

ASESMEN KERAPUHAN STRUKTUR JEMBATAN MELENGKUNG HORIZONTAL BOX GIRGER

FRAGILITY ASSESSMENT OF HORIZONTALLY CURVED BOX GIRDER BRIDGE

¹Aep Saepuloh, ²Relly Andayani

^{1,2} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Gunadarma

¹mydata.ug@gmail.com, ²rellyanda@yahoo.com

Abstrak

Dalam perkembangannya struktur jembatan memiliki variasi desain geometrik untuk memenuhi kebutuhan melewati rintangan yang berada dibawahnya. Jembatan melengkung horizontal (*horizontally curved bridge*) merupakan salah satu produk desain geometrik. Kinerja jembatan jenis ini perlu dievaluasi terhadap berbagai variasi beban gempa dalam usia layan. Hal ini penting dilakukan untuk memprediksi kerugian ekonomis akibat gempa dan memperkirakan tindakan perkuatan terhadap struktur jembatan. Tujuan dari penelitian ini untuk menggunakan fungsi kerapuhan (*fragility*) untuk menggambarkan probabilitas terlampauinya tingkat kerentanan untuk tiga model jembatan dengan radius yang berbeda, model 1 ($R = \infty$), model 2 ($R = 250$ Km) dan model 3 ($R = 150$ Km). Metode analitik nonlinear *pushover* digunakan untuk memperoleh tanggap strukur. Definisi tingkat kerusakan berdasarkan kriteria HAZUS-MH 2.1. Hasil dari penelitian bahwa pembebanan arah longitudinal pada jembatan melengkung lebih sensitif terhadap perfoma struktur akibat gempa, sedangkan pembebanan arah transversal tidak sensitif khususnya Model 2 ($R = 250$ Km) pada level *extensive* dan *complete damage*. Secara keseluruhan rata-rata probabilitas akibat gempa periode ulang 500 tahun struktur memiliki probabilitas terlampaui kriteria *extensive* sebesar 18% dan lebih tinggi dibandingkan level gempa 1.000 tahun sebesar 13%.

Kata Kunci: jembatan melengkung, analisis *pushover*, spektrum kapasitas, *demand spectrum*, kurva kerapuhan.

Abstract

In its development, the bridge structure has a variety of geometric designs to meet the cross needs that need to be underneath. Horizontal curved bridge is one of the products of geometric design. The performance of this type of bridge needs to be evaluated against various earthquake variations in service life. This is important to predict losses due to earthquake and to estimate reinforcement actions on the bridge structure. The purpose of this study is to use the fragility function to assess the probability of exceeding the approval level for three bridge models with different radii, model 1 ($R = \infty$), model 2 ($R = 250$ Km) and model 3 ($R = 150$ Km). Nonlinear pushover analytic methods are used to obtain structural responsiveness. The definition of damage level is based on the HAZUS-MH criteria 2.1. The results of the longitudinal direction loading on the curved bridge are more sensitive to earthquake structure performance, while the transversal loading is not particularly sensitive to Model 2 ($R = 250$ Km) at the area level and total damage. The average probability of an earthquake in the past 500 years has a risk level exceeded by 18% and is higher than the 1.000 years earthquake rate of 13%.

Keywords: curved bridge, pushover analysis, spectrum capacity, demand spectrum, fragility curve.

PENDAHULUAN

Struktur jembatan merupakan bagian dari jaringan transportasi darat dan sangat vital dalam aliran perjalanan (*traffic flow*). Struktur jembatan termasuk bagian dari infrastruktur jaringan jalan yang paling rentan terhadap beban seismik sehingga harus memiliki resiliensi yang cukup terhadap risiko kegempaan (Tropomera, 2016). Dalam perkembangannya struktur jembatan memiliki variasi desain geometrik untuk memenuhi kebutuhan melewati rintangan yang berada dibawahnya. Jembatan melengkung horizontal (*horizontally curved bridge*) merupakan salah satu produk desain geometik. Struktur jembatan tersebut memiliki perilaku seismik yang lebih kompleks daripada jembatan lurus dan lebih rentan terhadap gempa bumi (Minavand dan Ghafory-Ashtiany, 2019).

Dewasa ini perspektif pengetahuan terhadap rekayasa kegempaan beralih pada paradigma *earthquake resistant* untuk desain infrastruktur sesuai peraturan/ standar (*code*) perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan (SNI 2833-2008) dan peraturan desain bangunan tahan gempa terkini (SNI 03-1726-2012).

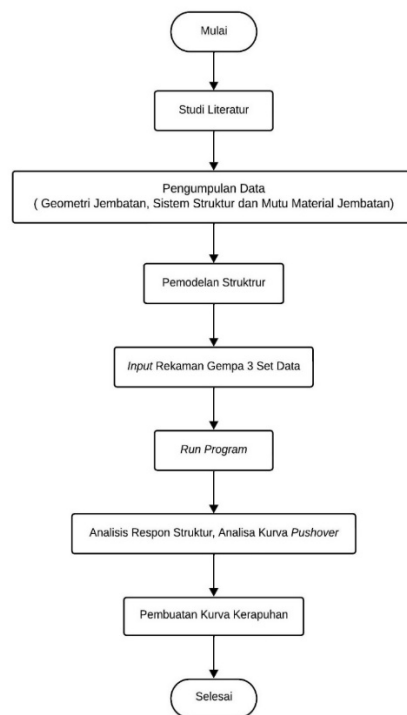
Untuk itu kinerja seismik jembatan eksisting ini perlu dievaluasi untuk menilai kerentanannya terhadap bahaya gempa (*seismic vulnerability*). Kerentanan atau kerapuhan tersebut digambarkan dengan kurva kerapuhan (*fragility curve*). Kurva kerapuhan tersebut merupakan hubungan antara probabilitas kerusakan dan intensitas *ground motion*. Probabilitas keruntuhan dinyatakan sebagai distribusi lognormal dari percepatan

spektral pada periode mode pertama, yang didefinisikan oleh nilai median, $S_a(T)$, dan dispersi, β (FEMA, 2012).

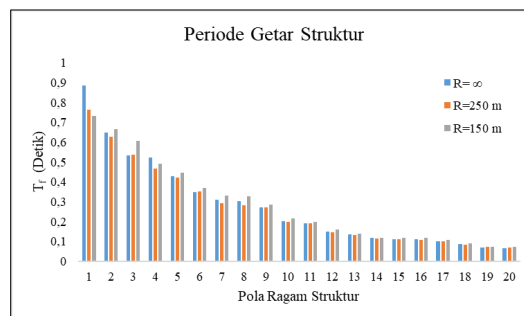
Penelitian dilakukan untuk melihat sensitifitas struktur akibat variasi geometri yang direpresentasikan dengan probabilitas kerentanan struktur. Struktur yang ditinjau berupa jembatan gelagar box beton dengan pilar portal *monolith* terhadap gelagar dengan variasi geometri struktur yaitu $R = \infty$, $R = 250$ m dan $R = 150$ m. Analisa struktur menggunakan bantuan program MIDAS Civil v.2018 dengan perilaku nonlinear struktur menggunakan analisa beban dorong statik.

METODOLOGI PENELITIAN

Struktur jembatan dianalisa secara dinamis untuk melihat perilaku respons struktur menggunakan metode nonlinear statis pushover untuk memperoleh kinerja masing-masing struktur. Langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan seperti, pertama melakukan pemodelan struktur jembatan tiga dimensi. Jembatan pertama dengan radius ∞ atau lurus, jembatan kedua dengan radius 250 Km dan jembatan ketiga dengan radius 150 Km. Kondisi batas perletakan *pier* dengan *pilecap* didefinisikan sebagai *rigid link*. Tahap kedua tiga struktur tersebut dianalisis menggunakan *nonlinear pushover analysis* untuk mendapatkan kurva kapasitas. Kurva tersebut ditransformasikan kedalam kurva kapasitas spektrum dan *demand spectrum* untuk memperoleh nilai S_d dan S_a . Tahap ketiga mencari nilai β (dispersi). Dan tahap keempat membuat kurva kerapuhan dengan input data S_d , S_a dan β .



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian



Gambar 2. Grafik Pola Ragam Struktur

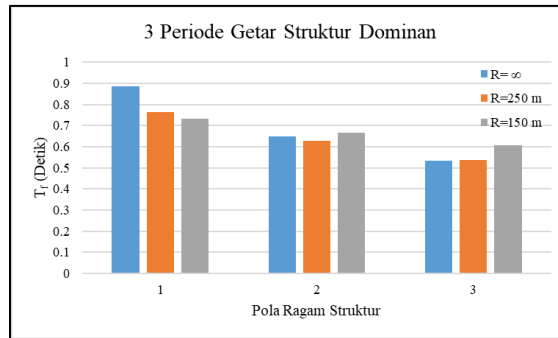
Sumber: *Output* Midas Civil, 2019

HASIL DAN PEMBAHASAN

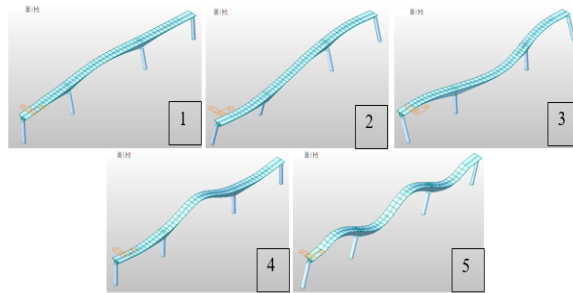
Karakteristik Dinamik Struktur

Analisis getaran beban dilakukan untuk mendapatkan karakteristik dinamik dari struktur dengan *eigenvalue analysis control*. Hasil yang diperoleh diantaranya pola ragam struktur, periode natural struktur, frekuensi natural struktur, dan modal partisipasi massa. Grafik pada Gambar 2. menunjukkan tiga periode dominan untuk setiap model.

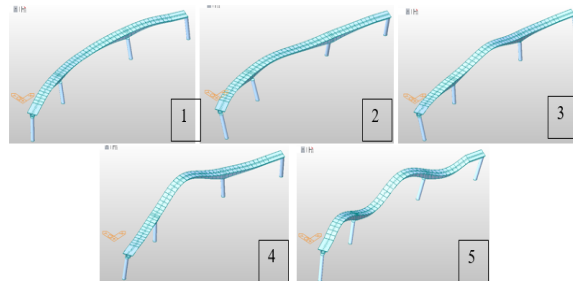
Berdasarkan grafik tersebut menjelaskan pola ragam (mode) dipengaruhi dari variasi geometri struktur karena memberikan nilai kekakuan yang berbeda untuk setiap kelengkungan (Gambar 4 s.d. Gambar 6 menunjukkan 5 pola ragam untuk setiap model hasil dari analisis *eigenvalue*. Perbedaan pola getar struktur sangat dipengaruhi oleh nilai massa dan kekakuan. Semakin besar nilai kekakuan struktur akan semakin kecil periode fundamental struktur.



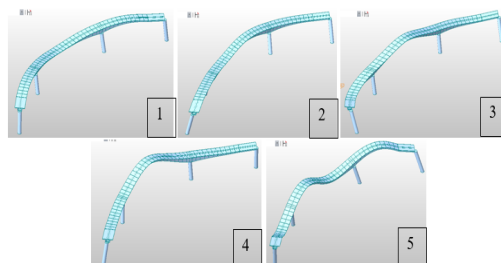
Gambar 3. Tiga Pola Ragam Struktur Dominan
Sumber: Olah data penulis, 2019



Gambar 4. Pola Ragam 1 s.d. 5 Model 1
Sumber: *Output* Midas Civil, 2019



Gambar 5. Pola ragam 1 s.d. 5 model 2
Sumber: *Output* Midas Civil, 2019



Gambar 6. Pola Ragam 1 s.d. 5 Model 3
Sumber: *Output* Midas Civil, 2019

Gambar 2 menggambarkan nilai masing-masing tegangan maksimum yang terjadi pada kombinasi ultimit (U1) ditinjau untuk masing-masing *pier*. Dari Tabel 1 dapat

diketahui tegangan yang terjadi masih dalam batas tegangan yang diijinkan. Rata-rata tegangan maksimum terjadi pada *pier* tengah P1 dan P2 untuk setiap model.

Kapasitas Struktur Jembatan

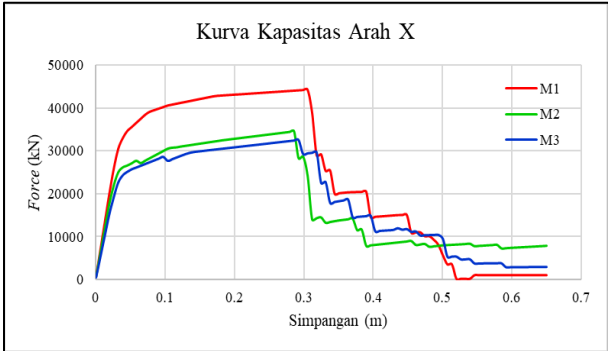
Kapasitas struktur jembatan untuk setiap model ditunjukan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Dari Gambar 7. Kurva Kapasitas Arah X diperoleh kapasitas maksimum model 1, 2 dan 3 berturut-turut sebesar 44.360,20 kN, 34.501,20 kN dan 32.634,10 kN. Sedangkan

Gambar 8. Kapasitas maksimum diperoleh berturut-turut 17.559,90 kN, 19.934,50 kN dan 25.385,20 kN. Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukan pengaruh kelengkungan jembatan terhadap kapasitas jembatan, dapat dilihat terjadi penurunan pada model 1 ke model 3 untuk arah X dan penurunan kapasitas dari model 3 ke model 1 untuk arah Y. Hal ini mungkin terjadi karena perbedaan nilai kekakuan akibat posisi geometri *pier*, semakin melengkung suatu jembatan kekakuannya bertambah searah sumbu transversalnya.

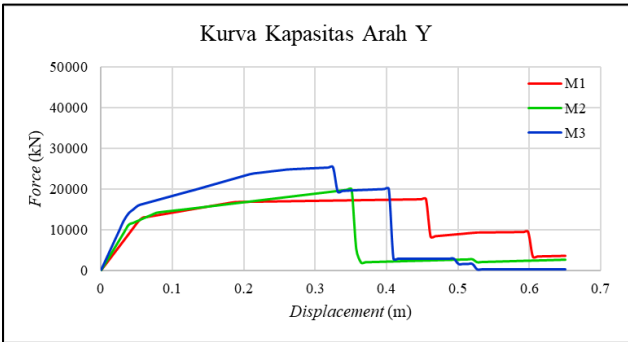
Tabel 1. Tegangan pada *Pier* Akibat Kombinasi U1

Elemen	M1	M2	M3	$f (izin)$	$f_{cc} < f (izin) = 0.80 f_{ck}$
P3	6.40	4.40	4.40	27.58	OK
P1	8.30	6.10	6.40	27.58	OK
P2	8.10	6.30	6.40	27.58	OK
P4	6.50	4.30	4.40	27.58	OK

Sumber: Olah data penulis, 2019



Gambar 7. Kurva Kapasitas Arah X
Sumber: Olah data penulis, 2019



Gambar 8. Kurva Kapasitas Arah Y
Sumber: Olah data penulis, 2019

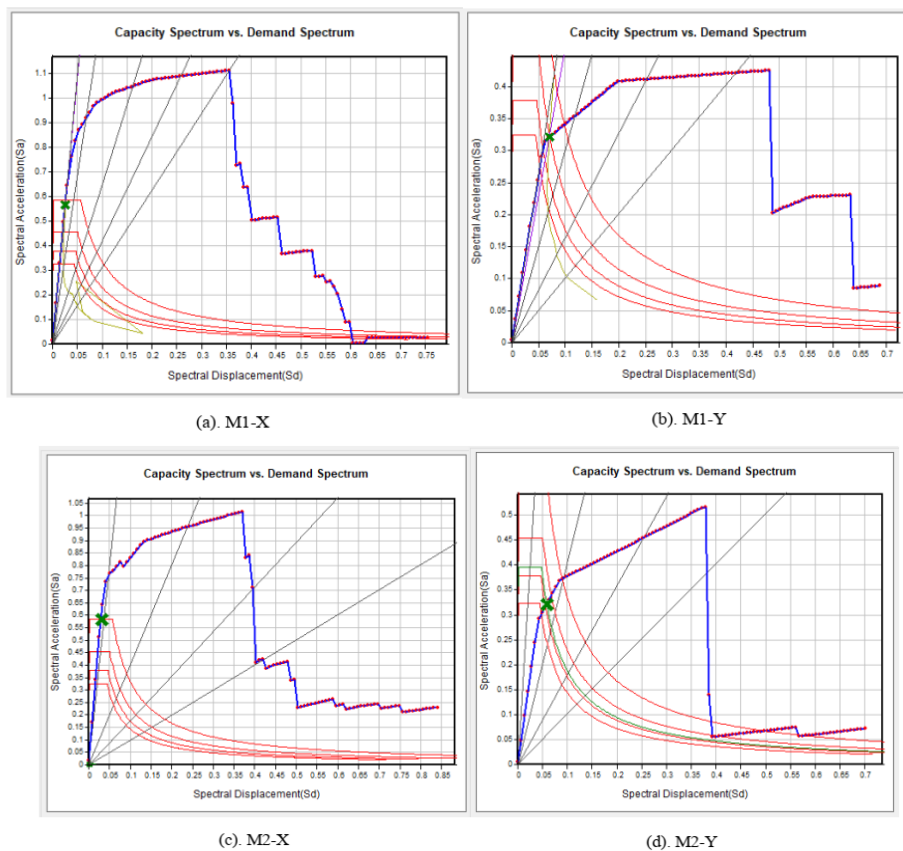
Hasil analisa *static nonlinear pushover* dan aplikasi *capacity spectrum procedure* dalam format *Acceleration – Displacement Response Spectra* (ADRS) ditampilkan dalam grafik Gambar 9. Kurva Spektrum Kapasitas vs Demand Spektrum (a), M1-X (b), M1-Y (c) M2-X, (d) M2-Y, (e) M3-X, dan (f) M3-Y. Titik kinerja digambarkan dalam notasi silang yang berpotongan antara kurva kapasitas dengan *demand spectrum*. Dari Gambar 9 dapat dilihat titik kinerja (*performace point*) untuk M1, M2, dan M3 arah memanjang berada pada kurva elastis sedangkan dalam arah melintang M1, M2, dan M3 titik kinerja

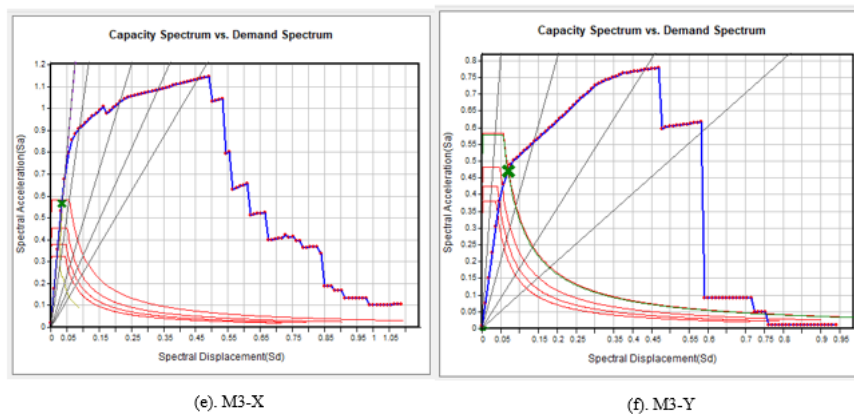
mulai bekerja pada kurva plastis. Data tersebut memberikan informasi bahwa kapasitas struktur melebihi gempa rencana dalam arah memanjang dan kapasitas struktur mendekati gempa rencana dalam arah melintang. Dari rata-rata nilai $S_a = 1,11$ g dalam arah memanjang dan $S_a = 0,51$ g dalam arah melintang, struktur sangat daktail dalam arah memanjang dibandingkan dalam arah melintang, namun demikian struktur masih dalam batas aman dari gempa dengan nilai spektral akselerasi yang diharapkan terjadi sebesar 0,4 g – 0,5 g berdasarkan peta zonasi gempa sesuai RSNI 2833:2013

Tabel 2. Rangkuman Titik Kinerja Setiap Model

	Arah X		Arah Y	
	Sd	Sa	Sd	Sa
M1	0,0263	0,5669	0,0699	0,3207
M2	0,0299	0,5846	0,0585	0,3221
M3	0,0349	0,5615	0,0592	0,4410

Sumber: Hasil analisa Midas Civil, 2019





Gambar 9. Kurva Spektrum Kapasitas vs Demand Spektrum (a), M1-X (b), M1-Y (c) M2-X, (d) M2-Y, (e) M3-X, dan (f) M3-Y
 Sumber: Hasil analisa Midas Civil, 2019

Tabel 3. β (Dispersi Kapasitas Struktur) Masing-Masing Model

Kode Model	β_c	β_d	β_d	$\beta_{M(ds)}$
M1X	0,5492	0,8436	0,50	0,40
M1Y	0,5476	0,8426	0,50	0,40
M2X	0,5492	0,8436	0,50	0,40
M2Y	0,5480	0,8428	0,50	0,40
M3X	0,5493	0,8436	0,50	0,40
M3Y	0,5485	0,8431	0,50	0,40

Sumber: Olah data penulis, 2019

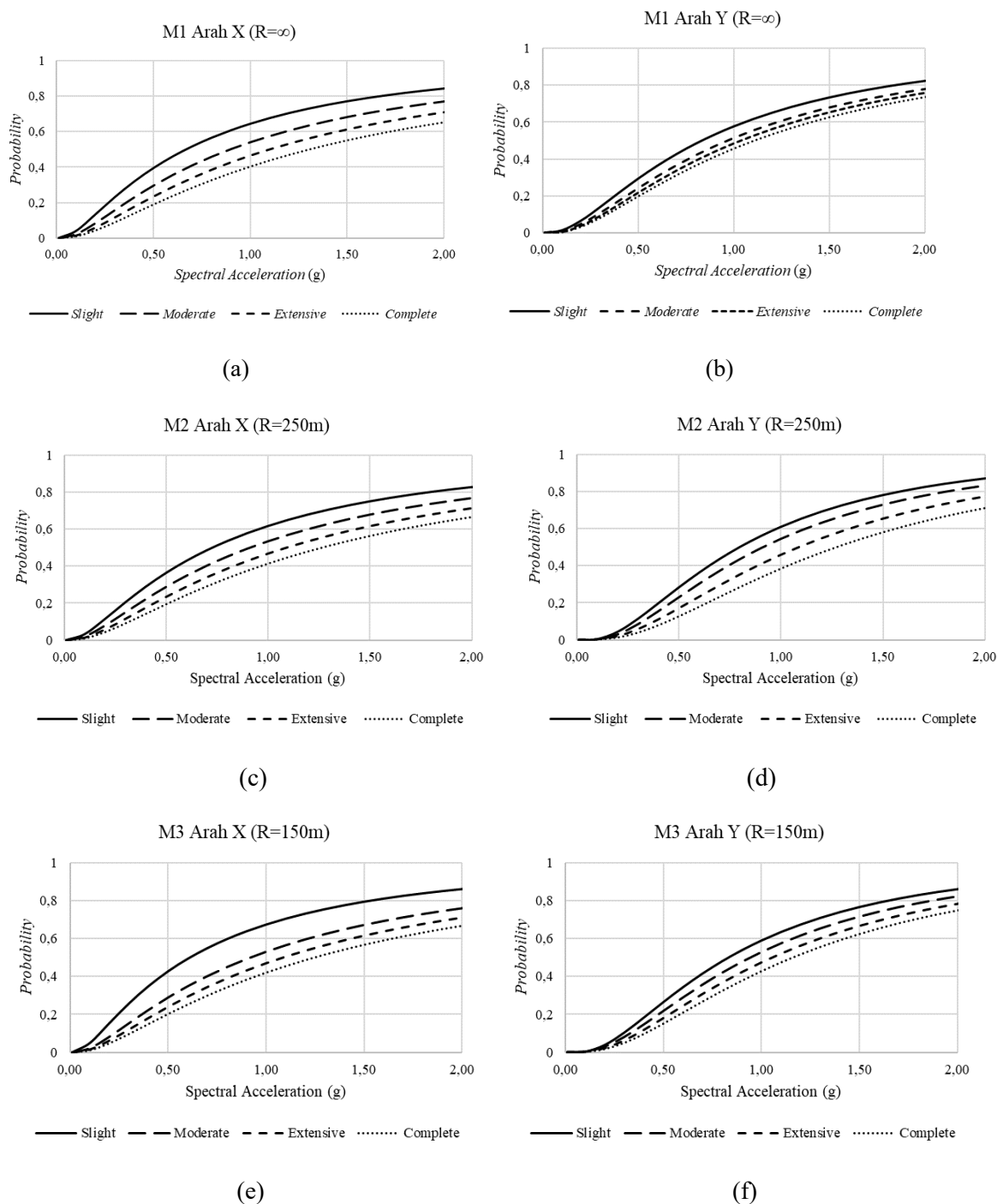
Pembahasan

Hasil analisa yang dilakukan pada keenam model lebih lanjut diolah untuk mendapatkan nilai dispersi dari kapasitas masing-masing struktur. Gambar 10 (a) sampai dengan (e) merupakan kurva kerapuhan untuk masing-masing model yang dibentuk menggunakan persamaan:

$$P(ds|S_a) = \phi\left(\frac{1}{\beta_{ds}}\right) \ln\left(\frac{S_a}{\bar{S}_a, ds}\right) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

ϕ : fungsi kumulatif probabilitas.
 β_{ds} : standar deviasi untuk ketidaktentuan total dari tiap kondisi kerusakan.
 S_a : percepatan spektra.
 $(\bar{S}_a, ds)$: nilai tengah percepatan spektra pada saat struktur mengalami kerusakan.



Gambar 10. Kurva Kerapuhan (c) Model 2 Arah X (d) Model 2 Arah Y (e) Model 3 Arah X (f) Model 3 Arah Y

Sumber: Olah data penulis, 2019

Berdasarkan kurva kerapuhan Gambar 10 terlihat bahwa jembatan Model 1, Model 2, dan Model 3 kecil kemungkinan struktur mengalami keruntuhan. Karena, sampai dengan $S_a = 1,0$ g untuk kriteria kerusakan *slight*, *moderate*, *extensive*, dan *complete*

masih jauh dibawah 100%. Spektra percepatan teramplifikasi untuk parameter dinamik percepatan tanah maksimum (PGA), spektra percepatan teramplifikasi untuk periode 0,2 detik (S_s), dan percepatan teramplifikasi 1,0 detik (S_1) dengan asumsi lokasi Jakarta Selatan

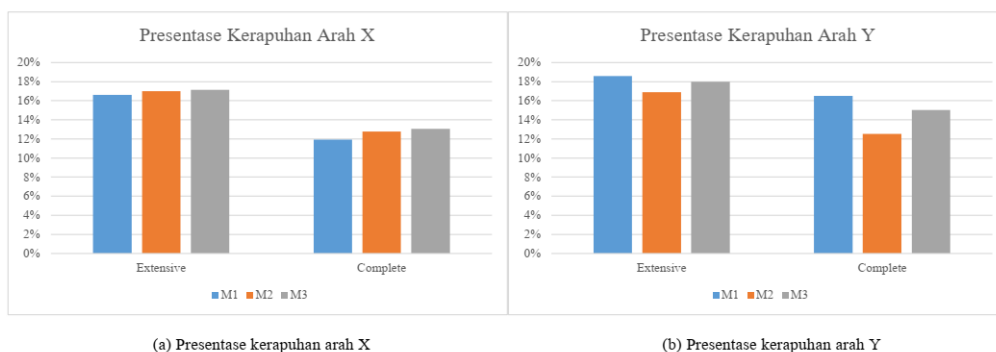
dan kondisi tanah sedang sesuai RSNI3 2833-2013 yang ditunjukkan pada Tabel 4, untuk kemudian diperoleh kemungkinan berdasarkan kriteria kerusakan Dari grafik Gambar 11 (a) dan Gambar 11 (b) dapat dilihat terjadi kenaikan probabilitas kerentanan/ potensi keruntuhan akibat perubahan variasi lengkungan jembatan untuk arah longitudinal. Namun demikian, Gambar 12 (a) dan Gambar 12 (b) terjadi penurunan nilai probabilitas keruntuhan untuk model 2 (R = 250 Km).

yang disajikan pada Gambar 11 dan Gambar 12. Sebagai perbandingan dipilih nilai yang terbesar spektra percepatan teramplifikasi untuk periode 0,2 detik (S_s) = 0,4 g dan 0,5 g Dari data tersebut ditarik kesimpulan bahwa pembebanan arah longitudinal pada jembatan melengkung lebih sensitif terhadap performa struktur akibat gempa, sedangkan pembebanan arah transversal tidak sensitif khususnya Model 2 (R = 250 Km) pada level *extensive* dan *complete damage*.

Tabel 4. Spektra Percepatan Tanah Jakarta Selatan

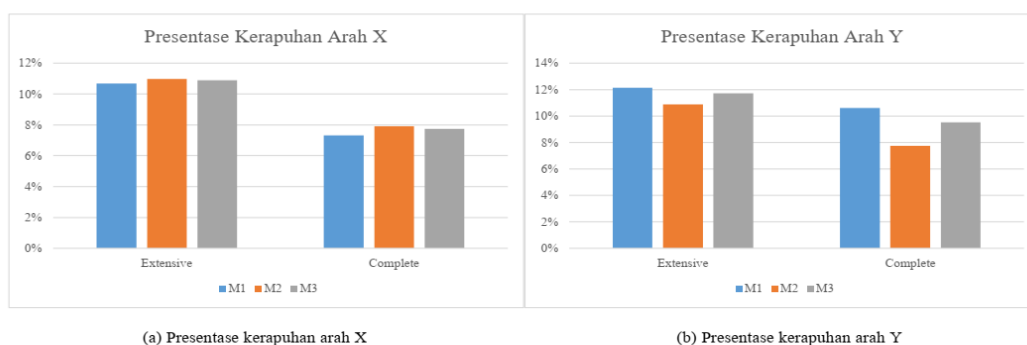
10% dalam 50 Tahun (500 tahun)	PGA	0,20 g
	S_s	0,40 g
	S_1	0,15 g
7% dalam 75 Tahun (1.000 tahun)	PGA	0,30 g
	S_s	0,50 g
	S_1	0,25 g

Sumber: SNI-2833:2013, 2013



Gambar 11. Presentase Kerapuhan pada Level Gempa 10% dalam 50 Tahun (500 Tahun) untuk (S_s) = 0,40 g

Sumber: Olah data penulis, 2019



Gambar 12. Presentase Kerapuhan pada Level Gempa 7% dalam 75 Tahun (1.000 Tahun) untuk (S_s) = 0,50 g

Sumber: Olah data penulis, 2019

Tabel 5. Rerata Probabilitas Terlampaui

Level Gempa	Extensive ($S_s=0,4g$)	Complete ($S_s=0,5g$)
10% dalam 50 tahun (500 tahun)	18%	14%
7% dalam 75 tahun (1.000 tahun)	13%	10%

Sumber: Olah data penulis, 2019

Tabel 5 menunjukkan bahwa akibat gempa periode ulang 500 tahun struktur memiliki probabilitas terlampaui kriteria extensive sebesar 18% dan lebih tinggi dibandingkan level gempa 1.000 tahun sebesar 13%.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan studi ini, perbandingan model jembatan dengan variasi kelengkungan M1 ($R = \infty$), M2 ($R = 250$ Km), dan M3 ($R = 150$ Km) dapat disimpulkan bahwa struktur jembatan dengan desain geometri melengkung memiliki risiko kerentanan/ kerapuhan terhadap beban gempa lebih tinggi khususnya dari arah pembebanan longitudinal. Secara keseluruhan model dalam penelitian ini, probabilitas untuk kriteria kerusakan masih dalam batas aman Karena, sampai dengan $S_a = 1,0$ g untuk kriteria kerusakan *slight*, *moderate*, *extensive*, dan *complete* masih jauh dibawah 100%.

Adapun saran yang dapat diambil dari studi ini yaitu membuat kajian dengan objek model jembatan dengan variasi radius ekstrim. lebih lanjut studi ini dilanjutkan untuk melakukan mengevaluasi dampak dari risiko kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa bumi yang diharapkan terjadi selama usia layan, dengan mengembangkan fungsi *loss estimation* untuk dapat mengkalkulasi kerugian dari segi sosial-ekonomi.

DAFTAR PUSTAKA

ATC. 1997. *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings: FEMA 273. Federal Emergency Management Agency*.
Chandran, Sruthi, dan PR Sreemahadevan

Pillai. 2017. "Seismic Vulnerability Assessment of Rc Bridge Using Fragility Curves." *International Research Journal of Engineering and Technology(IRJET)* 4 (3): 2228–31. <https://doi.org/ISSN: 2395-0056>.

Chopra, Anil K., dan Rakesh K. Goel. 1999. "Capacity-demand-diagram methods based on inelastic design spectrum." *Earthquake Spectra*.

Fajfar, Peter. 1999. "Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28 (9): 979–93. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199909\)28:9<979::AID-EQE850>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199909)28:9<979::AID-EQE850>3.0.CO;2-1).

FEMA. 2012. *Seismic Performance Assessment of Buildings - Volume 1 – Methodology FEMA P-58-1*. Diedit oleh Michael Mahoney. *Fema P-58-1*. 1 ed. Vol. 1. California: FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. www.ATCCouncil.org.

HAZUS. 2013. *Hazus –MH 2.1*. 2.1. Washington, D.C.: FEMA. www.fema.gov/plan/prevent/hazus.

Kim, Sang Hoon, dan Masanobu Shinozuka. 2004. "Development of fragility curves of bridges retrofitted by column jacketing." *Probabilistic Engineering Mechanics* 19 (1): 105–12. <https://doi.org/10.1016/j.pro bengmech.2003.11.009>.

Minavand, Mahmood, dan Mohsen Ghafory-Ashtiany. 2019. "Seismic Evaluation of Horizontally Curved Bridges Subjected to Near-Field Ground Motions." *Latin American Journal of Solids and*

- Structures* 16 (2): 1–15.
<https://doi.org/10.1590/1679-78255438>.
- Papailia, Alexsandra. 2011. “Seismic fragility curves for reinforced concrete buildings.” University of Patras.
http://www.strulab.civil.upatras.gr/sites/default/files/APapailia_MSc_thesis.pdf.
- SNI-2833:2013. 2013. *Perancangan Jembatan Terhadap beban Gempa*. Jakarta, Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.
- Tavio, dan Usman Wijaya. 2018. *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja (Performance Based Design)*. 1 ed. Surabaya: CV. Andi Offset (Penerbit Andi).
- Tropormera, Enjels N et. al. 2016. “Fungsi Fragility (Kerapuhan) Sebagai Alat Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Tipikal Jembatan Jalan Raya Beton.” In , 26–27. Yogyakarta: Universitas Atma Jaya Yogyakarta.