

ANALISIS DINAMIK RIWAYAT WAKTU NONLINIER SKEW BRIDGE

Zainal Abidin ¹⁾, Senot Sangadji ²⁾, Agus Supriyadi ³⁾

¹⁾Mahasiswa Fakultas Teknik, Program Studi Teknik sipil, Universitas Sebelas Maret

²⁾ Pengajar Fakultas Teknik, Program Studi Teknik sipil, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126; Telp 0271-634524. Email: zainalchaneman@gmail.com

Abstract

Skew bridge is a bridge that has a sloping angle that formed between the centerline of the bridge and the centerline of abutment or pier. The potential of the emergence of a large earthquake in Indonesia causes the skew bridge must also have good resistance to the earthquake. When a large earthquake occurs, some structural material has undergone plastification causing the structure to behave nonlinearly, thus a nonlinear dynamic analysis is performed in this study. Skew bridge used in this study refers to 2 main spans of the Solo Kertosono toll road bridge sta 108 + 666 in Madiun. In this study 3 earthquake records were used in analysis, with all of them will be adapted to spectrum earthquake of bridge area. Nonlinear analysis is done by analyzing the stiffness and condition of the bridge pillar structure at each loading cycle based on the result of hysteretic response curve. The results showed that all earthquake records resulted displacement response having a drift ratio of less than 0,5%. Nonlinearity analysis result showed that nonlinearity of all earthquake records started in cycle 2 and the main cause was cracking on concrete.

Keywords : *Skew bridge, Spectra response, Time history, Nonlinear response*

Abstrak

Skew bridge adalah jembatan yang memiliki sudut miring yang terbentuk antara garis tengah jembatan dan garis tengah penumpu abutment atau pier. Potensi munculnya gempa bumi yang besar di Indonesia menyebabkan *skew bridge* juga harus memiliki ketahanan yang baik terhadap gempa. Saat terjadi gempa besar, sebagian material struktur telah mengalami plastifikasi yang menyebabkan struktur berperilaku nonlinier, dengan begitu analisis dinamik nonlinier dilakukan pada penelitian ini. *Skew bridge* yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada 2 bentang utama jembatan jalan tol Solo Kertosono sta 108+666 di kota Madiun. Pada penelitian ini 3 rekaman gempa digunakan dalam analisis, dengan keseluruhan rekaman gempa disesuaikan dengan spektrum gempa daerah jembatan. Analisis nonlinier dilakukan dengan menganalisis nilai kekakuan dan kondisi struktur pilar jembatan pada setiap siklus pembebanan berdasarkan hasil kurva respon histeretik. Hasil analisis respon struktur menunjukkan semua rekaman gempa menghasilkan nilai *drift ratio* kurang dari 0,5%. Hasil analisis nonlinier menunjukkan terjadinya nonlinieritas semua rekaman gempa pada siklus ke-2 dan penyebabnya adalah *cracking* pada beton.

Kata kunci : *Skew bridge, Respon spektra, Riwayat waktu, Respon nonlinier*

PENDAHULUAN

Salah satu jenis jembatan yang kerap dibangun oleh para insinyur adalah *skew bridge*. *Skew bridge* seringkali dibangun pada kondisi-kondisi tertentu yang dapat berupa faktor geografis lokasi atau bentuk rintangan yang harus dilewati oleh jembatan. Sering kali para insinyur mendesain jembatan *skew bridge* di kota-kota besar yang memiliki tingkat kepadatan penduduk yang tinggi dan ruang yang terbatas.

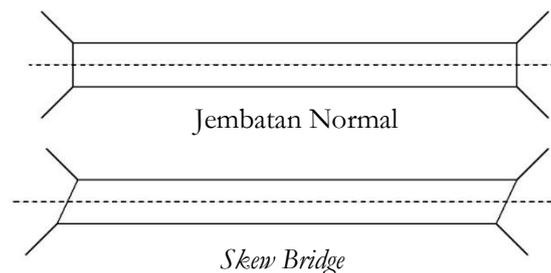
Salah satu kendala pada struktur jembatan adalah gempa bumi. Wilayah Indonesia sendiri merupakan wilayah yang rawan terjadi gempa bumi. Tingginya potensi gempa bumi disebabkan letak geografis Indonesia yang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Eurasia, Pasifik, dan Indo-Australia. Dalam 5 tahun terakhir telah tercatat berbagai aktifitas gempa besar di Indonesia, yaitu gempa Sumatera (8,5 SR) tahun 2012, gempa Aceh (6,2 SR) tahun 2013, gempa Mentawai (8,3 SR) dan gempa Pidie Jaya (6,5 SR) tahun 2016. Gempa-gempa tersebut telah menyebabkan ribuan korban jiwa, kerusakan serta keruntuhan infrastruktur dan bangunan.

Beberapa peneliti menyimpulkan bahwa analisis linier tidak dapat digunakan untuk mengetahui perilaku struktur terhadap gempa besar, karena pada dasarnya saat terjadi gempa besar telah terjadi deformasi plastis pada material struktur, sehingga bangunan tidak lagi berperilaku linier akan tetapi berperilaku nonlinier. Oleh karena itu, analisis dinamik nonlinier diperlukan untuk mengetahui perilaku struktur saat mengalami gempa besar.

DASAR TEORI

Pengertian dan Karakteristik *Skew Bridge*

Skew bridge adalah jembatan yang memiliki karakteristik khas yaitu sudut kemiringannya. Sudut kemiringan *skew bridge* adalah sudut miring yang terbentuk antara garis tengah jembatan dan garis tengah elemen penumpu *abutment* atau *pier*. Ilustrasi perbedaan jembatan normal dan jembatan *skew bridge* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Perbedaan Bentuk Jembatan Normal dan *Skew Bridge*

Berikut beberapa karakteristik *skew bridge* :

1. Adanya variasi momen yang terjadi pada struktur jembatan.
2. Adanya gaya torsi yang besar pada seluruh bagian slab jembatan.
3. Terjadinya momen lentur dan gaya geser yang besar pada slab, terutama pada bagian ujung yang tumpul.
4. Adanya reaksi yang rendah pada bagian ujung lancip slab jembatan, sehingga memungkinkan adanya pengangkatan pada bagian tersebut.
5. Adanya perbedaan nilai defleksi yang tinggi pada slab akibat adanya perbedaan gaya dan reaksi yang terjadi pada bagian lancip dan tumpul.

Analisis Respon Spektra

Definisi respon spektra adalah respon maksimum dari suatu sistem struktur *Single Degree of Freedom (SDOF)* baik percepatan, kecepatan dan perpindahan dengan struktur tersebut dibebani dengan gaya luar tertentu. Absis dari respon spektra adalah periode alami sistem struktur dan ordinat dari respon spektra adalah respon maksimum. Kurva respon spektra akan memperlihatkan Simpangan relatif maksimum (S_d), kecepatan relatif maksimum (S_v) dan percepatan total maksimum (S_a).

Analisis Riwayat Waktu

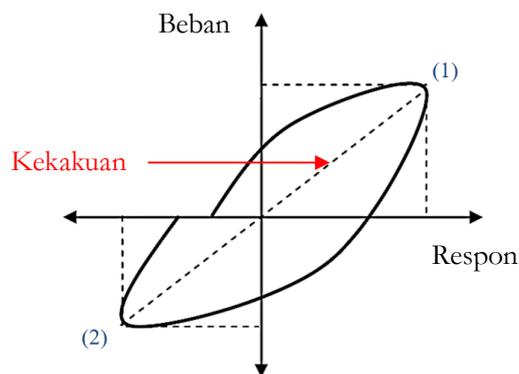
Menurut SNI 2833:2008 mengenai standar perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan, metode analisis riwayat waktu memerlukan data gempa besar tipikal yang umumnya terjadi di luar lokasi jembatan. Gerakan gempa masukan berupa gelombang akselerasi dengan amplitudo yang dimodifikasi berdasarkan wilayah frekuensi (*Frequency Zone*), sehingga sesuai akselerasi standar respon spektra. Gempa tipikal harus dipilih berdasarkan kondisi tanah dan topografi yang serupa dengan lokasi jembatan, sehingga dapat dilakukan modifikasi amplitudo. Dalam analisis ini, paling sedikit tiga data *ground motion* yang harus digunakan.

Analisis Respon Nonlinier Struktur

Pada dasarnya saat terjadi gempa besar pada struktur terjadi plastifikasi di beberapa bagian struktur, sehingga bangunan tidak lagi berperilaku linier akan tetapi berperilaku nonlinier. Pengetahuan mengenai data properti bahan struktur merupakan persyaratan utama untuk analisis respon nonlinier. Pada umumnya, bahan struktur seperti beton dan baja memiliki 2 daerah pada diagram tegangan-regangannya, yaitu daerah elastis dimana bahan berkelakuan secara linier, dan daerah plastis dimana bahan berkelakuan secara nonlinier.

Analisis Kekakuan pada Respon Histeretik

Pada setiap siklus pembebanan dapat diidentifikasi nilai kekakuan material struktur berdasarkan kurva histeretik respon yang terbentuk. Siklus pembebanan yaitu saat dimana beban berawal dari tidak ada atau nol lalu bertambah ke arah positif atau negatif sampai titik maksimum, lalu kembali lagi ke arah sebaliknya sampai titik maksimum. Nilai kekakuan ditetapkan sebagai kemiringan garis yang menghubungkan puncak-puncak beban maksimum arah positif dan negatif dari setiap siklus kurva beban dan respon struktur seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Kekakuan pada Siklus Kurva Respon Histeretik

Degradasi Kekakuan dan Kekuatan

Degradasi kekuatan struktur secara umum terjadi apabila struktur telah mengalami retak atau *cracking* pada beton dan leleh pada baja tulangan akibat deformasi yang cukup besar. Kondisi *cracking* pada beton menyebabkan momen inersia penampang berkurang sehingga nilai kekakuan tereduksi. Saat terjadi degradasi kekuatan dan kekakuan kekuatan struktur tidak mampu menjadi tinggi kembali seperti semula, karena deformasi permanen telah terjadi pada beton maupun baja tulangan. Oleh karena itu, analisis degradasi kekuatan dan kekakuan struktur menjadi signifikan untuk struktur tahan gempa.

METODE

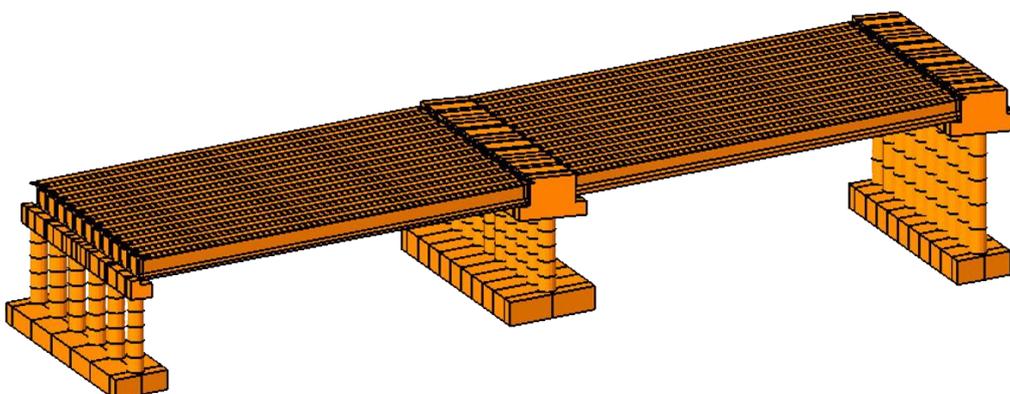
Pemodelan Jembatan

Metode penelitian diawali dengan membuat pemodelan 3 dimensi struktur jembatan *skew bridge* yang mengacu pada 2 bentang utama jembatan jalan tol Solo Kertosono sta 108+666 di kota Madiun. Jembatan tersebut memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 1 Deskripsi Jembatan

Deskripsi Jembatan	Keterangan
Jenis Jembatan	Jembatan sungai
Struktur Jembatan	Jembatan beton
Konfigurasi Bentang	30-40 m
Tinggi Jembatan	10 m
Lebar Jembatan	2 x 12,1 m
Sudut Kemiringan	16°

Pemodelan struktur jembatan mencakup bagian *pier*, *pier head*, pondasi, *bearing pad* dan diafragma jembatan. Berikut pemodelan jembatan nya:



Gambar 3 Pemodelan Jembatan

Mutu beton yang digunakan adalah $f_c' 30 \text{ MPa}$ dan $f_c' 40 \text{ MPa}$. Untuk pier, pier head, pondasi, dan diafragma jembatan menggunakan beton mutu $f_c' 30 \text{ MPa}$, sedangkan girder jembatan menggunakan beton mutu $f_c' 40 \text{ MPa}$. Mutu baja tulangan yang digunakan $f_y 240 \text{ MPa}$, dengan modulus elastisitas E_s sebesar 200.000 MPa .

Analisis Pembebanan

Setelah pemodelan selesai dilakukan maka selanjutnya dilakukan analisis pembebanan yang terdiri dari beban statis dan beban dinamis. Beban statis terdiri dari beban jembatan sendiri, beban mati dan beban berjalan. Beban mati terdiri dari beban plat, beban lapis *overlay* atau aspal, beban *barrier* tengah dan beban *barrier* pinggir. Beban berjalan terdiri dari beban lajur (*lane load*) dan beban kendaraan (*truck load*). Beban dinamis menggunakan beban gempa yang dianalisis dengan metode analisis dinamik riwayat waktu.

Beban mati dan beban berjalan ditambahkan ke dalam pemodelan jembatan. Beban mati mewakili beban yang memberikan berat tambahan kepada struktur jembatan. Beban mati yang bekerja yaitu : beban plat (528 kg/m^2), beban aspal (638 kg/m^2), beban *barrier* tengah ($1195,8 \text{ kg/m}$), dan beban *barrier* pinggir ($938,4 \text{ kg/m}$). Beban berjalan mewakili beban lalu lintas yang terdiri dari beban lajur dan beban kendaraan. Beban berjalan yang bekerja yaitu : beban terbagi rata ($47,25 \text{ kN/m}$), beban garis ($176,4 \text{ kN/m}$), dan beban truk yang dibagi menjadi 3 sumbu dengan berat sebesar 50 kN , 225 kN dan 225 kN .

Analisis Dinamik Riwayat Waktu

Tahapan analisis dinamik riwayat waktu dibagi menjadi 2 tahap yaitu tahap analisis respon spektra dan tahap analisis riwayat waktu. Prosedur penyusunan target respon spektra berdasarkan peraturan SNI 1726:2012 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung oleh Badan Standarisasi Nasional Indonesia. Metode analisis riwayat waktu dilakukan dengan menganalisis potensi gempa lokasi struktur jembatan berdasarkan data respons spektra lokasi dan data gempa yang sudah terjadi. Analisis dinamik riwayat waktu ini menggunakan 3 rekaman gempa sebagai berikut :

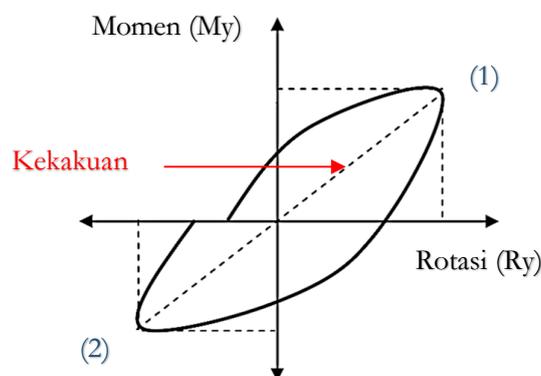
Tabel 2 Rekaman Gempa yang Digunakan

No	Event	Stasiun	Tahun	SR
1	Park Field	Cholame - Shandon Array #12	1966	6,19
2	San Fernando	Pacoima Dam	1971	6,61
3	Kobe	Osaka Bay	1995	7,30

Analisis Respon Nonlinier

Hasil analisis pada penelitian ini berupa respon struktur jembatan berdasarkan nilai *displacement*, *velocity*, dan *acceleration* pada arah longitudinal-transversal, serta respon histeretik salah satu pilar jembatan pada arah transversal. Analisis nonlinier dilakukan dengan menganalisis nilai kekakuan dan kondisi struktur pilar setiap siklus pembebanan berdasarkan hasil kurva respon histeretik dengan skala asli dan skala 2 kali gempa. Kondisi struktur pilar dianalisis apakah dalam kondisi *elastic* (elastis), *crack* (retak), *yield* (leleh), atau *crush* (patah). Nilai kekakuan dihitung berdasarkan Persamaan 1 dengan ilustrasi pada Gambar 4 di bawah.

$$k = \frac{M_y (1) + | M_y (2) |}{R_y (1) + | R_y (2) |} \dots\dots\dots 1$$

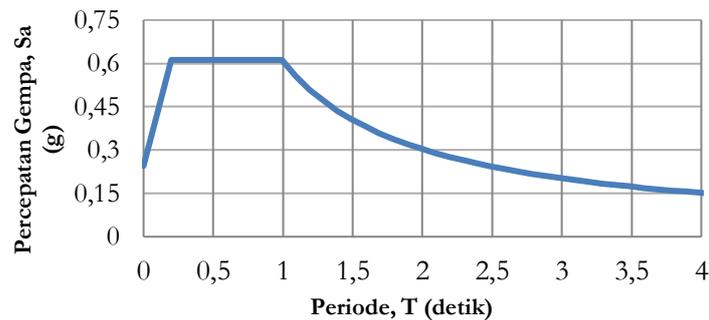


Gambar 4 Penentuan Nilai Kekakuan pada Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Respon Spektra

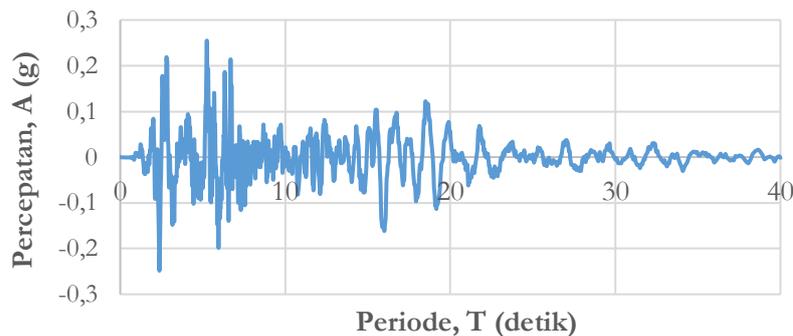
Dari SNI 1726:2012 didapatkan nilai parameter $S_S = 0,85$ dan $S_1 = 0,35$ g. Dari hasil tersebut berdasarkan Tabel 4 dan Tabel 5 SNI 1726:2012 didapatkan nilai parameter $F_a = 1,08$ dan $F_v = 2,60$. Selanjutnya dapat ditentukan nilai-nilai parameter spektrum berikutnya, sehingga berdasarkan SNI 1726:2012 didapatkan respon spektra:



Gambar 5 Respon Spektra Lokasi Jembatan

Hasil Analisis Riwayat Waktu

Setelah didapatkan data spektrum lokasi jembatan maka dilakukan analisis riwayat waktu dengan menggunakan 3 (tiga) rekaman gempa yang diambil rentang 10 detik dengan kapasitas gempa terbesar. Didapatkan nilai periode getar alami struktur arah longitudinal (sumbu x) sebesar 1,1885 detik dan arah transversal (sumbu y) sebesar 0,3559 detik. Data *ground motion records* yang digunakan didapatkan dari PEER dan BRI berupa data akselerogram yang mengandung nilai percepatan (A) dalam satuan g (*Gravity*) pada satuan waktu 0,01 detik. Berikut contoh grafik data *ground motion records* :



Gambar 6 *Ground Motion Records* Gempa Park Field arah Longitudinal

Data *ground motion records* perlu diubah dalam bentuk data spektrum. Proses perubahan data gempa dari data akselerogram ke data spektrum dilakukan menggunakan metode *amplitude scaling* sesuai peraturan ASCE 7-10. Metode ini menggunakan program komputer yaitu Seismosignal dari perusahaan Seismosoft. Proses perubahan membutuhkan nilai parameter *scale factor* (SF). Nilai *scale factor* (SF) dihitung menggunakan rumus Kalkan dan Chopra yang dapat dilihat pada Persamaan 2. Untuk menjalankan rumus tersebut perlu ditentukan rentang periode antara $0,2 T-1,5 T$, dimana T adalah periode getar alami struktur.

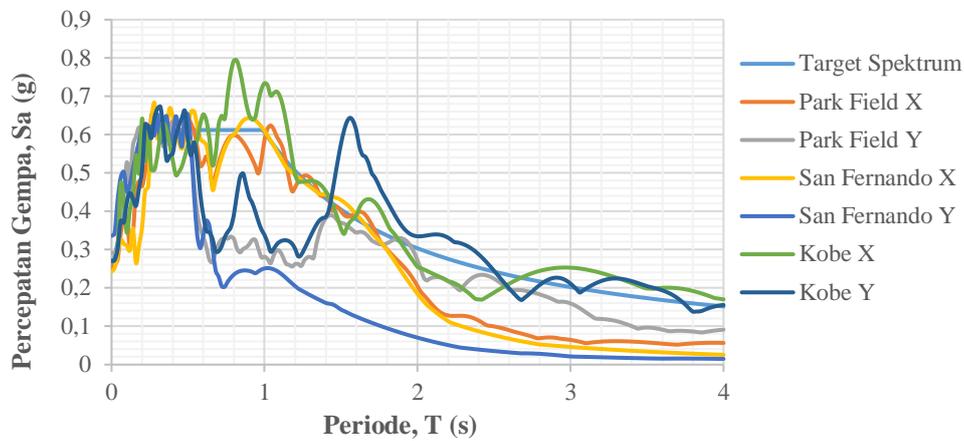
$$SF = \frac{\sum_{i=1}^n A_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i A_i} \dots\dots\dots 2$$

SF adalah nilai *scale factor* (SF), A_i adalah *Spektral Acceleration Target Respon Spectrum* pada Periode ke-i, dan A_i adalah *Spektral Acceleration Respon Spectrum* yang akan di Skala pada Periode ke-i. Dari hasil perhitungan didapatkan nilai *scale factor* (SF) sebagai berikut :

Tabel 3 Nilai *Scale Factor* (SF)

Gempa	<i>Scale Factor</i> (SF)	
	Longitudinal	Transversal
Park Field	2,4225	4,4408
San Fernando	0,0765	0,3105
Kobe	3,2991	3,2019

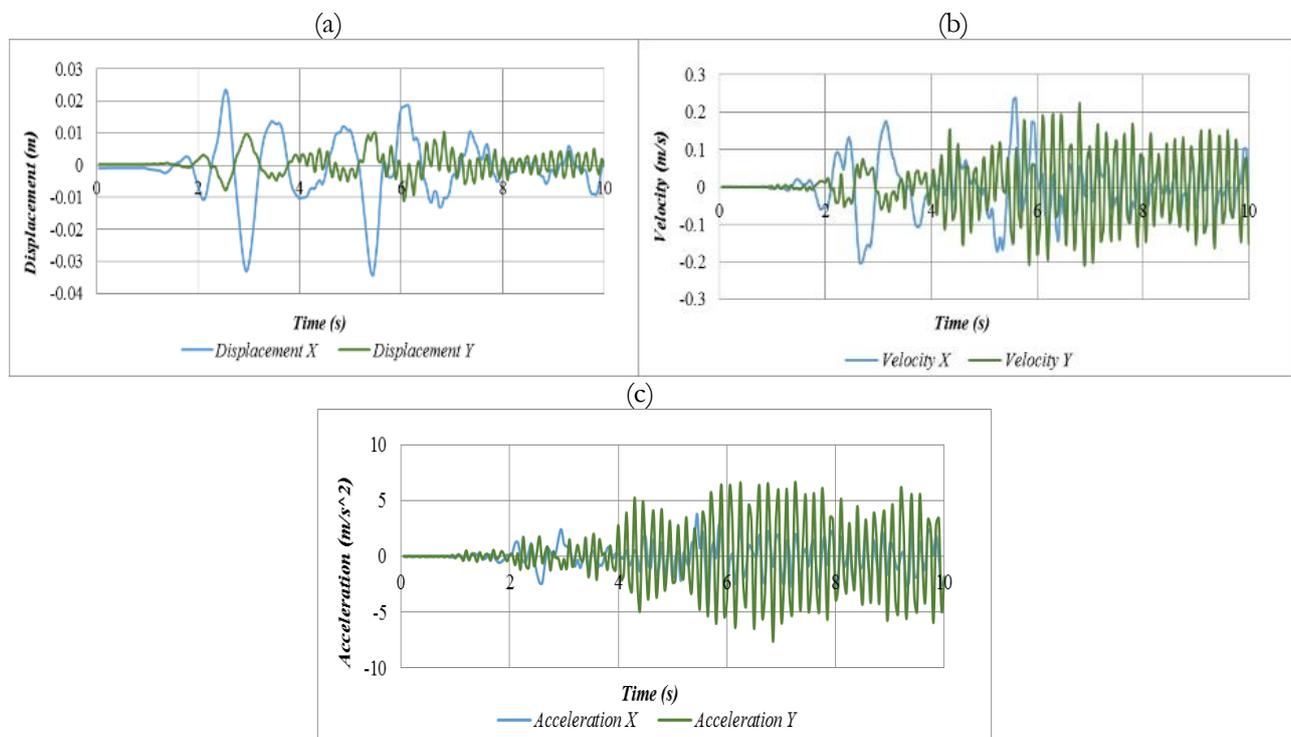
Hasil nilai rentang periode $0,2 T - 1,5 T$ dan hasil nilai *scale factor* (SF) masing-masing rekaman gempa di atas digunakan pada proses selanjutnya. Langkah selanjutnya yaitu menyesuaikan data rekaman gempa dengan target respon spektra menggunakan metode *spektrum matching*. Metode ini mengkombinasikan metode *amplitude scaling* dengan memodifikasi konten frekuensi data rekaman gempa. Proses penyesuaian data rekaman gempa menggunakan program komputer Seismomatch dari perusahaan Seismosoft. Hasil proses penyesuaian data rekaman ketiga gempa dapat dilihat pada Gambar 7 di bawah.



Gambar 7 Data Spektrum Gempa Sesudah Proses *Matching*

Hasil Analisis Respon Struktur

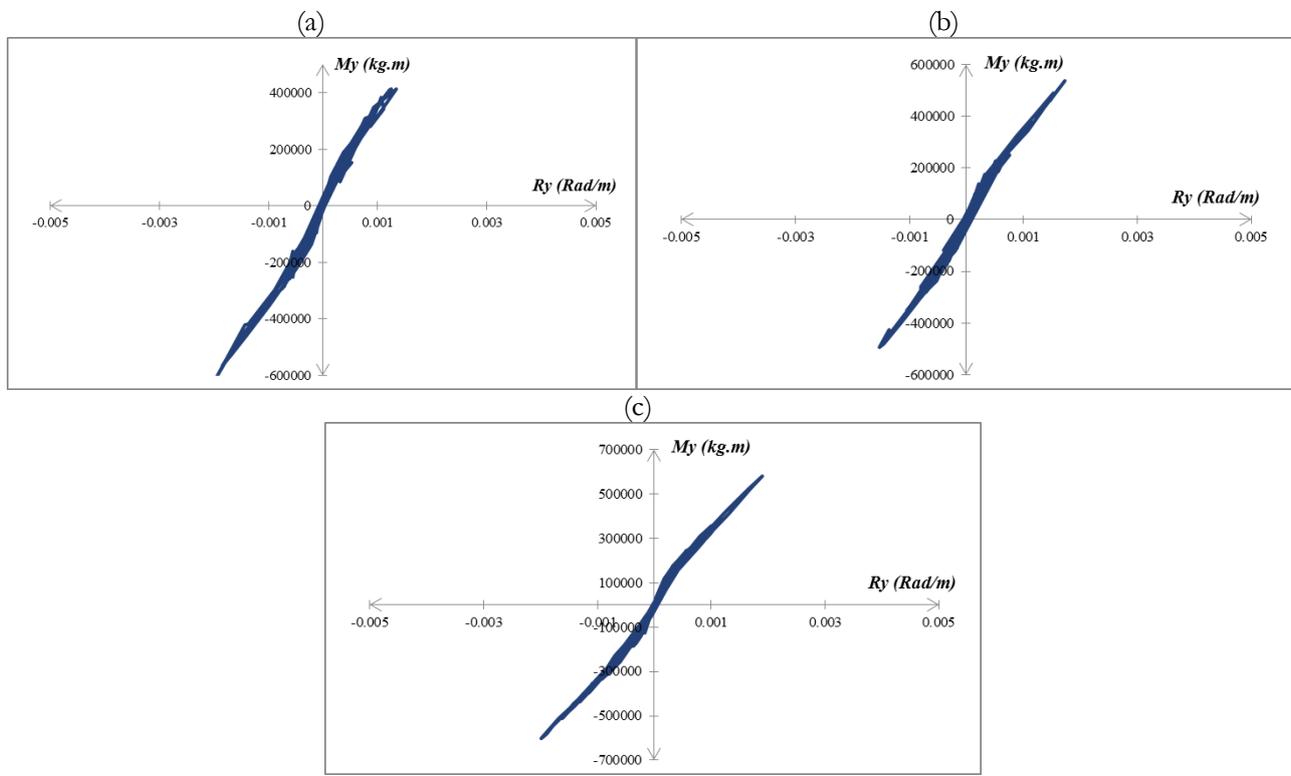
Analisis respon struktur dilakukan untuk menggambarkan kondisi secara keseluruhan dari jembatan. Respon yang ditinjau berupa *displacement*, *velocity*, dan *acceleration*. Untuk melakukan analisis ini maka perlu ditentukan titik bagian jembatan yang akan ditinjau untuk kondisinya. Titik tinjauan yang dipilih berupa titik tengah pada *pier head* bagian paling tengah dari jembatan. Pada penelitian ini respon diambil selama rentang waktu 10 detik maksimum dari data gempa hasil analisis riwayat waktu. Berikut contoh hasil respon struktur:



Gambar 8 Respon (a) *Displacement*, (b) *Velocity*, dan (c) *Acceleration* Gempa Park Field

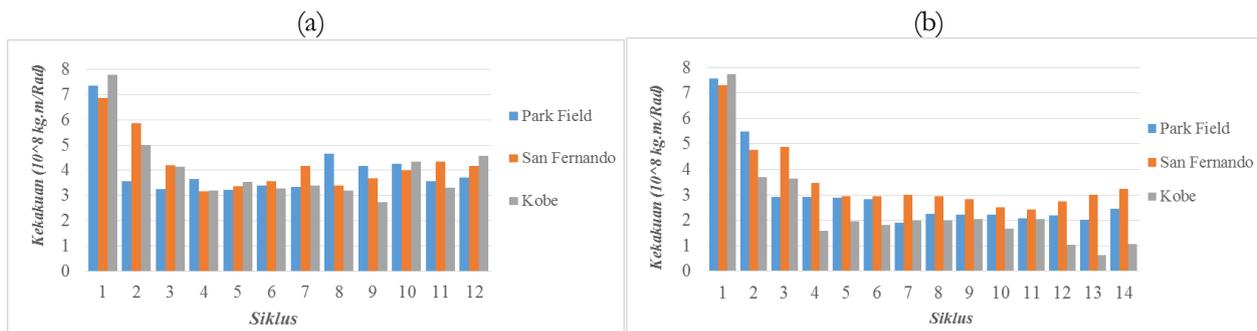
Analisis Respon Histeretik Pilar Jembatan

Setelah *running* pemodelan selesai dilakukan maka respon histeretik dapat ditinjau pada *pier* tinjauan struktur. Kurva yang terbentuk berdasarkan nilai variabel momen dan rotasi setiap rentang waktu 0,05 detik. Berikut hasil analisis kurva histeresis yang terbentuk pada program pemodelan jembatan dari rekaman gempa Park Field, San Fernando dan Kobe :



Gambar 9 Respon Histeretik Gempa (a) Park Field, (b) San Fernando, dan (c) Kobe

Nilai kekakuan dihitung berdasarkan Persamaan 1. Berikut hasil perhitungan kekakuan berdasarkan kurva respon histeretik pada setiap siklus dari pembebanan rekaman gempa Park Field, San Fernando, dan Kobe dengan perbandingan skala asli dan skala 2 kali:



Gambar 10 Rekapitulasi Kekakuan Struktur setiap Gempa dengan (a) Skala Asli dan (b) Skala 2 kali

Dapat dilihat pada siklus ke-1 nilai kekakuan setiap rekaman gempa masih tinggi dan cenderung sama pada pembebanan skala asli dan skala 2 kali yaitu $\pm 7 \times 10^8$ kg.m/Rad. Hal ini dapat membuktikan bahwa siklus ke-1 masih dalam tahap elastis, respon struktur masih bersifat linier. Setelah siklus ke-2 nilai kekakuan sudah terdegradasi dan terdapat perbedaan nilai kekakuan antara gempa skala asli dan gempa skala 2 kali, sehingga pada siklus ini dapat diidentifikasi telah terjadi nonlinieritas pada respon struktur.

Hasil analisis kondisi material struktur pilar pada skala asli menunjukkan material beton sudah terjadi *crack* yang dimulai pada siklus ke-2, namun belum terjadi deformasi permanen pada baja tulangan akibat *yield*. Hasil analisis kondisi material struktur pada skala 2 kali gempa menunjukkan sudah terjadi *crack* pada beton dan *yield* pada baja tulangan yang dimulai pada siklus ke-2, namun belum terjadi *crush* (patah) pada struktur pilar jembatan.

SIMPULAN

Melalui rangkaian studi literatur, analisis dan pembahasan pada penelitian dengan judul Analisis Dinamik Riwayat Waktu Nonlinier *Skew Bridge* ini dapat disimpulkan:

1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa respon *displacement* pada semua rekaman gempa arah longitudinal dan transversal memiliki nilai *drift ratio* yang kurang dari 0,5%. Respon *displacement* maksimum pada semua rekaman gempa terjadi saat respon struktur sudah menjadi nonlinier. Respon *displacement* pada arah longitudinal memiliki nilai yang lebih tinggi, namun respon *velocity* dan *acceleration* pada arah transversal memiliki nilai yang lebih tinggi.
2. Semua rekaman gempa menunjukkan respon struktur sudah bersifat nonlinier, dengan waktu dan penyebab terjadinya nonlinieritas tersebut berbeda pada masing-masing rekaman gempa. Sifat nonlinieritas dapat teridentifikasi akibat terjadinya degradasi kekakuan pada skala asli dan skala 2 kali gempa.
3. Sifat nonlinier respon struktur pada semua rekaman gempa terjadi pada siklus ke-2 sampai akhir siklus pembebanan. Nonlinieritas respon pada gempa dengan skala asli terjadi akibat *crack* (retak) pada beton, sedangkan nonlinieritas respon pada gempa dengan skala 2 kali terjadi akibat *crack* (retak) pada beton dan *yield* (leleh) pada baja tulangan.

REFERENSI

- Afandi, Niam. 2016. *Pengembangan Kurva Kerapuhan Berbasis Incremental Dynamic Analysis untuk Evaluasi Kinerja Seismik Jembatan Beton*. Solo : Universitas Sebelas Maret Surakarta (UNS).
- Ansuman Kar, Vikash Khatri, P. R. Maiti, P. K. Singh. 2012. *Study on Effect of Skew Angle in Skew Bridges*. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2 (12), 13-18.
- Ariestadi, Dian. 2008. *Teknik Struktur Bangunan – Jilid 3*. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Ayu, Dilla dan Faimun. 2017. *Studi Perbandingan Analisis Respon Spektra dan Time History untuk Desain Gedung*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).
- D.I. Wahjudi. 2012. *Model Multilinier untuk Mensimulasikan Perilaku Respons Histeretik Sambungan Balok-ke-Kolom Beton Bertulang pada Pembebanan Siklik*. *Jurnal Pendidikan*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).
- Fu, Gonggang dan Chun, Pang-jo. 2013. *Skewed Highway Bridges*. Detroit : Wayne State University.
- Gere dan Timoshenko. 2000. *Mekanika Bahan*. Jilid 1. Jakarta : PT Erlangga.
- Januar, Johannes. 2007. *Peningkatan Disipasi Energi dan Daktilitas pada Kolom Beton Bertulang yang Diretrofit dengan Carbon Fiber Jacket*. Yogyakarta: Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Hadi, Dean. 2016. *Pengembangan Kurva Kerapuhan Berbasis Incremental Dynamic Analysis untuk Evaluasi Kinerja Seismik Jembatan Rangka Baja*. Solo : Universitas Sebelas Maret Surakarta (UNS).
- Nuur, Dwi. 2015. *Pengaruh Dosis dan Aspek Rasio Serat Baja Terhadap Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas pada Beton Normal dan Beton Mutu Tinggi*. Solo : Universitas Sebelas Maret Surakarta (UNS).
- Kalkan, Erol, dan Anil K Chopra. 2010. *"Practical Guidelines to Select and Scale Earthquake Records for Nonlinear Response History Analysis of Structures"*. *Open File Report U.S. Departement of the Interior and U.S. Geological Survey*. United States : USGS and Earthquake Engineering Research Institute.
- Penta, Titik. 2008. *Perilaku Siklik Balok Prategang Parsial Pratarik Akibat Perbedaan Rasio Tulangan*. Bogor : Universitas Pakuan.
- Purnomo, Edy. 2014. *Analisis Kinerja Struktur Pada Gedung Bertingkat Dengan Analisis Dinamik Respon Spektrum Menggunakan Software Etabs (Studi Kasus : Bangunan Hotel Di Semarang)*. Solo : Universitas Sebelas Maret Surakarta (UNS).
- Wang, Huili, dkk. 2011. *Seismic Analysis of Prestressed Bridge Pier Based on Fiber Section*. China : Institute of Bridge Engineering.