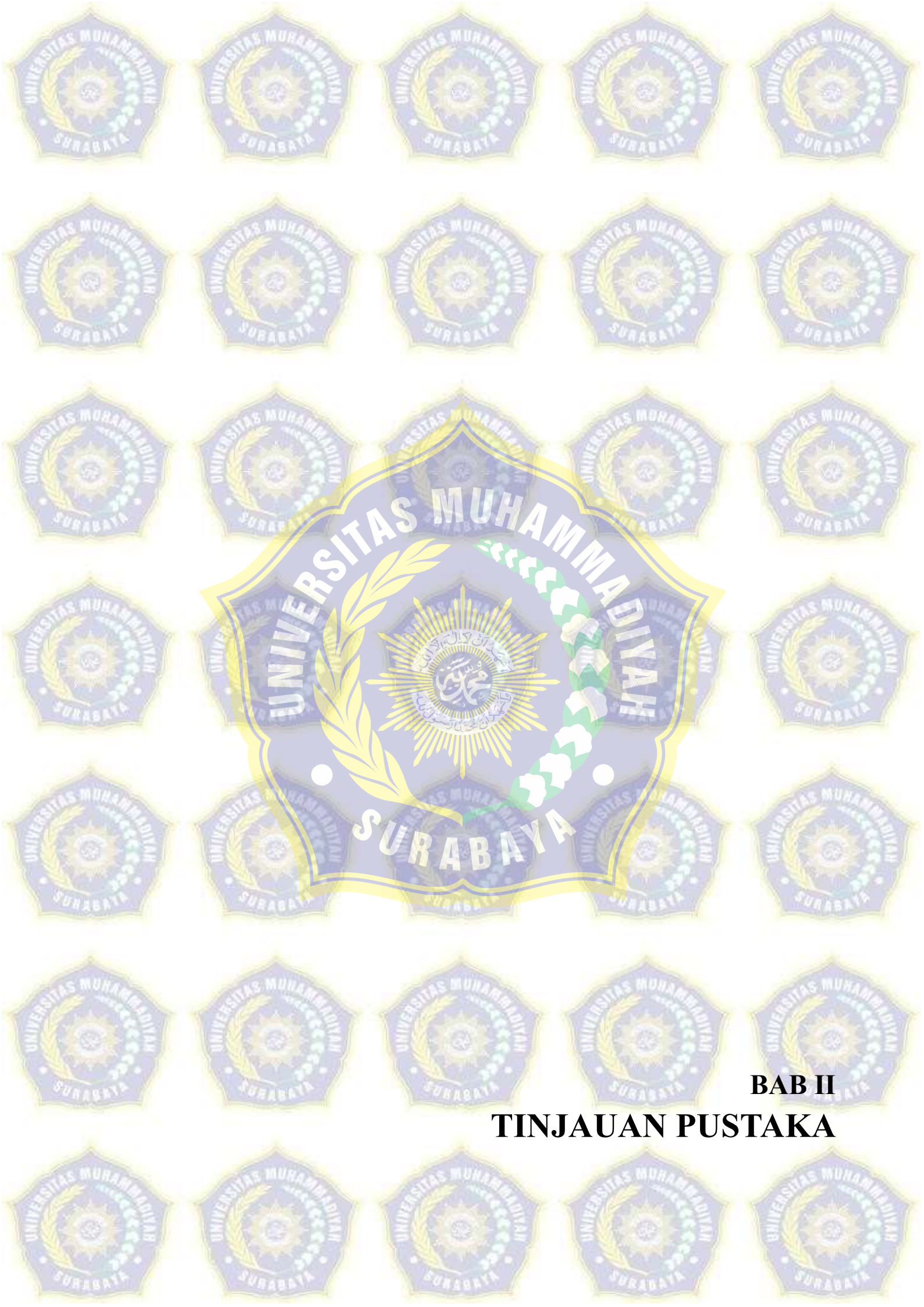




BAB II

TINJAUAN PUSTAKA



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

Bracing adalah elemen pengaku struktur bangunan yang berfungsi menambah kekakuan bangunan, menahan daktilitas, mampu menahan beban lateral, dan kekuatan serta bisa meredam energi yang di akibatkan getaran-getaran. Sistem *bracing* baja bisa digunakan secara efektif untuk perkuatan seismik bangunan beton bertulang yang ada serta untuk desain seismik bangunan baru (Repadi et al., 2016). Pada rangka yang diberi *bracing*, hambatan lateral struktur disediakan oleh anggota diagonal yang bersama dengan balok membentuk jaringan rangka vertikal dengan kolom bertindak sebagai tali busur. Karena geser horizontal pada bangunan ditahan oleh komponen horizontal dari gaya tarik dan gaya tekan pada struktur gedung. Sistem *bracing* sangat efisien dalam menahan beban lateral.

Bracing umumnya dianggap sebagai sistem baja eksklusif, tetapi saat ini *bracing* baja juga digunakan dalam rangka beton bertulang. Efisiensi *bracing* dalam menghasilkan struktur yang sangat kaku secara lateral dengan material tambahan minimum menjadikannya bentuk struktural yang ekonomis untuk semua ketinggian bangunan, hingga yang tertinggi. Pada umumnya *bracing* terdiri dari dua jenis, *konsentris* dan *eksentris* (Patel & Lamsal, 2023).

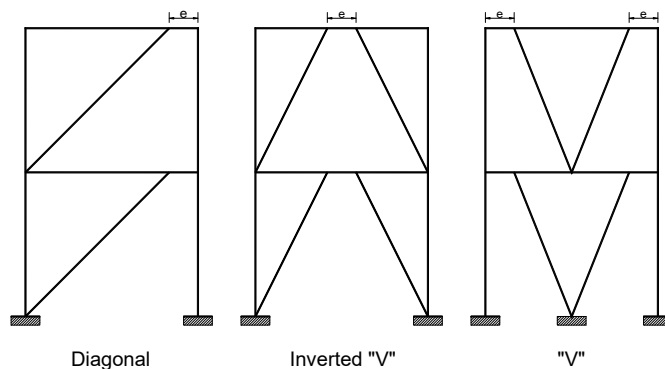
2.2. Sistem Struktur Rangka *Bracing*

2.2.1. Sistem Rangka *Bracing* Eksentrik (*Eccentrically Braced Frame*)

Sistem struktur rangka *bracing* eksentrik adalah sistem *bracing* yang mengombinasikan kekakuan dan kekuatan sistem rangka dengan karakteristik penyimpangan energi secara inelastic dari sistem rangka pemikul momen. Istilah eksentrik digunakan karena ujung batang dari *bracing* dirancang memiliki eksentrisitas yang biasanya berada pada balok. Bagian eksentrik pada balok dikenal sebagai link, dimana komponen ini berperan sebagai sekring dalam struktur.

Elemen *link* akan terlebih dahulu mengalami leleh melalui cara lentur dan atau geser sebelum terjadi tekuk pada bagian elemen yang mampu menyerap energi dari gempa dan mengalami proses plastifikasi pada segmen elemen yang mengalami rusak tersebut sebagai sarana pemancaran energi (Amirsyah & Zulkarnain, 2019).

Bentuk-bentuk sistem portal *Eccentrically Braced Frame* (EBF) dapat dilihat pada gambar 2.1



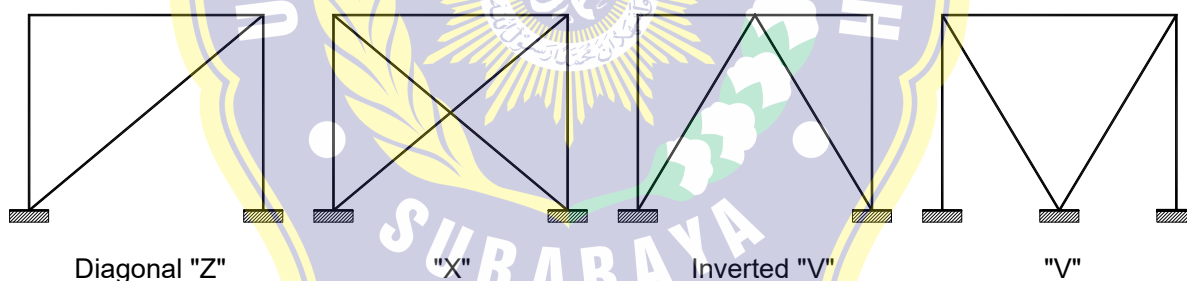
Gambar 2. 1 Ragam bentuk *bracing* Eksentrik

Sumber: (Hutahaean, 2016)

2.2.2. Sistem Rangka Bracing Konsentrik (*Concentrically Bracing System*)

Concentrically Bracing System (CBF) adalah sistem struktur yang menggunakan elemen *bracing* diagonal untuk menahan gaya lateral akibat beban gempa atau angin, di mana sumbu elemen *bracing* berpotongan atau hampir berpotongan pada satu titik dengan sumbu balok dan kolom di dalam satu *joint*. Dengan demikian, gaya aksial pada elemen *bracing* bekerja secara konsentris terhadap titik pertemuan sendi struktur. Sistem ini berfungsi meningkatkan kekakuan lateral dan kapasitas struktur terhadap beban gempa (Santi & Hutahaean, 2016).

Pada umumnya *bracing* konsentrik mempunyai bentuk Z (diagonal), X, V, dan inverted V yang dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2. 2 Ragam bentuk *bracing* konsentrik

Sumber: (Aryandi & Herbudiman, 2017)

- *Bracing* tipe Z (diagonal)

Bracing diagonal Z adalah tipe rangka penahan gaya lateral dimana batang diagonal tersusun sedemikian rupa hingga terlihat seperti huruf Z pada bidang rangka. Sistem ini terbentuk dari dua batang diagonal yang saling bersilangan namun tidak bertemu di tengah bentang, melainkan saling bersambung melalui batang balok. *Bracing* Z mampu memberikan kekakuan lateral yang lebih baik di banding rangka tanpa *bracing*, sehingga mengurangi deformasi lateral. struktur dengan jenis *bracing* Z (diagonal) memiliki perpindahan (*displacement*) lebih kecil dibanding struktur tanpa *bracing* (Kristian et al., 2024).

- *Bracing Tipe X*

Bracing tipe X adalah konfigurasi penahan gaya lateral di sebuah kerangka struktur dimana dua batang diagonal saling menyilang membentuk pola “X” di antara kolom dan balok. Salah satu batang diagonal bekerja dalam tarik (*tension*) dan yang satunya lagi dalam tekan (*compression*) saat terjadi gaya lateral seperti gempa. Penggunaan *bracing* X memberikan kekakuan lateral yang tinggi sehingga dapat mengurangi pergeseran (*drift*) struktur secara signifikan (Vivek Kumar et al., 2025). Struktur dengan *bracing* tipe X memiliki nilai momen lentur terkecil dibandingkan tipe *bracing* lainnya. Penambahan *bracing* X juga dapat mengurangi *lateral displacements* yang terjadi pada struktur.

- *Bracing Tipe V*

Konfigurasi sistem pengekang lateral dimana dua batang diagonal menyatu di satu titik balok sehingga membentuk pola seperti huruf “V”. *bracing* tipe ini memberikan kekakuan lateral yang baik dan membantu mengurangi pergeseran antar lantai (*inter-story drift*) serta *displacement* dalam kondisi lateral, terutama dalam bangunan bertingkat menengah.

- *Bracing Inverted V*

Struktur *Bracing Inverted V* merupakan salah satu jenis dari *bracing* konsentrik. Kedua batang diagonal akan sama-sama menahan beban horizontal. Secara arsitektural memungkinkan adanya pintu, jendela atau bagian terbuka ditengah bentang (Repadi et al., 2016). Pada desain *bracing* bentuk *inverted V* panjang batang *bracing* akan menjadi pendek karena akan memiliki tumpuan ditengah balok. Tumpuan ini akan mengurangi deformasi lentur balok, sehingga balok akan menjadi lebih kecil. *Bracing* bentuk *inverted V* selain digunakan untuk menahan beban lateral juga dapat digunakan untuk menahan beban vertikal (Rienanda et al., 2019).

Mekanisme keruntuhan CBF dirancang untuk terjadi pada elemen *bracing* dan pelat buhul yang menghubungkan *bracing* dan ke balok serta kolom. Ketika terjadi gempa yang signifikan, diharapkan terjadi tekuk pada batang *bracing* (karena beban aksial yang ditanggung) sehingga menimbulkan rotasi sudut pada bagian ujung *bracing* yang akhirnya membuat pelat buhul di sambungan ujung *bracing* mengalami leleh (muncul sendi plastis).

Pada CBF salah satu elemen strukturnya akan berfungsi sebagai batang tekan atau batang tarik tergantung pada dampak dari beban lateral yang disebabkan oleh gempa. CBF dapat dibedakan menjadi dua jenis yakni struktur rangka *bracing* konsentrik biasa (*Ordinary Concentrically Braced Frame*) dan struktur rangka *bracing* konsentrik khusus (*Special Concentrically Braced Frame*). *Special Concentrically Braced Frame* (SCBF) dirancang dengan menerapkan metode perancangan kapasitas, dimana *bracing* berperan sebagai sekering sistem. SCBF diharapkan untuk menawarkan kemampuan deformasi inelastis yang berarti, terutamanya saat terjadinya tekuk, serta menghasilkan *bracing* dengan kolom dan penyangganya yang diharapkan tetap dalam kondisi elastis.

2.2.3. Perencanaan Profil *Bracing*

Pemilihan *bracing* sebagai komponen penahan lateral harus memenuhi parameter yang telah diatur oleh SNI 1729-2020.

1. Batang *bracing* harus bersifat kompak ($\lambda < \lambda_p$).

1) Cek kekompakan sayap.

$$\lambda_{sayap} < \lambda_c \text{ sayap}$$

$$\lambda_{sayap} = \frac{B}{2 \times t_f} \quad (2.1)$$

$$\lambda_{sayap} = 0,56 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.2)$$

2) Cek kekompakan badan.

$$\lambda_{badan} < \lambda_c \text{ badan}$$

$$\lambda_{sayap} = \frac{H - (2 \times t_f)}{t_w} \quad (2.3)$$

$$\lambda_{sayap} = 1,49 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.4)$$

2. Cek kelangsingan profil *Bracing*.

a. Rasio kelangsingan

$$= \frac{K \times L}{r_{min}} \quad (2.5)$$

b. Batas rasio kelangsingan

$$= 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.6)$$

c. kontrol kelangsingan profil

$$= \frac{K \times L}{r_{min}} < 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}} < 200 \quad (2.7)$$

3. Perencanaan komponen tarik

Kekuatan tarik desain, $\phi_t P_n$ dan kekuatan tarik izi P_n/Ω_t , komponen struktur tarik harus menjadi nilai terendah yang diperoleh sesuai dengan kondisi batas leleh tarik pada penampang bruto dan keruntuhan tarik pada penampang neto.

a. Untuk leleh tarik pada penampang bruto

$$P_n = F_y A_g \quad (2.8)$$

$$\phi = 0,9 \text{ (DFBT)} \quad \Omega = 1,67 \text{ (DKI)}$$

- b. Untuk keruntuhan tarik pada penampang neto

$$P_n = F_y A_e \quad (2.9)$$

$$\phi = 0,75 \text{ (DFBT)} \quad \Omega = 2 \text{ (DKI)}$$

dengan

A_e = luas neto efektif (mm^2)

A_g = luas bruto dari komponen struktur (mm^2)

F_y = tegangan leleh minimum terspesifikasi (MPa)

F_u = kekuatan tarik minimum terspesifikasi (MPa)

4. Perencanaan komponen tekan

Kekuatan tekan nominal, P_n , harus ditentukan berdasarkan keadaan batas berupa tekuk lentur.

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (2.10)$$

Tagangan kritis F_{cr} , ditentukan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \text{a. Bila } \frac{LC}{r} &\leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ atau } \frac{F_y}{F_e} \leq 2,25 \\ F_{cr} &= \left(0,658 \frac{F_y}{F_e} \right) \times F_y \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \text{b. Bila } \frac{LC}{r} &\leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ atau } \frac{F_y}{F_e} \leq 2,25 \\ F_{cr} &= 0,877 F_e \end{aligned} \quad (2.12)$$

dengan

A_g = luas penampang melintang bruto komponen struktur (mm^2)

E = modulus Elastis baja (200.000 MPa)

F_y = tegangan leleh minimum terspesifikasi untuk tipe baja yang digunakan

r = radius girasi (mm)

2.3. Sendi Plastis

Apabila suatu struktur bangunan menerima beban gempa dengan intensitas tertentu, maka akan terbentuk sendi plastis pada elemen struktur bangunan. Sendi plastis merupakan kondisi dimana elemen struktur kehilangan kemampuan menahan gaya-gaya dalam. Perencanaan struktur harus mengikuti prinsip kolom kuat dan balok lemah, sehingga saat terjadi keruntuhan, bagian yang terlebih dahulu mengalami kegagalan adalah balok. Apabila kolom yang runtuh terlebih dahulu, maka keseluruhan bangunan berpotensi mengalami kehancuran total.

2.4. Pembebanan Struktur

Dalam analisa pembebanan struktur tahan gempa, ada beberapa beban yang perlu di perhitungkan sesuai dengan SNI-1727-2020.

2.4.1. Beban Mati (*Dead Load*)

Menurut SNI-1727-2020, beban mati (*Dead Load*) adalah berat total dari semua bahan konstruksi yang terpasang pada bangunan gedung, seperti dinding, tangga, atap, *finishing* komponen arsitektural, dan elemen struktur lainnya. Beban ini di modelkan secara fisik pada *software*. Dengan kata lain beban tidak perlu di hitung secara manual, tetapi hanya dimodelkan pada *software*.

2.4.2. *Super Imposed Dead Load* (SIDL)

Beban yang umumnya digunakan sebagai beban mati yang tidak dimodelkan pada ETABS sepeerti: beban tembok, pagar, partisi, keramik, elektrikal, dan saluran. Beban tersebut wajib di inputkan kedalam model.

2.4.3 Beban Hidup (*Live Load*)

Menurut SNI-1727-2020, beban hidup (*Live Load*) adalah beban yang disebabkan oleh pgguna dan penghuni bangunan gedung struktur lainnya yang tidak mencakup beban konstruksi dan beban lingkungan. SNI-1727-2020 menetapkan aturan pembebanan, termasuk beban hidup, berdasarkan fungsi gedung.

2.4.4 Beban Gempa (*Earthquake Load*)

Beban gempa merupakan gaya atau tekanan yang ditimbulkan oleh getaran tanah akibat aktivitas gempa bumi, yang kemudian diteruskan ke struktur bangunan dan mempengaruhi kinerja serta kestabilan struktur bangunan. Analisa perhitungan beban gempa rencana yang terjadi pada struktur mengacu pada peraturan gempa SNI 1726-2019, dengan tahapan berikut:

1. Menentukan klasifikasi situs.

Dalam perumusan kriteria desain seismik suatu bangunan di permukaan tanah atau penentuan *amplifikasi* besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs, maka situs tersebut harus diklasifikasikan terlebih dahulu. Tipe kelas situs ditetapkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 klasifikasi Situs.

Kelas situs	Vs (m/detik)	N atau N _{ch}	S _u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥100

Sumber: SNI-1726-2019

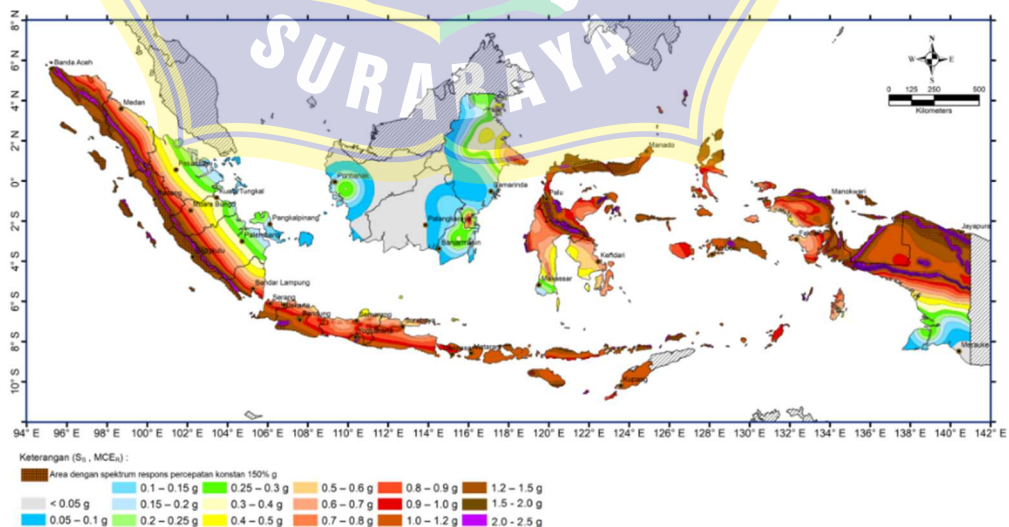
Tabel 2. 1 Klasifikasi Situs (lanjutan).

Kelas situs	Vs (m/detik)	N atau N _{ch}	S _u (kPa)
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut:			
1. Indeks plastisitas, $P_I > 20$.			
2. Kadar air, $w \geq 40\%$			
3. Kuat geser niralir $S_u < 25$ KPa			
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik sebagai berikut:		
	- Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah		
	- Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)		
	- Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $P_I > 75$)		
	Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $s_u < 50$ kPa		

Sumber: SNI-1726-2019

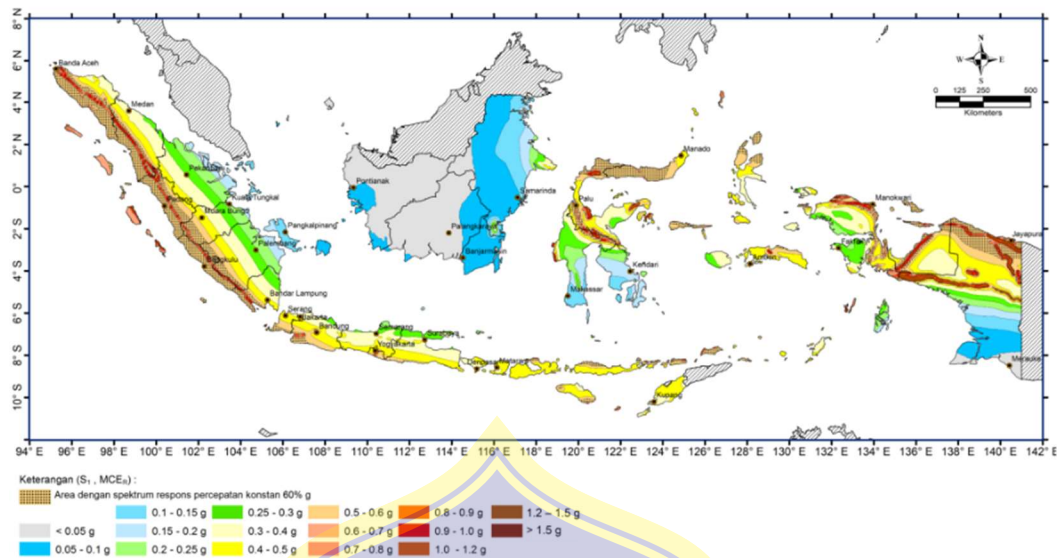
2. Menentukan parameter percepatan gempa S_s dan S_1 .

Parameter S_s (percepatan batuan dasar pada periode pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik) telah ditetapkan menggunakan peta gempa dalam SNI 1726-2019, berikut peta gempa bisa dilihat pada gambar 2.3 dan 2.4



Gambar 2. 3 parameter gerak tanah S_s wilayah Indonesia untuk *spektrum respons* 0,2 detik

Sumber: SNI 1726-2019



Gambar 2. 4 parameter gerak tanah S_1 wilayah Indonesia untuk *spektrum respons* 0,2 detik
Sumber: SNI 1726-2019

3. Menentukan faktor koefisien situs (F_a, F_v).

Faktor amplifikasi meliputi faktor *amplifikasi* getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor *amplifikasi* terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v)

Tabel 2. 2 koefisien Situs, F_a .

Kelas situs	Parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$ detik, S_s				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,88
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^b				

Sumber: SNI 1726-2019

Tabel 2. 3 Koefisien Situs Fv.

Kelas situs	Parameter respon spektral percepatan gempa MCE _R terpetakan pada periode 1 detik, S ₁				
	S ₁ ≤ 0,1	S ₁ = 0,2	S ₁ = 0,3	S ₁ = 0,4	S ₁ ≥ 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	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF			SS ^b		

Sumber: SNI-1726-2019

4. Menentukan parameter (SM_s) dan (SM₁).

Parameter respon spektral percepatan pada periode pendek (SM_s) dan periode 1 detik (SM₁) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, ditentukan dengan perumusan berikut ini:

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s \quad (2.10)$$

$$S_{M1} = F_v \cdot S_1 \quad (2.11)$$

Keterangan

S_s = parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek

S₁ = parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terletak untuk periode 1,0 detik

5. Menentukan parameter SD_s dan SD₁.

Parameter percepatan spektra desain untuk periode pendek, SD_s dan pada periode 1 detik, SD₁, ditentukan melalui persamaan berikut ini:

$$S_{M1} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.12)$$

$$S_{M1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.13)$$

6. Menentukan kategori resiko bangunan berdasarkan fungsinya.

Berdasarkan SNI 1726-2019 untuk kategori risiko struktur bangunan gedung dan non gedung pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan gempa I_e.

Tabel 2. 4 Kategori risiko bangunan gedung dan non-gedung untuk beban gempa.

Jenis pemanfaatan	Kategori resiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: - Fasilitas pertanian, Perkebunan, perternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, II, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantorr - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat berbelanja/ mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - pabrik	II
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia paada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jumpo	III
Gedung dan nongedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi	

Tabel 2. 4 Kategori resiko bangunan gedung dan non-gedung untuk beban gempa (lanjutan)

Jenis pemanfaatan	Kategori resiko
Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran. Gedung dan non gedung yang ditunjukkan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas Pendidikan - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangka air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk kedalam kategori resiko IV.	IV

Sumber: SNI-1726-2019

Tabel 2. 5 Faktor keutamaan gempa.

Kategori resiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Sumber: SNI-1726-2019

7. Menentukan kategori seismik sesuai Tabel 2.6 dan Tabel 2.7.

Tabel 2. 6 kategori desain seismik ($T=0,2$ detik).

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$SDS < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	C	D
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

Sumber: SNI-1726-2019

Tabel 2. 7 kategori desain seismik periode 1 detik.

Nilai S_{D1}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$SD1 < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber: SNI-1726-2019

8. Menentukan kombinasi pembebanan.

Penentuan kombinasi pembebanan mengacu pada SNI 1726-2019 seperti:

- 1,4D
- 1,4D + 1,6L
- $(1,2 + 0,2S_{DS}) D + \rho \times Q_E + L$
- $(0,9 + 0,2S_{DS}) D + \rho \times Q_E$

2.5 Nonlinear Time History Analysis (NLTHA)

Metode NLTHA merupakan metode *nonlinier* yang dikenal lebih handal dan akurat dibanding metode sebelumnya. Hal ini dikarenakan, metode NLTHA bisa memprediksi perilaku struktur bangunan gedung dengan mode shape yang lebih tinggi. Metode ini bisa digunakan pada semua jenis struktur tanpa terkecuali. Ciri khas utama dari metode dengan desain NLTHA adalah menggunakan data *ground motion* (GM) sebagai beban gempanya.

2.5.1 Earthquake Ground Motion

Ground motion adalah hasil rekaman yang merekam pergerakan gempa dengan menggunakan *seismometer* atau *seismograph*. *Ground motion* (GM) yang diperoleh umumnya berupa dua *ground motion* arah horizontal yang saling tegak lurus (H1 & H2) dan satu *ground motion* arah vertikal (V). pada analisis struktur bangunan tahan gempa, *ground motion* yang umum digunakan adalah *ground motion* arah horizontal dengan dengan asumsi arah x dan arah

y. dapat diasumsikan struktur bangunan menerima gempa dari dua arah yang saling tegak lurus dalam waktu bersamaan. Sementara itu, *ground motion* arah vertikal hanya digunakan pada kasus tertentu, contohnya untuk struktur yang memikul *sensitive equipment*, struktur kantilaver bentang panjang dan fasilitas industri yang memikul *massive equipment*, dimana struktur tersebut rawan rusak bila terjadi gempa arah vertikal.

Pemilihan *ground motion* yang tepat merupakan salah satu parameter penting dalam proses analisis NLTHA. Semakin banyak *ground motion* yang digunakan maka akan memperoleh hasil yang tepat dan semakin akurat. Apabila mengacu pada ASCE 7-2016 atau SNI 1726-2019 jumlah minimal *ground motion* yang digunakan dalam analisis NLTHA adalah 11 *ground motion*.

Dalam analisis linier (desain) atau analisis nonlinier (analisis) *ground motion* digunakan sebagai beban gempa. Tidak semua daerah didunia ini memiliki data *ground motion*, oleh karena itu dalam analisis beban gempa akan ada proses *ground motion modification* yang bertujuan untuk menyamakan intensitas gempa suatu tempat dengan *ground motion* yang digunakan (yang bersumber dari tempat lain). Ada dua macam metode *modification ground motion* yaitu: *amplitude scale* dan *spectral matching*.

2.5.2 *Amplitude-scaled*

Amplitude-scaled adalah salah satu metode yang digunakan untuk modifikasi *ground motion* dalam analisis NLTHA. Jenis metode ini hanya mengubah *amplitude* dari *response spectrum* dari *ground motion*. Dalam arti lain, bentuk *spectra* dan *ground motion* tidak berubah secara signifikan. Setelah *ground motion* di modifikasi dengan diskala (*scaled*), tidak ada perubahan dari segi *pattern* (pola) namun terjadi peningkatan pada *amplitudanya*. Ada beberapa poin penting terkait metode *amplitude* menurut ketentuan ASCE/SEI 7-16 dan SNI 1726-2019 sebagai berikut:

- Ground motion* horizontal yang digunakan terdiri dari dua komponen arah yang saling tegak lurus (arah x dan arah y)
- Setiap *ground motion* akan menghasilkan *response spectrum* (arah x dan arah y)
- Dalam proses *scaling*, *response spectrum* yang digunakan merupakan nilai *geomean* yang memenuhi syarat SNI 1726-2019; Pasal 11.2.3.2.
- Nilai *geomean* dari semua *spectrum* tidak boleh lebih kecil dari 90% target *response spectrum* sesuai *periode range*.
- Komponen vertikal dari setiap *ground motion* vertikal harus diskalakan sehingga rata-rata *response spectrum* vertikal menyelubangi target *response spectrum* arah vertikal sesuai *range periode*.

2.5.3 *Spectral Matching*

Dengan menggunakan metode *spectral matching*, *response spectrum* atau pun *ground motion*, keduanya mengalami perubahan yang signifikan baik dari segi bentuk maupun pola. Setelah dilakukan proses *matching* maka bentuk dan pola *response spectrum* mengikuti pola dari target *response spectrum*. Bersamaan dengan itu bentuk dan pola *ground motion* dari *response spectrum* tersebut juga mengalami perubahan. *Ground motion (matched)* inilah yang

akan digunakan sebagai beban gempa dalam proses NLTHA. Jenis algoritma yang digunakan dalam *spectral matching* adalah *wavelet algorithm*. Dalam aplikasinya, proses *spectra matching* lebih banyak menggunakan *software*, yaitu *SeismoMatch*. Bila mengacu pada ASCE/SEI atau SNI 1726-2019 beberapa poin penting terkait *spectral matching*, sebagai berikut:

- a. *Ground motion* horizontal yang digunakan terdiri dari dua komponen arah yang saling tegak lurus (arah x dan arah y)
- b. Setiap *ground motion* akan menghasilkan *response spectrum* (arah x dan arah y)
- c. Dalam proses *spectral matching*, *response spectrum* yang digunakan merupakan nilai geomean dengan menggunakan persamaan

$$\begin{aligned} T_{min} &\leq T \leq T_{max} \\ 0,2T_1 &\leq T \leq 2T_1 \end{aligned} \quad (2.14)$$

- d. Tiap pasang dari *ground motion* harus dimodifikasi (*matched*) hingga nilai geomean yang dihasilkan (pada *range period*) dari tiap pasangan *ground motion* sama dengan atau lebih besar dari 110% target *response spectrum*.
- e. Bila vertikal *ground motion* digunakan, maka hasil *matching* tidak boleh lebih kecil dari target *response spectrum*.

2.6 Performance Assessment

Parameter yang digunakan sebagai kriteria *performance assessment* dalam penelitian ini mencakup *displacement ductility* ($\mu_\phi, \mu_\varepsilon, \mu_\Delta$) dan *system parameters* (R, Ω, C_d). Parameter-parameter ini akan di evaluasi pada bangunan yang dianalisis menggunakan metode *Nonlinear Time History Analysis* (NLTHA). Evaluasi ini bertujuan untuk menilai respons struktur saat menerima beban layanan atau dalam kondisi analisis nonlinier.

1. Displacement Ductility (Δ).

Displacement ductility ini adalah membandingkan *displacement* maksimum (Δ_m) terhadap *displacement* saat struktur mengalami leleh (Δ_y).

2. System parameters.

Parameter yang ditinjau kembali disaat analisis NLTHA, yang meliputi *overstrength* (Ω_0), *reduction factor* (R) dan *deflection amplification factor* (C_d). berikut penjelasan dari parameter tersebut adalah sebagai berikut:

a. Overstrength (Ω_0).

Overstrength adalah rasio antara gaya geser pada saat *displacement* plastis maksimum (*Apparent Strength*) terhadap gaya geser saat struktur pertama kali mengalami leleh (*design strength*). Dalam analisa NLTHA, nilai *overstrength* akan dihitung untuk dibandingkan dengan SNI 1726-2019; Tabel 12. Jika nilai *overstrength* dari analisis NLTHA lebih kecil di bandingkan dengan SNI 1726-2019, maka dapat diartikan kekuatan aktual struktur lebih kecil dibandingkan rencana desain awal, begitu sebaliknya.

b. Reduction factor (R).

Reduction factor adalah perbandingan rasio antara nilai gaya geser pada *displacement* maksimum dalam kondisi elastis (*elastic strength demand*) terhadap nilai gaya geser saat struktur pertama kali mengalami leleh (*design strength*). Dalam analisa NLTHA, nilai *R* yang dihitung akan dibandingkan dengan yang ada pada SNI 1726-2019. Jika nilai *R* yang diperoleh lebih kecil dibandingkan dengan SNI 1726-2019, maka kekuatan aktual struktur lebih besar dibandingkan rencana desain awal, begitu juga sebaliknya.

c. *Deflection amplification factor* (C_d).

Adalah faktor yang besaran simpangan lateral, yang dihitung sebagai perbandingan antara *actual inelastic displacement demand* (Δ_I) dan *design displacement demand* (Δ_D). Dalam analisa NLTHA, jika nilai C_d yang diperoleh dari hasil analisis NLTHA lebih kecil dibandingkan dengan SNI 1726-2019, maka dapat diartikan kekuatan aktual struktur lebih besar dibandingkan rencana desain awal, begitu juga sebaliknya.

2.7 kriteria penerimaan (*acceptance criteria*)

Parameter *acceptance criteria* yang digunakan pada penelitian ini adalah *story drift* (Δ), *story drift ratio*, serta *residual* dan *transient drift*. Berikut parameter yang akan di analisis menggunakan metode *nonlinier time history analysis*.

1. *Story drift*

Merupakan perpindahan lateral relatif antara dua tingkat bangunan yang berdekatan atau simpangan horizontal pada setiap tingkat bangunan yang diukur relatif terhadap lantai bawahnya.

2. *Story drift ratio*

Merupakan perbedaan nilai deformasi antara dua tingkat yang berdekatan yang dibagi dengan tinggi antar tingkat pada gedung tersebut.

3. *Residual story drift ratio*

Residual story drift ratio merupakan parameter yang menggambarkan besar kecilnya deformasi permanen yang dimiliki suatu struktur gedung setelah mengalami beban seismik berupa gempa. Nilai ini menunjukkan perubahan posisi struktur yang tidak dapat kembali ke kondisi semula karena adanya perpindahan akibat gempa.

2.8 Penelitian Terdahulu

Berikut penelitian terdahulu yang menjadi landasan dan acuan dalam pemetaan konsep penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 8 Peneltian terdahulu

Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian			Kesimpulan
Weri Afrizal, dkk (2025)	Analisa Penggunaan Terhadap Kinerja Beton Bertulang Bangunan Bertingkat	Pengaruh <i>Bracing</i> Struktur Pada		Pada hasil penelitian ini menunjukan bahwa gaya dalam terbesar terjadi pada bangunan tanpa <i>bracing</i> dan momen yang bekerja pada balok tanpa menggunakan <i>bracing</i> 57,536% lebih besar dari pada yang menggunakan <i>bracing</i> tipe-X dan 55,817% lebih besar dari bangunan yang menggunakan <i>bracing</i> <i>Inverted-V</i> . bangunan tanpa <i>bracing</i> dikategorikan <i>immediate occupancy</i> karena nilai total <i>drift</i> kurang dari 0,01 dan <i>inelastic drift</i> kurang dari 0,005.
Ameliana Salwa, dkk (2025)	Pengaruh Bentuk Terhadap Kinerja Beton Bertulang Beban Gempa	<i>Bracing</i> Struktur Akibat		Pada hasil penelitian ini menunjukkan bahwa struktur <i>existing</i> memenuhi batas simpangan antar lantai yang diizinkan dengan nilai cukup besar, sedangkan model <i>bracing</i> memenuhi persyaratan dengan nilai tidak besar. Deformasi maksimum tanpa <i>bracing</i> 100,27 mm (arah Y), sementara <i>bracing</i> X hanya sebesar 51,48 mm (arah Y), simpangan antar lantai juga mengalami signifikan, <i>bracing</i> X memberikan hasil paling efektif dengan pengurangan sebesar 50,26% pada arah x dan 75,13% pada arah y. penurunan simpangan ini mencerminkan peningkatan penyerapan energi oleh struktur. Secara keseluruhan, <i>bracing</i> X terbukti sebagai konfigurasi <i>bracing</i> paling efektif dalam meningkatkan kinerja seismik bangunan berdasarkan parameter deformasi dan simpangan antar lantai.

Tabel 2. 8 Penelitian terdahulu (lanjutan)

Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Kesimpulan
Amer Yassin & Kabir Sadeghi, (2023)	<i>Structure Behaviour under Seismic loads using X-Bracing, Inverted V-Bracing Systems and without Bracing</i>	Dalam penelitian ini, beberapa parameter seismik utama yang analisis dan dibandingkan meliputi <i>Maximum Story Drift</i> (simpangan antar lantai maksimum), <i>Stiffness Factor</i> (faktor kekakuan), dan <i>Displacement</i> (perpindahan), yang seluruhnya di evaluasi menggunakan <i>Pushover analysis</i> . Hasil penelitian menunjukkan bahwa rangka yang dilengkapi dengan sistem <i>bracing</i> X lebih efisien dan memiliki kinerja seismik terbaik. Penelitian ini juga meninjau pemasangan <i>bracing</i> pada bentang tengah dan pada dua bentang berbeda. Hasilnya menunjukkan pemasangan <i>bracing</i> pada dua bentang memberikan sedikit keunggulan dalam kinerja struktur.
Elfin Nur Fitriyati & Retno Trimurtiningrum, (2022)	Studi Perbandingan Perilaku Sistem Rangka <i>Bracing</i> Tipe X-1 dan Tipe X-2 Pada Gedung Perkuliahan 10 Lantai	Pada hasil penelitian ini struktur <i>bracing</i> tipe X-1 (WF 250 x 250 x 9 x 14) memiliki nilai simpangan sebesar 0,1007 mm, nilai simpangan antar lantai sebesar 0,1893 mm dan nilai periode struktur 1,72893 detik, nilai simpangan ini lebih kecil dibandingkan <i>bracing</i> tipe X-2 (WF 350 x 350 x 12 x 19) sebesar 0,1086 mm, nilai simpangan antar lantai sebesar 0,2627 mm dan periode struktur 1,89002 detik. Dalam penggunaan <i>bracing</i> tipe X-1 memiliki efek P-Delta sebesar 0,021, lebih kecil dari pada <i>bracing</i> tipe X-2 sebesar 0,248.

Tabel 2. 8 Penelitian terdahulu (lanjutan)

Peneliti (Tahun)		Judul Penelitian			Kesimpulan
Julita Repadi, (2016)	Andrini dkk	Analisis Beton Variasi	Kinerja Bertulang Penempatan	Struktur Dengan <i>Bracing Inverted V</i>	pada hasil penelitian ini perkuatan dengan <i>bracing inverted V</i> mampu mengurangi nilai <i>displacement</i> dan daktilitas struktur beton bertulang. Penurunan <i>bracing</i> mengurangi periode struktur bangunan, pengurangan nilai <i>displacement</i> pad arah X sebesar 1.328% - 42.013% arah Y sebesar 10.00% - 39.394%. nilai daktilitas struktur mengalami peningkatan dibandingkan dengan gedung tanpa <i>bracing</i> . Taraf kinerja struktur bangunan aman. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan <i>bracing</i> dapat meningkatkan kekakuan, kekuatan dan stabilitas struktur.

Sumber: Hasil analisis (2026)