

ANALISIS EFEKTIVITAS SISTEM *BRACING-X* DAN *INVERTED-V* PADA STRUKTUR BAJA EMPAT LANTAI DI WILAYAH GEMPA TINGGI

I Gede Gegiranang Wiryadi^{1*}, I Ketut Diartama Kubon Tubuh²,
I Putu Agus Putra Wirawan³, I Gede Jaya Putra⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mahasaraswati Denpasar

*Email: gegiranangwiryadi@unmas.ac.id

ABSTRAK: Studi ini mengevaluasi efektivitas dua Konfigurasi sistem bracing-*X* dan inverted-*V* pada struktur baja empat lantai yang berfungsi sebagai bangunan pendidikan di wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi. Analisis dilakukan menggunakan metode linier dinamis respons spektrum untuk membandingkan kinerja seismik kedua sistem terhadap struktur open frame. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem bracing-*X* dan inverted-*V* mampu meningkatkan kapasitas gaya geser dasar secara signifikan dibandingkan dengan struktur open frame. Selain itu, periode getar alami struktur dengan bracing lebih pendek, yang menunjukkan kekakuan yang lebih tinggi. Penerapan bracing juga menghasilkan simpangan maksimum dan simpangan antar tingkat lebih kecil, sehingga meningkatkan kemampuan layan bangunan. Struktur bracing memungkinkan pengurangan penggunaan baja tanpa mengorbankan kinerja seismik. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem bracing meningkatkan kekakuan, kapasitas gaya geser dasar dan memberikan efisiensi material yang lebih baik dibandingkan dengan sistem open frame.

Kata Kunci: Struktur Baja, Struktur *Open Frame*, *Bracing-X*, *Bracing Inverted-V*, Beban Gempa

ABSTRACT: This study evaluates the effectiveness of two bracing system configurations—*X* and *Inverted-V*—on a four-story steel structure functioning as an educational building in a region with a high seismicity level. Analysis was conducted using the linear dynamic response spectrum method to compare the seismic performance of both systems against an open frame structure. The results indicate that the *X* and inverted-*V* bracing systems can significantly increase the base shear capacity compared to the open frame structure. In addition, the fundamental period of the structure with bracing is shorter, indicating higher stiffness. The application of bracing also results in smaller total drift and inter-story drift, thus improving the serviceability of the building. The bracing structure allows for a reduction in steel usage without compromising seismic performance. These findings indicate that the bracing system improves stiffness, base shear capacity and offers better material efficiency compared to the open frame system.

Keywords: Steel Structure, Open Frame Structure, *Bracing-X*, *Bracing Inverted-V*, Earthquake Load

PENDAHULUAN

Indonesia menjadi salah satu negara yang tingkat kerawanan gempa tertinggi di dunia, karena terletak di pertemuan tiga lempeng tektonik aktif yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik. Aktivitas seismik yang tinggi ini telah menyebabkan berbagai bencana gempa bumi yang merusak infrastruktur dan menelan korban jiwa dalam jumlah besar. Beberapa kejadian gempa besar seperti gempa Yogyakarta tahun 2006, gempa Padang tahun 2009, serta gempa Lombok dan palu tahun 2018. Hal ini menunjukkan betapa rentannya bangunan-bangunan di Indonesia terhadap gaya gempa, terutama bangunan publik seperti sekolah dan fasilitas pendidikan yang seharusnya memiliki tingkat keamanan struktural yang tinggi.

Dalam praktik rekayasa struktur di Indonesia, sistem *open frame* (rangka terbuka tanpa elemen penahan lateral tambahan) masih banyak digunakan, terutama pada bangunan bertingkat rendah hingga menengah. Sistem ini menawarkan fleksibilitas ruang dan kemudahan konstruksi, namun memiliki kelemahan signifikan dalam menghadapi gaya lateral akibat gempa (Shi et al., 2016). Kekakuan lateral yang rendah dan potensi terjadinya mekanisme *soft story* menjadikan sistem *open frame* kurang ideal untuk bangunan di zona gempa tinggi (Sudarsana et al., 2021).

Sebagai alternatif, sistem struktur bracing (*bracing system*) telah banyak dikembangkan untuk meningkatkan kapasitas lateral dan stabilitas bangunan (Benita et al., 2019; Al-Safi et al., 2021; Meena et al., 2021; Putra et al., 2022). *Bracing-X* dan *inverted-V* merupakan dua konfigurasi yang umum digunakan pada struktur baja. *Bracing-X* dikenal memiliki distribusi gaya yang merata dan kapasitas geser yang tinggi, sedangkan *inverted-V* menawarkan deformabilitas yang lebih baik dan efisiensi material (Yongkang and Zhengzhong, 2012; Kianmehr, 2021; Tatang and Tjong, 2022; Wiryadi et al., 2024). Namun, masing-masing sistem memiliki kelebihan dan kekurangan, sehingga perlu dikaji secara

komprehensif, terutama dalam konteks sebagai pilihan sistem struktur untuk bangunan berlokasi di wilayah gempa tinggi.

Untuk mengevaluasi performa seismik dari sistem struktur tersebut, digunakan pendekatan analisis utama yaitu analisis linier dinamis respon spektrum. Analisis respon spektrum memberikan gambaran perilaku struktur terhadap spektrum percepatan gempa berdasarkan karakteristik tanah dan bangunan (Gunawan et al., 2021; Trangipani et al., 2022). Respon struktur terhadap beban gempa yang dikerjakan dengan metode respon spektrum dapat memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap efektivitas sistem struktur dalam menghadapi gempa.

Berdasarkan kondisi tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan efektivitas sistem *bracing-X* dan *inverted-V* terhadap sistem *open frame* pada struktur baja empat tingkat yang difungsikan sebagai bangunan pendidikan di wilayah gempa tinggi. Evaluasi dilakukan melalui analisis linier untuk menilai kapasitas lateral, deformabilitas, dan efisiensi penggunaan material baja, sehingga dapat memberikan rekomendasi desain yang efisien tetapi tetap memenuhi aspek kekuatan dan keamanan.

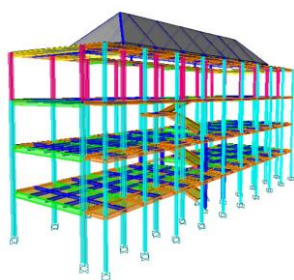
METODE PENELITIAN

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik untuk mengevaluasi efektivitas sistem struktur *bracing* pada bangunan baja empat lantai yang difungsikan sebagai fasilitas pendidikan di wilayah gempa tinggi. Tiga model struktur dibandingkan adalah sistem *open frame* (tanpa *bracing*), sistem *bracing-X*, dan sistem *bracing inverted-V*. Analisis dilakukan secara linier dinamis menggunakan metode respon spektrum untuk menilai kapasitas lateral, deformabilitas, dan penggunaan material baja.

Objek Studi

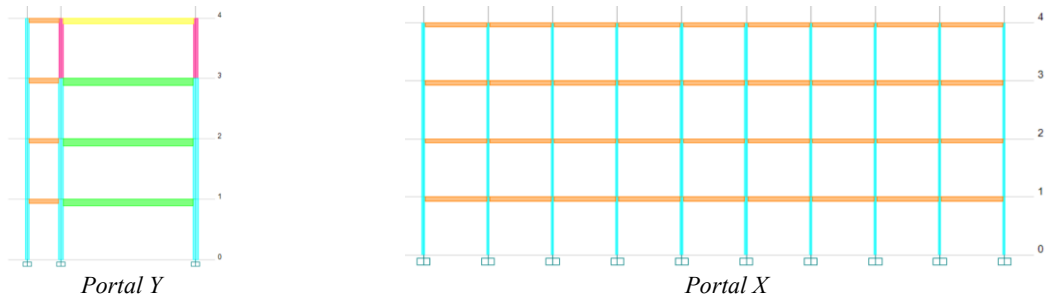
Objek studi dalam penelitian ini adalah sebuah bangunan sekolah empat lantai yang dirancang sebagai fasilitas pendidikan di wilayah dengan tingkat aktivitas seismik tinggi, yaitu Provinsi Bali. Pembebanan mengikuti ketentuan dari SNI 1727:2020 untuk gravitasi (beban hidup, beban mati, beban finishing dan instalasi) (BSN, 2020a), sedangkan beban lateral berupa beban gempa mengikuti ketentuan dari SNI 1726:2019 (BSN, 2019). Struktur utama bangunan menggunakan material baja profil, dengan balok dan kolom dari jenis *Wide Flange* (WF) dan *H-beam* sesuai dengan ketentuan desain SNI 1729:2020 (BSN, 2020b). Sistem struktur yang dianalisis terdiri dari tiga konfigurasi yaitu model pertama menggunakan sistem *open frame* (*moment frame*), model kedua menerapkan sistem *bracing-X*, dan model ketiga menggunakan sistem *bracing inverted-V*. Bangunan ini dirancang untuk berdiri di zona gempa tinggi berdasarkan Peta Gempa Indonesia (Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, 2021), dengan parameter seismik berupa percepatan spektral pada periode 0,2 detik sebesar $S_s = 0,945$ dan pada periode 1 detik sebesar $S_1 = 0,3976$. Kelas situs ditetapkan sebagai kelas D, yang mencerminkan kondisi tanah lunak dengan potensi amplifikasi gempa yang signifikan. Data seismik ini digunakan sebagai dasar dalam analisis linier statis dan dinamis respon spektrum. Fungsi utama bangunan sebagai gedung sekolah menempatkannya dalam Kategori Desain Risiko (KDR) IV, dengan faktor keutamaan (*Importance Factor*), I_e sebesar 1,5, sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019 untuk bangunan pendidikan yang harus tetap berfungsi pasca gempa (BSN, 2019). Ketinggian tiap lantai dirancang 3,6 meter, dan tata letak struktur seperti pada Gambar 1, Gambar 2, dan Gambar 3.



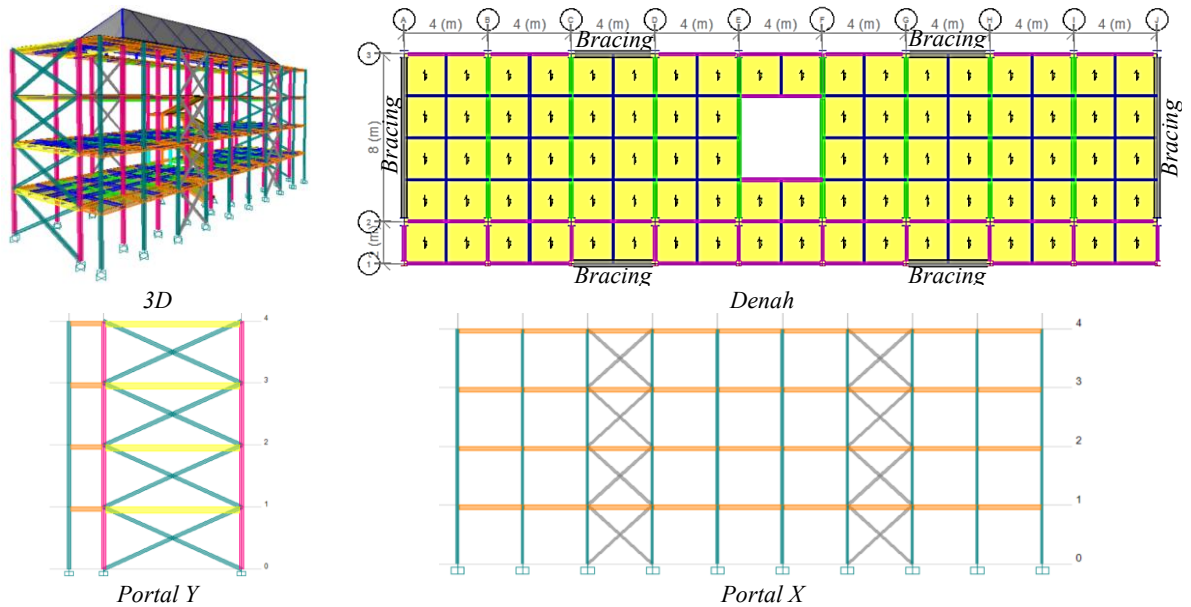
3D



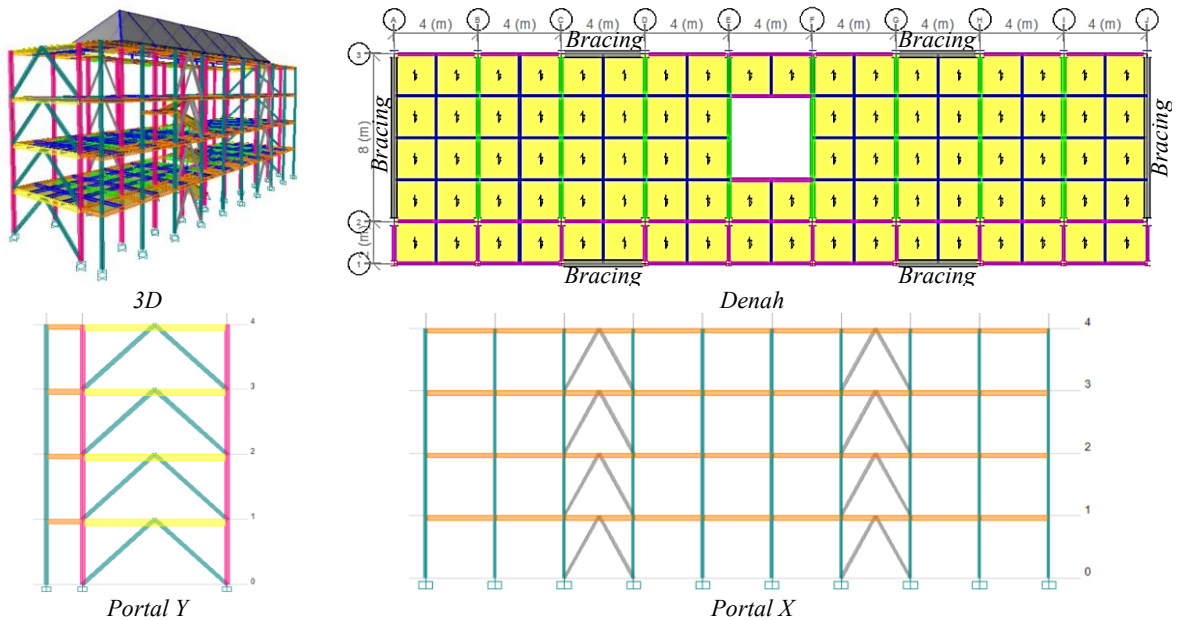
Denah



Gambar 1. Model Open Frame



Gambar 2. Model Bracing-X



Gambar 3. Model Bracing Inverted-V

Berdasarkan ketentuan dari SNI 1726 2019, setiap sistem struktur memiliki koefisien seismik yang berbeda-beda seperti modifikasi respon (R), faktor kuat lebih (Ω), dan faktor pembesaran defleksi (C_d) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Koefisien modifikasi sistem struktur

Model Struktur	Modifikasi Response, R	Faktor kuat lebih, Ω	Faktor pembesaran defleksi, Cd	Faktor Keutamaan, Ie
<i>Open Frame</i>)	8	3	5,5	1,5
<i>Bracing-X</i>	6	2	5	1,5
<i>Bracing Inverted-V</i>	6	2	5	1,5

Analisis dan desain dilakukan pada seluruh model dengan ketentuan sesuai dengan peraturan yang berlaku. Desain struktur baja mengikuti ketentuan dari SNI 1729:2020. Proses analisis mengikuti ketentuan seperti pemeriksaan periode struktur, penyamaan gaya geser dasar dinamis dengan gaya geser statis, pemeriksaan simpangan maksimum dan simpangan antar tingkat, sehingga seluruh elemen dipastikan memiliki kapasitas aman dalam menahan gaya-gaya yang bekerja. Perbandingan perilaku struktur secara akibat beban gempa yang dikerjakan dibandingkan dari ketiga model struktur serta berat penggunaan baja sebagai tolak ukur tingkat efisiensi materialnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dilakukan terhadap tiga model struktur baja empat lantai yang difungsikan sebagai bangunan pendidikan di wilayah gempa tinggi yaitu model *Open Frame*, model *Bracing-X*, dan *Bracing Inverted V*. Evaluasi dilakukan melalui pendekatan linier dinamis respon spektrum untuk menilai kapasitas lateral, simpangan, dan penggunaan material baja.

Periode dan Mode Shape

Periode alami struktur dibatasi sesuai dengan ketentuan dari SNI 1726:2019 dimana periode struktur tidak boleh melewati batas periode maksimum (T_{max}). Jika periode tersebut terlewat maka digunakan T_{max} untuk perhitungan beban gempa statis ekuivalen (V_s) dan kemudian disesuaikan beban gempa dinamis dari perhitungan respon spektrum (V_d) agar memiliki nilai sama atau lebih besar dari gempa statis ekuivalen ($V_d \geq V_s$). Tabel 2 menunjukkan perhitungan periode maksimum (T_{max}) struktur dan periode struktur berdasarkan model (T). Periode maksimum dihitung berdasarkan Persamaan (1) dan Persamaan (2), yang memperhitungkan koefisien batas (C_u), periode pendekatan fundamental (T_a), parameter sistem struktur C_t dan x , serta ketinggian struktur yang diperhitungkan (h_n). Hasil pemodelan dengan karakteristik struktur menunjukkan nilai periode struktur (T) lebih rendah dari periode maksimum (T_{max}) sehingga digunakan nilai periode struktur (T).

$$T_{max} = C_u T_a \tag{1}$$

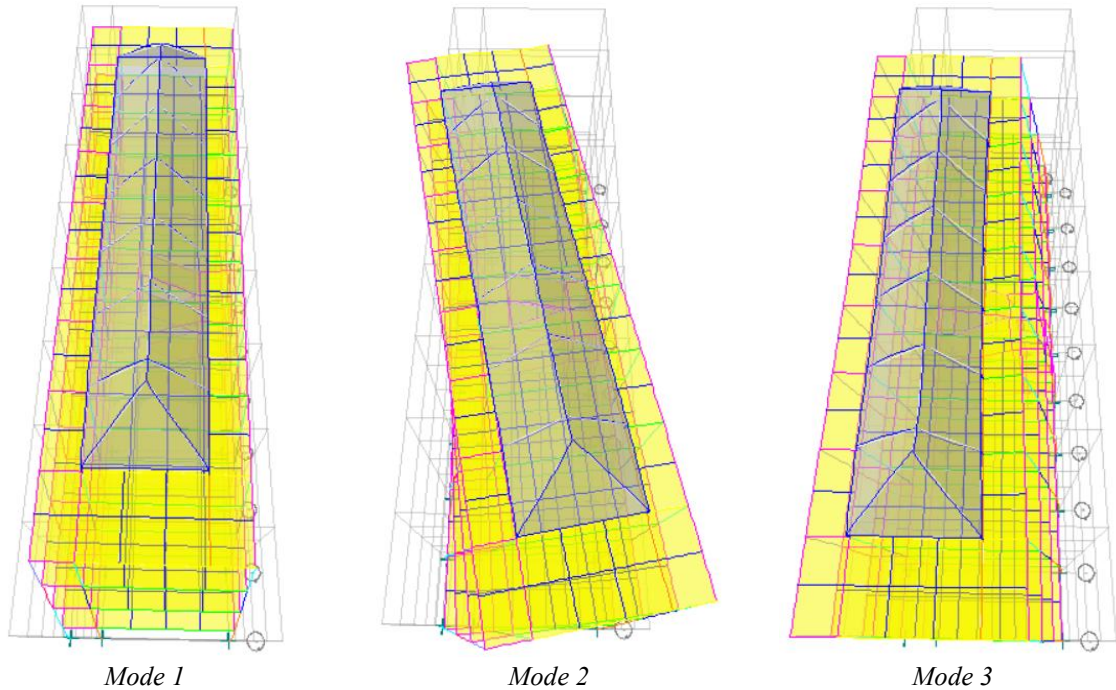
$$T_a = C_t h_n^x \tag{2}$$

Tabel 2. Periode fundamental struktur

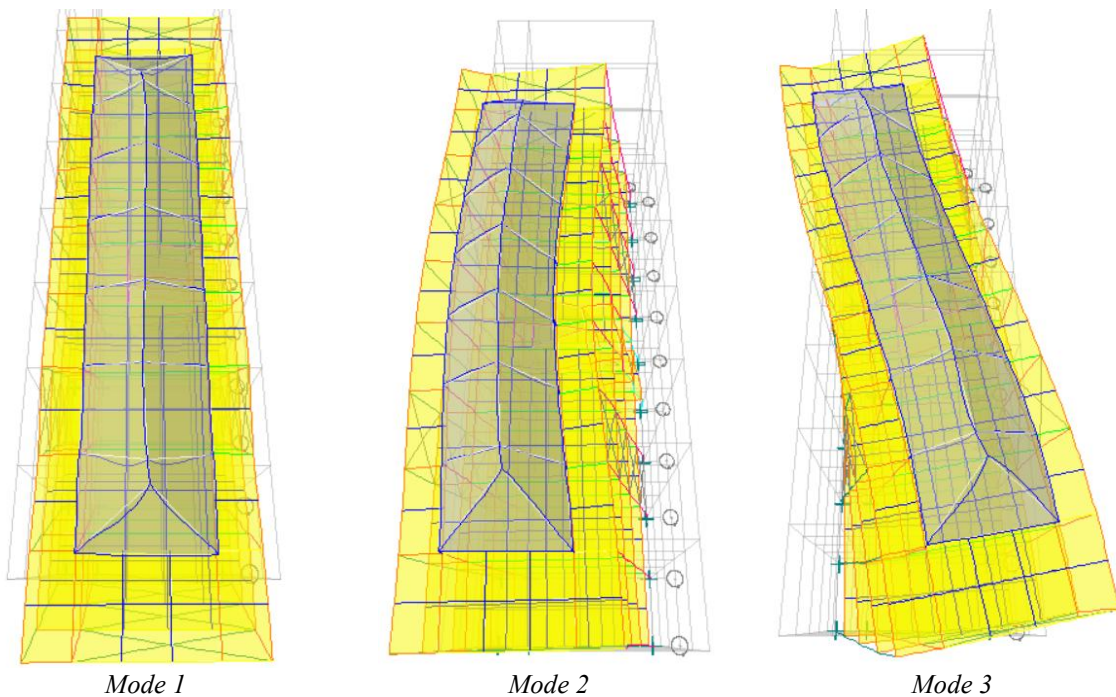
Model	h_n	C_t	x	T_a	C_u	T_{max}	T
<i>Open Frame</i>)	18	0.0724	0.8	0.731	1.4	1.023	0.828
<i>Bracing-X</i>	18	0.0488	0.75	0.426	1.4	0.597	0.481
<i>Bracing Inverted-V</i>	18	0.0488	0.75	0.426	1.4	0.597	0.492

Untuk memahami respons dinamis struktur terhadap beban lateral akibat gempa, perlu dilakukan pemeriksaan terhadap *mode shape*, yaitu pola pergerakan lateral dominan dari struktur pada masing-masing mode. Dalam penelitian ini, analisis *mode shape* dilakukan hingga mode ke-3, dengan visualisasi hasil ditampilkan pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6. Mode ke-1: Semua model struktur (*Open Frame*, *Bracing-X*, dan *Bracing Inverted-V*) menunjukkan pola pergerakan translasi lateral, yang merupakan karakteristik umum pada mode fundamental struktur bangunan. Mode ke-2: Struktur *Open Frame* menunjukkan pola rotasi, sedangkan struktur dengan *Bracing-X* dan *Inverted-V* tetap menunjukkan pola translasi. Perubahan ini mengindikasikan bahwa struktur *Open Frame* memiliki kekakuan lateral yang lebih rendah, sehingga mode rotasi muncul lebih awal. Mode ke-3: Struktur

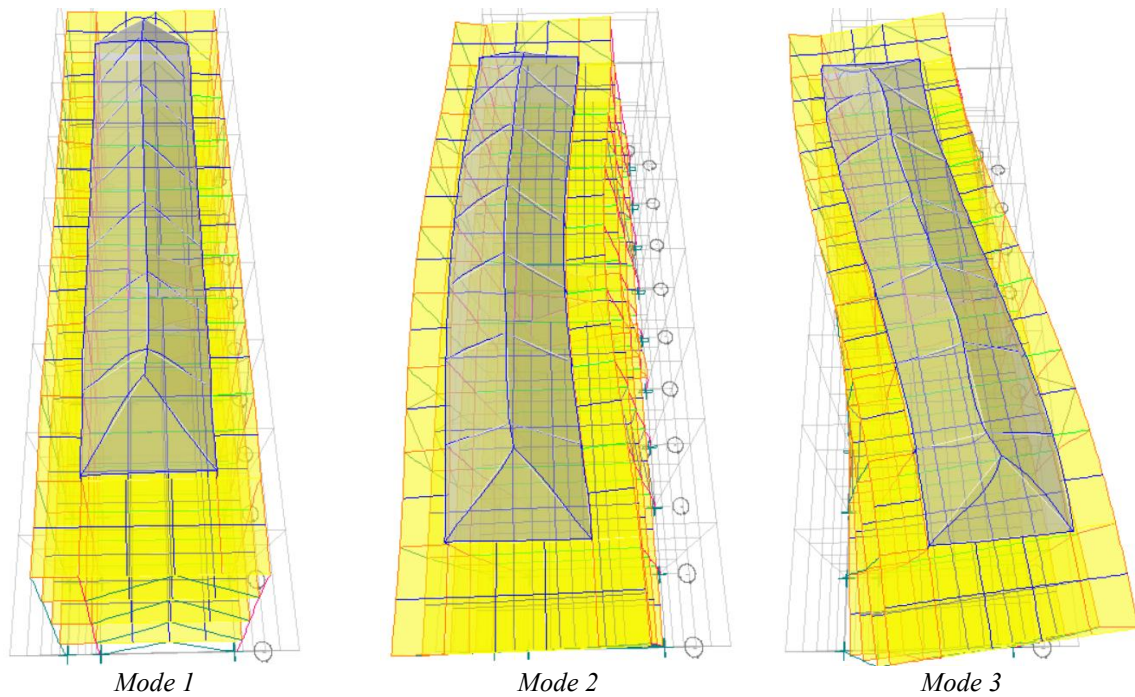
dengan *Bracing-X* dan *Inverted-V* menunjukkan pola rotasi, sesuai dengan ekspektasi bahwa mode rotasi muncul pada mode yang lebih tinggi. Sebaliknya, struktur *Open Frame* masih menunjukkan pola translasi, yang menandakan bahwa distribusi kekakuan lateral belum cukup untuk menghasilkan mode rotasi pada tahap ini. Rekapitulasi pola *mode shape* dan rasio partisipasi masa dari ketiga model struktur disajikan secara ringkas dalam Tabel 3.



Gambar 4. *Mode shape* struktur *Open Frame*



Gambar 5. *Mode shape* struktur *Bracing-X*



Gambar 6. Mode shape struktur *Bracing Inverted V*

Secara umum, konfigurasi mode shape yang diharapkan untuk struktur yang stabil adalah translasi pada mode ke-1 dan ke-2, serta rotasi pada mode ke-3. Ketidaksiharian pola ini pada struktur *Open Frame* menunjukkan bahwa sistem tersebut memiliki kekakuan lateral yang lebih rendah dan potensi ketidakstabilan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem *Bracing-X* dan *Inverted-V*.

Tabel 3. Mode shape dan partisipasi masa

Mode	Partisipasi masa (%)											
	Open Frame				Bracing-X				Bracing Inverted-V			
	UX	UY	RZ	Ket.	UX	UY	RZ	Ket.	UX	UY	RZ	Ket.
1	77.28	0.02	0.28	Translasi	73.53	0.02	0.09	Translasi	78.54	0.03	0.02	Translasi
2	0.25	0.02	77.33	Rotasi	0.01	78.96	0.00	Translasi	0.02	81.27	0.00	Translasi
3	0.01	75.69	0.01	Translasi	0.04	0.00	76.89	Rotasi	0.04	0.00	79.54	Rotasi

Gaya Geser Dasar

Gaya geser dasar statis dihitung menggunakan metode statis ekuivalen yang memperhitungkan massa total struktur dan distribusinya pada setiap tingkat. Beban gempa dianggap sebagai gaya lateral yang bekerja secara seragam, dan gaya geser dasar ditentukan berdasarkan massa efektif, faktor respons seismik, serta karakteristik wilayah gempa. Sedangkan gaya geser dasar dinamis dihitung berdasarkan metode respon spektrum yang mempertimbangkan respon dinamis struktur terhadap berbagai frekuensi getar. Dalam pendekatan ini, gaya geser dasar bekerja pada pondasi struktur dan kemudian didistribusikan ke setiap tingkat berdasarkan kekakuan relatif dan mode getar dominan. Gaya geser dinamis harus memiliki nilai sama atau lebih besar dari gaya geser statis yang disebutkan dalam skala faktor harus memiliki nilai ≥ 1 . Gaya geser dasar dinamis pada struktur *Open Frame* sudah lebih besar dari gaya geser dasar statisnya, namun untuk struktur *Bracing-X* dan *Inverted-V* lebih kecil ($V_d < V_s$). Sehingga dilakukan penyamaan terlebih dahulu dengan memberikan koefisien skala faktor terhadap gempa dinamisnya. Tabel 4 menunjukkan besarnya gaya geser statis dan dinamis akhir masing-masing struktur.

Tabel 4. Gaya geser dasar statis dan dinamis

Parameter	Open Frame		Bracing-X		Bracing Inverted-V	
	X	Y	X	Y	X	Y
Gempa Statis, V_s	685.895	685.895	1303.07	1303.07	1290.94	1290.94
Gempa Dinamis, V_d	689.288	766.412	1303.49	1303.14	1290.97	1291.01
Skala Faktor	1.005	1.117	1.000	1.000	1.000	1.000

Sistem *Bracing-X* dan *Inverted-V* secara konsisten memberikan gaya geser dasar yang lebih tinggi baik dalam analisis statis maupun dinamis dibandingkan *Open Frame*. Struktur *Open Frame* menunjukkan peningkatan gaya geser yang lebih besar dalam analisis dinamis, menandakan ketidakstabilan lateral yang lebih tinggi.

Simpangan Maksimum dan Simpangan Antar Tingkat

Simpangan maksimum adalah pergeseran lateral total yang terjadi pada titik yang dihitung dari taraf penjepitan lateral akibat beban gempa. Simpangan antar tingkat adalah selisih pergeseran lateral antara dua lantai yang berdekatan. Rekapitulasi simpangan maksimum disajikan dalam Tabel 5 sampai dengan

Tabel 10. Untuk sistem struktur dengan kategori risiko IV, simpangan ijin maksimum (Δ_{max}) dihitung sebesar 1% dari tinggi total yang ditinjau. Sedangkan simpangan antar tingkat dihitung mengikuti Persamaan 3, dengan simpangan antar tingkat maksimum (Δ_a) juga sebesar 1% dari tinggi tingkat yang ditinjau (BSN, 2019).

$$\delta_x = C_d \delta_{ex} / I_e \tag{3}$$

Tabel 5. Simpangan dan simpangan antar tingkat struktur *Open Frame* arah X

Tingkat	h _{sx} (mm)	Simpangan Maksimum (mm)			Simpangan Antar tingkat (mm)		
		δ _{ex}	Δ _{max}	Ket	δ _x	Δ _a	Ket
5	3600	31.32	180.00	OK	10.49	36.00	OK
4	3600	28.46	144.00	OK	25.31	36.00	OK
3	3600	21.55	108.00	OK	29.30	36.00	OK
2	3600	13.56	72.00	OK	30.59	36.00	OK
1	3600	5.22	36.00	OK	19.13	36.00	OK

Tabel 6. Simpangan dan simpangan antar tingkat struktur *Open Frame* arah Y

Tingkat	h _{sy} (mm)	Simpangan Maksimum (mm)			Simpangan Antar tingkat (mm)		
		δ _{ey}	Δ _{max}	Ket	δ _y	Δ _a	Ket
5	3600	27.34	180.00	OK	3.15	36.00	OK
4	3600	26.48	144.00	OK	27.36	36.00	OK
3	3600	19.02	108.00	OK	24.02	36.00	OK
2	3600	12.47	72.00	OK	26.24	36.00	OK
1	3600	5.31	36.00	OK	19.47	36.00	OK

Tabel 7. Simpangan dan simpangan antar tingkat struktur *Bracing-X* arah X

Tingkat	h _{sx} (mm)	Simpangan Maksimum (mm)			Simpangan Antar tingkat (mm)		
		δ _{ex}	Δ _{max}	Ket	δ _x	δ _{ex}	δ _{max}
5	3600	24.98	180.00	OK	21.50	36.00	OK
4	3600	19.11	144.00	OK	20.11	36.00	OK
3	3600	13.63	108.00	OK	21.30	36.00	OK
2	3600	7.82	72.00	OK	17.54	36.00	OK
1	3600	3.04	36.00	OK	11.14	36.00	OK

Tabel 8. Simpangan dan simpangan antar tingkat struktur *Bracing-X* arah Y

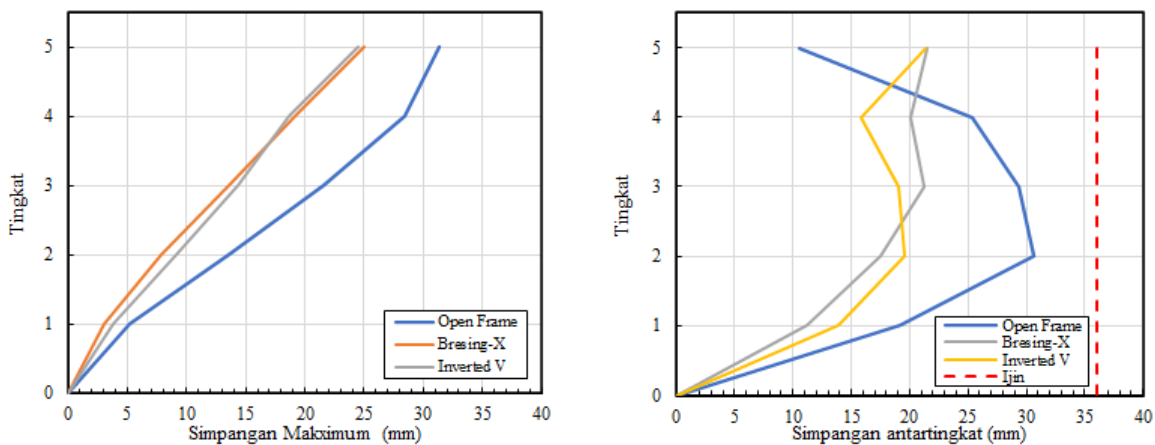
Tingkat	h _{sy} (mm)	Simpangan Maksimum (mm)			Simpangan Antar tingkat (mm)		
		δ _{ey}	Δ _{max}	Ket	δ _y	Δ _a	Ket
5	3600	16.82	180.00	OK	1.68	36.00	OK
4	3600	16.36	144.00	OK	21.64	36.00	OK
3	3600	10.46	108.00	OK	13.28	36.00	OK
2	3600	6.84	72.00	OK	13.50	36.00	OK
1	3600	3.15	36.00	OK	11.57	36.00	OK

Tabel 9. Simpangan dan simpangan antar tingkat struktur *Bracing Inverted-V* arah X

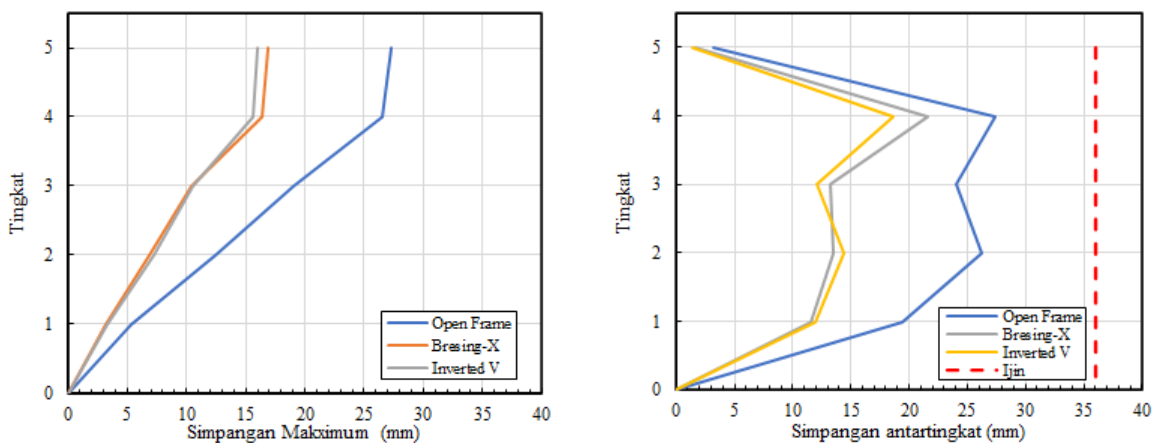
Tingkat	h_{sx} (mm)	Simpangan Maksimum (mm)			Simpangan Antar tingkat (mm)		
		δ_{ex}	Δ_{max}	Ket	δ_x	Δ_a	Ket
5	3600	24.44	180.00	OK	21.39	36.00	OK
4	3600	18.61	144.00	OK	15.82	36.00	OK
3	3600	14.29	108.00	OK	19.03	36.00	OK
2	3600	9.10	72.00	OK	19.53	36.00	OK
1	3600	3.78	36.00	OK	13.85	36.00	OK

Tabel 10. Simpangan dan simpangan antar tingkat struktur *Bracing Inverted-V* arah Y

Tingkat	h_{sx} (mm)	Simpangan Maksimum (mm)			Simpangan Antar tingkat (mm)		
		δ_{ex}	Δ_{max}	Ket	δ_x	Δ_a	Ket
5	3600	15.96	180.00	OK	1.39	36.00	OK
4	3600	15.58	144.00	OK	18.66	36.00	OK
3	3600	10.49	108.00	OK	12.11	36.00	OK
2	3600	7.19	72.00	OK	14.37	36.00	OK
1	3600	3.27	36.00	OK	12.00	36.00	OK



Gambar 7. Simpangan maksimum dan simpangan antar tingkat arah X

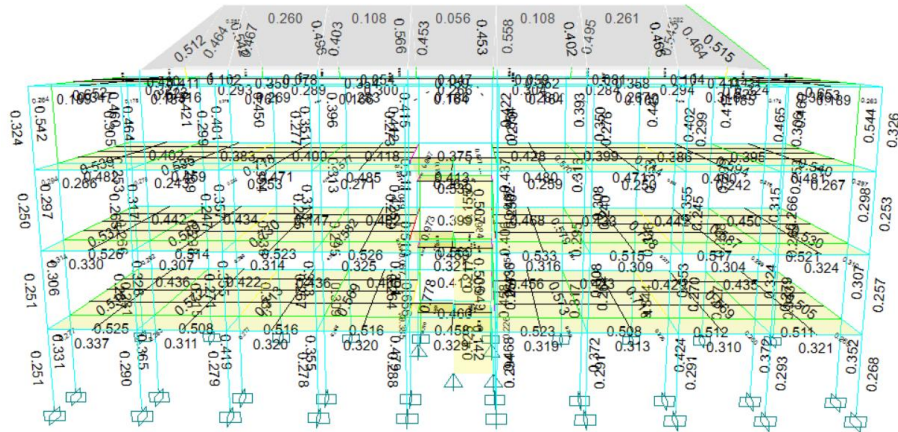


Gambar 8. Simpangan maksimum dan simpangan antar tingkat arah Y

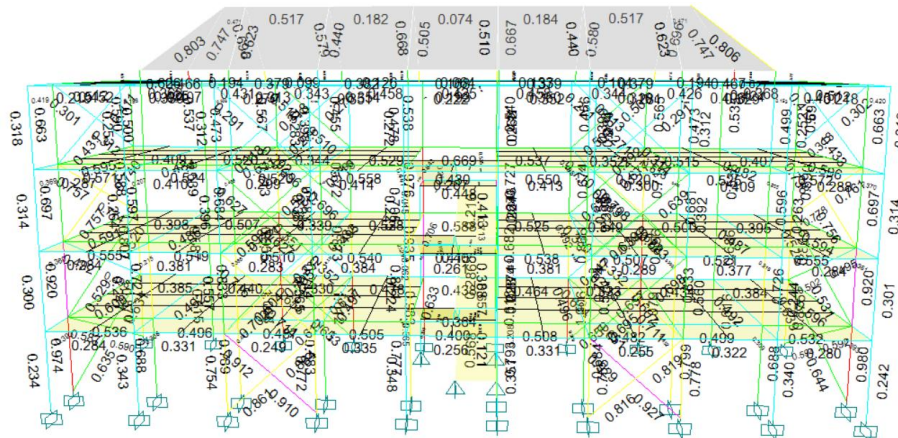
Berdasarkan perbandingan simpangan dan simpangan antar tingkat dari Gambar 7 dan Gambar 8, struktur dengan sistem *bracing* (X dan *Inverted-V*) memiliki simpangan maksimum dan antar tingkat yang lebih kecil dibandingkan sistem *Open Frame*, sehingga lebih kaku karena adanya *bracing*. Simpangan yang lebih kecil menunjukkan kekakuan lateral yang lebih tinggi, risiko kerusakan yang lebih rendah, dan kemampuan layan yang lebih baik.

Rasio Kapasitas Elemen Struktur

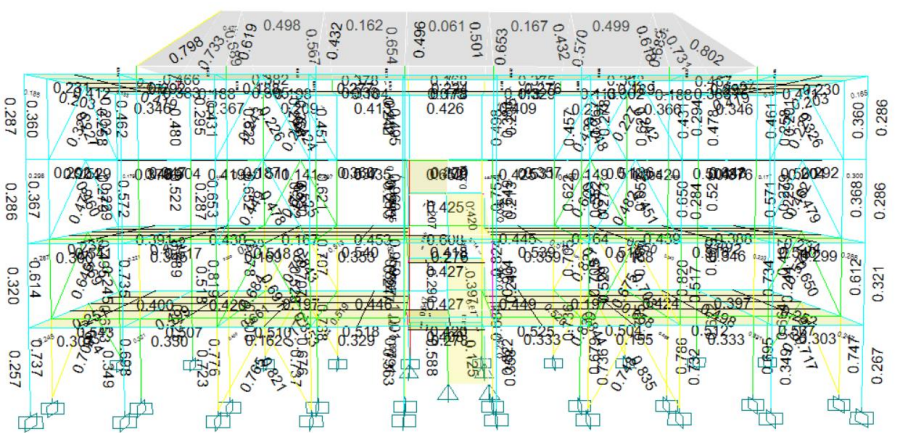
Rasio Demand-to-Capacity (D/C) merupakan indikator penting dalam analisis elemen struktur baja, yang menunjukkan seberapa besar beban yang bekerja (*demand*) dibandingkan dengan kapasitas maksimum elemen (*capacity*). Selain itu rasio kapasitas balok kolom pada struktur *open frame* juga diperiksa untuk memenuhi kriteria balok lemah-kolom kuat. Kemudian desain komponen balok dan kolom pada struktur *bracing* telah didesain berdasarkan kapasitas aksial dari *bracing*. Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11 menunjukkan hasil analisis D/C ratio untuk ketiga sistem struktur, yang mana rasio D/C berada dalam rentang 0.209 hingga 0.980, yang menunjukkan seluruh elemen masih berada dalam batas aman ($D/C < 1.0$).



Gambar 9. D/C-ratio balok dan kolom struktur *Open Frame*



Gambar 10. D/C-ratio balok dan kolom struktur *Bracing-X*



Gambar 11. D/C-ratio balok dan kolom struktur *Bracing Inverted-V*

Elemen utama struktur, yaitu balok, kolom, dan *bracing*, yang digunakan dalam masing-masing sistem *Open Frame*, *Bracing-X*, dan *Bracing Inverted-V* direkapitulasi dalam Tabel 11. Rekap ini tidak hanya mencakup jenis dan jumlah elemen, tetapi juga menunjukkan total kebutuhan material baja untuk setiap konfigurasi struktur.

Tabel 11. Profil dan kebutuhan material baja

Model Struktur	Profil Baja	Total Panjang (m)	Total Berat (Kg)
Model <i>Open Frame</i>	Balok		
	WF200x100	781,29	16160,41
	WF250x125	36	1069,92
	WF300x150	623,44	21188,08
	WF350x175	32	1533,37
	WF400x200	252	15889,51
	Kolom		
	H400	144	24765,09
	H350	72	9845,45
	H300	144	13591,93
	H250	36	2615,18
H200	36	1802,14	
			108461,08
Model <i>Bracing-X</i>	Balok		
	WF200x100	781,29	16160,41
	WF250x125	647,43	18175,66
	WF300x150	12	442,93
	WF350x175	80	3858,31
	WF400x200	204	13080,36
	Kolom		
	H300	14,4	135,95
	H250	273,6	19875,37
	H200	144	7208,56
	Bracing		
H250	91,707	6661,97	
H200	91,703	4590,82	
H150	129,154	4086,89	
			94287,63
Model <i>Bracing Inverted-V</i>	Balok		
	WF200x100	781,29	16160,41
	WF250x125	747,43	18192,01
	WF300x150	12	442,92
	WF350x175	80	3858,31
	WF400x200	204	13080,36
	Kolom		
	H300	39,6	3737,78
	H250	248,4	18044,74
	H200	144	7208,56
	Bracing		
H200	86,10	4310,28	
H150	131,78	4170,09	
			89189,12

Dalam studi ini, struktur *Open Frame* membutuhkan total material sebesar 108.461,08 kg (\approx 108 ton). Nilai ini merupakan yang tertinggi di antara ketiga sistem dan menunjukkan bahwa struktur tanpa *bracing* membutuhkan elemen yang lebih besar atau lebih banyak untuk mencapai kekakuan dan stabilitas yang memadai. Struktur *Bracing-X* membutuhkan material sebesar 94.287,63 kg (\approx 94,3 ton). Penggunaan sistem *bracing* memungkinkan efisiensi material yang lebih baik karena kontribusi *bracing* terhadap kekakuan lateral mengurangi beban pada balok dan kolom utama. Struktur *Bracing Inverted-V* membutuhkan material sebesar 89.189,12 kg (\approx 89,2 ton). Kebutuhan material struktur *Bracing-Inverted-V* paling rendah, tetapi tetap memberikan kekakuan yang setara dengan *Bracing-X*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pada penelitian ini, efektivitas penerapan struktur bracing-X dan Inverted-V tidak hanya menunjukkan performa yang lebih baik dari segi struktur, tetapi juga memberikan informasi material yang lebih efisien. Analisis terhadap aspek periode getar, kapasitas gaya geser dasar, simpangan maksimum dan antar tingkat, serta efisiensi penggunaan material pada struktur baja empat tingkat yang berfungsi sebagai bangunan sekolah atau pendidikan menunjukkan bahwa sistem struktur dengan *bracing* (X dan *Inverted-V*) memiliki performa seismik yang lebih baik dibandingkan sistem *Open Frame*.

1. Periode Getar Struktur *Open Frame* memiliki periode getar yang lebih panjang dibandingkan struktur dengan *bracing*, menunjukkan kekakuan lateral yang lebih rendah dan potensi respons dinamis yang lebih besar. Adanya *bracing* pada struktur *Bracing-X* dan *Inverted-V* menghasilkan periode yang lebih pendek, karena kontribusi *bracing* meningkatkan kekakuan yang lebih tinggi dan stabilitas yang lebih baik terhadap beban gempa.
2. Kapasitas Gaya Geser Dasar Sistem *Bracing-X* dan *Inverted-V* menunjukkan kapasitas gaya geser dasar yang lebih tinggi baik dalam analisis statis maupun dinamis, dibandingkan *Open Frame*. Selain karena faktor modifikasi respon (R) yang lebih rendah.
3. Simpangan maksimum dan antar tingkat struktur dengan *bracing* menghasilkan simpangan total dan antar tingkat yang lebih kecil. Sistem *bracing* menunjukkan lebih efektif dalam mengendalikan deformasi dan mengurangi risiko kerusakan pada elemen non-struktural. Hal ini direkomendasikan untuk bangunan dengan KDR tinggi seperti bangunan sekolah atau pendidikan.
4. Efisiensi penggunaan material struktur yang ditinjau pada studi ini, struktur *Open Frame* membutuhkan material baja dalam jumlah lebih besar (± 108 ton), sedangkan *Bracing-X* dan *Inverted-V* hanya memerlukan ± 94.3 ton dan ± 89.2 ton. Efisiensi ini menunjukkan bahwa sistem *bracing* tidak hanya meningkatkan performa seismik, tetapi juga lebih hemat dari sisi penggunaan material dan biaya konstruksi.

Secara keseluruhan, sistem *Bracing-X* dan *Bracing Inverted-V* direkomendasikan sebagai solusi struktural yang lebih efektif dan efisien untuk bangunan pendidikan di wilayah rawan gempa, dengan kinerja dalam aspek kekakuan, stabilitas, dan efisiensi material.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Safi, S., Alameri, I., Wasel, W. A. and Al-kadasi, A. B. 2021. Linear and Nonlinear Behavior of Steel Buildings with Different Bracing Systems. *International Journal of Steel Structures*. 21(2).
- Badan Standardisasi Nasional 2019. *SNI 1726:2019 Indonesian Seismic Code for Structural Building and Non-Building*. Jakarta
- Badan Standardisasi Nasional 2020a. *SNI 1727:2020 Minimum Design Loads for Building and Other Structure*
- Badan Standardisasi Nasional 2020b. *SNI 1729 2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja*. Jakarta
- Benita, D. R., Desmaliana, E. and Pribadi, A. 2019. Analisis Perbandingan Kinerja Struktur Baja SRBKK Tipe Inverted-V pada Gedung Bertingkat 12, 16, dan 20 Lantai. (Hal. 65-74). *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*. 5(4).
- Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan 2021. *Indonesian Spectral Design*. Direktorat Jendral Cipta Karya Kementerian PUPR
- Gunawan, I. P. A. S., Giatmajaya, I. W. and Wiryadi, I. G. G. 2021. Analisis dan Pemodelan Struktur Gedung Rumah Sakit Pada Wilayah Gempa Tinggi. *Jurnal Ilmiah Teknik Unmas*. Denpasar. 1(1): 7-13.
- Kianmehr, A. 2021. Effect of the Bracing System on the Probability of Collapse of Steel Structures under Maximum Credible Earthquake. *Shock and Vibration*. 2021.
- Meena, R. K., Awadhiya, G. P., Paswan, A. P. and Jayant, H. K. 2021. Effects of Bracing System on Multistoreyed Steel Building. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1128(1).

- Putra, R. O., Sutriyono, B. and Rizkiardi, A. 2022. Perbandingan Kinerja Struktur Gedung Baja 8 Lantai Tanpa Bresing dan dengan Bresing Menggunakan Metode Pushover Analysis. *EXTRAPOLASI*. 19(01).
- Shi, G., Hu, F. and Shi, Y. 2016. Comparison of seismic design for steel moment frames in Europe, the United States, Japan and China. *Journal of Constructional Steel Research*
- Sudarsana, I. K., Wiryadi, I. G. G., Pringgana, G. and Sinaga, A. M. W. 2021. Analisis Pengaruh Kelangsingan Struktur terhadap Perilaku Dinamis Struktur Gedung Beton Bertulang. in *Konferensi Nasional Teknik Sipil 15*. Semarang: Universitas Katolik Soegijapranata. 770–780.
- Tatang, D. J. and Tjong, L. F. 2022. Studi Komparasi Perilaku Gedung Beton Bertulang dengan Ketidakberaturan Vertikal Tipe 2 Menggunakan Dinding Geser dan Rangka Bresing Konsentrik Inverted-V. *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*. 15(2).
- Trangipani, N. M., Wiryadi, I. G. G., Wirawan, I. P. A. P. and Darmayasa, I. G. O. 2022. Analisis Perilaku Struktur Gedung Sekolah dengan Metode Respon Spektrum Studi Kasus: SMAN 9 Denpasar. *Jurnal Ilmiah Teknik Universitas Mahasaraswati Denpasar (JITUMAS)*. 2(1): 21–28.
- Wiryadi, I. G. W., Tubuh, I. K. D. K., Wirawan, I. P. A. P. and Diangga, I. P. E. W. 2024. Perilaku Dinamis dari Penggunaan Bracing X Dua Tingkat pada Gedung Bertingkat Dengan Analisis Time History. *Reinforcement Review in Civil Engineering Studies and Management*. 3(1).
- Yongkang, S. and Zhengzhong, W. 2012. Seismic Performance Evaluation on Eccentrically Brace Steel Frame by Capacity Spectrum Method. *Applied Mechanics and Materials*