

Penilaian Kerentanan Seismik pada Jembatan Box Girder Beton Prategang Menerus Bentang Majemuk Eksisting melalui Pengembangan Kurva Fragilitas Analitik

Daony Roha Silitonga

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Jl. Pattimura No. 20, Kebayoran Baru, Jakarta Selatan 12110 Telp. /Fax. (62-21) 7227228 E-mail: daony 84@yahoo.com

Iswandi Imran

Institut Teknologi Bandung Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132. Telp. (62-22) 2534144, 2512970. Fax. (62-22) 2534144 E-mail: iswandiimran@gmail.com

Abstrak

Pengembangan kurva fragilitas merupakan salah satu metode penilaian kerentanan jembatan terhadap beban gempa yang dilakukan untuk memastikan keamanan dan kemampuan layan jembatan selama dan pasca gempa. Kurva fragilitas menunjukkan nilai probabilitas terjadinya suatu tingkat kerusakan pada struktur jembatan akibat suatu intensitas gempa, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi potensi kerusakan dan menentukan level kinerja jembatan. Studi ini mengembangkan kurva fragilitas untuk Jembatan Box Girder-Beton Prategang-Menerus -Bentang Majemuk eksisting yang berlokasi di Jakarta, dengan studi kasus pada Jembatan JLNT Tendean. Pengembangan kurva fragilitas mengacu kepada standar HAZUS. Kurva fragilitas dikembangkan dengan melakukan Non-Linear Time History Analysis (NLTHA) pada Model Analisis 3D Jembatan menggunakan program MIDAS CIVIL 2011. Input beban gempa pada NLTHA berupa serangkaian ground motion spesifik situs Jakarta, yang telah diskalakan terhadap Respon Spektra Target baik pada kondisi Beban Gempa Rencana Jakarta maupun pada berbagai level intensitas gempa. Tingkat kerusakan struktur jembatan akibat suatu intensitas gempa ditentukan dari respon seismik hasil NLTHA, berdasarkan nilai parameter kinerja jembatan - NCHRP 440 (2013). Kurva fragilitas yang dihasilkan menunjukkan bahwa Jembatan JLNT Tendean berpotensi mengalami tingkat kerusakan menengah akibat Beban Gempa Rencana, dengan kategori level kinerja "Life Safety". kerusakan runtuh dengan probabilitas terlampaui 50%, akan terjadi pada kejadian gempa dengan PGA sebesar 1.18g. Dengan demikian, dari studi ini dapat disimpulkan bahwa Jembatan JLNT Tendean memiliki fragilitas seismik yang rendah.

Kata Kunci: Kurva fragilitas, kerentanan seismik, HAZUS, NLTHA, NCHRP 440.

Abstract

The development of fragility curve is one of method to assess the bridge vulnerability to seismic loading in order to ensure bridge's safety and serviceability during and after an earthquake. Fragility curve describes the probability of a bridge reaching or exceeding a particular damage state for a given ground motion Intensity Measure (IM). Therefore, it can be used to identify bridge's potential damage and performance level at certain level of seismic intensity. This study presents the fragility curve development of an existing Multi Span Continuous-Prestressed Concrete-Box Girder-Highway Bridge, namely JLNT Tendean, which is located in Jakarta. The development of fragility curve refers to HAZUS standard. The fragility curve is developed by performing Non-Linear Time History Analysis (NLTHA) on 3D analytical bridge model using MIDAS CIVIL 2011 program. A suite of Jakarta's site-specific ground motion, which has been scaled both to Seismic Design Load and various level of seimic intensity Target Response Spectrums, will be used as seismic load input. Based on bridge performance parameters refer to NCHRP 440 (2013), the bridge's structural Damage States due to various earthquake loadings, are defined from the seismic responses resulted from NLTHA. The developed fragility curve shows that moderate damage state can occur at JLNT Tendean due to Seismic Design Load, and the performance level is categorized as "Life Safety". The complete damage state with 50% probability of exceedance can occur on seismic event with PGA of 1.18g. Based on this study, it is concluded that the JLNT Tendean has low seismic vulnerability.

Keyword: Fragility curve, seismic vulnerability, HAZUS, NLTHA, NCHRP 440.

1. Pendahuluan

Jembatan jalan raya memegang peranan penting dalam pertumbuhan ekonomi suatu negara dan menjadi penggerak berkembangnya infrastruktur lainnya. Jembatan jalan raya merupakan salah satu komponen utama dari jaringan transportasi, sehingga jembatan tersebut harus tetap berfungsi selama dan setelah gempa. Keamanan (*safety*) dan kemampuan layan (*serviceability*) dari jembatan selama dan setelah gempa merupakan prasyarat untuk memastikan keberlangsungan fasilitas transportasi, tanggap darurat dan jalur evakuasi.

Saat ini Indonesia sudah memiliki peraturan yang mengatur tentang perencanaan jembatan terhadap beban gempa yaitu Standar Nasional Indonesia SNI 2833:2016. Namun kondisi saat ini, masih banyak jembatan yang belum menerapkan peraturan tersebut dan belum didesain tahan gempa, sehingga selama dan pasca gempa, terutama gempa kuat, masih banyak jembatan yang mengalami kerusakan parah atau bahkan runtuh, yang tentu saja berpotensi menimbulkan kerugian fisik maupun keselamatan jiwa pengguna jembatan.

Oleh karena itu, untuk memastikan keamanan dan kemampuan layan jembatan selama dan pasca gempa, perlu dilakukan penilaian kerentanan jembatan eksisting terhadap beban gempa, terutama di wilayah zona gempa kuat, salah satunya melalui pengembangan kurva fragilitas. Studi ini akan mengembangkan kurva fragilitas untuk jembatan jalan raya dengan sistem struktur berupa Jembatan Box Girder-Beton Prategang-Menerus-Bentang Majemuk (Multi-Span Continuous Prestressed Concrete Box Girder Bridge). Jembatan Box Girder-Beton Prategang-Menerus-Bentang Majemuk merupakan salah satu tipe struktur jembatan jalan raya yang banyak dijumpai di Jakarta sebagai salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki tingkat kerawanan yang tinggi terhadap gempa.

fragilitas merupakan kurva menghubungkan antara nilai probabilitas terjadinya suatu tingkat kerusakan pada struktur jembatan akibat suatu intensitas gempa. Pada studi ini, kurva fragilitas akan dikembangkan dengan melakukan analisis respon dinamik riwayat waktu non-linear (Non-Linear Time History Analysis) pada Model Analisis Tiga Dimensi (3D) Jembatan dengan menggunakan serangkaian riwayat waktu percepatan tanah akibat gempa (ground motion) spesifik situs Jakarta, yang telah diskalakan terhadap Target Response Spectrum (Respons Spektra Jakarta - Tanah Lunak) baik pada kondisi Beban Gempa Rencana maupun pada berbagai level intensitas gempa, sebagai input beban gempa. Dari hasil NLTHA, juga diamati pola plastifikasi yang terjadi pada jembatan akibat beban gempa rencana. Kurva fragilitas yang dihasilkan digunakan untuk mengidentifikasi potensi kerusakan yang terjadi dan menentukan level kinerja jembatan akibat berbagai level intensitas gempa.

2. Dasar Teori

2.1 Penilaian fragilitas bangunan akibat gempa

Penilaian fragilitas bangunan akibat gempa bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi kerentanan (fragilitas) suatu bangunan yang diakibatkan oleh bencana gempa bumi. Penilaian ini memberikan nilai probabilitas terjadinya kerusakan akibat suatu intensitas gempa.

Nilai fragilitas suatu bangunan dapat direpresentasikan berupa suatu fungsi kontinyu atau berupa nilai-nilai diskrit (bukan fungsi kontinyu). Nilai fragilitas yang berupa fungsi kontinyu disajikan dengan menggunakan kurva fragilitas. Kurva fragilitas menghubungkan nilai kemungkinan terlampauinya suatu tingkat kerusakan tertentu pada suatu bangunan akibat suatu intensitas gempa.

Pengembangan kurva fragilitas dapat dilakukan dengan beberapa metode, antara lain:

- 1. Metode Berbasis Empiris (Empirical Fragility Curve)
 - Kurva fragilitas dikembangkan dengan menggunakan distribusi kerusakan dari hasil observasi atau investigasi kerusakan bangunan pasca gempa.
- 2. Metode Berbasis Analisis (Analytical Fragility Curve)

Kurva fragilitas dikembangkan melalui analisis struktur yang menghasilkan nilai distribusi kerusakan, yang hasilnya bergantung pada pendekatan yang digunakan dalam pemodelan struktur dan perhitungan.

Beberapa metode analisis struktur yang dapat digunakan, diantaranya elastic spectral analysis, non-linear static analysis pushover, Non-Linear Time History Analysis.

3. Metode Berbasis Opini Para Ahli/Pakar (*Expert-based/Judgemental Fragility Curve*)

Kurva fragilitas dikembangkan berdasarkan nilai estimasi para ahli untuk kemungkinan distribusi kerusakan yang terjadi pada struktur pada berbagai intensitas gempa. Metode ini bergantung pada keputusan dan informasi dari para ahli.

2.2 Kurva fragilitas dengan metode HAZUS

HAZUS (*Hazard United States*) mendefinisikan kurva fragilitas sebagai kurva yang memberikan hubungan antara nilai probabilitas terjadinya suatu tingkat kerusakan (*Damage State / DS*) pada bangunan dengan nilai intensitas gempa (*Intensity Measure / IM*).

HAZUS memodelkan nilai probabilitas terjadinya suatu tingkat kerusakan akibat suatu level intensitas gempa tersebut (yang dalam studi ini menggunakan intensitas gempa dalam bentuk *Peak Ground Accelleration/* PGA) sebagai nilai kumulatif dari distribusi lognormal, yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) berikut:

$$P[DS|PGA] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} ln \left(\frac{PGA}{\overline{PGA}_{ds}} \right) \right]$$
 (1)

dimana:

: probabilitas tercapainya atau P[DS|PGA] terlampauinya suatu tingkat kerusakan

pada suatu nilai PGA.

: nilai percepatan tanah puncak di batuan PGA

dasar.

: nilai median dari PGA untuk mencapai PGA de

suatu tingkat kerusakan

: standar deviasi lognormal dari PGA β_{ds} mencapai tingkat suatu

kerusakan.

Φ : Standard Normal Cumulative

Distribution Function.

Kurva fragilitas dikembangkan untuk Tingkat Kerusakan Ringan (Slight), Menengah (Moderate), Berat (Extensive) dan Runtuh (Complete).

2.3 Tingkat Kerusakan

memberikan hubungan fragilitas antara probabilitas tercapainya suatu tingkat kerusakan pada struktur akibat suatu intensitas gempa. Maka, tahapan yang penting dalam analisis kurva fragilitas struktur yaitu menetapkan tingkat kerusakan (damage state) pada struktur berdasarkan suatu ukuran kerusakan (damage measure atau demand paramater). Beberapa ukuran kerusakan yang digunakan diantaranya adalah displacement ductility, curvature displacement, ductility, drift ratio, dan sebagainya. Ukuran kerusakan ini digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kerusakan yang menunjukkan level kinerja (performance level) struktur terhadap gempa. Tingkat kerusakan struktur akibat gempa dipengaruhi oleh kinerja struktur itu sendiri. Level kinerja atau tingkat kerusakan digambarkan dengan kerusakan fisik yang terjadi pada struktur.

HAZUS mengklasifikasikan Tingkat Kerusakan menjadi Ringan (Slight), Menengah (Moderate), Berat (Extensive) dan Runtuh (Complete). Deskripsi batasan jembatan kualitatif kerusakan secara tingkat berdasarkan HAZUS dapat dilihat pada Tabel 1.

Identifikasi tingkat kerusakan yang dialami jembatan dan penetapan level kinerja dapat dilakukan berdasarkan Parameter Desain/ Kinerja Jembatan (NCHRP 440, 2013) seperti pada Tabel 2.

Dari Tabel 2, dapat dilihat bahwa batasan parameter kinerja untuk setiap tingkat kerusakan adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Deskripsi tingkat kerusakan jembatan berdasarkan HAZUS

Tingkat Kerusakan	Deskripsi
Ringan (<i>Slight</i>)	Retak (<i>cracking</i>) dan pecah (<i>spalling</i>) minor pada <i>abutment</i> , retak <i>shear key</i> pada <i>abutment</i> , retak dan pecah minor pada <i>sendi plastis</i> , pecah minor pada kolom (hanya perlu perbaikan ringan/non struktural), retak ringan pada <i>deck</i>
Menengah (<i>Moderate</i>)	Retak geser dan pecah menengah pada kolom (kolom masih kuat secara struktural), terjadi perpindahan sedang pada <i>abutment</i> , retak dan pecah sedang pada <i>shear key</i> , sambungan mengalami retak pada <i>shear key</i> , keruntuhan <i>keeper bar</i> , keruntuhan <i>rocker bearing</i> , terjadi settlement sedang pada <i>approach</i>
Berat (<i>Extensive</i>)	Terjadi penurunan kekuatan tanpa runtuh pada kolom - terjadi kegagalan akibat geser - (kolom tidak aman secara struktural), terjadi perpindahan residual yang besar pada sambungan, terjadi settlement yang besar pada approach, terjadi vertical offset pada abutment, terjadi differential settlement pada sambungan, keruntuhan shear key pada abutment
Runtuh (Complete)	Semua kolom runtuh total, kegagalan sambungan pada <i>bearing support</i> yang segera diikuti dengan kegagalan <i>deck</i> , miringnya <i>substructure</i> akibat keruntuhan pondasi.

Tabel 2. Parameter desain / kinerja jembatan (bridge performance / design parameters) berdasarkan NCHRP 440 (2013)

Tingkat (Level)	Deskripsi	Regangan Baja	Regangan Beton	% Drift	Displacement Ductility
II	Operational	0.005	0.0032	1	1
III	Life Safety	0.019	0.01	3	2
IV	Near Collapse	0.048	0.027	5	6
V	Collapse	0.063	0.036	8.7	8

Vol. 26 No. 1, April 2019 49

- Tingkat Kerusakan Ringan (*Slight Damage State*) terjadi apabila nilai *drift* kurang dari 1% dan struktur dikategorikan memiliki Kinerja '*Operational*'.
- Tingkat Kerusakan Menengah (Moderate Damage State) terjadi apabila nilai drift antara 1% 3% dan struktur dikategorikan memiliki Kinerja 'Life Safety'.
- Tingkat Kerusakan Berat (Extensive Damage State) terjadi apabila nilai drift antara 3% – 5% dan struktur dikategorikan memiliki Kinerja 'Near-Collapse'.
- Tingkat Kerusakan Runtuh (Complete Damage State) terjadi apabila nilai drift antara 5% – 8.7% dan struktur dikategorikan memiliki Kinerja 'Collapse'.

3. Metodologi Pengembangan Kurva Fragilitas Analitik dengan Metode Non-Linear Time History Analysis (NLTHA)

Kurva fragilitas dikembangkan untuk Tingkat Kerusakan Ringan, Menengah, Berat dan Runtuh. Tingkat kerusakan struktur akibat gempa menunjukkan level kinerja struktur. Untuk mendapatkan nilai fragilitas struktur, diperlukan suatu parameter yang mewakili kinerja bangunan tersebut. Nilai yang dipakai sebagai parameter kinerja struktur pada studi ini adalah drift. Beberapa parameter intensitas gempa yang banyak digunakan dalam pengembangan kurva fragilitas, diantaranya adalah Spectral Acceleration (Sa), Peak Ground Acceleration (PGA), Peak Ground Velocity (PGV), dan sebagainya. Dalam studi ini, kurva fragilitas akan dibentuk terhadap PGA.

Pada studi ini, kurva fragilitas dikembangkan dari hasil analisis respons dinamik struktur jembatan dengan metode *Non-Linear Time History Analysis*. Analisis respon seismik struktur tersebut dilakukan dengan pendekatan level komponen (*component level approach*) terhadap komponen struktur pilar (*pier*) jembatan sebagai komponen yang paling kritis dalam menahan gaya gempa (pembentukan sendi plastis terjadi pada *pier* jembatan sebagai pusat massa struktur).

- a) Pengembangan kurva fragilitas analitik dengan metode NLTHA pada studi ini secara umum dapat dijelaskan dengan tahapan sebagai berikut:
- b) Pemilihan serangkaian ground motion yang sesuai dengan karakteristik kegempaan spesifik situs di lokasi jembatan sebagai representasi gerakan tanah akibat gempa.
- c) Pemodelan struktur jembatan dengan program MIDAS CIVIL 2011.

- d) Proses NLTHA yaitu serangkaian ground motion terpilih, yang sudah diskalakan terhadap Target Response Spectrum Jakarta pada kondisi Beban Gempa Rencana maupun pada berbagai level intensitas gempa, dieksitasi pada model analisis 3D jembatan untuk mengestimasi respons seismik yang terjadi pada komponen struktur jembatan, dalam hal ini pier jembatan.
- e) Mengidentifikasi tingkat kerusakan yang terjadi pada struktur jembatan dari nilai respons struktur yang terjadi akibat berbagai input beban gempa.
- f) Perhitungan parameter batasan tingkat kerusakan yang diperlukan untuk pengembangan kurva fragilitas setiap tingkat kerusakan.
- g) Pengembangan kurva fragilitas melalui perhitungan nilai probabilitas terjadinya setiap tingkat kerusakan akibat suatu level intensitas gempa dengan mengikuti distribusi lognormal.

4. Studi Kasus

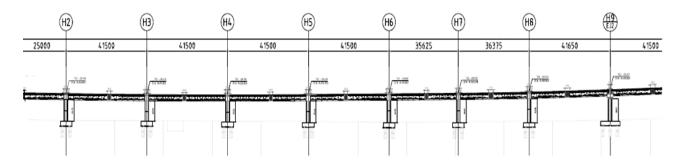
4.1 Deskripsi model studi

Jembatan yang digunakan pada studi kasus untuk menganalisis kerentanan jembatan terhadap beban gempa melalui pengembangan Kurva Fragilitas Analitik dengan metode Non-Linear Time History Analysis ini adalah Jembatan Jalan Layang Non-Tol Ciledug-Tendean untuk Paket Tendean (JLNT Tendean). Jembatan ini berlokasi di Wilayah Jakarta yang merupakan zona gempa kuat di Indonesia. Jembatan JLNT Tendean merupakan tipe Jembatan Box Girder - Beton Prategang - Menerus - Bentang Majemuk.

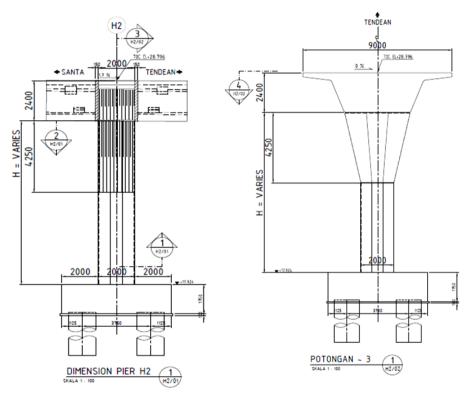
Pada studi ini, pemodelan dan analisis dilakukan terhadap segmen 1 bentang menerus (continuous) pada jembatan utama JLNT Tendean dengan panjang total 279.65 m. Segmen 1 dipilih karena merupakan segmen yang paling panjang, miring dan melengkung (skewed and curved segment), serta memiliki pier terpendek, sehingga segmen ini paling rentan terhadap beban gempa (hasil analisisnya merepresentasikan respons keseluruhan struktur). Segmen ini terdiri dari 8 pier (pier H2 sampai H9), dengan tinggi bervariasi antara 8.090 m sampai dengan 9.398 m. Geometri dari struktur jembatan JLNT Tendean ini dapat dilihat pada Gambar 1.

4.1.1 Detail dimensi dan konfigurasi penulangan penampang pier

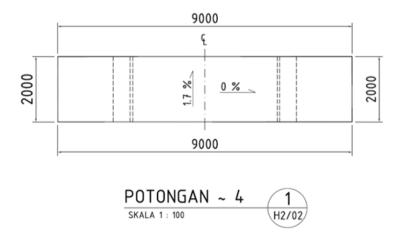
Pier H2 sampai H9 pada jembatan JLNT Tendean mempunyai dimensi penampang dan konfigurasi penulangan yang tipikal. Detail dimensi pier ditampilkan pada Gambar 2 hingga Gambar 4, dan konfigurasi penulangan pada pier ditampilkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



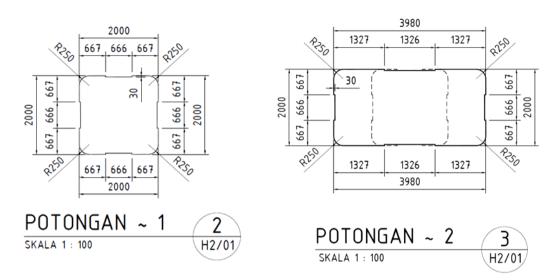
Gambar 1. Segmen 1 bentang menerus pada JLNT Tendean



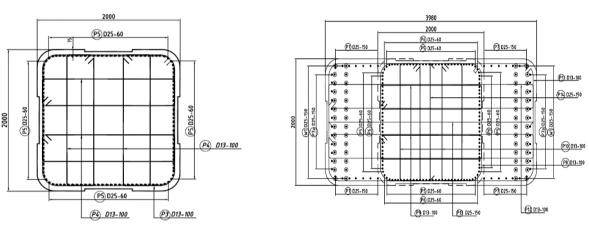
Gambar 2. Tampak samping dan tampak depan tipikal pier H2-H9 dengan variasi tinggi (H)



Gambar 3. Tampak atas tipikal pier H2-H9

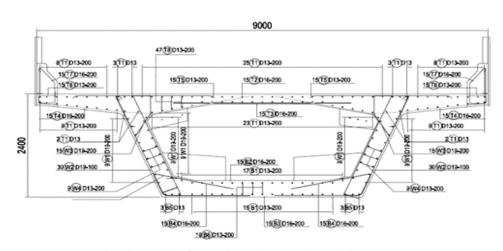


Gambar 4. Detail dimensi penampang tipikal pier H2-H9



Gambar 5. Konfigurasi penulangan penampang bawah tipikal pier H2-H9

Gambar 6. Konfigurasi penulangan penampang atas tipikal pier H2-H9



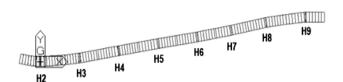
Gambar 7. Konfigurasi penulangan box girder

4.2 Pemodelan struktur

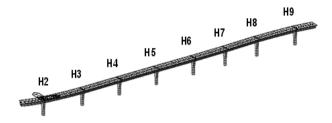
Pemodelan Jembatan dengan menggunakan program komputer MIDAS CIVIL 2011, dapat dilihat pada

Gambar 8 dan Gambar 9. Model dibuat mendekati keadaan riil untuk mengetahui respons seismik akibat riwayat waktu percepatan tanah akibat gempa yang bekerja pada jembatan.

52 Jurnal Teknik Sipil



Gambar 8. Tampak atas model JLNT Tendean



Gambar 9. Tampak 3D model JLNT Tendean

5. Beban Gempa

5.1 Target response spectrum wilayah Jakarta

Pembebanan gempa mengacu pada SNI 2833:2016 tentang Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa. Karena Jembatan JLNT Tendean berlokasi di wilayah Jakarta yang merupakan wilayah gempa kuat, maka struktur tersebut direncanakan terhadap beban gempa.

Dari dokumen perencanaan diketahui bahwa struktur jembatan direncanakan dengan umur rencana minimal 75 tahun dan probabilitas gaya gempa terlampaui sebesar 7%, sehingga struktur jembatan direncanakan mampu memikul gaya gempa dengan periode ulang 1000 tahun.

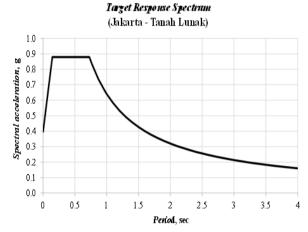
Dengan mengikuti kriteria gempa desain pada Jembatan JLNT Tendean berdasarkan Peta Gempa Indonesia pada SNI 2833:2016, diperoleh nilai-nilai spektra percepatan tanah di batuan dasar yang kemudian nilai-nilai spektra percepatan tersebut dikalikan dengan faktor amplifikasi yang sesuai untuk kelas situs Tanah Lunak (SE), sehingga diperoleh Target Response Spectrum di permukaan tanah di wilayah Jakarta (pada lokasi Jembatan JLNT Tendean) untuk kondisi Beban Gempa Rencana seperti ditampilkan pada Gambar 10.

5.2 Ground motion spesifik situs wilayah Jakarta

Pada studi ini, penilaian respons struktur terhadap beban gempa yang bekerja dilakukan dengan Non-Linear Time History Analysis. NLTHA membutuhkan serangkaian ground motion sebagai input beban gempa. Keakuratan hasil NLTHA sangat tergantung dari ground motion yang digunakan. Pemilihan serangkaian ground motion yang sesuai merupakan proses yang penting dalam NLTHA. Percepatan tanah yang sesuai dipilih dari rekaman peristiwa gempa aktual yang memiliki magnitud, jarak patahan, dan mekanisme sumber gempa yang konsisten dengan hal-hal yang mengontrol ketentuan gempa maksimum yang dipertimbangkan.

Serangkaian ground motion yang digunakan pada studi ini adalah 5 (lima) ground motion yang sesuai dengan karakteristik kegempaan spesifik situs Jakarta yang telah dikembangkan oleh Sengara dkk. (2015) melalui proses Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 3.

Rangkaian ground motion tersebut diskalakan terhadap Target Response Spectrum baik pada kondisi Beban Gempa Rencana Jakarta maupun pada berbagai level intensitas gempa (dengan range Peak Surface



Gambar 10. Target response spectrum wilayah Jakarta - kondisi tanah lunak

Tabel 3. Ground motion spesifik situs Jakarta oleh Sengara dkk. (2015)

Earthquake Mechanism	Catalog Code	Source	Earthquake	Magnitude	Epicentral Distance (km)
Megathrust	MYG01311	K-NET	Tohoku Earthquake 11	9.00	170.00
	311146	[25]	Mar 2011		
	TAP075	PEER	Chi - chi Earthquake	7.62	160.21
		[22]	20 Sep 1999		
Benioff	Padang	Rusnadi	Padang Earthquake	7.60	81.00
	30-11-2009	et al [26]	30 Sep 2009		
Shallow Background	A-ORR	PEER	Whittier Narrows-01 Earthquake 10 Jan	5.99	77.07
		[22]	1987		
Shallow Crustal	SER	PEER	Landers Earthquake 29 Jan 1992	7.28	75.2
		[22]			

Acceleration PSA dari 0.1g hingga 2.1g dengan peningkatan setiap 0.1g, sehingga didapatkan 105 scaled ground motions yang kompatibel dengan Target Response Spectrum), untuk digunakan sebagai input NLTHA agar diperoleh distribusi respons struktur untuk semua tingkat kerusakan. Proses penskalaan (scaling) ground motion ini berdasarkan persyaratan scaling ASCE/SEI 7-10.

6. Non-Linear Time History Analysis (NLTHA)

NLTHA dilakukan pada Model Analisis 3D Jembatan dengan menggunakan program MIDAS CIVIL 2011 untuk menganalisis respons dinamik struktur terhadap beban gempa yang bekerja. Proses NLTHA dilakukan berbagai level intensitas pada gempa menghasilkan distribusi nilai perpindahan maksimum pada semua tingkat kerusakan, yang selanjutnya akan diolah untuk pengembangan kurva fragilitas berdasarkan HAZUS.

Perilaku inelastik struktur didefinisikan melalui pemodelan sendi plastis pada model struktur jembatan yaitu pada elemen *pier. Pier* merupakan bagian struktur jembatan yang dirancang untuk mengalami kerusakan hingga batas yang dapat diterima melalui pembentukan sendi plastis (*plastic hinge*).

Karakteristik sendi plastis didefinisikan dari perilaku inelastik (non-linear) elemen pier yang berupa hubungan momen-rotasi setiap elemen pier (untuk arah longitudinal dan transversal) yang mengikuti Model Hysteresis Takeda (1970), serta perilaku inelastik material beton yang berupa hubungan tegangan-regangan material beton yang mengikuti Model Mander (1988), baik untuk beton terkekang (confined) maupun tidak terkekang (unconfined).

Hubungan momen-rotasi dapat diperoleh dengan terlebih dahulu menghitung hubungan momen-kurvatur penampang *pier* untuk arah longitudinal dan transversal dengan menggunakan Program *XTRACT*.

Selanjutnya, nilai rotasi diperoleh dari nilai kurvatur dikalikan dengan panjang sendi plastisnya.

Respons struktur jembatan terhadap beban gempa dari hasil NLTHA yang berupa nilai perpindahan maksimum, kemudian dihitung nilai *drift* dari setiap nilai perpindahan maksimum tersebut. Dari nilai *drift* maksimum, dilakukan identifikasi tingkat kerusakan (*damage state*) yang dialami jembatan dan penetapan level kinerja (*performance level*) struktur akibat beban gempa yang bekerja berdasarkan Parameter Desain/Kinerja Jembatan (NCHRP 440, 2013).

7. Hasil Studi

Dari hasil NLTHA, *drift* maksimum yang dialami elemen *pier* akibat Beban Gempa Rencana Wilayah Jakarta sebesar 1.12%, sehingga berdasarkan Parameter Desain/ Kinerja Jembatan (NCHRP 440, 2013), kinerja struktur masuk dalam kategori kinerja "*Life Safety*" dan struktur diidentifikasi mengalami kondisi Kerusakan Menengah (*Moderate Damage*).

Nilai *drift* maksimum tersebut terjadi pada arah transversal, menunjukkan bahwa gempa dominan terjadi pada arah transversal jembatan. Nilai *drift* maksimum hasil NLTHA pada berbagai skenario intensitas gempa ditampilkan pada **Tabel 4.**

7.1 Pola plastifikasi

Kondisi yang perlu diperhatikan adalah kondisi ketika struktur mengalami kelelehan pertama kali (first yield) dan kondisi ketika struktur mengalami keruntuhan. Struktur mengalami kelelehan pertama kali pada tahap dimana sendi plastis pertama terbentuk. Tahap first yield merupakan parameter penting karena merupakan

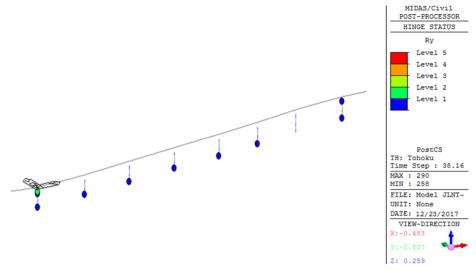
batas antara kondisi elastis (tidak rusak) dan kondisi plastis (rusak) namun belum runtuh.

Dari hasil NLTHA, pola plastifikasi arah longitudinal dan transversal yang terbentuk pada jembatan JLNT Tendean akibat Beban Gempa Rencana Wilayah Jakarta adalah sebagai berikut:

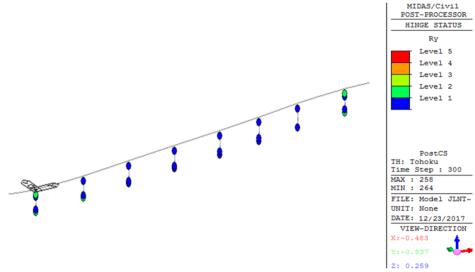
- a. Pola Plastifikasi Arah Longitudinal
- Jembatan mengalami kelelehan pertama (first yield) pada pier H2 (Gambar 11).
- Pada akhir durasi gempa, plastifikasi terjadi hanya pada bagian ujung bawah dan atas pier H2 dan H9, serta pada bagian ujung bawah pier H3 (Gambar 12).
- b. Pola Plastifikasi Arah Transversal
- Jembatan mengalami kelelehan pertama (first yield) pada pier H9 (Gambar 13).
- Pada akhir durasi gempa, plastifikasi terjadi pada semua ujung bawah *pier*, namun tidak terjadi keruntuhan (Gambar 14).

Tabel 4. Hasil NLTHA pada berbagai skenario intensitas gempa serta identifikasi damage state dan performance level

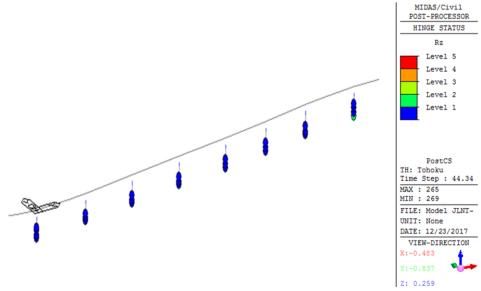
PSA	PGA	di	Drift	D==i=====	Performance
(g)	(g)	(meter)	%	- Drainage State	Level
0.1	0.07	0.028	0.35	Slight Damage	"Operational
0.2	0.14	0.0559	0.69	Slight Damage	"Operational
0.3	0.2	0.0739	0.91	Slight Damage	"Operational
0.4	0.27	0.0909	1.12	Moderate Damage	"Life Safety"
0.5	0.34	0.1259	1.56	Moderate Damage	"Life Safety"
0.6	0.41	0.1553	1.92	Moderate Damage	"Life Safety"
0.7	0.48	0.1863	2.3	Moderate Damage	"Life Safety"
0.8	0.54	0.2139	2.64	Moderate Damage	"Life Safety"
0.9	0.61	0.2435	3.01	Extensive Damage	"Near-Collapse"
1	0.68	0.279	3.45	Extensive Damage	"Near-Collapse"
1.1	0.75	0.3147	3.89	Extensive Damage	"Near-Collapse"
1.2	0.82	0.3256	4.36	Extensive Damage	"Near-Collapse"
1.3	0.88	0.3892	4.81	Extensive Damage	"Near-Collapse"
1.4	0.95	0.4284	5.3	Complete Damage	"Collapse"
1.5	1.02	0.4665	5.77	Complete Damage	"Collapse"
1.6	1.09	0.5027	6.21	Complete Damage	"Collapse"
1.7	1.15	0.5381	6.65	Complete Damage	"Collapse"
1.8	1.22	0.5728	7.08	Complete Damage	"Collapse"
1.9	1.29	0.6075	7.51	Complete Damage	"Collapse"
2	1.36	0.6417	7.93	Complete Damage	"Collapse"
2.1	1.43	0.6752	8.35	Complete Damage	"Collapse"



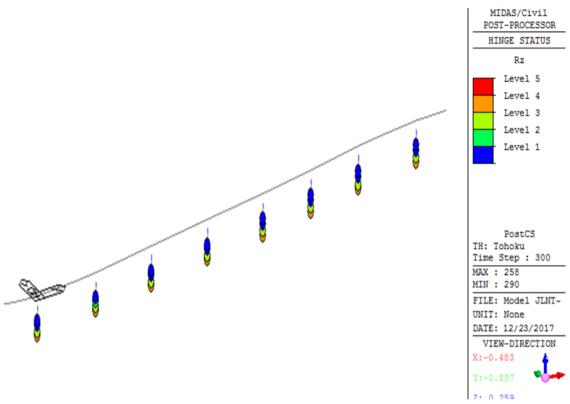
Gambar 11. Kelelahan pertama (first yield) pada pier H2 untuk plastifikasi arah longitudinal



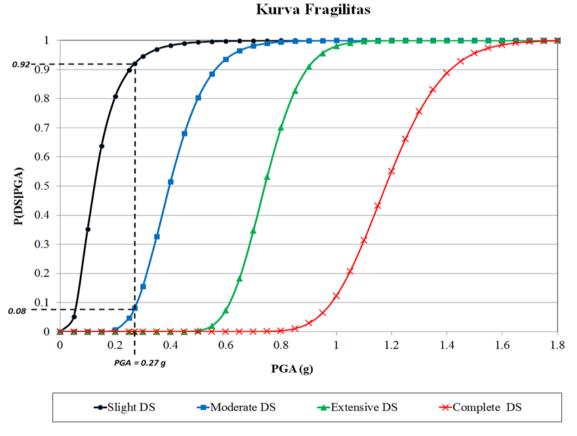
Gambar 12. Pola plastifikasi arah longitudinal pada akhir durasi gempa akibat beban gempa rencana wilayah Jakarta



Gambar 13. Kelelahan pertama (first yield) pada pier H9 untuk plastifikasi arah transversal



Gambar 14. Kelelahan pertama (first yield) pada pier H2 untuk plastifikasi arah longitudinal



Gambar 15. Kurva fragilitas jembatan JLNT Tendean

8. Kesimpulan dan Saran

8.1 Kesimpulan

- Dari pola plastifikasi dapat terlihat bahwa gempa dominan pada arah transversal, dan jembatan kuat dalam menahan Beban Gempa Rencana Wilayah Jakarta karena tidak terjadi keruntuhan akibat beban gempa tersebut.
- Akibat Beban Gempa Rencana Wilayah Jakarta yang bekerja pada jembatan, potensi kerusakan yang terjadi hanya kerusakan ringan dan menengah.
- Potensi keruntuhan dapat terjadi pada kejadian gempa dengan intensitas (nilai PGA) yang cukup lebih besar dari Beban Gempa Rencana Wilayah Jakarta.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa Jembatan JLNT Tendean memiliki fragilitas seismik yang rendah.

8.2 Saran

Wilayah Jakarta merupakan wilayah dengan tingkat kerawanan tinggi terhadap gempa, oleh karenanya struktur jembatan di wilayah ini harus dirancang untuk tahan gempa, dengan menekankan pada aspek daktilitas struktur yang baik dan kemampuan untuk mendisipasi energi yang baik, agar struktur mampu menahan gempa karakteristik Jakarta.

Pengembangan kurva fragilitas analitik kedepannya dapat dilakukan sebagai salah satu upaya untuk mengevaluasi kinerja struktur jembatan terhadap beban seismik, serta untuk mengidentifikasi tingkat kerusakan yang terjadi akibat berbagai level intensitas gempa pada berbagai tipe struktur jembatan di berbagai wilayah di Indonesia, khususnya wilayah-wilayah dengan tingkat kerawanan tinggi terhadap gempa.

Daftar Pustaka

- Ang, A.H.S. and Wilson H. Tang, 2007, Probability Concepts in Engineering Planning and Design, 2nd edition. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, 2010, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers.
- Billah, A.H.M. Muntasir and M. Shahria Alam, 2014, Seismic Fragility Assessment of Highway Bridges: A State-of-the-art Review. London, UK: Taylor & Francis.
- HAZUS-MH MR1 Technical & User's Manual, 2003. Multi-hazard Loss Estimation Methodology: Earthquake Model. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.

- HAZUS-MH MR4 Technical Manual, 2003, Multihazard Loss Estimation Methodology: Earthquake Model. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Mander, J. B., M. J. N. Priestlev and R. Park, 1988. Theoritical Stress-Strain Model for Confined Concrete. Journal of Structural Engineering, Vol. 114, Issue 8.
- NCHRP Synthesis 440, 2013, Performance-Based Seismic Bridge Design. Washington, D.C.: National Academy of Sciences.
- Sengara, I.W., M.A.Yulman dan A. Mulia, 2015, Seismic Time-History Ground-Motions for a Specific Site in Jakarta. Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), 77:11, 127–136.
- Standar Nasional Indonesia SNI 1726-2012, 2012, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia SNI 1725:2016, 2016, Pembebanan untuk Jembatan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia SNI 2833:2016, 2016, Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Takeda, T, M.A. Sozen and N.N. Nielsen, 1970, Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes. Journal of the Structural Division, 1970, Vol. 96, Issue 12, Pg. 2557-2573.

Penilaian Kerentanan Seismik pada Jembatan Box Girder...