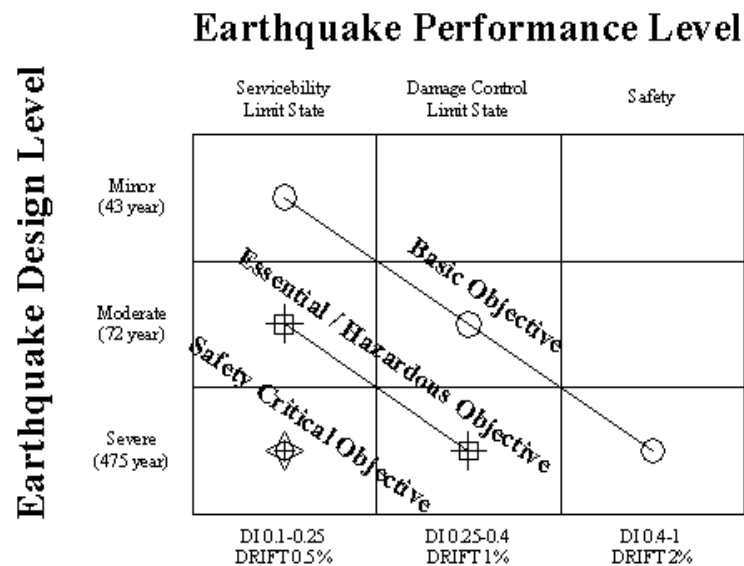


Performance Based Design, Sebaiknya Menggunakan *Modal Pushover Analysis* atau *Capacity Spectrum Method*?

Benjamin Lumantarna¹

1. PENDAHULUAN

Tatacara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Rumah Dan Gedung, (SNI 03-1726-2002), maupun Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Bertulang untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002), masih menggunakan konsep perhitungan berbasis gaya (*strength based*). Dilain pihak *Asian Concrete Model Code*, (ACMC, 1999) yang diharapkan menjadi payung dari peraturan beton di Asia memperkenalkan perencanaan berbasis kinerja (*Performance Based Design*) dengan menetapkan berbagai tingkat kinerja struktur (*multiple performance levels*). Tingkat kinerja ini adalah tingkat kinerja bangunan yang diharapkan terjadi pada saat struktur menerima beban gempa dengan tingkat intensitas tertentu (Gambar 1). Perencanaan berbasis gaya tidak menyatakan dengan jelas kriteria kinerja yang ingin dicapai, tetapi mekanisme keruntuhan yang direncanakan menjamin tidak terjadi keruntuhan total (*collapse*) terhadap gempa besar. Perencanaan berbasis gaya dapat diharapkan memenuhi kinerja *serviceability* dan *safety limit state*. Pelajaran yang ditarik dari beberapa gempa besar yang terjadi menunjukkan, perencanaan berbasis gaya berhasil mengurangi korban jiwa menjadi sangat kecil, tetapi tidak mengurangi kerugian material yang ternyata masih sangat besar (ATC40, 1996, Boen, T., 1999), dengan demikian diperlukan suatu cara analisa untuk dapat mengetahui kinerja bangunan terhadap gempa sedang (*moderate*) yang diharapkan masih didalam *damage control limit state*.



Gambar 1: Tingkatan dan Sasaran Kinerja Berdasarkan ACMC (1996)

¹ Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

Untuk mengetahui kinerja struktur dalam keadaan nonlinear diperlukan analisis static nonlinier yang sederhana tetapi handal untuk menggantikan analisis nonlinear riwayat waktu (*Non-linear Time History Analysis*, NLTHA) yang lebih “eksak” tetapi membutuhkan waktu komputasi yang sangat lama. Selain harus cukup sederhana, analisis statik nonlinier ini harus dapat memprediksi perpindahan lateral maupun gaya dalam dari struktur yang ditinjau secara cukup akurat dan konservatif.

Dari beberapa cara analisis statik nonlinier yang telah diusulkan, yang paling populer pada saat ini adalah cara *Capacity Spectrum Method* (CSM), atau lebih dikenal sebagai *static pushover analysis* [ATC40, 1996, Boen, T., 1999, Krawinkler, H., 1996, SEAOC, 2000). Cara ini relatif mudah dan telah dapat dilakukan dengan beberapa program komputer seperti Ruaumoko (Carr, A.J., 2001), ETABS-Nonlinear (Habibullah, A., 1998), dan SAP 2000 (Habibullah, A., 2000). Penelitian terhadap keandalan analisis *static pushover* untuk bangunan yang teratur dan prilakunya didominasi oleh mode pertama telah dilaporkan dalam beberapa pertemuan ilmiah lain (Lumantarna, B. et.al, 2001, Lumantarna, B. et.al, 2002, Lumantarna, B., 2002, Lumantarna, B. et.al., 2003, Lumantarna, B. et.al, 2004, Chopra, A.K., et.al, 2002, Chintanapakdee, C. et.al, 2003). Karena analisis *static pushover* didasarkan kepada anggapan bahwa respons struktur di dominasi oleh mode pertama dan tetap didominasi oleh mode pertama meskipun telah terjadi pelelehan sendi plastis, untuk struktur yang lebih tinggi dimana mode yang lebih tinggi mulai berpengaruh, Chopra, A.K. dan Goel, R.K. (2001) mengusulkan penggunaan *Modal Pushover Analysis* (MPA). Beberapa peneliti [Goel, R.K., et.al., 2004, Kalkan, E., et al, 2004, Attard, T., et.al, 2004, Thjin, T. et.al., 2006) telah menunjukkan keakuratan cara MPA dalam memprediksi perpindahan horizontal akibat beban lateral, tetapi keakuratan MPA untuk memprediksi gaya dalam tidak dilaporkan.

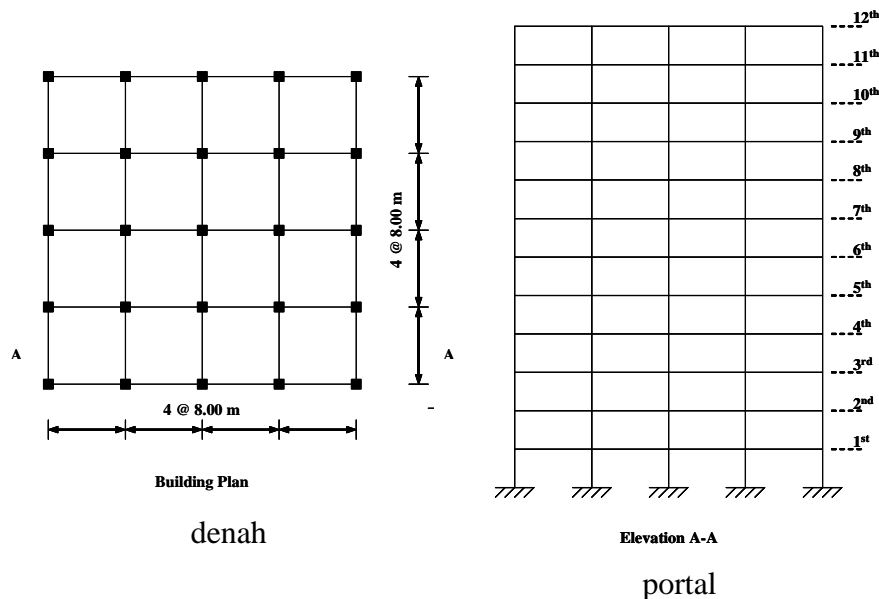
Penelitian ini membandingkan performa CSM dan MPA bila dibandingkan dengan NLTHA dalam memprediksi perpindahan horizontal, gaya geser tingkat dan momen pada bangunan yang perilaku dinamisnya didominasi oleh mode pertama. Percepatan tanah yang digunakan dalam analisis riwayat waktu nonlinier (NLTHA) adalah percepatan gempa sintesis yang telah disesuaikan dengan respons spektrum yang diberikan dalam Tatacara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Rumah Dan Gedung (SNI 03-1726-2002). Gempa sintesis didapatkan dengan melakukan modifikasi komponen Utara-Selatan (N-S) dari gempa El Centro 1940 menggunakan program RESMAT (Lumantarna, B., et.al, 1997). Analisis dinamis nonlinier riwayat waktu (NLTHA) dilakukan dengan program Ruaumoko 3D (Carr, A.J., 2001), sedangkan untuk analisis statik nonlinier CSM dan MPA digunakan SAP 2000 nonlinear (Habibullah, A., 2003).

2. BANGUNAN YANG DITINJAU

Dalam penelitian ini ditinjau suatu bangunan 12 lantai seperti terlihat dalam Gambar 2. Bangunan ini direncanakan sebagai struktur rangka beton bertulang pemikul khusus (SRPMK) sesuai dengan SNI 03-2847-2002 (2002) dan SNI 03-1726-2002 (2002). Bangunan dianggap berada didaerah 2 peta gempa Indonesia (SNI 03-1726, 2002) dan dibangun diatas tanah lunak. Denah bangunan dan bentuk portal ditunjukkan dalam Gambar 2. Bangunan ini berukuran 32m x 32m, dengan empat bentang lebar 8m kedua arah, terdiri atas 12 lantai dengan tinggi tingkat 4m. Ukuran kolom 800mm x 800mm, balok induk 350mm x 700mm, dan balok anak 350mm x 600mm, sedangkan tebal lantai 120mm. Mutu beton 30 MPa, mutu baja untuk tulangan longitudinal 400 MPa sedangkan untuk sengkang 240 MPa. Detail bangunan dan perhitungan dapat dilihat dalam referensi (Hadiwijaya, I.J., et.al, 2007). Bangunan ini prilakunya didominasi oleh mode pertama, dimana *mass participating ratio* untuk mode pertama adalah 81.06%,

sedangkan untuk mode kedua dan tiga dalam arah lateral yang sama berturut-turut adalah 8.56% dan 7.23%.

Kinerja bangunan ini dievaluasi menggunakan cara analisa statik nonlinier CSM menggunakan fasilitas yang tersedia dalam program SAP 2000 (Habibullah, A., 2003) dengan menggunakan pola pembebanan berdasarkan mode pertama. Untuk MPA juga digunakan fasilitas-fasilitas yang ada dalam SAP 2000 (Habibullah, A., 2003) untuk melakukan analisis pushover maupun analisis riwayat waktu linier. Dalam analisis MPA digunakan satu mode, serta penjumlahan dua mode dan tiga mode dengan menggunakan metode penjumlahan Square Root of Sum of Squares (SRSS). Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan cara yang lebih "eksak" yaitu analisa dinamis nonlinier riwayat waktu (NLTHA) menggunakan program RUAOMOKO 3D (Carr, A.J., 2001). Properti sendi plastis diperoleh dengan program ESDAP (Lidyawati, L., et.al, 2003) yang dikembangkan di Universitas Kristen Petra, Surabaya, menggunakan algoritma yang diusulkan oleh D.J. King (1986). Percepatan tanah yang digunakan dalam analisa NLTHA adalah percepatan tanah sintesis yang didapat dengan memodifikasi komponen Utara-Selatan (N-S) percepatan gempa El-Centro 1940 sehingga menghasilkan respons spektrum yang sama dengan design spektrum daerah 2 peta gempa Indonesia [1]. Modifikasi dilakukan dengan program RESMAT (Lumantarna, B., et.al., 1997), suatu program yang dikembangkan di Universitas Kristen Petra, Surabaya.



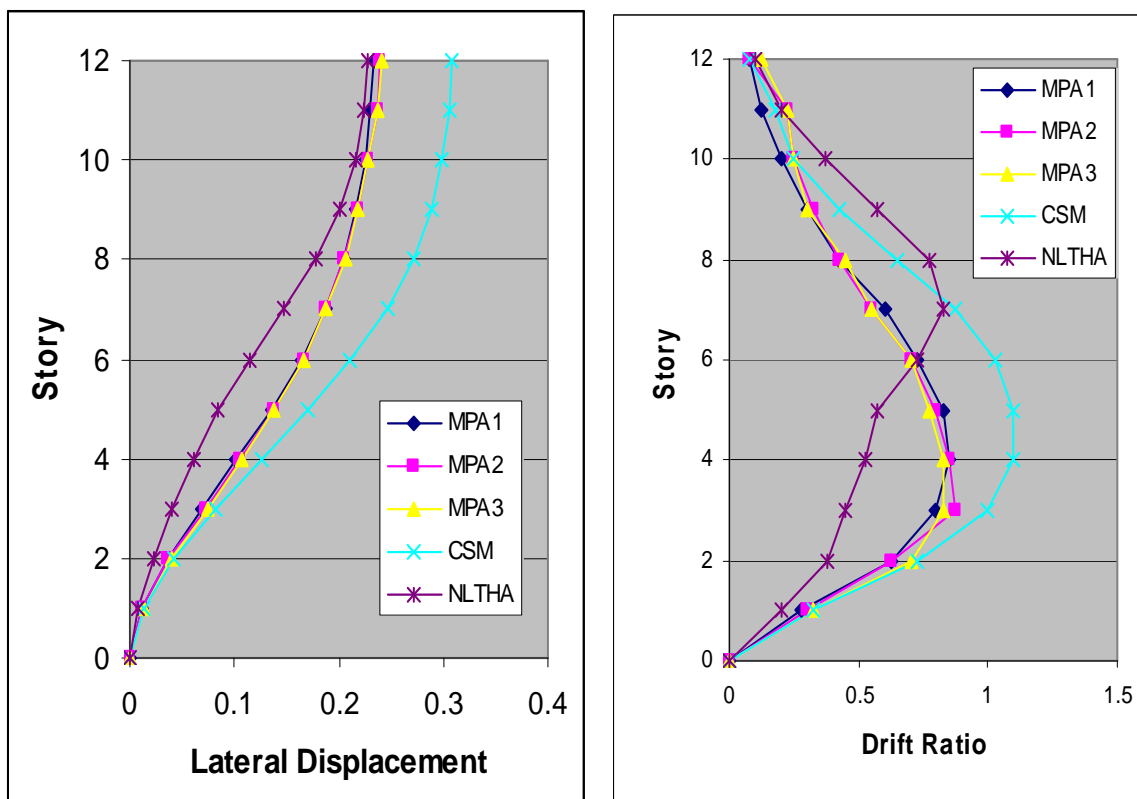
Gambar 2: Bangunan yang ditinjau (Hadiwijaya, I.J., et.al., 2007)

3. HASIL ANALISIS

Hasil analisis berupa perbandingan antara CSM, MPA menggunakan mode pertama (MPA1), MPA dengan menjumlahkan dua mode (MPA2) dan tiga mode (MPA3) ditunjukkan dalam bentuk tabel dan grafis dalam Tabel 1 sampai 3 dan Gambar 3 sampai 5. Tabel 1 menunjukkan perbandingan perpindahan lateral yang didapat dengan menggunakan analisa CSM, MPA dengan satu mode (MPA1), MPA dengan dua mode (MPA2), MPA dengan tiga mode (MPA3) dengan NLTHA. Gambar 3 menunjukkan perbandingan perpindahan lateral dan drift rasio dalam bentuk grafis.

Tabel 1. Perpindahan lateral lantai

Floor	Mode 1	Mode 2	Mode 3	MPA			NLTHA	CSM
				1 Mode	2 Mode	3 Mode		
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0109	-0.0053	0.0050	0.0109	0.0121	0.0131	0.0076	0.0125
2	0.0357	-0.0146	0.0132	0.0357	0.0386	0.0408	0.0230	0.0420
3	0.0678	-0.0228	0.0171	0.0678	0.0715	0.0735	0.0414	0.0816
4	0.1022	-0.0275	0.0145	0.1022	0.1058	0.1068	0.0618	0.1257
5	0.1351	-0.0276	0.0067	0.1351	0.1379	0.1381	0.0854	0.1700
6	0.1642	-0.0224	-0.0028	0.1642	0.1657	0.1657	0.1137	0.2112
7	0.1878	-0.0116	-0.0095	0.1878	0.1882	0.1884	0.1466	0.2458
8	0.2052	0.0040	-0.0101	0.2052	0.2052	0.2055	0.1779	0.2715
9	0.2170	0.0219	-0.0034	0.2170	0.2181	0.2181	0.2012	0.2887
10	0.2249	0.0384	0.0091	0.2249	0.2282	0.2283	0.2161	0.2993
11	0.2300	0.0505	0.0228	0.2300	0.2355	0.2366	0.2242	0.3056
12	0.2331	0.0579	0.0329	0.2331	0.2402	0.2424	0.2281	0.3094



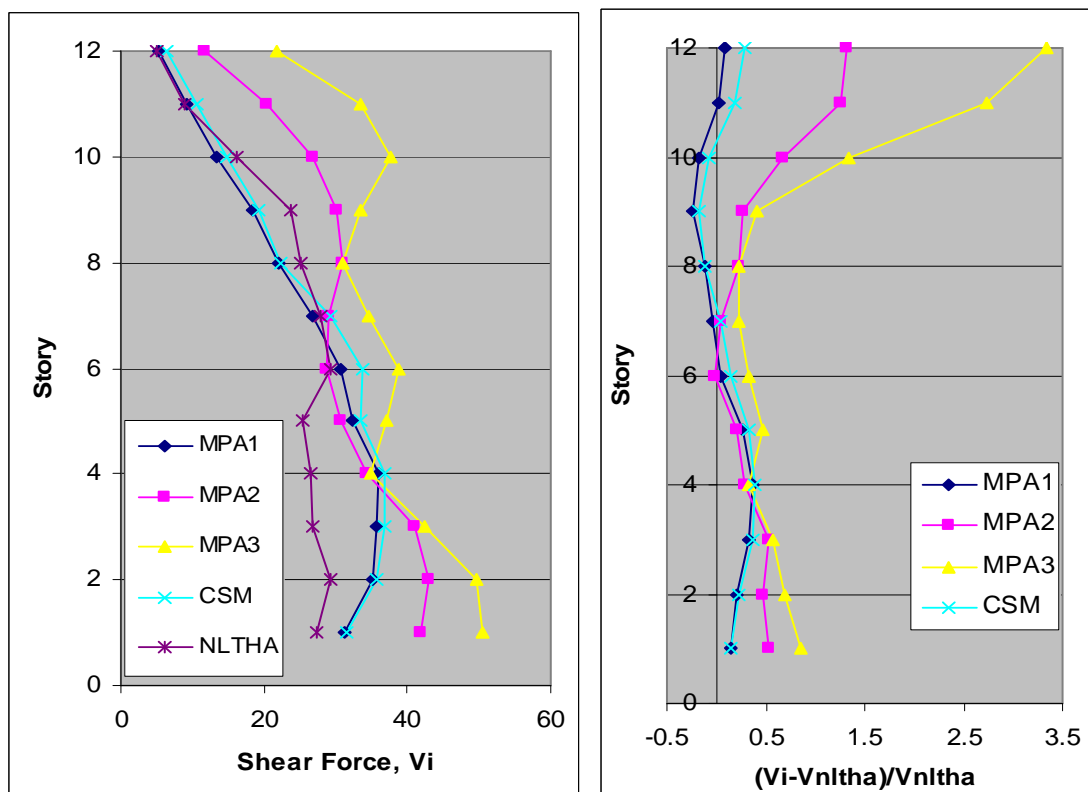
Gambar 3. Perbandingan perpindahan lateral tiap lantai dan drift rasio

Tabel 2 menunjukkan menunjukkan perbandingan gaya geser kolom yang didapat dengan menggunakan analisa CSM, MPA dengan satu mode (MPA1), MPA dengan dua mode (MPA2), MPA dengan tiga mode (MPA3) dengan NLTHA. Gambar 4

menunjukkan perbandingan perpindahan gaya geser serta penyimpangan gaya geser terhadap gaya geser yang dihasilkan oleh analisa NLTHA dalam bentuk grafis.

Tabel 2. Gaya geser kolom (kg)

Floor	Mode 1	Mode 2	Mode 3	MPA			NLTHA	CSM
				1 Mode	2 Mode	3 Mode		
1	31,306	-27,704	28,499	31,306	41,804	50,594	27,434	31,524
2	35,115	-24,784	24,785	35,115	42,980	49,614	29,313	35,829
3	35,859	-19,662	10,839	35,859	40,919	42,330	26,838	36,786
4	35,885	-11,207	-6,801	35,885	34,239	34,908	26,439	36,746
5	32,353	-750	-21,021	32,353	30,662	37,176	25,338	33,399
6	30,653	10,374	-25,949	30,653	28,756	38,733	29,285	33,801
7	26,819	19,031	-18,740	26,819	29,109	34,620	27,982	29,255
8	22,026	24,902	-2,626	22,026	30,932	31,043	25,168	22,329
9	18,348	26,911	14,683	18,348	30,023	33,421	23,724	19,319
10	13,311	25,214	26,482	13,311	26,847	37,710	16,145	14,902
11	9,219	19,539	26,674	9,219	20,287	33,512	8,990	10,583
12	5,455	11,608	18,340	5,455	11,608	21,705	5,042	6,436



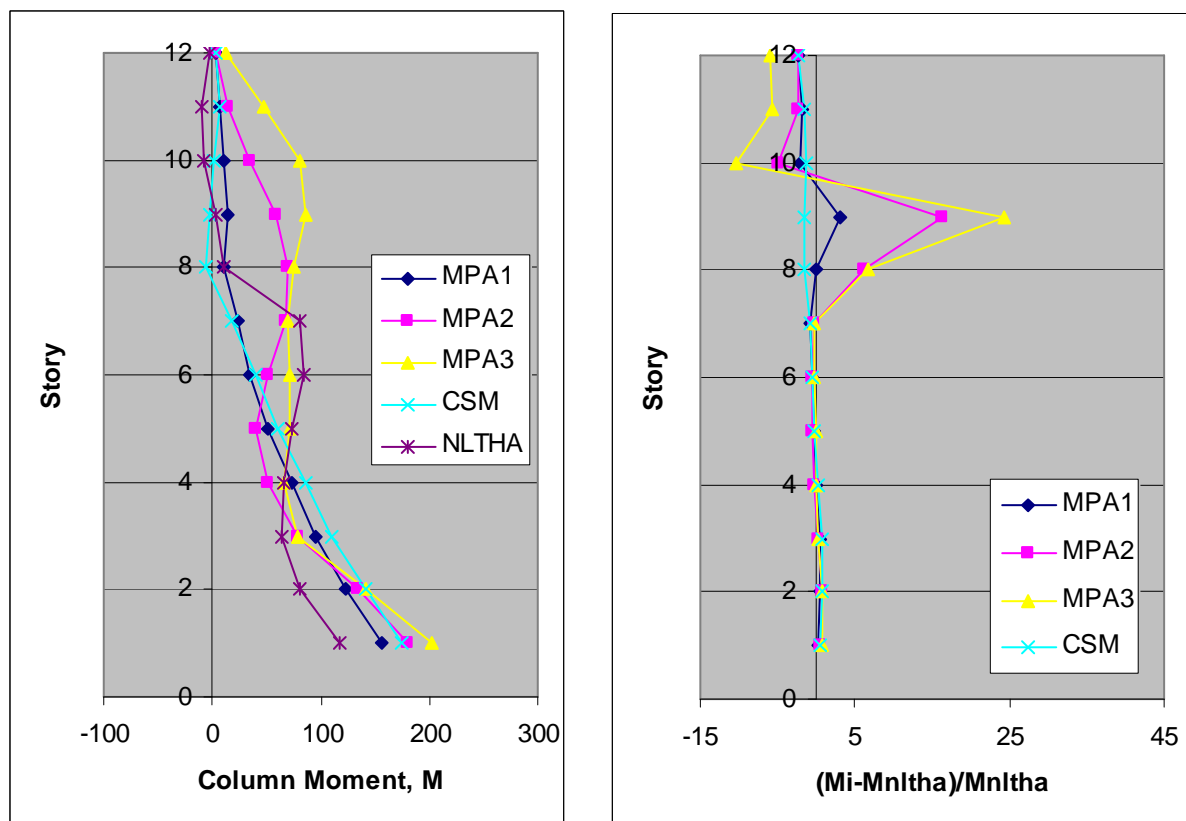
Gambar 4. Perbandingan gaya geser kolom (kg)

Tabel 3 menunjukkan perbandingan momen kolom yang didapat dengan menggunakan analisa CSM, MPA dengan satu mode (MPA1), MPA dengan dua mode (MPA2), MPA dengan 3 mode (MPA3) dengan NLTHA.

Tabel 3. Momen kolom (kg.m)

Floor	Mode 1	Mode 2	Mode 3	MPA			NLTHA	CSM
				1 Mode	2 Mode	3 Mode		
1	156,910	-88,412	93,685	156,910	180,104	203,013	116,551	174,428
2	123,906	-53,341	42,810	123,906	134,899	141,529	80,290	141,329
3	95,279	-27,766	-4,908	95,279	78,155	78,309	64,732	111,026
4	73,057	-2,820	-42,554	73,057	51,199	66,575	64,998	85,392
5	51,121	22,011	-59,456	51,121	40,703	72,054	73,328	60,048
6	34,238	45,444	-49,377	34,238	51,437	71,301	84,531	39,988
7	24,097	66,909	-15,945	24,097	67,640	69,494	80,475	18,056
8	9,917	69,079	27,593	9,917	70,465	75,674	9,852	-5,069
9	13,908	57,531	62,646	13,908	58,453	85,681	3,356	-1,540
10	10,343	33,061	72,766	10,343	33,958	80,300	-8,599	1,615
11	7,756	13,477	46,153	7,756	13,811	48,175	-10,317	6,487
12	3,022	2,987	12,186	3,022	2,987	12,547	-2,457	3,175

Gambar 5 menunjukkan perbandingan momen kolom serta penyimpangan momen kolom terhadap momen kolom yang didapat dengan analisa NLTHA dalam bentuk grafis.



Gambar 5. Perbandingan momen kolom (kg.m)

4. DISKUSI DAN KESIMPULAN

Dengan anggapan bahwa hasil analisis yang benar adalah hasil analisis dengan menggunakan NLTHA, terlihat dalam Gambar 3 bahwa MPA dapat memprediksi perpindahan lateral lantai lebih baik dari CSM, tetapi baik MPA maupun CSM menghasilkan perpindahan lateral yang lebih konservatif dari NLTHA. Seperti diharapkan karena kontribusi mode kedua dan ketiga tidak besar, maka penambahan jumlah mode yang diperhatikan tidak memberikan kontribusi yang besar pada perpindahan lateral.

Gambar 4 dan 5 menunjukkan gaya geser dan momen kolom yang dihasilkan oleh analisis CSM dan MPA dengan hanya menggunakan mode pertama, sangat dekat dan dapat dikatakan cukup baik bila dibandingkan dengan hasil NLTHA. Tetapi tidak seperti yang diharapkan, penambahan jumlah mode (MPA2 dan MPA3) tidak memberikan hasil yang konvergen menuju jawaban yang benar (NLTHA).

Dengan demikian, berdasarkan hasil penelitian terhadap gedung 12 lantai dengan dominasi mode pertama yang ditinjau dalam penelitian ini terdapat indikasi bahwa:

1. CSM dan MPA memberikan prediksi perpindahan lateral maupun gaya dalam yang konservatif terhadap NLTHA
2. MPA memberikan hasil yang lebih baik dalam prediksi perpindahan lateral, tetapi dengan bertambahnya jumlah mode yang ditinjau ternyata tidak konvergen dalam prediksi gaya dalam.
3. Karena dalam kenyataan perencanaan berdasarkan kinerja kemungkinan diperlukan perkuatan momen maupun gaya lintang untuk mencapai kinerja yang diinginkan, maka sehubungan dengan tidak adanya konvergensi dalam prediksi gaya dalam, maka penggunaan MPA harus dipertimbangkan dengan hati-hati.
4. Penggunaan CSM untuk bangunan yang didominasi oleh mode pertama memberikan hasil yang konservatif baik perpindahan lateral maupun gaya dalam yang sisi pandang perencanaan dapat diterima.

5. DAFTAR REFERENSI

- ACMC, (1999), *Asian Concrete Model Code, Level 1 & 2 Documents, Second Draft*. International Committee On Concrete Model Code, Japan, March 1999.
- ATC 40, (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume 1*, California, USA.
- Attard, T., dan Fafitis, A., (2005). "Modeling of Higher-Mode Effects Using An Optimal Multi-Modal Pushover Analysis". *Earthquake Resistant Engineering Structures V*, Southampton: Wit Press. pp. 405-414.
- Boen, T., (1999), Dasar-Dasar Analisa Pushover, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil*, 5-6 March 1999, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, pp. 2.01-2.14.
- Carr, A.J., (2001), *Ruaumoko-3D Version, Inelastic Dynamic Analysis*, University of Canterbury, New Zealand.
- Chintanapakdee, C., dan Chopra, A.K., (2003), Evaluation of Modal Pushover Analysis Using Generic Frames, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.32, January.

- Chopra, A.K., dan Goel, R.K., (2001), *A Modal Pushover Analysis Procedure To Estimate Seismic Demands For Buildings: Theory And Preliminary Evaluation*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Peer Report 2001/03, January.
- Chopra, A.K., dan Goel, R.K., (2002), A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.31, pp. 561-582.
- Goel, R.K., dan Chopra, A.K. (2004). "Evaluation of Modal And Fema Pushover Analyses: Sac Buildings". *Earthquake Spectra*, 20 (1), pp. 225-254.
- Habibullah, A., (1998), *ETABS-Nonlinear, Three Dimensional Analysis and Design of Building Systems*, Computer and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Habibullah, A., (2003), *SAP 2000 Analysis Reference Manual*. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA
- Hadiwijaya, I.J., Wibowo, H., (2007), *Evaluasi Modal Pushover Analysis Pada Sistem Rangka Penahan Momen Beton Bertulang First Mode Dominant*, Skripsi No 11131501/Sip/2007, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Kalkan, E., dan Kunnath, S.K., (2004). "Method of Modal Combination For Pushover Analysis Of Buildings". 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2713, Vancouver, Canada.
- King, D.J. (1986). "*Computer Programs for Concrete Column Design*". University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Krawinkler, H., (1996), Pushover Analysis: Why, How, When And Where Not To Use It, *Proc. 65th Annual Convention SEAOC*, 1-6 October 1996, Maui, Hawaii, USA, pp, 17-36.
- Lidyawati, L. dan Pono, G.B.W.R., (2003), *Penyempurnaan Program Komputer Untuk Desain Beban Lentur Dan Aksial Serta Analisa Momen-Kurvatur Penampang Beton Bertulang*, Skripsi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Lumantarna B., (2002), Keandalan Analisa Pushover Untuk Meramal Prilaku Seismik Nonlinier Struktur Portal Terbuka Teratur, *Profesionalisme Dalam Dunia Konstruksi Indonesia, Seminar Dan Pameran Haki 2002*, 20-21 Agustus 2002, Jakarta, pp V01-09
- Lumantarna B., Kumalasari C., dan Wijaya V., (2003), Keandalan Analisa Pushover Untuk Meramal Prilaku Seismik Nonlinier Struktur Portal Terbuka Dengan Setback, *Perkembangan Teknologi Dan Aplikasinya Dalam Dunia Konstruksi Indonesia, Seminar Dan Pameran Haki 2003*, 19-20 Agustus 2003, Jakarta, pp C01-11
- Lumantarna, B., et.al., (2004), Keandalan Analisa Pushover untuk Meramal Perilaku Seismik Nonlinier Struktur Portal Terbuka dengan Reentrant Corner, *Dimensi Teknik Sipil*, Vol.6, , No.1, Maret, pp. 1-6.
- Lumantarna, B., Lukito, M., (1997), Resmat, Sebuah Program Interaktif Untuk Menghasilkan Riwayat Waktu Gempa Dengan Spektrum Tertentu, *Proc. HAKI Conference 1997*, Jakarta, Indonesia, pp. 128-135.
- Lumantarna, B., Widjaja, S., dan Santoso, B., (2002), Seismic Performance Evaluation of Regular Buildings Using Pushover and Dynamic Nonlinear Time History Analysis, *17th Australasian Conference On The Mechanics Of Structures And Materials, ACMSM 17*, 12-14 June 2002, Gold Coast, Australia.

- Lumantarna, B., Wijoyo, H., dan Harianto, D., (2001), Seismic Performance Evaluation Using Pushover And Dynamic Nonlinear Time History Analysis, *Proc. ICCMC/IBST 2001 Int. Conf. on Advanced Technologies in Design, Construction and Maintenance of Concrete Structures*, 28-29 March 2001, Hanoi, Vietnam, pp. 133-139.
- SEAOC, (2000), *Vision 2000, Performance-Based Seismic Engineering Of Buildings*, SEAOC's Vision 2000 Report, Structural Engineers Association Of California, California, USA.
- SNI 03-1726, (2002), *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Gedung*, SNI 03-1726, Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, Bandung, Indonesia.
- SNI 03-2847, (2002), *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, SNI 03-2847, Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, Bandung, Indonesia.
- Thjin, T., Ascheim, A., dan Hernandez-Montes, E. (2006). "Observations on The Reliability Of Alternative Multiple-Mode Pushover Analysis Methods". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 132 (3), pp. 471-477.
- .