

# PENILAIAN KINERJA SEISMIK JEMBATAN DENGAN PENDEKATAN ANALISIS PUSHOVER (SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF BRIDGE WITH IMPLEMENTING PUSHOVER ANALYSIS)

Anton Surviyanto<sup>1)</sup>, Setyo Hardono<sup>2)</sup>

<sup>1), 2)</sup> Puslitbang Jalan dan Jembatan

Jl. A.H. Nasution No.264 Bandung

E-mail: <sup>1)</sup>surviyanto@yahoo.com, <sup>2)</sup>setyo\_hardono@yahoo.com

Diterima : 21 September 2011; Disetujui : 07 Desember 2011

## ABSTRAK

*Pada jembatan panjang atau kolom tinggi diperlukan suatu analisis yang lebih kompleks untuk mengetahui perilaku dinamik atau gempa. Salah satu analisis yang sering digunakan adalah Prosedur Statik Nonlinier (NSP). Studi ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi perbandingan respon struktur dan kelayakan sistem struktur jembatan terhadap peraturan persyaratan gempa dengan menerapkan Prosedur Statik Nonlinier (Nonlinear Static Pushover/NSP). Prosedur Statik Nonlinier (NSP) ini dilakukan dengan mengimplementasikan Analisis Pushover pada jembatan berdasarkan Federal Emergency Management Agency (FEMA)-273. Untuk tujuan perbandingan dilakukan juga, Nonlinear Time-History Analysis (NLTHA), yang dipertimbangkan sebagai metode paling akurat. Penelitian dibatasi hanya untuk jembatan yang simetris tanpa skew. Abutment dan pier diasumsikan ditumpu oleh bored pile. Sambungan momen antara struktur atas dan pier diasumsikan sambungan kaku (rigid). Jembatan sebagai objek penulisan diambil Jembatan Penggaron di Jawa Tengah. Metode analisis dan desain struktur mengikuti prosedur Applied Technology Council (ATC)-49 sesuai dengan Seismic Design and Analysis Prosedur (SDAP). Jembatan Penggaron dianalisis menggunakan NSP dan NLTHA. Satu riwayat waktu gempa El Centro 1940 NS diimplementasikan untuk melakukan analisis time-history. Pola beban Modal digunakan untuk merepresentasikan distribusi gaya inersia yang dihasilkan oleh gempa. Perpindahan, geser dasar, dan deformasi sendi plastik yang diperoleh dari prosedur NSP dibandingkan dengan NLTHA. Analisis menggunakan intensitas beban seismik gempa kuat. Kinerja jembatan dievaluasi terhadap beban gempa. Hasil kajian menunjukkan NSP memberikan nilai yang lebih konservatif dibandingkan NLTHA. Untuk gempa arah longitudinal, perbandingan hasil perpindahan analisis NLTHA adalah 15.37% dari analisis respon spektrum. Sedangkan perbandingan perpindahan analisis NLTHA dan analisis pushover adalah 39.05%. Untuk gempa arah transversal jembatan, perbedaan hasil perpindahan analisis NLTHA adalah 13.07% dari analisis respon spektrum. Sedangkan perbandingan perpindahan analisis NLTHA dan analisis pushover adalah 52.76%.*

**Kata Kunci :** *Pilar Terintegrasi, Analisis Pushover, Kinerja Seismik Jembatan, Analisis Riwayat Waktu Nonlinier, Seismic Design and Analysis Prosedur (SDAP)*

## ABSTRACT

*In case of long span and high-pier bridge, more complex analysis is needed to evaluate dynamic and earthquake behaviour of the structure. One of the analysis which commonly used is Non Linear Static Procedure (NSP). This study aims to analyze and evaluate the comparison between the structural response and feasibility of the structural system of bridge with the design code, especially seismic*

requirements by applying Nonlinear Static Procedures. It is implemented using Pushover Analysis based on Federal Emergency Management Agency, FEMA-273. For comparison purpose, Non Linear Time History Analysis (NLTHA) was conducted and considered as the most accurate method. The scope of this study is limited to simetrically non-skew span bridge. Abutment and pier were assumed to be supported by bored pile. Moment connection between superstructure and pier is assumed as rigid joint. Penggaron Bridge located in Central Java is the object of the study. Analysis method and structural design adopted procedure of Applied Technology Council (ATC-49) in accordance with Seismic Design and Analysis Procedure (SDAP). Penggaron bridge was analyzed using NSP and NLTHA. One ground motion, El Centro NS 1940 earthquake was implemented to analyze NLTHA. Modal load pattern was used to represent inertia force distribution generated by the earthquake. Displacement, base shear, plastic deformation joints obtained from NSP procedure compared with NLTHA. Analysis used is high intensity seismic load. Bridge performance was evaluated to seismic load. The analysis shows that NSP give more conservative value compared with NLTHA. For earthquake longitudinal direction of the bridge, the different between NLTHA and Response Spectrum Analysis is 15.37%, and the different between NLTHA and pushover analysis is 39.05%. For earthquake transverse direction of the bridge, the different between NLTHA and Response Spectrum Analysis is 13.07%, and the different between NLTHA and pushover analysis is 52.76%.

**Keywords :** *Integrated Pier, Pushover Analysis, Seismic Performance of Bridge, Non-Linear Time History Analysis, Seismic Design and Analysis Prosedure (SDAP)*

## PENDAHULUAN

Pada jembatan panjang atau kolom tinggi diperlukan suatu analisis yang lebih kompleks untuk mengetahui perilaku dinamik atau gempa (A.J. Kappos 2005). Salah satu analisis yang sering digunakan adalah Prosedur Statik Nonlinier (NSP). Prosedur ini dilakukan dengan mengimplementasikan Analisis Pushover pada jembatan. Untuk tujuan perbandingan dilakukan juga, *Nonlinear Time-History Analysis (NLTHA)*, yang dipertimbangkan sebagai metode paling akurat.

Studi ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi perbandingan respon struktur dan kelayakan sistem struktur jembatan terhadap peraturan perencanaan jembatan khususnya persyaratan gempa dengan menerapkan Prosedur Statik Nonlinier.

Penilaian kriteria kinerja seismik pada jembatan ini merupakan prosedur yang penting dalam proses desain untuk mengetahui perilaku pasca-elastik/inelastik dari struktur jembatan

tersebut, seperti yang dijelaskan dalam ATC-49, dengan level kinerja dan level kerusakan yang didesain pada jembatan (ATC 2003).

## KAJIAN PUSTAKA

Terdapat beberapa metode dalam Prosedur Statik Nonlinier pada struktur, antara lain : (1) *Capacity Spectrum Method (CSM)* (ATC 2003); (2) *Displacement Coefficient Method (DCM)* (FEMA-273 1997); (3) *Secant method* (COLA 1995); dan (4) *Modal Pushover Analysis (MPA)* (Chopra and Goel 2001; 2002).

Dalam studi diatas, CSM mengimplementasikan estimasi kebutuhan perpindahan target. CSM membutuhkan banyak iterasi sedangkan NSP secara umum tidak membutuhkan iterasi. Dalam studi ini, NSP diimplementasikan untuk mengestimasi perpindahan target dan melakukan analisis pushover. Kriteria penerimaan kinerja menggunakan FEMA-273 untuk mengevaluasi level kinerja.

### Elemen Kunci Dalam Analisis *Pushover*

Oleh karena secara alami jembatan membentang secara horizontal dibandingkan gedung yang vertikal maka pertimbangan dan modifikasi harus diambil untuk penerapan NSP pada jembatan (Kaliprasanna 2011). Modifikasi dan pertimbangan harus terkonsentrasi pada elemen kunci dalam analisis *pushover* :

1. Definisi node kontrol : node kontrol adalah node yang digunakan untuk memonitor perpindahan struktur. Node kontrol ini merupakan perpindahan terhadap gaya geser dasar dalam bentuk kurva kapasitas (*pushover*) dari struktur.
2. Pembentukan kurva *pushover*, yang termasuk dalam evaluasi distribusi gaya : harus memiliki perpindahan yang sama atau mendekati untuk perpindahan aktual akibat gempa, hal ini penting untuk menggunakan distribusi gaya ekuivalen terhadap distribusi gaya inersia yang diharapkan.
3. Estimasi kebutuhan perpindahan : hal ini merupakan elemen kunci ketika menggunakan analisis *pushover*. Node kontrol didorong hingga mencapai kebutuhan perpindahan, yang merepresentasikan perpindahan maksimum yang diharapkan yang dihasilkan dari intensitas gempa.
4. Evaluasi level kinerja : Evaluasi kinerja merupakan tujuan utama dalam *performance-based design*. Komponen atau aksi dipertimbangan memenuhi level kinerja yang ditentukan. Untuk aksi *deformation-controlled*, kebutuhan deformasi dibandingkan dengan nilai maksimum yang diizinkan. Untuk aksi *force-controlled*, kapasitas kekuatan dibandingkan dengan nilai gaya pada komponen.

### Pola Beban

Beberapa pola beban digunakan untuk merepresentasikan intensitas beban yang dihasilkan oleh gempa. Pola pertama, Pola Seragam, berdasarkan gaya lateral yang proporsional terhadap massa total yang diterapkan pada setiap node. Pola beban ini diterapkan pada jembatan sebagai :

$$F_i = m_i \cdot g \quad (1)$$

$F_i$  = gaya lateral pada setiap node  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ),  $N$  = jumlah node,  $m_i$  = massa yang diterapkan pada node  $i$ ,  $g$  = percepatan tanah. FEMA-273 menggunakan dua pola beban (Pola Seragam dan satu dari dua pola beban) dan mengambil nilai maksimum untuk setiap aksi. Pola beban ini ditujukan untuk penekanan pada geser dasar dibandingkan pelelehan momen tinggi dan deformasi.

Pola beban kedua untuk jembatan adalah Pola Modal, yang ditulis menggunakan distribusi pola beban menurut mode pertama sebagai berikut:

$$F_i = \left( \frac{m_i \phi_i}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_i} \right) \cdot V \quad (2)$$

$F_i$  = gaya lateral pada setiap node  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ),  $N$  = jumlah node,  $m_i$  = massa yang diterapkan pada node  $i$ ,  $\phi_i$  = amplitudo mode fundamental pada node  $i$ , dan  $V$  = geser dasar. Pola beban ini dapat digunakan bila lebih dari 75% dari total *mass participates* dalam arah mode fundamental. Nilai  $V$  dalam persamaan sebelumnya dapat diambil sebagai nilai pilihan karena distribusi gaya adalah penting ketika nilai meningkat inkremental hingga mencapai perpindahan target atau kolaps.

Pola beban ketiga adalah Pola Spektral, harus digunakan ketika mode yang lebih tinggi dianggap memberikan efek yang penting. Pola beban ini berdasarkan gaya modal yang dikombinasikan menggunakan metode *SRSS* (*Square Root of Sum of the Squares*) or *CQC* (*Complete Quadratic Combination*). Dapat ditulis sebagai berikut :

$$F_i = \left( \frac{m_i \delta_i}{\sum_{i=1}^N m_i \delta_i} \right) \cdot V \quad (3)$$

$F_i$ ,  $m_i$ ,  $N$ , dan  $V$  sama seperti penjelasan Pola Modal, dan adalah perpindahan pada node  $i$ , yang dihasilkan dari analisis respon spektrum struktur (meliputi jumlah mode yang mencukupi untuk menangkap 90% total massa), yang diasumsikan elastik linier. Analisis respon

spektra menggunakan spektrum dengan *ground motion* yang tepat.

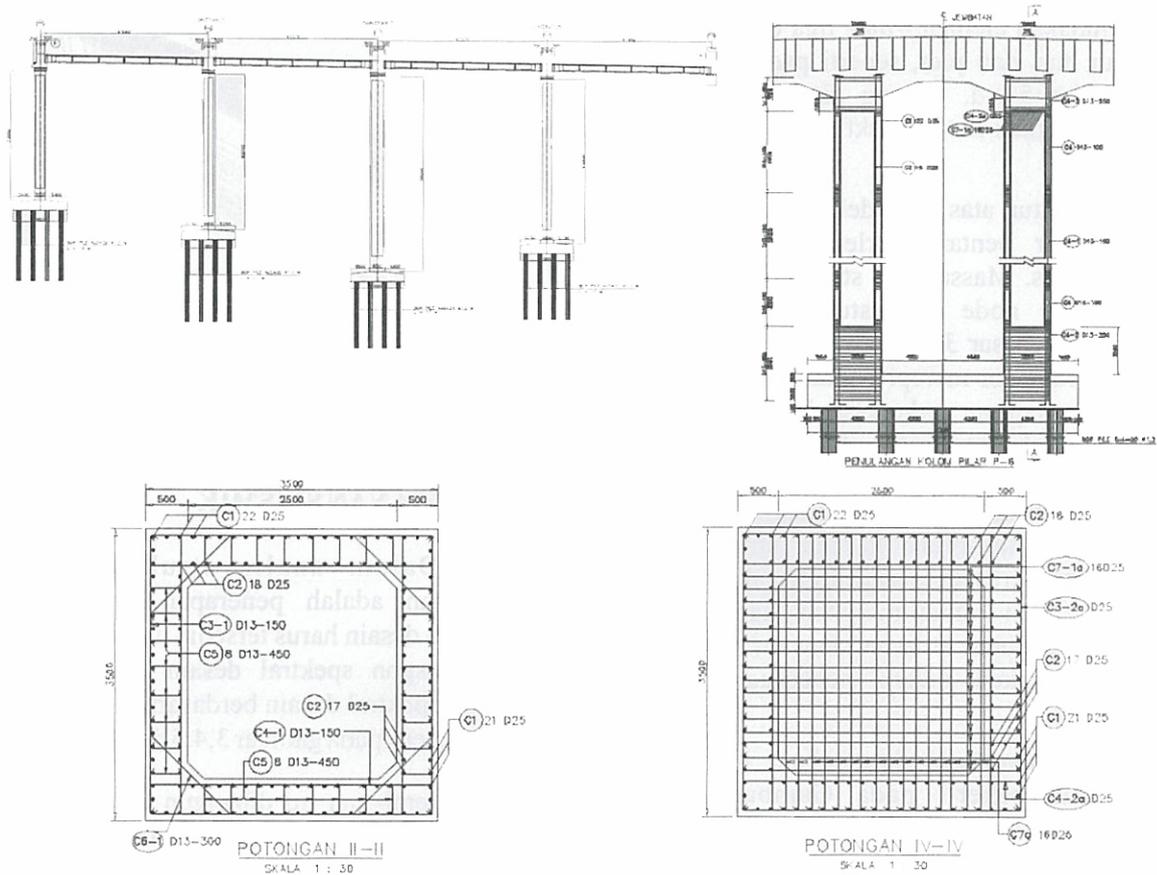
## HIPOTESIS

Prosedur statik nonlinier memberikan nilai yang lebih konservatif dibandingkan dengan Analisis Riwayat Waktu Nonlinier yang dipertimbangkan lebih akurat.

## METODOLOGI PENELITIAN

Untuk mengevaluasi kinerja seismik pada jembatan perlu dilakukan beberapa langkah analisis yaitu analisis respon spektrum dengan Faktor R-rencana (AASTHO 2005), kemudian dibandingkan dengan verifikasi analisis *pushover* statik nonlinier prosedur dan dibandingkan pula analisis riwayat waktu nonlinier sebagai pembanding yang paling terpercaya dan akurat.

Jembatan dalam penelitian ini adalah Jembatan Penggaron ( $110^{\circ}25'11.5''E$ ,  $7^{\circ}7'2.1''S$ ) dengan struktur atas beton prategang empat bentang menerus (Pier 5-8), sebagaimana terlihat pada Gambar 1. Struktur atas adalah girder I standar dengan bentang 43 m, sedangkan kolom memiliki ketinggian antara 30~50m. Fondasi berupa *bored pile beton*, *abutment* diasumsikan tanpa restrain dalam arah longitudinal. Dalam arah transversal, kekakuan transversal meliputi pile dan dinding abutment. Struktur diasumsikan bebas berotasi dalam sumbu vertikal pada setiap perletakan (rol) dan bentang menerus pada *bent* (perletakan jepit)/sistem pier-struktur atas terintegrasi. Tampak atas tampak samping dan potongan melintang dapat dilihat pada Gambar 1. Namun untuk penelitian ini hanya pier 5 s.d. 8 yang diteliti, karena menggunakan sistem terintegrasi struktur atas dan struktur bawah



**Gambar 1** Tampak atas, elevasi, dan penampang jembatan

Dalam arah longitudinal, kolom diasumsikan menahan semua gaya gempa arah longitudinal. Abutment dengan tipe dukungan mengizinkan pergerakan longitudinal struktur atas dan tidak ada restrain dalam arah longitudinal. Dalam arah transversal, struktur atas diasumsikan berperilaku sebagai dua perletakan sederhana dengan perpindahan maksimum pada bagian tengah bentang. *Bent* tengah diasumsikan mengantisipasi dalam tahanan gaya gempa transversal sepanjang struktur atas. Kunci geser disediakan sebagai restrainer untuk mentransfer gaya gempa arah transversal kepada abutment.

### Model Elemen Hingga Struktur

Program analisis struktur CSI Bridge V.15 digunakan untuk melakukan analisis. Nonlinieritas geometrik dengan pertimbangan efek *P-delta* diterapkan pada jembatan dengan penambahan *nonlinieritas material*. Model menggunakan elemen *frame* tiga dimensi untuk struktur atas dan pier, seperti pada Gambar 1, hanya pier 5 s.d. 8 yang dimodelkan karena sistem integrasi antara struktur atas dan struktur bawah.

Struktur atas dimodelkan dengan empat elemen per bentang terletak pada sentroid struktur atas. Massa total struktur adalah *lump mass* pada node dari struktur atas. Beban tambahan sebesar  $34.3 \text{ kN/m}$  pada struktur atas dipertimbangkan merepresentasikan beban dari barrier dan lapisan perkerasan. Beban diafragma pada tengah bentang adalah *lump mass*. Penentuan momen inersia dan kekakuan torsional struktur atas berdasarkan properti penampang tak-retak karena struktur atas diharapkan berespon secara linier akibat beban seismik. *Skew* diperhitungkan hanya dalam orientasi elemen struktur bawah, dan tidak dipertimbangkan dalam penentuan properti struktur atas.

*Abutment* tidak dimodelkan, hanya node perletakan seperti pada Gambar 2. Pier dimodelkan dengan elemen frame 3D yang merepresentasikan *pier head* dan kolom-kolom individu. Momen inersia kolom dihitung berdasarkan penampang retak menggunakan

kurva Momen-Kurvatur ( $M-\phi$ ). Fondasi kolom dimodelkan dengan perletakan jepit untuk footing.

Model matematika tiga dimensi dibuat merefleksikan geometri, kondisi batas, perilaku material jembatan. Pendekatan massa kontinu digunakan daripada *lump mass*, maka dapat meningkatkan hasil analisis dinamik. Fondasi *pile* dimodelkan dengan merestrain perpindahan vertikal, rotasi, translasional pada arah longitudinal dan transversal (perletakan jepit). Momen inersia efektif pada kolom digunakan dalam analisis berdasarkan spesifikasi ATC-49. Analisis respon spektrum elastik linier multi modal dilakukan menggunakan kurva respon spektrum yang dibangun berdasarkan kondisi site. Rasio redaman untuk model digunakan 5 persen. Tiga *load cases* didefinisikan pada struktur; pertama adalah beban mati gravitasi statik, kedua beban lainnya berhubungan dengan eksitasi seismik menurut ATC-49



Gambar 2 Model Elemen Hingga Jembatan Penggaron

### PEMBEBANAN SEISMIK

Dalam analisis struktur, setelah pemodelan adalah penerapan beban respon spektrum desain harus tersedia untuk melakukan NSP. Respon spektral desain harus tersedia. Respon spektral desain berdasarkan peta Gempa 2010, seperti pada gambar 3,4,5 dan 6.

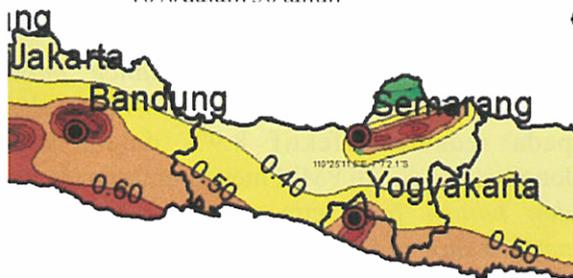
Jembatan ini dibangun di daerah Jawa Tengah dengan daerah seismik  $PGA=0,2g$ ,  $S_3=0,4g$ ,  $S_1=0,2g$ . Estimasi ini berdasarkan probabilitas 10% dalam 50 tahun, yang ekuivalen dengan periode ulang 475 tahun. Kondisi

permukaan tanah diasumsikan tanah keras dengan kelas site E.

Parameter spektral percepatan Jembatan Penggaron dan koefisien site tanah untuk gempa kuat adalah  $PGA_M = F_{PGA} \cdot S_{PGA} = 1.2 \times 0.2 = 0.24$ ;  $S_{DS} = F_a \times S_s = 1.2 \times 0.4 = 0.48$ ;  $S_{D1} = F_v \times S_1 = 1.6 \times 0.2 = 0.32$ ;  $T_s = S_{D1}/S_{DS} = 0.32/0.48 = 0.67$ .



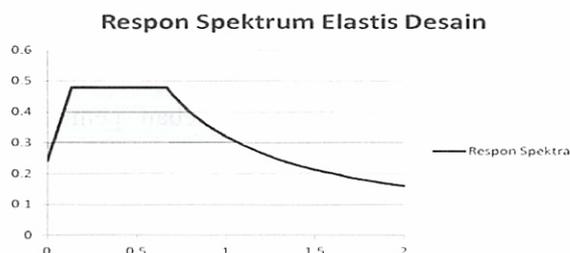
Gambar 3 Percepatan puncak di batuan dasar (SB) 10% dalam 50 tahun



Gambar 4 Peta respon spektra percepatan 0.2 detik di batuan dasar (SB) 10% dalam 50 tahun



Gambar 5 Peta respon spektra percepatan 1.0 detik di batuan dasar (SB) 10% dalam 50 tahun



Gambar 6. Respon Spektra Desain Elastis Site Kelas Tanah E

### Kombinasi Beban Gempa dan Faktor Beban berdasarkan NCHRP 12-49

Efek desain seismik elastik harus ditentukan dengan kombinasi SRSS atau gaya kombinasi 100% - 40% akibat beban seismik individual (NCHRP 2001). Kombinasi SRSS dari kuantitas respon adalah :

$$M_x = \sqrt{(M_x^L)^2 + (M_x^T)^2} \quad (4)$$

$$M_y = \sqrt{(M_y^L)^2 + (M_y^T)^2} \quad (5)$$

Dua kasus beban dari kombinasi gaya seismik ortogonal dispesifikasikan oleh NCHRP untuk memperhitungkan arah gerakan tak tentu gempa dan mensimulasikan terjadinya gaya gempa pada arah horizontal tegak lurus yaitu LC1 dan LC2. LC1 adalah *Load Case 1* terdiri dari 100% gaya gerakan longitudinal ditambah 40% gaya arah transversal (utamanya pembebanan longitudinal) dan *Load Case 2* terdiri dari 100% gaya gerakan transversal ditambah 40% gaya arah longitudinal (utamanya pembebanan transversal). LC1 dan LC2 ditentukan sebagai berikut :

$$M_x^{LC1} = 1.0M_x^L + 0.4M_x^T \quad (6)$$

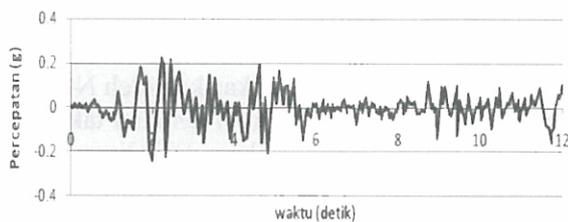
$$M_x^{LC2} = 1.0M_x^T + 0.4M_x^L \quad (7)$$

Bila desain biaksial pada elemen diperlukan, maka modifikasi desain kuantitas respon maksimum harus dikombinasikan untuk menentukan vektor momen maksimum menurut metode SRSS. Catatan bahwa pada spesifikasi baru NCHRP 12-49 kontribusi komponen tegak lurus diperbesar dari 30% menjadi 40%, hal ini memberikan prediksi gaya elastik dan perpindahan dengan hasil yang lebih akurat.

Untuk melakukan *Nonlinear Time-History Analysis (NLTHA)*, digunakan penskalaan gempa El Centro N-S 1940. *Nonlinear Time History Analysis* memberikan hasil yang paling akurat dan dapat diterima

secara luas dalam menganalisis perilaku inelastis struktur. Perhitungan NLTHA dilakukan dengan bantuan program CSI Bridge V.15 menggunakan integrasi langsung Newmark dengan nilai  $\beta = 0.25$  dan nilai  $\gamma = 0.5$ , untuk memahami secara lebih baik respon seismik jembatan di Penggaron. Jembatan dikenakan gempa El Centro dengan skala menjadi 0.24g dalam arah longitudinal dan transversal jembatan. Hasil *nonlinear time history analysis* untuk perpindahan pada pier-pier yang diteliti.

Berikut ini adalah *ground motion El Centro* yang telah diskala 0.24g dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. *Ground Motions El Centro* arah N-S 12 detik yang diskala

## HASIL DAN ANALISIS

Analisis menggunakan intensitas beban gempa kuat, dengan  $PGA = 0.24g$ . Analisis dilakukan untuk menghasilkan perpindahan maksimum, gaya geser dasar total, dan rotasi sendi plastis yang dihasilkan dari NSP dan NLTHA.

Analisis *pushover* dilakukan pada model struktur jembatan secara global, untuk menentukan perilaku beban-perpindahan lateral arah transversal dan longitudinal. Persyaratan desain kapasitas yang digunakan untuk desain pierhead dan fondasi menyatakan bahwa elemen-elemen ini tidak diizinkan leleh. Kebutuhan perpindahan target untuk analisis *pushover* arah transversal dan longitudinal adalah :  $1.5 \cdot \Delta mT = 1.5 \times 0.117$  m dan  $1.5 \cdot \Delta mL = 1.5 \times 0.135$  m.

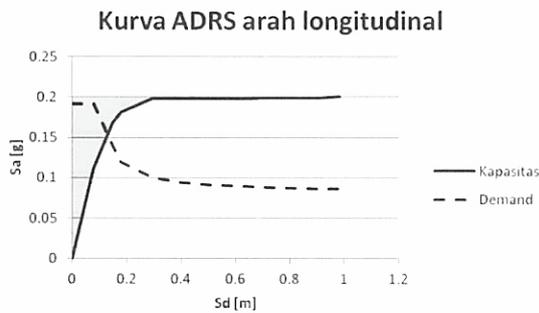
Analisis *pushover* pertama dilakukan pada kontrol beban akibat beban gravitasi pada struktur (*push* gravitasi). Kemudian analisis *pushover* lateral dalam arah longitudinal dan transversal dilakukan dalam kontrol perpindahan

dimulai dari akhir *push* gravitasi pada node di pier 50m (pier 7). Hasil yang diperoleh dari analisis ini diperiksa terhadap kebutuhan seismik Penggaron ( $PGA = 0.24g$ ). Setelah mendefinisikan spektrum desain, model dianalisis akibat beban gravitasional, dengan mempertimbangkan efek P-delta secara simultan. Dengan menggunakan kondisi inisial ini yang diperoleh dari gaya gravitasional, analisis *pushover* dilakukan pada model dalam arah longitudinal dan transversal dengan mempertimbangkan mode yang tepat. Level performa struktur merupakan hal yang sangat penting.

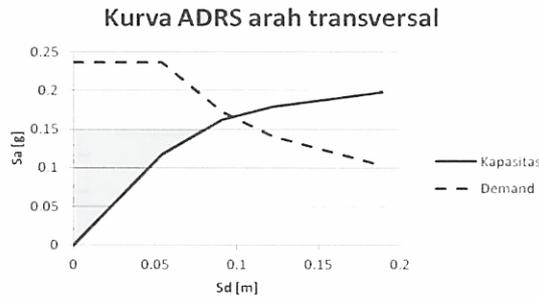
Gambar 8 menunjukkan spesifikasi *performance point* model dalam arah longitudinal, yang diperoleh dari titik kurva spektrum kapasitas dan spektrum *demand* yang tereduksi dalam format *Acceleration-Displacement Response Spectrum (ADRS)*.

Dari Gambar 8, *performance point* struktur terjadi pada perpindahan 0.142 m dan pada redaman efektif 8.9% dalam arah longitudinal. Sendi PMM mendominasi pada *top* dan *bottom* pier serta rotasi struktur pada *performance point* adalah 0.00021 radian pada pier 6. Dengan membandingkan nilai rotasi ini, *performance level* pada model dalam arah longitudinal yang diperoleh adalah dalam level B-IO (antara elastik dan *Immediate Occupancy*). Berdasarkan hasil tersebut, struktur tidak lemah dalam arah longitudinal dan oleh karena itu level kinerja elemen struktur dan kurva perilaku global telah dipertimbangkan.

Berdasarkan metode koefisien FEMA 356, dari model analitis didapat faktor R aktual sebesar 2.15. Struktur jembatan didesain memiliki faktor reduksi gempa aktual (R) sebesar 2.15 yang kurang dari nilai faktor reduksi gempa asumsi awal yaitu 4. Sehingga dapat disimpulkan bahwa struktur jembatan ini memiliki angka faktor keamanan yang cukup dalam perencanaan struktur dalam menahan beban gempa yang direncanakan.



Gambar 8. Kurva ADRS pushover arah longitudinal Jembatan



Gambar 9. Kurva ADRS pushover arah transversal jembatan

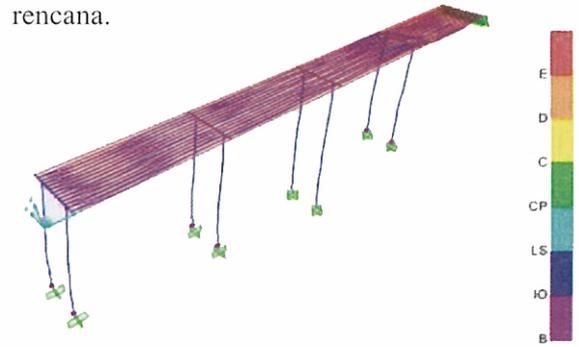
Dari analisis *pushover* dapat diketahui lokasi maupun urutan terjadinya sendi plastis akibat gempa kuat sehingga detailing pada lokasi-lokasi tersebut harus mampu mengembangkan terjadinya sendi plastis. Hasil *pushover* arah longitudinal menghasilkan leleh pertama terjadi pada ujung atas dan bawah pier.

Gambar 9 menunjukkan spesifikasi *performance point* model dalam arah transversal, yang diperoleh dari titik kurva spektrum kapasitas dan spektrum demand yang tereduksi dalam format *Acceleration-Displacement Response Spectrum (ADRS)*.

Dari Gambar 9, *performance point* struktur terjadi pada perpindahan 0.092 m dan pada redaman efektif 11.1% dalam arah transversal. Sendi P-M2-M3 mendominasi pada top dan bottom pier serta rotasi struktur pada *performance point* adalah 0.0001 radian. Dengan membandingkan nilai rotasi ini, level kinerja pada model dalam arah longitudinal yang diperoleh adalah dalam level B-IO (antara Elastik dan *Immediate Occupancy*). Berdasarkan hasil tersebut, struktur tidak lemah dalam arah

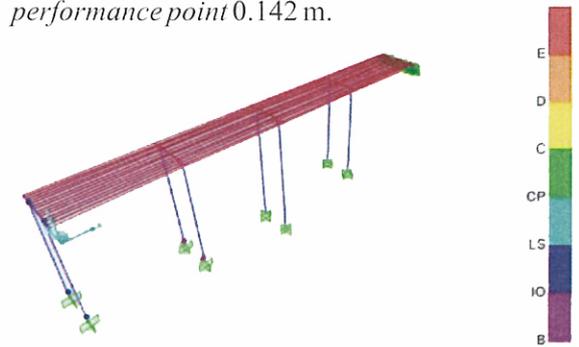
transversal dan oleh karena itu level performa elemen struktur dan kurva perilaku global telah dipertimbangkan.

Berdasarkan metode koefisien FEMA 356, dari model CSI Bridge didapat faktor R aktual sebesar 2.53. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa faktor R aktual untuk kedua arah *pushover* jembatan lebih kecil dari R rencana.



Gambar 10. Kelelahan rotasional kolom (*pushover* arah longitudinal)

Dari Gambar 10 diatas dapat terlihat bahwa kelelahan kolom terjadi pada bagian bawah pier adalah kategori B-IO pada perpindahan *performance point* 0.142 m.



Gambar 11. Kelelahan rotasional kolom (*pushover* arah transversal)

Dari Gambar 11 diatas dapat terlihat bahwa kelelahan kolom terjadi pada bagian atas bawah pier yaitu pada rotasional elastik (B)-IO kategori B-IO pada perpindahan *performance point* 0.092 m.

### Arah Longitudinal

Periode mode pertama arah longitudinal adalah 1.68 detik dan *modal participation mass ratio* untuk mode ini adalah 81.74 %. Kurva *pushover* untuk arah ini ditunjukkan pada

Gambar 8. Persamaan dibawah digunakan untuk mengestimasi perpindahan target :

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2}$$

$C_0, C_1, C_2,$  and  $C_3$  adalah faktor modifikasi untuk memperhitungkan beberapa parameter yang mempengaruhi node kontrol perpindahan, dan persamaan ini adalah aturan *equal displacement*. Untuk lebih detail tentang definisi setiap parameter dan estimasinya, dapat dilihat pada FEMA-273.

Estimasi perpindahan target adalah untuk level gempa kuat adalah 176 mm. Gaya dalam dan deformasi akibat setiap perpindahan ditentukan untuk mengevaluasi level kinerja untuk setiap level desain.

Dalam studi ini perpindahan maksimum, geser dasar, dan rotasi sendi plastik yang dihasilkan NSP dibandingkan dengan NLTHA.

Tabel 1 dan Tabel 2 adalah perbandingan parameter dari NSP dengan parameter dari NLTHA untuk perpindahan akibat gempa masing-masing arah. NSP menggunakan analisis pushover, dengan pola beban Modal.

$$Diff. (\%) = \frac{X_{NSP} - X_{NLTHA}}{X_{NLTHA}} \times 100\% \quad (8)$$

Keterangan :  $X_{NSP}$  adalah nilai dari NSP dan  $X_{NLTHA}$  merupakan parameter NLTHA. Diff (%) adalah selisih nilai nilai NSP dan NLTHA dalam persen.

Seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1, NSP overestimasi perpindahan target dari 39.05% untuk level gempa kuat.

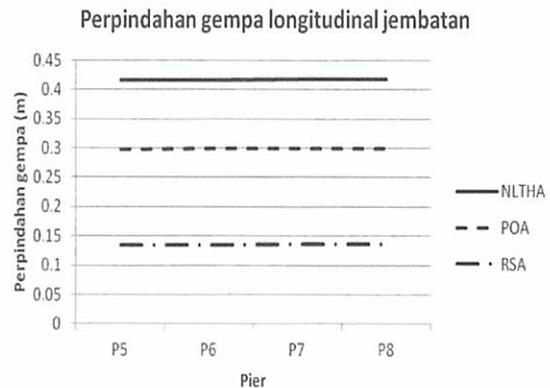
Rotasi sendi plastik adalah faktor penting untuk mendefinisikan level kinerja. NSP overestimasi rotasi sendi plastik dari 39.05% untuk level gempa kuat.

Berikut adalah Tabel 1 menunjukkan perpindahan dalam arah longitudinal akibat gempa dari hasil analisis respon spektrum elastik, Nonlinier time history analisis dan analisis pushover untuk kedua tipe jembatan.

Berikut adalah Gambar 12 menunjukkan perpindahan jembatan Penggaron dalam arah longitudinal akibat gempa.

**Tabel 1.** Perbandingan perpindahan gempa arah longitudinal

Analisis	Perpindahan gempa arah longitudinal (m)			
	Pier5	Pier6	Pier7	Pier8
Respon spektrum	0.1349	0.1353	0.1359	0.1361
NLTHA	0.1174	0.1176	0.1178	0.1179
Pushover	0.1634	0.1635	0.1638	0.1639
Diff (%)	39.18	39.03	39.05	39.02



**Gambar 12.** Perpindahan gempa arah longitudinal

Dari Gambar 12 diatas dapat disimpulkan bahwa perbandingan hasil perpindahan analisis NLTHA adalah 15.37% dari analisis respon spektrum. Sedangkan perbandingan perpindahan analisis NLTHA dan analisis pushover adalah 39.05%.

### Arah Transversal

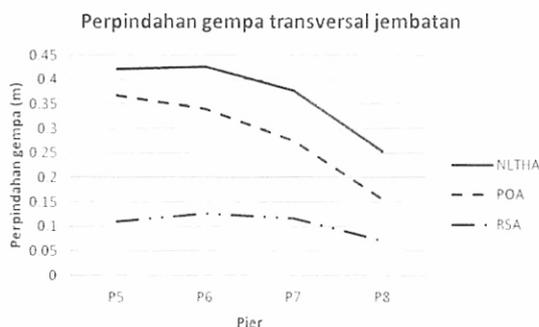
Periode mode pertama dalam arah transversal adalah 1.37 detik dan *modal participation mass ratio* untuk mode ini adalah 77.07%. Kurva pushover untuk arah ini ditunjukkan pada Gambar 9. Persamaan yang sama digunakan untuk mengestimasi perpindahan target. Perpindahan target estimasi adalah 203 mm untuk level gempa kuat.

Seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2, NSP overestimasi perpindahan target dari 52.76% untuk level gempa kuat. Untuk geser dasar, perbedaannya kecil

Rotasi sendi plastik adalah faktor penting untuk mendefinisikan level kinerja. NSP overestimasi rotasi sendi plastik dari 52.76% untuk level gempa kuat.

**Tabel 2.** Perbandingan perpindahan gempa arah transversal

Analisis	Perpindahan gempa arah transversal (m)			
	Pier5	Pier6	Pier7	Pier8
Respon spektrum	0.1098	0.1258	0.1168	0.0710
NLTHA	0.0538	0.0872	0.1033	0.0980
Pushover	0.2580	0.2140	0.1578	0.0843
Diff (%)	379.55	145.41	52.76	-13.98



**Gambar 13.** Perpindahan gempa arah longitudinal jembatan abutment konvensional

Dari Gambar 13 diatas dapat disimpulkan bahwa perbedaan hasil perpindahan analisis NLTHA adalah 13.07% dari analisis respon spektrum. Sedangkan perbandingan perpindahan analisis NLTHA dan analisis pushover adalah 52.76%.

## PEMBAHASAN

Dengan menggunakan kriteria penerimaan FEMA-273 untuk mengevaluasi level kinerja jembatan, rotasi sendi plastis tidak boleh melebihi nilai level kinerja sebagai berikut : 0.005 untuk *immediate occupancy*, 0.01 untuk *life safety*, dan 0.017 untuk *collapse prevention*. Dalam arah longitudinal, jembatan memenuhi level kinerja B dan IO untuk level gempa kuat. Dalam arah transversal, jembatan memenuhi level kinerja B dan IO untuk kinerja gempa kuat.

Dari analisis pushover dan NLTHA, untuk jembatan Penggaron terjadi kelelahan pada bagian atas dan bawah pier dalam kategori rotasional elastik (B)-IO dalam gempa arah longitudinal dan gempa arah transversal.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Perbandingan penerapan NSP pada jembatan ini menggunakan Analisis *Pushover* menurut ketentuan FEMA-273. Jembatan empat bentang dipresentasikan dan dijelaskan pada studi kasus. Perbandingan hasil diperoleh dari NLTHA dipertimbangkan sebagai metode yang paling baik untuk analisis nonlinier, dengan NSP diimplementasikan analisis *pushover* dilakukan untuk mengevaluasi validitas beberapa prosedur.

Perpindahan target untuk Jembatan Penggaron diestimasi menggunakan NSP dan mengimplementasikan pola beban dalam studi ini. Dalam arah longitudinal dan transversal, NSP memberikan nilai yang lebih konservatif untuk semua kasus. Perbedaan dalam perpindahan target meningkat pada struktur pada rentang inelastik. Dari analisis pushover dan NLTHA, untuk jembatan Penggaron terjadi kelelahan pada bagian atas dan bawah pier dalam kategori rotasional elastik (B)-IO dalam gempa arah longitudinal dan gempa arah transversal.

Hasil kajian menunjukkan NSP memberikan nilai yang lebih konservatif dibandingkan NLTHA.

1. Untuk gempa arah longitudinal, perbandingan hasil perpindahan analisis NLTHA adalah 15.37% dari analisis respon spektrum. Sedangkan perbandingan perpindahan analisis NLTHA dan analisis pushover adalah 39.05%.
2. Untuk gempa arah transversal jembatan, perbedaan hasil perpindahan analisis NLTHA adalah 13.07% dari analisis respon spektrum. Sedangkan perbandingan perpindahan analisis NLTHA dan analisis pushover adalah 52.76%.

## Saran

Metode Analisis Pushover dapat diaplikasikan pada jembatan secara umum. Peraturan Jembatan (BMS 1992) masih menggunakan prosedur respon spektrum elastik desain yang dibagi dengan faktor-R (faktor reduksi gempa). Hal ini bersifat empiris dan tidak menggambarkan perilaku inelastik struktur sebenarnya. Oleh karena itu maka perlu dilakukan revisi peraturan gempa BMS 1992 dengan peraturan yang *state of the art*.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) L R F D . . 2 0 0 5 . *Bridge Design Specification, Interim Revision*. Washington, DC: AASHTO  
[https://www.google.co.id/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CDgQFjAC&url=https%3A%2F%2Fbookstore.transportation.org%2Fitem\\_details.aspx%3Fid%3D51&ei=txaJT7aCBMfYrQea1bjhCw&usg=AFQjCNH EktufBx8t1XHhslpc2eLKmavoA](https://www.google.co.id/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CDgQFjAC&url=https%3A%2F%2Fbookstore.transportation.org%2Fitem_details.aspx%3Fid%3D51&ei=txaJT7aCBMfYrQea1bjhCw&usg=AFQjCNH EktufBx8t1XHhslpc2eLKmavoA). (Accessed July 5, 2011)
- Applied Technology Council (ATC). 2003.. *Recommendation LRFD Guidelines For The Seismic Design Of Highway Bridges, Part 1: Specifications*.  
<https://www.google.co.id/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDgQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.atcouncil.org%2Fpdfs%2Ffatc49tocpart1.pdf&ei=OBaJT-WtEIXUrQfEkvm-Cw&usg=AFQjCNGciU8nhME1AOMKfVkwVhUFuKR72g>. (Accessed July 5, 2011)
- California Department of Transportation (Caltrans). 2006. *Seismic Design Criteria, Version 1.4*  
<http://www.dot.ca.gov/hq/esc/techpubs/manual/othermanual/other-engineeringmanual/seismic-design-criteria/sdc.html>  
(Accessed July 5, 2011)
- Chopra dan Goel. 2001. *Direct Displacement-Based Design: Use of Inelastic vs. Elastic Design Spectra*.  
[http://scholar.google.co.id/scholar\\_url?hl=en&q=http://ceenve3.civeng.calpoly.edu/goel/research/performance%2520based%2520design/pap\\_eeri.pdf&sa=X&scisig=AAGBfm36j1jBj1iCViDHMHJx4VBI5BmCyQ&oi=scholar&ei=lxelT4T1DM6qrAf45-mxCw&ved=0CBkQgAMoADAA](http://scholar.google.co.id/scholar_url?hl=en&q=http://ceenve3.civeng.calpoly.edu/goel/research/performance%2520based%2520design/pap_eeri.pdf&sa=X&scisig=AAGBfm36j1jBj1iCViDHMHJx4VBI5BmCyQ&oi=scholar&ei=lxelT4T1DM6qrAf45-mxCw&ved=0CBkQgAMoADAA)  
(Accessed July 5, 2011)
- , 2002. *A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings*  
[http://scholar.google.co.id/scholar\\_url?hl=en&q=http://psfeg.com/Downloads/chopra.pdf&sa=X&scisig=AAGBfm1-FfimeAWNsgx3UdvQeG9govL1lg&oi=scholar&ei=axeJT\\_LwLYLPPrQflv8neCw&ved=0CBgQgAMoATAA](http://scholar.google.co.id/scholar_url?hl=en&q=http://psfeg.com/Downloads/chopra.pdf&sa=X&scisig=AAGBfm1-FfimeAWNsgx3UdvQeG9govL1lg&oi=scholar&ei=axeJT_LwLYLPPrQflv8neCw&ved=0CBgQgAMoATAA). (Accessed July 5, 2011)
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) - 273, National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP). 1997. *Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*.  
<https://www.google.co.id/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.wbdg.org%2Fccb%2FDHS%2FARCHIVES%2Ffema273.pdf&ei=DhiJT-zbDIfsrAeR6aW9Cw&usg=AFQjCNEqRDKwlySrwr9GQqGmm1hCNPtba>  
(Accessed July 5, 2011)
- Kaliprasanna Sethy .2011. *Application Of Pushover Analysis To RC Bridges*, Department Of Civil Engineering, National Institute Of Technology, R o u r k e l a .  
<https://www.google.co.id/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCQOFjAA&url=http%3A%2F%2Fthesis.nitrkl.ac.in%2F2833%2F&ei=RiJT6TWNNoe8rAfO2rzOCw&usg=AFQjCNH21-fzCSXsz3cyxFVZG0LbGw2iJA>. (Accessed July 5, 2011)

- Kappos, A.J. 2005., *Modal Pushover Analysis As A Mean For The Seismic Assesment of Bridge Structure* [http://scholar.google.co.id/scholar?q=Modal+Pushover+Analysis+As+A+Mean+For+The+Seismic+Assesment+of+Bridge+Structure&hl=id&as\\_sdt=0&as\\_vis=1&oi=scholart&sa=X&ei=DfmIT9qHMsTirAfSoonfCw&ved=0CBkQgQMwAA](http://scholar.google.co.id/scholar?q=Modal+Pushover+Analysis+As+A+Mean+For+The+Seismic+Assesment+of+Bridge+Structure&hl=id&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart&sa=X&ei=DfmIT9qHMsTirAfSoonfCw&ved=0CBkQgQMwAA) (Accessed July 5, 2011)
- Kementerian Pekerjaan Umum. 1992. *Bridge Design Manual BMS*. Jakarta: Kementerian PU.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). 2001. *Comprehensive Specification For The Seismic Design of Bridges*. Washington, DC.: TRB. [https://www.google.co.id/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDkQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.trb.org%2Fpublications%2Fnchrp%2Fnchrp\\_rpt\\_472.pdf&ei=YhiJT8GTFY3LrQfvh5XPCw&usg=AFQjCNE38la1DQHNLjF7mQNwr9RuF5zPTw](https://www.google.co.id/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDkQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.trb.org%2Fpublications%2Fnchrp%2Fnchrp_rpt_472.pdf&ei=YhiJT8GTFY3LrQfvh5XPCw&usg=AFQjCNE38la1DQHNLjF7mQNwr9RuF5zPTw) (Accessed July 5, 2011)