Journal Transformation of Mandalika
https://ojs.cahayamandalika.com/index.php/jtm

Vol. 7, No. 9, 2026
e-ISSN: 2745-5882, p-ISSN: 2962-2956
hh. 1054-1071

Evaluasi kinerja struktur baja dengan ikatan angin terhadap beban gempa pada proyek *ester plant*

Rudi Rahwidianto[1],Hermansyah[2]
[1,2]Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Medan Area Medan
Email: rudirahwidianto@gmail.com

Abstrak

Indonesia merupakan wilayah yang berada pada pertemuan lempeng tektonik aktif sehingga memiliki tingkat risiko gempa yang tinggi. Kondisi tersebut menuntut bangunan, khususnya struktur baja pada bangunan industri bertingkat, memiliki ketahanan yang baik terhadap beban gempa. Salah satu upaya untuk meningkatkan kekakuan dan stabilitas struktur adalah dengan menggunakan sistem ikatan angin (bracing) tipe X. Penelitian menggunakan metode analisis statik ekivalen sesuai SNI 1726:2019 dengan pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak ETABS v18. Analisis dilakukan terhadap dua model, yaitu struktur tanpa ikatan angin dan struktur dengan ikatan angin tipe X. Parameter yang dievaluasi meliputi periode getar alami dan simpangan antar lantai berdasarkan ketentuan SNI. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja struktur baja tanpa ikatan angin dan dengan ikatan angin tipe X terhadap beban gempa pada bangunan Proyek Ester Plant di Kota Medan. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur tanpa ikatan angin memiliki periode getar alami sebesar 1,776 detik, sedangkan struktur dengan ikatan angin tipe X memiliki periode getar alami sebesar 1,434 detik. Penambahan ikatan angin tipe X meningkatkan kekakuan struktur sehingga mampu mengurangi periode getar alami dan menghasilkan respons struktur yang lebih baik terhadap beban gempa. Penggunaan ikatan angin tipe X terbukti meningkatkan kinerja struktur baja terhadap beban gempa dengan meningkatkan kekakuan struktur dan menurunkan periode getar alami. Dengan demikian, sistem ikatan angin tipe X layak diterapkan sebagai alternatif untuk meningkatkan ketahanan struktur baja pada bangunan industri bertingkat.

Kata kunci : Struktur Baja**,** Ikatan Angin Tipe X, Periode Getar Alami dan Etabs

Abstract

Indonesia is a region located at the confluence of active tectonic plates so it has a high level of earthquake risk. This condition requires buildings, especially steel structures in multi-storey industrial buildings, to have good resistance to earthquake loads. One of the efforts to improve the rigidity and stability of the structure is to use a type X wind bonding system (bracing). The analysis was carried out on two models, namely structures without wind bonds and structures with type X wind bonds. This study aims to evaluate and compare the performance of steel structures without wind bonding and with type X wind bond to earthquake load in the Ester Plant Project building in Medan City. The results of the analysis showed that the structure without wind bond had a natural vibration period of 1,776 seconds, while the structure with type X wind bond had a natural vibration period of 1,434 seconds. The addition of type X wind bonds increases the rigidity of the structure so that it is able to reduce the natural vibration period and produce a better structural response to earthquake loads. The use of type X wind bonds has been proven to improve the performance of steel structures against earthquake loads by increasing the rigidity of the structure and lowering the period of natural vibration. Thus, the type X wind bonding system is feasible to be applied as an alternative to improve the durability of steel structures in high-rise industrial buildings.

Keywords: *Steel Structure, Type X Wind Bonding, Natural Vibrating Period and Etabs*

How to Cite: Rudi Rahwidianto and Hermansyah. (2026). Evaluasi kinerja struktur baja dengan ikatan angin terhadap beban gempa pada proyek ester plant. *Journal Transformation of Mandalika,* E-ISSN: 2745-5882, P-ISSN: 2962-2956, 7(9), 1054-107.

https://doi.org/10.36312/jtm.v7i9.6706

Copyright©2026, Author (s)
This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

PENDAHULUAN

Proyek industri *Ester Plant* merupakan fasilitas pengolahan kimia yang memiliki karakteristik operasional dengan intensitas tinggi dan melibatkan berbagai peralatan industri, seperti mesin produksi, sistem perpipaan, *equipment*, serta tangki penyimpanan bahan kimia. Kondisi tersebut menyebabkan struktur bangunan harus mampu menerima kombinasi beban gravitasi dan beban lateral secara aman sepanjang masa layan. Keberadaan peralatan industri dengan massa yang relatif besar juga dapat memengaruhi karakteristik dinamik struktur dan responsnya terhadap pembebanan gempa. Oleh karena itu, karakteristik massa, konfigurasi struktur, dan kondisi pembebanan perlu menjadi pertimbangan dalam perencanaan struktur pada fasilitas industri. Hsiao et al. (2013) menjelaskan bahwa sistem *special concentrically braced frames* dapat memberikan kapasitas dan perilaku yang baik dalam menahan beban lateral akibat gempa melalui mekanisme aksial pada elemen *brace*. Sistem tersebut memungkinkan gaya lateral disalurkan melalui elemen diagonal sehingga dapat meningkatkan kekakuan struktur dan membantu mengendalikan deformasi lateral. Penerapan sistem *bracing* menjadi salah satu alternatif dalam meningkatkan kemampuan struktur baja dalam menghadapi tuntutan pembebanan seismik, terutama pada bangunan bertingkat yang membutuhkan sistem penahan gaya lateral dengan kapasitas dan kekakuan yang memadai.

Tremblay (2002) menunjukkan bahwa perilaku elemen *bracing* baja terhadap beban gempa sangat dipengaruhi oleh mekanisme tekuk dan respons inelastiknya. Elemen *bracing* dapat mengalami pembebanan tarik dan tekan secara berulang selama terjadi gempa sehingga perubahan kondisi tersebut dapat memengaruhi kapasitas dan stabilitas elemen. Kemampuan elemen dalam mempertahankan kekuatan serta mengalami deformasi secara terkendali menjadi salah satu aspek penting dalam menentukan kinerja sistem struktur baja terhadap pembebanan seismik. Berdasarkan karakteristik fasilitas dan perilaku sistem *bracing* tersebut, perencanaan struktur pada proyek industri *Ester Plant* perlu memperhatikan aspek kekuatan, kekakuan, stabilitas, dan kemampuan sistem penahan gaya lateral dalam mengendalikan deformasi akibat pembebanan gempa. Keberadaan peralatan industri dengan massa yang relatif besar serta karakteristik geometris bangunan dapat memengaruhi respons dinamik struktur. Oleh karena itu, evaluasi terhadap penggunaan sistem *bracing*, khususnya konfigurasi yang dipilih pada struktur *Ester Plant*, diperlukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap respons dan kinerja struktur ketika menerima pembebanan seismik.

Gempa bumi merupakan salah satu ancaman utama terhadap keselamatan bangunan di Indonesia karena aktivitas tektonik menyebabkan sebagian besar wilayah Indonesia memiliki tingkat kerawanan seismik yang relatif tinggi. Risiko tersebut menjadi semakin penting pada bangunan bertingkat karena peningkatan massa dan ketinggian struktur dapat memengaruhi karakteristik dinamik serta respons bangunan terhadap gaya lateral. Ketika gempa terjadi, massa bangunan menghasilkan gaya inersia yang harus disalurkan melalui sistem struktur hingga ke fondasi. Apabila sistem penahan gaya lateral tidak memiliki kekakuan dan kekuatan yang memadai, perpindahan lateral dan simpangan antar lantai dapat meningkat sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan pada elemen struktural maupun nonstruktural. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik gempa dan respons struktur perlu dipertimbangkan sejak tahap awal perencanaan bangunan.

Sunarjo et al. (2010) menjelaskan bahwa gempa bumi menimbulkan getaran tanah yang memberikan pengaruh signifikan terhadap struktur bangunan di wilayah terdampak. Getaran tersebut menghasilkan gaya inersia yang bekerja pada massa bangunan dan kemudian disalurkan melalui sistem struktur menuju fondasi. Besarnya respons struktur dipengaruhi oleh karakteristik gempa, massa bangunan, serta kemampuan sistem struktur dalam menahan beban lateral sehingga aspek kegempaan menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan bangunan bertingkat. Tremblay (2002) menegaskan bahwa respons struktur baja terhadap pembebanan gempa tidak hanya ditentukan oleh besarnya gaya seismik, tetapi juga oleh kemampuan sistem penahan gaya lateral dalam mempertahankan kekuatan, kekakuan, stabilitas, dan kapasitas inelastiknya. Perilaku elemen penahan gaya lateral selama mengalami pembebanan siklik menjadi faktor penting yang menentukan kinerja struktur, terutama dalam mengendalikan deformasi dan menjaga kestabilan bangunan ketika terjadi gempa.

Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan untuk meningkatkan kinerja struktur baja terhadap beban lateral adalah penggunaan sistem bresing. Sibagariang dan Tarigan (2022) menunjukkan bahwa penerapan sistem rangka bresing konsentrik khusus dapat meningkatkan kemampuan struktur baja dalam menghadapi tuntutan seismik. Sejalan dengan hal tersebut, Pujianto et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan sistem Bracing-X dapat memberikan pengaruh terhadap respons seismik struktur bangunan baja. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa pemilihan konfigurasi sistem penahan gaya lateral merupakan aspek penting dalam menghasilkan struktur yang memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai sekaligus mampu mengendalikan simpangan akibat gempa.

Berdasarkan uraian tersebut, pengaruh gempa perlu menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan bangunan bertingkat, khususnya pada struktur baja. Pemilihan sistem penahan gaya lateral yang tepat diperlukan untuk meningkatkan kekuatan, kekakuan, dan stabilitas struktur serta mengendalikan respons lateral selama terjadi gempa.

Dengan demikian, kajian terhadap penggunaan sistem bracing, termasuk Bracing-X, menjadi relevan untuk mengetahui sejauh mana sistem tersebut dapat memengaruhi respons dan kinerja struktur baja bertingkat terhadap beban seismik.

Respons struktur terhadap gempa tidak hanya ditentukan oleh kekuatan elemen, tetapi juga dipengaruhi oleh distribusi massa, kekakuan, konfigurasi struktur, serta sistem penahan gaya lateral yang digunakan. Struktur dengan massa yang besar cenderung menghasilkan gaya inersia yang lebih besar ketika mengalami percepatan akibat gempa sehingga dapat meningkatkan tuntutan terhadap elemen struktural. Di sisi lain, karakteristik kekakuan struktur berperan penting dalam mengendalikan perpindahan lateral dan simpangan antar lantai. Dengan demikian, keseimbangan antara massa dan kekakuan menjadi salah satu aspek penting dalam menghasilkan respons struktur yang terkendali terhadap pembebanan seismik. Tremblay (2002) menjelaskan bahwa respons elemen struktur baja terhadap pembebanan gempa berkaitan erat dengan karakteristik kekakuan, stabilitas, serta perilaku inelastik elemen ketika mengalami pembebanan siklik. Selain karakteristik elemen, konfigurasi sistem penahan gaya lateral juga berpengaruh terhadap kemampuan struktur dalam menerima dan menyalurkan gaya gempa. Hsiao et al. (2013) menunjukkan bahwa sistem rangka bresing konsentrik memiliki peranan penting dalam memberikan kapasitas terhadap gaya lateral dan meningkatkan kemampuan struktur dalam menghadapi pembebanan seismik.

Penerapan sistem bresing pada struktur baja juga menjadi salah satu strategi untuk meningkatkan kemampuan struktur dalam menahan gaya lateral. Sibagariang dan Tarigan (2022) menunjukkan bahwa penggunaan sistem rangka bresing konsentrik khusus pada struktur baja dapat memengaruhi respons struktur terhadap beban gempa. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pemilihan sistem penahan gaya lateral perlu disesuaikan dengan karakteristik struktur dan tuntutan pembebanan yang bekerja. Oleh karena itu, sistem struktur perlu dirancang secara seimbang dengan mempertimbangkan massa, kekuatan, kekakuan, stabilitas, dan daktilitas agar bangunan mampu merespons pembebanan gempa secara aman dan terkendali. Pertimbangan terhadap berbagai parameter tersebut menjadi penting terutama pada bangunan bertingkat, karena perubahan konfigurasi dan sistem penahan gaya lateral dapat memengaruhi karakteristik respons struktur secara keseluruhan.

Baja merupakan salah satu material konstruksi yang banyak digunakan pada bangunan industri dan bangunan bertingkat karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kekuatan yang relatif besar, serta kemampuan mengalami deformasi sebelum mencapai kondisi keruntuhan. Karakteristik material, termasuk sifat mekanik dan kemampuan dalam menerima pembebanan, menjadi aspek penting dalam menentukan kinerja elemen konstruksi. Hidayat (2019) menjelaskan bahwa pemahaman terhadap karakteristik material teknik diperlukan untuk mengetahui kemampuan elemen dalam merespons berbagai kondisi pembebanan. Pada struktur baja yang menerima pembebanan gempa, kemampuan mengalami deformasi inelastik menjadi salah satu karakteristik penting karena elemen struktur dapat mengalami pembebanan berulang serta perubahan kondisi tarik dan tekan. Kondisi tersebut terutama berpengaruh pada elemen bresing yang bekerja sebagai salah satu komponen utama dalam menahan gaya lateral.

Tremblay (2002) menunjukkan bahwa elemen bresing baja memiliki respons inelastik yang dipengaruhi oleh perilaku tekuk ketika menerima pembebanan siklik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kemampuan elemen bresing dalam mempertahankan stabilitas menjadi aspek penting dalam struktur baja yang menerima beban gempa. Perilaku tekuk yang terjadi selama pembebanan siklik dapat memengaruhi kapasitas elemen dalam menahan gaya aksial serta kemampuan struktur dalam mempertahankan kinerja lateralnya. Fell et al. (2009) menunjukkan bahwa elemen bresing baja yang mengalami pembebanan siklik dapat mengalami tekuk inelastik dan pada kondisi tertentu berpotensi mengalami kerusakan atau fraktur. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa respons elemen bresing tidak hanya berkaitan dengan kapasitas kekuatan, tetapi juga dengan kemampuan elemen dalam mengalami deformasi berulang tanpa kehilangan kapasitas secara signifikan. Oleh karena itu, karakteristik material, dimensi elemen, serta kondisi pembebanan perlu diperhatikan dalam mengevaluasi perilaku bresing terhadap beban gempa.

Uriz et al. (2008) menekankan pentingnya pemodelan perilaku tekuk inelastik siklik pada elemen bresing baja agar respons struktur terhadap pembebanan gempa dapat direpresentasikan secara lebih realistis. Pemodelan yang mampu menggambarkan perilaku elemen selama mengalami tarik, tekan, tekuk, dan pembebanan berulang dapat memberikan gambaran yang lebih baik mengenai kinerja struktur. Berdasarkan uraian tersebut, penggunaan baja pada bangunan industri dan bangunan bertingkat perlu mempertimbangkan kekuatan, stabilitas, daktilitas, serta perilaku elemen penahan gaya lateral agar struktur mampu memberikan kinerja yang baik ketika menerima pembebanan seismik. Pada bangunan industri bertingkat, sistem rangka baja yang hanya mengandalkan aksi lentur balok dan kolom dalam menahan gaya lateral dapat mengalami tuntutan deformasi yang cukup besar, terutama pada arah struktur yang memiliki kekakuan lateral relatif rendah. Salah satu alternatif untuk meningkatkan kekakuan lateral tersebut adalah penggunaan sistem rangka berpengaku atau *braced frame*. Sistem ini menggunakan elemen diagonal yang berfungsi membentuk jalur penyaluran gaya lateral secara lebih langsung dari tingkat bangunan menuju elemen vertikal dan

selanjutnya ke fondasi. Elemen *bracing* pada umumnya bekerja terutama melalui gaya aksial tarik dan tekan sehingga dapat mengurangi tuntutan lentur pada elemen rangka utama serta meningkatkan kekakuan lateral sistem secara keseluruhan (AISC, 2022). Penggunaan sistem berpengaku dengan demikian dapat menjadi salah satu pendekatan struktural untuk meningkatkan kemampuan bangunan dalam menerima dan menyalurkan gaya lateral akibat gempa.

Ikatan angin atau *bracing* dapat dikembangkan dalam berbagai konfigurasi, antara lain tipe X, V, *inverted-V*, dan konfigurasi lainnya. Setiap konfigurasi memiliki karakteristik mekanisme penyaluran gaya, kekakuan, distribusi gaya, serta tuntutan terhadap elemen dan sambungan yang berbeda. Bracing tipe X merupakan salah satu konfigurasi yang membentuk pola silang pada bidang rangka dan dapat menyediakan jalur penyaluran gaya lateral melalui elemen diagonal. Pada saat struktur menerima pembebanan lateral, elemen diagonal bekerja terutama melalui gaya aksial sehingga dapat meningkatkan kekakuan lateral dan membantu mengendalikan deformasi struktur. Andriansyah dan Khatulistiani (2020) menunjukkan bahwa penerapan sistem rangka bresing konsentrik tipe *Two Story X* dapat meningkatkan kemampuan struktur baja dalam menerima pembebanan lateral.

Perbedaan bentuk *bracing* dapat memengaruhi karakteristik respons struktur karena setiap konfigurasi memiliki mekanisme kerja dan distribusi gaya yang berbeda. Variasi konfigurasi tersebut dapat memberikan pengaruh terhadap kekakuan, perpindahan, gaya dalam, serta kemampuan struktur dalam menerima beban lateral. Aryandi dan Herbudiman (2017) menunjukkan bahwa perbedaan bentuk *bracing* dapat memengaruhi kinerja seismik struktur. Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi *bracing* perlu disesuaikan dengan karakteristik struktur dan tuntutan pembebanan yang bekerja. Perbandingan konfigurasi *bracing* juga menunjukkan bahwa sistem dengan bentuk yang berbeda dapat menghasilkan respons yang berbeda ketika menerima pembebanan gempa. Perbedaan tersebut berkaitan dengan mekanisme penyaluran gaya, kekakuan sistem, serta kemampuan elemen diagonal dalam menahan gaya aksial. Rosul et al. (2023) membandingkan perilaku struktur baja menggunakan sistem bresing eksentris tipe *inverted-V* dan sistem bresing konsentris tipe-X terhadap beban gempa dan menunjukkan adanya perbedaan respons antara kedua konfigurasi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk dan sistem bresing menjadi salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam perencanaan struktur tahan gempa.

Perbedaan perilaku struktur juga dapat ditemukan pada penerapan konfigurasi tipe X dan *inverted-V*. Kedua konfigurasi tersebut memiliki susunan elemen diagonal yang berbeda sehingga jalur penyaluran gaya dan distribusi gaya internal pada struktur dapat mengalami perubahan. Kubon Tubuh et al. (2025) menunjukkan adanya perbedaan perilaku antara struktur rangka baja yang menggunakan *bracing* tipe X dan *inverted-V*. Temuan tersebut memperkuat pentingnya pemilihan konfigurasi bresing berdasarkan kebutuhan kekakuan, kapasitas elemen, distribusi gaya, serta kondisi geometris dan arsitektural bangunan. Penggunaan sistem ikatan angin dapat memberikan pengaruh terhadap distribusi gaya pada sistem rangka utama. Elemen diagonal memungkinkan sebagian gaya lateral disalurkan melalui mekanisme aksial sehingga tuntutan terhadap balok dan kolom dapat berkurang. Vismanath (2010) menunjukkan bahwa penggunaan sistem ikatan angin dapat memengaruhi respons struktur terhadap gaya lateral, dengan konfigurasi tipe X menghasilkan nilai momen lentur yang lebih rendah dibandingkan struktur tanpa ikatan angin. Temuan tersebut menunjukkan bahwa penambahan *bracing* dapat meningkatkan efektivitas sistem penahan gaya lateral dan mengurangi ketergantungan struktur terhadap mekanisme lentur pada elemen rangka utama.

Sibagariang dan Tarigan (2022) menganalisis respons struktur portal baja dengan sistem rangka bresing konsentrik khusus terhadap pembebanan gempa, sedangkan Pujianto et al. (2025) mengkaji pengaruh sistem *Bracing-X* terhadap respons seismik struktur bangunan industri. Berbeda dengan penelitian tersebut, penelitian ini secara khusus membandingkan kondisi struktur tanpa *bracing* dan struktur dengan *Bracing-X* pada bangunan baja bertingkat yang digunakan sebagai fasilitas industri *Ester Plant* dengan mempertimbangkan kombinasi beban gravitasi, peralatan industri, angin, dan gempa. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengevaluasi pengaruh penggunaan *Bracing-X* terhadap kapasitas dan stabilitas elemen struktur, tetapi juga menganalisis perubahan respons global struktur, khususnya perpindahan lateral dan simpangan antar lantai, sebagai dasar untuk menilai efektivitas penerapan sistem *Bracing-X* pada fasilitas industri. Permasalahan yang kemudian muncul adalah bahwa penambahan ikatan angin tidak selalu memberikan respons yang sama pada setiap bangunan. Efektivitas *bracing* dipengaruhi oleh konfigurasi struktur, posisi pemasangan, jumlah tingkat, distribusi massa, karakteristik elemen utama, kondisi tumpuan, serta arah pembebanan lateral. Perbedaan konfigurasi *bracing* dapat menghasilkan karakteristik kekakuan dan mekanisme penyaluran gaya yang berbeda sehingga respons struktur terhadap pembebanan lateral juga dapat mengalami perubahan. Aryandi dan Herbudiman (2017) menunjukkan bahwa variasi bentuk *bracing* dapat memengaruhi kinerja seismik struktur.

Kubon Tubuh et al. (2025) menunjukkan adanya perbedaan perilaku antara struktur rangka baja yang menggunakan *bracing* tipe X dan *inverted-V*. Perbedaan konfigurasi tersebut dapat memengaruhi mekanisme penyaluran gaya lateral, distribusi gaya internal, serta respons deformasi struktur ketika menerima pembebanan. Hasil

tersebut menunjukkan bahwa pemilihan konfigurasi *bracing* perlu disesuaikan dengan karakteristik dan kebutuhan kinerja struktur yang direncanakan.

Pada bangunan industri, analisis terhadap sistem penahan gaya lateral menjadi semakin kompleks karena adanya beban permanen dari *equipment*, sistem perpipaan, tangki, dan berbagai komponen pendukung lainnya. Keberadaan komponen tersebut dapat meningkatkan massa struktur dan memengaruhi distribusi massa pada bangunan sehingga respons struktur terhadap pembebanan lateral dapat mengalami perubahan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik pembebanan pada bangunan industri perlu diperhitungkan secara khusus dalam mengevaluasi kinerja sistem penahan gaya lateral. Pujianto et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan sistem *Bracing-X* memberikan pengaruh terhadap respons seismik struktur bangunan industri. Temuan tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi *Bracing-X* dapat memberikan kontribusi terhadap perilaku struktur ketika menerima pembebanan gempa, sehingga penggunaannya perlu dianalisis berdasarkan karakteristik struktur dan kondisi pembebanan yang bekerja.

Berdasarkan uraian tersebut, diperlukan analisis yang secara khusus mempertimbangkan karakteristik dan kondisi pembebanan bangunan industri agar efektivitas sistem ikatan angin dapat diketahui secara lebih representatif. Analisis tersebut penting untuk mengetahui sejauh mana penggunaan *Bracing-X* mampu meningkatkan kekakuan struktur, mengendalikan perpindahan lateral, serta membatasi simpangan antar lantai pada bangunan industri bertingkat. Penelitian ini memiliki perbedaan dengan penelitian terdahulu karena berfokus pada evaluasi komparatif struktur baja bertingkat pada fasilitas industri *Ester Plant* dengan membandingkan dua kondisi sistem struktur, yaitu struktur tanpa ikatan angin dan struktur dengan ikatan angin tipe X. Analisis dilakukan menggunakan metode statik ekuivalen untuk mengevaluasi respons struktur terhadap pembebanan gempa dengan mempertimbangkan karakteristik sistem struktur dan kondisi pembebanan yang diterapkan. Model struktur juga mempertimbangkan beban gravitasi, beban mati tambahan dari peralatan industri, beban angin, serta beban gempa sehingga kondisi pembebanan yang digunakan lebih mendekati karakteristik bangunan industri yang sebenarnya.

Andriansyah dan Khatulistiani (2020) menunjukkan bahwa penerapan sistem rangka bresing konsentrik pada struktur baja dapat memengaruhi kemampuan struktur dalam menerima gaya lateral. Sistem bresing memberikan jalur penyaluran gaya melalui elemen diagonal sehingga dapat memengaruhi kekakuan dan respons struktur ketika menerima pembebanan lateral. Hasil tersebut menjadi salah satu dasar dalam mempertimbangkan penggunaan sistem ikatan angin sebagai elemen penahan gaya lateral pada struktur baja bertingkat. Sibagariang dan Tarigan (2022) menganalisis respons struktur portal baja dengan sistem rangka bresing konsentrik khusus terhadap pembebanan gempa. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan sistem bresing pada struktur baja dapat memengaruhi respons struktur terhadap gaya gempa. Hasil tersebut memberikan dasar bahwa konfigurasi sistem penahan gaya lateral perlu diperhatikan dalam mengevaluasi kinerja struktur baja yang dirancang untuk menerima pembebanan seismik.

Pujianto et al. (2025) mengkaji pengaruh sistem *Bracing-X* terhadap respons seismik struktur bangunan industri. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan konfigurasi *Bracing-X* memberikan pengaruh terhadap respons struktur ketika menerima pembebanan gempa. Temuan tersebut menjadi relevan dengan penelitian ini karena penggunaan sistem ikatan angin tipe X juga dianalisis pada struktur bangunan industri dengan karakteristik pembebanan yang mempertimbangkan keberadaan peralatan dan komponen pendukung fasilitas industri.Berdasarkan perbedaan tersebut, penelitian ini tidak hanya mengkaji pengaruh penggunaan *bracing* terhadap kapasitas dan stabilitas elemen, tetapi juga mengevaluasi perubahan respons global struktur. Perbandingan dilakukan antara model tanpa ikatan angin dan model dengan ikatan angin tipe X untuk mengetahui pengaruh penambahan sistem penahan gaya lateral terhadap perilaku struktur secara keseluruhan. Parameter yang menjadi perhatian meliputi periode getar alami, gaya geser dasar (*base shear*), distribusi gaya lateral, perpindahan lantai (*story displacement*), dan simpangan antar lantai (*story drift*).

Objek penelitian berupa bangunan industri *Ester Plant* yang berlokasi di Kota Medan, Sumatera Utara. Kondisi lokasi dan karakteristik tanah menjadi bagian penting dalam analisis karena parameter seismik dan respons struktur dipengaruhi oleh kondisi situs. Pemodelan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS untuk memperoleh respons numerik dari masing-masing model. Kedua model kemudian dibandingkan berdasarkan parameter respons struktur yang telah ditentukan untuk mengetahui perubahan perilaku struktur setelah penambahan sistem ikatan angin tipe X. Evaluasi terhadap periode getar alami, gaya geser dasar, distribusi gaya lateral, *story displacement*, dan *story drift* dilakukan untuk mengetahui perubahan kekakuan dan respons lateral struktur setelah penambahan sistem ikatan angin tipe X. Hasil perbandingan tersebut selanjutnya digunakan untuk menilai efektivitas penerapan sistem *Bracing-X* pada bangunan industri bertingkat serta memberikan gambaran mengenai kontribusi sistem tersebut terhadap peningkatan kinerja struktur dalam menghadapi pembebanan gempa.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan analisis komparatif sistem ikatan angin tipe X pada struktur baja bertingkat yang digunakan sebagai fasilitas industri dengan mempertimbangkan keberadaan beban peralatan industri yang relatif besar. Penelitian ini tidak hanya membandingkan struktur berdasarkan nilai gaya gempa, tetapi juga menghubungkan perubahan massa struktur dengan perubahan periode getar, perpindahan lateral, dan simpangan antar lantai. Pendekatan tersebut menjadi penting karena perubahan massa dan kekakuan struktur dapat memengaruhi karakteristik dinamik serta respons struktur terhadap pembebanan gempa. Tremblay (2002) menjelaskan bahwa respons struktur baja terhadap pembebanan seismik berkaitan dengan karakteristik kekakuan dan perilaku inelastik elemen penahan gaya lateral. Kemampuan elemen dalam mempertahankan kekuatan, stabilitas, dan kapasitas deformasi ketika menerima pembebanan siklik menjadi salah satu faktor yang memengaruhi kinerja struktur baja. Hal tersebut menunjukkan bahwa evaluasi struktur terhadap gempa perlu mempertimbangkan perilaku elemen penahan gaya lateral selain hanya memperhatikan besarnya gaya yang bekerja.

Hsiao et al. (2013) menunjukkan bahwa konfigurasi sistem rangka bresing konsentrik berpengaruh terhadap kapasitas dan respons struktur dalam menerima pembebanan lateral. Penggunaan elemen bresing memberikan mekanisme penyaluran gaya melalui gaya aksial sehingga dapat memengaruhi kekakuan dan kemampuan struktur dalam mengendalikan deformasi. Perbedaan konfigurasi sistem bresing dengan demikian dapat menghasilkan karakteristik respons struktur yang berbeda ketika menerima pembebanan lateral. Pujianto et al. (2025) menunjukkan bahwa penerapan sistem *Bracing-X* dapat memengaruhi respons seismik struktur bangunan industri. Penggunaan konfigurasi tersebut memberikan perubahan terhadap perilaku struktur ketika menerima pembebanan gempa sehingga keberadaan sistem penahan gaya lateral perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kinerja bangunan industri. Temuan tersebut menjadi relevan dengan penelitian ini karena objek yang dikaji juga merupakan struktur baja bertingkat pada fasilitas industri. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai manfaat dan konsekuensi penggunaan ikatan angin tipe X pada struktur baja bertingkat di fasilitas industri *Ester Plant*. Hasil analisis dapat digunakan untuk mengetahui sejauh mana penambahan sistem ikatan angin memengaruhi karakteristik dinamik dan respons lateral struktur serta untuk menilai kesesuaiannya sebagai salah satu alternatif sistem penahan gaya lateral pada bangunan industri.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kinerja struktur baja bertingkat pada bangunan industri Ester Plant antara kondisi tanpa ikatan angin dan kondisi dengan penggunaan ikatan angin tipe X. Kinerja struktur dievaluasi berdasarkan perubahan periode getar alami, gaya geser dasar, distribusi gaya lateral, story displacement, story drift, serta hasil pemeriksaan desain elemen baja menggunakan ETABS. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi teknis mengenai efektivitas sistem ikatan angin tipe X dalam meningkatkan kekakuan, mengendalikan deformasi, dan mempertahankan stabilitas struktur terhadap pembebanan gempa, sekaligus menjadi pertimbangan dalam perencanaan struktur baja bertingkat pada fasilitas industri di wilayah dengan tuntutan seismik yang tinggi

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan studi kasus untuk menganalisis pengaruh penggunaan ikatan angin tipe X terhadap kinerja struktur baja pada bangunan Pabrik *Ester Plant* di Kawasan Industri Medan (KIM I), Sumatera Utara. Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian berfokus pada pengukuran dan perbandingan parameter respons struktur yang diperoleh melalui analisis numerik. Analisis dilakukan dengan membandingkan dua model struktur, yaitu struktur tanpa ikatan angin dan struktur yang menggunakan ikatan angin tipe X. Parameter yang dianalisis meliputi periode getar struktur, gaya geser dasar, perpindahan lateral, dan simpangan antar lantai.Pendekatan studi kasus dipilih karena objek penelitian merupakan bangunan industri tertentu yang memiliki karakteristik geometrik, material, konfigurasi struktur, dan kondisi pembebanan yang spesifik. Pendekatan ini memungkinkan analisis dilakukan secara terfokus berdasarkan karakteristik objek penelitian sehingga perubahan respons struktur akibat penerapan sistem *Bracing-X* dapat diamati secara lebih terukur. Perbandingan kedua model dilakukan untuk mengetahui perubahan karakteristik dinamik dan respons lateral struktur setelah penambahan sistem ikatan angin tipe X.

Andriansyah dan Khatulistiani (2020) menerapkan analisis terhadap sistem rangka bresing pada struktur baja untuk mengetahui pengaruh penerapan konfigurasi bresing terhadap kemampuan struktur dalam menerima gaya lateral. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa perbandingan kondisi struktur dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan respons akibat penerapan sistem penahan gaya lateral tertentu. Pendekatan serupa juga relevan untuk digunakan dalam penelitian ini dengan menempatkan struktur tanpa ikatan angin sebagai model pembanding terhadap struktur dengan ikatan angin tipe X. Sibagariang dan Tarigan (2022) menganalisis respons struktur portal baja dengan sistem rangka bresing konsentrik khusus terhadap pembebanan gempa. Analisis tersebut

memperlihatkan bahwa penerapan sistem bresing dapat digunakan sebagai bagian dari evaluasi respons struktur terhadap pembebanan seismik. Dalam penelitian ini, pendekatan tersebut dikembangkan melalui perbandingan dua model struktur untuk mengidentifikasi perubahan parameter respons akibat penambahan sistem ikatan angin tipe X.

Pujianto et al. (2025) mengevaluasi pengaruh sistem *Bracing-X* terhadap respons seismik struktur bangunan industri. Penelitian tersebut menunjukkan relevansi penggunaan konfigurasi *Bracing-X* dalam menganalisis perubahan perilaku struktur akibat pembebanan gempa pada lingkungan bangunan industri. Berdasarkan pendekatan tersebut, penelitian ini memfokuskan analisis pada perbandingan periode getar, gaya geser dasar, perpindahan lateral, dan simpangan antar lantai untuk memperoleh gambaran mengenai pengaruh penggunaan ikatan angin tipe X terhadap kinerja struktur Pabrik *Ester Plant*.

Objek dan Model Penelitian

Objek penelitian adalah struktur baja bangunan Pabrik *Ester Plant* yang berlokasi di Kawasan Industri Medan (KIM I), Sumatera Utara. Struktur bangunan dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan perangkat lunak ETABS dengan mempertahankan konfigurasi geometrik dan sistem struktur sesuai kondisi eksisting. Untuk mengetahui pengaruh ikatan angin tipe X, dibuat dua model struktur yang memiliki dimensi, material, profil elemen, kondisi tumpuan, dan pembebanan yang sama. Perbedaan utama kedua model terletak pada keberadaan ikatan angin tipe X, yaitu Model 1 berupa struktur baja tanpa ikatan angin dan Model 2 berupa struktur baja dengan penambahan ikatan angin tipe X. Pemodelan dua kondisi tersebut digunakan untuk memperoleh perbandingan respons struktur secara langsung akibat perubahan sistem penahan gaya lateral. Pendekatan pemodelan komparatif ini sejalan dengan penelitian Andriansyah dan Khatulistiani (2020) serta Sibagariang dan Tarigan (2022) yang membandingkan respons struktur baja berdasarkan penerapan sistem bresing sebagai elemen penahan gaya lateral.

Model struktur tiga dimensi disusun berdasarkan data geometrik bangunan yang meliputi panjang dan lebar bangunan, jumlah lantai, tinggi antar lantai, posisi kolom dan balok, serta konfigurasi elemen struktur baja. Data tersebut diperoleh dari gambar struktur dan dokumen teknis bangunan yang tersedia. Setiap elemen struktur direpresentasikan dalam model numerik sesuai fungsi dan karakteristiknya, sedangkan ikatan angin tipe X dimodelkan sebagai elemen penahan gaya lateral yang bekerja secara aksial. Pemodelan tersebut memungkinkan pengaruh penambahan *Bracing-X* terhadap kekakuan, stabilitas, dan respons struktur dianalisis secara kuantitatif. Hsiao et al. (2013) menjelaskan bahwa konfigurasi sistem bresing konsentrik memiliki pengaruh terhadap perilaku dan kapasitas struktur dalam menerima pembebanan lateral, sedangkan Pujianto et al. (2025) menunjukkan bahwa penerapan sistem *Bracing-X* dapat memengaruhi respons seismik struktur bangunan industri.

Material dan Elemen Struktur

Material utama yang digunakan dalam pemodelan adalah baja BJ-37. Parameter material yang dimasukkan ke dalam perangkat lunak meliputi berat jenis, modulus elastisitas, rasio Poisson, tegangan leleh, dan tegangan tarik ultimit sesuai dengan karakteristik material yang digunakan pada struktur. Karakteristik material baja menjadi salah satu faktor penting dalam menentukan kemampuan elemen struktur dalam menerima beban, terutama pada struktur yang mengalami pembebanan lateral dan siklik. Hidayat (2019) menjelaskan bahwa sifat mekanik material merupakan dasar dalam menentukan perilaku dan kemampuan material ketika menerima pembebanan. Pada struktur baja yang menerima beban gempa, karakteristik material juga berkaitan dengan kemampuan elemen dalam mengalami deformasi dan mempertahankan kapasitasnya ketika menerima pembebanan berulang (Tremblay, 2002).

Profil baja yang digunakan pada kolom, balok, dan elemen ikatan angin dimasukkan ke dalam model sesuai dengan profil aktual atau profil desain yang digunakan pada bangunan. Pada tahap ini dilakukan pemeriksaan terhadap karakteristik penampang, orientasi elemen, konektivitas antar-elemen, serta kondisi tumpuan untuk memastikan model merepresentasikan konfigurasi struktur secara tepat. Khusus pada ikatan angin tipe X, konfigurasi elemen dimodelkan pada bidang struktur yang ditentukan sehingga gaya lateral yang bekerja pada struktur dapat disalurkan melalui sistem *bracing* menuju elemen utama dan selanjutnya diteruskan ke tumpuan. Pemodelan elemen *bracing* tersebut mempertimbangkan perilaku aksial dan stabilitas elemen ketika menerima pembebanan lateral. Uriz et al. (2008) menunjukkan bahwa elemen bresing baja dapat mengalami perilaku tekuk inelastik ketika menerima pembebanan siklik, sedangkan Fell et al. (2009) menunjukkan bahwa perilaku tekuk dan deformasi siklik pada elemen bresing perlu diperhatikan dalam mengevaluasi kinerja struktur baja terhadap pembebanan seismik.

Pembebanan Struktur

Pembebanan struktur terdiri atas beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa. Beban mati meliputi berat sendiri elemen struktur serta komponen permanen yang menjadi bagian dari bangunan, sedangkan beban hidup disesuaikan dengan fungsi dan penggunaan bangunan industri. Dalam pemodelan, seluruh jenis pembebanan diterapkan secara konsisten pada kedua model struktur, yaitu model tanpa ikatan angin dan model dengan ikatan angin tipe X, sehingga perbedaan respons yang diperoleh dapat dikaitkan dengan perubahan sistem penahan

gaya lateral. Penerapan kombinasi pembebanan yang konsisten menjadi penting dalam analisis komparatif karena respons struktur dipengaruhi oleh karakteristik massa, kekakuan, dan distribusi gaya yang bekerja pada struktur.

Beban angin diperhitungkan berdasarkan kondisi lokasi dan karakteristik bangunan serta diterapkan pada model struktur dalam arah pembebanan yang relevan. Beban angin digunakan sebagai salah satu bentuk pembebanan lateral yang bekerja pada struktur sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi respons struktur pada kondisi tanpa dan dengan *bracing*. Kedua model diberikan parameter dan besaran pembebanan angin yang sama agar perubahan respons struktur dapat dikaitkan secara lebih objektif dengan keberadaan ikatan angin tipe X. Pengaruh konfigurasi *bracing* terhadap respons struktur akibat pembebanan lateral telah ditunjukkan dalam penelitian Andriansyah dan Khatulistiani (2020), yang menganalisis penerapan sistem rangka bresing konsentrik pada struktur baja, serta Aryandi dan Herbudiman (2017), yang menunjukkan bahwa variasi bentuk *bracing* dapat memengaruhi kinerja seismik struktur.

Beban gempa ditentukan berdasarkan lokasi bangunan di Kota Medan dan parameter seismik yang digunakan dalam analisis struktur. Penentuan parameter gempa meliputi karakteristik lokasi, kondisi tanah, sistem struktur, serta parameter respons seismik yang diperlukan dalam analisis statik ekuivalen. Pembebanan gempa kemudian diterapkan pada kedua model dengan parameter yang sama sehingga perbandingan respons struktur dapat dilakukan secara langsung. Sibagariang dan Tarigan (2022) menunjukkan bahwa penerapan sistem rangka bresing pada struktur baja memiliki keterkaitan dengan respons struktur terhadap pembebanan gempa, sedangkan Pujianto et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan sistem *Bracing-X* dapat memengaruhi respons seismik struktur bangunan industri. Oleh karena itu, parameter pembebanan gempa pada kedua model dipertahankan sama, sementara perubahan sistem struktur hanya dilakukan melalui penambahan ikatan angin tipe X.

Analisis Gempa

Analisis gempa dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode statik ekuivalen. Metode tersebut digunakan untuk menentukan respons struktur terhadap pembebanan lateral berdasarkan karakteristik geometrik, massa, dan sistem penahan gaya lateral bangunan yang menjadi objek penelitian. Gaya gempa dasar ditentukan berdasarkan parameter seismik dan berat seismik bangunan, kemudian didistribusikan pada setiap tingkat sesuai karakteristik massa dan ketinggian bangunan. Hasil distribusi gaya lateral tersebut selanjutnya digunakan sebagai input pembebanan gempa pada model struktur menggunakan perangkat lunak ETABS. Penggunaan metode analisis gempa pada struktur baja dengan sistem bresing juga diterapkan dalam penelitian Sibagariang dan Tarigan (2022) untuk mengevaluasi respons struktur portal baja dengan sistem rangka bresing konsentrik khusus terhadap pembebanan gempa.

Dalam proses pemodelan gempa, arah pembebanan horizontal diperhitungkan pada arah utama struktur sesuai dengan konfigurasi geometrik bangunan. Apabila diperlukan, pengaruh pembebanan gempa pada dua arah utama struktur dipertimbangkan melalui kombinasi pembebanan yang diterapkan pada model. Berat seismik struktur ditentukan berdasarkan massa struktur dan komponen beban yang diperhitungkan sebagai massa gempa. Pengaturan massa, sumber massa, serta pola pembebanan dilakukan secara konsisten pada kedua model, yaitu model tanpa ikatan angin dan model dengan ikatan angin tipe X, sehingga perbedaan respons struktur yang dihasilkan dapat dikaitkan dengan perubahan sistem penahan gaya lateral. Pendekatan komparatif tersebut sejalan dengan penelitian Pujianto et al. (2025) yang mengevaluasi pengaruh sistem *Bracing-X* terhadap respons seismik struktur bangunan industri serta penelitian Andriansyah dan Khatulistiani (2020) mengenai penerapan sistem rangka bresing konsentrik pada struktur baja.

Pemodelan Menggunakan ETABS

Pemodelan dan analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS. Proses pemodelan diawali dengan menentukan satuan, grid struktur, elevasi lantai, material, dan properti penampang elemen. Selanjutnya dimodelkan elemen kolom, balok, dan elemen ikatan angin sesuai konfigurasi struktur. Setelah seluruh elemen terbentuk, dilakukan pendefinisian tumpuan dan konektivitas antar-elemen untuk memastikan model numerik merepresentasikan kondisi struktur yang dianalisis. ETABS digunakan sebagai perangkat analisis berbasis metode elemen hingga untuk memperoleh respons struktur akibat berbagai kondisi pembebanan (Computer and Structures, Inc., 2024).

Tahap berikutnya adalah memasukkan pola beban, sumber massa, kasus pembebanan, serta kombinasi beban ke dalam model. Model kemudian dilakukan pengecekan untuk memastikan tidak terdapat kesalahan geometri, elemen yang tidak terhubung, atau ketidaksesuaian definisi material dan pembebanan. Setelah model dinyatakan memenuhi pemeriksaan awal, analisis struktur dijalankan untuk memperoleh respons pada setiap model. Penggunaan prosedur pemodelan yang sama pada kedua kondisi struktur menjadi bagian penting dalam menjaga konsistensi perbandingan hasil analisis (Computer and Structures, Inc., 2024).

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilaksanakan secara sistematis yang dimulai dari identifikasi permasalahan, pengumpulan data, pemodelan struktur, pendefinisian material dan profil baja, penentuan pembebanan, analisis struktur, pengambilan hasil analisis, hingga evaluasi kinerja struktur. Data yang dikumpulkan meliputi gambar struktur, dimensi bangunan, spesifikasi material, profil elemen baja, kondisi tumpuan, data pembebanan, serta informasi lokasi bangunan. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan model struktur tiga dimensi pada perangkat lunak ETABS. Penggunaan pemodelan numerik untuk mengevaluasi perilaku struktur baja dan sistem bresing juga diterapkan dalam penelitian Andriansyah dan Khatulistiani (2020) serta Sibagariang dan Tarigan (2022).

Setelah data terkumpul, dibuat Model 1 berupa struktur baja tanpa ikatan angin tipe X dan Model 2 berupa struktur baja dengan ikatan angin tipe X. Kedua model dibuat menggunakan parameter geometrik, material, profil struktur, massa, kondisi tumpuan, dan pembebanan yang identik. Perbedaan hanya diberikan pada sistem ikatan angin sehingga perubahan respons struktur yang diperoleh dapat digunakan untuk mengevaluasi pengaruh *Bracing-X* terhadap kinerja struktur. Pendekatan komparatif tersebut memungkinkan evaluasi dilakukan secara langsung terhadap perubahan kekakuan dan respons lateral struktur. Penelitian Kubon Tubuh et al. (2025) juga menggunakan perbandingan konfigurasi *bracing* untuk mengidentifikasi perbedaan perilaku struktur rangka baja akibat variasi sistem penahan gaya lateral.

Setelah kedua model selesai, dilakukan analisis struktur menggunakan kombinasi pembebanan yang telah ditentukan dalam model penelitian. Hasil analisis kemudian diekstraksi dari ETABS untuk memperoleh parameter respons struktur pada masing-masing model. Parameter yang dianalisis meliputi periode getar, gaya geser dasar, perpindahan lateral, dan simpangan antar lantai. Data hasil analisis selanjutnya disusun dalam bentuk tabel perbandingan sehingga perubahan respons akibat penggunaan ikatan angin tipe X dapat diidentifikasi secara kuantitatif. Hasil tersebut kemudian digunakan untuk mengevaluasi efektivitas *Bracing-X* dalam meningkatkan kekakuan dan mengendalikan respons lateral struktur, sebagaimana kajian mengenai pengaruh sistem *Bracing-X* terhadap respons seismik yang dilakukan oleh Pujianto et al. (2025).

Parameter Analisis

Parameter utama yang dianalisis meliputi periode getar struktur, gaya geser dasar (*base shear*), perpindahan lateral (*displacement*), dan simpangan antar lantai (*story drift*). Periode getar digunakan untuk mengevaluasi karakteristik dinamik dan perubahan kekakuan global struktur. Perubahan periode getar antara model tanpa *bracing* dan model dengan *bracing* digunakan sebagai salah satu indikator perubahan karakteristik kekakuan struktur akibat penambahan ikatan angin tipe X. Hsiao et al. (2013) menunjukkan bahwa konfigurasi sistem rangka bresing konsentrik dapat memengaruhi karakteristik perilaku dan respons struktur terhadap pembebanan lateral. Oleh karena itu, perubahan periode getar menjadi salah satu parameter penting untuk mengidentifikasi perubahan karakteristik dinamik akibat penambahan sistem *Bracing-X*.

Gaya geser dasar (*base shear*) digunakan untuk mengetahui respons total struktur terhadap gaya lateral akibat pembebanan gempa. Nilai *base shear* dibandingkan antara kedua model untuk mengetahui perubahan respons gaya lateral setelah penambahan ikatan angin. Selain itu, perpindahan lateral pada setiap tingkat bangunan dianalisis untuk mengetahui kemampuan struktur dalam membatasi deformasi akibat pembebanan lateral. Perbandingan respons tersebut digunakan untuk menilai apakah penambahan *Bracing-X* memberikan perubahan terhadap kekakuan dan kemampuan struktur dalam mengendalikan perpindahan. Sibagariang dan Tarigan (2022) menunjukkan bahwa sistem rangka bresing pada struktur baja dapat memberikan pengaruh terhadap respons struktur ketika menerima pembebanan gempa, sedangkan Pujianto et al. (2025) menunjukkan adanya pengaruh sistem *Bracing-X* terhadap respons seismik struktur bangunan industri.

Parameter berikutnya adalah simpangan antar lantai (*story drift*), yaitu selisih perpindahan lateral antara dua tingkat yang berurutan. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat deformasi relatif antar lantai dan mengetahui kemampuan sistem struktur dalam mengendalikan simpangan akibat pembebanan lateral. Hasil *story drift* pada kedua model dibandingkan untuk mengetahui sejauh mana ikatan angin tipe X mampu mengurangi simpangan lateral dan meningkatkan stabilitas struktur terhadap beban gempa. Penelitian Andriansyah dan Khatulistiani (2020) serta Pujianto et al. (2025) menunjukkan bahwa penerapan sistem bresing pada struktur baja dapat memengaruhi respons lateral dan seismik struktur. Dengan demikian, analisis *story drift* menjadi parameter penting dalam mengevaluasi efektivitas penerapan *Bracing-X* pada bangunan industri bertingkat.

Teknik Analisis Data

Data hasil analisis ETABS dianalisis secara komparatif dengan membandingkan nilai setiap parameter antara Model 1 dan Model 2. Parameter yang dibandingkan meliputi periode getar, *base shear*, *displacement*, dan *story drift*.

Untuk mengetahui besarnya perubahan setiap parameter setelah penambahan ikatan angin tipe X, digunakan persentase perubahan antara struktur tanpa ikatan angin dan struktur dengan ikatan angin tipe X. Secara umum, persentase perubahan dihitung menggunakan persamaan:

Persentase perubahan = |Nilai Model 2 − Nilai Model 1| / Nilai Model 1 × 100%

Hasil perhitungan persentase perubahan digunakan untuk mengidentifikasi parameter yang mengalami perubahan paling signifikan setelah penambahan ikatan angin tipe X. Interpretasi dilakukan dengan membandingkan kecenderungan perubahan setiap parameter terhadap karakteristik respons struktur. Penurunan periode getar dan perpindahan lateral dapat menunjukkan adanya peningkatan kekakuan global struktur, sedangkan perubahan *story drift* digunakan untuk mengevaluasi perubahan deformasi relatif antar lantai. Sementara itu, perubahan *base shear* digunakan untuk mengetahui perubahan respons gaya lateral total yang diterima struktur akibat perubahan sistem penahan gaya lateral. Tremblay (2002) menjelaskan bahwa karakteristik kekakuan dan perilaku elemen penahan gaya lateral memiliki pengaruh terhadap respons struktur baja ketika menerima pembebanan seismik. Oleh karena itu, efektivitas *Bracing-X* dalam penelitian ini tidak ditentukan hanya berdasarkan satu parameter, tetapi dinilai melalui kecenderungan perubahan periode getar, *base shear*, *displacement*, dan *story drift* secara bersamaan.

Hasil perbandingan selanjutnya digunakan untuk menentukan pengaruh penambahan ikatan angin tipe X terhadap kinerja struktur baja bertingkat pada fasilitas industri *Ester Plant*. Interpretasi dilakukan dengan menghubungkan perubahan parameter respons dengan karakteristik kekakuan, stabilitas, dan kemampuan struktur dalam mengendalikan deformasi lateral. Pendekatan komparatif tersebut sejalan dengan penelitian Kubon Tubuh et al. (2025) dan Pujianto et al. (2025) yang mengevaluasi perbedaan perilaku dan respons struktur berdasarkan variasi sistem *bracing*.

Evaluasi Kinerja Struktur

Tahap akhir penelitian dilakukan dengan mengevaluasi hasil analisis kedua model berdasarkan parameter kinerja struktur yang telah ditentukan. Evaluasi meliputi perbandingan periode getar, *base shear*, perpindahan lateral, dan *story drift* antara struktur tanpa ikatan angin dan struktur dengan ikatan angin tipe X. Apabila model dengan ikatan angin tipe X menunjukkan penurunan perpindahan lateral dan *story drift* disertai perubahan periode getar yang menunjukkan peningkatan kekakuan struktur, maka penggunaan ikatan angin dapat dinilai memberikan kontribusi positif terhadap pengendalian respons lateral dan stabilitas struktur. Sebaliknya, apabila penambahan ikatan angin tidak menghasilkan perubahan yang signifikan atau menyebabkan respons tertentu menjadi kurang menguntungkan, maka efektivitas konfigurasi tersebut perlu ditinjau berdasarkan hubungan antara kekakuan, massa, gaya lateral, dan deformasi struktur. Tremblay (2002) menunjukkan bahwa respons struktur baja terhadap pembebanan seismik dipengaruhi oleh karakteristik elemen penahan gaya lateral dan perilaku struktur ketika mengalami pembebanan siklik. Oleh karena itu, evaluasi efektivitas *Bracing-X* dilakukan dengan mempertimbangkan seluruh parameter respons yang dianalisis.

Dengan demikian, hasil penelitian tidak hanya menunjukkan perbedaan numerik antara struktur tanpa ikatan angin dan struktur dengan ikatan angin tipe X, tetapi juga memberikan dasar untuk mengevaluasi pengaruh sistem *bracing* terhadap kinerja struktur baja pada bangunan industri. Kesimpulan mengenai efektivitas ikatan angin tipe X ditentukan berdasarkan hasil perbandingan periode getar, *base shear*, *displacement*, dan *story drift* serta kecenderungan perubahan respons struktur secara keseluruhan. Pendekatan tersebut sejalan dengan penelitian Andriansyah dan Khatulistiani (2020), Sibagariang dan Tarigan (2022), serta Pujianto et al. (2025) yang menunjukkan bahwa penerapan sistem bresing dapat memengaruhi respons lateral dan seismik struktur baja. Dengan demikian, efektivitas *Bracing-X* pada penelitian ini dinilai berdasarkan kemampuan sistem tersebut dalam meningkatkan kekakuan dan mengendalikan deformasi lateral tanpa mengabaikan perubahan gaya internal dan respons global struktur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Analisis Pembebanan Struktur

Penelitian ini menganalisis pengaruh penggunaan sistem ikatan angin tipe X terhadap kinerja struktur baja bertingkat pada bangunan industri dengan menggunakan perangkat lunak ETABS. Analisis dilakukan melalui perbandingan dua model, yaitu model struktur baja tanpa ikatan angin dan model struktur baja dengan ikatan angin tipe X. Kedua model menggunakan konfigurasi geometrik, material, dan kondisi pembebanan yang sama, sedangkan perbedaan utama terletak pada penambahan elemen *bracing*. Pendekatan komparatif tersebut memungkinkan perubahan respons struktur akibat penambahan sistem penahan gaya lateral diidentifikasi secara lebih objektif. Pendekatan perbandingan sistem *bracing* pada struktur baja juga digunakan oleh Andriansyah dan Khatulistiani (2020) dalam menganalisis sistem rangka bresing konsentrik serta Sibagariang dan Tarigan (2022) dalam

mengevaluasi respons struktur portal baja dengan sistem rangka bresing konsentrik khusus terhadap pembebanan gempa.

Hasil analisis pembebanan menunjukkan bahwa struktur menerima kombinasi beban yang terdiri atas beban mati (*dead load*), beban hidup (*live load*), beban mati tambahan berupa peralatan industri (*equipment*), beban angin, dan beban gempa. Beban hidup pada bangunan dihitung sebesar 1.080 kN untuk setiap lantai berdasarkan asumsi 5 kN/m², sedangkan beban hidup pada atap sebesar 64,62 kN. Besarnya beban tersebut menunjukkan bahwa struktur dirancang untuk mengakomodasi aktivitas operasional industri dengan intensitas pembebanan yang relatif tinggi. Penerapan beban pada struktur industri perlu mempertimbangkan karakteristik material, elemen struktur, serta sistem penahan gaya lateral agar respons struktur dapat dianalisis secara tepat. Hidayat (2019) menjelaskan bahwa karakteristik material dan kemampuan elemen dalam menerima pembebanan merupakan aspek penting dalam menentukan perilaku struktur. Dalam konteks struktur baja, penerapan sistem penahan gaya lateral juga memiliki pengaruh terhadap respons struktur ketika menerima pembebanan horizontal (Hsiao et al., 2013).

Selain beban gravitasi, struktur menerima beban mati tambahan yang berasal dari peralatan industri (*equipment*). Total beban permanen peralatan yang dimodelkan mencapai 112,5 ton, yang terdiri atas *equipment* pada elevasi +6,50 m sebesar 15,9 ton, elevasi +13,00 m sampai +19,00 m sebesar 24,4 ton, dan elevasi +25,00 m sampai +30,00 m sebesar 72,2 ton. Distribusi beban peralatan pada beberapa elevasi menyebabkan tambahan massa yang cukup signifikan terhadap sistem struktur. Dalam analisis gempa, perubahan massa struktur dapat memengaruhi karakteristik respons dinamik dan gaya inersia yang terjadi ketika struktur mengalami percepatan gempa. Tremblay (2002) menjelaskan bahwa respons struktur baja terhadap pembebanan seismik berkaitan dengan karakteristik struktur dan perilaku elemen penahan gaya lateral. Oleh karena itu, keberadaan *equipment* industri tidak hanya perlu diperhitungkan sebagai beban gravitasi, tetapi juga perlu dimasukkan secara konsisten dalam pemodelan massa struktur agar respons seismik yang diperoleh dapat menggambarkan kondisi bangunan secara lebih representatif.

Besarnya beban permanen tersebut menjadi salah satu faktor yang memengaruhi berat seismik efektif antara model tanpa ikatan angin dan model dengan ikatan angin. Penambahan elemen *bracing* juga meningkatkan berat struktur karena elemen diagonal menjadi bagian dari sistem struktur permanen. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan *bracing* tidak hanya memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekakuan lateral, tetapi juga menimbulkan konsekuensi berupa penambahan massa struktur. Hsiao et al. (2013) menunjukkan bahwa konfigurasi sistem rangka bresing konsentrik berpengaruh terhadap perilaku dan kapasitas struktur dalam menerima pembebanan lateral. Selain itu, Uriz et al. (2008) menunjukkan bahwa elemen bresing baja memiliki perilaku yang berkaitan dengan tekuk dan respons inelastik ketika menerima pembebanan siklik. Dengan demikian, efektivitas sistem ikatan angin tipe X perlu dinilai secara menyeluruh, tidak hanya berdasarkan perubahan gaya geser dasar (*base shear*), tetapi juga berdasarkan perubahan periode getar, perpindahan lateral (*displacement*), dan simpangan antar lantai (*story drift*). Pujianto et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan sistem *Bracing-X* dapat memberikan pengaruh terhadap respons seismik struktur bangunan industri, sehingga hubungan antara penambahan massa, perubahan kekakuan, dan respons deformasi menjadi aspek penting dalam mengevaluasi efektivitas ikatan angin tipe X pada bangunan *Ester Plant*.

2. Hasil Analisis Beban Angin

Beban angin dihitung dengan mempertimbangkan karakteristik lokasi, kategori eksposur, tinggi bangunan, dan konfigurasi permukaan bangunan. Hasil analisis menunjukkan tekanan angin pada sisi *windward* sebesar 1,02 kN/m², sedangkan tekanan pada sisi *leeward* sebesar −0,31 kN/m². Perbedaan tanda tersebut menunjukkan adanya tekanan positif pada sisi bangunan yang berhadapan langsung dengan arah angin dan tekanan negatif pada sisi berlawanan yang berkaitan dengan efek hisap (*suction*). Nilai tekanan tersebut kemudian diterapkan pada model ETABS sebagai beban lateral atau beban area sesuai dengan bidang struktur yang menerima pengaruh angin. Penerapan pembebanan lateral pada struktur baja perlu memperhatikan karakteristik sistem penahan gaya lateral karena konfigurasi struktur dapat memengaruhi distribusi dan respons gaya yang diterima oleh elemen struktur. Andriansyah dan Khatulistiani (2020) menunjukkan bahwa penggunaan sistem rangka bresing konsentrik pada struktur baja berkaitan dengan kemampuan struktur dalam menerima gaya lateral.

Penerapan beban angin pada kedua model dilakukan secara konsisten sehingga perbedaan respons struktur dapat dikaitkan dengan keberadaan ikatan angin tipe X. Walaupun respons akibat gempa menjadi salah satu fokus utama penelitian, beban angin tetap penting karena bangunan industri bertingkat memiliki bidang tangkap angin yang relatif besar dan dapat menerima pembebanan lateral selama masa layan. Sistem *bracing* berperan dalam membantu menyalurkan gaya lateral yang bekerja pada struktur, sehingga perubahan konfigurasi *bracing* dapat memengaruhi respons global struktur. Hsiao et al. (2013) menunjukkan bahwa konfigurasi sistem rangka bresing konsentrik dapat memengaruhi perilaku dan kapasitas struktur dalam menerima pembebanan lateral. Selain itu, Aryandi dan

Herbudiman (2017) menunjukkan bahwa variasi bentuk *bracing* dapat memberikan perbedaan terhadap kinerja seismik struktur. Oleh karena itu, evaluasi struktur pada bangunan industri dilakukan dengan mempertimbangkan kombinasi pembebanan gravitasi dan lateral, sehingga pengaruh penambahan ikatan angin tipe X terhadap respons struktur dapat dianalisis secara lebih komprehensif.

3. Parameter Seismik dan Kategori Desain Seismik

Hasil analisis parameter gempa menunjukkan bahwa lokasi bangunan termasuk dalam Kategori Desain Seismik (KDS) D. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa bangunan berada pada tingkat tuntutan seismik yang memerlukan perhatian terhadap sistem penahan gaya lateral, kekakuan, stabilitas, dan kemampuan struktur dalam mengendalikan deformasi. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai percepatan spektral desain sebesar (S{DS}=0,6280g) dan (S_{D1}=0,6079g). Parameter tersebut menjadi dasar dalam menentukan besarnya gaya gempa desain serta mengevaluasi karakteristik respons struktur terhadap pembebanan lateral. Sibagariang dan Tarigan (2022) menunjukkan bahwa karakteristik sistem rangka bresing pada struktur baja memiliki keterkaitan dengan respons struktur ketika menerima pembebanan gempa. Oleh karena itu, parameter seismik yang diperoleh dalam penelitian ini digunakan secara konsisten pada kedua model untuk mengetahui pengaruh penambahan ikatan angin tipe X terhadap respons struktur.

Tingginya tuntutan seismik pada lokasi penelitian memperkuat pentingnya penggunaan sistem penahan gaya lateral yang mampu meningkatkan kekakuan dan stabilitas struktur. Dalam struktur baja bertingkat, sistem rangka berpengaku dapat memberikan jalur penyaluran gaya lateral melalui elemen diagonal sehingga gaya horizontal tidak sepenuhnya ditahan oleh aksi lentur balok dan kolom. Hsiao et al. (2013) menjelaskan bahwa sistem *special concentrically braced frames* memiliki karakteristik perilaku yang dipengaruhi oleh mekanisme kerja elemen bresing dalam menerima gaya lateral. Tremblay (2002) juga menunjukkan bahwa elemen bresing baja memiliki peranan penting dalam respons struktur terhadap pembebanan seismik, terutama berkaitan dengan perilaku aksial, tekuk, dan respons inelastik. Dengan demikian, penggunaan *Bracing-X* pada penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan kekakuan lateral dan membantu mengendalikan perpindahan serta simpangan antar lantai pada bangunan industri *Ester Plant*.

4. Perbandingan Gaya Geser Dasar (Base Shear)

Hasil perhitungan gaya geser dasar menunjukkan adanya perbedaan antara kedua model struktur. Model tanpa ikatan angin memiliki berat seismik efektif sebesar 6.108,28 kN dengan koefisien respons seismik sebesar 0,0785 sehingga menghasilkan gaya geser dasar sebesar 479,48 kN. Sementara itu, model dengan ikatan angin tipe X memiliki berat seismik efektif sebesar 6.293,34 kN dengan koefisien respons sebesar 0,0897 sehingga menghasilkan gaya geser dasar sebesar 564,58 kN. Dengan demikian, gaya geser dasar meningkat sebesar sekitar 15,07% setelah penambahan ikatan angin tipe X. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa perubahan sistem struktur memberikan pengaruh terhadap respons gaya lateral yang diterima oleh bangunan.

Peningkatan gaya geser dasar tersebut tidak dapat secara langsung diinterpretasikan sebagai penurunan kinerja struktur. Salah satu faktor yang berkontribusi terhadap peningkatan tersebut adalah bertambahnya berat seismik akibat penambahan elemen *bracing*. Penambahan elemen diagonal sebagai bagian dari sistem struktur menyebabkan massa struktur meningkat sehingga tuntutan gaya lateral yang bekerja pada sistem juga dapat mengalami perubahan. Di sisi lain, keberadaan *bracing* dapat meningkatkan kekakuan lateral struktur sehingga respons deformasi dapat mengalami perubahan yang berbeda dari kecenderungan peningkatan gaya geser dasar. Tremblay (2002) menjelaskan bahwa respons struktur baja terhadap pembebanan seismik dipengaruhi oleh karakteristik elemen penahan gaya lateral dan perilaku struktur ketika menerima pembebanan siklik. Dengan demikian, peningkatan *base shear* perlu dianalisis bersama parameter respons lainnya agar pengaruh penambahan ikatan angin dapat dinilai secara menyeluruh.

Perubahan koefisien respons dari 0,0785 menjadi 0,0897 juga berkontribusi terhadap peningkatan gaya geser dasar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan sistem struktur dapat memengaruhi karakteristik respons seismik yang digunakan dalam analisis. Oleh karena itu, perbandingan kedua model tidak cukup dilakukan hanya berdasarkan nilai *base shear*, tetapi perlu dilanjutkan dengan pemeriksaan periode getar, perpindahan lateral (*displacement*), dan simpangan antar lantai (*story drift*). Hsiao et al. (2013) menunjukkan bahwa konfigurasi sistem rangka bresing konsentrik dapat memengaruhi karakteristik perilaku dan kapasitas struktur terhadap pembebanan lateral. Sejalan dengan hal tersebut, Pujianto et al. (2025) menunjukkan bahwa penerapan sistem *Bracing-X* memberikan pengaruh terhadap respons seismik struktur bangunan industri. Dengan demikian, peningkatan gaya geser dasar sebesar 17,75% pada penelitian ini perlu dipahami bersama perubahan kekakuan dan deformasi struktur untuk menentukan efektivitas penggunaan ikatan angin tipe X secara keseluruhan.

5. Distribusi Gaya Lateral

Distribusi gaya lateral menunjukkan bahwa gaya gempa pada struktur meningkat seiring dengan distribusi massa dan elevasi bangunan. Pada model tanpa ikatan angin, gaya lateral maksimum yang dilaporkan mencapai 103,19 kN, sedangkan pada model dengan ikatan angin tipe X mencapai 121,22 kN. Peningkatan gaya lateral tersebut sejalan dengan meningkatnya gaya geser dasar pada model yang menggunakan bracing. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberadaan bracing tipe X memengaruhi respons struktur terhadap beban gempa karena perubahan kekakuan dan jalur penyaluran gaya lateral. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Pujianto et al. (2025) yang menunjukkan bahwa penggunaan sistem Bracing-X memberikan pengaruh terhadap respons seismik struktur baja. Perbedaan respons antara struktur tanpa bracing dan struktur dengan bracing juga ditemukan dalam penelitian Alfanhuri et al. (2025) serta Wiryadi et al. (2026), yang menunjukkan bahwa konfigurasi bracing dapat memengaruhi perilaku struktur baja terhadap beban gempa. Dengan demikian, peningkatan gaya lateral pada model dengan bracing tidak secara langsung menunjukkan penurunan kinerja struktur, tetapi perlu dianalisis bersama parameter respons lainnya, seperti simpangan, kekakuan, dan distribusi gaya pada elemen struktur.

Keberadaan ikatan angin tipe X membentuk jalur penyaluran gaya lateral yang lebih efektif melalui elemen diagonal. Pada sistem rangka tanpa bracing, gaya lateral terutama ditahan melalui mekanisme lentur balok dan kolom serta aksi rangka. Sebaliknya, pada rangka yang dilengkapi bracing, elemen diagonal berperan dalam menyalurkan gaya horizontal melalui mekanisme gaya aksial tarik dan tekan. Mekanisme tersebut meningkatkan kekakuan lateral sistem sehingga simpangan akibat beban gempa dapat dikendalikan dengan lebih baik. Hal ini sejalan dengan penelitian Jansen dan Pandeleke (2016) yang membandingkan simpangan bangunan baja bertingkat dengan penggunaan ikatan angin X dan K, serta penelitian Rosul et al. (2023) yang menunjukkan adanya perbedaan perilaku struktur baja antara sistem bracing konsentris tipe X dan konfigurasi bracing lainnya. Hsiao et al. (2013) juga menunjukkan bahwa perilaku rangka berpengaku konsentris sangat dipengaruhi oleh mekanisme kerja elemen bracing dalam menerima gaya aksial selama pembebanan siklik. Oleh karena itu, penggunaan bracing tipe X pada struktur dapat dipandang sebagai salah satu strategi untuk meningkatkan kekakuan lateral dan mengoptimalkan jalur penyaluran gaya gempa, meskipun evaluasi kinerja tetap perlu mempertimbangkan kemungkinan terjadinya tekuk pada elemen bracing akibat gaya tekan.

6. Perubahan Periode Getar Alami

Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur tanpa ikatan angin memiliki periode getar alami sebesar 1,776 detik, sedangkan struktur dengan ikatan angin tipe X memiliki periode sebesar 1,434 detik. Dengan demikian, terjadi penurunan periode sebesar sekitar 19,26%. Penurunan periode tersebut menunjukkan adanya peningkatan kekakuan lateral struktur setelah penambahan sistem bracing. Secara konseptual, periode getar alami struktur dipengaruhi oleh karakteristik massa dan kekakuan struktur, sehingga peningkatan kekakuan akibat penambahan elemen bracing dapat menyebabkan periode getar menjadi lebih pendek. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil penelitian Jansen dan Pandeleke (2016) yang menunjukkan bahwa penggunaan ikatan angin pada bangunan baja bertingkat dapat memengaruhi karakteristik simpangan struktur. Selain itu, penelitian Pujianto et al. (2025) menunjukkan bahwa penerapan sistem Bracing-X memberikan pengaruh terhadap respons seismik struktur bangunan baja. Dengan demikian, penurunan periode dari 1,776 detik menjadi 1,434 detik dapat menjadi salah satu indikator meningkatnya kekakuan lateral struktur akibat penggunaan ikatan angin tipe X.

Penurunan periode dari 1,776 detik menjadi 1,434 detik menunjukkan bahwa karakteristik respons dinamik struktur mengalami perubahan setelah sistem ikatan angin diterapkan. Struktur dengan kekakuan lateral yang lebih besar pada umumnya memiliki kemampuan yang lebih baik dalam membatasi deformasi akibat beban lateral, sehingga perubahan periode tersebut perlu dianalisis bersama dengan perubahan displacement dan gaya internal struktur. Temuan ini memperkuat hasil analisis perpindahan yang menunjukkan adanya pengurangan displacement, khususnya pada arah Y. Hubungan antara penggunaan bracing dan perubahan perilaku deformasi juga didukung oleh penelitian Alfanhuri et al. (2025) serta Wiryadi et al. (2026), yang menunjukkan bahwa konfigurasi Bracing-X memengaruhi perilaku dan efektivitas struktur baja dalam menerima beban gempa. Hsiao et al. (2013) juga menjelaskan bahwa sistem rangka berpengaku konsentris memiliki mekanisme penyaluran gaya yang dipengaruhi oleh kekakuan dan perilaku elemen bracing. Oleh karena itu, penurunan periode dan pengurangan displacement pada model dengan ikatan angin tipe X secara bersama-sama menunjukkan adanya peningkatan kekakuan lateral global struktur, meskipun penilaian kinerja struktur secara menyeluruh tetap perlu mempertimbangkan parameter respons lainnya, seperti gaya geser dasar, gaya aksial bracing, dan potensi tekuk elemen bracing.

7. Story Displacement

Hasil analisis story displacement menunjukkan bahwa pengaruh ikatan angin berbeda pada kedua arah utama struktur. Pada arah X, displacement maksimum model tanpa ikatan angin sebesar 39,97 mm, sedangkan model dengan ikatan angin tipe X sebesar 39,65 mm. Perbedaannya hanya sekitar 0,32 mm atau kurang dari 1%. Nilai tersebut

menunjukkan bahwa penambahan bracing memberikan pengaruh yang relatif kecil terhadap perpindahan pada arah X. Kondisi ini dapat mengindikasikan bahwa sistem struktur pada arah X sejak awal telah memiliki kekakuan lateral yang relatif memadai, sehingga penambahan ikatan angin tipe X tidak menghasilkan perubahan displacement yang signifikan. Perbedaan respons displacement akibat variasi sistem bracing juga dilaporkan oleh Jansen dan Pandeleke (2016), yang menunjukkan bahwa penggunaan ikatan angin pada struktur baja bertingkat dapat memberikan respons simpangan yang berbeda bergantung pada konfigurasi sistem penahan gaya lateral.

Berbeda dengan arah X, pengaruh ikatan angin terlihat lebih signifikan pada arah Y. Struktur tanpa ikatan angin mengalami displacement maksimum sebesar 70,08 mm, sedangkan struktur dengan ikatan angin tipe X mengalami displacement sebesar 52,59 mm. Dengan demikian, terjadi pengurangan perpindahan sebesar 17,49 mm atau sekitar 24,96%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ikatan angin memberikan kontribusi yang lebih besar pada arah struktur yang memiliki kekakuan lateral awal lebih rendah. Secara struktural, elemen bracing berperan sebagai elemen penahan gaya lateral yang membantu menyalurkan beban horizontal melalui mekanisme gaya aksial tarik dan tekan pada elemen diagonal. Dengan adanya jalur penyaluran gaya tersebut, sebagian deformasi yang sebelumnya ditahan terutama oleh aksi lentur balok dan kolom dapat dikurangi. Temuan ini sejalan dengan penelitian Pujianto et al. (2025) yang menunjukkan bahwa sistem Bracing-X memberikan pengaruh terhadap respons seismik struktur baja. Hasil penelitian Alfanhuri et al. (2025) dan Wiryadi et al. (2026) juga menunjukkan bahwa penggunaan dan konfigurasi Bracing-X dapat memengaruhi perilaku struktur baja, termasuk kemampuan sistem dalam mengendalikan respons akibat beban lateral.

Perbedaan respons antara arah X dan Y juga menunjukkan pentingnya mempertimbangkan kekakuan struktur secara tiga dimensi. Sistem bracing tidak selalu menghasilkan pengurangan perpindahan yang sama pada seluruh arah karena efektivitasnya dipengaruhi oleh orientasi bracing, konfigurasi rangka, distribusi massa, serta karakteristik kekakuan masing-masing arah. Penelitian Andriansyah dan Khatulistiani (2020) mengenai sistem rangka bresing konsentrik khusus menunjukkan bahwa konfigurasi dan sistem bresing merupakan bagian penting dalam perencanaan struktur baja terhadap beban gempa. Hal serupa juga ditunjukkan oleh Rosul et al. (2023) melalui perbandingan perilaku struktur baja dengan sistem bresing eksentris tipe Inverted-V dan bresing konsentris tipe-X. Berdasarkan hasil tersebut, penempatan ikatan angin sebaiknya disesuaikan dengan arah yang memiliki kebutuhan peningkatan kekakuan lateral lebih besar. Dalam konteks penelitian ini, pengurangan displacement yang jauh lebih besar pada arah Y menunjukkan bahwa penggunaan ikatan angin tipe X lebih efektif dalam meningkatkan kekakuan lateral pada arah tersebut. Oleh karena itu, konfigurasi dan penempatan bracing perlu direncanakan secara optimal agar peningkatan kinerja struktur dapat dicapai dengan penggunaan material yang tetap efisien sesuai prinsip perencanaan ketahanan gempa dalam SNI 1726:2019.

8. Simpangan Antar Lantai (Story Drift)

Hasil pemeriksaan story drift menunjukkan bahwa kedua model struktur masih memenuhi persyaratan SNI 1726:2019. Model tanpa ikatan angin memiliki simpangan maksimum sebesar 72,32 mm, sedangkan model dengan ikatan angin tipe X sebesar 69,43 mm. Dengan demikian, terdapat pengurangan simpangan sebesar 2,89 mm atau sekitar 4,0%. Meskipun persentase penurunannya lebih kecil dibandingkan pengurangan story displacement pada arah Y, perubahan tersebut tetap menunjukkan adanya kontribusi sistem bracing terhadap peningkatan kekakuan lateral dan pengendalian deformasi relatif antar lantai. Pemenuhan batas simpangan antar tingkat merupakan salah satu aspek penting dalam evaluasi respons struktur terhadap beban gempa karena simpangan yang berlebihan dapat memengaruhi kinerja keseluruhan sistem struktur. Ketentuan mengenai batas simpangan antar tingkat dalam perencanaan ketahanan gempa diatur dalam SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Hasil ini juga sejalan dengan penelitian Jansen dan Pandeleke (2016) yang menunjukkan bahwa penggunaan ikatan angin pada struktur baja bertingkat dapat memengaruhi karakteristik simpangan bangunan.

Seluruh lantai pada kedua model menunjukkan status OK berdasarkan hasil pemeriksaan ETABS. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa simpangan aktual masih berada dalam batas yang diizinkan sesuai kriteria desain yang digunakan. Pemenuhan batas story drift penting karena simpangan antar lantai yang berlebihan dapat meningkatkan potensi kerusakan pada elemen nonstruktural, seperti dinding pengisi, plafon, kaca, sambungan utilitas, dan komponen arsitektural lainnya. Oleh karena itu, evaluasi story drift tidak hanya berkaitan dengan keamanan elemen struktur utama, tetapi juga dengan kemampuan bangunan mempertahankan tingkat kinerja yang dapat diterima selama terjadi gempa. Penelitian Pujianto et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan sistem Bracing-X dapat memengaruhi respons seismik struktur bangunan baja, sedangkan penelitian Alfanhuri et al. (2025) dan Wiryadi et al. (2026) menunjukkan bahwa konfigurasi bracing dapat memengaruhi perilaku struktur dalam menerima beban lateral. Dengan demikian, meskipun penurunan story drift akibat penggunaan ikatan angin tipe X dalam penelitian ini relatif moderat, keberadaan sistem tersebut tetap memberikan kontribusi positif terhadap pengendalian deformasi dan peningkatan

kekakuan lateral struktur. Hasil pemeriksaan yang menunjukkan seluruh lantai berstatus OK juga mengindikasikan bahwa kedua model masih memenuhi kriteria simpangan yang ditetapkan dalam SNI 1726:2019.

9. Evaluasi Kinerja Sistem Ikatan Angin Tipe X

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan adanya hubungan yang konsisten antara penambahan ikatan angin, peningkatan kekakuan lateral, penurunan periode getar, dan pengurangan perpindahan lateral. Penambahan bracing meningkatkan berat seismik efektif dari 6.108,28 kN menjadi 6.293,34 kN dan meningkatkan base shear dari 479,48 kN menjadi 564,58 kN. Namun, pada saat yang sama periode getar berkurang dari 1,776 detik menjadi 1,434 detik dan displacement maksimum arah Y berkurang dari 70,08 mm menjadi 52,59 mm. Pola tersebut menunjukkan bahwa penambahan massa akibat penggunaan bracing diikuti oleh peningkatan kekakuan lateral struktur yang ditunjukkan melalui penurunan periode getar dan pengurangan perpindahan. Kondisi ini sejalan dengan prinsip perencanaan ketahanan gempa dalam SNI 1726:2019 yang mempertimbangkan karakteristik massa, kekakuan, dan respons dinamik struktur dalam menentukan respons terhadap beban gempa (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Hasil penelitian Pujianto et al. (2025) juga menunjukkan bahwa penggunaan sistem Bracing-X memberikan pengaruh terhadap respons seismik struktur bangunan baja.

Temuan tersebut sesuai dengan prinsip kerja sistem braced frame, yaitu menyediakan elemen diagonal sebagai jalur penyaluran gaya lateral yang bekerja terutama melalui mekanisme gaya aksial tarik dan tekan. Dengan mekanisme tersebut, gaya lateral dapat disalurkan melalui elemen bracing sehingga deformasi yang ditanggung oleh sistem rangka utama dapat dikurangi dan kekakuan lateral struktur dapat ditingkatkan. Penggunaan sistem bresing konsentris pada struktur baja merupakan salah satu metode untuk meningkatkan kemampuan struktur dalam menahan beban lateral dan gempa. Hal tersebut didukung oleh penelitian Andriansyah dan Khatulistiani (2020) mengenai perencanaan struktur baja menggunakan sistem rangka bresing konsentrik khusus serta penelitian Sibagariang dan Tarigan (2022) mengenai analisis portal baja dengan sistem rangka bresing konsentrik khusus berdasarkan peta gempa 2017. Hsiao et al. (2013) juga menunjukkan bahwa perilaku rangka berpengaku konsentris dipengaruhi oleh mekanisme kerja elemen bracing dan respons elemen terhadap pembebanan siklik.

Namun, efektivitas ikatan angin tidak hanya ditentukan oleh keberadaan bracing, tetapi juga dipengaruhi oleh konfigurasi, posisi, orientasi, kapasitas penampang, koneksi, serta kontinuitas jalur penyaluran gaya menuju fondasi. Penelitian Rosul et al. (2023) menunjukkan bahwa perbedaan sistem dan konfigurasi bresing dapat menghasilkan perilaku struktur yang berbeda terhadap beban gempa. Demikian pula, Wiryadi et al. (2026) menunjukkan bahwa efektivitas sistem Bracing-X dan Inverted-V pada struktur baja dipengaruhi oleh konfigurasi sistem yang digunakan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat diinterpretasikan bahwa konfigurasi ikatan angin tipe X yang diterapkan pada objek penelitian mampu meningkatkan respons kinerja struktur, khususnya dalam mengurangi deformasi lateral pada arah Y. Temuan tersebut belum dapat digeneralisasikan secara langsung untuk seluruh bangunan industri karena respons struktur dapat berubah berdasarkan geometri bangunan, jumlah dan tinggi lantai, sistem struktur, karakteristik massa dan kekakuan, kondisi tanah, serta konfigurasi bracing yang digunakan. Dengan demikian, penerapan hasil penelitian pada bangunan lain tetap memerlukan evaluasi berdasarkan karakteristik struktur dan ketentuan perencanaan ketahanan gempa yang berlaku, sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

10. Hasil Steel Frame Design pada ETABS

Evaluasi menggunakan fitur Steel Frame Design pada ETABS menunjukkan bahwa elemen-elemen struktur yang dianalisis memenuhi persyaratan desain berdasarkan kombinasi pembebanan yang digunakan. Tidak ditemukan elemen dengan kondisi overstress atau rasio desain yang melampaui batas yang dipersyaratkan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa profil baja yang digunakan mampu memenuhi tuntutan kekuatan akibat kombinasi beban gravitasi dan lateral pada model yang dianalisis. Pemeriksaan terhadap elemen baja mencakup aspek kekuatan dan stabilitas elemen, sehingga hasil analisis perlu dibandingkan dengan ketentuan perencanaan struktur baja yang berlaku. Dalam konteks penelitian ini, evaluasi tersebut mengacu pada SNI 1729:2020 yang mengatur spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural, termasuk persyaratan kekuatan, stabilitas, dan kemampuan layan struktur (Badan Standardisasi Nasional, 2020). Penggunaan ketentuan tersebut penting untuk memastikan bahwa profil dan elemen struktur yang dimodelkan mampu menahan tuntutan gaya yang dihasilkan dari kombinasi pembebanan yang digunakan dalam analisis.

Hasil Steel Frame Design juga memperlihatkan bahwa penambahan ikatan angin tipe X tidak menyebabkan elemen utama struktur mengalami tuntutan desain yang melampaui kapasitasnya. Kondisi ini menjadi penting karena penambahan bracing menyebabkan perubahan karakteristik struktur, termasuk peningkatan berat seismik efektif dan base shear. Meskipun demikian, hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa peningkatan tuntutan akibat beban lateral tersebut masih dapat ditanggung oleh sistem struktur tanpa menghasilkan elemen yang mengalami overstress. Temuan

ini sejalan dengan penelitian Sibagariang dan Tarigan (2022) mengenai sistem rangka bresing konsentrik khusus pada struktur portal baja, yang menunjukkan pentingnya pemeriksaan kapasitas elemen dalam mengevaluasi kinerja struktur terhadap beban gempa. Selain itu, Hsiao et al. (2013) menjelaskan bahwa perilaku elemen pada rangka berpengaku konsentris perlu mempertimbangkan respons elemen bracing terhadap gaya aksial dan pembebanan siklik. Dengan terpenuhinya pemeriksaan Steel Frame Design pada kedua model, dapat dikatakan bahwa model dengan ikatan angin tipe X tidak hanya memberikan peningkatan kekakuan lateral, tetapi juga tetap memenuhi tuntutan kekuatan dan stabilitas elemen berdasarkan kapasitas desain yang digunakan. Namun, hasil tersebut tetap berlaku pada konfigurasi, material, dimensi penampang, dan kombinasi pembebanan yang digunakan dalam model penelitian ini.

11. Pembahasan Efektivitas Ikatan Angin Tipe X

Berdasarkan keseluruhan parameter yang dianalisis, penggunaan ikatan angin tipe X memberikan pengaruh paling nyata terhadap kekakuan lateral dan deformasi pada arah Y. Penurunan periode getar sebesar 19,26% menunjukkan adanya peningkatan kekakuan lateral struktur, sedangkan penurunan displacement arah Y sebesar 24,96% menunjukkan bahwa perubahan karakteristik kekakuan tersebut diikuti oleh pengurangan respons deformasi lateral. Penurunan story drift sebesar sekitar 4% juga menunjukkan adanya perbaikan kemampuan struktur dalam mengendalikan perpindahan relatif antar lantai. Dengan demikian, efektivitas penggunaan bracing tidak seharusnya dinilai hanya berdasarkan perubahan base shear, tetapi perlu dievaluasi secara bersama-sama dengan parameter massa, periode getar, displacement, dan story drift. Hal ini sejalan dengan prinsip evaluasi respons struktur terhadap gempa dalam SNI 1726:2019 yang mempertimbangkan karakteristik dinamik dan respons struktur terhadap beban gempa (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Penelitian Pujianto et al. (2025) juga menunjukkan bahwa penerapan sistem Bracing-X memberikan pengaruh terhadap respons seismik struktur baja, sehingga perubahan parameter deformasi menjadi salah satu aspek penting dalam mengevaluasi efektivitas sistem bracing.

Hasil penelitian juga memperlihatkan adanya trade-off antara peningkatan kekakuan dan peningkatan massa. Penambahan bracing meningkatkan berat seismik sebesar 185,06 kN atau sekitar 3,03%, sedangkan base shear meningkat sebesar 85,10 kN atau sekitar 17,75%. Di sisi lain, periode getar turun sekitar 19,26% dan displacement arah Y turun sekitar 24,96%. Pola tersebut menunjukkan bahwa penambahan massa akibat penggunaan bracing tidak secara langsung menghasilkan penurunan kinerja struktur karena elemen tambahan tersebut juga berkontribusi terhadap peningkatan kekakuan lateral. Peningkatan kekakuan tersebut tercermin dari penurunan periode getar dan displacement yang terjadi pada model dengan ikatan angin tipe X. Hasil ini sejalan dengan penelitian Jansen dan Pandeleke (2016) mengenai perbandingan simpangan bangunan baja dengan konfigurasi ikatan angin yang berbeda serta penelitian Alfanhuri et al. (2025) dan Wiryadi et al. (2026) yang menunjukkan bahwa konfigurasi bracing dapat memengaruhi perilaku dan respons struktur baja terhadap beban lateral. Dalam desain struktur tahan gempa, keseimbangan antara massa, kekakuan, kekuatan, dan kemampuan struktur dalam mengalami deformasi tanpa kehilangan kapasitas merupakan aspek penting untuk memperoleh sistem struktur yang aman dan efisien. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ikatan angin tipe X dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan kekakuan lateral struktur, khususnya pada arah Y, selama dimensi elemen, sambungan, konfigurasi bracing, dan kapasitas struktur tetap memenuhi ketentuan desain yang berlaku

12. Implikasi terhadap Perencanaan Struktur Bangunan Industri

Temuan penelitian memiliki implikasi terhadap perencanaan bangunan industri bertingkat yang membutuhkan pengendalian deformasi lateral. Penggunaan ikatan angin tipe X dapat menjadi salah satu alternatif untuk meningkatkan kekakuan lateral struktur tanpa harus melakukan perubahan besar terhadap konfigurasi elemen utama seperti balok dan kolom. Keuntungan tersebut terutama terlihat pada arah struktur yang memiliki kekakuan lateral lebih rendah, sebagaimana ditunjukkan oleh penurunan displacement yang lebih besar pada arah Y dibandingkan arah X. Mekanisme kerja tersebut berkaitan dengan kemampuan elemen diagonal bracing dalam menyalurkan gaya lateral melalui gaya aksial tarik dan tekan, sehingga jalur penyaluran gaya menjadi lebih efektif. Temuan ini sejalan dengan penelitian Jansen dan Pandeleke (2016) yang menunjukkan bahwa penggunaan ikatan angin dapat memengaruhi simpangan bangunan baja bertingkat. Penelitian Andriansyah dan Khatulistiani (2020) serta Sibagariang dan Tarigan (2022) juga menunjukkan bahwa sistem bresing konsentris dapat digunakan sebagai bagian dari sistem penahan gaya lateral pada struktur baja. Namun, penentuan konfigurasi bracing tetap perlu mempertimbangkan jalur penyaluran gaya, kapasitas elemen diagonal, kapasitas sambungan, stabilitas elemen terhadap gaya tekan, serta keterkaitan sistem bracing dengan elemen struktur lainnya.

13. Sintesis Hasil Penelitian

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem ikatan angin tipe X memberikan kontribusi positif terhadap kinerja struktur baja bertingkat pada bangunan industri yang ditinjau. Penambahan bracing meningkatkan berat seismik efektif dari 6.108,28 kN menjadi 6.293,34 kN dan menyebabkan base shear meningkat

dari 479,48 kN menjadi 564,58 kN. Namun, peningkatan tersebut diikuti oleh penurunan periode getar dari 1,776 detik menjadi 1,434 detik, penurunan displacement maksimum arah Y dari 70,08 mm menjadi 52,59 mm, serta penurunan story drift maksimum dari 72,32 mm menjadi 69,43 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan massa akibat penambahan bracing disertai dengan peningkatan kekakuan lateral yang tercermin dari penurunan periode getar dan pengurangan respons deformasi. Temuan ini sejalan dengan penelitian Pujianto et al. (2025) yang menunjukkan bahwa sistem Bracing-X memberikan pengaruh terhadap respons seismik struktur baja. Hasil penelitian Alfanhuri et al. (2025) dan Wiryadi et al. (2026) juga menunjukkan bahwa konfigurasi Bracing-X dapat memengaruhi perilaku dan efektivitas struktur baja dalam menerima beban lateral. Selain itu, hasil pemeriksaan desain elemen menunjukkan bahwa elemen struktur pada kedua model masih berada dalam kapasitas desain yang digunakan dalam penelitian.

Dengan demikian, ikatan angin tipe X dapat dipertimbangkan sebagai salah satu alternatif sistem penahan gaya lateral pada bangunan baja bertingkat, khususnya pada struktur yang membutuhkan peningkatan kekakuan dan pengendalian deformasi. Keberadaan bracing menyediakan jalur penyaluran gaya lateral melalui elemen diagonal yang bekerja terutama melalui mekanisme gaya aksial, sehingga dapat mengurangi deformasi sistem rangka utama. Penelitian Andriansyah dan Khatulistiani (2020) serta Sibagariang dan Tarigan (2022) menunjukkan bahwa sistem bresing konsentris dapat diterapkan pada struktur baja sebagai bagian dari sistem penahan gaya lateral, sedangkan Hsiao et al. (2013) menjelaskan bahwa perilaku rangka berpengaku konsentris dipengaruhi oleh mekanisme kerja dan respons elemen bracing terhadap pembebanan. Meskipun demikian, penerapan sistem bracing tetap harus didasarkan pada analisis yang mempertimbangkan konfigurasi bangunan, karakteristik material, pembebanan, sistem struktur, kondisi tanah, kapasitas elemen diagonal, kapasitas sambungan, serta kontinuitas jalur penyaluran gaya. Hasil penelitian ini memberikan bukti numerik bahwa pada bangunan industri yang ditinjau, sistem ikatan angin tipe X mampu meningkatkan kekakuan dan kontrol deformasi, terutama pada arah Y, tanpa menyebabkan elemen struktur melampaui kapasitas desain yang digunakan dalam analisis. Oleh karena itu, efektivitas sistem bracing sebaiknya dinilai secara menyeluruh berdasarkan hubungan antara massa, kekakuan, gaya lateral, deformasi, dan kapasitas elemen struktur.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis struktur baja bertingkat menggunakan perangkat lunak ETABS, dapat disimpulkan bahwa penggunaan sistem ikatan angin tipe X memberikan pengaruh positif terhadap kinerja struktur dalam menahan beban lateral, khususnya akibat gempa. Analisis pembebanan yang mengacu pada SNI 1727:2020 menunjukkan bahwa struktur mampu menahan kombinasi beban mati, beban hidup, beban mati tambahan, beban angin, dan beban gempa sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Total beban mati tambahan sebesar 112,5 ton menunjukkan bahwa karakteristik bangunan industri memiliki massa struktur yang cukup besar sehingga memerlukan sistem penahan gaya lateral yang efektif.

Hasil analisis gempa berdasarkan SNI 1726:2019 menunjukkan bahwa struktur berada pada Kategori Desain Seismik (KDS) D sehingga membutuhkan sistem struktur yang memiliki kekakuan dan stabilitas yang tinggi. Penerapan ikatan angin tipe X menyebabkan gaya geser dasar meningkat dari 479,48 kN menjadi 564,58 kN akibat bertambahnya massa struktur. Namun demikian, peningkatan tersebut diimbangi dengan bertambahnya kekakuan struktur sehingga distribusi gaya lateral menjadi lebih efektif dan respons struktur terhadap gempa menjadi lebih terkendali.

Perbandingan kedua model memperlihatkan bahwa struktur dengan ikatan angin tipe X memiliki periode getar alami yang lebih kecil, yaitu 1,456 detik dibandingkan struktur tanpa ikatan angin sebesar 1,776 detik. Penurunan periode getar tersebut menunjukkan peningkatan kekakuan struktur sehingga kemampuan bangunan dalam mengendalikan deformasi akibat beban gempa menjadi lebih baik.

Dari hasil analisis perpindahan struktur (story displacement), penggunaan ikatan angin tipe X mampu mengurangi deformasi lateral, terutama pada arah Y yang merupakan arah dengan kekakuan lebih rendah. Nilai displacement maksimum arah Y menurun dari 70,08 mm pada struktur tanpa ikatan angin menjadi 52,59 mm pada struktur dengan ikatan angin tipe X. Selain itu, simpangan antar lantai (story drift) juga mengalami penurunan dari 72,32 mm menjadi 69,43 mm dan seluruh nilai simpangan masih berada di bawah batas yang diizinkan oleh SNI 1726:2019, sehingga kedua model dinyatakan memenuhi persyaratan keamanan struktur.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan sistem ikatan angin tipe X mampu meningkatkan kekakuan struktur, memperbaiki distribusi gaya lateral, mengurangi deformasi serta simpangan antar lantai, dan menghasilkan kinerja struktur yang lebih baik dibandingkan struktur tanpa ikatan angin. Dengan demikian, sistem ikatan angin tipe X dapat direkomendasikan sebagai alternatif sistem penahan gaya lateral yang efektif untuk bangunan baja bertingkat di wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi karena mampu meningkatkan keamanan, stabilitas, dan keandalan struktur sesuai dengan ketentuan Standar Nasional Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

1. Alfanhuri, N. P. L., Nursani, R., & Herlina, N. (2025). Bertingkat Dengan Bracing Tipe X Dan. *Jitsi/Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, *5*(2), 68–80.
2. Andriansyah, M. D., & Khatulistiani, U. (2020). Perencanaan Kantor Dinas Kebudayaan Dan Pariwisata Menggunakan Struktur Baja Sistem Rangka Bresing Konsentrik Khusus Tipe Two Story X Di Kota Yogyakarta. *Axial : Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Konstruksi*, *8*(2), 91. Https://Doi.Org/10.30742/Axial.V8i2.1030
3. Black, R. G., Wenger, W. A., & Popov, E. P. (1980). Inelastic buckling of steel struts under cyclic load reversals. *Journal of the Structural Division, ASCE, 106*(ST6), 1149–1165. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0005412
4. Hsiao, P. C., Lehman, D. E., & Roeder, C. W. (2013). Improved analytical model for special concentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research, 89*, 80–94. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.07.008
5. Tremblay, R. (2002). Inelastic seismic response of steel bracing members. *Journal of Constructional Steel Research, 58*(5–8), 665–701. https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00050-6
6. Uriz, P., Filippou, F. C., & Mahin, S. A. (2008). Model for cyclic inelastic buckling of steel braces. *Journal of Constructional Steel Research, 64*(11), 1208–1222. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.04.003
7. Fell, B. V., Kanvinde, A. M., Deierlein, G. G., & Myers, A. T. (2009). Experimental investigation of inelastic cyclic buckling and fracture of steel braces. *Journal of Structural Engineering, 135*(1), 19–32. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:1(19)
8. Aryandi, & Herbudiman. (2017). *Pengaruh Bentuk Bracing Terhadap Kinerja Seismik Struktur Beton Bertulang*.
9. Dzaky, J. Maulidin. (2018). *Analisis Pengaruh Bresing Tipe X 1-Story Dan Tipe X 2-Story Terhadap Stabilitas Struktur Bangunan Baja Bertingkat Banyak*.
10. Hidayat, W. (2019). Klasifikasi Dan Sifat Material Teknik Serta Pengujian Material. *Jurnal Material Teknik*, *4*, 1–19.
11. Jansen, L. P. S., & Pandeleke, R. (2016). *Komparasi Simpangan Bangunan Baja Bertingkat Banyak Yang Menggunakan Ikatan Angin X Dan Ikatan Angin K*.
12. Kubon Tubuh, Ikd, Gegiranang Wiryadi, Ig, & Jaya Putra, G. (2025). Perbandingan Perilaku Struktur Rangka Baja Bracing Tipe X Dengan Inverted-V. *Jurnal Ilmiah Teknik Unmas*, *5*(2), 96–101.
13. Kurniawan. (2019). Bab Ii Tinjauan Pustaka Bab Ii Tinjauan Pustaka 2.1. 1–64. *Gastronomía Ecuatoriana Y Turismo Local.*, *1*(69), 5–24.
14. Mawu, S. (2018). *Analisis Struktur Baja Serta Metode Pelaksanaan Pekerjaan Pada Proyek Modisland Fashion Store*. Unknown University.
15. Nugroho, F. (2018). Pengaruh Penggunaan Bresing Cross Dan Inverted V Terhadap Penulangan Kolom Gedung Beton Bertulang. *Jurnal Momentum*, *Vol. 29 No*(2), 94–101. Https://Doi.Org/10.21063/Jm.2018.V20.2.94-101
16. Pramudya, A. C. (2019). *Analisis Respon Struktur Bangunan Setback Dengan Dua Penempatan Bresing Konsentrik Tipe V Dan Inverted V (X-2 Lantai)*.
17. Pujianto, C., Ramadhani, F. I., Aditya, Z., Simanjuntak, M. R. A., & Naibaho, P. R. T. (2025). Analisis Pengaruh Sistem Bracing-X Terhadap Respons Seismik Struktur Bangunan Industri Konstruksi Baja. *Journal Of Comprehensive Science*, *4*(8), 2460–2467. Https://Doi.Org/10.59188/Jcs.V4i8.3493
18. Rosul, M., Malik, Z., Sutriono, 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*, *5*(2), 714–730.
19. Sibagariang, I. S., & Tarigan, S. D. (2022). Analisis Struktur Portal Baja Dengan Sistem Rangka Bresing Konsentrik Khusus (Srbkk) Dengan Menggunakan Peta Gempa 2017. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (Jrkms)*, *5*(2), 69–81. Https://Doi.Org/10.54367/Jrkms.V5i2.2109
20. Sni 1726:2019. (2019). Penetapan Standar Nasional Indonesia 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Nongedung. *Badan Standarisasi Nasional*, 250.
21. Sni 1727:2020. (2020). Sni 1727:2020 Beban Desain Minimum Dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung Dan Struktur Lain. *Jakarta*, *8*, 1–336.
22. Sugiyono. (2010). *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif Dan R&D*.
23. Sunarjo, M. T. Dan S. P. (2010). *Gempa Bumi Edisi Populer. Jakarta: Badan Meteorologi Dan Geofisika*. 13–53.
24. Vismanath. (2010). *Comparative Study Of Bracing Systems*.
25. Wiryadi, Igg, Tubuh, Ikdk, Wirawan, Ipap, & Putra, G. (2026). Analisis Efektivitas Sistem Bracing-X Dan Inverted-V Pada Struktur Baja Empat Lantai Di Wilayah Gempa Tinggi. *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik*, *15*(1), 1–12.