

Asesmen Kerapuhan Seismik Jembatan dengan *Incremental Dynamic Analysis*

Mutiara Puspahati¹, Ireng Guntorojati², S.A. Kristiawan³, Senot Sangadji⁴

Abstrak

Tujuan studi ini adalah untuk melakukan asesmen terhadap kerapuhan seismik jembatan beton bertulang dengan tipe single pier yang didesain sebagai jembatan layang tol di daerah urban. Struktur jembatan yang ditinjau terdiri dari beberapa model struktur yang memiliki variasi geometri. Tiga parameter penting dalam asesmen terhadap suatu struktur, yaitu *hazard*, kebutuhan (*demand*), dan kapasitas (*capacity*). Beberapa tipe desain struktur jembatan single pier digunakan sebagai basis data dalam proses analisis dinamis untuk menghasilkan kurva respon non-linier struktur. Variasi geometri struktur jembatan yang ditinjau adalah tinggi pier dan panjang bentang. Suatu analisis dinamik bertahap (*Incremental Dynamic Analysis*) dilakukan untuk mengetahui kapasitas struktur. Incremental Dynamic Analysis adalah sebuah pendekatan untuk menghasilkan ilustrasi level kerusakan struktur yang mengalami intensitas seismik yang bervariasi. Tujuh set rekaman gempa besar yang pernah terjadi di dunia digunakan sebagai demand. Kondisi struktur setelah gempa dibandingkan untuk mengetahui pengaruh variasi geometri struktur terhadap kerapuhan seismik struktur jembatan beton bertulang, serta kesesuaiannya dengan peraturan perencanaan jembatan terhadap gempa yang saat ini digunakan RSNi 2833-201X.

Kata kunci: jembatan; *single pier*; kerapuhan; *incremental dynamic analysis*; RSNi 2833-201X

^{1,2} Structural Engineer PT Wiratman

^{3,4} SmartQuake Research Group Universitas Sebelas Maret

Asesmen Kerapuhan Seismik Jembatan dengan *Incremental Dynamic Analysis*

Mutiara Puspahati¹, Ireng Guntorojati², S.A. Kristiawan³, Senot Sangadji⁴

1 PENDAHULUAN

Bertambahnya masalah kemacetan pada kota-kota besar di Indonesia, khususnya Jakarta mendesak pengembangan sistem transportasi dan jaringan jalan secara berkelanjutan. Salah satu alternatif penambahan jalan di tengah tingginya biaya untuk pengadaan dan pembebasan lahan adalah dengan mengusahakan konstruksi jalan tol layang yang pembiayaannya merupakan kerjasama antara pemerintah dan investasi swasta. Sistem struktur jalan tol layang yang diusulkan, pada umumnya menggunakan sistem gelagar beton prategang di atas dua tumpuan sederhana yang ditumpu oleh rangkaian pilar tunggal pada arah longitudinal struktur. Lebar struktur jembatan mencapai 26,3 m, bentang jembatan bervariasi antara 30-40 m dan tinggi pier jembatan bervariasi antara 10-15 m.

Perencanaan struktur tersebut mengacu pada peraturan dan SNI yang berlaku di Indonesia, khusus untuk perencanaan gempa menggunakan RSNi 2833-201X – mengenai Perancangan Jembatan terhadap Beban Gempa. Perencanaan elemen-elemen struktur menggunakan peraturan gempa tersebut menghasilkan dimensi dan kebutuhan kapasitas struktur yang lebih besar daripada peraturan sebelumnya.

Pemeriksaan sistem struktur lebih detail terhadap pengaruh gempa dilakukan dengan melakukan analisis menggunakan metode Analisis Dinamik Bertahap / *Incremental Dynamic Analysis* (IDA). IDA merupakan metode analisis parameter terhadap performa struktur akibat gempa yang dilakukan untuk beberapa geometrik struktur. IDA dilakukan dengan analisis riwayat waktu dinamik non-linear (*non-linear time history analysis*) menggunakan tujuh set rekaman gempa yang masing-masing diskalakan terhadap beberapa level intensitas gempa. Kondisi performa struktur setelah gempa dipresentasikan pada kurva kerapuhan seismik untuk masing-masing geometri struktur yang ditinjau.

2 ASESMEN KERAPUHAN SEISMIK

2.1. Analisis Riwayat Waktu Dinamik Non-Linear dan Penentuan *Intensity Measure*

Asesmen kerapuhan seismik dari suatu struktur memerlukan analisis dinamik riwayat waktu non-linear yang dilakukan untuk mengidentifikasi tingkat kerusakan struktur akibat suatu riwayat waktu gempa tertentu. Sebelum analisis riwayat waktu, analisis beban gravitasi (beban mati dan sebagian beban hidup) sudah dilakukan terlebih dahulu. Permodelan sendi plastis pada ujung bawah pier dilakukan dengan menggunakan permodelan *fiber element* yang memungkinkan perilaku sendi plastis kolom termodelkan dan teramati.

Analisis riwayat waktu dilakukan menggunakan tujuh rekaman getaran tanah akibat gempa yang pernah terjadi di beberapa lokasi di dunia, dengan nilai puncak percepatan batuan dasar (PGA) yang berbeda-beda. Menurut Moridani¹, efisiensi IDA akan menjadi lebih baik bila menggunakan ukuran intensitas gempa (*intensity measure*) sesuai dengan spektra percepatan pada periode fundamental struktur 1 detik (S_a , $T_1=1$ det).

Sehingga nilai PGA dari getaran tanah yang digunakan akan dimodifikasi untuk menyesuaikan dengan $S_a(T_1)$.

Tabel 1 Rekaman getaran tanah untuk *Incremental Dynamic Analysis*

Getaran Tanah	Tahun	Stasiun	PGA	$S_a(T=1 \text{ det})$
			g	g
Kobe	1995	Kakogawa	0.345	0.511
Imperial Valley	1979	USGS Station 5115	0.3152	0.406
Landers	1992	000 SCE Station 24	0.7803	0.447
Loma Prieta	1989	090 CDMG Station 47381	0.3674	0.538
Northridge	1994	090 CDMG Station 24278	0.5683	0.695
Sumatera	2007	Sikuai Island	0.3397	0.205
Tohoku	2011	Seismological Training Laboratory, BRI	0.3400	0.514

2.2 Ukuran Kerusakan (*Damage Measure*)

Suatu tahapan yang penting dari analisis kerapuhan struktur yaitu dengan menetapkan tingkat kerusakan struktur berdasarkan suatu ukuran kerusakan. Salah satu ukuran kerusakan atau *damage measure* adalah perpindahan. Perpindahan struktur merupakan kriteria yang tepat untuk digunakan dalam mendefinisikan level kerusakan dan performa struktur terhadap gempa. Level kriteria kerusakan dapat diadaptasi dari HAZUS MR4 *technical manual* dengan empat level kerusakan yaitu *slight*, *moderate*, *extensive* dan *complete* yang dideskripsikan pada Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2 Batasan level kerusakan jembatan berdasarkan HAZUS

Level	Deskripsi
Slight	Retak dan pecah minor terjadi pada sendi plastis kolom, perlu perbaikan ringan (non struktural)
Moderate	Kolom mengalami sedikit retak akibat kegagalan geser
Extensive	Kolom mengalami penurunan kekuatan dan hampir runtuh, telah terjadi kegagalan akibat geser
Complete	Kolom runtuh total

2.3 Fungsi Kurva Kerapuhan

Kurva kerapuhan seismik struktur dapat dibentuk dengan menggunakan fungsi persamaan probabilitas untuk menggambarkan kemungkinan suatu intensitas gempa menyebabkan kerusakan pada struktur. Suatu fungsi probabilitas

kerusakan struktur terlampaui dikemukakan dalam penelitian Frankie tahun 2010 sebagai berikut.

$$P(\text{Exceedence } s_i | IM) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{tot}} \ln \left(\frac{IM}{LS_i} \right) \right] \quad (1)$$

dimana IM = ukuran intensitas gempa ; LS_i = batasan level kerusakan dan β_{tot} = parameter ketidakpastian

2.4 Parameter Ketidakpastian

Dispersi (β) dari kurva kerapuhan didapatkan secara eksplisit dari analisis dalam mengestimasi ukuran kerusakan struktur untuk nilai intensitas tertentu dan ketidakpastian dari kapasitas struktur. Frankie (2010) mendeskripsikan parameter ketidakpastian (β_{tot}) dari *demand* dan *capacity* dalam persamaan (2).

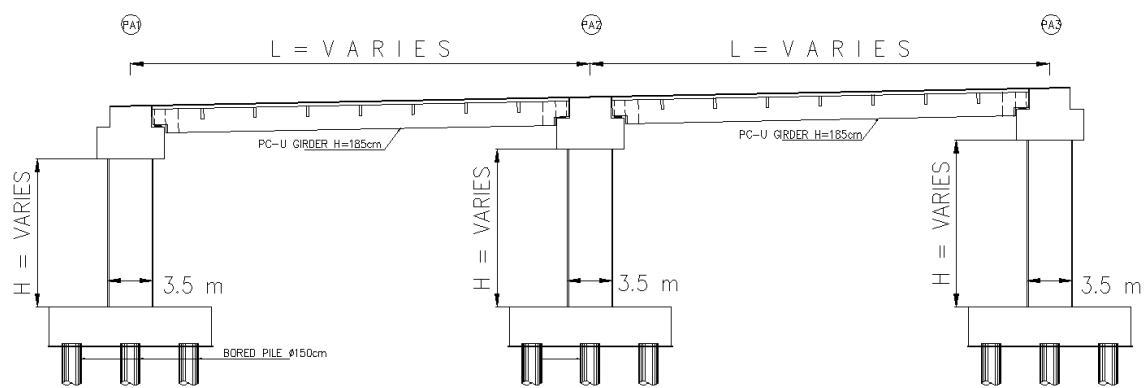
$$\beta_{tot} = \sqrt{[(CONV[\beta_C, \beta_D])_i]^2 + [(\beta_{LS})_i]^2} \quad (2)$$

dimana $\beta_{LSi} = 0.4$ dari HAZUS ; β_C = dispersi dari hasil analisis kapasitas struktur; dan $\beta_D = 0.45$ untuk periode pendek dan 0.5 untuk periode panjang (HAZUS).

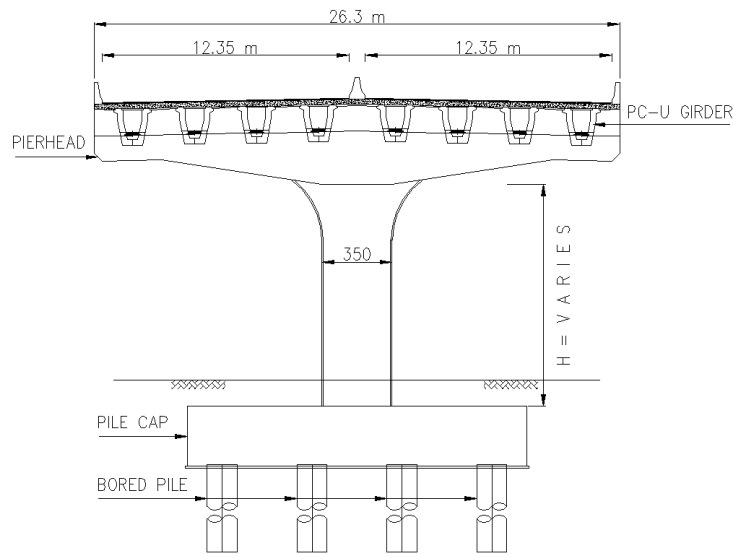
3 METODOLOGI

3.1. Model Struktur

Model sistem struktur jembatan yang digunakan mengacu pada rencana awal sistem struktur tipikal yang digunakan pada perencanaan Tol Layang Dalam Kota Jakarta seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



(a)



(b)

Gambar 1 Model sistem struktur pada perencanaan Tol Layang Dalam Kota Jakarta
(a) potongan memanjang, (b) potongan melintang.

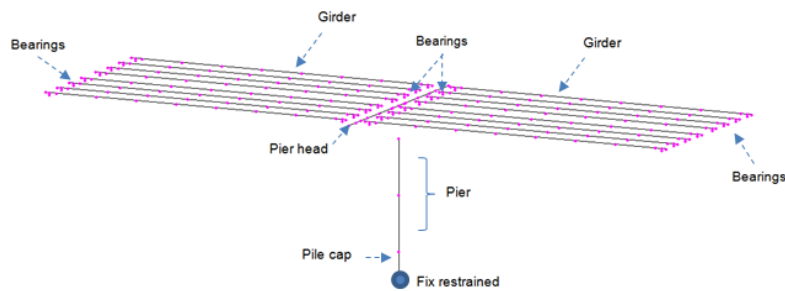
Perencanaan berdasarkan RSNI 2833-201X namun menggunakan peta gempa dengan periode ulang 500 tahun, menghasilkan desain pier jembatan dengan dimensi 3,5 m x 3,5 m dengan rasio tulangan longitudinal 1.0% dan detail tulangan pengekang yang cukup untuk memastikan perilaku non-linear dan sendi plastis pada pier bisa terbentuk pada saat kondisi gempa. Periode fundamental struktur yang diperoleh $T = 1$ detik dan rasio redaman kritis diasumsikan 5% untuk struktur beton .

Analisis IDA dilakukan pada beberapa variasi geometri struktur yaitu panjang bentang jembatan (L) dan tinggi pier jembatan (H). Total enam sistem struktur dengan variasi L dan H dipilih untuk dievaluasi respon kerapuhan gempanya. Variasi geometrik model yang dianalisis dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 3 Variasi model struktur

Kode Model	Panjang (L)	Tinggi Pier (H)
	m	m
L30	30	13
L35	35	13
L40	40	13
H10	35	10
H13	35	13
H16	35	16

Pemodelan struktur dilakukan dengan properti seperti pada Tabel 4. Tujuh set variasi rekaman getaran tanah yang diskalakan dengan faktor pengali antara 0.4 hingga 15 dibebankan pada struktur pada arah longitudinal sebagai tinjauan kritis perpindahan struktur jembatan.



Gambar 2 Model numerik sistem struktur jembatan single pier – simple support

Tabel 4 Data properti struktur untuk pemodelan

Elemen		
Kolom	Single pier 3.5 m x 3.5 m	
Pile Cap	12.5 m x 12.5 m	
Girder	8 buah Prestressed PCU Girder lebar 1.9 m	
Perletakan Girder	hinge - rol - hinge - rol	
Material		
Concrete	Pier & Pile cap	$f_c' = 30 \text{ MPa}$
	Girder	$f_c' = 50 \text{ MPa}$
	Pier Head	$f_c' = 34 \text{ MPa}$
Reinforcing Steel	$F_y = 390 \text{ MPa}$	

3.2. Pembuatan Kurva Kerapuhan Struktur

Kurva fragilitas struktur dapat dibentuk setelah hasil IDA didapatkan dan seluruh parameter ketidakpastian serta batasan level kerusakan ditentukan. Berdasarkan HAZUS MR4 *Technical Manual*, batasan level kerusakan ditentukan secara empirik untuk beberapa klasifikasi struktur jembatan. Sistem struktur yang digunakan dalam analisis ini termasuk ke dalam kelas tipe struktur Highway Bridge 17 yang dideskripsikan sebagai struktur multi-kolom, simple supported – prestressed concrete. Setelah menentukan kelas dari sistem struktur, maka batasan level kerusakan dapat diambil dari Tabel 7.7 di dalam HAZUS MR4 *Technical Manual* dan dimodifikasi sesuai dengan variasi properti dan geometri struktur. Batasan level kerusakan ini ditentukan dalam ukuran spektral percepatan struktur pada periode 1 detik, $S_a(T_1)$, seperti dapat dilihat pada Tabel 5 berikut ini.

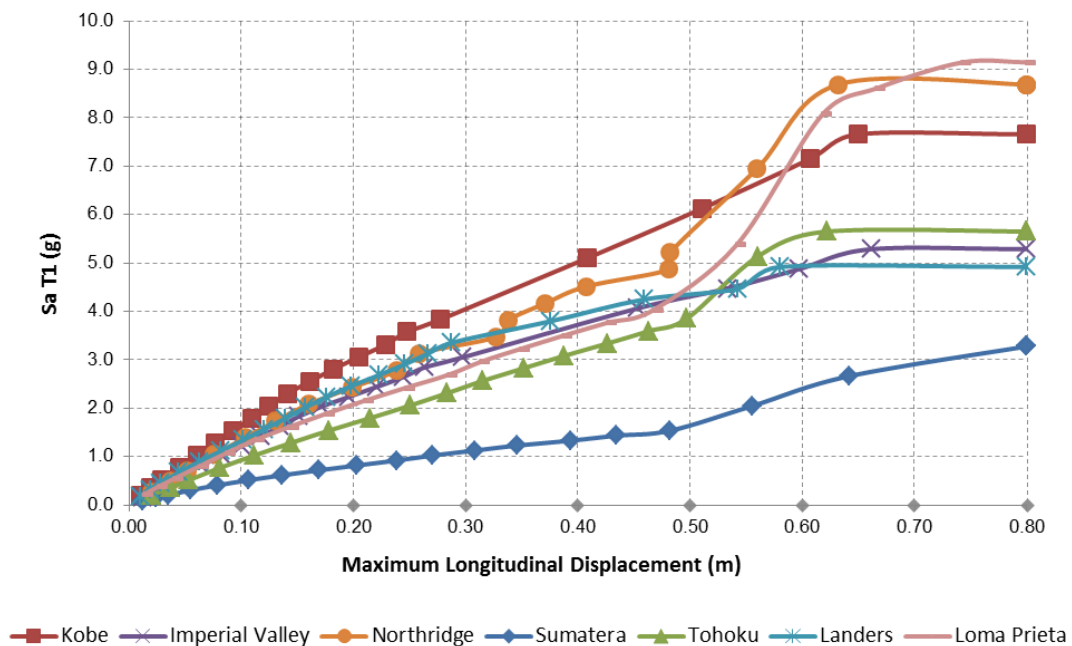
Tabel 5 Batasan level kerusakan untuk analisis

Ukuran	Level			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
Sa (T1) HAZUS	0.25	0.35	0.45	0.70
Sa (T1) termodifikasi	0.25	0.4375	0.5625	0.8750

4 HASIL ANALISIS

4.1. Variasi Geometri Struktur

Incremental Dynamic Analysis yang dilakukan pada keenam model struktur menghasilkan gambaran respon dan kapasitas dari struktur yang selanjutnya dapat digunakan untuk membentuk kurva kerapuhan struktur sebagai metode dalam asesmen kerapuhan seismik. Hasil IDA menggunakan 7 set rekaman getaran tanah dapat dicermati pada Gambar 3 untuk model L40.

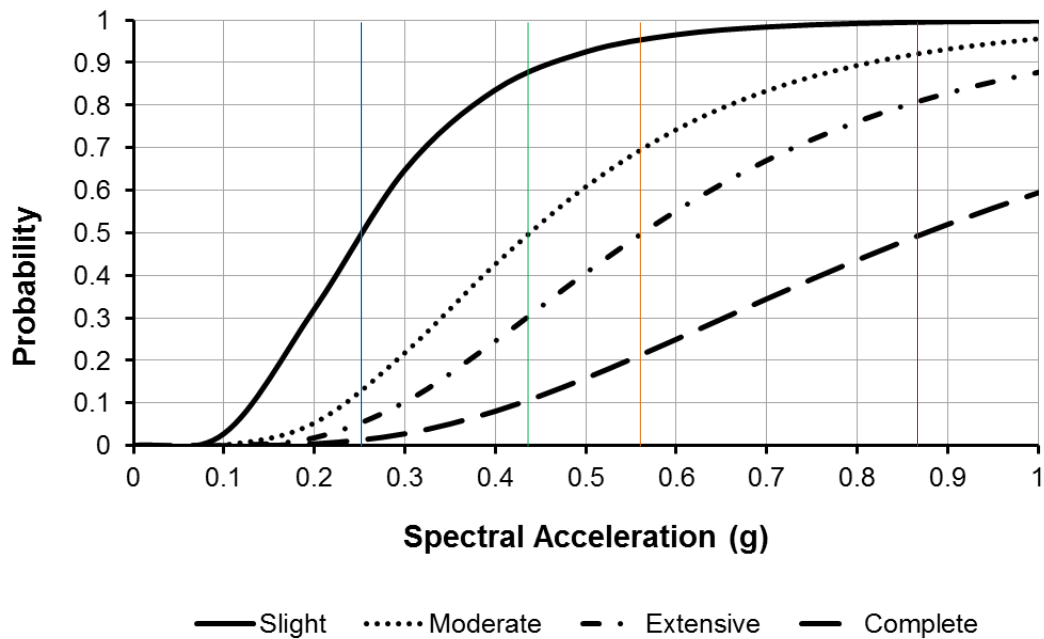


Gambar 3 Perpindahan Longitudinal Maksimum untuk masing-masing rekaman getaran tanah pada level spektral percepatan yang berbeda untuk L40

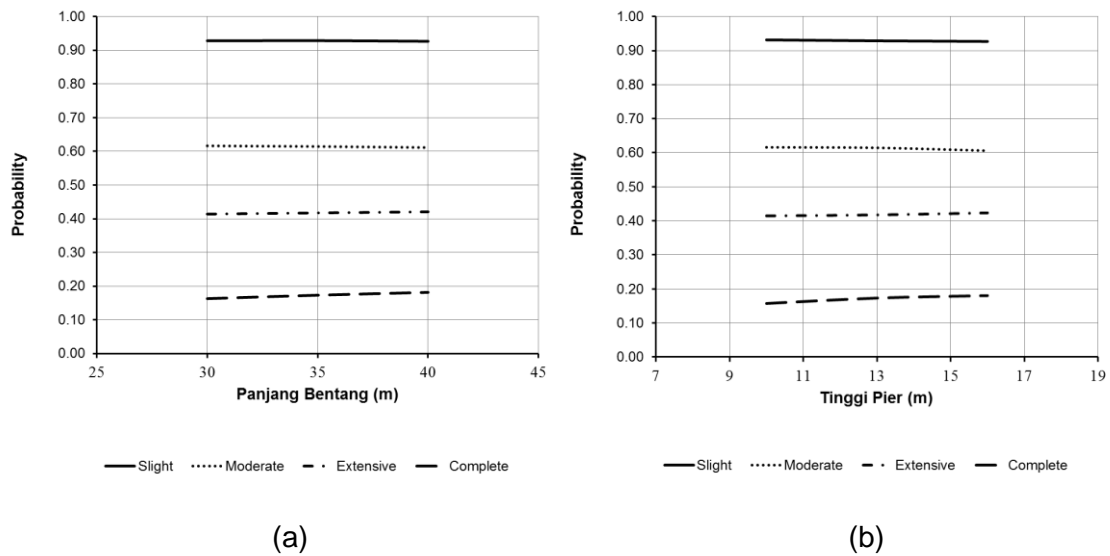
Hasil analisis yang dilakukan pada keenam model lebih lanjut diolah untuk mendapatkan nilai dispersi dari kapasitas masing-masing struktur. Perbedaan geometri struktur menghasilkan nilai dispersi yang berbeda pula. Nilai dispersi dari keenam model dapat dilihat pada Tabel 6 dan kurva kerapuhan struktur dapat dibentuk pada langkah terakhir dari IDA dengan menggunakan persamaan (1) dengan hasil seperti pada Gambar 4 di bawah ini.

Tabel 6 β (dispersi kapasitas struktur) dari masing-masing model

Kode Model	β			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
L30	0.4804	0.4845	0.4954	0.5594
L35	0.4792	0.4924	0.5170	0.5836
L40	0.4840	0.5069	0.5379	0.6042
H10	0.4725	0.4861	0.5000	0.5467
H13	0.4792	0.4924	0.5170	0.5836
H16	0.4837	0.5336	0.5587	0.6013
Bc rata-rata	0.4798	0.4993	0.5210	0.5798



Gambar 4 Kurva kerapuhan struktur dengan berbagai level kriteria kerusakan



Gambar 5 Perbandingan probabilitas kerusakan struktur pada empat level kriteria kerusakan terhadap $S_a (T1) = 0.505 \text{ g}$ (gempa 500 tahun RSNI 2833-201X) terhadap variasi geometri struktur a) panjang bentang (b) tinggi pier

4.2. Tinjauan Kerapuhan Struktur terhadap RSNI 2833-201X

Menurut RSNI 2833-201X, spektra percepatan teramplifikasi untuk periode 1 detik ($S_a T1$) dengan asumsi lokasi struktur di Jakarta Utara dan kondisi tanah lunak adalah 0.797 g untuk gempa dengan periode ulang 1000 tahun dan 0.502 g untuk periode ulang 500 tahun. Berdasarkan peraturan tersebut, performa jembatan terhadap gempa desain pada level kinerja keselamatan/*life safety* yaitu jembatan diizinkan untuk mengalami kerusakan tetapi tidak boleh runtuh. Dalam hal ini berdasarkan kriteria kerusakan HAZUS, dikategorikan dalam kerusakan *extensive damage*.

Dari kurva kerapuhan yang diperoleh terhadap berbagai variasi bentang (L) dan tinggi pier (H), dapat diperoleh nilai probabilitas kerapuhan struktur untuk masing-masing kriteria kerusakan tertera pada Tabel 7.

Tabel 7 Probabilitas kerapuhan struktur

Sa (T1)	Rata-rata probabilitas terlampaui	
	Level Extensive	Level Complete
1000 tahun 0.797 g	74.98 %	43.60 %
500 tahun 0.502 g	41.74 %	17.16 %

Tabel di atas menunjukkan bahwa akibat gempa dengan periode ulang 1000 tahun struktur yang dianalisis memiliki probabilitas terlampaui kriteria extensive sangat tinggi dan performa struktur sudah mendekati ke arah complete damage. Sedangkan untuk

gempa dengan periode ulang 500 tahun, probabilitas terlampaui kriteria extensive mendekati 50% dan probabilitas kriteria complete damage masih relatif kecil.

5 KESIMPULAN

Kurva kerapuhan yang diperoleh dari asesmen ini terhadap variasi geometri struktur menunjukkan bahwa pengaruh panjang bentang tidak sensitif terhadap performa struktur jembatan akibat gempa, sedangkan pengaruh tinggi pier lebih sensitif khususnya pada level *extensive* dan *complete damage*.

Terhadap probabilitas untuk level kriteria kerusakan yang digunakan, desain struktur pier yang dianalisis tidak sesuai untuk perencanaan dengan RSNi 2833-201X menggunakan gempa periode ulang 1000 tahun, namun masih bisa digunakan untuk gempa dengan periode ulang 500 tahun.

6 UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Wiratman dan Prof. DR. Ir. Iratman Wangsadinata atas dukungan dan bantuannya untuk bisa menyelesaikan tulisan ini.

7 DAFTAR PUSTAKA

- Applied Technology Council (ATC). 1996. *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Rep. ATC-40. Redwood City, CA: Applied Technology Council.
- Bakhshi, A. & Asadi, P. 2013. Probabilistic evaluation of seismic design parameters of RC frames based on fragility curve. *Scientia Iranica Transaction A: Civil Engineering*, 20(2): 231-241.
- Bilgin, H. 2013. Fragility-based assessment of public buildings, *Engineering Structures*, 56: 1283-1294.
- FEMA. 2003. *HAZUS-MH MR4 Technical Manual*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. 2010. *HAZUS-MH MR5 Advanced Engineering Building Module (AEBM)*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- Frankie, T.M. 2010. *Simulation-based Fragility Relationships for Unreinforced Masonry Buildings*. M.S. thesis. Urbana, IL: Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.
- Mackie, K. & Stojadivonic, B. 2004. Fragility Curves for Reinforced Concrete Highway Overpass Bridges.. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Paper No. 1553.
- Mackie, K. & Stojadivonic, B. 2007. Integrated Probabilistic Performance-Based Evaluation of Benchmark Reinforced Concrete Bridges. Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley.
- Papailia, A. 2011. *Seismic Fragility Curves for Reinforced Concrete Buildings*. M.S. thesis. Patra: University of Patras.
- Pitilakis, K et al. 2014. *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Element at Seismic Risk*. Springer.