

ANALISIS RESPONS DINAMIK JEMBATAN RANGKA BAJA MENGGUNAKAN SISTEM SEISMIC ISOLATION LEAD RUBBER BEARING (LRB)

Ari Vera Indra¹⁾, Reni Suryanita²⁾, Ismeddiyanto²⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya J. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode Pos 28293

Email : arieloveindra@gmail.com

Abstract

Seismic isolation is system to dampen seismic energy that works on the bridge by add an object called base isolators. The purpose of this study is show the dynamic response of steel truss bridge with stiffness variation LRB (Lead Rubber Bearing) as base isolators and seismic loads. Modeling the structure of the steel truss bridge consists of three spans and two poles. The steel truss bridge model given in the form of data akselerogram seismic load time history. The data is akselerogram Padang Earthquake Malaysia station with variations PGA (Peak Ground Acceleration) of 0.2 g, 0.4 g, 0.6 g and 0.8 g. LRB rigidity is increase to 50%, 100%, 150%, 200%, and 250% of the initial stiffness parameters LRB. The analysis is conduct use dynamic time history analysis. Stiffness value of LRB (Lead Rubber Bearing) base FEMA P-751-2012 and AASHTO Guide Specification for Seismic Isolation Design. Analysis showed The dynamic response displacement and decreased to increase stiffness of LRB but dynamic response acceleration increases.

Keywords: *Seismic isolation, base isolator, steel truss bridge,, PGA, Peak Ground Acceleration, LRB (Lead Rubber Bearing), dynamic time history analysis,, dynamic response.*

A. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi konstruksi yang pesat telah menciptakan sistem untuk meredam beban gempa terhadap struktur. Salah satunya dikenal dengan nama sistem isolasi gempa (*seismic isolation*). Sistem ini biasanya diterapkan pada bangunan bertingkat dan jembatan yang rentan terhadap beban gempa. Pada intinya jembatan didesain untuk meredam energi gempa yang bekerja pada dengan menambah suatu benda yang dinamakan *base isolator* seperti yang terlihat pada Gambar 1.

Jembatan sangat rentan terhadap kerusakan dan bahkan runtuh ketika mengalami gempa bumi. Periode fundamental getaran mayoritas jembatan adalah di kisaran 0,2 detik hingga 1,2 detik, dalam rentang ini respons struktur jembatan mirip dengan periode dominan gerakan tanah yang disebabkan gempa (Kunde & Jangid, 2003). Untuk jembatan yang sangat kaku seperti jembatan normal dengan dermaga pendek periode waktu sering sangat kecil. Bahkan untuk beberapa struktur jembatan respons hampir sama dengan percepatan tanah. Hal tersebut dapat dicegah

dengan memperpanjang periode jembatan atau meningkatkan kemampuan disipasi energi.



Gambar 1. Chain of Rock Bridge
(Waheed & Adeli, 2005)

Analisis jembatan dengan metode riwayat waktu sudah banyak diteliti sebelumnya (Murat, 2006; Haque, 2010; Ozbulut, 2011; Jangid, 1998; Kim, 2014, dll) baik untuk jembatan *box girder* dan jembatan sederhana. Namun belum banyak dijumpai penelitian yang mengkaji pengaruh kekakuan *base isolator*

terhadap respons dinamik jembatan rangka baja.

Di Indonesia kajian dan penelitian tentang *seismic isolation* masih terfokus terhadap bangunan bertingkat sedangkan untuk jembatan masih jarang padahal Indonesia diapit oleh lempeng-lempeng tektonik seperti Eurasia, India-australia dan Pasifik sehingga Indonesia memiliki intensitas kegempaan yang cukup tinggi. Maka berdasarkan hal tersebut jurnal ini bertujuan untuk menganalisis respons dinamik jembatan jembatan rangka baja akibat variasi kekakuan LRB dan beban gempa

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka beberapa permasalahan berikut dapat dirumuskan:

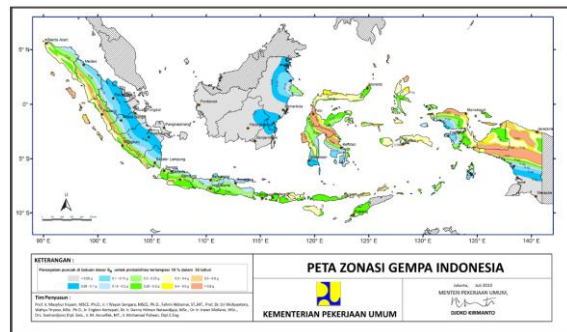
1. Respons dinamik (perpindahan, kecepatan, dan percepatan) jembatan rangka baja menggunakan sistem *seismic isolation* dengan peningkatan kekakuan LRB (*Lead Rubber Bearing*) sebagai *base isolator* akibat beban gempa.
2. Respons dinamik jembatan rangka baja menggunakan sistem *seismic isolation* dengan variasi beban gempa (0,2 g, 0,4 g, 0,6 g dan 0,8 g).

B. TINJAUAN PUSTAKA

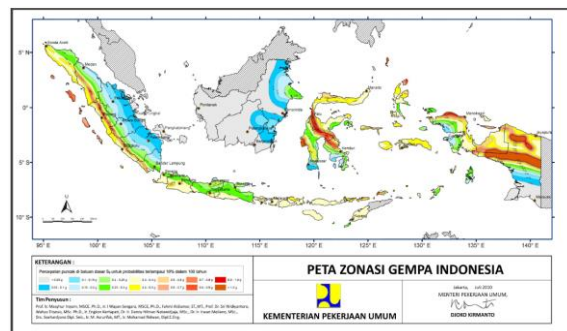
B.1 Umum

Beban gempa yang bekerja pada struktur dapat digolongkan sebagai beban dinamis, yaitu beban yang berubah-ubah menurut waktu, arah maupun posisinya. Pembebanan gaya gempa ini berbeda dengan pembebanan-pembebanan statis. Pada pembebanan statis, respons dan pembebanannya bersifat tetap atau statis. Sementara pada pembebanan akibat gaya gempa, respons dan pembebanannya berubah menurut waktu sehingga dalam perhitungannya gaya gempa tidak mempunyai solusi tunggal seperti pada gaya statis.

Berdasarkan SNI 2833-2008 tentang standar perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan, periode ulang gempa menentukan besarnya akselerasi gempa PGA (*Peak Ground Acceleration*) yang berkaitan dengan umur rencana jembatan seperti yang terlihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Umur rencana jembatan 50 dan 100 tahun sebanding dengan periode ulang gempa 500 tahun dan 1000 tahun.



Gambar 2. Peta hazard gempa Indonesia untuk probabilitas terlampaui 10 % dalam 50 tahun (Kementerian Pekerjaan Umum, 2010)



Gambar 3. Peta hazard gempa Indonesia untuk probabilitas 10 % dalam 100 tahun (Kementerian Pekerjaan Umum, 2010)

Dengan menggunakan pendekatan probabilitas, Kementerian Pekerjaan Umum telah menghasilkan peta PGA (*Peak Ground Acceleration*) dan spektrum percepatan untuk periode pendek (0,2 detik) dan periode 1,0 detik dengan kemungkinan terlampaui 10% dalam 50 tahun, dan 10% dalam 100 tahun, atau yang mewakili dua level *hazard* (potensi bahaya) gempa yaitu 500 dan 1000 tahun.

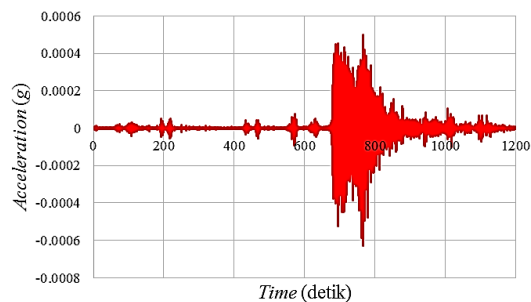
B.2 Analisis Ragam (*Modal Analysis*)

Analisis ragam (*modal analysis*) adalah analisis yang menentukan gerak struktur pada kondisi getaran bebas, dimana gerakannya hanya dipengaruhi oleh kondisi awal. Kondisi seperti ini jarang dijumpai namun, analisis ini memberikan sifat dinamis yang paling penting dari struktur yaitu periode natural dan pola perubahan bentuknya (*mode shapes*).

B.3 Analisis Dinamik Riwayat Waktu

Pada analisis riwayat waktu, beban gempa yang dimasukkan dalam pembebanan struktur adalah rekaman gerakan tanah (*ground motion*) dari gempa-gempa terdahulu. Rekaman gerakan tanah ini biasanya disebut akselerogram yang terlihat pada Gambar 4.

Akselerogram ini berupa data percepatan tanah (*ground acceleration*) akibat gempa bumi selama selang waktu tertentu.



Gambar 4. Akselerogram

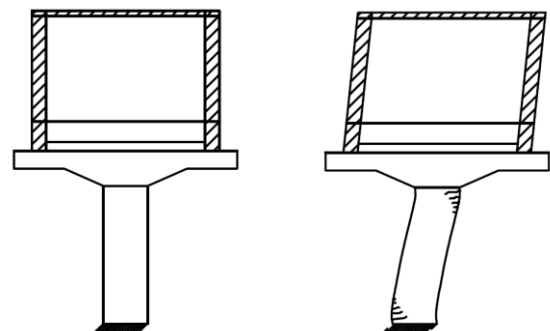
Akselerogram dengan gerakan tanah yang kuat (*strong-motion accelerogram*) pertama kali dicatat pada gempa bumi tahun 1933 yang terjadi di Long Beach. Setelah pencatatan pada gempa ini, ratusan rekaman gempa lainnya diperoleh. Kebanyakan dari rekaman tersebut merupakan gerakan yang kecil dan hanya sebagian kecil di antaranya yang memiliki percepatan 20% *g* atau lebih. Lebih dari setengahnya berasal dari California yang mana paling banyak berasal dari tiga gempa bumi, yaitu gempa bumi di San Fernando pada tanggal 9 Februari 1971, gempa bumi di Loma Prieta pada tanggal 17 Oktober 1989, dan pada tanggal 17 Januari 1994 di Northridge (Grant, Fenves, & Auricchio, 2005).

B.4 Seismic isolation

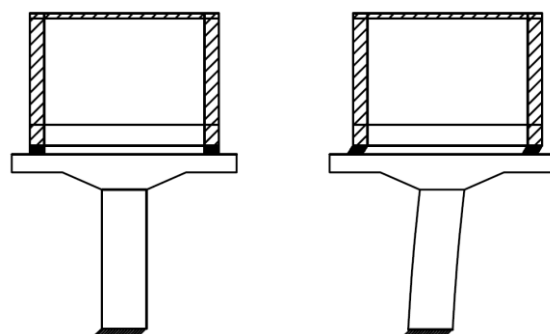
Seismic isolation adalah teknik modifikasi untuk mengurangi efek dari gempa bumi pada jembatan dan struktur lainnya. Sistem *seismic isolation* ini akan memisahkan struktur dari komponen horizontal pergerakan tanah dengan menyisipkan *base isolator* yang memiliki kekakuan horizontal yang relatif besar, antara struktur atas dan bawah. Jembatan dengan *base isolator* memiliki frekuensi getaran yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan jembatan konvensional dan frekuensi dominan dari gerakan tanah. Akibatnya percepatan gempa yang bekerja jembatan menjadi lebih kecil (Kunde & Jangid, 2003).

Base isolator mereduksi kekuatan gempa mendekati kapasitas batas elastis dari elemen struktur untuk menghindari atau membatasi deformasi plastis dan fenomena kerusakan. Jembatan yang menggunakan *base isolator* gaya geser yang ditransmisikan dari substruktur ke superstruktur dapat dikurangi dengan

menggeser periode alami dari jembatan. Akibatnya, gerakan superstruktur dipisahkan dari gerakan substruktur saat gempa, dengan demikian menghasilkan efek pengurangan gaya inersia. Pada saat yang sama, energi gempa pada jembatan juga berkurang sebagai akibat dari disipasi energi yang terkonsentrasi di isolator yang sesuai dengan rancangan. Contoh perbandingan deformasi antara jembatan baja konvensional dan jembatan baja dengan *seismic isolation* dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Jembatan baja konvensional di mana deformasi terjadi di struktur



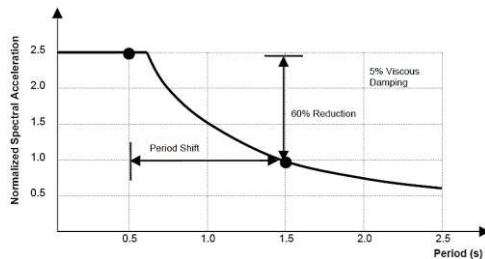
Gambar 6. Jembatan rangka baja dengan *seismic isolation* di mana deformasi terjadi di *base isolator*

B.4.1 Fleksibilitas

Kekakuan horizontal dari *base isolator* yang mengubah periode dasar jembatan menjadi lebih lama dari periode tanpa isolator, jangka waktu yang secara signifikan lebih lama dari periode dominan gerakan tanah sehingga respons jembatan berkurang sebagai hasilnya.

Pengaruh fleksibilitas isolator pada respons jembatan diilustrasikan pada Gambar 7. Berdasarkan AASHTO (1999) percepatan respons spektrum untuk kondisi kaku tanah (jenis tanah II) dan 5 persen redaman. Hal ini

terlihat bahwa perubahan periode 0,5 - 1,5 detik karena fleksibilitas dari sistem isolator hasil pengurangan 60 persen dalam gaya gempa (percepatan spektrum dinormalisasi turun 2,5-1,0) (Buckle, Constantinou, Diceli, & Ghasemi, 2006).

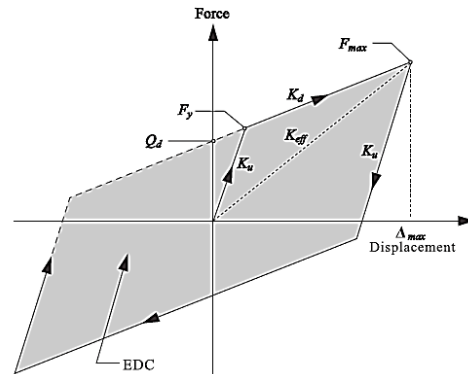


Gambar 7. Pengaruh fleksibilitas isolator pada respons jembatan (Buckle et al., 2006)

Mekanisme kerusakan sebuah struktur harus didesain pada lokasi-lokasi tertentu sehingga setelah gempa kuat terjadi, dapat dengan mudah diperbaiki. Lokasi keruntuhan harus didesain pada balok dan kolom yang disebut sendi plastis. Sendi plastis atau *hinge* merupakan bentuk ketidak mampuan elemen struktur (balok dan kolom) menahan gaya dalam. Konsep perencanaan struktur harus sesuai dengan *strong column-weak beam*. Apabila terjadi keruntuhan struktur maka baloklah yang harus runtuh dahulu, namun apabila kolomnya yang runtuh dahulu maka struktur langsung hancur.

B.4.2 Disipasi Energi

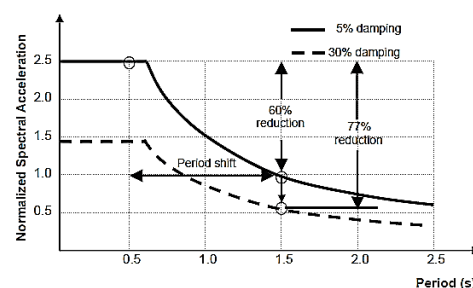
Meskipun kekakuan horizontal dari *base isolator* dapat mengurangi gaya gempa tetapi hal ini dapat mengakibatkan perpindahan yang lebih besar pada superstruktur. Untuk mengatasi hal tersebut, kebanyakan sistem *base isolator* menggunakan mekanisme disipasi energi untuk membatasi perpindahan pada tingkat yang wajar. Disipasi energi di dalam fisika berarti energi yang hilang dari suatu sistem, hilang dalam arti berubah menjadi energi lain. Mekanisme ini berarti bahwa ada keseimbangan pada kurva gaya dan perpindahan. Hubungan bilinear gaya dan perpindahan pada *base isolator* yang menyertakan disipasi energi berdasarkan AASHTO yang terlihat pada Gambar 8. Daerah yang diarsir di dalam kurva adalah energi yang disipasi selama siklus gerak *base isolator* (Buckle et al., 2006).



Gambar 8. Kurva *Hysteresis Loop* (Kircher, 2012)

Dari Gambar 8 terlihat bahwa besarnya gaya dan perpindahan pada *base isolator* tergantung pada beberapa parameter. Parameter tersebut meliputi kekakuan awal K_u (*elastic stiffness*), kekakuan pasca leleh K_d (*post elastic stiffness*), kekakuan efektif K_{eff} (*effective stiffness*), kekuatan leleh F_y (*yield force*), kekuatan maksimum F_{max} (*maximum force*), sifat kekuatan Q_d (*characteristic strength*), perpindahan maksimal Δ_{max} (*maximum displacement*). Kekakuan awal K_u yang cukup besar direncanakan untuk menahan beban angin dan gempa kecil. Pada umumnya nilai kekakuan ini mencapai 6,5 sampai 10 kali dari kekakuan pasca leleh K_d .

Tidak hanya perpindahan yang berkurang apabila redaman ditingkatkan tetapi juga gaya gempa akan berkurang (Buckle et al., 2006). Gambar 9 menunjukkan hal tersebut, kurva garis lurus dan putus-putus mewakili 5% dan 30% redaman untuk kondisi tanah keras (jenis tanah II) respons spektra AASHTO (1999). Peningkatan level redaman disebabkan oleh disipasi energi pada *base isolator* yang berujung pada penurunan gaya gempa. Hal ini terlihat penurunan 60 persen pada periode 1,5 detik karena fleksibilitas dan bisa meningkat sampai 77 persen ketika redaman ditingkatkan dari 5 persen menjadi 30 persen.



Gambar 9. Efek redaman pada respons jembatan (Buckle et al., 2006)

B.5 LRB (*Lead Rubber Bearing*)

LRB (*Lead rubber bearing*) merupakan *base isolator* yang paling sering digunakan yang merupakan salah satu jenis *Laminated Rubber Bearing*. LRB memiliki kapasitas redaman yang tinggi (*high-damping capacity*), fleksibilitas horizontal (*horizontal flexibility*) dan kekakuan vertikal yang tinggi (*high vertical stiffness*) (Buckle et al., 2006). LRB (*Lead rubber bearing*) ditemukan di Selandia Baru pada tahun 1975 dan sudah digunakan secara luas di Selandia Baru, Jepang, dan Amerika Serikat.

LRB terbuat dari lapisan karet dan dipadu dengan lapisan baja, tetapi di tengahnya diberi rongga yang diisi dengan *lead* (perunggu) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Lapisan karet di vulkanisir sehingga bisa bergerak ke semua arah horizontal dan dilaminasi di antara lapisan baja yang mampu menahan beban aksial. *Lead* (perunggu) yang terletak di tengah berfungsi sebagai tempat penyerapan energi sehingga mampu mengurangi gaya gempa dan perpindahan (Naeim & Kelly, 1999).

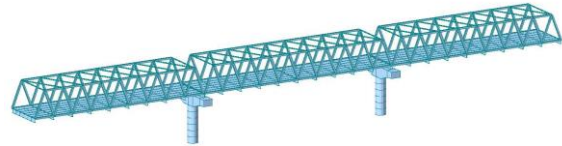


Gambar 10. LRB (*Lead Rubber Bearing*)

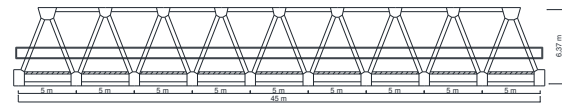
C. METODOLOGI PENELITIAN

C.1 Data Struktur

Struktur jembatan rangka baja yang ditinjau berdasarkan Gambar Standar Rangkang Baja Bangunan Atas Jembatan Kementerian pekerjaan Umum. Adapun denah yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Denah pemodelan



Gambar 12. Tampak samping rangka baja

Dimensi elemen struktur jembatan rangka baja yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Gelagar memanjang WF 450×200×9×16, $f_y = 550$ MPa
2. Gelagar melintang WF 900×350×12×19, $f_y = 550$ MPa
3. Rangka baja induk WF 350×350×12×19, $f_y = 550$ MPa
4. Ikatan angin WF 150×150×6×6, $f_y = 550$ MPa
5. Pelat lantai tebal 25 cm, $f_c' = 35$ MPa
6. Tiang jembatan, $f_c' = 35$ MPa

C.2 Data Kekakuan LRB

Parameter kekakuan LRB berdasarkan FEMA P-751,2012, AASHTO *Guide Specification for Seismic Isolation Design*. Parameter kekakuan LRB terdiri dari kekakuan efektif linier, kekakuan elastis, kekakuan plastis, kuat leleh (*yield strength*) dan *compression stiffness*. Parameter tersebut divariasikan dengan cara meningkatkan kekakuan awal LRB menjadi 50 %, 100 %, 150 %, 200 %, 250 % dan 300 % seperti yang ditabulasikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data kekakuan LRB

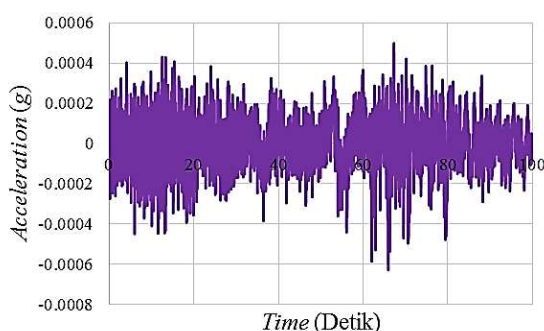
Parameter	Kekakuan awal	Peningkatan dari kekakuan awal					
		50%	100%	150%	200%	250%	300%
Kekakuan efektif linier, K_{eff} (kN/mm)	4.95	7.425	9.9	12.38	14.85	17.33	19.8
Kekakuan elastis, K_u (kN/mm)	15	22.5	30	37.5	45	52.5	60
Kekakuan plastis, K_d (kN/mm)	1.5	2.25	3	3.75	4.5	5.25	6
Post yield stiffness ratio, r	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Yield Strength, F_y (kN)	100	150	200	250	300	350	400
Compression Stiffness, K_v (kN/mm)	600	900	1200	1500	1800	2100	2400

C.3 Data Beban

Penelitian ini ditujukan untuk melihat pengaruh variasi kekakuan LRB dan beban gempa terhadap respons dinamik jembatan rangka baja, sehingga data beban yang digunakan untuk analisis hanya berupa beban mati, beban gempa dan beban lalu lintas.

C.3.1 Data Beban Gempa

Pembebanan gempa diberikan kepada jembatan rangka baja merupakan beban gempa riwayat waktu (*time history*) dalam bentuk akselerogram. Akselerogram yang digunakan merupakan Gempa Padang Stasiun Malaysia dengan durasi 1200 detik dan 0,00063 g seperti yang terlihat Gambar 5. Akselerogram tersebut diskalakan menjadi 0,2 g, 0,4 g, 0,6 g, dan 0,8 g dengan durasi 100 detik, durasi yang dipakai merupakan waktu pada percepatan maksimum akselerogram yaitu antara 700 – 800 detik seperti Gambar 13. Arah pembebanan yang tinjau berdasarkan batasan masalah.



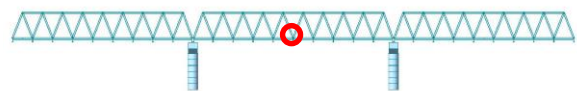
Gambar 13. Akselerogram Gempa Padang durasi 700 – 800 detik

C.1 Tahapan Analisis

Analisis dilakukan dengan cara memodelkan struktur jembatan rangka baja ke dalam *software* berupa rangka baja, pelat lantai, *base isolator* tipe LRB, dan pilar sesuai data yang akan digunakan. Setelah pemodelan selesai maka selanjutnya dilakukan analisis sehingga mendapatkan respons dinamik struktur setelah diberikan beban gempa yang telah direncanakan sebelumnya. Berikut penjelasan tahapan analisis dengan *software* elemen hingga:

1. Memasukkan data parameter kekakuan LRB sebagai *base isolator* berdasarkan FEMA P-751,2012 dan AASHTO *Guide Specification for Seismic Isolation Design*. Input parameter LRB pada Midas Civil terdiri dari parameter kekakuan efektif linier (*linear effective stiffness*), kekakuan elastis (*elastic stiffness*), kuat leleh (*yield strength*) dan *post yield stiffness ratio*.
2. Melakukan analisis ragam (*modal analysis*) yang hanya dipengaruhi oleh berat sendiri struktur tanpa ada pengaruh gaya-gaya luar yang bekerja pada struktur.

3. Melakukan evaluasi periode alami struktur yang diperoleh dari hasil analisis ragam sesuai dengan yang disyaratkan SNI 1726-2012.
4. Mendefinisikan data beban gempa berupa riwayat waktu (*time history*). Pada tahap ini diperlukan data akselerogram gempa, akselerogram yang dianalisis merupakan data Gempa Padang Stasiun Malaysia. Berbeda dengan beban lain yang langsung dimasukkan melalui *static load case*, akselerogram dimasukkan melalui menu *time history function*.
5. Memasukkan beban riwayat waktu (*time history*) yang telah didefinisikan pada menu *ground acceleration*. Arah percepatan gempa diberikan adalah 0,3X dan 1Y.
6. Memasukkan beban lalu lintas (*vehicle load*) berdasarkan data pembebanan. Beban dimodelkan pada 2 (dua) lajur lalu lintas di jembatan rangka baja.
7. Mendefinisikan analisis pembebanan riwayat waktu di menu *time history load cases*. Pada penelitian ini menggunakan dua *case*. Pada *case* yang pertama diberi nama *Dead Load*, beban yang akan di-input adalah beban gravitasi yang berupa beban mati dari berat sendiri struktur. Pada *time history load cases* diganti menjadi nonlinier. Dilanjutkan *case* kedua yang diberi nama *Time history Analisis case time history* ini merupakan kelanjutan dari analisis *case dead load*. Pada analisis ini menggunakan akselerogram gempa.
8. Menganalisis hasil riwayat waktu. Hasil analisis riwayat waktu yang didapat dari *software* yaitu berupa grafik perpindahan (*displacement*), percepatan (*acceleration*), dan kecepatan (*velocity*) dengan fungsi waktu. Titik tinjauan (*node*) terlihat pada Gambar 14 yang terletak di pertengahan girder kedua.



Gambar 14. Titik tinjauan (node)

D. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

D.1 Analisis Ragam

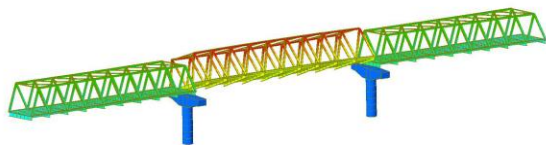
Jumlah ragam dipengaruhi oleh terpenuhinya syarat partisipasi massa ragam.

Berdasarkan SNI 1726-2012 jumlah ragam yang diambil menghasilkan partisipasi massa ragam melebihi 90% massa aktual arah horizontal. Pada penelitian ini jumlah ragam getar yang digunakan sebanyak 41 ragam. Tabel 2 memperlihatkan hasil partisipasi ragam ke-41.

Tabel 2. Partisipasi Massa Ragam

Mode	Partisipasi Massa Ragam (%)		Syarat SNI 1726-2012	Memenuhi
	Arah X	Arah Y		
41	94,32	92,61	$\geq 90\%$	Ya

Bentuk ragam getaran secara umum terdiri dari dua jenis, yaitu translasi dan torsi/puntir. Translasi adalah perubahan bentuk struktur yang berupa pergerakan *joints* secara horizontal ke arah X atau ke arah Y. Sedangkan puntir/torsi merupakan perubahan bentuk struktur yang terpuntir terhadap sumbu vertikalnya. Bentuk ragam (*mode shape*) getaran struktur bervariasi mulai dari ragam ke-1 hingga ragam ke-41. Bentuk ragam ke-1 merupakan translasi arah Y hal ini sesuai dengan SNI 1726-2012 seperti yang terlihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Mode shape 1 translasi arah Y

D.2 Analisis Dinamik Riwayat Waktu

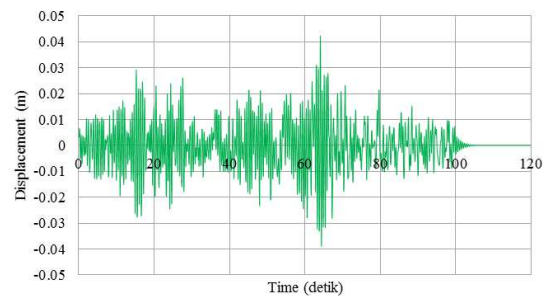
Setelah dilakukan proses analisis dinamik riwayat waktu (*time history*) sehingga didapatkan respons dinamik perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*), dan percepatan (*acceleration*).

D.2.1 Respons Dinamik Perpindahan

Respons dinamik perpindahan (*displacement*) berupa grafik hubungan perpindahan dengan fungsi waktu (*time*), yang diperoleh setelah melakukan analisis dinamik riwayat waktu. Berikut ini ditampilkan grafik

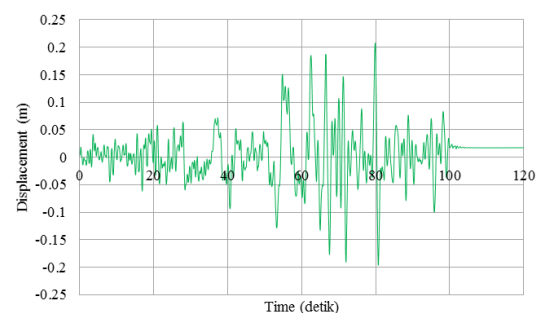
respons dinamik perpindahan untuk percepatan gempa 0,6 g, arah gempa 0,3X 1Y, dan variasi parameter kekakuan *base isolator*.

Respons dinamik perpindahan (*displacement*) di *node* 1 jembatan rangka baja tanpa *base isolator* dan percepatan gempa 0,6 g terlihat pada Gambar 16. Terlihat bahwa perpindahan maksimum mencapai 0,042 m yang terjadi pada detik ke 64,1.



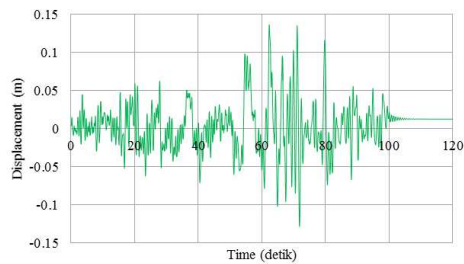
Gambar 16. Respons dinamik perpindahan jembatan rangka baja tanpa *base isolator*

Respons dinamik perpindahan (*displacement*) jembatan rangka baja dengan *base isolator* tipe LRB dan percepatan gempa 0,6 g terlihat pada Gambar 17. Perpindahan maksimum mencapai 0,203 m yang terjadi pada detik ke 79,8.



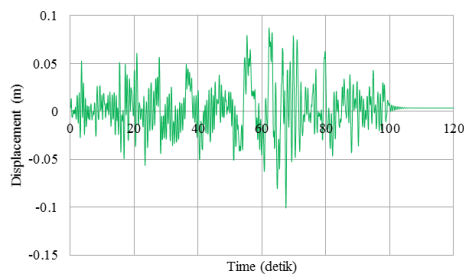
Gambar 17. Respons dinamik perpindahan jembatan rangka baja dengan LRB sebagai *base isolator*

Respons dinamik perpindahan (*displacement*) jembatan rangka baja dengan peningkatan 50 % kekakuan LRB dan percepatan gempa 0,6 g terlihat pada Gambar 18. Perpindahan maksimum mencapai 0,137 m yang terjadi pada detik ke 62,3. Perpindahan tersebut lebih kecil daripada perpindahan maksimum pada parameter kekakuan awal LRB yaitu dengan selisih 0,066 m.



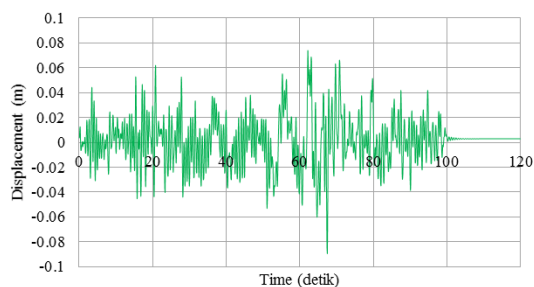
Gambar 18. Respons dinamik perpindahan dengan peningkatan 50 % kekakuan LRB

Respons dinamik perpindahan (*displacement*) jembatan rangka baja dengan peningkatan 100 % kekakuan LRB dan percepatan gempa 0,6 g terlihat pada Gambar 19. Perpindahan maksimum mencapai 0,101 m yang terjadi pada detik ke 67,5. Perpindahan tersebut lebih kecil daripada perpindahan maksimum pada peningkatan 50 % kekakuan LRB yaitu dengan selisih 0,036 m.



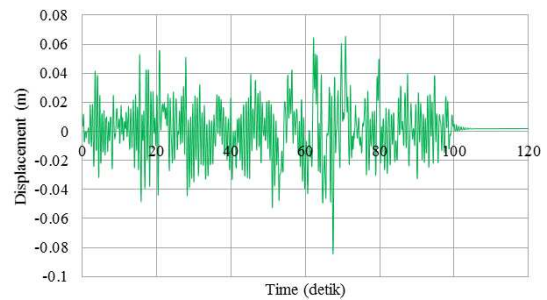
Gambar 19. Respons dinamik perpindahan dengan peningkatan 100 % kekakuan LRB

Respons dinamik perpindahan (*displacement*) jembatan rangka baja dengan peningkatan 150 % kekakuan LRB dan percepatan gempa 0,6 g terlihat pada Gambar 20. Perpindahan maksimum mencapai 0,089 m yang terjadi pada detik ke 67,5. Perpindahan tersebut lebih kecil daripada perpindahan maksimum pada peningkatan 100 % kekakuan LRB yaitu dengan selisih 0,012 m dan terjadi pada waktu bersamaan.



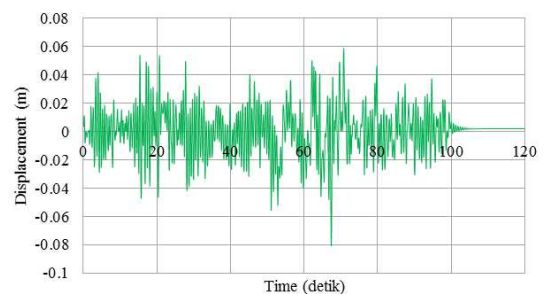
Gambar 20. Respons dinamik perpindahan dengan peningkatan 150 % kekakuan LRB

Respons dinamik perpindahan (*displacement*) jembatan rangka baja dengan peningkatan 200 % kekakuan LRB dan percepatan gempa 0,6 g terlihat pada Gambar 21. Perpindahan maksimum mencapai 0,084 m yang terjadi pada detik ke 67,5. Perpindahan tersebut lebih kecil sedikit daripada perpindahan maksimum pada peningkatan 150 % kekakuan LRB yaitu dengan selisih 0,005 m.



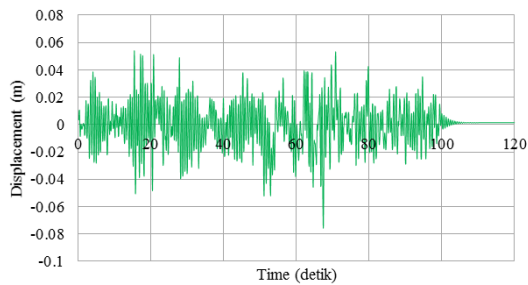
Gambar 21. Respons dinamik perpindahan dengan peningkatan 200 % kekakuan LRB

Respons dinamik perpindahan (*displacement*) jembatan rangka baja dengan peningkatan 250 % kekakuan LRB dan percepatan gempa 0,6 g terlihat pada Gambar 22. Perpindahan maksimum mencapai 0,08 m yang terjadi pada detik ke 67,4. Perpindahan tersebut lebih kecil sedikit daripada perpindahan maksimum pada peningkatan 200 % kekakuan LRB yaitu dengan selisih 0,004 m.



Gambar 22. Respons dinamik perpindahan dengan peningkatan 250 % kekakuan LRB

Respons dinamik perpindahan (*displacement*) jembatan rangka baja dengan peningkatan 300 % kekakuan LRB dan percepatan gempa 0,6 g terlihat pada Gambar 23. Perpindahan maksimum mencapai 0,075 m yang terjadi pada detik ke 67,4. Perpindahan tersebut lebih kecil sedikit daripada perpindahan maksimum pada peningkatan 250 % kekakuan LRB yaitu dengan selisih 0,005 m dan terjadi pada waktu yang bersamaan.

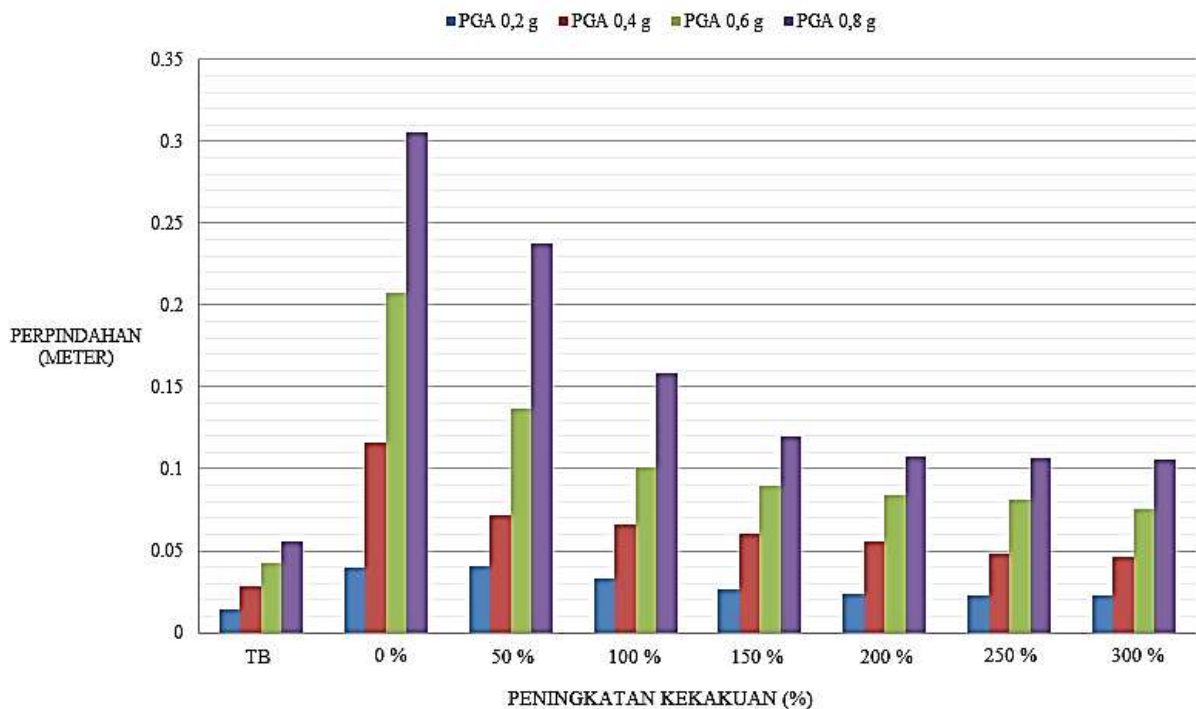


Gambar 23. Respons dinamik perpindahan dengan peningkatan 300 % kekakuan LRB

Perpindahan maksimum node terhadap masing-masing model analisis terlihat pada Gambar 24. Terlihat bahwa Respons dinamik perpindahan jembatan rangka baja dengan *base isolator* tipe LRB (*Lead Rubber Bearing*) lebih besar daripada jembatan rangka baja tanpa *base isolator* sebagai contoh perpindahan maksimum

jembatan tanpa *base isolator* pada PGA 0,6 g arah gempa yaitu 0,042 m dan dengan LRB yaitu 0,208 m, terbukti bahwa LRB menyebabkan kelenturan pada perletakan sehingga menghasilkan perpindahan yang lebih besar.

Respons dinamik perpindahan mengalami kenaikan dengan rata-rata 0,034 m dari peningkatan PGA 0,2 g ke 0,4 g, 0,041 m dari peningkatan PGA 0,4 g ke 0,6 g, dan 0,047 m dari peningkatan PGA 0,6 g ke 0,8 g untuk arah gempa 0,3X 1Y. Maka mengalami kenaikan dengan rata-rata 0,030 m dari peningkatan PGA 0,2 g ke 0,4 g, 0,036 m dari peningkatan PGA 0,4 g ke 0,6 g, dan 0,046 m dari peningkatan PGA 0,6 g ke 0,8 g.



Gambar 24. Perpindahan maksimum terhadap masing-masing model analisis

D.2.2 Respons Dinamik Kecepatan

Respons dinamik kecepatan (*velocity*) berupa grafik hubungan kecepatan dengan fungsi waktu (*time*), yang diperoleh setelah melakukan analisis dinamik riwayat waktu. Berikut ini ditampilkan grafik respons dinamik kecepatan untuk percepatan gempa 0,6 g, arah gempa 0,3X 1Y, dan variasi parameter kekakuan *base isolator* tipe LRB (*Lead Rubber Bearing*).

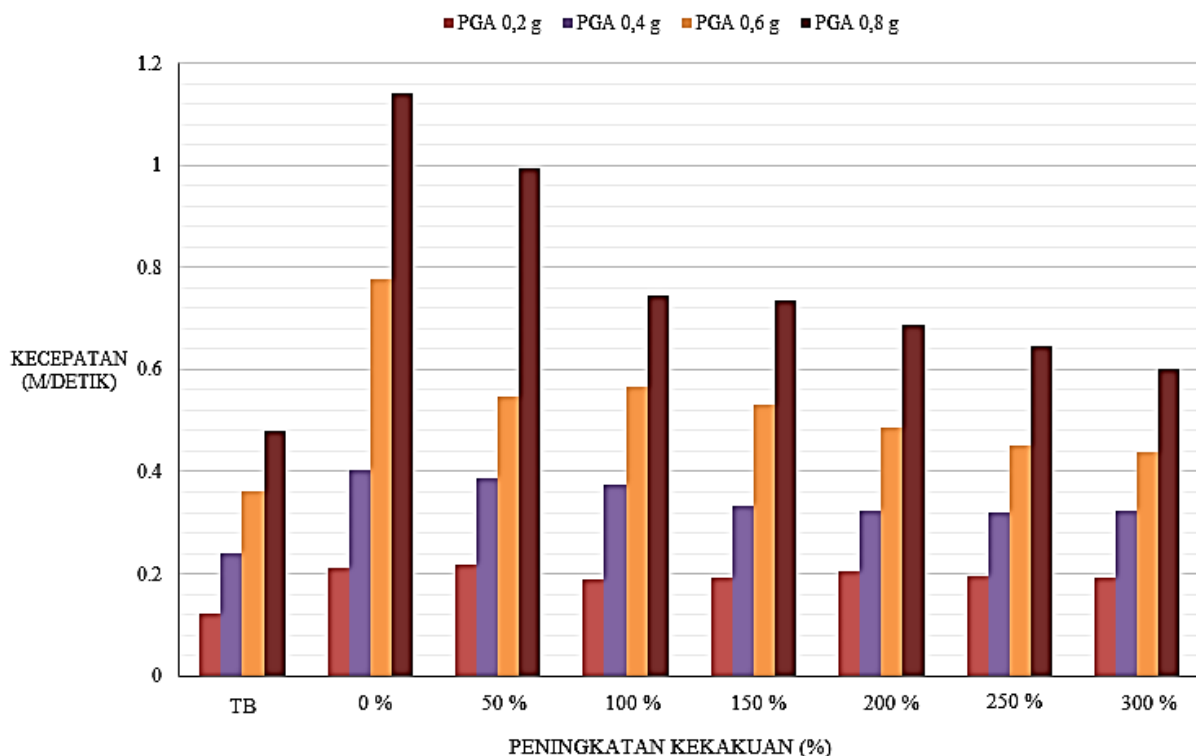
Kecepatan maksimum node terhadap masing-masing model analisis terlihat pada Gambar 25. Terlihat bahwa Respons dinamik kecepatan jembatan rangka baja dengan *base isolator* tipe LRB (*Lead Rubber Bearing*) lebih besar daripada jembatan rangka baja tanpa *base isolator* sebagai contoh kecepatan maksimum jembatan tanpa *base isolator* pada PGA 0,6 g yaitu 0,361 m/det dan dengan LRB yaitu 0,778 m/det, hal tersebut sama dengan

tren respons dinamik perpindahan yang juga meningkat.

Respons dinamik kecepatan berkurang apabila kekakuan LRB ditingkatkan tetapi hal tersebut hanya berlaku pada PGA 0,6 g dan 0,8 g sedangkan pada PGA 0,2 g dan 0,4 g respons kecepataannya hanya berkurang sedikit sehingga tidak terlihat dampak yang signifikan dari peningkatan kekakuan LRB. Tetapi pada

PGA 0,2 g dan 0,4 g respons dinamik kecepatan mengalami tren peningkatan.

Respons dinamik kecepatan mengalami kenaikan dengan rata-rata 0,147 m/detik dari peningkatan PGA 0,2 g ke 0,4 g, 0,182 m/detik dari peningkatan PGA 0,4 g ke 0,6 g, dan 0,235 m/detik dari peningkatan PGA 0,6 g ke 0,8 g untuk arah gempa 0,3X 1Y.



Gambar 25. Kecepatan maksimum terhadap masing-masing model analisis

D.2.3 Respons Dinamik Percepatan

Respons dinamik percepatan (*acceleration*) berupa grafik hubungan percepatan dengan fungsi waktu (*time*), yang diperoleh setelah melakukan analisis dinamik riwayat waktu. Berikut ini ditampilkan grafik respons dinamik percepatan untuk percepatan gempa 0,6 g, arah gempa 0,3X 1Y dan variasi parameter kekakuan *base isolator* tipe LRB (*Lead Rubber Bearing*).

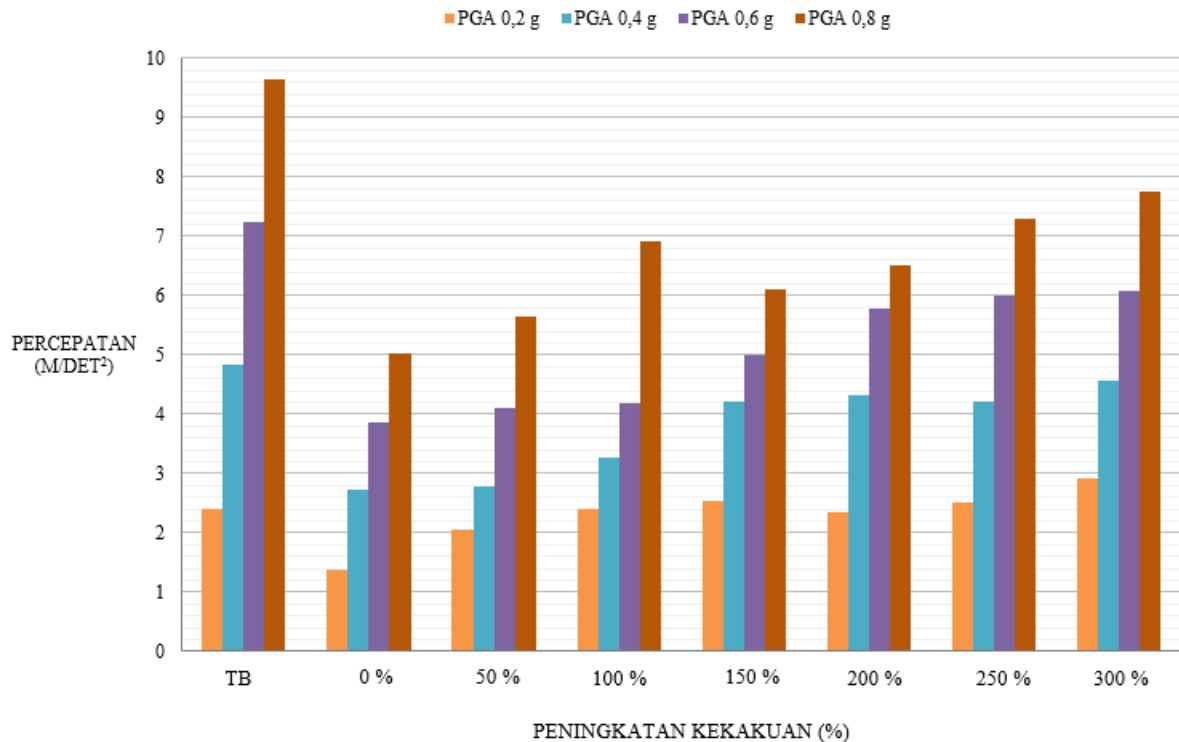
Percepatan maksimum node terhadap masing-masing model analisis terlihat pada Gambar 26. Terlihat bahwa Respons dinamik percepatan jembatan rangka baja dengan *base isolator* tipe LRB (*Lead Rubber Bearing*) lebih kecil daripada jembatan rangka baja tanpa *base isolator* sebagai contoh percepatan maksimum jembatan tanpa *base isolator* pada PGA 0,6 g

arah gempa 0,3X 1Y yaitu 7,252 m/det² dan dengan LRB yaitu 3,864 m/det², hal tersebut sama berbanding terbalik dengan respons dinamik perpindahan dan kecepatan.

Respons dinamik percepatan bertambah apabila kekakuan LRB ditingkatkan tetapi terjadi beberapa sering anomali di mana percepatannya berkurang seperti yang terlihat pada percepatan PGA 0,8 g pada peningkatan kekakuan LRB 100 % ke 150 % di mana percepatan maksimumnya berkurang dari 6,917 m/det² menjadi 6,101 m/det² hal tersebut juga berlaku pada percepatan gempa (PGA) yang lainnya.

Respons dinamik percepatan mengalami kenaikan dengan rata-rata 1,545 m/det² dari peningkatan PGA 0,2 g ke 0,4 g, 1,419 m/det² dari peningkatan PGA 0,4 g ke 0,6 g, dan

1,579 m/det² dari peningkatan PGA 0,6 g ke 0,8 g untuk arah gempa 0,3X 1Y.



Gambar 26. Percepatan maksimum terhadap masing-masing model analisis

E. KESIMPULAN DAN SARAN

E.1 Kesimpulan

1. Penggunaan LRB (*Lead Rubber Bearing*) pada jembatan rangka baja yang menggunakan *seismic isolation* memiliki respons dinamik perpindahan (*displacement*) dan kecepatan (*velocity*) absolut yang lebih besar daripada jembatan rangka baja tanpa *base isolator*. Hal ini terjadi karena LRB memiliki kelenturan atau fleksibilitas dalam arah horizontal yang memungkinkan terjadinya perpindahan yang besar pada *base isolator*.
2. Hasil analisis respons dinamik jembatan rangka baja dengan sistem *seismic isolation* menunjukkan bahwa respons dinamik perpindahan (*displacement*) meningkat apabila kekakuan LRB ditingkatkan per 50 %. Hal ini terjadi karena disipasi energi LRB yang meningkat sehingga penyerapan atau redaman beban gempa pun meningkat.
3. Respons dinamik kecepatan tidak perlu diperhitungkan dalam analisis dinamik jembatan rangka baja karena walaupun secara garis besar kecepatan menurun apabila kekakuan LRB ditingkatkan per 50 % tetapi terdapat beberapa anomali di mana

kecepatannya malah meningkat dan cenderung stagnan atau tidak mengalami perubahan yang berarti.

4. Respons dinamik percepatan (*acceleration*) di rangka baja secara garis besar meningkat apabila kekakuan *base isolator* tipe LRB (*Lead Rubber Bearing*) ditingkatkan walaupun terjadi beberapa anomali. Hal ini berbanding terbalik dengan respons dinamik perpindahan (*displacement*) dan kecepatan (*velocity*).
5. Hasil analisis respons dinamik jembatan rangka baja meningkat apabila percepatan gempa (PGA) di tingkatan. Terjadi penambahan peningkatan rata-rata sebesar 0,007 m per peningkatan 0,2 g untuk respons perpindahan, 0,039 m/detik untuk respons kecepatan dan 0,029 m/det² untuk respons percepatan.

E.2 Saran

1. Penelitian ini hanya menganalisis pengaruh respons dinamik penggunaan *base isolator* tipe LRB pada rangka jembatan akibat beban gempa. Oleh sebab itu disarankan untuk studi selanjutnya analisis dilakukan untuk tiang atau pilar jembatan. Sehingga respons dinamik penggunaan LRB pada

jembatan rangka baja dapat diketahui lebih detail.

2. Dalam penelitian ini pengaruh perpindahan maksimum LRB (*Lead Rubber Bearing*) diabaikan sehingga diharapkan dalam studi respons dinamik jembatan rangka baja selanjutnya hal ini diperhitungkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Buckle, I. G., Constantinou, M. C., Diceli, M., & Ghasemi, H. (2006). Seismic isolation of highway bridges.
- Grant, D. N., Fenves, G. L., & Auricchio, F. (2005). Modelling and analysis of high-damping rubber bearings for the seismic protection of bridges.
- Haque, M., Bhuiyan, A., & Alam, M. (2010). *Seismic response analysis of base isolated highway bridge: Effectiveness of using laminated rubber bearings*. Paper presented at the IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II.
- Jangid, R. (2007). Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions. *Engineering Structures*, 29(10), 2503-2513.
- Kim, W.-S., Ahn, D.-J., & Lee, J.-K. (2014). A Study on the Seismic Isolation Systems of Bridges with Lead Rubber Bearings. *Open Journal of Civil Engineering*, 4(04), 361.
- Kircher, C. (2012). Chapter 12: Seismically Isolated Structures. *NI Council, FEMA P-751, NEHRP Recommended Provisions: Design Examples*, 1-63.
- Kircher Charles, A. (2012). FEMA P-751, 2012. NEHRP Recommended Provisions: Design Examples: Chapter.
- Kunde, M., & Jangid, R. (2003). Seismic behavior of isolated bridges: A-state-of-the-art review. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 3(2), 140-169.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*: John Wiley & Sons.
- Nasional, B. S. (2008). Standar Nasional Indonesia: Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Jembatan, SNI 2833-2008: Bandung.
- Ozbulut, O. E., & Hurlbaas, S. (2011). Seismic assessment of bridge structures isolated by a shape memory alloy/rubber-based isolation system. *Smart Materials and Structures*, 20(1), 015003.
- Umum, K. P. (2010). Peta zonasi gempa indonesia: Jakarta: KPU.
- Waheed, A., & Adeli, H. (2005). Case-based reasoning in steel bridge engineering. *Knowledge-Based Systems*, 18(1), 37-46.