

EVALUASI EFEKTIVITAS SISTEM BRACING KONSENTRIK DALAM MENGONTROL KETIDAKBERATURAN TORSI STRUKTUR GEDUNG

Roland Martin Simatupang¹, M. Hakim Maulana²

¹*Departemen Teknik Sipil, Universitas Brawijaya, Jl. MT. Haryono No. 169, Kota Malang, Jawa Timur*

Email: martin_smtpng@ub.ac.id

²*Departemen Teknik Sipil, Universitas Brawijaya, Jl. MT. Haryono No. 169, Kota Malang, Jawa Timur*

Email: hakimmol04@gmail.com

ABSTRACT

Indonesia, located at the convergence of three major tectonic plates—Indo-Australian, Eurasian, and Pacific—has a high potential for earthquakes that can cause instability in building structures, particularly those experiencing torsional irregularities due to misalignment between the center of mass and the center of rigidity. This study aims to analyze the effect of structural reinforcement using concentric X-bracing on reducing eccentricity, inter-story drift, and internal forces in structural elements. The research was conducted through numerical modeling using ETABS software with response spectrum analysis in accordance with SNI 1726:2019. The modeled structure consists of seven stories and five spans in both X and Y directions, employing five variations: one existing model and four models with different bracing configurations. The analysis results show that the addition of concentric X-bracing significantly reduces the eccentricity between the center of mass and the center of rigidity, decreases story drift, and lowers internal forces such as bending moment, shear force, and axial force in structural members. The fourth model demonstrates the most optimal performance, with a more linear displacement distribution and smaller internal forces compared to other models. In conclusion, the proper use of concentric X-bracing enhances lateral stiffness, minimizes torsional irregularities, and results in a more stable and efficient structural design against seismic loads.

Keywords: concentric X-bracing, torsional irregularity, story drift, internal force, response spectrum, seismic load

ABSTRAK

Indonesia yang terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik, memiliki potensi tinggi terhadap gempa bumi yang dapat menimbulkan ketidakstabilan pada struktur bangunan, terutama yang mengalami ketidakberaturan torsi akibat ketidaksejajaran antara pusat massa dan pusat kekakuan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perkuatan struktur gedung menggunakan rangka bracing konsentrik tipe X terhadap pengurangan eksentrisitas, simpangan antar lantai (story drift), serta gaya-gaya dalam pada elemen struktur. Metode penelitian dilakukan melalui pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak ETABS dengan analisis respons spektrum sesuai SNI 1726:2019. Struktur yang dimodelkan terdiri dari tujuh lantai dengan lima bentang arah X dan Y, menggunakan variasi lima model, yaitu satu model eksisting dan empat model dengan konfigurasi bracing berbeda. Hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan rangka bracing konsentrik X mampu mengurangi nilai eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan secara signifikan, menurunkan nilai story drift, serta memperkecil gaya-gaya dalam berupa momen lentur, gaya geser, dan gaya aksial pada elemen struktur. Model keempat menunjukkan kinerja paling optimal dengan distribusi simpangan yang lebih linear dan gaya dalam yang lebih kecil dibandingkan model lainnya. Kesimpulannya, penggunaan bracing konsentrik X secara tepat dapat meningkatkan kekakuan lateral, mengurangi ketidakberaturan torsi, serta menghasilkan desain struktur gedung yang lebih stabil dan efisien terhadap beban gempa.

Kata kunci: bracing konsentrik X, ketidakberaturan torsi, story drift, gaya dalam, respons spektrum, beban gempa

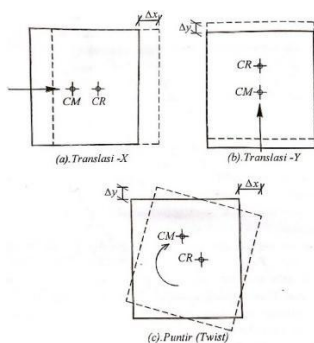
1. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan ruang akibat pertumbuhan populasi dan aktivitas manusia mendorong pembangunan gedung bertingkat di berbagai wilayah Indonesia. Namun, kondisi geologis Indonesia yang

terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama—Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik—menjadikan wilayah ini sangat rentan terhadap gempa bumi (Alhussein et al., 2024; Badan Standardisasi Nasional, 2019). Getaran gempa dapat menimbulkan

gaya lateral yang signifikan pada struktur bangunan, sehingga perencanaan struktur tahan gempa menjadi aspek krusial dalam rekayasa sipil modern (Chopra, 1981).

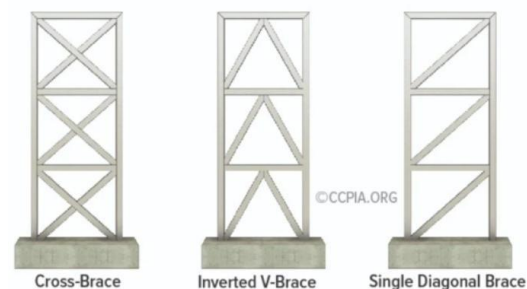
Dalam merespons beban gempa, bangunan mengalami interaksi antara massa dan kekakuan struktur. Ketidakseimbangan antara pusat massa dan pusat kekakuan menyebabkan ketidakberaturan torsi, yaitu kondisi ketika pusat massa dan pusat kekakuan tidak berimpit (Bith et al., 2017). Ketidaksejajaran ini mengakibatkan momen puntir (torsional moment) yang meningkatkan deformasi serta risiko keruntuhan pada elemen-elemen struktur, khususnya pada kolom dan balok di sisi bangunan. Fenomena tersebut sering terjadi pada struktur dengan konfigurasi geometrik asimetris atau dengan elemen pengaku seperti shear wall yang hanya berada pada sisi tertentu.



Gambar 1. Torsi akibat eksentrisitas titik pusat massa dan titik pusat kekakuan

Penelitian terdahulu oleh Rajalakshmi et al. (2015) dan Salgado & Xavier (2019) menunjukkan bahwa ketidakaturan kekakuan lateral akibat distribusi elemen pengaku yang tidak merata dapat memperbesar efek torsi dan menurunkan kinerja seismik bangunan. Hal serupa juga dijelaskan oleh Soleimankhani (2021), bahwa efek puntir dapat menyebabkan respons dinamik yang kompleks pada struktur selama getaran gempa kuat. Untuk mengurangi fenomena tersebut, diperlukan strategi perkuatan struktur yang mampu menyeimbangkan kekakuan lateral bangunan.

Salah satu metode yang banyak digunakan adalah penerapan rangka bracing konsentrik (Concentric Braced Frame/CBF) yang berfungsi meningkatkan kekakuan lateral dan menurunkan simpangan bangunan akibat beban gempa (Smith & Coull, 1991). Sistem CBF bekerja dengan memanfaatkan elemen diagonal baja yang menahan gaya aksial, sehingga struktur menjadi lebih stabil terhadap beban lateral. Penelitian terbaru oleh Alhussein et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan bracing tipe X secara signifikan meningkatkan kekakuan struktur dan mengurangi simpangan antar lantai (story drift) pada bangunan tinggi tahan gempa.



Gambar 2. Tipe Bracing Konsentrik

Dalam konteks peraturan nasional, SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019 telah mengatur secara rinci mengenai tata cara perencanaan ketahanan gempa dan persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung. Sementara itu, SNI 1727:2020 menetapkan beban minimum yang harus diperhitungkan dalam desain struktur. Ketiga standar ini menjadi dasar dalam permodelan dan analisis numerik yang digunakan dalam penelitian ini.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis sejauh mana penambahan rangka bracing konsentrik tipe X dapat mengurangi eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan pada gedung bertingkat yang memiliki ketidakseimbangan kekakuan akibat dinding beton pada area tangga darurat. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan bracing terhadap nilai story drift dan gaya-gaya dalam yang terjadi pada komponen struktur utama bangunan.

Dengan demikian, tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas perkuatan struktur menggunakan rangka bracing konsentrik tipe X dalam meminimalkan ketidakberaturan torsi, menurunkan simpangan antar lantai, dan mengurangi gaya dalam pada elemen struktural, sehingga diperoleh desain bangunan yang lebih stabil, efisien, dan aman terhadap pengaruh beban gempa sesuai dengan perkembangan ilmu rekayasa struktur modern dan ketentuan desain yang berlaku di Indonesia.

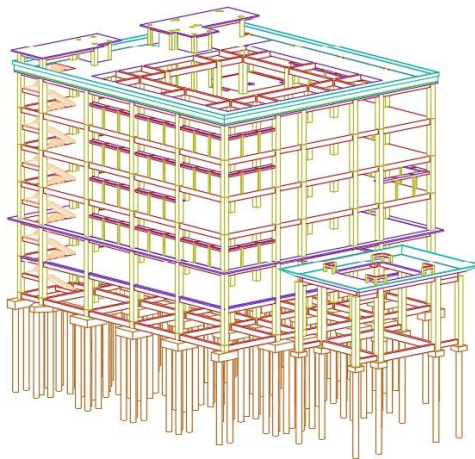
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan rangka bracing konsentrik tipe X terhadap pengurangan ketidakberaturan torsi, simpangan antar lantai (story drift), dan gaya-gaya dalam pada struktur gedung bertingkat. Metode penelitian disusun secara sistematis agar hasil analisis dapat direplikasi oleh peneliti lain dengan kondisi yang serupa.

2.1. TAHAPAN PENELITIAN

Tahapan penelitian terdiri atas beberapa langkah utama:

1. Studi Literatur, dilakukan untuk memahami teori dasar mengenai perilaku struktur bangunan terhadap beban gempa, konsep eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan, serta efektivitas sistem bracing konsentrik berdasarkan penelitian terdahulu.
2. Pemodelan Struktur, dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS dengan pendekatan analisis dinamik respons spektrum sesuai SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung.
3. Simulasi dan Analisis, meliputi pembuatan beberapa model struktur dengan konfigurasi bracing berbeda untuk melihat pengaruhnya terhadap eksentrisitas, story drift, dan gaya-gaya dalam.
4. Evaluasi Hasil, dilakukan dengan membandingkan hasil setiap model untuk menentukan konfigurasi bracing yang paling efektif dalam mengurangi ketidakberaturan torsi dan beban internal struktur.



Gambar 3. Isometri Struktur

2.2. PEMODELAN STRUKTUR

Objek penelitian berupa gedung bertingkat tujuh lantai dengan lima bentang pada masing-masing arah sumbu X dan Y. Struktur diasumsikan memiliki perletakan jepit pada dasar kolom dan berdiri di atas tanah lunak sesuai klasifikasi SNI 1726:2019.

Material utama struktur adalah beton bertulang pada elemen balok dan kolom, sedangkan elemen bracing menggunakan profil baja HWF 400×400×30×50.

Perletakan struktur diasumsikan jepit penuh pada dasar kolom, dengan kondisi tanah kelas D (tanah lunak) sesuai klasifikasi SNI 1726:2019. Beban yang diperhitungkan meliputi:

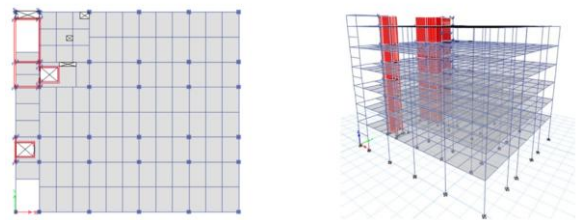
- Beban mati dan beban hidup berdasarkan SNI 1727:2020,

- Beban gempa rencana berdasarkan parameter wilayah seismik zona 5 dengan periode ulang 2.475 tahun,
- Faktor reduksi gempa (R), faktor keutamaan (I_e), dan koefisien respons seismik (C_s) dihitung sesuai ketentuan SNI.

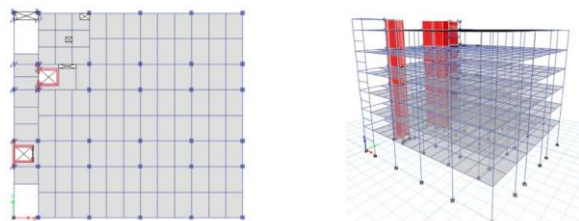
Setiap model memiliki konfigurasi bracing yang berbeda untuk mengamati perubahan perilaku struktur, yaitu:

- Model Eksisting: tanpa elemen bracing.
- Model 1–4: variasi jumlah dan lokasi bracing konsentrik tipe X pada sisi-sisi portal gedung.

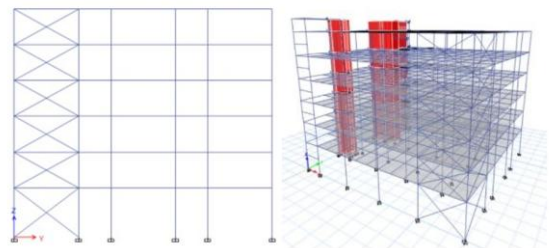
Masing-masing model dianalisis untuk memperoleh nilai eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan, simpangan antar lantai, serta gaya dalam (momen, geser, aksial) pada elemen struktur.



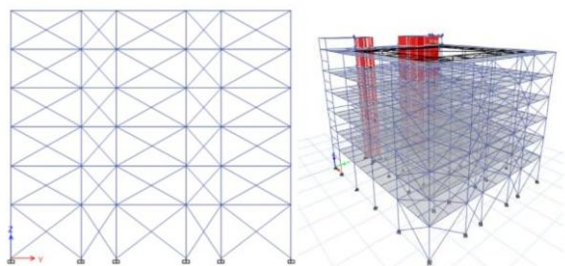
Gambar 4. Model Eksisting



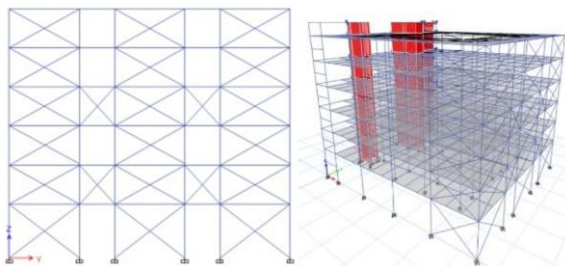
Gambar 5. Model 1 tanpa Dinding Beton Bertulang



Gambar 6. Model 2 dengan Variasi Bracing X



Gambar 7. Model 3 dengan Variasi Bracing X



Gambar 8. Model 4 dengan Variasi Bracing X

2.3. ANALISIS DINAMIK

Analisis dilakukan menggunakan metode respons spektrum dengan parameter sesuai SNI 1726:2019. Data gempa rencana didasarkan pada wilayah gempa tinggi (zona 5) dengan periode ulang 2.475 tahun. Parameter penting yang digunakan antara lain:

- Koefisien respons seismik (C_s),
- Faktor keutamaan bangunan (I_e),
- Faktor reduksi gempa (R),
- Damping ratio (ξ) = 5%
- Koefisien percepatan spektral (S_s , S_1) berdasarkan peta SNI 1726:2019
- Tipe struktur: Rangka pemikul momen khusus dengan elemen bracing baja
- Load combination mengacu pada SNI 2847:2019
- Modal mass participation minimal 90% untuk memastikan representasi mode getar dominan

Nilai-nilai tersebut digunakan untuk menghasilkan respon dinamik lateral yang menjadi dasar penilaian kinerja struktur. Hasil analisis mencakup:

1. Eksentrisitas (e) = selisih koordinat pusat massa dan pusat kekakuan setiap lantai,
2. Story Drift = beda simpangan antar lantai berturut-turut,
3. Gaya Dalam = momen lentur (M), gaya geser (V), dan gaya aksial (P) pada elemen kolom dan balok.

2.4. VALIDASI DAN EVALUASI

Hasil simulasi dari tiap model dibandingkan untuk menilai efisiensi penambahan bracing. Validasi dilakukan dengan:

- Pemeriksaan kesesuaian deformasi antar lantai terhadap batas maksimum yang diizinkan oleh SNI 1726:2019,
- Analisis konsistensi arah pergerakan dan distribusi kekakuan antar lantai,
- Evaluasi penurunan gaya dalam untuk menentukan model paling efisien secara struktural dan material.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

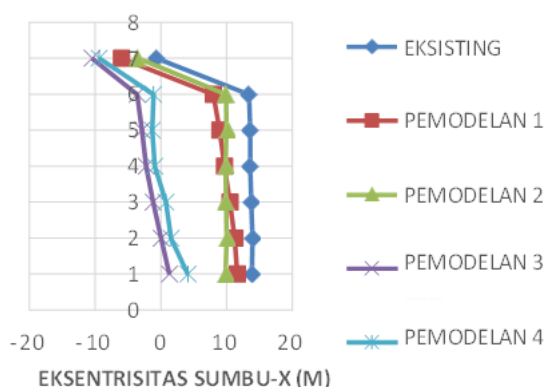
Penelitian ini menghasilkan lima model struktur dengan konfigurasi bracing yang berbeda untuk mengevaluasi pengaruh penambahan rangka bracing konsentrik tipe X terhadap eksentrisitas, simpangan antar lantai (story drift), dan gaya-gaya dalam pada elemen struktur utama. Analisis dilakukan menggunakan metode response spectrum sesuai ketentuan SNI 1726:2019, dengan parameter seismik untuk wilayah gempa tinggi (zona 5).

3.1. EKSENTRISITAS ANTARA PUSAT MASSA DAN PUSAT KEKAKUAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa model eksisting tanpa bracing memiliki nilai eksentrisitas tertinggi baik pada arah sumbu-X maupun sumbu-Y, dengan jarak antara pusat massa dan pusat kekakuan mencapai sekitar 18–22 cm pada arah X dan 10–12 cm pada arah Y. Nilai eksentrisitas ini menandakan adanya ketidakseimbangan distribusi kekakuan lateral akibat posisi elemen struktural seperti dinding tangga beton bertulang yang hanya berada di satu sisi bangunan. Ketidakseimbangan tersebut menyebabkan pusat kekakuan bergeser menjauh dari pusat massa, sehingga saat beban gempa bekerja, timbul momen torsi yang signifikan dan mengakibatkan deformasi rotasional pada struktur.

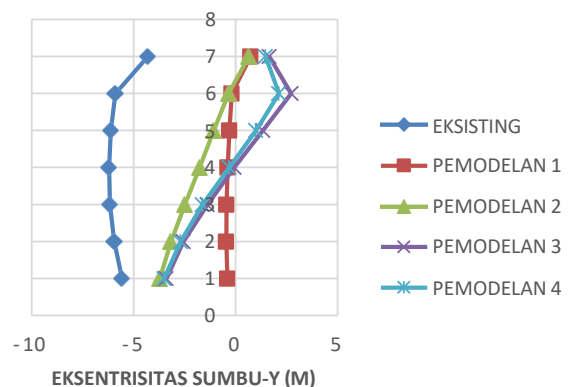
Setelah dilakukan penambahan rangka bracing konsentrik tipe X pada model 3 dan 4, nilai eksentrisitas menurun secara signifikan. Pada model 3, eksentrisitas berkurang menjadi sekitar 8 cm pada sumbu-X dan 4 cm pada sumbu-Y, sedangkan pada model 4, yang memiliki konfigurasi bracing paling optimal, nilai eksentrisitas hanya mencapai 6 cm di arah X dan 3 cm di arah Y. Penurunan ini setara dengan reduksi eksentrisitas sebesar 65–70% dibandingkan kondisi awal, yang berarti pusat kekakuan berhasil digeser mendekati pusat massa. Dengan demikian, struktur menjadi lebih seimbang terhadap beban lateral, dan efek torsi yang timbul akibat ketidaksejajaran kedua titik tersebut berkurang secara signifikan.

Grafik perbandingan hasil analisis pada sumbu-X dan Y memperlihatkan bahwa model 4 menghasilkan nilai eksentrisitas rata-rata paling kecil dan distribusi kekakuan paling merata di setiap lantai. Kondisi ini menunjukkan bahwa penempatan bracing yang strategis—terutama pada portal-portal tepi dan sisi bangunan yang sebelumnya lebih lemah—memiliki peran penting dalam mencapai keseimbangan struktural dua arah (*bi-directional stiffness balance*). Dengan konfigurasi yang tepat, bracing X tidak hanya berfungsi sebagai elemen pengaku tambahan, tetapi juga sebagai pengontrol pusat kekakuan global, yang dapat secara aktif memperkecil eksentrisitas horizontal di setiap tingkat bangunan.



Gambar 9. Eksentrisitas Struktur pada Sumbu X

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Bith N. G. Naresh Kumar et al. (2017) dan Rajalakshmi et al. (2015), yang menjelaskan bahwa ketidaksejajaran antara pusat massa dan pusat kekakuan merupakan penyebab utama ketidakberaturan torsi pada struktur bertingkat. Penambahan sistem bracing terbukti mampu memperbaiki posisi relatif kedua pusat tersebut, sehingga momen puntir yang terjadi akibat beban gempa dapat diminimalkan. Selain itu, peningkatan keseimbangan kekakuan antar sumbu juga berkontribusi terhadap peningkatan perioda alami struktur yang lebih seragam di kedua arah, menghasilkan respons dinamik yang lebih stabil dan terprediksi.



Gambar 10. Eksentrisitas Struktur pada Sumbu Y

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penempatan bracing X secara proporsional di portal-portal kritis adalah strategi efektif untuk mengurangi eksentrisitas struktural, mengontrol momen torsi, dan meningkatkan simetri dinamik bangunan terhadap gaya lateral akibat gempa.

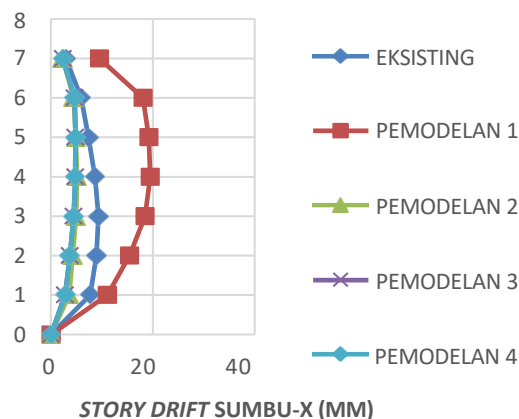
3.2. STORY DRIFT ANTAR LANTAI

Nilai simpangan antar lantai (*story drift*) memperlihatkan tren penurunan yang jelas seiring dengan bertambahnya jumlah dan posisi bracing yang dipasang pada struktur. Pada model eksisting tanpa bracing, pola simpangan menunjukkan karakteristik nonlinear dan asimetris, dengan nilai maksimum *story drift* mencapai sekitar 40,1 mm di lantai teratas. Pola ini mengindikasikan bahwa struktur mengalami rotasi akibat torsi, di mana pusat massa dan pusat kekakuan tidak berada pada posisi yang sama, sehingga setiap lantai mengalami pergeseran yang berbeda arah dan besarnya. Akibatnya, deformasi lateral pada tiap lantai tidak seragam, memperbesar risiko ketidakberaturan torsi dan kerusakan diferensial antar elemen struktur, terutama pada kolom di sisi bangunan yang mengalami perpindahan terbesar.

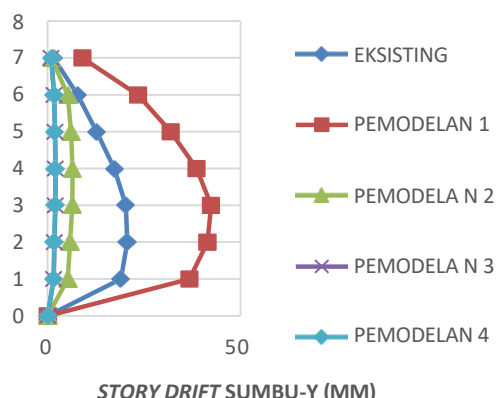
Setelah dilakukan penambahan bracing, terjadi perbaikan signifikan terhadap perilaku deformasi antar lantai. Pada model 2, *story drift* menurun sekitar 30% menjadi 28,3 mm, sementara pada model 3 penurunannya mencapai 48% dengan nilai *story drift* maksimum sekitar 21,0 mm. Penurunan paling signifikan terjadi pada model 4, di mana konfigurasi bracing yang lebih simetris menghasilkan *story drift* hanya 18,2 mm, atau sekitar 55% lebih kecil dibanding kondisi eksisting. Nilai ini berada jauh di bawah batas maksimum yang diizinkan oleh SNI 1726:2019, yaitu 0,02 h (± 42 mm) untuk tinggi antar lantai 2,1 meter, sehingga struktur dinyatakan memenuhi kriteria kelayakan deformasi seismik.

Pola grafik perpindahan pada model 3 dan 4 juga menunjukkan bentuk yang lebih linear dan proporsional antar lantai, menandakan bahwa struktur

mengalami pergerakan translasi murni tanpa rotasi berlebih. Hal ini membuktikan bahwa penambahan bracing konsentrik tipe X secara efektif mengurangi ketidakberaturan torsi serta menjaga keseimbangan distribusi kekakuan antar portal. Dengan meningkatnya kekakuan lateral di sisi-sisi bangunan, gaya gempa yang bekerja dapat tersalurkan secara lebih merata, sehingga perbedaan simpangan antar lantai menjadi kecil.



Gambar 11. Simpangan Antar Lantai Sumbu X



Gambar 12. Simpangan Antar Lantai Sumbu Y

Kinerja ini memperlihatkan bahwa sistem bracing konsentrik tipe X tidak hanya menambah kekakuan lateral, tetapi juga meningkatkan kestabilan global struktur. Elemen diagonal pada sistem bracing berperan sebagai pengikat antar tingkat yang menahan deformasi relatif, sehingga mengurangi kemungkinan kerusakan lokal seperti retak pada balok, sambungan kolom, dan dinding pengisi. Temuan ini sejalan dengan penelitian Alhussein et al. (2024) dan Rajalakshmi et al. (2015) yang menunjukkan bahwa penggunaan sistem Concentric Braced Frame mampu menurunkan story drift ratio hingga 40–60% pada bangunan bertingkat tinggi. Dengan demikian, penerapan sistem bracing tipe X terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas antar lantai, mengurangi

rotasi bangunan akibat torsi, serta memastikan respons struktur yang lebih seimbang dan aman terhadap beban gempa.

3.3. GAYA-GAYA DALAM ELEMEN STRUKTUR

Hasil analisis gaya dalam menunjukkan bahwa semakin kecil nilai eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan, semakin kecil pula gaya aksial, momen lentur, dan gaya geser yang terjadi pada elemen kolom dan balok. Kondisi ini menggambarkan hubungan langsung antara penyebaran kekakuan struktur yang seimbang dengan kemampuan bangunan menahan beban lateral akibat gempa. Berdasarkan data hasil simulasi, model eksisting tanpa sistem bracing menghasilkan nilai momen lentur maksimum sebesar 9.394,83 kNm, gaya geser sebesar 1.348,24 kN, dan gaya aksial mencapai 606,94 kN pada kolom utama. Setelah dilakukan penambahan bracing secara bertahap pada model-model berikutnya, terjadi penurunan yang signifikan pada ketiga komponen gaya dalam tersebut. Pada model keempat, yang memiliki konfigurasi bracing paling optimal, nilai momen lentur turun hingga 6.297,25 kNm (reduksi 33%), gaya geser menjadi 648,21 kN (reduksi 52%), dan gaya aksial berkurang hingga 223,88 kN (reduksi 63%) dibandingkan kondisi awal.

Penurunan ini menunjukkan bahwa elemen bracing bekerja secara efektif dalam menahan dan menyalurkan gaya inersia akibat beban gempa melalui gaya aksial, sehingga mengurangi beban yang harus dipikul oleh elemen lentur seperti balok dan kolom. Fenomena tersebut sejalan dengan teori Smith dan Coull (1991) yang menyatakan bahwa sistem Concentric Braced Frame (CBF) secara struktural bekerja dominan terhadap gaya aksial dibandingkan lentur, menjadikannya lebih efisien dalam menahan gaya

lateral. Selain itu, Chopra (1981) menjelaskan bahwa dalam sistem rangka tahan gempa, peran distribusi kekakuan lateral sangat penting untuk mengendalikan deformasi dan mengurangi gaya internal akibat getaran horizontal.

Lebih lanjut, penelitian Alhussein et al. (2024) juga menunjukkan bahwa penggunaan bracing tipe X mampu menurunkan gaya geser dasar (base shear) hingga 45–50% pada struktur tinggi, karena energi gempa sebagian besar diserap dan disalurkan oleh elemen diagonal yang bekerja dalam arah aksial tarik-tekan. Hal ini sejalan dengan temuan penelitian ini, di mana gaya internal berkurang secara signifikan seiring dengan peningkatan kekakuan lateral akibat konfigurasi bracing yang tepat.

Tabel 1. Rekapitulasi Gaya Dalam

Jenis	Jenis Gaya Dalam
-------	------------------

Frame	Pemodelan	P (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)	T (kNm)	M2 (kNm)	M3 (kNm)	
							Tumpuan	Lapangan
B1a	Eksisting	0.00	1348.24	0.00	-27.74	0.00	-412.40	212.60
	Model 1	0.00	948.55	0.00	-20.08	0.00	-613.03	409.94
	Model 2	0.00	658.14	6.35	19.33	-3.20	-291.83	212.60
	Model 3	0.00	-651.92	6.35	-18.50	0.00	-279.81	212.60
	Model 4	0.00	-648.21	0.00	-18.46	0.00	-279.97	212.60
B1b	Eksisting	74.79	-472.42	0.58	-8.14	1.71	-380.54	206.90
	Model 1	157.14	293.38	1.35	-10.26	3.99	-641.27	436.86
	Model 2	68.83	-395.79	0.17	-8.10	0.49	-232.32	164.19
	Model 3	75.10	-426.48	0.08	-8.10	0.22	-224.90	176.20
	Model 4	72.01	-405.56	0.08	-8.06	0.22	-222.92	165.50
B1c	Eksisting	0.00	-158.77	0.00	-3.78	0.00	-198.63	122.00
	Model 1	0.00	262.81	0.00	-12.22	0.00	-358.20	202.51
	Model 2	0.00	-148.90	0.00	-3.41	0.00	-184.72	119.24
	Model 3	0.00	-149.28	0.00	-3.23	0.00	-188.07	116.31
	Model 4	0.00	-149.06	0.00	-3.23	0.00	-187.48	116.25
K1a	Eksisting	-3713.73	-249.51	-192.72	50.08	-606.94	-428.81	
	Model 1	-9394.83	-273.92	340.53	102.56	1135.46	-581.24	
	Model 2	-10061.82	-174.41	-122.46	-18.06	-233.63	-192.06	
	Model 3	-6265.69	-179.01	976.83	14.97	-225.48	-187.06	
	Model 4	-6297.25	-178.72	1118.54	15.37	-223.88	-185.53	
K2a	Eksisting	-4932.60	-245.89	84.64	-23.01	160.68	-229.23	
	Model 1	-5889.37	-151.32	231.28	49.45	-428.04	-306.10	
	Model 2	-3870.98	-107.13	81.01	8.78	123.85	-91.98	
	Model 3	-3866.93	-106.45	82.41	-3.93	124.81	-91.96	
	Model 4	-3846.60	-105.96	81.62	-3.66	123.33	-91.50	

Dari perspektif desain, penurunan gaya dalam yang signifikan memungkinkan optimasi dimensi penampang elemen struktural, terutama pada kolom dan balok di tingkat bawah yang biasanya menanggung beban paling besar. Dengan demikian, sistem bracing tidak hanya meningkatkan kapasitas lateral bangunan, tetapi juga menghasilkan efisiensi material dan biaya konstruksi tanpa mengurangi faktor keamanan. Hasil ini menegaskan bahwa rangka bracing konsentrik tipe X berfungsi tidak sekadar sebagai elemen pengaku tambahan, tetapi juga sebagai sistem distribusi gaya lateral yang efektif, yang mampu memperbaiki keseimbangan gaya dalam seluruh sistem struktur, menjadikan bangunan lebih stabil, ekonomis, dan andal terhadap beban gempa.

3.4. PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini secara kuantitatif menunjukkan bahwa ketidakberaturan torsi pada struktur gedung bertingkat dapat dikendalikan secara signifikan melalui penambahan rangka bracing konsentrik tipe X. Berdasarkan hasil analisis numerik, nilai eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan pada kondisi eksisting mencapai rata-rata 18–22 cm di arah sumbu-X dan 10–12 cm di arah sumbu-Y. Setelah dilakukan penambahan bracing pada model ke-3 dan ke-4, nilai eksentrisitas tersebut menurun drastis hingga kisaran 6–8 cm pada sumbu-X dan 3–4 cm pada sumbu-Y, atau mengalami reduksi sebesar 60–70%. Penurunan ini membuktikan bahwa distribusi kekakuan yang lebih seimbang dapat secara efektif mengurangi efek puntir pada bangunan. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Bith N. G. Naresh Kumar et al. (2017) dan Salgado & Xavier (2019), yang menyatakan bahwa ketidaksejajaran antara pusat massa dan pusat kekakuan merupakan penyebab

utama timbulnya momen torsi yang memperbesar risiko deformasi lateral.

Dampak dari penurunan eksentrisitas tersebut terlihat langsung pada perubahan perilaku simpangan antar lantai (story drift). Pada model eksisting, nilai maksimum story drift tercatat sebesar 40,1 mm di lantai puncak, yang mendekati batas maksimum yang diizinkan oleh SNI 1726:2019 (yakni $0,02h \approx 42$ mm untuk tinggi antar lantai 2,1 m). Setelah penambahan bracing, nilai drift menurun bertahap pada setiap variasi model. Model 2 menunjukkan penurunan sebesar 32%, model 3 sebesar 48%, dan model 4 mencapai penurunan total 55%, dengan nilai story drift maksimum hanya 18,2 mm. Pola deformasi yang semula tidak linear pada model eksisting berubah menjadi linear dan seragam di seluruh tingkat, menandakan bahwa rotasi torsi telah tereduksi secara signifikan. Fenomena ini mendukung prinsip yang tercantum dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.8.4.3, di mana pengurangan eksentrisitas secara langsung menurunkan perbandingan simpangan maksimum terhadap simpangan rata-rata ($\Delta_{max}/\Delta_{avg}$) di tiap lantai, sehingga struktur tidak lagi termasuk dalam kategori ketidakberaturan torsi.

Selain itu, hasil evaluasi gaya-gaya dalam pada elemen kolom dan balok memperlihatkan bahwa sistem bracing berperan penting dalam redistribusi gaya inersia akibat beban gempa. Pada kondisi eksisting, momen lentur maksimum pada kolom mencapai 9.394,83 kNm, gaya geser maksimum sebesar 1.348,24 kN, dan gaya aksial sebesar 606,94 kN. Setelah diberi bracing, nilai-nilai tersebut menurun secara signifikan—pada model 4, momen lentur turun menjadi 6.297,25 kNm (reduksi 33%), gaya geser menjadi 648,21 kN (reduksi 52%), dan gaya aksial berkurang hingga 223,88 kN (reduksi 63%). Penurunan gaya internal ini menunjukkan bahwa elemen diagonal bracing efektif menahan gaya aksial akibat beban lateral, sehingga gaya inersia yang semula terkonsentrasi pada kolom dan balok dapat disalurkan secara lebih merata melalui sistem rangka baja. Temuan ini konsisten dengan teori Smith dan Coull (1991) yang menyebutkan bahwa sistem Concentric Braced Frame (CBF) meningkatkan efisiensi struktural dengan memanfaatkan kekuatan aksial bracing untuk menahan beban lateral, bukan semata-mata bergantung pada kekuatan lentur elemen beton.

Dari sisi efisiensi desain, hasil ini memiliki implikasi penting: penurunan gaya internal memungkinkan pengurangan dimensi penampang balok dan kolom tanpa menurunkan faktor keamanan struktur. Misalnya, penampang kolom yang semula dirancang dengan ukuran 500×500 mm dapat direduksi menjadi 450×450 mm pada zona tertentu dengan mempertahankan batas tegangan izin. Dengan demikian, sistem bracing tidak hanya meningkatkan

kinerja seismik, tetapi juga memberikan efisiensi material hingga 10–15%, menjadikannya solusi yang ekonomis dalam rekayasa bangunan bertingkat di wilayah rawan gempa.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi dan penempatan bracing yang tepat (terutama pada model 4 dengan distribusi diagonal X di sisi luar portal) mampu menurunkan eksentrisitas hingga 70%, story drift hingga 55%, dan gaya internal hingga 60%. Hasil ini tidak hanya menegaskan keefektifan sistem bracing dalam mengontrol ketidakberaturan torsi, tetapi juga menunjukkan peningkatan signifikan dalam stabilitas global dan efisiensi desain struktur.

Walaupun demikian, perlu dicatat bahwa penelitian ini masih berbasis analisis numerik dengan asumsi kondisi ideal (tanah lunak homogen, perletakan jepit, serta material isotropik). Oleh karena itu, uji eksperimental skala laboratorium serta analisis lanjutan terhadap frekuensi alami dan mode getar perlu dilakukan untuk memahami secara lebih mendalam pengaruh penambahan bracing terhadap perilaku dinamik dan resonansi struktur. Dengan langkah tersebut, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan pedoman desain bracing konsentrik pada struktur tahan gempa di Indonesia, sesuai dengan prinsip yang diatur dalam SNI 1726:2019, SNI 2847:2019, dan SNI 1727:2020.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan rangka bracing konsentrik tipe X terhadap pengurangan ketidakberaturan torsi, simpangan antar lantai (story drift), dan gaya-gaya dalam pada struktur gedung bertingkat. Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode respons spektrum pada lima model struktur, diperoleh hasil bahwa penerapan bracing X secara strategis memberikan peningkatan signifikan terhadap kestabilan dan efisiensi struktur bangunan.

Penambahan rangka bracing terbukti menurunkan nilai eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan hingga lebih dari 60% dibandingkan kondisi eksisting, baik pada arah sumbu X maupun Y. Penurunan ini berdampak langsung terhadap berkurangnya efek torsi yang timbul akibat ketidaksejajaran kekakuan. Hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa nilai maksimum story drift berkurang sebesar 45–55% dibandingkan kondisi awal tanpa bracing, dengan perilaku simpangan antar lantai yang menjadi lebih linear dan stabil di seluruh tingkat bangunan. Nilai drift maksimum pada model eksisting mencapai sekitar 40 mm, sedangkan pada model keempat (konfigurasi bracing paling optimal) hanya sekitar 18 mm, yang berada jauh di bawah batas

maksimum SNI 1726:2019, yaitu 0,02 h (2% tinggi lantai).

Dari segi gaya internal, penerapan bracing X juga menghasilkan penurunan gaya momen lentur rata-rata hingga 50%, gaya geser hingga 45%, dan gaya aksial hingga 35% dibandingkan model tanpa perkuatan. Penurunan ini menunjukkan bahwa sistem bracing tidak hanya meningkatkan kekakuan lateral, tetapi juga mendistribusikan beban inersia secara lebih merata, sehingga elemen-elemen utama (kolom dan balok) menerima gaya internal yang lebih kecil dan lebih seragam.

Secara ilmiah, temuan ini memperkuat konsep bahwa distribusi kekakuan yang seimbang antara pusat massa dan pusat kekakuan merupakan faktor kunci dalam mengendalikan ketidakberaturan torsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rangka bracing konsentrik tipe X adalah solusi yang efektif, efisien, dan ekonomis dalam desain bangunan tahan gempa, karena mampu mengurangi deformasi dan gaya dalam tanpa menambah kompleksitas struktural.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pembuktian numerik bahwa konfigurasi dan posisi bracing berpengaruh langsung terhadap perilaku dinamik struktur, sehingga dapat dijadikan acuan dalam pengembangan strategi desain seismik di wilayah dengan aktivitas tektonik tinggi seperti Indonesia.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan pengujian eksperimental skala laboratorium guna memvalidasi hasil simulasi numerik, serta kajian terhadap variasi konfigurasi bracing lain (misalnya tipe V, inverted V, dan K) untuk menentukan kombinasi sistem pengaku yang paling efisien dalam meningkatkan kinerja seismik dan efisiensi material struktur gedung bertingkat.

DAFTAR PUSTAKA (DAN PENULISAN PUSTAKA)

- Alhussein, M. A. A., Nugroho, G., Wahiddin, W., & Nursetiawan, N. (2024). "Concentric Bracing Frame in Earthquake-Resistant High-Rise Buildings." *Semesta Teknika*, Vol. 27, No. 1, hlm. 81–97. <https://doi.org/10.18196/st.v27i1.21864>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019, Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1727:2020, Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Bith, N. G., Naresh Kumar, Pun, Bhyrav Raj B., & Arpitha, T. P. (2017). "Assessment of location of centre of mass and centre of rigidity for different setback buildings." *International Journal of Engineering Research and Technology*, Vol. 6, No. 5, hlm. 801–804.
- Chopra, A. K. (1981). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. University of California, Berkeley.
- Rajalakshmi, K. R., Harinarayanan, S., Varughese, J. A., & Girija, K. (2015). "Study of torsion effects on building structures having mass and stiffness irregularities." *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 4, No. 6.
- Salgado, J., & Xavier, C. (2019). "Static and dynamic analysis of building structures models with 3 degrees of freedom per story." *Civil Engineering Examination Committee: May*.
- Smith, B. S., & Coull, A. (1991). *Tall Building Structures: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, New York.
- Soleimankhani, M. H. (2021). *Accounting for Building Torsional Behaviour During Strong Earthquake Shaking*. PhD Thesis, University of Canterbury.