

Desain Tahan Gempa Jembatan Ngarai Sianok di Bukittinggi, Sumatera Barat - Indonesia

NURUL HAKIM¹, ENKON K. KERTAPATI², SUHARA¹, EDWARD V. M.¹

1. PT. Maratama Cipta Mandiri
 2. Pusat Penelitian Geologi
- Email: nurul_nig@yahoo.com

ABSTRAK

Jembatan Ngarai sianok dibuat dengan struktur jembatan cable stayed dengan panjang bentang 685 m. Memiliki tinggi pilar 173,5 m. Jembatan ini berada di samping sesar aktif Ngarai sianok sejauh 162 m. Kondisi jembatan yang berada sangat dekat dengan lokasi sumber gempa sesar Ngarai Sianok, membuat analisis bahaya gempa Jembatan Ngarai Sianok mengacu pada perilaku khusus Sesar. Dalam perencanaan struktur bangunan, beban gempa rencana untuk analisis respon dinamik digunakan respon spektrum dari karakteristik sesar Ngarai Sianok.

Metoda analisis yang digunakan yaitu metode Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) dan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). Analisis perambatan gelombang menghasilkan rekomendasi respon spektrum desain permukaan untuk periode ulang gempa 950 tahun dengan PBA = 0,973g. Perbandingan respon spektrum permukaan di lokasi jembatan Ngarai Sianok menunjukkan bahwa hasil analisis perambatan gelombang cenderung lebih dekat ke Tanah Keras untuk klasifikasi site dari SNI 03-1726-2016 untuk PBA = 0,97g.

Kata kunci: *cable-stayed, sesar, ground motion, respon spektrum.*

ABSTRACT

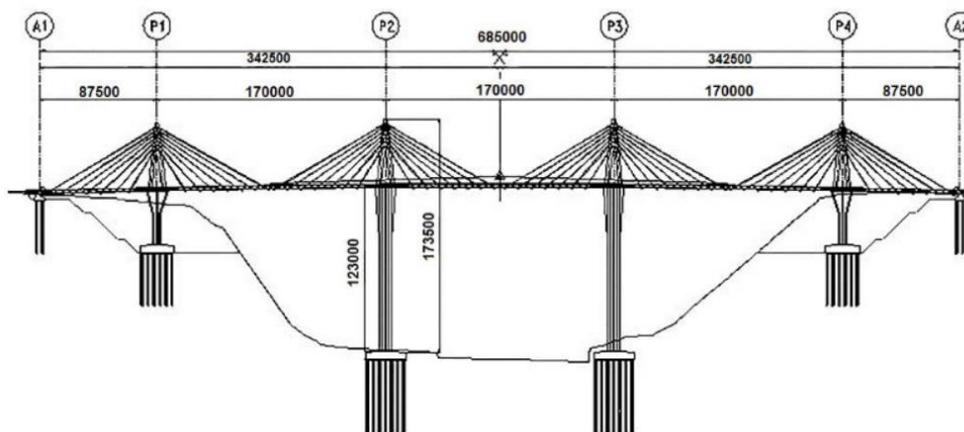
Ngarai Sianok Bridge is made with a Cable Stayed bridge structure with a span length of 685 m. Has a pillar height of 173.5 m. This bridge is beside the active canyon sianok as far as 162 m. The condition of the bridge which is very close to the location of the Ngarai Sianok fault source, made an earthquake hazard analysis of the Ngarai Sianok Bridge referring to the special behavior of Fault. In planning the structure of the building, the earthquake load planned to analyze the dynamic response used a spectra response from the characteristic character of the Ngarai Sianok fault.

The analytical method used is the Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) method and Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). Wave propagation analysis results in a recommendation of a surface design response for the return period of a 950 year earthquake with PBA = 0.973g. Comparison of the surface spectrum response at the Ngarai Sianok bridge location shows that the results of the wave propagation analysis tend to be closer to hard soil for the site classification of SNI 03-1726-2016 for PBA = 0.97g.

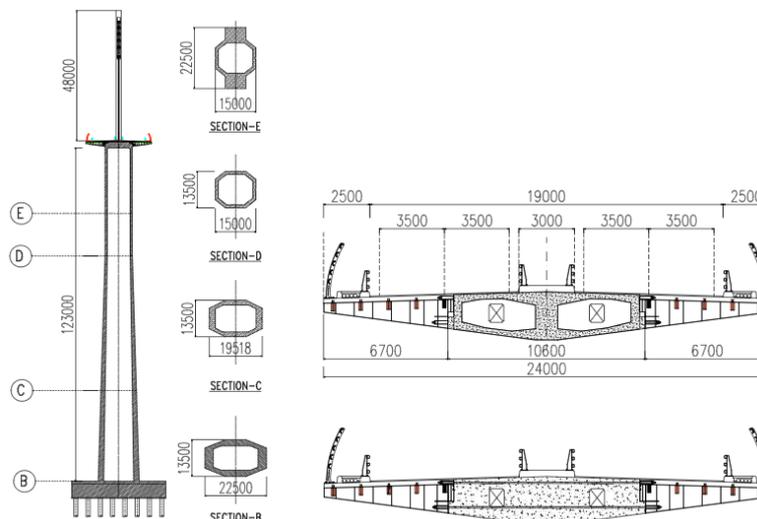
Keywords: *cable stayed, fault, ground motion, spectra response.*

1. PENDAHULUAN

Merespon pertumbuhan ekonomi masyarakat di segala bidang yang bermuara kepada kemakmuran masyarakat khususnya di Kota Bukittinggi – Sumatera Barat. Pembangunan jembatan yang melintasi Lembah Ngarai Sianok perlu segera dilakukan. Jembatan Ngarai Sianok memiliki struktur desain jembatan *cabl stayed* dengan panjang bentang 685 m. dengan tinggi pilar 173,5 m. Jembatan ini akan menjadi jembatan *cabl stayed* tertinggi di Indonesia. Tampak memanjang dan detail jembatan dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**.



Gambar 1. Tampak memanjang rencana Jembatan Ngarai Sianok



Gambar 2. Dimensi pilar dan lantai rencana Jembatan Ngarai Sianok

Mengingat posisinya, lokasi rencana Jembatan Ngarai Sianok-Bukittinggi ini terletak di daerah kondisi geologi yang relatif tidak kompleks akan tetapi dikelilingi oleh sumber-sumber gempa, oleh karena itu maka jembatan ini harus aman terhadap ancaman gempa bumi dan seyogyanya jembatan tersebut secara prinsip harus kokoh dari ancaman gaya gempa bumi yang akan menggongcangnya. Sehingga dengan demikian, untuk keselamatan bangunan Jembatan Ngarai Sianok tersebut akan dilakukan kajian geologi, sejarah kegempaan, pengumpulan data kegempaan sekunder, karakterisasi sumber-sumber gempa bumi, analisis bahaya gempa bumi dan analisis efek dari kondisi tanah lokal. Maka dari itu, obyek utama

2. ANALISIS BAHAYA GEMPA

Fenomena gempa bumi yang terjadi di permukaan tanah adalah suatu gerakan tiba-tiba yang parameter kekuatannya dinyatakan dalam percepatan, kecepatan dan simpangan. Secara garis besar, tingkat kerusakan yang mungkin terjadi tergantung dari besaran dan kedalaman, serta lama getaran gempa, kondisi geologi dan geotektonik lokasi bangunan, dan percepatan tanah di lokasi bangunan akibat dari getaran suatu gempa bumi serta kualitas bangunan itu sendiri.

Oleh karena itu, salah satu cara untuk bisa mengantisipasi efek primer dari gempa adalah mendesain struktur bangunan agar tahan terhadap guncangan tersebut. Dalam perencanaan struktur bangunan, beban gempa rencana untuk analisa respon dinamik biasanya digunakan Respon Spektrum dan a_{maks} permukaan. Untuk mendapatkan nilai respon spektrum dan a_{maks} permukaan ada tahapan analisis yang harus dilalui dimana tahapannya adalah:

1. Identifikasi model sumber gempa.
2. Analisa perambatan gelombang gempa, model fungsi atenuasi.
3. Analisa probabilitas, penentuan a_{maks} di batuan dasar.
4. Penentuan *ground motion*.
5. Analisa perambatan gelombang di deposit tanah.
6. Pembuatan respon spektrum rencana dan a_{maks} permukaan tanah.

Fenomena gempa dapat digambarkan sebagai pelepasan energi oleh batuan bumi yang mengalami *stress* (baik regangan maupun tekanan) setelah mengalami akumulasi dalam jangka waktu tertentu sesuai dengan sifat fisik batuan buminya. Semakin tinggi kekuatan batuan dalam menahan *stress* semakin besar pula energi yang dilepaskan. Dengan kata lain; semakin besar periode ulang suatu gempa semakin besar pula magnitude gempa yang akan terjadi, dan semakin besar magnitude gempa makin besar pula percepatan tanah yang terjadi di suatu tempat; sehingga tingkat risiko bangunan terhadap gempa bumi bisa terkait dengan periode ulang gempa bumi.

Analisa *hazard gempa* (*seismic hazard analysis*) sering dipakai untuk menentukan tingkat pembebanan yang mungkin akan terjadi pada suatu tempat. Terdapat 2 (dua) metode perhitungan yang bisa dikerjakan; yaitu *Deterministic Seismic Hazard Analysis* (DSHA) yang akan menjawab untuk mengetahui perilaku gerakan tanah jika gempa terjadi (Frankel, 1996), sementara *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) digunakan untuk menganalisis berapakah probabilitas melebihi gerakan tanah yang ditentukan selama periode waktu tertentu atau apa gerakan tanah yang memiliki probabilitas tertentu untuk dilampaui selama periode waktu tertentu (Frankel, 1996).

Paramater-parameter data paleo-seismik, seismik, geologi-geotektonik sangat diperlukan di dalam karakterisasi zona sumber gempa sebagai potensi seismogenik di sekitar Lokasi rencana Jembatan Ngarai Sianok Bukittinggi. Pada umumnya, kewenangan spesifik geologi tertuju kepada fitur-fitur tektonik, seperti struktur sesar yang dapat menerangkan dimana gempa bumi telah terjadi atau kejadian gempa masa lalu. Oleh karena itu, hal tersebut sangat diperlukan untuk pengembangan analisis deterministik ataupun analisis probabilistik guncangan gempa. Berdasarkan pada karakteristik tektonik, geologi, seismologi berikut aspek geofisika yang diketahui ataupun tidak diketahui, maka daerah lokasi rencana Jembatan Ngarai Sianok-Bukittinggi dibagi ke dalam beberapa zona-zona sumber gempa dengan radius kira-kira 300 km. Gempa-gempa berjarak lebih jauh dari jarak tersebut pada umumnya tidak merusak bangunan. Sumber gempa dan pemodelannya berdasarkan hasil rekomendasi dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2** berikut:

Tabel 1. Estimasi Karakteristik Potensi Sumber Gempa Patahan (*Fault*) untuk Jembatan Ngarai Sianok

No	<i>Fault Name</i>	<i>Slip-Rate</i> [mm/yr]	<i>Sense</i>	<i>Dip</i> [deg]	<i>Top</i> [km]	<i>Bottom</i> [km]	M_{maks}	Desain
1	Renun	27	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,8	
2	Toru	24	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,4	
3	Angkola	19	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,6	
4	Barumun	19	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,5	
5	Sumpur	19	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	6,9	
6	Sianok	19	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,3	
7	Sumani	19	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,2	
8	Suliti	19	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,4	
9	Siulak	11	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,2	
10	Dikit	11	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,2	
11	Ketaun	11	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,3	
12	Musi	11	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,2	
13	Manna	11	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,3	
14	Kumering	11	<i>Strike-slip</i>	90	3	20	7,6	

Tabel 2. Estimasi Karakteristik Potensi Sumber Gempa *Background* untuk Jembatan Ngarai Sianok

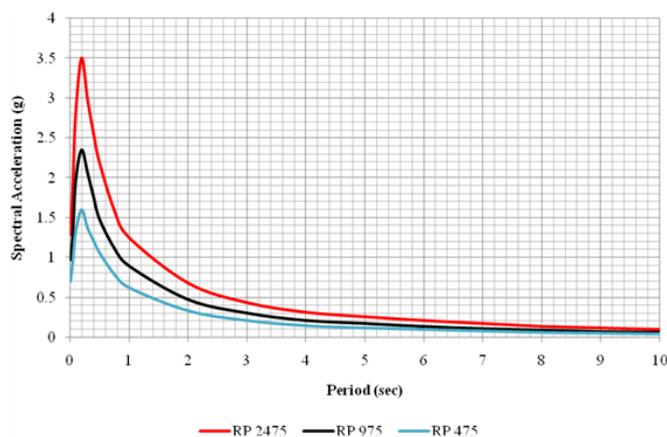
<i>Background Condition</i>	<i>Depth of Background</i> [km]	<i>Magnitude</i>		<i>b-value</i>	<i>a-value</i>
		Minimum	Maksimum		
<i>Shallow Background</i>	0 - 10	5	6,5	1	4,772
	10 - 20	5	6,5	1	4,795
	20 - 30	5	6,5	1	5,011
	30 - 40	5	6,5	1	5,702
	40 - 50	5	6,5	1	5,094
<i>Intermediate-Deep Background</i>	50 - 75	5	7,2	1	5,147
	75 - 100	5	7,2	1	5,224
	100 - 150	5	7,2	1	5,355
	150 - 200	5	7,2	1	5,152
	200 - 300	5	7,2	1	5,132

Tabel 3. Estimasi Karakteristik Potensi Sumber Gempa Subduksi (*Subduction*) untuk Jembatan Ngarai Sianok

No	<i>Suduction Name</i>	M_{maks} History	<i>b-value</i>	<i>a-value</i>	M_{maks} (Desain)		<i>Slip-Rate</i> [mm/yr]
					GR	Char	
1	Mid-1 Sumatera	8,7 (28-03-2005)	0,878	4,71	8,7	8,7	60
2	Mid-2 Sumatera	8,5 (12-09-2007)	0,97	5,35	8,5	8,5	60

2.1 Analisis Probabilistik Seismic Hazard Analisis

Tiga *level hazard* dihitung, yaitu 10 % *in 50 years probability of exceedance* (RP 475 tahun), 5 % *in 50 years probability of exceedance* (RP 975 tahun) dan 2 % *in 50 years probability of exceedance* (RP 2475 tahun) dengan referensi *base-rock* untuk lokasi rencana Jembatan Ngarai Sianok. *Uniform Hazard Spectra* (UHS) dan hasil deagregasi untuk *level hazard* RP 475, dan RP 975 tahun juga dihitung. **Gambar 5** dan **Tabel 4** memperlihatkan *Uniform Hazard Spectra* (UHS) dari *site* Jembatan Ngarai Sianok.

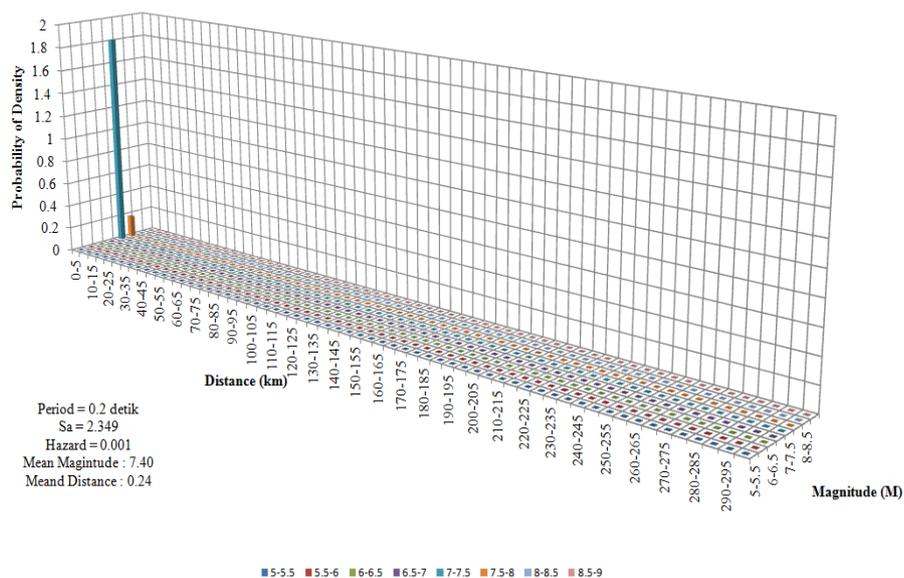


Gambar 5. UHS lokasi Jembatan Ngarai Sianok

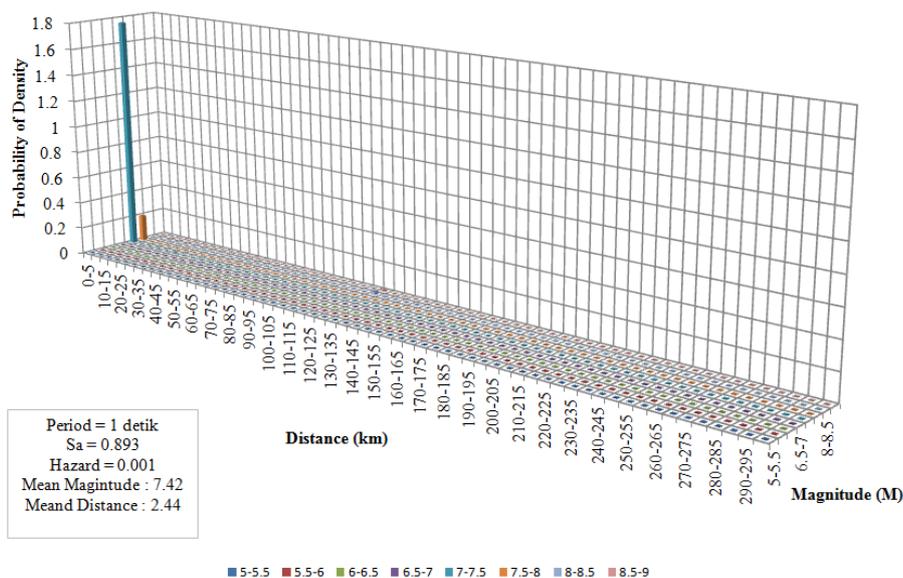
Tabel 4. Digitasi UHS untuk Periode PBA 0,2 detik dan 1,0 detik disetiap Level Hazard

Periode	Acceleration [g]		
	RP 475	RP 975	RP 2475
	PSHA 2013	PSHA 2013	PSHA 2013
PBA	0.690	0.973	1.289
0,2 detik	1.603	2.349	3.500
1,0 detik	0.620	0.893	1.254

Hazard curve hasil dari PSHA untuk periode PBA 0,2 dan 1,0 detik dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7 yang memperlihatkan hasil De-agregasi di periode 0,2 detik dan 1,0 detik untuk periode ulang 975 tahun.



Gambar 6. De-agregasi $T = 0,2$ detik untuk RP 975 tahun



Gambar 7. De-agregasi $T = 1,0$ detik untuk RP 975 tahun

Controlling magintude dan distance dari hasil De-agregasi pada periode 0,2 dan 1,0 detik untuk periode ulang 975 tahun dapat dilihat pada **Tabel 5** dan **Tabel 6**.

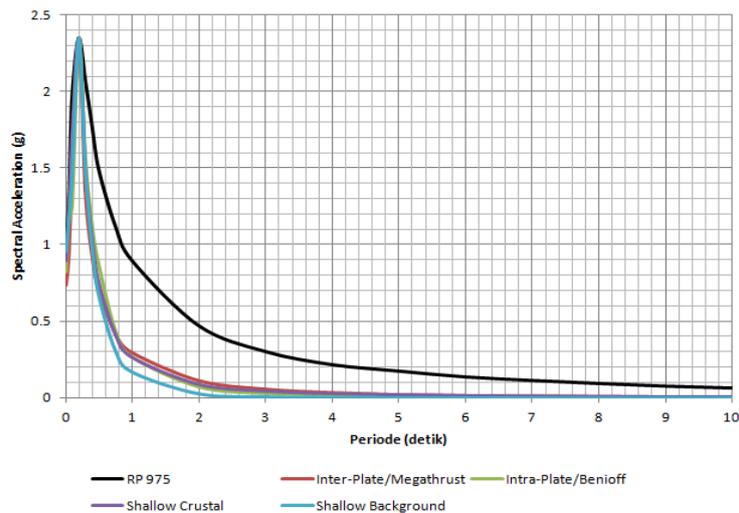
Tabel 5. Controlling Magnitude dan Distance (M,R) Hasil De-agregasi di Periode 0,2 detik RP 975

Mekanisme Gempa	M	R [km]
Inter-Plate (Megathrust)	8,60	121,59
Intra-Plate (Benioff)	7,07	95,35
Shallow Crustal	7,40	0,1
Shallow Background	6,34	69,17

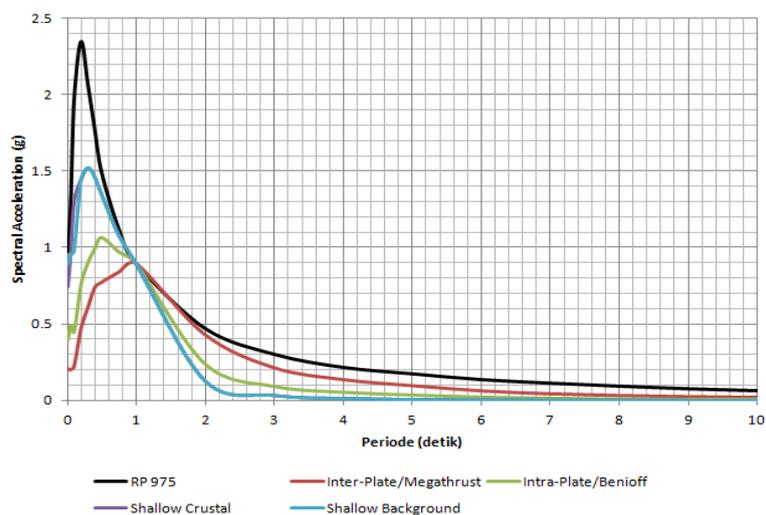
Tabel 6. Controlling Magnitude dan Distance (M,R) Hasil De-agregasi di Periode 1,0 detik RP 975

Mekanisme Gempa	M	R [km]
Inter-Plate (Megathrust)	8,47	124,96
Intra-Plate (Benioff)	7,12	95,40
Shallow Crustal	7,40	0,1
Shallow Background	6,44	52,96

Untuk probabilitas periode ulang 975 tahun akan dihasilkan *input motion sintetik*. Untuk pembuatan *input motion sintetik* dibutuhkan target spektrum pada periode pendek 0,2 detik dan panjang 1,0 detik. Target spektrum dikembangkan berdasarkan penskalaan dengan metode Conditional Mean Spectrum (Baker, 2011) untuk setiap periode pendek 0,2 detik dan periode panjang 1,0 detik. Target spektrum juga merepresentasikan dari masing-masing sumber gempa. **Gambar 8** dan **Gambar 9** memperlihatkan target spektrum dari masing-masing periode.



Gambar 8. Target spektrum untuk periode 0,2 detik RP 975

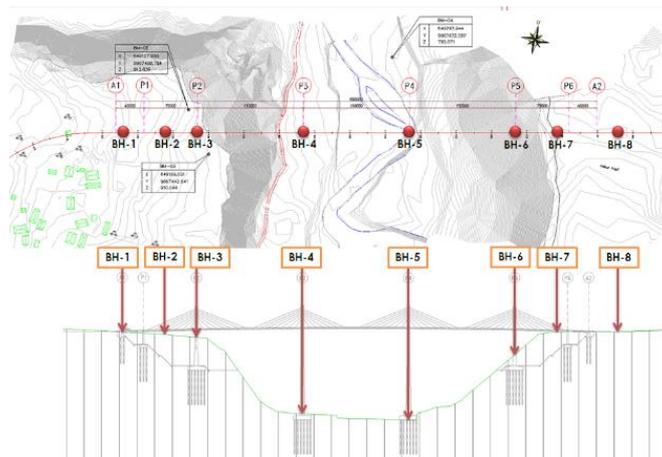


Gambar 9. Target spektrum untuk periode 1,0 detik RP 975

Berdasarkan target spektrum pada **Gambar 8** dan **Gambar 9** di atas, *input motion sintetik* dibuat dengan menggunakan metode RSPMATCH99. Lima *input motion* digunakan untuk masing-masing periode dan masing-masing periode ulang dicocokkan.

2.2 Analisis Perambatan Gelombang

Penyelidikan tanah di lokasi rencana Jembatan Ngarai Sianok dilakukan sebanyak 8 (delapan) titik dengan kedalaman maksimum sampai 40 meter. *Layout* titik-titik pengeboran ditunjukkan seperti pada **Gambar 10**. Untuk area tebing barat dilakukan 3 (tiga) titik bor dalam di BH-01 sampai BH-03, di are lembah dilakukan 2 (dua) titik bor dalam di BH-04 dan BH-05, dan area tebing timur (arah Bukit Tinggi) dilakukan 3 (tiga) titik bor dalam di BH-06 sampai BH-08. Seismic Downhole Test (SDT) dilakukan pada semua lubang bor atau sebanyak 8 (delapan) titik bor.

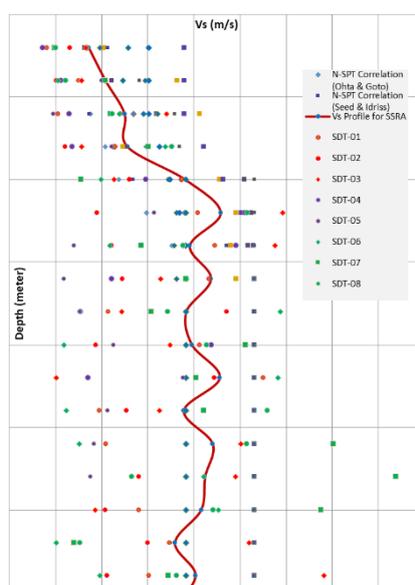


Gambar 10. Sket lokasi titik-titik bor

Secara umum, untuk area tebing barat, lapisan tanah permukaan dengan ketebalan 4–10 meter merupakan lempung kapasiran dan pasir kelempungan dengan kosistensi medium *stiff to very stiff*, dengan N-SPT = 7–19. Lapisan kedua pada kedalaman 10-15 meter merupakan *tuffaceous sand, very dense*, dengan N-SPT = 45–73. Lapisan ketiga pada kedalaman 15 meter sampai akhir pengeboran merupakan *tuffaceous sand, very dense*, dengan N-SPT >75.

Untuk area lembah, lapisan tanah permukaan dengan ketebalan 2–5 meter merupakan lempung kapasiran dan pasir kelempungan dengan kosistensi *very stiff*, dengan N-SPT = 21–24. Lapisan kedua pada kedalaman 5–15 meter merupakan *tuffaceous sand, very dense*, dengan N-SPT = 38–67. Lapisan ketiga pada kedalaman 15 meter sampai akhir pengeboran merupakan *tuffaceous sand, very dense*, dengan N-SPT >75.

Sedangkan berdasarkan data Seismic Downhole Test, lapisan pertama pada kedalaman 0–8 meter merupakan Tanah Lunak sampai Tanah Sedang dengan V_s (kecepatan gelombang geser tanah) = 81–338 m/s. Lapisan kedua pada kedalaman 8–35 meter (akhir pengeboran) merupakan Tanah Sedang sampai Tanah Keras dengan V_s = 214-550 m/s (dengan selingan lensa pasir lepas).



Gambar 11. Kecepatan gelombang geser sebagai fungsi kedalaman untuk lokasi jembatan Ngarai Sianok mengacu kepada data N-SPT dan Seismic Downhole Test

Selanjutnya, untuk keperluan analisis perambatan gelombang dari batuan dasar ke permukaan tanah, parameter kecepatan gelombang geser tanah (V_s) ditentukan berdasarkan data korelasi N-SPT dan SDT hasil pengukuran lapangan pada lokasi rencana jembatan. Batuan dasar (*baserock*) dengan kecepatan gelombang geser lebih dari $V_s = 760$ m/s diasumsikan berada pada kedalaman 100 meter. **Gambar 11** menunjukkan data kecepatan gelombang geser berdasarkan hasil korelasi dari N-SPT dan SDT, serta rekomendasi V_s desain sebagai fungsi kedalaman untuk lokasi jembatan Ngarai Sianok.

Analisis respon *site*-spesifik (*Site Specific Response Analysis*, SSRA) dilakukan dengan program komputer NERA untuk untuk PBA = 0,973g untuk periode ulang 950 tahun berdasarkan kondisi spesifik profil kecepatan gelombang geser di lokasi rencana jembatan Ngarai Sianok.

Hasil analisis untuk periode ulang gempa 950 tahun yang menunjukkan respon spektrum permukaan hasil analisis perambatan gelombang waktu berdasarkan profil kecepatan gelombang geser (V_s) tanah rata-rata dari hasil korelasi N-SPT rangkuman respon spektrum desain dalam tabulasi yang menunjukkan percepatan gempa sebagai fungsi periode (detik) untuk PBA = 0,973 g, ditampilkan pada **Tabel 7**.

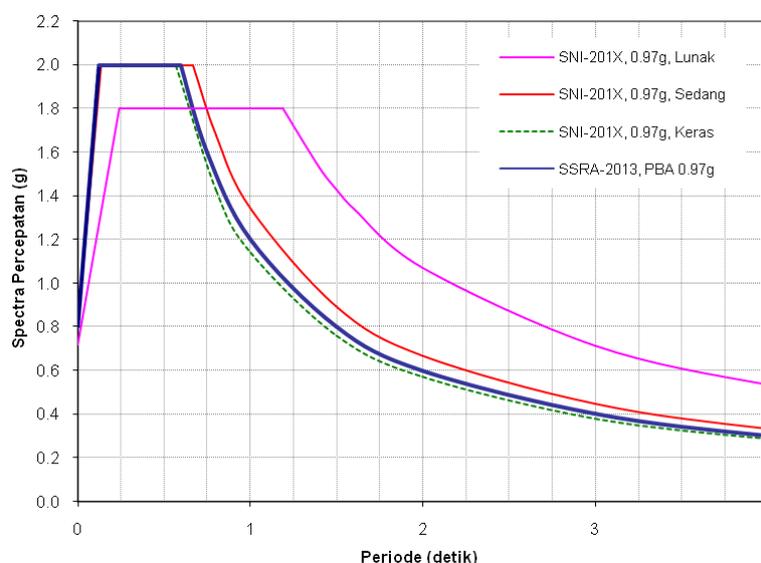
Tabel 7. Rekomendasi Respon Spektrum Desain yang Sesuai pada Periode Rendah dan Periode Tinggi [detik], untuk Periode Ulang Gempa 950 tahun, PBA = 0,73g

PBA = 0,973g	
$T_s = 0,60$ sec, $C_a = 0,80g$,	
$C_v = 1,20$	
T [detik]	S_a-desain [g]
0,00	0,80000
0,12	2,00000
0,60	2,00000
1,00	1,20000
1,20	1,00000
1,50	0,80000
2,00	0,60000
2,50	0,48000
3,00	0,40000
3,50	0,34286
4,00	0,30000
4,50	0,26667
5,00	0,24000
6,00	0,20000
7,00	0,17143
8,00	0,15000
9,00	0,13333
10,00	0,12000

Selanjutnya respon spektrum desain yang dikembangkan dari hasil analisis perambatan gelombang untuk periode ulang gempa 950 tahun dengan PBA = 0,963g mengacu kepada hasil PSHA di lokasi jembatan Ngarai Sianok dibandingkan dengan respon spektrum SNI 03-1726-2016 untuk periode ulang bangunan 0–4 detik, seperti ditunjukkan pada **Gambar 12**. Perbandingan respon spektrum permukaan menunjukkan bahwa hasil analisis

perambatan gelombang dengan $PBA = 0,973g$ (SSRA, 2013) ini berada diantara spektrum Tanah Sedang (SD) dan Tanah Keras (SE) dengan kecenderungan lebih dekat ke Tanah Keras (SC) untuk klasifikasi *site* dari SNI-1726-20116 dengan $PBA = 0,970g$.

Mempertimbangkan kondisi spesifik di lokasi jembatan Ngarai Sianok yang berada pada kondisi antara Tanah Sedang (SD) sampai Tanah Keras (SC) dan mengacu kepada hasil *seismic hazard* di Bukit Tinggi untuk periode ulang 950 tahun dengan $PBA = 0,973g$, maka respon spektrum desain jembatan Ngarai Sianok direkomendasikan mengacu kepada hasil SSRA ini yang telah mempertimbangkan 7 (tujuh) *input motion* untuk setiap periode yang merepresentasikan potensi gempa subduksi dan *shallow crustal*.



Gambar 12. Perbandingan respon spektrum desain hasil SSRA dengan $PBA = 0,973g$ dibandingkan dengan SNI-1726-2016 untuk $PBA = 0,970g$

3. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Berdasarkan hasil evaluasi potensi gempa dan analisis respon *site*-spesifik untuk Jembatan Ngarai Sianok, dapat disimpulkan dan direkomendasikan hal-hal sebagai berikut:

1. Target spektrum telah mempertimbangkan sumber-sumber gempa subduksi di sekitar Bukit Tinggi dan *shallow crustal faults* dalam radius 500 km dari lokasi jembatan Ngarai Sianok. Target spektrum dikembangkan untuk $PBA = 0,973g$ untuk periode ulang gempa 975 tahun berdasarkan hasil analisis sesuai *input* parameter gempa yang sudah ada sebelumnya untuk area Sumatra Barat, dengan menggunakan fungsi atenuasi yang sesuai dan tersedia pada program komputer EZ-FRISK.
2. Untuk gempa dengan kemungkinan periode ulang 950 tahun, selanjutnya dikembangkan beberapa *input motion* berdasarkan target spektrum dari gempa subduksi dan juga gempa *shallow crustal* yang diskalakan pada $T = 0,2$ detik dan $T = 1,0$ detik. Metode *spectral matching* dari beberapa data rekaman kejadian gempa digunakan untuk merekomendasikan 7 (tujuh) *input motion* untuk masing-masing periode yang merepresentasikan potensi gempa-gempa subduksi dan *shallow crustal*.
3. Seismic Downhole Test (SDT) pada 8 (delapan) lokasi digunakan untuk *input* dalam membuat profil kecepatan gelombang geser lapisan tanah sampai kedalaman 40 meter. Parameter kecepatan gelombang geser tanah tersebut juga diverifikasi berdasarkan pendekatan korelasi empiris nilai SPT dan data-data lainnya dari data pengeboran.

4. Mengacu kepada klasifikasi *site* SNI-1726-2002 & UBC-1997, maka lapisan tanah di rencana lokasi jembatan Ngarai Sianok cenderung diklasifikasikan sebagai Tanah Sedang sampai Tanah Keras.
5. Analisis perambatan gelombang telah menghasilkan rekomendasi respon spektrum desain permukaan untuk periode ulang gempa 950 tahun dengan $PBA = 0,973g$. Rekomendasi respon spektrum desain hasil analisis perambatan gelombang ini selanjutnya dibandingkan dengan respon spektrum SNI-1726-2016 untuk rentang periode 0–4 detik. Perbandingan spektrum permukaan di lokasi jembatan Ngarai Sianok menunjukkan bahwa hasil analisis perambatan gelombang ini (SSRA, 2013) ini berada diantara spektrum Tanah Sedang (*SD*) dan Tanah Keras (*SE*) dengan kecenderungan lebih dekat ke Tanah Keras (*SC*) untuk klasifikasi site dari SNI 03-1726-2016 untuk $PBA = 0,97g$.

DAFTAR RUJUKAN

- Baker, J. (2011). Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection. *Journal of Structural Engineering*, 3 (137), 322-331.
- Frankel, A. (1996). How can seismic hazard around the New Madrid Seismic Zone be similar to that in California? *Seismol. Res.Lett.*, ____ (____), 575–586.