

KOMPARASI PERILAKU STRUKTUR JEMBATAN DENGAN *ELASTOMERIC BEARING* DAN *LEAD RUBBER BEARING* TERHADAP GAYA GEMPA

Rahmat Azharis¹⁾, Maizuar¹⁾, David Sarana¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh, Jl. Batam, Blang Pulo, Kecamatan Muara Satu, Lhokseumawe, Aceh 24355

Corresponding author: rahmat.210110012@mhs.unimal.ac.id

Abstrak

Indonesia memiliki tingkat kegempaan cukup tinggi, sehingga infrastruktur seperti jembatan yang memiliki kesederhanaan bentuk sangat rentan terhadap kerusakan struktural, untuk itu diperlukan sistem isolasi seismik yang mampu mereduksi respon dinamis akibat beban gempa. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan perilaku struktur jembatan eksisting dengan sistem *Elastomeric Bearing* (EB) support dan Sistem Isolasi Seismik yaitu, *Lead Rubber Bearing* (LRB) terhadap pengaruh gaya gempa. Metode penelitian dengan pemodelan numerik menggunakan software SAP2000, mengacu pada SNI 1725-2016, SNI 2833-2016 dan Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa. Analisis yang digunakan adalah time history dengan input tiga data gempa representatif (*Quirihue, Hyuganda, Ki_se*). Parameter utama yang dianalisis meliputi *displacement* (perpindahan), defleksi (lendutan), periode alami dan frekuensi. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem LRB mampu menurunkan perpindahan struktur secara signifikan, yaitu 30-154%, dibandingkan EB pada semua gempa. Defleksi maksimum menunjukkan perbedaan relatif kecil hanya sekitar 1,3%, namun nilai lendutan LRB lebih kecil. Periode alami jembatan dengan LRB meningkat hingga 121,9%, yang membuat struktur lebih fleksibel, menurunkan frekuensi getar serta mengurangi gaya gempa yang bekerja pada struktur.

Kata kunci: *Elastomeric Bearing, Lead Rubber Bearing, Jembatan, Gempa*

Abstract

Indonesia has a relatively high level of seismic activity, which makes infrastructures such as bridges, with their simple structural forms, highly vulnerable to structural damage. Therefore, a seismic isolation system capable of reducing the dynamic response caused by earthquake loads is required. This study aims to compare the structural behavior of an existing bridge using an elastomeric bearing (EB) support system and a seismic isolation system, namely the lead rubber bearing (LRB), under earthquake loading. The research method involves numerical modeling using SAP2000 software, referring to SNI 1725-2016, SNI 2833-2016 and the book of 'Peta deagregasi Bahaya Gempa Indonesia' for planning and evaluation of seismic design. The analysis used is time history analysis with three representative earthquake records (*Quirihue, Hyuganda, Ke_si*), as input. The main parameters analyzed include displacement, deflection, natural period and frequency. The results show that the LRB system can significantly reduce structural displacement by 30-154% compared to EB in all earthquake directions. The maximum deflection shows a relatively small difference of about 1,3%, with the LRB system having a lower deflection value. The natural period of the bridge with LRB increased by up to 121,9%, making the structure more flexible, reducing vibration frequency, and decreasing the seismic forces acting.

Keywords: *Elastomeric Bearing, Lead Rubber Bearing, Bridge, Earthquake*

PENDAHULUAN

Jembatan memiliki peran penting sebagai infrastruktur penghubung aktivitas jalur kehidupan masyarakat, namun akibat kesederhanaan bentuk dan strukturnya mengakibatkan jembatan sangat rentan terhadap kegagalan struktur akibat gempa bumi. Posisi perletakan geometri Indonesia yang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, sehingga Indonesia memiliki aktifitas seismik yang cukup tinggi (Kunde & Jangid, 2003; Jamal dkk., 2017).

Aktifitas seismik yang tinggi mengakibatkan banyak kerusakan infrastruktur salah satunya yaitu jembatan, seperti peristiwa gempa disertai tsunami Aceh 2004 dengan gempa berkekuatan 9,3 Magnitudo. Oleh karena itu untuk meminimalisir hal tersebut, Provinsi Aceh perlu mempertimbangkan sistem isolasi seismik sebagai bagian dari perencanaan mitigasi gempa dalam pembangunan infrastruktur jembatan. Sistem isolasi seismik merupakan suatu komponen dengan perangkat khusus dengan sistem peredam viskos (pengurang energi) seperti beban lateral dan kendaraan, sehingga memisahkan struktur atas dari pondasi (Leblouba, 2022).

Jembatan Indonesia secara umum telah menerapkan penggunaan *Elastomeric Bearing* (EB) yang berfungsi sebagai peredam getaran, namun kapasitas seismiknya masih terbatas terutama deformasi besar ketika gempa bumi. Kemajuan teknologi dunia konstruksi, menghasilkan suatu inovasi berupa sebuah sistem isolasi seismik *Lead Rubber Bearing* (LRB), yang memiliki keunggulan menggabungkan fleksibilitas bantalan karet dengan kemampuan disipasi energi dari inti timbal (Santosa dkk., 2022).

Penelitian terdahulu banyak yang telah membuktikan keunggulan LRB dalam meredam energi gempa dan meningkatkan kestabilan struktur. Penelitian sebelumnya tidak membandingkan langsung isolator LRB dengan bantalan Elastomer (EB) yang umum digunakan pada jembatan eksisting, sehingga hal tersebut belum memberikan gambaran utuh mengenai peningkatan performa LRB terhadap kondisi aktual dilapangan. Penelitian -penelitian tersebut langsung membandingkan dua atau lebih sistem isolasi

seismik sekaligus, seperti LRB dengan *High dumping rubber bearing*, atau *Friction pendulum system* (Fauzan & Sukamdo, 2023; Gabriel, 2022). penelitian tentang penggunaan isolator LRB pada jembatan di wilayah Aceh sendiri masih jarang dijumpai.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis seberapa besar perbandingan dan pengaruh penggunaan LRB terhadap perilaku struktur pada jembatan krueng peudada yang berkaitan dengan gaya gempa. Analisis dengan pendekatan numerik menggunakan bantuan *Software* SAP2000 berdasarkan SNI 1725:2016 (pembebanan pada jembatan), SNI 2833:2016 dan Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Evaluasi dan Perencanaan Infrastruktur Tahan Gempa.

Elastomeric Bearing

Pedoman perencanaan perletakan bantalan karet untuk jembatan (2015), bahwa elastomer adalah suatu material dengan sifat karet asli, karet sintetis (karet vulkanis) yang meregang ketika terjadinya tegangan dan deformasi dengan cepat dan mampu kembali pada dimensi semula.

Bantalan elastomer berfungsi sebagai sarana pergerakan jembatan yang disebabkan oleh kontraksi, pemuaian, lendutan, tekanan tanah, dan gaya-gaya lainnya (Setiati & Irawan, 2005).

Dimensi elastomer yang digunakan sesuai dengan data gambar teknis yaitu 450x400x45mm, dari dimensi tersebut dapat dihitung nilai kekakuan horizontal dan vertikal dari EB, dengan ketentuan toleransi yang mengacu pada SNI 3966-2012, ditampilkan pada Tabel 1

Tabel 1. Batas toleransi bantalan elastomer

Uraian	Ukuran (mm)	
	≤ (350 × 170) mm ≤ Ø 330 mm	> (350 × 170) mm > Ø 330 mm
selimut tepi karet	± 2,0	± 4,0
ketebalan sisi luar	± 0,5	± 0,5
tebal sisi dalam	± 0,5	± 1,0
Dimensi area	± 2,0	± 4,0
Jarak antar sisi atas dan bawah	≤ 1,0	≤ 2,0
Variasi ketebalan bantalan:		
a) T ≤ 100 mm	± 1,0	± 1,0
b) T > 100 mm	± 2,0	± 2,0

Sumber: SNI 3966:2012

Spesifikasi untuk pelat baja mengacu pada *catalog product* Magda Elastomer Bearing, PT. Magdatama Multi Usaha, dengan spesifikasi pada Tabel 2

Tabel 2. Spesifikasi plat baja elastomer

Material	Item	Standar
S235 atau setara	Plat	EN 10025 atau setara
	Tensile strength, mm	350 N/mm ²
	Yield strength, mm	235 N/mm ²
	Elongation at break, mm	15%
	Ketebalan, min.	3 mm

Sumber: PT. Magdatama multi usaha

Dengan ketentuan-ketentuan yang telah diatur, kekakuan pada bantalan elastomer dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

1. Kekakuan Vertikal

$$K_v = (E_c \times A) / H \quad (1)$$

E_c (modulus tekan efektif elastomer) ksi
= 4,8GS2

G (Modulus geser elastomer)

S (Faktor bentuk) = $A / (2h_{ri}(L+W))$

Dimana:

L (Panjang elastomer)

W (Lebar elastomer)

h_{ri} (tebal efekti karet 1 lapis)

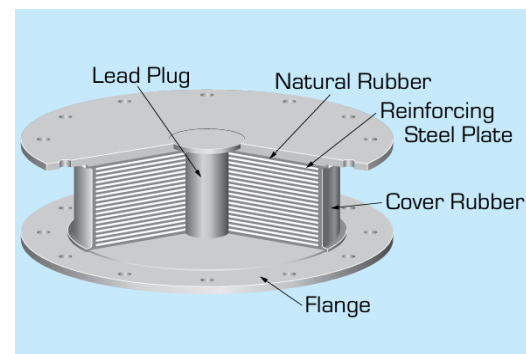
A (luas elastomer)

2. Kekakuan Vertikal

$$K_H = (G \times A) / h_{rt} \quad (2)$$

Lead Rubber Bearing

Lead Rubber Bearing (LRB) adalah suatu sistem yang terdiri dari lapisan karet yang dikombinasikan dengan lapisan baja serta tambahan lead. Sistem ini memiliki kemampuan ganda yaitu, dukungan beban vertikal, fleksibilitas horizontal, gaya pemulihan, serta peredaman dalam satu unit. Umumnya kapasitas penyerapan energi oleh lead mampu mengurangi perpindahan lateral dan memiliki tegangan yang relatif rendah sekitar 10MPa (kondisi geser). Lead dapat melakukan pemulihan dengan cara melalui proses rekristalisasi dan pertumbuhan butiran yang berkaitan secara simultan terus menerus sampai memulihkan sifat mekanis lead. Penelitian ini akan menggunakan spesifikasi LRB dari catalog Bridgeston sebagai acuan perencanaan. *Lead rubber bearing* dapat dilihat seperti Gambar 1.



Gambar 1. Lead rubber bearing

Sumber: Bridgeston

Rumus penentuan dimensi rencana LRB untuk jembatan sebagai berikut:

$$K_H = ((\rho/g) \times (2\pi/T_i)^2) \quad (3)$$

$$A = ((K_H \times t_r) / G)$$

$$D = \sqrt{(4A/\pi)}$$

Keterangan:

K_H :Kekakuan horizontal (MN/m)

P : gaya aksial (kN)

g : Gaya gravitasi (9,81)

T_i : Periode efektif struktur saat terjadi perpindahan

A : Luas lead rubber bearing (mm²)

t_r : Ketebalan karet (cm)

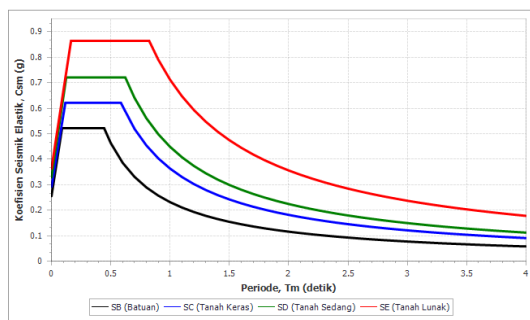
G : Modulus geser (N/mm²)

D : Diameter rencana lead rubber bearing (mm)

Spektrum Rencana

Respon spektra adalah nilai yang menggambarkan respon maksimum sistem berderajat kebebasan tunggal pada berbagai frekuensi alami (periode alami) teredam akibat suatu goyangan tanah. Respon spektra dapat di buat dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 2.

Respon spektrum, diambil melalui webside LINI PUPR yang sesuai dengan peraturan SNI 2833:2016 untuk perencanaan jembatan. Kondisi tanah pada lokasi penelitian adalah tanah sedang (SD), yang diperoleh dari hasil pengujian NSPT proyek jembatan pada gambar *as build drawing*. Spektrum Rencana pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar. 2 Spektrum rencana

Sumber: <https://lini.binamarga.pu.go.id>

Time-History

SNI 2833:2016 menjelaskan bahwa riwayat waktu percepatan harus menggambarkan kegempaan situs dan lokalitas situs, respon spektra yang kompatibel dengan riwayat waktu harus digunakan rekaman gempa yang mewakili. Teknik yang digunakan untuk menyesuaikan spektra harus dilakukan agar tercapai riwayat waktu yang secara seismologi menyerupai riwayat waktu inisial yang dipilih untuk penyesuaian spektra. Perancangan didasarkan pada pengaruh respons maksimum dari tiga gempa.

Menurut buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa, untuk penentuan kriteria data time-history terdiri dari beberapa tahapan yaitu, pemilihan dan

modifikasi gerak tanah, signifikansi analisis deagregasi dalam pemilihan gerak tanah, dan penentuan parameter input untuk analisis deagregasi.

a) Pemilihan dan modifikasi gerak tanah terdiri dari,

1. Pembuatan spektrum target
2. Pemilihan gerak tanah (Mekanisme sumber, Magnitudo dan jarak, dan klasifikasi situs)
3. Signifikansi deagregasi pemilihan tanah
4. Penentuan parameter input untuk analisis deagregasi

b) Mekanisme sumber

Setiap mekanisme sumber memiliki persamaan GMPE (Ground Motion Prediction Equation) yang berbeda satu sama lain. Peta deagregasi disajikan untuk 3 kondisi mekanisme sumber yang berkontribusi terhadap kegempaan Indonesia, yaitu subduksi interface (megathrust), subduksi intraslab (Benioff) dan sesar dangkal.

c) Level bahaya

Nilai percepatan spektral untuk suatu level bahaya tertentu ditentukan melalui kurva bahaya yang dikembangkan menggunakan teorema probabilitas total dan merupakan komponen utama, standart normatif untuk evaluasi dan retrofit seismik bangunan eksisting, untuk evaluasi struktur jembatan disyaratkan dua level bahaya untuk kebutuhan evaluasi yaitu, gempa dengan periode ulang 100-1000 tahun.

d) Parameter intensitas gerak tanah

Berdasarkan hasil pengamatan deagregasi di Indonesia menggunakan GMPE yang memiliki cakupan periode getar lebih besar dari 3 detik, oleh karena itu periode getar 3 detik secara strategis dapat mewakili struktur dengan periode menengah dan periode getar panjang seperti struktur jembatan.

Perilaku Struktur

Perilaku struktur jembatan adalah suatu reaksi jembatan yang diakibatkan oleh adanya gaya-gaya yang bekerja pada jembatan (Handayani, 2017).

Parameter perilaku struktur yang ditinjau terdiri dari *Displacement* (perpindahan),

Defleksi (lendutan), Periode alami jembatan.

1. *Displacement*

Displacement (perpindahan) merupakan suatu kondisi terjadinya perpindahan atau pergeseran relatif pada suatu element yang terjadi akibat beban yang diterima (Zebua, 2023). Perpindahan dapat terjadi pada suatu struktur disebabkan karena faktor alam seperti pergerakan tanah yang berada dititik berdirinya struktur tersebut. Dengan melakukan monitoring posisi pada suatu target yang berada pada struktur dengan melakukan secara berkala dan berkelanjutan, hal itu merupakan cara untuk mengetahui besarnya perpindahan yang terjadi (Usman, 2016).

2. Defleksi

Defleksi adalah suatu kondisiter jadinya perubahan bentuk pada suatu objek atau elemen dalam arah vertikal yang disebabkan oleh aksi pembebanan yang terjadi. Semakin panjang bentang suatu jembatan maka semakin besar pula defleksi yang akan ditimbulkan (Afrizal dkk., 2014; Firdausi dkk., 2018). Menurut (Cahyadi & Wirawan, 2016) sebelum diberikannya pembebanan, defleksi pada balok dapat dengan mudah dijelaskan berdasarkan posisinya. Tolak ukur defleksi sendiri dimulai dari permukaan netral awal ke titik sesudah defleksi terjadi.

3. Periode alami

Periode getar alami merupakan waktu yang dibutuhkan oleh suatu sistem untuk menyelesaikan satu siklus penuh getaran setelah mengalami gangguan dari posisi keseimbangan statis hingga kembali ke posisi semula. Istilah tersebut juga dikenal sebagai *natural fundamental periode*, dimana kata alami menunjukkan bahwa getaran tersebut merupakan karakteristik bawaan dari struktur yang dipengaruhi oleh massa dan kekakuannya (Mulia, 2013).

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian berlokasi pada Provinsi Aceh, Kabupaten Bireun, Kecamatan Krueng Peudada dengan titik koordinat lokasi 5°12'06"N, 96°34'53"E. Objek penelitian jembatan yang baru rampung pada tahun

2024, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3, dan jenis penelitian kuantitatif.



Gambar 3. Lokasi objek penelitian

Sumber: (Google earth)

Tahapan Penelitian

Tahapan atau langkah-langkah dari penelitian ini dimulai dari studi literatur, pengumpulan data primer yaitu, data Output analisis dan hasil perhitungan jembatan, data sekunder meliputi, as-build drawing jembatan, data tanah, data ground motion gempa dan data spesifikasi LRB. Dilanjut dengan pemodelan struktur menggunakan Software SAP2000; define (material, properti frame, dan pembebanan) struktur; Analisis degregasi dan Time-History; Analisis output EB dan LRB (Displacement, Defleksi, Periode alami dan Frekuensi) jembatan, dan diakhiri Analisis perilaku struktur jembatan dan dibandingkan.

Deskripsi jembatan

Jembatan Krueng Peudada merupakan jembatan PCI girder beton prategang yang berfungsi sebagai jalan lintas antar provinsi (Medan-Banda Aceh). Data teknik jembatan bersumber dari visual as-built drawing jembatan krueng peudada.

Panjang total jembatan sebesar 246 m dengan fokus tinjauan penilitian pada bentang 44,6 m pada titik P4 dan P5. Sebagai asumsi pada bentang terpanjang akan mengalami perilaku struktur yang lebih kompleks, sehingga kondisi tersebut sebagai tolak ukur perwakilan dari kondisi jembatan. Data teknis jembatan diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data teknis jembatan

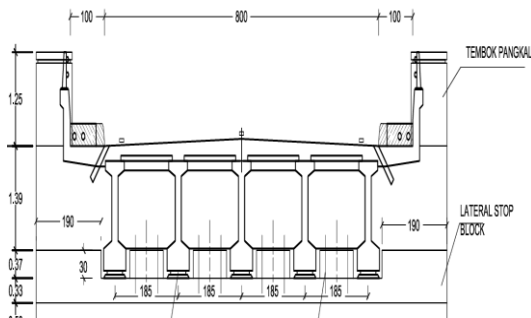
No	Tinjauan	Data teknis
1	Jenis jembatan	Jembatan beton prategang
2	Kelas Jembatan	Kelas I (Lebar = 10 [1+8+1]m)

3	Panjang jembatan	246 m
6	Mutu tulangan	BJTS 420 dan BJTP 820
7	Mutu beton girder	f'_c 40 MPa
8	Jenis Girder	PCI Girder
9	Tipe Strand	KBjp-P7 RB
10	Tensile Strength tendon	1860 MPa
11	Diameter PC strand	12,7 mm
12	Dia fragma	30 MPa
13	Deck plat	20 MPa

Sumber: *As build drawing* jembatan Krueng Peudada

Gambar Kerja

Gambar kerja (Detailed Engineering Drawing) jembatan yang digunakan pada penelitian ini bersumber dari gambar as-build drawing jembatan Krueng Peudada, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Potongan melintang jembatan
Sumber: *As build drawing* jembatan Krueng Peudada

Data Girder Jembatan

PCI girder jembatan krueng peudada berasal dari Wika Beton dengan spesifikasi pada bentang 44,6m ditampilkan pada Tabel 4 dan Gambar 5 sebagai berikut:

Tabel 4. PC strand girder

WIKI PCI Girder Straight Pretension L-44,6m; H-2,1m; CTC-185cm					
No. Cable	No. PC Strand Dia.12,7 (mm)	Cale Coor	Profile (mm)		Anchor Angle
			Edge	Midle	
1	15	Y	1450	350	5,7
2	19	Y	1150	230	4,8

3	19	Y	850	100	3,9
4	19	Y	550	100	2,3
5	19	Y	250	100	0,8

Sumber: PT. Wijaya Karya Beton Tbk

Kombinasi Pembebanan

Komponen dan sambungan jembatan harus memnuhi ketentuan yang berpengaruh terhadap kombinasi beban-beban dengan ketentuan pada setiap keadaan batas. Pada penelitian ini beban kombinasi berfokus pada kondisi Ekstrim yang merupakan kombinasi pembebanan gempa. Kombinasi beban ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Kombinasi pembebanan ekstrim

Beban	Ekstrim							
	DL	LL	PR	TD	TT	TB	TP	EQ
	1,2	2	1	0,3	0,3	0,3	0,3	1

Sumber: SNI 1725-2016

Data Time History

Tabel 6 Data event gempa time history

Event gempa	Magnitudo	R(km)	Vs30 (m/s)
<i>Ki_se</i>	7.23	74,08	205,2
<i>Hyuganada</i>	7.57	144,72	316.5
<i>Quirihue</i>	8,81	185,10	274

Sumber:

<https://www.risksciences.ucla.edu/nhr3/nga-subduction/gmportal>

HASIL DAN PEMBAHASAN

Elastomeric bearing yang digunakan dengan data teknis pada gambar *as build drawing* 450×400×45 mm serta ketentuan-ketentuan toleransi ukuran bantalan elastomer menurut SNI 3966-2012, dengan perhitungan persamaan (1) dan (2) sehingga diperoleh nilai K_v (386,3 kN/mm) dan K_H (5,65 kN/mm). Nilai K_v mewakili parameter U1 dan K_H sebagai U2 dan U3, dalam software SAP2000.

Hasil Analisis Axial Force

pengimputan semua nilai atau data skunder yang telah diperoleh di input atau di define, sehingga menghasilkan atau membentuk

geometri jembatan sesuai yang ada pada gambar teknis, tahapan ini akan dilakukan *run* untuk mendapatkan output gaya aksial dan periode alami yang digunakan untuk perencanaan LRB. Hasil analisis pemodelan yang telah dilakukan tanpa pengaruh gaya gempa, diperoleh output data *axial force* maksimum sebesar $\rho = 2644,692$ kN dan periode alami jembatan $T = 1,310762$ sec.

Hasil Analisis LRB

Perhitungan dimensi LRB dengan menggunakan rumus persamaan (3), dimana nilai *axial force* jembatan sebagai komponen utama penentu dimensi. Diameter LRB yang sesuai dengan perhitungan diperoleh sebesar 674 mm, dimana pada catalog *bridgeston* untuk LRB ukuran yang sesuai yaitu $\varnothing 700$ mm. Pada penelitian ini akan menggunakan LRB seri LH070G4. Nilai KV (2250 kN/mm), KH (9,63 kN/mm), post yield stiffness (0,741 kN/mm), *charactersitic strength* (62,6 kN/mm), dan *equivalent shear stiffness* (1,05 kN/mm).

Displacement arah X

Displacement arah X merupakan perpindahan horizontal struktur dengan isolator *elastomeric bearing* dan *lead rubber bearing*.

Hasil displacement EB and LRB arah X dapat dilihat pada Tabel 7

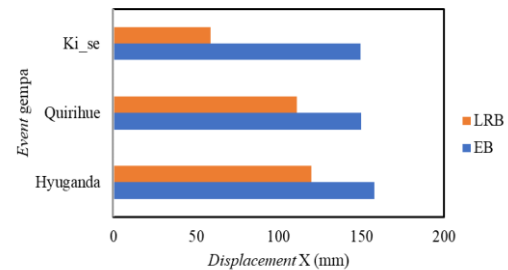
Tabel 7. Displacement EB dan LRB arah X

Bearing	Kondisi	Displacement (mm)		
		Hyuganda	Quirihue	Ki_se
EB	EKSTRIM	158,1	149,8	149,6
LRB	EKSTRIM	119,8	110,8	58,6

Hasil analisis menunjukkan penggunaan LRB mampu mendisipasi gaya gempa dan menurunkan displacement dibandingkan EB, dimana EB mengalami perpindahan pada gempa Hyuganda sebesar 158,1 mm, LRB 119,8 mm (peredaman $\pm 31,96\%$), gempa Quirihue 149,8 mm untuk EB dan 110,8 mm untuk LRB (peredaman $\pm 35,19\%$), gempa Ki_se dengan perpindahan sebesar 149 mm pada EB dan 58,6 mm (peredaman 154,2%).

Kondisi tersebut menggambarkan bahwa LRB mampu mereduksi gaya gempa dengan

peredaman histeretik dari inti timah pada LRB, sehingga menghasilkan perpindahan yang lebih kecil. Grafik perbandingan displacement EB dan LRB arah X dapat dilihat pada Gambar 5.



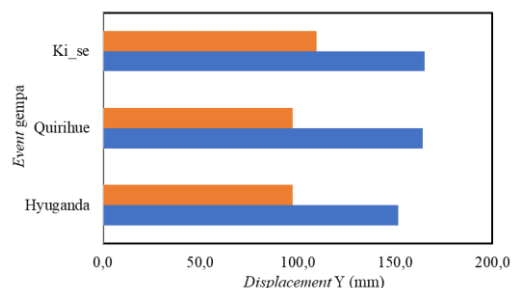
Gambar 5. Grafik perbandingan displacement EB dan LRB

Hasil displacement EB and LRB arah Y dapat dilihat pada Tabel 8

Tabel 8. Displacement EB dan LRB arah Y

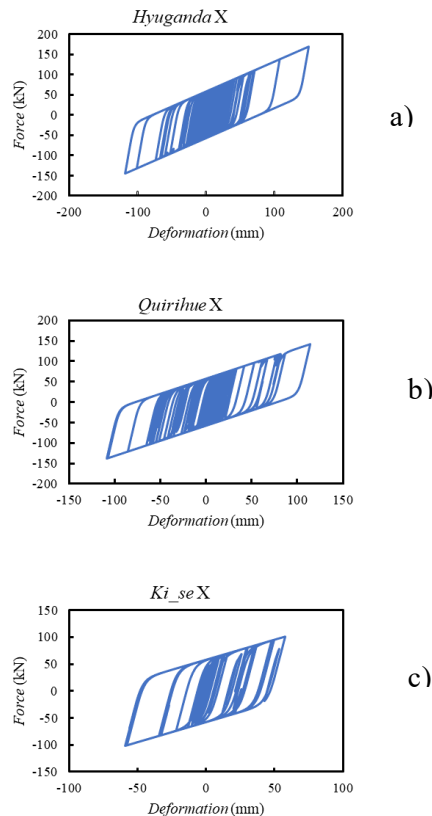
Bearing	Kondisi	Displacement (mm)		
		Hyuganda	Quirihue	Ki_se
EB	EKSTRIM	151,6	164,3	165,3
LRB	EKSTRIM	97,3	97,3	109,8

Hasil analisis displacement pada arah Y menunjukkan bahwa LRB mampu mereduksi gaya gempa dan menurunkan perpindahan dari EB. Gempa Hyuganda, EB sebesar 151,6 mm dan LRB 97,3 mm (penurunan 55,8%), gempa Quirihue dimana EB berpindah sejauh 164,3 mm dan LRB 97,3 mm (penurunan 68,8%), gempa Ki_se memiliki perpindahan sebesar 165,3 mm pada sistem EB dan 109,8 mm pada LRB (penurunan 50,5%). Grafik perbandingan displacement EB dan LRB arah Y dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik perbandingan displacement EB dan LRB

Hysteresis Curve



Gambar 7. *Hysteresis curve* LRB

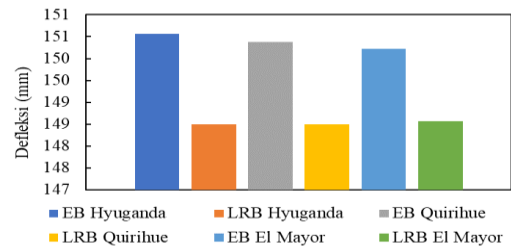
Gambar 7. a), b) dan c) menunjukkan kurva histeretik hubungan gaya dan deformasi pada Hyuganda, Quirihue dan Ki_se

Tabel 9. Perbandingan defleksi EB dan LRB

Bearing	Kondisi	Displacement (mm)		
		Hyuganda	Quirihue	Ki_se
EB	EKSTRIM	150,6	150,4	150,2
LRB	EKSTRIM	148,5	148,5	148,5

Defleksi terbesar terjadi pada jembatan dengan sistem EB, dimana pada penggunaan LRB menghasilkan defleksi yang sedikit lebih kecil. Jembatan eksisting dengan EB mengalami lendutan rata-rata 150,39 mm, sedangkan jembatan dengan sistem LRB mengalami defleksi rata-rata sebesar 148,504 mm. Memiliki rentang perbandingan rata-rata hanya $\pm 1,3\%$, namun LRB masih memiliki keunggulan dalam memperkecil lendutan. Perbedaan lendutan yang tidak signifikan, disebabkan oleh dominannya pengaruh gaya gravitasi (gaya vertikal) terhadap lendutan, sehingga nilai defleksi yang dihasilkan tidak

menunjukkan perbedaan yang signifikan. Grafik perbandingan defleksi dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik perbandingan defleksi

Periode Alami dan Frekuensi

Periode alami (waktu yang dibutuhkan oleh suatu struktur untuk melakukan satu getaran penuh) dan frekuensi alami (jumlah getaran per detik yang dilakukan struktur dalam keadaan bebas). adalah dua konsep **fundamental dalam** dinamika struktur, termasuk untuk memahami respon bangunan terhadap gempa.

Perbandingan periode alami dan frekuensi untuk EB dan LRB dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Perbandingan periode alami dan frekuensi

Output	Mode	EB	LRB	EB	LRB
		Periode	Periode	Frekuensi	Frekuensi
		detik	detik	Cyc/dt	Cyc/dt
Modal	1	1,329	2,950	0,753	0,339
Modal	2	1,264	2,922	0,791	0,342
Modal	3	0,745	1,719	1,342	0,582

LRB mampu meningkatkan periode alami struktur pada jembatan lebih besar dibandingkan dengan EB, dimana dapat dilihat pada Modal 1, LRB menghasilkan periode alami sebesar 2,950 detik, sedangkan EB hanya 1,329 detik. Modal 1 pada hasil analisis menunjukkan bahwa jembatan mengalami peningkatan periode alami hingga $\pm 121,9\%$ dengan sistem LRB.

AASHTO 2010, menjelaskan bahwa meningkatnya periode alami suatu struktur, maka percepatan gempa yang terjadi akan

lebih kecil dan mampu mereduksi gaya gempa yang bekerja pada struktur, dibuktikan dari hasil frekuensi yang kecil. Penggunaan LRB pada jembatan lebih efisien terhadap meredam beban dinamis seperti gempa dan menghasilkan struktur lebih fleksibel, karena memberikan periode getar alami yang lebih panjang dan memperkecil frekuensi sehingga mengurangi percepatan respon gempa. Struktur jembatan dengan kombinasi fleksibilitas yang tinggi dan peredaman pembuangan energi tambahan serta hasil frekuensi relatif rendah, membuktikan bahwa LRB mampu meningkatkan kapasitas seismik jembatan dan memperkecil perpindahan elemen struktur sehingga struktur menjadi lebih baik dan stabil.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, sehingga mendapatkan sebuah kesimpulan bahwa, jembatan eksisting dengan sistem EB (450×400×45 mm) mengalami displacement lebih besar pada ketiga event gempa yang digunakan (Hyuganda, Quirihue, dan Ki_{se}), dibandingkan dengan LRB (Ø700 mm), memperkecil displacement antara ±30-154%. Lendutan (defleksi), persentasi perbandingan relatif kecil (±1,3%) karena dipengaruhi oleh gaya gravitasi (gaya vertikal). Periode alami jembatan dengan LRB, mampu memperpanjang periode getar hingga ±121,9% dibandingkan EB.

LRB memberikan kontribusi yang cukup signifikan dalam meningkatkan kapasitas seismik jembatan. Karakteristik inti timah pada LRB mampu menyerap (mendisipasi) energi gempa melalui mekanisme histeretik, hal ini dibuktikan dengan periode alami jembatan yang lebih panjang dan frekuensi yang lebih kecil dibandingkan EB. Secara keseluruhan LRB terbukti lebih unggul dibandingkan EB dalam mereduksi pengaruh gaya gempa terhadap struktur jembatan. Adapun saran yang dapat dilakukan untuk pengembangan penelitian lanjutan adalah perlunya mempertimbangkan penggunaan variasi data gempa time history lebih banyak dengan karakteristik periode yang berbeda, agar hasil analisis dapat lebih komprehensif.

Penggunaan LRB dapat dijadikan alternatif yang lebih efektif dibandingkan EB pada wilayah dengan resiko gempa menengah hingga tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrizal, D. Z., Dewi, S. M., & Rahmayanti N, C. (2014). **Defleksi Balok Melintang dan Tegangan Batang Diagonal Tepi Jembatan “Boomerang Bridge” Akibat Variasi Posisi Pembebanan.**
- Cahyadi, M. N., & Wirawan, I. P. G. P. (2016). **Analisis Defleksi Vertikal Jembatan Suramadu Menggunakan Gps Cors(Continuosly Operating Reference Station).**
- Fauzan, A. D., & Sukamdo, P. (2023). **Perbandingan Pengaruh LRB (Lead Rubber Bearing) dan FPB (Friction Pendulum Bearing) pada Perilaku Struktur Jembatan (Studi Kasus Jembatan Tol Layang Dalam Kota Jakarta).** *Konstruksia*, 15(1), Article 1.
- Firdausi, I. K., Herbudiman, B., & Sukmara, G. (2018). **Studi Evaluasi Hubungan Defleksi Jembatan Akibat Perubahan Jenis Kabel dan Bentang pada Jembatan Suspension.**
- Gabriel, G. (2022). **Perbandingan Pengaruh High Damping Rubber Bearing dan Lead Rubber Bearing Terhadap Kinerja Struktur.** *Praxis: Jurnal Sains, Teknologi, Masyarakat Dan Jejaring*, 4(2), Article 2.
- Handayani, F. (2017). **Perilaku Struktur Jembatan Bersudut (Skew Bridge) Menggunakan Beton Mutu Normal.** *Jurnal Teknologi Berkelanjutan*, 6(02), 94–100.
- Jamal, R. J., Lantu, L., Aswad, S., & Sulaiman, C. (2017). **Mikrozonasi Kawasan Rawan Bencana Gempabumi dengan Studi Peak Ground Acceleration Menggunakan Metode Boore Atkinson dan Data Mikrotremor di Daerah Kupang.** *Jurnal Geoelebes*, 1(1), 5–12.

- Leblouba, M. (2022). ***Stability Analysis of Elastomeric Bearings in Bridge Structures. Advances In Bridge Engineering***, 3(1), 11.
- M.C. Kunde & R.S. Jangid. (2003). ***Seismic Behavior of Isolated Bridges: A-State-of-the-Art Review. Electronic Journal of Structural Engineering***, 3, 140–170.
- Mulia, R. (2013, Maret 27). ***Periode Getar Struktur, Mengapa Begitu Penting, Bagian I – Gempa. Sekedar Cerita Rezky Mulia***.
- Santosa, A., Sulistiyo, D., Awaludin, A., Setiawan, A. F., Satyarno, I., Purnomo, P., & Harry, I. (2022). ***View of Structural Systems Comparison of Simply Supported Psc Box Girder Bridge Equipped with Elastomeric Rubber Bearing and Lead Rubber Bearing***. 24.
- Setiati, N. R., & Irawan, R. R. (2005). ***Kajian Perbandingan Bantalan Elastomer sebagai Perletakan Jembatan dengan Menggunakan 4 Lapisan dan 3 Lapisan Pelat Baja. Jurnal Jalan Jembatan***, 22(2), Article 2.
- Usman, M. N. (2016). ***Studi Deformasi Jembatan dengan Metode Sipat Datar***.
- Zebua, D. (2023). ***Analisis Displacement Struktur Beton Bertulang pada Gedung Rumah Sakit. Jurnal Penelitian Jalan Dan Jembatan***, 3(1).