

STUDI PARAMETRIK KINERJA DINDING PENGISI BATA MERAH PADA STRUKTUR BETON BERTULANG AKIBAT BEBAN GEMPA

Mizanuddin Sitompul ^{*)}, Ade Faisal ^{**)}, Daniel Rumbi Teruna ^{***)}

¹⁾ Alumni Program Studi Magister Teknik Sipil USU

²⁾ Staf Pengajar Program Studi Magister Teknik Sipil USU

³⁾ Staf Pengajar Program Studi Magister Teknik Sipil USU

Abstrak

Studi ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh kekakuan, kekuatan dan penempatan (konfigurasi) dinding bata terhadap struktur. Struktur bangunan dimodelkan sebagai portal 2 dimensi dan terdiri dari 5 model yaitu struktur *open frame*, struktur *fully-infilled wall frame*, struktur *fully-infilled wall frame* dengan bukaan 16%, struktur *fully-infilled wall frame* dengan bukaan 40%, dan struktur *open first-story frame*. Hasil analisis menunjukkan bahwa kontribusi dinding pengisi yang terbuat dari dinding bata sangat mempengaruhi kekakuan lateral struktur. Adanya dinding pengisi yang kaku di sebuah level tingkat dan pada level tingkat lain tidak ada dapat menyebabkan efek tingkat lemah (*soft story*). Hasil studi juga menunjukkan bahwa faktor bukaan juga sangat mempengaruhi kekuatan dinding pengisi. Dinding dengan bukaan 40% ternyata tidak begitu mempengaruhi kinerja dari struktur utama. Pemasangan dinding pengisi bata ternyata dapat meningkatkan kapasitas dari struktur itu sendiri. Hal ini ditunjukkan oleh model struktur dengan menggunakan dinding pengisi memiliki kapasitas yang lebih besar dengan peningkatan sebesar 12,833% pada zona gempa 4 dan 28,931% pada zona gempa 6. Untuk model struktur dengan bukaan 16% terjadi peningkatan sebesar 3,015% pada zona gempa 4 dan 7,135% pada zona gempa 6. Berbanding terbalik dengan kapasitas, keberadaan dinding bata bisa mengurangi daktilitas struktur, dari studi ini diperoleh pengurangan sebesar 56,344% pada zona gempa 4 dan 71,405% pada zona gempa 6.

Kata kunci: dinding pengisi, faktor bukaan, analisis *pushover*, kekakuan, daktilitas, *performance point*

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi tidak bisa ditebak kapan akan terjadi. Cara yang efektif untuk mengurangi resiko kerusakannya adalah dengan kesiapan akan terjadinya gempa bumi salah satunya dengan melakukan pendekatan struktural. Bata merah merupakan salah satu material yang sering digunakan sebagai dinding pengisi pada bangunan, terutama sebagai penutup luar ataupun partisi pemisah di bagian dalam untuk kebutuhan arsitektural maupun kepentingan estetika bangunan khususnya untuk bangunan rendah dan bertingkat sedang. Hal ini dikarenakan bata merah memiliki sifat harga yang ekonomis, mudah didapat, dan tahan terhadap cuaca.

Pada umumnya dinding pengisi hanya diperhitungkan sebagai beban yang disalurkan ke struktur sehingga mengakibatkan pengaruh kekuatan dan kekakuan dinding pengisi tidak diperhitungkan dalam perencanaan suatu bangunan. Dinding pengisi ini akan memberikan sumbangan kekakuan yang cukup berarti pada struktur terutama saat menahan gaya lateral seperti gempa. Biasanya dalam perencanaan, bangunan diasumsikan sebagai struktur *open frame* dengan dinding bata non struktural hanya sebagai beban gravitasi yang bekerja pada balok. Dalam beberapa kasus gempa dapat diamati pada berbagai kasus gedung dengan pengaruh gempa, ternyata dinding bata ikut memikul beban lateral. Keretakan yang terjadi pada dinding bata menunjukkan terjadi transfer beban dari portal ke dinding bata. Selain itu, pada beberapa bangunan terjadi mekanisme keruntuhan *soft-story*. Keruntuhan *soft-story* diakibatkan karena konfigurasi dinding pengisi yang berbeda antara lantai satu dengan lantai-lantai di atasnya.

2. DIAGONAL TEKAN EKIVALEN (*EQUIVALENT DIAGONAL STRUT*) SANEINEJAD-HOBBS

Portal-Isi dapat dianggap sebagai portal tidak bergoyang (*braced framed*), dimana dinding pengisi akan berfungsi sebagai diagonal tekan ekivalen (*equivalent diagonal strut*). Diagonal tekan ekivalen hanya kuat terhadap gaya tekan saja. Pengaruh beban lateral bolak-balik akibat gempa dapat diatasi dengan terbentuknya diagonal tekan pada arah lain yang juga mengalami tekan (lihat Gambar 1).

5. Karena dinding pengisi mempunyai daktilitas yang terbatas, maka deformasi portal pada beban puncak juga terbatas kecuali pada bagian sudut yang dibebani, dengan demikian portal masih dalam kondisi elastis.

$$M_B = M_D = M_j < M_{pj} \quad (4)$$

$$M_c = \beta_c M_{pc} \text{ dan } M_b = \beta_b M_{pb} \quad (5)$$

dimana M_B dan M_D = *bending momen* pada sudut yang tidak dibebani (titik B dan D pada Gambar 2); M_j = merujuk pada salah satu nilai tersebut; M_c dan M_b = momen elastis terbesar yang ada pada kolom (c) dan balok (b); dan M_{pc} dan M_{pb} = tahanan momen plastis dari kolom dan balok. Saneinejad dan Hobb, (1995) menetapkan:

$$\beta_c \leq \beta_0 = 0,2 \text{ dan } \beta_b \leq \beta_0 = 0,2 \quad (6)$$

dimana β_0 = nominal atau batas atas (*upper-bound*), nilai dari faktor reduksi β .

3. DIAGONAL TEKAN EKIVALEN (*EQUIVALENT DIAGONAL STRUT*) BERDASARKAN FEMA 273

Lebar efektif *diagonal compression strut* yang digunakan untuk menganalisis kekuatan dan kekakuan dinding pengisi bata berdasarkan model FEMA 273 dihitung dengan rumus:

$$a = 0,175 (\lambda_1 h_{col})^{-0,4} r_{inf} \quad (7)$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} t_{inf} \sin 2\theta}{4E_{fe} I_{col} h_{inf}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

dimana:

h_{col} = tinggi kolom di antara as-balok

h_{inf} = tinggi dinding pengisi

E_{fe} = modulus elastisitas material portal

E_{me} = modulus elastisitas material dinding pengisi

I_{col} = inersia penampang kolom

L_{inf} = panjang dinding pengisi

r_{inf} = panjang diagonal dinding pengisi

t_{inf} = tebal dinding pengisi

θ = sudut yang dibentuk antara tinggi dan panjang dinding pengisi

λ_1 = koefisien yang digunakan untuk menentukan lebar efektif *strut*

a = lebar efektif *strut*

4. DIAGONAL TEKAN EKIVALEN (*EQUIVALENT DIAGONAL STRUT*) BERDASARKAN ASTERIS (2003)

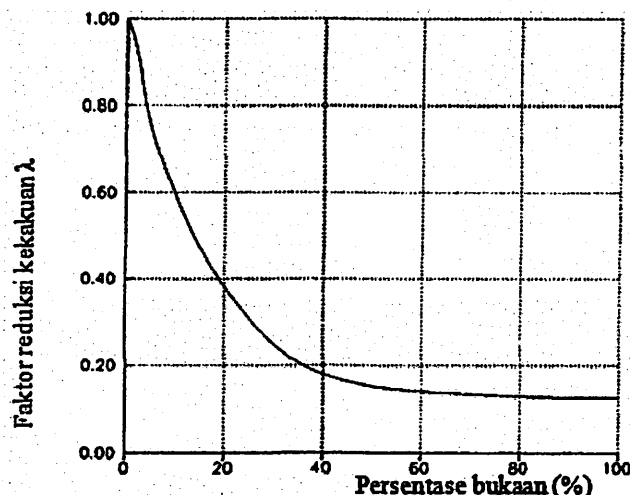
Asteris (2003) mengajukan sebuah formula dalam penentuan lebar efektif *diagonal compression strut* dengan menambahkan sebuah faktor koreksi λ ke model FEMA 273 yang merupakan faktor reduksi kekakuan akibat adanya bukaan pada dinding pengisi (pintu, jendela, dan lain-lain) sesuai persamaan:

$$w_t = \lambda a \quad (9)$$

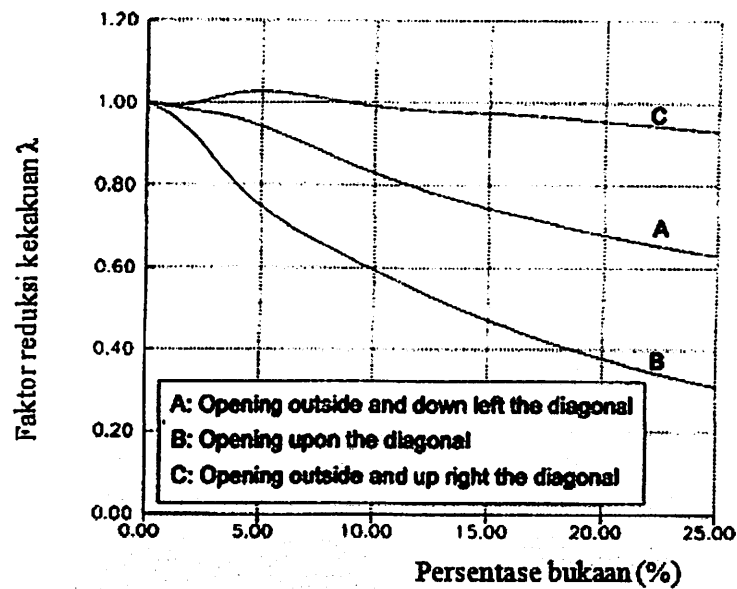
dimana

λ = faktor reduksi kekakuan dengan menggunakan Gambar 3

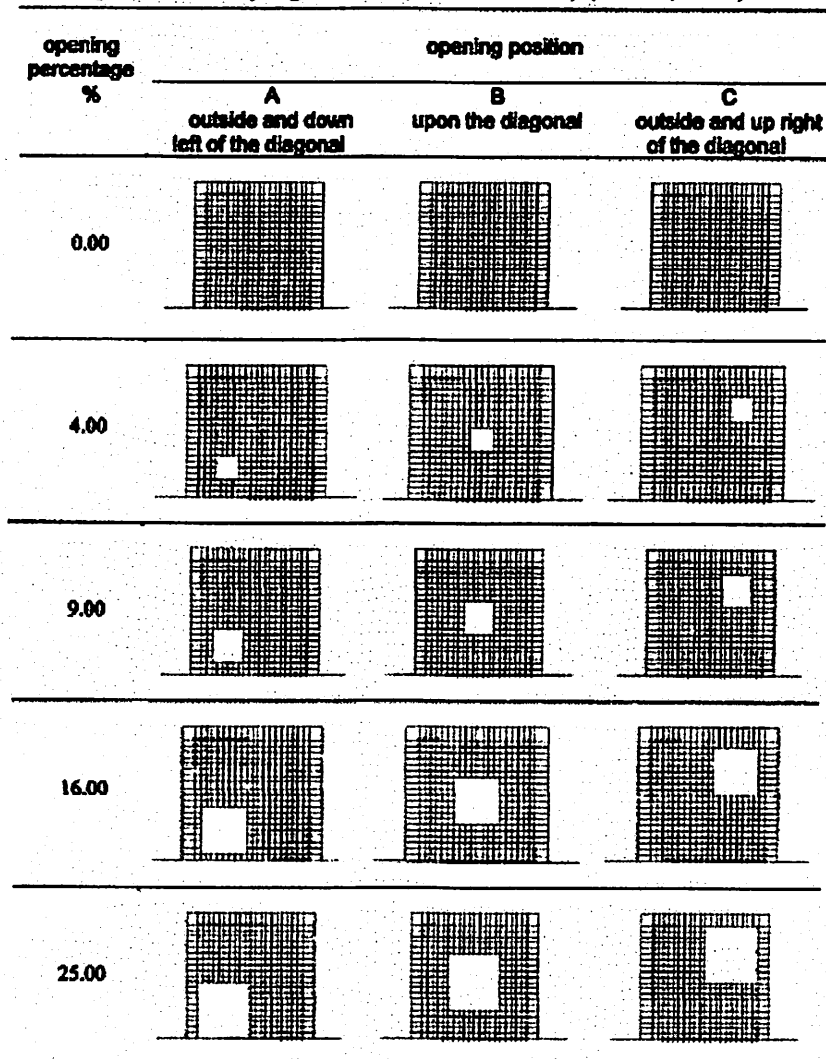
a = lebar efektif *strut* sesuai dengan FEMA 273, sesuai Pers. (7) dan (8)



Gambar 3. Faktor reduksi kekakuan dinding pengisi λ yang berhubungan dengan persentase bukaan (*case B*) (lihat Gambar 5) (Asteris, 2003)

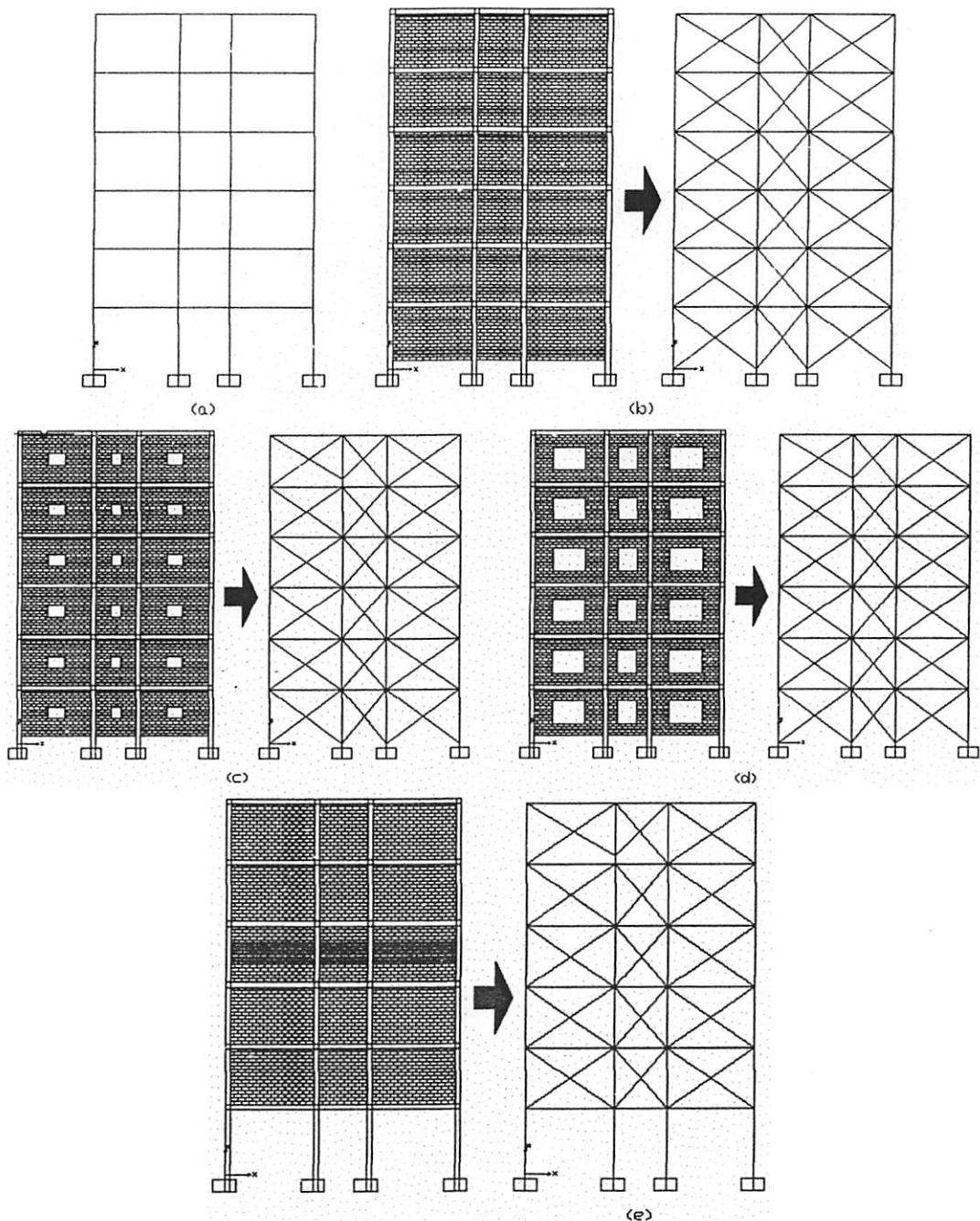


Gambar 4. Faktor reduksi kekakuan dinding pengisi λ yang berhubungan dengan persentase bukaan dengan posisi bukaan yang berbeda (lihat Gambar 5) (Asteris, 2003)



Gambar 5. Posisi bukaan (case A, B, dan C) dan persentase bukaan (Asteris, 2003)

5. METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 6. Pemodelan struktur (a) *open frame* (model 1); (b) *fully-infilled wall frame* (model 2); (c) *fully-infilled wall frame* dengan bukaan 16% (model 3); (d) *fully-infilled wall frame* dengan bukaan 40% (model 4); (e) *open first-story frame* (model 5)

Semua model struktur terdiri dari 6 lantai dan 3 bentang (Gambar 6). Tinggi untuk lantai pertama untuk semua model adalah 4 m, sedangkan untuk lantai-lantai lainnya 3,5 m. Masing-masing mempunyai panjang bentang 5 m kecuali di bagian tengahnya 3 m. Perletakan diasumsikan jepit. Struktur diasumsikan terletak di atas tanah sedang dan berada di zona gempa sedang dan tinggi. Peruntukan bangunan diasumsikan sebagai perhotelan. Untuk *preliminary design* ditetapkan dimensi balok 40 x 60 cm, kolom 60 x 60 cm, dan tebal plat lantai/atap 12 cm.

Dalam studi ini digunakan bata merah sebagai material dinding pengisi. Bukaan diasumsikan terletak pada tengah diagonal dinding. Karakteristik dinding bata yang akan digunakan dalam studi ini didasarkan pada karakteristik dinding bata hasil pengujian laboratorium yang dilakukan oleh Aryanto (2008). Berdasarkan eksperimen diperoleh data sebagai berikut:

1. Parameter individu bata dan mortar:
 - a. Kuat tekan unit bata 4,57 Mpa
 - b. Kuat tekan rata-rata mortar 10,45 Mpa
2. Parameter dinding pengisi (pasangan bata):
 - a. Kuat tekan rata-rata pasangan bata (f_m') 3,54 Mpa
 - b. Modulus elastisitas dinding pengisi 2478 Mpa
 - c. Kuat Lekat/ bond pasangan bata 0,39 MPa
 - d. Regangan pada tegangan maksimum, $\epsilon_c = 0,002$

Properti material nonlinier pada studi ini seperti kapasitas rotasi pasca leleh (rotasi plastis) untuk zona gempa 4 sebesar $\theta_p = 0,04$ dan untuk zona gempa 6, $\theta_p = 0,06$; kapasitas rotasi pasca kondisi plastis $\theta_{pc} = 0,06$ dan rotasi leleh θ_y dihitung dengan $\theta_y = M_y/K_0$. Nilai rasio antara momen maksimum dengan momen leleh adalah $M_o/M_y = 1,19$. Kekakuan elemen dihitung dengan $K_0 = 6EI/L$. Momen inersia efektif diasumsikan 40% dari momen inersia biasa $I_{ef} = 0,4 I$.

Analisis *pushover* dilakukan untuk melihat seberapa besar kapasitas dan daktilitas dari struktur yang ditinjau. Tipe analisis *pushover* yang digunakan dalam studi ini adalah kontrol *displacement* dimana struktur didorong sampai mencapai *displacement* yang diinginkan dan atau sampai struktur yang ditinjau runtuh. Untuk studi ini digunakan kontrol *displacement* sebesar 0,5 m dan efek P-Delta diabaikan. Untuk mendapatkan titik kinerja (*performance point*) pada studi ini digunakan *Capacity Spectrum Method* atau Metoda Spektrum Kapasitas (ATC-40).

6. HASIL DAN PEMBAHASAN

6.1. Kekakuan Lateral

Kekakuan lateral diperoleh dengan memberikan beban sebesar 1 kN pada atap struktur. Kekakuan diperoleh dari perbandingan antara beban 1 kN dengan besarnya perpindahan yang terjadi akibat pembebanan. Perbandingan kekakuan struktur untuk berbagai model dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan kekakuan struktur berbagai model

Jenis Model	Simpangan Atap (mm)	Kekakuan (1 kN/simpangan etap)
Model 1	0,071985	13,892
Model 2	0,047821	20,911
Model 3	0,058683	17,041
Model 4	0,066423	15,055
Model 5	0,060147	16,626

6.2. Simpangan Tingkat dan Simpangan Antartingkat

Berdasarkan SNI 03-1726-2002 Pasal 8, simpangan antarlantai ditentukan berdasarkan 2 kinerja, yaitu kinerja batas layan dan kinerja batas ultimit. Berdasarkan hasil perhitungan simpangan kinerja batas layan maupun simpangan kinerja batas ultimit, kontrol simpangan semua model masih memenuhi syarat yang diizinkan.

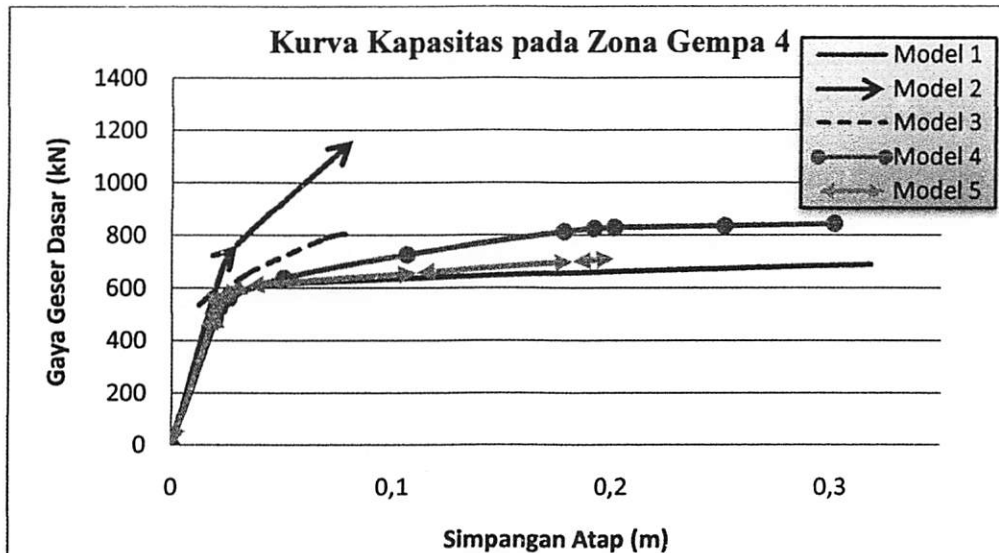
6.3. Titik Kinerja (*Performance Point*) Dan Daktilitas

Tabel 2 Perbandingan titik kinerja (*performance point*) dan daktilitas dari model struktur

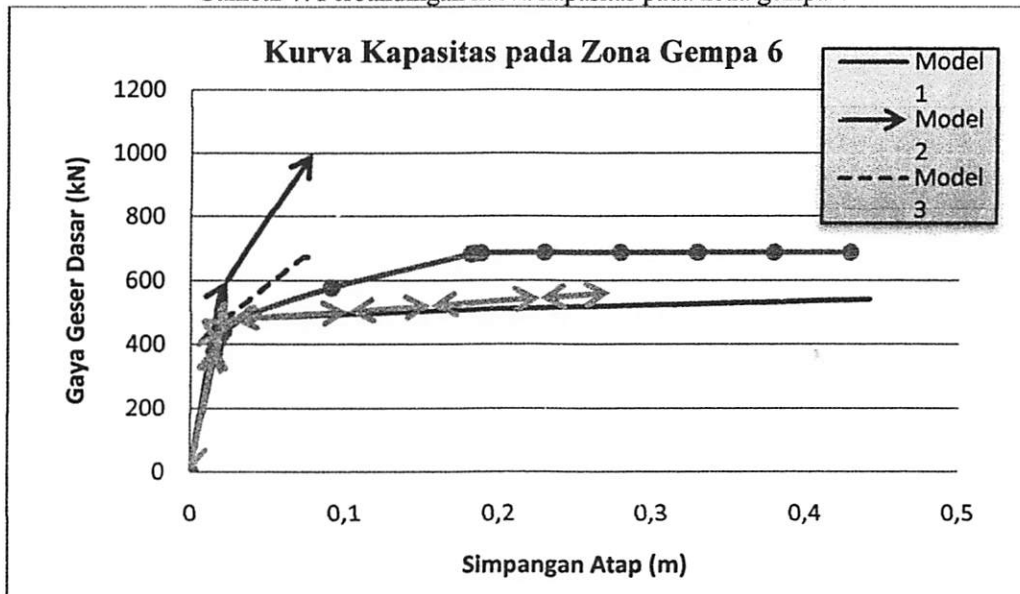
Model Struktur	Zona Gempa 4			Zona Gempa 6		
	Gaya Geser dasar (kN)	Perpindahan (m)	Daktilitas	Gaya Geser dasar (kN)	Perpindahan (m)	Daktilitas
Model 1	524,625	0,022	6,62	472,040	0,030	11,89
Model 2	591,952	0,020	2,89	608,604	0,025	3,4
Model 3	540,442	0,021	3,55	505,720	0,029	3,95
Model 4	523,094	0,021	6,6	475,250	0,033	10,7
Model 5	534,397	0,021	5,63	476,285	0,028	10,38

Tabel 3 Persentase peningkatan dan penurunan titik kinerja dan daktilitas dari model struktur

Model struktur	Peningkatan gaya geser dasar (%)		Penurunan daktilitas (%)	
	Zona gempa 4	Zona gempa 6	Zona gempa 4	Zona gempa 6
Model 2	12,833	28,931	56,344	71,405
Model 3	3,015	7,135	46,375	66,779
Model 4	0,293	0,680	0,302	10,008
Model 5	1,863	0,899	14,955	12,700



Gambar 7. Perbandingan kurva kapasitas pada zona gempa 4



Gambar 8. Perbandingan kurva kapasitas pada zona gempa 6

Dari hasil yang disajikan di atas dapat dilihat bahwa pada saat mencapai *performance point* kapasitas maksimal dari model struktur *open frame* berada di bawah kapasitas maksimal model struktur yang lain. Pada zona gempa 4, antara model 1 dengan model 2, 3 dan 5 terdapat perbedaan gaya geser dasar berturut-turut sebesar 12,833%; 3,015% dan 1,863%. Sedangkan pada zona gempa 6, terdapat perbedaan gaya geser dasar berturut-turut sebesar 28,931%; 7,135% dan 0,899%. Struktur *fully infilled wall* dengan bukaan 40% (model 4) cenderung berperilaku seperti struktur *open frame*, terlihat dari nilai titik kinerja dan daktilitas yang hampir sama antara kedua model. Berdasarkan hasil yang diperoleh, keberadaan dinding bata yang dimodelkan sebagai diagonal tekan ekuivalen akan menambah kapasitas struktur.

Struktur dengan *strut* mampu menerima gaya geser dasar lebih baik daripada struktur *open frame*. Struktur dengan bukaan 40% ternyata tidak begitu mempengaruhi kinerja dari struktur.

Di sisi lain jika ditinjau dari daktilitas, nilai daktilitas yang terbesar adalah model 1, kemudian diikuti oleh model 4, model 5, model 3 dan yang terkecil model 2. Dari analisis ini dapat ditarik kesimpulan bahwa keberadaan dinding bata bisa mengakibatkan menurunnya daktilitas dari struktur. Dinding bata bisa menyebabkan struktur menjadi lebih kaku.

Pada saat mencapai *performance point*, nilai target perpindahan (*displacement*) yang dihasilkan oleh struktur *open frame* lebih besar dari model yang lain terutama pada zona gempa 6. Hal ini menunjukkan bahwa struktur *open frame* dapat berdeformasi lebih baik daripada struktur dengan *strut*.

Dari sendi plastis yang terjadi, sendi plastis akan muncul terlebih dahulu pada balok atau kaki kolom kemudian terjadi pada kolom. Dengan adanya *strut* mengakibatkan sebagian gaya yang bekerja ke balok akan diterima juga oleh *strut*. Di bawah beban gempa sedang, semua struktur model berada pada daerah B-IO dan IO-LS yang menunjukkan bahwa secara keseluruhan kinerja struktur baik.

Di bawah pengaruh beban gempa kuat, Struktur *fully infilled wall* tanpa bukaan dan struktur *fully infilled wall* dengan bukaan 16% pada saat mencapai *performance point* berada pada daerah LS-CP yang menunjukkan bahwa kinerja struktur kurang baik. Struktur *open frame*, struktur *fully infilled wall* dengan bukaan 40%, dan struktur *open first-story* memiliki kinerja yang baik (karena saat *performance point* tidak ada yang melewati daerah LS).

7. KESIMPULAN

Dari hasil analisis dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil studi menunjukkan bahwa kontribusi dinding pengisi yang terbuat dari dinding bata sangat mempengaruhi kekakuan lateral struktur. Adanya dinding pengisi yang kaku di sebuah level tingkat dan pada level tingkat lain tidak ada (dalam penelitian ini di tingkat pertama) dapat menyebabkan efek tingkat lemah (*soft story*). Mekanisme keruntuhan *soft story* ini dapat menyebabkan kegagalan struktur. Hasil studi juga menunjukkan bahwa faktor bukaan juga sangat mempengaruhi kekuatan dinding pengisi. Dinding dengan bukaan 40% ternyata tidak begitu mempengaruhi kinerja dari struktur utama.
2. Pemasangan dinding pengisi bata ternyata dapat meningkatkan kapasitas dari struktur itu sendiri. Hal ini ditunjukkan oleh model struktur dengan menggunakan dinding pengisi memiliki kapasitas yang lebih besar dengan peningkatan sebesar 12,833% pada zona gempa 4 dan 28,931% pada zona gempa 6. Untuk model struktur dengan bukaan 16% terjadi peningkatan sebesar 3,015% pada zona gempa 4 dan 7,135% pada zona gempa 6. Berbanding terbalik dengan kapasitas, keberadaan dinding bata bisa mengurangi daktilitas struktur, dari studi ini diperoleh pengurangan sebesar 56,344% pada zona gempa 4 dan 71,405% pada zona gempa 6. Hasil studi juga menunjukkan bahwa dinding bata dapat mereduksi kinerja struktur untuk berdeformasi secara maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Aryanto, A. 2008. *Kinerja Portal Beton Bertulang dengan Dinding Pengisi Bata Ringan terhadap Beban Gempa*. Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Asteris, P. G. 2003. Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frame. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(8), 1071-1079.
- ATC-40. 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. *Report SSC 96-01*. Applied Technology Council.
- Badan Standarisasi Nasional. 2002. *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung SNI 03-1726-2002*. Jakarta. Departemen Pekerjaan Umum.
- Budiono, B. dan Supriatna, L. 2011. *Studi Komparasi Desain Bangunan Tahan Gempa dengan Menggunakan SNI 03-1726-2002 dan RSNI 03-1726-201x*. ITB, Bandung.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1987. *Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung*, Jakarta: Yayasan Badan Penerbit PU.
- Dewobroto, W. 2005. *Analisa Inelastis Portal-Dinding Pengisi dengan Equivalent Diagonal Strut*. Jurnal Teknik Sipil, Vol. 12.
- Dolšek, M. dan Fajfar, P. 2001. Soft storey effects in uniformly infilled reinforced concrete frames. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(1), 1-12.
- Faisal, A. 2013. Pemodelan Getaran Gempa Struktur Beton untuk Analisis Tidak Linier, *Seminar Nasional IV HASTAG*, Medan.
- Faisal, A. 2014. Torsi Aktual pada SRPM Simetris, *Seminar Nasional HAKI Komda Sumut*, Medan.
- Haselton, C. B., Liel, A. B., Deierlein, G. G., Dean, B. S., Chou, J. H. 2011. Seismic collapse safety of reinforced concrete building. I: assessment of ductile moment frames. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 137(4), 481-491.

- Kaushik, H. B., Rai, D. C., Jain, S. K. 2009. Effectiveness of some strengthening option for masonry-infilled RC frames with open first story. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 135(8), 925-937.
- Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M.P., Noland, J.L. 1996. Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 122(3), 228-237.
- Rozman, M., dan Fajfar, P. 2009. Seismic response of a RC frame building designed according to old and modern practices. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(3), 779-799.
- Saneinejad, A., dan Hobbs, B. 1995. Inelastic design of infilled frames. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 121(4), 634-650.
- Wibisono, C. dan Lie, H. 2008. Modal Pushover Analysis Struktur Gedung Beton Bertulang di Bawah Pengaruh Beban Gempa Kuat. *Laporan Tugas Akhir*, Program Studi Teknik Sipil, ITB, Bandung.
- Yuliari, E. dan Suhelda. 2008. Evaluasi Perbandingan Konsep Desain Dinding Geser Tahan Gempa Berdasarkan SNI Beton. *Laporan Tugas Akhir*, Program Studi Teknik Sipil, ITB, Bandung.
- Zareian, F, Krawinkler, H. 2007. Assessment of probability of collapse and design for collapse safety. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 1901-1914.

KAJIAN KURVA KAPASITAS STRUKTUR BAJA SRPM AKIBAT PENERAPAN DESAIN PLASTIS BERBASIS KINERJA PADA DAERAH KEGEMPAAN TINGGI DI INDONESIA

Fasri Budi Junianto Daeli ¹⁾, Ade Faisal ²⁾, Daniel Rumbi Teruna ³⁾

¹⁾ Alumni Program Magister Teknik Sipil USU, fasridaeli@gmail.com

²⁾ Staf Pengajar Program Magister Teknik Sipil USU

³⁾ Staf Pengajar Program Magister Teknik Sipil USU

Abstrak

Sebagian besar wilayah Indonesia merupakan zona gempa moderat hingga berat, sehingga perencanaan struktur gedung tahan gempa menjadi sangat penting. Namun prosedur desain kegempaan saat ini masih didasarkan terhadap respon elastis struktur, tanpa secara langsung mempertimbangkan respons inelastis struktur pada tahap awal desain, sehingga mengakibatkan desain awal struktur yang kurang baik dan menyebabkan proses iterasi desain, gaya geser dasar desain tidak realistis, kekuatan lateral tidak merata sepanjang tinggi struktur, serta pola mekanisme leleh tidak menjamin sesuai dengan yang diharapkan. Prosedur desain plastis berbasis kinerja merupakan prosedur desain kegempaan yang secara langsung menyertakan simpangan target dan mekanisme kolom kuat-balok lemah pada tahap awal desain, sehingga tidak dibutuhkan proses iterasi desain. Dalam penelitian ini akan dievaluasi kinerja struktur baja SRPM 3- dan 8-tingkat, yang didesain plastis berbasis kinerja di Pulau Nias dengan variasi rasio simpangan target 0.015, 0.025, dan 0.03, melalui analisis statis nonlinier menggunakan SeismoStruct, dan dengan data gempa Duzce 1999, Kocaeli 1999, dan Hector Mine 1999 yang telah diskalakan terhadap spektrum respons desain Pulau Nias. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa prosedur desain plastis berbasis kinerja dapat diterapkan dengan baik pada daerah kegempaan tinggi (Pulau Nias, Indonesia). Dari kurva kapasitas struktur menunjukkan bahwa gaya geser dasar desain plastis berbasis kinerja lebih realistis dibandingkan gaya geser dasar desain elastis. Hal ini dibuktikan oleh kuat lebih yang sangat besar pada desain elastis.

Kata-kata kunci: desain plastis, kinerja, struktur baja, SRPM, zona gempa tinggi, kurva kapasitas.

1. Pendahuluan

Sebagian besar wilayah Indonesia termasuk dalam kategori wilayah gempa moderat hingga berat, maka perencanaan struktur gedung tahan gempa di Indonesia menjadi sangat penting dan populer.

Desain kegempaan saat ini di Indonesia dan di banyak negara lainnya adalah didasarkan terhadap metodologi desain berdasarkan gaya. Gaya tersebut merupakan gaya geser dasar serta distribusinya terhadap setiap tingkat lantai struktur, dimana prosedur yang paling sering digunakan adalah prosedur gaya lateral ekuivalen. Prosedur tersebut didasarkan pada analisis elastis tanpa secara langsung memperhitungkan respon inelastis akibat pergerakan tanah sehingga menghasilkan respon yang buruk dan tidak dapat diprediksi.

Subash C. Goel dan beberapa peneliti lainnya telah mengembangkan suatu prosedur desain yang baru untuk beberapa jenis struktur yaitu *Performance-based plastic design* (desain plastis berbasis kinerja), yang didasarkan pada analisis inelastis (plastis) untuk menggantikan prosedur desain yang berdasarkan analisis elastis. Konsep desain tersebut adalah berdasarkan keadaan batas kinerja (*performance limit state*) menggunakan simpangan target dan mekanisme leleh (*yield mechanism*) sebagai target-target kinerja yang disertakan pada tahap awal desain sehingga hanya membutuhkan sedikit iterasi terhadap hasil desain awal, dan bahkan tidak membutuhkan iterasi sama sekali, juga dapat disebut sebagai suatu pendekatan sederhana tanpa membutuhkan analisis nonlinier komputer canggih.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Desain Plastis Berbasis Kinerja

Proses desain plastis berbasis kinerja untuk SRPM, secara garis besar adalah sebagai berikut:

1. Memilih mekanisme leleh dan simpangan target yang diharapkan terjadi pada struktur selama gempa terjadi. Mekanisme leleh yang baik adalah berdasarkan mekanisme kolom kuat-balok lemah yang telah dikenal sebagai suatu mekanisme yang paling ideal untuk desain tahan gempa. Mekanisme tersebut membatasi lokasi sendi plastis hanya pada balok dan kolom dasar, dimana sendi plastis pada kolom dasar diijinkan terjadi hanya pada keadaan yang tak dapat dihindarkan akibat gempa besar (Gambar 1).
2. Menaksir simpangan leleh (θ) struktur, perioda fundamental struktur (T), dan menentukan suatu distribusi vertikal gaya-gaya lateral desain yang wajar.

Simpangan leleh (θ_y) dapat diasumsikan untuk beberapa sistem struktural berdasarkan Tabel 1 yang dipengaruhi oleh periode struktur atau tinggi struktur (Lee & Goel 2001).

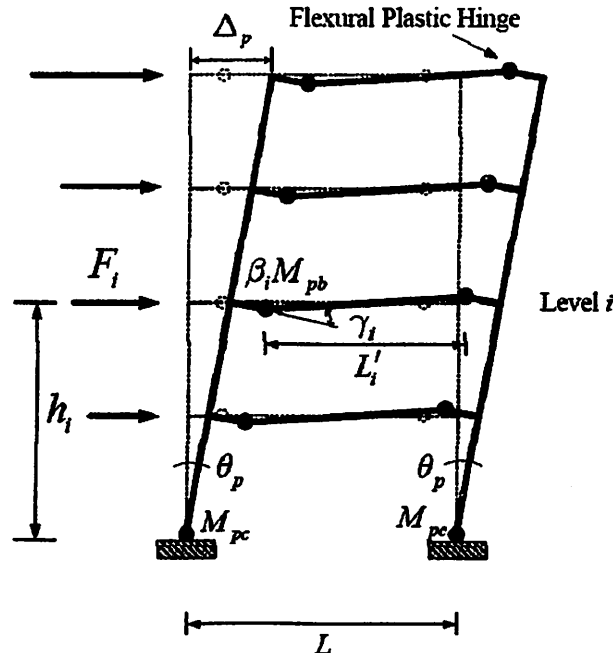
3. Menentukan nilai percepatan spektrum desain elastis S_a .

4. Menghitung gaya geser dasar desain (V).

5. Memodifikasi V dengan mempertimbangkan pengaruh P-delta.

Persamaan 4 atau 5 adalah untuk menghitung gaya lateral desain dengan tidak memperhitungkan efek P-Delta. Efek P-delta dalam gaya lateral desain adalah dengan menambahkan gaya lateral P-Delta (F_{i-PD}) terhadap F_i sehingga total gaya lateral desain (F^*_i) adalah sebagaimana diberikan pada persamaan 7.

6. Menggunakan metode plastis untuk mendesain balok dan kolom.



Gambar 1: Portal SRPM dengan mekanisme leleh terpilih

Tabel 1: Asumsi rasio simpangan leleh desain (Lee & Goel 2001; Liao 2010)

	RC		Steel			
	SMF	low & medium-rise MF	high-rise MF	EBF	STMF	CBF
Yield Drift Ratio, θ_y (%)	0.5	1.0	0.75	0.5	0.75	0.3

SMF = rangka pemikul momen khusus, MF = rangka pemikul momen, EBF = rangka bresing eksentrik, STMF = rangka batang pemikul momen khusus, CBF = rangka bresing konsentrik.

Dalam desain plastis berbasis kinerja, digunakan suatu distribusi gaya lateral desain berdasarkan Chac *et al.* (2007).

$$V_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^n w_j h_j}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{0.75T-0.2} V_y \quad (1)$$

$$V_n = F_n = \left(\frac{w_n h_n}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{0.75T-0.2} V_y \quad (2)$$

$$\beta_i = \left(\frac{V_i}{V_n} \right) = \left(\frac{\sum_{j=1}^n w_j h_j}{w_n h_n} \right)^{0.75T-0.2} \quad (3)$$

$$F_i = (\beta_i - \beta_{i+1}) F_n \quad (4)$$

$$F_i = (\beta_i - \beta_{i+1}) \left(\frac{w_n h_n}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{0.75T-0.2} V_y \quad (5)$$

$$F_{i-PD} = P_i \theta_u \quad (6)$$

$$F^*_i = F_i + F_{i-PD} \quad (7)$$

Dimana V_i dan V_n , masing-masing, adalah gaya geser tingkat desain pada tingkat ke- i dan pada tingkat teratas (atap). V_y adalah gaya geser dasar desain berdasarkan persamaan 8. w_i dan w_n , masing-masing, adalah berat struktur pada tingkat ke- i dan pada tingkat teratas (atap). h_i dan h_n , masing-masing, adalah ketinggian lantai tingkat ke- i dan tingkat teratas (atap) diukur dari permukaan tanah. F_i dan F_n , masing-masing, adalah gaya lateral

pada tingkat ke- i dan pada tingkat teratas (atap). β_i adalah faktor distribusi gaya geser pada tingkat ke- i , P_i adalah beban gravitasi pada lantai tingkat ke- i , dan θ_u adalah rasio simpangan target desain yang diasumsikan konstan pada setiap tingkat.

Koefisien gaya geser dasar desain (V_y/W):

$$\frac{V_y}{W} = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\gamma S_a^2}}{2} \quad (8)$$

$$\alpha = \left\{ \sum_{i=1}^n (\beta_i - \beta_{i+1}) h_i \right\} \left(\frac{w_n h_n}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{0,75T-0,2} \left(\frac{\theta_p 8\pi^2}{T^2 g} \right) \quad (9)$$

$$\theta_p = \theta_u - \theta_y \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{2\mu_s - 1}{R_\mu^2} \quad (11)$$

Dimana V_y adalah gaya geser dasar desain (yang diperoleh berdasarkan konsep energi), γ adalah faktor modifikasi energi, θ_p adalah simpangan inelastis global struktur atau rotasi plastis pada sendi plastis yang terjadi pada kolom dasar, θ_u adalah simpangan target, μ_s adalah faktor daktilitas struktural (= simpangan target dibagi simpangan leleh) atau Δ_{max}/Δ_y , R_μ adalah faktor reduksi daktilitas sebagaimana diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2: Faktor reduksi daktilitas berdasarkan rentang perioda struktur

Rentang Perioda Struktur, Faktor Reduksi Daktilitas (R_μ)	
$0 \leq T < \frac{T_1}{10}$	$R_\mu = 1$
$\frac{T_1}{10} \leq T < \frac{T_1}{4}$	$R_\mu = \sqrt{2\mu_s - 1} \cdot \left(\frac{T_1}{4T} \right)^{2,513 \cdot \log \left(\frac{1}{\sqrt{2\mu_s - 1}} \right)}$
$\frac{T_1}{4} \leq T < T_1'$	$R_\mu = \sqrt{2\mu_s - 1}$
$T_1' \leq T < T_1$	$R_\mu = \frac{T\mu_s}{T_1}$
$T_1 \leq T$	$R_\mu = \mu_s$

Dimana: $T_1 = 0,57$ detik; $T_1' = T_1(\sqrt{2\mu_s - 1}/\mu_s)$ detik. Sumber: Liao (2010).

2.2. Desain Plastis Berbasis Kinerja pada SRPM

Berdasarkan mekanisme leleh kolom kuat-balok lemah (Gambar 1), elemen balok menjadi elemen utama yang diharapkan leleh. Momen kapasitas balok yang dibutuhkan pada masing-masing tingkat ditentukan dengan pendekatan desain plastis (kerja luar sama dengan kerja dalam) sebagaimana pada persamaan 12 dan berdasarkan Gambar 1.

$$\sum_{i=1}^n \frac{F_i h_i}{\text{Jumlah bentang}} \theta_p = 2M_{pc} \theta_p + \sum_{i=1}^n 2(\beta_i M_{pb}) \gamma_i \quad (12)$$

$$M_{pc} = \frac{\psi V' h_1}{4} \quad (13)$$

$$\gamma_i = \left(\frac{L}{L_i} \right) \theta_p \quad (14)$$

$$M_{pbi} = \beta_i M_{pb} \quad (15)$$

$$\phi M_{pbi} \geq \beta_i M_{pb} \quad (16)$$

Dimana M_{pb} dan $\beta_i M_{pb}$ masing-masing adalah momen plastis balok pada tingkat teratas dan pada tingkat ke- i , M_{pc} adalah momen plastis kolom tingkat terbawah, V' adalah gaya geser dasar dalam model satu bentang ekuivalen (= V dibagi jumlah bentang), dan h_1 adalah tinggi tingkat pertama. Faktor ψ adalah faktor kuat lebih (*overstrength factor*) dimana Liao (2010) memberikan nilai ψ sebesar 1,1 untuk bangunan rendah/sedang dan 1,5 untuk bangunan tinggi struktur rangka pemikul momen beton bertulang maupun baja. ϕ adalah faktor reduksi kekuatan. Kemudian penampang balok dapat ditentukan berdasarkan standar perencanaan yang berlaku.

Untuk memastikan terjadinya mekanisme kolom kuat – balok lemah, kolom didesain dengan asumsi bahwa semua balok telah melewati kondisi sendi plastis dan dalam keadaan penguatan regangan (*fully strain hardened*) pada saat simpangan target maksimum dan juga kolom dasar diasumsikan telah mencapai kapasitas maksimumnya (M_{pc}) sebagaimana dimodelkan pada Gambar 2(a) yang merupakan diagram *free body* kolom eskterior Gambar 1.

Akibat semua sendi plastis yang sepenuhnya dalam kondisi penguatan regangan (*fully strain hardened*), maka gaya lateral yang dibebankan pada masing-masing tingkat (F_i) harus diperbaharui untuk perhitungan kuat

lebih balok setelah leleh. Dengan menggunakan distribusi gaya geser tingkat (inelastis), gaya diperbaharui (*updated forces* atau F_{iu}) dapat dituliskan pada persamaan 17.

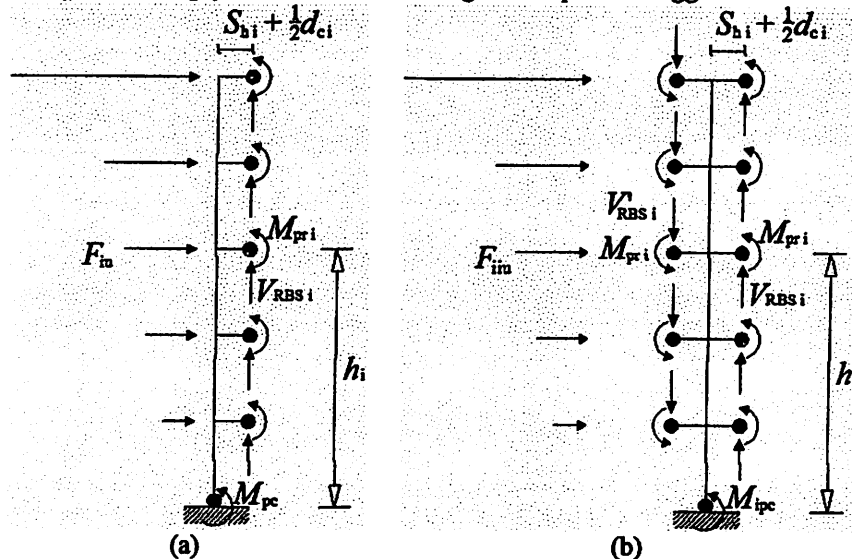
$$F_{iu} = (\beta_i - \beta_{i+1})F_{nu} \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n (\beta_i - \beta_{i+1})h_i F_{nu} = M_{pc} + \left[\sum_{i=1}^n M_{pr i} \right] + \left[\sum_{i=1}^n V_{RBS i} \left(S_{hi} + \frac{d_{ci}}{2} \right) \right] \quad (18)$$

$$M_c(h) = \left[\sum_{i=1}^n \delta_i M_{pr i} \right] + \left[\sum_{i=1}^n \delta_i V_{RBS i} \left(S_{hi} + \frac{d_{ci}}{2} \right) \right] - \left[\sum_{i=1}^n \delta_i F_{iu} (h_i - h) \right] \quad (19)$$

$$P_c(h) = \sum_{i=1}^n \delta_i \left(\frac{2M_{pr i}}{L_h} \right) + P_{cg}(h) \quad (20)$$

Dimana F_{nu} adalah gaya lateral diperbaharui pada tingkat teratas (atap), ditentukan dari persamaan keseimbangan diagram *free body* untuk satu kolom eksterior (persamaan 18). M_{pr} adalah momen maksimum yang mungkin terjadi pada sendi plastis di titik tengah RBS, V_{RBS} adalah gaya lintang terbesar pada titik tengah RBS dari masing-masing ujung balok, S_h adalah jarak dari bidang kontak kolom-balok ke titik tengah RBS, serta d_c adalah tinggi keseluruhan penampang profil kolom, $M_c(h)$ adalah momen kolom pada ketinggian h di atas permukaan tanah akibat gaya lateral F_{nu} . $\delta_i = 1$ jika $h \leq h_i$ atau $\delta_i = 0$ jika $h > h_i$. L_h adalah jarak antara posisi sendi plastis balok, $P_{cg}(h)$ adalah gaya aksial karena beban gravitasi pada ketinggian h .



Gambar 2: Diagram *free body* (a) kolom eksterior, (b) kolom interior

Setelah memperbaharui gaya-gaya lateral, momen desain kolom dapat ditentukan dengan memperlakukan kolom sebagai sebuah kantilever dan dituliskan pada persamaan 19.

Gaya aksial pada kolom pada ketinggian h dari permukaan tanah $P_c(h)$, dituliskan pada persamaan 20. Maka dengan diketahuinya $M_c(h)$ dan $P_c(h)$, kolom seterusnya dapat didesain sebagai elemen balok kolom dengan menggunakan ketentuan-ketentuan perencanaan yang biasa digunakan.

Untuk kolom interior pada Gambar 2(b), momen plastis pada kolom interior tingkat pertama (M_{tpc}) dapat ditentukan berdasarkan geometri struktur. Jika lebar masing-masing bentang adalah sama, maka

$$M_{tpc} = 2M_{pc} \quad (21)$$

Sehingga persamaan 17, 18, dan 19 masing-masing menjadi 22, 23, dan 24:

$$F_{itu} = (\beta_i - \beta_{i+1})F_{ntu} \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n (\beta_i - \beta_{i+1})h_i F_{ntu} = 2M_{pc} + 2 \left[\sum_{i=1}^n M_{pr i} \right] + \left[\sum_{i=1}^n (V_{RBS i} + V_{RBS i}) \left(S_{hi} + \frac{d_{ci}}{2} \right) \right] \quad (23)$$

$$M_c(h) = \left[2 \sum_{i=1}^n \delta_i M_{pr i} \right] + \left[\sum_{i=1}^n \delta_i (V_{RBS i} + V_{RBS i}) \left(S_{hi} + \frac{d_{ci}}{2} \right) \right] - \left[\sum_{i=1}^n \delta_i F_{itu} (h_i - h) \right] \quad (24)$$

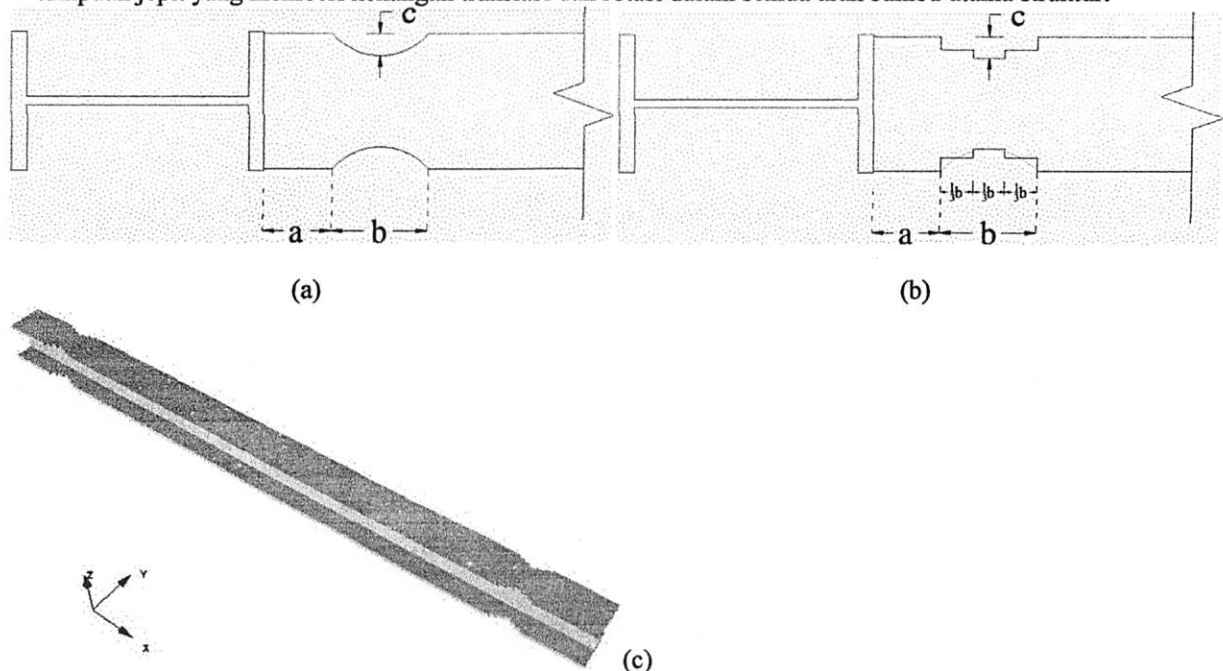
Karena gaya aksial desain kolom interior akibat beban gempa hampir nol, maka gaya aksial desain pada kolom interior dapat diambil hanya dari beban-beban gravitasi.

3. Metodologi Penelitian

Untuk memastikan kebenaran desain plastis berbasis kinerja dalam berperilaku sesuai dengan kriteria kinerja yang diharapkan, dilakukan kajian untuk memeriksa perilaku seismik struktur melalui analisis dinamis dan statis inelastis. Verifikasi kinerja struktur dilakukan dengan bantuan aplikasi program komputer SeismoStruct (Seismosoft 2013^b).

Komponen-komponen struktur dalam penelitian ini dimodelkan sebagai berikut:

1. Pelat lantai dan pelat atap dimodelkan sebagai diafragma kaku (*rigid diaphragm*) dimana ikatan balok dan pelat sangat kaku pada bidangnya terhadap beban horizontal (beban lateral struktur), sehingga perpindahan horizontal setiap titik pada balok dianggap sama besar.
2. Elemen balok dan elemen kolom dalam SeismoStruct dimodelkan sebagai *Inelastic frame element* (infrmFB), dimana elemen ini merupakan elemen balok-kolom yang dimodelkan berperilaku nonlinier (geometri maupun material). Pemilihan jenis elemen ini untuk memudahkan dalam menganalisis perilaku inelastis elemen balok-kolom.
3. Balok dimodelkan dengan RBS pada kedua ujungnya sehingga diharapkan leleh akan terjadi lebih dahulu pada titik tengah RBS dan mencegah leleh terjadi lebih dahulu di persambungan balok-kolom. Namun SeismoStruct tidak mampu memodelkan reduksi sebesar c yang berbentuk kurva sebagaimana pada Gambar 3(a), sehingga dilakukan idealisasi seperti pada Gambar 3(b), dan hasil pemodelan pada SeismoStruct sebagaimana pada Gambar 3(c).
4. Panjang bagian balok tak terkekang secara lateral (L_b) atau jarak antara titik-titik kekangan lateral mengikuti ketentuan ANSI/AISC 341-10, sehingga balok dianggap mengalami pengekangan lateral pada titik-titik kekangan yaitu kekangan terhadap translasi sumbu-y, rotasi sumbu-x (r_x) dan rotasi sumbu-z (r_z). Hal ini dilakukan untuk menghindari leleh akibat torsi dan leleh akibat tekuk pada balok sehingga diharapkan leleh yang terjadi pada balok merupakan leleh akibat lentur.
5. Hubungan balok – kolom dianggap kaku sehingga tidak akan terjadi kegagalan sambungan selama pembebanan gempa terjadi.
6. Daerah panel (pelat badan kolom yang keempat sisinya dibatasi oleh pelat-pelat sayap balok dan kolom pada sambungan balok-kolom) diasumsikan tidak mengalami kondisi inelastis. Sehingga dalam SeismoStruct daerah panel dimodelkan sebagai *elastic frame element* (elfrm).
7. Tumpuan dasar struktur yang merupakan pemodelan hubungan kolom dasar dengan pondasi dianggap sebagai tumpuan jepit yang memberi kekangan translasi dan rotasi dalam semua arah sumbu utama struktur.



Gambar 3: (a) Reduksi lebar pelat sayap balok akibat RBS, (b) Idealisasi reduksi lebar pelat sayap balok untuk digunakan dalam pemodelan struktur pada SeismoStruct, (c) Pemodelan RBS pada SeismoStruct

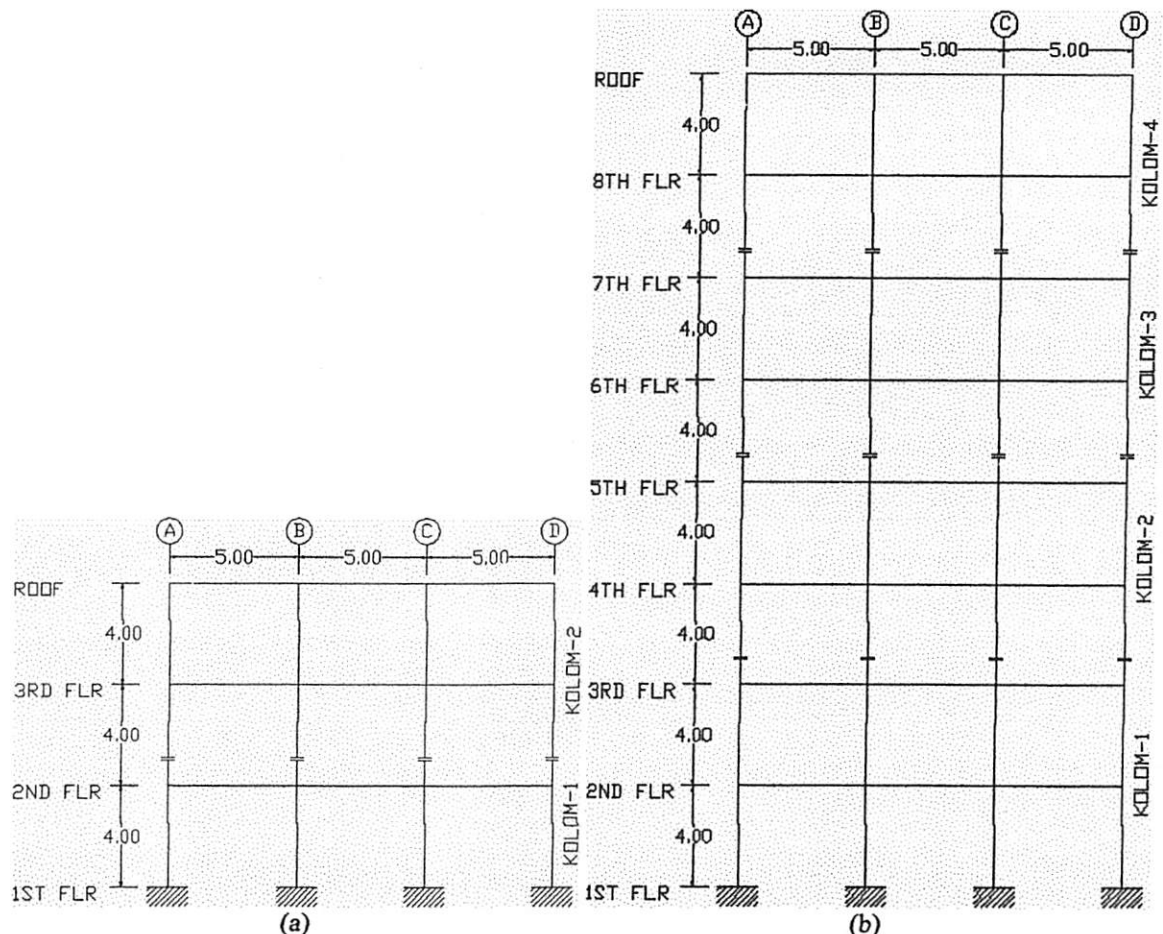
Penelitian dilakukan dengan mengambil studi kasus pada portal bangunan 3-tingkat dan portal bangunan 8-tingkat (Gambar 4) yang direncanakan berada di Pulau Nias. Jarak antar portal 5 m. Parameter-parameter desain diberikan dalam Tabel 3.

Kriteria kinerja yang diharapkan dari struktur yang didesain dengan prosedur desain plastis berbasis kinerja dalam penelitian ini adalah:

1. Variasi simpangan target adalah 1.5%, 2.5%, dan 3%. Hal tersebut didasarkan tingkatan kinerja struktur yang diberikan pada FEMA 356 (2000). Untuk level kinerja Terhindar dari Keruntuhan total (*collapse prevention level*) simpangan target maksimal 5%, sedangkan untuk level kinerja Keselamatan Penghuni Terjamin (*life safety*) simpangan target 1%-2.5%. Dengan simpangan target tersebut akan diperiksa keefektifan prosedur desain plastis berbasis kinerja dalam mengontrol simpangan maksimum.
2. Mekanisme leleh yang diharapkan adalah mekanisme kolom kuat-balok lemah (*strong column-weak beam*), dimana sendi-sendi plastis hanya diizinkan terjadi pada ujung-ujung balok dan pada ujung bawah kolom dasar.

Tabel 3: Parameter-parameter umum desain

Fungsi Struktur	Gedung Perkantoran
Lokasi Struktur	Pulau Nias
Kelas Situs Lokasi	Tanah Lunak (SE)
Tipe Struktur	Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)
Material Struktur	Struktur Baja
Mutu Baja (SNI 03-1729-2002)	BJ 50
Modulus elastisitas, E	200 000 mPa
Modulus elastis geser, G	77 200 mPa
Tegangan leleh minimum, F_y	290 mPa
Tegangan ultimate minimum, F_u	500 mPa
Regangan leleh, ϵ_y	0,00145
Regangan ultimate, ϵ_u	0,16
Potion ratio, μ	0,3
Modulus plastis, E_{sp}	1 324,50 mPa
Parameter strain hardening, μ	0,00662



Gambar 4: Portal SRPMK dalam arah U-S (a) 3-tingkat, dan (b) 8-tingkat

Sesuai dengan yang disyaratkan pada SNI 1726:2012 dimana untuk tujuan analisis dinamis nonlinier digunakan minimal 3 buah data rekaman gempa (akselerogram) dari 3 gempa yang berbeda. Dengan mengacu pada lokasi kasus yang ditinjau yaitu Pulau Nias dimana pernah terjadi gempa paling dashyat pada 28 Maret 2005 dengan Magnitudo 8.6 skala Richter, pusat gempa terjadi di 2.074° LU dan 97.013° BT dengan kedalaman 30 km (dangkal) (USGS 2010), maka 6 (enam) rekaman gempa yang digunakan diberikan pada Tabel 4.

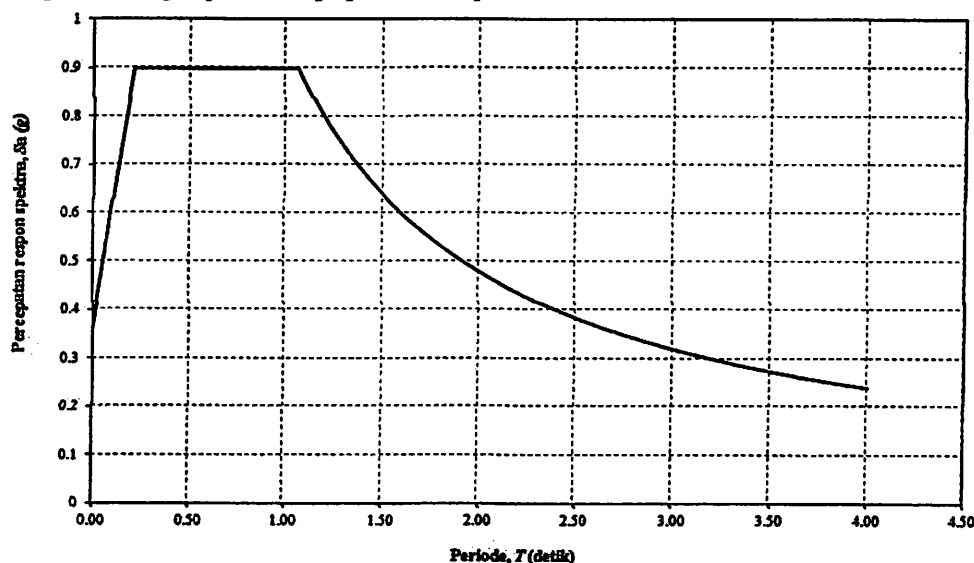
Tabel 4: Karakteristik beberapa rekaman gempa yang digunakan dalam penelitian ini

Nama Gempa	Focal Depth	Magnitudo	Jarak (km)	
			Episentral	Hypocentral
Gempa Kocaeli (Turki) 1999, <i>sta.</i> : Yarimca, 60°	15 km	7,51	19,3	25,07
Gempa Kocaeli (Turki) 1999, <i>sta.</i> : Yarimca, 330°	(dangkal)			
Gempa Duzce (Turki) 1999, <i>sta.</i> : Sakarya, 90°	10 km	7,14	64,17	65,67
Gempa Duzce (Turki) 1999, <i>sta.</i> : Sakarya, 180°	(dangkal)			
Gempa Hector Mine (California) 1999, <i>sta.</i> : Fun Valley, 90°	5 km	7,13	75,77	77,20
Gempa Hector Mine (California) 1999, <i>sta.</i> : Fun Valley, 360°	(dangkal)			

Sumber: PEER (2014)

Dengan mengambil kasus di Pulau Nias, maka dari peta gerak tanah seismik pada SNI 1726:2012 diperoleh $S_s = 1,5g$ dan $S_1 = 0,6g$ dan dengan mengasumsikan kelas situs lokasi kasus yang diteliti di Pulau Nias adalah tanah lunak (SE) sehingga $F_a = 0,9$ dan $F_v = 2,4$ maka dapat digambarkan spektrum respons desain Pulau Nias pada Gambar 5.

Untuk penelitian ini, penskalaan setiap komponen pasangan rekaman gempa dilakukan dengan menggunakan *software* SeismoMatch (Seismosoft 2013^a), dimana penskalaan dilakukan melalui proses *matching* masing-masing rekaman gempa terhadap spektrum respons desain Pulau Nias.



Gambar 5: Spektrum respons desain Pulau Nias

4. Hasil Penelitian

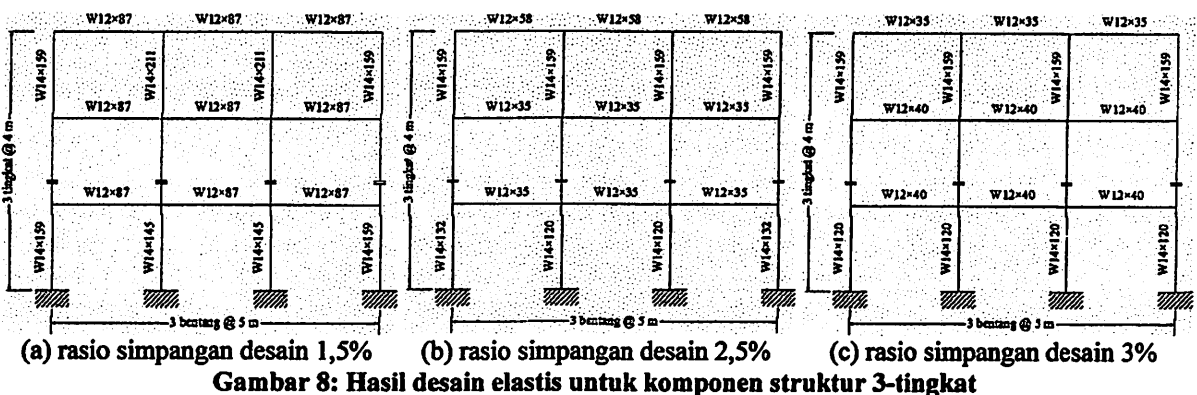
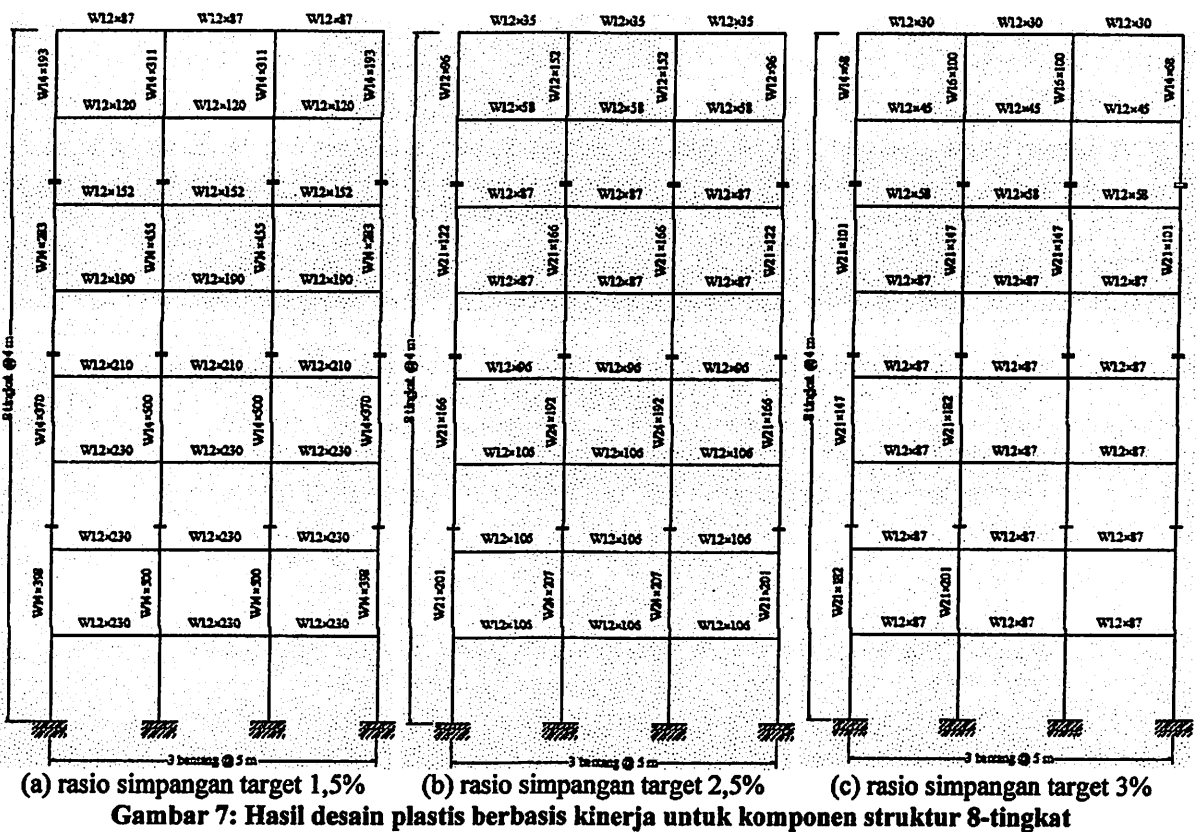
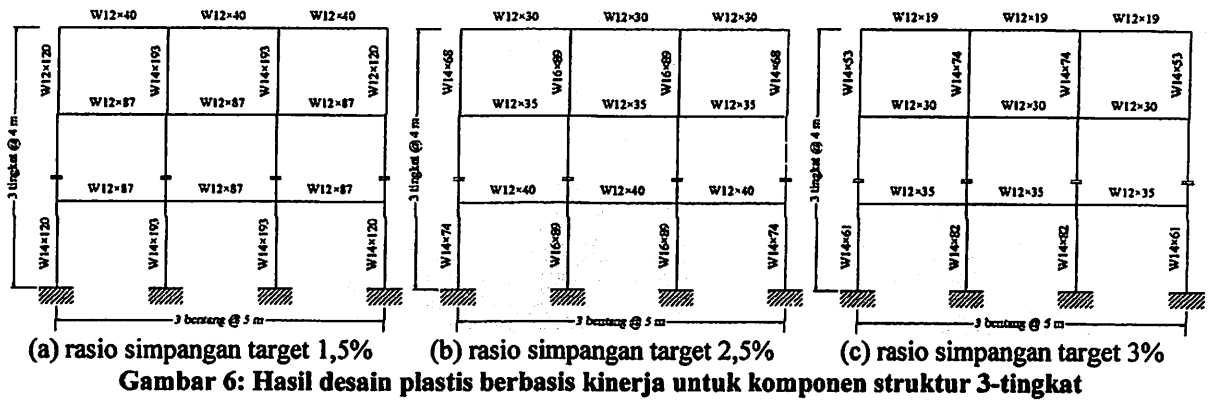
4.1. Hasil Desain Struktur

Struktur baja SRPMK 3-tingkat dan 8-tingkat yang didesain secara elastis, akan didesain ulang menggunakan metode desain plastis berbasis kinerja. Hasil desain elastis dan desain plastis berbasis kinerja diberikan pada Gambar 6 s.d. Gambar 9.

4.2. Hasil Analisis Pushover (Statis) Nonlinier

Analisis pushover statis nonlinier adalah suatu analisis nonlinier di mana pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statik lateral pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama di dalam struktur bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut, struktur mengalami kondisi plastis hingga mencapai keruntuhan struktur.

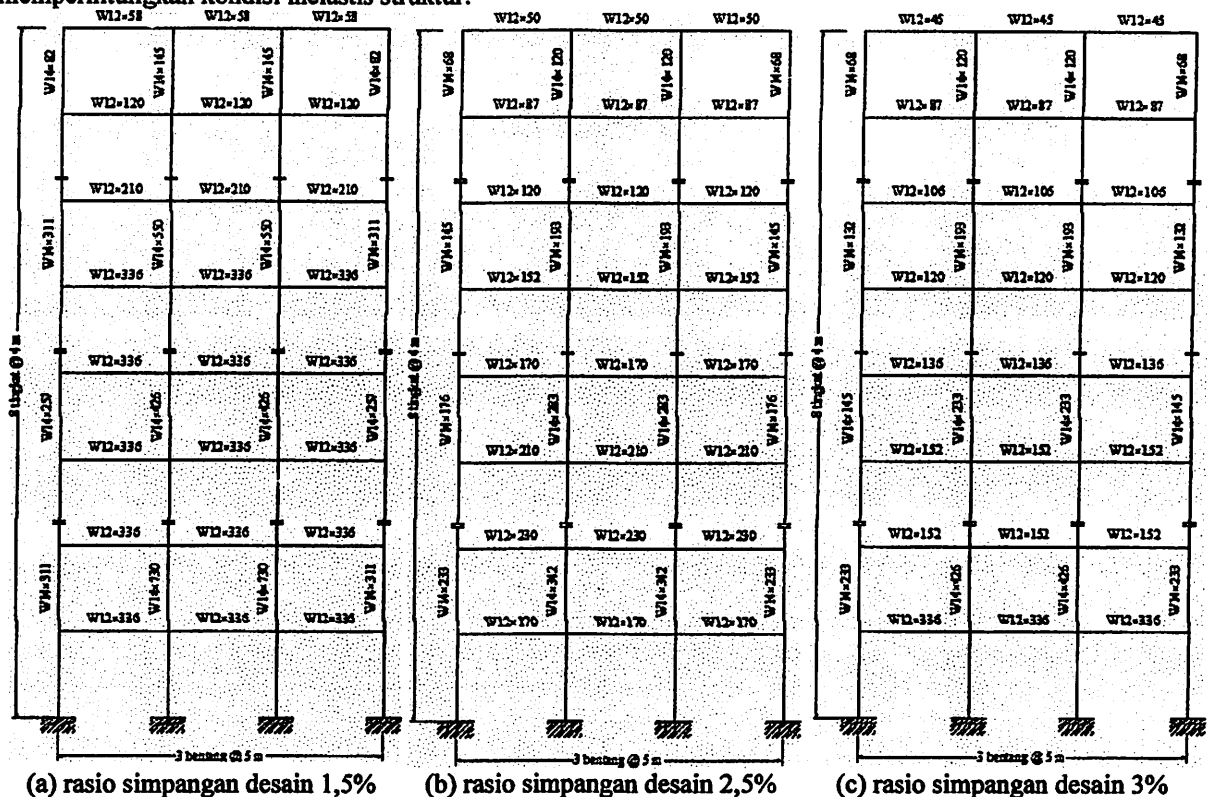
Kurva pushover atau sering disebut juga dengan kurva kapasitas merupakan plot antara perpindahan atap dengan gaya geser dasar yang diperlukan untuk mencapai simpangan target. Kurva pushover untuk struktur 3-tingkat dan struktur 8-tingkat, masing-masing diberikan pada Gambar 10 dan Gambar 11.



5. Analisis dan Pembahasan

Hasil analisis statis nonlinier dengan bantuan SeismoStruct akan dianalisis dan dibahas berikut ini untuk memverifikasi kinerja struktur yang didesain plastis berbasis kinerja dan dibandingkan dengan kinerja struktur yang didesain elastis.

Kurva pushover pada Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan bahwa walaupun gaya geser dasar struktur yang didesain dengan metode elastis lebih kecil dari pada gaya geser dasar struktur yang didesain dengan metode plastis berbasis kinerja, namun kuat lebih (perbandingan kapasitas gaya geser dasar terhadap gaya geser dasar desain) untuk struktur yang didesain dengan metode elastis lebih besar dari pada struktur yang didesain plastis berbasis kinerja sebagaimana terlihat pada Tabel 5. Hal ini mengindikasikan struktur yang tidak ekonomis dan gaya geser dasar desain yang tidak realistis, karena dalam penentuan gaya geser dasar desain elastis tidak memperhitungkan kondisi inelastis struktur.



Gambar 9: Hasil desain elastis untuk komponen struktur 8-tingkat

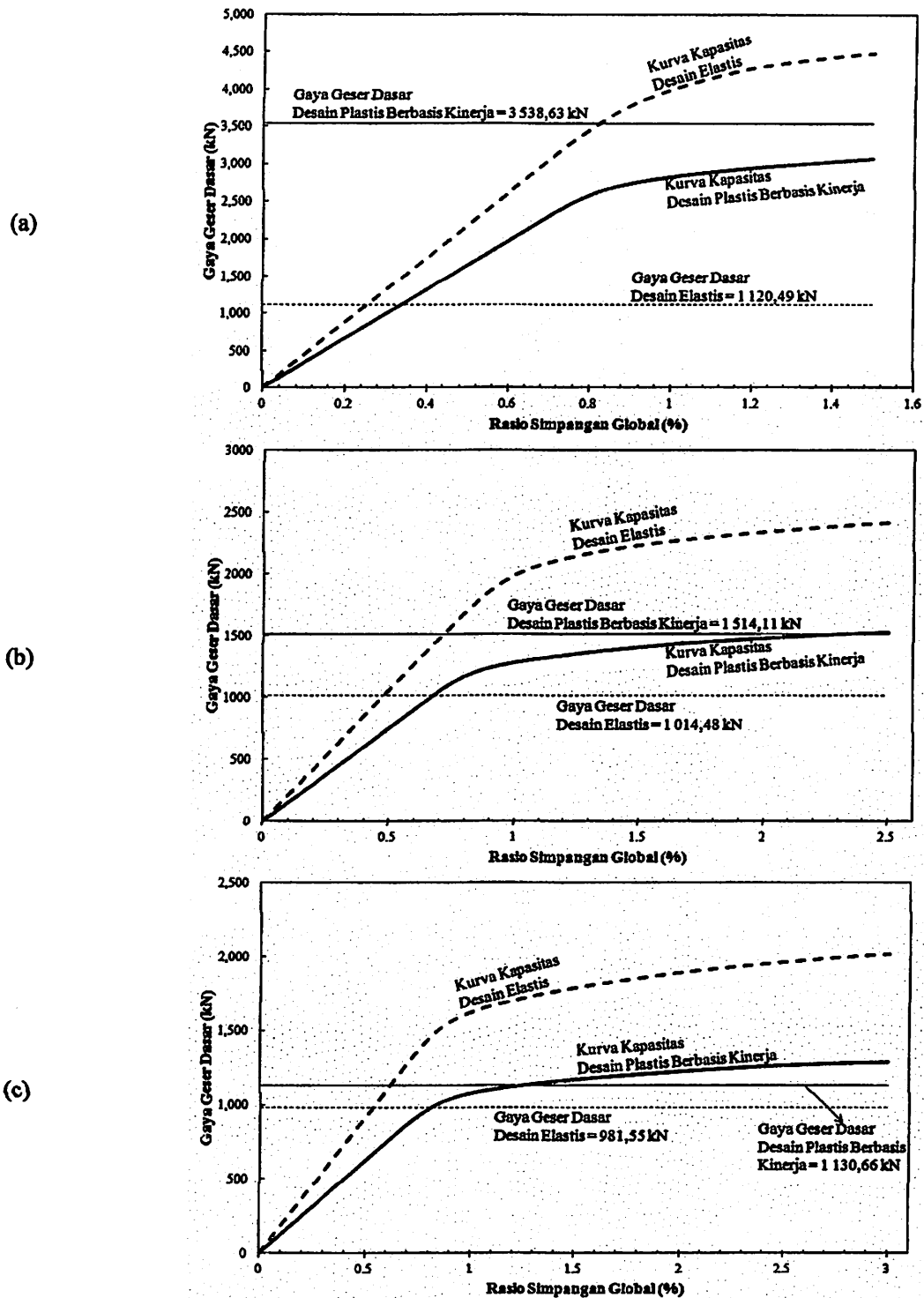
Biaya investasi pembangunan suatu struktur baru tentu merupakan hal penting yang akan dipertimbangkan oleh pemilik bangunan dengan tidak mengesampingkan kinerja struktur saat berbagai pembebanan diterima oleh struktur.

Pada Tabel 6, dapat dilihat perbandingan berat total komponen struktur dengan variasi jumlah tingkat bangunan dan simpangan desain atau simpangan target. Terlihat bahwa berat total komponen struktur yang didesain plastis berbasis kinerja, lebih kecil dibandingkan struktur yang didesain elastis, walaupun demikian, tidak mengorbankan kinerja struktur.

6. Kesimpulan

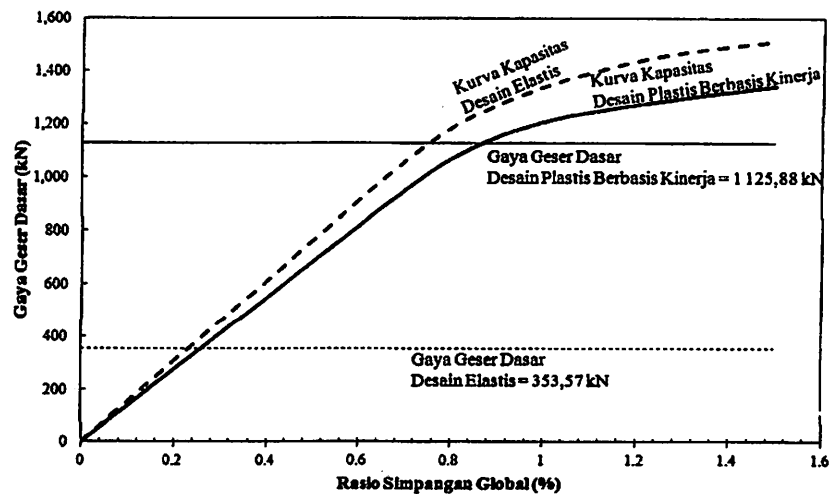
Dari hasil penelitian dan analisis terhadap hasil penelitian tersebut, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Gaya geser dasar desain plastis berbasis kinerja lebih realistis dibandingkan gaya geser dasar desain elastis, karena dalam penentuan gaya geser dasar desain elastis tidak memperhitungkan kondisi inelastis struktur. Hal ini dibuktikan oleh kuat lebih (perbandingan antara kapasitas gaya geser dasar dan gaya geser dasar desain) yang sangat besar pada desain elastis, bahkan besarnya mendekati 4.3. Namun berbeda pada desain plastis berbasis kinerja, kuat lebih hanya lebih kecil dari 1.2.
2. Desain plastis berbasis kinerja dapat diterapkan dengan baik pada struktur baja sistem rangka pemikul momen pada daerah kegempaan tinggi di Indonesia, bahkan berefek penghematan berat total material baja hingga 30% dibanding desain elastis.

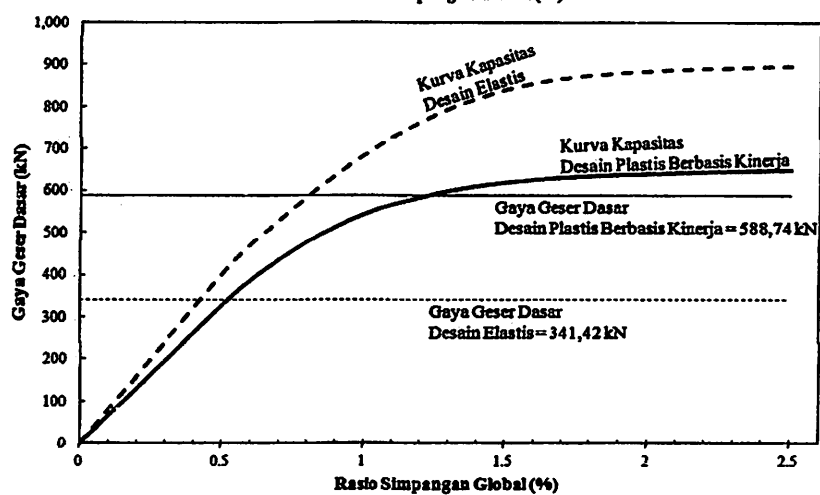


Gambar 10: Kurva pushover struktur 8-tingkat, dengan rasio simpangan target atau rasio simpangan desain (a). 1,5%; (b). 2,5%; dan (c). 3%

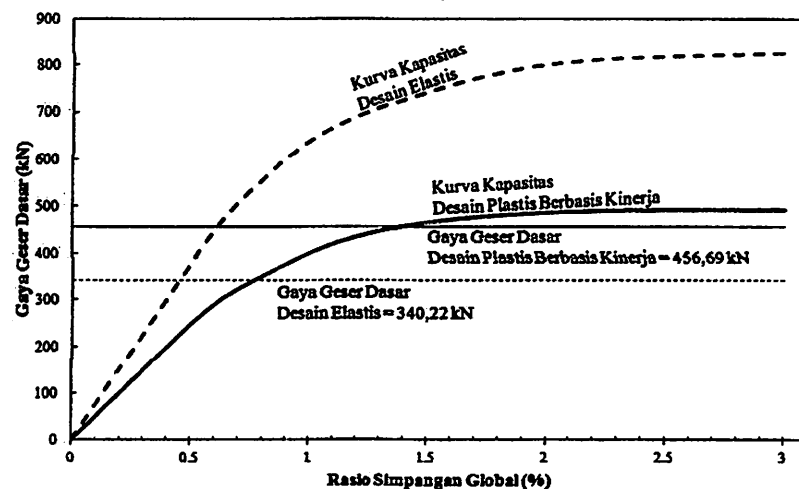
(a)



(b)



(c)



Gambar 11: Kurva pushover struktur 3-tingkat, dengan rasio simpangan target atau rasio simpangan desain (a). 1,5%; (b). 2,5%; dan (c). 3%

Tabel 5: Kuat lebih statis

	Desain Elastis, dengan rasio simpangan desain:			Desain Plastis berbasis Kinerja, dengan rasio simpangan target:		
	1,5%	2,5%	3%	1,5%	2,5%	3%
3-tingkat	4,28	2,62	2,42	1,19	1,10	1,08
8-tingkat	4,00	2,37	2,06	0,87	1,01	1,14

Tabel 6: Perbandingan berat total komponen struktur

	Berat Struktur 3-tingkat (kN)						Berat Struktur 8-tingkat (kN)		
	Rasio Simpangan Desain atau Rasio Simpangan Target:								
	1,5%	2,5%	3%	1,5%	2,5%	3%			
Desain Elastis	253,48	167,11	158,59	1 738,13	984,29	955,15			
Desain Plastis Berbasis Kinerja	219,12	109,49	89,68	1 456,21	656,89	560,03			

Daftar Pustaka

- American Institute of Steel Construction (AISC). 2010^a. *ANSI/AISC 341-10, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. AISC, Chicago, Illinois.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2012. *SNI 1726:2012, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. BSN, Jakarta.
- Chao, S. H., Goel, S. C. dan Lee, S. S. 2007. A Seismic Design Lateral Forces Distribution based on Inelastic State of Structures. *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, 23(3): 547-569.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). 2000. *FEMA 356, Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*. FEMA, Washington, D.C.
- Lee, S. S. dan Goel, S. C. 2001. Performance-based Design of Steel Moment Frames using Target Drift and Yield Mechanism [Research Report UMCEE 01-17, was submitted as a Dissertation by the first author]. Ann Arbor: The University of Michigan, College of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Liao, W. C. 2010. Performance-based Plastic Design of Earthquake Resistant Reinforced Concrete Moment Frames. [Dissertation]. Ann Arbor: The University of Michigan.
- Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center Ground Motion Database. http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database. [4 Mar 2014].
- Seismosoft Ltd. 2013^a. SeismoMatch v2.1 – A computer program for spectrum matching of earthquake records. Available from <http://www.seismosoft.com>. [10 Oct 2013].
- Seismosoft Ltd. 2013^b. SeismoStruct v6.5 – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. Available from <http://www.seismosoft.com>. [10 Oct 2013].
- United States Geological Survey (USGS), Earthquake Hazards Program. 2010. Magnitude 8.6 – Northern Sumatera, Indonesia. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2005/usweax/usweax.php>. [4 Mar 2014].