

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur Beton Bertulang dan Sistem Perkuatan Struktur dengan *Bracing*

Struktur beton bertulang merupakan salah satu sistem struktur yang paling umum digunakan dalam konstruksi bangunan gedung. Kelebihannya terletak pada kekuatan tekan beton dan kekuatan tarik baja tulangan yang saling melengkapi. Namun, dalam kondisi gempa, struktur ini dapat mengalami kerusakan serius jika tidak dirancang dengan sistem perkuatan yang memadai (Moehle, 2015). Salah satu metode yang efektif untuk meningkatkan kinerja seismik struktur beton bertulang adalah melalui penerapan sistem *bracing*. Dalam dunia rekayasa struktur, khususnya pada bangunan bertingkat, sistem perkuatan seperti *bracing* memiliki peran krusial dalam menjaga stabilitas struktur terhadap gaya lateral akibat beban gempa dan angin (Marc Badoux dan Jirsa, 1990).

Penerapan sistem *bracing* bertujuan untuk meningkatkan kekakuan lateral struktur, mengontrol simpangan antar lantai (*interstory drift*), serta memperbesar kapasitas energi yang dapat diserap bangunan saat terjadi beban dinamis, khususnya gempa bumi. Tanpa sistem *bracing*, bangunan konvensional seperti rangka beton bertulang cenderung memiliki daktilitas yang cukup tetapi kekakuan lateral yang rendah, sehingga rentan terhadap keruntuhan mekanisme lunak (*soft story collapse*) (Federal Emergency Management Agency, 2003).

Penting untuk dicatat bahwa selain jenis dan detail elemen *bracing*, Penempatan *bracing* dalam denah dan eleasi struktur sangat krusial untuk memastikan distribusi kekakuan lateral yang merata, mencegah konsentrasi simpangan, serta menghindari mekanisme lunak (*soft story collapse*). Penempatan yang optimal memungkinkan kontrol *interstory drift* dan memastikan jalur gaya yang logis sehingga struktur dapat menahan siklus gempa. Sebaliknya, penempatan yang tidak tepat bisa menyebabkan distribusi gaya internal yang tidak merata, peningkatan momen lokal, dan mengurangi efetiitas disipasi energi pada frame beton bertulang (Marc Badoux dan Jirsa, 1990).

Seiring berkembangnya teknologi dan kebutuhan akan struktur yang lebih efisien dan tahan gempa, berbagai jenis sistem *bracing* telah dikembangkan. *Buckling Restrained Brace* (BRB) merupakan salah satu jenis *bracing* yang digunakan dalam dunia konstruksi. BRB, merupakan inovasi terbaru dalam sistem *bracing*. Dalam sistem ini, elemen *bracing* dirancang agar mampu menahan gaya tekan tanpa mengalami tekuk (*buckling*), sehingga performanya jauh lebih stabil dan dapat bekerja dalam rentang elastis maupun inelastis secara efektif (Sabelli et al. 2003).

Dalam konteks penelitian ini, fokus diberikan pada Perbandingan Peletakan *Buckling-Restrained Brace* pada Struktur Beton Bertulang 8 lantai terhadap Perilaku Dinamik Gempa, dimana diberikan beberapa variasi peletakan *brace* terhadap struktur beton bertulang dengan tujuan utama untuk

mengetahui variasi peletakan yang mana yang memiliki kinerja terbaik. Dengan memahami perbedaan peletakan *bracing* diharapkan penelitian dapat memberikan gambaran yang jelas terkait pentingnya peletakan *brace* terhadap efektivitas dan pengoptimalan kinerja struktur beton bertulang ketika terkena beban seismik.

2.2 Buckling Restrained Brace

BRB merupakan sistem perkuatan modern yang dirancang untuk mengatasi kelemahan dari *bracing* konvensional. Elemen utama BRB adalah *Buckling-Restrained Brace* (BRB), yaitu komponen struktural yang mampu menahan beban aksial dalam dua arah (tarik dan tekan) tanpa mengalami tekuk (*buckling*). Hal ini dicapai melalui sistem pengekangan terhadap inti baja yang mengalami deformasi plastis (Sabelli et al. 2003). BRB terbukti memiliki daktilitas tinggi dan mampu menyerap energi gempa secara efektif. *Buckling Restrained Brace* (BRB) merupakan sistem *bracing* modern yang dikembangkan untuk mengatasi kelemahan utama dari sistem *bracing* konvensional, yaitu kegagalan akibat tekuk pada elemen tekan.

Konsep utama dari BRB adalah menggunakan elemen inti (biasanya baja) yang dikelilingi oleh selubung pengekan yang kaku, baik berupa beton, pipa baja, atau kombinasi keduanya. Selubung ini mencegah elemen inti mengalami deformasi lateral atau tekuk, sehingga elemen baja di dalamnya dapat bekerja optimal baik saat menerima gaya tarik maupun tekan. Dengan begitu, BRB mampu bekerja secara simetris dan memberikan kapasitas disipasi energi yang

tinggi, serta meningkatkan daktilitas sistem struktur secara keseluruhan (Bahrami, 2021).

Beberapa studi menyebutkan bahwa BRB sangat efektif diterapkan pada bangunan bertingkat sedang hingga tinggi, terutama di wilayah rawan gempa. Bahrami. (2021), dalam studinya menyatakan bahwa penggunaan BRB pada rangka struktur dapat mengurangi simpangan hingga 40% dibandingkan struktur tanpa *bracing*, serta mampu menahan lebih banyak siklus gempa sebelum terjadi keruntuhan.

Selain itu, BRB juga fleksibel untuk digunakan dalam berbagai variasi, seperti diagonal, cheron, maupun variasi eksentrik yang dimodifikasi. Fleksibilitas ini membuat BRB menjadi pilihan menarik bagi perencana struktur yang ingin mencapai keseimbangan antara efisiensi desain dan kinerja seismik yang tinggi.

Secara umum, BRB merupakan solusi unggul dalam perkuatan struktur terhadap beban gempa, dan sangat relevan untuk dibandingkan performanya dengan sistem *bracing* lainnya seperti *Concentric Brace Frame* (CBF) dalam penelitian ini.

2.3 Variasi Peletakan BRB pada Struktur Beton Bertulang

Keberhasilan BRB tidak hanya ditentukan oleh detail elemen *brace*, tetapi juga oleh variasi peletakan di dalam denah dan eleasi struktur. Beberapa skema peletakan yang sering dikaji meliputi:

1. Peletakan Tengah Portal (*Mid Bay*)

Variasi ini efektif dalam mengurangi simpangan global karena konsentrasi kekakuan berada di pusat massa struktur. Namun, penempatan yang terlalu terpusat berpotensi meningkatkan konsentrasi momen dan gaya dalam di zona inti. Studi Ahmed et al. (2016), menunjukkan bahwa lokasi BRB pada gedung tinggi, khususnya di sekitar dinding inti beton bertulang, berpengaruh besar terhadap respons seismik, di mana penempatan di inti dapat menurunkan simpangan antar lantai tetapi sekaligus meningkatkan gaya internal pada elemen tertentu.

2. Peletakan Perimeter

Pada skema ini, *bracing* dipasang di portal paling tepi bangunan untuk membentuk perimeter yang kaku. Variasi perimeter meningkatkan distribusi kekakuan lateral secara merata di sepanjang sisi bangunan dan cenderung menambah kapasitas tahan gempa global. Namun, beberapa penelitian menekankan risiko mekanisme *weak story* atau *soft story* apabila lantai dasar tidak diperkuat memadai. Menurut Razzaghi dan Hatami. (2019), melalui analisis nonlinear *time history* menemukan bahwa

sistem dengan BRB di perimeter lebih efektif dalam mengurangi *drift* dibanding *bracing* konvensional, tetapi memiliki potensi konsentrasi deformasi pada lantai dasar apabila distribusi kekakuan vertikal tidak dijaga merata.

3. Peletakan *Hybrid* (*Mid Bay* + Perimeter)

Peletakan *bracing Hybrid* merupakan strategi peletakan BRB yang mengombinasikan *brace* pada portal bagian tengah (*mid-core*) dan pada portal tepi (*perimeter*). Tujuannya adalah menciptakan distribusi kekakuan ganda, di mana *bracing* pada inti berfungsi mengendalikan simpangan global, sementara *bracing* di perimeter menambah redundansi lateral serta membantu meratakan distribusi gaya sepanjang denah.

Penelitian sebelumnya menegaskan keunggulan masing-masing strategi peletakan. Menurut Ahmed. (2016), menunjukkan bahwa peletakan BRB di sekitar inti dapat secara signifikan menurunkan simpangan antar lantai, meskipun berisiko meningkatkan gaya dalam di zona inti. Sebaliknya, menurut Razzaghi dan Hatami. (2019), melaporkan bahwa sistem dengan BRB di perimeter lebih efektif dalam menurunkan *drift* dibanding *bracing* konvensional, namun berpotensi menimbulkan konsentrasi deformasi pada lantai bawah apabila distribusi vertikal kekakuan tidak merata.

Berdasarkan temuan tersebut, pendekatan *Hybrid* dipandang sebagai alternatif yang dapat menggabungkan keunggulan kedua strategi, yaitu

mengurangi *drift* global sekaligus menekan risiko terjadinya *soft story* pada lantai bawah. Oleh karena itu, variasi *Hybrid* dalam penelitian ini dirancang dengan jumlah dan kekakuan *bracing* yang setara antar variasi, sehingga perbandingan performa struktur sepenuhnya difokuskan pada pengaruh variasi peletakan BRB.

2.4 Analisis Kinerja Struktur

Analisis *time history* merupakan salah satu metode utama dalam evaluasi kinerja struktur bangunan terhadap beban gempa. Metode ini dilakukan dengan memberikan riwayat percepatan gempa (*ground motion record*) secara langsung ke model struktur, kemudian menghitung respons dinamik struktur dalam domain waktu (Chopra, 2012).

Menurut Chopra. (2012), THA memungkinkan identifikasi parameter kunci seperti simpangan antar lantai (*interstory drift ratio*), gaya dalam, deformasi plastis, serta kurva histeresis yang terbentuk selama siklus pembebanan gempa. Parameter-parameter ini penting dalam menilai kapasitas disipasi energi struktur, khususnya pada sistem *Buckling-Restrained Brace* (BRB) yang dirancang untuk berdeformasi plastis secara stabil tanpa kehilangan kekuatan tekan.

Kelebihan lain dari analisis *time history* adalah kemampuannya mengevaluasi efek *damage concentration* dan *Residual drift*, yang tidak dapat terlihat jelas pada analisis pushover. Hal ini menjadikan THA sebagai

pendekatan yang lebih komprehensif dalam performance-based seismic design, karena mampu mengevaluasi struktur terhadap input gempa riil dengan variasi intensitas dan durasi yang berbeda (Mahoney dan Hanson, 2018).

Dengan demikian, penerapan analisis *time history* pada penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja sistem BRB dengan *bracing* konvensional melalui parameter utama seperti *interstory drift*, disipasi energi, serta *Residual drift* pasca gempa.

2.5 Studi Terdahulu

Penelitian mengenai kinerja struktur beton bertulang dengan penambahan sistem *bracing* telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Kajian-kajian tersebut umumnya difokuskan pada pengaruh variasi variasi, jenis, maupun posisi *bracing* terhadap respons seismik struktur, seperti simpangan antar lantai (*interstory drift*), perpindahan, daktilitas, hingga kapasitas geser struktur. Uraian berikut menyajikan beberapa penelitian terdahulu yang relevan dan menjadi dasar pijakan bagi penelitian ini.:

Faizi et al. (2016) meneliti penempatan optimal *Buckling Restrained Brace* (BRB) pada struktur beton lima lantai dengan metode analisis riwayat waktu menggunakan input gempa El Centro 1940. Penelitian ini mengusulkan prosedur optimasi untuk menentukan jumlah dan lokasi BRB yang paling efektif dalam meminimalkan *story drift*. Hasil penelitian membuktikan bahwa

metode optimasi yang dikembangkan lebih efektif dalam menurunkan simpangan dibandingkan dengan penempatan BRB secara acak.

Bohara et al. (2022), mengkaji pengaruh posisi *bracing* pada gedung berbentuk L (L-shape) enam lantai menggunakan ETABS. Penelitian ini membandingkan 12 model dengan berbagai posisi inverted-V *bracing*. Parameter yang dianalisis meliputi base shear, *interstory drift*, *displacement*, fundamental period, serta *torsional irregularity*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi tertentu dapat menurunkan *displacement* hingga 54%. Namun, penempatan *bracing* yang kurang tepat justru dapat memperbesar simpangan akibat pengaruh torsi pada struktur tidak beraturan.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Bose dan Ghosh. (2025) yang menganalisis kinerja seismik gedung tidak beraturan berbentuk L dengan enam lantai menggunakan berbagai variasi *bracing*, antara lain X, V, dan eksentrik. Analisis dilakukan melalui metode statis linier, respons spektrum, dan *time history*. Parameter yang ditinjau meliputi base shear, *story drift*, *displacement*, periode getar alami, dan modal mass participation. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *bracing* secara signifikan meningkatkan kapasitas geser dan mengurangi *story drift*, di mana *X-bracing* terbukti paling efektif untuk bangunan berbentuk L dibandingkan kondisi tanpa *bracing*.

Secara umum, penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penempatan *bracing* pada struktur beton bertulang mampu meningkatkan performa seismik, khususnya dalam mengurangi *drift* dan *displacement*.

Namun demikian, posisi dan variasi *bracing* sangat berpengaruh terhadap efektivitasnya. Penempatan yang tidak tepat bahkan dapat menimbulkan efek torsi dan distribusi *drift* yang tidak merata. Dari penelitian terdahulu tersebut, terlihat bahwa kajian mengenai variasi peletakan *Buckling Restrained Brace* (BRB) pada struktur beton bertulang bertingkat masih terbatas, terutama untuk bangunan simetris dengan jumlah lantai menengah hingga tinggi. Hal ini membuka peluang untuk dilakukan penelitian lebih lanjut guna mengisi celah penelitian (*research gap*) tersebut.

