

KEANDALAN ANALISA PUSHOVER UNTUK MERAMAL PRILAKU SEISMIC NONLINIER STRUKTUR PORTAL TERBUKA DENGAN *REENTRANT CORNER*

Benjamin Lumantarna

Dosen Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan, Jurusan Teknik Sipil - Universitas Kristen Petra

Iksan Gunawan, Eka Wijaya

Alumni Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan, Jurusan Teknik Sipil - Universitas Kristen Petra

ABSTRAK

Penelitian ini merupakan kelanjutan dari serangkaian penelitian yang dilakukan terhadap keandalan analisa beban dorong statik (*static pushover analysis*) di Universitas Kristen Petra. Dalam penelitian ini dua buah struktur portal terbuka terdiri dari struktur lima, dan sepuluh lantai, dengan *re-entrant corner* sebesar setengah dari intinya, direncanakan sesuai dengan konsep ke-3, SNI 1726-1999. Prilaku seismik ke dua struktur ini dievaluasi menggunakan analisa *static pushover* dan analisa dinamik nonlinier riwayat waktu. Untuk analisa riwayat waktu digunakan percepatan gempa sintesis yang telah disesuaikan dengan respons spektrum gempa Indonesia dengan menggunakan bermacam-macam percepatan tanah maksimum. Kurva kapasitas yang didapatkan dari analisa *static pushover* kemudian dibandingkan dengan kurva kapasitas yang didapatkan dengan analisa riwayat waktu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa analisa static pushover masih memberikan prediksi kapasitas struktur yang konservatif dan cukup memadai. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa keandalan analisa pushover menurun sejalan dengan bertambahnya pengaruh ragam yang lebih tinggi.

Kata kunci: Kurva kapasitas, analisa statik beban dorong, analisa dinamis nonlinier riwayat waktu, performa seismik, struktur portal terbuka dengan *re-entrant corner*.

ABSTRACT

This study is part of an ongoing study on the reliability of static pushover analysis at Petra Christian University. In this study two open frame buildings, five and ten story with re-entrant corner, are designed in accordance with the proposed Indonesian Earthquake Code (SNI 1726-1999, 3rd concept). The seismic performance of these buildings is evaluated using three dimensional static pushover and dynamic nonlinear time history analysis. The ground motions used in the dynamic analysis are spectrum consistent ground motions scaled to maximum acceleration of various return periods. The resulting Capacity Curves (Base Shears vs. Top Floor Displacement) are then compared. It is shown that although the static pushover analysis gives a conservative performance prediction, the predicted capacity curve is getting worse with the higher modes influence.

Keywords: *capacity curve, pushover analysis, dynamic nonlinear time history analysis, seismic performance, open frame building with re-entrant corner.*

PENDAHULUAN

Perencanaan ketahanan terhadap gempa dalam Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung, konsep ketiga, SNI 1726-1999, [1] masih menggunakan konsep berbasis gaya (*strength based*). Perencanaan berbasis gaya tidak menyatakan dengan jelas kriteria

performa yang ingin dicapai, tetapi mekanisme keruntuhan yang direncanakan menjamin tidak terjadi keruntuhan total (*collapse*) terhadap gempa besar. Pelajaran yang ditarik dari beberapa gempa besar yang terjadi menunjukkan, perencanaan berbasis gaya ini, berhasil mengurangi korban jiwa menjadi sangat kecil, tetapi tidak mengurangi kerugian material yang ternyata masih sangat besar [2,3].

Analisa beban dorong statik (*static pushover analysis*) [2,3,4,5,6] adalah analisa statik

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juni 2004. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Dimensi Teknik Sipil Volume 6 Nomor 2 September 2004.

nonlinier yang relatif mudah dan dapat digunakan untuk meramalkan performa struktur terhadap beban lateral. Beberapa program komputer seperti Ruaumoko [7] dan SAP2000 [8] telah dapat melakukan analisa pushover. Penelitian ini merupakan kelanjutan dari serangkaian penelitian yang dilakukan terhadap keandalan analisa *static pushover* di Universitas Kristen Petra. Penelitian terhadap keandalan analisa *static pushover* untuk bangunan yang teratur telah dilaporkan dalam pertemuan ilmiah lain [9,10,11].

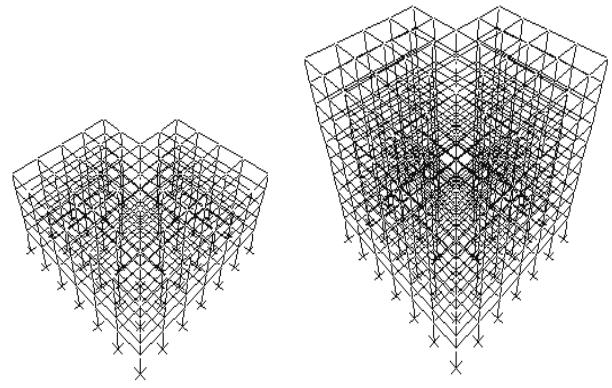
Dalam penelitian ini dua buah struktur portal terbuka dengan *re-entrant corner*, terdiri dari struktur lima lantai, dan sepuluh lantai. Semua struktur mempunyai denah yang sama dengan *re-entrant corner* sebesar setengah dari intinya (Gambar 1). Kedua struktur ini direncanakan sesuai dengan konsep ketiga, SNI 1726-1999. Prilaku seismik struktur dievaluasi menggunakan analisa *static pushover* dan analisa dinamis nonlinier riwayat waktu. Untuk analisa riwayat waktu digunakan percepatan gempa sintesis yang telah disesuaikan dengan respons spektrum yang diberikan dalam konsep Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung dengan menggunakan program Resmat [12].

STRUKTUR YANG DITINJAU DAN PEMBEBANAN

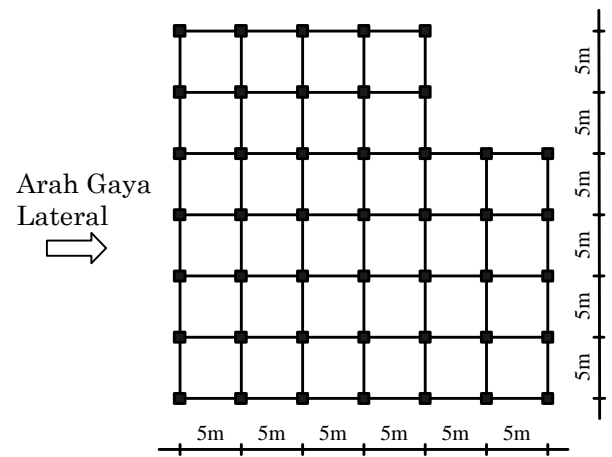
Struktur yang ditinjau adalah dua struktur portal terbuka dengan *re-entrant corner*, terdiri dari struktur lima, dan sepuluh. Denah semua struktur sama besar dan mempunyai *re-entrant corner* sebesar setengah dari intinya (Gambar 1).

Dimensi balok dan kolom ditunjukkan dalam Tabel 1. Tinggi antar lantai 3.5 m, mutu beton $f_c = 25$ MPa, mutu baja $f_y = 400$ MPa untuk tulangan longitudinal, dan mutu baja $f_y = 240$ MPa untuk sengkang.

Kedua struktur ini direncanakan menggunakan Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung, konsep ketiga, SNI 1726-1999 [1] dan dianggap sebagai bangunan perkantoran yang berada pada wilayah 4 dengan jenis tanah lunak.



(a) lima lantai (b) sepuluh lantai



(c) denah dengan *re-entrant* setengah inti

Gambar 1. Model dan Denah Struktur yang Ditinjau

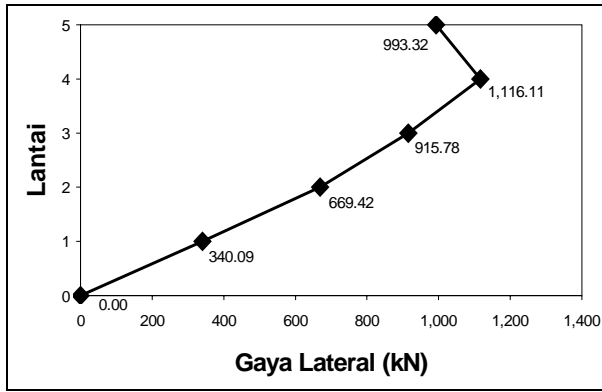
Tabel 1. Dimensi Balok dan Kolom

Elemen	5-lantai mm ²	10-lantai mm ²
Balok Induk	400 x 600	400 x 600
Kolom level 1-5	600 x 600	750 x 750
Kolom level 6-10	-	650 x 650

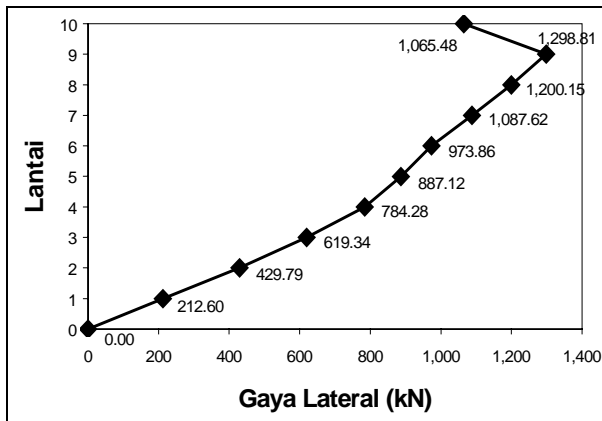
Tebal Plat = 120 mm; Mutu Beton, $f_c = 25$ MPa; Mutu Baja, $f_y = 400$ MPa; Mutu Sengkang, $f_y = 240$ MPa

Analisa *static pushover* maupun analisa dinamis nonlinier riwayat waktu dilakukan secara tiga dimensi dengan menggunakan program SAP2000 [8].

Kedua struktur ini termasuk dalam kategori bangunan yang tidak teratur, sehingga untuk pola pembebanan gaya lateral dalam analisa *pushover* digunakan pembagian gaya lateral yang didapatkan dari analisa ragam spektrum respons [13]. Pola pembebanan untuk struktur lima, dan sepuluh lantai, berturut-turut ditunjukkan dalam Gambar 2, dan 3.



Gambar 2. Pola Pembebanan untuk Struktur 5 Lantai



Gambar 3. Pola Pembebanan untuk Struktur 10 Lantai

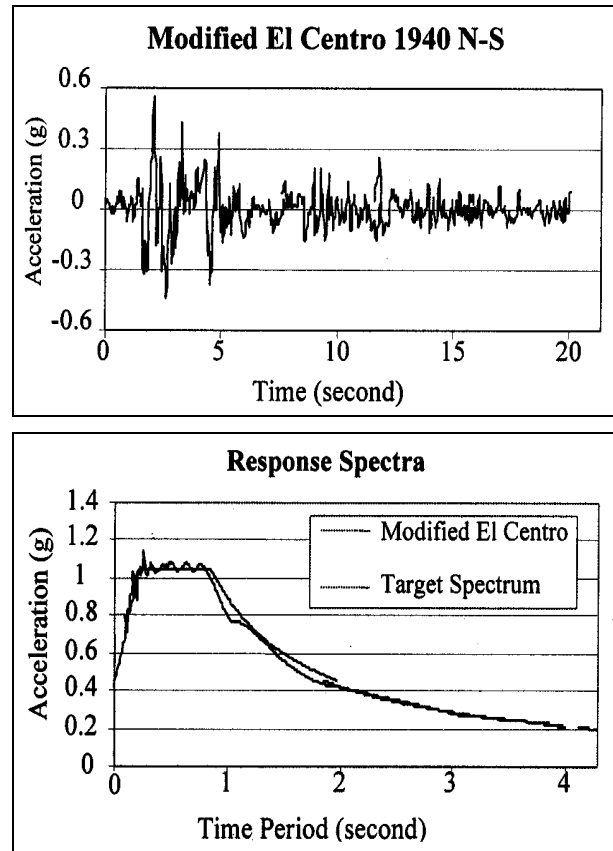
Beban percepatan gempa yang digunakan untuk analisa dinamis nonlinier riwayat waktu adalah beban percepatan gempa sintesis (*Spectrum-Consistent Time History*) yang didapatkan dengan melakukan modifikasi rekaman gempa El Centro 1940 NS *Component*, sehingga menghasilkan respons spektrum yang sama dengan respons spektrum gempa Indonesia [1]. Percepatan maksimum gempa sintesis ini kemudian diskalakan sesuai dengan percepatan maksimum periode ulang tertentu. Modifikasi dilakukan dengan program Resmat [12] yang dikembangkan di Universitas Kristen Petra.

Hasil modifikasi terhadap gempa El Centro 1940 NS *Component*, selanjutnya dinamakan Modified El-Centro, beserta respons spektrumnya ditunjukkan dalam Gambar 4.

HASIL ANALISIS

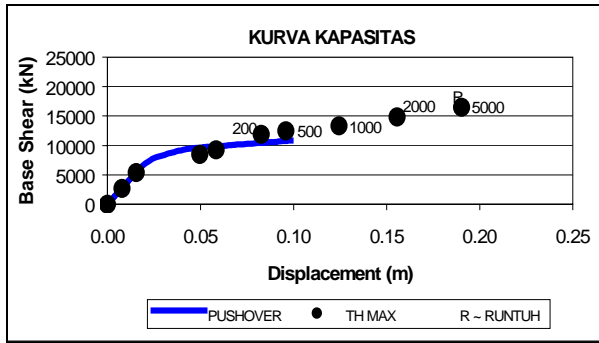
Hasil analisa *pushover* digambarkan sebagai Kurva Kapasitas (*Capacity Curve*) yang merupakan kurva dari besar gaya geser dasar (*base shear*) terhadap perpindahan lateral

lantai teratas/atap (*top floor displacement*). Hasil analisa ini kemudian dibandingkan dengan hasil analisa dinamis nonlinier riwayat waktu terhadap percepatan gempa sintesis yang telah diskala sehingga mewakili bermacam-macam periode ulang. Karena pada analisa dinamis, waktu terjadinya *base shear* maksimum tidak selalu sama dengan waktu terjadinya *top floor displacement* maksimum, maka ada tiga kemungkinan untuk menggambarkan kurva kapasitas, yaitu (a) menggunakan *base shear* dan *top floor displacement* maksimum (b) menggunakan *base shear* maksimum dan *top floor displacement* yang terjadi waktu *base shear* maksimum itu terjadi dan sebaliknya, (c) menggunakan *top floor displacement* maksimum dan *base shear* yang terjadi waktu *top floor displacement* maksimum tersebut terjadi.

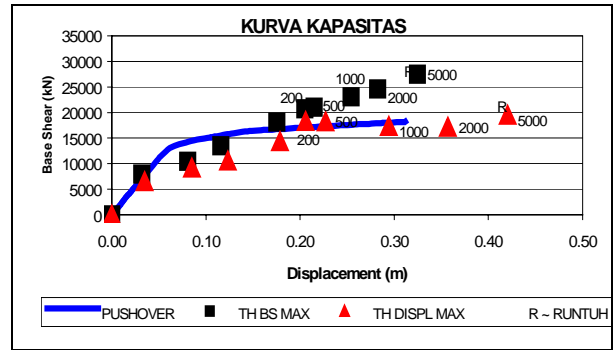


Gambar 4. Modified El Centro, beserta Response Spektrumnya

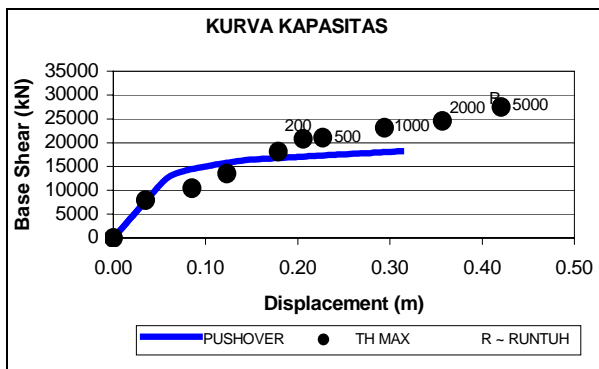
Hasil perbandingan kurva kapasitas hasil analisa *pushover* dengan kurva kapasitas analisa dinamis nonlinier riwayat waktu dengan menggunakan *base shear* dan *top floor displacement* maksimum (tipe a) ditunjukkan dalam Gambar 5 dan 6, berturut-turut untuk struktur lima dan sepuluh lantai.



Gambar 5. Perbandingan Kurva Kapasitas *Pushover* dan *Time History* berdasarkan *Base Shear* dan *Displacement* Maksimum, Struktur 5 Lantai dengan *re-entrant*.

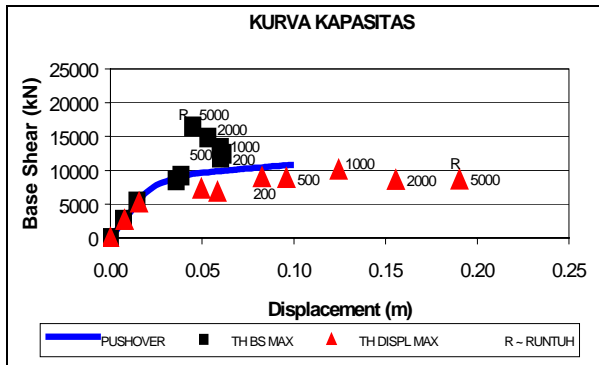


Gambar 8. Perbandingan Kurva Kapasitas *Pushover* dan *Time History* berdasarkan *Base Shear* Maksimum dan *Displacement* Maksimum, Struktur 10 Lantai dengan *re-entrant*.



Gambar 6. Perbandingan Kurva Kapasitas *Pushover* dan *Time History* berdasarkan *Base Shear* dan *Displacement* Maksimum, Struktur 10 Lantai dengan *re-entrant*.

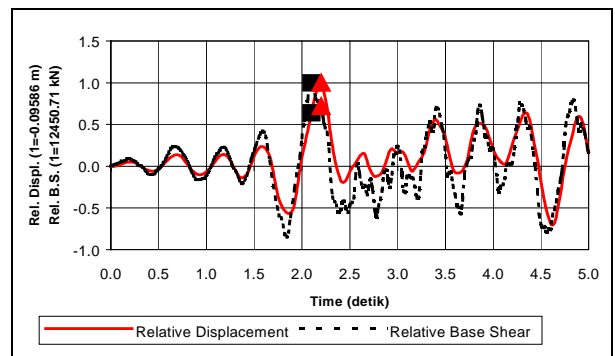
Perbandingan dengan kurva kapasitas analisa dinamis menggunakan *base shear* maksimum dan *top floor displacement* yang terjadi waktu *base shear* maksimum itu terjadi (tipe b) dan sebaliknya, menggunakan *top floor displacement* maksimum (tipe c), ditunjukkan dalam Gambar 7 dan 8, berturut-turut untuk struktur lima dan sepuluh lantai.



Gambar 7. Perbandingan Kurva Kapasitas *Pushover* dan *Time History* berdasarkan *Base Shear* Maksimum dan *Displacement* Maksimum, Struktur 5 Lantai dengan *re-entrant*

Angka-angka dalam Gambar 5, sampai 8 menunjukkan *return period* dari gempa yang digunakan. Percepatan tanah maksimum yang digunakan untuk gempa sintesis dengan *return period* 200, 500, 1000, 2000, 5000, and 10000 tahun berturut-turut adalah; 0.506, 0.562, 0.674, 0.787, 0.899, dan 1.068 kali percepatan gravitasi, g.

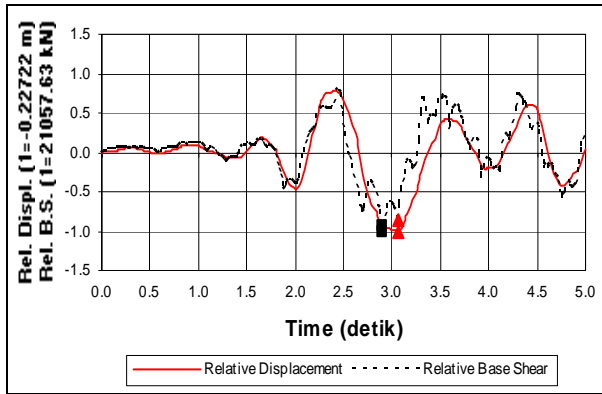
Tabel 2 menunjukkan *time lag* antara saat terjadinya displacement maksimum dan base shear maksimum, sedangkan Gambar 9, dan 10 menunjukkan hasil tipikal dari kurva yang menunjukkan perbandingan riwayat waktu dari *top floor displacement* dengan base shear akibat gempa sintesis, berturut-turut untuk struktur lima dan sepuluh lantai.



Gambar 9. Grafik *Displacement* dan *Base Shear* terhadap Waktu untuk Struktur 5 Lantai, percepatan gempa maksimum 0.562 g.

Tabel 2. *Time Lag* antara terjadinya *Displacement* dan *Base Shear* Maksimum

Max. Accl.	5-Lantai			10-Lantai		
	Displ	Shear	Lag	Displ	Shear	Lag
0.506	2.18	2.1	0.08	2.92	2.90	0.02
0.562	2.20	2.1	0.10	3.06	2.90	0.16
0.674	2.20	2.1	0.10	3.08	2.92	0.16
0.787	2.22	2.1	0.12	3.10	2.92	0.18
0.899	2.24	2.1	0.14	3.12	2.94	0.18
1.068	2.26	2.1	0.16	3.16	2.94	0.22



Gambar 10. Grafik *Displacement* dan *Base Shear* terhadap Waktu untuk Struktur 10 Lantai, percepatan gempa maksimum 0.562 g

Tabel 3 menunjukkan *Modal Participating Mass Ratio* yang didapat dari program SAP2000 [8]. Dapat dilihat dalam tabel ini bahwa struktur 5 lantai membutuhkan tiga ragam yang pertama, sedangkan struktur 10 lantai membutuhkan lebih dari tiga ragam yang pertama untuk mencapai *mass participating ratio* lebih dari 80 persen.

Tabel 3. *Modal Participating Mass Ratio*

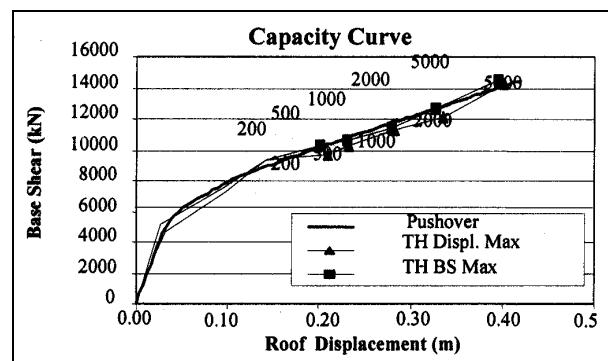
MODAL PARTICIPATION MASS RATIO								
Structure	Mode	T (sec)	Individual Mode (%)			Cumulative Sum (%)		
			UX	UY	UZ	UX	UY	UZ
5 Lantai dengan re-entrant	1	0.3588	41.832	41.832	0.000	41.832	41.832	0.000
	2	0.3587	41.396	41.396	0.000	83.228	83.228	0.000
	3	0.3433	0.450	0.450	0.000	83.677	83.677	0.000
	4	0.1154	5.154	5.154	0.000	88.831	88.831	0.000
	5	0.1154	5.109	5.108	0.000	93.939	93.939	0.000
10 Lantai dengan re-entrant	1	0.6531	39.018	39.018	0.000	39.018	39.018	0.000
	2	0.6519	38.252	38.252	0.000	77.270	77.270	0.000
	3	0.6199	0.812	0.812	0.000	78.082	78.082	0.000
	4	0.2255	5.793	5.793	0.000	83.875	83.875	0.000
	5	0.2253	5.643	5.643	0.000	89.518	89.518	0.000

DISKUSI DAN KESIMPULAN

Pada analisa dinamik riwayat waktu, *base shear* maksimum tidak selalu terjadi bersamaan dengan *displacement* maksimum. *Base shear* maksimum baru akan terjadi bersamaan dengan *displacement* maksimum bila gerakan struktur didominasi oleh ragam pertama. Struktur dengan *re-entrant* yang ditinjau dalam penelitian ini menunjukkan terjadinya *time lag* antara *displacement* maksimum dan *base shear* maksimum (Tabel 2). Untuk struktur lima lantai terjadi *time lag* sebesar 0.08 – 0.16 detik, sedangkan pada struktur sepuluh lantai terjadi *time lag* sebesar 0.02 - 0.22 detik. Gambar 9, dan 10 menunjukkan *time lag* akibat beban gempa sistesis dengan percepatan maksimum 0.562 g secara lebih jelas.

Akibat dari perbedaan waktu tercapainya *base shear* dan *displacement* maksimum ini tercermin dalam Gambar 7, dan 8 yang menunjukkan perbedaan yang cukup besar antara kurva kapasitas menggunakan *displacement* maksimum dengan kurva kapasitas menggunakan *base shear* maksimum. Tabel 3, menunjukkan bahwa struktur lima lantai membutuhkan dua ragam yang pertama, sedangkan struktur sepuluh lantai membutuhkan lebih dari tiga ragam pertama untuk mencapai *mass participating ratio* lebih dari 80 persen. Keadaan ini menunjukkan bahwa perilaku dinamik struktur sepuluh lantai telah dipengaruhi oleh ragam yang lebih tinggi.

Meskipun kurva kapasitas yang didapatkan dari analisa *pushover* menunjukkan perbedaan yang cukup besar dengan kurva kapasitas yang didapatkan dari analisa dinamis nonlinier riwayat waktu berdasarkan *base shear* maksimum maupun *displacement* maksimum (Gambar 7, dan 8), kurva kapasitas ini menunjukkan kesesuaian yang cukup baik dengan kurva kapasitas yang didapatkan dengan menggunakan *base shear* dan *displacement* maksimum (Gambar 5, dan 6). Memperhatikan hasil perbandingan pada struktur yang teratur yang dihasilkan pada penelitian yang terdahulu [9,10,11], terlihat bahwa keandalan analisa *pushover* menurun sejalan dengan bertambah berpengaruhnya ragam yang lebih tinggi. Untuk kejelasan perhatikan perbandingan antara kurva kapasitas yang dihasilkan dari analisa *pushover* dibandingkan dengan analisa dinamis nonlinier riwayat waktu pada struktur teratur dengan *re-entrant* sebesar 25 persen dari inti seperti ditunjukkan dalam Gambar 11, yang diambil dari referensi [11].



Gambar 11. Perbandingan Kurva Kapasitas: Analisa Pushover vs. Analisa Dinamis Nonlinier Riwayat Waktu, Struktur Teratur Tidak Simetris 10-Lantai, dengan *re-entrant* 25 persen [11]

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Analisa *Static Pushover* memberikan prediksi yang konservatif dan cukup memadai terhadap perilaku nonlinier struktur tidak teratur dengan *re-entrant*.
2. Keandalan analisa *static pushover* menurun sejalan dengan bertambahnya pengaruh ragam yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

1. SNI-1726, *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung, konsep ke-3, SNI 1726*, Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, Bandung, Indonesia. 1999.
2. ATC 40, *Seismic Evaluation and retrofit of Concrete Buildings, Volume 1*, California. 1996.
3. Boen, T., Dasar-dasar Analisa Pushover, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil, 5-6 March 1999*: 2.01-2.14, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung. 1999.
4. Krawinkler, H., Static Pushover Analysis, *SEAONC 1994 Fall Seminar on The Developing Art of Seismic Engineering*: 1-24, California, USA. 1994.
5. Krawinkler, H., Pushover Analysis: Why, How, When and Where Not to Use It, *Proc. 65th Annual Convention SEAOC, 1-6 October 1996*: 17-36, Maui, Hawaii, USA. 1996.
6. SEAOC, *Vision 2000, Performance-Based Seismic Engineering of Buildings*, SEAOC's Vision 2000 Report, Structural Engineers Association of California, California, USA. 2000.
7. Carr, A.J., *Ruaumoko, Inelastic Dynamic Analysis*, University of Canterbury, New Zealand. 1998.
8. Habibullah, A., *SAP2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*, Computer and Structures, Inc., Berkeley, California, USA. 1998.
9. Lumantarna, B., Wijoyo, H., and Harianto, D., 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: 133-139 Hanoi, Vietnam. 2001.
10. Lumantarna, B., Widjaja, S., and Santoso, B., 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. 2002.
11. Lumantarna B., Keandalan Analisa Pushover untuk Meramal Perilaku Seismik Nonlinier Struktur Portal Terbuka Teratur, *Profesionalisme dalam Dunia Konstruksi Indonesia*, Seminar dan Pameran HAKI 2002, 20-21 Agustus, Jakarta, 2002, pp.01-09.
12. Lumantarna, B. & Lukito, M., Resmat, Sebuah Program Interaktif untuk Menghasilkan Riwayat Waktu Gempa dengan Spektrum Tertentu, *Proc. HAKI Conference 1997, 13-14 August 1997*: 128-135, Jakarta, Indonesia. 1997.
13. SKBI, *Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Rumah dan Gedung, SKBI-1.3.53*, Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta, Indonesia. 1987.