

PERBANDINGAN PERILAKU STRUKTUR BAJA RANGKA TERBREIS TIPE X DAN DIAGRID PADA GEDUNG TINGGI

Ida Bagus Prastha Bhisama¹⁾, Made Hendra Prayoga²⁾

^{1,2)}Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Udayana, Jimbaran, Bali, Indonesia
Email: prasthab@unud.ac.id

ABSTRAK

Gedung tinggi merupakan salah satu solusi untuk mengatasi keterbatasan lahan akibat pertumbuhan penduduk yang kian pesat. Berbagai inovasi telah dilakukan untuk membuatnya lebih kuat dan efisien, beberapa diantaranya adalah struktur baja rangka terbreis (BF) dan diagrid (DIA). Pada BF, terdapat batang diagonal/bresing yang diletakkan diantara masing-masing portal dengan konfigurasi yang bervariasi. Pada penelitian ini, tipe bresing yang digunakan pada BF ada bresing tipe-x (BFX). Sementara itu, batang diagonal pada struktur DIA berperan sebagai kolom, sehingga penggunaan kolom vertikal tidak diperlukan. Kedua struktur dirancang pada gedung 15 lantai berukuran 18 m x 18 m dengan tinggi total 56 m dan dimodel pada program SAP2000. Perilaku dari kedua struktur tersebut telah dibandingkan dengan terlebih dahulu memastikan bahwa struktur telah memenuhi syarat kekakuan dan kekuatan. Hasil analisis menunjukkan bahwa model DIA lebih kaku dibandingkan model BFX, terlihat dari rasio perpindahan pada tingkat teratas dari model DIA : BFX adalah sebesar 1 : 1,9. Dari perbandingan berat struktur, struktur DIA lebih ringan dibandingkan dengan BFX, dengan rasio 1 : 2,176. Berdasarkan perbandingan tersebut, dapat dikatakan bahwa struktur DIA lebih kaku dan efisien dibandingkan dengan struktur BFX.

Kata kunci: struktur baja, rangka terbreis, diagrid, bresing, kekakuan struktur

BEHAVIOR COMPARISON OF TYPE-X BRACED FRAME AND DIAGRID STRUCTURES ON HIGH-RISE BUILDING

ABSTRACT

Tall buildings are one of the solutions to overcome land limitations due to rapid population growth. Various innovations have been made to make it stronger and more efficient, some of which are the steel braced frame (BF) structure and diagrid (DIA). In BF, there are diagonal elements/braces placed between each portal with various configurations. In this study, the type of brace used on the BF is the x-type brace (BFX). Meanwhile, the diagonal elements in the DIA structure act as columns, so that the use of vertical columns is not necessary. Both structures are designed in a 15-storey building measuring 18 m x 18 m with a total height of 56 m and modeled on the SAP2000 program. Both structures' behaviors have been compared by first ensuring that the structure meets the requirements for stiffness and strength. The analysis results show that the DIA is more rigid than the BFX model, as seen from the displacement ratio at the top level of the DIA : BFX model which was 1 : 1.9. From the structure's weight comparison, the DIA structure is lighter than that of BFX, with a ratio of 1 : 2.176. Based on this comparison, it can be said that the DIA structure is more rigid and efficient than the BFX structure.

Keywords: steel structure, braced frame, diagrid, bracing, structural stiffness

1 PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk yang kian pesat dan keterbatasan lahan merupakan sebuah masalah nyata yang sedang dihadapi masyarakat. Beberapa solusi untuk menghadapi masalah tersebut telah diupayakan, salah satunya adalah pembuatan gedung tinggi. Inovasi desain struktur dari gedung tinggi juga semakin banyak dilakukan untuk membangun gedung yang lebih kuat dan efisien. Pada akhir abad ke-19, desain awal bangunan tinggi mulai menyadari keefektifan elemen penguat diagonal dalam menahan gaya lateral, yang ditunjukkan dengan penggunaan sistem struktur rangka baja dengan penguat diagonal berbagai variasi seperti tipe-X, K, dan eksentrik (Moon et al., 2007). Sistem struktur tersebut biasa dikenal dengan istilah rangka terbreis. Rangka terbreis adalah sistem rangka batang vertikal yang memberikan stabilitas terhadap sistem struktur serta ketahanan terhadap gaya lateral (BSN, 2020). Pemasangan bresing pada portal secara diagonal membuat bresing hanya menahan gaya aksial saat melayani geser horisontal, sehingga kekakuan struktur akan meningkat secara efisien (Smith & Coull, 1991).

Selain rangka terbreis, terdapat sistem struktur yang dalam beberapa waktu terakhir mulai banyak digunakan, yaitu diagrid. Diagrid merupakan struktur yang menggunakan kolom-kolom diagonal sehingga membentuk rangka batang segitiga yang membuatnya menahan beban gravitasi dan diagonal dengan kemampuan yang sama. Batang-batang diagonal pada struktur diagrid akan meneruskan beban lateral yang diterima oleh struktur sehingga batang akan menerima gaya aksial (Arpitha et al., 2016). Efisiensi struktural dari sistem diagrid juga membuat kolom interior dan sudut tidak diperlukan, sehingga memungkinkan fleksibilitas yang signifikan dengan denah lantai (Leonard, 2007).

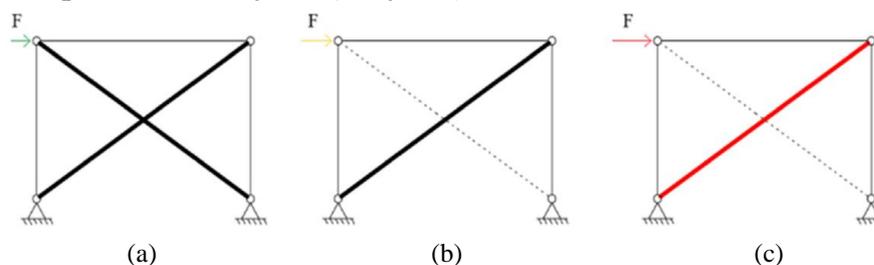
Berdasarkan penjabaran di atas, terlihat bahwa struktur diagrid merupakan struktur yang efisien baik secara struktural maupun arsitektural. Namun demikian, hal tersebut perlu dibuktikan lebih lanjut dengan melakukan sebuah penelitian yang dapat dimulai dengan membandingkan perilaku kedua tipe struktur tersebut. Pada penelitian ini, perilaku dari kedua struktur tersebut (*stress ratio* penampang, perpindahan, simpangan antar tingkat, dan berat struktur) akan ditinjau dan dibandingkan untuk mengetahui struktur mana yang lebih efisien diterapkan pada struktur gedung tinggi.

2 PERILAKU STRUKTUR BAJA

2.1 STRUKTUR RANGKA TERBREIS

Sistem Penahan Beban Lateral memiliki peran penting dalam desain struktur baja, yang secara konvensional dapat berupa rangka terbreis (Naqash, 2014). Sistem struktur konvensional seperti rangka terbreis ini umumnya terdiri dari kolom vertikal, balok horizontal, dan batang diagonal sebagai bresing, sehingga sistem tersebut tidak dapat membentuk desain gedung tinggi yang bebas atau kompleks (Ali & Moon, 2007). Batang diagonal/bresing ditempatkan menyilang (diagonal) pada portal di dalam suatu struktur rangka dan konfigurasi/penempatannya dapat divariasikan sesuai dengan kebutuhan struktur maupun arsitektur. Perilaku dari batang bresing pada sebuah sistem struktur adalah menyerupai rangka batang, sehingga dapat dikatakan bahwa elemen tersebut hanya menerima tarik dan tekan.

Rangka terbreis dapat dikategorikan ke dalam 2 tipe, yaitu rangka terbreis konsentrik/*concentric braced frame* (CBF) dan eksentrik/*eccentric braced frame* (EBF). Pada EBF, terdapat elemen *link* di antara hubungan kedua bresing, berbeda dengan CBF yang menjadi fokus pada penelitian ini. CBF merupakan salah satu sistem struktur tahan gempa / beban angin yang paling umum digunakan, terutama dengan konfigurasi X seperti terlihat pada Gambar 1. Perilaku bresing konsentrik tipe-X saat menerima beban dapat dibagi ke dalam 3 fase. Pada fase pertama, kedua bresing aktif menerima beban atau disebut fase pra-tebuk. Pada fase kedua, bresing yang mengalami tekan telah tertekuk sehingga dinamakan fase pasca-tebuk. Pada fase ketiga, bresing yang menerima gaya tarik telah mengalami deformasi plastis (fase plastis).



Gambar 1. Skema dari tiga fase CBF saat menerima beban (a) perilaku elastis dengan kedua batang diagonal aktif (b) perilaku elastis dengan satu batang diagonal aktif (c) fase plastis (Amadio et al., 2022)

2.2 STRUKTUR DIAGRID

Dengan pesatnya perkembangan ilmu pengetahuan di bidang material sehingga material dengan kuat tekan tinggi mulai banyak diproduksi, struktur gedung lebih sering diatur berdasarkan persyaratan kekakuannya akibat timpangnya perbandingan antara kekakuan material dengan kekuatannya (Connor, 2003). Diantara berbagai macam sistem struktur untuk gedung tinggi yang telah dikembangkan, struktur diagrid (DIA) merupakan salah satu sistem struktur yang memenuhi persyaratan tersebut. Penerapan modern pertama dari struktur diagrid dimulai pada awal tahun 1960, yaitu pada Gedung IBM di Pittsburgh atau yang sekarang dikenal sebagai gedung United Steel Workers (Montuori et al., 2014). Struktur diagrid kemudian mulai diminati sebagai sistem struktur yang efisien baik secara structural maupun arsitektural, terutama untuk bangunan tinggi seperti Hearst Tower di New York, Central China Television (CCTV) Headquarters di Beijing, dan Lotte Super Tower di Seoul (Kim et al., 2011). Bentuk-bentuk dari gedung tinggi yang menggunakan struktur diagrid cukup bervariasi, mulai dari bentuk persegi panjang yang konvensional, miring, meruncing, atau bentuk bebas (Moon, 2011). Secara umum, bentuk struktur diagrid adalah sebagai berikut.



Gambar 2. Struktur Diagrid
Sumber: (Moon et al., 2007)

Seperti terlihat pada Gambar 2, struktur diagrid tidak memiliki kolom vertikal seperti halnya pada struktur konvensional. Hal ini dapat dilakukan karena batang diagonal pada sistem struktur diagrid tersebut menahan baik gaya gravitasi maupun gaya lateral, sementara pada batang diagonal di rangka terbreis hanya mampu menahan gaya lateral saja (Moon et al., 2007).

2.3 STRESS RATIO

Stress ratio adalah perbandingan antara kuat nominal penampang dengan gaya dalam ultimate (kombinasi maksimum yang bekerja). Jika nilai *stress ratio* dari suatu struktur/komponennya kurang dari satu, maka struktur tersebut dianggap telah memenuhi persyaratan kekuatan. BAB H pada SNI 1729-2020 tentang desain komponen struktur untuk kombinasi gaya dan torsi menyatakan bahwa *stress ratio* dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut (BSN, 2020).

$$\text{Apabila } \frac{Pr}{Pc} \geq 0.2$$

$$\frac{Pr}{Pc} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy} \right) \leq 1.0 \quad (1)$$

$$\text{Apabila } \frac{Pr}{Pc} < 0.2$$

$$\frac{Pr}{2Pc} + \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy} \right) \leq 1.0 \quad (2)$$

dimana: P_r = kekuatan aksial yang diperlukan, kips (N);
 P_c = kekuatan aksial yang tersedia, kips (N);
 M_r = kekuatan lentur yang diperlukan, kip-in. (N-mm);
 M_c = kekuatan lentur yang tersedia, kip-in. (N-mm);
 x = indeks sumbu kuat lentur;
 y = indeks sumbu lemah lentur.

2.4 SIMPANGAN ANTAR TINGKAT

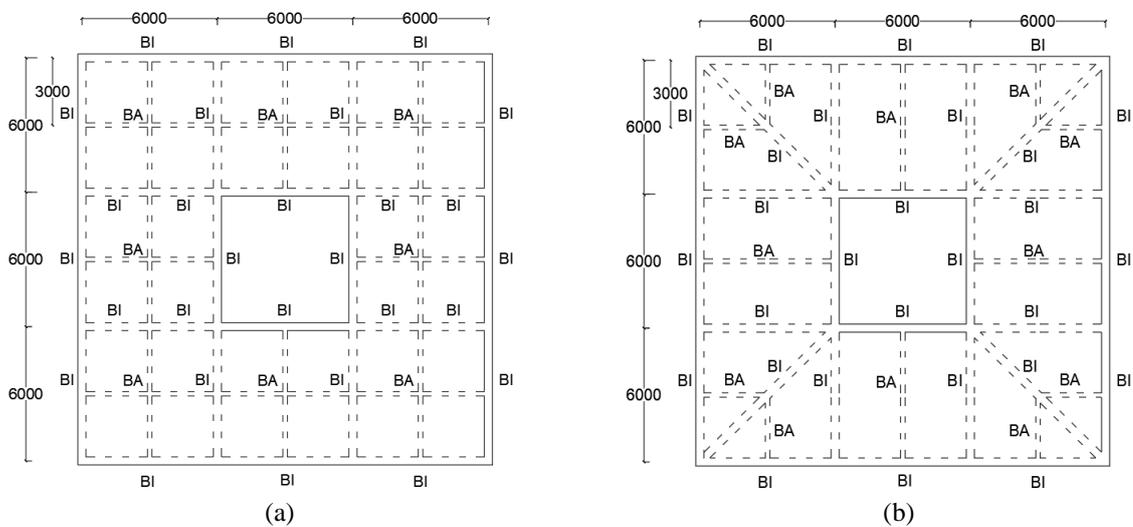
Simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin (Δ_x) (BSN, 2019), seperti yang terdapat pada Tabel 20 SNI 1726-2019. Besarnya simpangan antar tingkat desain dihitung dengan persamaan berikut:

$$\Delta x = \frac{(\delta x - \delta x - 1e) x Cd}{IE} \leq \Delta a \quad (3)$$

dimana: Δ_x = simpangan antar lantai desain;
 Δ_a = simpangan antar lantai ijin;
 δ_{xe} = defleksi pada lantai x;
 δ_{x-1e} = defleksi pada lantai x-1;
 C_d = faktor pembesaran defleksi;
 I_E = faktor keutamaan gempa.

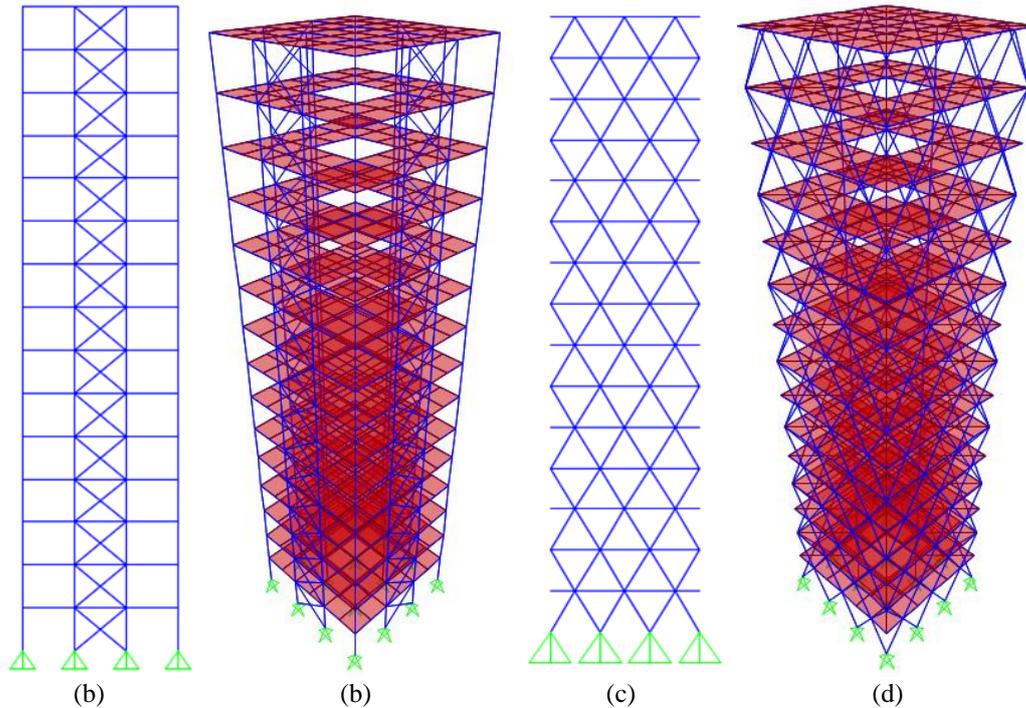
3 METODE

Penelitian ini dimulai dengan menentukan data geometri dari gedung. Terdapat 2 tipe struktur yang telah dimodel, yaitu struktur baja rangka terbreis/*braced frame* tipe-X (BFX) dan struktur diagrid (DIA). Kedua gedung tersebut dimodel dengan denah yang memiliki ukuran konfigurasi balok seperti terlihat pada Gambar 3. Sementara itu, untuk posisi kolom berada pada setiap bentang 6 m dari masing-masing balok induk. Bentang arah X dan Y pada kedua model adalah 6 m, dengan 3 portal pada masing-masing arah tersebut. Masing-masing model memiliki 15 tingkat dengan tinggi antar tingkat sebesar 4 m. Pada bagian tengah denah terdapat bukaan/*void* dengan ukuran 6 m x 6 m yang akan berfungsi sebagai tempat/*clearance* untuk tangga dan lift. Kedua struktur dibebani dengan beban hidup, mati, dan mati tambahan (yang disesuaikan dengan fungsi bangunan yaitu gedung kantor), serta gempa. Beban mati dari struktur telah dihitung oleh program SAP2000 secara otomatis sebagai berat sendiri dari struktur. Pada pelat lantai, terdapat 2 beban yang bekerja, yaitu beban hidup sebesar 3.83 kN/m² dan beban mati tambahan sebesar 1.62 kN/m². Untuk beban gempa pada model digunakan fitur *auto lateral load* yang terdapat pada SAP2000, dengan konfigurasi pembebanan yang disesuaikan dengan kondisi bangunan yaitu di Denpasar.



Gambar 3. Denah Struktur (a) BFX (b) DIA

Hasil pemodelan BFX ditampilkan pada Gambar 4 (a) dan (b). Penempatan bresing X di model BFX adalah pada perimeter gedung, dan bresing hanya dimodelkan pada portal bagian tengah. Hubungan balok induk lantai dengan kolom adalah jepit, sementara hubungan batang bresing dengan balok induk lantai adalah sendi. Pada model DIA, terlihat bahwa kolom-kolom tepi dari struktur BFX digantikan dengan batang diagonal. Penampang yang digunakan pada batang diagonal model struktur DIA adalah *hollow structural section* (HSS) dengan bentuk *pipe*. Batang diagonal yang terhubung dengan balok lantai dimodelkan sebagai sendi dengan memberikan definisi *release* pada momen di kedua ujung batang. Untuk balok dan kolom lainnya, sambungan diasumsikan sebagai jepit. Kedua model dianalisis linier menggunakan program SAP2000 untuk kemudian dibandingkan perilakunya.



Gambar 4. Model Struktur 15 Lantai (a) Portal Tepi BFX (b) 3D BFX (c) Portal Tepi DIA (d) 3D DIA

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Dimensi Penampang

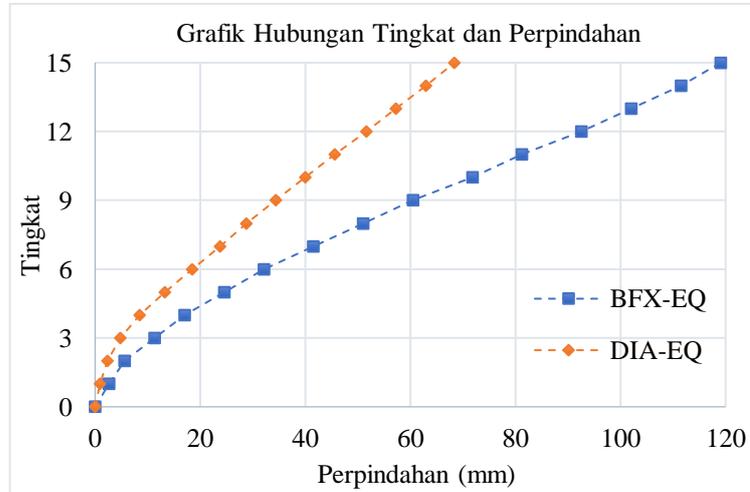
Penampang yang digunakan dalam model merupakan penampang *import* AISC. Terdapat 2 tipe penampang baja yang digunakan, yaitu *wide flange* (WF) dan *hollow structural steel* (HSS) dengan tipe *round*. Penampang baja HSS digunakan pada struktur kolom diagrid, sementara untuk elemen struktur lainnya menggunakan penampang baja WF. Dimensi yang dipilih tersebut berdasarkan hasil pemilihan berulang kali/*trial and error* hingga memperoleh dimensi yang memenuhi syarat kekakuan dan kekuatan. Dimensi penampang untuk setiap elemen struktur seperti kolom tepi, kolom utama, balok induk, balok anak, bresing, dan diagrid untuk masing-masing tingkat dapat dilihat pada Tabel 1. Dimensi untuk masing-masing penampang ditandai dengan kode seperti “400-415” yang menunjukkan bahwa penampang tersebut memiliki tinggi 400 mm dan berat penampang 415 kg/m. Berdasarkan tabel tersebut, terlihat bahwa seluruh penampang yang digunakan telah memenuhi syarat kekuatan dimana *stress ratio* penampang-penampang tersebut telah kurang dari satu, sehingga peninjauan terhadap perilaku lainnya dapat dilakukan.

Tabel 1. Tabel dimensi penampang dan *stress ratio*

Tingkat	BFX				DIA			
	Kolom (Tepi)	Balok Induk	Balok Anak	Bresing	Kolom (Core)	Diagrid	Balok Induk	Balok Anak
1-3	WF400 - 415	WF360 - 64	WF200 - 59	WF250- 73	WF 360 - 382	HSS 244.5 - 12.7	WF250 - 32.7	WF250 - 22.3
4-6	WF400 - 415	WF360 - 64	WF200 - 59	WF250- 58	WF 360 - 382	HSS 219 - 12.7	WF 250 - 32.7	WF250 - 22.3
7-9	WF360 - 287	WF250 - 67	WF200 - 59	WF200- 52	WF 360 - 216	HSS 177 - 12.7	WF 250 - 32.7	WF250 - 22.3
10-12	WF310 - 202	WF250 - 58	WF 200 - 59	WF200- 46.1	WF310 - 158	HSS 168 - 12.7	WF 250 - 32.7	WF250 - 22.3
13-15	WF310 - 158	WF250 - 58	WF200 - 59	WF200- 35.9	WF250 - 101	HSS 152.4 - 12.7	WF 250 - 32.7	WF250 - 22.3
Atap	-	WF250 - 58	WF200 - 59	-	-	-	WF 250 - 22.3	WF250 - 22.3
Stress Ratio	0.116 - 0.398	0.156- 0.564	0.16 - 0.89	0.103 - 0.634	0.339 - 0.941	0.365 - 0.917	0.354 - 0.979	0.22 - 0.663

4.2 Perpindahan

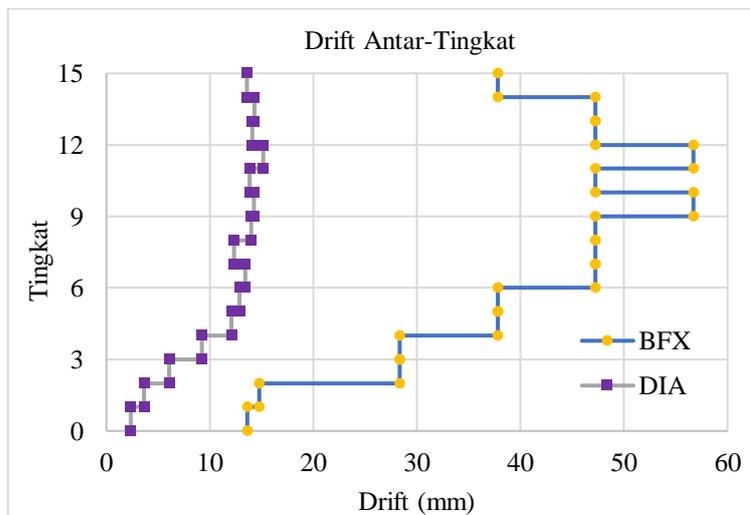
Perpindahan yang dibandingkan dari kedua model merupakan perpindahan akibat dari kombinasi beban gempa. Perpindahan tersebut diukur pada setiap tingkat, mulai dari tingkat 2 hingga 15. Hasil perbandingan kedua perpindahan tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan tingkat dan perpindahan pada Gambar 5. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa perpindahan yang terjadi pada model BFX jauh lebih besar dibandingkan dengan model DIA. Rasio antara kedua perpindahan maksimum (di tingkat teratas) dari kedua model mencapai 1 : 1.9. Hal tersebut menandakan bahwa struktur DIA jauh lebih kaku dibandingkan dengan struktur BFX.



Gambar 5. Perbandingan Tingkat dan Perpindahan BFX dan DIA

4.3 Simpangan Antar Tingkat (Inter Storey Drift)

Simpangan antar tingkat untuk masing-masing model ditampilkan pada Gambar 6. Simpangan antar lantai desain harus berada di bawah simpangan antar tingkat izin, yaitu 100 mm. Kedua model telah memenuhi syarat kekauan, dan hasil perbandingan simpangan antar tingkat dari kedua model menunjukkan bahwa drift-antar tingkat dari struktur BFX dan DIA masih jauh di bawah drift izin.

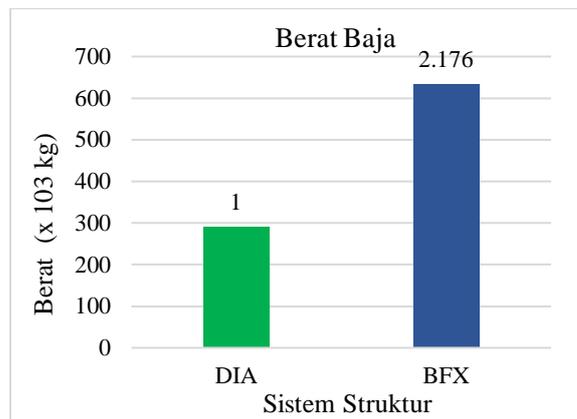


Gambar 6. Perbandingan Drift Antar-Tingkat BFX dan DIA

4.4 Berat Struktur

Untuk mengetahui efisiensi dari masing-masing tipe struktur, berat dari kedua struktur telah dibandingkan. Berat total struktur tersebut dihitung berdasarkan hasil perkalian massa penampang dengan panjang totalnya (dalam satuan panjang yang sama). Dalam penelitian ini, berat tersebut telah dihitung secara otomatis oleh program SAP2000. Perbandingan berat struktur antara model BFX dan model DIA 15 lantai akan disajikan dalam bentuk *bar chart* pada Gambar 7. Berdasarkan hasil analisis, struktur DIA lebih ringan

dibandingkan dengan BFX. Berat baja model DIA adalah 290.907,77 kg, sedangkan model BFX adalah 632.845 kg. Rasio perbandingan berat baja antara kedua model adalah 1 : 2,176 (DIA : BFX). Berdasarkan hal tersebut, dapat dikatakan bahwa struktur BF memerlukan lebih banyak material dibandingkan dengan DIA, yang akan berpengaruh signifikan terhadap biaya pembuatan masing-masing tipe struktur.



Gambar 7. Perbandingan Berat Baja Struktur BFX dan DIA

5 KESIMPULAN

Setelah perilaku struktur BFX dan DIA dibandingkan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem struktur DIA lebih kaku dibandingkan dengan BFX, terlihat dari rasio perpindahan tingkat model BFX sebesar 1.9 kali model DIA.
2. DIA lebih efisien dibandingkan BFX, terlihat dari rasio berat baja antara DIA dengan MF yaitu 1 : 2,176.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M. M., & Moon, K. S. (2007). Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. *Architectural Science Review*, 50(3), 205–223. <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5027>
- Amadio, C., Bomben, L., & Noè, S. (2022). Design of X-Concentric Braced Steel Frame Systems Using an Equivalent Stiffness in a Modal Elastic Analysis. *Buildings*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/buildings12030359>
- Arpitha, M. L., Sahana, T. S., & Siddu, K. C. S. (2016). Comparative Study of Diagrid Structures over Braced tube Structures. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 5(7), 13652–13660. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2016.0507209>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Standar Nasional Indonesia SNI 1726:2019*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Penetapan Standar Nasional Indonesia 1729 : 2020 Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural* (Issue 8).
- Connor, J. J. (2003). *Introduction To Structural Motion Control*.
- Kim, Y. J., Kim, M. H., Jung, I. Y., Ju, Y. K., & Kim, S. D. (2011). Experimental investigation of the cyclic behavior of nodes in diagrid structures. *Engineering Structures*, 33(7), 2134–2144. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.03.004>
- Leonard, J. (2007). *Investigation of Shear Lag Effect in High-rise Buildings with Diagrid System*.
- Montuori, G. M., Mele, E., Brandonisio, G., & De Luca, A. (2014). Geometrical patterns for diagrid buildings: Exploring alternative design strategies from the structural point of view. *Engineering Structures*, 71, 112–127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.017>
- Moon, K. S. (2011). Diagrid structures for complex-shaped tall buildings. *Procedia Engineering*, 14, 1343–1350. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.169>
- Moon, K. S., Connor, J. J., & Fernandez, J. E. (2007). Diagrid structural systems for tall buildings: Characteristics and methodology for preliminary design. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 16(2), 205–230. <https://doi.org/10.1002/tal.311>
- Naqash, M. T. (2014). An Overview on the Seismic Design of Braced Frames. *American Journal of Civil Engineering*, 2(2), 41. <https://doi.org/10.11648/j.ajce.20140202.15>
- Smith, B. S., & Coull, A. (1991). *Tall Building Structures: Analysis and Design*.