

PEMODELAN STRUKTUR BANGUNAN GEDUNG BERTINGKAT BETON BERTULANG RANGKA TERBUKA SIMETRIS DI DAERAH RAWAN GEMPA DENGAN METODA ANALISIS *PUSHOVER*

Siti Aisyah N.^{1*} dan Yoga Megantara²

¹Balai Diklat Wilayah VII Kementerian Pekerjaan Umum,
Jl. K.S. Tubun No.12, Lapangan Hatta, Palembang

²Pusat Penelitian dan Pengembangan Permukiman, Kementerian Pekerjaan Umum
Jl. Panyaungan, Cileunyi Wetan, Bandung 40393

*Koresponensi Pembicara. Phone: +62 711 359410, Fax: +62 711 377251
Email: nurjannah_sa@yahoo.co.id

ABSTRAK

Negara Indonesia terletak di antara beberapa lempeng tektonik dunia, yaitu lempeng Australia yang bergerak ke arah utara, lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat laut, dan lempeng Eurasia, sehingga sering mengalami gempa bumi. Dalam peraturan tentang kegempaan SNI 03-1726-2002 Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung, disebutkan salah satu metoda untuk menganalisis kinerja struktur suatu bangunan dalam kondisi pasca elastik akibat beban gempa adalah analisis *pushover* atau yang umum disebut metoda statis nonlinier. Tujuan dari penulisan makalah ini adalah untuk memperlihatkan bahwa struktur yang telah memenuhi syarat kekuatan sesuai dengan peraturan desain gedung bertingkat masih memerlukan analisis lebih jauh untuk mengukur kinerja model struktur bangunan gedung di bawah beban gempa dalam kondisi pasca elastik. Metoda penelitian yang digunakan untuk menganalisis model struktur bangunan gedung adalah analisis *pushover* berdasarkan SNI 03-1726-2002, Federal Emergency Management Agency (FEMA) 273, FEMA 356, dan Applied Technology Council (ATC)-40. Kinerja model struktur bangunan gedung yang terletak di Wilayah Gempa 4 Tanah Sedang di Indonesia dianalisis untuk mendapatkan tingkat kinerja struktur tersebut terhadap berbagai macam beban, termasuk beban gempa. Hasil analisis *pushover* memperlihatkan bahwa model struktur mempunyai tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO) menurut ATC-40 atau pada tingkat *Collapse Prevention* (CP) menurut FEMA 273. Analisis selanjutnya dengan beban Gempa Wilayah 6 Tanah Sedang yang mempunyai *Peak Ground Acceleration* (PGA) lebih tinggi daripada Wilayah Gempa 4 Tanah Sedang memperlihatkan bahwa model struktur masuk dalam tingkat *Damage Control* menurut FEMA 273 atau *Collapse Prevention* menurut ATC-40 serta mempunyai lokasi titik kinerja (*performance point*) lebih tinggi. Lokasi titik kinerja ini menunjukkan bahwa struktur di Wilayah Gempa 6 lebih rentan terhadap beban gempa rencana. Hal ini perlu diwaspadai karena berdasarkan peta gempa terbaru yang terdapat di dalam RSNI 03-1726-201x Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung, nilai PGA di semua wilayah Indonesia lebih tinggi daripada nilai PGA pada peta gempa yang terdapat di dalam SNI 03-1726-2002.

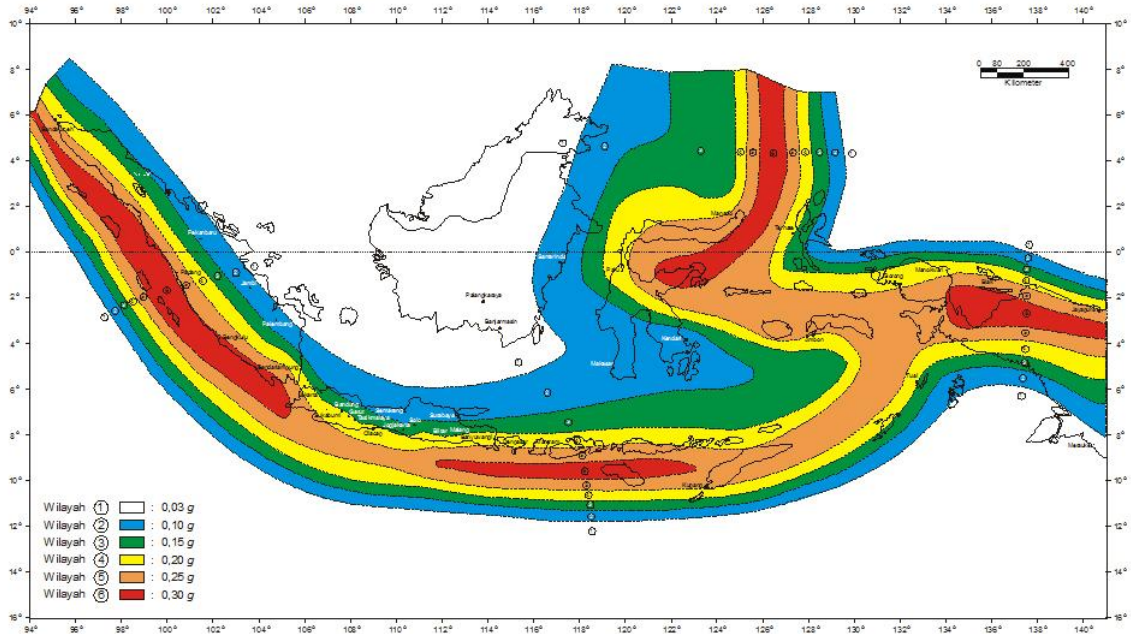
Kata Kunci: analisis *pushover*, *Peak Ground Acceleration*, spektra kapasitas, spektra kebutuhan, titik kinerja, wilayah gempa.

1. PENDAHULUAN

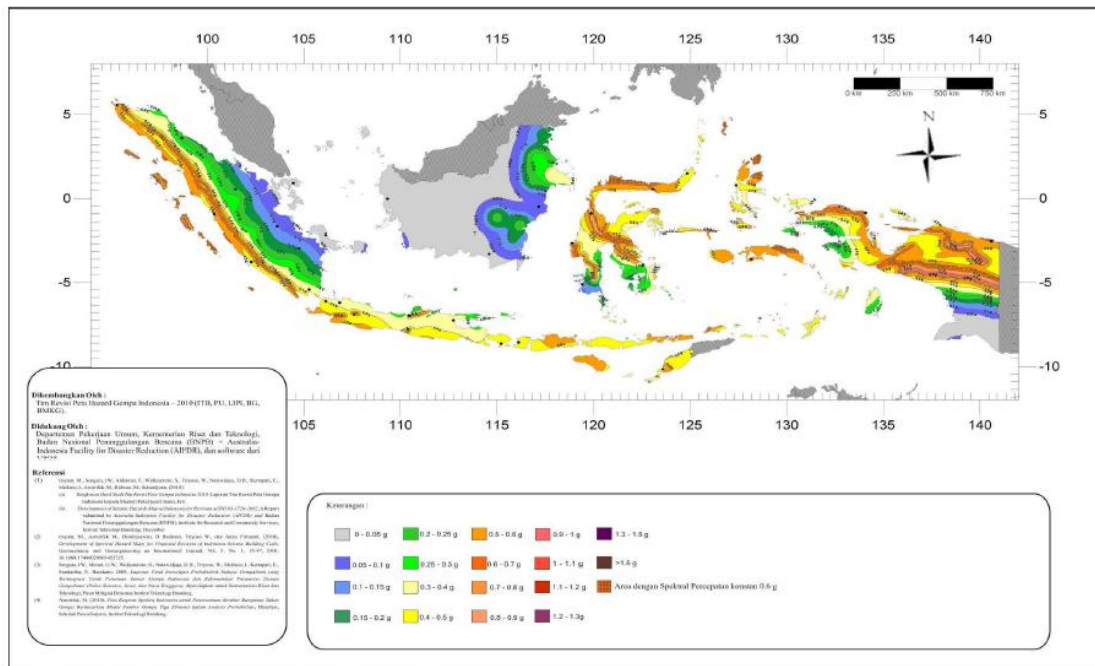
Negara Indonesia terletak di antara beberapa lempeng tektonik dunia, yaitu lempeng Australia yang bergerak ke arah utara, lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat laut, dan lempeng Eurasia, sehingga sering mengalami gempa bumi. Hal tersebut menyebabkan kondisi bangunan dalam keadaan rawan terhadap bahaya gempa. Maka, perencanaan struktur bangunan harus memenuhi kaidah ketahanan struktur. Bangunan gedung di Indonesia pada umumnya terdiri dari rangka beton bertulang konvensional. Fungsi bangunan-bangunan tersebut adalah sebagai rumah tinggal satu ataupun dua lantai, kantor, apartemen, rumah susun, rumah toko, ataupun fungsi lain. Perencanaan struktur gedung tersebut pada umumnya menggunakan metoda linier dinamik (spektra respon) dengan nilai kemampuan nominal struktur harus sama atau lebih besar dari nilai total beban terfaktor (metode perencanaan batas). Perencanaan dengan metode tersebut tidak memperlihatkan kondisi struktur bangunan pasca elastik di mana bangunan bisa mencapai batas kekuatannya dalam mekanisme keruntuhan, terutama akibat beban gempa. Dalam peraturan tentang kegempaan SNI 03-1726-2002 Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung, disebutkan salah satu metoda untuk menganalisis kinerja struktur suatu bangunan dalam kondisi pasca elastik akibat beban gempa adalah analisis *pushover* atau yang umum disebut metoda statis nonlinier.

Pembagian wilayah Indonesia berdasarkan kekuatan gempa rencana (nominal) dalam SNI 03-1726-2002 diperlihatkan pada Gambar 1. Pada peta gempa Indonesia versi tahun 2010 yang terdapat dalam RSNI 03-1726-201x, nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) di semua wilayah Indonesia mengalami peningkatan seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 2. Hal ini menyebabkan beban gempa rencana yang harus ditahan oleh struktur bangunan menjadi lebih besar. Sebagai perbandingan, nilai PGA Wilayah 4 pada peta gempa versi tahun 2002 adalah 0,20 g, sedangkan nilai PGA sebagian Wilayah 4 pada peta gempa versi tahun 2010 adalah 0,40-0,50 g. Nilai ini bahkan lebih besar daripada PGA pada Wilayah 6 peta gempa versi 2002 sebesar 0,30 g. Maka, perencanaan struktur bangunan baru ataupun pemeriksaan bangunan yang telah berdiri harus memperhatikan faktor peningkatan kekuatan gempa nominal dalam menilai kinerja struktur tersebut.

Tujuan dari penulisan makalah ini adalah untuk memperlihatkan bahwa struktur yang telah memenuhi syarat kekuatan menggunakan metode perencanaan batas sesuai dengan peraturan desain gedung bertingkat masih memerlukan analisis lebih jauh untuk mengukur kinerja model struktur bangunan gedung di bawah beban gempa dalam kondisi pasca elastik, serta untuk memperlihatkan perlunya kehati-hatian dalam perencanaan atau pemeriksaan struktur gedung akibat adanya bahaya gempa di Indonesia.



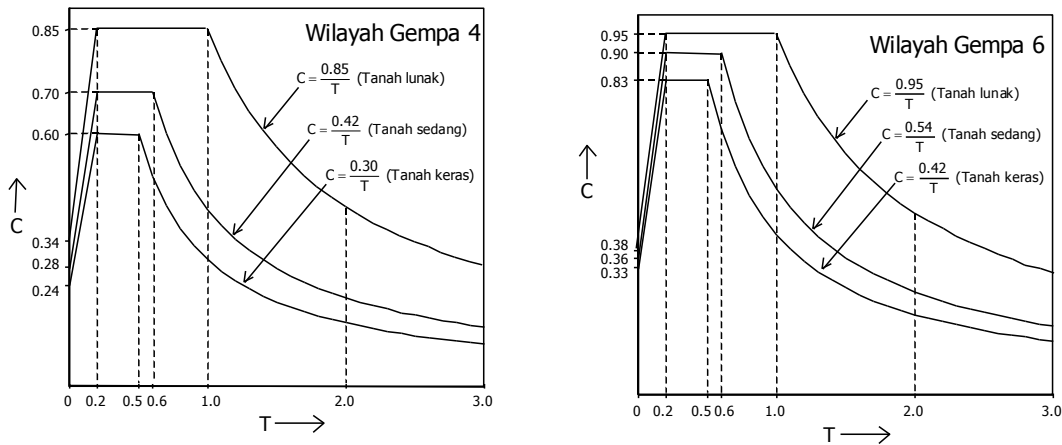
Gambar 1. Wilayah Gempa Indonesia dengan Percepatan Puncak Batuan Dasar Menggunakan Periode Ulang 500 Tahun (Sumber: SNI 03-1726-2002)



Gambar 2. Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Rata-rata Geometrik (MCEG), Kelas Situs SB (Sumber: RSNI 03-1726-201x)

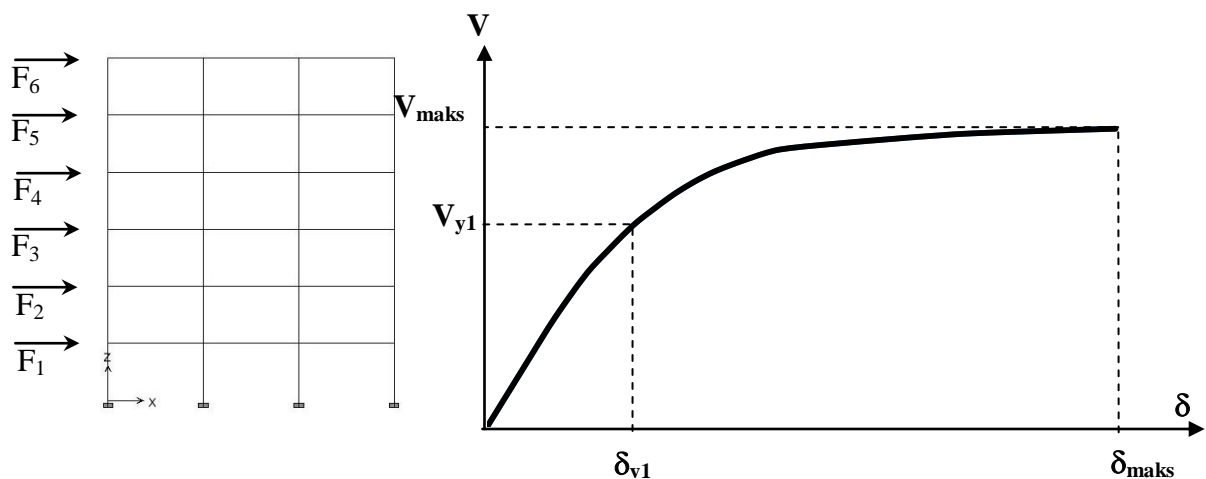
2. BAHAN DAN ALAT

Beban gempa yang digunakan dalam pemodelan adalah berdasarkan pada peta gempa dalam SNI 03-1726-2002. Bentuk spektra respon Wilayah Gempa 4 dan Wilayah Gempa 6 sebagai input model struktur adalah seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Spektra Respon Gempa Nominal pada Wilayah Gempa 4 dan Wilayah Gempa 6 (Sumber: SNI-1726-2002)

Analisis *pushover* adalah suatu cara untuk menganalisis struktur dengan beban statik monotonik yang diaplikasikan sepanjang ketinggian struktur dan ditingkatkan sampai simpangan pada puncak atas struktur mencapai simpangan target. Dalam proses *pushover*, satu sendi plastis akan mencapai kondisi leleh pertama yang kemudian diikuti dengan kondisi leleh pada sendi-sendi plastis lainnya. Hal ini terus berlanjut sampai akhirnya, simpangan pada puncak struktur mencapai simpangan target atau struktur memasuki kondisi tidak stabil. Proses *pushover* bisa dilakukan dengan prosedur *load-controlled* atau *displacement-controlled* (Oguz, 2005). Prosedur *load-controlled* digunakan jika beban yang diaplikasikan telah diketahui nilainya. Misalnya, beban gravitasi bisa diaplikasikan dalam *pushover load-controlled*. Prosedur *displacement-controlled* biasanya digunakan jika beban yang bisa ditahan oleh suatu struktur belum diketahui dengan pasti. Sehingga, beban tersebut ditingkatkan sampai struktur mencapai suatu nilai simpangan target. Spektra kapasitas struktur dalam analisis *pushover* adalah seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Struktur Bangunan Gedung yang Mendapat Beban Gempa dan Spektra Kapasitas (Sumber: SNI – 1726 – 2002)

dengan



- \square_{maks} : simpangan maksimum struktur pada saat terjadinya sendi plastis terakhir sebelum runtuh
- \square_{y1} : simpangan maksimum struktur pada saat terjadinya sendi plastis pertama
- V_{y1} : gaya geser saat leleh pertama
- V_{maks} : gaya geser maksimum

Penelitian dilakukan dengan menggunakan suatu model struktur bangunan gedung dengan konfigurasi dimensi yang simetris setinggi enam lantai menggunakan struktur rangka beton bertulang. Model tersebut mendapat beban gravitasi (beban hidup dan beban mati) serta beban gempa di Wilayah Gempa 4 Tanah sedang dan Wilayah Gempa 6 Tanah Sedang berdasarkan SNI 03-1726-2002. Penilaian kinerja struktur mengacu pada SNI 03-1726-2002, ATC-40, dan FEMA 273.

Dalam tulisan ini, kinerja struktur diperoleh dengan analisis nonlinier *pushover*. Tingkat kinerja struktur yang diatur dalam ATC-40 adalah seperti yang dijelaskan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Uraian tentang Tingkat Kinerja Bangunan Gedung berdasarkan FEMA 273 diperlihatkan pada Tabel 3. Spektra kapasitas menurut ATC-40 dan FEMA 273 adalah berturut-turut seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Tabel 1

Batas Deformasi Bangunan Gedung (Sumber: ATC-40, 1996)

Tingkat Kinerja				
<i>Interstory Drift Limit</i> (Batas Simpangan Antar Lantai)	<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Structural Stability</i>
<i>Maximum Total Drift</i> (Simpangan Total Maks.)	0.01	0.01-0.02	0.02	0.33 V_i/P_i
<i>Maximum Inelastic Drift</i> (Simpangan Nonelastik Maks.)	0.005	0.005-0.015	<i>No Limit</i>	<i>No Limit</i>

Tabel 2

Tingkat Kinerja Struktural (Sumber: ATC-40, 1996)

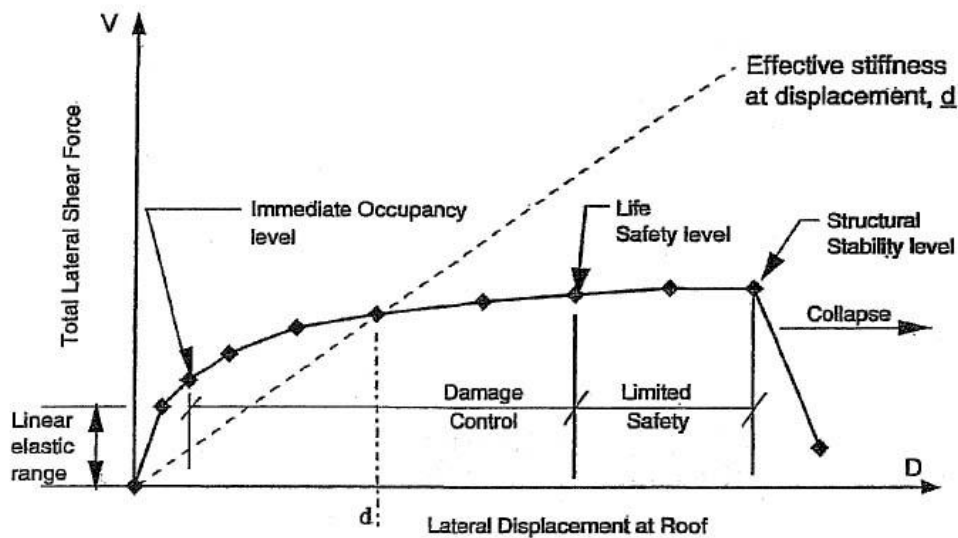
No.	Tingkat Kinerja	Uraian
1	SP-1	<i>Immediate Occupancy</i> (Penggunaan Sedang)
2	SP-2	<i>Damage Control</i> (Kontrol Kerusakan)
3	SP-3	<i>Life Safety</i> (Aman untuk Dihuni)
4	SP-4	<i>Limited Safety</i> (Keamanan Terbatas)
5	SP-5	<i>Structural Stability</i> (Stabilitas Struktural)
6	SP-6	<i>Not Considered</i> (Tidak Diperhitungkan)

Tabel 3

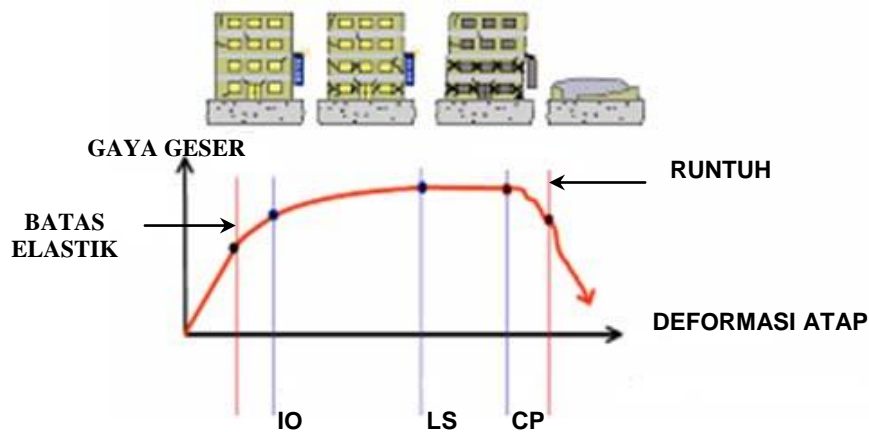
Tingkat Kinerja Bangunan Gedung (Sumber: FEMA 273, 1997)

No.	Tingkat Kinerja	Uraian
1	<i>Operational Level</i> (Tingkat Operasional)	Peralatan utilitas masih berfungsi; terdapat sedikit kerusakan
2	<i>Immediate Occupancy Level</i> (Tingkat Penggunaan Sedang)	Bangunan menerima “tanda hijau” (aman untuk digunakan) dari hasil pemeriksaan; perlu

3	<i>Life Safety Level</i> (Tingkat Aman untuk Dihuni)	sedikit perbaikan Struktur tetap stabil dan mempunyai kapasitas pelayanan cukup; kerusakan bagian nonstruktural masih terkontrol.
4	<i>Collapse Prevention Level</i> (Tingkat Pencegahan Keruntuhan)	Bangunan tetap berdiri, hampir runtuh; kerusakan atau kehilangan lain masih diperkenankan.



Gambar 5. Spektra Kapasitas (Sumber: ATC-40, 1996)



Gambar 6. Spektra Kapasitas (Sumber: FEMA 273, 1997)

Nilai perpindahan maksimum dan gaya geser yang terjadi sebelum runtuh disebut sebagai titik kinerja (*performance point*). Penentuan titik kinerja dapat diperoleh dengan metoda yang dipaparkan dalam ATC-40, FEMA 356, FEMA 440, dan SNI 03-1726-2002.

Dalam pemodelan, nilai faktor reduksi gempa adalah 8,5 dan nilai daktilitas asumsi awal adalah 5,3 dengan mengacu pada Tabel 2 SNI 03-1726-2002. Analisis struktur menghasilkan dimensi dan detil tulangan balok, kolom dan pelat yang

mempunyai kekakuan struktur tertentu, sehingga nilai waktu getar alami pertama adalah kurang dari satu detik. Detil tulangan yang merupakan keluaran program digunakan sebagai input model penampang dengan program *Reponse-2000* untuk memperoleh grafik momen-kelengkungan. Grafik tersebut dianalisis untuk memperoleh nilai *property hinge* penampang balok dengan berbagai detil tulangan tertentu. Nilai *property hinge* kolom adalah sesuai dengan nilai *default* program. Beban gravitasi menjadi input *load-controlled pushover* dan beban lateral gempa monotonik ditingkatkan sampai simpangan atap struktur mencapai nilai tertentu (*displacement-controlled*). Dalam tahap pertama analisis *pushover*, model mendapat beban gempa pada Wilayah Gempa 4 Tanah Sedang. Dalam tahap analisis *pushover* selanjutnya, beban ditingkatkan dengan cara memberikan beban gempa berdasarkan Wilayah Gempa 6 Tanah Sedang. Hasil analisis *pushover* dibandingkan untuk memperoleh informasi perbedaan kinerja dari kedua model struktur tersebut.

Data model struktur bangunan adalah seperti yang diperlihatkan pada Tabel 4 dan Tabel 5. Bentuk model struktur adalah seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 7. Jarak antar kolom pada arah sumbu X adalah sama dengan jarak antar kolom pada arah sumbu Y, yaitu 6 meter.

Tabel 4

Data Model Struktur

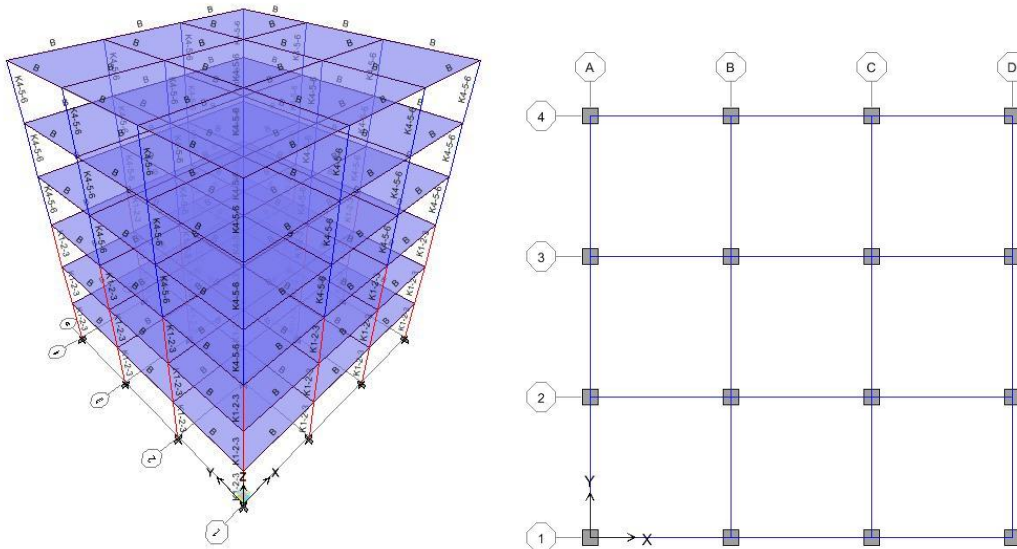
No.	Subjek	Data
1	Fungsi Bangunan Gedung	Kantor
2	Faktor Keutamaan	1
3	Jarak Antar Kolom pada Arah Sumbu-X	6 meter
4	Jarak Antar Kolom pada Arah Sumbu-Y	6 meter
5	Tinggi Tingkat	3,6 meter
6	Jumlah Tingkat	6
7	Kuat Tekan Beton (f_c')	35 MPa
8	Kuat Leleh Baja Tulangan Longitudinal (f_y)	400 MPa
9	Kuat Leleh Baja Tulangan Sengkang (f_y)	240 MPa
10	Dimensi Kolom pada Lt. 1-3	650 x 650
11	Detil Tulangan Kolom pada Lt. 1-3	12 D22
12	Dimensi Kolom pada Lt. 4-6	550 x 550
13	Detil Tulangan Kolom pada Lt. 4-6	8 D22
14	Dimensi Balok Semua Lantai	250 x 500
15	Tebal Pelat (Membran) Lt. 1-6	120 mm
16	Detil Tulangan Pelat Lt. 1-6	□10-200; dua arah

Tabel 5

Detil Tulangan Balok pada Setiap Lantai

Lantai	Balok Pinggir			Balok Tengah		
	Tulangan Tumpuan	Tulangan Lapangan	Tulangan Tumpuan	Tulangan Tumpuan	Tulangan Lapangan	Tulangan Tumpuan

1	3D19	2D19	3D19	3D19	2D19	3D19
	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19
2	3D19	2D19	3D19	4D19	2D19	4D19
	2D19	2D19	2D19	2D19	3D19	2D19
3	3D19	2D19	3D19	4D19	2D19	4D19
	2D19	2D19	2D19	2D19	3D19	2D19
4	3D19	2D19	3D19	3D19	2D19	3D19
	2D19	2D19	2D19	2D19	3D19	2D19
5	2D19	2D19	2D19	3D19	2D19	3D19
	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19
6	2D19	2D19	2D19	3D19	2D19	3D19
	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19



Gambar 7. Tampak Tiga Dimensi dan Denah Model Struktur Enam Lantai

Desain dimensi dan detail tulangan balok, kolom dan pelat berdasarkan SNI 03-2847-2002 dengan nilai-nilai faktor yang digunakan dalam proses desain beton bertulang dalam program telah disesuaikan, yaitu (BSN, 2002):

- (tarik lentur) = 0,8
- (tekan terkekang) = 0,7
- (tekan spiral) = 0,75
- (geser) = 0,6

Model struktur mendapat kombinasi beban gravitasi (beban hidup dan beban mati), beban gempa statik, serta kombinasi beban gravitasi dan beban gempa dinamik spektra respon pada arah Sumbu X dan Sumbu Y. Analisis beban gempa statik ekuivalen menggunakan beban gempa statik. Berdasarkan spektra respon pada Gambar 3, untuk Wilayah Gempa 4 Tanah Sedang, nilai Faktor Respon Gempa (C_a) adalah 0,28 dan nilai Faktor Respon Gempa Vertikal (C_v) adalah 0,42. Untuk Wilayah

Gempa 6 Tanah Sedang, nilai Faktor Respon Gempa (C_a) adalah 0,36 dan nilai Faktor Respon Gempa Vertikal (C_v) adalah 0,54. Nilai perioda adalah sesuai dengan perioda pertama model struktur. Parameter redaman 5% dan jenis perilaku struktur adalah A (bangunan baru).

Analisis ragam spektrum respon menggunakan spektrum respon Gempa Rencana sebagai beban gempa untuk menentukan respon dinamik struktur gedung tiga dimensi yang berperilaku elastik penuh terhadap pengaruh suatu gempa. Respon dinamik total struktur gedung tersebut didapat sebagai superposisi dari respon dinamik maksimum masing-masing ragamnya (BSN, 2002). Model struktur gedung beraturan, sehingga penjumlahan respon ragam bisa dilakukan dengan metoda Kombinasi Kuadratik Lengkap (*Complete Quadratic Combination*) ataupun Akar Jumlah Kuadrat (*Square Root of the Sum of Squares*). Dalam pemodelan ini, metoda CQC digunakan untuk perhitungan *Modal Combination* dan metoda SRSS digunakan untuk perhitungan *Directional Combination*. Redaman struktur yang diperhitungkan adalah 5% dari redaman kritis. Nilai spektrum respon dengan redaman 5% untuk setiap tingkat bahaya gempa mewakili respon maksimum struktur yang berhubungan dengan percepatan spektra (S_a) selama gempa terjadi sebagai fungsi periode vibrasi (T) (BSN, 2002). Nilai parameter gempa yang digunakan dalam analisis ragam spektrum respon adalah sama dengan analisis gempa statik ekuivalen. Jumlah ragam adalah 12 untuk menjamin nilai partisipasi massa yang menghasilkan respon total mencapai minimal 90%. Nilai respon total minimum ditetapkan dalam SNI -1726-2002 Pasal A.7.2.1. Nilai gaya geser tingkat nominal akibat pengaruh gempa rencana (V_t) sepanjang tinggi struktur gedung hasil analisis ragam spektrum respon dalam arah sumbu X dan sumbu Y harus dikalikan dengan Faktor Skala sesuai persamaan (1).

$$\text{Faktor Skala} = 0,8 V_1/V_t \geq 1,0 \quad (1)$$

dengan:

V_1 : gaya geser dasar nominal sebagai respon dinamik ragam yang pertama

V_t : gaya geser dasar nominal yang didapat dari hasil analisis ragam spektrum respon

Kombinasi beban yang digunakan adalah seperti yang diperlihatkan pada Tabel 6.

Tabel 6

Kombinasi Pembebanan

No.	Beban Mati	Beban Hidup	Beban Gempa Arah Sumbu X	Beban Gempa Arah Sumbu Y
1	1,4			
2	1,2	1,6		
3	1,2	0,5	1	0,3
4	1,2	0,5	0,3	1
5	1,2	0,5	-1	-0,3
6	1,2	0,5	-0,3	-1
7	0,9		1	0,3
8	0,9		0,3	1
9	0,9		-1	-0,3
10	0,9		-0,3	-1

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

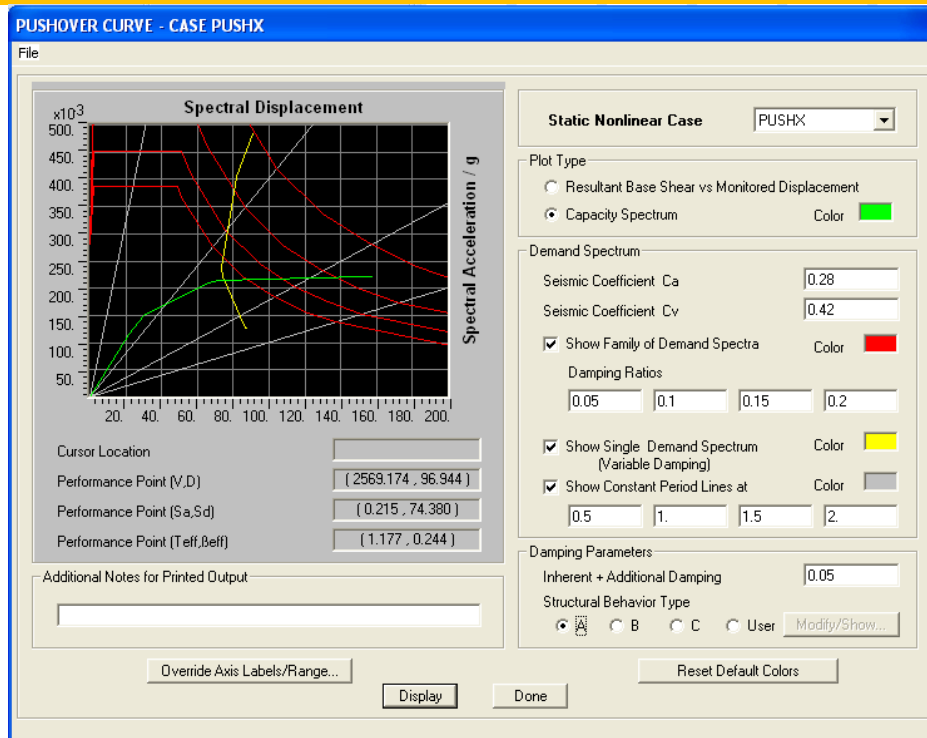
Dengan pemodelan struktur menggunakan SNI 03-2847-2002, diperoleh dimensi properti struktur balok, kolom dan pelat serta tulangan yang diperlukan. Dimensi struktur model sedemikian rupa sehingga perioda alami struktur ke-1 (T_1) adalah kurang dari satu detik. Dari pemodelan Ragam Vibrasi Bebas, diperoleh T_1 adalah 0,9836 detik. Nilai tersebut digunakan sebagai input beban gempa statik. Hasil analisis statik ekuivalen menghasilkan nilai gaya geser dasar nominal sebagai respon ragam yang pertama (V_1). Sedangkan, hasil analisis dinamik Spektra Respon menghasilkan nilai gaya geser nominal yang merupakan hasil analisis spektra respon (V_t).

Dari hasil analisis *pushover* menggunakan *performance based design*, titik kinerja model struktur pada Wilayah Gempa 4 Tanah Sedang dan Wilayah Gempa 6 Tanah Sedang adalah seperti yang tertera pada Tabel 7. Karena struktur semua model simetris pada arah sumbu X dan sumbu Y, maka hasil analisis adalah sama pada kedua arah tersebut. Lokasi titik kinerja terhadap spektra kapasitas dan spektra kebutuhan hasil analisis *pushover* adalah seperti yang tertera pada Gambar 8 dan Gambar 9, yaitu pada perpotongan Spektra Kapasitas yang berwarna hijau dengan Spektra Kebutuhan Tunggal dengan redaman 5% yang berwarna kuning. Spektra-spektra Kebutuhan berwarna merah. Gambar 10 memperlihatkan perbandingan lokasi titik kinerja pada Wilayah Gempa 4 dan Wilayah Gempa 6 Tanah Sedang.

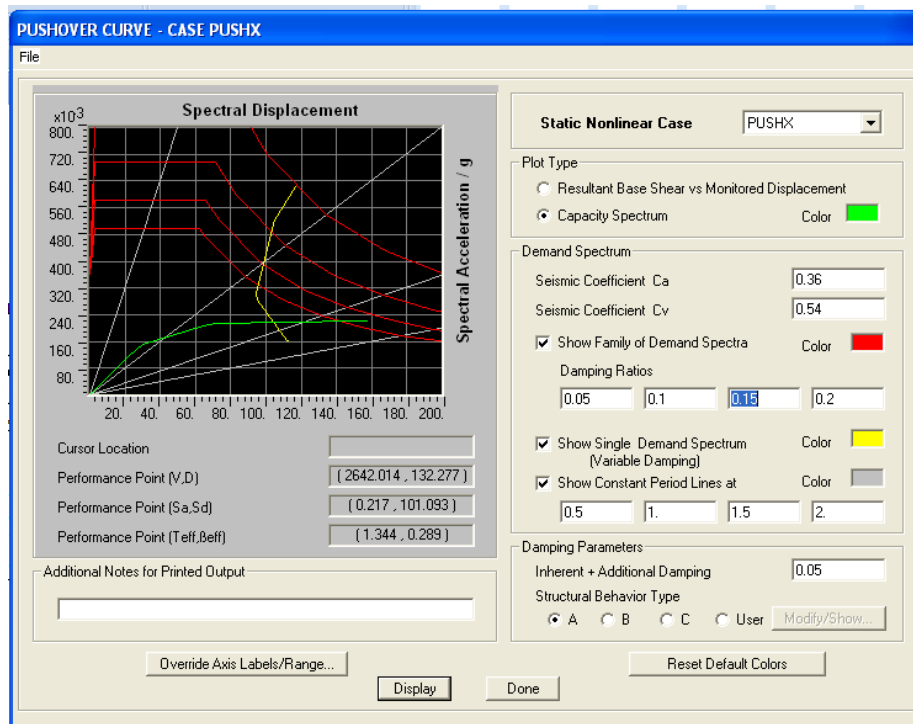
Tabel 7

Titik Kinerja Model Struktur

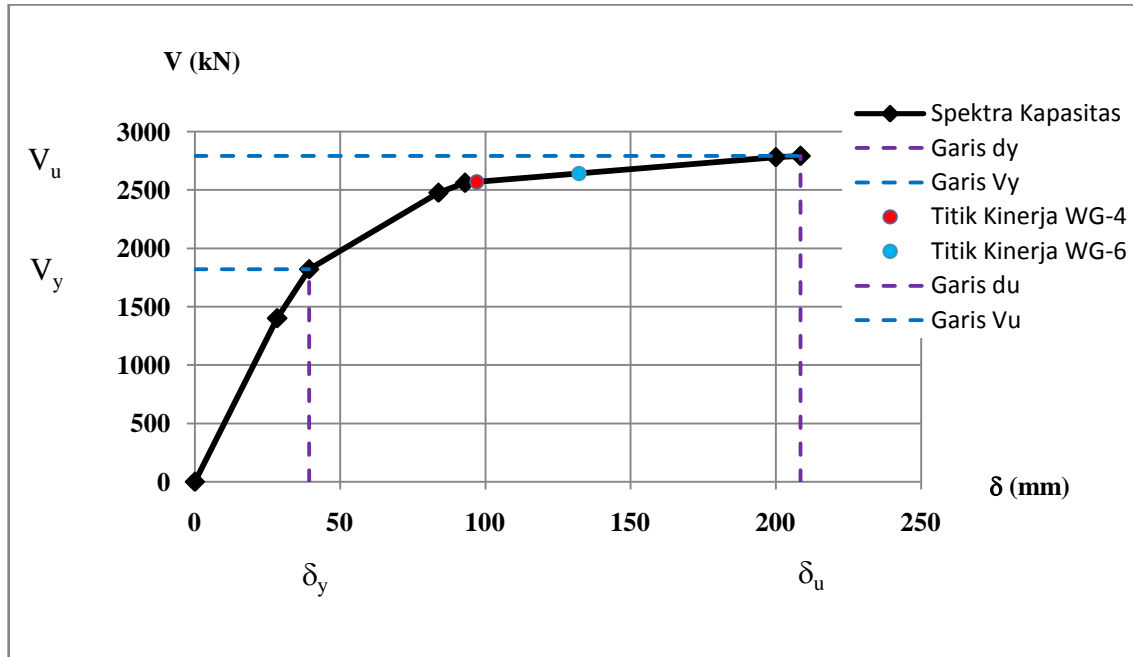
Wilayah Gempa, Tanah Sedang	V (kN)	D (mm)	T_{eff}	\square_{eff}
Wil. 4	2569,174	96,944	1,177	0,244
Wil.6	2642,014	132,277	1,344	0,289



Gambar 8. Titik Kinerja pada Wilayah Gempa 4, Tanah Sedang, $R = 8,5$, Spektra Kapasitas, Spektra Kebutuhan Tunggal dengan Redaman 5%, dan Grup Spektra Kebutuhan



Gambar 9. Titik Kinerja pada Wilayah Gempa 6, Tanah Sedang, $R = 8,5$, Spektra Kapasitas, Spektra Kebutuhan Tunggal dengan Redaman 5%, dan Grup Spektra Kebutuhan



Gambar 10. Perbandingan Lokasi Titik Kinerja Wilayah Gempa 4 dan Wilayah Gempa 6 Tanah Sedang pada Spektra Kapasitas

Dari Tabel 7 dan Gambar 10, terlihat bahwa lokasi titik kinerja (D,V) pada kasus Wilayah Gempa 4 lebih rendah daripada lokasi titik kinerja pada kasus Wilayah Gempa 6. Hal ini disebabkan karena model pada Wilayah Gempa 6 menahan beban gempa rencana yang lebih tinggi.

Tingkat kinerja model struktur diperoleh dengan membandingkan nilai *drift ratio* saat tercapai target perpindahan dengan kategori tingkat kinerja bangunan gedung pada Tabel 1. Persamaan (2) digunakan untuk memperoleh *drift ratio*.

$$Drift Ratio = D/H \tag{2}$$

dengan:

- D : perpindahan atap saat titik kinerja terjadi
- H : tinggi total struktur gedung

Tinggi total struktur gedung (H) enam lantai adalah 21,60 meter. Maka, *drift ratio* model pada Wilayah Gempa 4 dan Wilayah Gempa 6 Tanah Sedang berturut-turut adalah $96,94 \text{ mm}/21600 \text{ mm} = 0,0045$ dan $132,277 \text{ mm}/21600 \text{ mm} = 0,0061$.

Berdasarkan batas tingkat kinerja pada Tabel 1, maka tingkat kinerja struktur model di Wilayah Gempa 4 dan 6 Tanah Sedang berturut-turut termasuk dalam *Immediate Occupancy (IO)* dan *Damage Control* menurut ATC-40.

Nilai redaman efektif (\square_{eff}) struktur pada kedua macam Wilayah Gempa tersebut lebih kecil dari batas redaman efektif untuk gedung baru sebesar 40%. Maka, model struktur memenuhi syarat kinerja ATC-40 pada Wilayah Gempa 4 dan 6 Tanah Sedang. Analisis *pushover* yang memperlihatkan kondisi sendi platis tertera pada Tabel 8.

Tabel 8
Hasil Analisis *Pushover*

<i>Step</i>	Perpindahan D (mm)	Gaya Geser Dasar V (kN)	A-B	B-IO	IO- LS	LS- CP	CP- C	C-D	D-E	>E	TOTAL
0	0.00	0.00	478	2	0	0	0	0	0	0	480
1	28.37	1400.68	422	58	0	0	0	0	0	0	480
2	39.38	1822.15	362	40	56	22	0	0	0	0	480
3	83.86	2477.11	356	28	40	56	0	0	0	0	480
4	92.99	2561.02	322	14	36	12	96	0	0	0	480
5	199.99	2781.60	320	14	36	8	100	2	0	0	480
6	208.53	2791.41	480	0	0	0	0	0	0	0	480

dengan:

- A : *Origin Point* (Titik Awal)
- B : *Yield Point* (Titik Leleh)
- IO : *Intermediate Occupancy* (Penggunaan Sedang)
- LS : *Life Safety* (Aman untuk Dihuni)
- CP : *Collapse Prevention* (Pencegahan Keruntuhan)
- C : *Ultimate Point* (Titik Batas)
- D : *Residual Point* (Titik Sisa)
- E : *Failure Point* (Titik Keruntuhan)

Titik leleh terjadi pada *step* ke-2 dan titik keruntuhan pada *step* 6 telah diperlihatkan pada Gambar 10. Nilai daktilitas yang diperoleh dengan persamaan (3) sebagai berikut:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3)$$

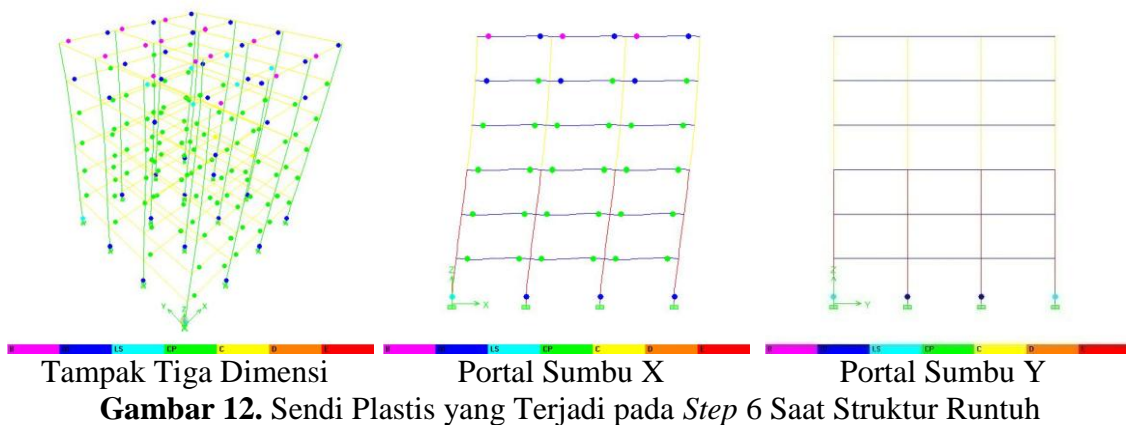
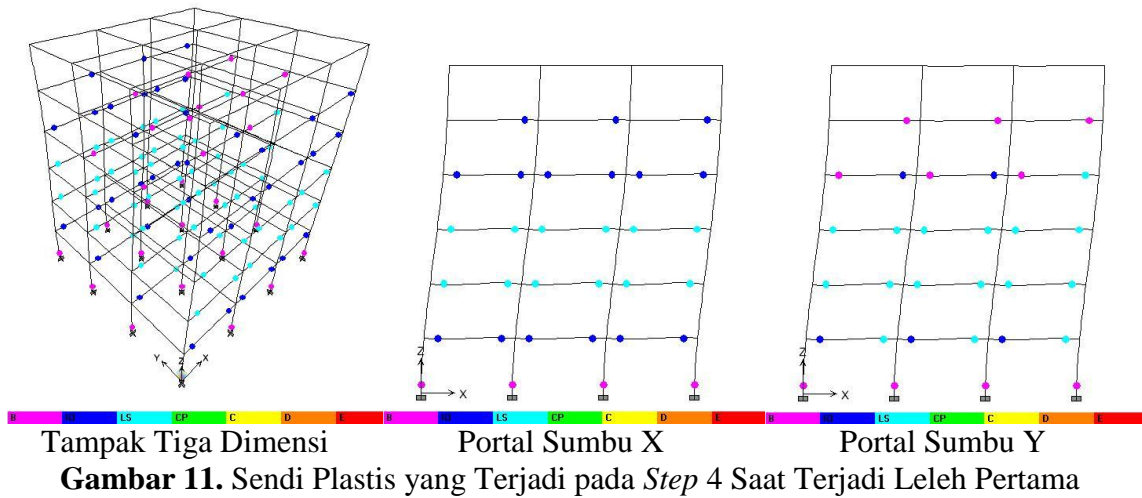
dengan:

- μ : daktilitas
- Δ_u : simpangan saat runtuh
- Δ_y : simpangan saat leleh pertama

Dari Tabel 8, diperoleh nilai daktilitas adalah $208,53 \text{ mm} / 39,38 \text{ mm} = 5,295756692 = 5,30$. Nilai ini sesuai dengan nilai daktilitas asumsi awal sebesar 5,30.

Nilai gaya geser dasar yang terjadi saat terjadi target perpindahan dihitung dengan interpolasi berdasarkan data pada Tabel 8. Maka, saat terjadi perpindahan sebesar 96,94 mm, gaya geser dasar yang dialami oleh model struktur di Wilayah Gempa 4 adalah 2569,17 kN. Untuk model di Wilayah Gempa 6, saat terjadi target perpindahan sebesar 132,28 mm, gaya geser dasar yang terjadi adalah 2642,02 kN.

Pada kondisi tersebut, minimal telah terdapat 36 sendi plastis di tingkat *Immediate Occupancy*, 12 sendi plastis di tingkat *Life Safety* dan 96 sendi plastis di tingkat *Collapse Prevention* menurut FEMA 273 yang terjadi pada *step* 4. Artinya, model struktur telah memasuki kondisi inelastis. Lokasi sendi plastis pada *step* 4 diperlihatkan pada Gambar 11. Lokasi sendi plastis saat terjadi keruntuhan struktur diperlihatkan pada Gambar 12.



4. KESIMPULAN

Dari hasil pemodelan, diperoleh kesimpulan bahwa perencanaan struktur gedung baru ataupun pemeriksaan struktur gedung yang telah berdiri memerlukan kehati-hatian. Walaupun struktur gedung telah memenuhi kriteria perencanaan metoda linier dinamik, perilaku struktur pasca elastik baru dapat diketahui dengan analisis nonlinier (analisis *pushover*) untuk memperoleh titik kinerja struktur. Menurut ATC-40, model struktur di atas Wilayah Gempa 4 Tanah Sedang dalam kondisi inelastik mampu menahan beban gempa sampai pada tingkat *Immediate Occupancy* (IO) dan di atas Wilayah Gempa 6 Tanah Sedang model tersebut mampu menahan beban sampai pada tingkat *Damage Control*. Sedangkan, menurut FEMA 273 tingkat kinerja yang sama dicapai oleh model struktur pada Wilayah Gempa 4 dan Wilayah Gempa 6 Tanah Sedang, yaitu pada tingkat *Collapse Prevention* (CP). Pada tingkat IO, hanya terdapat sedikit kerusakan struktural yang bisa diperbaiki. Pada tingkat *Damage Control*, kondisi struktur masih cukup aman untuk dihuni karena hanya terdapat sedikit kerusakan struktural. Pada tingkat CP, struktur bangunan masih berdiri dan sedikit tambahan kerusakan masih diperbolehkan, tetapi bangunan hampir runtuh.

Titik kinerja struktur pada Wilayah Gempa 6 lebih tinggi daripada titik kinerja struktur pada wilayah Gempa 4 karena beban gempa yang lebih tinggi. Struktur lebih rentan terhadap bahaya gempa pada Wilayah 6 yang mempunyai nilai PGA 1,5 kali PGA pada Wilayah Gempa 4. Hal ini perlu diwaspadai karena tingkat kekuatan

gempa berdasarkan pada peta gempa terbaru versi tahun 2010 jauh lebih besar daripada peta gempa versi tahun 2002.

Suatu struktur bangunan yang tidak memenuhi syarat teknis memerlukan penambahan kekakuan dan kekuatan struktur sehingga tingkat kinerja struktur mencapai tingkat minimum, yaitu Collapse Prevention menurut FEMA 273 atau *Life Safety* menurut ATC-40. Dengan meninjau tingkat kinerja suatu model struktur yang berada pada Tanah Sedang Wilayah Gempa 4 dan Wilayah Gempa 6, terlihat bahwa FEMA 273 lebih konservatif daripada ATC-40. Menurut ATC-40, tingkat kinerja model struktur di Wilayah Gempa 4 Tanah Sedang masih pada tingkat IO di mana hanya terdapat sedikit kerusakan struktural dan sistem struktur penahan beban lateral dan vertikal dengan kekuatan dan kekakuan tertentu masih dalam kondisi hampir sama dengan kondisi sebelum gempa. Model struktur di Wilayah Gempa 6 Tanah Sedang masuk dalam tingkat *Damage Control* menurut ATC-40 masih dalam batas yang aman untuk dihuni. Menurut FEMA 273, kinerja model struktur di kedua Wilayah Gempa tersebut hampir mencapai batas kekuatan karena telah memasuki tingkat kinerja CP dan hampir memasuki kondisi keruntuhan.

5. SARAN

Proses desain struktur bangunan baru ataupun pemeriksaan struktur bangunan yang telah berdiri harus memperhatikan kondisi pasca elastik untuk memperoleh tingkat kinerja struktur sesungguhnya, terutama dalam menahan beban gempa.

6. REFERENSI

- Applied Technology Council (1995). Structural Response Modification Factors (ATC 19). Redwood, USA.
- Applied Technology Council (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC40), Redwood, USA.
- Badan Standardisasi Nasional (2002). SNI 03-1726-2002 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung, Jakarta, Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional (2002). SNI 03-1726-201x Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Nongedung, Jakarta, Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional (2002). SNI 03-2847-2002 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, Jakarta, Indonesia.
- Dewobroto, W (2005). Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan SAP 2000. Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil: Ketahanan Konstruksi & Teknik Struktur Berdasarkan Profesionalisme, Unika Soegijapranata, Semarang, Indonesia.
- El-Tawil, S. and Kuenzli, C. M. (2002). Pushover of Hybrid Coupled Walls II: Analysis and Behavior. *Journal of Structural Engineering* Vol. 128, No. 10, Reston, United States of America.
- Federal Emergency Management Agency (1997). NEHRP GUIDELINES FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS (FEMA 273), Washington, USA.
- Federal Emergency Management Agency (2000). PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS (FEMA 356), Washington, USA.
- Oguz, S. (2005). Evaluation of Pushover Analysis Procedures for Frame Structures. Master, Tesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.



Suprpto, K. and Sudarto, (May 2009). Evaluation of Performance of Asymmetrical Dual System Structures Using Pushover and Time History Analysis. Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, Indonesia.

