,712	0,689	3%	2,16	0,521	0,472	10%
1,5	0,701	0,680	3%	2,18	0,519	0,468	11%
1,52	0,692	0,671	3%	2,2	0,516	0,464	11%
1,54	0,680	0,662	3%	2,22	0,514	0,459	12%
1,56	0,668	0,654	2%	2,24	0,512	0,455	13%
1,58	0,654	0,646	1%	2,26	0,509	0,451	13%
1,6	0,645	0,638	1%	2,28	0,506	0,447	13%
1,62	0,640	0,630	2%	2,3	0,502	0,443	13%
1,64	0,634	0,622	2%	2,32	0,502	0,440	14%
1,66	0,626	0,614	2%	2,34	0,500	0,436	15%
1,68	0,614	0,607	1%	2,36	0,498	0,432	15%
1,7	0,606	0,600	1%	2,38	0,495	0,429	16%
1,72	0,598	0,593	1%	2,4	0,491	0,425	16%
1,74	0,590	0,586	1%	2,42	0,487	0,421	15%
1,76	0,581	0,580	0%	2,44	0,481	0,418	15%
1,78	0,576	0,573	0%	2,46	0,475	0,415	15%
1,8	0,570	0,567	1%	2,48	0,469	0,411	14%
1,82	0,564	0,560	1%	2,5	0,463	0,408	14%
1,84	0,558	0,554	1%	2,52	0,457	0,405	13%
1,86	0,548	0,548	0%	2,54	0,450	0,402	12%
1,88	0,543	0,543	0%	2,56	0,443	0,398	11%
1,9	0,537	0,537	0%	2,58	0,435	0,395	10%
1,92	0,533	0,531	0%	2,6	0,427	0,392	9%
1,94	0,531	0,526	1%	2,62	0,418	0,389	7%
1,96	0,528	0,520	1%	2,64	0,409	0,386	6%
1,98	0,526	0,515	2%	2,66	0,401	0,383	4%

Lampiran 12 Lanjutan Tabel Kombinasi Matched Spectra & Correction

T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error	T (Sec)	Sa (g)	RS (g)	Error
2,68	0,392	0,381	3%	3,36	0,212	0,304	30%
2,7	0,385	0,378	2%	3,38	0,208	0,302	31%
2,72	0,378	0,375	1%	3,4	0,204	0,300	32%
2,74	0,372	0,372	0%	3,42	0,200	0,298	33%
2,76	0,366	0,370	1%	3,44	0,197	0,297	34%
2,78	0,360	0,367	2%	3,46	0,193	0,295	35%
2,8	0,354	0,364	3%	3,48	0,189	0,293	36%
2,82	0,349	0,362	4%	3,5	0,185	0,291	36%
2,84	0,343	0,359	4%	3,52	0,182	0,290	37%
2,86	0,338	0,357	5%	3,54	0,178	0,288	38%
2,88	0,332	0,354	6%	3,56	0,175	0,287	39%
2,9	0,327	0,352	7%	3,58	0,172	0,285	40%
2,92	0,322	0,349	8%	3,6	0,170	0,283	40%
2,94	0,316	0,347	9%	3,62	0,167	0,282	41%
2,96	0,311	0,345	10%	3,64	0,164	0,280	41%
2,98	0,305	0,342	11%	3,66	0,162	0,279	42%
3	0,299	0,340	12%	3,68	0,159	0,277	43%
3,02	0,293	0,338	13%	3,7	0,157	0,276	43%
3,04	0,288	0,336	14%	3,72	0,154	0,274	44%
3,06	0,282	0,333	15%	3,74	0,152	0,273	44%
3,08	0,277	0,331	16%	3,76	0,149	0,271	45%
3,1	0,272	0,329	17%	3,78	0,147	0,270	45%
3,12	0,267	0,327	18%	3,8	0,145	0,268	46%
3,14	0,263	0,325	19%	3,82	0,143	0,267	46%
3,16	0,258	0,323	20%	3,84	0,141	0,266	47%
3,18	0,254	0,321	21%	3,86	0,139	0,264	47%
3,2	0,249	0,319	22%	3,88	0,137	0,263	48%
3,22	0,244	0,317	23%	3,9	0,135	0,262	48%
3,24	0,239	0,315	24%	3,92	0,133	0,260	49%
3,26	0,234	0,313	25%	3,94	0,132	0,259	49%
3,28	0,229	0,311	26%	3,96	0,131	0,258	49%
3,3	0,224	0,309	27%	3,98	0,129	0,256	49%
3,32	0,220	0,307	28%	4	0,128	0,255	50%
3,34	0,216	0,305	29%				

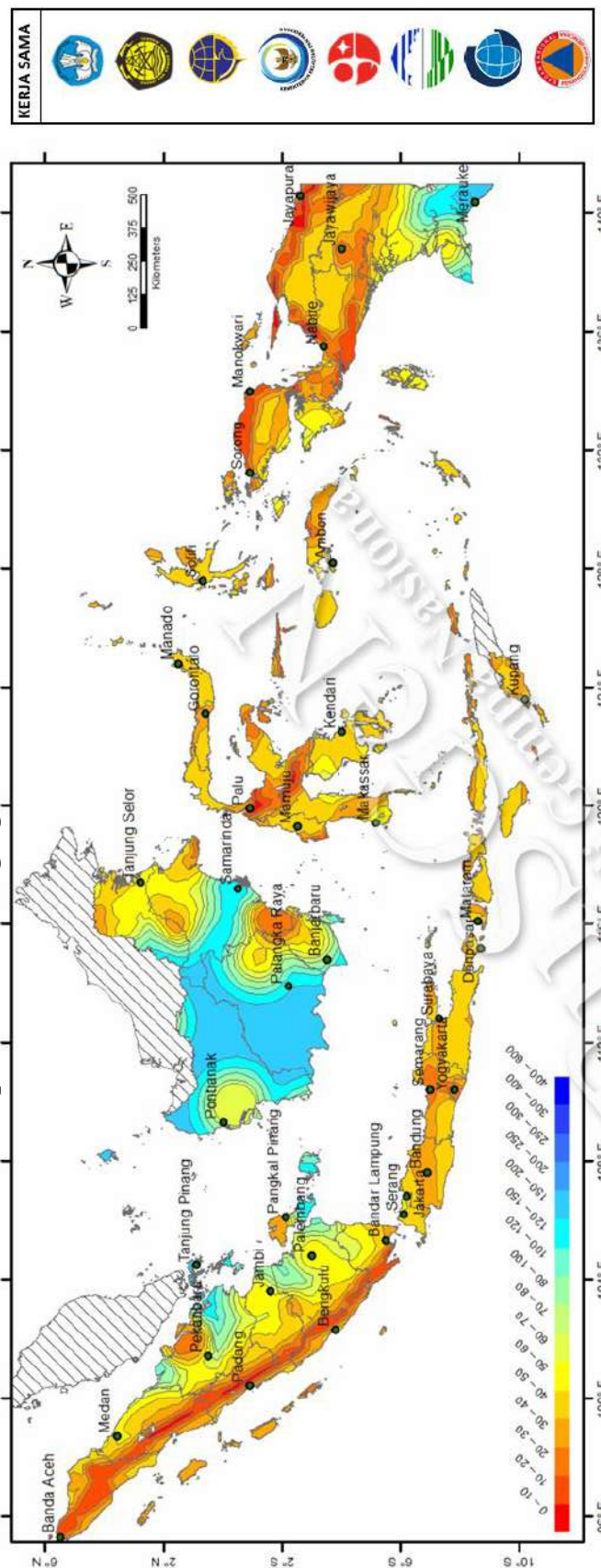
Lampiran 13 Peta Deagregasi Jarak Shallow Crustal PGA



	PETA DEAGREGASI BAHAYA GEMPA INDONESIA UNTUK PERENCANAAN DAN EVALUASI INFRASTRUKTUR TAHAN GEMPA Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat <i>Basuki Hadimoljono</i> Dr. Ir. M. Basuki Hadimoljono, M.Sc		Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
--	---	--	--

Gambar L2.46 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan puncak untuk periode ulang 2500 tahun

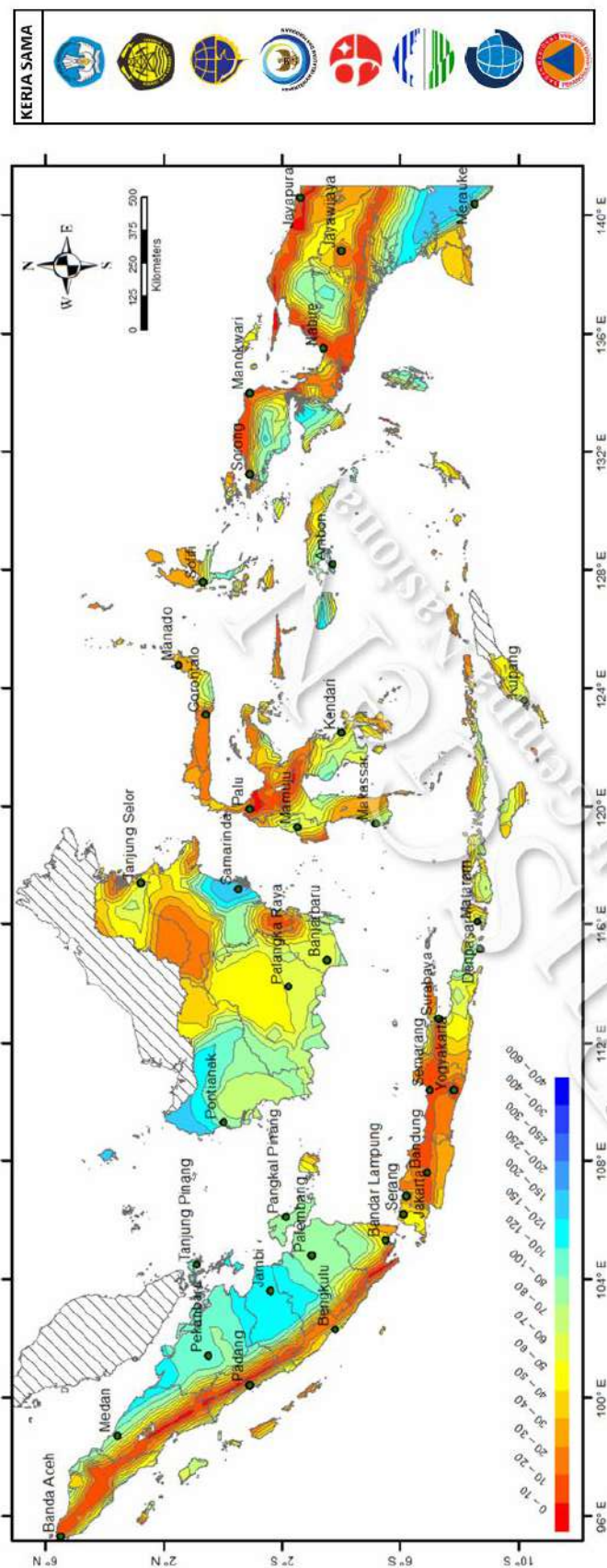
Lampiran 14 Peta Deagregasi Jarak Shallow Crustal 0,2 detik



 PuSGeN Pusat Studi Gempa Nasional National Center for Earthquake Studies	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	PETA DEAGREGASI BAHAYA GEMPA INDONESIA UNTUK PERENCANAAN DAN EVALUASI INFRASTRUKTUR TAHAN GEMPA Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeljono, M.Sc
---	--	---	---

Gambar L2.47 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

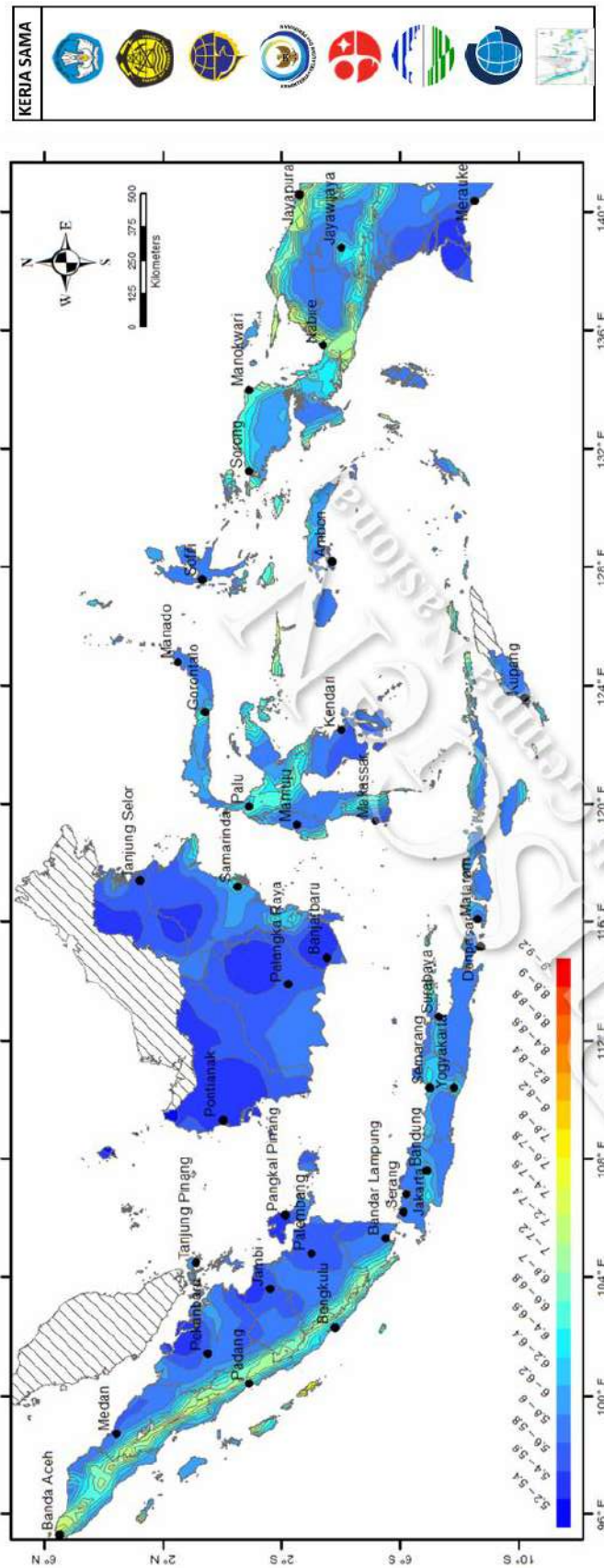
Lampiran 15 Peta Deagregasi Jarak Shallow Crustal 3 detik



	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeliono, M.Sc
---	---	---	---

Gambar L2.48 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Lampiran 17 Peta Deagregasi Magnitudo Shallow Crustal 0,2 detik



PETA DEAGREGASI BAHAYA GEMPA INDONESIA UNTUK PERENCANAAN DAN EVALUASI INFRASTRUKTUR TAHAN GEMPA

Tim Penyusun :

1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat)
2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua)
3. Prof. Ir. Faizal (Wakil Ketua)
4. Dr. Ir. M. Asrufak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim)
5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa)
6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA)
7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA)
8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)

Jakarta, 29 November 2022

Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

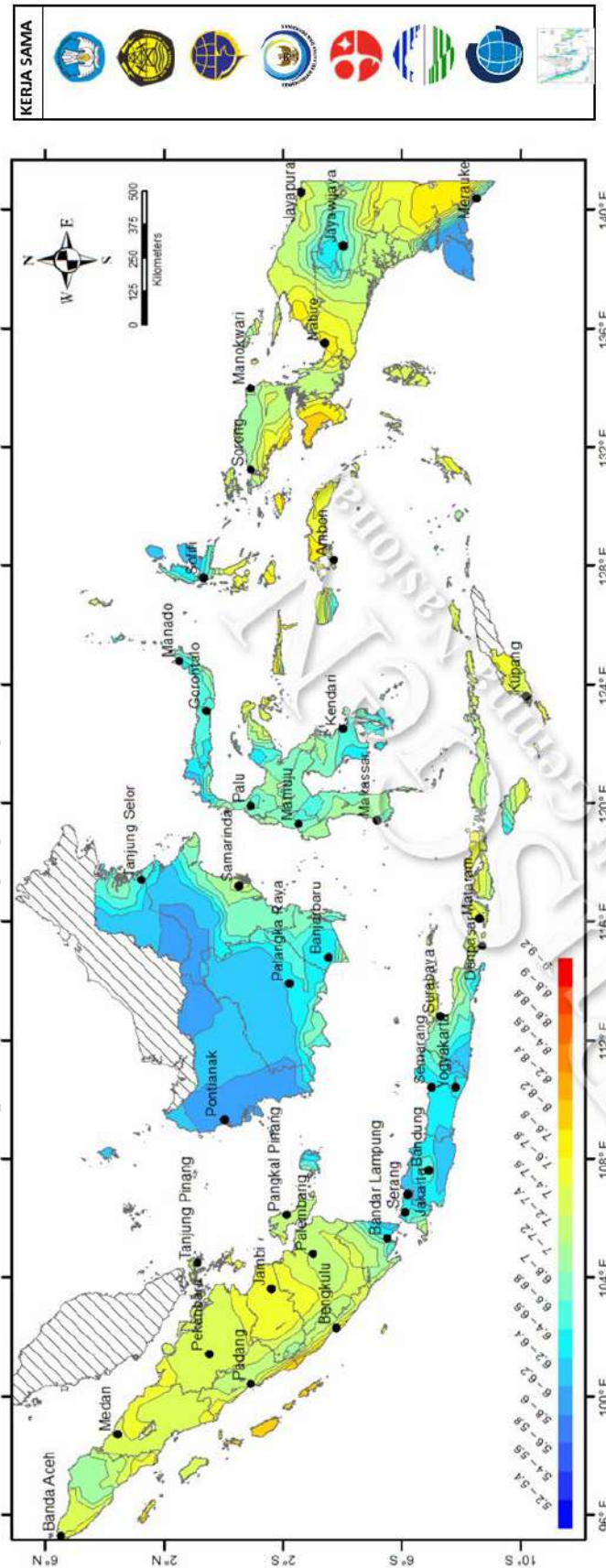
Sullivan

Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeljono, M.Sc

Kementerian Pekerjaan Umum
dan Perumahan Rakyat

Gambar L2.65 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

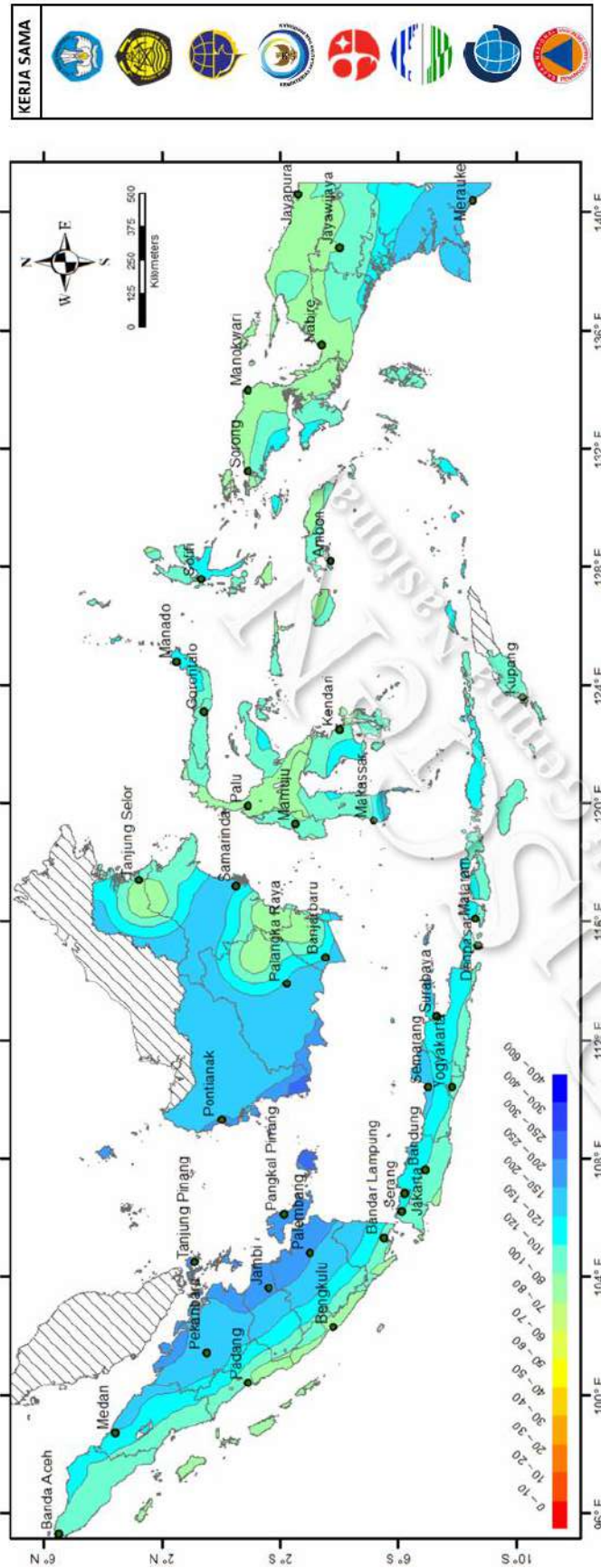
Lampiran 18 Peta Deagregasi Magnitudo Shallow Crustal 3 detik



 PuSGeN Pusat Studi Gempa Nasional National Center for Earthquake Studies	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeliono, M.Sc
---	--	---	---

Gambar L2.66 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa Sesar Dangkal pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

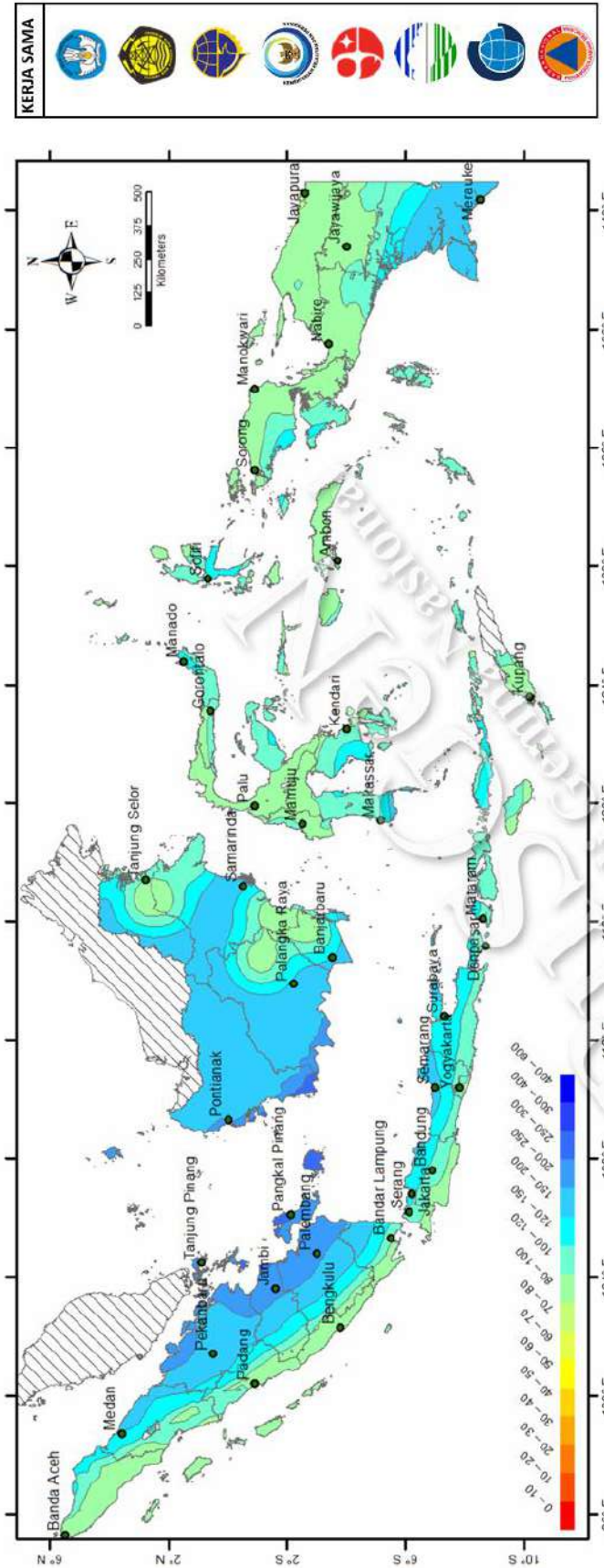
Lampiran 19 Peta Deagregasi Jarak Benioff PGA



 PuSGeN Pusat Studi Gempa Nasional National Center for Earthquake Studies	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoljono, M.Sc
---	--	---	---

Gambar L2.10 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Benioff* pada percepatan puncak untuk periode ulang 2500 tahun

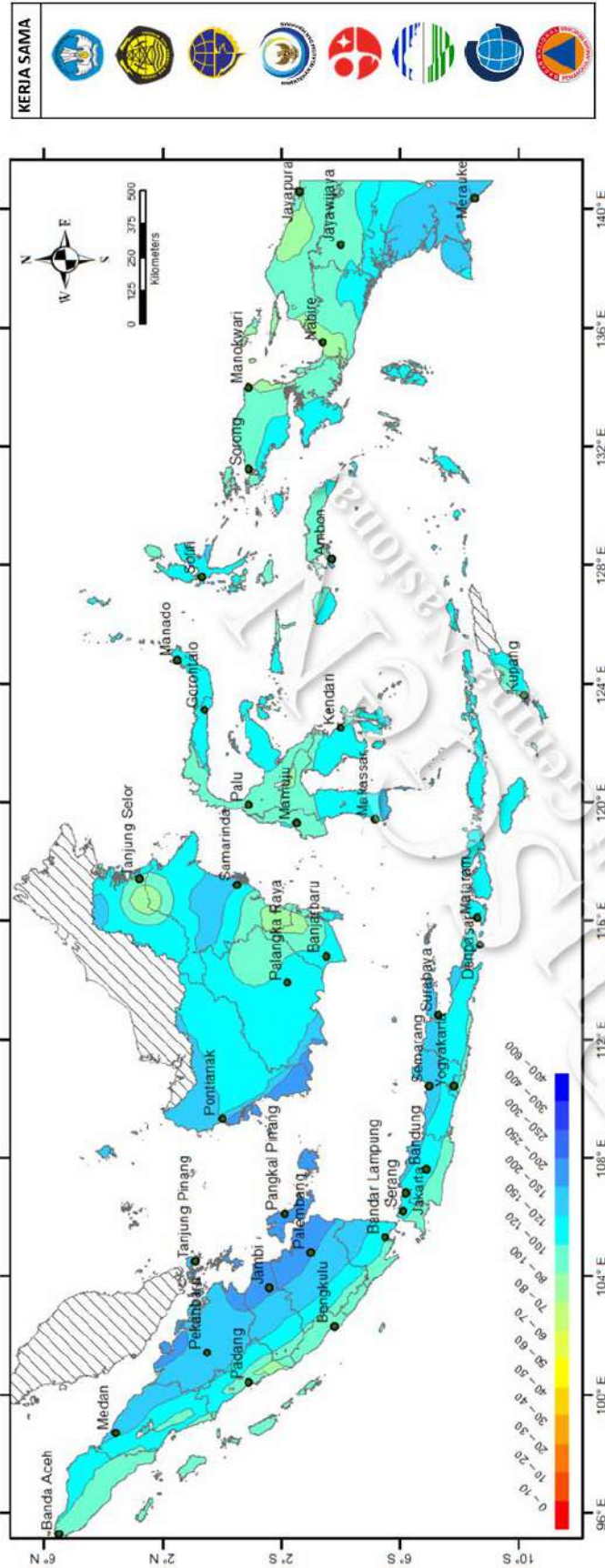
Lampiran 20 Peta Deagregasi Jarak Benioff 0,2 detik



	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSc., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeliono, M.Sc
--	---	--	---

Gambar L2.11 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

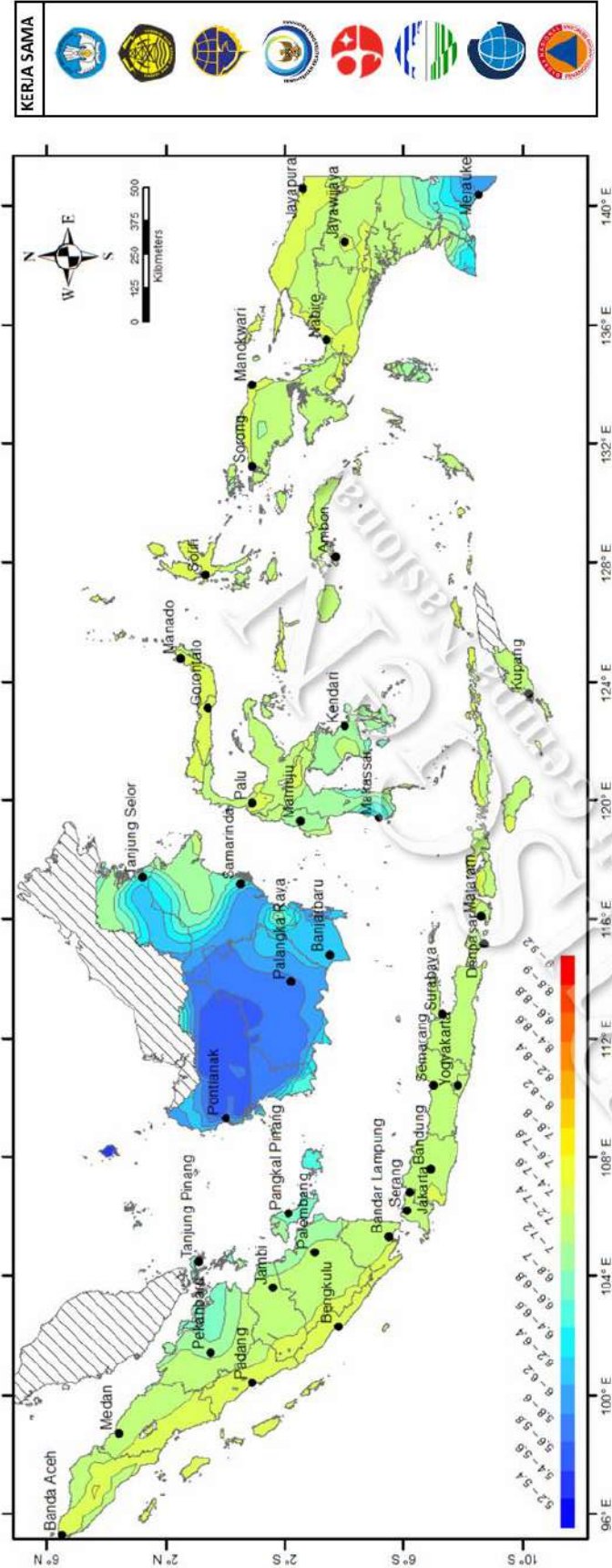
Lampiran 21 Peta Deagregasi Jarak Benioff 3 detik



 PuSGeN Pusat Studi Gempa Nasional National Center for Earthquake Studies	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeliono, M.Sc
---	--	---	---

Gambar L2.12 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

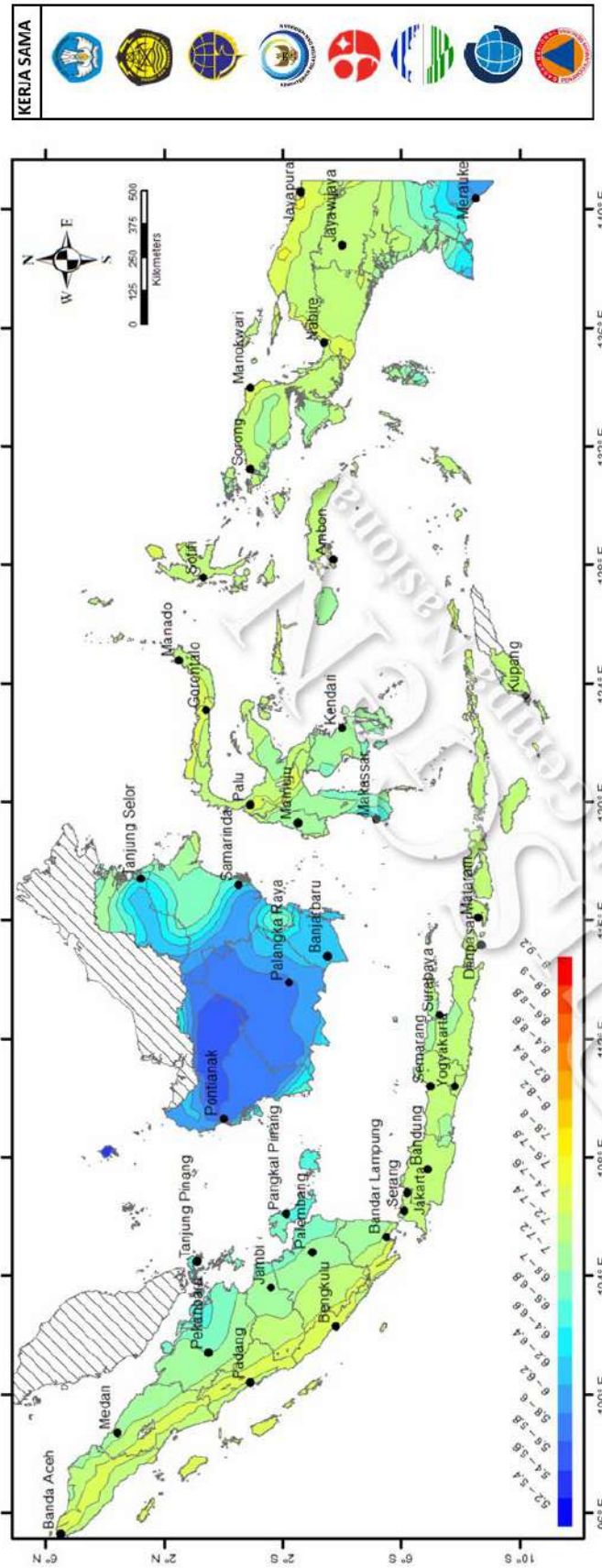
Lampiran 22 Peta Deagregasi Magnitudo Benioff PGA



	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyanoto, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)		Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat		Dr. Ir. M. Basuki Hadimoljono, M.Sc	

Gambar L2.28 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa Benioff pada percepatan puncak untuk periode ulang 2500 tahun

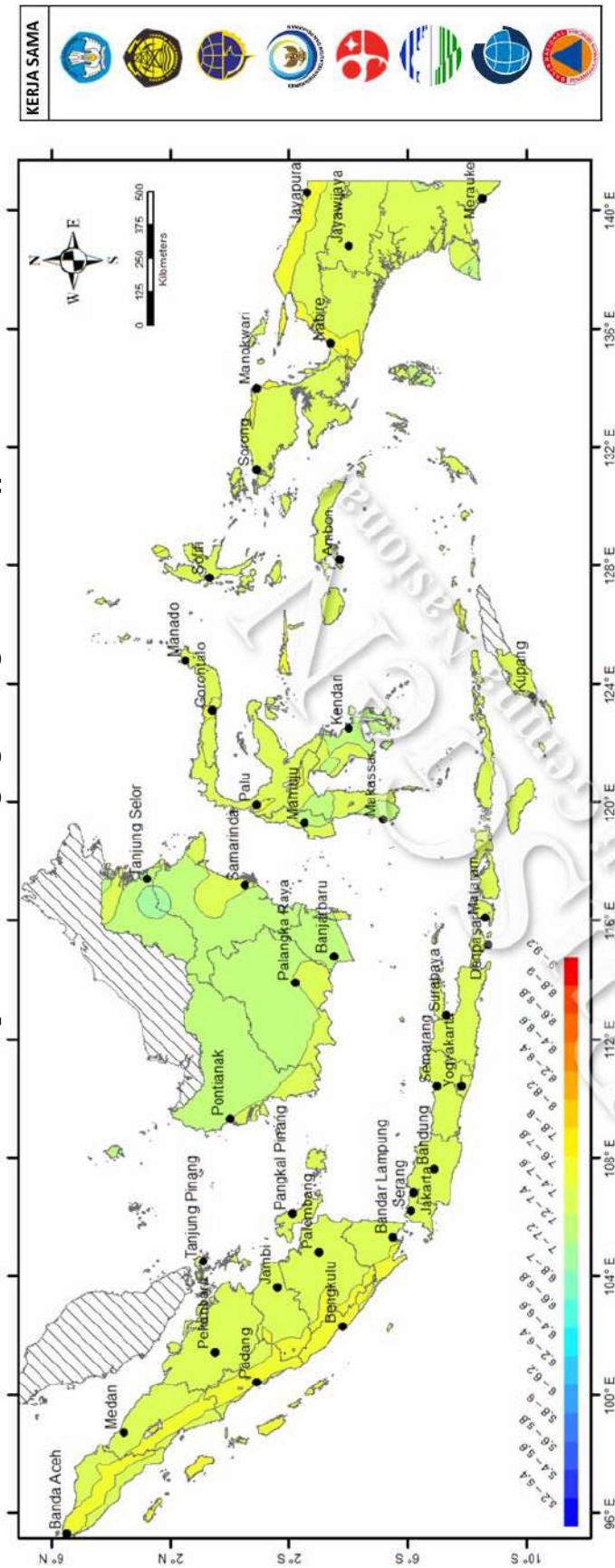
Lampiran 23 Peta Deagregasi Magnitudo Benioff 0,2 detik



 PuSGeN Pusat Studi Gempa Nasional National Center for Earthquake Studies	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeljono, M.Sc
---	--	---	---

Gambar L2.29 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa Benioff pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

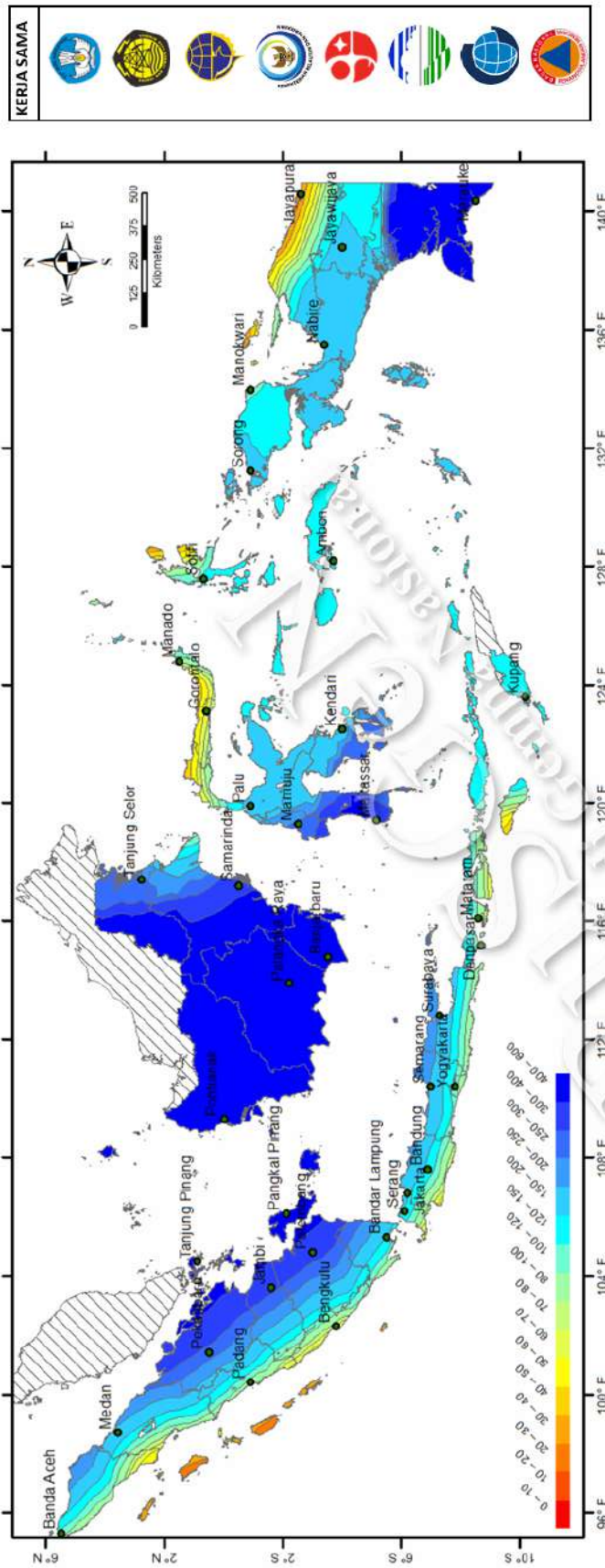
Lampiran 24 Peta Deagregasi Magnitudo Benioff 3 detik



	PETA DEAGREGASI BAHAYA GEMPA INDONESIA UNTUK PERENCANAAN DAN EVALUASI INFRASTRUKTUR TAHAN GEMPA Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeliono, M.Sc	 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeliono, M.Sc
---	---	---	---

Gambar L2.30 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa *Benioff* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

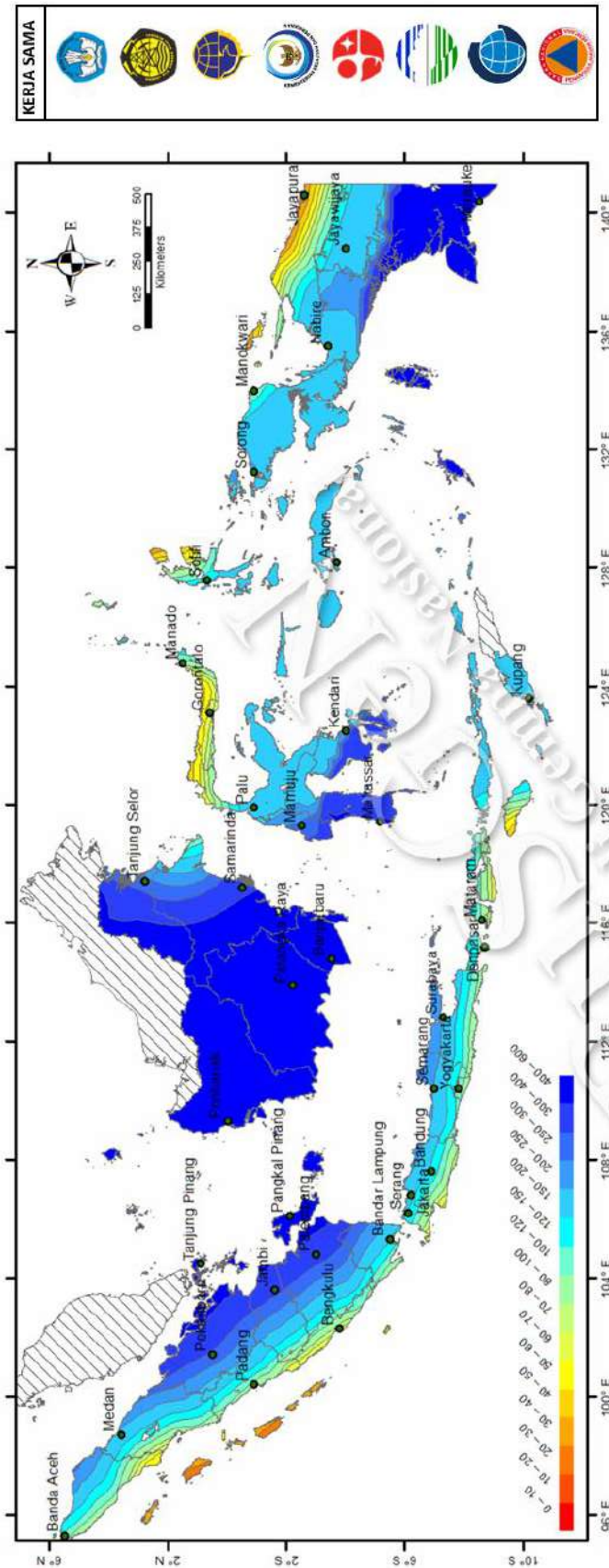
Lampiran 25 Peta Deagregasi Jarak Megathrust PGA



 PuSGeN National Center for Earthquake Simulation	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widiantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeljono, M.Sc
---	--	---	---

Gambar L2.82 Peta deagregasi Jarak (*R*) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan puncak untuk periode ulang 2500 tahun

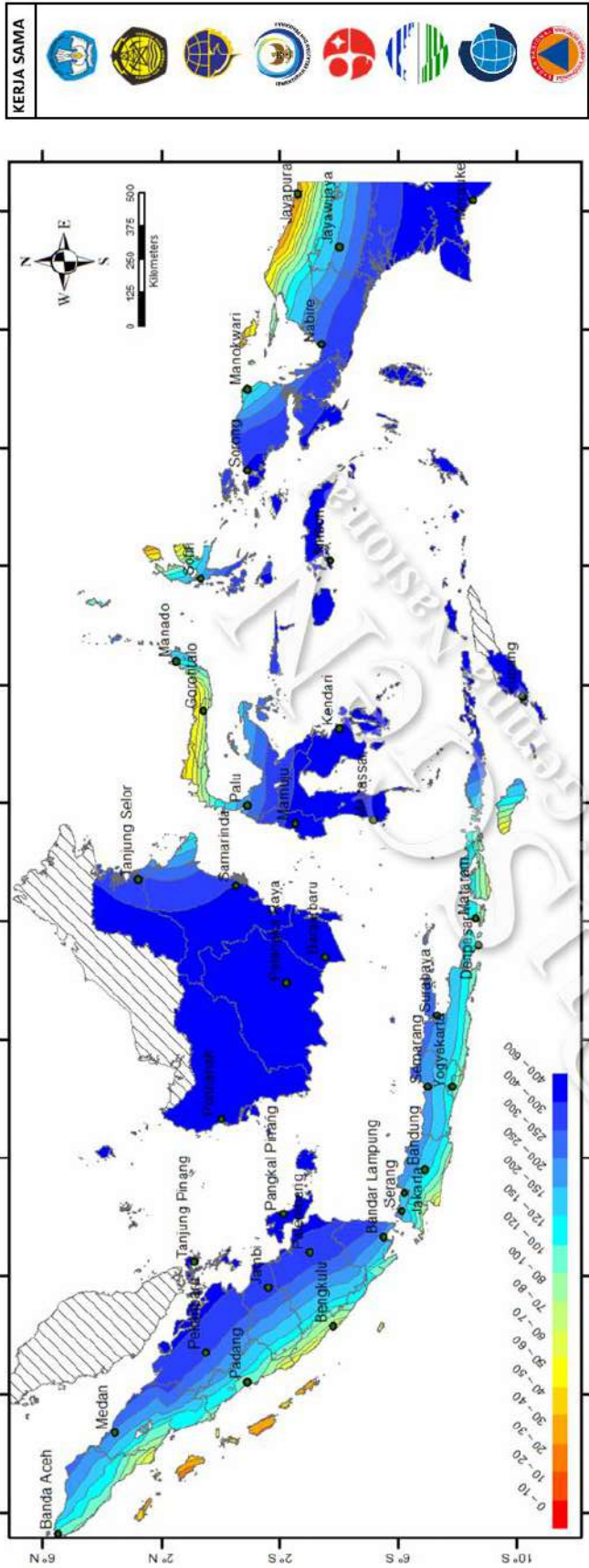
Lampiran 26 Peta Deagregasi Jarak Megathrust 0,2 detik



 PuSGeN Pusat Studi Gempa Nasional National Center for Earthquake Studies	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	 Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoljono, M.Sc
---	--	---	--

Gambar L2.83 Peta deagregasi Jarak (R) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

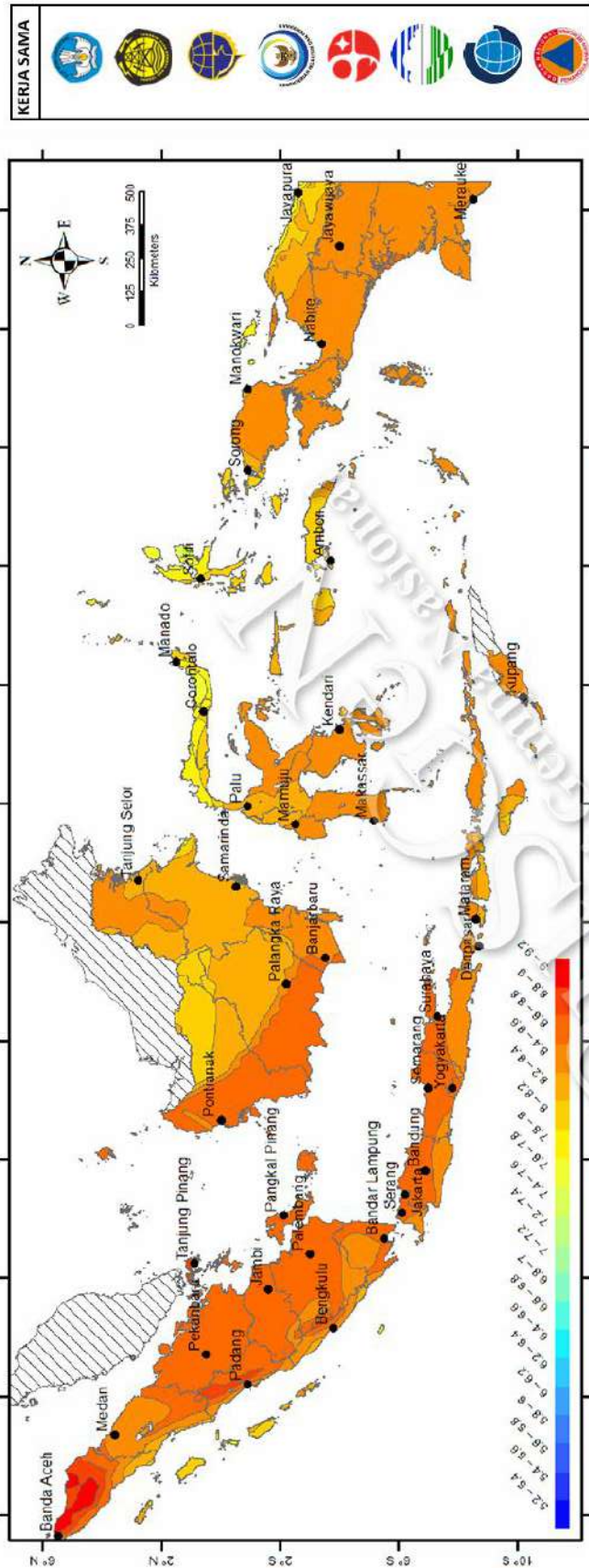
Lampiran 27 Peta Deagregasi Jarak Megathrust 3 detik



 PuSGeN Pusat Studi Gempa Nasional National Center for Earthquake Studies	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)
	 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
PETA DEAGREGASI BAHAYA GEMPA INDONESIA UNTUK PERENCANAAN DAN EVALUASI INFRASTRUKTUR TAHAN GEMPA Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeliono, M.Sc	

Gambar L2.84 Peta deagregasi Jarak (*R*) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

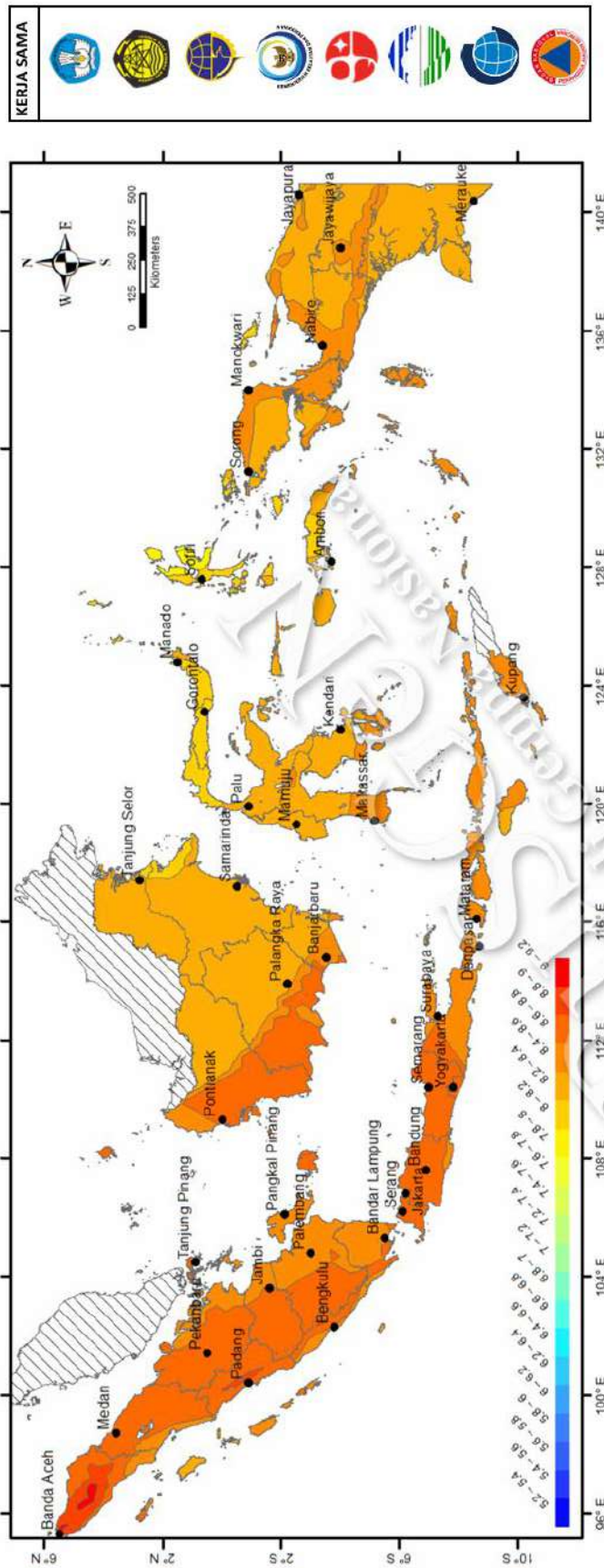
Lampiran 29 Peta Deagregasi Magnitudo Megathrust 0,2 detik



	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	 Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeljono, M.Sc
---	--	---	---

Gambar L2.101 Peta deagregasi Magnitudo (*M*) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 0,2-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun

Lampiran 30 Peta Deagregasi Magnitudo Megathrust 3 detik



PETA DEAGREGASI BAHAYA GEMPA INDONESIA UNTUK PERENCANAAN DAN EVALUASI INFRASTRUKTUR TAHAN GEMPA		
PusGen Pusat Studi Gempa Nasional National Center for Earthquake Research	Tim Penyusun : 1. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D. (Penasehat) 2. Prof. Ir. Sri Widyantoro, M.Sc., Ph.D. (Ketua) 3. Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua) 4. Dr. Ir. M. Asrurifak, MT. (Ketua Pokja PSHA merangkap ketua tim) 5. Dr. Mohamad Ridwan (Anggota Pokja Geofisika Gempa) 6. Jeremy Sean Kadarman, S.T. (Anggota Pokja PSHA) 7. Arifan Jaya Syahbana, S.T., M.Eng (Anggota Pokja PSHA) 8. Dr. Bambang Setiadi (Anggota Pokja PSHA)	Jakarta, 29 November 2022 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeliono, M.Sc
	Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat	

Gambar L2.102 Peta deagregasi Magnitudo (M) sumber gempa *Megathrust* pada percepatan spektrum respon 3-detik dengan redaman 5% untuk periode ulang 2500 tahun