

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Teori

2.1.1 Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) adalah sistem struktur untuk menahan momen lentur yang besar dengan prinsip *Strong Column Weak Beam* (SCWB). Prinsip ini mendesain sendi plastis terbentuk di balok, sehingga dapat terjadi disipasi energi gempa. Elemen struktur lain, seperti kolom dirancang lebih kuat agar tidak mengalami sendi plastis atau keruntuhan geser yang bisa berakibat fatal pada struktur (Zachari & Turuallo, 2020). Bila kolom lebih kuat daripada balok, maka tidak terjadi keruntuhan mendadak. Tapi jika kolom lebih lemah, dapat terjadi *soft story effect* (Zachari & Turuallo, 2020).

2.1.2 Sistem Ganda

Sistem ganda merupakan sistem gabungan antara rangka pemikul momen dan sistem lain seperti dinding geser. Menurut SNI 1726:2019, sistem rangka pemikul momen harus menahan minimal 25% dari gaya gempa desain. Tujuan dari ketentuan ini adalah untuk memastikan ada penahan gaya gempa tambahan sehingga dapat bangunan tetap mampu menopang beban layan setelah terjadi gempa besar, bahkan jika dinding geser mengalami kerusakan.

2.1.3 Peraturan SNI 1726:2019

SNI 1726:2019 adalah standar yang mengatur tentang perhitungan beban gempa, pemasukan beban gempa di struktur, dan cara mengecek bangunan apakah sudah kuat terhadap beban gempa atau belum, termasuk ketidakberaturan bangunan tersebut. Standar ini digunakan sebagai pedoman dalam merancang struktur tahan gempa di Indonesia.

2.1.3.1. Kategori Risiko Bangunan

Kategori ini dibagi menjadi beberapa kelompok berdasarkan pemanfaatan bangunan tersebut. Pembagian ini terdapat di tabel 2.1 di bawah ini. Kategori risiko ini menentukan faktor keutamaan gempa (I_e) yang dijabarkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1 *Kategori risiko bangunan*

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: <ul style="list-style-type: none">- Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan- Fasilitas sementara- Gudang penyimpanan- Rumah jaga dan struktur kecil lainn	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none">- Perumahan- Rumah toko dan rumah kantor- Pasar- Gedung perkantoran- Gedung apartemen/ rumah susun- Pusat perbelanjaan/ mall- Bangunan industri- Fasilitas manufaktur- Pabrik	II
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none">- Bioskop- Gedung pertemuan- Stadion- Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat- Fasilitas penitipan anak- Penjara- Bangunan untuk orang jompo	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: <ul style="list-style-type: none">- Pusat pembangkit listrik biasa- Fasilitas penanganan air	

- Fasilitas penanganan limbah
- Pusat telekomunikasi

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 nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas IV yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:

- Bangunan-bangunan monumental
- Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan
- Rumah ibadah
- Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat
- Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat
- Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya
- Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat
- Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat
- Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki 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 nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 2.2 Faktor Keutamaan gempa

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

Sumber: SNI 1726:2019

2.1.3.2. Klasifikasi Situs

Klasifikasi situs ini dilakukan berdasarkan kondisi tanah tempat terbangunnya gedung yang dikaji. Klasifikasi situs diuraikan dalam Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.3 *Klasifikasi situs*

Kelas situs	\bar{V}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{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
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:		
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 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 berikut: <ul style="list-style-type: none"> - 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) 		

Sumber: SNI 1726:2019

2.1.3.3. Parameter Percepatan Gempa

Dalam perancangan bangunan yang tahan gempa, dua parameter utama adalah S_s dan S_1 . Parameter S_s adalah percepatan respon spektral periode pendek (0,2 detik). Sedangkan parameter S_1 adalah percepatan respon spektral pada periode 1. Parameter ini didapat dari respons spektral percepatan 0,2 & 1 detik dalam peta gerak tanah seismik dengan probabilitas 2% dalam 50 tahun, yang dikenal sebagai *Maximum Considered Earthquake Risk* (MCER).

2.1.3.4. Koefisien Kelas Situs

Untuk menentukan respons spektral percepatan gempa MCER, diperlukan F_a (faktor amplifikasi percepatan periode pendek) dan F_v (faktor amplifikasi percepatan periode 1 detik). Faktor amplifikasi ini digunakan untuk menyesuaikan percepatan spektra terhadap pengaruh kondisi tanah atau

klasifikasi situs. Parameter S_{MS} (percepatan respons spektral untuk periode pendek yang disesuaikan dengan klasifikasi situs) dan S_{M1} (percepatan respons spektral untuk periode 1 detik yang disesuaikan dengan klasifikasi situs) dihitung dengan mengalikan nilai percepatan dasar pada masing-masing periode dengan faktor F_a dan F_v sesuai Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2, sehingga menghasilkan respons percepatan yang lebih akurat sesuai dengan karakteristik tanah setempat.

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (2.1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2.2)$$

Faktor F_a dan F_v ditentukan sesuai Tabel 2.4 dan 2.5.

Tabel 2.4 Koefisien situs, F_a

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS					

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 2.5 Koefisien situs, F_v

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS					

Sumber: SNI 1726:2019

2.1.3.5. Parameter percepatan spektral desain

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}) dan untuk periode 1 detik (S_{D1}) digunakan untuk menghitung respons struktur

terhadap gempa. Nilai S_{DS} dan S_{D1} ditentukan dengan Persamaan 2.3 dan persamaan 2.4.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.4)$$

2.1.3.6. Kategori desain seismik

Kategori desain seismik ditentukan berdasarkan parameter percepatan spektral desain, yaitu S_{DS} untuk periode pendek dan S_{D1} untuk periode 1 detik, serta kategori risiko struktur. Semakin tinggi nilai parameter dan kategori risiko suatu bangunan, semakin tinggi kategori desain seismik, dan semakin ketat persyaratan yang harus dipenuhi supaya struktur dapat menahan beban gempa.

Tabel 2.6 Kategori desain seismik berdasarkan S_{DS}

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	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 berdasarkan S_{D1}

Nilai S_{D1}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	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

2.1.3.7. Periode Alami Struktur

Periode alami struktur (T) bisa didapatkan dari hasil perhitungan Software Robot Structural Analysis Pro dengan syarat tidak boleh melebihi hasil kali koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dengan nilai periode fundamental pendekatan (T_a) seperti Persamaan 2.5.

$$T < C_u T_a \quad (2.5)$$

Tabel 2.8 Koefisien Pembatas (C_u)

Parameter percepatan respon spektra desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien Pembatas (C_u)
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

Sumber: SNI 1726:2019

Periode fundamental pendekatan (T_a) dapat ditentukan dengan Persamaan 2.6.

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.6)$$

Nilai C_t dan x dapat dilihat dari Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Nilai parameter periode pendekatan C_t dan x

Tipe struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka pemikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:	0,0724	0,8
<ul style="list-style-type: none"> • Rangka baja pemikul momen • Rangka beton pemikul momen 	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Sumber: SNI 1726:2019

Nilai periode alami struktur yang digunakan untuk desain dan analisis *drift*, ditentukan dengan syarat yang ada di Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Periode yang digunakan

Kondisi	Periode untuk desain	Periode untuk analisis <i>drift</i>
$T_{komputasi} \leq T_a$	T_a	T_a
$T_a < T_{komputasi} < C_u T_a$	$T_{komputasi}$	$T_{komputasi}$
$T_{komputasi} \geq C_u T_a$	$C_u T_a$	$T_{komputasi}$

Sumber: SNI 1726:2019

2.1.3.8. Gaya Geser Dasar Gempa

Gaya geser dasar akibat gempa bumi dihitung berdasarkan Persamaan 2.7.

$$V = C_s W \quad (2.7)$$

Koefisien respons gempa (C_s) dapat dihitung sesuai dengan Persamaan 2.8.

$$C_s = \frac{S_{DS}}{(R/I_e)} \quad (2.8)$$

Selanjutnya adalah mendistribusikan ke semua tingkat menjadi gaya gempa lateral (F_x), yang besarnya ditentukan dengan Persamaan 2.9.

$$F_x = C_{vx} V \quad (2.9)$$

Dengan faktor distribusi vertikal (C_{vx}) didapat dari Persamaan 2.10.

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2.10)$$

2.1.3.9. Simpangan Antar Lantai

Simpangan antar lantai merupakan selisih perpindahan lateral antara dua lantai yang kemudian dibagi dengan tinggi lantai, seperti Persamaan 2.11.

$$\Delta = \frac{\delta_x - \delta_{x-1}}{h} \quad (2.11)$$

Menurut SNI 1726:2019, simpangan ini awalnya dihitung dari hasil analisis elastik linier yang menghasilkan *elastic displacement*, yaitu perpindahan struktur akibat gempa desain tanpa mempertimbangkan perilaku inelastik. Untuk memperkirakan perpindahan aktual saat terjadi gempa besar, simpangan elastik ini perlu dikalikan dengan faktor C_d (*displacement amplification factor*) dan dibagi oleh faktor keutamaan. Hasil perkalian ini disebut sebagai *amplified displacement*, yang digunakan untuk memastikan simpangan antar lantai yang dialami struktur masih dalam batas aman.

Batas simpangan antar lantai ditentukan sesuai dengan Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Batas simpangan elastik

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-	0,025h	0,02h	0,015h

Struktur	Kategori Resiko		
	I atau II	III	IV
langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.			
Struktur dinding geser kantilever batu bata	0,01h	0,01h	0,01h
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007h	0,007h	0,007h
Semua struktur lainnya	0,02h	0,015h	0,01h

Sumber: SNI 1726:2019

2.1.3.10. Efek P-Delta

P-Delta merupakan pengaruh tambahan pada struktur yang terjadi akibat beban aksial (p) berinteraksi dengan perpindahan lateral (Δ) sehingga menghasilkan momen tambahan yang memengaruhi stabilitas struktur. Menurut SNI 1726:2019, efek P-Delta tidak perlu diperhitungkan jika koefisien stabilitas (θ) kurang dari atau sama dengan 0. Nilai θ dihitung dengan Persamaan 2.12.

$$\theta = \frac{P_x \Delta I_e}{V_x h_{sx} C_d} \quad (2.12)$$

Keterangan:

P_x = gaya aksial tekan vertikal di tingkat tersebut

Δ = simpangan antar lantai

V_x = gaya geser seismik

h_{sx} = tinggi tingkat

C_d = faktor pembesaran gempa

Struktur perlu didesain ulang apabila nilai koefisien stabilitas (θ) melebihi batas stabilitas struktur (θ_{max}) yang dihitung dengan Persamaan 2.13.

$$\theta_{max} = \frac{0,5}{\beta C_d} \leq 0,25 \quad (2.13)$$

Keterangan:

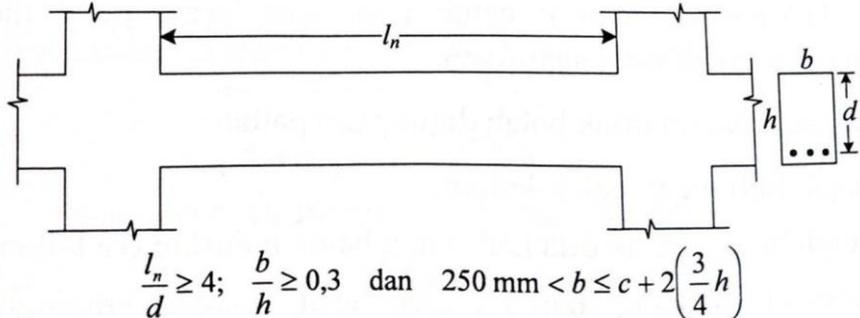
β = rasio kebutuhan geser terhadap kapasitas geser, diizinkan bernilai 1

2.1.4 Spesifikasi Perencanaan Elemen Pemikul Beban Gempa (SNI 2847:2019)

2.1.4.1. Balok

Balok adalah bagian dari struktur yang berfungsi sebagai penyalur momen menuju struktur kolom. Untuk struktur rangka pemikul momen khusus (SRPMK) terdapat beberapa persyaratan perencanaan elemen balok sebagai berikut:

1. Persyaratan gaya dan geometri
 - a. Bentang bersih komponen struktur tidak boleh kurang dari empat kali tinggi efektifnya
 - b. Perbandingan lebar terhadap tinggi komponen struktur tidak boleh kurang dari 0,3.
 - c. Lebar penampang haruslah:
 - a. ≥ 250 mm
 - b. \leq lebar kolom ditambah jarak pada tiap sisi kolom yang tidak melebihi tiga per empat tinggi komponen struktur lentur.



Gambar 2.1 Ketentuan dimensi penampang balok

2. Persyaratan Tulangan Lentur

Ada beberapa persyaratan tulangan lentur pada balok sebagai komponen lentur SRPMK diantaranya adalah:

- a. Masing-masing luas tulangan atas dan bawah harus lebih besar dari

luas tulangan minimum yang dipersyaratkan yaitu $A_s \geq \frac{\sqrt{f_c'}}{4f_y} bd$ atau

$A_s \geq \frac{1,4}{f_y} bd$ dengan b dan d masing-masing adalah lebar dan tinggi

efektif penampang komponen lentur.

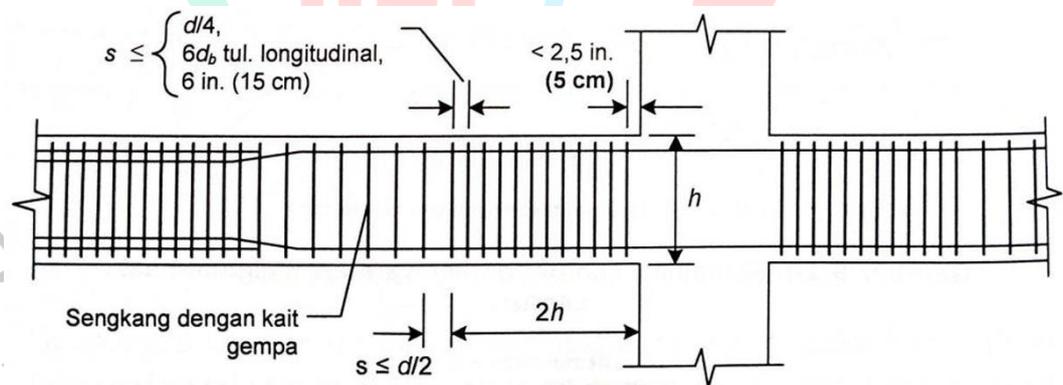
- b. Rasio tulangan lentur maksimum ρ_{maks} dibatasi sebesar 0,025. Selain itu pada penampang harus terpasang secara menerus minimum dua batang tulangan atas dan dua batang tulangan bawah. Rasio tulangan dicek dengan Persamaan 2.14.

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \leq 2,5\% \quad (2.14)$$

3. Persyaratan Tulangan Transversal

Persyaratan yang harus dipenuhi untuk pemasangan tulangan Sengkang, seperti yang terlihat pada gambar 2.2:

- a. Sengkang tertutup pertama harus dipasang tidak lebih dari 50 mm dari muka tumpuan.
- b. Spasi sengkang pada zona plastis tidak boleh melebihi:
 - c. $d/4$
 - d. enam kali diameter terkecil tulangan memanjang
 - e. 150 mm
- c. Spasi sengkang di luar zona plastis tidak boleh melebihi $d/2$



Gambar 2.2 Persyaratan tulangan transversal

4. Persyaratan Kuat Geser

Kuat geser perlu V_e untuk perencanaan geser bagi komponen struktur lentur SRPMK harus ditentukan dari peninjauan gaya statik pada komponen struktur antara dua muka tumpuan. V_e dapat dihitung dengan Persamaan 2.15

$$V_e = V_g + V_{pr} \quad (2.15)$$

Nilai V_{pr} dapat dicari dengan Persamaan 2.16

$$V_{pr} = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{L_n} \quad (2.16)$$

V_e = gaya geser ultimit balok akibat gempa

M_{pr1} = *moment probable* di perletakan 1 akibat goyangan ke kiri atau kanan

M_{pr2} = *moment probable* di perletakan 2 akibat goyangan ke kiri atau kanan

V_g = gaya geser gravitasi akibat $1,2D + 1,0L$

Momen ujung M_{pr} (*probable moment capacity*) dihitung berdasarkan nilai kuat tarik baja tulangan yang telah diperbesar dengan menerapkan faktor kuat lebih bahan, yaitu $1,25f_y$. Perencanaan geser dilakukan dengan mengasumsikan bahwa baik beton maupun baja tulangan transversal sama-sama berkontribusi dalam menahan gaya geser rencana yang terjadi. Namun khusus untuk daerah yang berpotensi membentuk sendi plastis yaitu di sepanjang $2h$ dari muka kolom), tulangan transversal harus dirancang untuk menahan kuat geser perlu dengan menganggap kontribusi penampang beton dalam menahan geser (V_c) = 0 selama:

- Gaya geser akibat gempa mewakili setengah atau lebih dari kuat geser perlu maksimum di sepanjang daerah tersebut

$$V_{pr} \geq \frac{1}{2} V_e \quad (2.17)$$

- Gaya aksial tekan terfaktor pada penampang, termasuk akibat gempa, lebih kecil dari $A_g f_c' / 20$

$$P_u < \frac{A_g f_c'}{20} \quad (2.18)$$

2.1.4.2. Kolom

Kolom merupakan salah satu elemen yang sangat penting dalam struktur bangunan. Kerusakan pada kolom dapat menyebabkan keruntuhan total karena bisa merusak tingkat lantai tertentu sehingga akan menyebabkan runtuhnya lantai-lantai di atasnya. Mengingat pentingnya kolom dalam stabilitas struktur, maka terdapat beberapa persyaratan detailing dalam perencanaan desain kolom SRPMK.

1. Persyaratan Geometri

- a. Ukuran penampang terkecil tidak kurang dari 300 mm.
- b. Perbandingan antara ukuran terkecil penampang terhadap ukuran dalam arah tegak lurus nya tidak kurang dari 0,4.

2. Persyaratan Tulangan Lentur

Prinsip *strong column, weak beam* dalam perencanaan struktur bertujuan untuk memastikan kolom lebih kuat daripada balok agar kerusakan dimulai pada balok, bukan kolom. Untuk itu, total besarnya momen lentur kolom atas dan bawah harus lebih besar atau sama dengan 1,2 kali momen lentur balok kanan dan kiri, seperti Persamaan 2.19.

$$M_n \text{ kolom atas} + M_n \text{ kolom bawah} \geq 1,2 (M_n \text{ balok kanan} + M_n \text{ balok kiri}) \quad (2.19)$$
$$\sum M_n \text{ kolom} \geq 1,2 M_n \text{ balok}$$

3. Persyaratan Tulangan Transversal

Sebelum mendesain tulangan transversal, perlu diketahui terlebih dahulu panjang sendi plastis pada kolom. Sendi plastis ditentukan sepanjang ℓ_0 dari muka tumpuan di atas dan di bawah. Panjang ℓ_0 diambil dari nilai terbesar diantara:

- Tinggi penampang kolom
- $\frac{L_n}{6}$
- 450 mm

Kekangan (*confinement*) pada sepanjang zona sendi plastis diambil dari nilai maksimal antara Persamaan 2.20 dan Persamaan 2.21.

$$- \frac{A_{sh}}{s} = \frac{0,3 b_c f_c'}{f_y} \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \quad (2.20)$$

$$- \frac{A_{sh}}{s} = \frac{0,09 b_c f_c'}{f_y} \quad (2.21)$$

Sedangkan spasi antar kekangan diambil nilai minimum dari:

- $\frac{b}{4}$
- $6d_b$
- $S_0 \rightarrow 100 \leq 100 + \frac{350-h_x}{3} \leq 150 \text{ mm}$

Spasi kekangan (*confinement*) di luar zona sendi plastis diambil nilai minimum dari:

- $6d_b$
- 150 mm

4. Persyaratan Kuat Geser

Untuk zona sendi plastis, perhitungan gaya geser dilakukan dengan Persamaan 2.22.

$$V = \frac{M_{pr,atas} + M_{pr,bawah}}{L_n} \quad (2.22)$$

Dengan nilai $M_{pr,atas}$ dan $M_{pr,bawah}$ diambil dari diagram interaksi dengan nilai f_y diganti menjadi $f_{pr} = 1,25 f_y$.

Kapasitas geser dari tulangan (V_s) dicari dengan Persamaan 2.23.

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.23)$$

V_u = diambil dari nilai terbesar antara output software atau V_u desain

V_c = dicari dengan Persamaan 2.24.

$$0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g} \right) f_c' b d \quad (2.24)$$

N_u = gaya tekan terkecil hasil semua kombinasi beban

Setelah menghitung nilai V_s ,

Jika $V_s > 0$, maka kebutuhan tulangan dihitung dengan Persamaan 2.25.

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_y d} \quad (2.25)$$

Nilai $\frac{A_v}{s}$ diambil dari nilai terbesar diantara 2 syarat nilai minimum pada Persamaan 2.26 dan Persamaan 2.27.

$$- \frac{A_v}{s} \min = 0,062 \sqrt{f_c'} \frac{b}{f_y} \quad (2.26)$$

$$- \frac{A_v}{s} \min = 0,35 \frac{b}{f_y} \quad (2.27)$$

$\frac{A_v}{s}$ ini menjadi syarat tambahan yg harus dipenuhi selain syarat *confinement*. Namun jika nilai $V_s = 0$, maka hanya perlu memenuhi syarat *confinement*.

2.1.4.3. Pelat Lantai

Pelat lantai adalah elemen struktur yang berfungsi untuk menyalurkan beban ke balok. Saat mendesain tulangan, pelat diibaratkan sebagai balok yang lebarnya 1000 mm karena perhitungan momen pada pelat dinyatakan per meter lebar pelat. Kapasitas momen pelat dihitung seperti balok, tapi perbedaannya adalah pelat menyalurkan beban dalam dua arah, yaitu arah sumbu X dan sumbu Y.

Momen yang digunakan untuk mendesain tulangan lentur adalah M_{xx} yang merupakan momen lentur pada sumbu X dan M_{yy} yang merupakan momen lentur pada sumbu Y. Jadi sebagai berikut:

- M_{xx} max (positif): Momen lapangan bawah arah X → untuk menentukan kebutuhan tulangan di lapangan bawah arah X.
- M_{xx} min (negatif): Momen tumpuan atas arah X → untuk menentukan kebutuhan tulangan di tumpuan atas arah X.
- M_{yy} max (positif): Momen lapangan bawah arah Y → untuk menentukan kebutuhan tulangan di lapangan bawah arah Y.
- M_{yy} min (negatif): Momen tumpuan atas arah Y → untuk menentukan kebutuhan tulangan di tumpuan atas arah Y.

Dalam desain tulangan, tulangan lapangan bawah didesain untuk menahan momen positif dan tulangan tumpuan atas didesain untuk menahan momen negatif. Sedangkan tulangan lapangan atas dan tumpuan bawah, momen seringkali mendekati nol. Oleh karena itu, di area ini cukup diberikan tulangan minimum.

Pelat lantai juga perlu dicek terhadap lendutan seketika akibat beban hidup dan lendutan jangka panjang akibat beban mati. Syarat lendutan seketika izin terdapat pada Persamaan 2.28.

$$\delta_{izin} = \frac{l}{360} \quad (2.28)$$

Sedangkan syarat lendutan jangka panjang izin terdapat pada Persamaan 2.29.

$$\delta_{izin} = \frac{l}{240} \quad (2.29)$$

2.1.4.4. Dinding Geser

Dinding geser adalah elemen struktural yang memiliki inersia penampang yang besar dibandingkan dengan kolom. Hal ini membuat dinding geser dapat menambahkan kekakuan lateral dari bangunan sehingga dapat mengurangi simpangan yang terjadi. Dalam mendesain dinding geser, Langkah pertama yang dibutuhkan adalah menghitung kebutuhan tulangan minimum. Tulangan minimum paling tidak mampu menghasilkan kapasitas geser nominal sebesar gaya geser ultimit dibagi dengan ϕ . Berdasarkan nilai kapasitas geser nominal tersebut, dapat ditentukan apakah dinding geser termasuk dalam zona 1, 2, atau 3.

1. Zona 1

Dinding geser masuk ke zona 1 apabila nilai $V_n = \frac{V_u}{\phi} < 0,083A_{cv}\sqrt{f'c}$.

Syarat rasio tulangan longitudinal dinding geser adalah:

- $\geq 0,12\%$ untuk tulangan D16 atau lebih kecil
- $\geq 0,15\%$ untuk tulangan D19 atau lebih besar

Sedangkan syarat rasio tulangan transversal adalah

- $\geq 0,2\%$ untuk tulangan D16 atau lebih kecil
- $\geq 0,25\%$ untuk tulangan D19 atau lebih besar

2. Zona 2

Jika nilai $\frac{V_u}{\phi}$ yang dipikul oleh dinding geser, diantara $0,083 A_{cv}\sqrt{f'c}$ dan $0,17 A_{cv}\sqrt{f'c}$, rasio tulangan longitudinal dan transversalnya harus di atas 0,25%.

3. Zona 3

Jika $\frac{V_u}{\phi}$ di atas $0,17 A_{cv}\sqrt{f'c}$, rasio tulangan longitudinal dan transversalnya juga harus di atas 0,25% dan harus dibuat 2 lapis tulangan. Rasio tulangan longitudinal dan transversal diperoleh dari Persamaan 2.30.

$$\rho_l = \frac{n_{lapis} \times A_s}{t_w \times s} \quad (2.30)$$

n_{lapis}	= Jumlah lapisan
A_s	= Luas tulangan
t_w	= Tebal dinding geser
s	= Spasi tulangan

Kapasitas lentur dinding geser dapat dilihat menggunakan diagram interaksi sedangkan kapasitas geser dapat dicari dengan Persamaan 2.31.

$$V_n = A_{cv} \left(\alpha_c \sqrt{f_c'} + \rho_t f_y \right) \quad (2.31)$$

A_{cv} = Luas penampang melintang

α_c = 0,25 untuk $\frac{h_w}{L_w} \leq 1,5$

= 0,17 untuk $\frac{h_w}{L_w} \geq 2,0$

= bervariasi secara linier antara 0,25 dan 0,17 untuk $1,5 < \frac{h_w}{L_w} < 2,0$

Nilai maksimum dari V_n dihitung dengan Persamaan 2.32.

$$V_{n \max} = 0,66 A_{cv} \sqrt{f_c'} = 3175725 \text{ N} \quad (2.32)$$

Jadi, nilai kapasitas geser yang dipakai adalah nilai terkecil diantara kedua nilai kapasitas geser tersebut.

2.1.5 Analisis Pushover

Analisis pushover adalah analisis yang digunakan dalam perencanaan berbasis kinerja. Hasil analisis ini didapatkan dengan memberikan beban statik lateral dengan nilai beban yang ditingkatkan secara bertahap sehingga dapat mencapai nilai simpangan struktur yang diharapkan atau bahkan struktur mengalami keruntuhan. Hasil yang didapatkan dari analisis tersebut adalah gaya geser dasar (*base shear*) dan simpangan (*displacement*). Nilai-nilai ini divisualisasikan ke dalam kurva kapasitas untuk dapat memberikan gambaran dari perilaku struktur. Hasil dari analisis ini dapat mengkategorikan tingkat kinerja struktur berdasarkan pada titik performa (*performance point*) yang diperoleh dari titik temu antara kurva *earthquake demand* dan *spectrum capacity*, selain itu juga dapat menunjukkan elemen struktur mana yang mengalami kerusakan dari hasil sendi plastis yang terbentuk.

2.1.6 ASCE 41-23

ASCE 41 berkembang dari FEMA 273 dan FEMA 356, dan pertama kali diterbitkan oleh American Society of Civil Engineers (ASCE) pada tahun 2006 dengan nama ASCE/SEI 41-06. ASCE 41 menyusun metodologi evaluasi dan perancangan dengan pendekatan *performance-based design* (Cook & Liel, 2020).

Evaluasi dalam ASCE 41 dapat dilakukan dengan pemodelan linier atau nonlinier serta menggunakan pendekatan statik atau dinamik dalam menilai kinerja struktur terhadap gempa (Sen dkk., 2023). Pada penelitian ini, evaluasi akan dilakukan dengan metode analisis statik nonlinear. Hasil analisis ini menjadi dasar untuk menilai apakah desain perkuatan yang direncanakan telah memenuhi standar kinerja yang ditetapkan.

2.1.6.1 Kinerja Seismik

Kinerja seismik adalah tingkat performa struktur terhadap gempa rencana yang dievaluasi berdasarkan tingkat kerusakan pada struktur akibat gempa rencana. Dalam desain bangunan tahan gempa, kinerja struktur mencerminkan sejauh mana bangunan dapat tetap berfungsi sesuai dengan tingkat kerusakan yang diizinkan setelah mengalami gempa rencana. Kinerja seismik dirancang dengan mempertimbangkan fungsi bangunan serta faktor ekonomis, sehingga tidak hanya berfokus pada keselamatan penghuni, tetapi juga pada batas kerusakan yang dapat diterima serta kemampuan bangunan untuk tetap beroperasi pasca-gempa (Tavio & Wijaya, 2018).

2.1.6.2 Tingkat Kinerja Seismik Elemen Struktur

Berdasarkan ASCE 41-23, tingkatan kinerja seismik elemen struktur adalah sebagai berikut:

1. Immediate Occupancy (IO)

Struktur tetap aman dan dapat beroperasi kembali setelah gempa

2. Life Safety (LS)

Kondisi bangunan rusak namun tidak runtuh masih mempunyai kekuatan cukup untuk memikul beban supaya manusia dapat menyelamatkan diri

3. Collapse Prevention (CP)

Kondisi bangunan berada di ambang batas keruntuhan total

2.1.6.3 Tingkat Bahaya Gempa untuk Gedung Baru

Tingkat gempa yang digunakan untuk bangunan baru menurut standar ASCE 41-23 adalah BSE-1N (*Basic Safety Earthquake-1 for New Buildings*) dan BSE-2N (*Basic Safety Earthquake-2 for New Buildings*). Namun pada penelitian ini hanya Menggunakan BSE-1N yang besarnya adalah dua per tiga dari MCE_R .

2.1.6.4 Target Kinerja Seismik Elemen Struktur

Target kinerja seismik elemen struktur diatur pada pasal 2.4.5 ASCE 41-23 seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.12 di bawah.

Tabel 2.12 *Target kinerja seismik*
Tingkat Bahaya Gempa untuk Gedung Baru

Kategori Resiko	BSE-1N
I and II	Life safety
III	Damage Control
IV	Immediate Occupancy

Sumber: ASCE 41-23

2.1.6.5 *Practical Approach for Nonlinear Modeling of Structures*

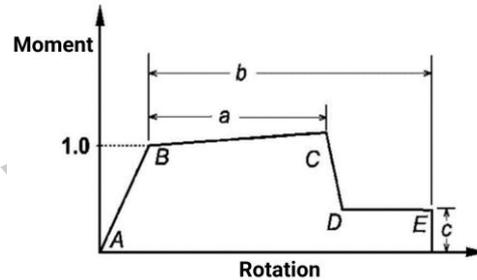
Terdapat 3 cara pemodelan nonlinear pada struktur (Mazhar dkk., 2021):

1. Nonlinear Modeling of Material, yaitu metode yang mendefinisikan perilaku inelastis pada tingkat material. Metode ini biasanya dimodelkan menggunakan pendekatan fiber modeling.
2. Nonlinear Modeling of Cross Sections, yaitu metode yang mendefinisikan perilaku inelastis pada tingkat penampang lintang. Metode ini menggunakan pendekatan plastic hinges
3. Nonlinear Modeling of Members, yaitu metode yang mendefinisikan perilaku inelastis pada tingkat elemen struktur secara keseluruhan. Metode ini juga menggunakan pendekatan plastic hinges

Pada penelitian ini, pemodelan nonlinear pada elemen balok beton bertulang dilakukan dengan nonlinear modeling of cross sections, pendekatan *plastic hinge modeling*. Metode ini memodelkan perilaku sendi plastis pada ujung-ujung elemen lentur. Dalam pendekatan ini, sendi plastis didefinisikan secara manual berdasarkan standar ASCE 41-17 menggunakan sendi tipe M3, yaitu tipe moment-rotation yang digambarkan dalam bentuk kurva tulang punggung (*backbone curve*). Backbone curve memiliki lima titik karakteristik, yaitu titik A, B, C, D, dan E, untuk masing-masing arah positif dan negatif seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. (Septhia et al., 2024):

- Titik A merupakan kondisi awal sebelum terjadi deformasi.

- Titik B menunjukkan kondisi leleh (*yielding*)
- Titik C merupakan kapasitas maksimum elemen (kapasitas ultimit),
- Titik D menunjukkan kekuatan sisa (*residual strength*), dan
- Titik E adalah titik kegagalan total komponen.



Gambar 2.3 Kurva Moment-Rotation (ASCE 41-17)

Kurva tulang punggung ini dapat diperoleh dengan mengacu pada ASCE 41-17 yang tampak pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5. Standar ini menyediakan parameter pemodelan serta kriteria penerimaan untuk berbagai elemen struktur, termasuk balok. Parameter tersebut mencakup:

1. Parameter pemodelan

Parameter pemodelan berupa nilai rotasi plastis untuk tiga titik acuan: titik leleh (a), kapasitas maksimum (b), dan kekuatan sisa (c). Nilai parameter ini digunakan untuk mengisi Tabel 2.13.

2. Kriteria penerimaan

Kriteria penilaian merupakan batas rotasi plastis yang diperbolehkan untuk mencapai tiga tingkat kinerja struktur, yakni:

- Immediate Occupancy (IO),
- Life Safety (LS), dan
- Collapse Prevention (CP).

Table 10-7. Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beams

Conditions	Modeling Parameters ^a			Acceptance Criteria ^a				
	Plastic Rotation Angle (radians)	Residual Strength Ratio	c	Plastic Rotation Angle (radians)				
				IO	LS	CP		
Condition i. Beams controlled by flexure ^b								
$\frac{\mu - \mu'}{\mu_{plst}}$	Transverse reinforcement ^c	$\frac{V_{yd}}{d_w d \sqrt{f_{cE}}}$						
≤0.0	C	≤3 (0.25)	0.025	0.05	0.2	0.010	0.025	0.05
≤0.0	C	≥6 (0.5)	0.02	0.04	0.2	0.005	0.02	0.04
≥0.5	C	≤3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≥0.5	C	≥6 (0.5)	0.015	0.02	0.2	0.005	0.015	0.02
≤0.0	NC	≤3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≤0.0	NC	≥6 (0.5)	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.01	0.015
≥0.5	NC	≤3 (0.25)	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.015
≥0.5	NC	≥6 (0.5)	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition ii. Beams controlled by shear ^b								
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span ^b								
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.005	0.01
Condition iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint ^b								
			0.015	0.03	0.2	0.01	0.02	0.03

Note: f_{cE} in lb/in.² (MPa) units.

^a Values between those listed in the table should be determined by linear interpolation.

^b Where more than one of conditions i, ii, iii, and iv occur for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.

^c "C" and "NC" are abbreviations for conforming and nonconforming transverse reinforcement, respectively. Transverse reinforcement is conforming if, within the flexural plastic hinge region, hoops are spaced at ≤ d/3, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the hoops (V_s) is at least 3/4 of the design shear. Otherwise, the transverse reinforcement is considered nonconforming.

^d V is the design shear force from NSP or NDP.

Gambar 2.4 Modeling Parameter dan Acceptance Criteria untuk Balok (ASCE 41-17)

Table 10-8. Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Columns Other Than Circular with Spiral Reinforcement or Seismic Hoops as Defined in ACI 318

Modeling Parameters	Acceptance Criteria		
	Plastic Rotation Angle (radians)		
	Performance Level		
Plastic Rotation Angles, <i>a</i> and <i>b</i> (radians) Residual Strength Ratio, <i>c</i>	IO	LS	CP
Columns not controlled by inadequate development or splicing along the clear height ^a			
$a = \left(0.042 - 0.043 \frac{N_{UD}}{A_g f_{cE}} + 0.63 \rho_t - 0.023 \frac{V_{yE}}{V_{CoIOE}} \right) \geq 0.0$	0.15 <i>a</i>	0.5 <i>b</i> ^b	0.7 <i>b</i> ^b
For $\frac{N_{UD}}{A_g f_{cE}} \leq 0.5$ $b = \frac{0.5}{5 + \frac{N_{UD}}{0.8 A_g f_{cE}} \frac{1}{\rho_t} \frac{f'_{cE}}{f_{yIE}}} - 0.01 \geq a^a$	≤ 0.005		
$c = 0.24 - 0.4 \frac{N_{UD}}{A_g f_{cE}} \geq 0.0$			
Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height ^c			
$a = \left(\frac{1}{8} \frac{\rho_t f_{yIE}}{\rho_t f_{yIE}} \right) \geq 0.0$	0.0	0.5 <i>b</i>	0.7 <i>b</i>
$b = \left(0.012 - 0.085 \frac{N_{UD}}{A_g f_{cE}} + 12 \rho_t^e \right) \geq a$			
$c = 0.15 + 36 \rho_t \leq 0.4$			

Gambar 2.5 Modeling Parameter dan Acceptance Criteria untuk Kolom (ASCE 41-17)

Tabel 2.13 Modeling Parameter

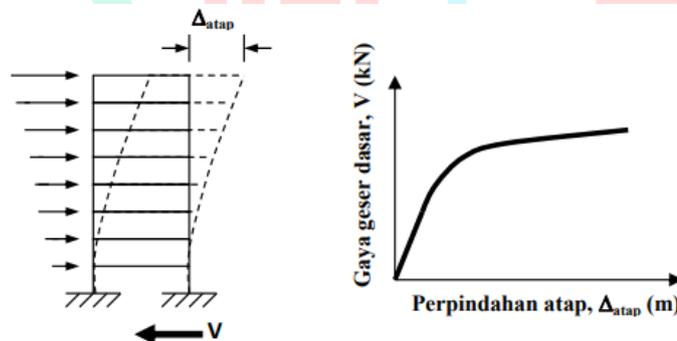
Point	Moment (normalized to a scale factor) Scale factor = Yield moment	Rotation (rad) (normalized to a scale factor) Scale factor = 1
E-	-c	-b
D-	-c	-a (or slightly greater than -a to avoid sudden strength loss)
C-	-1,1 to -1.3 (depending upon the assumed amount of post-yield strength)	-a
B-	-1	0
A	0	0

Point	Moment (normalized to a scale factor) Scale factor = Yield moment	Rotation (rad) (normalized to a scale factor) Scale factor = 1
B+	1	0
C+	1,1 to 1.3 (depending upon the assumed amount of post-yield strength)	a
D+	c	a (or slightly greater than -a to avoid sudden strength loss)
E+	c	b

Sumber: Mazhar et al., 2021

2.1.6.6 Kurva Kapasitas

Kurva kapasitas atau kurva pushouver merupakan hasil dari analisis *Non-linear Static Procedure* (NSP) dalam *Performance Based Design* (PBD). Kurva ini menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan. Proses pembuatan kurva kapasitas dimulai dengan pemberian beban statik lateral yang ditingkatkan secara bertahap hingga struktur mencapai *target displacement* atau mengalami pola keruntuhan tertentu. Setiap tahap pembebanan tersebut, nilai gaya geser dasar dan perpindahan puncak dicatat dan digunakan untuk membuat kurva kapasitas, seperti Gambar 2.6 (Laia dkk., 2024; Septianto dkk., 2019).



Gambar 2.6 Kurva Kapasitas (Suwandi, 2019)

2.1.6.7 Target Perpindahan untuk *Nonlinear Static Procedure*

Untuk bangunan dengan diafragma kaku di setiap tingkat lantai, perpindahan target (δ_t) harus dihitung dengan Persamaan 2.33.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (2.33)$$

Keterangan:

S_a = Percepatan spektrum respons pada periode fundamental efektif dan rasio peredaman bangunan dalam arah yang dipertimbangkan

g = Percepatan gravitasi

C_0 = Faktor modifikasi untuk menghubungkan perpindahan spektral dari sistem dengan derajat kebebasan tunggal (SDOF) yang setara ke perpindahan atap sistem dengan derajat kebebasan ganda (MDOF) bangunan, yang dihitung menggunakan salah satu prosedur berikut:

- Mode pertama *mass participation factor* dikalikan dengan ordinat dari *mode shape* pertama di node kontrol
- *Mass participation factor* yang dihitung menggunakan vektor bentuk yang sesuai dengan bentuk bangunan yang terdefleksi pada target perpindahan dikalikan dengan ordinat dari vektor bentuk tersebut di node kontrol.

Nilai yang sesuai dari Tabel 2.14

Tabel 2.14 Nilai untuk modifikasi faktor C_0

Jumlah tingkat	Shear Buildings		Bangunan lainnya
	Load pattern triangular	Load pattern seragam	Load pattern lainnya
1	1,0	1,0	1,0
2	1,2	1,15	1,2
3	1,2	1,2	1,3
5	1,3	1,2	1,4
10+	1,3	1,2	1,5

Sumber: ASCE 41-23

C_1 = Faktor modifikasi untuk menghubungkan perpindahan inelastis maksimum yang diharapkan dengan perpindahan yang dihitung untuk respons linear-elastis dengan Persamaan 2.34. Untuk periode T_s lebih besar dari T_e , nilai C_1 boleh diambil sebesar 1,0 kurang dari 0,2 detik, C_1 tidak perlu diambil lebih besar dari nilai pada $T = 0,2$ detik. Untuk periode lebih dari 1,0 detik, $C_1 = 1,0$.

$$C_1 = 1 + \frac{\mu_{strength} - 1}{aT_e^2} \quad (2.34)$$

C_2 = Faktor modifikasi untuk mewakili efek bentuk histeresis yang terjepit, degradasi kekakuan siklik, dan penurunan kekuatan pada respons perpindahan maksimum, dihitung dengan Persamaan 2.35. Untuk periode lebih dari 0,7 detik, $C_2 = 1,0$.

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{\mu_{strength} - 1}{T_e} \right)^2 \quad (2.35)$$

a = Faktor kelas situs
 = 130 untuk kelas situs A atau B
 = 90 untuk kelas situs C
 = 60 untuk kelas situs D, E, atau F

T_e = Periode fundamental efektif bangunan dalam arah yang dipertimbangkan, dalam detik.

$\mu_{strength}$ = Rasio kebutuhan kekuatan elastis terhadap koefisien kekuatan leleh, dapat dihitung dengan Persamaan 2.36.

$$\mu_{strength} = \frac{S_a}{V_y/W} C_m \quad (2.36)$$

V_y = Gaya geser dasar saat struktur mulai *yield*

W = Berat seismik efektif

C_m = Faktor massa efektif, dapat mengacu ke Gambar 2.7

Table 7-4. Values for Effective Mass Factor C_m .

No. of Stories	Concrete Moment Frame	Concrete Shear Wall	Concrete Pier-Spandrel	Steel Moment Frame	Steel Concentrically Braced Frame	Steel Eccentrically Braced Frame	Other
1-2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3 or more	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0

Note: C_m shall be taken as 1.0 if the fundamental period, T , in the direction of response under consideration is greater than 1.0 s.

Gambar 2.7 Nilai faktor C_m (ASCE 41-23)

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian yang dapat memudahkan peneliti dalam memahami permasalahan secara luas antara lain adalah sebagai berikut:

1. Desain Ulang Struktur Gedung Kelas & Lab Pupr Semarang Menggunakan *Performance Based Design* (Khairil & Fajarwati, 2024)
 - a. Peneliti
 Akhmad Khairil, Wahiddin, Anisah Nur Fajarwati (2024)

b. Lokasi

Semarang

c. Ringkasan

Penelitian ini bertujuan untuk mendesain ulang struktur Gedung Kelas & Lab PUPR Semarang menggunakan standar SNI 1726:2019 dan ASCE 41-17

d. Metodologi

Penelitian dilakukan dengan bantuan *software* ETABS, dimulai dengan *preliminary design*, memasukkan beban, pengecekan dengan SNI 1726:2019, dan analisis *nonlinear time history* untuk mendapat *drift ratio* sehingga dapat mengetahui level kinerja

e. Parameter

Desain elemen struktur dan kinerja seismik struktur gedung

● f. Hasil Penelitian

Didapatkan dimensi elemen struktur dan tulangan hasil desain ulang dan diketahui kinerja struktur serta *drift ratio* untuk beban gempa BSE-1N (gempa 225 tahun) dan BSE-2N (gempa 975 tahun)

2. *Implementing the performance-based seismic design for new reinforced concrete structures: Comparison among ASCE/ SEI 41, TBI, and LATBSDC* (Sattar dkk., 2021)

a. Peneliti

Siamak Sattar, Anne Hulseley, Garrett Hagen, Farzad Naeim, dan Steven McCabe (2021)

b. Lokasi

Los Angeles

c. Ringkasan

Studi ini membandingkan tiga standar untuk *Performance-Based Seismic Design* (PBSD), yaitu ASCE 41-17, *TBI Guidelines*, dan *LATBSDC Procedure* untuk bangunan beton bertulang Kategori Risiko II.

d. Metodologi

Penelitian ini menggunakan metode perbandingan yang dilakukan pada aspek filosofis, tingkat kinerja struktur, rekomendasi pemodelan, rekomendasi analisis, dan kriteria penerimaan dari ketiga standar.

e. Parameter

Perbedaan metode dari ketiga standar

f. Hasil Penelitian

Meskipun memiliki kesamaan, ketiga standar ini berbeda dari pengembangan model simulasi, perhitungan kebutuhan dan kapasitas elemen, dan kriteria penerimaan kinerja struktur bangunan.

3. *Non-linear analysis of seismic performance of low-rise concrete buildings in Indonesia* (Suwondo dkk., 2021)

g. Peneliti

- Riza Suwondo, Dave Mangindaan, Lee Cunningham, Sohaib Alama (2021)

h. Lokasi

Indonesia

i. Ringkasan

Penelitian ini menyelidiki kinerja seismik bangunan beton bertulang 2 tingkat yang dirancang sesuai dengan Standar Indonesia untuk kriteria *Immediate Occupancy* (IO) dan *Life Safety* (LS)

j. Metodologi

Analisis linier dan nonlinier pada bangunan beton bertulang 2 tingkat menggunakan bantuan *software* ETABS. Evaluasi bangunan dengan pendekatan kontrol perpindahan.

k. Parameter

Rasio simpangan maksimum antar lantai untuk BSE-1N dan BSE-2N

l. Hasil Penelitian

Bangunan tersebut telah memenuhi kriteria *Immediate Occupancy* (IO) dan *Life Safety* (LS)