

Kekuatan Struktur Jembatan terhadap Beban Gempa (Studi Kasus: Jembatan Cisomang Tol Purbaleunyi STA 100+700)

Khairurrijal^{1*}, Muhammad Fauzan¹ dan Sekar Mentari¹

¹ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor Kampus IPB Dramaga, PO BOX 220, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

* Penulis korespondensi: khairurrijal19@gmail.com

Abstrak: Kejadian-kejadian gempa besar yang pernah terjadi di Indonesia, mengisyaratkan bahwa upaya preventif perlu dilakukan dalam perancangan struktural pada suatu jembatan. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis besarnya gaya dalam maksimum pada kondisi layan dan ultimit, menghitung jumlah tulangan PCI girder dan *pier column*, serta menganalisis periode getar, kekakuan struktur, dan *displacement* yang terjadi. Penelitian menggunakan data sekunder *as built drawing* jembatan berupa data gambar dan dimensi girder, *deck*, *pier head*, dan *pier column* serta data material Jembatan Cisomang. Metode yang digunakan adalah pemodelan dan analisis gaya dalam menggunakan software CSI Bridge ver 22. Nilai kekakuan dari struktur Jembatan Cisomang didapatkan sebesar 176.682,1 kN/m. Besarnya perpindahan yang terjadi masih dibawah nilai *displacement* izin sebesar 168 mm. Girder dapat menahan momen dengan jumlah tendon 21 diameter 13 mm dan tulangan lentur (162D16). Namun, jumlah tendon dan tulangan lentur tersebut tidak memenuhi syarat tulangan lentur maksimum. Tulangan eksisting pada *pier column* mampu menahan gaya dalam yang bekerja sehingga tidak diperlukan tambahan tulangan.

Kata kunci: CSI Bridge; *displacement*; gempa; PCI girder

1. Pendahuluan

Menciptakan dan meningkatkan kegiatan ekonomi memerlukan sarana infrastruktur yang memadai. Sektor infrastruktur menjadi salah satu prioritas untuk mendorong laju pertumbuhan ekonomi nasional. Infrastruktur berperan penting dalam peningkatan investasi dan memperluas jangkauan partisipasi masyarakat, serta pemerataan hasil pembangunan. Semua fasilitas yang diperlukan masyarakat umum baik fisik maupun non fisik yang dibangun oleh pemerintah untuk mendukung berbagai kegiatan masyarakat dalam kehidupan sehari-hari disebut dengan infrastruktur

Melihat kondisi topografi Indonesia yang sangat beragam, menuntut adanya fasilitas yang mempermudah mobilisasi penduduk seperti jembatan. Jembatan adalah suatu bangunan yang memungkinkan menghubungkan jalan satu dengan jalan lain yang menyilang, sungai, saluran air, lembah atau menyilang jalan lain yang tidak sama permukaannya [1]. Jembatan Cisomang merupakan bagian dari ruas Jalan Tol Cikampek-Padalarang yang terletak pada STA 100+700 dengan tipe lintasan melintasi sungai Cisomang. Jembatan ini dibangun pada tahun 2002 sehingga dibutuhkan analisis kekuatan dengan acuan peraturan terbaru. Struktur atas pada Jembatan Cisomang berfungsi memikul beban langsung dari berat sendiri, beban mati tambahan, beban lalu lintas kendaraan, dan gaya rem [2].

Diterima: 13 Juli 2021

Disetujui: 31 Maret 2022

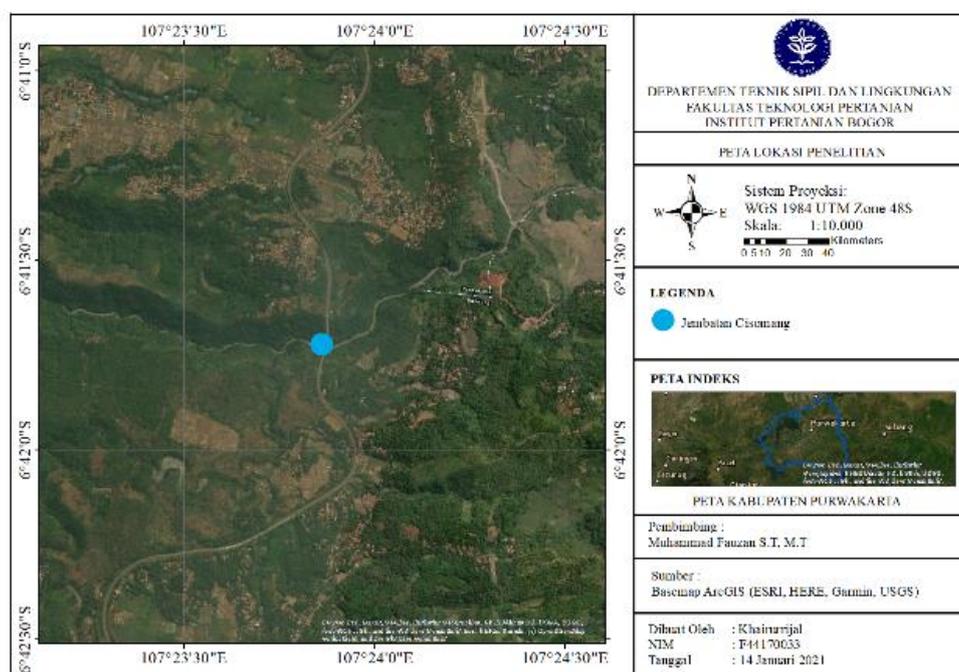
Sitasi:

Khairurrijal; Fauzan, M.; Mentari, S. Kekuatan Struktur Jembatan terhadap Beban Gempa (Studi Kasus: Jembatan Cisomang Tol Purbaleunyi STA 100+700). *J. Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2022; 7 (1): 17-32.,
<https://doi.org/10.29244/jsil.7.1.17-32>

Kejadian gempa di Indonesia yang sering disebabkan oleh letak geografi Indonesia yang berada di antara empat lempeng aktif tektonik yaitu tapal batas lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia, lempeng Filipina, dan lempeng Pasifik [3]. Gempa merupakan bencana alam yang sampai saat ini masih sangat sulit dan kompleks untuk diprediksi. Kejadian-kejadian gempa besar yang pernah terjadi di Indonesia, mengisyaratkan bahwa upaya preventif perlu dilakukan dalam perancangan struktural pada suatu jembatan [4].

2. Metodologi

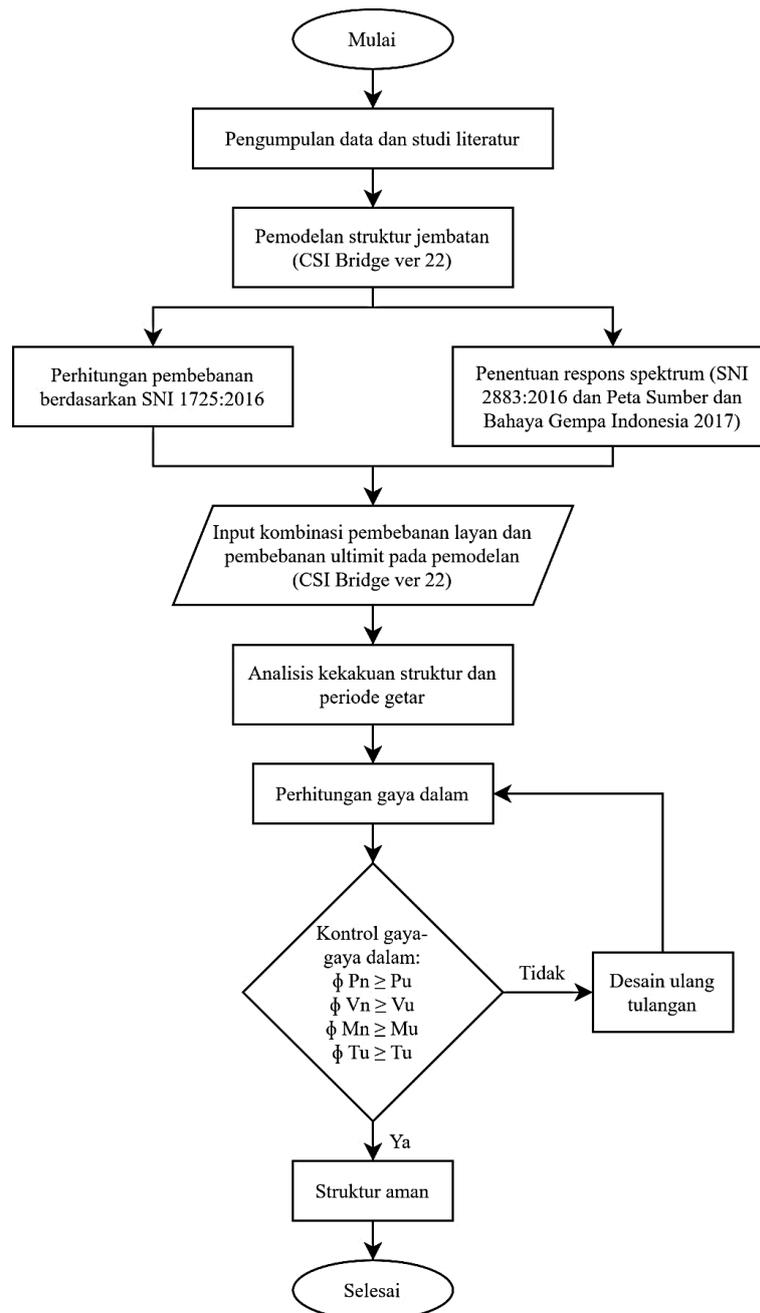
Penelitian dilakukan pada bulan Februari sampai dengan Mei 2021. Penelitian dilakukan di Jembatan Cisomang, Kabupaten Purwakarta, Provinsi Jawa Barat. Penelitian masih dapat dilakukan meskipun kondisi di tengah pandemi. Hal tersebut dikarenakan penelitian dilakukan menggunakan data sekunder. Lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian.

Sumber: Basemap ArcGIS

Prosedur penelitian diawali dengan pengumpulan data sekunder perencanaan Jembatan Cisomang. Data sekunder *as built drawing* jembatan berupa data gambar dan dimensi girder, *deck*, *pier head*, dan *pier column* serta data material jembatan dijadikan sebagai acuan untuk melakukan pemodelan dengan *software* CSI Bridge ver 22. Hasil dari pemodelan dan analisis struktur dari *software* CSI Bridge ver 22 digunakan sebagai panduan untuk analisis kombinasi pembebanan terbesar, periode getar dan kekakuan yang dialami jembatan, *displacement*, serta jumlah tulangan struktur jembatan. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 2.

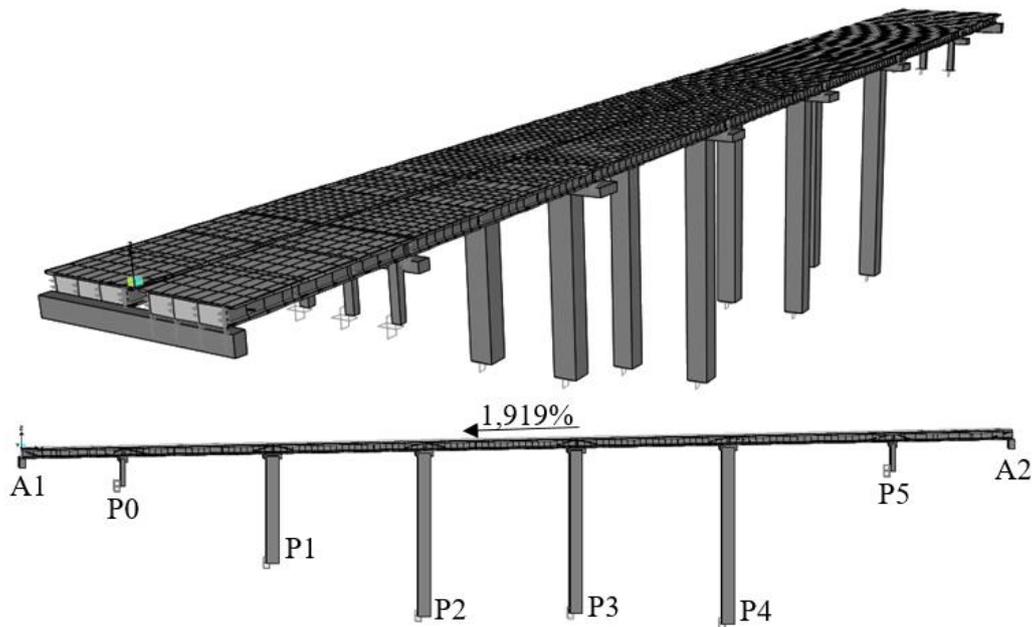


Gambar 2. Diagram alir penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pemodelan Jembatan Cisomang

Pemodelan jembatan dilakukan dengan menggunakan *software* CSI Bridge ver 22. Jembatan Cisomang adalah jembatan dua jalur yang memiliki panjang 252,13 m dengan lebar satu jalur sebesar 12,6 m. Struktur jembatan terdiri dari tujuh span dan memiliki kemiringan vertikal sebesar 1,92 %. Superstruktur jembatan pada satu jalur terdiri dari empat girder dengan tipe girder *Precast Concrete I (PCI)*. Jembatan ini dimodelkan dalam bentuk *simple beam* dan *segmental bridge*. Hasil dari pemodelan Jembatan Cisomang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pemodelan 3D jembatan Cisomang.

Data teknis Jembatan Cisomang adalah sebagai berikut:

Panjang Jembatan	: 252,13 m
Lebar Total Jembatan	: 26,9 m
Lebar Jembatan (1 jalur)	: 12,6 m
Jenis Girder	: PCI H-210
Kemiringan Vertikal	: 1,92 %
Jumlah Span	: 7
Jumlah lokasi Pier	: 6 lokasi
Mutu Beton <i>pier</i>	: 30 MPa
Mutu Beton <i>PCI Girder</i>	: 55 MPa
Mutu Beton <i>deck</i>	: 20 MPa
Jumlah jalur dan lajur	: 2 dan 6

Tabel 1. Data teknis pilar jembatan Cisomang.

Lokasi	Tinggi Pilar (m)	Jumlah Pilar	Ukuran Pilar (mm)
P0	7,81	4	1.000 x 1.250
P1	28,34	2	3.100 x 3.600
P2	42,81	2	3.100 x 3.600
P3	42,81	2	3.100 x 3.600
P4	46,45	2	3.100 x 3.600
P5	7,69	4	1.000 x 1.250

Sumber: [5]

Jembatan Cisomang memiliki dua *deck* jembatan yang ditopang pada satu lokasi *pier head*. Berdasarkan Tabel 1 tinggi pilar jembatan memiliki variasi yang beragam. Hal ini dapat terjadi karena pengaruh kontur di bawah jembatan. Data teknis panjang span dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data teknis span jembatan Cisomang.

Lokasi	Panjang Span (m)
A1-P0	25,69
P0-P1	38,10
P1-P2	38,70
P2-P3	38,70
P3-P4	38,70
P4-P5	42,00
P5-A2	30,24

Sumber: [6]

3.2. Input Pembebanan

Pembebanan yang diinputkan pada Jembatan Cisomang menggunakan program CSI Bridge mengacu pada SNI 1725:2016. Kombinasi beban layan merupakan kombinasi pembebanan yang digunakan untuk menghitung lendutan. Kombinasi beban ultimit merupakan kombinasi pembebanan akibat beban terfaktor yang digunakan untuk menghitung tulangan [7]. Kombinasi dan faktor beban untuk struktur jembatan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kombinasi pembebanan.

Kombinasi Pembebanan	Faktor Pembebanan											
	MS	MA	PR	TD	TT	TB	EW _s	EW _L	EU _n	ET	EQX	EQY
Layan 1	1	1	1		1	1	0,3	1				
Layan 2	1	1	1		1	1	-0,3	-1				
Layan 3	1	1	1		1	1			1	1		
Layan 4	1	1	1	1		1	0,3	1				
Layan 5	1	1	1	1		1	-0,3	-1				
Layan 6	1	1	1	1		1			1	1		
Ultimit 1	1,3	2	1		1,8	1,8	1,2	1,2				
Ultimit 2	1,3	2	1		1,8	1,8	-1,2	-1,2				
Ultimit 3	1,3	2	1	1,8		1,8	1,2	1,2				
Ultimit 4	1,3	2	1	1,8		1,8	-1,2	-1,2				
Ultimit 5	1,3	2	1		1,8	1,8					1	0,3
Ultimit 6	1,3	2	1		1,8	1,8					-1	0,3
Ultimit 7	1,3	2	1		1,8	1,8					1	-0,3
Ultimit 8	1,3	2	1		1,8	1,8					-1	-0,3
Ultimit 9	1,3	2	1	1,8		1,8					1	0,3
Ultimit 10	1,3	2	1	1,8		1,8					-1	0,3
Ultimit 11	1,3	2	1	1,8		1,8					1	-0,3
Ultimit 12	1,3	2	1	1,8		1,8					-1	-0,3
Ultimit 13	1,3	2	1		1,8	1,8					0,3	1
Ultimit 14	1,3	2	1		1,8	1,8					0,3	-1
Ultimit 15	1,3	2	1		1,8	1,8					-0,3	1
Ultimit 16	1,3	2	1		1,8	1,8					-0,3	-1
Ultimit 17	1,3	2	1	1,8		1,8					0,3	1
Ultimit 18	1,3	2	1	1,8		1,8					0,3	-1
Ultimit 19	1,3	2	1	1,8		1,8					-0,3	1
Ultimit 20	1,3	2	1	1,8		1,8					-0,3	-1

Keterangan:

MS	= Beban sendiri
MA	= Beban mati tambahan
PR	= Pengaruh prategang
TD	= Beban lajur "D"
TT	= Beban truk "T"
TB	= Gaya rem
EWs	= Beban angin struktur
EWL	= Beban angin kendaraan
EUn	= Gaya akibat temperatur seragam
ET	= Gaya akibat temperatur gradien
EQX	= Beban gempa dalam arah X
EQY	= Beban gempa dalam arah Y

3.3. Beban Gempa

Analisis gempa dinamis dilakukan menggunakan grafik respon spektrum. Pembuatan respon spektrum gempa dilakukan berdasarkan klasifikasi profil tanah. Data tanah yang digunakan yaitu data tanah pada kedalaman 30 m di bawah struktur jembatan sesuai dengan peraturan SNI 1725:2016 dan Buku Peta Gempa Indonesia Tahun 2017. Tujuan dari analisis probabilitas gerak tanah situs spesifik adalah untuk menghasilkan respon spektra percepatan yang memperhitungkan kemungkinan terlampaui 7% dalam 75 tahun pada nilai spektra dalam rentang periode yang ditentukan. Sedikitnya dilakukan dua jenis penyelidikan tanah dalam pengkalsifikasian jenis tanah [7]. Klasifikasi kelas situs pada analisis beban gempa ini ditentukan dari nilai rata-rata hasil uji penetrasi standar (NSPT) dan cepat rambat gelombang geser (V_s). Hasil perhitungan NSPT dan V_s dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data tanah lokasi penelitian.

Kedalaman (m)	N_{SPT}	t (m)	t/ N_{SPT}	\bar{N}_{SPT}	V_s	t/ V_s	\bar{V}_s (m/det)
0,00 – 1,50	17	1,50	0,088		227,940	0,0066	
1,50 – 3,00	22	1,50	0,068		241,865	0,0062	
3,00 – 4,52	17	1,52	0,089		227,940	0,0067	
4,52 – 6,00	25	1,48	0,059		249,082	0,0059	
6,00 – 7,54	22	1,46	0,066		241,865	0,0060	
7,54 – 9,00	28	1,52	0,054		255,660	0,0059	
9,00 – 10,52	26	1,48	0,057		251,339	0,0059	
10,52 – 12,00	35	1,53	0,044		269,124	0,0057	
12,00 – 13,53	41	1,53	0,037		279,098	0,0055	
13,53 – 15,00	32	1,47	0,046	28,21	263,634	0,0056	258,731
15,00 – 16,51	50	1,51	0,030		292,132	0,0052	
16,51 – 18,00	50	1,49	0,030		292,132	0,0051	
18,00 – 19,51	17	1,51	0,089		227,940	0,0066	
19,51 – 21,00	29	1,49	0,051		257,732	0,0058	
21,00 – 22,48	31	1,48	0,048		261,716	0,0057	
22,48 – 24,00	39	1,52	0,039		275,906	0,0055	
24,00 – 25,47	38	1,47	0,039		274,263	0,0054	
25,47 – 27,00	50	1,53	0,031		292,132	0,0052	
27,00 – 28,50	33	1,50	0,045		265,506	0,0056	
28,50 – 30,00	29	1,50	0,052		257,732	0,0058	

Sumber: [5]

Besarnya nilai N_{SPT} dan V_s secara berturut-turut adalah sebesar 28,21 dan 258,731 m/detik. Berdasarkan klasifikasi kelas situs dari SNI 2833:2016 [8], nilai hasil uji penetrasi sandar rata-rata berada pada rentang 15 sampai dengan 50. Nilai cepat rambat gelombang geser rata-rata berada pada rentang 175 sampai dengan 350 m/detik sehingga, tanah diklasifikasi kedalam situs tanah sedang (SD). Perhitungan respon spektra dilakukan dengan nilai PGA sebesar 0,46 g, nilai S_s sebesar 1,02 g, dan nilai S_1 sebesar 0,45 g. Selanjutnya dilakukan penentuan faktor amplifikasi untuk PGA, 0,2 detik, dan 1 detik menggunakan Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 5. Kelas situs.

Kelas Situs	\bar{V}_s (m/s)	\bar{N}	\bar{S}_u (kPa)
SA (Batuan Keras)	≥ 1500	N/A	N/A
SB (Batuan)	750 - 1500	N/A	N/A
SC (Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak)	350 - 750	> 50	≥ 100
SD (Tanah Sedang)	175 - 350	15 - 50	50 - 100
SE (Tanah Lunak)	< 175	< 15	< 50

Atau setiap profil lapisan tanah dengan ketebalan lebih dari 3 m dengan karakteristik sebagai berikut :

1. Indeks plastisitas, $PI > 20$,
2. Kadar air (w) $> 40\%$, dan
3. Kuat geser tak terdrainase < 25 kPa

SF (Lokasi yang membutuhkan penyelidikan geoteknik dan analisis respon dinamik spesifik)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik seperti : <ul style="list-style-type: none"> - Rentan dan berpotensi gagal terhadap beban gempa seperti likuifaksi, tanah lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung organik tinggi dan/atau gambut (dengan ketebalan $> 3m$) - Plastisitas tinggi (ketebalan $H > 7,5m$ dengan $PI > 75$) - Lapisan lempung lunak/medium kaku dengan ketebalan $H > 35m$
--	--

Sumber: BSN [8]

Catatan: N/A = Tidak dapat digunakan

Tabel 6. Faktor amplifikasi untuk PGA dan 0,2 detik (F_{PGA}/F_a).

Kelas Situs	$PGA \leq 0,1$	$PGA \leq 0,2$	$PGA \leq 0,3$	$PGA \leq 0,4$	$PGA \leq 0,5$
	$S_s \leq 0,25$	$S_s \leq 0,5$	$S_s \leq 0,75$	$S_s \leq 1,0$	$S_s \leq 1,25$
Batuan Keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah Keras (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah Sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah Lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Sumber: [8]

Catatan: Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linier

Keterangan:

PGA adalah percepatan puncak batuan dasar sesuai peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun.

S_s adalah parameter respons spektra percepatan gempa untuk periode pendek ($T=0,2$ detik) dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun.

SS adalah lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons dinamik spesifik

Tabel 7. Besarnya nilai Faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (F_v).

Kelas Situs	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$
Batuan Keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah Keras (SC)	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
Tanah Sedang (SD)	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
Tanah Lunak (SE)	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Sumber: [8]

Catatan: Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linier

Keterangan:

S_1 adalah parameter respons spektra percepatan gempa untuk periode 1 detik dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun.

SS adalah lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons dinamik spesifik.

Nilai faktor amplifikasi untuk PGA (F_{PGA}) didapatkan sebesar 1,041. Nilai faktor amplifikasi untuk percepatan respon spectral 0,2 detik (F_a) adalah sebesar 1,091. Nilai faktor amplifikasi untuk percepatan respon spectral 1 detik (F_v) adalah sebesar 1,548. Nilai faktor amplifikasi F_{PGA} , F_a , dan F_v selanjutnya digunakan untuk melakukan perhitungan A_s , S_{DS} , dan S_{D1} . Diagram respon spektrum Jembatan Cisomang dapat dilihat pada Gambar 4. Nilai A_s , S_{DS} , dan S_{D1} dapat dilihat pada perhitungan sebagai berikut.

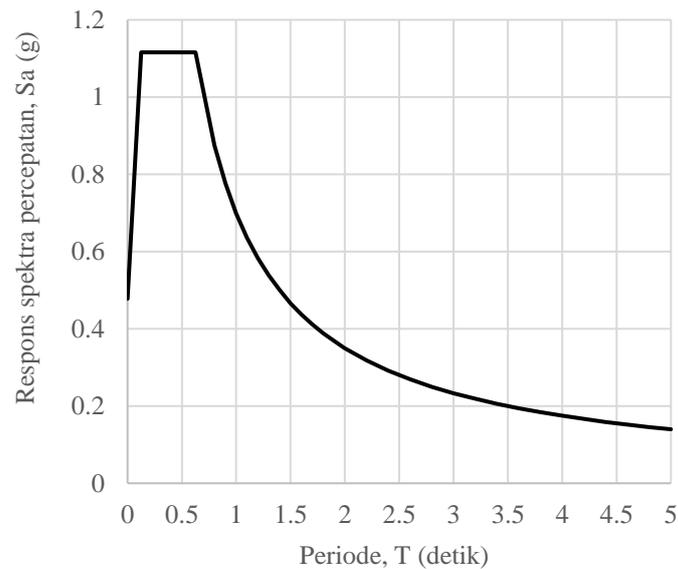
$$A_s = 1,041 \times 0,459 = 0,478 \text{ g}$$

$$S_{DS} = 1,091 \times 1,023 = 1,116 \text{ g}$$

$$S_{D1} = 1,548 \times 0,452 = 0,699 \text{ g}$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = \frac{0,699}{1,116} = 0,623 \text{ detik}$$

$$T_0 = 0,2 \times T_s = 0,2 \times 0,623 = 0,125 \text{ detik}$$



Gambar 4. Diagram respon spektrum gempa.

3.4. Periode Getar dan Kekakuan Struktur

Pengaruh beban pada suatu struktur dapat menyebabkan terjadinya getaran pada struktur tersebut. Besarnya periode getar suatu struktur dipengaruhi oleh massa struktur [9]. Besarnya periode getaran alami yang menjadi penyebab terjadinya getaran tersebut saling berhubungan satu sama lain terhadap nilai kekakuan dari strukturnya. Perilaku tersebut dikenal sebagai dinamika struktur yang merupakan perilaku suatu bangunan yang dipengaruhi oleh adanya beban dinamis yang bekerja pada struktur bangunan [10]. Mode getar dapat didefinisikan sebagai ragam atau pola goyangan struktur ketika sedang menerima beban dinamik dan berhubungan dengan periode yang dihasilkan oleh suatu getaran. Apabila suatu struktur dibebani dengan beban dinamik maka akan terjadi goyangan dengan periode terpanjang pada mode pertama lalu akan semakin rendah karena redaman pada mode getar selanjutnya. Mode getar (*mode shape*) yang memiliki frekuensi terendah (periode terpanjang) disebut sebagai mode getar pertama (*mode satu* atau *fundamental mode*) [11]. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan didapatkan 12 mode getar yang dapat terjadi pada struktur. Besar deformasi dan periode pada setiap mode getar yang terjadi dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 1. Deformasi dan periode struktur.

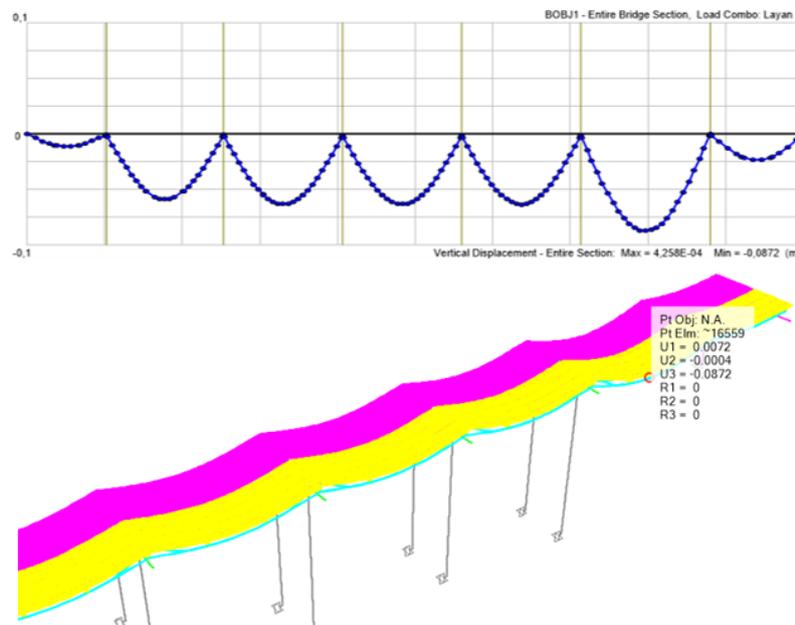
Mode	Periode (detik)	UX (m)	UY (m)	UZ (m)
1	2,649	0,008	0	0
2	2,272	4,00E-09	0	0
3	2,271	0,015	0	0
4	1,321	0	0,000004	0
5	1,184	0,0063	0	0
6	1,153	0	9,86E-07	0
7	1,033	0,0039	0	0
8	1,010	0	1,64E-07	0
9	0,922	0,0033	0	0
10	0,628	0	0,000001	0
11	0,421	0	4,39E-09	0
12	0,419	0,0000023	0	0,0000012

Berdasarkan data pada Tabel 18, Mode 1 sampai dengan mode 11 mengalami translasi yang ditandai dengan deformasi pada satu arah sumbu saja. Rotasi terjadi pada mode 12 yang ditandai dengan deformasi pada dua arah sumbu yaitu sumbu x dan sumbu z. Deformasi pada sumbu x terbesar terjadi pada mode 3 sebesar 15 mm. Deformasi pada sumbu y terbesar terjadi pada mode 4 sebesar 0,004 mm. Deformasi pada sumbu z terbesar terjadi pada mode 12 sebesar 0,0012 mm. Nilai periode mode getar pertama dan terbesar mewakili perilaku struktur jembatan secara keseluruhan sebesar 2,65 detik. Oleh karena itu, berdasarkan Perhitungan pada Lampiran 8 Nilai kekakuan dari struktur Jembatan Cisomang didapatkan sebesar 176.682,1 kN/m.

Kekakuan struktur merupakan gaya yang diperlukan struktur ketika mengalami deformasi sebesar satu satuan. Nilai kekakuan struktur ini tergantung dari material yang digunakan, dimensi elemen struktur, penulangan, modulus elastisitas, dan momen inersia polar [11]. Nilai kekakuan dipengaruhi oleh besarnya periode yang terjadi pada struktur. Semakin besar periode getar yang terjadi, maka kekakuan struktur jembatan akan semakin kecil, begitu juga sebaliknya. Besarnya nilai kekakuan mempengaruhi besarnya kemungkinan deformasi yang terjadi pada struktur jembatan. Semakin tinggi kekakuan, maka deformasi yang terjadi semakin kecil yaitu struktur akan menjadi semakin kaku. Semakin kecil nilai kekakuan, maka deformasi yang terjadi semakin besar yaitu struktur menjadi semakin fleksibel.

3.5. Analisis Displacement

Perpindahan posisi suatu objek terhadap posisi semula disebut dengan *displacement*. Analisis *displacement* didasarkan pada kombinasi beban layan. *Displacement* terbesar yang terjadi pada studi kasus Jembatan Cisomang ini terjadi pada kombinasi pembebanan layan 5. Nilai *displacement* maksimal yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. *Displacement* maksimum.

Lendutan yang terjadi pada jembatan akibat beban rencana untuk daya layan pada Peraturan Pembebanan untuk Jembatan Jalan Raya tidak melampaui $1/250$ panjang bentang [12]. Berdasarkan Gambar 5 *displacement* terbesar terjadi pada bentang P4-P5 dengan panjang bentang 42 m, sehingga didapatkan *displacement* yang diizinkan tidak lebih dari 168 mm. Lendutan maksimum terjadi pada 200,89 m dari abutment A1 atau 51,24 m dari abutment A2. Nilai lendutan maksimum pada sumbu z sebesar -87,2 mm. *Displacement* yang terjadi pada sumbu x dan sumbu y berturut-turut sebesar +7,2 mm dan -0,4 mm. Besarnya perpindahan yang terjadi masih dibawah nilai *displacement* izin sebesar 168 mm.

Displacement maksimum yang terjadi pada bentang P4-P5 dapat terjadi karena bentang tersebut merupakan bentang terpanjang.

3.6. Hasil Gaya Dalam

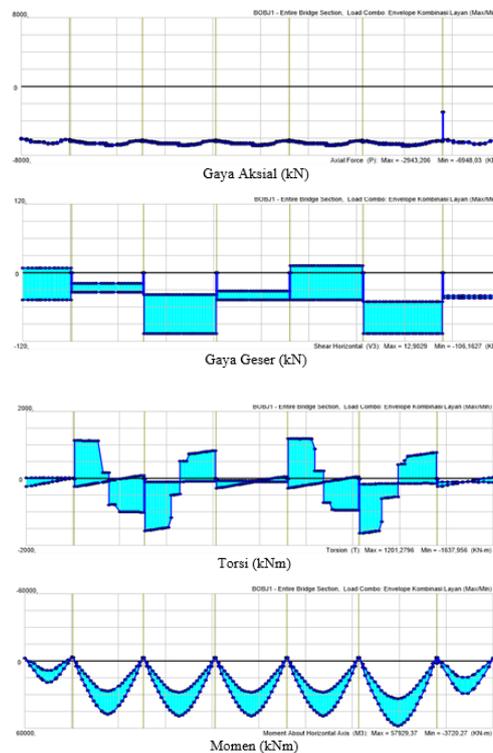
Kesesuaian nilai pada perhitungan secara manual dengan analisis *software* perlu dilakukan. Perbandingan perhitungan ini dilakukan dengan mengasumsikan struktur sebagai struktur balok sederhana. Perbandingan dilakukan dengan mengetahui kesesuaian momen akibat beban sendiri pada bentang P4-P5. Hasil momen akibat beban sendiri dengan perhitungan manual dapat dilihat pada perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} M_{\text{manual}} &= \frac{1}{8} qL^2 \\ &= \frac{1}{8} \times 150,57 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times (42 \text{ m})^2 \\ &= 33201,5 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{software}} &= M_{\text{max}} + M_{\text{min}} \\ &= 33145,85 + 64,23 \\ &= 33210,08 \text{ kNm} \end{aligned}$$

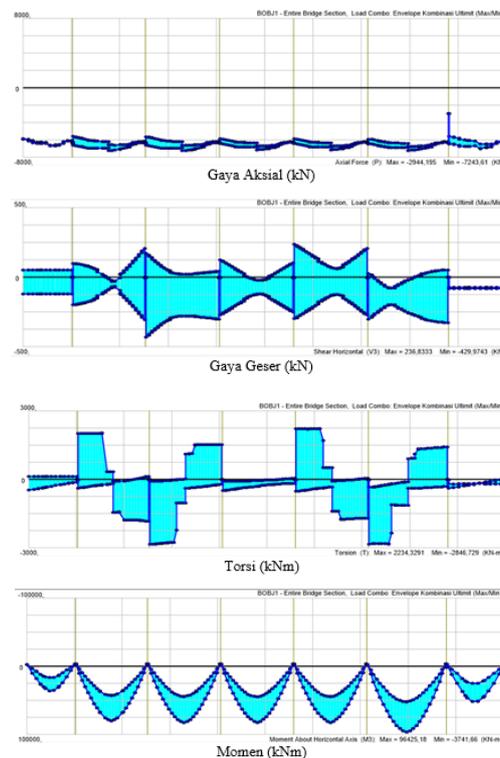
$$M_{\text{manual}} \approx M_{\text{software}}$$

Hasil momen menggunakan perhitungan manual dan analisis *software* memiliki nilai yang hampir sama. Oleh karena itu, analisis kekuatan Jembatan Cisomang menggunakan *software* CSI Bridge dapat diterima. Adapun sedikit perbedaan yang terjadi disebabkan oleh perhitungan manual dan analisis *software* menggunakan metode perhitungan yang berbeda. Selain itu, pada perhitungan menggunakan analisis *software* juga mempertimbangkan faktor kemiringan vertikal pada jembatan.



Gambar 6. Gaya dalam akibat kombinasi beban layan (*envelope*).

Gambar 6 menunjukkan gaya dalam yang dihasilkan berupa beban aksial beban geser, torsi dan juga momen pada kombinasi beban layan. Gaya aksial maksimum yang dihasilkan oleh kombinasi beban layan sebesar $-6948,03$ kN. Nilai (-) menunjukkan arah gaya aksial menuju sumbu batang sedangkan nilai (+) menunjukkan arah gaya aksial keluar dari sumbu batang. Gaya geser maksimum yang dihasilkan oleh kombinasi beban layan sebesar $-106,16$ kN. Nilai (-) menunjukkan terjadi pergeseran ke bawah pada sisi atas sedangkan nilai (+) menunjukkan terjadi pergeseran ke atas pada sisi bawah. Torsi maksimum yang dihasilkan oleh kombinasi beban layan sebesar $-1637,96$ kNm. Nilai (-) menunjukkan torsi berputar searah arah jarum jam sedangkan nilai (+) menunjukkan torsi berputar berlawanan arah dengan putaran jarum jam. Momen lentur maksimum yang dihasilkan oleh kombinasi beban layan sebesar $+57929,37$ kNm. Nilai (+) menunjukkan elemen struktur melengkung ke bawah yang artinya sisi atas tertekan dan sisi bawah tertarik, sedangkan nilai (-) menunjukkan elemen struktur melentur ke atas yang artinya sisi atas tertarik dan sisi bawah tertekan.



Gambar 7. Gaya dalam akibat kombinasi beban ultimit (*envelope*).

Gambar 7 menunjukkan gaya dalam yang dihasilkan berupa beban aksial beban geser, torsi dan juga momen pada kombinasi beban ultimit. Gaya aksial maksimum yang dihasilkan kombinasi beban ultimit sebesar $-7243,61$ kN. Gaya geser maksimum kombinasi beban ultimit didapatkan sebesar $-429,97$ kN. Torsi yang dihasilkan oleh kombinasi beban ultimit sebesar $-2846,73$ kNm. Nilai momen lentur yang dihasilkan program untuk kombinasi beban ultimit sebesar $+96425,18$ kNm.

Pilar Jembatan Cisomang terdiri atas dua jenis ukuran sebesar 1.000×1.250 mm dan 3.100×3.600 mm. Gaya aksial maksimum pada kombinasi beban ultimit pilar 1.000×1.250 mm sebesar $-8.784,59$ kN. Gaya geser maksimum pada kombinasi beban ultimit pilar 1.000×1.250 mm sebesar $-141,65$ kN. Torsi maksimum pada kombinasi beban ultimit pilar 1.000×1.250 mm sebesar $-141,14$ kNm. Momen lentur maksimum pada kombinasi beban ultimit pilar 1.000×1.250 mm sebesar $524,20$ kNm. Gaya aksial maksimum pada kombinasi beban ultimit pilar 3.100×3.600 mm sebesar $-20.571,36$ kN. Gaya geser maksimum pada kombinasi beban ultimit pilar 3.100×3.600 mm sebesar $1.301,07$ kN. Torsi maksimum

pada kombinasi beban ultimit pilar 3.100 x 3.600 mm sebesar -4.188,19 kNm. Momen lentur maksimum pada kombinasi beban ultimit pilar 3.100 x 3.600 mm sebesar 25.530,2 kNm.

3.7. Penulangan PCI Girder

Perhitungan tulangan lentur pada PCI girder didasarkan pada nilai momen ultimit terbesar yang terjadi pada jembatan. Momen nominal dengan faktor reduksi yang terjadi pada girder harus lebih besar dari momen ultimit. *Trial dan error* dilakukan untuk menentukan jumlah tendon dan tulangan lentur pada PCI girder. Jumlah tendon dan tulangan pada girder dirancang sebesar 21 tendon dengan diameter 13 mm dan 162 tulangan lentur dengan diameter 16 mm (162D16).

Momen nominal dengan faktor reduksi lebih besar dari momen ultimit. Hal ini menunjukkan girder dapat menahan momen dengan 21 tendon dengan diameter 13 mm dan 162 tulangan lentur dengan diameter 16 mm (162D16). Namun, jumlah tendon dan tulangan lentur tersebut tidak memenuhi syarat tulangan lentur maksimum. Mengurangi jumlah tendon dan tulangan lentur mengakibatkan tahanan momen tidak mampu menahan momen ultimit. Sehingga, agar persyaratan tulangan lentur maksimum dan tahanan momen memenuhi ukuran girder perlu diperbesar.

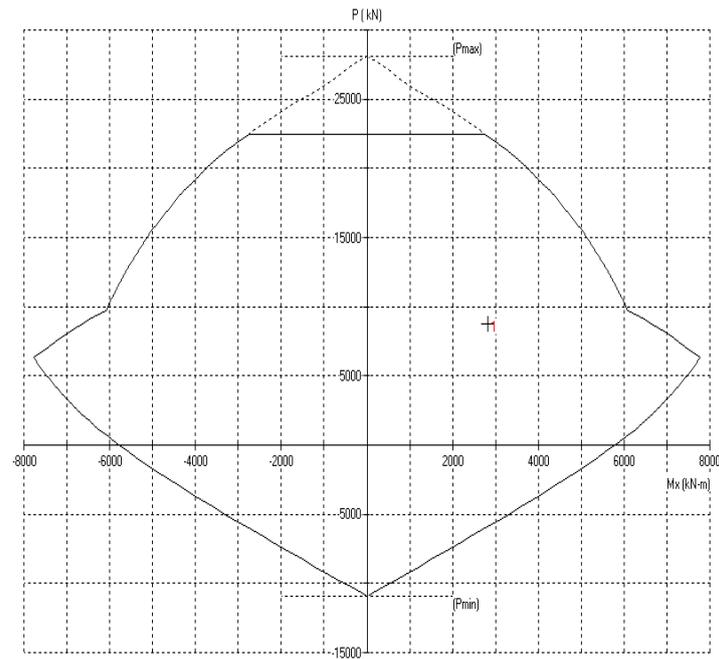
Perhitungan tulangan geser pada PCI girder didasarkan pada gaya geser ultimit terbesar yang terjadi pada jembatan. Perhitungan tulangan geser dilakukan dengan prinsip desain. Tahanan geser dengan faktor reduksi yang disumbangkan oleh beton sebesar 301,54 kN. Gaya geser terfaktor yang disumbangkan oleh beton lebih kecil dari gaya geser ultimit yang terjadi sebesar 429,97 kN. Sehingga, dibutuhkan 1 tulangan geser dengan diameter 9 mm untuk menahan gaya geser ultimit tersebut.

Perhitungan tulangan puntir pada PCI girder didasarkan pada gaya torsi ultimit terbesar yang terjadi pada jembatan. Perhitungan tulangan puntir dilakukan dengan prinsip desain. Tahanan puntir pada girder diperhitungkan terlebih dahulu untuk melihat kebutuhan tulangan puntir. Kuat puntir terfaktor yang disumbangkan oleh beton sebesar 2.073,78 kNm. Kuat puntir terfaktor yang disumbangkan oleh beton lebih kecil dari gaya torsi ultimit yang terjadi sebesar 2.846,73 kNm. Sehingga, dibutuhkan 2 tulangan puntir dengan diameter 16 mm untuk menahan gaya torsi ultimit tersebut.

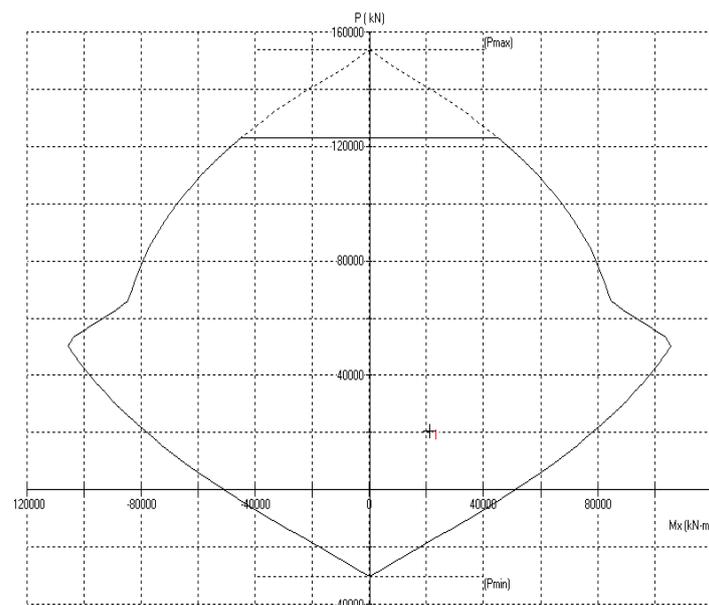
3.8. Penulangan Pilar Jembatan

Pilar jembatan terdiri dari pilar dengan ukuran 1.000 x 1.250 mm dan 3.100 x 3.600 mm. Gaya aksial dan gaya momen maksimum pada pilar digambarkan dalam bentuk diagram interaksi untuk mengetahui kapasitas penampang pilar dalam menahan kedua gaya tersebut [13]. Analisis pilar jembatan dilakukan dengan menggunakan *software* *pcaColumn*.

Beban yang dimasukkan pada pilar ukuran 1.000 x 1.250 mm terdiri dari beban aksial maksimum sebesar 8.784,59 kN, momen sumbu-x sebesar 2.825,17 kNm, dan momen sumbu-y sebesar 524,20 kNm. Beban yang dimasukkan pada pilar ukuran 3.100 x 3.600 mm terdiri dari beban aksial maksimum sebesar 20.571,36 kN, momen sumbu-x sebesar 21.148,08 kNm, dan momen sumbu-y sebesar 25.530,20 kNm. Jumlah tulangan utama dan tulangan sengkang pada pilar ukuran 1.000 x 1.250 mm berturut-turut adalah 36D32 dan D13-100. Jumlah tulangan utama dan tulangan sengkang pilar ukuran 3.100 x 3.600 mm berturut-turut adalah 100D22 dan D16-100. Diagram interaksi yang diperoleh setelah memasukkan data tersebut pada pilar ukuran 1.000 x 1.250 mm dan 3.100 x 3.600 mm berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Diagram interaksi pilar dengan ukuran 1.000 x 1.250 mm.



Gambar 9. Diagram interaksi pilar dengan ukuran 3.100 x 3.600 mm.

Berdasarkan Gambar 8 dan Gambar 9 dapat dilihat bahwa kedua jenis pilar aman akibat beban yang bekerja. Gaya dalam maksimum yang bekerja masih dapat ditahan oleh struktur pilar. Hal ini dapat terjadi karena nilai gaya aksial dan gaya momen maksimum yang terjadi pada pilar berada di area tekan (sisi dalam kurva). Penggunaan tulangan eksisting dengan tulangan utama 36D32 dan tulangan sengkang D13-100 pada pilar 1.000 x 1.250 mm dapat menahan gaya dalam maksimum. Tulangan utama 100D22 dan tulangan sengkang D16-100 pada pilar 3.100 x 3.600 mm dapat menahan gaya dalam maksimum.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Jembatan Cisomang dimodelkan dalam bentuk *simple beam* dan *segmental bridge*. Jembatan didesain dari abutment A1 sampai dengan abutment A2 berdasarkan data *as built drawing* menggunakan *software* CSI Bridge.
2. Gaya dalam yang terjadi pada struktur berupa gaya aksial, gaya geser, torsi, dan momen dengan nilai maksimum untuk kombinasi beban layan masing-masing sebesar -6.948,03 kN, -106,16 kN, -1.637,96 kNm, dan +57.929,37, sedangkan untuk kombinasi beban ultimit masing-masing sebesar -7.243,61 kN, -429,97 kN, -2.846,73 kNm, dan +96.425,18 kNm. Gaya aksial, gaya geser, torsi, dan momen maksimum pada kombinasi beban ultimit pilar 1.000 x 1.250 mm berturut-turut sebesar -8.784,59 kN, -141,65 kN, -141,14 kNm, dan 524,20 kNm, sedangkan untuk pilar 3.100 x 3.600 mm berturut-turut sebesar -20.571,36 kN, 1.301,07 kN, -4.188,19 kNm, dan 25.530,2 kNm.
3. Terdapat 12 mode getar yang mungkin terjadi pada struktur jembatan, dan periode terbesar terjadi pada mode 1 yaitu sebesar 2,649 detik yang mewakili perilaku struktur sehingga nilai kekakuan total strukturnya sebesar 176.682,1 kN/m.
4. *Displacement* terbesar yang terjadi pada struktur sebesar 87,2 mm pada beban layan 5. *Displacement* yang terjadi masih di bawah nilai *displacement* yang diijinkan sebesar 168 mm sehingga struktur termasuk kategori aman.
5. Penulangan pada Jembatan Cisomang didapatkan sebagai berikut:
 - Tendon dan tulangan lentur yang dibutuhkan girder sebesar 21 tendon dengan diameter 13 mm dan 162 tulangan lentur dengan diameter 16 mm (162D16). Namun, tidak memenuhi syarat tulangan lentur maksimum.
 - Tulangan geser yang dibutuhkan girder sebesar 1 tulangan geser dengan diameter 9 mm spasi 100 mm. Luas tulangan girder yang diambil telah memenuhi syarat tulangan lentur minimum.
 - Tulangan puntir yang dibutuhkan girder sebesar 2 tulangan dengan diameter 16 mm. Luas tulangan puntir yang diambil telah memenuhi syarat tulangan puntir minimum.
 - Tulangan eksisting pada *pier column* mampu menahan gaya dalam yang bekerja sehingga tidak diperlukan tambahan tulangan.

Daftar Pustaka

- [1] Hastuti FD, Sarma M, Manuwoto. Strategi peningkatan pertumbuhan ekonomi melalui investasi infrastruktur jalan dan jembatan di Provinsi Banten. *Jurnal Manajemen Pembangunan Daerah*. 2016; 8(1): 56-70.
- [2] Zarkasi I, Irpani H, Arifien H. Penanganan Jembatan Cisomang ruas tol Cikampek-Padalarang: pembelajaran penanganan jembatan akibat pergerakan tanah clay shale. *Jurnal Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia*. 2018; 4(1): 25-36.
- [3] Hadi AL, Anjasmara IM, Yusfania M. Analisa kecepatan pergeseran di Wilayah Jawa Tengah Bagian Selatan menggunakan GPS-CORS tahun 2013-2015. *Jurnal Teknik Institut Teknologi Sepuluh November*. 2016; 5(2): 70-74.
- [4] Naryanto HS. Analisis potensi kegempaan dan tsunami di kawasan pantai barat Lampung kaitannya dengan mitigasi dan penataan kawasan. *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*. 2008; 10(2): 71-77.

- [5] Octora DD. Analisis perkuatan pilar jembatan dengan metode jacketing memperhitungkan initial load dan interface slip. [*skripsi*]. Bandung: Institut Teknologi Bandung. 2019.
- [6] Purwanto GS. Penyusunan alir tunai (cash flow) biaya pelaksanaan konstruksi Jembatan Cisomang – Jalan Tol Cipularang. [*skripsi*]. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2011.
- [7] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2016a. *Standar Pembebanan Untuk Jembatan*. SNI 1725:2016. Jakarta (ID): BSN. 2016.
- [8] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2016b. *Standar Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa*. SNI 2833:2016. Jakarta (ID): BSN. 2016.
- [9] Julinanda Y. Analisis perilaku struktur jembatan cable stayed Dr. Ir. Soekarno di Manado pada tahap konstruksi. [*skripsi*]. Bogor: Institut Pertanian Bogor, 2016.
- [10] Miranda D. Analisis pengaruh gempa terhadap perilaku jembatan cable stayed Dr. Ir. Soekarno di Manado pada kondisi layan. [*skripsi*]. Bogor: Institut Pertanian Bogor, 2016.
- [11] Harahap MF, Fauzan M. Analisis Perilaku Struktur Gedung Bertingkat Dengan Analisis Dinamik Respon Spektrum Terhadap Beban Gempa. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2019; 4(3): 195-06.
- [12] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. *Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan*. RSNI T-02-2004. Jakarta (ID): BSN. 2004.
- [13] Unas SE, Wibowo A, Kartikasari R. Analisis dan desain kolom biaxial berdasarkan SNI 03-2847-2002 dengan menggunakan software Borland Delphi. *Jurnal Rekayasa Sipil*. 2007; 1(1): 43-56.