

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konstruksi Baja

Konstruksi baja merupakan metode konstruksi struktur bangunan yang sangat relevan untuk daerah rawan gempa, karena material baja memiliki kekuatan tinggi, rasio kekuatan terhadap berat yang baik, serta kemampuan daktilitas yang unggul dibanding banyak material lainnya (Pangestuti & Suswanto, 2021). Struktur baja memiliki kemampuan deformasi besar sebelum keruntuhan karena tingginya daktilitas material dan mekanisme disipasi energi yang efektif sehingga mampu menyerap dan mengurangi dampak energi gempa (Reyes-Salazar et al., 2018).

Penelitian mengenai struktur baja tahan gempa telah berkembang pesat dalam dekade terakhir, terutama setelah gempa besar membuka kesadaran akan kebutuhan desain yang tahan terhadap beban lateral yang besar. Studi ulasan tentang *seismic resilient steel structures* oleh (Fang et al., 2022) menunjukkan bahwa meskipun baja memiliki karakteristik mekanis yang baik, desain sambungan, mekanisme disipasi energi, dan sistem penahan gaya lateral harus diperhatikan secara khusus agar struktur baja dapat bertahan dari beban gempa tanpa kerusakan yang signifikan.

Dari sisi pelaksanaan, konstruksi baja memiliki kelebihan berupa proses fabrikasi yang dapat dilakukan di pabrik dengan tingkat presisi tinggi, sehingga mutu elemen struktur lebih terjamin. Proses pemasangan di lapangan relatif lebih cepat dibandingkan konstruksi beton, yang berdampak pada efisiensi waktu dan biaya proyek. Selain itu, sambungan baut pada struktur baja berperan penting dalam *load path* dan redistribusi gaya lateral selama gempa, serta telah menjadi fokus desain seismik untuk memastikan kapasitas rotasi dan perilaku histeresis yang memadai dalam struktur baja tahan gempa (Ribeiro et al., 2022).

Penggunaan struktur baja, apabila dilihat pada bangunan dan perbandingan (*ratio*) antara kekuatan berat (atau kekuatan per satuan berat) harus dipertahankan tinggi, maka bajalah yang dapat memenuhinya. Baja konstruksi juga memiliki keuntungan dan kelemahan diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Keuntungan baja adalah keseragaman bahan dan sifat – sifatnya yang dapat diduga secara cukup tepat. Kestabilan dimensi, kemudahan pembuatan, dan cepatnya pelaksanaan juga merupakan hal – hal yang menguntungkan dari baja struktur ini.
2. Kelemahan baja adalah mudahnya bahan ini mengalami korosi (tidak semua jenis baja) dan berkurangnya kekuatan pada temperatu tinggi.

Dalam perencanaan yang mengacu pada SNI 03-1729-2020 tentang Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung, sifat-sifat mekanis baja adalah sebagai berikut:

1. Modulus elastisitas : $E = 200.000 \text{ MPa}$
2. Modulus Geser : $G = 80.000 \text{ MPa}$
3. Angka Poisson : $\mu = 0,3$
4. Koefisien Pemuaian : $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C}$

Sifat mekanis baja struktural juga diklasifikasikan menurut jenis baja berdasarkan SNI 1729 : 2020 yaitu pada Tabel 2.1 berikut:

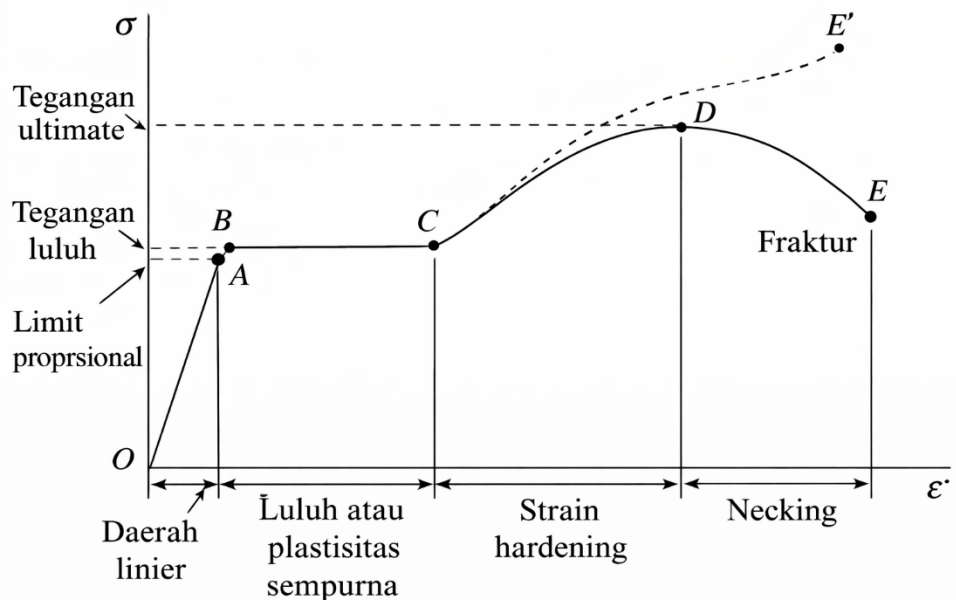
Tabel 2.1 Sifat Mekanis Baja

Jenis Baja	Tegangan putus minimum, f_u (MPa)	Tegangan leleh minimum, f_y (MPa)	Peregangan minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

(Sumber: SNI 1729 : 2020)

Setiap jenis baja memiliki tingkat daktilitas yang berbeda-beda, bergantung pada mutu materialnya. Peningkatan mutu baja umumnya diikuti oleh perubahan karakteristik daktilitas. Pada baja dengan mutu tinggi, nilai

daktilitas cenderung mendekati satu, yang menunjukkan bahwa material tersebut hampir tidak menunjukkan daerah luluh atau plastisitas sempurna pada kurva hubungan antara tegangan dan regangan. Sebaliknya, baja dengan mutu yang lebih rendah umumnya memiliki daerah plastis yang lebih jelas, namun material ini cenderung lebih peka terhadap pengaruh tegangan sisa yang timbul selama proses pembuatannya. Gambar grafik tegangan dan regangan baja dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Grafik Tegangan dan Regangan Baja
(Sumber: SNI 1729 : 2020)

Gambar tersebut menunjukkan kurva hubungan antara tegangan dan regangan pada material baja, yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada tahap awal pembebanan, material baja mengalami regangan hingga mencapai kondisi regangan permanen pada titik OB . Bagian ini dikenal sebagai daerah plastis, di mana deformasi yang terjadi tidak dapat kembali ke kondisi semula.
2. Setelah mencapai titik luluh, baja dapat mengalami pertambahan deformasi yang cukup besar meskipun tidak disertai peningkatan gaya tarik yang

signifikan. Pada kondisi ini, baja seolah kehilangan kemampuan untuk menahan tambahan beban, yang menandai terjadinya fenomena luluh.

3. Apabila pembebanan dilanjutkan kembali, material baja akan memasuki fase *strain hardening*. Pada tahap ini, kemampuan baja dalam menahan tegangan akan meningkat kembali, namun sifat mekanisnya tidak lagi sama seperti sebelumnya. Baja mengalami peningkatan nilai tegangan leleh, tegangan tarik maksimum, dan tegangan putus, serta perubahan pada daerah plastis dengan tegangan yang relatif konstan. Meskipun demikian, tingkat daktilitas material pada fase *strain hardening* cenderung mengalami penurunan.
4. Pembebanan yang terus diberikan hingga mencapai tegangan maksimum atau tegangan ultimit akan menyebabkan terjadinya fraktur. Kondisi ini menandakan bahwa material baja telah mengalami kegagalan dan tidak lagi mampu menahan beban.

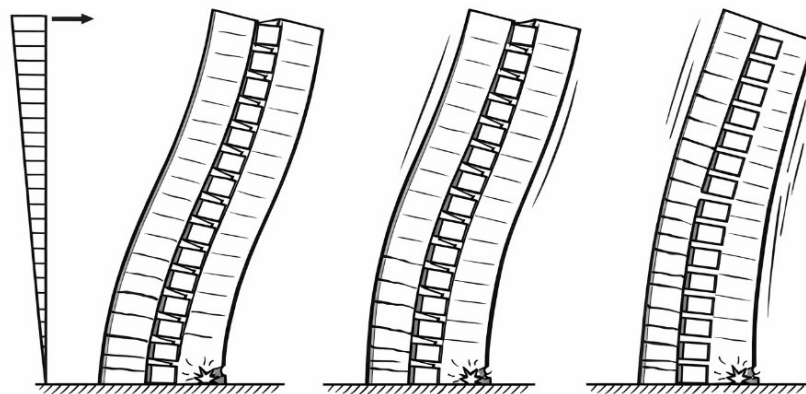
2.2 Struktur Baja Tahan Gempa

Struktur baja merupakan salah satu sistem struktur yang banyak digunakan pada bangunan bertingkat, khususnya di wilayah rawan gempa, karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, daktilitas yang baik, serta kemudahan dalam fabrikasi dan pelaksanaan konstruksi. Baja sebagai material struktur memiliki sifat mampu mengalami deformasi plastis yang besar sebelum mengalami kegagalan, sehingga sangat sesuai untuk konsep perencanaan struktur tahan gempa yang mengutamakan keselamatan jiwa (*life safety*).

Dalam perencanaan struktur baja tahan gempa, filosofi desain yang umum digunakan adalah *capacity design*, yaitu memastikan bahwa elemen-elemen struktur tertentu dirancang untuk mengalami leleh terlebih dahulu secara terkontrol, sementara elemen struktur lainnya tetap berada dalam kondisi elastis. Pendekatan ini bertujuan untuk mencegah terjadinya keruntuhan getas dan memastikan struktur memiliki kemampuan disipasi energi yang memadai saat menerima beban gempa. Menurut (AISC, 2016), sistem struktur baja tahan gempa harus dirancang agar mampu menahan deformasi inelastik berulang tanpa kehilangan kekuatan yang signifikan.

Beberapa penelitian dalam satu dekade terakhir menunjukkan bahwa struktur baja memiliki kinerja seismik yang baik apabila dirancang dengan sistem penahan gaya lateral yang tepat. (Fang et al., 2022) menyatakan bahwa penggunaan sistem rangka baja dengan mekanisme disipasi energi yang jelas dapat meningkatkan kinerja struktur terhadap beban gempa, terutama dalam mengontrol simpangan dan mencegah keruntuhan progresif. Selain itu, sistem struktur baja dengan daktilitas tinggi mampu menyerap energi gempa secara lebih efektif dibandingkan sistem yang bersifat getas.

Perencanaan struktur bangunan tahan gempa harus mempertimbangkan pengaruh gaya lateral yang bekerja secara berulang atau siklis selama peristiwa gempa bumi. Untuk mampu menahan gaya lateral tersebut, struktur perlu dirancang agar memiliki tingkat daktilitas yang cukup, terutama pada daerah sambungan (*joint*) maupun pada elemen penahan gaya gempa seperti bresing dan dinding geser, sehingga struktur dapat mengalami deformasi tanpa mengalami kegagalan secara tiba-tiba (Sofwan et al., 2019). Simulasi gedung akibat gaya lateral dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Simulasi Akibat Beban Angin dan Beban Gempa
(Sumber: Sofwan et al., 2019)

Pemilihan sistem struktur penahan gaya lateral menjadi faktor penting dalam perencanaan struktur baja tahan gempa. Beberapa sistem yang umum digunakan antara lain *Moment Resisting Frame* (MRF), *Concentrically Braced Frame* (CBF), dan *Eccentrically Braced Frame* (EBF). Di antara sistem tersebut, EBF banyak direkomendasikan karena mampu mengombinasikan kekakuan tinggi dari sistem bresing dan daktilitas yang baik dari mekanisme leleh pada elemen link. Penelitian oleh (Acosta et al., 2024) menunjukkan bahwa sistem *Eccentrically Braced Frame* (EBF) mampu menunjukkan respons seismik yang stabil pada pembebanan gempa kuat, dengan mekanisme disipasi energi yang efektif pada elemen *link* sehingga simpangan antar lantai tetap berada dalam batas kinerja yang dipersyaratkan oleh standar desain gempa.

2.2.1 Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM)

Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM) atau *Moment Resisting Frame* (MRF) merupakan sistem struktur baja yang menahan beban gempa terutama melalui kapasitas lentur balok dan kolom serta sambungan balok–kolom yang bersifat kaku (Alexandro et al., 2025). Pada sistem ini, tidak digunakan elemen bresing tambahan, sehingga gaya lateral disalurkan melalui mekanisme lentur elemen rangka. Keunggulan utama SRPM adalah daktilitas yang tinggi dan kemampuan struktur untuk mengalami deformasi besar sebelum mengalami kegagalan.

Namun demikian, SRPM umumnya memiliki kekakuan lateral yang relatif lebih rendah dibandingkan sistem rangka berpengaku, sehingga cenderung menghasilkan simpangan lateral yang lebih besar. Penelitian lain menunjukkan bahwa dalam desain *moment-resisting steel frames*, kinerja seismik sangat dipengaruhi oleh batas simpangan antar lantai, di mana struktur yang dirancang hanya berdasarkan kekuatan sering kali memiliki simpangan yang lebih tinggi dari batas yang diizinkan sehingga memerlukan peningkatan dimensi anggota atau detailing untuk mengendalikan deformasi lateral selama gempa (Abou-Elfath et al., 2017).

Berdasarkan tingkat daktilitas dan kapasitas disipasi energi yang direncanakan, SRPM diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM), dan Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB).

1. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dirancang untuk memiliki tingkat daktilitas dan kapasitas disipasi energi yang paling tinggi di antara sistem SRPM lainnya. Sistem ini umumnya digunakan pada bangunan yang berada di wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi. Perencanaan SRPMK mensyaratkan detail sambungan balok–kolom yang ketat dengan penerapan prinsip *strong column–weak beam*, sehingga sendi plastis diharapkan terbentuk pada balok terlebih dahulu sebelum kolom mengalami leleh.

SRPMK memiliki kemampuan disipasi energi yang tinggi, meskipun cenderung menghasilkan simpangan antar lantai yang relatif besar dibandingkan sistem rangka berpengaku (Alexandro et al., 2025).

2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)

Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM) merupakan sistem rangka pemikul momen dengan tingkat daktilitas menengah dan persyaratan detailing yang lebih sederhana dibandingkan SRPMK. Sistem ini umumnya diterapkan pada bangunan yang berada di wilayah dengan tingkat kegempaan menengah. SRPMM dirancang untuk memberikan keseimbangan antara kekakuan dan daktilitas, meskipun kapasitas disipasi energinya lebih rendah dibandingkan SRPMK.

3. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)

Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB) merupakan sistem SRPM dengan tingkat daktilitas paling rendah dan persyaratan detailing yang paling sederhana. Sistem ini umumnya hanya direkomendasikan untuk bangunan yang berada di wilayah dengan tingkat kegempaan rendah. Karena keterbatasan daktilitas

dan kemampuan disipasi energinya, SRPMB tidak sesuai untuk bangunan di daerah dengan risiko gempa menengah hingga tinggi.

2.2.2 *Concentrically Braced Frame (CBF)*

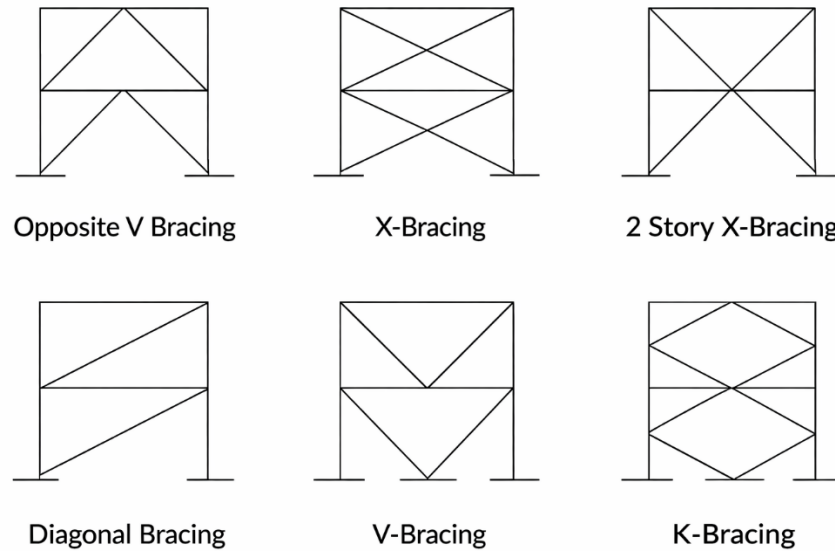
Concentrically Braced Frame (CBF) merupakan sistem rangka baja yang menggunakan elemen *bracing* yang terhubung secara konsentris pada simpul balok dan kolom. Sistem ini memiliki kekakuan lateral yang tinggi, sehingga sangat efektif dalam membatasi simpangan lateral struktur akibat beban gempa (Putra, 2025). Karena kekakuannya yang besar, CBF sering digunakan pada bangunan bertingkat rendah hingga menengah di daerah rawan gempa.

Meskipun memiliki keunggulan dari segi kekakuan, sistem CBF cenderung memiliki daktilitas yang lebih rendah dibandingkan SRPM dan EBF. Hal ini disebabkan oleh potensi terjadinya kegagalan tekuk pada elemen *bracing* tekan ketika menerima pembebanan siklik akibat gempa.

Pada sistem *Concentrically Braced Frame (CBF)*, elemen *bracing* dapat diklasifikasikan berdasarkan orientasinya menjadi sistem *bracing* vertikal dan sistem *bracing* horizontal. Kedua sistem ini memiliki peran yang berbeda dalam menyalurkan dan mendistribusikan gaya lateral akibat gempa pada struktur baja.

1. Sistem *bracing* vertikal, merupakan konfigurasi *bracing* yang paling umum digunakan pada struktur CBF. Pada sistem ini, elemen *bracing* dipasang secara vertikal atau diagonal di dalam bidang rangka, menghubungkan balok dan kolom untuk menahan gaya lateral akibat gempa. Fungsi utama *bracing* vertikal adalah meningkatkan kekakuan lateral struktur serta mengurangi simpangan antar lantai secara signifikan.
2. Sistem *bracing* horizontal, pada struktur CBF umumnya digunakan sebagai elemen pengaku tambahan yang berfungsi untuk mendistribusikan gaya lateral antar elemen rangka dan meningkatkan kestabilan global struktur. *bracing* horizontal sering diaplikasikan pada level lantai atau atap untuk membantu penyaluran gaya gempa menuju sistem *bracing* vertikal dan elemen penahan gaya lateral lainnya.

Berikut Gambar 2.3 yang merupakan beberapa konfigurasi sistem *bracing* kosentrik



Gambar 2.3 Variasi Rangka *Bracing* Kosentrik

(Sumber: Putra, 2025)

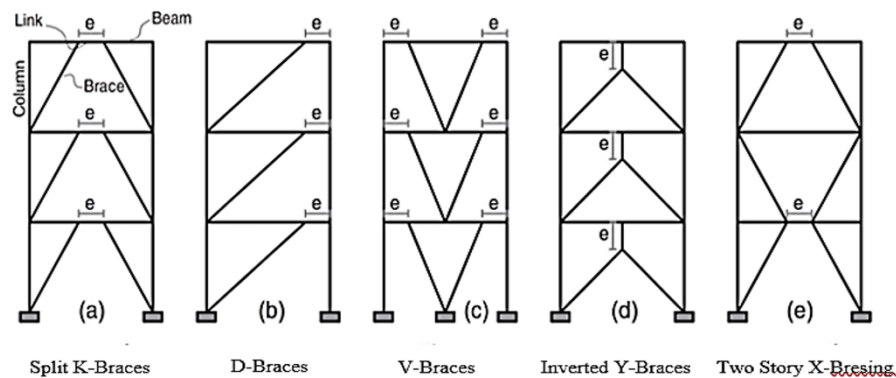
2.2.3 *Eccentrically Braced Frame (EBF)*

Eccentrically Braced Frame (EBF) merupakan sistem rangka baja yang mengombinasikan kekakuan tinggi dari sistem *bracing* dan daktilitas tinggi dari mekanisme lentur. Pada sistem EBF, elemen *bracing* tidak bertemu secara langsung di simpul, melainkan dihubungkan secara eksentris melalui elemen balok pendek yang disebut link (Nince & Trimurtiningrum, 2023). Elemen link ini dirancang untuk mengalami leleh terlebih dahulu dan berfungsi sebagai elemen disipasi energi utama saat struktur menerima beban gempa.

Keunggulan utama EBF dibandingkan SRPM dan CBF adalah kemampuannya dalam mengontrol mekanisme kerusakan secara terencana. Penelitian oleh (Acosta et al., 2024) menunjukkan bahwa struktur baja dengan sistem EBF memiliki perilaku histeresis yang stabil, kapasitas disipasi energi yang tinggi, serta simpangan antar lantai yang relatif lebih kecil dibandingkan SRPM.

Penelitian oleh (Cari & Bramantoro, 2023) menunjukkan bahwa variasi bentuk bracing eksentris memberikan pengaruh signifikan terhadap periode getar dan simpangan antar lantai struktur.

Berikut Gambar 2.4 yang merupakan beberapa konfigurasi sistem *bracing* eksentrik.



Gambar 2.4 Variasi Rangka *Bracing* Eksentrik
(Sumber: Mazzaruddin K & Trimurtiningrum, 2024)

2.2.3.1 *Bracing* Eksentrik Tipe *Two Story X*

Sistem *Eccentrically Braced Frame* (EBF) dengan konfigurasi *Two Story X* merupakan salah satu pengembangan dari sistem bracing eksentris yang dirancang untuk meningkatkan kinerja seismik bangunan baja bertingkat. Pada konfigurasi ini, elemen *bracing* disusun membentuk pola X yang bekerja melintasi dua tingkat lantai, sehingga mekanisme penyaluran gaya lateral tidak hanya terkonsentrasi pada satu lantai, tetapi terdistribusi secara vertikal. Kondisi tersebut berkontribusi terhadap peningkatan kekakuan lateral struktur serta pengendalian simpangan antar lantai yang lebih efektif dibandingkan sistem bracing eksentris konvensional satu tingkat (Mazzaruddin K & Trimurtiningrum, 2024).

Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bracing X dengan sifat eksentris memberikan pengaruh signifikan terhadap respons dinamik struktur. Studi numerik yang dilakukan oleh (Abdulridha, 2023) menunjukkan bahwa struktur baja bertingkat yang menggunakan *eccentric X-brace* mampu menunjukkan perilaku deformasi yang lebih terkontrol serta distribusi gaya lateral

yang lebih merata. Variasi tingkat eksentrisitas dan konfigurasi bracing terbukti memengaruhi simpangan lantai dan mekanisme disipasi energi menjadikan konfigurasi *Two-Story X* dinilai memiliki potensi yang baik dalam meningkatkan performa seismik struktur baja.

Penelitian lain oleh (Rahmawati & Khatulistiani, 2019) mengkaji respons simpangan lateral gedung baja bertingkat menunjukkan bahwa penerapan Two-Story X Bracing dapat menurunkan nilai *story drift* secara signifikan apabila dibandingkan dengan struktur tanpa bracing atau dengan konfigurasi bracing tunggal. Hasil analisis tersebut mengindikasikan bahwa sistem *Two-Story X* mampu meningkatkan stabilitas struktur secara global, khususnya pada bangunan yang berada di wilayah dengan tingkat aktivitas gempa tinggi.

2.2.3.2 Bracing Eksentrik Split K

Konfigurasi EBF tipe *Split K-Brace* merupakan pengembangan dari EBF tipe K dengan tujuan memperbaiki distribusi gaya internal dan meningkatkan daktilitas struktur. Studi oleh (Kusuma et al., 2025) menunjukkan bahwa penggunaan *Split K-Brace* pada struktur baja bertingkat mampu meningkatkan kinerja struktur terhadap beban lateral gempa dibandingkan konfigurasi EBF konvensional. Konfigurasi ini juga dinilai lebih efektif dalam mengontrol mekanisme leleh pada elemen link sehingga kerusakan struktur dapat terjadi secara lebih terkontrol.

2.3 Pembebanan

Pembebanan merupakan komponen fundamental dalam perencanaan struktur bangunan karena menentukan besarnya gaya yang harus dipikul oleh elemen struktur. Penentuan jenis dan besar beban harus dilakukan secara tepat agar struktur yang direncanakan mampu berperilaku aman dan memenuhi kriteria kinerja yang disyaratkan. Dalam perencanaan struktur gedung di Indonesia, pembebanan ditetapkan berdasarkan ketentuan Standar Nasional Indonesia (SNI 1727 : 2020) tentang beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain. Beban yang diperhitungkan dalam perencanaan ini meliputi beban mati, beban hidup, beban gempa, dan beban angin.

2.3.1 Beban Mati

Beban mati merupakan beban yang berasal dari berat seluruh elemen bangunan yang bersifat permanen dan bekerja secara terus-menerus sepanjang umur struktur. Beban ini mencakup berat sendiri elemen struktural seperti balok, kolom, pelat lantai, dan atap, serta elemen nonstruktural yang terpasang secara tetap pada bangunan. Elemen nonstruktural tersebut meliputi dinding, plafon, lantai, tangga, dinding partisi permanen, lapisan finishing, *cladding* gedung, serta komponen arsitektural lainnya yang menjadi bagian tetap dari bangunan.

Dalam perencanaan struktur, beban mati dihitung berdasarkan dimensi elemen dan berat jenis material yang digunakan, sehingga besarnya dapat ditentukan secara pasti. Perhitungan beban mati yang akurat sangat penting karena beban ini berpengaruh langsung terhadap gaya dalam elemen struktur dan menjadi dasar dalam penentuan kombinasi pembebanan. Ketentuan mengenai beban mati dalam perencanaan bangunan gedung mengacu pada SNI 1727 : 2020 tentang beban minimum untuk perencanaan bangunan gedung dan struktur lainnya.

2.3.2 Beban Hidup

Beban hidup merupakan beban yang timbul akibat aktivitas pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lainnya. Beban ini tidak bersifat permanen dan dapat berubah-ubah seiring dengan fungsi serta tingkat pemanfaatan bangunan. Beban hidup tidak termasuk ke dalam beban konstruksi maupun beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, dan beban mati.

Beban hidup diperhitungkan sebagai beban vertikal yang bekerja pada elemen struktur dan berpengaruh terhadap kapasitas serta kinerja struktur secara keseluruhan. Penentuan nilai beban hidup harus dilakukan sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 1727 : 2020 tentang beban minimum untuk perencanaan bangunan gedung dan struktur lain, agar struktur yang direncanakan mampu menahan variasi beban akibat aktivitas penggunaan bangunan dengan tingkat keamanan yang memadai. Adapun tabel beban hidup dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Beban Hidup Merata dan Terpusat

Hunian atau penggunaan Rumah Sakit	Merata, L_o psf (kN/m²)	Terpusat lb (kN)
Ruang operasi, Laboratorium	60	1000
Ruang Pasien	40	1000
Koridor di atas lantai pertama	80	1000

(Sumber: SNI 1727 : 2020)

Berdasarkan pada SNI 1727 : 2020 untuk hunian atau penggunaan rumah sakit diizinkan untuk reduksi beban hidup dan reduksi beban hidup berlantai banyak sesuai pasal 4.7.2 tentang reduksi beban hidup merata. komponen struktur yang memiliki nilai $K_{LL}A_T$ adalah 400 ft² (37,16 m²) atau lebih diizinkan untuk dirancang dengan beban hidup tereduksi sesuai dengan rumus berikut:

$$L = L_o \left(0,25 + \frac{15}{\sqrt{K_{LL}A_T}} \right) \quad (2.1)$$

Dalam SI:

$$L = L_o \left(0,25 + \frac{4,57}{\sqrt{K_{LL}A_T}} \right) \quad (2.2)$$

Dengan keterangan:

L : beban hidup desain tereduksi per ft² (m²) dari luasan yang didukung oleh komponen struktur

L_o : beban hidup desain tanpa reduksi per ft² (m²) dari luasan yang didukung oleh komponen struktur

K_{LL} : faktor elemen beban hidup

A_T : luas tributari dalam ft² (m²)

L tidak boleh kurang dari 0,50 L_o untuk komponen struktur yang mendukung satu lantai dan L tidak boleh kurang dari 0,40 L_o untuk komponen struktur yang mendukung dua lantai atau lebih dari dua lantai.

2.3.3 Beban Angin

Beban angin ditentukan dengan mengasumsikan adanya gaya berupa tekanan dan gaya isap yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan bangunan yang ditinjau. Gaya-gaya tersebut timbul akibat aliran angin yang mengenai bidang-bidang struktur, sehingga menghasilkan pengaruh lateral yang perlu diperhitungkan dalam perencanaan struktur gedung.

Mengacu pada SNI 1727 : 2020, kecepatan angin dasar yang digunakan dalam analisis struktur ditetapkan berdasarkan data yang tercantum dalam Buku Peta Angin Indonesia. Apabila dalam catatan peta tersebut dinyatakan bahwa nilai kecepatan angin yang tersedia lebih kecil dari kondisi aktual, maka kecepatan angin dasar dapat disesuaikan atau diperbesar sesuai ketentuan yang berlaku. Dalam perhitungan, arah datangnya angin diasumsikan dapat berasal dari segala arah horizontal. Pada gedung tertutup koefisien angin yang dipakai untuk menentukan pengaruh angin pada struktur sebagai berikut:

1. Dinding Vertikal

Di pihak angin	: +0,9
Di belakang angin	: -0,4
Sejajar dengan arah angin	: -0,4

2. Atap segitiga dengan sudut kemiringan α

Di pihak angin :

$\alpha < 65^\circ$	: 0,02 α -0,4
$65^\circ < \alpha < 90^\circ$	: +0,9
Di belakang angin, untuk semua α	: -0,4

2.3.4 Beban Gempa

Beban gempa adalah beban lateral yang timbul akibat getaran tanah selama peristiwa gempa bumi. Besarnya pengaruh beban gempa pada struktur dipengaruhi oleh tingkat kegempaan wilayah, kondisi tanah, karakteristik bangunan, serta sistem struktur yang digunakan. Perencanaan terhadap beban gempa bertujuan agar struktur mampu menahan gaya gempa tanpa mengalami keruntuhan yang membahayakan keselamatan penghuni. Penentuan beban gempa dalam penelitian

ini mengacu pada SNI 1726 : 2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur gedung dan non-gedung, dengan mempertimbangkan analisis respons dinamik struktur. Tahapan perhitungan beban gempa pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Kategori Risiko Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa

Untuk kategori risiko bangunan dan faktor keutamaan gempa berdasarkan SNI 1726:2019 dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 sebagai berikut.

Tabel 2.3 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Struktur Lainnya Untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dengan resiko rendah terhadap jiwa manusia	I
Semua gedung lain	II
Gedung dengan resiko tinggi terhadap jiwa manusia	III
Gedung yang ditujukan untuk fasilitas penting	IV

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

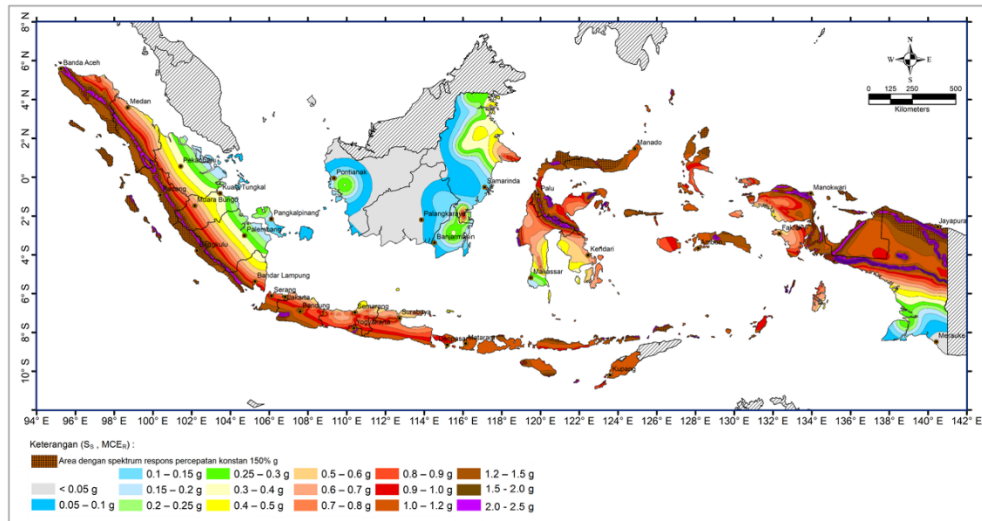
Tabel 2.4 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa
I atau II	1,00
III	1,25
IV	1,50

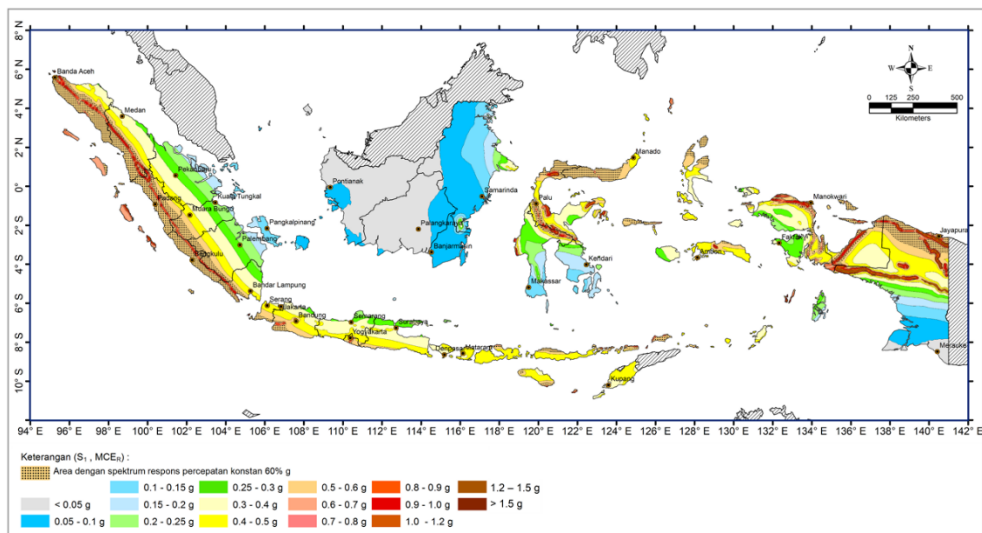
(Sumber: SNI 1726 : 2019)

2. Nilai Percepatan Tanah

Berdasarkan SNI 1726 : 2019 nilai percepatan tanah dapat ditentukan secara berurutan berdasarkan pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.5 Peta Spektra 0,2 Detik untuk Periode Ulang Gempa 2500 Tahun
(Sumber: SNI 1726 : 2019)



Gambar 2.6 Peta Spektra 1 Detik untuk Periode Ulang Gempa 2500 Tahun
(Sumber: SNI 1726 : 2019)

3. Koefisien Situs dan Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum Yang Dipertimbangkan Risiko-tertarget (MCE)

Percepatan periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$S_{MS} = F_a \times S_S \quad (2.3)$$

$$S_{M1} = F_V \times S_1 \quad (2.4)$$

Keterangan :

S_S : parameter respons spektral percepatan gempa MCER untuk periode pendek

S_1 : parameter respons spektral percepatan gempa MCER untuk periode 1 detik

Nilai F_a dan F_V dapat diperoleh dari interpolasi linear pada Tabel 2.5 dan Tabel 2.6 berikut.

Tabel 2.5 Koefisien Situs, F_a

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	SS				

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

Tabel 2.6 Koefisien Situs, F_V

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$				
	$S_s \leq 0,1$	$S_s = 0,2$	$S_s = 0,3$	$S_s = 0,4$	$S_s = 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa terpetakan pada periode pendek, T=0,2				
	Ss≤0,1	Ss=0,2	Ss=0,3	Ss=0,4	Ss=0,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF	SS				

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

4. Parameter Percepatan Desain

Parameter percepatan desain periode pendek (S_{DS}) dan periode 1 detik (S_{D1}) dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.5)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.6)$$

5. Spektrum Respon Desain

Parameter yang harus ditentukan adalah T_0 dan T_s yaitu sebagai berikut.

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.7)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.8)$$

Beberapa ketentuan yang harus dipenuhi yaitu sebagai berikut.

- Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain, S_a harus diambil dari persamaan berikut.

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.9)$$

- Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a , sama dengan S_{DS} .
- Untuk periode lebih besar dari T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan berikut.

$$S_A = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.10)$$

Keterangan :

S_{DS} : parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek

S_{D1} : parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik

T : periode getar fundamental struktur

6. Kategori Desain Seismik

Kategori desain seismik dapat ditentukan berdasarkan perbandingan parameter percepatan desain dan kategori risiko yang dapat dilihat berurutan pada Tabel 2.7 dan Tabel 2.8 berikut.

Tabel 2.7 Kategori Desain Seismik Periode Pendek

Nilai S_{DS}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,87$	A	A
$0,167 < S_{DS}$	B	C
$0,33 < S_{DS} < 0,50$	C	D
$0,50 < S_{DS}$	D	D

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

Tabel 2.8 Kategori Desain Seismik Periode 1 Detik

Nilai S_{D1}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 < S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 < S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 < S_{D1}$	D	D

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

7. Modifikasi Respons (R), Faktor Kuat Lebih Sistem (Ω_0) dan Faktor Pembesaran Defleksi (C_d)

Nilai-nilai tersebut dapat ditentukan berdasarkan Tabel 2.9 berikut.

Tabel 2.9 Faktor R , C_d dan Ω_0 pada Sistem Rangka Baja

No	Sistem Penahan Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, R_a	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0^g	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d^b	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^c				
					B	C	D ^d	E ^d	F ^e
1	Rangka baja dengan bresing eksentris	8,00	2,00	4,00	TB	TB	48	48	30
2	Rangka baja dengan bresing kosentrik khusus	6,00	2,00	5,00	TB	TB	48	48	30
3	Rangka baja dengan bresing kosentrik biasa	3,25	2,00	3,25	TB	TB	10	10	TI
4	Rangka baja pemikul momen khusus	8,00	3,00	5,50	TB	TB	TB	TB	TB

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

8. Prosedur Gaya Ekuivalen Lateral

a. Geser dasar seismik

Geser dasar seismik dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$V = C_s W \quad (2.11)$$

Dengan :

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.12)$$

$$C_s = \frac{S_{DS} T_L}{\left(T \frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.13)$$

$$C_s = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (2.14)$$

$$C_s = \frac{0,5 S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.15)$$

Keterangan :

V : geser dasar seismik (kN)

C_s : koefisien respon seismik

W : berat seismik efektif (kN)

Untuk $T \leq T_L$, C_s menggunakan persamaan 2.12. Untuk $T > T_L$, C_s menggunakan persamaan 2.13. C_s harus tidak kurang dari persamaan 2.14. Untuk struktur yang berlokasi di daerah di mana S₁ sama dengan atau lebih besar dari 0,6g, C_s harus tidak kurang dari persamaan 2.15.

b. Penentuan periode

Periode dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.16)$$

Keterangan :

h_n : ketinggian struktur (m)

C_t dan x dapat ditetapkan berdasarkan Tabel 2.10 berikut.

Tabel 2.10 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Rangka baja pemikul momen	0,0724 ^a	0,80
Rangka beton pemikul momen	0,0466 ^a	0,90
Rangka baja dengan bresing eksentrik	0,0731 ^a	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap teknik	0,0731 ^a	0,75
Sistem struktur lainnya	0,0488 ^a	0,75

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

Apabila bangunan lebih dari 12 lantai, T_a dapat menggunakan persamaan berikut.

$$T_a = 0,1N \quad (2.17)$$

c. Distribusi vertikal gaya gempa

Gaya gempa lateral (F_x) dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$F_x = C_{vx}V \quad (2.18)$$

Dengan :

$$C_{ovx} = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2.19)$$

Keterangan :

C_{vx} : faktor distribusi vertikal

V : gaya lateral (kN)

w_i dan w_x : berat seismik pada tingkat i dan x

h_i dan h_x : tinggi dari dasar hingga tingkat i dan x

k : eksponen terkait periode struktur

d. Distribusi horizontal gaya gempa

Gaya geser tingkat gempa pada semua tingkat (V_x) dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad (2.20)$$

Dengan F_i merupakan bagian dari geser dasar seismik (V) yang timbul di tingkat i (kN).

2.4 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan dasar yang digunakan mengikuti aturan SNI 1727 : 2020 pasal 4.2.2. Seluruh bagian struktur harus dirancang sedemikian rupa agar kekuatan desain yang dihasilkan sama atau melebihi efek dari beban terfaktor dalam kombinasi-kombinasi berikut:

1. 1,4D
2. 1,2D + 1,6L + 0,5 (L_r atau R)
3. 1,2D + 1,6L (L_r atau R) + (L atau 0,5 W)
4. 1,2D + 1,0W + L + 0,5 (L_r atau R)
5. 0,9D + 1,0W
6. 1,2D + E_v + E_h + L
7. 0,9D - E_v + E_h

Keterangan:

D : beban mati

L : beban hidup

L_r : beban hidup pekerja pada atap

R : beban hujan

W : beban angin

N : beban notional

E : beban statik ekuivalen

2.4.1 Pengaruh Beban Seismik

Pengaruh beban gempa diatur dalam pasal 7.4.2 dalam SNI 1726:2019 Dimana beban E dalam kombinasi 6 harus ditentukan dengan persamaan berikut.

$$E = E_h + E_v \quad (2.21)$$

Sedangkan beban E dalam kombinasi 7 harus ditentukan dengan persamaan berikut.

$$E = E_h - E_v \quad (2.22)$$

Adapun E_h merupakan pengaruh beban gempa horizontal yang ditentukan dengan persamaan berikut.

$$E_h = \rho Q_E \quad (2.23)$$

Keterangan:

ρ : faktor redudansi

Q_E : pengaruh gaya gempa horizontal dari V atau F_p

Sedangkan E_v merupakan pengaruh beban gempa vertikal yang ditentukan dengan persamaan berikut.

$$E_v = 0,2 S_{DS} D \quad (2.24)$$

Keterangan:

S_{DS} : parameter percepatan spektrum respon

D : pengaruh beban mati

2.4.2 Pengaruh Beban Gempa Termasuk Faktor Kuat Lebih

Pengaruh beban gempa termasuk faktor kuat lebih diatur dalam pasal 7.4.3 dengan E dalam kombinasi 5 harus diambil sama dengan E_m seperti pada persamaan berikut.

$$E_m = E_{mh} + E_v \quad (2.25)$$

Sedangkan E dalam kombinasi 7 harus diambil sama dengan E_m seperti pada persamaan berikut.

$$E_m = E_{mh} - E_v \quad (2.26)$$

Keterangan :

E_m : pengaruh beban gempa

E_{mh} : pengaruh beban gempa horizontal termasuk kuat lebih struktur

E_v : pengaruh beban gempa vertikal

Sedangkan E_{mh} merupakan pengaruh beban gempa horizontal dengan faktor kuat lebih yang ditentukan dengan persamaan berikut.

$$E_{mh} = \Omega_0 Q_E \quad (2.27)$$

Keterangan :

Ω_0 : faktor kuat lebih

Q_e : pengaruh beban gempa horizontal dari V , F_{px} atau F_p

2.5 Pengecekan Awal

2.5.1 Partisipasi Massa

Berdasarkan ketentuan Pasal 7.9.1 SNI 1726:2019 mengenai jumlah ragam getar, analisis struktur harus dilakukan untuk menentukan ragam getar alami

bangunan. Dalam analisis tersebut, jumlah ragam yang disertakan harus memadai sehingga partisipasi massa ragam yang terkombinasi dapat merepresentasikan massa struktur secara keseluruhan. Secara ideal, analisis mencakup ragam yang menghasilkan partisipasi massa hingga 100% dari massa struktur. Untuk memenuhi ketentuan ini, pada ragam satu badan kaku (*single rigid body*) dengan periode 0,05 detik, diperkenankan untuk memasukkan seluruh ragam dengan periode di bawah 0,05 detik.

Sebagai alternatif yang diizinkan, analisis dapat dilakukan dengan jumlah ragam minimum asalkan partisipasi massa ragam terkombinasi mencapai paling sedikit 90% dari massa aktual struktur pada masing-masing arah horizontal ortogonal yang ditinjau dalam model analisis.

2.5.2 Skala Gaya

Mengacu pada Pasal 7.9.4.1 SNI 1726:2019 mengenai penskalaan gaya, apabila periode fundamental struktur yang diperoleh dari hasil analisis melebihi nilai $C_u T_a$ pada suatu arah tertentu, maka periode struktur T pada arah tersebut harus diambil sebesar $C_u T_a$. Selanjutnya, apabila gaya geser dasar hasil kombinasi respons analisis ragam (V_t) bernilai kurang dari 100% gaya geser dasar (V) yang dihitung menggunakan prosedur gaya lateral ekuivalen, maka seluruh gaya hasil analisis ragam tersebut harus dikalikan dengan faktor penskalaan sebesar V/V_t . V merupakan gaya geser dasar statik ekuivalen yang dihitung sesuai ketentuan SNI, sedangkan V_t adalah gaya geser dasar yang diperoleh dari hasil analisis kombinasi ragam.

2.5.3 Ketidakberaturan Bangunan

Mengacu pada SNI 1726:2019, ketidakberaturan bangunan diklasifikasikan ke dalam dua kelompok utama, yaitu ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal. Pembagian ini dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi geometri, distribusi massa, kekakuan, dan kekuatan struktur yang dapat memengaruhi respons bangunan terhadap beban gempa. Keberadaan ketidakberaturan pada struktur dapat menyebabkan konsentrasi gaya

dan deformasi yang tidak merata, sehingga perlu diperhatikan secara khusus dalam perencanaan dan analisis struktur tahan gempa.

Kriteria dan jenis ketidakberaturan tersebut dijabarkan lebih rinci dalam ketentuan SNI dan disajikan secara sistematis pada tabel yang memuat klasifikasi ketidakberaturan bangunan secara horizontal maupun vertikal. Uraian tersebut digunakan sebagai acuan dalam menentukan metode analisis yang sesuai serta dalam mengevaluasi kinerja struktur terhadap pengaruh gempa yang dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Ketidakberaturan Horizontal

No	Jenis Ketidakberaturan	Definisi
1a	Ketidakberaturan torsi	Ketidakberaturan torsi dinyatakan terjadi apabila simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung, termasuk pengaruh torsi tak terduga dengan faktor $A_x = 1,0$, pada salah satu ujung struktur yang melintang terhadap suatu sumbu, melebihi 1,2 kali nilai simpangan antar tingkat rata-rata pada kedua ujung struktur tersebut. Ketentuan mengenai ketidakberaturan torsi sebagaimana diatur dalam pasal-pasal terkait hanya berlaku untuk struktur yang menggunakan diafragma dengan perilaku kaku atau setengah kaku.
1b	Ketidakberaturan torsi berlebihan	Ketidakberaturan torsi berlebihan dinyatakan terjadi apabila simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung, termasuk pengaruh torsi tak terduga dengan faktor $A_x = 1,0$, pada salah satu ujung struktur yang melintang terhadap suatu sumbu, melebihi 1,4 kali nilai simpangan antar tingkat rata-

No	Jenis Ketidakberaturan	Definisi
		rata pada kedua ujung struktur. Ketentuan mengenai ketidakberaturan torsi berlebihan sebagaimana diatur dalam pasal-pasal terkait hanya berlaku untuk struktur dengan diafragma yang berperilaku kaku atau setengah kaku.
2	Ketidakberaturan Sudut Dalam	Ketidakberaturan sudut dalam dinyatakan terjadi apabila kedua dimensi proyeksi denah struktur yang diukur dari lokasi sudut dalam melebihi 15% dari dimensi denah bangunan pada arah yang ditinjau.
3	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma dinyatakan terjadi apabila terdapat diafragma yang mengalami diskontinuitas atau perubahan kekakuan secara mendadak. Kondisi ini mencakup diafragma yang memiliki area terpotong atau terbuka lebih dari 50% luas diafragma bruto yang melingkupinya, atau apabila terjadi perubahan kekakuan diafragma efektif yang melebihi 50% antara suatu tingkat dengan tingkat di atasnya.
4	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang	Ketidakberaturan akibat pergeseran melintang atau tegak lurus terhadap bidang dinyatakan terjadi apabila terdapat diskontinuitas pada lintasan penyaluran gaya lateral, yang ditunjukkan oleh adanya pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada satu atau lebih elemen vertikal pemikul gaya lateral.

No	Jenis Ketidakberaturan	Definisi
5	Ketidakberaturan sistem nonparalel	Ketidakberaturan sistem nonparalel dinyatakan terjadi apabila elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak tersusun sejajar atau tidak simetris terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama dari sistem penahan gaya gempa.

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

Jenis ketidakberaturan vertikal dapat dilihat pada Tabel 2.12 berikut.

Tabel 2.12 Ketidakberaturan Vertikal

No	Jenis Ketidakberaturan	Definisi
1a	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak	Ketidakberaturan kekakuan berupa tingkat lunak dinyatakan terjadi apabila terdapat suatu tingkat bangunan yang memiliki kekakuan lateral kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya, atau kurang dari 80% nilai kekakuan lateral rata-rata dari tiga tingkat yang berada di atasnya.
1b	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak berlebihan	Ketidakberaturan kekakuan berupa tingkat lunak berlebihan dinyatakan terjadi apabila pada suatu tingkat bangunan, kekakuan lateral yang dimiliki kurang dari 60% kekakuan lateral tingkat di atasnya, atau kurang dari 70% nilai kekakuan lateral rata-rata dari tiga tingkat yang berada di atasnya.

No	Jenis Ketidakberaturan	Definisi
2	Ketidakberaturan Berat (Massa)	Ketidakberaturan berat atau massa dinyatakan terjadi apabila massa efektif pada suatu tingkat bangunan melebihi 150% dari massa efektif tingkat yang berdekatan. Dalam evaluasi ketidakberaturan ini, kondisi atap yang memiliki massa lebih kecil dibandingkan lantai di bawahnya tidak perlu diperhitungkan.
3	Ketidakberaturan Geometri Vertikal	Ketidakberaturan geometri vertikal dinyatakan terjadi apabila dimensi horizontal sistem pemikul atau penahan gaya gempa pada suatu tingkat bangunan melebihi 130% dari dimensi horizontal sistem pemikul gaya gempa pada tingkat yang berdekatan.
4	Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral	Ketidakberaturan akibat diskontinuitas arah bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral dinyatakan terjadi apabila terjadi pergeseran arah bidang elemen penahan gaya lateral yang besarnya melebihi panjang elemen tersebut, atau apabila terdapat penurunan kekakuan elemen pemikul gaya lateral pada tingkat di bawahnya.
5a	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat	Ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral dinyatakan terjadi apabila kekuatan lateral suatu tingkat bangunan kurang dari 80% kekuatan lateral tingkat yang berada di atasnya. Kekuatan lateral tingkat yang dimaksud merupakan jumlah kekuatan dari

No	Jenis Ketidakberaturan	Definisi
		seluruh elemen pemikul gaya seismik yang bersama-sama menahan dan mendistribusikan geser tingkat pada arah yang ditinjau.
5b	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat	Ketidakberaturan tingkat lemah berlebihan akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral dinyatakan terjadi apabila kekuatan lateral suatu tingkat bangunan kurang dari 65% kekuatan lateral tingkat yang berada di atasnya. Kekuatan lateral tingkat yang dimaksud merupakan akumulasi kekuatan seluruh elemen pemikul gaya seismik yang secara bersama-sama menahan dan mendistribusikan geser tingkat pada arah yang ditinjau.

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

2.5.4 Pengecekan Beban Notional Asumsi

Penggunaan beban notional diperkenankan sepanjang memenuhi ketentuan umum yang tercantum dalam SNI 1729:2019, yaitu apabila perbandingan antara simpangan maksimum akibat analisis orde kedua dan simpangan maksimum hasil analisis orde pertama, dengan mempertimbangkan kekakuan yang telah disetujui, pada seluruh tingkat bangunan bernilai sama dengan atau tidak melebihi 1,7.

$$\frac{\Delta 2^{nd} order_{max}}{\Delta 1^{st} order_{max}} \leq 1,7 \quad (2.28)$$

2.5.5 Pengecekan P-Δ

Mengacu pada ketentuan Pasal 7.8.7 SNI 1726:2019, pengaruh P–Delta terhadap gaya elemen struktur, momen pada elemen struktur, serta simpangan antar

lantai dapat diabaikan apabila nilai koefisien stabilitas (θ) yang diperoleh dari persamaan terkait sama dengan atau tidak melebihi 0,10.

$$\theta = \frac{P_x \Delta I_e}{V_x h_{sx} C_d} \leq 0,10 \quad (2.29)$$

Keterangan:

P_x : beban desain vertikal total pada dan di atas tingkat x (kN)

Δ : simpangan antar lantai tingkat desai

I_e : faktor keutamaan gempa

V_x : gaya geser seismik yang bekerja antara tingkat x dan $x-1$ (kN)

h_{sx} : tinggi tingkat di bawah tingkat x (mm)

C_d : faktor pembesaran defleksi

Dan stabilitas (θ) harus tidak melebihi θ_{max} yang ditentukan melalui persamaan berikut.

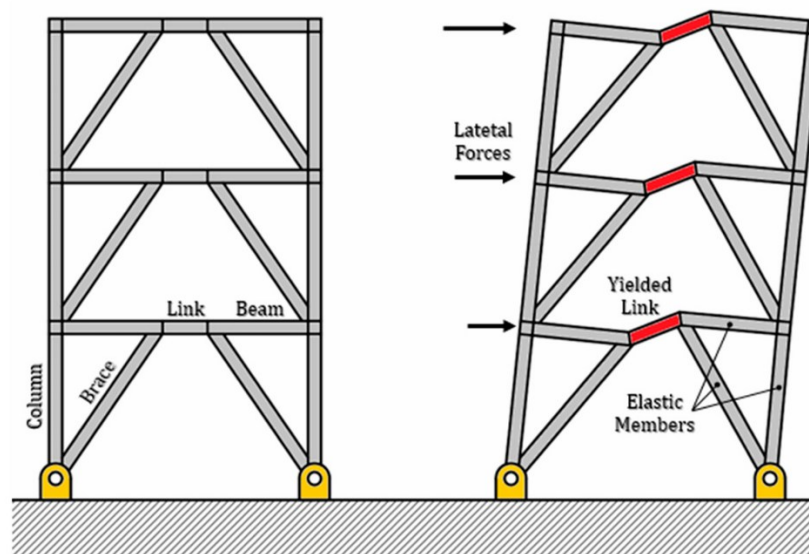
$$\theta_{max} = \frac{0,5}{\beta C_d} \leq 0,25 \quad (2.30)$$

Dalam hal ini, β merupakan perbandingan antara kebutuhan geser dan kapasitas geser pada tingkat yang terletak di antara tingkat x dan $x - 1$, yang secara konservatif diperbolehkan untuk diasumsikan bernilai 1,0. Apabila koefisien stabilitas (θ) memiliki nilai lebih besar dari 0,10 namun masih kurang dari atau sama dengan θ_{max} , maka pengaruh P-Delta terhadap perpindahan dan gaya pada elemen struktur harus dievaluasi menggunakan analisis rasional. Sebagai alternatif, perpindahan serta gaya elemen struktur diperkenankan untuk diperbesar dengan faktor $1,0/(1 - \theta)$. Namun, apabila nilai θ melebihi θ_{max} , struktur dianggap memiliki potensi ketidakstabilan sehingga perlu dilakukan perancangan ulang.

2.6 Perencanaan Sistem Rangka *Bracing* Eksentrik

2.6.1 Perilaku *Link Beam*

Link beam merupakan elemen balok pendek dalam sistem rangka baja berpengaku eksentrik yang direncanakan untuk mengalami kelelahan lebih awal ketika struktur menerima beban lateral, khususnya beban gempa (Hong & Yu, 2024). Elemen ini berfungsi sebagai komponen utama dalam mekanisme disipasi energi, sehingga kekuatan *link beam* harus direncanakan secara cermat agar mampu menahan gaya geser dan momen sesuai dengan kapasitas plastisnya. Panjang *link* menjadi parameter penting karena menentukan mekanisme kelelahan yang terjadi, apakah didominasi oleh geser, lentur, atau kombinasi keduanya. Selain itu, sudut rotasi *link* digunakan sebagai indikator kinerja inelastik *link beam*, di mana batasan rotasi tertentu ditetapkan untuk menjamin perilaku daktil dan mencegah kegagalan getas seperti pada Gambar 2.7 berikut.



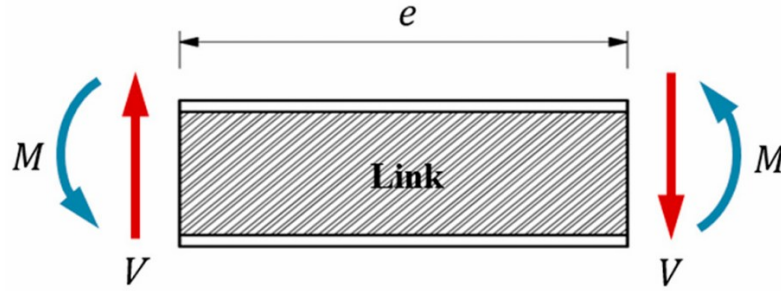
Gambar 2.7 Mekanisme Plastis dari EBF *Split K*

(Sumber: Hong & Yu, 2024)

2.6.1.1 Kuat Elemen *Link Beam*

Pada elemen *link*, gaya geser bekerja pada kedua ujung *link* dengan besar yang sama namun memiliki arah yang berlawanan. Kondisi ini menyebabkan

timbulnya momen lentur pada masing-masing ujung *link* yang memiliki besar dan arah yang serupa seperti pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Aksi Geser dan Lentur dari Elemen *Link*

(Sumber: Hong & Yu, 2024)

Mekanisme kelelahan yang terjadi pada elemen *link* ditentukan oleh jenis gaya yang dominan bekerja. Apabila kelelahan dikendalikan oleh gaya geser, maka elemen tersebut diklasifikasikan sebagai *link* geser. Sebaliknya, jika kelelahan terjadi akibat pengaruh momen lentur, elemen tersebut termasuk dalam kategori *link* lentur. Perbedaan mekanisme ini dipengaruhi oleh panjang *link*, yang pembahasannya akan diuraikan pada subbab berikutnya. Batas kekuatan elemen *link*, baik terhadap geser maupun lentur, ditetapkan berdasarkan persamaan-persamaan tertentu yang dijelaskan sebagai berikut:

1. *Link* geser

Kuat geser *link* pada penelitian ini dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$V_n = V_p \quad (2.31)$$

Dengan,

$$V_p = 0,6F_y A_{tw} \text{ untuk } P_r/P_c \leq 0,15 \quad (2.32)$$

$$V_p = 0,6F_y A_{tw} \sqrt{1 - (P_r/P_c)^2} \text{ untuk } P_r/P_c > 0,15 \quad (2.33)$$

$$A_{tw} = (d - 2t_f)t_w \quad (2.34)$$

2. *Link* Lentur

Kuat momen lentur *link* pada penelitian ini dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$V_n = 2M_p/e \quad (2.35)$$

Dengan,

$$M_p = F_y Z \text{ untuk } P_r/P_c \leq 0,15 \quad (2.36)$$

$$M_p = F_y Z \left(\frac{1 - P_r/P_c}{0,85} \right) \text{ untuk } P_r/P_c > 0,15 \quad (2.37)$$

Keterangan:

P_r : P_u

P_u : kuat tekan perlu (N)

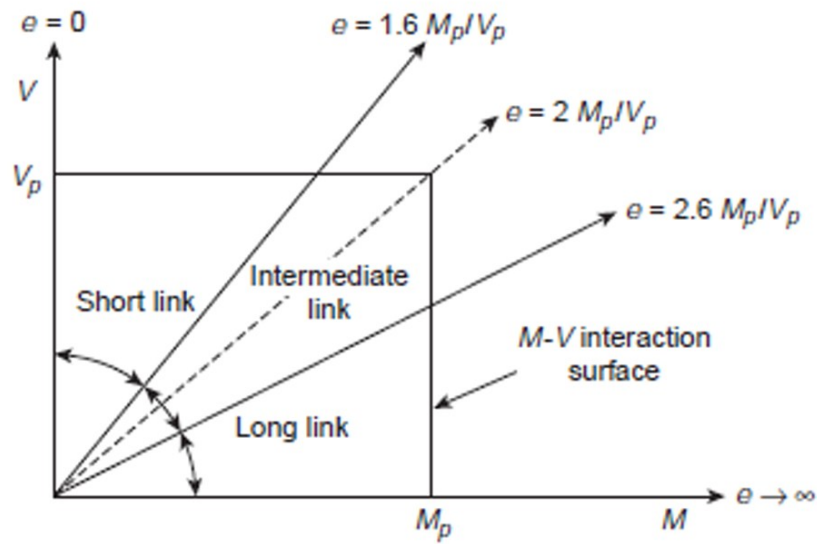
P_c : P_y

P_r : $F_y A_g$

e : panjang *link* (mm)

2.6.1.2 Panjang *Link Beam*

Link pada Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE) ditentukan berdasarkan rasio antara panjang *link* dan perbandingan kapasitas momen plastis (M_p) serta kapasitas geser plastis (V_p). Pada *link* yang lebih pendek, gaya geser akan mencapai kondisi plastis (V_p) terlebih dahulu sebelum momen lentur mencapai kapasitas plastisnya, sehingga kelelahan utamanya terjadi akibat aksi geser. Sebaliknya, pada *link* yang lebih panjang, momen plastis (M_p) akan tercapai lebih dulu, sehingga mekanisme kelelahan didominasi oleh lentur (Rafael & Suswanto, 2018). Pembagian panjang *link* ini selanjutnya digunakan untuk mengklasifikasikan *link* menjadi tiga tipe utama: *short link*, *intermediate link*, dan *long link*, yang masing-masing menunjukkan perilaku dominan geser, interaksi geser-lentur, atau dominan lentur. Klasifikasi berdasarkan rasio panjang link terhadap M_p/V_p ini banyak digunakan dalam literatur dan standar desain untuk menilai perilaku inelastik *link* dalam menahan beban lateral gempa. Klasifikasi *link* berdasarkan panjangnya dapat dilihat pada Gambar 2.9 dan persamaan-persamaan berikut.



Gambar 2.9 Klasifikasi *Link Beam* Berdasarkan Panjang
(Sumber: Rafael & Suswanto, 2018)

Dengan rumus :

1. *Short link* (*link* pendek atau *link* geser)

$$e \leq \frac{1,6M_p}{V_p} \quad (2.38)$$

2. *Intermediate link*

$$\frac{1,6M_p}{V_p} < e < \frac{2,6M_p}{V_p} \quad (2.39)$$

3. *Long link* (*link* panjang atau lentur)

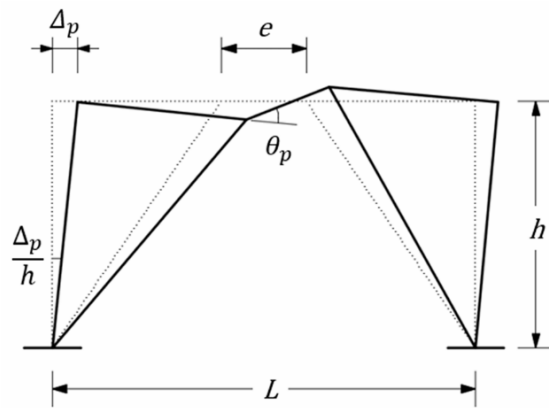
$$e \geq \frac{2,6M_p}{V_p} \quad (2.40)$$

2.6.1.3 Sudut Rotasi *Link Beam*

Sudut rotasi *link beam* merupakan sudut inelastis yang terbentuk antara elemen *link beam* dan balok yang berdekatan ketika nilai simpangan antar lantai total mencapai besarnya simpangan antar lantai rencana (Δ). Besaran sudut rotasi

yang terjadi pada *link beam* harus dibatasi agar tidak melampaui nilai tertentu sesuai ketentuan yang berlaku sebagai berikut:

1. 0,08 radian untuk panjang *link* $e \leq 1,6 M_p/V_p$
2. 0,02 radian untuk panjang *link* $e \geq 2,6 M_p/V_p$
3. Interpolasi linier antara 0,08-0,02 jika panjang *link* $1,6 M_p/V_p < e < 2,6 M_p/V_p$



Gambar 2.10 Sudut Rotasi *Link Beam*

(Sumber: Hong & Yu, 2024)

Berdasarkan Gambar 2.10, sudut rotasi pada link beam dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\theta_p = \frac{L}{e} \times \frac{\Delta_p}{h} \quad (2.41)$$

Keterangan :

L : lebar bentang

h : tinggi lantai

Δ_p : plastic story drift

θ_p : sudut rotasi *link beam*

2.6.1.4 Pendetailan *Link Beam*

Pendetailan pada bagian web *link beam* melalui pemasangan pengaku web (*web stiffeners*) berperan penting dalam menghasilkan perilaku *link beam* yang

stabil, memiliki daktilitas yang baik, dan mampu bekerja secara terkontrol ketika struktur mengalami pembebanan siklik akibat gempa..

Adapun ketentuan jarak dan tebal *web stiffeners* pada ujung dan tengah *link beam* antara lain:

1. Untuk *link* dengan panjang $e \leq 1,6 M_p/V_p$, wajib disediakan *intermediate web stiffeners* dengan jarak antar pengaku yang tidak melebihi $30t_w - d/5$ untuk sudut rotasi *link* sebesar 0,08 radian, atau $52t_w - d/5$ untuk sudut rotasi *link* sebesar 0,02 radian.
2. *Intermediate web stiffeners* harus dibuat dengan tinggi penuh (*full depth*). Apabila tinggi penampang *link* kurang dari 25 inci (635 mm), pengaku cukup dipasang pada satu sisi web *link* (sisi depan). Ketebalan pengaku pada satu sisi tersebut harus minimum sebesar t_w atau 3/8 inci (10 mm), dipilih nilai yang lebih besar, sedangkan lebarnya tidak boleh kurang dari $b_f/2 - t_w$.
3. Persyaratan kekuatan sambungan las *fillet* yang menghubungkan pengaku dengan web *link* harus memenuhi nilai $A_{st}F_y$ (LRFD), sementara kekuatan las antara pengaku dan *flange link* ditetapkan sebesar $A_{st}F_y/4$ (LRFD), dengan A_{st} merupakan luas penampang pengaku.

2.6.2 Perencanaan *Bracing*

Pada Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE), elemen bresing harus dirancang memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan elemen *link*, sehingga diharapkan bresing tetap berperilaku elastis dan tidak mengalami kelelahan saat struktur menerima beban gempa. Dengan demikian, elemen bresing direncanakan mampu memikul gaya plastis yang dihasilkan oleh *link*. Besarnya gaya tersebut dapat ditentukan berdasarkan nilai geser nominal yang bekerja pada *link*, yang selanjutnya diperbesar dengan mempertimbangkan faktor kekuatan material yang diharapkan (R_y) serta pengaruh *strain hardening* pada *link* dengan faktor sebesar 1,25.

Panjang elemen bresing diagonal selanjutnya dapat dihitung secara sederhana menggunakan hubungan geometris berdasarkan rumus *Pythagoras*, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$L = \sqrt{H^2 + (0,5B - 0,5e)^2} \quad (2.42)$$

Keterangan :

L : panjang bresing diagonal (mm)

H : jarak bersih antar lantai (mm)

B : jarak bersih antar kolom (mm)

e : panjang *link* (mm)

2.6.3 Perencanaan Kolom dan Balok Sistem Rangka *Bracing* Eksentris

Perencanaan elemen balok dan kolom pada Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE) mengacu pada ketentuan AISC 341-22, di mana elemen balok dan kolom dirancang memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan elemen *link*. Dalam sistem SRBE, kekuatan rencana balok dan kolom di luar daerah link ditentukan berdasarkan nilai geser ultimit yang dihasilkan oleh *link*. Namun demikian, pada balok dan kolom SRBE perlu diperhitungkan pengaruh *strain hardening*, yang menyebabkan peningkatan kekuatan geser rencana *link* sebesar 25%. Oleh karena itu, faktor pengali yang digunakan dalam perencanaan menjadi sebesar $1,25 \times 0,88 = 1,10$, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$V_{ult} = 1,1R_y V_n \quad (2.43)$$

2.7 Analisis Perilaku Struktur

Respons struktur terhadap beban gempa ditentukan oleh beberapa parameter dinamik utama, antara lain periode alami, kekakuan struktur, simpangan antar lantai (*inter-story drift*), serta perpindahan lateral.

2.7.1 Periode Natural

Periode natural struktur adalah waktu yang diperlukan oleh suatu struktur untuk menyelesaikan satu siklus getaran bebas akibat pengaruh gaya dinamik lateral. Besarnya periode natural memiliki hubungan berbanding terbalik dengan kekakuan sistem, di mana struktur dengan kekakuan yang lebih tinggi cenderung memiliki periode getar yang lebih pendek. Selain itu, periode natural juga dipengaruhi oleh besarnya massa serta distribusi kekakuan pada keseluruhan sistem struktur, sehingga berperan penting dalam menentukan besar gaya gempa yang bekerja pada struktur tersebut. Penelitian oleh (Nursani & Huseinny, 2026) menunjukkan bahwa penggunaan sistem *bracing* pada struktur baja bertingkat mampu memperpendek periode natural struktur secara signifikan dibandingkan struktur tanpa *bracing*, yang mengindikasikan peningkatan kekakuan lateral akibat keberadaan elemen *bracing*. Pada penelitian ini periode natural diperoleh secara langsung menggunakan bantuan software struktur.

2.7.2 Kekakuan Struktur

Kekakuan struktur merupakan indikator kemampuan struktur dalam menahan gaya lateral sebelum mengalami deformasi pada tingkat tertentu. Struktur dengan tingkat kekakuan yang lebih besar umumnya menghasilkan simpangan lateral yang lebih kecil. Namun demikian, variasi kekakuan struktur juga berpengaruh terhadap periode natural sistem serta besarnya gaya geser dasar yang bekerja pada struktur. Kekakuan struktur dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$k_n = \frac{V_n}{\delta_n} \quad (2.44)$$

Keterangan:

V_n : gaya geser pada lantai n yang ditinjau

δ_n : nilai *displacement* pada lantai n yang diperbesar

2.7.3 Displacement dan Simpangan Antar Lantai

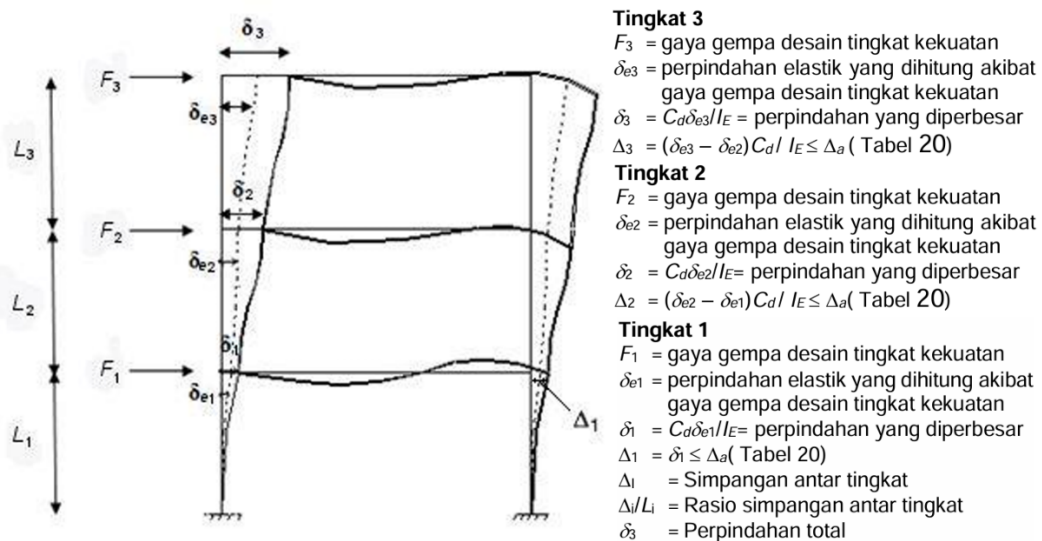
Displacement atau perpindahan lateral menunjukkan besarnya perpindahan absolut yang dialami struktur akibat pengaruh beban gempa, yang pada umumnya

mencapai nilai maksimum pada tingkat atau lantai paling atas bangunan. Pada penelitian ini nilai *displacement* diperoleh melalui bantuan software struktur.

Adapun simpangan antar lantai merupakan indikator penting dalam evaluasi kinerja seismik struktur karena berkaitan langsung dengan potensi kerusakan struktur dan non-struktur. Simpangan antar lantai dalam penelitian ini ditetapkan berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019. Mengacu pada Pasal 7.8.6, nilai defleksi pada pusat massa struktur dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{ex}}{I_e} \quad (2.45)$$

Penentuan simpangan antar tingkat dapat ditentukan berdasarkan Gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.11 Penentuan Simpangan Antar Lantai

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

Simpangan antar lantai tidak boleh melebihi simpangan antar lantai ijin yang dapat dilihat pada Tabel 2.13 berikut.

Tabel 2.13 Simpangan Antar Lantai Izin

Struktur	Kategori Resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai tingkat.	$0,025h_{sx}$	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$	$0,010h_{sx}$

(Sumber: SNI 1726 : 2019)

2.8 Preliminary Design Struktur Baja

Preliminary design merupakan tahapan perencanaan awal yang bertujuan untuk menentukan dimensi awal elemen struktur baja agar mampu memikul beban rencana serta memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, dan stabilitas struktur. Pada tahap ini, perencanaan dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 1729 : 2020 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural serta AISC/ANSI 360-22 Metode LRFD (*Load and Resistance Factor Design*).

2.8.1 Desain Elemen Tekan

Desain elemen tekan pada penelitian ini dilakukan berdasarkan SNI 1729 : 2020 dan AISC/ANSI 360-22, dengan ketentuan sebagai berikut.

1. Ketentuan Umum

Kuat tekan nominal (P_n) ditetapkan berdasarkan nilai paling kecil yang diperoleh dari batasan tekuk lentur, tekuk torsi, dan tekuk lentur-torsi. Namun, untuk penampang IWF yang digunakan dalam penelitian ini, mekanisme kegagalan yang dipertimbangkan hanya mencakup tekuk lentur dan tekuk torsi. Adapun faktor reduksi kekuatan yang digunakan dalam metode *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) ditentukan sebagai berikut.

$$\phi_c = 0,90 \quad (2.46)$$

2. Panjang Efektif

Faktor panjang efektif (K) yang digunakan dalam perhitungan rasio kelangsingan (KL/r) diambil sebesar 1,0, dengan L merupakan panjang elemen yang tidak diberi pengaku dan r menyatakan jari-jari girasi penampang.

3. Kuat Tekan Nominal

Penampang elemen tekan yang digunakan pada penelitian ini adalah penampang IWF tanpa elemen langsing dengan ketentuan

a. Tekuk Lentur

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (2.47)$$

Dengan ketentuan F_{cr} sebagai berikut.

$$\text{Jika } \frac{KL}{r} > 4,71 \text{ atau } \frac{F_y}{F_e} > 2,25 \quad (2.48)$$

$$\text{Maka, } F_{cr} = \left[0,658^{\frac{F_y}{F_e}} \right] F_y \quad (2.49)$$

Dan,

$$\text{Jika } \frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ atau } \frac{F_y}{F_e} > 2,25 \quad (2.50)$$

$$\text{Maka, } F_{cr} = 0,877 F_e \quad (2.51)$$

Dengan nilai F_e didapat dari

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (2.52)$$

Dengan keterangan:

P_n : kekuatan tekan nominal (kN)

F_{cr} : tegangan kritis (MPa)

A_g : luas penampang bruto (mm²)

KL : panjang efektif komponen struktur (mm)

r : radius girasi (mm)

F_e : tegangan tekuk elastis (MPa)

b. Tekuk Torsi

Persamaan untuk batas tekuk torsi pada dasarnya sama dengan persamaan batas tekuk lentur, dengan perbedaan terletak pada nilai tegangan kritis elastis (F_e). Untuk penampang dengan simetri ganda, seperti profil IWF, nilai F_e ditentukan menggunakan persamaan khusus sebagai berikut.

$$F_e = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L)^2} + GJ \right] \frac{1}{I_x + I_y} \quad (2.53)$$

Keterangan :

G : modulus elastis geser baja sesuai AISC sebesar 77200 MPa

I_x, I_y : momen inersia sumbu x dan y (mm⁴)

K_z : faktor panjang tekuk efektif

J : konstanta torsi (mm⁴)

C_w : konstanta lengkung (mm⁶)

2.8.2 Desain Elemen Lentur

Desain elemen lentur pada penelitian ini dilakukan berdasarkan SNI 1729 : 2020 dan AISC/ANSI 360-22, dengan ketentuan sebagai berikut.

1. Ketentuan Umum

Kuat lentur nominal (M_n) ditetapkan berdasarkan nilai terkecil yang diperoleh dari batas leleh material dan batas tekuk torsi-lateral yang terjadi pada penampang profil IWF.

- a. Faktor reduksi yang digunakan sama seperti elemen tekan.
- b. Titik-titik tumpuan balok dan gelagar ditahan terhadap rotasi terhadap sumbu longitudinalnya.
- c. Faktor modifikasi tekuk torsi-lateral ditentukan dengan persamaan berikut.

$$C_b = \frac{12M_{max}}{2,5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (2.54)$$

Keterangan :

M_{max} : nilai mutlak momen maksimum bagian tak berpengaku (Nmm)

M_A : nilai mulak momen $\frac{1}{4}$ bagian tak berpengaku (Nmm)

M_B : nilai mulak momen pada sumbu bagian tak berpengaku (Nmm)

M_C : nilai mulak momen $\frac{3}{4}$ bagian tak berpengaku (Nmm)

2. Kuat Lentur Nominal

a. Leleh

Pelelehan atau yielding didapatkan dengan persamaan berikut.

$$M_n = M_p = F_y Z_x \quad (2.55)$$

Keterangan :

F_y : tegangan leleh minimum dari jenis baja yang digunakan (MPa)

Z_x : modulus penampang plastis di sumbu x (mm^3)

b. Tekuk Torsi Lateral

1) Jika $L_b \leq L_p$, maka batas tekuk torsi lateral tidak diterapkan.

2) Jika $L_p < L_b \leq L_r$, maka,

$$M_n = C_b \left[M_r + (M_p - M_r) \frac{(L_r - L)}{(L_r - L_p)} \right] \quad (2.56)$$

3) Jika $L_r \leq L$, maka,

$$M_n = M_{cr} \leq M_p \quad (2.57)$$

Dimana,

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \quad (2.58)$$

$$L_p = 1,76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.59)$$

$$L_r = 1,95 r_{ts} \frac{E}{0,7 F_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h_0} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x h_0} \right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7 F_y}{E} \right)^2}} \quad (2.60)$$

$$r_{ts}^2 = \sqrt{\frac{I_y C_w}{S_x}} \quad (2.61)$$

Keterangan :

E : modulus elastisitas baja (200.000 MPa)

J : konstanta torsi (mm^4)

S_x : modulus penampang elastis (mm^3)

h_0 : jarak antara titik berat sayap (mm)

L_b : jarak antar sumbu penampang tak berpengaku (mm)

C : 1, untuk profil dengan simetri ganda seperti IWF

2.8.3 Desain Elemen Geser

Desain elemen geser pada penelitian ini dilakukan berdasarkan SNI 1729 : 2020 dan AISC/ANSI 360-22, dengan ketentuan sebagai berikut.

1. Ketentuan umum

Faktor reduksi untuk elemen geser metode LRFD adalah sebagai berikut.

$$\phi_v = 0,90 \quad (2.62)$$

2. Kuat Geser Nominal

Kuat geser nominal (V_n) pada elemen berpengaku atau tidak berpengaku dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$V_n = 0,6F_y A_w C_v \quad (2.63)$$

Adapun ketentuan nilai C_v diperoleh dengan syarat berikut.

a. Profil IWF canai panas dengan

$$\frac{h}{t_w} \leq 2,24 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.64)$$

b. Semua profil baik profil simetris ganda dan simetris tunggal dan kanal lainnya kecuali PCB bundar ditentukan dengan persamaan berikut.

$$1) \text{ Jika, } \left(\frac{h}{t_w} \right) \leq 1,10 \sqrt{\frac{k_n E}{f_y}} \quad (2.65)$$

$$C_v = 1$$

$$2) \text{ Jika, } 1,10 \sqrt{\frac{k_n E}{f_y}} \leq \left(\frac{h}{t_w} \right) \leq 1,37 \sqrt{\frac{k_n E}{f_y}}$$

$$C_v = 1,10 \sqrt{\frac{\frac{k_n E}{f_y}}{\left(\frac{h}{t_w} \right)}} \quad (2.66)$$

$$3) \text{ Jika, } 1,37 \sqrt{\frac{k_n E}{f_y}} \leq \left(\frac{h}{t_w}\right)$$

$$C_v = 1,5 \frac{k_n E}{f_y} \frac{1}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2} \quad (2.67)$$

Keterangan :

A_w : luas dari badan (mm^2)

h : jarak bersih sayap dikurangi jari-jari sudut atau las

t_w : tebal web atau badan

2.8.4 Desain Elemen Kombinasi Tekan dan Lentur

Desain elemen kombinasi tekan dan lentur pada penelitian ini dilakukan berdasarkan SNI 1729 : 2020 dan AISC/ANSI 360-22, dengan ketentuan sebagai berikut.

$$1. \text{ Jika, } \frac{P_r}{P_c} \geq 0,2$$

$$\text{Maka, } \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (2.68)$$

$$2. \text{ Jika, } \frac{P_r}{P_c} < 0,2$$

$$\text{Maka, } \frac{P_r}{P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (2.69)$$

Keterangan :

P_e : kekuatan aksial perlu (N)

P_c : kekuatan aksial tersedia (N)

M_r : kekuatan lentur perlu (Nmm)

M_c : kekuatan lentur tersedia (Nmm)

x, y : arah x dan arah y

2.8.5 Sambungan Struktur Baja

Perencanaan sambungan struktur baja pada umumnya dibedakan menjadi sambungan baut dan sambungan las. Kedua jenis sambungan tersebut memiliki mekanisme penyaluran gaya yang berbeda dan direncanakan berdasarkan ketentuan dalam SNI 1729 : 2020.

1. Perencanaan Sambungan Baut

Sambungan baut bekerja dengan menyalurkan gaya melalui gaya geser pada baut dan gaya tekan pada pelat sambungan. Pada tahap perencanaan, kapasitas sambungan baut harus lebih besar dari gaya rencana yang bekerja.

a. Kuat geser nominal baut

$$R_n = F_{nv}A_b \quad (2.70)$$

Keterangan :

R_n : kapasitas geser nominal baut (kN)

F_{nv} : tegangan geser nominal baut (MPa)

A_b : luas penampang baut (mm²)

b. Kuat tekan tumpu (*bearing*) nominal pada pelat

$$R_n = 1,2L_c t f_u \quad (2.71)$$

Keterangan :

L_c : jarak bersih dari tepi lubang baut ke tepi pelat (mm)

t : tebal pelat sambungan (mm)

f_u : tegangan tarik ultimit baja (MPa)

2. Perencanaan Sambungan Las

Sambungan las bekerja dengan menyalurkan gaya melalui logam las. Jenis las yang umum digunakan dalam struktur baja adalah las sudut (*fillet weld*). Kapasitas sambungan las ditentukan berdasarkan luas efektif las dan kekuatan logam las berdasarkan rumus di bawah ini.

$$R_n = 0,6f_{exx}A_w \quad (2.72)$$

Keterangan :

f_{exx} : kuat tarik elektrode las (MPa)

A_w : luas efektif penampang las (mm²)

2.9 Penelitian Sebelumnya

Berbagai studi sebelumnya telah dilakukan untuk mengevaluasi perilaku serta kinerja struktur baja yang menggunakan sistem *Eccentrically Braced Frame* (EBF) dalam menahan beban gempa. Ulasan singkat terhadap penelitian-penelitian yang relevan dengan kajian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Analisis Perbandingan Perilaku dan Kinerja Struktur Baja Terbreis Eksentris Tipe *Split K-Bresing* dan *Two Story X-Bresing* (Mazzaruddin K & Trimurtiningrum, 2024). Penelitian ini menganalisis perbedaan perilaku struktur baja yang menggunakan sistem EBF tipe *Split-K* dan *Two-Story X* akibat pengaruh gempa. Parameter respons struktur yang ditinjau meliputi periode getar alami, perpindahan lateral, serta simpangan antar lantai. Hasil kajian menunjukkan bahwa kedua konfigurasi EBF mampu meningkatkan ketahanan struktur terhadap gaya lateral. Namun demikian, sistem *Two-Story X* cenderung memberikan kekakuan struktur yang lebih tinggi, sementara konfigurasi *Split-K* menunjukkan distribusi disipasi energi yang lebih merata melalui mekanisme kerja elemen link.
2. Perbandingan Perilaku Struktur Baja Sistem Rangka Bresing Eksentris Tipe *Two Story-X* dan *Inverted-V* (Nince & Trimurtiningrum, 2023). Penelitian lain membandingkan respons struktur baja yang menggunakan EBF tipe *Two-Story X* dan *Inverted-V* dengan metode analisis gempa dinamik. Tujuan utama penelitian ini adalah mengidentifikasi pengaruh variasi konfigurasi bracing terhadap respons struktur berupa periode getaran, perpindahan lateral, dan simpangan antar tingkat. Berdasarkan hasil analisis, sistem *Two-Story X* terbukti lebih efektif dalam mengendalikan simpangan antar lantai dibandingkan EBF tipe *Inverted-V*, khususnya pada lantai bagian atas bangunan.
3. Pengaruh Bentuk *Bracing* Eksentris pada Struktur Gedung Baja terhadap Kinerja Struktur dengan Analisis Gempa Respon Spektrum (Cari & Bramantoro, 2023). Penelitian ini membahas pengaruh berbagai konfigurasi

bresing eksentris terhadap kinerja struktur gedung baja delapan lantai dengan menggunakan analisis dinamik respon spektrum sesuai SNI 1726:2019. Tipe bresing yang dianalisis meliputi EBF tipe K, *Inverted-V*, D, serta kombinasi *Inverted-V* dan V. Parameter evaluasi mencakup periode getar, simpangan antar lantai, dan gaya geser dasar akibat gempa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan EBF tipe K memberikan performa paling optimal dalam menurunkan periode getaran dan simpangan antar lantai dibandingkan struktur tanpa sistem bresing.

4. Perbandingan Daktilitas Dengan Analisa *Pushover* Pada Struktur Rangka Baja Model *Eccentrically Braced Frame* tipe K (EBF) dan *Eccentrically Braced Frame* tipe Y (EBF) Melalui Program SAP2000 (Larasati & Rumintang, 2021). Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan tingkat daktilitas dan kekakuan struktur rangka baja yang menggunakan EBF tipe K dan EBF tipe Y melalui analisis statik nonlinier *pushover*. Parameter yang dianalisis meliputi kurva kapasitas struktur, nilai daktilitas, serta pola pembentukan sendi plastis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua sistem EBF memiliki kemampuan daktilitas yang baik, namun EBF tipe K menunjukkan tingkat kekakuan dan daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan EBF tipe Y, sehingga dinilai lebih unggul dalam menahan beban gempa.