

HALAMAN PENGESAHAN

LAPORAN PENELITIAN PELAKSANAAN PENELITIAN APLIKATIF KREATIF

1	a. Judul Penelitian	Kinerja Struktur Baja dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus yang Menggunakan <i>Reduced Beam Section</i> dalam Dua Arah Orthogonal
	b. Bidang Ilmu	Teknik Sipil/ <i>Earthquake Engineering</i>
2	Ketua Peneliti:	
	a. Nama Lengkap dan Gelar	Ima Muljati, S.T., M.T., M.Eng.
	b. NIP	93031
	c. Jurusan/Fakultas/Pusat Studi	Teknik Sipil/ Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
3	Alamat Ketua Peneliti	Jurusan Teknik Sipil, UK Petra Jl. Siwalankerto 121 – 131 Surabaya +62 31 2983398; imuljati@petra.ac.id
4	Jumlah Anggota Peneliti	3
	a. Nama Anggota Penelitian I	Hasan Santoso, S.T., M.Eng.Sc.
	b. Nama Anggota Penelitian II	Alvin Darmawan
	c. Nama Anggota Penelitian III	Peter Hermawan
5	Lokasi Penelitian	Surabaya
6	Kerjasama dengan institusi lain	---
7	Jangka Waktu Penelitian	6 bulan
8	Biaya yang diusulkan	
	a. Sumber dari UK Petra	
	b. Sumber lainnya	Rp. 3,000,000
	Total	Rp. 3,000,000

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil

Daniel Tjandra, S.T., M.Eng.
NIP: 03010



Surabaya, 28 Februari 2011
Ketua Peneliti,

Ima Muljati, S.T., M.T., M.Eng.

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Ir. Handoko Sugiharto, M.T.
NIP: 84028



PRAKATA

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian mengenai Perencanaan Berbasis Kinerja (*Performance Based Design*) yang dilakukan di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Kristen Petra. Tujuan utama penelitian tentang Perencanaan Berbasis Kinerja ini adalah memberikan kontribusi aktif dalam penyempurnaan peraturan perencanaan struktur beton dan baja untuk bangunan gedung di Indonesia.

Dalam kesempatan ini Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada beberapa pihak yang telah terlibat, yaitu:

1. Tuhan Yang Maha Esa, atas perkenan dan hikmatnya sehingga penelitian ini boleh berlangsung dengan lancar.
2. Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Kristen Petra dan Kepala Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Kristen Petra yang telah menyetujui pelaksanaan penelitian ini.
3. Ketua Jurusan Teknik Sipil UK Petra yang telah membantu proses seleksi dan administratif sehingga penelitian dapat terlaksana dengan baik.

Pada akhirnya penelitian ini tidak lepas dari beberapa kekurangan yang tidak bisa kami hindari. Untuk itu kami mohon maaf jika ada kesalahan, baik itu disengaja maupun tidak. Kami mengharapkan masukan dan semoga penelitian ini dapat berguna bagi semua pihak yang membutuhkan, terutama demi kemajuan dunia teknik sipil di Indonesia.

Surabaya, 28 Februari 2011

Penulis

KINERJA STRUKTUR BAJA DENGAN SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS YANG MENGGUNAKAN *REDUCED BEAM SECTION* DALAM DUA ARAH ORTHOGONAL

ABSTRAK

Gempa Northridge 1994 membuktikan bahwa kinerja struktur baja masih belum sempurna. Kegagalan struktur banyak terjadi pada sambungan balok-kolom yang tidak menunjukkan perilaku *strong column weak beam* sebagaimana diharapkan. Salah satu alternatif untuk mengatasi hal tersebut adalah penggunaan *Reduced Beam Section* (RBS) yang bertujuan untuk memindahkan kerusakan sambungan balok-kolom ke daerah balok.

Penelitian mengenai struktur baja dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang menggunakan RBS pada satu arah menunjukkan bahwa simpangan antar tingkat (*drift*) yang terjadi tidak memenuhi syarat. Struktur tersebut menggunakan kolom dari profil *wide flange* (WF). Melanjutkan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi SRPMK Baja yang menggunakan RBS dalam dua arah orthogonal. Untuk mengurangi *drift* yang berlebihan maka digunakanlah kolom-kolom dengan penampang *kingcross*.

Elemen balok dan kolom direncanakan menurut SNI 1729-02 sedangkan perencanaan RBS menggunakan AISC 358-05. SRPMK yang ditinjau adalah bangunan 6- dan 10-lantai dengan denah simetris terdiri dari 5 bentang masing-masing 6 meter, dan berada di wilayah gempa 2 dan 6 peta gempa Indonesia. Pemeriksaan kinerja struktur dilakukan dengan analisis statis *pushover* nonlinier dan analisis dinamis *time history* nonlinier.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur telah memiliki kinerja yang baik jika diukur dari parameter *drift* dan *damage index* serta mengalami mekanisme keruntuhan yang aman, yaitu *beam sidesway mechanism*. Penggunaan RBS lebih menjamin terjadinya mekanisme *strong column weak beam*. Akan tetapi penggunaan profil *kingcrossed* pada kolom menyebabkan harga struktur menjadi lebih mahal dibandingkan SRPMK konvensional yang menggunakan profil WF.

Kata Kunci: Reduced Beam Section, kinerja struktur, sistem rangka pemikul momen khusus.

ABSTRACT

Many steel structures collapse during the 1994 Northridge Earthquake due to poor beam-column connection. Structures fail to maintain strong column weak beam condition, leading to unsafe collapse mechanism. The use of Reduced Beam Section (RBS) is able to force the inelastic deformation away from beam-column connections. The method reduces beam flange area in order to reduce the beam moment capacity at the interface of the column.

The previous study on steel special moment resisting frames (SMRF) using RBS in their one principal axis shows that their interstory drift are larger than the limitation value defined by Vision 2000. The structures use wide flange section for their columns. Continuing the research, this study is aimed to check the performance of steel moment resisting frames using RBS in their two major orthogonal axes. In order to reduce the excessive interstory drift, structures use kingcross section.

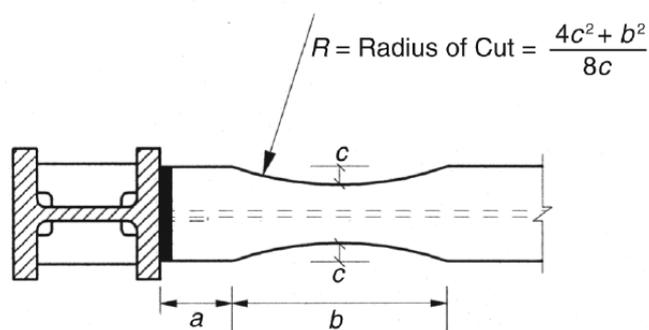
Beams and columns are design based on Indonesian Steel Code SNI 1729-02 and Indonesian Seismic Code SNI 1726-02 while the RBS's are designed using AISC 358-05. The considered structures are 6- and 10-story office buildings consist of 5 bays with 6 meters span, located in zone 2 and 6 of Indonesian Seismic Map. Static nonlinear pushover analysis and dynamic nonlinear time history analysis have been used to observe the performance of the structures. The structures show good performance in terms of interstory drift and damage indices, and experience safe collapse mechanism. The use of RBS's in the structures are able to maintain strong column weak beam condition. However the use of kingcross section resulting higher cost of structure than conventional SMRF which is use wide flange section as their column section.

Keywords: Reduced Beam Section, structural performance, special moment resisting frame.

LATAR BELAKANG

Evaluasi kegagalan struktur baja pasca gempa Northridge tahun 1994 menunjukkan adanya pola keruntuhan yang tidak duktail. Sebagian besar struktur mengalami kegagalan pada bagian sambungannya. Hal tersebut terjadi baik pada sambungan las maupun baut (FEMA, 2000). Kondisi tersebut mendorong para peneliti untuk mencari alternatif sambungan yang menghasilkan perilaku struktur yang lebih baik dan memiliki pola keruntuhan yang aman.

Federal Emergency Management Agency, FEMA (2000) merekomendasikan penggunaan *Reduced Beam Section* (RBS) pada sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK). Pada RBS, bagian sayap profil balok sejarak a dari muka kolom, dipotong sebagian dengan radius tertentu. Bentuk geometri dan ukuran pemotongan sayap balok menurut AISC 358-05 (2005) dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1 Geometri dan Ukuran Pemotongan RBS (AISC 358-05)

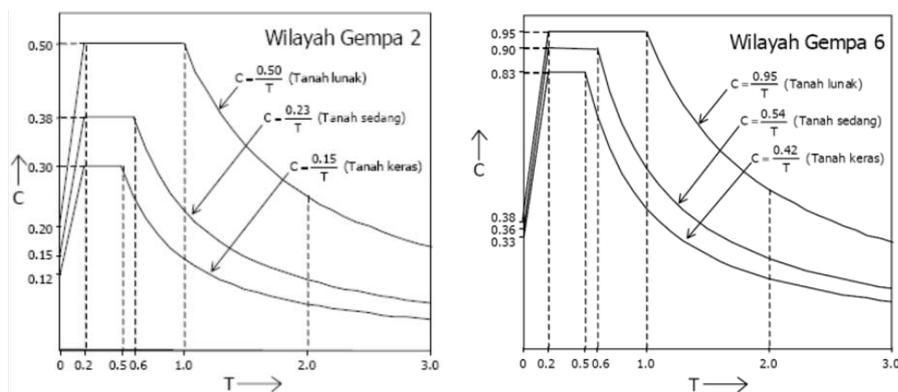
Pengurangan luas penampang balok menyebabkan kapasitas balok di daerah RBS menjadi berkurang. Dengan demikian deformasi inelastis yang terjadi selama gempa tidak terjadi pada bagian sambungan balok-kolom melainkan pada bagian RBS. Keuntungan lain penggunaan RBS adalah kemudahan pencapaian kondisi *strong column weak beam* karena pengurangan kapasitas nominal balok menyebabkan tuntutan kapasitas nominal kolom pada struktur dengan RBS tidak sebesar pada balok konvensional.

Limongan dan Leonata (2010) serta Hadinyoto dan Luis (2010) meneliti penggunaan RBS pada struktur baja dengan SRPMK 6- dan 10-lantai di wilayah 2 dan 6 peta gempa Indonesia. Penelitian tersebut menggunakan RBS pada satu arah saja, yaitu sebidang dengan sumbu kuat kolom. Struktur diasumsikan memiliki kekuatan dan kekakuan yang cukup dalam arah tegak lurus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RBS dapat lebih menjamin terpenuhinya persyaratan *strong column weak beam*. Jika dibandingkan dengan SRPMK konvensional yang diteliti oleh Budiharjo dan Santoso (2007) serta Wiyono dan Yuwono (2008), ukuran profil balok dan kolom yang dipakai pada SRPMK yang menggunakan RBS lebih efisien. Akan tetapi simpangan antar tingkat (*drift*) yang terjadi masih lebih besar daripada yang disyaratkan oleh *Vision 2000* (SEAOC, 2005).

RBS memiliki prospek yang baik untuk diterapkan pada struktur baja di Indonesia. Oleh sebab itu sudi ini bertujuan meneliti lebih lanjut kinerja struktur baja dengan SRPMK yang menggunakan RBS pada kedua sumbu orthogonal bangunan. Untuk mengurangi pengaruh simpangan antar tingkat yang berlebihan maka digunakan kolom dengan penampang *kingcross*.

STRUKTUR YANG DITINJAU

Bangunan yang ditinjau dalam penelitian ini adalah bangunan perkantoran 6- dan 10-lantai yang berdiri di atas tanah lunak di wilayah 2 dan 6 peta gempa Indonesia yang memiliki respon spektrum seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

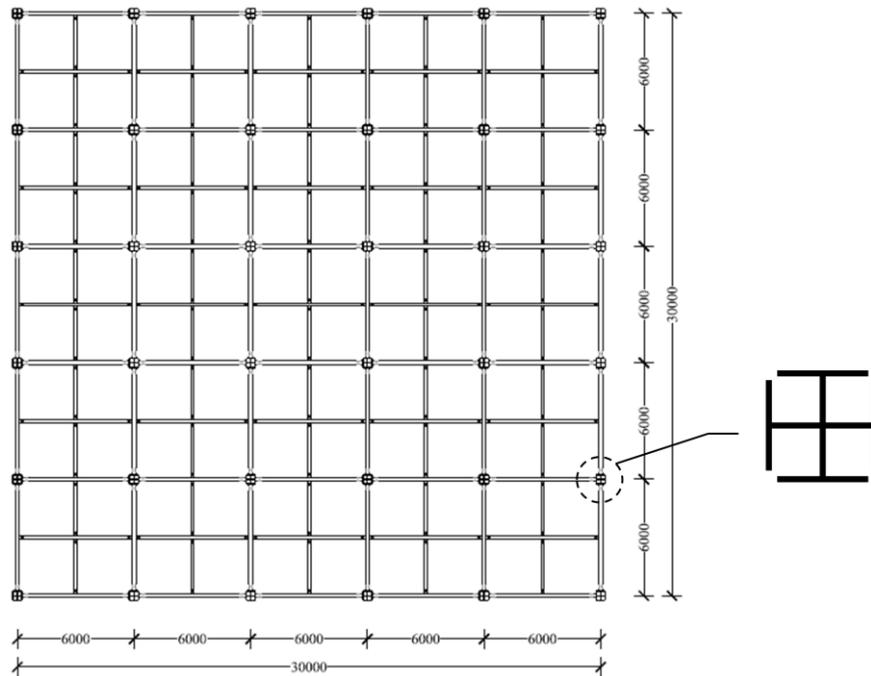


Gambar 2 Respon Spektrum Wilayah 2 dan 6 Peta Gempa Indonesia (SNI 1726-2002).

Bangunan terbuat dari struktur baja yang direncanakan sebagai SRPMK menurut SNI 1729-02, sedangkan RBS direncanakan menurut AISC 358-05. Tinggi lantai pertama

adalah 4.00 meter sedangkan tinggi lantai lainnya 3.50 meter. Denah dan penampang *kingcross* pada kolom dapat dilihat pada Gambar 3.

Sistem lantai adalah beton bertulang dengan tebal 120 mm, yang didukung oleh balok anak setiap jarak 3 m untuk arah-x dan -y. Mutu baja struktural yang dipergunakan adalah BJ37. Pelat lantai terbuat dari beton bertulang dengan mutu $f_c' 25$ MPa.



Gambar 3 Denah Struktur dan Penampang *Kingcross* pada Kolom

DESAIN

SNI 1729-02 tidak mengatur tentang RBS, sehingga dalam penelitian ini perencanaan RBS mengacu pada AISC 358-05. Prosedur perencanaan RBS menurut AISC 358-05 adalah sebagai berikut:

1. Menentukan geometri RBS (mengacu pada Gambar 1)

$$0,5 b_f \leq a \leq 0,75 b_f \quad (1)$$

$$0,65 d \leq b \leq 0,85 d \quad (2)$$

$$0,1 b_f \leq c \leq 0,25 b_f \quad (3)$$

keterangan:

b_f = lebar sayap balok (mm)

d = tinggi balok (mm)

a = jarak dari muka kolom hingga awal potongan RBS (mm), dalam penelitian ini diambil $0.625 b_f$.

b = panjang potongan RBS (mm), dalam penelitian ini diambil $0.75 d$.

c = kedalaman coakan pada tengah RBS (mm)

2. Menghitung modulus plastis pada penampang minimum RBS

$$Z_e = Z_x - 2ct_{bf} (d - t_{bf}) \quad (4)$$

keterangan:

Z_e = modulus plastis penampang minimum RBS (mm^3)

Z_x = modulus plastis balok tanpa RBS (mm^3)

t_{bf} = tebal sayap balok (mm)

3. Menghitung momen maksimum pada penampang minimum RBS:

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y Z_e \quad (5)$$

keterangan:

M_{pr} = momen *probable* maksimum pada bagian tengah penampang RBS (Nmm)

R_y = rasio tegangan leleh yang diharapkan dibanding tegangan leleh minimum, diambil sebesar 1.50 untuk baja A36 atau BJ37

C_{pr} = faktor untuk menghitung kekuatan ultimate dari koneksi, termasuk akibat *strain hardening*, *local restraint*, *additional reinforcement*, bergantung dari keadaan koneksi. Dalam AISC 358-05 merekomendasikan nilai C_{pr} :

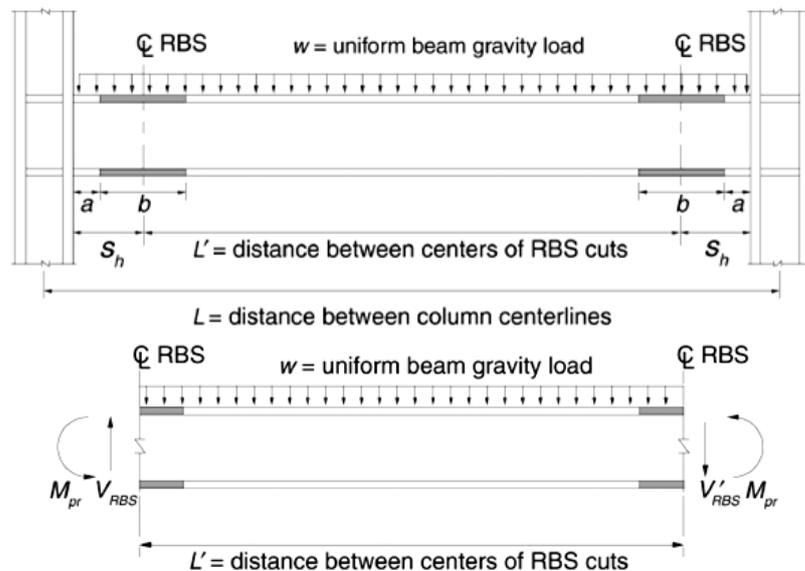
$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1.20 \quad (6)$$

keterangan:

F_y = tegangan leleh minimum (N/mm^2)

F_u = tegangan pada saat *strain hardening* (N/mm^2)

4. Menghitung gaya geser pada bagian tengah RBS (V_{RBS}) dengan memperhitungkan pengaruh momen leleh pada bagian tengah RBS (M_{pr}) dan pengaruh geser dari kombinasi gaya gravitasi (w) dan gaya gempa. Menurut AISC 358-05, kombinasi pembebanan yang digunakan adalah $1.2D + f_1L + 0.2S$. Gambar 4 menunjukkan balok dengan RBS dan *freebody* yang digunakan untuk mencari nilai V_{RBS} .



Gambar 4 Balok dengan RBS dan Beban Merata Gravitasi serta Diagram *Free-Body* untuk Menentukan Nilai V_{RBS} (AISC 358-05)

faktor f_1 merupakan faktor beban untuk *live load*, dan diambil tidak lebih kecil dari 0.50. Rumus dari gaya geser pada bagian tengah RBS tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_{RBS} = \frac{2M_{PR}}{L'} + \frac{wL'}{2} \quad (7)$$

$$V'_{RBS} = \frac{2M_{PR}}{L'} - \frac{wL'}{2} \quad (8)$$

keterangan:

L' = jarak antara bagian tengah RBS

- Menghitung momen maksimum yang mungkin terjadi pada muka kolom dari diagram *free body* dari momen di tengah RBS seperti pada Gambar 5.

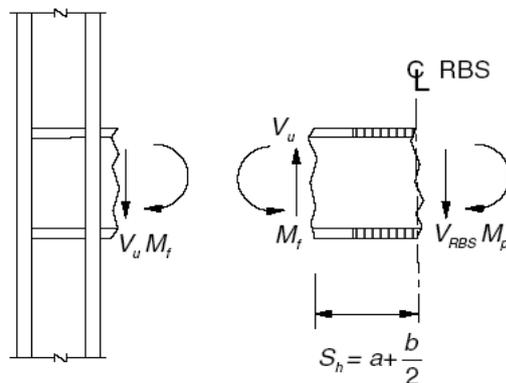
$$M_f = M_{pr} + V_{RBS}S_h \quad (9)$$

keterangan:

M_f = momen maksimum yang mungkin terjadi pada muka kolom (N-mm)

V_{RBS} = gaya geser maksimum dari dua RBS di tiap ujung balok (N)

S_h = $a + b/2$ (mm)



Gambar 5 Diagram *Free-Body* untuk Menentukan Nilai M_f (AISC 358-05)

- Menghitung momen plastis balok berdasarkan tegangan leleh yang diharapkan:

$$M_{pe} = Z_b R_y F_y \quad (10)$$

keterangan:

M_{pe} = momen plastis berdasarkan tegangan leleh yang diharapkan (N-mm)

Z_b = modulus penampang plastis (mm^3)

- Memeriksa M_f harus kurang daripada $\Phi_d M_{pe}$. Jika hasilnya tidak memenuhi maka nilai c harus ditingkatkan dan/atau mengurangi nilai dari a dan b .

$$M_f \leq \Phi_d M_p \quad (11)$$

keterangan:

Φ_d = faktor reduksi untuk daktilitas maksimum

8. Menghitung gaya geser ultimit balok.

$$V_u = \frac{2M_{pr}}{L'} + V_{gravity} \quad (12)$$

keterangan:

V_u = gaya geser ultimit balok

L' = jarak antara titik tengah RBS (mm)

$V_{gravity}$ = gaya geser balok dari kombinasi pembebanan $1.2D + 0.5L + 0.2S$

9. Menghitung perbandingan rasio momen kolom terhadap balok

$$\Sigma M_{pb} \approx \Sigma (M_{pr} + M_v) \quad (13)$$

keterangan:

M_{pr} = momen plastis yang mungkin terjadi (N-mm)

M_v = $V_{RBS} (a + b/2 + d_c/2)$

V_{RBS} = gaya geser maksimum dari dua RBS di tiap ujung balok (N)

d_c = tinggi kolom (mm)

Berdasarkan Persamaan (5) dan (13) didapatkan Persamaan (14):

$$\Sigma M_{pb}^* = \Sigma (C_{pr} R_y f_y Z_e + V_{RBS} \times s) \quad (14)$$

keterangan:

ΣM_{pb}^* = jumlah momen balok pada pertemuan as balok dan as kolom

s = $a + b/2 + d_c/2$

= jarak dari penampang minimum RBS ke as kolom

Struktur dimodelkan secara 3D menggunakan program Struktur menerima beban mati berupa berat sendiri struktur dan beban hidup untuk bangunan perkantoran sesuai Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1993. Sedangkan beban gempa dihitung sebagai beban statis ekuivalen sesuai SNI 1726-02.

Balok direncanakan sesuai SNI 1729-02 mengikuti persamaan interaksi:

$$\frac{M_u}{\phi M_n} + 0,625 \frac{V_u}{\phi V_n} \leq 1,375 \quad (15)$$

keterangan:

M_u = momen ultimit

M_n = momen nominal

V_u = gaya geser ultimit

V_n = gaya geser nominal

ϕ = faktor reduksi

Kolom direncanakan sesuai SNI 1729-02 mengikuti persamaan interaksi:

Bila $\frac{N_u}{\phi N_n} \geq 0,2$ maka

$$\frac{N_u}{\phi N_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right) \leq 1 \quad (16)$$

Bila $\frac{N_u}{\phi N_n} < 0,2$ maka

$$\frac{N_u}{2\phi N_n} + \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \leq 1 \quad (17)$$

keterangan:

N_u, N_n = gaya aksial ultimit dan nominal

M_{ux}, M_{uy} = momen ultimit dalam arah sumbu x dan y penampang kolom

M_{nx}, M_{ny} = momen nominal dalam arah sumbu x dan y penampang kolom

ϕ = raktor reduksi

Untuk menjamin persyaratan *strong column weak beam*, SNI 1729-02 mensyaratkan:

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1 \quad (18)$$

ΣM_{pc}^* adalah jumlah momen-momen kolom di bawah dan di atas sambungan pada pertemuan balok-kolom. ΣM_{pc}^* ditentukan dengan menjumlahkan proyeksi kuat lentur nominal kolom, termasuk *voute* bila ada, di atas dan di bawah sambungan balok-kolom dengan reduksi akibat beban aksial tekan kolom. Diperkenankan untuk mengambil nilai $\Sigma M_{pc}^* = \Sigma Z_c (f_{yc} - N_{uc} / A_g)$. ΣM_{pb}^* adalah jumlah momen-momen balok pada pertemuan as balok dan as kolom. ΣM_{pb}^* ditentukan dengan menjumlahkan proyeksi kuat lentur nominal balok di daerah sendi plastis pada as kolom. Diperkenankan untuk mengambil $\Sigma M_{pb}^* = \Sigma (1,1 R_y M_p + M_y)$.

keterangan:

f_{yc} = tegangan leleh penampang kolom

N_{uc} = gaya aksial tekan terfaktor pada kolom

Z_c = modulus plastis kolom

R_y = faktor modifikasi tegangan leleh (diambil 1.50 untuk BJ37)

M_y = momen tambahan akibat amplifikasi gaya geser dari lokasi sendi plastis ke as kolom

Selain harus memenuhi persyaratan *strong column weak beam*, SNI juga mensyaratkan kekompakan penampang profil sesuai Tabel 15.7-1 dan Tabel 7.5-1. Dalam level elastis struktur juga harus memenuhi persyaratan layan dan ultimit mengikuti ketentuan dalam pasal 8.1 dan 8.2.

ANALISIS DAN KINERJA STRUKTUR

Untuk mengukur kinerja struktur dilakukan analisis statis nonlinier *pushover* menggunakan program ETABS dan analisis dinamis nonlinier *time history* menggunakan program SAP2000. Kriteria pengukuran kinerja struktur menggunakan Vision 2000 (SEAOC, 2005) untuk parameter *drift* dan FEMA 350 (SAC, 2000) untuk parameter *damage index*. Matriks kinerja struktur dapat dilihat pada Gambar 6.

Earth Quake Performance Level			
Earth Quake Design Level	Immediate Occupancy	Life Safety	Structural Stability
	Minor 100 th	○	+
Moderable 500 th	□	○	+
Severe 1000 th	*	□	○
	DI 0,1 - 0,333 Drift 0,5%	DI 0,333 - 0,5 Drift 1,5%	DI 0,5 - 1 Drift 2,5%

+ = unacceptable

Gambar 6 Matriks Kinerja Struktur untuk Berbagai Tingkat Intensitas Gempa Versi FEMA 350 (SAC, 2000) dan Vision 2000 (SEAOC, 1995).

HASIL DESAIN

Dimensi balok dan kolom pada bangunan 6- dan 10-lantai di wilayah 2 dan 6 peta gempa Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2.

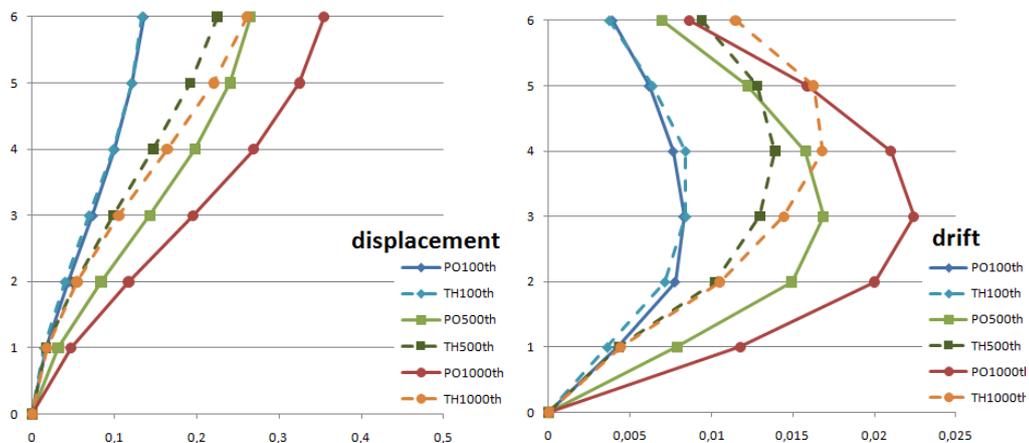
Tabel 1 Dimensi Balok dan Kolom Bangunan 6-Lantai di Wilayah 2 dan 6 Peta Gempa Indonesia

Lantai	Balok Induk		Kolom		
	Eksterior	Interior	Eksterior	Interior	Sudut
Wilayah 2 Peta Gempa Indonesia					
1	350.175.7.11	350.175.7.11	500.200.10.11	600.200.11.17	400.200.8.13
2					
3					
4					
5					
6					
Wilayah 6 Peta Gempa Indonesia					
1	450.200.9.14	450.200.9.14	700.300.13.24	70.300.13.24	600.200.11.17
2	500.200.10.16	500.200.10.16			
3					
4	450.200.9.14	450.200.9.14	588.300.12.20	588.300.12.20	500.200.10.16
5	400.200.8.13	400.200.8.13			400.200.8.13
6	350.175.7.11	350.175.7.11	400.200.8.13	400.200.8.13	400.200.8.13
Dimensi balok anak: 250.125.6.9 Seluruh elemen menggunakan profil <i>wide flange</i>					

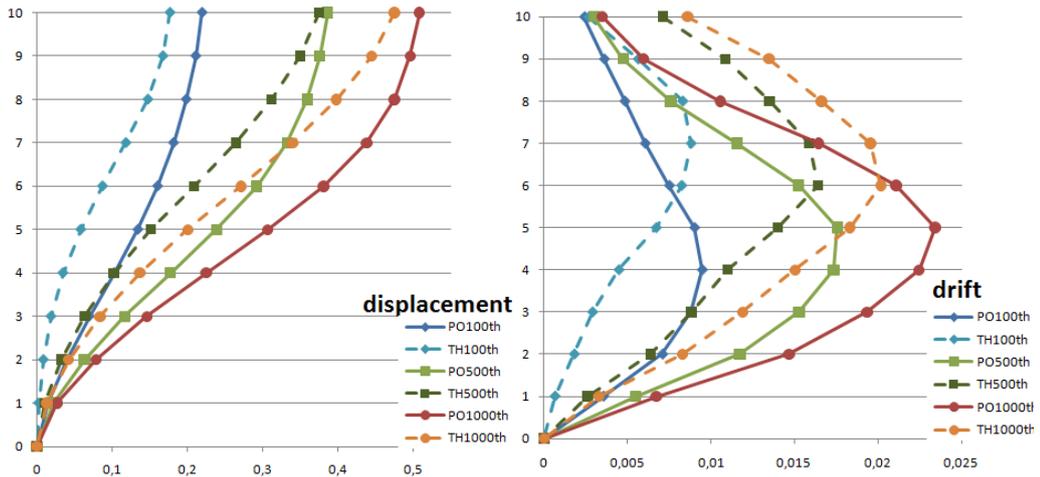
Tabel 2 Dimensi Balok dan Kolom Bangunan 10-Lantai di Wilayah 2 dan 6 Peta Gempa Indonesia

Lantai	Balok Induk		Kolom			
	Eksterior	Interior	Eksterior	Interior	Sudut	
Wilayah 2 Peta Gempa Indonesia						
1	350.175.7.11	350.175.7.11	600.200.11.17	588.300.12.20	500.200.10.16	
2				600.200.11.17	450.200.9.14	
3			500.200.10.16	500.200.10.16	450.200.9.14	350.175.7.11
4						
5						
6			450.200.9.14	450.200.9.14	400.200.8.13	400.200.8.13
7						
8			300.150.6,5,9			
9	298.149.5,5,8					
10						
Wilayah 6 Peta Gempa Indonesia						
1	600.200.11.17	600.200.11.17	900.300.16.28	900.300.16.28	800.300.14.26	
2	588.300.12.20	588.300.12.20				800.300.14.26
3						
4						
5	600.200.11.17	600.200.11.17	700.300.13.24	700.300.13.24	588.300.12.20	
6						
7	450.200.9.14	450.200.9.14	588.300.12.20	588.300.12.20	400.200.8.13	
8	400.200.8.13	400.200.8.13	600.200.11.17	600.200.11.17		
9						
10						
Dimensi balok anak: 250.125.6.9 Seluruh elemen menggunakan profil <i>wide flange</i>						

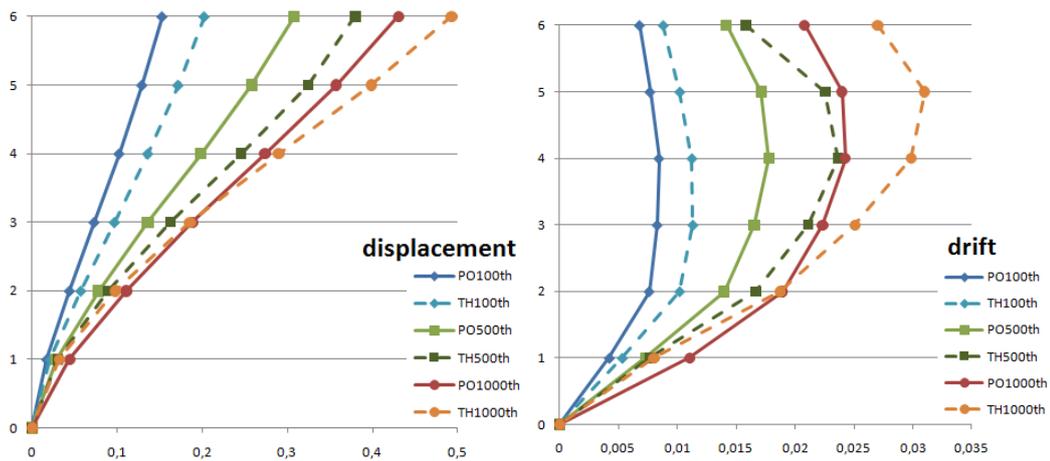
Perpindahan lantai (*displacement*) dan simpangan antar tingkat (*drift*) yang dihasilkan oleh analisis *pushover* (PO) dan *time history* (TH) untuk berbagai periode ulang gempa dari keempat bangunan dapat dilihat pada Gambar 7 – 10.



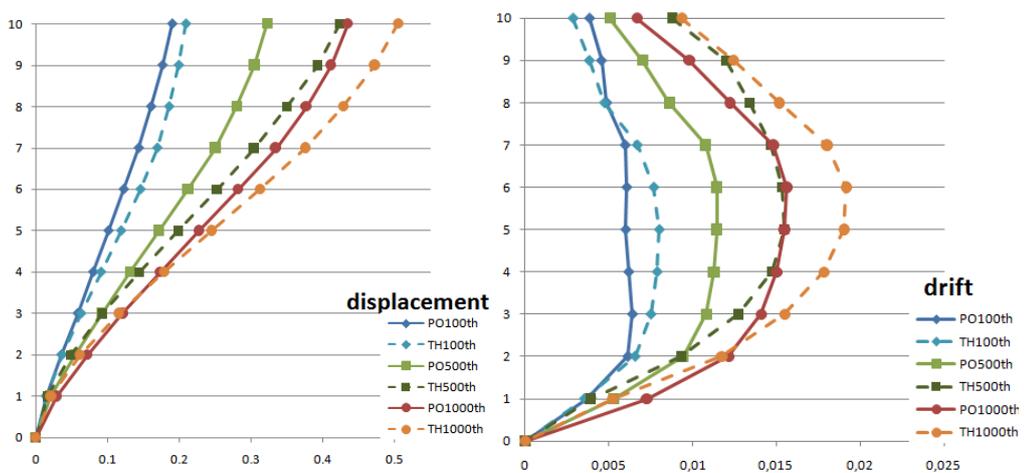
Gambar 7 Displacement dan Drift Bangunan 6-lantai untuk Wilayah 2



Gambar 8 *Displacement dan Drift* Bangunan 10-lantai untuk Wilayah 2



Gambar 9 *Displacement dan Drift* Bangunan 6-lantai untuk Wilayah 6



Gambar 10 *Displacement dan Drift* Bangunan 10-lantai untuk Wilayah 6

Dari hasil analisis *pushover* dan *time history* untuk bangunan 6- dan 10-lantai pada Wilayah 2 dan 6 peta gempa Indonesia, terlihat bahwa persyaratan *strong column weak beam* telah dipenuhi. Hal ini terlihat pada analisis *pushover* dan *time history* tidak terjadi sendi plastis pada kolom, serta sendi plastis terjadi pada RBS balok. *Damage index* balok yang dihasilkan *time history* lebih besar daripada yang dihasilkan *pushover*. Namun pola kerusakan (sendi plastis) yang dihasilkan *pushover* dan *time history* menunjukkan pola yang mirip.

Tabel 3 – 8 menampilkan matriks kinerja struktur dari hasil analisis *pushover* dan *time history* untuk parameter *drift* dan *damage index*.

Tabel 3 Matriks Kinerja Bangunan 6- dan 10-lantai, Wilayah 2, *Drift*.

Periode Ulang Gempa	Bangunan	Performance Level							
		Immediate Occupancy		Life Safety		Structural Stability		Unacceptable	
		PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH
100 tahun	6-lantai	0,0083	0,0084						
	10-lantai	0,0095	0,0088						
500 tahun	6-lantai	0,0169	0,0139						
	10-lantai		0,0164	0,0176					
1000 tahun	6-lantai		0,0168	0,0224					
	10-lantai			0,0234	0,0202				
<i>Drift Ratio maximum (%)</i>		<0,5		0,5-1,5		1,5-2,5		> 2,5	

■ : standar Vision 2000

Tabel 4 Matriks Kinerja Bangunan 6- dan 10-lantai, Wilayah 2, *Damage Index* Balok.

Periode Ulang Gempa	Bangunan	Performance Level									
		First Yield		Immediate Occupancy		Life Safety		Structural Stability		Unacceptable	
		PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH
100 tahun	6-lantai	O	O								
	10-lantai	O	O								
500 tahun	6-lantai	O	O								
	10-lantai	O	O								
1000 tahun	6-lantai	O	O								
	8-lantai	O	O								
<i>Damage Index maximum</i>		< 0,1		0,1-0,333		0,333-0,5		0,5-1,0		> 1,0	

O : berada pada kisaran nilai tersebut

■ : standar FEMA 350

Tabel 5 Matriks Kinerja Bangunan 6- dan 10-lantai, Wilayah 2, *Damage Index* Kolom.

Periode Ulang Gempa	Bangunan	Performance Level									
		First Yield		Immediate Occupancy		Life Safety		Structural Stability		Unacceptable	
		PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH
100 tahun	6-lantai										
	10-lantai										
500 tahun	6-lantai	O									
	10-lantai										
1000 tahun	6-lantai	O									
	8-lantai										
<i>Damage Index Maimum</i>		< 0,1		0,1-0,333		0,333-0,5		0,5-1,0		> 1,0	

O : berada pada kisaran nilai tersebut

■ : standar FEMA 350

Dalam matriks kinerja bangunan berdasarkan *drift ratio*, terlihat bahwa untuk beban gempa 100 tahun telah sesuai dengan persyaratan Vision 2000, sedangkan untuk beban gempa 500 tahun dan 1000 tahun cenderung lebih kecil dari persyaratan Vision 2000. Berdasarkan *damage index* balok, terlihat bahwa hasil analisis *pushover* dan *time history* cenderung sama lebih kecil daripada *damage index* yang disyaratkan FEMA 350. Sementara itu *damage index* kolom hanya terjadi pada dasar bangunan 6-lantai yang dibebani beban gempa 500 tahun dan 1000 tahun, dan masih lebih kecil dari yang disyaratkan oleh FEMA 350.

Tabel 6 Matriks Kinerja Bangunan 6- dan 10-lantai, Wilayah 6, *Drift*.

Periode Ulang Gempa	Bangunan	Performance Level									
		First Yield		Immediate Occupancy		Life Safety		Structural Stability		Unacceptable	
		PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH
100 tahun	6-lantai			0,0085	0,0113						
	10-lantai	0,0064			0,0080						
500 tahun	6-lantai					0,0178	0,0236				
	10-lantai			0,0114	0,0155						
1000 tahun	6-lantai					0,0243	0,0310				
	10-lantai			0,0156			0,0192				
<i>Drift Ratio Maximum (%)</i>		< 0,2		0,2-0,5		0,5-1,5		1,5-2,5		> 2,5	

■ : standar Vision 2000

Tabel 7 Matriks Kinerja Bangunan 6- dan 10-lantai, Wilayah 6, *Damage Index* Balok.

Periode Ulang Gempa	Bangunan	Performance Level									
		First Yield		Immediate Occupancy		Life Safety		Structural Stability		Unacceptable	
		PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH
100 tahun	6-lantai	O	O								
	10-lantai	O	O								
500 tahun	6-lantai		O	O							
	10-lantai	O	O								
1000 tahun	6-lantai		O	O							
	8-lantai	O	O								
<i>Damage Index Maximum</i>		< 0,1		0,1-0,333		0,333-0,5		0,5-1,0		> 1,0	

O : berada pada kisaran nilai tersebut

■ : standar FEMA 350

Tabel 8 Matriks Kinerja Bangunan 6- dan 10-lantai, Wilayah 6, *Damage Index* Kolom.

Periode Ulang Gempa	Bangunan	Performance Level									
		First Yield		Immediate Occupancy		Life Safety		Structural Stability		Unacceptable	
		PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH	PO	TH
100 tahun	6-lantai										
	10-lantai										
500 tahun	6-lantai	O									
	10-lantai	O									
1000 tahun	6-lantai	O									
	10-lantai	O									
<i>Damage Index</i> Maximum		< 0,1		0,1-0,333		0,333-0,5		0,5-1,0		> 1,0	

O : berada pada kisaran nilai tersebut

■ : standar FEMA 350

Dalam matriks kinerja bangunan berdasarkan *drift ratio*, terlihat bahwa *drift ratio* untuk beban gempa 100 tahun telah sesuai dengan persyaratan Vision 2000, sedangkan untuk beban gempa 500 tahun dan 1000 tahun cenderung lebih kecil dari persyaratan Vision 2000. Hanya bangunan 6-lantai dengan beban gempa 500 tahun dan 1000 tahun yang *drift ratio*-nya sesuai dengan Vision 2000. Sedangkan berdasarkan *damage index*, terlihat bahwa *damage index* balok berdasarkan analisis *pushover* dan *time history* cenderung sama dan lebih kecil daripada *damage index* yang disyaratkan FEMA 350. Sementara itu *damage index* kolom hanya terjadi pada dasar bangunan 6-lantai dan 10-lantai yang dibebani beban gempa 500 tahun dan 1000 tahun dengan analisis *pushover*. *Damage index* kolom struktur 6-lantai yang dibebani beban gempa 500 tahun dan 1000 tahun lebih kecil dari yang disyaratkan oleh FEMA 350.

Penelitian ini juga membandingkan berat profil yang digunakan pada SRPMK baja tanpa RBS (Budiharjo, Santoso, Wiyono dan Yuwono, 2008), SRPMK baja dengan RBS pada salah satu arah (Hadinyoto, Luis, Limongan, dan Leonata, 2010) dan SRPMK baja dengan RBS pada kedua arah yang digunakan dalam penelitian ini (Tabel 9).

Tabel 9 Perbandingan Berat Profil Bangunan SRPMK Baja.

Jumlah Tingkat	Wilayah 2			Wilayah 6		
	Tanpa RBS (kg/m ²)	Dengan RBS 1 arah (kg/m ²)	Dengan RBS 2 arah (kg/m ²)	Tanpa RBS (kg/m ²)	Dengan RBS 1 arah (kg/m ²)	Dengan RBS 2 arah (kg/m ²)
4	46,837	44,090		62,524	50,971	
6			49,978			79,062
8	49,782	46,483		71,459	63,296	
10			53,446			108,877
12	54,049	43,696		74,130	67,340	

Dari tabel perbandingan berat profil baja pada wilayah 2 dan 6 dapat dilihat bahwa bangunan SRPMK baja dengan RBS pada 2 arah memiliki berat profil per m² luas lantai yang lebih besar akibat penggunaan kolom *king cross*. Tetapi perlu diperhatikan bahwa pada penelitian SRPMK baja tanpa menggunakan RBS, jenis kolom yang digunakan

adalah profil WF. Orientasi penampang kolom diatur sedemikian rupa untuk mendapatkan kekakuan struktur yang relatif sama pada kedua arahnya. Dalam proses desain sangat sulit untuk menemukan profil-profil yang kompak sehingga pilihan profil yang terbatas ini mengakibatkan profil terpakai tidak bisa efisien. Sedangkan pada penelitian SRPMK baja dengan RBS pada salah satu arah, jenis kolom yang digunakan juga profil WF. Kinerja bangunan hanya ditinjau pada satu arah saja, sedangkan pada arah lainnya tidak diperiksa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *drift ratio* pada struktur tersebut melebihi batas yang disyaratkan oleh Vision 2000 (Luis dan Hadinyoto 2010 serta Limongan dan Leonanta, 2010).

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan evaluasi kinerja dan efisiensi desain Struktur Baja dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) menggunakan *Reduced Beam Section* (RBS) pada dua arah orthogonal dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Struktur baja dengan SRPMK yang menggunakan RBS memiliki beberapa kelebihan dibandingkan struktur baja SRPMK yang menggunakan profil biasa. Beberapa kelebihan tersebut yaitu lebih mudah menemukan ukuran profil kolom yang sesuai sehingga bisa didesain lebih efisien, dan lebih menjamin mekanisme *strong column weak beam*.
2. Secara umum struktur memiliki kinerja yang baik jika diukur dari parameter *drift* dan *damage index* menurut batasan Vision 2000 dan FEMA 350.
3. Desain bangunan tidak ekonomis, karena berat profil yang dipakai lebih besar dibandingkan struktur baja dengan SRPMK dengan penampang konvensional (tanpa RBS). Hal ini disebabkan karena penggunaan profil *king cross* pada kolom-kolom.
4. Syarat kinerja batas layan dan kinerja batas ultimit dalam SNI 1726-2002 menjadi batasan utama selama proses desain balok dan kolom. Persyaratan ini menyebabkan hasil desain balok dan kolom menjadi besar.

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut dengan beberapa perubahan sebagai berikut:

1. Dalam analisis *time history nonlinear* penelitian ini, riwayat waktu yang berhasil di-*record* hanya mencapai sekitar 6 detik dari total 20 detik percepatan gempa. Oleh karena itu disarankan untuk menggunakan program lain selain SAP 2000 v11.0.0 yang dapat melakukan analisis dengan lebih cepat dan sederhana, namun tetap memiliki kapasitas memori yang besar.
2. Melihat hasil desain yang tidak ekonomis, maka disarankan untuk mencoba melakukan penelitian sejenis pada bangunan baja dengan sistem ganda.
3. Kinerja struktur dengan menggunakan RBS akan menghasilkan pola keruntuhan yang lebih aman. Dengan mempertimbangkan hal tersebut, maka peraturan Indonesia, SNI 03-1729-2002 sebaiknya mulai mengatur penggunaan RBS agar dapat digunakan dalam pembangunan bangunan baja di masa yang akan datang. Sebagai pedoman, SNI 03-1729-2002 dapat mengadopsi peraturan desain RBS dari AISC 358-05.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction (2005). *Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic application, AISC 358-05*. American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago:Author.
- Badan Standarisasi Nasional. (2002). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*, SNI 03-1726-2002.
- Badan Standarisasi Nasional. (2002). *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*, SNI 03-1729-2002.
- CSI. (2005). *CSI Analysis Reference Manual*. California: Computers and Structures, Inc.
- CSI. (2005). *ETABS Integrated Building Design Software User's Guide*. California: Computers and Structures, Inc.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1983). *Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983*. Bandung.
- Limongan, J. dan Leonanta, Y.S. (2010). *Evaluasi Kinerja Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) Baja yang Menggunakan Reduce Beam Section di Wilayah 2 Peta Gempa Indonesia* (Tugas Akhir Strata 1 no 11011719/SIP/2010). Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Luis, C. dan Hadinyoto, T.W. (2010). *Evaluasi Kinerja Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) Baja yang Menggunakan Reduce Beam Section di Wilayah 6 Peta Gempa Indonesia* (Tugas Akhir Strata 1 no 11011716/SIP/2010). Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- SAC Joint Venture (2000). *FEMA-350 Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings*. California : Federal Emergency Management Agency.
- Structural Engineers Association of California (1995). *VISION 2000 progress report*. California.
- Wiyono, S.K. dan Yuwono, E. (2008). *Evaluasi kinerja struktur baja dengan sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) yang didesain berdasarkan SNI 03-1729-2002 di wilayah 6 peta gempa Indonesia* (Tugas Akhir no 11011591/SIP/2008). Unpublished undergraduate thesis, Universitas Kristen Petra, Surabaya.