

Studi Numerik terhadap Kinerja serta Perilaku Elemen *Reduced Bracing Section* dan *Stiffeners* pada *Concentrically Braced Frames*

Arrahmatur Rizqi^{1,*}, Budi Suswanto¹, Harun Al-Rasyid¹

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, Email: arrahmatur@gmail.com

Info Artikel		Abstract
Diajukan	02 Maret 2021	<i>Seismic response quality of CBF determined by the performance of the (bracing). In order to reach the best performance from CBF, the stiffener have to get collapse before other components from its frame system. The purpose of using the reduced saction bracing is to enfast the collapse of bracing. In this research, this reduced section of bracing is refered to single and double reduced beam section. In this research, diagonal stiffeners is also used as the stiffener at the bracing. The using of stiffeners are supposed to strengthen the center of the bracing. The using of diagonal stiffeners in this research is refered to SNI 1729 – 2002. Single and triple stiffeners will be installed every 200 mm and 10 mm thickness. According to the result of analysis, we can assume that the using of reduced section of the bracing emerges well enough dissipation energy whereas the addition of diagonal stiffened of the bracing brings better ductility value.</i>
Diperbaiki	22 Maret 2021	
Disetujui	22 Maret 2021	

Keywords: Concentrically Braced Frame, reduced section, diagonal stiffeners, dissipation energy, ductility

Abstrak

Kualitas respon seismik dari CBF ditentukan dari kinerja pengakunya (bracing). Untuk mencapai kinerja terbaik dari CBF, pengaku harus gagal dahulu sebelum komponen lainya dari sistem rangka itu sendiri. Penggunaan reduced saction bracing bertujuan untuk mempercepat kegagalan pada bracing. Dalam penelitian ini reduced section pada bracing mengacu pada sistem yang ada pada reduced beam section (RBS) dan double reduced beam section (DRBS). Selain penerapan reduced section pada bracing dalam penelitain juga menggunakan diagonal stiffeners sebagai pengaku pada bracing. Penggunaan stiffeners bertujuan untuk memperkuat bagian tengah dari bracing. Penggunaan diagonal stiffeners di penelitian ini mengacu pada SNI 1729-2002. Diagonal stiffeners akan dipasang single stiffeners dan triple stiffeners dengan jarak antar stiffeners 200 mm dan tebal 10 mm. Dari hasil analisis didapatkan bahwa penggunaan reduced section pada bracing menghasilkan energi disipasi yang cukup baik. Sedangkan penambahan diagonal stiffener pada bracing menghasilkan nilai daktilitas yang lebih baik.

Kata kunci: *Concentrically Braced Frame, reduced section, diagonal stiffeners, energi disipasi, daktilitas*

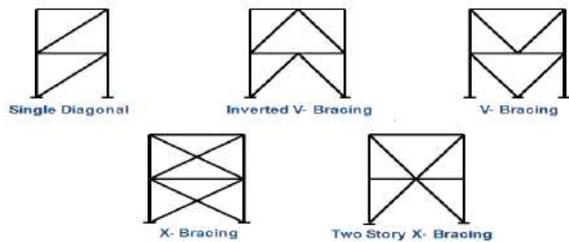
1. Pendahuluan

Concentrically Braced Frame (CBF) adalah pengembangan dari *Moment Resisting Frame* (MRF), dimana lendutan CBF dibatasi karena adanya pengaku dan CBF memiliki kemampuan daktilitas dan penyerapan energi disipasi yang kecil [1]. CBF dua tipe yaitu *Special Concentrically Braced Frame* (SCBF) dan *Ordinary Concentrically Braced Frame* (OCBF) yang mana perbedaan dari kedua tipe ini adalah daerah gempa. SCBF digunakan untuk daerah rawan gempa (gempa tinggi). Sedangkan pada OCBF digunakan untuk daerah dengan gempa rendah [1]. Persyaratan desain untuk sistem SCBF lebih ketat daripada sistem OCBF karena kebutuhan deformasi yang lebih tinggi [2]. Dalam hal ini CBF memiliki keuntungan dan kerugian. Keuntungan dari CBF adalah mempunyai kekakuan elastik yang tinggi. Dan kerugiannya dari CBF adalah mempunyai daktilitas yang kurang dibandingkan dengan rangka berpengaku tipe lain (*Special Momen Resisting Frames, Eccentrically Braced Frames, Buckling*

Restrained Braced Frame) dan bentuknya mengurangi fungsi arsitektural [1].

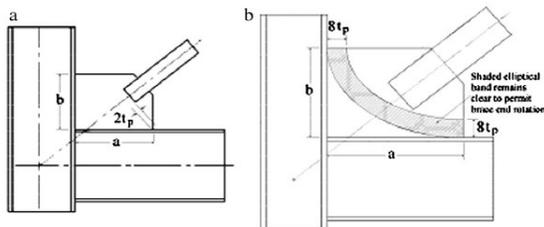
Konsep pertama dari penggabungan balok dan kolom melalui koneksi momen untuk membuat tipe struktural yang tidak dapat ditentukan secara statis disebut *Moment Resisting Frame* (MRF). Kerangka ini menahan gaya seismik oleh elemen yang berperan pada dasarnya sebagai lentur. Konsep kedua berasal dari *Concentrically Braced Frame* (CBF), dimana balok dan kolom digabungkan oleh sambungan geser untuk membentuk rangka tidak stabil yang dibuat secara statis ditentukan oleh pemasangan diagonal member (*braces*) [3]. (CBF) biasanya terdiri dari *bracing* diagonal yang terhubung ke balok dan kolom dengan sambungan pelat buhul. *Bracing* dapat ditempatkan di sejumlah konfigurasi dan geometri yang berbeda. Elemen CBF pada awalnya dirancang dengan asumsi aksi rangka, yaitu anggota hanya membawa beban aksial [4]. Tipe-V, tipe-V terbalik (*chevron*) dan *X-bracing* dua lantai, terdiri dari tipe-V dan tipe-V terbalik, adalah tiga kategori

utama dari konfigurasi yang memberi perkuatan pada SCBF [5] dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Macam-macam model konfigurasi bracing pada CBF [1].

SCBF bertujuan untuk menjaga resistan pada deformasi inelastis yang besar melalui pelelehan dan kegagalan spesifik, termasuk *brace buckling* dalam tekan dan tegangan tarik. Selain mekanisme hasil primer ini, SCBF dapat menunjukkan mekanisme-mekanisme hasil sekunder dalam balok, kolom, zona panel, dan pelat buhul (*gusset*). Mode kegagalan yang diharapkan dan dipilih adalah setelah banyak *brace* yang putus dan menghasilkan deformasi siklik yang besar [6].



Gambar 2. Variasi sambungan gusset plate (a) $2t_p$ linear clearance, (b) $8t_p$ elliptical clearance [9]

Pelat gusset biasanya digunakan untuk menghubungkan *bracing* ke elemen *frame* yang lainnya. Dalam SCBF, harus dirancang untuk mengakomodasi rotasi yang terkait dengan tekuk pada *bracing* di luar bidang. Hal ini sering dicapai melalui jarak bebas *linear* atau *elips*. Dengan demikian, lentur *gusset plate* sering kali masuk ke dalam tujuan leleh dan kegagalan yang diharapkan [7]. Naderpour dkk, mengusulkan untuk memberikan jarak bebas linier $2t$ di pelat gusset untuk memungkinkan rotasi ujung brace dan mencapai perilaku daktail yang cukup bagus [7]. Lehman dkk, menyarankan desain *gusset plate* berdasarkan pada sistem tujuan kegagalan dimana mode kegagalan yang diinginkan dapat diperoleh [8]. Selain itu, mengusulkan juga panjang jarak elips 6 sampai $8t$ sebagai pengganti jarak $2t$ linier dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Respons rangka yang diperkuat secara konsentris dalam menahan beban seismik diatur oleh kinerja bresing dan sambungan yang mengalami pembebanan siklik terbalik.

Untuk mendapatkan kinerja yang diinginkan dari rangka penahan secara konsentris, penguat harus gagal terlebih dahulu dengan menunjukkan daktilitas yang dapat diterima setelah beberapa siklus deformasi inelastis termasuk peregangannya pada tegangan dan tekuk pada kompresi [10]. Mengurangi penampang bagian struktur yang cukup kecil untuk membatasi pengurangan kekuatan tekan akan menghasilkan kekuatan tarik yang berkurang dan membatasi kebutuhan perkuatan sambungan. Konsep menggabungkan sekering (*fuse*) dalam *brace* untuk mengurangi kekuatan tarik ke tingkat yang dibutuhkan oleh perhitungan secara ketat telah diselidiki di masa lalu pada brace HSS. Hal ini menunjukkan bahwa kebutuhan daktilitas dengan brace penampang tereduksi pada sekitar lubang *brace* [10].

Pengaku longitudinal adalah pengaku dengan arah sejajar dengan *flange*. Biasanya digunakan untuk memperkuat girder dengan dimensi besar. Pengaku longitudinal juga digunakan untuk menghindari tekuk pada *web* yang dapat menyebabkan pengurangan yang luar biasa dari ketahanan lentur girder. Peran penting lainnya dari pengaku longitudinal adalah untuk mengontrol defleksi lateral dari elemen gelagar [11]. Pengaku melintang dengan ketebalan setidaknya sama dengan elemen yang diberi *stiffeners*, dilas pada ketinggian penuh dari panel *web* dan *flange*. Pada sambungan yang dibaut, pengaku di *compression zone* harus sejajar dengan *flange* (*center of compression*) [11].

Dari uraian di atas maka perlu dilakukan penelitian ini untuk mengetahui kinerja terbaik dari *frame* yang menggunakan *bracing* diberi *fuse* atau *frame* yang menggunakan *bracing* diberi *stiffeners*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan ataupun acuan dalam mendesain stuktur baja CBF. Serta semoga dapat dikembangkan lagi dalam penelitian selanjutnya.

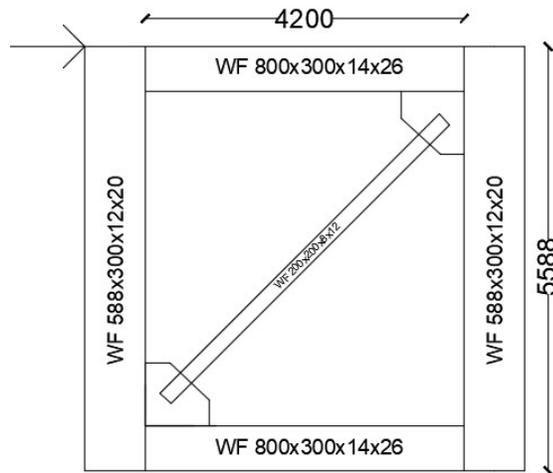
2. Metode

Dalam studi ini, akan dilakukan analisa sebagian portal rangka baja yang diberi perkuatan dengan menggunakan *concentrically braced frames* (CBF). Ada 4 spesimen dimana spesimen tersebut yang membedakan adalah modifikasi pada *bracing*, profil dan mutu baja yang akan digunakan. Setelah membedakan antar spesimen kemudian diberi beban siklik menggunakan *software* Abaqus. Pengamatan akan dilakukan terhadap perilaku *brace* pada portal rangka baja yang diuji dan bagaimana hasil dari respon histeristiknya.

Spesimen dalam penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Hsiao dkk, [9] dimana balok kolom menggunakan profil WF dan *bracing* menggunakan profil HSS, serta *gusset plate* dengan menggunakan plat baja

tebal 10 mm dengan *clearance* 8t. Tetapi pada spesimen penelitian ini mengalami modifikasi yang mengacu pada profil dan mutu baja yang sering digunakan di Indonesia.

Spesimen menggunakan profil WF pada elemen balok dan kolom dengan mutu baja BJ 50 serta *bracing* juga menggunakan profil WF dengan mutu baja BJ 34. Sedangkan untuk *gusset plate* menggunakan tebal plat 10 mm dengan *clearance* 8t dan mutu baja BJ 55 seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 1**. Tinggi portal pada spesimen adalah 5588 mm serta lebar 4200 mm dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Portal spesimen dalam pemodelan numerik dan posisi *loading point*

Modifikasi juga dilakukan pada elemen *bracing*. Dalam penelitian ini pada bagian tengah *bracing* diberi *reduced section* yang mengacu pada sistem *reduced beam section* dan *double reduced beam section* dengan nama spesimen CBFVR-1 dan CBFVR-2 serta dapat dilihat pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**. Hal tersebut bertujuan untuk mempercepat kegagalan pada *bracing* sebelum elemene penyusun lainnya. Untuk menentukan ukuran *reduced section* ada beberapa batasan tertentu sesuai dengan AISC-358 dan dapat dilihat pada **Gambar 4**. Persamaan 1-4 adalah batasan dalam menentukan ukuran *reduced section*:

- 0.5b_{bf} ≤ a ≤ 0.75b_{bf} (1)
- 0.65h ≤ b ≤ 0.85h (2)
- 0.1b_{bf} ≤ c₁ ≤ 0.25b_{bf} (3)
- c₁ ≤ c₂ (4)

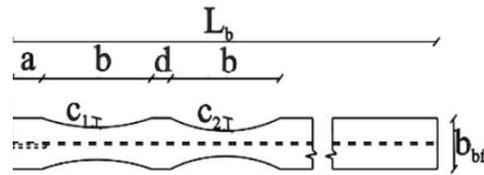
dimana:

b_{bf} adalah lebar profil

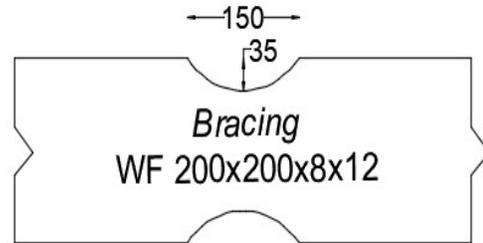
h adalah tinggi profil

Keterangan:

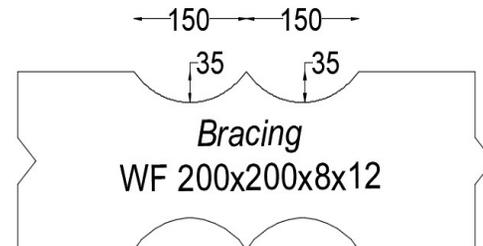
t_s adalah ketebalan pengaku, mm



Gambar 4. *Double reduced section*



Gambar 5. Tampak atas detail *bracing* pada variabel CBFVR-1



Gambar 6. Tampak atas detail *bracing* pada variabel CBFVR-2

Selain itu modifikasi juga dilakukan pada elemen *bracing* dengan memberi *stiffener* pada bagian tengah *bracing*. Hal tersebut bertujuan untuk memperkuat pada bagian tengah *bracing*. Pada spesimen yang diberi *single stiffener* dengan nama CBFVR 3 dan yang diberi *triple stiffener* dengan nama CBFVR 4. Ilustrasi spesimen dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**. Untuk menentukan ukuran *stiffener* dalam penelitian ini mengacu pada peraturan SNI 1729-2002. Lebar pengaku pada setiap sisi pelat badan harus lebih besar dari sepertiga lebar pelat sayap dikurangi setengah tebal pelat badan. Tebal pengaku harus lebih tebal dari setengah tebal pelat sayap dan memenuhi. Persamaan 5 adalah batasan dalam menentukan ukuran stiffener.

$$\frac{b_s}{t_s} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (5)$$

b_s adalah lebar pengaku, mm

Tabel 1. Material Elemen Penyusun CBF

No	Nama	Nama elemen	Material	Fu	Fy	Dimensi
1	CBFVR-1	Balok	BJ 50	500	290	WF 800x300x14x26
		Kolom	BJ 50	500	290	WF 588x300x12x20
		Bracing	BJ 34	340	210	WF 200x200x8x12
		Gusset Plate	BJ 55	550	410	tinggi (a) = 835 mm, lebar (b) =835 mm
		Clearance	-	-	-	8 t
		Reduced Section	-	-	-	Single Reduced
		Stiffeners	-	-	-	-
2	CBFVR-2	Balok	BJ 50	500	290	WF 800x300x14x26
		Kolom	BJ 50	500	290	WF 588x300x12x20
		Bracing	BJ 34	340	210	WF 200x200x8x12
		Gusset Plate	BJ 55	550	410	tinggi (a) = 835 mm, lebar (b) =835 mm
		Clearance	-	-	-	8 t
		Reduced Section	-	-	-	Double Reduced
		Stiffeners	-	-	-	-
3	CBFVR-3	Balok	BJ 50	500	290	WF 800x300x14x26
		Kolom	BJ 50	500	290	WF 588x300x12x20
		Bracing	BJ 34	340	210	WF 200x200x8x12
		Gusset Plate	BJ 55	550	410	tinggi (a) = 835 mm, lebar (b) =835 mm
		Clearance	-	-	-	8 t
		Reduced Section	-	-	-	-
		Stiffeners	-	-	-	Single Stiffeners
4	CBFVR-4	Balok	BJ 50	500	290	WF 800x300x14x26
		Kolom	BJ 50	500	290	WF 588x300x12x20
		Bracing	BJ 34	340	210	WF 200x200x8x12
		Gusset Plate	BJ 55	550	410	tinggi (a) = 835 mm, lebar (b) =835 mm
		Clearance	-	-	-	8 t
		Reduced Section	-	-	-	-
		Stiffeners	-	-	-	Triple Stiffeners

Pemodelan secara numerik dilakukan dengan bantuan program Abaqus. Pemodelan yang dibuat sesuai dengan *preliminary design* yang telah ditentukan. Pemodelan secara numerik dilakukan untuk mengetahui apakah desain yang telah dilakukan seperti material yang digunakan, ukuran elemen, serta interaksi yang dipilih telah sesuai dengan hasil eksperimen sehingga mampu menunjukkan hasil yang serupa dengan eksperimen. Tahapan pemodelan numerik yang dilakukan meliputi:

1. Model Geometri

Penelitian ini menggunakan profil WF pada elemen balok, kolom dan *bracing*. Sedangkan untuk *gusset plate* dan *stiffener* menggunakan tebal plat 10 mm.

2. Material Properties

Material yang digunakan dalam studi ini ialah bahan baja dengan nilai berat jenis 7850 kg/m^3 , *modulus young* sebesar 200000 N/mm^2 dan memiliki nilai *poisson ratio* sebesar 0,3

3. Pembebanan

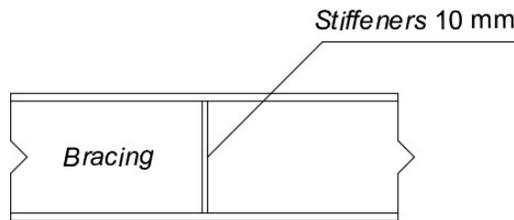
Pembebanan yang diberikan pada spesimen menggunakan kuasi statis beban siklik yang sesuai dengan persyaratan pada AISC 2005 dan diilustrasikan dalam bentuk grafik pada **Gambar 9**. Pembebanan dilakukan dengan *displacement control method*. Pembebanan diletakkan pada ujung atas kolom *frame* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3**.

4. Interaksi

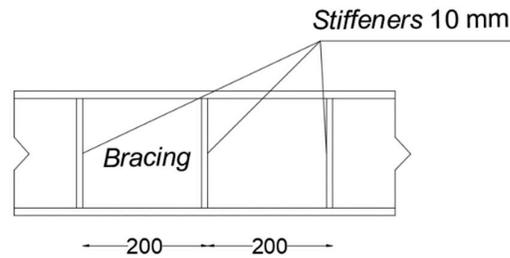
Interaksi tipe *tie constraint* diberikan pada permukaan kontak antara *stiffeners* dengan *brace*, kolom dan balok serta antara *gusset plate* dengan balok dan kolom kemudian yang terakhir kontak permukaan antara balok dengan kolom dan antara balok. *Tie constraint* digunakan pada kontak yang bersifat seperti sambungan las.

5. Model Meshing

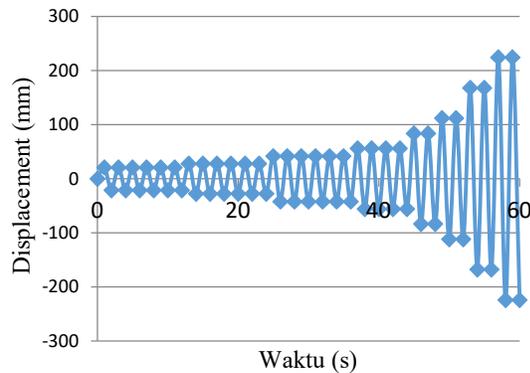
Pemodelan secara numerik yang dilakukan dengan bantuan program Abaqus memodelkan spesimen dengan menggunakan tipe elemen C3D8R. Model meshing digunakan untuk *plotting* hasil analisa berupa ilustrasi tegangan serta *displacement* yang terjadi pada elemen. Ukuran *meshing* dalam satu portal sebesar 75 mm untuk semua elemen.



Gambar 7. Tampak samping detail *bracing* pada variabel CBFVR-3



Gambar 8. Tampak samping detail *bracing* pada variabel CBFVR-4



Gambar 9. Grafik pembebanan siklik

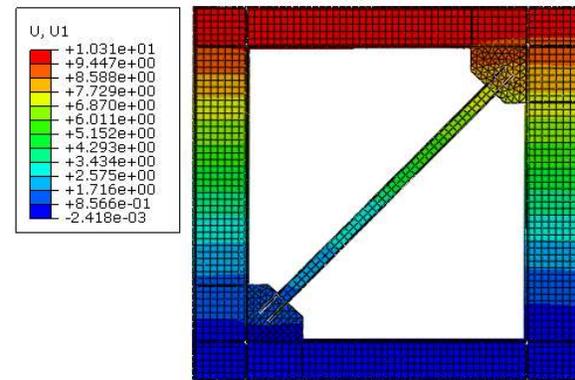
3. Hasil dan Pembahasan

A. CBFVR 1

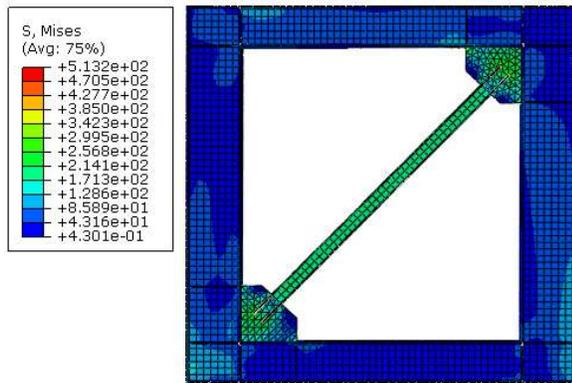
Seerti yang sudah ada pada Tabel 1 CBFVR-1 menggunakan material tipe baja BJ 50 dengan $f_y = 250$ MPa dan $f_u = 410$ MPa untuk elemen balok dan kolom. Sementara untuk *bracing* menggunakan baja tipe BJ 34 dengan $f_y = 210$ MPa dan $f_u = 340$ MPa, sedangkan *gusset plate* menggunakan material baja tipe BJ 55 dengan $f_y = 290$ MPa dan $f_u = 550$ MPa. Pada desain *gusset plate* menggunakan tinggi (a) 835 mm dan lebar (b) 835 mm. Untuk ketebalan *gusset plate* sendiri menggunakan 10 mm dan clearance $8t$ (80 mm). Akan tetapi yang membedakan dari variabel lain pada variabel CBFVR-1 menggunakan *reduced section* pada bagian tengah *bracing* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Adapun dimensi *single reduced section* bisa dilihat pada Gambar 5.

Pada spesimen rangka bresing konsentrik (CBFVR-1), elemen *bracing* pada *frame* telah mencapai tegangan 210 MPa pada saat deformasi portal 10,31 mm pada bagian atas kolom seperti ditunjukkan pada Gambar 10 dan Tabel 2. Elemen *bracing* mencapai tegangan 210 MPa seperti ditunjukkan pada Gambar 11, dimana sesuai dengan f_y material yang digunakan yaitu BJ-34. Pada pola kegagalan spesimen CBFVR-1 telah sesuai dengan desain rangka bresing konsentrik, yaitu leleh pada *bracing* terlebih dahulu sebelum ada elemen yang gagal terlebih dahulu. Setelah *bracing* leleh maka dilanjutkan pembebanan sampai *bracing* mengalami mencapai tegangan *ultimate* 340 MPa.

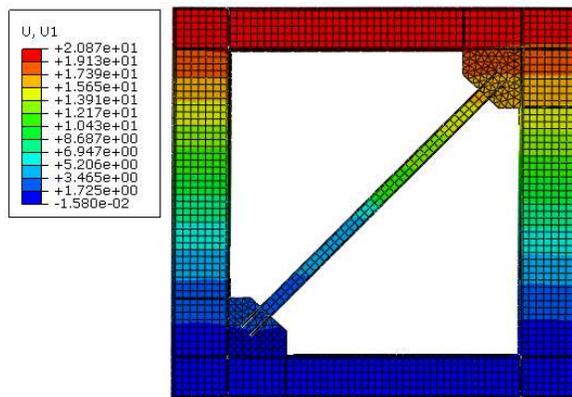
Pada spesimen rangka bresing konsentrik (CBFVR-1), elemen struktur *bracing* pada *frame* mencapai tegangan maksimum 340 MPa pada deformasi portal 20,9 mm pada bagian atas kolom seperti ditunjukkan pada Gambar 12 dan Tabel 2. Elemen *bracing* mencapai tegangan maksimum 340 MPa seperti ditunjukkan pada Gambar 13, dimana sesuai dengan f_u material yang digunakan yaitu BJ-34



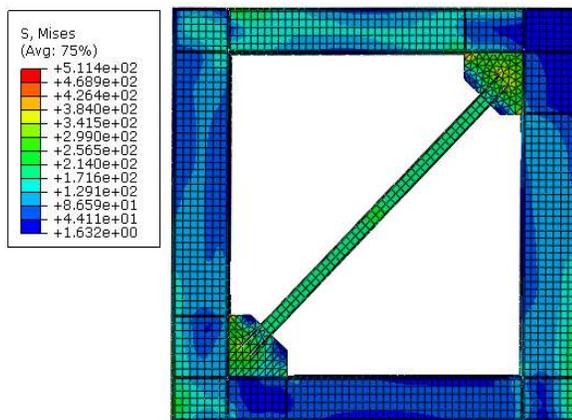
Gambar 10. *Displacement* yang terjadi pada *frame* CBFVR-1 saat *bracing* mencapai nilai f_y



Gambar 11. Tegangan yang terjadi pada *frame* CBFVR-1 saat *bracing* mencapai nilai f_y



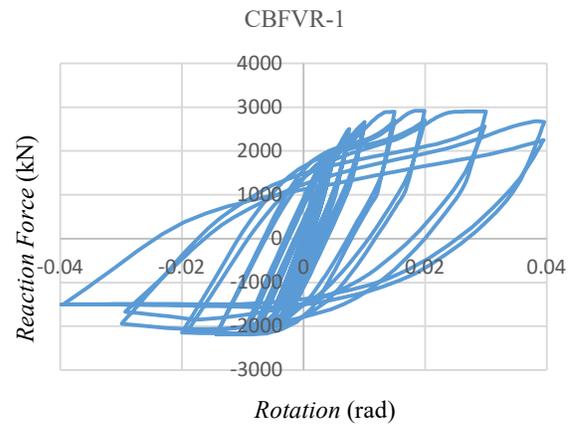
Gambar 12. Displacement yang terjadi pada *frame* CBFVR-1 saat *bracing* mencapai nilai f_u



Gambar 13. Tegangan yang terjadi pada *frame* CBFVR-1 saat *bracing* mencapai nilai f_u

Kurva histeresis seperti ditunjukkan pada **Gambar 14**, didapatkan dengan mengkombinasikan nilai *reaction force* (RF) pada dasar kolom *frame* dengan nilai *displacement* pada ujung kolom atas (U). Elemen *bracing* mencapai tegangan

maksimum 210 MPa saat rotasi kolom bernilai 0,0018 dan mencapai tegangan maksimum 340 MPa saat rotasi 0,00373. Pada variabel CBFVR-1 ini rotasi maksimum mencapai 0.04 dengan *reaction force* sebesar 2665,54 kN. Sedangkan *reaction force* maksimum mencapai 2920,81 kN pada saat rotasi mencapai 0,02.



Gambar 14. Kurva histeresis CBFVR-1

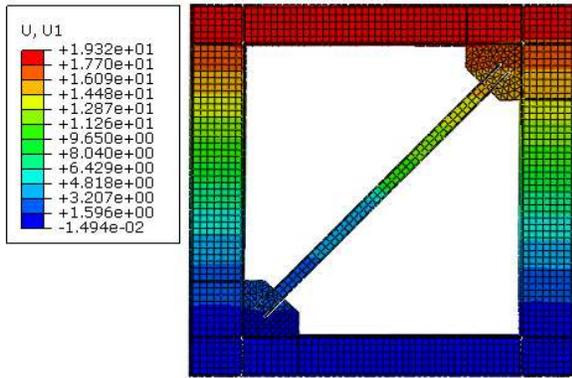
Tabel 2. Deformasi *frame* CBFVR-1 saat *bracing* mencapai f_y dan f_u

Variabel CBFVR-1	Deformasi <i>Frame</i>	Tegangan Pada <i>Bracing</i>
<i>Bracing</i> (f_y)	10,31 mm	210 MPa
<i>Bracing</i> (f_u)	20,9 mm	340 MPa

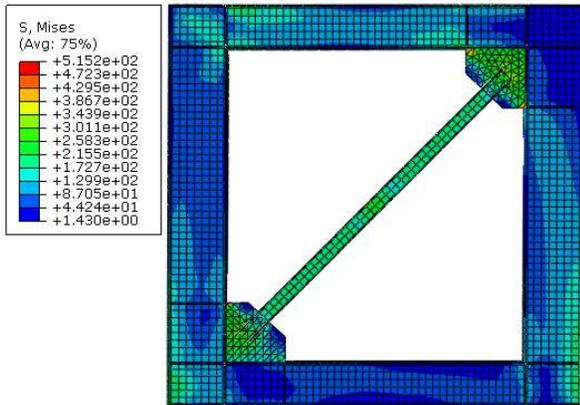
B. CBFVR 2

Pada variabel CBFVR-2 menggunakan *double reduced section* pada bagian tengah *bracing*. Adapun dimensi *double reduced section* bisa dilihat pada **Gambar 6** dan pada **Tabel 1**.

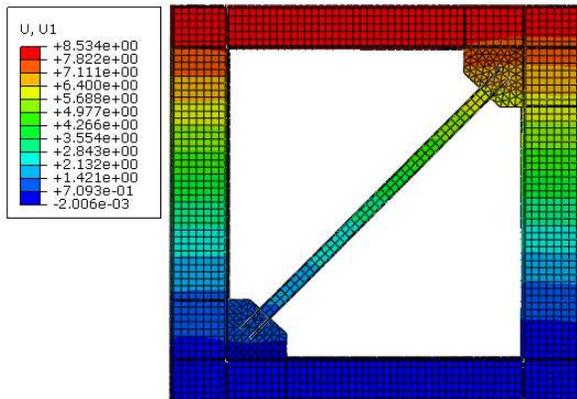
Pada spesimen rangka bresing konsentrik (CBFVR-2), elemen *bracing* pada *frame* telah mencapai tegangan 210 MPa pada saat deformasi portal 8,53 mm pada bagian atas kolom seperti ditunjukkan pada **Gambar 15**. Elemen *bracing* mencapai tegangan 210 MPa seperti ditunjukkan pada **Gambar 16** dan **Tabel 3**, dimana sesuai dengan f_y material yang digunakan yaitu BJ-34. Pada pola kegagalan spesimen CBFVR-2 telah sesuai dengan desain rangka bresing konsentrik, yaitu leleh pada *bracing* terlebih dahulu sebelum ada elemen yang gagal terlebih dahulu. Setelah *bracing* leleh maka dilanjutkan pembebanan sampai *bracing* mengalami mencapai tegangan *ultimate* 340 MPa.



Gambar 17. Displacement yang terjadi pada frame CBFVR-2 saat bracing mencapai nilai f_u



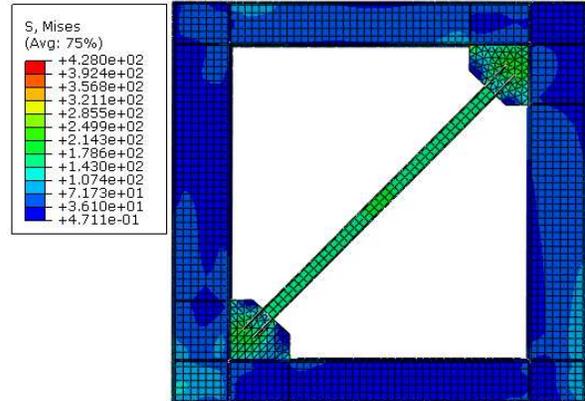
Gambar 18. Tegangan yang terjadi pada frame CBFVR-2 saat bracing mencapai nilai f_u



Gambar 15. Displacement yang terjadi pada frame CBFVR-2 saat bracing mencapai nilai f_y

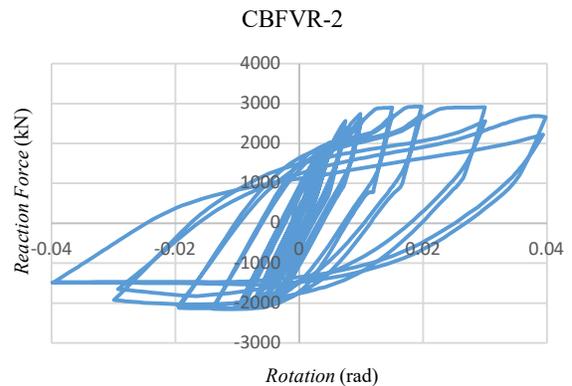
Pada spesimen rangka bracing konsentrik (CBFVR-2), elemen struktur bracing pada frame mencapai tegangan maksimum 340 MPa pada deformasi portal 19,3 mm pada bagian atas kolom seperti ditunjukkan pada **Gambar 17** dan **Tabel 3**. Elemen bracing mencapai tegangan maksimum 340

MPa seperti ditunjukkan pada **Gambar 18**, dimana sesuai dengan f_u material yang digunakan yaitu BJ-34.



Gambar 16. Tegangan yang terjadi pada frame CBFVR-2 saat bracing mencapai nilai f_y

Kurva histeresis seperti ditunjukkan pada **Gambar 19**, didapatkan dengan mengkombinasikan nilai reaction force (RF) pada dasar kolom frame dengan nilai displacement pada ujung kolom atas (U). Elemen bracing mencapai tegangan maksimum 210 MPa saat rotasi kolom bernilai 0,0015 dan mencapai tegangan maksimum 340 MPa saat rotasi 0,0035. Pada variabel CBFVR-2 ini rotasi maksimum mencapai 0.04 dengan reaction force sebesar 2658,35 kN. Sedangkan reaction force maksimum mencapai 2922,13 kN pada saat rotasi mencapai 0,0197.



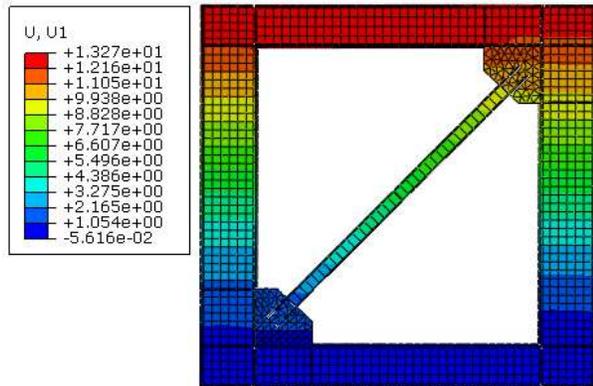
Gambar 19. Kurva histeresis CBFVR-2

Tabel 3. Deformasi frame CBFVR-2 saat bracing mencapai f_y dan f_u

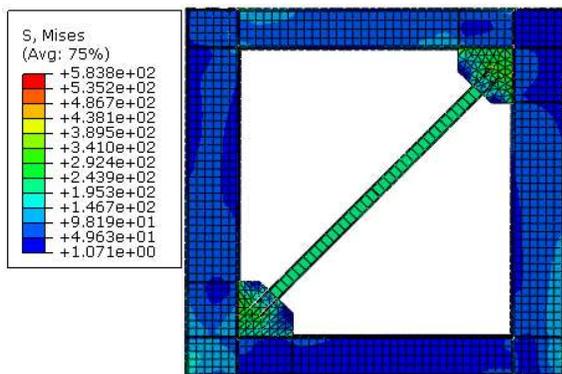
Variabel CBFVR-2	Deformasi Frame	Tegangan Pada Bracing
Bracing (f_y)	8,53 mm	210 MPa
Bracing (f_u)	19,3 mm	340 a

C. CBFVR 3

Pada variabel CBFVR-3 menggunakan *single stiffeners* pada bagian tengah *bracing*. Adapun dimensi *single stiffeners* bisa dilihat pada **Gambar 7**. Pada spesimen rangka bresing konsentrik (CBFVR-3), elemen *bracing* pada *frame* telah mencapai tegangan 210 MPa pada saat deformasi portal 13,3 mm pada bagian atas kolom seperti ditunjukkan pada **Gambar 20** dan **Tabel 4**. Elemen *bracing* mencapai tegangan 210 MPa seperti ditunjukkan pada **Gambar 21**, dimana sesuai dengan f_y material yang digunakan yaitu BJ-34. Pada pola kegagalan spesimen CBFVR-3 telah sesuai dengan desain rangka bresing konsentrik, yaitu leleh pada *bracing* terlebih dahulu sebelum ada elemen yang gagal terlebih dahulu. Setelah *bracing* leleh maka dilanjutkan pembebanan sampai *bracing* mengalami mencapai tegangan *ultimate* 340 MPa.



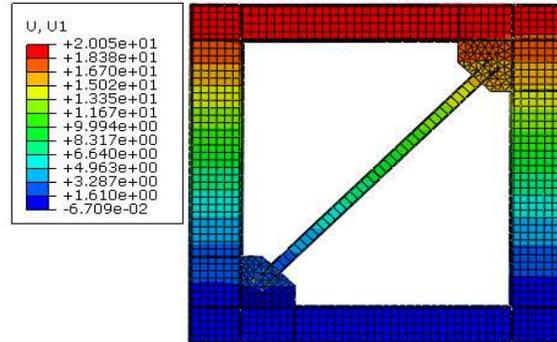
Gambar 20. Displacement yang terjadi pada *frame* CBFVR-3 saat *bracing* mencapai nilai f_y



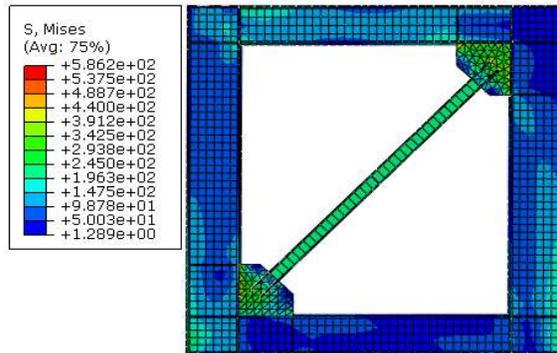
Gambar 21. Tegangan yang terjadi pada *frame* CBFVR-3 saat *bracing* mencapai nilai f_y

Pada spesimen rangka bresing konsentrik (CBFVR-3), elemen struktur *bracing* pada *frame* mencapai tegangan maksimum 340 MPa pada deformasi portal 20 mm pada bagian atas kolom seperti ditunjukkan pada **Gambar 22** dan

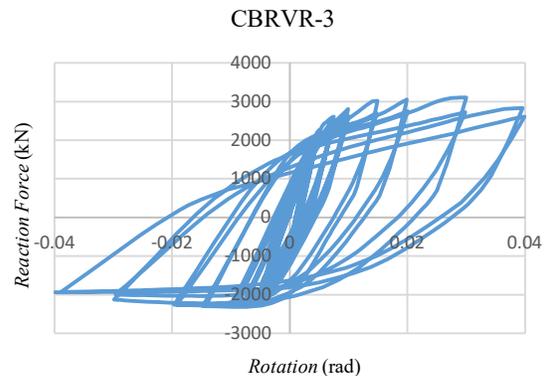
Tabel 4. Elemen *bracing* mencapai tegangan maksimum 340 MPa seperti ditunjukkan pada **Gambar 23**, dimana sesuai dengan f_u material yang digunakan yaitu BJ-34.



Gambar 22. Displacement yang terjadi pada *frame* CBFVR-3 saat *bracing* mencapai nilai f_u



Gambar 23. Tegangan yang terjadi pada *frame* CBFVR-3 saat *bracing* mencapai nilai f_u



Gambar 24. Kurva Histeresis CBFVR-3

Kurva histeresis seperti ditunjukkan pada **Gambar 24**, didapatkan dengan mengkombinasikan nilai *reaction force* (RF) pada dasar kolom *frame* dengan nilai *displacement* pada ujung kolom atas (U). Elemen *bracing* mencapai tegangan 210 MPa saat rotasi kolom bernilai 0,0023 rad dan mencapai

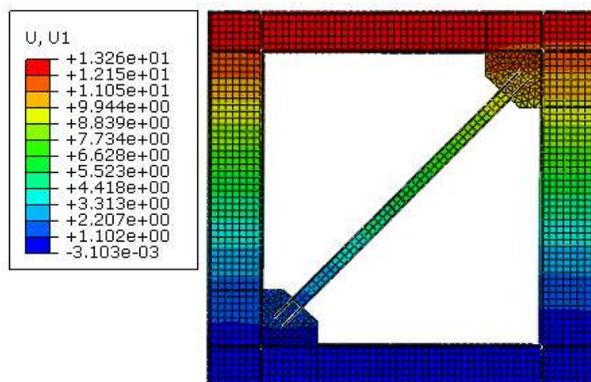
tegangan maksimum 340 MPa saat rotasi 0,0035 rad. Pada variabel CBFVR-3 ini rotasi maksimum mencapai 0.04 rad dengan *reaction force* sebesar 2614,25 kN. Sedangkan *reaction force* maksimum mencapai 3105,3 kN pada saat rotasi mencapai 0,03 rad.

Tabel 4. Deformasi *frame* CBFVR-3 saat *bracing* mencapai f_y dan f_u

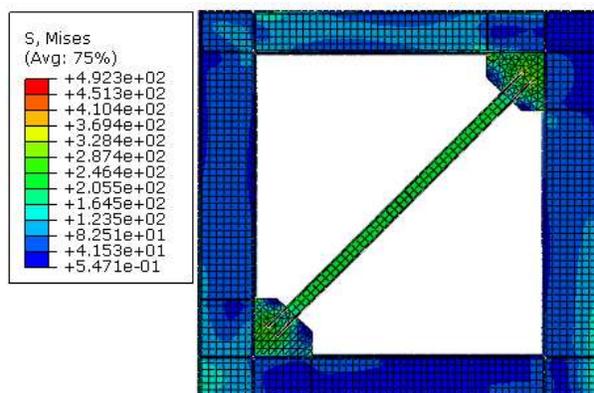
Variabel CBFVR-3	Deformasi <i>Frame</i>	Tegangan Pada <i>Bracing</i>
<i>Bracing</i> (f_y)	13,3 mm	210 MPa
<i>Bracing</i> (f_u)	20 mm	340 a

D. CBFVR 4

Pada variabel CBFVR-4 menggunakan *triple stiffeners bracing* pada bagian tengah *bracing*. Adapun dimensi *triple stiffeners bracing* bisa dilihat pada **Gambar 8** dan **Tabel 1**.



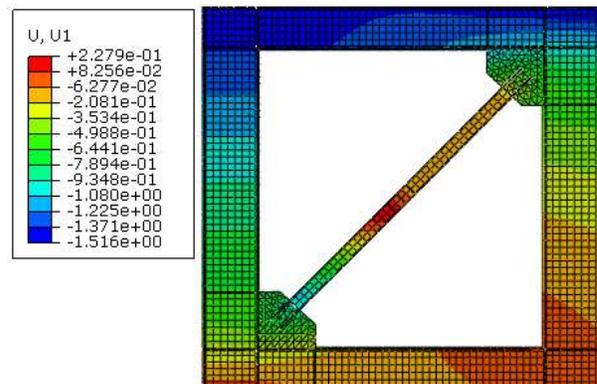
Gambar 25. Displacement yang terjadi pada *frame* CBFVR-4 saat *bracing* mencapai nilai f_y



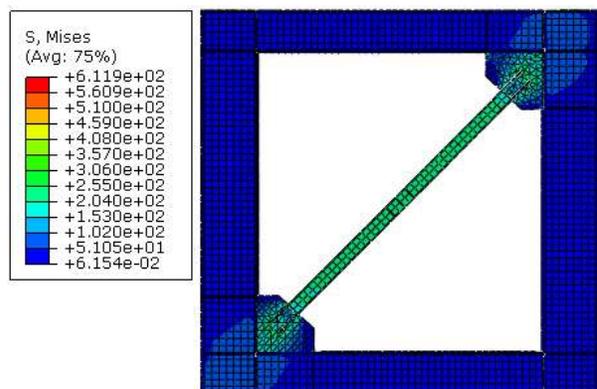
Gambar 26. Tegangan yang terjadi pada *frame* CBFVR-4 saat *bracing* mencapai nilai f_y

Pada spesimen rangka bresing konsentrik (CBFVR-4), elemen *bracing* pada *frame* telah mencapai tegangan 210 MPa pada saat deformasi portal 13,26 mm pada bagian atas kolom seperti ditunjukkan pada **Gambar 25** dan **Tabel 5**. Elemen *bracing* mencapai tegangan 210 MPa seperti ditunjukkan pada **Gambar 26**, dimana sesuai dengan f_y material yang digunakan yaitu BJ-34. Pada pola kegagalan spesimen CBFVR-4 telah sesuai dengan desain rangka bresing konsentrik, yaitu leleh pada *bracing* terlebih dahulu sebelum ada elemen yang gagal terlebih dahulu. Setelah *bracing* leleh maka dilanjutkan pembebanan sampai *bracing* mengalami mencapai tegangan *ultimate* 340 MPa.

Pada spesimen rangka bresing konsentrik (CBFVR-4), elemen struktur *bracing* pada *frame* mencapai tegangan maksimum 340 MPa pada deformasi portal 22,8 mm pada bagian atas kolom seperti ditunjukkan pada **Gambar 27** dan **Tabel 5**. Elemen *bracing* mencapai tegangan maksimum 340 MPa seperti ditunjukkan pada **Gambar 28**, dimana sesuai dengan f_u material yang digunakan yaitu BJ-34.

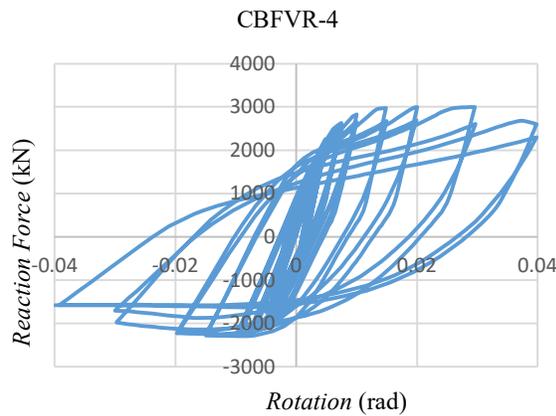


Gambar 27. Displacement yang terjadi pada *frame* CBFVR-4 saat *bracing* mencapai nilai f_u



Gambar 28. Tegangan yang terjadi pada *frame* CBFVR-4 saat *bracing* mencapai nilai f_u

Kurva histeresis seperti ditunjukkan pada **Gambar 29** diatas didapatkan dengan mengkombinasikan nilai *reaction force* (RF) pada dasar kolom *frame* dengan nilai *displacement* pada ujung kolom atas (U). Elemen *bracing* mencapai tegangan 250 MPa saat rotasi kolom bernilai 0,0023 rad dan mencapai tegangan maksimum 340 MPa saat rotasi 0,0027 rad. Pada variabel CBFVR-4 ini rotasi maksimum mencapai 0,04 rad dengan *reaction force* sebesar 2300,06 kN. Sedangkan *reaction force* maksimum mencapai 2996,4 kN pada saat rotasi mencapai 0,03 rad.



Gambar 29. Kurva Histeresis CBFVR-4

Tabel 5. Deformasi *frame* CBFVR-4 saat *bracing* mencapai f_y dan f_u

Variabel CBFVR-4	Deformasi Frame	Tegangan Pada Bracing
Bracing (f_y)	13,3 mm	210 MPa
Bracing (f_u)	22,8 mm	340 MPa

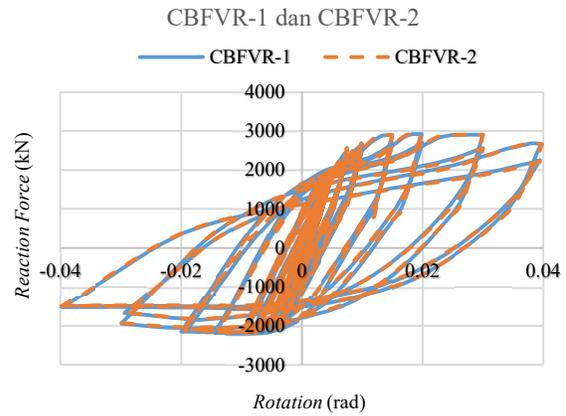
E. Perbandingan Hasil Pemodelan

Setelah pemodelan variabel CBFVR 1-4 selesai dan diketahui hasilnya. Selanjutnya dilakukan analisa hasil pemodelan Abaqus dari vairabel tersebut. Hal tersebut bertujuan untuk membandingkan hasil masing-masing variabel.

1) CBFVR-1 dan CBFVR-2

Pada kurva histeresis seperti ditunjukkan **Gambar 30** variabel CBFVR-1 dan CBFVR-2 mengalami rotasi dan tegangan yang hampir sama. Pada variabel CBFVR-1 mengalami rotasi sebesar 0,04 rad pada saat tegangan yang terjadi di dasar kolom sebesar 2665,54 kN. Sedangkan pada Pada variabel CBFVR-2 mengalami rotasi sebesar 0,04 rad pada saat tegangan yang terjadi di dasar kolom sebesar 2658,35 kN dapat dilihat pada **Tabel 6**. Berdasarkan luasan kurva histeresis didapatkan energi disipasi pada variabel CBFVR-1 sebesar 769,46 kNm. Sedangkan pada variabel

CBFVR-2 didapatkan energi disipasi sebesar 760,805 kNm. Energi disipasi pada variabel CBFVR-1 lebih besar dari pada CBFVR-2 dengan selisih sebesar 8,654 kNm atau sebesar 0,27% seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 7**.



Gambar 30. Perbandingan kurva histeresis CBFVR-1 dan CBFVR-2

Tabel 6. Perbandingan nilai *base shear* CBFVR-1 dan CBFVR-2 saat rotasi 0,04 rad

Variabel	Base shear saat rotasi maksimum 0,04 rad (kN)	Selisih (%)
CBFVR-1	2665,54	0,27
CBFVR-2	2658,35	

Tabel 7. Perbandingan nilai energi disipasi CBFVR-1 dan CBFVR-2

Variabel	Energi Disipasi (kNm)	Selisih (%)
CBFVR-1	769,46	1,21
CBFVR-2	760,81	

Tabel 8. Perbandingan nilai deformasi *frame* CBFVR-1 dan CBFVR-2

Variabel	Deformasi frame (mm)		Selisih (%)	
	Bracing 210 MPa	Bracing 340 MPa	Bracing 210 MPa	Bracing 340 MPa
CBFVR-1	10,31	20,9	17,27	7,66
CBFVR-2	8,53	19,3		

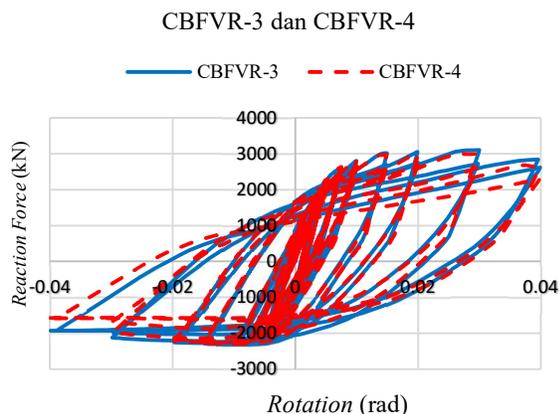
Tabel 9. Perbandingan nilai daktilitas CBFVR-1 dan CBFVR-2

Variabel	Daktilitas	Selisih (%)
CBFVR-1	2,03	10,18
CBFVR-2	2,26	

Tabel 8 menunjukkan deformasi *frame* variabel CBFVR-1 saat *bracing* saat mencapai tegangan 210 MPa memiliki nilai lebih besar daripada CBFVR-2 dengan selisih nilai sebesar 1,78 mm atau sebesar 17,27%. Deformasi *frame* variabel CBFVR-1 saat *bracing* mencapai tegangan maksimum 340 MPa juga lebih besar daripada CBFVR-2 dengan selisih nilai sebesar 1,6 mm atau sebesar 7,66%. Dapat dilihat pada **Tabel 9** daktilitas dari CBFVR-2 mempunyai nilai lebih besar dari CBFVR-1 dengan selisih nilai sebesar 0,23 atau sebesar 10,18%. Dari beberapa hasil analisa tersebut menunjukkan perilaku pada variabel CBFVR-1 dan CBFVR-2 mengalami perbedaan yang tidak terlalu signifikan.

Tabel 10. Perbandingan nilai *base shear* CBFVR-3 dan CBFVR-4 saat rotasi 0,04 rad

Variabel	<i>Base shear</i> saat rotasi maksimum 0,04 rad (kN)	Selisih (%)
CBFVR-3	2614,25	12,02
CBFVR-4	2300,06	



Gambar 31. Perbandingan kurva histeresis CBFVR-3 dan CBFVR-4

2) CBFVR-3 dan CBFVR-4

Pada kurva histeresis seperti ditunjukkan **Gambar 31** variabel CBFVR-3 dan CBFVR-4 mengalami rotasi 0,04 rad dengan tegangan yang cukup berbeda. Pada variabel CBFVR-3 mengalami rotasi sebesar 0,04 rad pada saat tegangan yang terjadi di dasar kolom sebesar 2614,25 kN. Sedangkan pada variabel CBFVR-4 mengalami rotasi sebesar 0,04 rad pada saat tegangan yang terjadi di dasar kolom sebesar 2300,06 kN dapat dilihat pada **Tabel 10**. Berdasarkan luasan kurva histeresis didapatkan energi disipasi pada variabel CBFVR-3 sebesar 862,74 kNm. Sedangkan pada variabel CBFVR-4 didapatkan energi

disipasi sebesar 808,45 kNm. Energi disipasi pada variabel CBFVR-3 lebih besar dari pada CBFVR-4 dengan selisih sebesar 54,29 kNm atau sebesar 6,29% seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 11**.

Tabel 12 menunjukkan deformasi *frame* variabel CBFVR-3 saat *bracing* saat mencapai tegangan 210 MPa memiliki nilai sama dengan variabel CBFVR-4. Deformasi *frame* variabel CBFVR-4 saat *bracing* mencapai tegangan maksimum 340 MPa juga lebih besar daripada CBFVR-3 dengan selisih nilai sebesar 2,8 mm atau sebesar 12,28%. Dapat dilihat pada **Tabel 13** untuk daktilitas dari CBFVR-4 mempunyai nilai lebih besar dari CBFVR-3 dengan selisih nilai sebesar 0,21 atau sebesar 12,28%.

Tabel 11. Perbandingan nilai energi disipasi CBFVR-3 dan CBFVR-4

Variabel	Energi Disipasi (kNm)	Selisih (%)
CBFVR-3	862,74	6,29
CBFVR-4	808,45	

Tabel 12. Perbandingan nilai deformasi *frame* CBFVR-3 dan CBFVR-4

Variabel	Deformasi <i>frame</i> (mm)		Selisih (%)	
	<i>Bracing</i> 210 MPa	<i>Bracing</i> 340 MPa	<i>Bracing</i> 210 MPa	<i>Bracing</i> 340 MPa
	MPa	MPa	MPa	MPa
CBFVR-3	13,3	20	0	12,28
CBFVR-4	13,3	22,8		

Tabel 13. Perbandingan nilai daktilitas CBFVR-3 dan CBFVR-4

Variabel	Daktilitas	Selisih (%)
CBFVR-3	1,5	12,28
CBFVR-4	1,71	

4. Simpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pada *preliminary design*, pemberian variasi berupa *single reduced section* dan *double reduced section* pada *bracing* menghasilkan perbedaan tidak begitu signifikan terhadap hasil analisa. Sedangkan untuk variasi berupa *single stiffener* dan *triple stiffeners* menghasilkan perbedaan yang cukup signifikan.
2. Pada variabel CBFVR-1 mengalami *base shear* terbesar pada saat rotasi 0,04 rad sebesar 2665,54 kN dengan modifikasi pada *bracing* menggunakan *single reduced bracing section* yang teletak pada tengah bentang *bracing*. Sedangkan yang mengalami *base shear* terkecil

pada saat rotasi 0,04 rad adalah variabel CBFVR-4 sebesar 2300,06 kN dengan modifikasi *bracing* menggunakan *triple stiffeners* pada bentang tengah *bracing*.

3. Dapat dilihat energi disipasi terbesar pada variabel CBFVR-3 sebesar 862,74 kNm dengan modifikasi *bracing* menggunakan *single stiffeners* pada bentang tengah *bracing*. Sementara yang mempunyai nilai disipasi energi terkecil pada variabel CBFVR-2 modifikasi *bracing* menggunakan *double reduced bracing section* yang terletak pada bentang tengah *bracing*.
4. Pada variabel CBFVR-2 mempunyai daktilitas terbesar, sebesar 2,26 dengan modifikasi pada *bracing* menggunakan *double reduced bracing section* yang terletak pada tengah bentang *bracing*. Sedangkan yang mempunyai daktilitas terkecil adalah variabel CBFVR-3 sebesar 1,5 dengan modifikasi *bracing* menggunakan *single stiffeners* pada bentang tengah *bracing*.
5. Untuk mode kegagalan pada semua variabel CBFVR telah sesuai dengan metodologi desain rangka bresing konsentrik, yaitu leleh pada *bracing* terlebih dahulu sebelum ada elemen penyusun lainnya yang mengalami kegagalan. Selanjutnya *bracing* mengalami *local buckling* dan mengalami *deform shape*.
6. Dari 4 variabel dalam penelitian ini, variabel 3 dan 4 yang memiliki modifikasi penambahan *stiffeners* pada *bracing* merupakan modifikasi yang paling mudah dalam pelaksanaan dilapangan.

Daftar Pustaka

- [1] N. A. Setiyowati, B. Suswanto, and R. Soewardjo, "Studi Perbandingan Perilaku Profil Baja WF dan HSS Sebagai Bresing pada SCBF Akibat Beban Lateral dengan Program Bantu Finite Element Analysis," *J. Tek. ITS*, vol. 1, no. 1, pp. D40–D45, 2012.
- [2] C.-H. Chen and H.-K. Hu, "Evaluation of loading sequences on testing capacity of concentrically braced frame structures," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 130, pp. 1–11, 2017.
- [3] F. Barbagallo, M. Bosco, E. M. Marino, and P. P. Rossi, "Achieving a more effective concentric braced frame by the double-stage yield BRB," *Eng. Struct.*, vol. 186, pp. 484–497, 2019.
- [4] C. W. Roeder, E. J. Lumpkin, and D. E. Lehman, "A balanced design procedure for special concentrically braced frame connections," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 67, no. 11, pp. 1760–1772, 2011.
- [5] S. Momenzadeh and J. Shen, "Seismic demand on columns in special concentrically braced frames," *Eng. Struct.*, vol. 168, pp. 93–107, 2018.
- [6] A. D. Sen, C. W. Roeder, D. E. Lehman, and J. W. Berman, "Nonlinear modeling of concentrically braced frames," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 157, pp. 103–120, 2019.
- [7] M. N. Naderpour and A. A. Aghakouchak, "Probabilistic damage assessment of concentrically braced frames with built up braces," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 147, pp. 191–202, 2018.
- [8] D. E. Lehman, C. W. Roeder, D. Herman, S. Johnson, and B. Kotulka, "Improved seismic performance of gusset plate connections," *J. Struct. Eng.*, vol. 134, no. 6, pp. 890–901, 2008.
- [9] P.-C. Hsiao, D. E. Lehman, and C. W. Roeder, "Improved analytical model for special concentrically braced frames," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 73, pp. 80–94, 2012.
- [10] F. Legeron, E. Desjardins, and E. Ahmed, "Fuse performance on bracing of concentrically steel braced frames under cyclic loading," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 95, pp. 242–255, 2014.
- [11] S. Bougoffa, O. Mezghanni, S. Durif, A. Bouchaïr, and A. Daoud, "Compression zone with partial stiffeners in beam-to-column steel connections," *Eng. Struct.*, vol. 229, p. 111674, 2021.