

OPTIMALISASI STRUKTUR BAJA UNTUK BANGUNAN PENDIDIKAN DI ZONA GEMPA KAJIAN TEKNIS DAN EKONOMIS

I Gede Gegiranang Wiryadi^{1*}, I Ketut Sudarsana²

^{1*}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Mahasaraswati Denpasar, Jl. Kamboja No. 11A, Denpasar

e-mail: gegiranangwiryadi@unmas.ac.id

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit, Jimbaran, Badung

e-mail: ksudarsana@unud.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi tiga sistem struktur baja yaitu Rangka Terbuka, Bresing-X, dan Bresing Inverted-V, pada bangunan sekolah empat lantai yang berlokasi di zona gempa tinggi, yaitu Provinsi Bali. Analisis struktur dilakukan menggunakan pendekatan linier statis dan dinamis respon spektrum, sesuai dengan standar yang berlaku di Indonesia. Hasil analisis dan desain struktur telah memenuhi kriteria keamanan struktur, baik dari segi simpangan maupun rasio *Demand-to-Capacity* ($D/C < 1.0$). Simpangan maksimum tercatat sebesar 31,32 mm pada sistem Rangka Terbuka, 21,50 mm pada Bresing-X, dan 21,39 mm pada Bresing Inverted-V. Dari sisi kebutuhan material, sistem Rangka Terbuka memerlukan 108 ton baja, sementara Bresing-X dan Bresing Inverted-V masing-masing membutuhkan 94,3 ton dan 89,2 ton. Estimasi biaya konstruksi menunjukkan potensi penghematan sebesar 13,1% untuk Bresing-X dan 17,8% untuk Bresing Inverted-V dibandingkan sistem Rangka Terbuka. Temuan ini mengindikasikan bahwa sistem bracing lebih efektif dalam mereduksi deformasi bangunan. Walaupun sistem Bresing Inverted-V memiliki potensi gangguan terhadap tata ruang interior, secara keseluruhan sistem ini dinilai paling efisien baik dari aspek teknis maupun ekonomis, sehingga direkomendasikan sebagai solusi struktur baja yang optimal untuk bangunan pendidikan di wilayah seismik tinggi.

Kata kunci: Struktur baja, rangka terbuka, sistem bresing, efisiensi material

1. PENDAHULUAN

Perencanaan struktur bangunan bertingkat, efisiensi biaya merupakan salah satu pertimbangan utama yang memengaruhi keputusan desain. Bangunan empat lantai, yang banyak digunakan untuk fungsi komersial, pendidikan, maupun hunian, membutuhkan sistem struktur yang tidak hanya mampu menahan beban gravitasi, tetapi juga gaya lateral seperti gempa dan angin. Pemilihan sistem struktur yang tepat akan berdampak langsung pada kebutuhan material, kompleksitas konstruksi, dan total biaya pembangunan (Apriani and Rahmat, 2020). Oleh karena itu, analisis terhadap berbagai alternatif sistem struktur menjadi penting untuk menghasilkan desain yang optimal secara teknis dan ekonomis.

Sistem struktur yang umum digunakan dalam konstruksi baja adalah rangka terbuka. Sistem rangka terbuka menawarkan fleksibilitas ruang dan kemudahan dalam penataan interior, namun cenderung membutuhkan elemen baja yang lebih besar untuk menahan gaya lateral (Dorri *et al.*, 2023; Wiryadi *et al.*, 2023). Berbeda dengan sistem bresing-X, dan bresing inverted-V, yang mana sistem bresing memberikan kekakuan tambahan melalui elemen diagonal, yang dapat meningkatkan stabilitas struktur dan mengurangi dimensi elemen utama (Al-Safi *et al.*, 2021; Kianmehr, 2021; Meena *et al.*, 2021; Wiryadi *et al.*, 2024). Meskipun demikian, konfigurasi bresing dapat memengaruhi tata letak ruang dan estetika bangunan, sehingga pemilihannya harus mempertimbangkan aspek fungsional dan arsitektural.

Dari sudut pandang biaya, setiap sistem struktur memiliki implikasi yang berbeda terhadap volume dan jenis material baja yang dibutuhkan. Sistem rangka terbuka cenderung memerlukan profil baja yang lebih besar dan jumlah yang lebih banyak untuk mencapai tingkat kekakuan yang setara dengan sistem bresing. Hal ini disebabkan oleh absennya elemen pengaku lateral, sehingga beban lateral sepenuhnya ditanggung oleh elemen rangka utama. Sebaliknya, sistem bresing seperti X dan inverted V mampu meningkatkan kekakuan struktur melalui elemen diagonal, sehingga dapat mengurangi kebutuhan baja pada kolom dan balok utama (Hassan and Al-Wazni, 2023; Malik and Sutrisno, 2023). Namun, penambahan elemen diagonal tersebut juga menimbulkan kebutuhan material tambahan, baik dari segi jumlah maupun jenis profil baja yang digunakan. Perbedaan konfigurasi ini menghasilkan variasi dalam total berat struktur, kompleksitas sambungan, dan efisiensi distribusi gaya. Selain itu, harga satuan material baja yang digunakan pada masing-masing sistem turut memengaruhi estimasi biaya keseluruhan proyek.

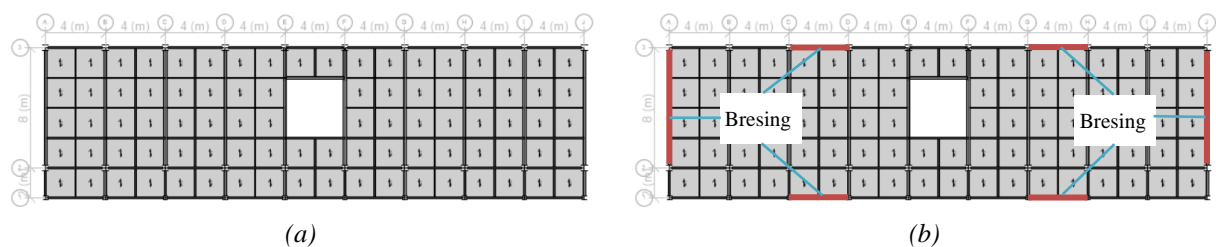
Artikel ini menyajikan analisis komparatif terhadap tiga sistem struktur baja yaitu rangka terbuka, bresing-X, dan bresing inverted-V yang terfokus pada estimasi biaya penggunaan material untuk bangunan empat lantai. Meskipun berbagai studi sebelumnya telah membahas performa teknis dan kekakuan masing-masing sistem, kajian yang secara spesifik mengaitkan konfigurasi struktur dengan efisiensi biaya material baja pada bangunan bertingkat masih terbatas, terutama dalam konteks bangunan empat lantai yang umum digunakan di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menyajikan data kuantitatif dan analisis perbandingan yang dapat membantu perencanaan dan pelaksana konstruksi dalam memilih sistem struktur yang paling ekonomis tanpa mengorbankan aspek

keselamatan, fungsionalitas, dan kemudahan pelaksanaan. Hasil kajian diharapkan dapat menjadi referensi praktis dalam pengambilan keputusan desain yang berkelanjutan, adaptif terhadap kondisi lapangan, serta selaras dengan prinsip efisiensi dan ketahanan struktur.

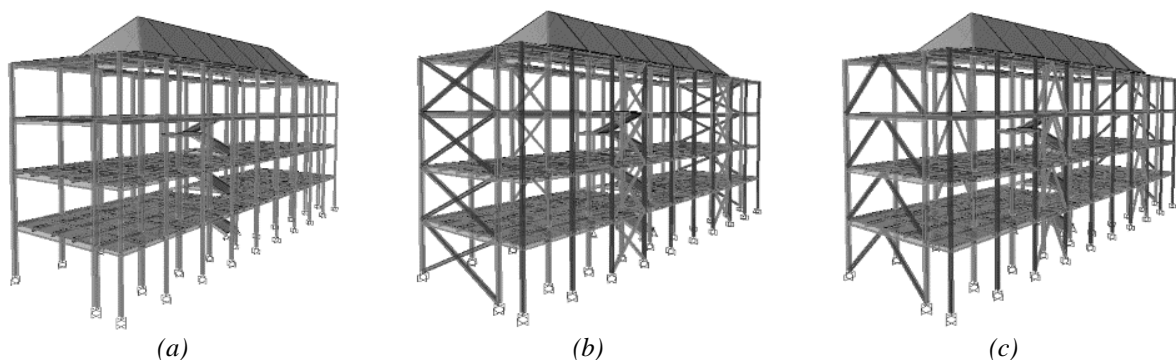
2. METODE

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. Bangunan ini memiliki tinggi antar lantai sebesar 3,6 meter dan dikategorikan dalam Kategori Desain Risiko (KDR) IV, sesuai dengan SNI 1726:2019, yang menetapkan bahwa bangunan pendidikan harus tetap berfungsi pasca gempa (BSN, 2019). Oleh karena itu, faktor keutamaan (*Importance Factor*) yang digunakan dalam analisis adalah sebesar 1,5. Pembebanan pada struktur mengikuti ketentuan dari SNI 1727:2020 untuk beban gravitasi, yang mencakup beban mati, beban hidup, beban finishing, dan instalasi (BSN, 2020). Sementara itu, beban lateral berupa beban gempa ditentukan berdasarkan SNI 1726:2019 (BSN, 2019), dengan parameter seismik yang mengacu pada Peta Gempa Indonesia tahun 2021. Nilai percepatan spektral yang digunakan adalah $S_s = 0,945$ untuk periode 0,2 detik dan $S_1 = 0,3976$ untuk periode 1 detik. Kelas situs ditetapkan sebagai kelas D, yang mencerminkan kondisi tanah sedang dengan potensi amplifikasi gempa yang signifikan. Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan geometri dan sistem struktur yang dikaji.

Penelitian ini membandingkan tiga sistem struktur yang berbeda, yaitu sistem rangka terbuka (*moment frame*), sistem *bracing-X*, dan sistem *bracing inverted-V*. Struktur utama bangunan menggunakan material baja profil, dengan elemen balok dan kolom dari jenis Wide Flange (WF) dan H-beam, sesuai dengan ketentuan desain dalam SNI 1729:2020 (BSN, 2020b). Sistem struktur yang digunakan berbeda, sehingga memiliki koefisien desain seismik yang berbeda. Koefisien desain seismik seperti modifikasi respon (R) = 8 untuk rangka terbuka dan 6 untuk bresing. Untuk faktor kuat lebih (Ω) = 3 untuk rangka terbuka dan 2 untuk bresing. Sedangkan untuk faktor pembesaran defleksi (C_d) sebesar 5,5 untuk rangka terbuka dan 5 untuk struktur bresing. Ketiga model ini dianalisis untuk menilai efisiensi penggunaan material baja dan kinerja struktural dalam menghadapi beban gempa. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk mengevaluasi kebutuhan volume dan berat baja dari masing-masing sistem struktur, serta melakukan estimasi biaya berdasarkan total berat baja dikalikan dengan harga satuan material. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi sistem struktur yang paling efisien secara teknis dan ekonomis untuk bangunan pendidikan di zona gempa tinggi.



Gambar 1. Denah struktur rangka terbuka (a) dan struktur bresing (b)



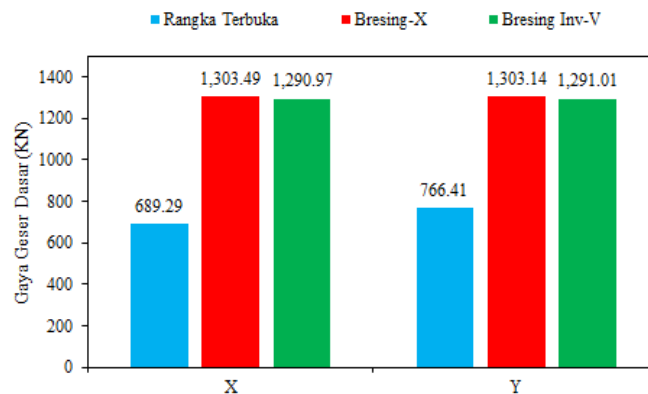
Gambar 2. 3D struktur rangka terbuka (a), bresing-X (b), bresing inverted-V (c)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gaya Geser Dasar dan Gaya Geser Tingkat

Gaya geser dasar dapat dihitung melalui dua pendekatan, yaitu metode statis dan metode dinamis. Gaya geser dasar statis dihitung menggunakan metode statis ekuivalen, yang memperhitungkan massa total struktur serta distribusinya

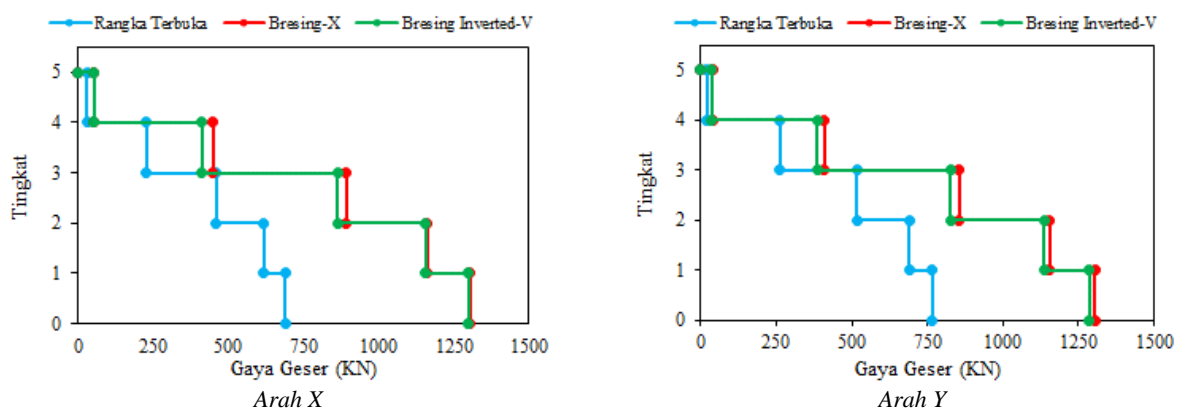
pada setiap tingkat. Dalam metode ini, beban gempa dianggap sebagai gaya lateral yang bekerja secara seragam, dan gaya geser dasar ditentukan berdasarkan massa efektif, faktor respons seismik, serta karakteristik wilayah gempa. Sementara itu, gaya geser dasar dinamis dihitung menggunakan metode respons spektrum, yang mempertimbangkan respons 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. Menurut ketentuan, gaya geser dinamis harus memiliki nilai yang sama atau lebih besar dari gaya geser statis, sehingga skala faktor yang digunakan harus bernilai ≥ 1 . Pada struktur Rangka Terbuka (RT), gaya geser dasar dinamis telah memenuhi syarat karena nilainya lebih besar dari gaya geser dasar statis. Namun, pada struktur Bracing-X (B-X) dan Inverted-V (B-Inv-V), gaya geser dasar dinamis masih lebih kecil ($V_d < V_s$). Oleh karena itu, dilakukan penyamaan terlebih dahulu dengan memberikan koefisien skala faktor terhadap gaya gempa dinamisnya. Hasil akhir gaya geser dasar masing-masing struktur dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Gaya geser dasar

Gaya geser dasar struktur rangka terbuka lebih kecil dari nilai gaya geser dasar struktur bresing. Hal ini terutama disebabkan oleh pengambilan nilai faktor modifikasi respon (R) yang berbeda dimana R untuk rangka terbuka lebih besar, sehingga nilai reduksinya lebih besar. Tetapi diantara kedua struktur bresing, nilai gaya geser dasar struktur bresing-X lebih besar dibandingkan struktur bresing inverted-V, yang mungkin disebabkan oleh perbedaan berat seismik akibat penggunaan material strukturnya.

Gaya geser tingkat merupakan hasil distribusi dari gaya geser dasar (*base shear*) ke masing-masing tingkat bangunan. Distribusi ini tidak bersifat merata, melainkan ditentukan oleh kekakuan relatif dari setiap tingkat struktur. Semakin tinggi kekakuan suatu tingkat, maka semakin besar proporsi gaya geser yang diterimanya. Sebaliknya, tingkat yang lebih fleksibel akan menerima gaya geser yang lebih kecil. Prinsip ini mencerminkan bahwa kekakuan struktur berperan langsung dalam menentukan respons terhadap gaya lateral, seperti gaya gempa. Oleh karena itu, pemahaman terhadap kekakuan tiap tingkat sangat penting dalam perencanaan dan analisis struktur tahan gempa, agar distribusi gaya geser dapat dilakukan secara akurat dan efisien.

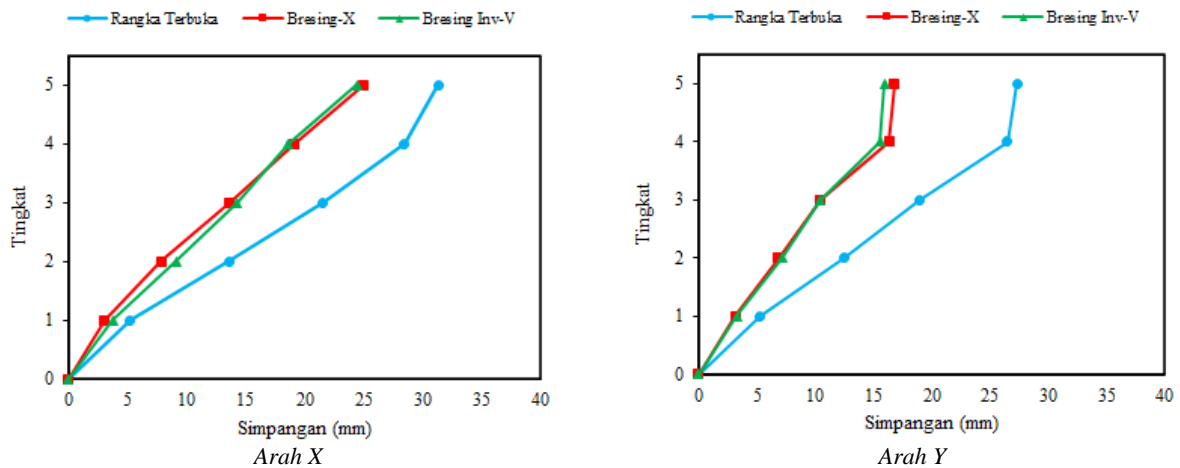


Gambar 4. Gaya geser tingkat

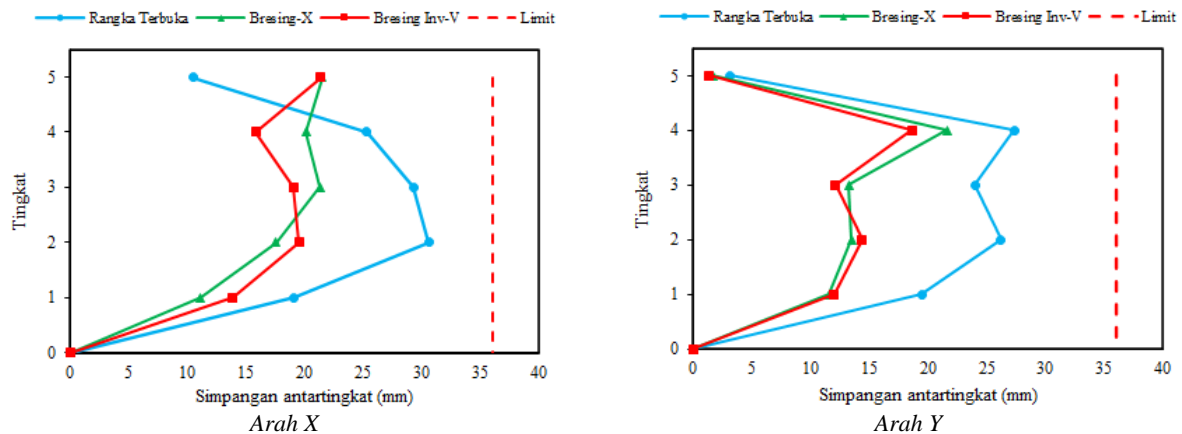
Simpangan maksimum dan simpangan antar tingkat

Simpangan maksimum dihitung dari besar gaya gempa rencana yang bekerja pada struktur yaitu gaya geser dasar yang didistribusikan ke masing-masing tingkat. Simpangan maksimum adalah simpangan yang dihitung pada tingkat yang ditinjau dari posisi perletakan di dasar. Sedangkan simpangan antar tingkat adalah simpangan yang dihitung berdasarkan selisih simpangan tingkat yang berdekatan yang kemudian disesuaikan berdasarkan faktor pembesaran

amplifikasi (C_d) dan faktor keutamaan (I_e). Untuk struktur dengan kategori IV, simpangan ijin maksimum sebesar 1% dari tinggi tingkat yang ditinjau (BSN, 2019). Simpangan maksimum dan simpangan antar tingkat disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Simpangan maksimum



Gambar 6. Simpangan antartingkat

Berdasarkan hasil analisis, struktur yang menggunakan sistem bracing tipe X dan Inverted-V menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan struktur dengan sistem rangka terbuka. Hal ini ditunjukkan oleh nilai simpangan maksimum dan simpangan antar tingkat yang lebih kecil, yang mencerminkan tingkat deformasi lateral yang rendah. Simpangan yang lebih kecil ini menandakan bahwa struktur memiliki kekakuan lateral yang lebih tinggi, sehingga mampu menahan gaya gempa atau beban lateral lainnya dengan lebih efektif. Kekakuan yang lebih tinggi ini juga berkontribusi pada penurunan risiko kerusakan struktural serta peningkatan kemampuan layan bangunan, karena struktur tetap stabil dan nyaman digunakan selama masa operasionalnya. Dengan demikian, penerapan sistem bracing memberikan keuntungan signifikan dalam meningkatkan stabilitas dan keandalan struktur terhadap beban lateral.

Kekakuan Lateral Tingkat

Kekakuan tingkat struktur merupakan faktor kunci dalam menentukan respons bangunan terhadap gaya lateral, seperti gaya gempa. Kekakuan yang tinggi akan menghasilkan simpangan yang lebih kecil, sedangkan kekakuan yang rendah menyebabkan simpangan yang lebih besar. Simpangan ini mencerminkan seberapa besar deformasi horizontal yang terjadi pada tiap tingkat bangunan saat menerima beban lateral. Kekakuan masing-masing struktur disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Kekakuan struktur

| Tingkat | Rangka Terbuka | | Bracing-X | | Bracing Inverted-V | |
|---------|----------------|--------|-----------|--------|--------------------|--------|
| | X | Y | X | Y | X | Y |
| 4 | 31079 | 43138 | 80415 | 93548 | 98288 | 103732 |
| 3 | 57737 | 106512 | 160159 | 242858 | 163838 | 250352 |

| | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 77734 | 152826 | 269347 | 355605 | 208844 | 318598 |
| 1 | 136783 | 252333 | 441702 | 476866 | 351343 | 434797 |

Struktur dengan sistem rangka terbuka cenderung memiliki kekakuan lateral yang lebih rendah karena tidak dilengkapi dengan elemen pengaku tambahan. Akibatnya, simpangan antar tingkat dan simpangan maksimum yang terjadi relatif lebih besar, sehingga struktur lebih rentan terhadap kerusakan dan penurunan kinerja layan. Sebaliknya, struktur dengan sistem bracing tipe X dan Inverted-V menunjukkan kekakuan yang jauh lebih tinggi. Elemen bracing berfungsi sebagai pengaku diagonal yang menambah resistensi terhadap gaya geser dan momen, sehingga mampu mengurangi simpangan secara signifikan. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur dengan bracing memiliki simpangan maksimum dan antar tingkat yang lebih kecil dibandingkan rangka terbuka.

Penggunaan material struktur

Untuk menilai aspek ekonomis dari masing-masing sistem struktur, dilakukan perhitungan berat total baja struktural yang digunakan pada setiap alternatif desain. Komponen yang diperhitungkan meliputi kolom, balok, dan elemen bracing, karena ketiganya berkontribusi langsung terhadap kekakuan dan kekuatan struktur. Sementara itu, pelat lantai tidak dimasukkan dalam perhitungan karena direncanakan memiliki spesifikasi yang sama untuk struktur rangka terbuka maupun struktur dengan bracing. Proses desain difokuskan pada optimalisasi penggunaan material baja pada komponen utama tersebut, guna mencapai efisiensi struktural dan biaya. Rincian berat kebutuhan baja untuk masing-masing komponen dan sistem struktur disajikan secara lengkap pada Tabel 2.

| Struktur | Kebutuhan Material | | |
|----------|--------------------|-----------|---------------|
| | Rangka Terbuka | Bresing-X | Bresing Inv-V |
| Balok | 55841.29 | 51728.07 | 51717.67 |
| Kolom | 52619.79 | 27219.88 | 28991.08 |
| Bresing | | 15339.68 | 8480.37 |
| Total | 108461.08 | 94287.63 | 89189.12 |

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa struktur rangka terbuka memiliki total kebutuhan baja tertinggi, yaitu sebesar 108.461,08 kg. Hal ini disebabkan oleh absennya elemen bracing, sehingga kolom dan balok harus menanggung seluruh beban lateral, yang berdampak pada penggunaan profil baja yang lebih besar. Sebaliknya, struktur dengan sistem bracing-X dan Inverted-V menunjukkan efisiensi yang lebih baik. Sistem bracing-X membutuhkan total 94.287,63 kg baja, sedangkan sistem bracing Inverted-V lebih ringan lagi dengan total 89.189,12 kg. Penggunaan elemen bracing memungkinkan pengalihan sebagian beban lateral dari kolom dan balok ke sistem pengaku diagonal, sehingga profil yang digunakan dapat dioptimalkan. Meskipun sistem bracing menambahkan komponen baru, total kebutuhan baja tetap lebih rendah dibandingkan rangka terbuka. Efisiensi dalam desain dan pemanfaatan material, karena struktur yang lebih kaku dapat dirancang dengan toleransi deformasi yang lebih ketat. Dengan demikian, penerapan sistem bracing X dan Inverted-V merupakan strategi efektif untuk meningkatkan kekakuan dan ketahanan struktur terhadap gaya lateral, terutama dalam konteks bangunan tahan gempa.

4. KESIMPULAN

Struktur baja dengan sistem bracing, khususnya tipe Inverted-V dan bracing-X, terbukti lebih efisien secara ekonomis dibandingkan rangka terbuka. Sistem bracing Inverted-V memberikan penghematan material hingga 17,8%, sementara bracing-X mencapai 13,1%, tanpa mengorbankan aspek keamanan struktural. Kedua sistem menunjukkan simpangan yang lebih kecil dan kekakuan yang lebih tinggi, sehingga mampu menahan gaya gempa dengan lebih efektif. Bracing-X secara khusus menawarkan keseimbangan antara efisiensi material dan fleksibilitas ruang, karena konfigurasi diagonalnya cenderung lebih mudah diintegrasikan dalam desain interior dibandingkan Inverted-V. Dengan demikian, sistem bracing seperti tipe X dan Inverted-V menjadi solusi optimal yang menggabungkan efisiensi biaya dan kinerja teknis untuk bangunan pendidikan di zona gempa tinggi.

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*, Vol. 21 No. 2, doi: 10.1007/s13296-020-00450-1.
- Apriani, W. and Rahmat, H. (2020), "Review Design Struktur Beton Bertulang Terhadap Struktur Baja Pada Struktur Gedung Diatas Tanah Lunak", *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 10 No. 1, pp. 8–16, doi: 10.29103/tj.v10i1.254.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019), *SNI 1726:2019 Indonesian Seismic Code for Structural Building and Non-Building*, Jakarta, p. 238.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020a), *SNI 1727:2020 Minimum Design Loads for Building and Other Structure*, pp.

1–336.

- Badan Standardisasi Nasional. (2020b), *SNI 1729 2020 Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja*, Jakarta.
- Dorri, F., Hooman Ghasemi, Seyed. and Jalilkhani, M. (2023), “Performance-based system reliability analysis for steel moment frames”, *Structures*, Vol. 51, pp. 472–483, doi: 10.1016/j.istruc.2023.03.047.
- Hassan, Z.Q. and Al-Wazni, S. (2023), “A review of retrofitting in the structural steel buildings using bracing systems”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1232 No. 1, p. 012031, doi: 10.1088/1755-1315/1232/1/012031.
- Kianmehr, A. (2021), “Effect of the Bracing System on the Probability of Collapse of Steel Structures under Maximum Credible Earthquake”, *Shock and Vibration*, Vol. 2021, doi: 10.1155/2021/2323758.
- Malik, M.R.Z. and Sutrisno, B. (2023), “Studi Perbandingan Perilaku Gedung Struktur Baja Sistem Bresing Eksentris Tipe Inverted-V dan Sistem Bresing Konsentris Tipe-X Terhadap Beban Gempa”, *Journal of Scientech Research and Development*, Vol. 5 No. 2, pp. 714–730, doi: 10.56670/jsrd.v5i2.247.
- 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*, Vol. 1128 No. 1, doi: 10.1088/1757-899x/1128/1/012017.
- Wiryadi, I.G.G., Putra Wirawan, I.P.A., Kubon Tubuh, I.K.D. and Adnyana, I.N.E. (2023), “Perilaku Struktur Gedung dengan Perkuatan Bresing X dan Canggah Wang dalam Menahan Beban Gempa”, *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik*, Vol. 12 No. 2, pp. 174–183, doi: 10.36733/jikt.v12i2.7869.
- 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*, Vol. 3 No. 1.