

Pengaruh Variasi Girder Terhadap Perilaku Struktur Atas Jembatan Beton Prategang Akibat Gempa Horizontal

The Effect of Girder Variations on the Behavior of Superstructure Prestressed Concrete Bridge Due to Horizontal Earthquake

Septiano H. E. Tefa¹, Dantje A. T. Sina^{2*}, Hj. Andi Kumalawati³

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

Article info:

Kata kunci:

Girder, perilaku struktur, prategang, jembatan, gempa Horizontal

Keywords:

Beam girder, structure behavior, prestress, bridge, horizontal earthquake

Article history:

Received: 22-04-2022

Accepted: 12-05-2022

*)Koresponden email:

¹yanotefa01@gmail.com

²dantjesina@staf.undana.ac.id

Abstrak

Gempa bumi merupakan bencana alam berbahaya dan menimbulkan kerusakan dalam skala yang besar. Sebagai antisipasi dari kerusakan tersebut, desain struktur tahan gempa sudah menjadi kewajiban dalam merancang suatu struktur, salah satunya adalah struktur jembatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui partisipasi massa struktur, kapasitas dan tingkat kinerja struktur menggunakan metode respon spektrum, metode *pushover* dan metode *FEMA-356* pada jembatan beton prategang tipe I dengan panjang 37 m dan lebar 4 m menggunakan 10 variasi girder yang berlokasi di Bendungan Temef. Hasil penelitian yang diperoleh yaitu kondisi struktur paling kritis terjadi pada arah melintang. Kapasitas geser dasar struktur maksimum lebih besar pada arah longitudinal dibandingkan dengan arah melintang, sedangkan kapasitas perpindahan struktur maksimum lebih besar pada arah melintang dibandingkan dengan arah longitudinal. Pengaruh luas penampang dan inersia penampang girder terhadap kapasitas struktur adalah semakin besar luas dan inersia penampang girder maka kapasitas struktur akan semakin besar. Tingkat kinerja struktur dari 10 variasi adalah *Immediate Occupancy (IO)*.

Abstract

Earthquakes are dangerous natural disasters and cause damage on a large scale. Therefore, this study aimed to determine the mass participation of the structure, structure capacity, and performance levels. The analysis was carried out based on the spectral response, pushover, and FEMA-356 methods. In anticipation of the damage, the design of earthquake-resistant structures has become essential in structural design, especially in the bridge structure design. The bridge samples in this study were type I prestressed concrete bridges with a length of 37 m and a width of 4 m using ten variations of girders located at the Temef Dam. The results obtained are the most critical structural conditions occur in the transverse direction. The base shear maximum capacity is more significant in the longitudinal direction than in the transversal direction. The maximum displacement capacity is higher in the transversal direction than in the longitudinal direction. The effect of cross-sectional area and cross-sectional inertia of the beam girder on the structure's capacity is the greater the cross-sectional area and inertia of the beam girder, the greater the capacity of the structures. All of The structure performance levels were Immediate Occupancy (IO).

Kutipan:

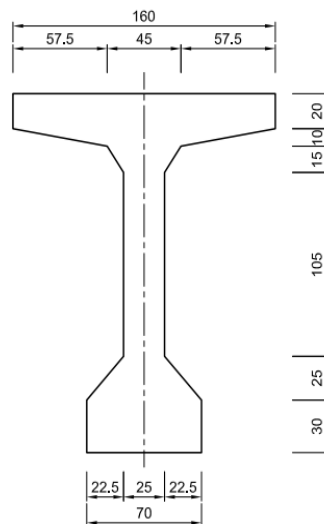
1. Pendahuluan

Gempa bumi merupakan bencana alam berbahaya dan menimbulkan kerusakan yang besar. Kerusakan jembatan yang disebabkan oleh gempa bumi adalah kerusakan jembatan I-Jiang di Taiwan akibat dari gempa Chi-chi (Moehle dkk. 1999) dan kerusakan jembatan Beburung 2 di Lombok Timur (Saputra 2020). Sebagaiantisipasi dari kerusakan tersebut, desain struktur tahan gempa menjadi kewajiban dalam perancangan suatu struktur.

Wilayah NTT khususnya Pulau Timor termasuk kawasan rawan terjadi gempa bumi tektonik karena berdasarkan peta gempa tahun 2017, wilayah NTT ditemukan 11 sesar aktif, patahan benua berada di selatan terdapat lempeng Australia yang menyusup ke utara dan ke bawah lempeng Eurasia serta patahan lokal yang berada di sebelah barat Pulau Timor dan sebelah utara Kefamenanu (Albar dkk. 2020). Berdasarkan beberapa penelitian terkait, penggunaan metode analisis yang digunakan sama yaitu metode respon spektrum tetapi yang menjadi perbedaan pada penelitian ini adalah mengetahui perilaku struktur dan kinerja struktur atas jembatan menggunakan variasi penampang girder yang berbeda. Variasi penampang yang digunakan adalah 10 variasi tipe *PCI-Girder* pada struktur atas jembatan dengan Panjang 37 m dan lebar 4 m yang memiliki fungsi sebagai penghubung dari *Spillway* ke *Intake* saluran pengelak Bendungan Temef Kabupaten TTS Propinsi NTT (Djubida 2020). Penelitian ini dilakukan dengan bantuan *software CSiBridge v22.1.0*.

2. Bahan dan Metode

Dimensi penampang girder yang digunakan pada lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Dimensi Girder *Eksisting* (Satuan dalam centimeter)

Dimensi *eksisting* sesuai gambar di atas digunakan sebagai acuan 100% pada girder variasi 6 (*GV-6*). Data perencanaan struktur dari 10 variasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Sampel Penelitian

Variasi Sampel (Model)	Dimensi Girder (m)			Presentase Luasan Variasi Sampel
	Lebar Atas	Lebar Bawah	Tinggi	
Variasi 1 (<i>GV-1</i>)	1,60	0,70	1,80	Perkecil 5,86%
Variasi 2 (<i>GV-2</i>)	1,60	0,70	1,85	Perkecil 4,69%
Variasi 3 (<i>GV-3</i>)	1,60	0,70	1,90	Perkecil 3,52%
Variasi 4 (<i>GV-4</i>)	1,60	0,70	1,95	Perkecil 2,34%
Variasi 5 (<i>GV-5</i>)	1,60	0,70	2,00	Perkecil 1,17%

Variasi Sampel (Model)	Dimensi Girder (m)			Presentase Luasan Variasi Sampel
	Lebar Atas	Lebar Bawah	Tinggi	
Variasi 6 (GV-6)	1,60	0,70	2,05	100% (acuan)
Variasi 7 (GV-7)	1,60	0,70	2,10	Perbesar 1,17%
Variasi 8 (GV-8)	1,60	0,70	2,15	Perbesar 2,34%
Variasi 9 (GV-9)	1,60	0,70	2,175	Perbesar 2,93%
Variasi 10 (GV-10)	1,60	0,70	2,20	Perbesar 3,52%

Penelitian ini berlokasi di Bendungan Temef Kabupaten TTS Propinsi NTT dengan titik koordinat 9°42'47,4" LS dan 124°27'22,4" BT. Waktu penelitian dilakukan sampai analisis data hasil penelitian dari bulan Juni 2021 sampai bulan Februari 2022 yang dimulai dengan mengumpulkan data informasi jembatan yang terdiri dari data primer (dimensi jembatan, dimensi penampang girder, jenis dan spesifikasi material) dan data sekunder berupa data seismik respon spektrum (Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan 2021). Kemudian dilakukan pemodelan struktur atas jembatan menggunakan 10 variasi girder dan dilanjutkan perhitungan pembebanan pada struktur atas jembatan (SNI 1725:2016) dan diinput pada *software* untuk masing-masing variasi. Setelah itu dilanjutkan dengan analisis dinamik *respon spektrum* yang digunakan sebagai gempa dinamik (V_D). Tahap selanjutnya dilakukan analisis struktur atas jembatan dan dilakukan pengecekan pada periode getar alami struktur ($T_D \leq T_S$). Jika pengecekan tersebut memenuhi maka dilakukan perhitungan gempa statik atau lateral (V_S) dan dilakukan pengecekan pada geser dasar ragam ($V_D \geq 0,85V_S$). Jika pengecekan tidak memenuhi maka dicari koreksi faktor skala baru agar pengecekan bisa memenuhi, setelah memenuhi dilakukan lagi pengecekan pada partisipasi massa struktur (arah kritis $\geq 90\%$). Selanjutnya dilakukan analisis *pushover* untuk mengetahui kapasitas struktur, kemudian dilanjutkan dengan tingkat kinerja struktur menggunakan metode *FEMA-356* untuk memperoleh performa level struktur jembatan dari 10 variasi girder.

2.1. Analisis Struktur Atas Jembatan Tahan Gempa

Ada 3 parameter penting yang digunakan untuk menghitung gempa statik atau lateral yaitu koefisien respon gempa elastik (C_{sm}) respon spektrum, berat efektif struktur (W_t) dan faktor modifikasi respon (R) (SNI 2833:2016). Prosedur perhitungan gempa statik atau lateral:

1. Koefisien respon gempa elastik (C_{sm}) respon spektrum

Penentuan koefisien respon gempa elastik sebagai berikut:

- Periode lebih kecil dari T_0 ditentukan dengan Persamaan 1.

$$C_{sm} = (S_{DS} - A_s) \frac{T}{T_0} + A_s \tag{1}$$

- Periode lebih besar sama dengan T_0 dan lebih kecil sama dengan T_s , maka $C_{sm} = S_{DS}$.
- Periode lebih besar T_s ditentukan dengan Persamaan 2.

$$C_{sm} = \frac{S_{D1}}{T} \tag{2}$$

2. Berat efektif struktur (W_t)

Berat efektif struktur ditentukan dengan Persamaan 3.

$$W_t = 1,00 DL + 1,00 LL \tag{3}$$

3. Faktor modifikasi respon (R)

Faktor modifikasi respon ditentukan berdasarkan model bangunan bawah, yaitu tipe dinding untuk sumbu kuat (arah-x) dan tipe kolom tunggal untuk sumbu lemah (arah-y).

4. Geser dasar statik (V_S)

Geser dasar statik ditentukan dengan Persamaan 4.

$$V_S = \frac{C_{sm}}{R} \times W_t \tag{4}$$

2.2. Kontrol Geser Dasar dan Partisipasi Massa Struktur

1. Kontrol geser dasar ragam

Nilai geser dasar dinamik (V_D) harus lebih besar sama dengan 85% geser dasar statik ($0,85V_S$). Jika geser dasar dinamik lebih kecil, maka harus dikali dengan $(0,85V_S/V_D) \geq 0$ agar memenuhi syarat (SNI 1726:2012).

2. Respon partisipasi massa struktur

Respon partisipasi massa struktur digunakan untuk mengetahui arah kritis struktur dengan syarat rasio minimum 90% (SNI 1726:2012).

2.3. Analisis Statik Non-linear Pushover

Analisis statik non-linear *pushover* digunakan untuk mengetahui kapasitas pada step maksimum suatu struktur.

2.4. Tingkat Kinerja Struktur Metode FEMA-356

Tingkat kinerja struktur menggunakan metode *FEMA-356* (FEMA 356 2000) ditentukan untuk memperoleh target perpindahan (δ_T) dengan Persamaan 5.

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (5)$$

Keterangan:

δ_T : Target perpindahan (m)

T_e : Waktu getar efektif (detik).

C_0 : Faktor modifikasi untuk mengkonversi *spectral displacement* struktur *SDOF* ekuivalen menjadi *roof displacement* struktur sistem *MDOF*, sesuai Tabel 3-2 *FEMA-356*.

C_1 : Faktor modifikasi untuk menghubungkan peralihan inelastik maksimum dengan peralihan respons elastik linear.

C_2 : Faktor modifikasi untuk memperlihatkan efek dari *hysteresis shape* pada respon perpindahan maksimum struktur sesuai Tabel 3-3 *FEMA 356*.

C_3 : Faktor modifikasi untuk memperlihatkan kenaikan peralihan akibat efek *P-delta*.

S_a : Akselerasi respon spektrum yang berkesesuaian dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau

g : Percepatan gravitasi bumi = 9,81 m/detik²

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Beban Gempa Statik (V_S)

Gempa statik dari 10 variasi girder arah-x (UX) dan arah-y (UY) dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Beban Gempa Statik (V_S)

Variasi Sampel	Gempa Statik (V_S)		Satuan
	UX	UY	
Variasi 1 ($GV-1$)	819,515	614,636	kN
Variasi 2 ($GV-2$)	852,012	639,009	kN
Variasi 3 ($GV-3$)	887,423	665,567	kN
Variasi 4 ($GV-4$)	917,954	688,466	kN
Variasi 5 ($GV-5$)	951,458	713,594	kN
Variasi 6 ($GV-6$)	985,300	738,975	kN
Variasi 7 ($GV-7$)	1019,464	764,598	kN
Variasi 8 ($GV-8$)	1054,018	790,514	kN
Variasi 9 ($GV-9$)	1071,376	803,532	kN
Variasi 10 ($GV-10$)	1088,866	816,650	kN

3.2. Kontrol Geser Dasar Ragam

Nilai geser dasar ragam diperoleh dari hasil analisis dinamik (V_D) sebesar 85% dari geser dasar statik ($0,85V_S$) atau dapat ditulis $V_D \geq 0,85V_S$. Kontrol awal geser dasar ragam arah-x (UX) dan arah-y (UY) dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kontrol Awal Geser Dasar Ragam

Variasi Sampel	Arah Gempa	Geser Dinamik	85% Geser Statik	Kontrol ($V_D \geq 0,85V_S$)	Satuan
Variasi 1 (GV-1)	UX	4,612	696,588	No	kN
	UY	161,819	522,441	No	kN
Variasi 2 (GV-2)	UX	3,797	724,210	No	kN
	UY	163,487	543,158	No	kN
Variasi 3 (GV-3)	UX	3,341	754,310	No	kN
	UY	165,126	565,732	No	kN
Variasi 4 (GV-4)	UX	3,077	780,261	No	kN
	UY	166,740	585,196	No	kN
Variasi 5 (GV-5)	UX	2,927	808,740	No	kN
	UY	168,320	606,555	No	kN
Variasi 6 (GV-6)	UX	2,849	837,505	No	kN
	UY	169,879	628,129	No	kN
Variasi 7 (GV-7)	UX	2,807	866,544	No	kN
	UY	171,415	649,908	No	kN
Variasi 8 (GV-8)	UX	2,789	895,915	No	kN
	UY	172,928	671,937	No	kN
Variasi 9 (GV-9)	UX	2,788	910,669	No	kN
	UY	173,678	683,002	No	kN
Variasi 10 (GV-10)	UX	2,793	925,536	No	kN
	UY	174,422	694,152	No	kN

Dari Tabel 3 di atas, hasil kontrol belum memenuhi syarat yang ditentukan, sehingga perlu dicari faktor skala baru untuk dikalikan dengan koordinat respon spektrum menggunakan persamaan $0,85V_S / V_D$. Hasil kontrol ulang geser dasar ragam menggunakan faktor skala baru arah-x (UX) dan arah-y (UY) dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kontrol Ulang Geser Dasar Ragam

Variasi Sampel	Arah Gempa	Geser Dinamik	85% Geser Statik	Kontrol ($V_D \geq 0,85V_S$)	Satuan
Variasi 1 (GV-1)	UX	696,645	696,588	Oke	kN
	UY	522,512	522,441	Oke	kN
Variasi 2 (GV-2)	UX	724,256	724,210	Oke	kN
	UY	543,158	543,158	Oke	kN
Variasi 3 (GV-3)	UX	754,352	754,310	Oke	kN
	UY	565,737	565,732	Oke	kN
Variasi 4 (GV-4)	UX	780,335	780,261	Oke	kN
	UY	585,197	585,196	Oke	kN
Variasi 5 (GV-5)	UX	808,785	808,740	Oke	kN
	UY	606,625	606,555	Oke	kN
Variasi 6 (GV-6)	UX	837,539	837,505	Oke	kN
	UY	628,212	628,129	Oke	kN

Variasi Sampel	Arah Gempa	Geser Dinamik	85% Geser Statik	Kontrol ($V_D \geq 0,85 V_S$)	Satuan
Variasi 7 (GV-7)	UX	866,608	866,544	Oke	kN
	UY	650,004	649,908	Oke	kN
Variasi 8 (GV-8)	UX	895,934	895,915	Oke	kN
	UY	672,000	671,937	Oke	kN
Variasi 9 (GV-9)	UX	910,795	910,669	Oke	kN
	UY	683,005	683,002	Oke	kN
Variasi 10 (GV-10)	UX	925,685	925,536	Oke	kN
	UY	694,199	694,152	Oke	kN

Dari Tabel 4 di atas, hasil kontrol geser dasar ragam sudah memenuhi syarat yang ditentukan, sehingga nilai faktor koreksi baru sudah benar dan bisa digunakan.

3.3. Respon Partisipasi Massa Struktur

Presentase respon partisipasi massa struktur arah-x (UX) dan arah-y (UY) dalam penentuan arah kritis struktur dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Modal Load Participation Ratio

Variasi Sampel	Output Case	Load Participation (%)	
		UX	UY
Variasi 1 (GV-1)	Modal	0,19	99,84
Variasi 2 (GV-2)	Modal	0,24	99,84
Variasi 3 (GV-3)	Modal	0,29	99,84
Variasi 4 (GV-4)	Modal	0,37	99,84
Variasi 5 (GV-5)	Modal	0,43	99,84
Variasi 6 (GV-6)	Modal	0,53	99,84
Variasi 7 (GV-7)	Modal	0,64	99,84
Variasi 8 (GV-8)	Modal	0,77	99,83
Variasi 9 (GV-9)	Modal	0,85	99,83
Variasi 10 (GV-10)	Modal	0,94	99,83

Dari Tabel 5 di atas menunjukkan kondisi kritis pada kekuatan struktur jembatan adalah pada arah-y (UY), karena melebihi rasio minimum partisipasi massa struktur yaitu 90% ($\geq 90\%$).

3.4. Kapasitas Geser Dasar Struktur (Base Shear Capacity)

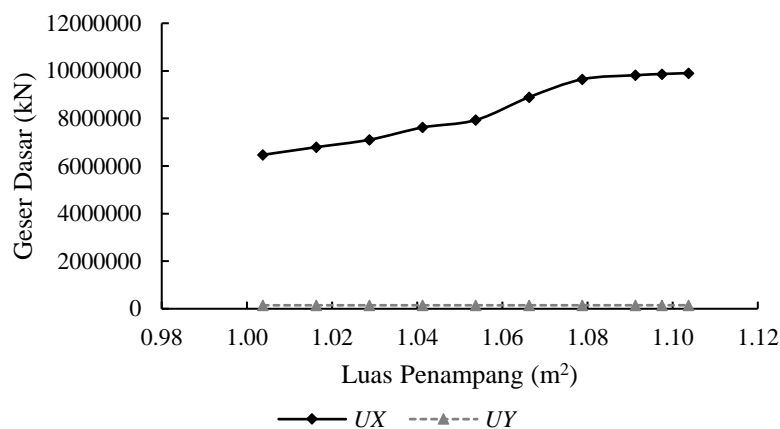
Kapasitas geser dasar struktur step max arah-x (UX) dan arah-y (UY) dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Kapasitas Geser Dasar Struktur (Base Shear) Step Maksimum

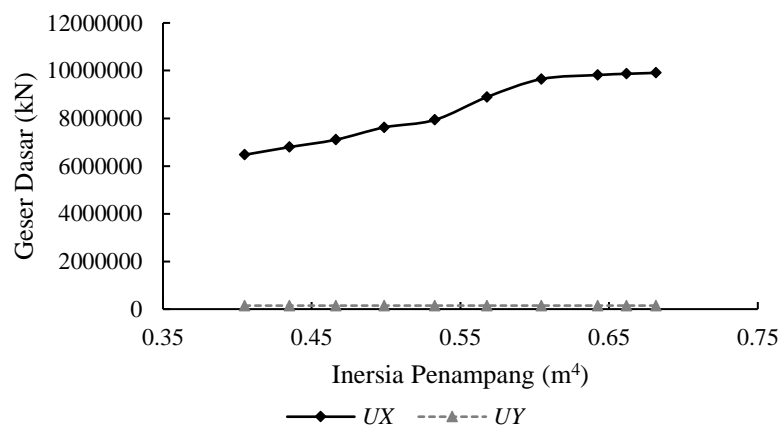
Variasi Sampel	Luas (m ²)	Inersia (m ⁴)	Kapasitas Geser Dasar (kN)		Step Max
			UX	UY	
Variasi 1 (GV-1)	1,0038	0,4049	UX	6470657,154	7
			UY	146662,175	100
Variasi 2 (GV-2)	1,0163	0,4350	UX	6792890,310	6
			UY	146820,227	100
Variasi 3 (GV-3)	1,0288	0,4663	UX	7104079,738	8
			UY	147011,275	100
Variasi 4 (GV-4)	1,0413	0,4989	UX	7621498,840	6
			UY	147231,896	100

Variasi Sampel	Luas (m ²)	Inersia (m ⁴)	Kapasitas Geser Dasar (kN)	Step Max
Variasi 5 (GV-5)	1,0538	0,5328	UX	7933553,804
			UY	147385,213
Variasi 6 (GV-6)	1,0663	0,5680	UX	8894586,317
			UY	147610,105
Variasi 7 (GV-7)	1,0788	0,6045	UX	9646305,230
			UY	147743,249
Variasi 8 (GV-8)	1,0913	0,6424	UX	9815637,256
			UY	147915,604
Variasi 9 (GV-9)	1,0975	0,6618	UX	9866299,337
			UY	148053,369
Variasi 10 (GV-10)	1,1038	0,6816	UX	9906299,337
			UY	148089,817

Dari Tabel 6 di atas diperoleh bahwa kapasitas geser dasar struktur step max lebih besar pada arah-x (UX) karena gempa lateral terjadi lebih besar pada arah-x (UX) dibandingkan dengan arah-y (UY). Grafik pengaruh luas penampang girder (A) dan inersia penampang girder (I) terhadap kapasitas geser dasar struktur (V) step max dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Grafik Pengaruh Luas Penampang (A) terhadap Kapasitas Geser Dasar Struktur (V) Step Maksimum



Gambar 3. Grafik Pengaruh Inersia Penampang (I) terhadap Kapasitas Geser Dasar Struktur (V) Step Maksimum

Dari grafik pada Gambar 2 dan Gambar 3 di atas menunjukkan bahwa semakin besar luas penampang girder (A) dan inersia penampang girder (I), maka kapasitas geser dasar struktur (V) step max juga akan lebih besar jika dibandingkan dengan luas penampang girder (A) dan inersia penampang girder (I) yang lebih kecil.

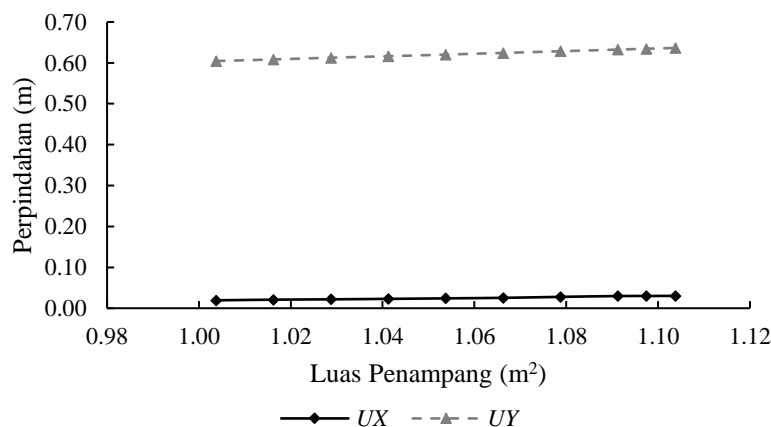
3.5. Kapasitas Perpindahan Struktur (*Displacement Capacity*)

Kapasitas perpindahan struktur step max arah-x (UX) dan arah-y (UY) dapat dilihat pada Tabel 7.

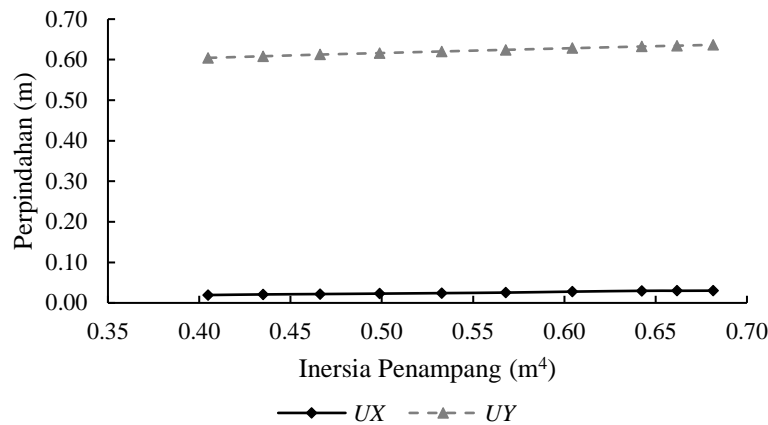
Tabel 7. Kapasitas Perpindahan Struktur (*Displacement*) Step Maksimum

Variasi Sampel	Luas (m ²)	Inersia (m ⁴)	Kapasitas Perpindahan (m)		Step Max
Variasi 1 (GV-1)	1,0038	0,4049	UX	0,0194	7
			UY	0,6045	100
Variasi 2 (GV-2)	1,0163	0,4350	UX	0,0209	6
			UY	0,6084	100
Variasi 3 (GV-3)	1,0288	0,4663	UX	0,0218	8
			UY	0,6126	100
Variasi 4 (GV-4)	1,0413	0,4989	UX	0,0228	6
			UY	0,6163	100
Variasi 5 (GV-5)	1,0538	0,5328	UX	0,0241	5
			UY	0,6203	100
Variasi 6 (GV-6)	1,0663	0,5680	UX	0,0254	10
			UY	0,6243	100
Variasi 7 (GV-7)	1,0788	0,6045	UX	0,0278	11
			UY	0,6284	100
Variasi 8 (GV-8)	1,0913	0,6424	UX	0,0298	9
			UY	0,6325	100
Variasi 9 (GV-9)	1,0975	0,6618	UX	0,0299	10
			UY	0,6345	100
Variasi 10 (GV-10)	1,1038	0,6816	UX	0,0302	10
			UY	0,6366	100

Grafik pengaruh luas penampang girder (A) dan inersia penampang girder (I) terhadap kapasitas perpindahan struktur (D) step max dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Grafik Pengaruh Luas Penampang (A) terhadap Kapasitas Perpindahan Struktur (D) Step Maksimum

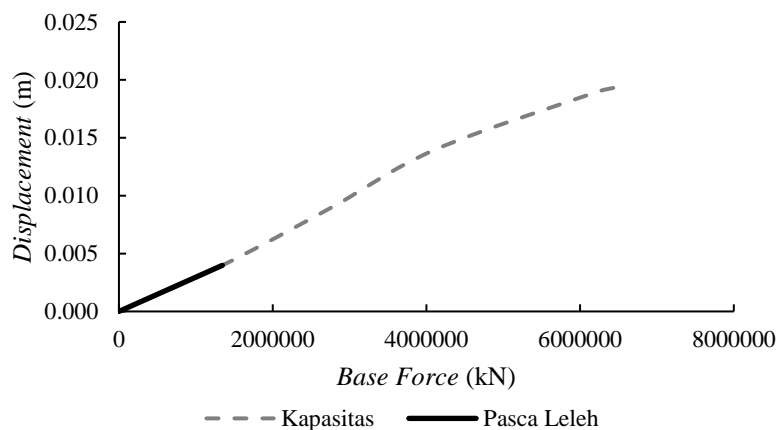


Gambar 5. Grafik Pengaruh Inersia Penampang (*I*) terhadap Kapasitas Perpindahan Struktur (*D*) Step Maksimum

Dari grafik pada Gambar 4 dan Gambar 5 di atas menunjukkan bahwa semakin besar luas penampang girder (*A*) dan inersia penampang girder (*I*), maka kapasitas perpindahan struktur (*D*) step max juga akan lebih besar jika dibandingkan dengan luas penampang girder (*A*) dan inersia penampang girder (*I*) yang lebih kecil.

3.6. Tingkat Kinerja Struktur Metode FEMA-356

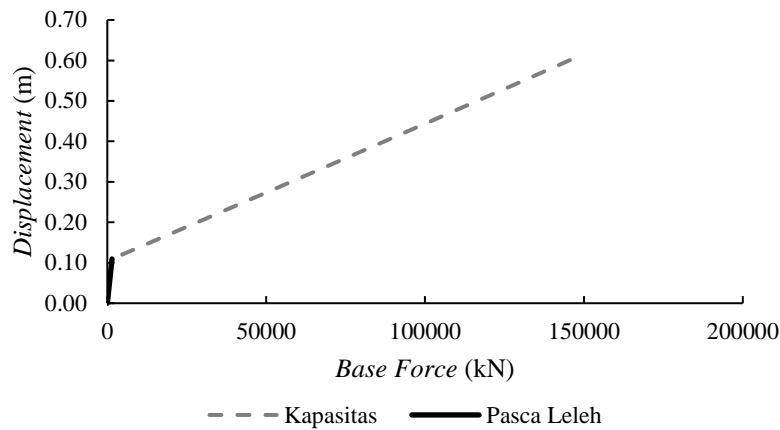
Tingkat kinerja struktur berdasarkan metode FEMA-356 digunakan untuk mengetahui tingkat keruntuhan struktur pasca gempa berdasarkan target perpindahan struktur (δ_T). Tingkat kinerja struktur yang digunakan sebagai contoh adalah girder variasi 1 (*GV-1*) mewakili 10 variasi lainnya. Kurva *bilinear pushover* arah-x (*UX*) dan arah-y (*UY*) girder variasi 1 (*GV-1*) dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Kurva *Bilinear Pushover* Arah-x Girder Variasi 1 (*GV-1*)

Dari kurva *bilinear pushover* pada Gambar 6 di atas, diperoleh nilai-nilai yang digunakan untuk menghitung target perpindahan struktur arah-x (δ_{T-x}) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \delta_{T-x} &= C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \\
 &= (0,989)(1)(1)(1)(0,492) \frac{0,020^2}{4\pi^2} (9,81) \\
 &= 0,0000484 \text{ m Immediate Occupancy}
 \end{aligned}$$



Gambar 7. Kurva *Bilinear Pushover* Arah-y Girder Variasi 1 (*GV-1*)

Dari kurva *bilinear pushover* pada Gambar 7 di atas, diperoleh nilai-nilai yang digunakan untuk menghitung target perpindahan struktur arah-x (δ_{T-Y}) sebagai berikut:

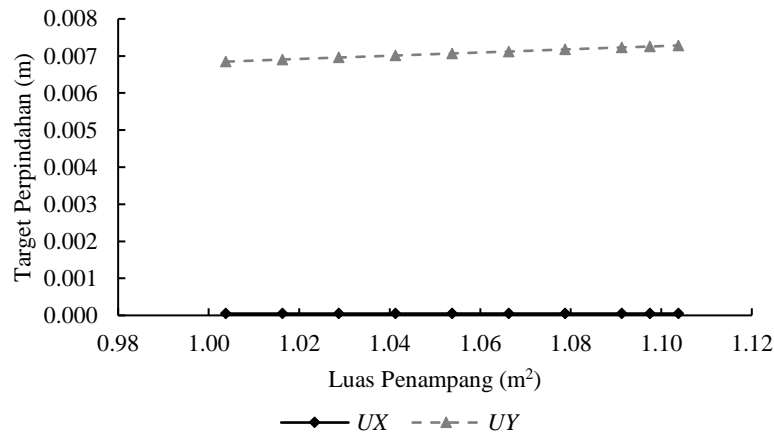
$$\begin{aligned} \delta_{T-Y} &= C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \\ &= (1,017)(1,447)(1)(1)(0,941) \frac{0,141^2}{4\pi^2} (9,81) \\ &= 0,00685 \text{ m Immediate Occupancy} \end{aligned}$$

Hasil rekapitulasi nilai target perpindahan struktur (δ_T) berdasarkan metode *FEMA-356* dari 10 variasi girder arah-x (*UX*) dan arah-y (*UY*) dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Rekapitulasi Target Perpindahan Struktur (δ_T) Metode *FEMA-356*

Variasi Sampel	Luas (m ²)	Target Perpindahan, δ_T (m)	
		<i>UX</i>	<i>UY</i>
Variasi 1 (<i>GV-1</i>)	1,0038	0,0000484	0,00685
Variasi 2 (<i>GV-2</i>)	1,0163	0,0000485	0,00690
Variasi 3 (<i>GV-3</i>)	1,0288	0,0000486	0,00696
Variasi 4 (<i>GV-4</i>)	1,0413	0,0000486	0,00701
Variasi 5 (<i>GV-5</i>)	1,0538	0,0000488	0,00707
Variasi 6 (<i>GV-6</i>)	1,0663	0,0000488	0,00712
Variasi 7 (<i>GV-7</i>)	1,0788	0,0000490	0,00718
Variasi 8 (<i>GV-8</i>)	1,0913	0,0000491	0,00723
Variasi 9 (<i>GV-9</i>)	1,0975	0,0000491	0,00725
Variasi 10 (<i>GV-10</i>)	1,1038	0,0000492	0,00728

Dari Tabel 8 di atas, kemudian dibuat dalam satu grafik yaitu grafik target perpindahan struktur (δ_T) dari 10 variasi girder berdasarkan luas penampang girder (*A*) dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Target Perpindahan Struktur (δ_T) Metode *FEMA-356* Berdasarkan Luas Penampang Girder (*A*)

Dari grafik pada Gambar 8 di atas menunjukkan bahwa target perpindahan struktur terbesar terjadi pada arah-y jika dibandingkan dengan arah-x, hal ini dikarenakan nilai inersia penampang pada arah-y (sumbu lemah) lebih kecil dari nilai inersia penampang pada arah-x (sumbu kuat).

Tingkat kinerja atau performa level struktur dari 10 variasi berdasarkan metode *FEMA-356* arah-x (*UX*) dan arah-y (*UY*) dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Tingkat Kinerja Struktur Metode *FEMA-356*

Variasi Sampel	Arah	Parameter <i>FEMA-356</i>				Performa Level Struktur
		Pasca Leleh		Target Perpindahan		
		<i>Displ, δ_y</i> (m)	<i>Base Force, V_y</i> (kN)	<i>Displ, δ_T</i> (m)	<i>Base Force, V_T</i> (kN)	
Variasi 1 (<i>GV-1</i>)	<i>UX</i>	0,00398	1345156,443	0,0000484	16457,267	<i>IO</i>
	<i>UY</i>	0,1095	1494,163	0,00685	92,917	<i>IO</i>
Variasi 2 (<i>GV-2</i>)	<i>UX</i>	0,00402	1349140,264	0,0000485	16378,459	<i>IO</i>
	<i>UY</i>	0,1134	1494,477	0,00690	90,467	<i>IO</i>
Variasi 3 (<i>GV-3</i>)	<i>UX</i>	0,00406	1362562,811	0,0000486	16411,997	<i>IO</i>
	<i>UY</i>	0,1176	1495,261	0,00696	87,932	<i>IO</i>
Variasi 4 (<i>GV-4</i>)	<i>UX</i>	0,00410	1386785,319	0,0000486	16570,203	<i>IO</i>
	<i>UY</i>	0,1213	1496,422	0,00701	86,042	<i>IO</i>
Variasi 5 (<i>GV-5</i>)	<i>UX</i>	0,00413	1388870,347	0,0000488	16504,361	<i>IO</i>
	<i>UY</i>	0,1253	1496,970	0,00707	83,973	<i>IO</i>
Variasi 6 (<i>GV-6</i>)	<i>UX</i>	0,00416	1413301,568	0,0000488	16679,250	<i>IO</i>
	<i>UY</i>	0,1293	1498,358	0,00712	82,044	<i>IO</i>
Variasi 7 (<i>GV-7</i>)	<i>UX</i>	0,00419	1414512,971	0,0000490	16624,794	<i>IO</i>
	<i>UY</i>	0,1334	1498,854	0,00718	80,200	<i>IO</i>
Variasi 8 (<i>GV-8</i>)	<i>UX</i>	0,00422	1427103,151	0,0000491	16691,322	<i>IO</i>
	<i>UY</i>	0,1375	1499,849	0,00723	78,433	<i>IO</i>
Variasi 9 (<i>GV-9</i>)	<i>UX</i>	0,00424	1445877,737	0,0000491	16857,377	<i>IO</i>
	<i>UY</i>	0,1395	1500,873	0,00725	77,629	<i>IO</i>
Variasi 10 (<i>GV-10</i>)	<i>UX</i>	0,00425	1439543,851	0,0000492	16765,532	<i>IO</i>
	<i>UY</i>	0,1416	1500,898	0,00728	76,778	<i>IO</i>

Catatan: Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), Collapse Prevention (CP)

Dari Tabel 6 di atas diperoleh nilai target perpindahan struktur berdasarkan FEMA-356 berada di bawah nilai pasca leleh struktur ($\delta_T \leq \delta_y$), hal ini menunjukkan bahwa struktur mengalami kerusakan yang kecil atau kerusakan yang tidak berarti dan kekakuan struktur setelah terjadi gempa hampir sama seperti sebelum terjadi gempa (Manalip dkk. 2014). Sehingga dari 10 variasi girder yang digunakan, tingkat kinerja atau performa level struktur termasuk dalam kategori level *Immediate Occupancy (IO)*.

4. Kesimpulan

Kondisi struktur paling kritis terhadap kekuatan struktur adalah pada arah-y (*UY*), karena partisipasi massa struktur pada arah-y (*UY*) melebihi rasio minimum ($\geq 90\%$). Kapasitas geser dasar struktur step maksimum lebih besar pada arah-x (*UX*), sedangkan kapasitas perpindahan struktur step maksimum lebih besar pada arah-y (*UY*). Pengaruh luas penampang girder dan inersia penampang girder terhadap kapasitas struktur step maksimum adalah semakin besar luas dan inersia maka kapasitas juga akan lebih besar. Tingkat kinerja struktur berdasarkan metode *FEMA-356* untuk 10 variasi adalah pada level performa *Immediate Occupancy (IO)*.

Daftar Pustaka

- Albar, Moh G, Partogi H Simatupang, dan Wilhelmus Bunganaen. 2020. "Respon Struktur Jembatan Prategang Oelnaikbesi Akibat Pengaruh Gempa." *Jurnal Teknik Sipil* 9(2): 277–90.
- Badan Standardisasi Nasional. 2012. *SNI 1726:2012 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2016. *SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2016. *SNI 2833:2016 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Djubida, Sandro. 2020. "Gambar Teknik Struktur Jembatan Penghubung Spillway ke Intake Saluran Pengelak Bendungan Temef."
- FEMA 356. 2000. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Manalip, H, Reky S Windah, dan Servie O Dapas. 2014. "Analisis Pushover Pada Struktur Gedung Bertingkat Tipe Podium." *Jurnal Sipil Statik* 2(4): 201–13.
- Moehle, Jack dkk. 1999. "The Chi-Chi, Taiwan Earthquake of September 21, 1999." *Earthquake Engineering Research Intitute's Learning from Earthquakes Project*: 1–12.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan. 2021. "Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa dan Pedoman Penentuan Spektrum Respons Desain di Permukaan Tanah Untuk Jembatan." <http://lini.binamarga.pu.go.id/> (accessed June 3, 2021).
- Saputra, Endra Piqriawan. 2020. "Analisis Metode Perbaikan Jembatan Akibat Gempa (Studi Kasus Jembatan Beburung 2 Lombok Timur)." Jurusan Teknik Sipil, Universitas Mataram.