

# **Analisis Kapasitas Struktur dengan Incremental Dynamic Analysis (IDA) & Pendekatan Modal Pushover Analysis (MPA) Struktur Beton Bertulang**

Bambang Budiono dan Ferry Wibowo

## **1. PENDAHULUAN**

Perkembangan dalam dunia komputerisasi memungkinkan perhitungan analisis menjadi lebih akurat namun pada waktu yang sama analisis yang dilakukan menjadi lebih kompleks. Seperti dari analisis statik elastik, dinamik elastik, statik nonlinier, dan pada akhirnya dinamik nonlinier yang menghasilkan analisis yang lebih akurat. Namun pada umumnya engineer lebih menyukai menggunakan statik nonlinier (pushover) dari pada dinamik nonlinier untuk menentukan *seismic demands*.

Dengan statik nonlinier pushover atau metode spektrum kapasitas dapat diperoleh perilaku struktur secara keseluruhan, dari elastis, leleh dan akhirnya runtuh, dengan cara menaikkan besarnya gaya geser statik secara monotonik yang mengikuti pola distribusi tinggi struktur sampai target displacement tercapai. Baik distribusi gaya dan target displacement didasarkan atas asumsi bahwa respon yang dihasilkan dikontrol oleh mode yang dominan dan mode shape yang tetap tidak berubah setelah struktur leleh.

Seperti pada pushover, dengan menaikkan besarnya gaya gempa yang ada; maka satu analisis riwayat waktu akan menghasilkan satu incremental dari Incremental Dynamic Analysis (IDA) yang konsep awalnya dikemukakan oleh Bertero dan pada akhirnya diadopsi oleh FEMA.

Performance-based earthquake engineering (PBEE) merupakan perkiraan perilaku struktur pada beban gempa, PBEE memerlukan estimasi dari seismic demand dan kapasitas dari struktur. Salah satu metode alternatif bertujuan sama dengan PBEE adanya Incremental Dynamic Analysis. Metode ini memerlukan analisis nonlinier riwayat waktu dari struktur untuk suatu pergerakan tanah, yang diskalakan untuk berbagai intensitas dari elastis sampai akhir ketidakstabilan dinamik global, hingga terbentuk respon dari seluruh struktur. Dari hasil IDA memungkinkan untuk diperoleh kapasitas global dari struktur yang berkorespondensi dengan beberapa tingkat batas, seperti immediate occupancy (IO), collapse prevention (CP), atau global instability (GI).

Mengingat perhitungan IDA dengan menggunakan analisis riwayat waktu sangat kompleks maka perlu dilakukan pendekatan untuk menghitung seismic demands dari struktur, yaitu dengan modal pushover analysis (MPA). MPA dikembangkan untuk meningkatkan pushover konvensional dengan mengikutkan kontribusi mode yang lebih tinggi untuk seismic demands (Chopra & Goel 2002). Sekarang pada umumnya perhitungan MPA melibatkan mode pertama, dua mode atau tiga mode; hal ini mirip prosedur FEMA yang menggunakan dua atau tiga distribusi gaya lateral. MPA didasarkan pada tiga asumsi utama : (1) Kopel antara koordinat modal dari lelehnya sistem dapat diabaikan, (2) respon puncak inelastik dari sistem berderajat banyak (MDF) berhubungan dengan masing-masing distribusi gaya modal dapat ditentukan dari analisis pushover dan (3) respon total dapat ditentukan dengan mengabungkan respon puncak modal dengan aturan

kombinasi modal standar. MPA mempunyai tingkat akurasi yang sama dengan analisis respon spektra

## 2. INCREMENTAL DYNAMIC ANALYSIS

Incremental Dynamic Analysis (IDA) adalah prosedur yang dikembangkan untuk mengestimasi secara akurat respon gempa (seismic demand) dan kapasitas dari struktur. Prosedur tersebut membutuhkan respon riwayat waktu non linier dari pergerakan tanah, respon tersebut diskalakan untuk berbagai besaran, sehingga dapat dihasilkan respon keseluruhan struktur, dari perilaku elastik sampai dengan perilaku inelastik.

Adapun persamaan gerak respon riwayat waktu tersebut adalah:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \text{sign } \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t)$$

Persamaan matriks ini memrepresentasikan N buah persamaan differensial nonlinier untuk N buah displacement tingkat  $u_i(t) = 1, 2, \dots, N$ .

Pada analisis nonlinier, kekakuan struktur berubah-ubah nilai tiap waktu, ketika pembebanan awal, unloading maupun reloading.

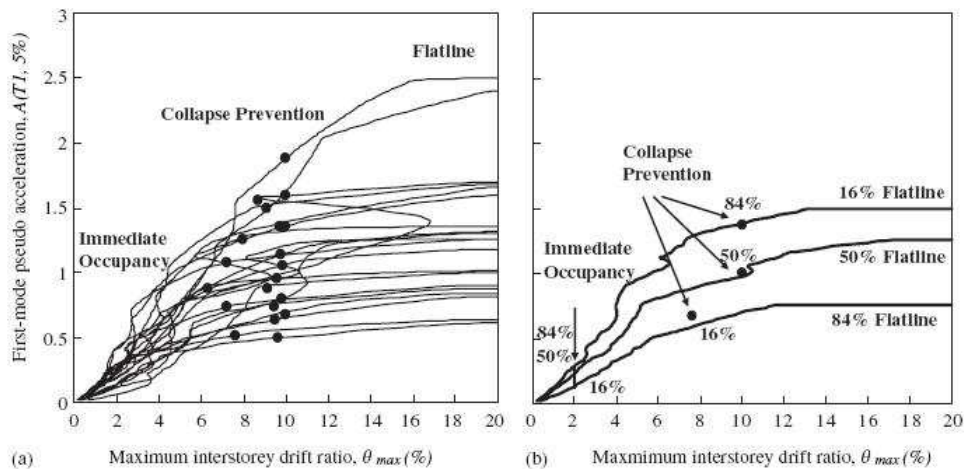
Penyelesaian numerik dari persamaan di atas harus diulang pada setiap waktu dengan penambahan  $\Delta t$ , yang harus singkat, sesingkat mungkin untuk memastikan bahwa prosedur numerik tersebut konvergen, tetap stabil, dan memberikan hasil yang akurat. Beberapa metode penyelesaian nonlinier terdapat pada beberapa buku dynamic of structures karangan : Clough and Penzien, Humar, dan Chopra.

Beberapa tujuan yang didapat dari analisis IDA adalah:

- Lebih mengerti perubahan respon alami struktur seiring peningkatan intensitas pergerakan tanah.
- Menghasilkan estimasi kapasitas dinamik dari sistem struktur global.
- Pada kumpulan grafik IDA, dapat dilihat bagaimana suatu struktur stabil atau tidak terhadap berbagai jenis pergerakan tanah.

Hasil dari IDA merupakan plot grafik dari intensitas pergerakan tanah versus parameter demand struktur. Parameter intensitas struktur dapat berupa  $A(T_{1,5\%})$  percepatan absolut struktur dengan periode elastik mode pertama dan rasio redaman 5%. Sedangkan untuk parameter demand struktur dapat berupa  $\theta_{\text{roof}}$ , rasio drift puncak di atap yang didefinisikan displacement atap dibagi tinggi bangunan, dapat pula berupa  $\theta_{\text{max}}$  yaitu maksimum dari semua rasio antar tingkat, didefinisikan sebagai displacement antar tingkat dibagi tinggi antar tingkat.

Pada dasarnya pergerakan tanah dapat dikelompokkan menjadi 3 bentuknya, yaitu 16%, 50% dan 84% dari kapasitas struktur (Lihat gambar 1)



Gambar 1. Kurva IDA dan Kapasitas Keadaan Batas Bangunan 9 Lantai untuk SAC-Los Angeles: (a) Kurva IDA dengan 20 Pergerakan Tanah (b) Pengelompokan Kurva IDA

### 3. MODAL PUSHOVER ANALYSIS

Prosedur MPA biasa digunakan untuk mengestimasi seismic demand akibat tiap pergerakan tanah yang mempunyai intensitas yang berbeda-beda selain dengan nonlinier RHA. Meskipun teori analisis modal tidak berlaku untuk sistem inelastik, namun diijinkan untuk prosedur MPA.

Dalam prosedur MPA, puncak respon bangunan karena  $P_{eff,n}(t)$  atau demand modal puncak  $r_n$  ditentukan dengan statik nonlinier atau analisis pushover dengan distribusi gaya modal  $S_n^* = m\phi_n$  untuk masing-masing mode, dengan kata lain gaya gempa perlantainya adalah  $F_{in} = \frac{MPF_n m_i \phi_{in}}{\sum MPF_n m_i \phi_{in}}$ . Untuk memperoleh respon total dari struktur maka respon tiap mode dikombinasikan dengan aturan kombinasi modal (SRSS) pada tiap intensitas pergerakan tanah.

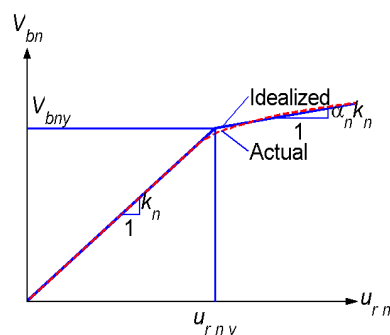
Berdasarkan teori dinamika struktur, teori MPA sangatlah menarik sebab teori tersebut menghindari RHA nonlinier dari struktur. Selain menghitung tiap demand dari modal  $r_n$  membutuhkan satu analisis statik nonlinier dan satu RHA nonlinier dari sistem 'modal' SDF dan demand 'modal' hanya perlu ditentukan untuk beberapa mode awal dari struktur (pada umumnya 2 atau 3). Untuk selanjutnya kekakuan elastik dari kurva gaya-deformasi untuk sistem modal SDF didefinisikan sebagai kuadrat frekuensi modal, hal tersebut untuk menghindari kompleksnya prosedur IDA.

Dalam mengaplikasikan MPA untuk mendapatkan kurva IDA, analisis mode ke-n dari struktur hanya perlu diimplementasikan sekali, sebab hal itu sudah cukup memberikan semua informasi yang diperlukan untuk mengestimasi seismic demand karena berbagai pergerakan tanah yang diskalakan untuk berbagai tingkat intensitas. Informasi dari MPA yang diperlukan untuk mendapatkan IDA adalah displacement atau  $u_m$  untuk tiap tingkat intensitas.

#### 4. DEMAND MODAL PUSHOVER ANALYSIS

Untuk mencari besarnya deformasi pada lantai atap dapat digunakan beberapa metode, antara lain: analisis respon riwayat waktu nonlinier SDF, spektra desain inlesatik atau dengan persamaan empiris.

Untuk respon riwayat waktu nonlinier SDF dapat mempergunakan bantuan progam nonlin, namun terlebih dahulu kurva pushover harus diidealisasikan menjadi bilinear.



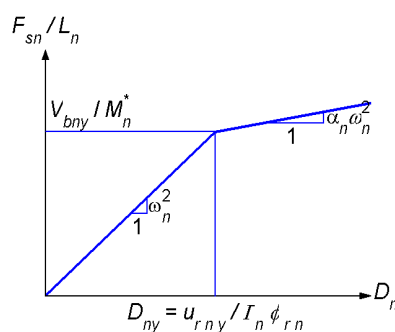
Gambar 2. Idealisasi Kurva Pushover menjadi Bilinear

Kemudian melakukan konversi properties struktur MDF menjadi SDF.

$$\frac{F_{sny}}{L_n} = \frac{V_{bny}}{M^*} \qquad D_{ny} = \frac{u_{rny}}{MPF \cdot \phi_{rny}}$$

dimana  $M^*$  adalah massa efektif.

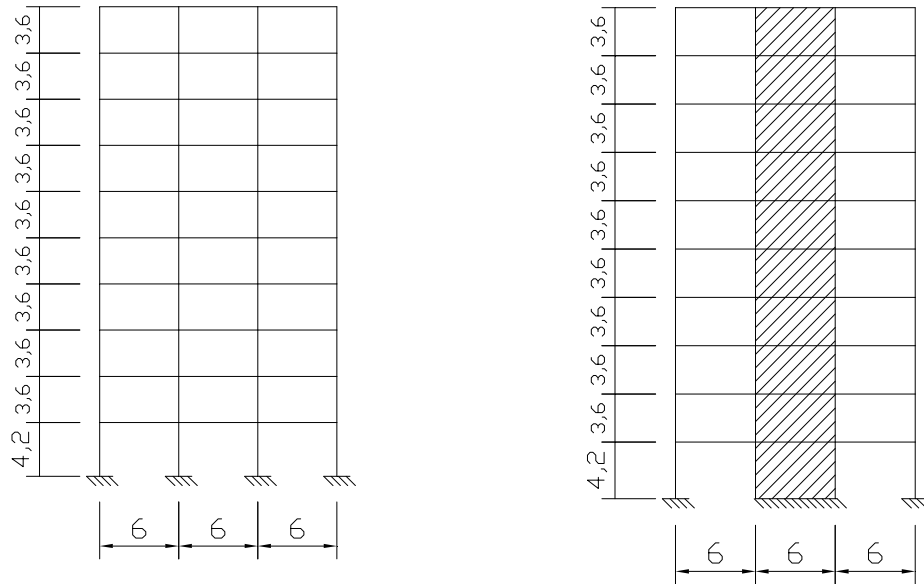
Kurva pushover yang telah diidealisasi tersebut, kemudian diubah menjadi kurva gaya-deformasi dengan parameter SDF.



Gambar 3. Kurva Gaya-Deformasi SDF

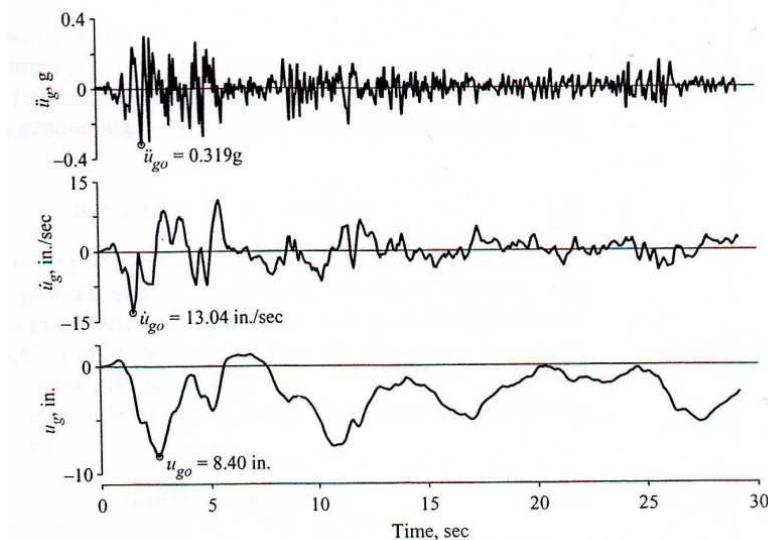
#### 5. APLIKASI IDA dan MPA PADA STRUKTUR BETON BERTULANG

Metode ini telah dicoba pada bangunan struktur beton open frame dan berdinding geser 10 lantai. Dengan model struktur 2D seperti berikut:



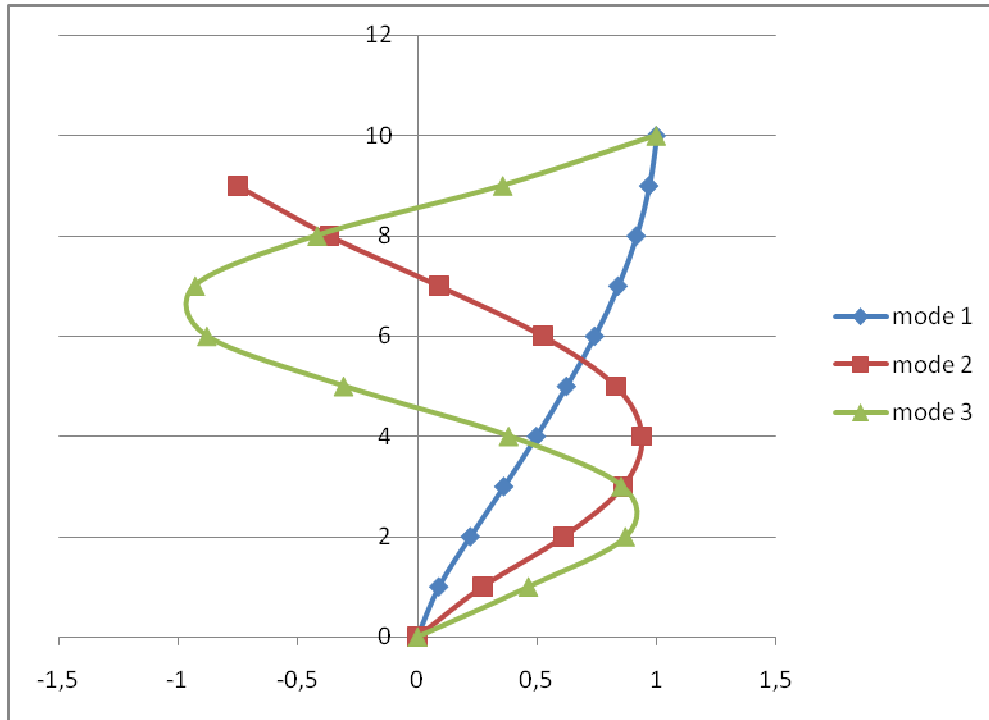
Gambar 4. Pemodelan Struktur 2D

Untuk analisis respon riwayat waktu menggunakan beban gempa El-Centro N-S 1940 dengan intensitas 0.2g, 0.4g, 0.6g, 0.8g, 1.0g, 1.2g, 1.4g, 1.6g, 1.8g, 2.0g, 2.3g, dan 2.5g.

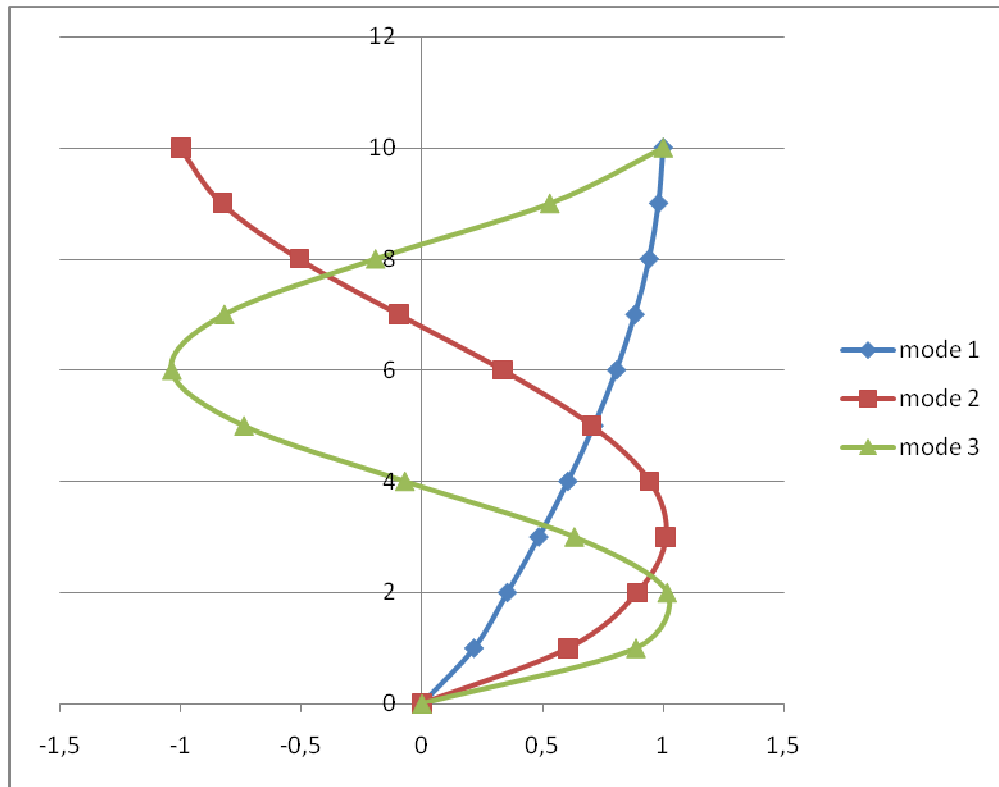


Gambar 5. Percepatan, Kecepatan dan Displacement dari Gempa El-Centro, 18 Mei 1940

Adapun mode struktur beton bertulang tersebut :

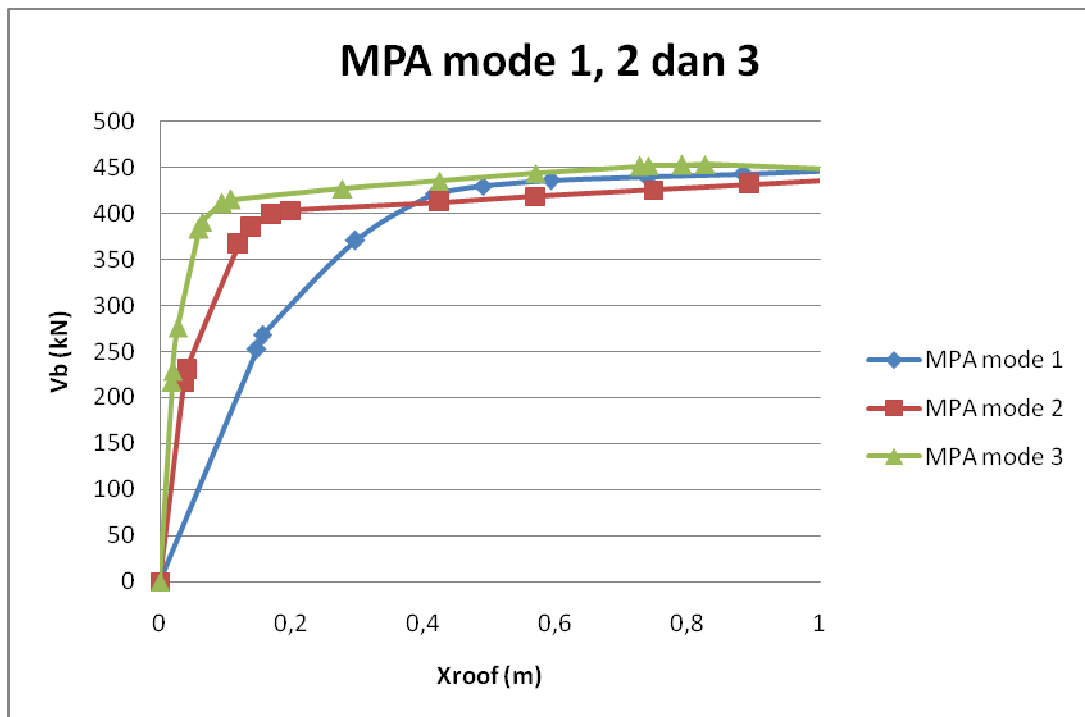


Gambar 6. Mode Shape Struktur Beton Bertulang Open Frame

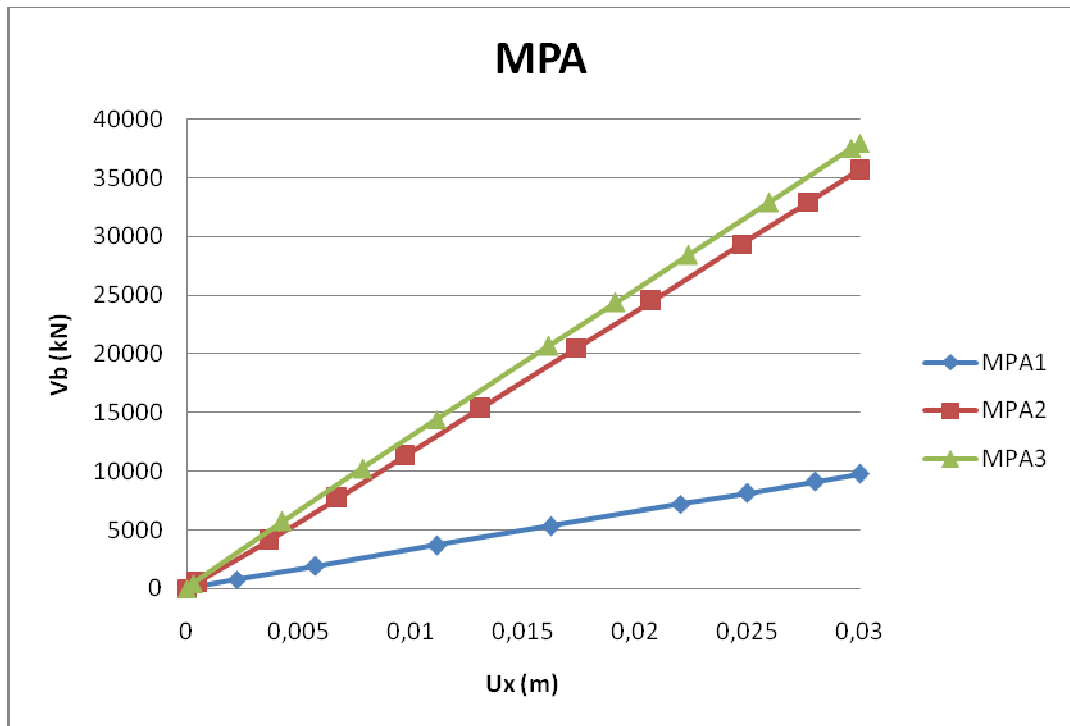


Gambar 7. Mode Shape Struktur Beton Bertulang Berdinding Geser

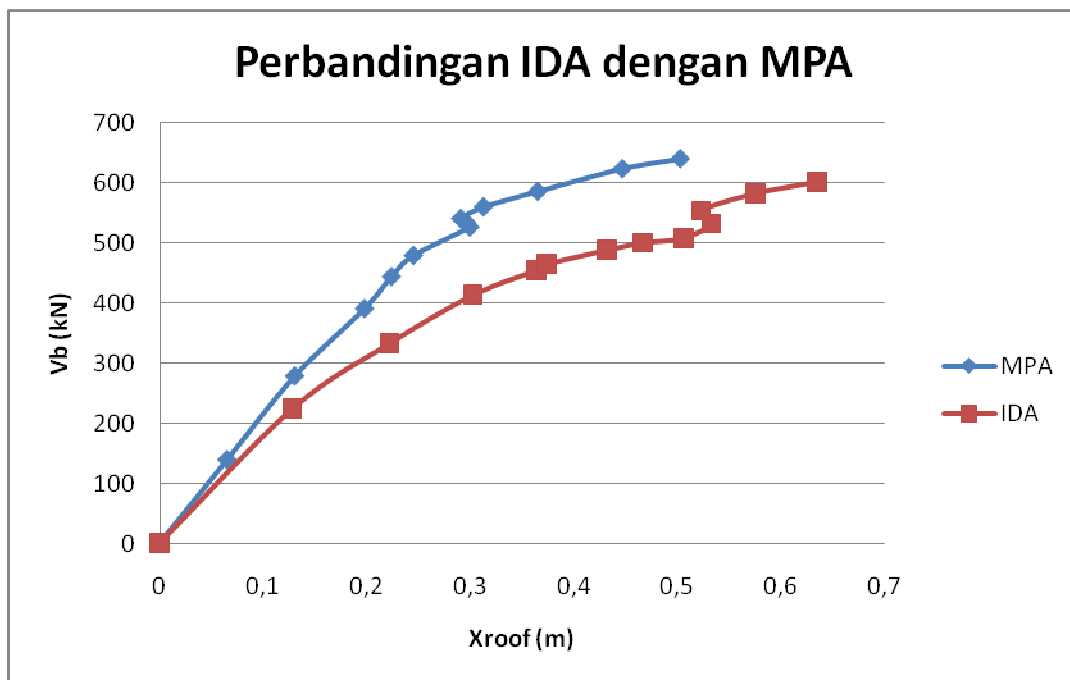
Modal Pushover Analysis masing-masing struktur:



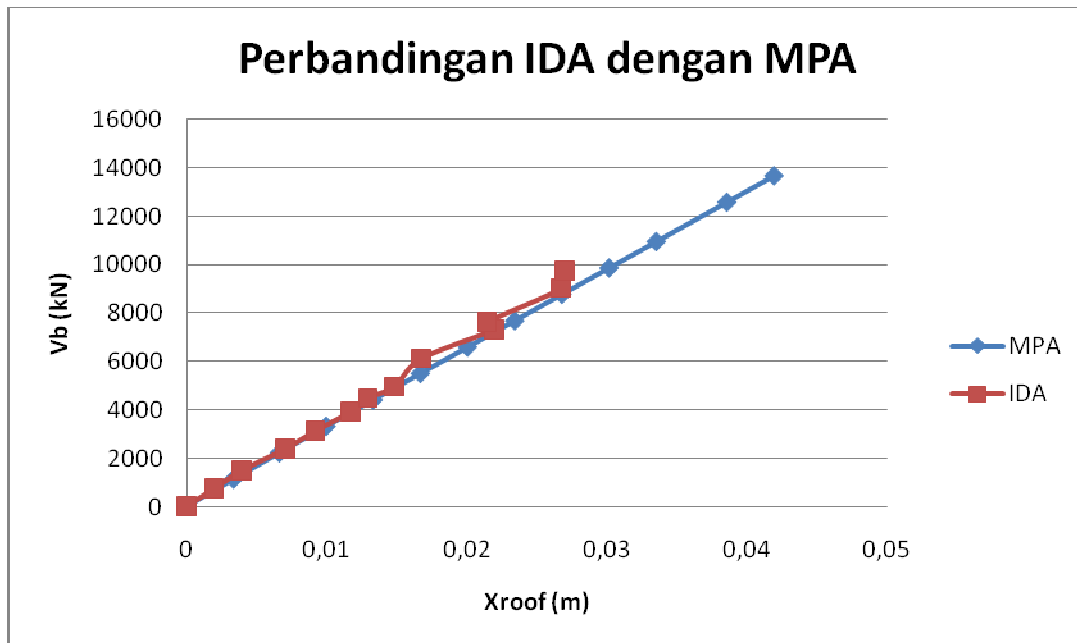
Gambar 8. Modal Pushover Analysis Struktur Beton Bertulang Open Frame



Gambar 8. Modal Pushover Analysis Struktur Beton Bertulang Berdinding Geser Berikut Merupakan hasil perbandingan Incremental Dynamic Analysis dengan Modal Pushover Analysis :

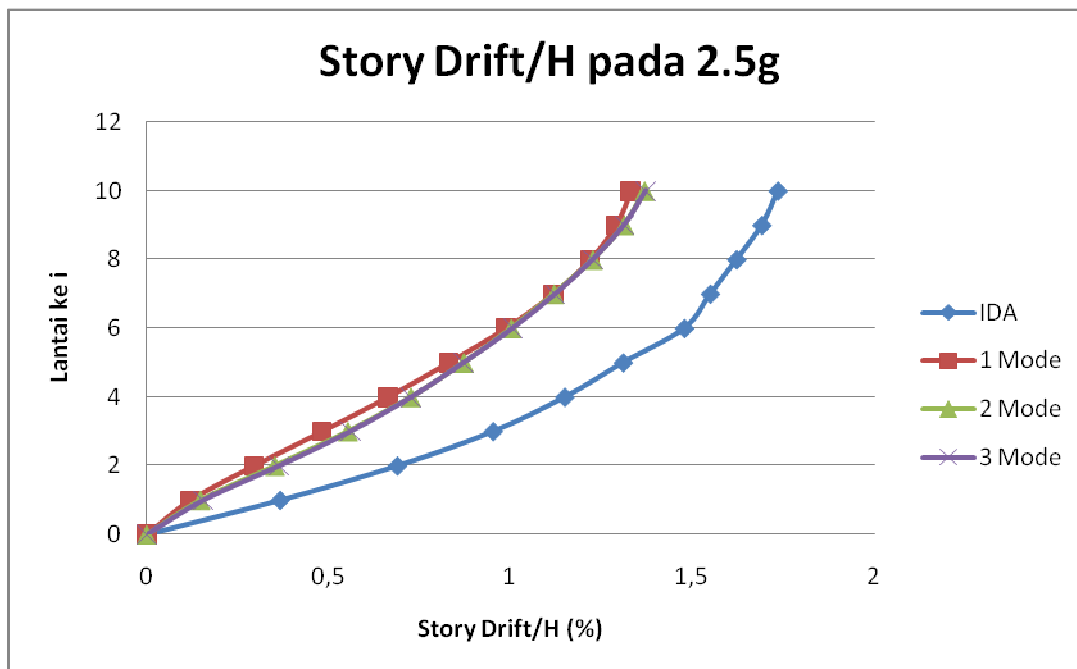


Gambar 9. Perbandingan IDA dengan MPA pada Struktur Beton Bertulang Open Frame

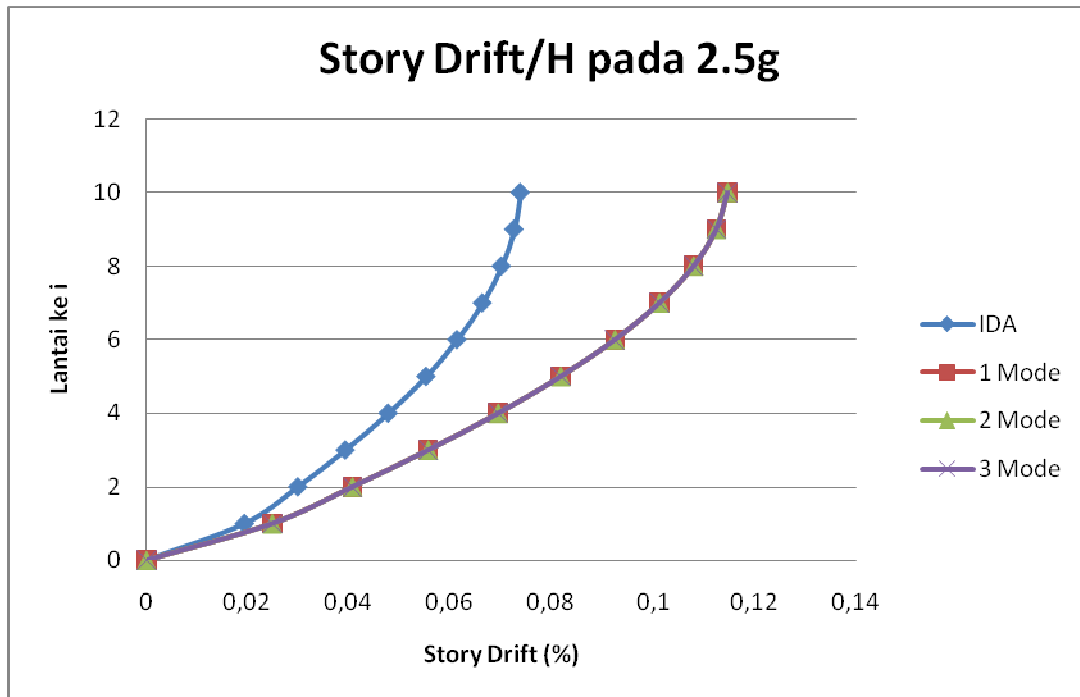


Gambar 10. Perbandingan IDA dengan MPA pada Struktur Beton Bertulang Berdinding Geser

Dari hasil di atas terlihat MPA cukup konservasi untuk digunakan analisis menggantikan IDA pada beton bertulang open frame. Namun pada beton berdinding geser pengaruh mode 2 dan 3 terlalu kecil sehingga kurva MPA yang dihasilkan kurang konservatif.



Gambar 11. Perbandingan Story Drift/H IDA dengan MPA pada Struktur Beton Bertulang Open Frame



Gambar 12. Perbandingan Story Drift/H IDA dengan MPA pada Struktur Beton Bertulang Berdinding Geser

Untuk story drift struktur kedua jenis struktur beton bertulang cukup konservatif, dengan perbedaan story drift per tinggi total kurang dari 1%.

## 6. KESIMPULAN

- Modal Pushover Analysis cukup konservatif untuk menggantikan Incremental Dynamic Analysis
- Untuk bangunan tinggi, pengaruh mode yang lebih tinggi perlu diperhitungkan, terutama mode 2 dan 3.
- Model kurva gaya-deformasi bilinear cocok untuk digunakan pada struktur beton bertulang.
- Story drift MPA cukup akurat untuk mengganti story drift IDA.
- Pada struktur dengan dinding geser, pengaruh mode 2 dan 3 tidak signifikan, hal ini disebabkan karena mode 1 yang terlalu dominan.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

- Applied Technology Council (1996). "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *Report ATC-40*, ATC, Redwood City, Calif.
- Building Seismic Safety Council (1997). "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," *FEMA-273*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

- Chopra, A. K. (2001). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 844 pp.
- Chopra, A. K., and Goel, R. K. (2002). "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings," *Earthq. Engrg. Struc. Dyn.*, **31**:561-582.
- Chopra, A. K., and Goel, R. K. (2004). "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric plan buildings," *Earthq. Engrg. Struc. Dyn.*, **119**:459-469.
- Chopra, A. K. (2005). *Earthquake Dynamics of Structures, A Primer*, 2nd ed., Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, MNO-11.
- Chopra, A. K., and Han, Sang Whan. (2006). "Approximate incremental dynamic analysis using the modal pushover analysis procedure," *Earthq. Engrg. Struc. Dyn.*, **35**:1853-1873.
- Computer and Structures, Inc (2007). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, and SAFE*. Berkeley, California, USA.
- The National Science Foundation (1976). *SIMQKE: A Program for Artificial Motion Generation User's Manual and Documentation*, M.I.T. Department of Civil Engineering
- Vamvatisikos D, Cornell CA (2002). "Incremental dynamic analysis," *Earthq. Engrg. Struc. Dyn.*, **31**:491-514.
- Vamvatisikos D, Cornell CA (2004). "Applied incremental dynamic analysis," *Earthquake Spectra.*, **20**(2):523-533.
- Vamvatisikos D, Cornell CA (2005). "Direct estimation of seismic demand and capacity of multi-degree of freedom systems through incremental dynamic analysis of single degree of freedom approximation," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **131**(4):561-582.