

Earthquake-Resistant Building : Buckling-Restrained Braced Truss-Girder Moment Frames (proposed)

Hidayat Sugihardjo¹

Abstract—This paper evaluates the inelastic behaviors of four Buckling-Restrained Braces (BRB) and two full scale Buckling-Restrained Braced Truss-girder Moment Frames (BRBTMF) by analytical and experimental means. The BRB section is strip plate core cased with rectangular hollow section, thus resulting in identical axial strengths of compression and tension. The BRBTMF proposed in this paper is the modification of The Special Truss Moment Frames (STMF) by replacing the X-bracing with the BRB. The conclusion of analytical studies is that frames proposed have better inelastic behavior than the other ductile frames. From the experimental analysis the BRBTMF have hysteretic curves in the 3% drift ratio to cyclic loading and result the cumulative ductility factor which has met the requirements of the hysteretic system structure.

Keywords—Inelastic behaviors, STMF, BRB, BRBTMF, Cumulative ductility factor

I. PENDAHULUAN

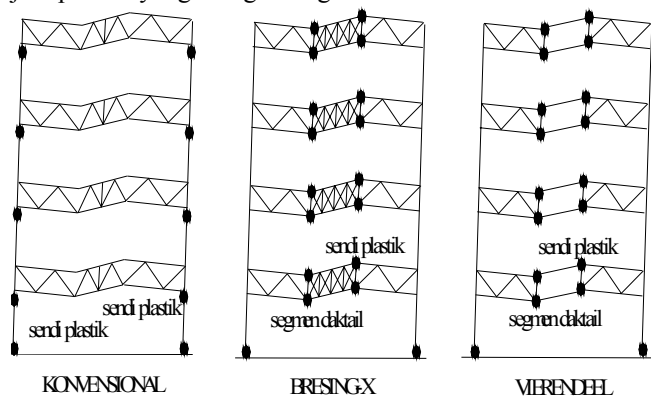
Letak Indonesia yang merupakan pertemuan tiga lempeng yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Pasifik dan lempeng Eurasia, menyebabkan hampir semua wilayah Indonesia mempunyai resiko gempa tektonik tinggi. Oleh karena itu di Indonesia, merencanakan suatu struktur bangunan yang tahan terhadap beban gempa, merupakan kebutuhan yang tidak dapat dihindari. Kekuatan, kekakuan, daktilitas dan kemampuan untuk mendisipasikan energi gempa yang harus dimiliki oleh struktur bangunan merupakan hal utama yang harus diperhatikan. *Filosofi bangunan tahan gempa bahwa akibat gempa-gempa besar bangunan boleh rusak tetapi tidak boleh menimbulkan korban jiwa* harus menjadi dasar pemikiran. Hal lain yang juga harus diperhatikan adalah *sistem struktur*, material yang akan digunakan serta sistem sambungan dari setiap elemennya.

Dalam merancang struktur gedung menurut standar baja Indonesia [1], sistem struktur baja harus dapat digolongkan dalam salah satu dari lima sistem, yaitu: Sistem Dinding Penumpu, Sistem Rangka Bangunan, Sistem Rangka Pemikul Momen, Sistem Ganda dan Sistem Bangunan Kolom Kantilever. Sistem rangka batang dapat dimasukkan dalam golongan Sistem Rangka Pemikul Momen (baik *biasa* atau *konvensional* maupun *khusus*) yang berdiri sendiri maupun Sistem Ganda,

dimana bersama rangka pemikul beban gravitasi, bersama-sama memikul beban lateral. Disebut *khusus* karena adanya *segmen daktail khusus* atau spesial di tengah bentang yang berfungsi mendisipasikan beban-beban dinamik (lihat Gambar 1).

Jika dibandingkan dengan balok solid, balok rangka batang baja mempunyai tiga keuntungan secara ekonomi: memerlukan detail sambungan lebih sederhana, rasio antara berat sendiri terhadap daya dukung kecil (cocok untuk bentang-bentang besar) dan mempunyai ruang untuk utilitas yang lebih besar.

Keuntungan tambahan jika sistem rangka batang ini digunakan di Indonesia, dimana *tenaga kerja relatif murah*, sehingga rangka batang yang banyak memerlukan volume pekerjaan dibanding dengan balok solid, masih menjadi pilihan yang menguntungkan.



Gambar 1. Tipe-tipe rangka batang dan mekanisme lelehnya

Sistem rangka pemikul yang didesain dengan filosofi ini dikenal sebagai *Balok Kuat Kolom Lemah*. Hal ini tidak dianjurkan. Pada analisis numerik riwayat waktu dengan beban beberapa rekaman gempa, dibuktikan bahwa sendi-sendi plastik terjadi pada kolom-kolom, seperti terlihat pada Gambar 1, [2].

Untuk memperbaiki kinerja sistem struktur, telah dilakukan penelitian pada bentuk rangka yang berbeda. Yang pertama, panel Vierendeel ditambahkan di sekitar tengah-bentang sebagai segmen yang daktail, lihat Gambar 1. Segmen ini bekerja seolah-olah sebagai *fuse* (pemberi peringatan) daktail yang berfungsi mendisipasi energi gempa dengan cara berdeformasi lentur inelastik. Selama berlangsungnya gempa, gaya lateral yang dihasilkan menimbulkan gaya geser pada segmen daktail yang ditahan sendirian oleh batang-batang tepi atas dan bawah sampai terjadi sendi-sendi plastik akibat lentur dan membentuk mekanisme leleh pada rangka,[3].

Naskah diterima 1 Mei 2007; selesai revisi pada 6 September 2007

¹ Hidayat S. adalah dosen Jurusan Teknik Sipil, FTSP, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, INDONESIA (e-mail: hidajat_sugihardjo@yahoo.com)

Sistem yang kedua adalah dengan tambahan batang diagonal bentuk-X (yang selanjutnya disebut *bresing-X*) yang ditempatkan pada panel-panel sekitar tengah-bentang rangka. Dengan adanya tambahan segmen daktail dari bresing-X ini, energi gempa didisipasi oleh bresing-X sampai terjadi plastifikasi. Setelah bresing-X tak berfungsi, beban gempa akan dipikul sendiri oleh batang-batang tepi atas dan bawah seperti fenomena rangka batang dengan segmen Vierendeel. Jadi aksi inelastik sistem rangka akibat gempa kuat merupakan kontribusi dari bresing-X dan gaya geser yang dihasilkan empat sendi plastik pada ujung-ujung segmen daktail seperti terlihat pada Gambar 1, Goel dan Itani [4]. Bentang yang bisa dicapai dengan sistem ini sampai 20 m [5] dan tingginya 160 ft (48m) [6].

Dengan bentang-bentang 8,5m, 10m dan 12m sistem rangka daktail tipe Vierendeel dan bresing-X dengan penampang siku dan persegi ini telah dilakukan studi [7], [8], [9]. Sistem ini masih menunjukkan perilaku inelastik yang baik sampai bentang 12m. Untuk mengetahui perilaku inelastik gedung-gedung tinggi yang menggunakan SRBPMK dan untuk memvalidasi pernyataan NEHRP [6] bahwa batasan penggunaan SRBPMK hanya untuk gedung sampai 160ft (48m), telah di-studi model analitik dengan tinggi sampai 52m [10], [11], [12], [9] dengan Analisis Riwayat Waktu dan Beban Dorong Statik Nonlinier. Respon inelastik sistem ini juga masih baik untuk gedung sampai tinggi 52m.

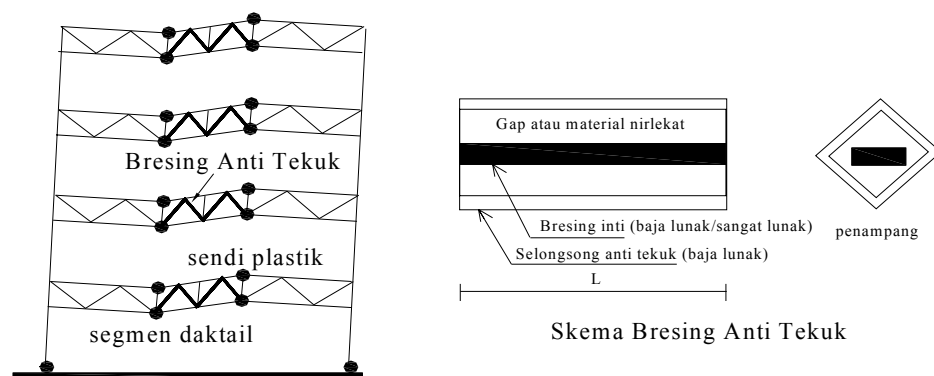
Pada saat ini di Jepang telah berkembang material baja baru, dinamakan Baja Sangat Lunak (*Low Yield Stress Steel*), dimana yang termasuk dalam kelompok ini adalah LY100, LY160 dan LY235. Dalam bentuk *Stiffened Flat-bar (SF Damper)* atau *Buckling-Restraint Braces (Bresing Anti Tekuk atau selanjutnya disingkat BAT)*, material ini banyak digunakan sebagai peredam histeretik. Baja ini mempunyai karakteristik tegangan leleh yang kecil, berkisar 90-245 MPa (sampai sepertiga A36) tetapi regangan putusnya dapat mencapai 1,5-2,5 kali regangan putus baja A36. *Penggunaan baja sangat lunak sebagai pengganti baja normal menjamin plasti-*

fikasi terjadi pada deformasi yang kecil tanpa adanya perubahan yang signifikan pada dimensi bresing (peredam) dan kekakuan struktur, [13], [14]. Konfigurasi penampang BAT berupa pelat strip (atau penampang lain) dari baja sangat lunak atau lunak sebagai *bresing inti* yang dimasukkan dalam selongsong tabung kotak dari baja normal dengan atau tanpa material nirlekat, yang berfungsi sebagai *elemen pengekan lateral* seperti terlihat pada Gambar 2. Dari konfigurasi BAT ini dihasilkan *kapasitas leleh tekan relatif sama dengan kapasitas leleh tariknya*. Macam-macam penampang BAT yang lain dapat dilihat di [15].

Dalam peraturan terbaru [5], dikenalkan sistem struktur baru yang disebut *Buckling-Restraint Braces Frames (BRBF)*. Sistem ini terdiri dari balok solid yang diperkaku oleh BAT. Dari uji analitik pada struktur gedung baja 11-lantai 8-bentang yang diperkaku dengan BAT [14], menunjukkan reduksi rasio simpangan sampai 50% dan terjadi pengurangan pada gaya geser dasarnya meskipun relatif kecil.

Studi yang dilakukan Kasai *et al* [16] pada gedung 14-tingkat yang diretrofiting dengan BAT jenis material nirlekat (*Buckling-Restraint Unbonded Braces*) menunjukkan pengurangan sampai 60% pada rasio simpangan dan sampai 30% pada gaya geser dasarnya. Kesimpulan hasil studi Clark *et al.* [17] yang dilakukan pada sebuah struktur yang didesain berdasarkan target rasio simpangan dan kekakuan, masih dapat diperkecil gaya geser dasarnya sampai 50%, dengan adanya tambahan BAT tipe material nirlekat sebagai pengaku.

Kajian analitik awal pada SRBBAT pernah dilakukan dengan mengganti bresing-X pada *dua* panel ditengah bentang dengan BAT konfigurasi-X [18]. Dalam studi ini energi yang didisipasi ditingkatkan lagi dengan mengganti bresing-X yang kekuatannya pasca tekuknya kecil dengan BAT yang kapasitas tekannya relatif sama dengan tarik. Pada SRBBAT, nilai-nilai simpangan atap dan rasio simpangan tingkat berkurang sampai 50%.



Gambar 2. Sistem Rangka Batang berelamen Bresing Anti Tekuk (SRBBAT) (usulan)

Dari uraian latar belakang di atas terlihat bahwa studi-studi yang dilakukan kebanyakan *memperkaku* struktur rangka balok solid dengan BAT. Timbul pemikiran, apabila dari studi [18] bresing-X *semuanya diganti* dengan

BAT bentuk V-terbalik, tentu akan dapat memperbaiki respon seismik sistem rangka. Pemilihan bentuk V-terbalik karena efektifitas disipasi energi BAT sangat tergantung panjangnya, sedang tipe-X panjang efektifnya

hanya 50% dari panjang teoretisnya (disebabkan masalah sambungan ke batang tepi rangka) [19].

Permasalahan yang akan diteliti pada SRBBAT diantaranya adalah :

1. Perilaku seismik (simpangan atap, rasio simpangan) akibat beberapa rekaman gempa.
2. Perilaku rangka akibat beban siklik, faktor daktilitas kumulatif dan disipasi energinya.
3. Faktor daktilitas sistem rangka terhadap beban dorong statik nonlinier

II. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan untuk mempelajari perilaku inelastik rangka batang berelemen BAT diatas adalah secara *analitik* dan *eksperimental*.

A. Kajian analitik

Teori dasar sistem rangka batang daktail ini adalah disipasi energi gempa dilewatkan pada suatu segmen daktail di tengah bentang yang bersifat inelastik. Elemen lain diluar segmen daktail (termasuk kolom) harus tetap elastik dengan memperbesar kekuatannya dengan suatu faktor kuat cadang (*overstrength factor*), dimana untuk SRBBAT besarnya faktor kuat cadang adalah 1,5 [19] mengacu pada studi Goel dan Itani [2].

Pada SRBBAT, jika $P_{y(BAT)}$ = gaya aksial leleh BAT ; α = sudut kemiringan BAT terhadap horisontal; M_p = kapasitas momen plastik dari batang-batang tepi rangka batang dan L_s = panjang segmen daktail, maka kapasitas geser ultimit yg harus disediakan oleh segmen khusus, V_p (dimana V_p harus lebih besar dari gaya geser ultimit akibat gempa, V_u) dapat dihitung dengan Persamaan (1) [19].

$$V_p = (P_{y(BAT)}) \sin \alpha + \frac{4M_p}{L_s} \quad (1)$$

Sebagai model analitik dan beban gempa pada penelitian ini mengacu pada studi yang pernah dilakukan [4], [18] yaitu portal 4-tingkat 7-bentang dengan denah dan portal memanjang seperti pada Gambar 3. Pengaruh kekakuan portal interior dimodelkan sebagai kolom kantilever dengan hubungan sendi pada model keseluruhan sistem struktur. Semua bresing-X pada segmen daktail diganti BAT bentuk V-terbalik. Gempa dipikul portal eksterior memanjang, sedang portal interior memikul beban gravitasi. Untuk desain awal elemen strukturnya, digunakan SAP [20] dan Manual [21]. Gaya geser dasar: $V =$

ZICW/ R_w dengan $Z = 0,4$; $I = 1,0$; $C = 1,94$ berdasarkan periode getar, $T = 0,68$ detik dan tipe tanah S_3 ($S_{factor} = 1,2$). Berat mati total bangunan W dihitung berdasar beban merata 3,83 KPa. Portal didesain sebagai SMRF dengan $R_w = 12$ (atau $R = 8,5$, [22] karena diharapkan adanya perilaku histeretik yang daktail dan stabil. Distribusi beban statik ekuivalen segitiga (ragam-1) dan ragam-2 seperti pada Tabel 1.

a. Analisis Riwayat Waktu Nonlinier

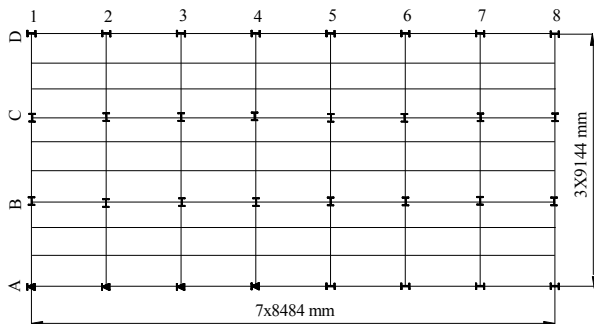
Metode analitik yang digunakan adalah Analisis Riwayat Waktu dengan beberapa rekaman gempa yang telah diskala terhadap spektra rencana tanah S3-UBC [22], dengan cara *menyamakan intensitasnya*. Metode yang digunakan sebagai berikut : Pertama, dengan rekaman gempa Miyagi-ken-oki 1978 NS PGA 0,4g karena gempa ini ternyata yang mengakibatkan respon maksimum seperti hasil studi terdahulu [4]. Kedua, validasi sistem yang diusulkan diuji dengan gempa El Centro 1940 NS, Northridge (Newhall 0 degree) dan Kobe NS. yang diskalakan.

Untuk menganalisis energi leleh yang didisipasi oleh BAT digunakan persamaan gerak sistem inelastik dalam bentuk persamaan keseimbangan energi (2) [23], [24]. Peredaman viskos menggunakan cara klasik dari Rayleigh, dengan koefisien redam 5%, karena cara ini relatif cocok dengan data-data eksperimen terdahulu [24], [25]. Dengan metode langkah demi langkah dari Newmark, persamaan gerak inelastik (2) diselesaikan untuk rekaman-rekaman gempa diatas dengan bantuan perangkat lunak DRAIN-2DX [25].

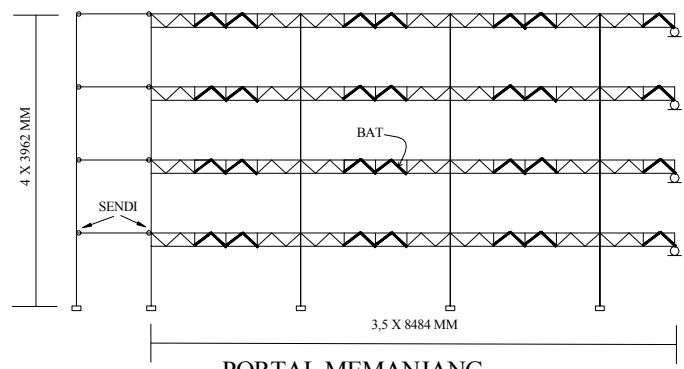
$$E_K(t) + E_D(t) + E_S(t) + E_Y(t) = E_I(t) \quad (2)$$

TABEL 1
DISTRIBUSI BEBAN LATERAL STATIK (RAGAM-1) DAN RAGAM-2
PADA TIAP LANTAI

Lantai	Gaya lateral statik (10 ³ N)	Ragam-2 (10 ³ N)
1	63,6	472,5
2	127,7	487,7
3	193,0	408,9
4	257,1	302,9
Jumlah	641,4	1672,0



DENAH



PORTAL MEMANJANG

Gambar 3. Denah dan model analitik portal memanjang A, D

Dimana

$$E_k(t) = \int_0^t m \dot{u}^2 dt$$

$$E_k(t) = \int_0^t m \ddot{u}(t) \dot{u} dt = \int_0^u m \dot{u}(t) du = \frac{m \dot{u}^2}{2} = \text{energi kinetik}$$

$$E_D(t) = \int_0^t f_D(t) \dot{u} dt = \int_0^t c \dot{u}^2(t) dt = \text{energi redam}$$

$$E_Y(t) = \int_0^t f_s(u, \dot{u}) \dot{u} dt - E_S(t) = \text{energi leleh}$$

$$E_I(t) = - \int_0^t m \ddot{u}_g(t) \dot{u} dt = \text{energi input}$$

Pemodelan batang diagonal dan vertikal rangka batang mengacu pada Gambar (4a), sedang untuk elemen BAT dimodelkan sebagai elemen yang mempunyai kapasitas leleh tekannya sama dengan tarik seperti pada Gambar (4b). Kolom dan batang-batang tepi atas dan bawah digunakan elemen balok-kolom seperti pada Gambar (4c) dengan koordinat titik A adalah (0,9 ; 0,2) [3]. Model material sikliniknya adalah *elastoplastik bilinier dengan penguatan regangan*, dengan simplikasi tanpa memperhitungkan efek Bauschinger.

b. Analisis Beban Dorong Nonlinier

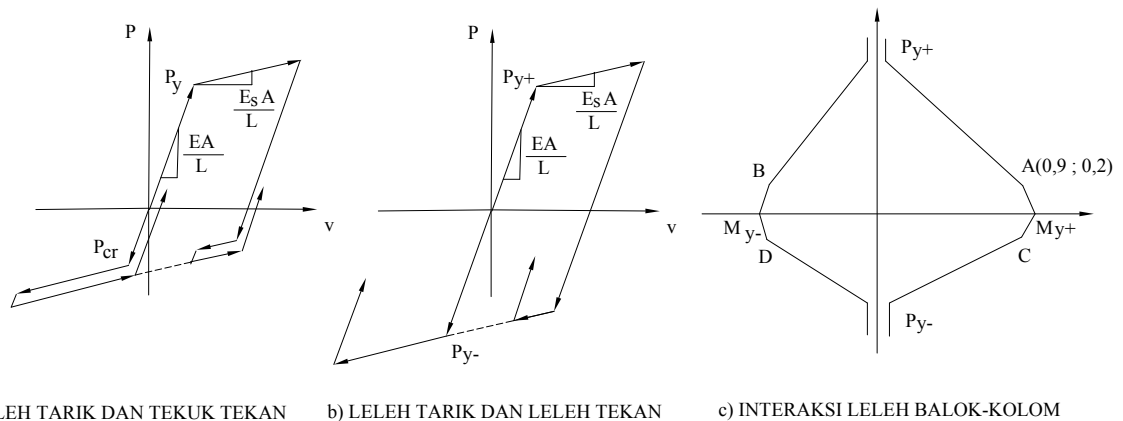
Analisis beban dorong statik pada rangka balok solid berpengaku BAT biasanya menggunakan metode *displa-*

cement control, dimana sebagai batasan langkah analisis adalah regangan maksimum BAT yang merupakan komponen dari simpangan lantainya. Hal ini bisa dilakukan karena anggapan lantai yang kaku tak berhingga atau struktur *shear building*. Regangan maksimum BAT ini diambil 2% seperti yang dilakukan oleh Clark *et al* [17].

Pada balok rangka batang cara ini tidak mungkin dilakukan mengingat ada displesemen nodal-nodalnya kearah vertikal. Cara yang paling mungkin untuk mengetahui batas langkah maksimum dari analisis adalah dengan *metode coba-coba* [19].

Evaluasi analisis beban dorong statik yang berhubungan dengan daktilitas dan reduksi gaya menggunakan kajian dari kurva respon struktur umum (Uang, 1991). Apabila suatu sistem diidealkan elastoplastik sempurna, maka besarnya daktilitas struktur dapat dihitung dari faktor reduksi beban, R_w atau R adalah :

$$\mu_y = \frac{3 R_w}{8} = \frac{3(1,4 R)}{8} \tag{3}$$



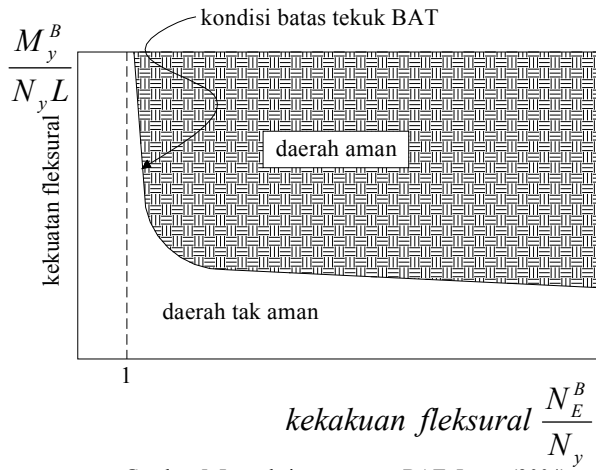
Gambar 4. Pemodelan elemen rangka batang daktil dengan DRAIN-2DX, Prakash dan Powel (1992)

c. Teori dan desain BAT

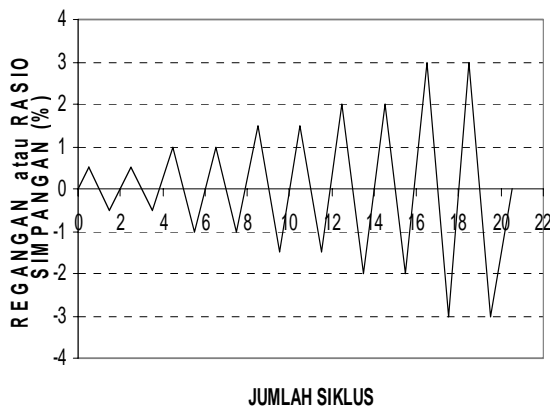
Teori BAT yang lebih mempresentasikan perilaku bresing sesungguhnya dimana memperhitungkan interaksi antara *bresing inti* dan pengekang lateral serta interaksi antara kekuatan dan kekakuan pengekang lateral, dikenalkan oleh Inoue [26]. Dalam desain BAT, untuk mencegah tekuk menyeluruh (*overall buckling*), momen batas elastik desain dari pengekang lateral, M_y^B , harus lebih besar dari momen yang terjadi di tengah bentang akibat gaya aksial atau memenuhi ketidaksamaan (4) ; dimana : a= defleksi awal selongsong anti tekuk di tengah bentang ; s = tinggi ruang antara bresing inti dan selongsong anti tekuk ; e=defleksi awal bresing inti ; N_y dan L adalah gaya aksial leleh dan panjang bresing inti,

$$\left(1 - \frac{N_y}{N_E^B} \right) \frac{M_y^B}{N_y L} > \frac{a + s + e}{L} \tag{4}$$

Kombinasi kekakuan dan kekuatan pengekang lateral harus terletak pada daerah aman, sehingga pada kejadian ini *bresing inti sebagai peredam tidak mengalami tekuk, tetapi berdeformasi plastik*. Jika dari ketidaksamaan (4) diatas : N_E^B (tekuk Euler pengekang) menyatakan parameter *kekakuan pengekang lateral* dan M_y^B , parameter untuk *kekuatan batas elastiknya*, maka dalam desain BAT demensinya harus terletak pada daerah aman dari diagram interaksi Gambar 5 [26].



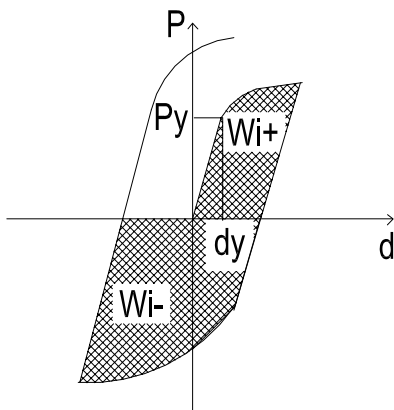
Gambar 5. Interaksi penampang BAT, Inoue (2004)



Gambar 6. Kurva riwayat pembebanan

d. Disipasi energi

Energi yang didisipasi suatu struktur inelastik ditentukan oleh faktor daktilitas kumulatif, η , yang didefinisikan sebagai perbandingan antara energi total (elastik ditambah plastik) terhadap energi elastik seperti pada Gambar 7 dan dapat dihitung dari Persamaan 5. Elemen BAT disyaratkan mempunyai $\eta > 100$ [14] sedang untuk sistem struktur histeretik $\eta > 20$ [23].



Gambar 7. Diagram P-d sistem inelastik

$$\eta = \frac{\sum W_{i+} + \sum W_{i-}}{P_y d_y} \tag{5}$$

Dimana:

P_y = gaya leleh pertama

d_y = displacemen leleh pertama

W = energi total

B. Kajian eksperimental

Tujuan kajian eksperimental adalah untuk mengetahui perilaku benda uji yang sesungguhnya terhadap beban siklik dan juga untuk memverifikasi kajian analitik. Riwayat pembebanan berupa perpindahan kuasi statik (*displacement control*) seperti pada Gambar 6. Pada BAT berupa perubahan panjang aksial dan pada SRBBAT berupa perbandingan simpangan lateral (δ) terhadap tinggi kolom (H). Perilaku inelastik yang diperoleh digambarkan dalam kurva histeretik.

a. Benda uji BAT

Pemilihan bentuk empat benda uji BAT berdasarkan studi dan persyaratan kekakuan (demensi) [14], dimana juga harus diperhatikan sistem penyambungannya dengan rangka batang utama. Dan mengingat dimensi-demensi penampang yang kecil yang diperoleh dari kajian analitik, sambungan las merupakan alternatif yang paling memungkinkan. Berdasarkan persyaratan dimensi $b_i/t_i < 7,5$ dan $b_p/t_p < 17,5$ dan Ketidaksamaan (5) hasil desain BAT seperti tercantum dalam Tabel 2.

Sebagai contoh, detail BAT-1 seperti terlihat pada Gambar 8. Pelat pengaku setebal 12mm pada pangkal BAT sebagai representasi dari pelat simpul jika BAT sudah terpasang pada rangka batang. Pelat dasar setebal 25 mm sebagai alat bantu untuk mengikat ke *loading frame*. Semua BAT menggunakan material baja A283 grade C yang sudah mengalami perlakuan *soft annealing* dengan tegangan leleh berkisar 265 MPa dan pengekang dari material setara baja A50.

b. Benda uji SRBBAT

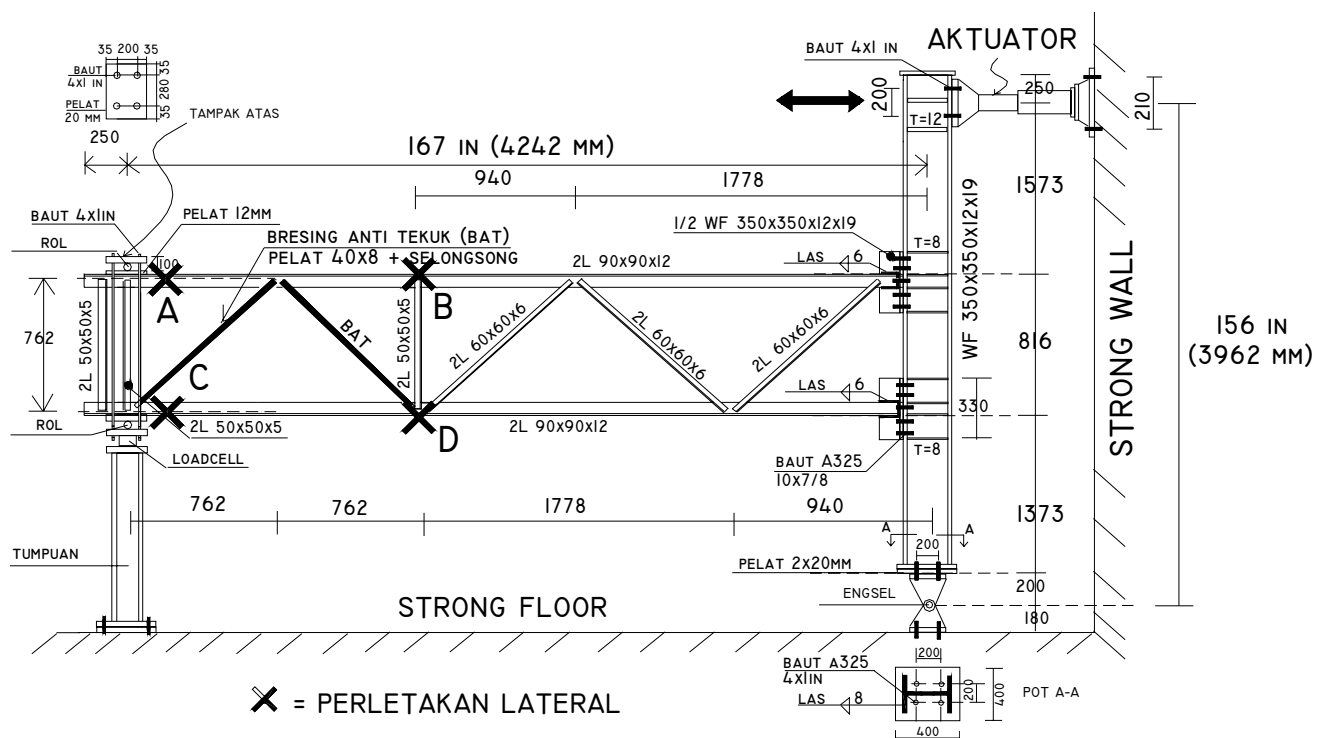
Dua model benda uji portal skala penuh dengan tinggi kolom 3962 mm dan setengah bentang balok 4242 mm (lihat skema Gambar 8), yang merupakan segmen dari model analitik Gambar 3. Penampang dan jenis baja sebaiknya yang tersedia dipasaran di Indonesia. Khusus untuk penampang siku kompak yang jarang terdapat di Indonesia diperoleh dengan cara mengurangi lebarnya. Profil dari baja setara Bj 52 dari hasil analisis selengkapnya dirangkum pada Tabel 3. Steling eksperimental SRBBAT (Rangka-1) dan BAT-2 terlihat pada Gambar 9.

TABEL 2
DIMENSI DAN PERSYARATAN BAT

Benda uji	Lebar bresing inti b_i (mm)	Tebal bresing inti t_i (mm)	Lebar pengekang b_p (mm)	Tebal pengekang t_p (mm)	Panjang BAT L (mm)
BAT-1	49,0	7,9	48,5	3,3	709
BAT-2	39,4	7,9	40,5	2,7	707
BAT-3	37,7	7,9	38,8	2,7	707
BAT-4	47,8	7,9	46,5	3,3	709

TABEL 3
PROFIL ELEMEN-ELEMEN SRBBAT

Jenis elemen	Rangka-1	Rangka-2
Kolom tingkat-1 dan 2	WF 400x400x15x15	WF 400x400x15x15
Kolom tingkat-3 dan 4	WF 350x350x10x17	WF 350x350x10x17
Batang tepi	LL 90x90x12	LL 90x90x12
Diagonal luar	LL 60x60x6	LL 60x60x6
Vertikal luar	LL 50x50x5	LL 50x50x5
Vertikal dalam	LL 50x50x5	LL 50x50x5
Inti BAT-A283	Pelat 50x8	Pelat 40x8
Selongsong BAT-A50	LL 50x50x3,3	LL 50x50x2,7



Gambar 9 . Benda uji Rangka-1 (SRBBAT) ; rangka dengan elemen BAT 50x8 mm²



BAT-2



SRBBAT (Rangka-1)

Gambar 10. Seting eksperimental benda uji

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kajian Analitik Riwayat Waktu Nonlinier

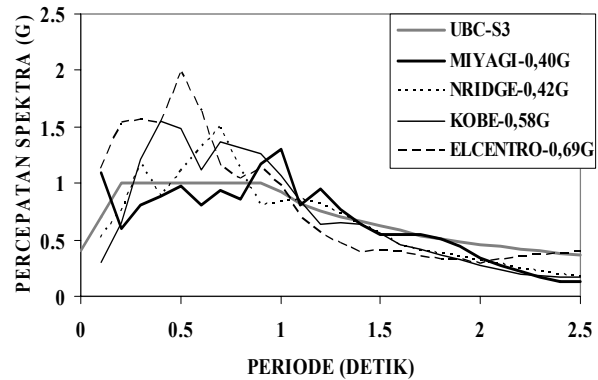
Model analitik dari Gambar 3 dibebani dengan empat gempa Miyagi-ken-oki 1978 NS PGA 0,4g, Elcentro 1940 NS PGA 0,69g, Northridge (Newhall 0 degree) PGA 0,42g dan Kobe NS PGA 0,58g, dengan skala seperti pada Gambar 11. Perbandingan rasio simpangan tingkatnya akibat gempa Miyagi dapat dilihat pada Gambar 12. Terlihat pada lantai satu sampai dengan tiga simpangan rangka berlemen BAT relatif sama dengan rangka daktail tipe bresing-X, hanya pada puncak atap pada sistem rangka usulan ini mengecil cukup signifikan, sistem usulan cocok untuk mengurangi *whiplast* (efek cambuk) pada gedung-gedung tinggi. Secara keseluruhan rasio simpangan rangka yang diusulkan lebih kecil dibandingkan sistem rangka daktail tipe bresing-X, Vierendeel, rangka solid, maupun rangka batang konvensional.

Untuk menguji validasi sistem struktur yang diteliti, rangka dikaji terhadap tiga rekaman gempa yang lain yang mempunyai kandungan frekuensi yang berbeda. Perbandingan riwayat simpangan lateral atap untuk keempat gempa seperti pada Gambar 13. Terlihat akibat gempa Miyagi respon paling besar karena *predominant periode* nya identik dengan periode fundamental struktur ($T_{struktur} = 1,0041$ detik)

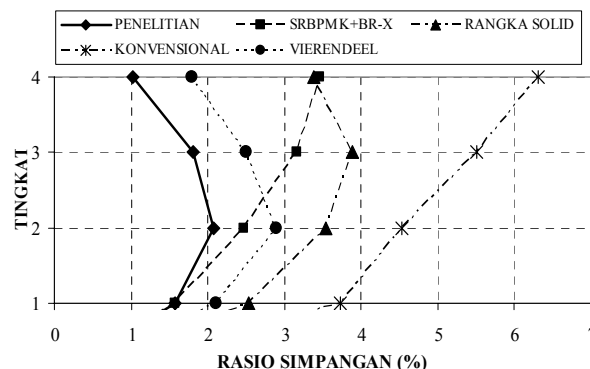
Pada Analisis Beban Dorong yang mengalami rotasi plastik pertama adalah kolom pada lantai dasarnya. Sistem struktur ini mempunyai periode fundamental lebih besar satu detik ($T = 1,0041$ detik), sehingga termasuk bangunan yang fleksibel. Untuk itu perlu analisis pada ragam getaran yang lebih besar (ATC 40, 1996). Kurva untuk beban statik (identik dengan ragam-1) dan ragam-2 dapat dilihat pada Gambar 14. Terlihat ada peningkatan kapasitas untuk ragam-2 dan juga daktilitasnya. Besarnya daktilitas kedua ragam ini meningkat dari 4,5 menjadi 5,43 dan 5,80. Dari kedua

daktilitas ini berdasarkan Persamaan (4) didapatkan $R_w = 14,5-15,5$ (bandingkan asumsi awal $R_w = 12$).

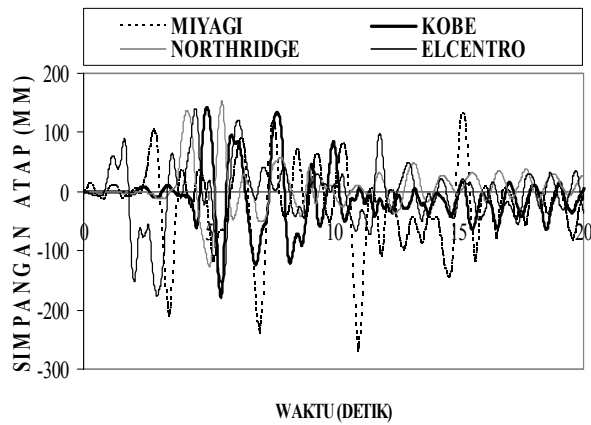
Aktivitas inelastik akibat gempa Miyagi banyak terjadi pada elemen-elemen BAT, merata pada seluruh tingkat bangunan dan pada ujung-ujung segmen daktail dengan terbentuknya sendi-sendi plastik. Sendi-sendi plastik ini hanya terjadi pada lantai satu sampai lantai tiga saja. Plastifikasi pada dasar kolom memang tidak bisa dihindari untuk menjamin adanya mekanisme leleh struktur, seperti terlihat pada Gambar 15.



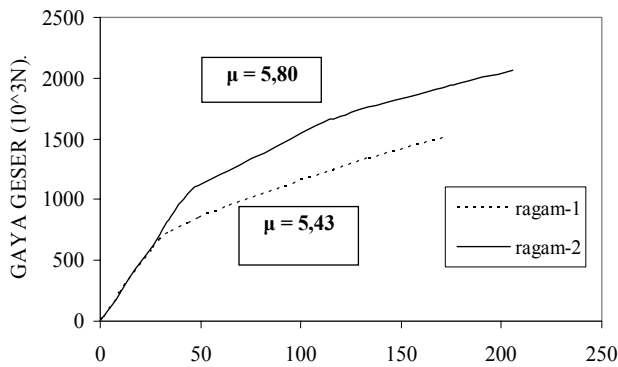
Gambar 11. Skala beberapa gempa terhadap tanah S3-UBC



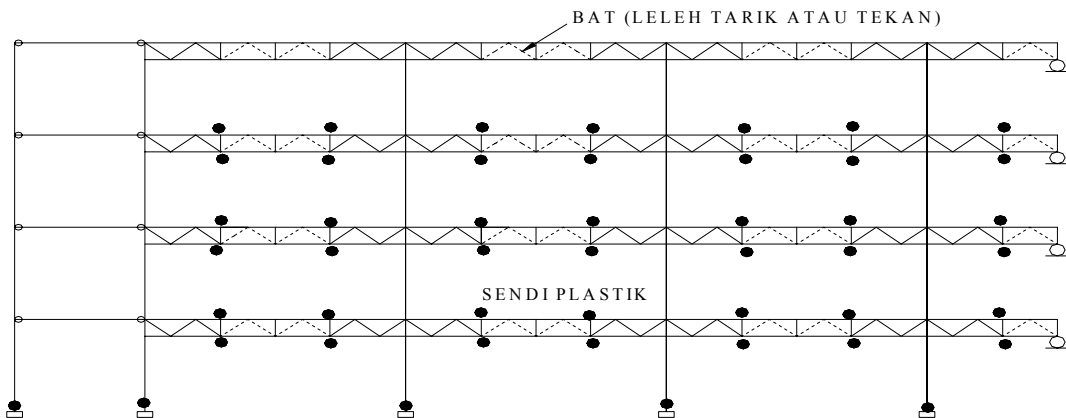
Gambar 12. Perbandingan rasio simpangan tingkat (gempa Miyagi)



Gambar 13. Simpangan lateral atap akibat beberapa rekaman gempa



Gambar 14. Kurva beban dorong statik SRBBAT



Gambar 15. Aktifitas inelastik pada akhir gerakan tanah (gempa Miyagi)

b. Disipasi energi

Kumulatif energi disipasi hasil eksperimental masing-masing BAT dan SRBBAT dihitung untuk menentukan faktor daktilitas kumulatif, η . Hasil ini dibandingkan dengan kajian analitik. Sebagai contoh grafik kumulatif energi disipasi untuk BAT-1 dan Rangka-1 (SRBBAT-1) seperti terlihat pada Gambar 18. Terlihat dari grafik ini nilai kumulatif energi disipasi hasil eksperimental selalu lebih kecil dari pada kajian analitik disebabkan pengabaian efek Bauschinger pada model analitik BAT. Dari hasil ekperimental yang relatif sama dengan analitik dapat disimpulkan perangkat lunak DRAIN-2DX akurat. Dengan Persamaan (5) besarnya η untuk BAT dan

B. Kajian eksperimental

a. BAT

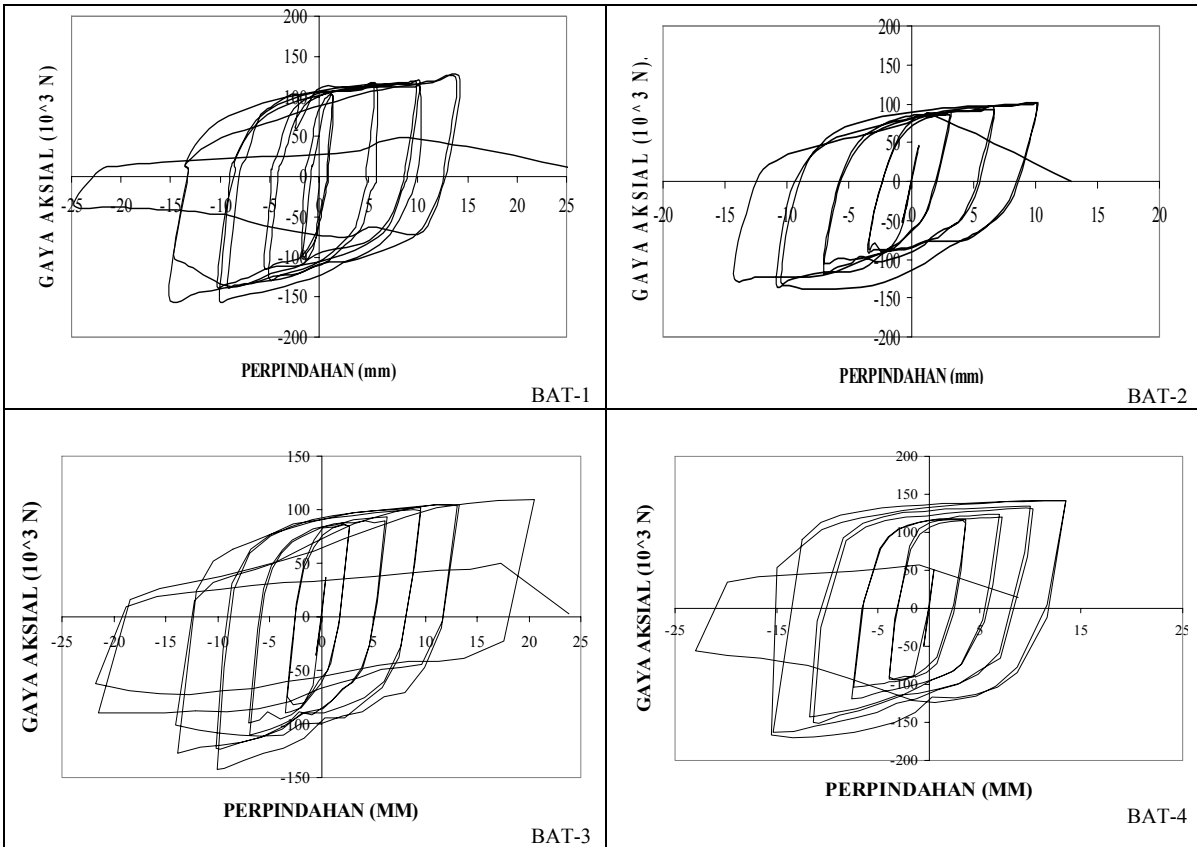
Kurva histeretik ke empat BAT terlihat seperti pada Gambar 16. Dari kurva ini, terlihat histeretik lebih stabil jika BAT dalam keadaan tertarik dari pada tertekan, disebabkan adanya perlawanan dari selongsong. Fenomena efek Bausschinger juga terlihat disini, dimana terjadi lengkungan yang besar pada saat benda uji tertekan. Umumnya pada siklus kedua saat regangan 2% (perpindahan 14,18 mm) mulai ada degradasi kekuatan pada BAT, disebabkan retak pada selongsongnya. Pada BAT-3 satu siklus penuh pada regangan 3% (perpindahan 21,27mm) masih bisa dicapai meskipun terjadi penurunan beban leleh yang signifikan. Secara umum, kecuali BAT-2, histeretik BAT masih stabil pada regangan 2%.

b. SRBBAT

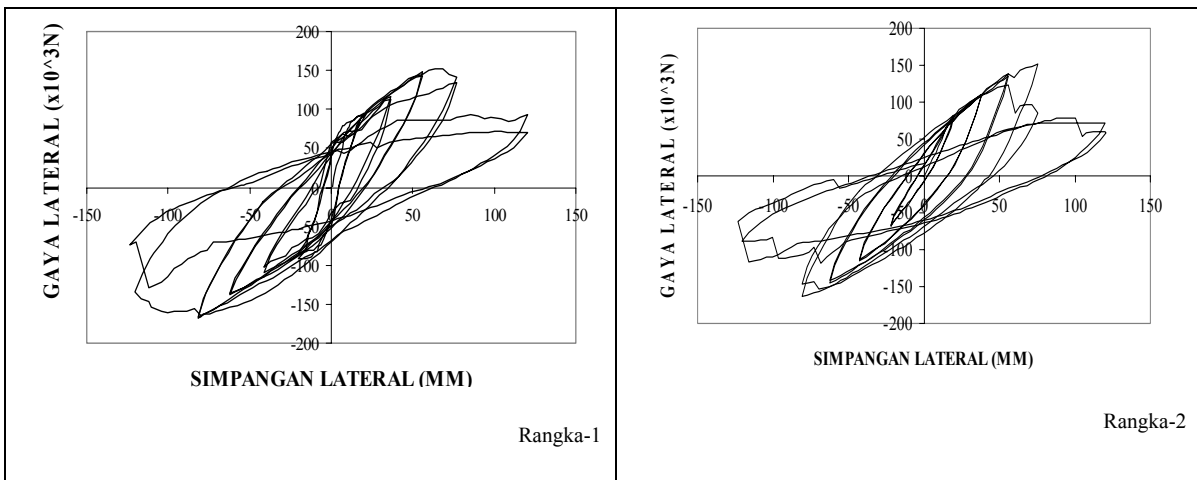
Kurva histeretik ke dua SRBBAT terlihat seperti pada Gambar 17. Dari kurva ini terlihat kekakuan rangka mengalami degradasi setiap peningkatan simpangan. Hal ini terjadi karena adanya plastifikasi yang terjadi secara bertahap, dimulai dari BAT, kemudian diikuti oleh ujung-ujung batang tepi pada segmen daktail. Setelah rangka mencapai $\delta/H=2\%$ (simpangan 79,24 mm), BAT sudah runtuh sama sekali, sehingga terjadi penurunan kekakuan yang cukup signifikan ketika beban δ/H diteruskan sampai 3% (simpangan 118,86 mm).

SRBBAT terlihat pada Tabel 4. Dari kurva histeretik ekperimental Gambar 17, dengan cara grafis dengan mengambil puncak-puncak setiap siklusnya, besarnya daktilitas SRBBAT didapat antara 3,87-6,72 [19].

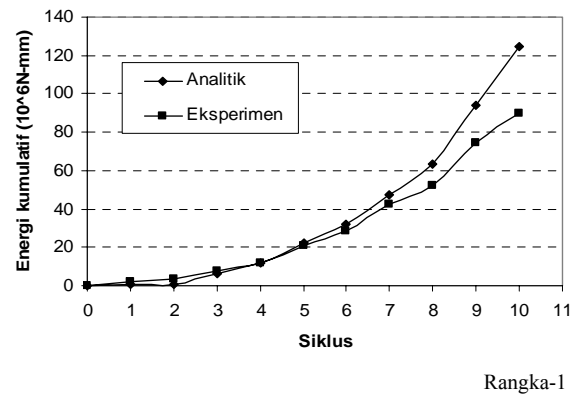
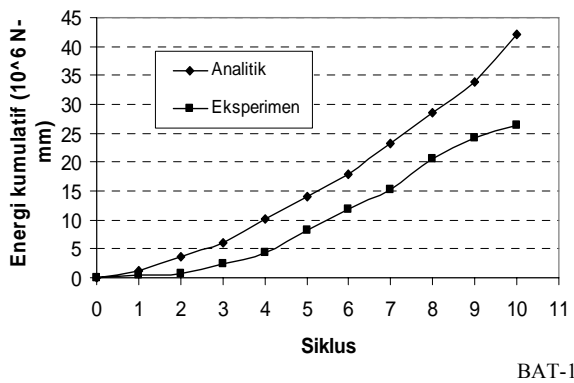
Berdasar Tabel 4 terlihat besarnya faktor daktilitas kumulatif rangka berelemen BAT ini sesuai dengan anjuran untuk sistem struktur histeretik, dimana nilai praktis $\eta > 20$. Untuk BAT, meskipun kumulatif energi disipasinya dihitung hanya sampai siklus 2%, semua BAT mempunyai $\eta > 100$. Nilai ini sudah cukup untuk elemen BAT yang merupakan bagian dari struktur elastoplastik.



Gambar 16. Kurva histeretik BAT



Gambar 17. Kurva histeretik SRBBAT



Gambar 18. Kumulatif energi disipasi

TABEL 4
FAKTOR DAKTILITAS KUMULATIF BAT DAN SRBBAT

Benda uji	Dimensi (mm)	Energi histeretik $\sum W_i$ (10^6 N-mm)	Faktor daktilitas kumulatif η
BAT-1	50x8	20,61	377
BAT-2	40x8	14,21	235
BAT-3	40x8	15,58	211
BAT-4	50x8	22,83	166
Rangka-1	dengan BAT 50x8	89,73	48
Rangka-2	dengan BAT 40x8	83,59	52

IV. KESIMPULAN

Dari hasil eksperimental dan kajian analitik yang telah dilakukan, ditinjau dari aspek-aspek disipasi energi, daktilitas dan simpangan, dihasilkan perilaku inelastik rangka berlemen BAT sebagai berikut :

1. Dari hasil eksperimental terbukti BAT dapat berfungsi dengan baik sampai rasio simpangan 2%, dapat mendisipasikan energi sampai terjadi plastifikasi aksial pada bresing intinya, sesuai fungsinya sebagai bresing yang tidak boleh menekuk seperti pada bresing tradisional. Fenomena ini dapat dilihat pada kurva histeretiknya yang masih stabil (meskipun ada degradasi-degradasi lokal kecil) pada rasio simpangan 2%. Kerusakan akibat tekuk pada selongsong baru terjadi pada rasio simpangan 3% dimana nilai ini sudah jauh melebihi kajian analitik akibat beberapa rekaman gempa yang hanya mencapai $\pm 2\%$. Aktifitas inelastik lain hanya terjadi pada ujung-ujung segmen daktail, elemen yang lain masih elastik, sesuai yang diharapkan.
2. Daktilitas SRBBAT hasil eksperimental dan analitik berkisar antara 3,87-6,72. Dari nilai daktilitas tersebut, faktor reduksi terhadap beban leleh pertama, R, secara analitik meningkat lebih dari 20,6 % (R menjadi 10,34) dibandingkan SRBPMK. Jadi sistem rangka usulan ini dapat didisain terhadap beban statik ekivalen lebih kecil, yang berarti suatu sistem struktur yang lebih ekonomis.
3. Ditinjau dari simpangannya, SRBBAT juga menunjukkan perilaku yang baik terhadap beberapa rekaman gempa, dimana simpangan lateral ataupun masih bersifat asimtotik sampai akhir berlangsungnya beban gempa dan nilainya menunjukkan pengurangan yang signifikan terhadap rangka batang bresing-X. Rasio simpangan sistem usulan ini terhadap SRBPMK, rangka solid dan rangka batang konvensional menunjukkan pengurangan yang signifikan terutama pada atapnya. Ini hal yang menguntungkan untuk struktur gedung yang tinggi untuk mengurangi efek cambukan. Pengurangan simpangan bisa terjadi karena adanya plastifikasi yang lebih awal pada BAT nya disebabkan penggunaan baja dengan tegangan leleh yang rendah pada bresing intinya.
4. SRBBAT usulan ini termasuk sistem struktur histeretik dimana faktor daktilitas kumulatifnya lebih besar 20. Seperti pada sistem struktur inelastik pada

umumnya, kekakuan sistem usulan ini akan berkurang akibat adanya aktifitas inelastik elemen-elemennya, sehingga periode inelastiknya akan bertambah besar. Jadi untuk mendapatkan percepatan spektra atau gaya geser dasar seismik yang lebih kecil, SRBBAT usulan ini hanya cocok untuk gempa-gempa tipe Elcentro dimana respon spektranya bersifat menurun (*descending*) setelah puncak.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [2] *Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung Menggunakan Metoda LRFD*. Laboratorium Mekanika Struktur, Pusat Penelitian Antar Universitas, Bidang Ilmu Rekayasa, ITB, Bandung, 139-141. 2000.
- [3] Goel, S.C., dan Itani, A.M. "Seismic Behavior of Open Web Truss Moment Frames", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120(6), 1763-1780. 1994.
- [4] Basha, H.S., dan Goel, S.C. "Seismic-Resistant Truss-Moment Frames with Vierendeel Segment", *The 11th World Conference on Earthquake Engineering*, paper no. 487. 1996.
- [5] Goel, S.C., dan Itani, A.M., "Seismic-Resistant Special Truss-Moment Frames", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120(6), 1781-1797. 1994.
- [6] *AISC. Seismic Provisions for Structural Steel Building*, American Institute of Steel Construction, Chicago, 16-18. 1997. 2005.
- [7] *NEHRP. Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, BSSC, Washington, D.C., 43-75. 2000.
- [8] Kurniawan, D., "Perencanaan dan Evaluasi Daktilitas Gedung Baja Special Truss Moment Frames dengan Sistem Segmen Vierendeel", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, ITS Surabaya. 2004.
- [9] Firmansyah, K., "Perencanaan dan Evaluasi Daktilitas Gedung Baja Special Truss Moment Frames dengan Sistem Segmen Bresing-X Menggunakan Profil Pelat", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, ITS Surabaya. 2004.
- [10] Sulistyio, I., "Perencanaan dan Evaluasi Daktilitas Gedung Baja Special Truss Moment Frames dengan Sistem Segmen Bresing-X Menggunakan Profil Siku, Vierendeel", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, ITS Surabaya. 2004.
- [11] Karuniawan, R. "Studi Daktilitas Gedung Baja Tingkat Tinggi Dengan Sistem Struktur Special Truss Moment Frames Tipe Bresing-X Menggunakan Profil Siku Tunggal", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, ITS Surabaya. 2005.
- [12] Eko, A.K., "Studi Daktilitas Gedung Baja Tingkat Tinggi Dengan Sistem Struktur Special Truss Moment Frames Tipe Bresing-X Menggunakan Profil Pelat Persegi", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, ITS Surabaya. 2005.
- [13] Kuswanto, Y.D., "Studi Daktilitas Gedung Baja Tingkat Tinggi Dengan Sistem Struktur Special Truss Moment Frames Tipe Vierendeel", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, ITS Surabaya. 2005.
- [14] Kamura, H., Katayama, T., Shimokawa, H., dan Okamoto, H. "Mechanical Property of Low Yield Strength Steel and Energy Dissipation Characteristics of Hysteretic Dampers with Low Yield Steel", *US-Joint Meeting for Advanced Steel Structures*, 1-4. 2000.
- [15] Shimokawa, H. dan Kamura, "Hysteretic Behavior of Flat-Bar Brace Stiffened by Square Steel Tube", *The 6th International Conference on Steel & Space Structures, Singapore*, 1-4. 1999.
- [16] Tsai, K.C., Lai, J.W., Hwang, Y.C., Lin, S.L., dan Weng, CH. "Research and Application of Double-Core Buckling Restrained Braces in Taiwan", *The 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada*, paper no. 2179. 2004.
- [17] Kasai, K., Fu, Y., dan Watanabe, A. "Passive Control System for Seismic Damage Mitigation", *Journal of Structural Engineering, ASCE, 124(5)*, 501-512. 1998.
- [18] Kurniawan, D., "Perencanaan dan Evaluasi Daktilitas Gedung Baja Special Truss Moment Frames dengan Sistem Segmen Vierendeel", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, ITS Surabaya. 2004.

- [19] Sugihardjo, H., dan Merati, W. "Concept and Design of Ductile Plane Truss and Its Inelastic Behavior Due to Post Elcentro Earthquake", *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Perencanaan ke II, "The Integration of Civil Engineering Scientist Supporting the Improvement of National Economy"*, UPN Veteran Jatim, Surabaya, A01-A06. 2004
- [20] Sugihardjo, H., "Perilaku Inelastik Balok Rangka Batang Daktail Berelemen Bresing Anti Tekuk Sebagai Komponen Gedung Bertingkat", Disertasi, Sekolah Pascasarjana, ITB, Bandung. 2006.
- [21] SAP. *Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures*, Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA. 2000.
- [22] *Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design (LRFD)*. American Institute of Steel Construction, Chicago, 5-9. 1997.
- [23] *ICBO. Uniform Building Code. International Conference of Building Officials*, Whittier, Calif. 1988,1994, 1997.
- [24] Akiyama, H., *Earthquake-Resistant Limit-State Design for Building*, University of Tokyo Press, 11-30. 1985.
- [25] Chopra, A.K., *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, 2nd ed.*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 265-283. 2001.
- [26] Prakash, V., dan Powell, G.H. *DRAIN-2DX*, University of California, Berkeley, California. 1992.
- [27] Inoue, K. "Hysteresis-Type Vibrations Dampers. Design of Hysteresis Type Dampers, Steel Construction Today and Tomorrow", *The Japan Iron and Steel Federation, No.7, June, 4-6*. 2004.