

ANALISIS KINERJA GEDUNG TINGGI DENGAN DIAGRID SEBAGAI ALTERNATIF DARI STRUKTUR BAJA RANGKA TERBREIS

Ida Bagus Prastha Bhisama¹, Made Hendra Prayoga¹, I Putu Agus Putra Wirawan²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Udayana

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Mahasaraswati Denpasar

Email: prasthab@unud.ac.id

ABSTRAK: Sejak akhir abad ke-19, rangka baja terbreis (BF) menjadi pilihan dalam desain gedung tinggi karena adanya bresing yang sangat efisien dalam menahan gaya lateral yang diterima struktur. Namun demikian, bresing tetap memiliki kekurangan utama yakni kurang estetikanya tampilan fasad gedung akibat penggunaan bresing yang juga dapat menghalangi area untuk bukaan pintu ataupun jendela serta kolom eksternal yang membuat struktur terkesan kaku. Struktur diagrid (DIA) muncul sebagai alternatif yang unggul secara estetik karena dengan penggunaan batang diagonal pada perimeter struktur membuat kolom vertikal tidak lagi diperlukan dan tampilan gedung menjadi lebih futuristik. Pada penelitian ini, kinerja struktur DIA dibandingkan dengan BF tipe-X (BFX) pada gedung 15 lantai di program SAP2000 dengan analisis statik non-linier *pushover*. Hasil analisis menunjukkan struktur DIA mampu menahan gaya geser dasar 14 -17% lebih besar dengan simpangan yang relatif lebih kecil dari struktur BFX yang menunjukkan bahwa DIA lebih kuat dalam menahan beban lateral akibat gempa. Dari hasil perbandingan taraf kinerja, struktur BFX dan DIA memiliki taraf kinerja IO (*Immediate Occupancy*) dengan sendi plastis pertama pada BFX terbentuk di bresing dan DIA di batang diagonalnya. Perbandingan berat kedua struktur menunjukkan rasio 1 : 2,176 (DIA : BFX) yang membuktikan bahwa DIA lebih ringan dari BFX. Berdasarkan hasil tersebut, DIA merupakan alternatif BFX yang tepat karena lebih efisien serta dapat menahan gaya geser dasar yang lebih besar.

Kata kunci: diagrid, rangka terbreis, bresing, kinerja struktur

PERFORMANCE ANALYSIS OF TALL BUILDING WITH DIAGRID AS AN ALTERNATIVE TO STEEL BRACED FRAME STRUCTURE

ABSTRACT: Since the end of the 19th century, braced frames (BF) have become the choice for tall building design because of bracing that are highly efficient in resisting the lateral forces. However, it still has some major drawbacks, such as the lack of aesthetic appearance of the building facade due to the use of bracings which can also block areas for door or window openings as well as external columns which make the structure seem stiff. The diagrid structure (DIA) appears as an aesthetically superior alternative because of diagonal beams on the perimeter that makes vertical columns unnecessary and the building appears more futuristic. In this study, performance of DIA was compared with BF with X-type bracing (BFX) in a 15-storey building in the SAP2000 program using static non-linear *pushover* analysis. The analysis results show that DIA structure is able to withstand 14 -17% greater base shear forces with a relatively smaller displacement than the BFX structure which indicates that DIA is stronger in resisting lateral loads due to earthquakes. From performance levels comparison, both structures have an IO (*Immediate Occupancy*) performance level with the first plastic hinge on BFX formed in the braces and DIA in the diagonal rods. Comparison of the weight between the two structures showed a ratio of 1 : 2.176 (DIA : BFX), which proved that DIA is lighter than BFX. Based on these results, DIA was the suitable BFX alternative because it was more efficient and can withstand greater base shear forces.

Keywords: diagrid, braced frame, bracing, structural performance

PENDAHULUAN

Gedung tinggi menjadi solusi dalam mengatasi kebutuhan lahan yang kian meningkat akibat pesatnya laju pertumbuhan populasi. Dengan kapasitas yang besar dan minimnya lahan yang dibutuhkan, pembangunan gedung tinggi telah banyak dilakukan terutama di daerah padat penduduk. Rangka baja terbreis/*braced frame* (BF) menjadi salah satu sistem struktur yang paling diminati untuk gedung tinggi karena keberadaan bresing. Bresing merupakan metode yang sangat efisien dan ekonomis untuk memperkuat struktur dalam menahan beban lateral (Din, 2017). Keefektifan bresing sebagai elemen penguat diagonal pada desain awal bangunan tinggi mulai digunakan sejak akhir abad ke-19, dengan penggunaan bresing bervariasi seperti tipe-K, X, dan eksentrik (Moon et al., 2007). Dibandingkan dengan rangka terbuka/*moment frame* (MF), perilaku dari BF cenderung lebih baik. Namun demikian, salah satu kekurangan utama dari BF adalah kurang estetisnya tampilan gedung yang

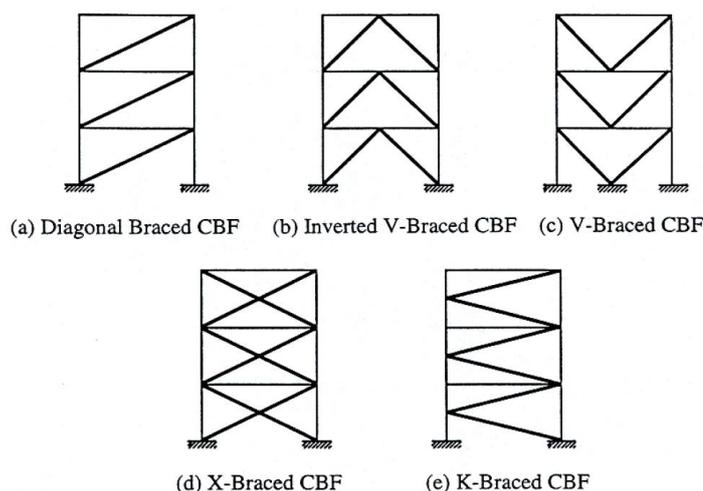
menggunakan sistem struktur tersebut, karena keberadaan bresing yang berada di antara rangka serta jumlah kolom yang cukup banyak.

Struktur diagrid (DIA) muncul sebagai alternatif dari BF. Secara estetis, tampilan eksterior struktur dengan sistem DIA lebih baik karena berkurangnya jumlah kolom vertikal yang digunakan pada bagian perimeter/kolom eksternal. Hal tersebut membuat struktur DIA mulai diminati karena keefisienannya dari segi arsitektural. Selain segi estetika, tinjauan terhadap kekuatan dan kekakuan struktur menjadikan DIA lebih diminati. Perbandingan deformasi antara kedua struktur menunjukkan bahwa DIA 1.9 kali lebih kaku dibanding BF (tipe-X) (Bhisama dan Prayoga, 2023). Hal tersebut menjadi salah satu alasan bahwa DIA memiliki perilaku yang lebih baik dibanding BF. Namun, perbandingan kinerja antara kedua sistem struktur belum cukup jelas dan perlu untuk diselidiki lebih lanjut.

Dalam penelitian ini, kinerja dari kedua sistem struktur akan dibandingkan dalam desain gedung tinggi 15 lantai yang menerima beban gempa sebagai beban lateral. Pada struktur BF, terdapat 4 kolom inti dan 12 kolom eksterior, sedangkan struktur DIA terdiri dari diagonal grid yang bertumpu pada 12 pondasi. Perbandingan kinerja yang dilakukan antara lain meliputi perbandingan kurva *pushover* dan gaya geser dasar, mekanisme sendi plastis yang terjadi, serta penentuan level kinerja struktur. Sebagai perbandingan efisiensi, berat dari material baja yang dibutuhkan pada kedua struktur juga dibandingkan.

STRUKTUR RANGKA TERBREIS

Dalam desain struktur baja, sistem penahan beban lateral memiliki peran penting yang dapat berupa rangka terbreis (Naqash, 2014). Rangka terbreis adalah sistem rangka batang vertikal yang memberikan ketahanan terhadap gaya lateral serta stabilitas pada sistem struktur (BSN, 2020). Sistem struktur ini menggunakan batang diagonal sebagai bresing yang berada di antara kolom vertikal dan balok horizontal, sehingga cukup sulit untuk mendesain gedung tinggi yang bebas atau kompleks (Ali dan Moon, 2007). Balok dan kolom yang kemudian membentuk rangka akan menahan gaya vertikal, sementara bresing akan menahan gaya lateral pada struktur. Keberadaan bresing pada rangka akan mengurangi perpindahan lateral yang terjadi pada struktur serta momen lentur pada kolom. Bresing cukup ekonomis, mudah dipasang, tidak menempati banyak ruang serta memiliki fleksibilitas desain untuk memenuhi kebutuhan kekuatan dan kekakuan struktur (Sawarkar dan Satone, 2022). Rangka terbreis terbagi ke dalam 2 kategori, yaitu eksentrik/*eccentric braced frame* (EBF) dan konsentrik/*concentric braced frame* (CBF). Perbedaan keduanya adalah elemen *link* yang terdapat pada struktur EBF. Pada penelitian ini, tipe rangka terbreis akan difokuskan pada CBF.



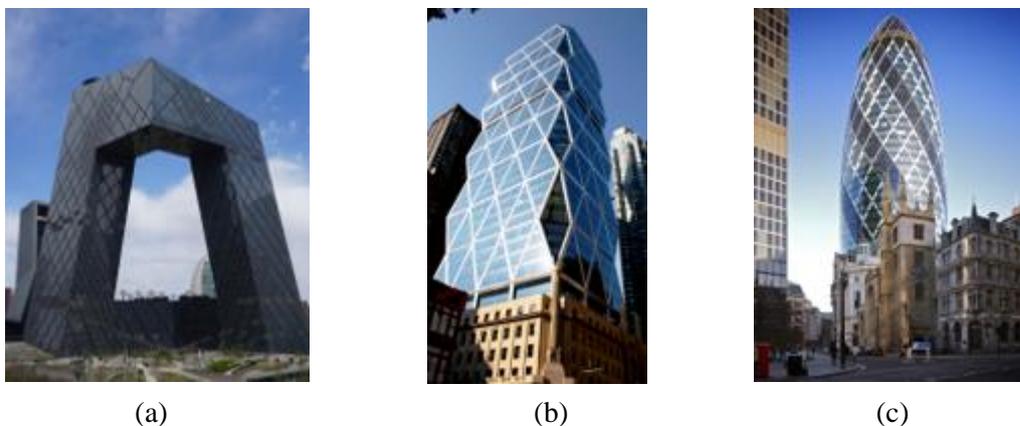
Gambar 1. Konfigurasi Bresing pada Struktur
Sumber: Uang et al., 1994

Beberapa tipe CBF yang umum digunakan dalam sistem rangka terbreis adalah tipe-diagonal, V terbalik, V, X/cross, dan K seperti yang ditampilkan pada Gambar 1. Variasi penempatan bresing pada struktur disesuaikan dengan kebutuhan struktur maupun arsitektur. Struktur rangka terbreis/*braced frame* tipe-X (BFX) dipilih sebagai pembanding dengan struktur DIA karena konfigurasinya cukup sering dijumpai dalam gedung tinggi maupun sebagai perkuatan. Bresing tipe-X terdiri dari 2 elemen

diagonal yang menyilang, dengan perilaku seperti rangka batang (menerima tarik dan tekan) berdasarkan arah beban yang bekerja pada struktur. Salah satu kelemahan utama dari BFX adalah penempatannya yang akan mengganggu posisi bukaan (pintu atau jendela) pada bagian perimeter bangunan serta struktur akan terkesan kaku sehingga mengurangi nilai estetikanya.

STRUKTUR DIAGRID

Diagrid (DIA) merupakan sistem struktur gedung tinggi yang tersusun atas balok horisontal dan elemen diagonal yang berperan sebagai kolom dan bresing. Istilah diagrid berasal dari kombinasi kata *diagonal* dan *grid*. Konsep struktur DIA sendiri sebenarnya bukan merupakan konsep yang baru, karena kestabilan dari sistem struktur diagonal adalah solusi klasik dan paling natural pada struktur baja dan penggunaannya telah menyebar luas (Montuori et al., 2014). Dalam 1 dekade terakhir, struktur diagrid mulai diminati karena efisiensi strukturalnya serta potensi estetika yang didapat dari konfigurasi geometri yang unik. Potensi estetika DIA yang hampir tidak terbatas memungkinkannya untuk beradaptasi dengan hampir setiap bentuk bangunan dan mendapatkan tampilan fasad yang elegan melalui integrasi desain arsitektur dan struktur. Beberapa contoh dari bangunan tersebut dapat dilihat seperti pada Central China Television (CCTV) Headquarters di Beijing, Hearst Tower di New York, dan Swiss Re Tower di London (Kim et al., 2011).



Gambar 2. Bangunan dengan Sistem Struktur Diagrid:
(a) CCTV Headquarters; (b) Hearst Tower; dan (c) Swiss Re Tower
Sumber: wikipedia.com

Salah satu perbedaan utama dari struktur DIA dibandingkan dengan BF adalah tidak adanya kolom eksternal pada struktur tersebut. Hal tersebut dapat terjadi karena batang diagonal pada struktur DIA mampu menahan gaya gravitasi dan lateral, berbeda dengan bresing pada rangka terbreis yang hanya mampu menahan gaya lateral (Moon et al., 2007). Dengan tidak adanya kolom eksternal, tentu tampilan dari gedung dengan struktur DIA akan terlihat lebih modern dan futuristik. Selain itu, pengurangan kolom eksternal juga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan material, sehingga DIA menjadi salah satu alternatif yang cukup baik terhadap struktur BF.

ANALISIS KINERJA STRUKTUR

Analisis kinerja struktur / analisis *pushover* merupakan penyederhanaan dari analisis dinamis nonlinier (*Nonlinear Time History Analysis*). Pengaruh beban gempa rencana diasumsikan sebagai beban statis yang bekerja pada pusat massa setiap lantai. Pada *pushover analysis*, beban statis ini ditingkatkan secara bertahap hingga struktur mencapai taraf kinerja tertentu sehingga dapat diketahui perilaku seismik struktur. Hasil dari *pushover analysis* yaitu sebagai berikut:

- Kurva kapasitas struktur;
- Skema keruntuhan struktur atau formasi sendi plastis yang terjadi;
- *Performance level* atau taraf kinerja dari struktur yang dianalisis.

Kurva kapasitas struktur

Hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan hasil analisis kinerja ditunjukkan dalam bentuk kurva kapasitas. Kekakuan dan kekuatan struktur dalam menahan beban gempa dapat ditentukan berdasarkan kurva kapasitas struktur. Titik *performance point* merupakan titik potong pada kurva

kapasitas yang menunjukkan taraf kinerja struktur. *Performance point* dapat ditentukan menggunakan metode pada ATC-40, FEMA-356 dan FEMA-440.

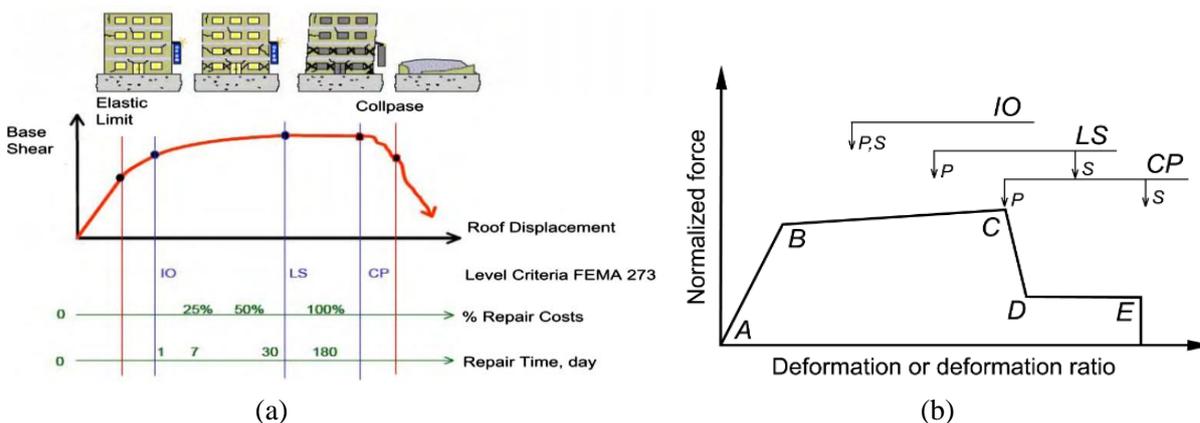
Mekanisme terbentuknya sendi plastis

Ketika struktur dibebani dengan beban gempa, maka akan terjadi plastifikasi atau disipasi energi pada daerah sendi plastis. Elemen struktur pada daerah sendi plastis memiliki persyaratan detailing yang lebih ketat dibandingkan dengan daerah non sendi plastis. Elemen struktur yang didesain mengalami plastifikasi harus bersifat duktail dan tidak mudah runtuh. Mekanisme atau urutan terbentuknya sendi plastis harus diperiksa dan dipastikan bahwa plastifikasi terjadi pada elemen struktur yang direncanakan mengalami plastifikasi.

Taraf kinerja struktur

Kondisi batas maksimum kerusakan struktur pada analisis kinerja ditunjukkan dalam taraf kinerja struktur, yang dibedakan menjadi 2 kategori, yaitu *Discrete Structural Performance Levels* dan *Intermediate Structural Performance Ranges* (ASCE, 2000). *Discrete Structural Performance Levels* terdiri dari *Immediate Occupancy*, *Life Safety*, dan *Collapse Prevention*. Sedangkan *Intermediate Structural Performance Ranges* terdiri dari *Damage Control Range* dan *Limited Safety Range*. Gambaran umum terkait tingkat kerusakan bangunan dan taraf kinerja ditampilkan pada Gambar 3a.

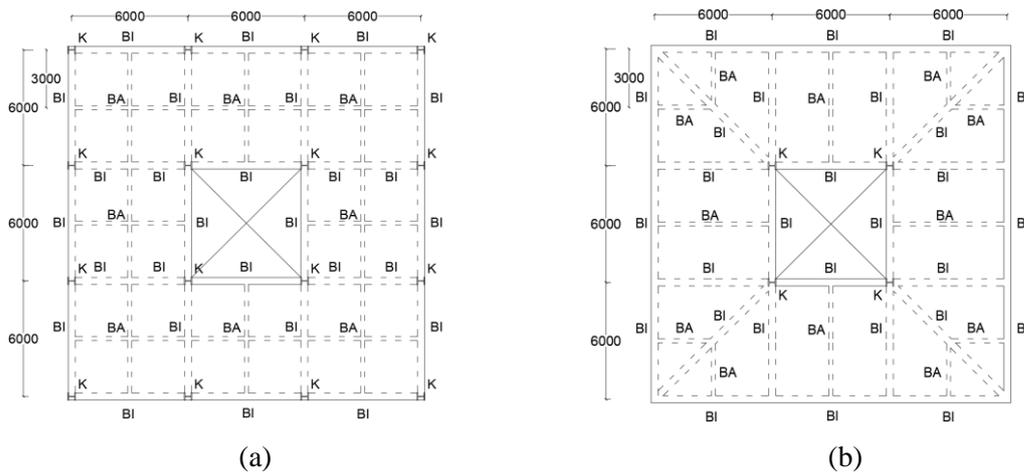
Untuk menentukan taraf kinerja struktur, digunakan suatu kriteria tertentu/*acceptance criteria* yang dapat ditentukan dalam bentuk deformasi (ϵ atau Δ) seperti pada Gambar 3b. Titik A merupakan titik awal. Titik B yaitu kondisi leleh pertama (*First Yield*). Titik C yaitu kondisi ultimit atau kondisi batas dari suatu elemen. Sedangkan titik D dan E merupakan kapasitas sisa dari suatu elemen.



Gambar 3. (a) Taraf Kinerja Struktur Bangunan dan (b) *Acceptance Criteria* berdasarkan Deformasi
Sumber: (FEMA, 1997)

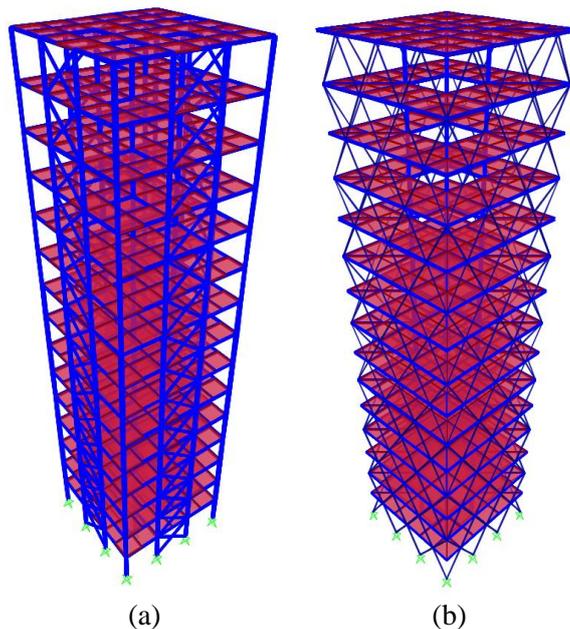
METODE PENELITIAN

Penelitian ini membandingkan kinerja struktur BFX dan DIA, yang dimulai dengan penentuan data geometri struktur. Denah fiktif seperti yang ditampilkan pada Gambar 4 digunakan sebagai dasar pemodelan dari kedua struktur. Balok induk (BI) pada masing-masing denah memiliki bentang 6 m baik pada arah X maupun Y. Pada BFX posisi kolom berada pada setiap ujung bentang dari BI (total 16 kolom), sementara pada DIA hanya ada pada area inti/*core*, yaitu sejumlah 4 kolom. Pada bagian tengah (*core*) terdapat bukaan/*void* yang merupakan area bukaan untuk tangga dan *lift* yang terdapat pada kedua struktur. Pembebanan pada struktur meliputi beban mati, mati tambahan, hidup (sesuai fungsi bangunan yaitu kantor), dan beban gempa.



(a) (b)
Gambar 4. Denah Struktur Tipikal (a) BFX (b) DIA

Pemodelan elemen hingga dari struktur BFX dan DIA dilakukan pada piranti lunak SAP2000, seperti yang ditampilkan pada Gambar 5. Masing-masing gedung dimodel setinggi 15 lantai dengan luas per-lantai 18 x 18 meter dan tinggi total 75 meter. Posisi bresing pada BFX ditempatkan pada portal tengah untuk masing-masing portal pada bagian tepi bangunan. Pada DIA, batang diagonal dimodel dengan menggunakan penampang *hollow structural section* (HSS) dengan bentuk pipa/pipe. Bagian ujung bresing maupun batang diagonal yang bertumpu/terhubung dengan pertemuan balok-kolom pada gedung dimodelkan sebagai sendi dengan mendefinisikan *release* terhadap momen pada ujung-ujung batang. Kedua model telah dianalisis secara linier dan telah memenuhi syarat kekakuan dan kekuatan, yang akan ditampilkan secara singkat dalam bentuk tabel.



(a) (b)
Gambar 5. Model 3D Struktur pada SAP2000 (a) BFX (b) DIA

Setelah analisis linier, penelitian dilanjutkan dengan analisis kinerja untuk mengetahui kinerja struktur akibat beban gempa dengan menggunakan analisis statik non-linier *pushover*. Beban gempa dimodelkan sebagai beban lateral statis yang bekerja di pusat massa setiap lantai bangunan. Beban lateral ini kemudian terus ditingkatkan secara bertahap sampai struktur mencapai taraf kinerja tertentu. Hasil dari analisis statik non-linier *pushover* adalah kurva kapasitas struktur yang menggambarkan hubungan gaya geser dasar dengan perpindahan ($V-\Delta$), mekanisme terbentuknya sendi plastis dan titik *performnace point* yang menunjukkan *demand* atau taraf kinerja struktur akibat beban gempa rencana. Dalam penelitian ini digunakan dua metode untuk menentukan titik *performnace point* yaitu *Capacity*

Spectrum Method (CSM) berdasarkan ATC-40 dan *Displacement Coefficient Method* (DCM) berdasarkan FEMA-356.

Ketika struktur dibebani dengan beban gempa, akan terjadi plastifikasi atau disipasi energi pada daerah sendi plastis. Pemodelan sendi plastis digunakan untuk memodelkan perilaku nonlinier dari elemen struktur seperti balok, kolom, dan bresing. Pada SAP2000, sendi plastis dimodelkan menggunakan fitur *auto hinge*. Sendi plastis balok dimodelkan sebagai sendi plastis momen (M3) pada kedua ujung balok. Pada kolom digunakan sendi plastis aksial-momen (P-M2-M3) pada kedua ujung kolom. Sedangkan pada bresing dan elemen diagrid digunakan sendi plastis aksial (P) pada tengah bentang elemen. Hasil analisis kinerja kedua struktur kemudian dibandingkan dalam bentuk perbandingan kurva kapasitas, mekanisme terbentuknya sendi plastis, serta taraf kinerja struktur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

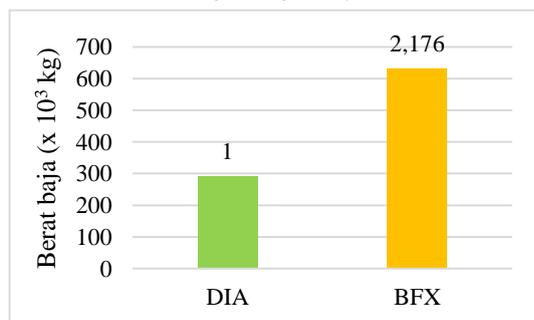
Dimensi, stress ratio elemen, dan perbandingan berat struktur

Sebelum melakukan analisis kinerja, penampang yang digunakan pada elemen struktur harus memenuhi persyaratan kekakuan dan kekuatan. Setelah melalui proses *trial dan error* dengan penampang *import AISC*, dimensi dan *stress ratio* penampang ditampilkan pada Tabel 1. Kode “400-415” menunjukkan tinggi penampang 400 mm dan berat 415 kg/m. *Stress ratio* seluruh penampang telah kurang dari 1 (memenuhi syarat), sehingga analisis dapat dilanjutkan ke tahap analisis kinerja.

Tabel 1. Dimensi dan *stress ratio* penampang BFX dan DIA

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

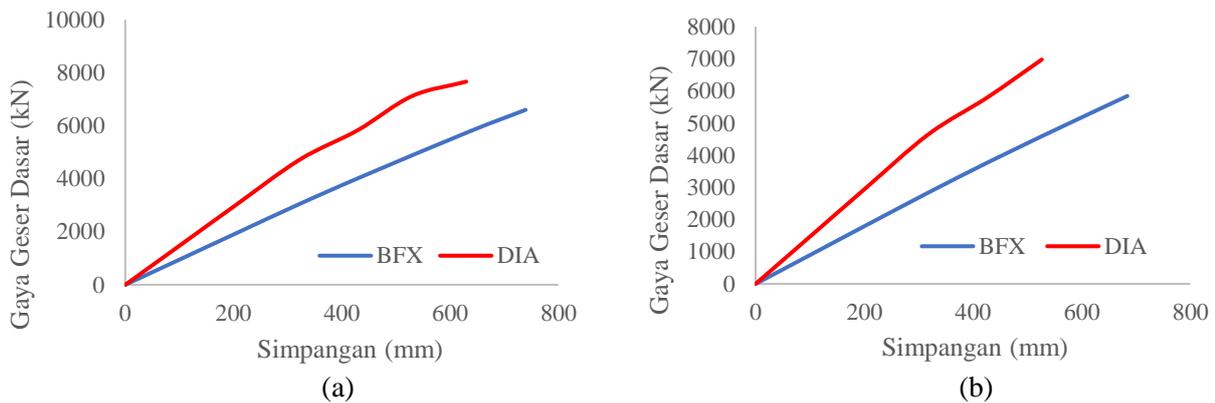
Berat keseluruhan struktur juga dibandingkan untuk mengetahui tingkat efisiensi dari struktur DIA sebagai alternatif dari BFX. Berat total baja dari kedua struktur telah dihitung secara otomatis oleh program SAP2000. Berdasarkan hasil perhitungan oleh program, berat total baja pada model BFX adalah 632.845 kg sedangkan DIA hanya 290.907 kg. Jika dibandingkan dalam bentuk diagram batang seperti pada Gambar 6, terlihat bahwa rasio perbandingan berat baja kedua struktur adalah 1 : 2,176 (DIA : BFX). Dengan struktur yang jauh lebih ringan, DIA lebih efisien dalam penggunaan material dan tentu akan berpengaruh signifikan dalam mengurangi biaya konstruksi dari gedung tinggi tersebut.



Gambar 6. Perbandingan Berat Baja Struktur BFX dan DIA

Perbandingan kurva kapasitas dan performance point

Dalam analisis kinerja, dibandingkan kurva kapasitas struktur untuk dua arah yaitu arah X dan Y. Perbandingan kurva kapasitas untuk struktur BFX dengan DIA ditampilkan pada Gambar 7. Berdasarkan hasil analisis, kurva kapasitas struktur DIA lebih besar dibandingkan dengan struktur BFX. Struktur DIA memiliki kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan struktur BFX. Untuk nilai simpangan yang sama, struktur DIA dapat menahan gaya geser dasar yang lebih besar jika dibandingkan dengan struktur BFX. Untuk mengetahui perbandingan taraf kinerja struktur, dibandingkan simpangan dan gaya geser dasar pada titik *performance point*. Simpangan dan gaya geser dasar pada titik *performnace point* berdasarkan metode ATC-40 dan FEMA-356 ditampilkan pada Tabel 2 dan 3.



Gambar 7. Kurva Kapasitas Struktur (a) Arah X (b) Arah Y

Metode ATC-40 memberikan nilai simpangan dan gaya geser dasar yang lebih besar jika dibandingkan dengan Metode FEMA-356 tetapi dengan perbedaan yang sangat kecil yaitu sekitar 0.6%. Sehingga Metode ATC-40 lebih konservatif untuk digunakan dalam analisis kinerja struktur. Berdasarkan kedua metode tersebut, struktur DIA dapat menahan gaya geser dasar yang lebih besar dengan simpangan yang relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan struktur BFX. Berdasarkan Metode ATC-40 dan FEMA-356, gaya geser dasar struktur DIA lebih besar 14% (arah X) dan 17% (arah Y) jika dibandingkan dengan struktur BFX. Sehingga berdasarkan hasil analisis statik non-linier *pushover*, dapat disimpulkan bahwa struktur DIA lebih kuat dalam menahan beban lateral akibat gempa. Struktur BFX memiliki kekakuan dan kekuatan yang lebih lemah dibandingkan dengan struktur DIA.

Tabel 2. *Performance point* berdasarkan ATC-40

Tipe Struktur	Arah X		Arah Y	
	Perpindahan Maksimum (mm)	Gaya Geser Dasar (kN)	Perpindahan Maksimum (mm)	Gaya Geser Dasar (kN)
BFX	215.60	2046.08	221.87	1987.55
DIA	162.17	2389.12	162.32	2386.75

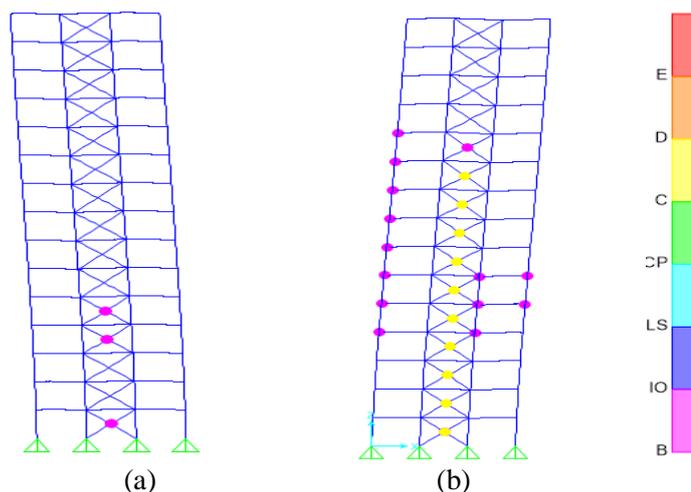
Tabel 3. *Performance point* berdasarkan FEMA-356

Tipe Struktur	Arah X		Arah Y	
	Perpindahan Maksimum (mm)	Gaya Geser Dasar (kN)	Perpindahan Maksimum (mm)	Gaya Geser Dasar (kN)
BFX	214.44	2035.18	220.53	1975.52
DIA	161.14	2373.85	161.27	2371.30

Mekanisme terbentuknya sendi plastis dan taraf kinerja

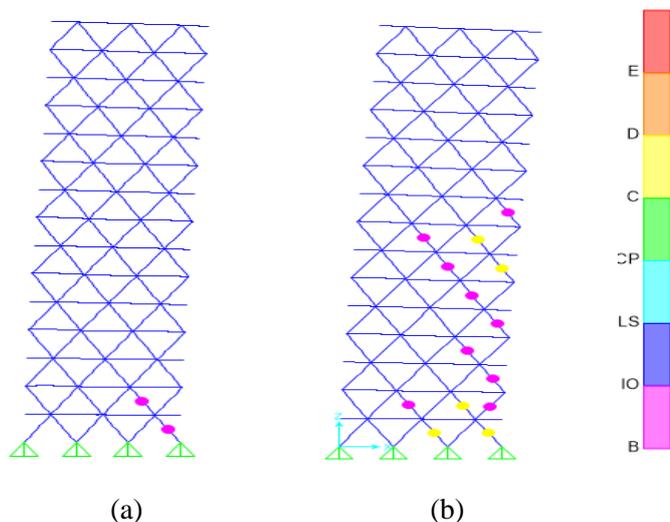
Mekanisme terbentuknya sendi plastis yang diharapkan pada struktur BFX yaitu sendi plastis pertama terjadi pada bresing kemudian dilanjutkan dengan pembentukan sendi plastis pada balok dan kolom. Disipasi energi pertama terjadi pada bresing kemudian dilanjutkan pada elemen balok dan kolom

jika beban gempa terus ditingkatkan. Berdasarkan mekanisme ini, kerusakan pertama akan terjadi pada bresing. Jika beban gempa terus ditingkatkan sampai melebihi beban gempa rencana, akan terjadi kerusakan pada balok dan kolom. Mekanisme terbentuknya sendi plastis untuk struktur BFX ditampilkan pada Gambar 8. Gambar 8. (a) menunjukkan kondisi saat *performance point*. Plastifikasi baru terjadi pada bresing tingkat bawah bangunan dengan taraf kinerja IO (*Immediate Occupancy*). Jika beban gempa terus ditingkatkan melebihi *demand* atau titik *performance point*, maka plastifikasi akan menyebar ke elemen *frame* dengan taraf kinerja IO (*Immediate Occupancy*) seperti pada Gambar 8. (b). Pada kondisi ini sebagian besar bresing sudah mengalami kegagalan. Nilai *drift* maksimum arah X dan Y untuk struktur BFX pada titik *performance point* yaitu 0.0029 dan 0.0030. Sehingga secara global berdasarkan ATC-40 struktur BFX memiliki taraf kinerja IO (*Immediate Occupancy*).



Gambar 8. Mekanisme Terbentuknya Sendi Plastis (BFX) (a) *Performance Point* (Step 4) (b) Step 7

Pada struktur DIA, sendi plastis pertama terjadi pada struktur diagrid kemudian dilanjutkan dengan pembentukan sendi plastis pada elemen *frame*. Struktur diagrid sebagai struktur utama penahan beban gempa. Disipasi energi pertama terjadi pada struktur diagrid kemudian dilanjutkan pada elemen *frame*. Mekanisme terbentuknya sendi plastis untuk struktur DIA ditampilkan pada Gambar 9. Gambar 9. (a) menunjukkan kondisi saat *performance point*. Plastifikasi baru terjadi pada struktur diagrid tingkat bawah bangunan dengan taraf kinerja IO (*Immediate Occupancy*). Jika beban gempa terus ditingkatkan melebihi *demand* atau titik *performance point*, maka plastifikasi akan menyebar ke struktur diagrid lainnya seperti pada Gambar 9. (b). Pada kondisi ini beberapa struktur diagrid sudah mengalami kegagalan tetapi belum terjadi plastifikasi pada elemen *frame*. Nilai *drift* maksimum arah X dan Y untuk struktur DIA pada titik *performance point* yaitu 0.0022. Sehingga secara global berdasarkan ATC-40 struktur DIA memiliki taraf kinerja IO (*Immediate Occupancy*).



Gambar 9. Mekanisme Terbentuknya Sendi Plastis (DIA): (a) *Performance Point* (Step 4); (b) Step 7

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dijabarkan sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbandingan berat kedua struktur menunjukkan rasio 1:2,176 (DIA:BFX), yang menandakan bahwa struktur DIA lebih efisien dibandingkan BFX.
2. Struktur DIA dapat menahan gaya geser dasar yang lebih besar dengan simpangan yang relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan struktur BFX.
3. Pada titik *performance point*, kedua struktur termasuk dalam taraf kinerja IO (*Immediate Occupancy*), tetapi struktur DIA dapat menahan gaya geser dasar yang lebih besar.
4. Metode ATC-40 lebih konservatif untuk digunakan karena menghasilkan nilai simpangan dan gaya geser dasar yang lebih besar dibandingkan dengan metode FEMA-356.
5. Untuk struktur gedung tinggi sebaiknya menggunakan struktur DIA karena memiliki berat struktur yang lebih ringan sehingga lebih ekonomis tetapi dapat menahan gaya geser dasar yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M. M., Moon, K. S. 2007. Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. *Architectural Science Review* 50, 205–223.
- American Society of Civil Engineers, 2000. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building (FEMA 356)*. Virginia: ASCE.
- Badan Standardisasi Nasional, 2020. *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja (SNI 1729:2020)*. Jakarta: BSN.
- Bhisama, I. B. P., Prayoga, M. H. 2023. "Pebandingan Perilaku Struktur Baja Rangka Terbreis Tipe X dan Diagrid pada Gedung Tinggi", *Jurnal Spektran* 11(1), hal. 1–7.
- Din, F.M. 2017. "Effectiveness of Bracing in High Rise Structure under Response Spectrum Analysis", *International Journal of Engineering and Technical Research* 7(7), hal.70–73.
- Federal Emergency Management Agency, 1997. *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington DC: ATC.
- 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, hal. 2134–2144.
- 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, hal. 112–127.
- Moon, K.S., Connor, J.J., Fernandez, J.E., 2007. "Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design", *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 16, hal. 205–230.
- Naqash, M.T., 2014. "An Overview on the Seismic Design of Braced Frames", *American Journal of Civil Engineering* 2(2), hal. 41-47.
- Sawarkar, S., Satone, S., 2022. "To Study and Analyze Effects of Bracing in Design of Building", *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 10(4), hal. 2310–2313.
- Uang, C. M., Bruneau, M., Whittaker, A.S., Tsai, K. C., 1994. *The Seismic Design Handbook*. California: Springer.