

Perancangan Struktur Sistem Rangka Bresing Tahan Tekuk Studi Kasus pada Bangunan Esensial

Gelasius Galvindy

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
E-mail: gelasiusgalvindy@gmail.com

Erwin Lim*

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Abstrak

Perancangan struktur dengan menggunakan Sistem Rangka Bresing Tahan Tekuk (SRBTT) belum lazim ditemukan di Indonesia, namun jenis struktur ini dapat banyak ditemukan di negara lainnya seperti Amerika Serikat, Jepang, dan Taiwan. Jenis struktur ini memiliki beberapa kelebihan dibanding jenis struktur lainnya, sebagai contoh apabila bresing mengalami kerusakan akibat beban gempa, elemen bresing dapat diganti dengan yang baru sehingga tidak memerlukan renovasi struktur secara keseluruhan. Selain itu, sistem struktur ini juga menghasilkan simpangan struktur yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan sistem struktur lainnya, sehingga kerugian akibat kerusakan dapat berkurang. Makalah ini membahas contoh perancangan suatu bangunan esensial (kategori risiko IV) hipotetikal setinggi tiga lantai yang terletak di zona gempa tinggi dengan menggunakan Sistem Rangka Bresing Tahan Tekuk (SRBTT). Konsep utama dari perancangan sistem tersebut adalah kontrol terhadap hirarki keruntuhan, dimana elemen struktur lainnya tidak boleh mengalami leleh sebelum bresing tahan tekuk mengalami leleh. Berdasarkan analisa pushover, didapatkan bahwa struktur yang dirancang berada dalam tahap damage control dan masih di bawah batasan target kinerja life safety, menandakan tingkat kerusakan yang lebih rendah dan masih dapat diperbaiki setelah gempa besar terjadi.

Kata-kata Kunci: Perancangan struktur; beban gempa; sistem rangka bresing tahan tekuk; analisa mekanisme plastik

Abstract

Structure designed with the Buckling-Restrained Bracing Frame (BRBF) system is not widely adopted in Indonesia, yet it is enjoying its popularity in other countries such as the United States, Japan, and Taiwan. This type of structure has several advantages compared to others, such as the ability to be replaced once it has yielded following a large earthquake so that retrofitting for the whole structure is unnecessary, as well as smaller structure drift compared to other structure systems, which may reduce cost due to building damage. This paper discusses design example for a hypothetical essential 3-storey building (risk category IV) located in a high seismic zone using the BRBF system. The main concept of the design is to control the failure hierarchy, in which other structure elements may not yield before the bracing yields. Through the pushover analysis, it is further verified that the structure being designed falls into the life safety category, thus denoting its capability to reduce structure damage and can be retrofitted after large earthquakes. Pushover analysis showed that the attained drift ratio is still categorized as damage control and satisfy the allowable targeted level for risk category IV building, i.e. life safety. This result implies that the level of damage is still within repairable limit.

Keywords: Structure design; earthquake; buckling-restrained bracing frame; plastic mechanism analysis

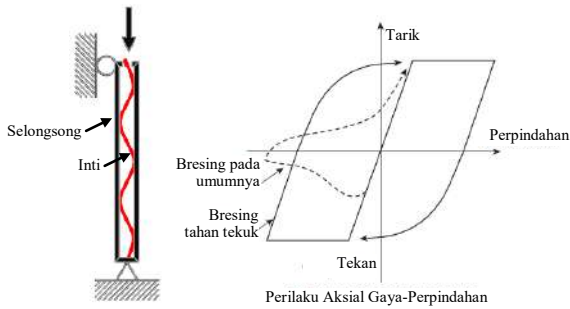
1. Pendahuluan

Bresing tahan tekuk (selanjutnya disingkat BTT) dapat dijelaskan melalui dua definisi: (1) Secara definisi mekanis, BTT merupakan sistem yang mampu memecah tegangan dan tekuk. Sebagaimana dapat dilihat pada **Gambar 1** kiri, tegangan akan ditahan oleh inti baja (ditandai dengan warna merah), sedangkan tekuk akan ditahan oleh selongsong (ditandai dengan kotak berwarna hitam); dan (2) Secara definisi performa, BTT merupakan sistem yang mempunyai

kurva histeretik yang seimbang pada bagian tekan dan tariknya. Kurva tersebut dapat dilihat pada **Gambar 1** kanan. BTT sendiri mempunyai bagian-bagian seperti terlihat pada **Gambar 2**, dari bagian paling dalam sampai paling luar, dengan penjelasan sebagai berikut:

1. Inti / Core: Inti dari BTT berfungsi untuk menahan tegangan tarik dan tekan yang terjadi;
2. Bond Interrupter: Disebut juga sebagai perusak lekatan, berfungsi sehingga transfer gaya geser antara mortar dengan inti dari SRBTT dapat

*Penulis Korespondensi: erwinlim@si.itb.ac.id



Gambar 1. Definisi mekanis BTT (kiri) dan definisi performa BTT (kanan). (Sabelli, 2018)



Gambar 2. Komponen bresing tahan tekuk (ACME Bracing Co.)

tereliminasi. Eliminasi transfer gaya geser bertujuan untuk mencegah tegangan ditahan oleh selongsong;

3. Mortar: Mortar berfungsi untuk mengisi selongsong sehingga mempunyai mekanisme tahan tekuk;
4. Selongsong / Sleeve: Selongsong berfungsi untuk melingkupi inti, bond interrupter, serta mortar sehingga menjadi suatu kesatuan utuh.

Sistem Rangka Bresing Tahan Tekuk memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dibandingkan dengan sistem struktur lainnya. Jika dibandingkan dengan rangka bresing lainnya seperti Sistem Rangka Bresing Eksentrik (SRBE) maupun Sistem Rangka Bresing Konsentrik (SRBK), BTT memiliki perilaku tahan dan tarik yang hampir identik. dapat berfungsi sebagai disipator energi yang lebih stabil jika dibandingkan dengan bresing lainnya. Apabila SRBTT dibandingkan dengan Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM), kekakuan elastik SRBTT lebih tinggi sehingga mudah dalam memenuhi batasan goyangan struktur. Selain itu, dalam hal peranan BTT sebagai “sekring” ketika terkena gempa besar, BTT yang rusak dapat diganti dengan cepat. Hal ini berbeda untuk SRPM, dimana sendi plastis diharapkan terbentuk pada kedua ujung balok. Penggantian balok yang rusak akan sangat susah dilakukan, sehingga retrofit bangunan secara keseluruhan mungkin perlu dilakukan. Hal yang sama juga terjadi pada SRBE dan SRBK, dimana bresing akan tertekuk dan merubah konfigurasi struktur sehingga penggantian bresing tidak mudah dilakukan.

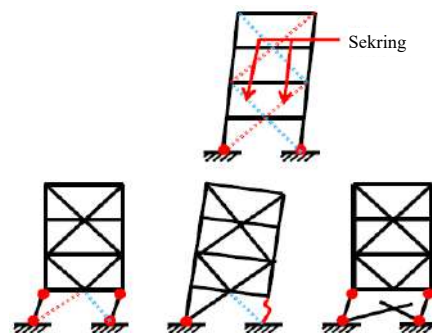
Penggunaan BTT di Indonesia masih sangat terbatas walaupun sudah pernah dilakukan kajian eksperimental (Andarini dan Moestopo, 2013). Makalah ini hendak melengkapi pembahasan contoh aplikasi perancangan

SRBTT pada proyek suatu bangunan penting (kategori risiko IV). Perancangan ini dilengkapi dengan analisis beban dorong untuk mendapatkan titik kinerja struktur sebagai langkah verifikasi asumsi-asumsi yang dilakukan saat proses perancangan. Sebagai studi kasus, digunakan suatu struktur empat lantai dengan ketinggian 17 meter. Pemodelan dan analisis struktur menggunakan software ETABS, sedangkan desain BTT akan menggunakan bantuan software CoreBrace. Struktur dengan BTT ini diharapkan dapat menjadi alternatif sistem struktur yang dapat meningkatkan kinerja bangunan selain penggunaan alat disipasi energi gempa, seperti metallic damper (Murdiansyah dan Setio, 2014) dan isolator seismik (Reza dan Setio, 2021).

2. Konsep Desain SRBTT

Perilaku yang diinginkan pada SRBTT ialah lelehnya BTT, sedangkan perilaku yang dihindari ialah sendi lentur pada kolom, tekuk balok ataupun kolom, serta kegagalan sambungan, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3. Karena bresing diinginkan leleh, maka hal ini juga dikenal sebagai konsep sekring, dimana ukuran bresing akan dipilih sehingga memberikan kekuatan yang cukup serta dapat mengontrol goyangan yang terjadi. Setelah ukuran bresing dipilih sesuai dengan ketentuan tersebut, maka akan dilakukan desain kapasitas untuk elemen struktur lainnya. Desain kapasitas ialah konsep desain dimana kapasitas maksimum dari sekring akan digunakan sebagai beban pada balok dan kolom, dan kemudian memilih dimensi dari balok dan kolom. Hal ini dilakukan untuk mencegah perilaku yang tidak diinginkan, seperti tekuk balok atau kolom .

Pada umumnya, BTT akan memiliki kuat tekan yang lebih besar jika dibandingkan dengan kuat tariknya. Kuat tarik pada bresing SRBTT akan dikalikan dengan faktor kuat lebih akibat strain-hardening dengan rentang $1,3 \leq \omega \leq 1,5$ sedangkan kuat tekan pada bresing SRBTT akan dikalikan lagi dengan faktor kuat lebih kompresi dengan rentang $1,1 \leq \beta \leq 1,2$. Kedua nilai tersebut diilustrasikan pada Gambar 4 dan umumnya bergantung pada pabrik pembuat bresing serta rasio panjang leleh (rasio antara panjang daerah leleh pada inti baja BTT terhadap panjang keseluruhan bresing diukur dari titik kerja). Pada tulisan ini, digunakan nilai tengah, yakni $\beta = 1,15$ dan $\omega = 1,4$.

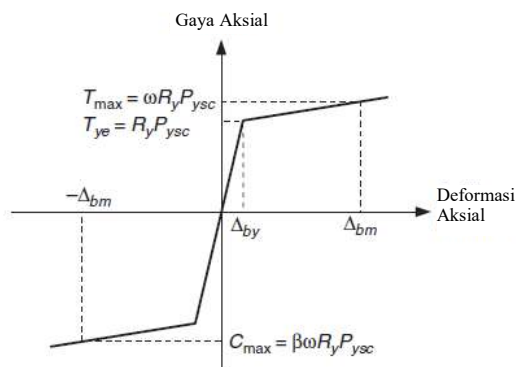


Gambar 3. Perilaku SRBTT yang diinginkan (atas) dan dihindari (bawah). (Uang, 2017)

Perancangan SRBTT secara garis besar akan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pilih ukuran BTT yang akan digunakan, kemudian hitung kapasitas maksimum dari BTT yang dipilih. Sebagai acuan, penampang awal BTT dapat dipilih secara sembarang untuk kemudian dilakukan optimasi berdasarkan rasio kebutuhan dan kapasitas dari bresing tersebut (demand-capacity ratio) berdasarkan hasil analisa di tahap 3;
2. Setelah tarik dan tekan maksimum diperoleh, nilai tersebut akan diproyeksikan menjadi komponen vertikal dan horizontal. Kemudian, nilai tersebut akan diaplikasikan pada balok dan kolom, untuk dilakukan perhitungan kebutuhan kapasitas balok dan kolom. Prinsip desain kapasitas dilakukan agar balok dan kolom tidak gagal lebih dahulu daripada elemen BTT;
3. Pilih dimensi balok dan kolom. Kemudian, lakukan analisa apakah dimensi BTT, balok, dan kolom yang dipilih telah memenuhi kebutuhan kekuatan dan kekakuan struktur. Jika tidak memenuhi, kembali ke tahap pertama;
4. Jika telah memenuhi, maka perancangan dapat dilanjutkan pada tahap detailing sambungan struktur.

Sebagai catatan, SRBTT pada umumnya dikombinasikan dengan jenis sistem struktur lainnya seperti struktur rangka penahan momen (SRPM). Prosedur diatas hanya berlaku untuk pemilihan ukuran bresing, kolom, serta balok pada SRBTT, sedangkan pemilihan ukuran elemen struktur untuk sistem struktur lainnya tidak perlu



Gambar 4. Kurva histeresis bresing tahan tekuk. (Uang, 2017).

disamakan, dimana umumnya akan bergantung terhadap beban gravitasi yang bekerja.

Dalam pemodelan, hal penting yang harus dipertimbangkan pada perancangan SRBTT ialah kekakuan elastik dari BTT. BTT merupakan elemen nonprismatik yang memiliki tiga daerah utama yang harus dipertimbangkan untuk menentukan secara akurat kekakuannya, yakni daerah inti leleh, daerah transisi, serta daerah sambungan. Model analisis yang dibuat harus memperhitungkan kekakuan aktual BTT. Umumnya, akan digunakan faktor modifikasi kekakuan terhadap area dari BTT. Setelah dikalikan, kekakuan BTT pada model akan sama dengan kekakuan aktual elemen nonprismatik BTT. Faktor kekakuan akan bergantung pada geometri dari BTT, panjang daerah leleh, sambungan ujung, serta manufaktur.

3. Perancangan Struktur

3.1 Data dan pembebanan struktur

Struktur yang akan ditinjau merupakan sebuah bangunan ibadah hipotetikal 4 tingkat, dengan tinggi tingkat 1 hingga tingkat 2 adalah 5 m dan tinggi tingkat di atasnya (tingkat 2 s.d. tingkat 4) adalah tipikal 4,5 m, serta tinggi kanopi 3 m. Bentang total dalam arah x dan arah y, masing-masing adalah 64 meter dan 72 meter, dengan jarak antar kolom bervariasi dengan minimal 8 meter, diilustrasikan pada Gambar 5.

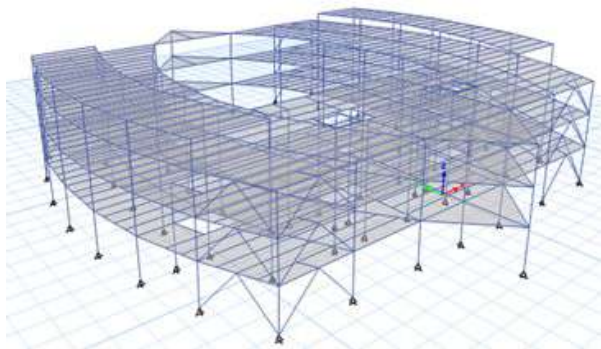
Pembebanan gravitasi mencakup berat sendiri, berat mati tambahan berupa beban MEP, fasad, railing, rangka kaca sesuai fungsi arsitektural. Sedangkan beban hidup diasumsikan sebesar 4,79 kN/m² untuk semua ruangan. Untuk pembebanan gempa, diasumsikan bangunan terletak di peta gempa dengan nilai percepatan spektrum respons 0,2 detik dan 1 detik, masing-masing S_s = 0,6 g dan S₁ = 0,25 g dan terletak di tanah SE.

3.2 Analisa dengan mekanisme plastis

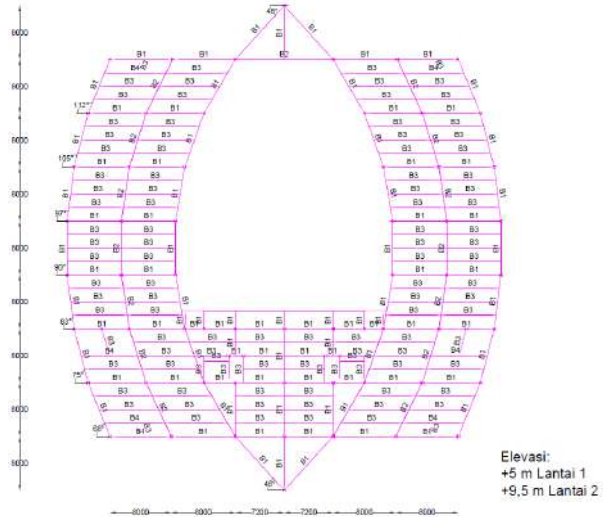
Sub-bab ini akan membahas hasil iterasi terakhir dari analisa mekanisme plastis, dimana BTT dianggap mencapai kapasitas batasnya dan elemen lainnya didesain dengan prinsip desain kapasitas (Bruneau, et al. 2011, Kersting et al. 2015, dan Surendran et al. 2017). Iterasi dimensi elemen struktur terakhir dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi pemilihan penampang

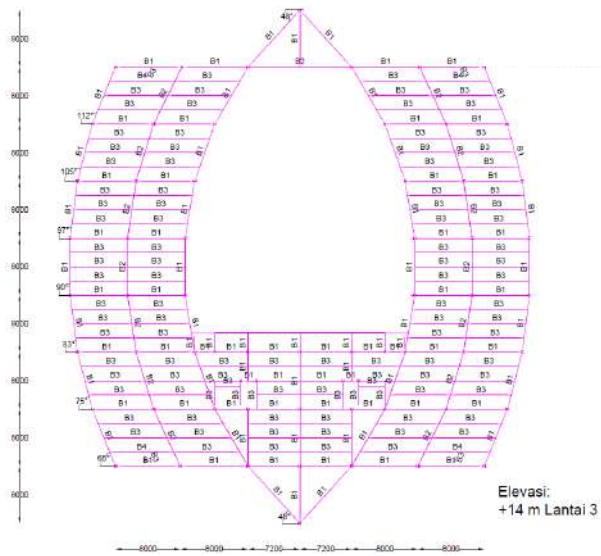
Elemen Struktur	Penampang	Keterangan
BTT bentang memanjang, tingkat 1	CoreBrace 7.5	A = 48,4 cm ² ; F _y = 242 MPa
BTT bentang memanjang, tingkat 2	CoreBrace 6.5	A = 41,9 cm ² ; F _y = 242 MPa
BTT bentang memanjang, tingkat 3	CoreBrace 5.5	A = 35,5 cm ² ; F _y = 242 MPa
BTT bentang memendek, tingkat 1	CoreBrace 4.5	A = 29,0 cm ² ; F _y = 242 MPa
BTT bentang memendek, tingkat 1	CoreBrace 3.5	A = 22,5 cm ² ; F _y = 242 MPa
BTT bentang memendek, tingkat 1	CoreBrace 2.5	A = 16,1 cm ² ; F _y = 242 MPa
Balok	IWF 450x200x9x14	F _y = 345 MPa
Kolom	H 350x350x12x19	F _y = 345 MPa



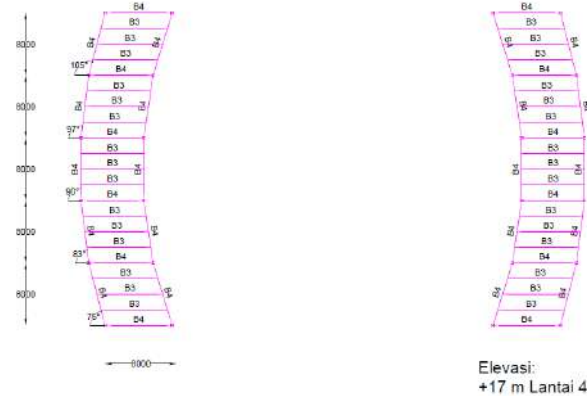
(a) Tampak 3D struktur



(b) Denah lantai 1 (el. + 5 m) dan 2 struktur (el. + 9.5 m)



(c) Denah lantai 3 struktur (el. + 14 m)



(d) Denah lantai 4 struktur (el. + 17 m)

Gambar 5. Ilustrasi pemodelan serta denah struktur

Karena dalam perancangan tidak dilakukan pengujian BTT, maka faktor penyesuaian kondisi strain hardening untuk tekan dan tarik, masing-masing diambil nilai tengah dari rentang empiris sebelumnya yakni $\beta = 1,15$ dan $\omega = 1,4$. Kemudian, nilai R_y yakni rasio antara kuat leleh perkiraan rata-rata F_{yc} dengan kuat leleh minimum F_y , untuk BTT diambil $R_y = 1$. Contoh perhitungan akan menggunakan penampang BTT terbesar, yakni CoreBrace 7.5. Pertama, akan dihitung kuat tekan (C_{max}) dan tarik maksimum (T_{max}) dari penampang:

$$T_{max} = \omega R_y P_{sc} = \omega R_y f_y A = 1,4 \times 1 \times 262 \times 48,4 = 1775,31 \text{ kN} \quad (1)$$

$$C_{max} = \beta T_{max} = 1,15 \times 1775,31 = 2041,6 \text{ kN} \quad (2)$$

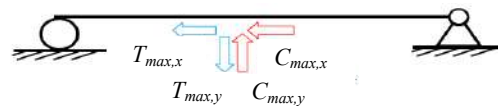
Kemudian, akan dihitung komponen vertikal dan horizontal dari nilai tersebut. Dengan bentang horizontal memiliki panjang $l_x = 8,6$ m serta bentang vertikal memiliki tinggi $l_y = 5$ m, maka:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{l_y}{l_x / 2} \right) = 0,858 \quad (3)$$

$$T_{max,x} = \cos(\theta) T_{max} = \cos(0,858) \times 1775,31 = 1159,88 \text{ kN} \quad (4)$$

$$T_{max,y} = \sin(\theta) T_{max} = \sin(0,858) \times 1775,31 = 1344,02 \text{ kN} \quad (5)$$

dengan prinsip yang sama, $C_{max,x}$ dan $C_{max,y}$ adalah 1333,87 kN dan 1545,62 kN.



Gambar 6. Keseimbangan gaya pada balok.

Dengan penggunaan konfigurasi V terbalik, maka gaya yang muncul pada balok dapat dilihat pada Gambar 6.

Oleh itu, maka gaya geser (V_{ecl}), momen (M_{ecl}), dan gaya aksial (P_{ecl}) yang muncul pada balok akibat kapasitas batas (capacity limited) BTT ialah:

$$V_{ecl} = -\frac{C_{max,y} - T_{max,y}}{2} = -\frac{1545,62 - 1344,02}{2} = -100,8 \text{ kN} \quad (6)$$

$$M_{ecl} = \frac{V_{ecl} l_x}{2} = \frac{(-100,95)(8,6)}{2} = -434,08 \text{ kNm} \quad (7)$$

$$P_{ecl} = C_{max,x} + T_{max,x} = 2493,75 \text{ kN} \quad (8)$$

Gaya dalam akibat aksi BTT di atas perlu dikombinasikan dengan beban mati dan beban hidup untuk mendapatkan gaya dalam ultimit. Dalam SNI 1726:2019 Ps. 7.4.3.1, kombinasi beban yang dapat digunakan adalah kombinasi beban dengan E_{cl} mensubstitusi E_{mh} , yakni (1) $0,78 D + E_{cl}$; serta (2)

Tabel 2. Rekapitulasi perhitungan beban balok

	V (kN)	M (kN.m)	P (kN)
Kapasitas BTT (E_{cl})	-100,95	-434,09	2493,75
Beban mati (D)	-55,32	-44,89	57,12
Beban hidup (L)	-51,08	-40,59	49,74
0,78 D + E_{cl}	-144,10	-469,10	2538,30
1,32 D + L + E_{cl}	-225,05	-533,93	2618,88

1,32 D + L + E_{cl} . Tabulasi perhitungan dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Berdasarkan gaya dalam ultimit untuk balok pada Tabel 2, maka dapat dihitung bahwa profil balok IWF 450x200x9x14 yang dipilih mampu menahan gaya geser, momen, dan aksial yang terjadi. Perhitungan untuk BTT ukuran lainnya dapat dilakukan dengan cara yang sama.

Selanjutnya untuk perancangan kolom, akan dihitung beban yang bekerja akibat kapasitas maksimum dari bresing. Ilustrasi keseimbangan gaya dapat dilihat pada **Gambar 7** untuk kolom tertekan, serta **Gambar 8** untuk kolom tertarik.

Untuk tingkat 3, akan bergantung pada besaran gaya geser balok yang bekerja, yakni:

$$E_{cl,T} = 74,04 \text{ kN} \quad (9)$$

$$E_{cl,C} = -74,04 \text{ kN} \quad (10)$$

Untuk tingkat 2:

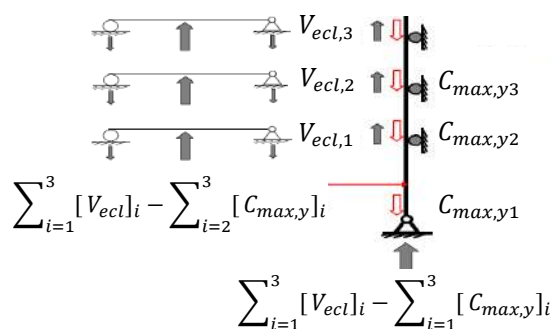
$$E_{cl,T} = 74,04 + T_{max,y} + V_{ecl} = 74,04 + 957,47 + 87,39 = 1115,91 \text{ kN} \quad (11)$$

$$E_{cl,C} = -74,04 + C_{max,y} + V_{ecl} = -74,04 + 1097,64 - 87,39 = 939,1 \text{ kN} \quad (12)$$

Untuk tingkat 1:

$$E_{cl,T} = 1115,91 + T_{max,y} + V_{ecl} = 1115,91 + 1126,54 + 100,95 = 2343,4 \text{ kN} \quad (13)$$

$$E_{cl,C} = 939,1 + C_{max,y} + V_{ecl} = 939,1 + 1295,52 - 100,95 = 2338,01 \text{ kN} \quad (14)$$



Gambar 7. Keseimbangan gaya pada kolom mengalami tekan

Untuk tingkat dasar:

$$E_{cl,T} = 2343,4 + T_{max,y} = 2343,4 + 1301,3 = 3644,71 \text{ kN} \quad (15)$$

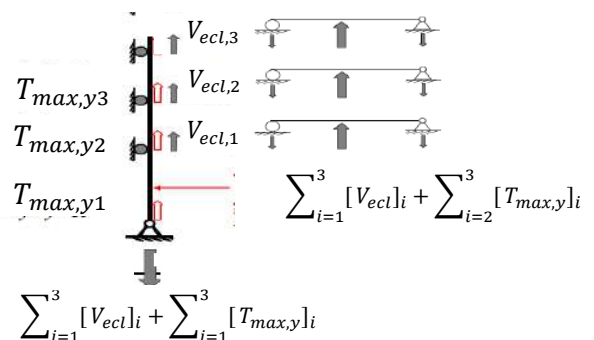
$$E_{cl,C} = 2338,01 + C_{max,y} = 2338,01 + 1496,5 = 3834,51 \text{ kN} \quad (16)$$

Kemudian, seperti pada balok, akan dicatat beban aksial akibat beban mati serta beban hidup. Setelah itu, akan dihitung beban ultimit yang terjadi berdasarkan dua kombinasi beban, yakni (1) 0,78 D + E_{cl} ; serta (2) 1,32 D + L + E_{cl} . Tabulasi perhitungan dapat dilihat pada **Tabel 3**. Selanjutnya, perhitungan kapasitas kolom dengan profil sesuai SNI 1729:2020, profil IWF 350x350x12x19 dapat menahan gaya-gaya dalam ultimit yang telah dihitung seperti pada **Tabel 3**. Hasil pengecekan simpangan dan p-delta struktur dapat dilihat pada **Gambar 9** dan menunjukkan masih dalam batasan drift yang disyaratkan.

3.3 Analisa beban dorong (*Pushover*)

Analisis beban dorong dilakukan untuk mendapatkan performa struktur secara keseluruhan. Prosedur ini umumnya digunakan untuk desain berbasis kinerja. Dalam melakukan analisis statik-nonlinier, akan dilakukan beberapa hal sebagai berikut:

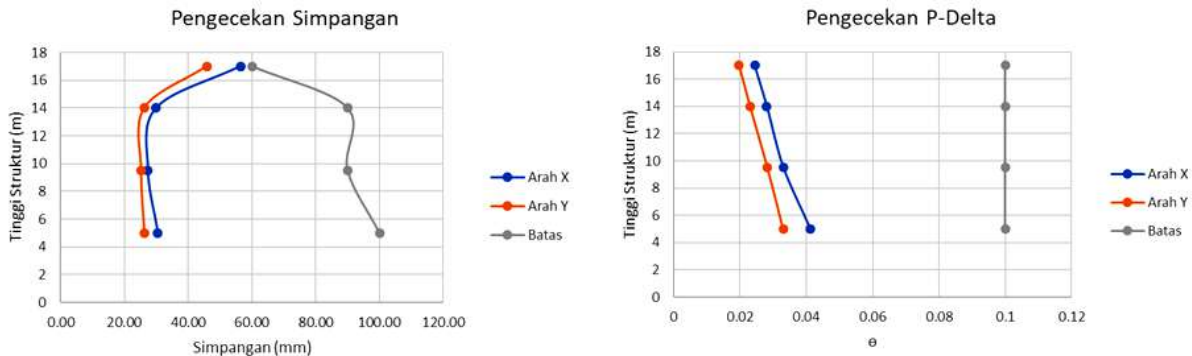
1. BTT akan dimodelkan memiliki hinge ditengah bentang elemen. ETABS memiliki definisi bawaan hinge untuk BTT dengan parameter mengacu pada dokumen FEMA 440, sehingga perilaku non-linier dapat meliputi hardening dengan deformasi plastis;



Gambar 8. Keseimbangan gaya pada kolom mengalami tarik

Tabel 3. Rekapitulasi perhitungan beban kolom

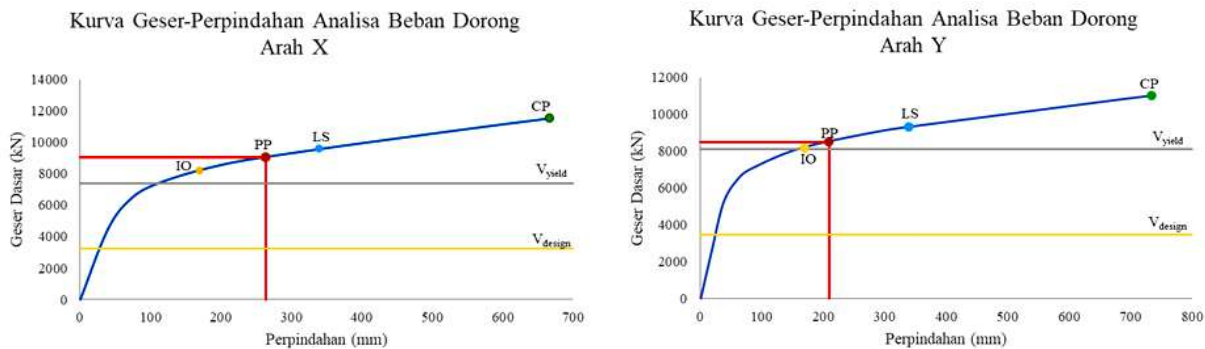
	$E_{cl,T}$ (kN)	$E_{cl,C}$ (kN)	D (kN)	L (kN)	0,78 D + E_{cl} (kN)	1,32 D + L + E_{cl} (kN)
Tingkat Dasar	3644,71	3834,51			3644,71	3834,51
Tingkat 1	2343,40	2338,01	594,09	494,15	2806,79	3369,28
Tingkat 2	1115,91	939,10	387,83	329,38	1418,41	1615,73
Tingkat 3	74,04	-74,04	188,15	162,55	220,80	255,58



Gambar 9. Pengecekan simpangan (kiri) dan efek P-Delta (kanan).

Tabel 4. Rekapitulasi hasil analisa beban dorong

	Arah X		Arah Y	
Δ_{atap}	264,46	mm	Δ_{atap}	209,55 mm
Δ_{atap} / H	0,0155		Δ_{atap} / H	0,0123
S_a	0,2629	g	S_a	0,23 g
S_d	184,323	mm	S_d	167,63 mm
Geser	9049,01	kN	Geser	8506,68 kN
$V_{leleh\ pertama\ (a)}$	7387,83	kN	$V_{leleh\ pertama\ (a)}$	8134,92 kN
$V_{dinamik\ (b)}$	3217,91	kN	$V_{dinamik\ (b)}$	3474,50 kN
Kuat Lebih (a/b)	2,30		Kuat Lebih (a/b)	2,34



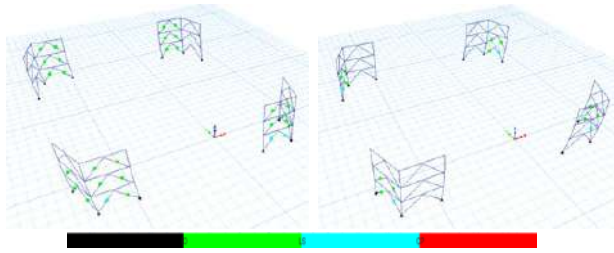
Gambar 10. Kurva geser dasar - perpindahan hasil analisa beban dorong arah X (kiri) dan arah Y (kanan).

- Material nonlinear data BTT akan dimodelkan mempunyai jenis histeresis BRB Hardening Model pada ETABS, supaya dapat merepresentasikan perilaku histeresis BTT akibat hardening dengan baik;
- Hanya elemen balok dan kolom pada portal dengan BTT akan dimodelkan memiliki hinge di kedua ujungnya. Walaupun balok dan kolom pada SRBTT dirancang untuk tetap elastis, beban aktual seismik inelastik tidak akan sesuai dengan distribusi gaya pada desain, dan leleh dapat terjadi diluar BTT pada portal disekitarnya; dan
- Efek P-Delta akan diikutsertakan dalam analisis statik-nonlinier untuk mendapatkan efek destabilisasi global pada sistem gravitasi. Beban mati pun didefinisikan sebagai nonlinear.

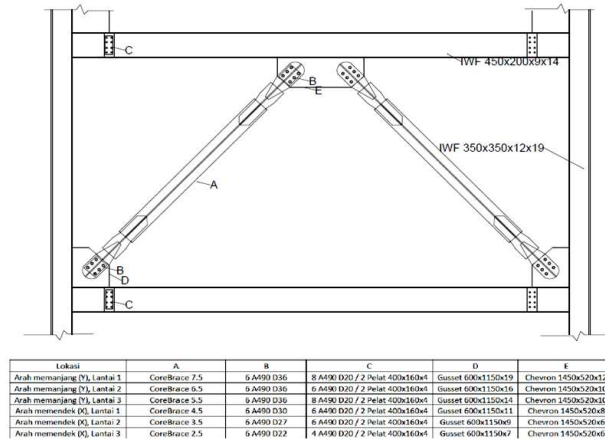
Kurva hasil pembebanan beban dorong berdasarkan FEMA 440 untuk arah X dapat dilihat pada Gambar 10 kiri, dan untuk arah Y dapat dilihat pada Gambar

10 kanan. Dengan tinggi struktur 17 meter, hasil analisis beban dorong dapat dilihat pada Tabel 4. Dari hasil analisa beban dorong, didapatkan bahwa kuat leleh bangunan dalam arah X dan arah Y masih jauh di atas gaya geser dinamik yang disyaratkan oleh SNI 1726:2019 dengan rasio mencapai 2,3. Sementara itu, untuk kedua arah, rasio drift adalah 1,5% dan 1,2% masing-masing untuk arah X, dan arah Y. Nilai rasio drift ini masih berada diantara 0,01 hingga 0,02 sehingga struktur dikategorikan dalam kategori damage control dan belum mencapai batasan target kinerja untuk bangunan dengan tingkat risiko IV, i.e. 2%.

Dengan demikian, disimpulkan bahwa struktur dapat dijadikan tempat pengungsian setelah gempa rencana terjadi. Selain itu, didapatkan bahwa nilai kuat lebih berdasarkan analisa beban dorong lebih kecil dibanding nilai kuat lebih pada SNI yakni 2,5. Sendi plastis yang terbentuk pada titik performa struktur dapat dilihat pada Gambar 11 (kiri) untuk arah X dan



Gambar 11. Sendi plastis yang terbentuk saat mencapai titik performa akibat beban dorong arah X (kiri) dan arah Y (kanan) pada SRBTT



Gambar 13. Tipikal hasil desain

Gambar 11 (kanan) untuk arah Y. Dari kedua gambar tersebut, dapat dilihat bahwa lokasi kegagalan sesuai desain awal, yakni hanya pada elemen BTB, dan tidak terbentuk pada balok maupun kolom. Hal ini menandakan bahwa beban gempa terdispersi dengan baik oleh BTT yang telah dirancang. Tipikal hasil perancangan dapat dilihat pada **Gambar 12**.

4. Kesimpulan

1. Sistem rangka bresing tahan tekuk (SRBTT) merupakan salah satu opsi sistem struktur yang dapat digunakan dalam perancangan struktur tahan gempa. Desain SRBTT harus memperhatikan prinsip desain kapasitas, dimana disipasi energi hanya diizinkan untuk terjadi di BTT dan tidak terjadi di balok atau kolom struktural.
2. Analisis beban dorong nonlinear berdasarkan FEMA 440 dengan beban gempa periode ulang 2500 tahun menunjukkan bahwa perilaku global struktur yang ditunjukkan dengan rasio *story drift* sebesar 1,5% dan 1,2%, masing-masing untuk arah x dan arah y masih dibawah 2% yang disyaratkan dan dikategorikan sebagai daerah *damage control*, sehingga struktur masih layak untuk digunakan kembali setelah gempa besar terjadi.
3. Hasil evaluasi beban dorong nonlinear juga menunjukkan bahwa pada tingkatan elemen, semua energi terdispersi di BTT; sementara elemen lainnya masih dalam kondisi elastis sesuai prinsip desain kapasitas yang direncanakan di awal.

Daftar Pustaka

- Andarini, R. D., dan Moestopo, M., 2013, *Kajian Eksperimental Bresing Tahan Tekuk pada Bangunan Tahan Gempa di Indonesia*, Jurnal Teknik Sipil, Vol. 20, No.3.
- Badan Standardisasi Nasional, 2019, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung* (SNI 1726:2019).
- Badan Standardisasi Nasional, 2020, *Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural* (SNI 1729:2020), BSN.
- Bruneau, M., Uang, C.M., Sabelli, R., 2011, *Ductile Design of Steel Structures*, The McGraw-Hill Companies.
- Federal Emergency Management Agency, 2005, *FEMA 440: Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*.
- Kersting, R.A., Fahnestock, L.A., Lopez, W.A., 2015, *Seismic Design of Steel Buckling-Restrained Braced Frames*, ATC.
- Murdiansyah, L., dan Setio, H. D., 2014, *Studi Pengaruh Kenaikan Kekakuan Metallic Damper terhadap Respon Seismik Struktur Rangka Baja dengan Energi Redaman Tambahan Peredam ADAS (Added Dampng and Stiffness)*, Jurnal Teknik Sipil, Vol. 21, No. 1.
- Reza, A. M., dan Setio, H. D., 2021, *Optimum Location Analysis of Story Isolation System on High Rise Building*, Jurnal Teknik Sipil, Vol. 28, No. 2.
- Robinson, K. S., 2014, *Advances in Design Requirements of Bucklin Restrained Braced Frames*, NZSEE Conference, Paper No. 011.
- Sabelli, R., 2018, *AISC Live Webinars Seismic Design in Steel*, American Institute of Steel Construction.
- Surendran, N., Varma, A., 2017, *Buckling Restrained Braces (BRB) – A Review*, International Research Journal of Engineering and Technology.
- Takeuchi, T., 2018, *Buckling-Restrained Brace: History, Design, and Applications*, the 9th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Area, Christchurch, New Zealand
- Tsai, K.C., Lin, P. C., Wu, A. C., Chuang, M. C., 2013, *Buckling Restrained Braces: Research and Implementation in Taiwan*, Steel Innovations Conference, Christchurch, New Zealand.
- Uang, C.M., Bruneau, M., Whittaker, A.S., Tsai, K.C., 2017, *Seismic Design of Steel Structures*, McGraw-Hill.

Watanabe, A., 2018, *Design and Applications of Buckling-Restrained Braces*, International Journal of High-Rise Buildings, Vol. 7, No. 3, Council on Tall Buildings and Urban Habitat.