

# MODIFIKASI TIME HISTORY PERMUKAAN UNTUK PERENCANAAN GEDUNG DI PROVINSI BENGKULU BERDASARKAN SNI 8899:2020

Evan Fikri Mahendra<sup>1\*</sup>, Elvis Saputra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,  
Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

\*[17511164@alumni.uii.ac.id](mailto:17511164@alumni.uii.ac.id)

## 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:** time history, spectral matching, artificial ground motion

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

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. 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.

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).

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. 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.

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 Non Linear*.

## 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*). 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.

## Analisis Deagregasi

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. Untuk menentukan variasi dari intensitas gerak tanah berbagai mekanisme sumber gempa, penyusunan *ground motion prediction equation* (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.

## *Time History*

*Time History* merujuk pada rekaman rinci dari gerakan tanah yang diukur selama kejadian gempa bumi, yang menunjukkan variasi percepatan, kecepatan, dan perpindahan tanah terhadap waktu. 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).

## METODOLOGI

### Pengumpulan Data

Pengumpulan Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data historis kejadian gempa 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. 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.

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 <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/> untuk SNI 1726:2019. Kemudian data kecepatan geser rata-rata tanah di kedalaman 30 m ( $Vs30$ ) didapatkan dari website <https://www.usgs.gov/>.

### Deagregasi Hazard dan Penentuan Target Respon Spektrum

Deagregasi *hazard* dilakukan dengan menghitung tingkat bahaya gempa berdasarkan kumpulan data kejadian gempa dan prediksi gerakan tanah di masa depan dalam jangka waktu tertentu untuk menentukan kemungkinan magnitudo ( $M$ ) dan jarak ( $R$ ) dari sumber gempa. Penentuan target respon spektrum dilakukan berdasarkan SNI 1726:2019 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 kelas situs yang berlaku.

### Pemilihan dan Modifikasi Rekaman Gerak Tanah

11 pasang gerak tanah horizontal harus dipilih untuk setiap target spektrum respons. Modifikasi rekaman gerak tanah dicocokkan dengan respons spektrum target harus mengikuti rentang periode yang ditentukan, 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.

### Penskalaan Amplitudo dan Pencocokan Spektral

Penskalaan Amplitudo, untuk setiap pasang gerak tanah spektrum arah maksimum harus dibuat dengan menggunakan dua komponen gerak horizontal secara simultan. 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.

### Artificial Ground Motion

Penentuan percepatan *artificial Time History* digunakan *actual Time History* yang diambil dari katalog gempa PEER NGA-West dan UCLA NHR3 yang di asumsikan terjadi di batuan dasar.

## ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### Deagregasi Hazard

Hasil dari analisis deagregasi gempa yang dilakukan berdasarkan panduan Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastuktur Gempa untuk wilayah Provinsi Bengkulu dengan sumber gempa *Shallow Crustal*, *Benioff*, dan *Megathrust*. Pengamatan dilakukan pada level bahaya gempa PGA, 0.2 detik, dan 3 detik dengan redaman 5% untuk

probabilitas 2% atau dengan periode ulang 2475 tahun,  $V_{s30}$  yang digunakan merupakan situs Tanah Sedang dengan nilai  $V_{s30} = 175-350$  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.

Fungsi deagregasi yang digunakan pada penelitian ini merupakan turunan dari fungsi atenuasi yang telah diperhitungkan dalam pembuatan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia sehingga penggunaannya 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.

Hasil dari deagregasi ini nantinya digunakan sebagai filter untuk mencari data gempa serupa dengan lokasi site yang pernah terjadi di seluruh dunia yang dapat dilihat pada table 1 berikut.

Tabel 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

### 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*.

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 untuk sumber gempa *Shallow Crustal* dan website UCLA NHR3 untuk sumber gempa subduksi dengan nilai pemilihan spektral rotasi digunakan RotD100 (*Rotation of Direction 100%*).

Data yang nantinya digunakan untuk pencocokan terdiri dari 2 data AT2 untuk komponen gerak tanah arah horizontal. 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.

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

Hasil dari pemilihan rekaman gerak tanah untuk masing-masing sumber gempa dapat dilihat pada table berikut.

Tabel 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	SMART1101	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

Tabel 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.

Tabel 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.

Tabel 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.

### Respon Spektra Target $MCE_R$

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. Penentuan parameter tersebut didapatkan menggunakan aplikasi respon spektra yang dapat diakses secara online melalui web <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/>.

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:

$$S_s = 1,5 \text{ g}; S_1 = 0,6 \text{ g}; F_a = 1; F_v = 1,7; S_{MS} = 1,5 \text{ g}; S_{M1} = 1,02 \text{ g}; S_{DS} = 1 \text{ g}; S_{D1} = 0,68 \text{ g}.$$

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. 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 3 berikut.

Tabel 3 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

### Rentang Periode Pencocokan

Periode fundamental struktur, T, dalam arah yang ditinjau 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 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.

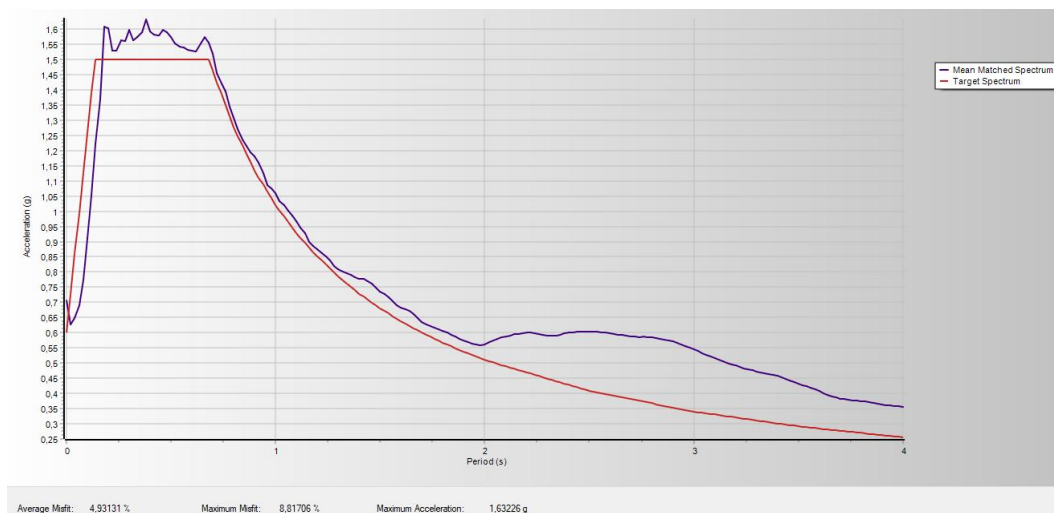
## Modifikasi Gerak Tanah

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. 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.

### *Spectral Matching*

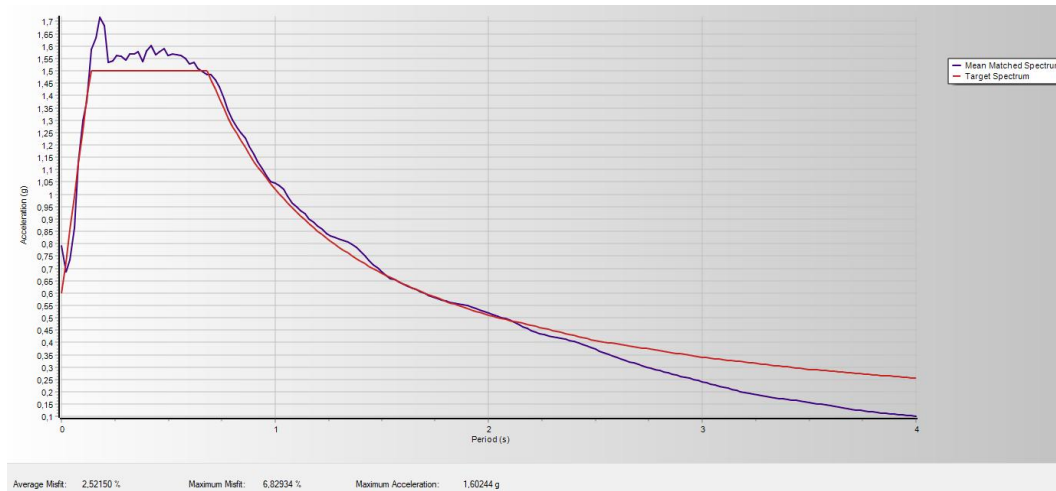
Proses *matching* untuk masing-masing sumber gempa dilakukan dengan menginput 11 pasang data RSN yang telah dipilih seperti yang terdapat pada tabel 2-5 ke dalam aplikasi SeismoMatch. Setelah *matching* 11 pasang data tersebut selesai, didapatkan hasil berupa visualisasi *accelerogram* berupa kurva percepatan-periode serta spektra rata-rata tercocok yang dapat dilihat pada gambar berikut.

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 1 dapat dilihat apabila kurva dari spektra gempa tercocok 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 misfit* < 10%, dan *Maximum misfits* < 30% dan nilai maksimum  $S_a = 1,60162$  g.



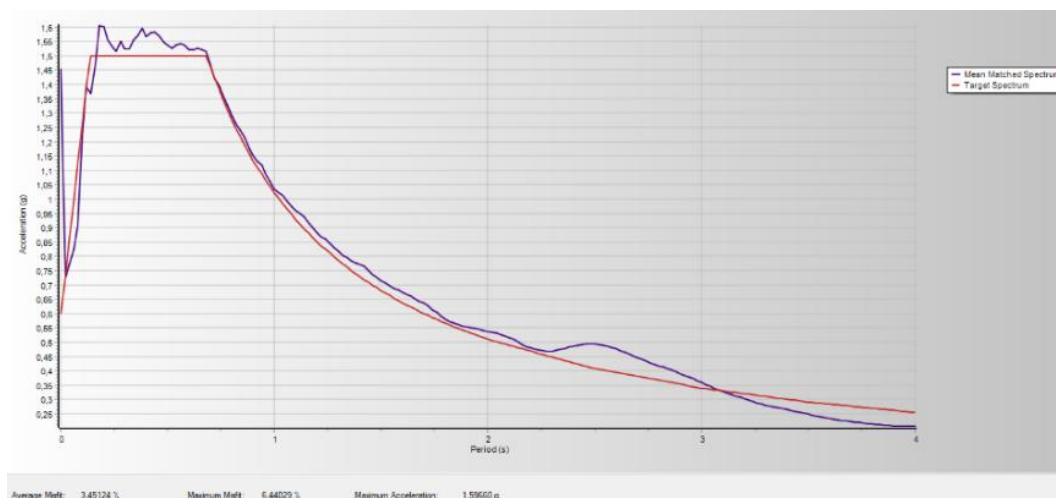
Gambar 1 Spektra Gempa Tercocokan Sumber Gempa *Shallow Crustal*

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 2 dapat dilihat apabila kurva dari spektra gempa tercocokkan 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 misfit* < 10%, dan *Maximum misfits* < 30% dan nilai maksimum  $S_a = 1,60244$  g.



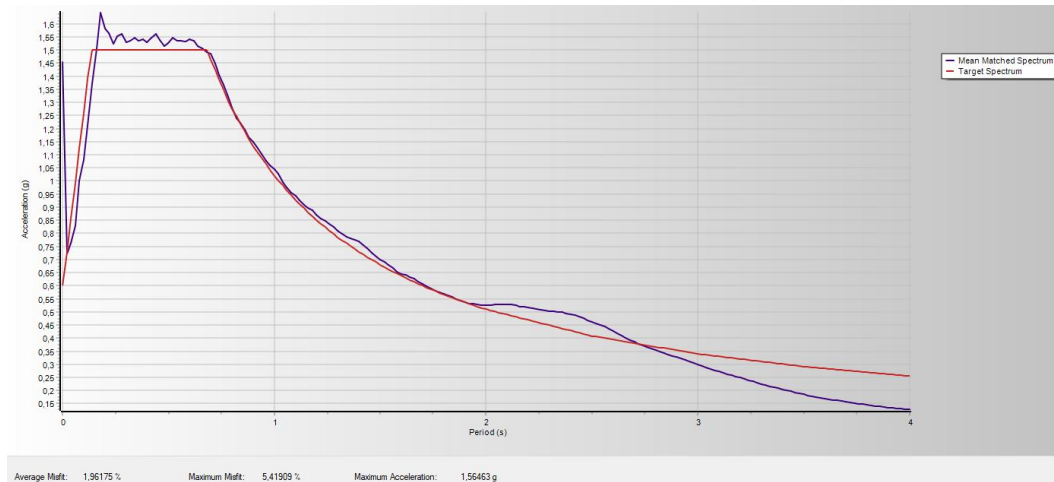
Gambar 2 Spektra Gempa Tercocokkan Sumber Gempa *Benioff*

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 3 dapat dilihat apabila kurva dari spektra gempa tercocokkan 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 misfit* < 10%, dan *Maximum misfits* < 30% dan nilai maksimum  $S_a = 1,59660$  g.



Gambar 3 Spektra Gempa Tercocokkan Sumber Gempa *Megathrust*

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 4 dapat dilihat apabila kurva dari spektra gempa tercocokkan 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 misfit* < 10%, dan *Maximum misfits* < 30% dan nilai maksimum  $S_a = 1,56463$  g.

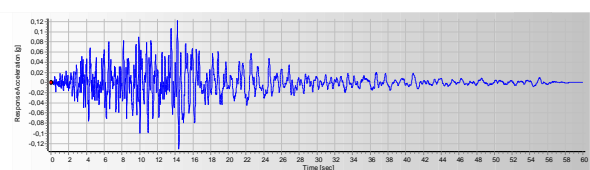


Gambar 4 Spektra Gempa Tercocokkan Sumber Gempa Kombinasi

### Artificial Ground Motion Design

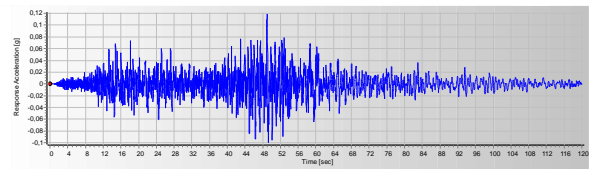
Gerak tanah (*ground motion*) merupakan data percepatan riwayat waktu (*Time History acceleration*) di batuan dasar yang merupakan bagian dari data gempa yang diperlukan untuk menganalisis perambatan gelombang geser seismik pada lapisan tanah. Data yang digambarkan dari hasil analisis ini berupa gambaran spesifik mengenai kondisi geologi dan parameter kegempaan, antara lain nilai maksimum percepatan gempa, durasi, dan frekuensi. Setelah proses pencocokan spektra selesai dan didapatkan data spektra gempa tercocokkan masing-masing data dilakukan 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*. 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.

Pada data sumber gempa *Shallow Crustal* dari hasil *generate* grafik didapatkan nilai *Max Acceleration (PGA)* = 0,13126 g. *Accelerograms* untuk *time series* untuk rata-rata gempa tercocokkan dari sumber gempa *Shallow Crustal* dapat dilihat pada gambar 5.



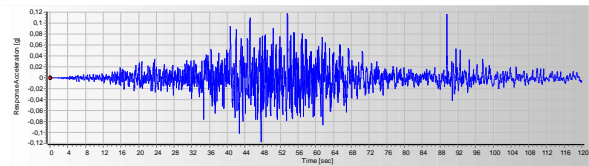
Gambar 5 Mean Matched Shallow Crustal Time History Accelerograms

Pada data sumber gempa *Benioff* data dari *generate* grafik didapatkan nilai *Max Acceleration (PGA)* = 0,11892 g. *Accelerograms* untuk *time series* untuk rata-rata gempa tercocokkan dari sumber gempa *Benioff* dapat dilihat pada gambar 6.



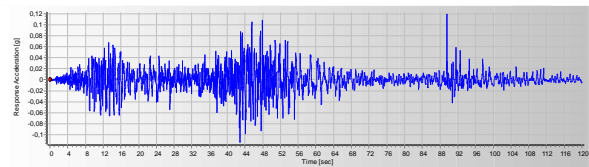
Gambar 6 Mean Matched Benioff Time History Accelerograms

Pada data sumber gempa *Megathrust* dari *generate* grafik didapatkan nilai *Max Acceleration* (PGA) = 0,11813 g. *Accelerograms* untuk *time series* untuk rata-rata gempa tercocok dari sumber gempa *Megathrust* dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7 Mean Matched Megathrust Time History Accelerograms

Pada data kombinasi sumber gempa dari *generate* grafik didapatkan nilai *Max Acceleration* (PGA) = 0,11951 g. *Accelerograms* untuk *time series* untuk rata-rata gempa tercocok dari kombinasi sumber gempa dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8 Mean Matched Time History Accelerograms Kombinasi

## KESIMPULAN

Dari ketiga jenis sumber gempa didapatkan hasil kecocokan terbaik berasal dari gempa kombinasi dengan *Average misfit* 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.

## DAFTAR PUSTAKA

- Asrurifak, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Farid, M., Misliniyati, R., Amri, K., Mase, L. Z., Supriani, F. (2024). *Seismic Response in Muara Bangkahulu Sub-District, Bengkulu City Using The Concept of Wave Propagation*. Jurnal Pensil : Pendidikan Teknik Sipil 13 (2024) 214-329 ISSN: 2623-1085.
- 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.
- 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 Conferences 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, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. ISBN: 978-602 5489-01-3.
- PUSKIM. (2019). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2019*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- 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.