

BEBERAPA KETENTUAN BARU MENGENAI DESAIN STRUKTUR BAJA TAHAN GEMPA

Muslinang Moestopo¹

1. Pendahuluan

Ketentuan baru mengenai tata cara perencanaan struktur baja untuk bangunan gedung di Indonesia telah dipublikasikan sejak 2002 berupa SNI-03-1729-2002⁹⁾. Ketentuan ini mengacu kepada metoda perencanaan Load Resistance and Factor Design (LRFD) yang sudah lebih dahulu diadopsi untuk perencanaan struktur beton (SNI 03-2847-02). Pada dokumen yang baru ini dimasukkan pula ketentuan mengenai perencanaan struktur baja tahan gempa dan komponen struktur komposit. Walaupun diterbitkan agak lebih lambat, namun ketentuan dalam SNI-03-1729-2002 mengacu kepada dua buah dokumen mengenai ketentuan sejenis di Amerika Serikat, yaitu *Specification for Structural Steel Buildings* dan *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* yang dikeluarkan oleh American Institute of Steel Construction, Inc (AISC) tahun 1993 dan pemutakhirannya pada tahun 1997.

Sejak saat itu, AISC telah melakukan pemutakhiran lebih lanjut pada tahun 2002 dan yang terakhir adalah *Specification for Structural Steel Buildings* (AISC 360-05)¹⁾ pada tahun 2005, yang berisi gabungan antara perencanaan dengan *Allowable Stress Design* (ASD) dan LRFD. Sejalan dengan perkembangan hasil penelitian yang secara intensif dilakukan di Amerika Serikat melalui SAC *Project*, telah diterbitkan pula pemutakhiran bagian struktur tahan gempa, yaitu melalui *Seismic Provisions for Steel Building Structures* edisi tahun 1997, dan perubahannya tahun 1999 dan 2002, hingga yang terakhir yaitu AISC 341-05²⁾ pada tahun 2005. Fokus dari proyek penelitian yang mendukung pemutakhiran ini meliputi berbagai aspek, diantaranya: spesifikasi bahan termasuk bahan las, stabilitas penampang dan komponen struktur, perilaku berbagai sistem struktur pemikul beban gempa, sistem sambungan hingga detailing yang diperlukan untuk menghasilkan kinerja struktur baja tahan gempa yang memenuhi kekuatan, kekakuan, daktilitas, dan kemampuan menyerap energi yang diperlukan.

Dengan demikian, akan terdapat sejumlah pemutakhiran pada ketentuan AISC yang belum diadopsi oleh SNI selama rentang lebih dari 10 tahun. Beberapa pemutakhiran disampaikan sebagai contoh dalam makalah ini dengan maksud memberikan informasi terkini yang diperlukan para pelaku industri konstruksi baja khususnya dalam menghadapi kebutuhan yang semakin meningkat akan struktur baja tahan gempa. Sejalan dengan itu, upaya pemutakhiran SNI 03-1729 diharapkan dapat dilakukan dalam waktu yang tidak terlalu lama.

¹ Anggota Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Staf Peneliti Kelompok Riset Rekayasa Struktur Bangunan, Pusat Rekayasa Industri, ITB

2. Spesifikasi Bahan

Pemutakhiran yang dilakukan terhadap ketentuan mengenai bahan baja, mengakomodasi hasil penelitian terhadap berbagai jenis dan mutu baja yang beredar di pasaran Amerika Utara. Mengingat pentingnya persyaratan bahwa leleh akibat beban gempa hanya direncanakan terjadi pada komponen yang telah ditentukan sesuai dengan jenis struktur (dan tidak pada sambungan dan komponen lainnya), maka AISC 341-05²⁾ telah dilengkapi dengan nilai faktor kuat lebih bahan, berupa R_y (rasio antara nilai tegangan leleh sebenarnya dengan nilai tegangan leleh nominal) dari berbagai bahan dan mutu baja dengan spesifikasi menurut *American Society of Testing Materials* (ASTM), seperti terlihat dalam Tabel 1. Selain itu, telah diperkenalkan pula nilai R_t , yaitu rasio antara nilai tegangan tarik/putus (sebenarnya) dengan nilai tegangan tarik/putus nominal, guna mengantisipasi keruntuhan fraktur (misalnya pada batang tarik).

Hasil penelitian menunjukkan berbagai kegagalan fraktur pada kolom baja yang diduga akibat dari rendahnya nilai *notch-toughness* terutama pada daerah ujung pelat badan dari penampang-penampang WF. Dalam upaya menjamin kemampuan penampang baja memikul beban siklik akibat gempa melalui mekanisme plastifikasi yang memerlukan daktilitas dan kemampuan disipasi energi yang cukup, maka persyaratan yang berkaitan dengan ketahanan *notch-toughness* bahan baja (yang dinyatakan dengan nilai *Charpy V-Notch toughness*) telah diperketat, khususnya untuk penggunaan pelat yang direncanakan mengalami pelelehan.

Tabel 1 Faktor Kuat Lebih Bahan²⁾

PENGUNAAN BAHAN BAJA	R_y	R_t
<i>Profil dan batang baja gilas-panas:</i>		
ASTM A36/A36M	1.5	1.2
ASTM A572/572M Grade 42	1.3	1.1
ASTM A572/572M Grade 50 atau 55 ASTM A913/A913M Grade 50, 60, atau 65 ASTM A588/588M, ASTM A992/A992M, A1011 HSLAS Grade 55	1.1	1.1
ASTM A529 Grade 50	1.2	1.2
ASTM A529 Grade 55	1.1	1.2
<i>Penampang Rongga (HSS):</i>		
ASTM A500 (Grade B atau C), ASTM A501	1.4	1.3
<i>Pipa:</i>		
ASTM A53/A53M	1.6	1.2
<i>Pelat:</i>		
ASTM A36/A36M	1.3	1.2
ASTM A572/A572M Grade 50 ASTM A588/A588M	1.1	1.2

3. Stabilitas Penampang

Dalam memikul beban siklik akibat gempa, sebuah penampang baja harus mampu berdeformasi plastik secara stabil untuk menghasilkan jumlah penyerapan energi yang besar. Hal ini harus dijamin oleh kekompakan pelat-pelat penampang terhadap bahaya tekuk akibat bekerjanya gaya tekan yang berulang-ulang. SNI 03-1729-02 yang mengacu pada ketentuan tahun 1994 dan 1997 telah mensyaratkan nilai kelangsingan (*slenderness ratio*) dari pelat sayap dan pelat badan penampang baja yang memikul beban gempa, disamping syarat nilai kelangsingan untuk penampang non-seismik. Hasil penelitian selanjutnya menunjukkan perlunya memperketat kelangsingan pelat badan pada penampang baja yang memikul beban gempa. Hal ini telah dituangkan dalam revisi *Seismic Provision AISC* versi tahun 2005²⁾.

Tabel 2 menunjukkan nilai kelangsingan dari beberapa penampang baja sebagai komponen pemikul gempa, yaitu yang direncanakan mengalami pelelehan akibat beban siklik. Terlihat adanya sejumlah penampang yang tidak memenuhi persyaratan kekompakan sebagai komponen pemikul beban gempa (*seismically-compact*), khususnya pada pelat sayap. Walaupun persyaratan telah diperketat pada AISC 2005²⁾, namun penampang-penampang gilas-panas (*hot-rolled*) pada Tabel 2 masih memenuhi persyaratan kekompakan pelat badan. Hal ini perlu diperhatikan terutama pada penampang-penampang balok tinggi yang memikul beban gempa. Nilai kelangsingan tersebut menunjukkan perlunya para pelaku jasa konstruksi memperhatikan penggunaan penampang-penampang baja dengan ukuran tertentu yang tidak memenuhi ketentuan sebagai komponen pemikul beban gempa.

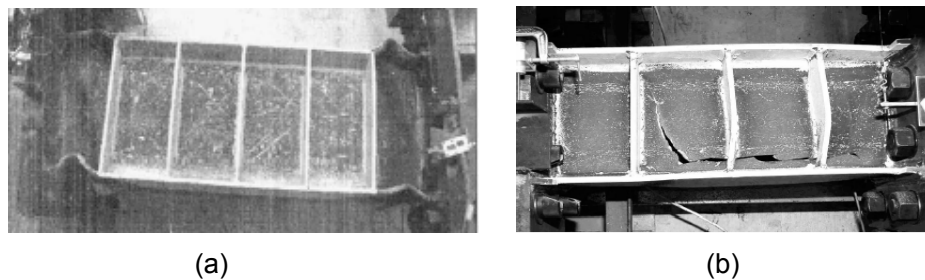
Tabel 2 Nilai Kelangsingan (λ) Pelat Penampang

Penampang Lentur WF	Pelat Sayap					Pelat Badan				
	λ	λ_p	λ_{ps} SNI- 02	λ_{ps} AISC- 05	OK	λ	λ_p	λ_{ps} SNI- 02	λ_{ps} AISC- 05	OK
	$\frac{b}{2tf}$	$\frac{170}{\sqrt{f_y}}$	$\frac{135}{\sqrt{f_y}}$	$0.30 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$		$\frac{h}{t_w}$	$\frac{1680}{\sqrt{f_y}}$	$\frac{1365}{\sqrt{f_y}}$	$2.45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	
100.100.6.8	6.25				V	10.67				V
150.100.6.9	5.56				V	18.00				V
150.150.7.10	7.50				V	15.43				V
200.100.5.5.8	6.25				V	29.45				V
200.200.8.12	8.33				V	18.75				V
250.250.9.14	8.93	10.75	8.54	8.48	NO	21.11	106.25	86.33	69.30	V
300.150.5.5.8	9.31				NO	46.55				V
300.300.10.15	10.00				NO	23.40				V
350.175.6.9	9.67				NO	50.00				V
350.350.12.19	9.21				NO	22.67				V
400.200.7.11	9.05				NO	48.86				V
400.400.13.21	9.52				NO	25.15				V

Penelitian yang dilakukan penulis pada struktur baja berpengaku eksentrik (*eccentrically braced frame*) menunjukkan indikasi bahaya tekuk tersebut^{4,5)} seperti terlihat pada Gambar 2. Beberapa hasil penelitian terakhir^{6,7)} pada Gambar 2 menunjukkan perlunya kajian lebih lanjut mengenai rasio kelangsingan pelat yang digunakan sebagai *link* pada struktur baja berpengaku eksentrik.



Gambar 1 Kegagalan Pada Pelat Sayap Link^{4,5)}



a. Tekuk Pelat Sayap b. Fraktur Pelat Badan
Gambar 2 Kegagalan Pada Pelat Link^{6,7)}

4. Sambungan

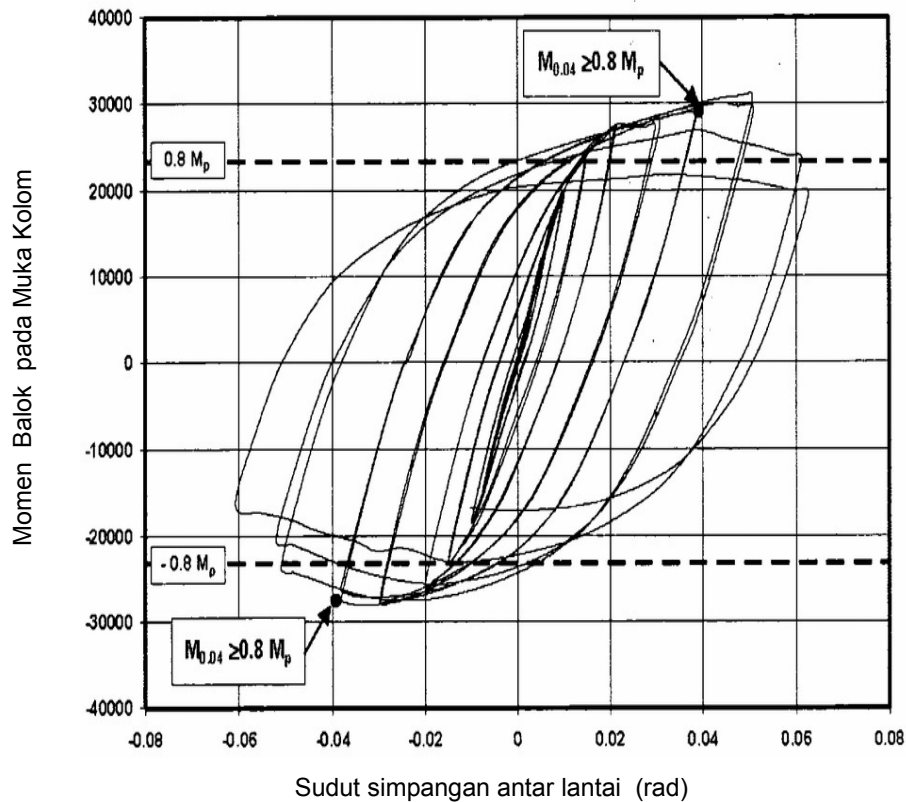
Ketentuan mengenai sambungan yang merupakan komponen sangat penting dalam struktur tahan gempa, mengalami beberapa pemutakhiran. Sebagai contoh, ketahanan *notch-toughness* diperketat untuk pelat buhul pada sambungan bresing/pengaku yang direncanakan leleh sebagai sendi plastis pada struktur berpengaku konsentrik. Untuk sambungan las, ketentuan mengenai spesifikasi bahan las diperketat, khususnya yang berkaitan dengan ketahanan *notch-toughness* dari bahan las/elektroda.

Dalam perencanaan struktur tahan gempa disyaratkan dengan ketat bahwa sambungan harus direncanakan (jauh) lebih kuat daripada komponen yang disambung, untuk menjamin bahwa selama gempa terjadi, pelelehan tidak terjadi di bagian sambungan, tetapi di bagian yang memang telah direncanakan leleh pada struktur yang bersangkutan. Oleh karena itu, harus diperhitungkan faktor kuat lebih bahan, R_y (yang telah diperbaharui) dalam merencanakan sambungan, termasuk alat sambungnya.

Dalam SNI 03-1729-02 dinyatakan bahwa sambungan pada struktur pemikul gempa, harus mampu mengakomodasi terjadinya penyerapan energi yang baik pada sendi plastis sesuai dengan kinerja struktur yang direncanakan. Kinerja ini dinyatakan dengan besaran sudut rotasi plastis yang terbentuk diantara sumbu balok dan sumbu kolom. Hal

ini harus dibuktikan melalui pengujian sambungan di laboratorium, hal mana merupakan kesulitan bagi para penyedia jasa konstruksi.

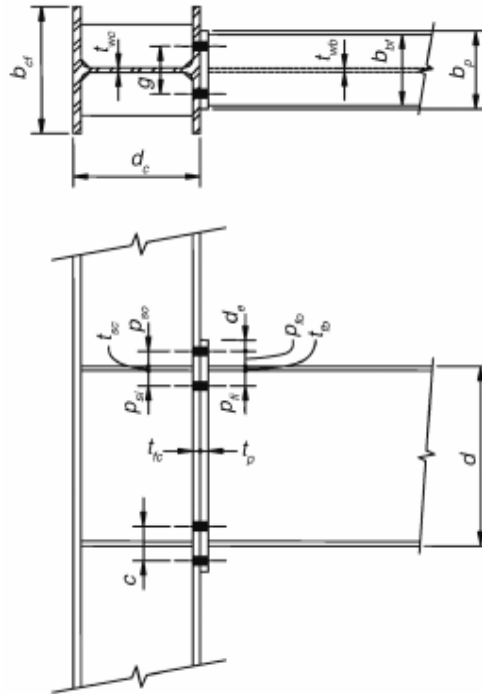
Hasil penelitian selanjutnya menunjukkan bahwa kinerja sambungan lebih tepat bila dinyatakan dengan besaran simpangan antar lantai (*interstory drift angle*) yang terjadi akibat pembebanan bolak-balik. Dalam hal ini, sebuah sambungan pada struktur rangka pemikul momen khusus (SRPMK) harus mampu berdeformasi hingga mencapai sudut simpangan antar lantai sebesar 0.04 radian pada saat sambungan masih dapat memobilisasi kuat momen sebesar minimal 80% dari nilai momen plastis balok. Ukuran kinerja ini telah diadopsi dan menjadi ketentuan AISC tahun 2005²⁾.



Gambar 3 Kurva histeresis Sambungan Balok-Kolom pada SRPMK²⁾

Sejumlah penelitian yang sangat intensif di Amerika Serikat telah berhasil menghasilkan sejumlah model sambungan baut untuk digunakan pada struktur pemikul momen. AISC telah menerbitkan dokumen mengenai jenis sambungan yang dinyatakan mampu memobilisasi mekanisme plastifikasi pada struktur pemikul momen khusus dan terbatas, melalui dokumen *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*³⁾.

Gambar 4 dan Tabel 3 menunjukkan salah satu jenis sambungan baut yang telah teruji untuk digunakan pada struktur rangka baja pemikul momen. Dalam dokumen tersebut, disampaikan pula sejumlah sambungan dengan skema dan dimensi ukuran dan jarak yang direkomendasikan.



Gambar 4 Contoh Sambungan Extended-Plate 3)

Tabel 3 Batasan Parameter Pada Contoh Sambungan Extended-Plate 3) (dalam mm)

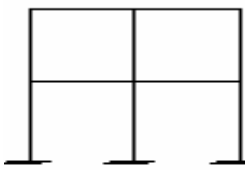
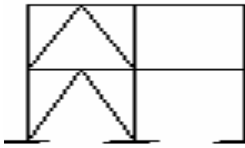
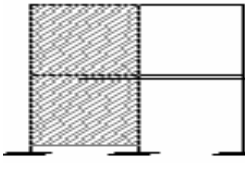
Parameter	t_p	b_p	g	p_{fi}, p_{fo}	d	t_{bf}	b_{bf}
Minimum	13	178	102	38	635	10	152
Maksimum	57	273	152	114	1400	19	235

Selain ketentuan mengenai pelat penyambung, dinyatakan pula batasan-batasan mengenai balok dan kolom yang dihubungkan oleh jenis sambungan tersebut. Dokumen³⁾ ini juga memuat ketentuan mengenai parameter desain sambungan, dan merekomendasikan sejumlah variasi dimensi pada berbagai jenis sambungan. Namun demikian, perlu kiranya dicermati beberapa parameter yang memerlukan penyesuaian dengan kondisi ketersediaan bahan di Indonesia, khususnya parameter kuat lebih bahan yang memerlukan kajian intensif.

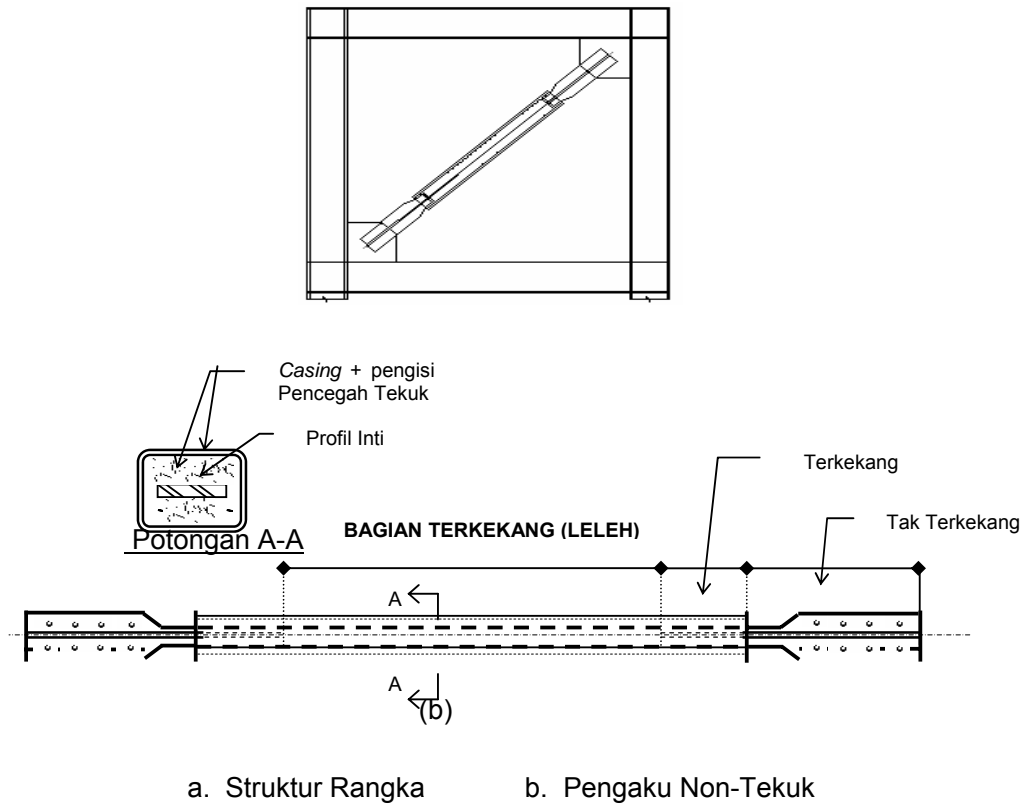
5. Sistem Struktur Pemikul Beban Gempa

Dalam SNI 03-1729-2002 telah diperkenalkan sejumlah sistem struktur rangka baja pemikul beban gempa, dengan masing-masing kinerjanya yang direpresentasikan dengan nilai R, yaitu faktor modifikasi respons struktur atau faktor reduksi beban gempa. Berdasarkan sejumlah hasil penelitian yang dilakukan, ketentuan terakhir AISC tahun 2005²⁾ telah merevisi nilai R dan menambahkan sistem struktur yang baru, seperti terlihat pada Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4 Sistem Struktur Rangka Baja dan nilai R

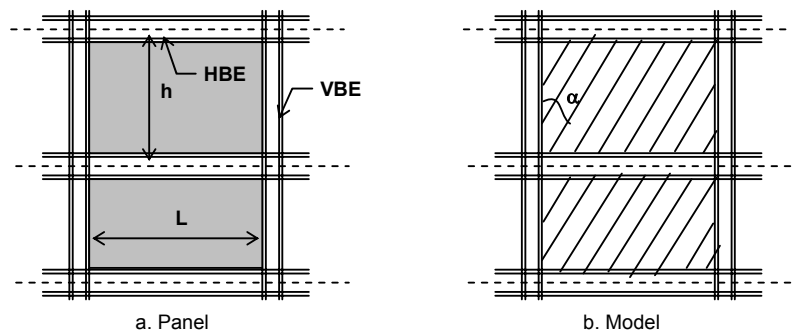
SISTEM STRUKTUR RANGKA BAJA		SNI-03-1729-2002	Seismic Provision AISC-2005	
		R	R	
	<i>Special Moment Frames (SMF)</i>	8.5	8	
	<i>Intermediate Moment Frames (IMF)</i>	6.0	4.5	
	<i>Ordinary Moment Frames (OMF)</i>	4.5	3.5	
	<i>Buckling Restraint Braced Frames (BRBF)</i>	Sambungan balok-kolom memikul momen	-	8.0
		Sambungan balok-kolom tidak memikul momen	-	7.0
	<i>Steel Plate Shear Walls (SPSW)</i>	-	7.0	

Pada struktur rangka berpengaku non-tebuk (*Buckling Restraint Braced Frames*), penyerapan energi gempa direncanakan terjadi melalui pelelehan batang pengaku (inti) yang terbuat dari baja lunak, baik pada saat tertarik maupun tertekan. Pelelehan pada kondisi tekan dimungkinkan terjadi mengingat batang inti terbungkus oleh selongsong (*casing*) baja dengan bahan pengisi, seperti terlihat pada Gambar 5. Dengan demikian dapat diupayakan peningkatan kinerja struktur dalam bentuk penyerapan energi yang baik dan stabil pada bagian batang inti.



Gambar 5 Rangka Berpengaku Non-Tekuk (*Buckling Restraint Braced Frames*)

Pada struktur rangka berdinding pelat baja (*steel plate shear walls*), pelelehan direncanakan terjadi pada dinding baja melalui mekanisme tarik pada dinding baja, yang sekaligus mengalami tekuk yang terkendali oleh adanya aksi tarik pada dinding baja tersebut, yang dimodelkan dengan gaya tarik dalam arah diagonal, seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6 *Steel Plate Shear Walls*

Berbagai ketentuan perencanaan bagi BRBF dan SPSW telah ditambahkan dalam ketentuan terbaru AISC³⁾ tahun 2005.

6. Penutup

Sejumlah pemutakhiran telah dilakukan berdasarkan berbagai hasil penelitian yang telah dilakukan dalam meningkatkan kinerja struktur baja pemikul gempa. Diantaranya menyangkut spesifikasi bahan, stabilitas penampang, sambungan, detailing dan sistem struktur pemikul gempa.

SNI 03-1729-2002 yang memuat ketentuan baru bagi perencanaan struktur baja tahan gempa di Indonesia, memerlukan kajian dan pemutakhiran lebih lanjut untuk mengakomodasi berbagai kebutuhan dalam meningkatkan kinerja terhadap bahaya gempa yang semakin perlu diperhatikan.

7. Daftar Pustaka

1. American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-05, Chicago, March 2005 .
2. American Institute of Steel Construction, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, ANSI/AISC 341s1-05 , Chicago, November 2005.
3. American Institute of Steel Construction, *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, ANSI/AISC 358-05, Chicago, December 2005.
4. Moestopo M. and Mirza, A., Kinerja Link Dengan Sambungan Baut Pada Struktur Rangka Berpengaku Eksentrik, Seminar & Pameran HAKI, Jakarta, Agustus 2006.
5. Moestopo M. and Khairullah, *On Improved Behavior of Eccentrically Braced Frames*, 9th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Bali, 2003
6. Okazaki, T., et.al, *Experimental Study of Local Buckling, Overstrength, and Fracture of Links in Eccentrically Braced Frames*, Journal of Structural Engineering, October 2005.
7. Richards, P.W. and Uang, C.M., *Effect of Flange Width-Thickness Ratio on Eccentrically Braced Frames Link Cyclic Rotation Capacity*, Journal of Structural Engineering, October 2005
8. SNI 03-1729-2002, *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung*, 2002.
9. SNI 03-1726-2002, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*, 2002.