

Studi Komparasi Analisis Inelastis Dinamik Riwayat Waktu dan Statik *Pushover* Terhadap Kinerja Struktur

Yudi Herdiansah¹, Prima Sukma Yuana²

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik – Universitas Jenderal Achmad Yani

Abstrak

Indonesia merupakan negara yang mempunyai potensi gempa aktif karena sebagian besar wilayahnya merupakan letak pertemuan lempeng tektonik. Oleh karena itu, perencanaan bangunan di Indonesia harus dibuat sedemikian rupa sehingga struktur tahan terhadap gempa. Tren terbaru perencanaan bangunan tahan gempa adalah perencanaan berbasis kinerja. Analisis yang digunakan adalah analisis dinamik riwayat waktu yang kemudian dibandingkan dengan analisis statik *pushover*. Analisis dinamik riwayat waktu menggunakan empat percepatan gempa yaitu Gempa El-Centro, Northridge, Kobe, dan Chi-chi yang kemudian respon spektrumnya disesuaikan dengan respon spektrum SNI 03-1726-2003. Parameter yang dihasilkan dari analisis ini adalah perpindahan maksimum. Hasil analisis menunjukkan besarnya perpindahan maksimum yang dihasilkan oleh analisis *time history* secara umum tidak melebihi target perpindahan dari analisis *pushover*, hanya ada penyimpangan pada struktur SRPMM dengan percepatan Gempa Northridge dimana perpindahan yang dihasilkan melebihi target perpindahan maksimum dari analisis *pushover*. Level kinerja struktur yang dihasilkan keduanya berada diantara IO-LS. Sesuai dengan level kinerja yang dihasilkan, analisis statik *pushover* cukup rasional dan dapat diandalkan untuk evaluasi perilaku seismik dan dapat menggantikan analisis dinamik nonlinier riwayat waktu dalam perencanaan berbasis kinerja.

Kata kunci:

Pushover, riwayat waktu, gempa, level kinerja, perencanaan, evaluasi perilaku seismik

1. Pendahuluan

Gempa merupakan fenomena alam yang terjadi dan tidak dapat dielakkan dari kehidupan manusia. Bencana gempa bumi selalu menimbulkan banyak korban jiwa dan juga harta benda. Namun bukan gempa buminya yang menyebabkan banyak korban melainkan oleh rusak dan runtuhnya bangunan buatan manusia.

Perencanaan struktur bangunan tahan gempa umumnya didasarkan pada analisis struktur elastis yang kemudian diberi faktor beban untuk mensimulasi kondisi ultimate (batas). Namun kenyataannya, perilaku keruntuhan bangunan saat terjadi gempa adalah inelastis. Oleh karena itu, evaluasi yang dapat memperkirakan kondisi inelastis struktur saat terjadi gempa, perlu mendapat jaminan bahwa kinerja bangunan akan memuaskan. Dalam perencanaan bangunan, struktur harus dibuat sedemikian rupa sehingga struktur memiliki kekuatan yang cukup dengan bobot yang ringan dan tingkat daktilitas yang baik sehingga mampu mendisipasi energi gempa yang terjadi.

Tren terbaru perencanaan bangunan tahan gempa saat ini adalah perencanaan berbasis kinerja. Konsep perencanaan berbasis kinerja adalah konsep yang menetapkan tingkat kinerja bangunan yang diharapkan dapat dicapai saat bangunan dilanda gempa dengan intensitas tertentu. Perilaku seismik struktur dievaluasi dengan evaluasi kinerja menggunakan analisis statik *pushover* dan analisis inelastis dinamik riwayat waktu (*inelastic dynamic time history analysis*).

2 Maksud dan Tujuan

Maksud dan tujuan dalam penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui perilaku inelastik model struktur rangka beton bertulang bertingkat yang direncanakan dengan SRPMM dan SRPMK.
2. Mengetahui hasil analisis statik *pushover* apakah dapat mewakili analisis dinamik nonlinier riwayat waktu dalam menggambarkan perilaku seismik struktur ketika mengalami gempa.

3 Tinjauan Pustaka

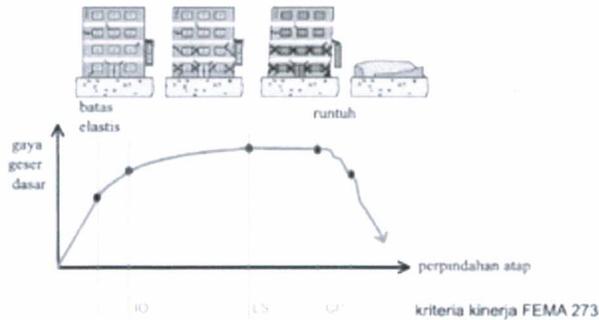
3.1 Konsep Kinerja Struktur Tahan Gempa

Performance based design adalah suatu konsep yang dalam perencanaan dan analisis seismik struktur bangunan, menetapkan berbagai kinerja struktur. Tingkat kinerja ini adalah tingkat kinerja bangunan yang diharapkan terjadi pada saat struktur dilanda gempa dengan tingkat intensitas tertentu. Tingkat kinerja ini merupakan suatu pilihan yang harus ditentukan oleh perencana struktur pada tahapan awal, dimana tingkat kinerja ini dapat dievaluasi dari beberapa kondisi batas. Kondisi batas ini bersifat fleksibel karena merupakan kesepakatan dari pihak perencana struktur dengan pihak pemilik bangunan. Sehingga pemilik bangunan dapat menentukan tujuan perencanaan dan resiko keselamatan, kesiapan pakai, dan kerugian harta benda yang mungkin terjadi akibat gempa yang akan datang.

Sasaran kinerja terdiri dari kejadian gempa rencana yang ditentukan dan taraf kerusakan yang diijinkan atau level kinerja dari bangunan terhadap kejadian gempa tersebut. Mengacu pada FEMA 273 (1997) yang menjadi acuan klasik bagi perencanaan berbasis kinerja maka kategori level kinerja struktur adalah:

Tabel 1 Kategori level kinerja

Level Kinerja	Penjelasan
O (<i>Operasional</i>)	Tidak ada kerusakan berarti pada struktur dan nonstruktur, bangunan tetap berfungsi.
IO (<i>Immediate Occupancy</i>)	Tidak ada kerusakan yang berarti pada struktur, dimana kekuatan dan kekakuannya kira-kira hampir sama dengan kondisi sebelum gempa. Komponen nonstruktur masih berada di tempatnya dan sebagian besar masih berfungsi. Bangunan dapat berfungsi dan tidak terganggu dengan masalah perbaikan.
LS (<i>Life Safety</i>)	Terjadi kerusakan elemen struktur, kekakuan berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang cukup terhadap keruntuhan. Komponen nonstruktur masih ada tetapi tidak berfungsi. Dapat dipakai lagi bila sudah dilakukan perbaikan.
IO (<i>Immediate Occupancy</i>)	Kerusakan yang berarti pada komponen struktur dan nonstruktur. Kekuatan dan kekakuan struktur berkurang banyak, hampir runtuh. Kecelakaan akibat kejatuhan material bangunan yang rusak sangat mungkin terjadi.



Gambar 1 Ilustrasi rekanva gempa berbasis kinerja

3.2 Analisis Statik Pushover

Gambar tersebut menjelaskan secara kualitatif level kinerja FEMA 273 yang digambarkan dengan suatu kurva hubungan gaya-perpindahan yang menunjukkan perilaku struktur secara menyeluruh terhadap pembebanan lateral.

Agar dapat menggambarkan kinerja struktur diperlukan analisis inelastis terhadap struktur. Analisis tersebut dapat dilakukan dengan analisis statik *pushover* dan analisis nonlinier riwayat waktu (*nonlinear time history analysis*).

Analisis statik *pushover* adalah suatu analisis statik nonlinier dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statik yang menangkap pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelepasan (sendi plastis) pertama di dalam struktur bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca elastis yang besar sampai mencapai kondisi plastis. Dari hasil analisis tersebut dapat diketahui nilai-nilai gaya geser dasar untuk perpindahan lantai atap tertentu. Nilai-nilai yang didapatkan tersebut kemudian dipetakan menjadi suatu kurva kapasitas dari struktur.

Tujuan analisis *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta untuk memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Selanjutnya dapat diidentifikasi bagian-bagian yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetailan dan stabilitasnya.

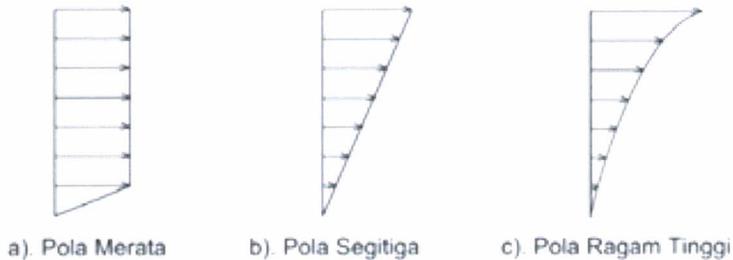
3.2.1 Target Perpindahan

Gaya dan deformasi setiap komponen/elemen dihitung terhadap "perpindahan tertentu" di titik kontrol yang disebut sebagai "target perpindahan" dengan notasi δ_i dan dianggap sebagai perpindahan maksimum yang terjadi saat bangunan mengalami gempa rencana. Untuk mendapatkan perilaku struktur pasca keruntuhan maka perlu dibuat analisis *pushover* untuk membuat kurva hubungan gaya geser dasar dan perpindahan lateral titik kontrol sampai minimal 150% dari target perpindahan, δ_i . Permintaan membuat kurva *pushover* sampai minimal 150% target perpindahan adalah agar dapat dilihat perilaku bangunan yang melebihi kondisi rencananya.

3.2.2 Pola Beban Dorong

Distribusi gaya inersia yang berpengaruh saat gempa, akan bervariasi secara kompleks sepanjang tinggi bangunan. Oleh karena itu, analisis beban dorong statik memerlukan berbagai kombinasi pola distribusi yang berbeda untuk menangkap kondisi yang paling ekstrim untuk perencanaan.

Bentuk distribusi yang relatif sederhana disampaikan dalam gambar berikut:



Gambar 2 Variasi pola distribusi pembebanan lateral (FEMA 273)

3.3 Analisis *Time history*

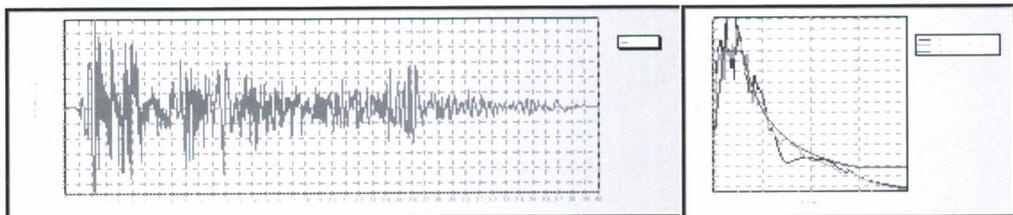
Dalam penelitian perilaku suatu struktur terhadap gempa diperlukan suatu gempa rencana yang dapat digunakan untuk melakukan analisis respons riwayat waktu. Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung (Peraturan Gempa Indonesia) tidak memberikan gempa rencana, tetapi untuk perencanaan, selama belum tersedia hasil pencatatan gempa setempat yang memuaskan yang dapat digunakan untuk mendapatkan pembagian gaya geser tingkat yang representatif, peraturan gempa Indonesia menentukan penggunaan minimal empat riwayat percepatan gempa yang berbeda.

Percepatan gempa yang ditinjau dalam analisis respons dinamik linier dan nonlinier riwayat waktu, harus diambil dari rekaman gerakan tanah akibat gempa yang didapat di suatu lokasi yang mirip kondisi geologi, topografi dan seismotektoniknya dengan lokasi tempat struktur yang ditinjau berada. Salah satunya yang harus digunakan adalah akselerogram gempa *El-Centro* yang direkam pada tanggal 15 Mei 1940 di California.

3.3.1 Percepatan Gempa Rencana

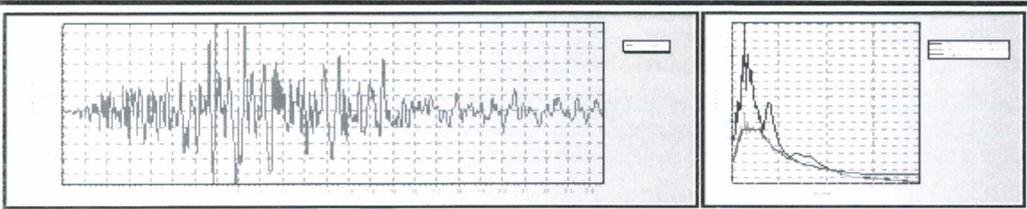
Percepatan gempa yang digunakan dalam kajian ini diperoleh dengan cara memodifikasi percepatan gempa asli sehingga spektrum responsnya sesuai dengan spektrum respons rencana dalam konsep SNI-03-1726-2003. Untuk memodifikasi percepatan gempa digunakan *software Seismo Match*. Percepatan gempa dari *software SeismoMatch* yang digunakan dalam kajian ini antara lain:

1. Gempa *El Centro* 1940, direkam pada 15 Mei 1940 di California, pada jarak 9 km dari pusat gempa, dengan durasi 13,98 detik. Skala gempa 6,4 Richter.



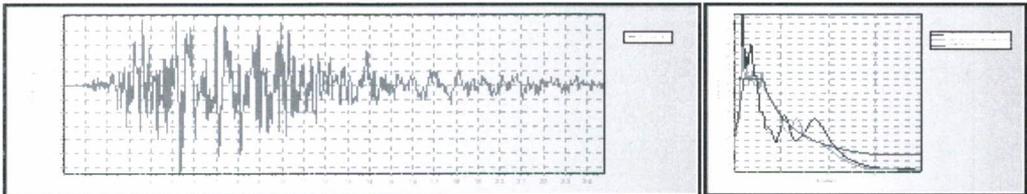
Gambar 3 Akselerogram gempa *El Centro* 1940

2. Gempa *Northridge* 1994, direkam pada 17 Januari 1994 di California, pada jarak 18 km dari pusat gempa. Skala gempa 6,7 Richter.



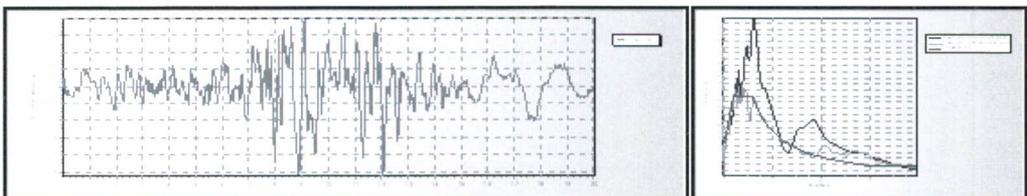
Gambar 3 Akselerogram gempa *El Centro* 1940

3. Gempa Kobe 1995, direkam pada 17 januari 1995 di Jepang. Skala gempa 6,9 Richter.



Gambar 5 Akselerogram gempa Kobe 1995

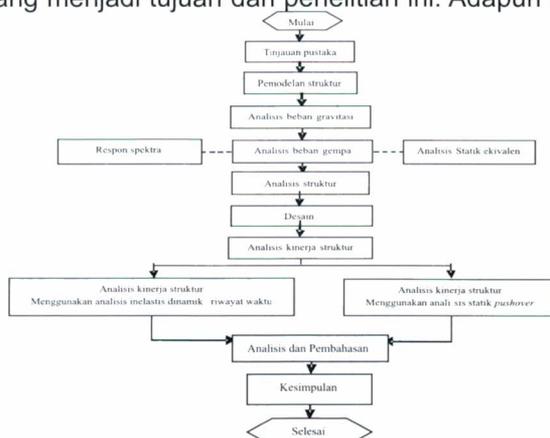
4. Gempa Chi-chi, direkam pada 21 september 1999 di Taiwan, pada jarak 15 kmdari pusat gempa, dengan durasi 30 detik. Skala gempa 7,6 Richter.



Gambar 6 Akselerogram gempa Chi-chi 1999

4 Metodologi Penelitian

Dalam penyusunan penelitian ini, dibutuhkan langkah-langkah dan tahapan-tahapan pengerjaan yang sistematis dan terarah agar diperoleh hasil yang sesuai dengan apa yang menjadi tujuan dari penelitian ini. Adapun langkah-langkah kajian ini antara lain:



Gambar 7 Langkah-langkah penelitian

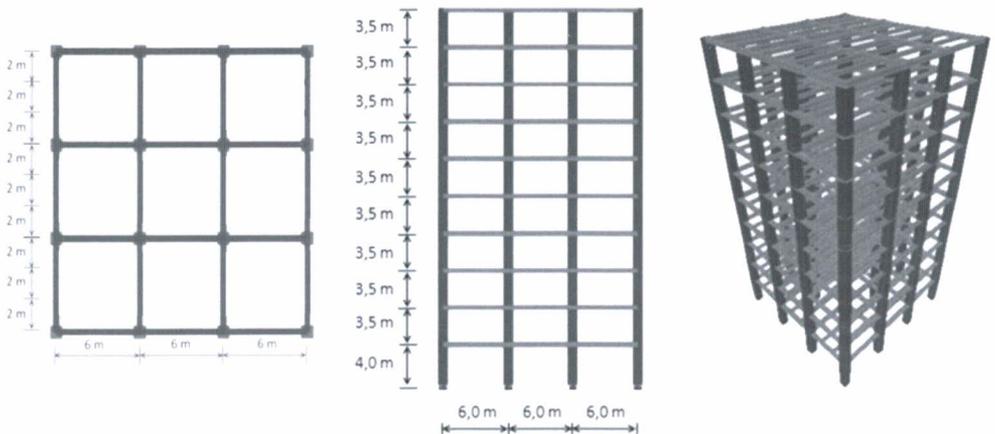
4.1 Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur dalam kajian ini adalah struktur beton bertulang yang direncanakan dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM) dan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Struktur gedung termasuk ke dalam kategori gedung beraturan menurut SNI 03-1726-2003 Pasal 4.3.1.

Adapun deskripsi gedung adalah sebagai berikut:

- a. Fungsi gedung : Gedung perkantoran
- b. Jenis struktur : Beton bertulang
- c. Jumlah lantai : 10 lantai
- d. Tinggi lantai dasar : 4 m
- e. Tinggi lantai tipikal : 3,5 m
- f. Lokasi : Wilayah 4
- g. Jenis tanah : Sedang

Data model struktur dapat dilihat pada gambar dibawah ini, dimana setiap lantai memiliki *layout* tipikal.



Gambar 8 Model struktur

Data-data dari material yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Mutu beton (f_c') : 30 Mpa
- b. Berat Jenis Beton (γ_c) : 24 KN/m³
- c. Modulus Elastisitas (E) : $4700 \sqrt{f_c'}$ Mpa
- d. Tegangan leleh baja (lentur, f_y) : 400 Mpa
- e. Tegangan leleh baja (geser, f_{yv}) : 240 MPa

5 Analisis dan Pembahasan

5.1 Analisis Statik *Pushover*

Berikut diberikan rangkuman dari hasil perhitungan level kinerja untuk kedua sistem struktur:

Tabel 2 Hasil analisis *pushover* untuk pola segitiga (SRPMM)

	Pelelehan Pertama		Target Perpindahan		Kondisi Sendi Plastis
	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (KN)	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (KN)	
FEMA 356	43	1329,517	285.800	2148.282	IO – LS
ATC 40			244.896	2082.267	IO – LS
FEMA 440			259.808	2106.928	IO – LS

Tabel 3 Hasil analisis *pushover* untuk pola ragam tinggi (SRPMM)

	Pelelehan Pertama		Target Perpindahan		Kondisi Sendi Plastis
	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (KN)	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (KN)	
FEMA 356	62,5	2521.762	265.330	3649.589	IO – LS
ATC 40			177.706	3477.783	IO – LS
FEMA 440			241.210	3606.862	IO – LS

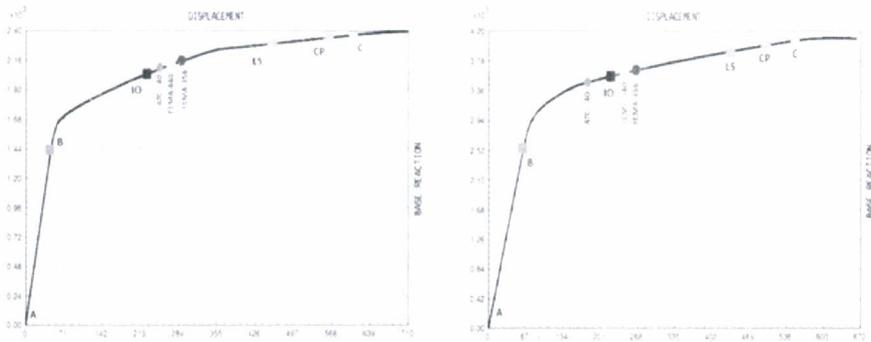
Tabel 4 Hasil analisis *pushover* untuk pola segitiga (SRPMK)

	Pelelehan Pertama		Target Perpindahan		Kondisi Sendi Plastis
	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (KN)	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (KN)	
FEMA 356	44,5	1375.769	285.800	2052.280	IO – LS
ATC 40			249.460	2020.476	IO – LS
FEMA 440			259.808	2034.955	IO – LS

Tabel 5 Hasil analisis *pushover* untuk pola ragam tinggi (SRPMK)

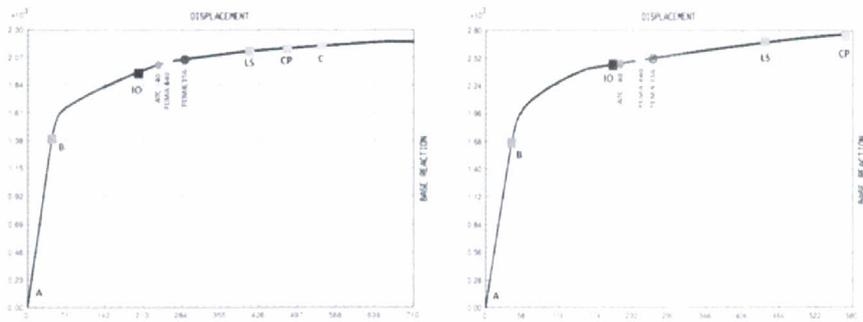
	Pelelehan Pertama		Target Perpindahan		Kondisi Sendi Plastis
	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (KN)	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (KN)	
FEMA 356	39	1573.579	265.330	2523.282	IO – LS
ATC 40			220.309	2477.511	IO – LS
FEMA 440			241.210	2498.760	IO – LS

Berdasarkan tabel analisis di atas, maka dapat diplot untuk masing-masing target perpindahan pada kurva *pushover* yang ditampilkan pada gambar 9 dan 10.



Gambar 9 Target perpindahan SRPMM

- kiri : pola segitiga
- kanan : pola ragam tinggi



Gambar 10 Target perpindahan SRPMK

- kiri : pola segitiga
- kanan : pola ragam tinggi

Berdasarkan gambar 9 dan 10 di atas, dapat dilihat bahwa analisis dengan metoda FEMA 356, FEMA 440, dan ATC-40 menghasilkan level kinerja yang sama yaitu IO – LS untuk kedua sistem struktur, kecuali untuk struktur SRPMM dengan metoda ATC-40 yang berada pada kondisi B – IO.

5.2 Analisis Time History

Tabel di bawah ini menunjukkan level kinerja struktur yang dihasilkan dari analisis *time history*.

Tabel 6 Daktilitas dan kondisi sendi plastis saat perpindahan maksimum

Tabel 6 Daktilitas dan kondisi sendi plastis saat perpindahan maksimum

GEMPA	SRPMM			KONDISI SENDI PLASTIS
	PERPINDAHAN (mm)		DAKTILITAS	
	δy	δm	μ_s	
Chi-Chi	55.95380	256.18580	4.57852	B – IO
Northridge	30.29770	428.63700	14.14751	IO – LS
Kobe	44.23770	234.44420	5.29965	B – IO
El Centro	49.65600	217.39330	4.37799	IO – LS
	SRPMK			
	PERPINDAHAN (mm)		DAKTILITAS	
	δy	δm	μ_s	
Chi-Chi	43.32990	260.53900	6.01291	B – IO
Northridge	37.69500	257.90430	6.84187	IO – LS
Kobe	37.34000	164.38290	4.40233	B – IO
El Centro	26.09960	207.68920	7.95756	B – IO

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa analisis *time history* menghasilkan level kinerja yang sama yaitu IO – LS untuk kedua sistem struktur.

5.3 Perbandingan Hasil Analisis Dinamik *Time History* dengan Statik *Pushover*

Dengan analisis riwayat waktu dapat dilihat apakah struktur gedung yang ditinjau sudah melampaui target perpindahan atau belum. Hasil analisis untuk masing-masing gempa riwayat waktu dan analisis *pushover* dibahas dalam subbab ini.

Tabel 7 memberikan nilai perpindahan maksimum dari analisis *time history* yang kemudian dibandingkan dengan target perpindahan dari analisis *pushover* pada struktur SRPMM.

Tabel 7 Perbandingan perpindahan analisis *pushover* dan *time history* (SRPMM)

Lantai	PUSHOVER		TIME HISTORY			
	Target Perpindahan (mm)		Perpindahan Maksimum (mm)			
	Pola segitiga	Pola ragam tinggi	El Centro	Kobe	Northridge	Chi-Chi
10	285.7845	285.7498	217.3933	234.4442	428.637	256.186
9	282.4697	283.5472	217.9174	215.2862	375.9807	243.669
8	272.8595	279.0104	213.9716	192.1228	323.5194	228.137
7	252.5349	269.5823	200.7416	164.7658	270.3171	207.255
6	220.3269	250.7415	173.8195	133.8956	213.9637	178.794
5	178.5355	218.7201	135.7801	100.9109	161.6186	143.632
4	133.595	177.782	96.8855	70.6157	117.0731	108.126
3	88.9994	131.111	61.6449	44.3613	77.4045	73.7181
2	48.478	81.8882	32.5595	23.7315	43.2969	42.1942
1	16.685	35.71	11.1469	8.76	16.3996	16.332

Tabel 8 memberikan nilai perpindahan maksimum dari analisis *time history* yang kemudian dibandingkan dengan target perpindahan dari analisis *pushover* pada struktur SRPMK.

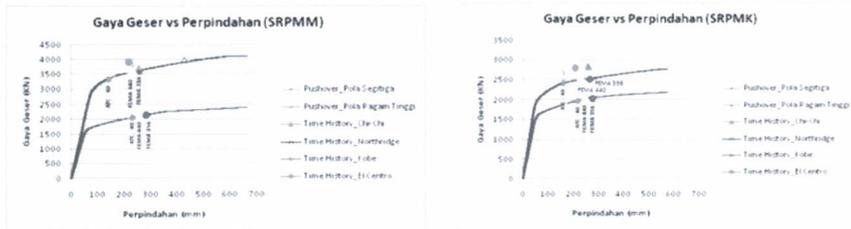
Tabel 8 Perbandingan perpindahan analisis *pushover* dan *time history* (SRPMK)

Lantai	PUSHOVER		TIME HISTORY			
	Target Perpindahan (mm)		Perpindahan Maksimum (mm)			
	Pola segitiga	Pola ragam tinggi	El Centro	Kobe	Northridge	Chi-Chi
10	285.77	256.251	207.6892	164.3829	257.9043	260.539
9	282.6364	263.6538	197.2647	156.3726	233.1737	258.189
8	273.7044	260.0121	181.5424	143.6744	205.9011	247.7525
7	254.4839	250.9718	157.9572	125.3028	176.7622	221.5497
6	223.2195	232.0759	128.3657	101.5814	146.4407	185.0177
5	181.8684	201.0949	97.2659	76.2356	114.8417	144.9421
4	92.43	162.3459	68.9729	53.96	83.5999	106.6194
3	137.005	119.2767	43.9391	34.7425	53.8168	71.411
2	51.8522	74.7459	23.6206	18.3008	28.4547	41.0461
1	19.5108	33.3592	8.409	5.709	9.6616	16.9285



Gambar 11 Kurva perbandingan perpindahan SRPMM (kiri) dan SRPMK (kanan)

Gambar 11 menunjukkan perbandingan hasil nilai gaya geser dasar vs perpindahan maksimum dari analisis beban dorong (*pushover analysis*) dan analisis riwayat waktu (*time history analysis*).



Gambar 12 Kurva perbandingan perpindahan

Berdasarkan kurva pada gambar 12, dapat disimpulkan bahwa analisis statik *pushover* dapat mewakili analisis dinamik nonlinier riwayat waktu. Namun ada penyimpangan dari hasil analisis struktur SRPMM dengan percepatan Gempa Northridge, dimana perpindahan maksimum yang dihasilkan melebihi target perpindahan dari analisis statik *pushover*. Hal ini diakibatkan oleh karakteristik percepatan Gempa Northridge yang berbeda dengan ketiga percepatan gempa lainnya.

Untuk percepatan Gempa El Centro, Kobe, dan Chi-Chi, perpindahan yang dihasilkan masih lebih kecil daripada perpindahan dengan analisis statik *pushover*. Ini menunjukkan bahwa analisis statik *pushover* cukup rasional dan dapat diandalkan untuk evaluasi perilaku seismik dan dapat menggantikan analisis dinamik nonlinier riwayat waktu dalam perencanaan berbasis kinerja.

6 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis *nonlinear time history* dan statik *pushover*, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. a. Perpindahan maksimum dari analisis *time history* pada struktur SRPMM adalah sebesar 428,637 mm akibat Gempa Northridge sedangkan struktur SRPMK menghasilkan perpindahan maksimum sebesar 260,539 mm yang diakibatkan oleh Gempa Chi-Chi.
b. Target perpindahan maksimum dari analisis statik *pushover* pada struktur SRPMM adalah sebesar 285,7845 mm dengan pola beban segitiga sedangkan struktur SRPMK menghasilkan target perpindahan sebesar 285,77 mm dengan pola beban segitiga.
Besarnya perpindahan maksimum yang dihasilkan oleh analisis *time history* secara umum tidak melebihi target perpindahan dari analisis statik *pushover*, hanya ada penyimpangan pada struktur SRPMM dengan percepatan Gempa Northridge dimana perpindahan yang dihasilkan melebihi target perpindahan maksimum dari analisis statik *pushover*.
2. Level kinerja struktur yang dihasilkan dari analisis *time history* maupun statik *pushover* sama-sama berada di antara *Immediate Occupancy* dan *Life Safety* (IO-LS). Sesuai dengan level kinerja yang dihasilkan, analisis statik *pushover* cukup rasional dan dapat diandalkan untuk evaluasi perilaku seismik dan dapat menggantikan analisis dinamik nonlinier riwayat waktu dalam perencanaan berbasis kinerja.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ali, D. *Verifikasi Strong Metodologi*. <http://www.lontar.ui.ac.id> (4 Januari 2012)
2. Dewobroto, W. *Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover*. <http://sipil-uph.tripod.com>. (4 Desember 2011)
3. Dh3too-kv. *Perlunya Beban Gempa Dalam Suatu Struktur*. <http://dh3too-kv.blogspot.com>. (4 Januari 2012)
4. Ginsar, I.M dan Lumantara, B. (TT). *Seismic Performance Evaluation Of Building With Pushover Analysis*. <http://fportfolio.petra.ac.id>. (4 Januari 2012)
5. Wibowo., Purwanto, E., Yanto, D. *Menentukan Level Kinerja Struktur Beton Bertulang Pasca Gempa*. Media Teknik Sipil, X (1) ,49 - 54. (2010)