

# ANALISIS NONLINIER GEMPA DALAM ARAH MELINTANG PADA KEPALA JEMBATAN INTEGRAL (SEISMIC NONLINEAR ANALYSIS IN TRANSVERSE DIRECTION FOR ABUTMENT OF INTEGRAL ABUTMENT BRIDGE)

Anton Surviyanto

Puslitbang Jalan dan Jembatan  
Jl. A.H. Nasution No.264, Bandung 40294  
e-mail: anton.surviyanto@pusjatan.pu.go.id  
Diterima: 4 September 2012, disetujui: 04 Desember 2012

## ABSTRAK

Jembatan integral merupakan tipe jembatan tanpa ada sambungan dengan lantai jembatan menerus dan terhubung secara monolit dengan dinding abutmen. Dalam analisis linier dan nonlinier struktur, dinding kepala jembatan dimodelkan sebagai dinding geser menggunakan beberapa teknik baik itu menggunakan elemen shell maupun kombinasi elemen frame. Teknik pemodelan yang umum digunakan adalah mid-pier frame untuk merepresentasikan kekakuan dinding dan frame horizontal (rigid arm). Dalam makalah ini, analisis statik nonlinier pushover dilakukan untuk jembatan abutmen integral. Dinding abutmen dimodelkan dengan elemen mid-pier frame dan elemen shell. Material nonlinier untuk model mid-pier diasumsikan dengan sendi plastis (interaksi PMM/aksial terhadap momen arah masing-masing), sedangkan model multilayer mempertimbangkan beton dan tulangan sebagai shell yang berlapis. Hasil kedua model dibandingkan dalam perilaku sistem struktur global. Hasil menunjukkan kurva pushover untuk kedua model serupa. Namun model mid-pier frame overestimasi kapasitas struktur untuk inkremental perpindahan lebih besar dari 0,038 m dibandingkan dengan model shell multilayer. Perpindahan struktur dari beberapa titik simpul yang berbeda cukup signifikan dengan selisih lebih dari 10% antar kedua model. Hal ini disebabkan oleh kekakuan rigid beam pada model abutmen dengan model mid-pier frame.

**Kata kunci:** jembatan abutmen integral, gempa arah transversal, dinding geser, analisis nonlinier, multilayer shell, sendi plastis, interaksi PMM

## ABSTRACT

Integral abutment bridge is joint less type of bridge, where bridge deck is continuous and connected monolithically with abutment wall. In the nonlinear analyses, the nonlinear material model of mid-pier frame is generally based on plastic hinge concept located on the plastic zones at the end of the structural elements or distributed along the member span length. The nonlinear behavior of the shell elements is generally modeled using multi layer shell element with layered material model. In this approach, the concrete and the reinforcement inside the structural elements are modeled respectively with different layers. In this study, different approaches for linear and nonlinear modeling of the shear walls in structural analyses of buildings are studied and applied to abutment of Integral Abutment-Bridge. The analyses results of different approaches are compared in terms of overall behavior of the structural systems. Results show that pushover curve for both models are identical. But, Mid-pier frame model gives overestimate in capacity of structure for displacement incremental more than 0.038 m compared with multi layer shell element. The displacement of structure is significantly different more than 10% for both models. This is because of the rigid beam stiffness of the mid-pier frame element abutment model.

**Keywords:** integral abutment bridge, earthquake transverse direction, RC shear wall, nonlinear analysis, multilayer shell, plastic hinges, PMM interaction

## PENDAHULUAN

Jembatan abutmen-integral (*Integral-Abutment Bridge*) merupakan tipe jembatan tanpa ada sambungan (*joint-less*), dengan lantai jembatan menerus dan terhubung secara monolit dengan dinding abutmen (Federal Highway Administration 2005).

Penelitian sebelumnya (Dicleli 2008; Dehne 2003; Shamsabadi 2006; Pekcan 2010; Vasheghani 2010; Roman 2002; Frosch 2009; Gucunski 2005) lebih fokus pada analisis gempa arah longitudinal, sedangkan perilaku struktur belum pernah dilakukan sebelumnya.

Menurut Fahjan (2010), dalam analisis linier dan nonlinier struktur, dinding dapat dimodelkan menggunakan beberapa teknik baik itu menggunakan elemen *shell* maupun kombinasi elemen *frame*. Teknik pemodelan yang umum digunakan adalah *mid-pier frame* untuk merepresentasikan kekakuan dinding dan frame horizontal (*rigid arm*) untuk memberikan sambungan yang baik dengan perpotongan komponen balok dan lantai. Formulasi elemen *shell* umumnya terdiri dari derajat kebebasan *out-of-plane (plate)* dan *in-plane (membrane)*.

Beberapa model analitis untuk non-linieritas material dinding yang digunakan adalah *out-of-plane (plate)* dan *in-plane (membrane)*. Model *mid-pier frame* berdasarkan konsep sendi plastis dan hubungan momen-rotasi bilinear. Untuk tujuan analisis, sendi plastis (interaksi *PMM*) dapat diasumsikan pada zona sendi plastis pada ujung elemen struktur ataupun didistribusikan sepanjang bentang elemen. Model sendi yang lebih komprehensif dapat dipertimbangkan menggunakan model serat untuk memprediksi perilaku sendi plastis. Material nonlinier elemen *shell* dapat dimodelkan menggunakan elemen *layered shell* dengan model material direksional. Dalam model, beton dan tulangan didalam elemen struktur dimodelkan dengan serat yang berbeda sehingga perilaku siklik material dapat disimulasikan dengan baik. Dalam kebanyakan aplikasi tidak meliputi model geser nonlinier untuk elemen struktur tersebut.

Dalam makalah ini, analisis statik nonlinier *pushover* dilakukan untuk jembatan abutmen integral. Dinding abutmen dimodelkan dengan elemen *mid-pier* dan elemen *shell*. Material nonlinier untuk model *mid-pier* diasumsikan

dengan sendi plastis *PMM*, sedangkan model *multilayer* mempertimbangkan beton dan tulangan sebagai *layered shell*. Hasil kedua model dibandingkan dalam perilaku sistem struktur global dengan membandingkan respon dan kinerja struktur akibat beban gempa arah transversal dengan model *mid-pier frame* dan *shell multilayer* pada abutmen.

## KAJIAN PUSTAKA

### Model linier dinding

Aplikasi metode elemen hingga untuk analisis struktur dengan dinding membutuhkan pemahaman aproksimasi dalam asumsi pemodelan untuk masing elemen. Dua prosedur pemodelan dan asumsi dijelaskan sebagai berikut:

### Model elemen *frame*

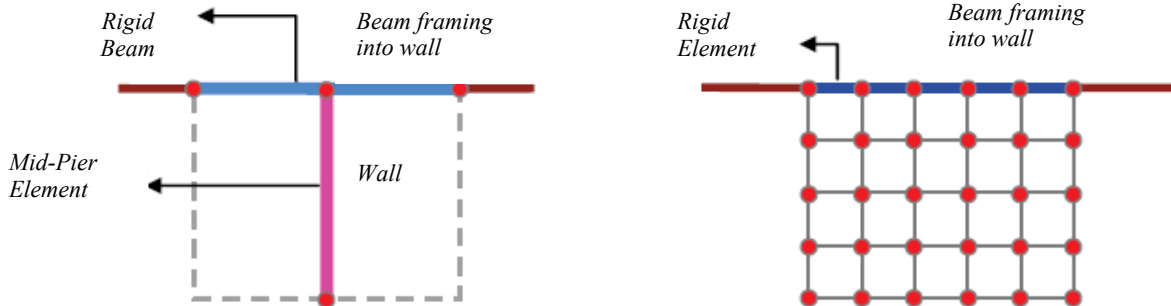
Pemodelan dinding menggunakan beberapa elemen *frame*. Teknik pemodelan yang umum digunakan adalah *mid-pier frame* untuk merepresentasikan kekakuan dinding dan frame horizontal (*rigid arm*) untuk memberikan sambungan yang baik dengan perpotongan komponen balok dan lantai (Gambar 1). Titik kritis yang penting dalam model ini adalah pemilihan properti kekakuan untuk *frame* horizontal. Kekakuan tak hingga dari *frame* bagian atas dapat menjadi over-estimasi dalam momen lentur terutama sambungan balok. Model ini banyak digunakan dalam praktis untuk memodelkan dinding struktur untuk analisis linier dan nonlinier. Hasil model ini tidak akurat dalam dinding kompleks dengan bukaan (*opening*).

### Model elemen *shell*

Elemen *shell* dapat digunakan secara efisien dalam analisis struktur dengan dinding. Elemen *shell* dipertimbangkan dalam desain *software* yang memiliki enam derajat kebebasan pada setiap titik simpul dan derajat kebebasan *in plane*, yang dapat kompatibel dengan model elemen hingga balok tiga dimensi. Perlu diketahui bahwa *shape function* bilinear digunakan untuk mendefinisikan *displacement field* elemen *quadrilateral*. Oleh karena itu, pemodelan dinding membutuhkan diskritisasi *mesh* untuk memperoleh perilaku yang realistis. Keuntungan menggunakan elemen *shell* adalah kemampuan untuk memodelkan dinding

kompleks yang panjang dan berinteraksi dengan model tiga dimensi. Meskipun formulasi elemen *shell* meliputi derajat kebebasan pengeboran, hasil analisis menunjukkan inkonsistensi dan sensitivitas momen pengeboran terhadap ukuran *mesh* dan kondisi pembebanan. Hal ini memberikan efek yang signifikan dalam momen lentur *in plane* balok yang terhubung dengan

dinding. Untuk menyelesaikan masalah ini, dalam dunia praktis, balok yang terhubung dengan dinding umumnya dimodelkan dengan sebuah perpanjangan elemen *shell* dinding (Gambar 1).



**Gambar 1.** Model elemen *mid-pier frame* dan *shell* untuk dinding geser (Fahjan 2010)

### Model material nonlinier dinding geser

Model elemen nonlinier dinding terdiri dari elemen *solid* nonlinier tiga dimensi, dua dimensi nonlinier *shell* elemen dan model yang disimplifikasi menggunakan *frame* elemen.

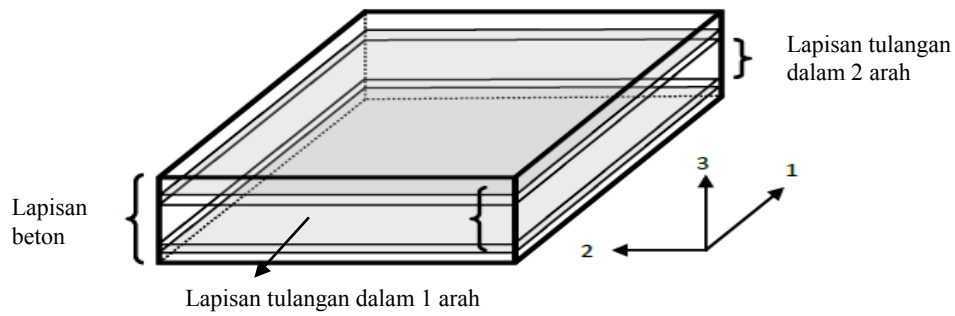
### Elemen hingga kontinum

Dinding dimodelkan dengan elemen kontinum menggunakan elemen *solid* nonlinier yang terdapat dalam *software* analisis *FE advanced* seperti *ANSYS*, *ABAQUS*, dan lain-lain. Elemen kontinum memberikan superitas dalam akurasi pemodelan detail dan tulangan. Tulangan dapat dimodelkan dalam tiga arah yang berbeda. Model plastisitas untuk beton berdasarkan teori *flow* plastisitas, kriteria leleh *Von Mises*, *isotropic hardening* dan aturan *flow*. Elemen kontinum *men-capture* respon perilaku yang penting seperti, interaksi aksial-lentur, deformasi geser in-elastis, efek *confinement* tulangan dalam perilaku beton, *compression softening*, dan *tension stiffening* beton. Meskipun demikian, model elemen kontinum membutuhkan jumlah yang besar dalam input parameter, model ini sangat efektif dalam analisis satu atau lebih elemen beton bertulang. Di sisi lain, model elemen kontinum masih tidak praktis diterapkan dalam analisis dan desain struktur secara keseluruhan.

### Elemen *shell multi-layer*

Dinding dimodelkan menggunakan *mesh* yang halus dari elemen *shell multilayer smeared*. Elemen *shell multilayer* ini berdasarkan prinsip mekanisme material komposit dan dapat mensimulasikan *coupled* lentur *in-plane/out-plane* dan *coupled* lentur-geser *in-plane* perilaku nonlinier dinding beton bertulang. Elemen *shell* dibuat menjadi beberapa lapisan dengan ketebalan yang berbeda. Properti material yang berbeda di-assign untuk masing-masing lapisan (Gambar 2).

Hal ini berarti bahwa tulangan di-*smeared* ke dalam satu lapisan atau lebih. Selama perhitungan elemen hingga, regangan aksial dan kurvatur lapisan tengah dapat diperoleh dalam satu elemen. Kemudian menurut asumsi bahwa *plane remains plane*, regangan dan kurvatur lapisan lainnya dapat dihitung. Kemudian tegangan yang berkorespondensi dapat dihitung dengan hubungan konstitutif material yang di-assign pada lapisan. Dari prinsip di atas, dapat terlihat bahwa performa struktur dinding dapat secara langsung terhubung dengan hukum konstitutif material. Untuk *performance based design*, rekomendasi *FEMA 273* mendefinisikan kriteria performa untuk lentur beton bertulang dalam rotasi plastis.

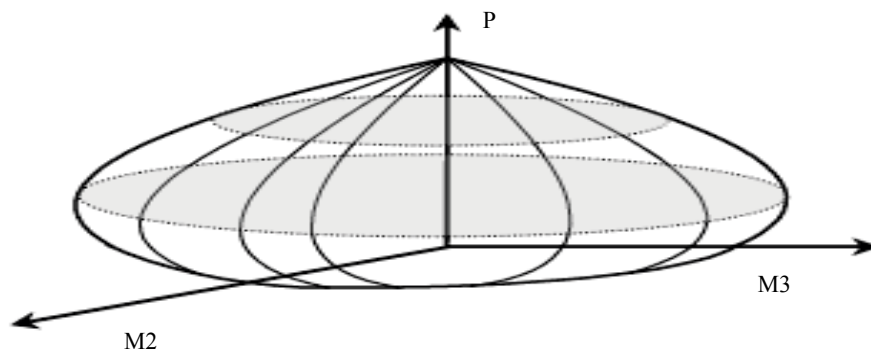


**Gambar 2.** Elemen *shell multi-layer* (Fahjan 2010)

### Sendi plastis (interaksi *PMM*)

Dinding dimodelkan dengan elemen *frame* komposisi. Model *frame equivalen* dapat diasumsikan dalam *mid-pier* dan balok kaku. Nonlinieritas material dinding dapat dimodelkan dengan mempertimbangkan sendi plastis pada elemen *mid-pier*. Sendi plastis *frame* struktur dianalisis dengan meletakkan pegas plastik kaku pada lokasi kelelahan yang diharapkan. Bagian elemen antara dua pegas plastik kaku tepat elastik sempurna. Semua deformasi in-elastis diasumsikan terjadi pada pegas ini. Model nonlinier *mid-pier frame* umumnya berdasarkan konsep sendi plastik dan hubungan momen-rotasi bilinear (Gambar 3).

Untuk tujuan analisis, sendi plastis (interaksi *PMM*) dapat diasumsikan dalam zona plastis pada ujung elemen struktur maupun didistribusikan sepanjang bentang elemen. FEMA 273 mengajukan properti sendi plastis untuk dinding dengan hubungan momen-rotasi bilinear yang mendefinisikan kriteria penerimaan. Model sendi plastis *PMM* yang lebih komprehensif dapat dihitung menggunakan model serat untuk memprediksi perilaku sendi plastis. Dalam praktis, sendi plastis di-assign pada model *mid-pier* dapat digunakan secara langsung dalam analisis nonlinier dinding.



**Gambar 3.** Sendi plastis (interaksi *PMM*), (FEMA 1997)

Dua model analisis untuk studi kasus jembatan abutmen integral dipertimbangkan menggunakan teknik pemodelan dinding abutmen yang berbeda antara lain:

1. Dinding dimodelkan dengan elemen *shell multilayer*

Material model *shell* nonlinier, hubungan tegangan-regangan Mander diadopsi untuk

merepresentasikan model material beton dengan regangan tekan maksimum adalah 0,002 dan regangan ultimit adalah 0,003. Model nonlinier kinematik dipilih untuk baja tulangan dengan *strain hardening* 0,01 dan kapasitas ultimit regangan 0,09. Tulangan dalam arah longitudinal dan transversal merupakan lapisan yang terpisah untuk setiap

arahnya, digunakan untuk memperhitungkan tulangan atas dan bawah dalam penampang.

2. Dinding dimodelkan dengan *mid-pier frame* dengan sendi plastis yang didefinisikan menurut FEMA 273. *Mid-pier* dimodelkan sebagai elemen *frame* dengan parameter penampang dinding. Ketebalan balok kaku persegi panjang adalah sama seperti ketebalan dinding. Sendi plastis *PMM* didefinisikan menurut FEMA 273 dengan distribusi tulangan seperti pada Gambar 5. Level gaya aksial yang diakomodasi dari kombinasi beban mati sedangkan tulangan transversal tidak dimasukkan.

Untuk menginvestigasi perilaku nonlinier dengan model dinding abutmen yang dipilih, Analisis *pushover* dilakukan. Analisis *pushover* merupakan prosedur statik nonlinier dalam kompatibilitas pembebanan struktur dengan *modal shape* yang ditentukan yang secara inkremental ditingkatkan. Pada setiap inkremental, sendi lemah dan mode runtuk pada struktur ditemukan. Kurva *pushover* mendefinisikan perubahan perpindahan atas dengan hubungan gaya geser dasar yang diterapkan pada semua inkremental. Pada setiap inkremental perilaku setiap elemen struktur dapat diteliti. Untuk mempelajari performa struktur akibat level gaya gempa yang dispesifikasikan dengan spektrum desain,

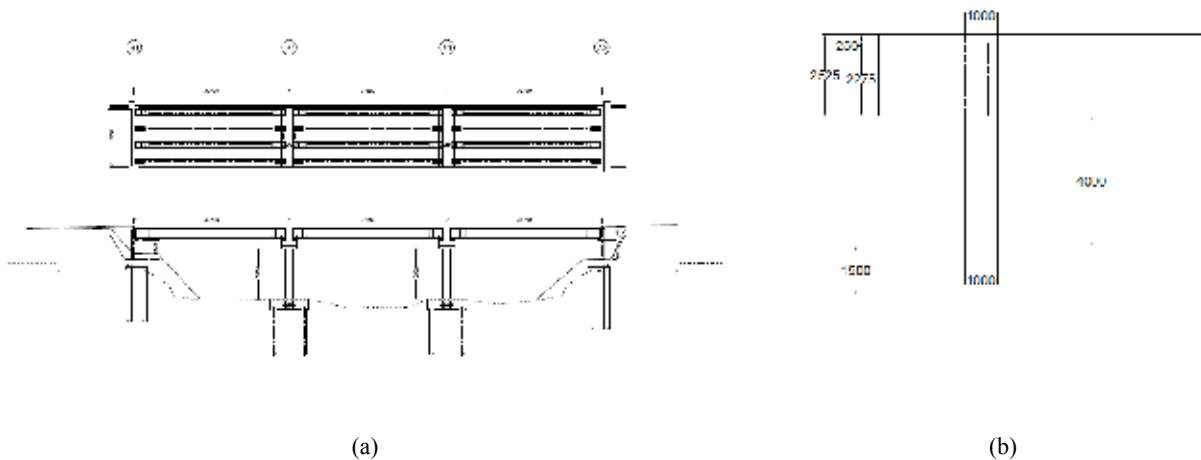
konsep titik kinerja direkomendasikan untuk memenuhi aturan *equal displacement*.

## HIPOTESIS

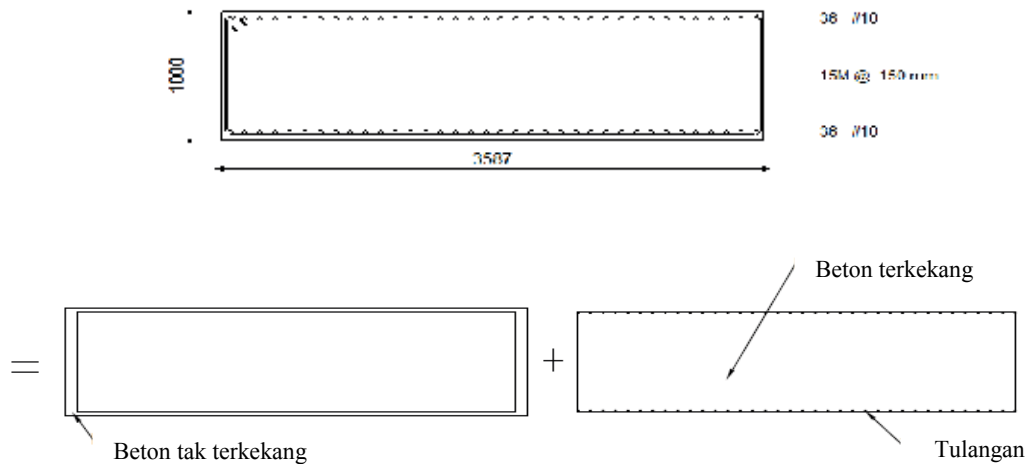
Analisis nonlinier gempa dalam arah melintang dengan model *shell multilayer* memberikan nilai kinerja struktur yang tidak konservatif dibandingkan dengan model *mid-pier frame* yang biasa digunakan dalam desain praktis.

## METODOLOGI

Kasus jembatan adalah struktur beton prestress tiga bentang dengan tipe abutmen integral tanpa *skew*. Tiga bentang dengan 3 x 30 m dengan dua kolom. Kolom dengan tinggi 10 m dengan penampang lingkaran 1,5 m. Fondasi berupa bored pile. Dalam arah transversal, kekakuan transversal meliputi pile dan dinding abutmen. Struktur diasumsikan sistem portal kaku pada setiap perletakan dan bentang menerus pada perletakan jepit (*bent*). Tampak atas tampak samping dan potongan melintang dapat dilihat pada Gambar 4(a) dan 4(b), sedangkan penampang abutmen integral dan penulangan dalam model struktur pada Gambar 5.



**Gambar 4.** (a) Tampak jembatan dan (b) Penampang abutmen jembatan abutmen integral

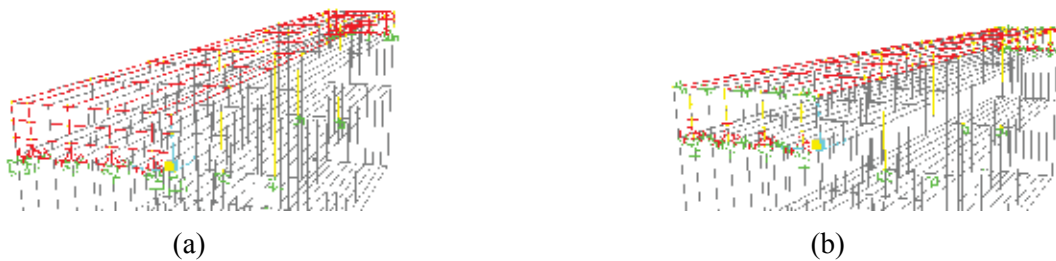


**Gambar 5.** Distribusi penulangan abutmen dalam skema *multilayer* pemodelan struktur

Jembatan abutmen integral dimodelkan menggunakan program SAP 2000 (Gambar 6). Program mampu melakukan analisis tiga dimensi. Model matematika tiga dimensi dibuat merefleksikan geometri, kondisi batas, perilaku material dari jembatan. Pendekatan massa kontinu digunakan daripada *lump mass*, maka dapat meningkatkan hasil analisis dinamik. Fondasi pile dimodelkan dengan merestrain perpindahan vertikal dan rotasi namun memasang pegas translasional pada arah longitudinal dan transversal, konsisten dengan deformasi yang diharapkan pada pile cap dan tanah disekeliling. Pegas ini mengakomodasi kekakuan lateral pile dan tekanan pasif tanah pada masing-masing arah. Momen inersia efektif

pada kolom digunakan dalam analisis berdasarkan spesifikasi ATC-49. Momen inersia efektif digunakan berdasarkan NCHRP 12-49.

Analisis nonlinier *pushover* diterapkan pada model struktur dengan model *shell multilayer* dan model *mid-pier frame*. Prosedur analisis *pushover* mengacu pada peraturan AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials 2005), FEMA 273 (Federal Emergency Management Agency 1997), ATC-49 (Applied Technology Council 2003) dan NCHRP 12-49 (Transportation Research Board 2001) dan penelitian yang dikembangkan oleh Chopra (2001 dan 2002), Kaliprasanna (2011) dan Kappos (2005).



**Gambar 6.** Pemodelan struktur jembatan abutmen integral 3D (a) model elemen *shell* dan (b) model *mid-pier frame*

## HASIL DAN ANALISIS

Dinding abutmen dengan dua lapis tulangan arah memanjang dan melintang dapat dimodelkan dengan teknik yang berbeda dengan memperhitungkan nonlinieritas material beton bertulang (*shell multilayer* dan *mid-pier frame* dengan sendi plastis). Karakteristik sendi plastis dari dinding abutmen dapat didefinisikan menggunakan rekomendasi FEMA 273 atau berdasarkan properti sendi pada serat dinding. Untuk memeriksa kinerja dinding dengan model sendi plastis pada *mid-pier frame* dapat diperiksa dengan rekomendasi kriteria penerimaan FEMA 273.

Perilaku nonlinier *shell multilayer* dapat diperiksa dengan memeriksa tegangan dalam beton dan lapisan tulangan, kriteria ATC 49 dan FEMA 273 tidak dapat diterapkan.

Analisis *pushover* dilakukan pada kedua model struktur jembatan secara global, untuk menentukan perilaku beban-perpindahan lateral arah melintang. Oleh karena prosedur kapasitas desain yang digunakan untuk desain *pierhead* dan fondasi, maka elemen-elemen ini tidak dizinkan leleh.

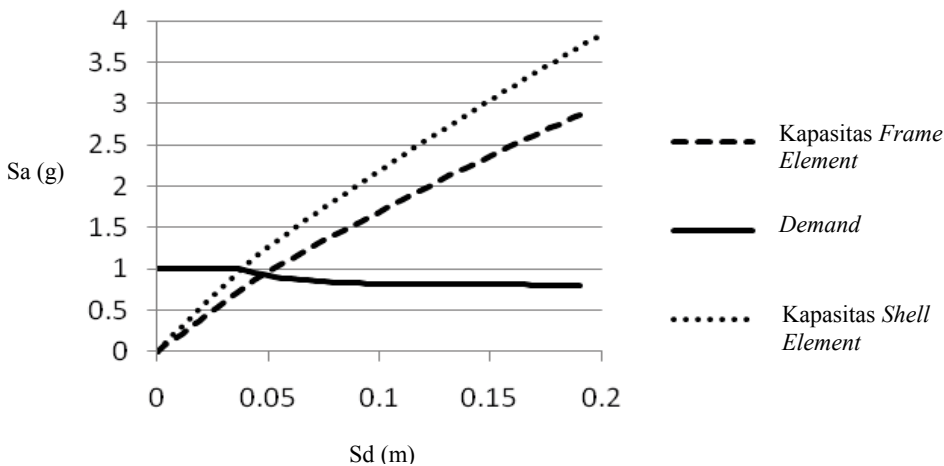
Dari data model SAP 2000, kebutuhan perpindahan arah melintang pada pusat gravitasi pier 1 akibat gempa arah melintang adalah,  $\delta_T = 0,04379$  m. Periode getar pada ujung akhir *palteau* respon spektrum desain,  $T_s = 0,56$  detik.

Periode getar melintang model SAP 2000 jembatan,  $T_T = 0,41$  detik. Faktor modifikasi respon,  $R = 4$  yang digunakan dalam desain. Pertama, penentuan *short period modifier* berdasarkan persamaan 8.3.4-3 ATC-49,  $T^* = 1,25T_s = 0,7$  detik. Oleh karena  $T^* > T_T$  dan  $T^* > T_L$ , maka :

$$R_dT := \left(1 - \frac{1}{R}\right) \cdot \frac{1,25 \cdot T_s}{T_T} + \frac{1}{R} \dots\dots\dots(1)$$

Dari persamaan diatas diperoleh  $R_dT = 1,53$ . Kemudian penentuan perpindahan modifikasi untuk gempa arah melintang adalah  $\delta_mT = R_dT \cdot \delta_T = 0,067$  m. Maka kebutuhan perpindahan target untuk analisis *pushover* arah melintang adalah  $1,5 \cdot \delta_mT = 0,101$  m diperoleh dari persamaan 8.3.5-1 ATC 49 yaitu  $1,5 \cdot \delta_mT \leq \delta_{capacity}$ .

Analisis *pushover* dilakukan pertama pada kontrol beban akibat beban gravitasi pada struktur (*push* gravitasi). Kemudian analisis *pushover* lateral dalam arah longitudinal dan melintang dilakukan dalam kontrol perpindahan dimulai dari akhir *push* gravitasi. Hasil yang diperoleh dari analisis ini diperiksa terhadap kebutuhan seismik Bandung (PGA=0,4g). *Pushover* dilakukan mengikuti pola beban mode pertama untuk arah melintang.



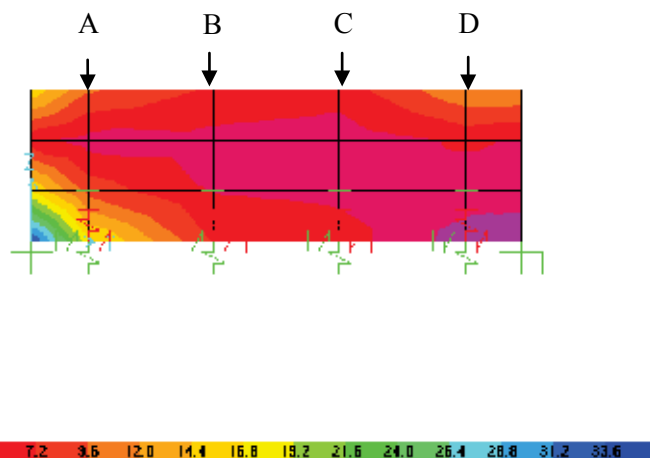
**Gambar 7.** Perbandingan Sa terhadap Sd dalam format kurva *ADRS pushover* arah melintang jembatan



Gambar 7 menunjukkan spesifikasi titik kinerja kedua model dalam arah melintang, yang diperoleh dari titik kurva spektrum kapasitas dan spektrum *demand* yang tereduksi dalam format *Acceleration-Displacement Response Spectrum (ADRS)*. Dari Gambar 7, titik kinerja struktur terjadi pada perpindahan 0,038 m dan pada redaman efektif 5,8% untuk model elemen *shell multilayer*, sedangkan mid pier frame titik kinerja struktur terjadi pada perpindahan 0,051 m dan pada redaman efektif 6,5% dalam arah melintang. Sendi *PMM* mendominasi pada *top* dan *bottom pier* serta rotasi struktur pada titik kinerja adalah

0,00011 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. Oleh karena itu level kinerja elemen struktur dan kurva perilaku global telah dipertimbangkan.

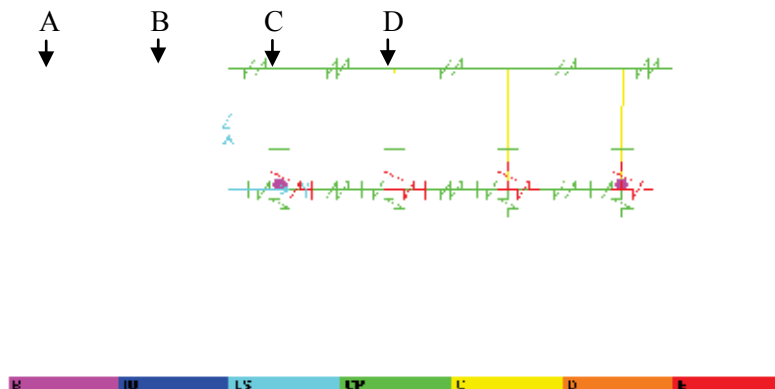
Berikut adalah hasil analisis *pushover* dengan model *shell multilayer* (Gambar 8) dan model *mid-pier frame* (Gambar 9).



**Gambar 8.** Kontur tegangan *Von Misses* model *shell multilayer*

Gambar 8 menunjukkan kinerja kepala jembatan struktur jembatan abutmen integral dengan model *shell multilayer* akibat beban *pushover* dengan titik kinerja 0,038 m. Pada Gambar 8 dapat terlihat bahwa tegangan pada

ujung bawah kiri (warna biru) sebesar 33,6 MPa, yang berarti telah melebihi tegangan tekan beton. Pada ujung bawah kanan tengah beton sebesar 2,4 MPa yang berarti telah mengalami sendi plastis yang melebihi tegangan tarik beton.



**Gambar 9.** Kinerja abutmen model *mid-pier frame*



Gambar 9 menunjukkan kinerja kepala jembatan struktur jembatan abutmen integral dengan pemodelan *mid-pier frame*. Dari Gambar 9 dapat terlihat bahwa kepala jembatan mengalami sendi plastis pada titik kinerja 0,051 m dalam kategori level B-IO (antara Elastik dan *Immediate Occupancy*).

## PEMBAHASAN

Berikut ini adalah perbandingan hasil analisis *pushover* dan analisis nonlinier *shell multilayer* memberikan hasil perpindahan struktur pada step ke-21 analisis *pushover* secara global yang seperti pada Tabel 1 berikut.

**Tabel 1.** Perpindahan struktur pada titik-titik simpul

Titik Simpul	Model <i>Shell Multilayer</i> [m]	Model <i>Mid-Pier Frame</i> [m]
A	0,00143	0,00060
B	0,00134	0,00060
C	0,00121	0,00060
D	0,00115	0,00060

Dari Tabel 1 diatas dapat disimpulkan perpindahan struktur dari beberapa titik simpul yang berbeda sangat signifikan dengan selisih lebih dari 10% antar kedua model. Berdasarkan Gambar 7 dapat disimpulkan bahwa *Model mid-pier frame* overestimasi kapasitas struktur untuk inkremental perpindahan lebih besar dari 0,038 m dibandingkan dengan model *shell multilayer*. Kedua hal ini disebabkan kekakuan balok yang sangat kaku dengan model *rigid beam* pada *Model mid-pier frame* sangat dipengaruhi perilaku dan kekakuan struktur dalam arah transversal. Oleh karena itu perlu teknik pemodelan dan pengaturan kekakuan *rigid beam* pada model sehingga deformasi/perpindahan struktur pada dinding kepala jembatan sama dengan perilaku yang diharapkan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil numerik untuk model yang berbeda model konfigurasi dinding abutmen dan analisis yang berbeda dapat disimpulkan :

1. Dengan memperhitungkan titik kinerja jembatan ini yang relatif sama dengan 0,038 m dan 0,051 m (perbedaan kurang dari 10%)

maka kurva *pushover* untuk kedua model adalah mendekati identik. Status sendi untuk kedua model pada titik kinerja yang tersedia hampir memiliki pola yang sama.

2. Estimasi model *mid-pier frame* melampaui kapasitas struktur untuk perpindahan bertahap lebih besar dari 0,038 m dibandingkan dengan model *shell multilayer*. Model *shell multilayer* kurang konservatif dibandingkan model *mid-pier frame*.
3. Perpindahan struktur dari beberapa titik simpul yang berbeda sangat signifikan dengan selisih lebih dari 10% antar kedua model. Kedua hal ini disebabkan kekakuan balok yang sangat kaku dengan model *rigid beam* pada model *mid-pier frame* sangat mempengaruhi perilaku dan kekakuan struktur dalam arah transversal.

### Saran

1. Model *shell multilayer* sebaiknya digunakan untuk kajian deformasi perpindahan struktur pada kepala jembatan.
2. Model *mid-pier frame* perlu penyesuaian kekakuan pada *rigid beam* model melalui kajian yang lebih lanjut.
3. Untuk desain praktis dapat digunakan model *mid-pier frame* yang lebih konservatif.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. 2005. *Bridge Design Specification, Interim Revision*. Washington, DC.: AASHTO.
- Applied Technology Council (ATC) 49. 2003. "Recommendation LRFD Guidelines for The Seismic Design of Highway Bridges", Part 1: Specifications.
- California Department of Transportation (Caltrans). 2006. *Seismic Design Criteria, Version 1.4*. Sacramento: California Department of Transportation.  
<http://www.dot.ca.gov/hq/esc/techpubs/manual/othermanual/other-engin-manual/seismic-design-criteria/sdc.html>
- Chopra & Goel. 2001. "Direct Displacement-Based Design: Use of Inelastic vs. Elastic Design Spectra". *Earthquake Engineering Research Institute (EERI). Earthquake Spectra* 17, ( 1): 47-64.

- , 2002. "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings". *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*; 31:561–582.
- Dehne, Youssef. 2003. "Seismic Analysis of Integral Abutment Bridge: Scotch Road I-95 Project". In *Proceedings, 16<sup>th</sup> Annual ASCE Engineering Mechanics Conference*. Washington: ASCE.
- Dicleli, M. and Semih Erhan. 2008. "Effect of Soil and Substructure Properties on Live-Load Distribution in Integral Abutment Bridges", *Journal of Bridge Engineering* 13(5): 527-539.
- Eugenia Roman. 2002. "Design Details of Integral Bridges" In *Proceedings of the 15 Engineering Mechanics Conference*. New York: ASCE.
- Fahjan, Y.M. 2010. "Nonlinear Analysis Method for Reinforcement Concrete Building with Shear Wall", *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering (14 th ECEE)*. Ohrid: Republic of Macedonia.
- Federal Emergency Management Agency. 1997. *Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. FEMA Publication 273. Washington, DC.: FEMA.
- Federal Highway Administration. 2005 – "Integral Abutment and Jointless Bridges" In *Proceedings of the Integral Abutment and Jointless Bridges, (IAJB 2005)*, Illinois: FHA.
- Frosch, Robert J., Michael E. Kreger and Aaron M. Talbott. 2009. *Earthquake Resistance of Integral Abutment Bridges*. Indiana: Indiana Department of Transportation and Purdue University.
- Gucunski, Nenad. 2005. *Seismic Analysis of Retaining Walls, Buried Structures, Embankments, and Integral Abutment*. New Jersey: New Jersey Department of Transportation.
- Kappos, A.J., et al 2005. "Modal Pushover Analysis as a Mean for The Seismic Assessment of Bridge Structure". In *Proceeding of the 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures*. Greece: EAEE.
- Kementerian Pekerjaan Umum. 1992. *Bridge Design Manual BMS*. Jakarta: Kementerian PU.
- National Cooperative Highway Research Program. 2001. "*Comprehensive Specification for The Seismic Design of Bridges*". Washington, DC.: TRB.
- Pekcan, Gokhanet., et al 2010. *Seismic Performance of Steel Plate Girder Bridges with Integral Abutments*. FHWA-HIF-11-043. New Jersey, FHWA.
- Sethy, Kaliprasanna. 2011. Application of Pushover Analysis to RC Bridges. Thesis. National Institute of Technology.
- Shamsabadi, Anoosh., et al 2004. "Three Dimensional Nonlinear Seismic Soil-Foundation-Structure Interaction Analysis of a Skewed Bridge Considering Near Fault Effects", In *Proceeding US-Turkey Soil-Structural Interaction Workshop*. California: CSNI.
- Vasheghani-Farahani, Reza QiuHong Zhao and Edwin G. Burdette. 2010. "Seismic Analysis of Integral Abutment Bridge in Tennessee, Including Soil-Structure Interaction" *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 2201: 70 -79.