JURNAL REKAYASA SIPIL (JRS-UNAND)
Vol. 22 No. 1, Maret 2026
Diterbitkan oleh:
Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas (Unand)
ISSN (Print) : 1858-2133
ISSN (Online) : 2477-3484
http://jrs.ft.unand.ac.id

PERBANDINGAN PERILAKU SEISMIK GEDUNG BAJA SMF, EBF DAN CBF MENGGUNAKAN ANALISIS PUSHOVER

ALTIE SANTIKA ARIFIN[1*], MAULIDAH NUR RIZKA[2], EKKY SETIA FANI[3]

[1] *Mahasiswa Prodi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Jawa Barat*
[2] *Mahasiswa Prodi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Jawa Barat*
[3] *Mahasiswa Prodi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Jawa Barat*

[*] *Corresponding Author:* 25023022@mahasiswa.itb.ac.id

Naskah diterima: 2 Oktober 2025. Disetujui: 19 Desember 2025. Diterbitkan: 31 Maret 2026

ABSTRAK

Perencanaan struktur baja di daerah rawan gempa memerlukan pemilihan sistem rangka yang mampu memberikan keseimbangan antara kekakuan, daktilitas, dan kapasitas disipasi energi. Penelitian ini membahas perbandingan perilaku seismik gedung baja dua lantai dengan tiga sistem struktur: Special Moment Frame (SMF), Concentrically Braced Frame (CBF), dan Eccentrically Braced Frame (EBF). Analisis dilakukan menggunakan metode pushover pada perangkat lunak SAP2000 untuk mengevaluasi kapasitas beban lateral, distribusi sendi plastis, serta kurva kapasitas base shear–displacement. Parameter yang dianalisis meliputi PMM ratio, simpangan antar lantai, gaya geser dasar, berat struktur, dan daktilitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem CBF memiliki base shear terbesar namun perilaku yang sangat kaku, sedangkan EBF memberikan kombinasi paling seimbang antara kekakuan dan daktilitas. Sistem EBF menunjukkan berat struktur paling ringan, area disipasi energi terbesar pada kurva pushover, serta daktilitas tertinggi, sehingga paling direkomendasikan untuk digunakan pada gedung baja di wilayah gempa tinggi.

Kata kunci : pushover, SMF, CBF, EBF, daktilitas, base shear

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara dengan tingkat aktivitas seismik yang tinggi sehingga perencanaan struktur gedung harus mempertimbangkan ketahanan terhadap gempa secara serius. Dalam desain berbasis kinerja (performance-based design), pemilihan sistem struktur merupakan langkah penting untuk menjamin keselamatan, kenyamanan, dan efisiensi biaya konstruksi. Sistem rangka pemikul momen khusus (SMF) menawarkan daktilitas tinggi dan kemampuan deformasi inelastik yang besar, tetapi memiliki simpangan antar lantai yang relatif lebih besar. Sistem rangka bresing konsentris (CBF) memberikan

kekakuan lateral yang tinggi sehingga simpangan lebih kecil, namun cenderung kurang daktail dan lebih rentan terhadap kegagalan akibat buckling. Sistem rangka bresing eksentris (EBF) dikembangkan untuk menggabungkan kelebihan SMF dan CBF dengan menyediakan elemen link beam yang mampu menyerap energi secara signifikan.

Indonesia merupakan salah satu wilayah dengan tingkat aktivitas seismik tertinggi di dunia karena berada pada pertemuan Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Kondisi tektonik tersebut menyebabkan bangunan gedung harus dirancang dengan mempertimbangkan kapasitas struktur dalam menahan beban lateral serta kemampuan untuk tetap berfungsi setelah peristiwa gempa. Dalam pendekatan Performance-Based Seismic Design (PBSD), pemilihan sistem perlawanan lateral menjadi aspek krusial karena secara langsung memengaruhi kekakuan, kapasitas deformasi inelastik, disipasi energi, dan stabilitas struktur selama peristiwa gempa kuat (Sejal et al., 2011).

Secara umum, Special Moment Frame (SMF) dikenal karena daktilitas tinggi dan kemampuan deformasi inelastik yang besar, namun cenderung menghasilkan simpangan antar lantai yang lebih besar. Concentrically Braced Frame (CBF) menawarkan kekakuan lateral dan kapasitas awal yang besar sehingga simpangan relatif kecil, tetapi dalam kondisi inelastis sering menunjukkan keterbatasan daktilitas akibat risiko buckling pada anggota pengaku. Eccentrically Braced Frame (EBF) dikembangkan sebagai kompromi—menempatkan elemen link yang dikontrol untuk menyerap energi sehingga menggabungkan kekakuan CBF dan daktilitas SMF. Kajian-kajian sebelumnya menunjukkan pola perbedaan kinerja ini pada beragam konfigurasi dan tingkatan gedung (Karsaz et al, 2018)

Di antara berbagai sistem rangka baja tahan gempa, tiga sistem yang paling umum digunakan adalah Special Moment Frame (SMF), Concentrically Braced Frame (CBF), dan Eccentrically Braced Frame (EBF). Masing-masing sistem menunjukkan karakteristik kinerja yang berbeda. SMF dikenal unggul dari sisi daktilitas dan kapasitas rotasi plastis, namun umumnya menghasilkan simpangan antar lantai yang lebih besar akibat kekakuan awal yang relatif rendah. CBF menawarkan kekakuan tinggi dan drift yang kecil pada tahap awal pergerakan, tetapi pada kondisi inelastis sering menunjukkan degradasi kekuatan signifikan akibat buckling elemen bracing sehingga membatasi daktilitas total sistem. Sementara itu, EBF dikembangkan sebagai sistem hibrida yang mengombinasikan kelebihan SMF dan CBF dengan memusatkan disipasi energi pada elemen link, sehingga mampu memberikan kinerja inelastik yang lebih stabil dan mudah diprediksi.

Berbagai penelitian internasional menunjukkan adanya perbedaan kinerja yang konsisten antara ketiga sistem tersebut. Studi pada Engineering Structures, Journal of Constructional Steel Research, dan Earthquake Engineering and Structural Dynamics melaporkan bahwa SMF memiliki mekanisme pembentukan sendi plastis yang lebih teratur dan daktilitas tinggi; CBF memiliki kekakuan awal yang besar namun rentan terhadap brace buckling pada gempa kuat; sedangkan EBF menunjukkan disipasi energi yang unggul melalui deformasi elemen link, baik pada konfigurasi shear link maupun flexural link. Penelitian di Indonesia, baik melalui jurnal nasional maupun tugas akhir di berbagai perguruan tinggi, juga telah mengkaji kinerja ketiga sistem rangka tersebut, terutama pada bangunan bertingkat menengah hingga tinggi, variasi bentuk bracing, serta optimasi panjang elemen link.

Namun demikian, tinjauan pustaka menunjukkan bahwa penelitian yang secara khusus membandingkan kinerja SMF, CBF, dan EBF pada bangunan baja bertingkat rendah (low-rise), terutama dua lantai, masih sangat terbatas. Padahal, bangunan baja rendah memiliki tingkat penggunaan yang tinggi pada sektor industri, komersial, dan pendidikan di Indonesia. Selain itu, sebagian besar studi sebelumnya hanya berfokus pada parameter

kinerja yang bersifat umum seperti drift maksimum atau gaya geser dasar, sedangkan analisis mendalam terkait mekanisme pembentukan sendi plastis, nilai rasio PMM, daktilitas global, serta kapasitas struktural residual belum banyak dilakukan secara terintegrasi. Dengan demikian, terdapat kesenjangan penelitian yang perlu diisi untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai perilaku seismik sistem rangka baja pada bangunan rendah di wilayah rawan gempa.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan perilaku seismik gedung baja dua lantai menggunakan tiga sistem perlawanan lateral (SMF, CBF, dan EBF) melalui analisis statik nonlinier (pushover analysis) pada perangkat lunak SAP2000. Evaluasi dilakukan terhadap berbagai parameter kinerja, antara lain kapasitas gaya geser dasar, distribusi sendi plastis, simpangan antar lantai, rasio PMM kolom, daktilitas global, serta berat total struktur. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah berupa pemahaman yang lebih mendalam mengenai pemilihan sistem rangka baja yang optimal untuk bangunan bertingkat rendah di wilayah seismik tinggi, serta menjadi referensi bagi perencana dan praktisi struktur dalam menentukan sistem struktur yang efisien, aman, dan sesuai konteks Indonesia (Sejal et al., 2011).

2. METODE PENELITIAN

Metode analisis yang digunakan berupa analisis kualitatif dengan analisis numerik. Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang terstruktur, dimulai dari pemodelan struktur, penentuan beban, hingga pelaksanaan analisis pushover. Bagan alir perencanaan struktur dapat dilihat pada Gambar 1 dan Denah gedung pada pada Gambar 2
Detail perencaan sebagai berikut :

Fungsi Bangunan	: Gedung Perkantoran
Lokasi	: Kota Bandung
Jenis Konstruksi	: Struktur Baja
Jenis Tanah	: Sedang
Kategori Desain Seismik	: KDS D

Material yang digunakan harus memenuhi spesifikasi, peraturan dan standar yang akan digunakan. Material yang digunakan mempunyai spesifikasi berikut :

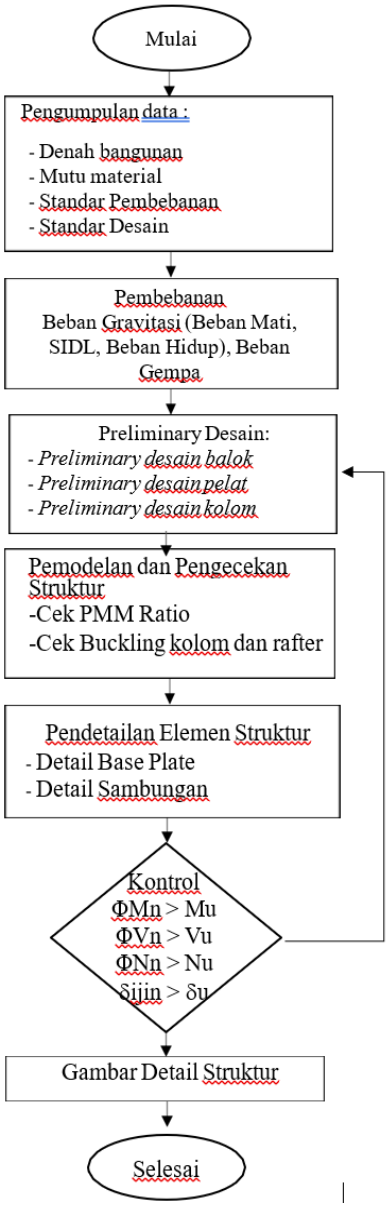
a. Baja Profil
Berdasarkan SNI 7860:2015 pasal A3.1 mengenai spesifikasi baja struktural yang digunakan dalam sistem penahan gaya seismik (SPGS, Baja profil yang digunakan pada struktur utama memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Tegangan leleh	: A36 atau SS400, fy 240 MPa ; fu 370 MPa
Modulus elastisitas	: Es = 200000 MPa

b. Baut
- High Strength Bolt : JIS B 1186 F10T / ASTM A325, atau setara
- Common Strength Bolt : JIS B 1180 F10T / ASTM A307, atau setara
- Anchor Bolt : JIS G3101 SS400 / ASTM A325, atau setara

Tahapan pemodelan struktur meliputi pembuatan geometri bangunan, pendefinisian material, penetapan profil elemen struktur, dan penerapan properti nonlinear seperti hinge momen, hinge aksial, serta link elemen untuk sistem EBF. Selanjutnya, pembebanan

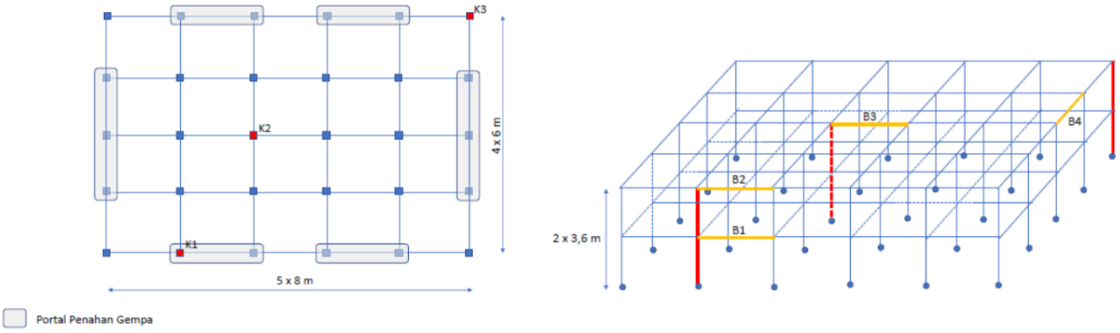
struktur ditentukan berdasarkan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019, yang mencakup beban mati, beban hidup, serta beban gempa statik ekivalen yang dihitung berdasarkan parameter respons desain wilayah Bandung. Kombinasi pembebanan digunakan sesuai ketentuan LRFD dan kombinasi khusus untuk analisis pushover. Analisis elastis awal dilakukan untuk memastikan kekakuan, distribusi gaya, dan batasan simpangan memenuhi persyaratan SNI sebelum dilakukan analisis nonlinear.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Analisis pushover dilakukan dengan menerapkan gaya lateral bertahap menggunakan pola beban uniform dan modal hingga struktur mencapai kondisi kinerja atau mekanisme runtuh. Pada tahap ini, kurva kapasitas (base shear–displacement), distribusi hinge plastis, serta nilai drift antar lantai diperoleh sebagai dasar evaluasi perilaku nonlinear. Properti hinge ditentukan mengacu pada FEMA 356 dan ATC-40, termasuk titik leleh, kapasitas maksimum, dan degradasi kekuatan elemen. Hasil analisis kemudian dievaluasi untuk membandingkan performa ketiga sistem struktur berdasarkan base shear maksimum,

daktilitas, disipasi energi, mekanisme plastis, drift antar lantai, serta berat struktur. Dari rangkaian tahapan tersebut diperoleh kesimpulan mengenai sistem struktur yang paling sesuai untuk digunakan pada bangunan baja dua lantai yang menjadi objek penelitian.



Gambar 1. Detail Denah Gedung

Pembebanan Struktur mengikuti SNI 1727:2020 antara lain :

1. Beban Mati dan Beban Mati Tambahan

beban yang berasal dari berat sendiri struktur dan komponen permanen lainnya oleh software SAP2000. Beban mati tambahan (superimposed dead load / SDL) adalah beban mati yang tidak berasal dari berat sendiri elemen struktur, pada Tabel 1 dapat dilihat jenis beban mati tambahan yang diaplikasikan.

Tabel 1. Beban Mati Tambahan

No	Jenis Beban Mati	Besaran Beban kg/m^2
1	Beban Keramik	112.17
2	Beban Ceiling	10
3	Beban Slab Deck	288
4	Beban Metal Deck	7.35
5	Beban Dinding Bata Ringan	110

2. Beban Gempa

Pengaruh gempa pada struktur gedung ditentukan berdasarkan analisa dinamik karena gaya yang terjadi pada struktur diakibatkan oleh gerakan tanah. Gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarannya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2%. (periode ulang gempa 2500 tahun). Untuk perencanaan gedung tahan gempa berdasarkan pada SNI 1726:2019 tentang "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung dan Non Gedung". Parameter respon spektra Kota Bandung pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Parameter Perhitungan Respon Spektra Bandung

Parameter Respons Spektra		
Lokasi Bangunan	Jln Taman Sari	Bandung
	Lintang	6.891272
	Bujur	107.607213
Kategori Resiko	Gedung Perkantoran	II
Faktor Keutamaan	I_e	1,0

Klasifikasi Situs		SD (Tanah Sedang)
Percepatan gempa MCEr terpetakan untuk periode pendek	S_s	1.217831
Percepatan gempa MCEr terpetakan untuk periode 1 detik	S_1	0.522935
Faktor amplikasi periode pendek	F_a	1.012868
Faktor amplikasi periode 1 detik	F_v	1.777065
Percepatan pada periode pendek	S_{Ms}	1.233502
Percepatan pada periode 1 detik	S_{M1}	0.929290
Percepatan desain pada periode pendek	S_{DS}	0.822334
Percepatan desain pada periode 1 detik	S_{D1}	0.619527
Parameter Periode	T_0	0.150675
	T_s	0.753375

3. Kombinasi Pembebanan

Dalam merencanakan sebuah struktur bangunan diperlukan perencanaan pembebanan terhadap bangunan tersebut, sehingga struktur bisa menahan beban – beban yang akan terjadi sebagai struktur yang statis 3 dimensi. Dalam perhitungan pembebanan faktor pembebanan yang digunakan adalah sebagai berikut :

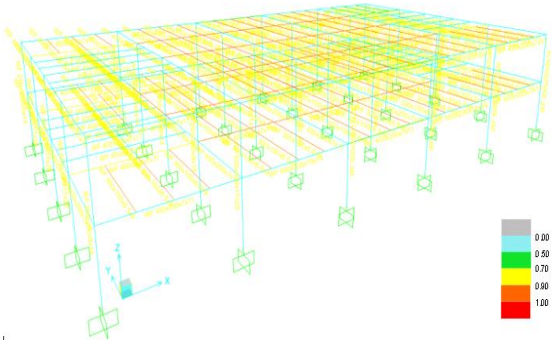
1. 1.4 DL
2. 1.2 DL + 1.6 LL + 0.5 Lr
3. 1.2 DL + 1.6 Lr + 1 LL
4. 1.2 DL + 1.6 Lr ± 0.5 Wx
5. 1.2 DL + 1.6 Lr ± 0.5 Wy
6. 1.2 DL + 1.6 Lr ± 0.375 Wx ± 0.375 Wy
7. 1.2 DL + 1 LL + 0.5 Lr ± 1 Wx
8. 1.2 DL + 1 LL + 0.5 Lr ± 1 Wy
9. 1.2 DL + 1 LL + 0.5 Lr ± 0.75 Wx ± 0.75 Wy
10. (1.2+0.20 Sds) DL + 1 LL ± 1 EQX ± 0.3 EQY
11. (1.2+0.20 Sds) DL + 1 LL ± 0.3 EQX ± 1 EQY
12. 0.9 DL ± 1 Wx
13. 0.9 DL ± 1 Wy
14. 0.9 DL ± 0.75 Wx ± 0.75 Wy
15. (0.9-0.20 Sds) DL ± 1 EQX ± 0.3 EQY
16. (0.9-0.20 Sds) DL ± 0.3 EQX ± 1 EQY

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

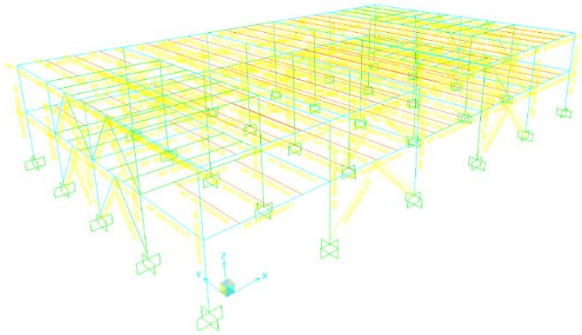
Analisis gedung dilakukan dengan pemodelan pada SAP2000 dan dengan tiga tipe struktur rangka yaitu : *Special Moment Frame, Concentrically Braced Frame, Eccentrically Braced Frame*

3.1. Pengecakan PMM Ratio

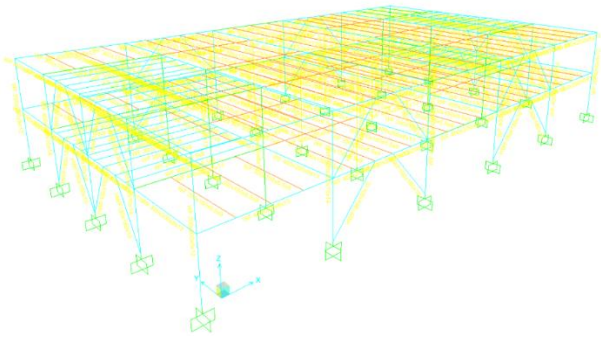
Pengecekan PMM rasio dilakukan untuk memastikan integritas struktur, nilai PMM rasio harus kurang dari 1.00. berdasarkan output dari program seperti dibawah ini, stress rasio pada elemen struktur baja masih kurang dari 1.00. Hasil pengecekan PMM ratio dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 2. Pengecekan PMM Ratio Sistem SMF



Gambar 3. Pengecekan PMM Ratio Sistem CBF



Gambar 4. Pengecekan PMM Ratio Sistem EBF

Pada pemodelan ini, sistem Eccentrically Braced Frame (EBF) menunjukkan nilai PMM ratio yang lebih rendah dan lebih stabil dibandingkan SMF maupun CBF, yang mengindikasikan bahwa kolom pada sistem ini bekerja dalam kondisi tegangan yang lebih aman terhadap interaksi aksial–momen. Kondisi ini terutama disebabkan oleh mekanisme kerja elemen link, yang berfungsi sebagai pusat deformasi inelastik dan elemen disipasi energi utama pada EBF. Ketika struktur menerima beban gempa, link mengalami rotasi plastis terlebih dahulu sehingga sebagian besar energi getaran terserap pada komponen tersebut. Dengan demikian, gaya aksial tambahan maupun momen yang diteruskan ke kolom menjadi jauh lebih kecil, sehingga demand PMM pada elemen kolom EBF tetap dalam batas yang lebih rendah dan tidak mendekati envelope kapasitasnya. Sebaliknya, pada SMF, disipasi energi terjadi langsung pada balok dan sebagian momen diteruskan ke kolom, sehingga kolom harus menahan

kombinasi momen–aksial yang lebih besar. Hal ini meningkatkan nilai PMM ratio pada beberapa lantai. Sementara pada CBF, kolom menerima kontribusi gaya aksial signifikan akibat aksi bracing, sehingga PMM ratio cenderung lebih tinggi dibanding dua sistem lainnya. Oleh karena itu, distribusi dan nilai PMM ratio yang lebih rendah pada EBF menegaskan bahwa portal EBF memiliki kapasitas cadangan (reserve strength) yang lebih baik, serta perilaku inelastik yang lebih terkontrol, sehingga menghasilkan daktilitas yang lebih tinggi dan performa seismik yang lebih unggul dibandingkan SMF dan CBF.

3.2. Pemeriksaan Simpangan Antar Lantai

Penentuan simpangan antar lantai diatur dalam SNI 1726:2019 pasal 7.8.6, berdasarkan pada kinerja batas ultimit. Penentuan simpangan antar tingkat desain harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau. Hasil perhitungan bisa dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengecekan Drift Ratio

Sistem	Lantai	δ_x (mm)	δ_y (mm)	$\delta_{x_2} - \delta_{x_1}$ (mm)	$\delta_{y_2} - \delta_{y_1}$ (mm)	Δ_x (mm)	Δ_y (mm)	H (mm)	H x 0.02 / ρ (mm)	Remark
SMF	LT. 2	14.960	15.340	9.330	9.260	51.315	50.930	3600	72.000	O.K
	LT. 1	5.630	6.080	5.630	6.080	30.965	33.440	3600	72.000	O.K
	BASE	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	-
CBF	LT. 2	2.26	1.92	1.88	0.1	9.4	0.5	3600	72.000	O.K
	LT. 1	0.38	1.82	0.38	1.82	1.9	9.1	3600	72.000	O.K
	BASE	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	-
EBF	LT. 2	1.99	2.7	0.91	1.25	3.64	5	3600	72.000	O.K
	LT. 1	1.08	1.45	1.08	1.45	4.32	5.8	3600	72.000	O.K
	BASE	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	-

Data drift menunjukkan bahwa CBF memiliki drift antar lantai paling kecil, sedangkan SMF memiliki drift paling besar, dan EBF berada di antara keduanya. Drift terkecil pada CBF merupakan konsekuensi langsung dari kekakuan lateral yang besar sehingga struktur mengalami deformasi yang relatif kecil walaupun menerima gaya lateral besar. Namun, drift kecil ini bukan indikator performa inelastik yang baik, karena pada pushover terlihat adanya penurunan kekuatan yang signifikan setelah bracing mencapai titik buckling. Sebaliknya, drift besar pada SMF mencerminkan fleksibilitas sistem dan periode dominan yang panjang. Meskipun deformasi besar dapat diterima oleh sistem yang bersifat daktail, drift yang tinggi meningkatkan risiko kerusakan non-struktural seperti panel dinding, façade, dan komponen arsitektural. Hal ini berkesesuaian dengan gaya dalam yang dibandingkan pada Tabel 4

Tabel 4. Resume Gaya Elemen

Sistem	Elemen	P (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)	T (kN-m)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
SMF	K1	0	31,2	3,162	0,0016	10,8219	161,4261
		-344,961	-78,693	-3,162	-0,0016	-10,83	-137,18
	K2	0	2,176	0,941	0,000155	3,2182	8,149

		-658,622	-2,177	-0,941	-0,00016	-3,2182	-8,1553
	K3	0	2,886	0,823	0,000155	3,0209	10,003
		-126,361	-2,887	-0,823	-0,00016	-3,0197	-10,004
	B1	0	89,847	2,24E-15	0,000178	3,37E-15	79,426
		0	-89,524	-2,2E-15	-0,00018	-3,4E-15	-170,748
	B2	0	88,972	4,48E-15	0,000167	4,5E-15	85,858
		0	-88,565	-4,5E-15	-0,00016	-4,5E-15	-161,426
	B3	0	122,504	2,29E-17	0	3,8E-17	324,9535
		0	-122,504	-3,2E-17	0	-2,6E-17	-6,3E-15
	B4	0	89,471	4,47E-15	0,000168	4,47E-15	68,5696
		0	82,646	-4,5E-15	-0,00016	-4,5E-15	-146,535
	K1	4,447,096	0	-4,428	0,0000204	15,9425	197,406
		-88,938	-91,02	-12,067	-0,00002	-27,5003	-131,259
	K2	0	0,678	0,279	-7,89E-06	0,4187	2,4215
		-657,592	-1,863	-0,163	7,89E-06	-0,5849	-4,197
	K3	0	0.678	0.283	-7,9E-06	0,4285	2,4423
		-124,918	-1,863	-0.162	1,74E-17	-0,5886	-4,2637
CBF	B1	0	125,693	1,56E-15	-3,1E-15	1,74E-17	198,629
		0	-122,119	0	4,03E-05	-3,1E-15	-197,406
	B2	0	143,813	1,56E-15	-3,9E-05	1,8E-15	220,6932
		0	-137,41	-1,8E-15	0,000	-3,9E-15	-248,795
	B3	0	122,946	1,04E-15	-0,000	3,9E-16	325,8374
		0	-122,946	-2.00E-16	2,16E-05	-2.00E-15	0
	B4	0	204,995	1,67E-14	-1,8E-05	8,3E-15	237,4998
		0	-153,347	-3,5E-17		-8,3E-15	-316,269
	K1	0	4,087	0,423	6,11E-05	1,1609	11,2404
		-299,855	-4,027	-0,419	-6.00E-05	-1,1541	-11,14668
	K2	0	1,039	0,279	3,25E-05	0,7616	2,8658
		-739,806	-1,027	-0,282	-3,2E-05	-0,7648	-2,8467
	K3	0	1,141	0,294	3,25E-05	0,8042	3,1426
		-126,052	-1,125	-0,296	-3,2E-05	-0,8042	-3,1145
	B1	0	36,376	2,3E-15	3,8E-16	3,64E-15	38,0956
EBF		0	-37,526	-2,3E-15	-3,8E-16	-3,7E-15	-35,9548
	B2	0	39,593	2,25E-15	4,41E-18	3,64E-15	38,7925
		0	-39.295	2,2E-15	-4,4E-18	-3,64E-15	-42,6711
	B3	0	122,936	-2,23E-15	0,000	2,23E-15	325,8374
		0	-122,946	-2,2E-15	-0,000	-2,2E-15	0
	B4	0	44,099	8,9E-15	1,09E-18	8,96E-15	26,8791
		0	-40,418	-9.00E-15	-1,1E-18	-8,9E-15	-33,5722

Tabel resume gaya elemen memberikan gambaran mengenai distribusi gaya internal pada balok, kolom, dan bracing untuk masing-masing sistem struktur. Berdasarkan hasil pemodelan, terlihat bahwa sistem CBF menghasilkan gaya aksial terbesar pada elemen kolom dan bracing, yang merupakan konsekuensi dari mekanisme penahan gaya lateral yang berbasis aksi aksial. Nilai axial force yang tinggi pada CBF menunjukkan bahwa sebagian besar gaya geser lantai dialihkan melalui elemen bracing, sehingga kolom menerima gaya tekan tambahan yang signifikan. Hal ini berimplikasi pada meningkatnya PMM ratio dan besarnya kebutuhan kapasitas kolom pada sistem tersebut.

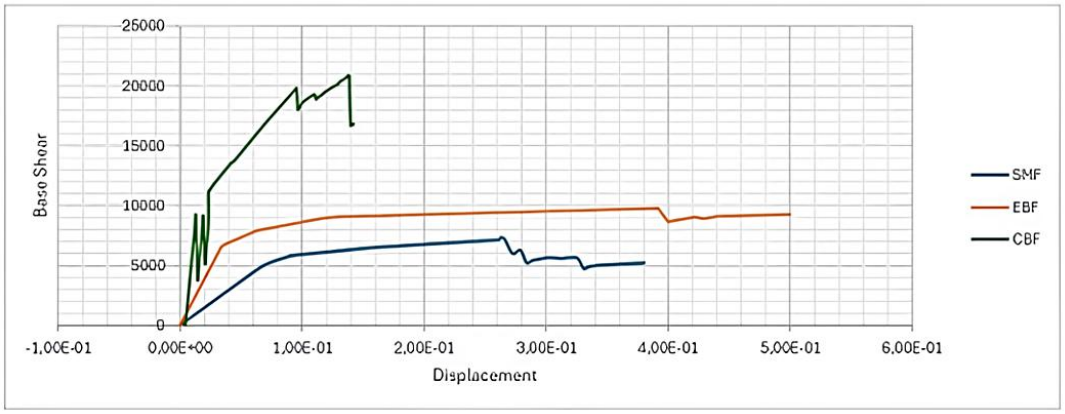
Pada sistem SMF, gaya internal didominasi oleh momen lentur pada balok dan kolom, sesuai dengan karakteristik sistem rangka momen yang mengandalkan aksi lentur sebagai mekanisme utama penahan beban lateral. Resume gaya menunjukkan bahwa momen pada balok SMF relatif lebih besar dibandingkan dua sistem lainnya, terutama pada lantai-lantai

atas di mana rotasi relatif lebih besar terjadi. Sebaliknya, gaya aksial pada elemen SMF relatif kecil, menunjukkan bahwa kontribusi elemen kolom terhadap transfer beban aksial akibat gempa tidak sebesar pada CBF.

Adapun pada sistem EBF, distribusi gaya internal menunjukkan pola yang lebih seimbang. Elemen link menerima gaya geser dan momen terbesar, yang menandai keberhasilan sistem dalam memusatkan deformasi inelastik pada komponen tersebut. Dengan demikian, gaya aksial dan momen pada kolom EBF berada pada tingkat yang lebih rendah, sehingga elemen kolom beroperasi jauh di bawah envelope kapasitasnya. Pola distribusi gaya ini sejalan dengan konsep desain EBF yang memanfaatkan link sebagai elemen fuse untuk disipasi energi terkontrol. Gaya internal pada balok dan kolom EBF juga menunjukkan stabilitas yang lebih baik dibanding SMF, karena sebagian besar momen plastis tidak dialihkan ke elemen utama.

3.3. Analisis Push Over

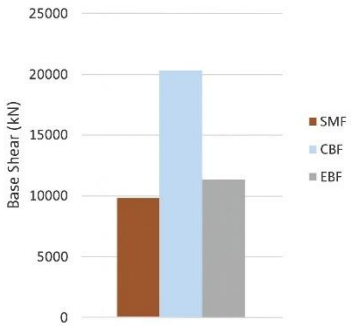
Metode analisis nonlinier statik yang digunakan untuk mengevaluasi kapasitas kinerja struktur bangunan terhadap gempa dengan cara menerapkan beban lateral statik secara bertahap dan monoton hingga mencapai keruntuhan atau batas yang ditentukan. Tinjauan dilakukan pada base shear (gaya geser dasar) dan analisis push-over yang dilakukan pada setiap system pada arah x dan y. Pada dasarnya nilai base shear dan kecenderungan kurva push-over pada arah x maupun y sama. Berikut adalah plot grafik push-over untuk ketiga system struktur pada Gambar 6.



Gambar 5. Grafik Push Over SMF, EBF, dan CBF

Dari hasil pemodelan didapatkan nilai base shear paling besar adalah system CBF namun memberikan perilaku struktur yang sangat kaku dibantingkan 2 sistem lainnya. Dari grafik diatas system yang memiliki perilaku paling baik dengan area disipasi gaya gempa paling besar adalah system EBF.

Pada pemodelan kasus ini EBF memiliki daktilitas yang lebih baik dikarenakan pada portal penahan gempa system EBF kapasitas portal masih dikondisi yang lebih baik dibandingkan pada system SMF yang memungkinkan daklititas EBF menjadi lebih baik yang terlihat pada analisis PMM rasio. Berikut adalah perbandingan gaya geser dasar dari 3 sistem pada arah x dan arah y pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 6. Gaya Geser Dasar X



Gambar 7. Gaya Geser Dasar Y

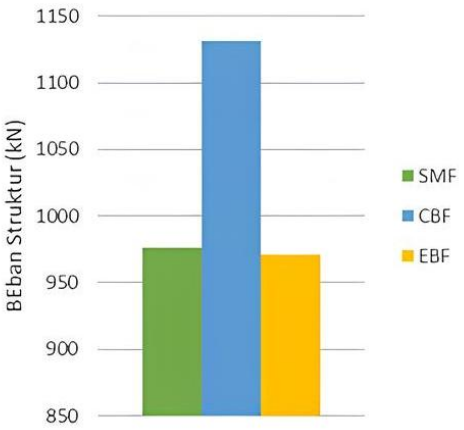
Tabel 5. Gaya Geser Dasar

Arah	SMF (kN)	CBF (kN)	EBF (kN)
-X	7371	19761	9803
-Y	8838	24700	17180

Gaya geser dasar paling tinggi dihasilkan oleh struktur dengan system CBF. Base shear CBF memiliki nilai yang tinggi karena rangka dengan bracing konsentrik memiliki kekakuan yang tinggi karena distribusi gaya dalam CBF langsung melalui elemen bracing, menghasilkan gaya geser yang lebih tinggi pada dasar bangunan. R-Factor untuk CBF sebesar 6 dan lebih rendah dibandingkan SMF dan EBF (R = 8) . R-Factor adalah faktor reduksi yang digunakan dalam desain seismik untuk memperhitungkan daktilitas dan kapasitas energi absorbsi struktur. Karena CBF lebih kaku dan kurang daktil, R-Factor-nya lebih kecil, menghasilkan base shear yang lebih tinggi. Perbandingan berat struktur dengan 3 sistem berbeda dapat dilihat pada Gambar 9 dan Tabel 6.

Berat struktur secara teoritis SMF akan memberikan berat struktur paling besar karena semua gaya gempa diserap oleh kolom balok dimana portal kolom balok harus mampu menahan gaya yang cukup besar menyebabkan kebutuhan profil besar, namun berat total struktur sangat bergantung pada desain spesifik dan material yang digunakan. Pada kasus kali ini CBF menunjukkan hasil yang lebih tinggi karena pada kondisi post buckling bukan hanya gaya lateral dari gempa yang menentukan dimensi profil namun juga terkait tambahan gaya unbalanced force dari bresing yang terpasang. Perhitungan post-buckling pada CBF dihitung untuk memastikan bahwa struktur dapat tetap menahan beban dan mempertahankan stabilitas setelah elemen-elemen bracing mengalami buckling (tekuk). Bresing SCBF juga diwajibkan highly ductile member maka hal ini juga menyebabkan

kebutuhan dimensi kolom dan balok membesar. Selain kinerja, gaya geser dan berat struktur ketiga struktur dibandingkan juga terhadap daktilitas, hasil perhitungan daktilitas dapat dilihat pada Tabel 7.



Gambar 8. Beban Struktur

Tabel 6. Berat Struktur

SMF (kN)	CBF (kN)	EBF (kN)
976,428	1131,749	970,921

Tabel 7. Daktilitas

	SMF	CBF	EBF
Leleh	0.2723	0.001	0.4016
Ultimit	0.3253	0.001	0.5
Daktilitas	1.1947	1	1.2448

Perhitungan daktilitas menunjukkan bahwa pada sistem CBF, nilai daktilitas yang diperoleh relatif rendah dan bahkan sama dengan nilai pada titik leleh pertama. Hal ini terjadi karena gaya geser dasar mengalami penurunan lebih dari 20% segera setelah terjadinya pelelehan awal, sehingga berdasarkan kriteria kinerja pushover, struktur dianggap telah memasuki kondisi kegagalan global. Penurunan kekuatan yang tajam tersebut merupakan karakteristik khas sistem bracing konsentris, di mana elemen bracing yang bekerja dominan secara aksial sangat rentan mengalami buckling saat mencapai batas tekannya. Ketika buckling terjadi, kapasitas tekan elemen menurun secara drastis, menyebabkan hilangnya kekakuan lateral dan penurunan kekuatan global rangka.

Kehilangan kapasitas ini memaksa sistem untuk melakukan redistribusi gaya internal ke kolom dan balok yang sebelumnya tidak didesain sebagai elemen utama disipasi energi. Redistribusi semacam ini menghasilkan peningkatan tiba-tiba pada permintaan momen dan geser pada elemen-elemen tersebut, sehingga struktur tidak memiliki kemampuan untuk memasuki rentang inelastik yang lebih besar. Oleh karena itu, CBF menunjukkan daktilitas yang sangat terbatas, sesuai dengan perilaku yang dapat dilihat dalam literatur bahwa bracing konsentris umumnya tidak mampu mempertahankan kapasitas pasca-buckling dan hanya menyediakan daktilitas rendah dalam respons gempa intensitas tinggi.

Sebaliknya, sistem SMF menunjukkan nilai daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan CBF karena mekanisme deformasi inelastik pada SMF terjadi secara bertahap melalui pembentukan sendi plastis pada balok. Namun demikian, distribusi plastisitas yang tersebar dan deformasi lateral yang besar menyebabkan SMF tidak seefisien EBF dalam mengendalikan mekanisme keruntuhan. Pada sistem EBF, nilai daktilitas yang diperoleh merupakan yang paling tinggi dibandingkan kedua sistem lainnya. Hal ini terjadi karena elemen link yang terdapat pada EBF berfungsi sebagai structural fuse yang dirancang khusus untuk memasuki kondisi plastis lebih dahulu. Link menerima gaya geser dan momen terbesar, sehingga energi gempa diserap secara terlokalisasi dan terkendali pada elemen tersebut. Dengan terkendalinya lokasi dan urutan terbentuknya deformasi plastis, elemen utama seperti balok dan kolom tetap berada dalam kondisi elastis lebih lama. Konsekuensinya, struktur dapat mengalami deformasi lateral yang lebih besar sebelum mengalami degradasi kapasitas signifikan, menghasilkan kapasitas daktilitas yang baik pada EBF.

4. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian di atas dan pembahasan pada bab sebelumnya maka dapat di simpulkan sebagai berikut:

1. CBF memiliki base shear terbesar pada analisis push-over karena faktor reduksi gempa (R = 6) lebih kecil dibandingkan SMF dan EBF (R = 8), sehingga sistem ini lebih kaku namun kurang daktil.
2. CBF mengalami penurunan gaya geser dasar >20% setelah leleh pertama, yang menunjukkan indikasi kegagalan struktur akibat buckling dan redistribusi gaya internal.
3. EBF menunjukkan daktilitas terbaik karena rasio PMM yang lebih optimal, sehingga elemen struktural mampu mengalami deformasi lebih besar sebelum keruntuhan.
4. Untuk gedung baja 2 lantai di bandung dalam studi ini, EBF merupakan sistem paling sesuai, ditinjau dari kinerja struktur, drift, base shear, disipasi energi, dan berat struktur. EBF memberikan keseimbangan terbaik antara kekakuan dan daktilitas meskipun perancangannya lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

American Society of Civil Engineers. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

Benita, D. R. (2019). *Analisis Perbandingan Kinerja Struktur Baja SRBKK Tipe Inverted-V Pada Gedung Bertingkat 12, 16, dan 20 Lantai*. Skripsi, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung.

Christian, J. (2022). *Perbandingan Kinerja Struktur Baja Sistem Tunggal Rangka Terbreis Konsentris Tipe Multi-Story X dengan 3 Bentang Bresing pada Bangunan 12 dan 18 Lantai Menggunakan Profil Wide Flange (WF) dan Hollow Structural Section (HSS)*, 100–106.

Faytarouni, M., et al. (2019). Improved brace fracture model for seismic evaluation of concentrically braced frames. *Engineering Structures*, 206, 110184. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110184

Kairatun, I., Budiman, E., & Jamal, M. (2019). Analisis pushover pada struktur baja dengan bresing menggunakan SAP2000. *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Sipil*, 3(1), 50–64.

Karsaz, K., & Razavi Tosee, S. V. (2018). A comparative study on the behavior of steel moment-resisting frames with different bracing systems based on a response-based damage index. *Civil Engineering Journal*, 4(6), 1354–1373. https://doi.org/10.28991/cej-0309178

Kharisma, R. Z. (2022). *Analisis Kinerja Struktur Pada Gedung Menggunakan Metode Time History Analysis*. Skripsi, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung.

Ananda, N. R. (2021). *Analisis Pengaruh Jumlah Tingkat terhadap Respon Struktur Baja SRBKK Tipe Inverted-V dengan Metode Analisis Riwayat Waktu*. Skripsi, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung.

Sejal, P. D., Vasanwala, S. A., & Desai, A. K. (2011). Performance based seismic design of structure: A review. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 1(4), 795–803.