

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Beton Bertulang

Beton merupakan campuran antara semen *portland* atau semen hidrolis yang dicampur dengan agregat halus, agregat kasar, dan air. Kuat tekan beton adalah besarnya beban persatuan luas yang membuat benda uji hancur tatkala dibebani oleh gaya tekan. Nilai kuat tekan beton didapat dari hasil pengujian tekan pada benda uji berbentuk silinder ataupun balok. Hasil kuat tekan beton untuk pengujian benda uji silinder ialah f'_c dengan satuan MPa atau N/mm^2 dan benda uji balok adalah K dengan satuan kg/cm^2 .

Beton umumnya dilengkapi dengan tulangan yang berfungsi untuk menahan gaya tarik pada struktur beton bertulang. Hal ini disebabkan oleh karakteristik beton yang sangat kuat terhadap gaya tekan namun memiliki kelemahan dalam menahan gaya tarik (Hermansyah & Sachroudi, 2023). Beton merupakan salah satu material utama yang digunakan dalam berbagai jenis konstruksi, baik skala kecil maupun besar, seperti gedung, bendungan, jembatan, perkerasan jalan, dan berbagai struktur teknik sipil lainnya. Salah satu alasan utama pemanfaatan beton dalam struktur adalah kemampuannya bekerja secara efektif dalam sistem struktural, terutama dalam menahan beban tekan. Namun, karena keterbatasannya terhadap gaya tarik, maka diperlukan penggunaan tulangan untuk melengkapi kekuatan beton dan menjadikannya lebih andal sebagai elemen struktur.

2.2 Elemen Struktur Atas

2.2.1 Pelat

Pelat merupakan struktur tipis yang dibuat dari beton bertulang dengan bidang yang arahnya horizontal, dan beban yang bekerja tegak lurus pada bidang struktur tersebut. Ketebalan bidang pelat ini relatif sangat kecil apabila dibandingkan dengan bentang panjang/lebar bidangnya. Pelat beton bertulang ini sangat kaku dan arahnya horizontal, sehingga pada bangunan gedung pelat ini berfungsi sebagai diafragma/unsur pengaku horizontal yang sangat bermanfaat untuk mendukung ketegaran balok portal. Pelat beton bertulang banyak digunakan

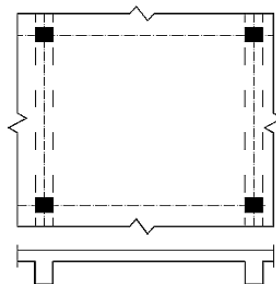
pada bangunan sipil, baik sebagai lantai bangunan, lantai atap dari suatu gedung, lantai jembatan maupun lantai pada dermaga. Beban yang bekerja pada pelat umumnya diperhitungkan terhadap beban gravitasi (beban mati atau beban hidup). Beban tersebut mengakibatkan terjadi momen lentur. Oleh karena itu pelat juga direncanakan terhadap beban lentur seperti kasus balok menurut (Asroni, 2010).

2.2.1.1 Jenis-jenis Pelat

Struktur pelat beton pada gedung dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Pelat Satu Arah

Pelat satu arah adalah pelat dengan tulangan pokok satu arah yang akan dijumpai jika pelat beton lebih dominan menahan beban yang berjumpa momen lentur pada bentang satu arah saja. Suatu pelat dikatakan satu arah jika $\frac{L_y}{L_x} \geq 2$. Dimana L_y merupakan sisi terpanjang, dan L_x merupakan sisi terpendek dari pelat. Adapun untuk Pelat satu arah dapat dilihat pada Gambar 2.1. Gambar 2.1 Pelat satu arah



Gambar 2.1 Pelat satu arah

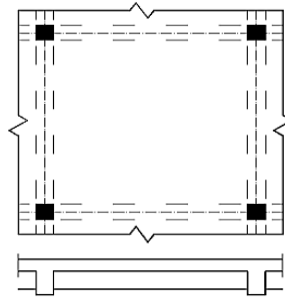
Bila lendutan harus dihitung, maka lendutan yang terjadi sesudah bekerjanya beban harus dihitung dengan metode atau formula standar untuk lendutan elastis, dengan memperhitungkan pengaruh retak dan tulangan terhadap kekakuan komponen struktur. Dalam SNI 2847:2019 dijelaskan mengenai perancangan pelat satu arah pada pasal 9.3.1.1 Tebal minimum pelat satu arah dapat dilihat pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2.1 Ketebalan minimum Pelat Solid Satu Arah Nonprategang

Kondisi perlekatan	Minimum h
Perlekatan sederhana	$\ell/20$
Satu ujung menerus	$\ell/24$
Kedua ujung menerus	$\ell/28$
Kantilever	$\ell/10$

2. Pelat Dua Arah

Pelat yang keempat sisinya ditumpu oleh balok dengan perbandingan $\frac{L_y}{L_x} \leq 2$ perhitungan pelat didasarkan umumnya dilakukan dengan pendekatan dua arah yang tercantum dalam tabel momen pelat dua arah akibat beban terbagi rata. Adapun untuk Pelat dua arah dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pelat dua arah

Menurut SNI 2847:2019 pada pasal 13 berlaku untuk pelat dua arah dengan tulangan pokok dua arah yang akan dijumpai jika pelat beton menahan beban yang berupa momen lentur pada bentang dua arah. Pelat lantai yang dirancang adalah pelat lantai dua arah yang didukung pada keempat sisinya. Adapun syarat tebal pelat minimum menurut SNI 2847:2019 pasal 8.3.1.2 adalah pada Tabel 2.2 sebagai berikut:

Tabel 2.2 Syarat tebal pelat minimum

a_m	h minimum, mm		
$a_m \leq 2,0$	Tanpa drop panel	125	(a)
	Dengan drop panel	100	
$0,2 \leq a_m \leq 2,0$	Terbesar dari:	$h = \frac{I_n \left[0,8 + \frac{f_y}{1400} \right]}{36 + 5 \cdot \beta \cdot (a_m - 0,2)}$	(b)

a_m	h minimum, mm		
		125	(c)
$a_m \geq 2,0$	Terbesar dari:	$h = \frac{I_n \left[0,8 + \frac{f_y}{1400} \right]}{36 - 9, \beta}$	(d)
		90	(e)

- a. Untuk $a_m < 0,2$ ketebalan pelat minimum adalah sebagai berikut ini:
- 1) Pelat tanpa penebalan : 125 mm
 - 2) Pelat dengan penebalan : 100 mm
- b. Untuk $0,2 < a_m < 2,0$ ketebalan pelat minimum harus memenuhi persamaan sebagai berikut ini:

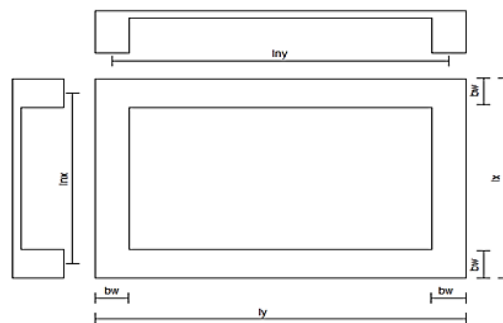
$$h = \frac{I_n \left[0,8 + \frac{f_y}{1400} \right]}{36 + 5, \beta \cdot (a_m - 0,2)} \quad (2.1)$$

dan tidak boleh kurang dari 120 mm h

- c. Untuk $a_m > 2,0$ ketebalan pelat minimum harus memenuhi persamaan sebagai berikut ini:

$$h = \frac{I_n \left[0,8 + \frac{f_y}{1400} \right]}{36 - 9, \beta} \quad (2.2)$$

dan tidak boleh kurang dari 90 mm.



Gambar 2.3 Contoh Pelat

Keterangan:

h =Tebal pelat minimum (cm).

f_y =Tulangan leleh baja tulangan (MPa).

α =Rasio kekuatan lentur penampang balok terhadap kuat lentur pelat dengan lebar yang dibatasi secara lateral oleh garis sumbu tengah dari panel-panel yang bersebelahan (bila ada) pada tiap sisi balok.

α_m =Nilai rata-rata α untuk semua balok pada tepi-tepi dari suatu panel.

β =Rasio bentang bersih dalam suatu arah memanjang terhadap arah memendek dari pelat dua arah. $\beta = I_{n_y} / I_{n_x}$.

λ_n =Panjang bentang bersih dalam arah memanjang dari konstruksi dua arah, diukur dari muka ke muka tumpuan pada pelat tanpa balok dan muka ke muka balok atau tumpuan lain pada kasus lainnya.

- d. Pada tepi yang tidak menerus, balok tepi harus mempunyai rasio kekakuan α tidak kurang dari 0,8.

$$\alpha = \frac{E_{cb} \cdot I_b}{E_{cp} \cdot I_p} \quad (2.3)$$

Keterangan:

E_{cb} = modulus elastisitas balok beton.

E_{cp} = modulus elastisitas pelat beton.

I_b = momen inersia terhadap sumbu pusat penampang bruto balok.

I_p = momen inersia terhadap sumbu pusat penampang bruto pelat.

- e. Beban yang bekerja pada pelat.

$$qU = 1,2 \cdot qD + 1,6qL \quad (2.4)$$

Keterangan:

qU = beban ultimit.

qD = beban mati pelat.

qL = beban hidup pelat.

- f. Mencari tebal efektif pelat Untuk menentukan tinggi efektif pelat ditinjau dari dua arah yaitu:

Arah X

$dx = \text{tebal pelat} - \text{selimut beton} - \frac{1}{2} \cdot \emptyset \text{ tulangan arah x}$

Arah Y

$dy = \text{tebal pelat} - \text{selimut beton} - \frac{1}{2} \cdot \emptyset \text{ tulangan arah y}$

- g. Mencari momen yang bekerja pada arah sumbu x dan y, dengan bantuan Gambar 2.4 Tabel Momen Marcus sebagai berikut.

TABEL MARCUS
(Momen-momen pada pelat)

$k = \frac{l_y}{l_x}$, $l_y =$ bentang terbesar

No	Kondisi Perletakan	$k_x = q_x/q$	$k_y = q_y/q$	Momen lapangan Ml		Faktor koreksi untuk M. Lapangan		Momen tumpuan Mt	
				Mlx	Mly	C'x	C'y	Mtx	Mty
1		$\frac{k^4}{1+k^4}$	$\frac{1}{1+k^4}$	$\frac{1}{8} q_x \cdot l_x^2$	$\frac{1}{8} q_y \cdot l_y^2$	$1 - \frac{5}{6} \frac{k^2}{1+k^4}$	$1 - \frac{5}{6} \frac{k^2}{1+k^4}$	-	-
2		$\frac{5k^4}{2+5k^4}$	$\frac{2}{2+5k^4}$	$\frac{9}{128} q_x \cdot l_x^2$	$\frac{1}{8} q_y \cdot l_y^2$	$1 - \frac{75}{32} \frac{k^2}{2+5k^4}$	$1 - \frac{5}{3} \frac{k^2}{2+5k^4}$	$\frac{1}{8} q_x \cdot l_x^2$	-
3		$\frac{5k^4}{1+5k^4}$	$\frac{1}{1+5k^4}$	$\frac{1}{24} q_x \cdot l_x^2$	$\frac{1}{8} q_y \cdot l_y^2$	$1 - \frac{25}{18} \frac{k^2}{1+k^4}$	$1 - \frac{5}{6} \frac{k^2}{1+5k^4}$	$\frac{1}{12} q_x \cdot l_x^2$	-
4		$\frac{k^4}{1+k^4}$	$\frac{1}{1+k^4}$	$\frac{9}{128} q_x \cdot l_x^2$	$\frac{9}{128} q_y \cdot l_y^2$	$1 - \frac{15}{32} \frac{k^2}{1+k^4}$	$1 - \frac{15}{32} \frac{k^2}{1+k^4}$	$\frac{1}{8} q_x \cdot l_x^2$	$\frac{1}{8} q_y \cdot l_y^2$
5		$\frac{2k^4}{1+2k^4}$	$\frac{1}{1+2k^4}$	$\frac{1}{24} q_x \cdot l_x^2$	$\frac{9}{128} q_y \cdot l_y^2$	$1 - \frac{5}{9} \frac{k^2}{1+2k^4}$	$1 - \frac{15}{32} \frac{k^2}{1+2k^4}$	$\frac{1}{12} q_x \cdot l_x^2$	$\frac{1}{8} q_y \cdot l_y^2$
6		$\frac{k^4}{1+k^4}$	$\frac{1}{1+k^4}$	$\frac{1}{24} q_x \cdot l_x^2$	$\frac{1}{24} q_y \cdot l_y^2$	$1 - \frac{5}{18} \frac{k^2}{1+k^4}$	$1 - \frac{5}{18} \frac{k^2}{1+k^4}$	$\frac{1}{12} q_x \cdot l_x^2$	$\frac{1}{12} q_y \cdot l_y^2$

Catatan :

Perletakan sendi

Perletakan jepit

Gambar 2.4 Tabel Momen Marcus

(Sumber: Asroni, 2010)

Keterangan:

k = Koefisien momen yang tergantung dari L_y/L_x dan kondisi

tumpuan (Tabel MARKUS)

q = Beban merata di atas pelat (kg/m^2)

l_x = Panjang Bentang Terpendek (m)

l_y = Panjang Bentang Terpanjang (m)

m_{tx} = Momen tumpuan arah x persatuan lebar pelat (kg.m)

m_{ty} = Momen tumpuan arah y persatuan lebar pelat (kg.m)

m_{1x} = Momen lapangan arah x persatuan lebar pelat (kg.m)

m_{1y} = Momen lapangan arah y persatuan lebar pelat (kg.m)

h. Tulangan

Langkah-langkah dalam menghitung tulangan pelat, yaitu:

- 1) Menghitung nilai d , berlaku :

$$d = h - s - \frac{1}{2}\phi \quad (2.5)$$

- 2) Menghitung nilai ratio tulangan ρ :

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.6)$$

$$\rho_{\max} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.7)$$

Rasio tulangan perlu

$$bd^2 = \frac{M_n}{\rho \cdot f_y \cdot (1 - 0,59 \cdot \frac{f_y}{f'_c} \cdot \rho)} \quad (2.8)$$

- 3) Menentukan luas tulangan (A_s) yang diperlukan :

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad (2.9)$$

- 4) Memilih diameter tulangan (ϕ) yang akan digunakan dengan penampang dihitung dengan persamaan:

$$A_{s_{tulangan}} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \phi^2 \quad (2.10)$$

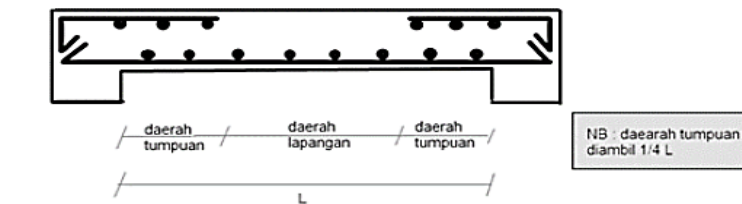
- 5) Menghitung jumlah tulangan :

$$n = \frac{A_s}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \phi^2} \quad (2.11)$$

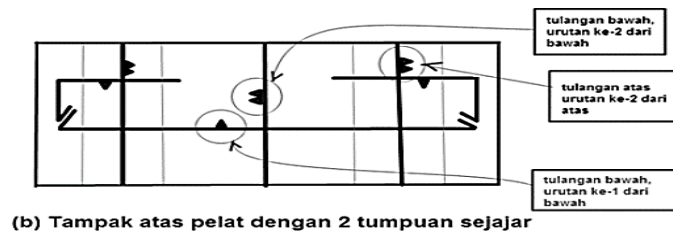
Spasi antara tulangan :

syarat jarak antar tulangan : $x < 3h$ dan $< 500\text{mm}$ Perhitungan penulangan

dilakukan terhadap arah x dan arah y



(b) Tampak depan pelat dengan 2 tumpuan sejajar



(b) Tampak atas pelat dengan 2 tumpuan sejajar

Gambar 2.5 Tulangan Pelat

2.2.2 Balok

Struktur Balok adalah elemen struktural yang menerima gaya-gaya yang bekerja dalam arah *transversal* terhadap sumbunya yang mengakibatkan terjadinya momen lentur dan gaya geser sepanjang bentangnya. Menurut (Setiawan, 2016) Balok merupakan elemen horizontal ataupun miring yang panjang dengan ukuran lebar dan tinggi yang terbatas. Balok juga berfungsi memikul beban lantai serta beban lainnya yang bekerja di atasnya dan menyalurkan beban tersebut ke kolom.

Berdasarkan (Badan Standarisasi Nasional, 2019b) dapat ditentukan Tinggi minimum balok (h) pada pasal 9.3.1. Adapun untuk detailnya dapat dilihat pada Tabel 2.3. Lebar minimum dari balok sesuai pasal 18.6.2, yaitu minimum lebar balok (b_w) harus sekurangnya nilai terkecil dari $0,3h$ dan 250 mm.

Tabel 2.3 Tinggi Minimum Balok Nonprategang

Kondisi Perletakan	Minimum (h)
Perletakan sederhana	$\ell/16$
Menerus satu sisi	$\ell/18,5$
Menerus dua sisi	$\ell/21$
Kantilever	$\ell/8$

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019b)

2.2.2.1 Balok Persegi dengan Tulangan Tunggal

Balok tulangan tunggal sering juga disebut dengan balok bertulangan sebelah atau balok dengan tulangan saja. Berikut merupakan bentuk penampang balok yang dilengkapi dengan distribusi regangan dan tegangan beton.

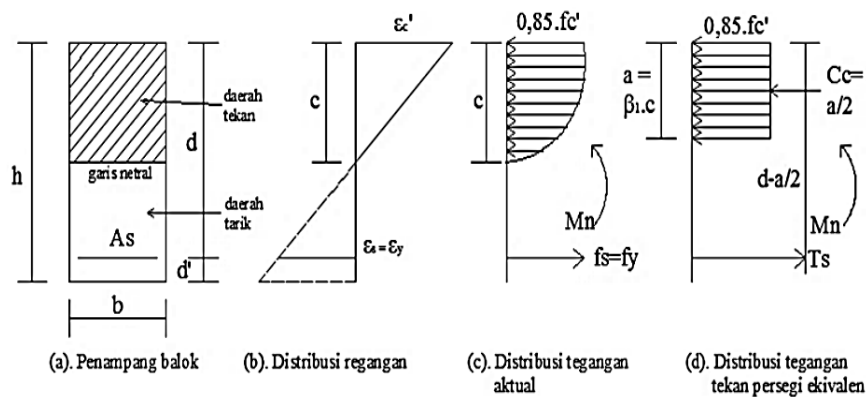
Analisis dan desain penampang balok menggunakan distribusi balok tegangan ekuivalen berbentuk persegi empat atau dikenal dengan balok tegangan Whitney. Blok tegangan tersebut didefinisikan sebagai berikut :

1. Tegangan tekan merata sebesar $0,85 f'c$ diasumsikan merata pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang dan suatu garis yang sejajar sumbu netral sejarak $a = \beta_1 \cdot c$ dari serat beton yang mengalami regangan tekan maksimum.
2. Jarak c dari serat dengan regangan tekan maksimum ke sumbu netral harus diukur tegak lurus sumbu tersebut.
3. Faktor β_1 dapat dihitung sebagai berikut :
 - $f'c \leq 28\text{Mpa} \rightarrow \beta_1 = 0,85$
 - $28\text{Mpa} \leq f'c \leq 56\text{Mpa} \rightarrow \beta_1 = 0,05 \frac{f'c - 28}{7}$
 - $f'c \geq 56\text{Mpa} \rightarrow \beta_1 = 0,65$

(2.12)

Resultan gaya tekan yang terjadi dengan lebar b dan tinggi sumbu netral c adalah:

$$C = 0,85 f'c \beta_1 b c \quad (2.13)$$



Gambar 2.6 Distribusi Regangan dan tegangan Balok Tunggal

(Sumber: Asroni, 2010)

Pada balok persegi panjang tulangan tunggal dengan kondisi seimbang distribusi tegangan dan regangannya dapat dilihat pada Gambar 2.6 yang mana dengan menggunakan perbandingan segitiga akan diperoleh hubungan berikut:

$$C_b = \left(\frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{E_s}} \right) \cdot d \quad (2.14)$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan kesetimbangan gaya tekan dan gaya tarik baja, maka dapat dituliskan :

$$C = T$$

$$0,85 f'_c a_b b = A_{s_b} \cdot f_y \quad (2.15)$$

Untuk menghitung kebutuhan tulangan terlebih dahulu dihitung persentase penulangan. Rumus rasio penulangan:

1. Tulangan seimbang

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.16)$$

2. Tulangan minimum

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.17)$$

3. Tulangan maksimum

$$\rho_{\max} = \left(\frac{0,003 + f_y / E_s}{0,008} \right) \rho_b \quad (2.18)$$

4. Tulangan perlu

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_u}{0,85 \cdot \phi \cdot f'_c \cdot b \cdot d^2}} \right] \quad (2.19)$$

Momen rencana dari suatu balok persegi bertulangan tunggal dihitung dengan mengalikan C atau T dengan jarak antara kedua gaya tersebut. Maka rumusnya sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi.C.z = \phi.T.z \\ \phi M_n &= \phi.0,85.f'c.a.b.\left(d - \frac{a}{2}\right) = \phi.A_s.f_y.\left(d - \frac{a}{2}\right)\end{aligned}\quad (2.20)$$

Jika, $A_s = \rho b d$ dan nilai a disubstitusikan, maka rumus momen rencana menjadi sebagai berikut :

$$\phi M_n = \phi.\rho.d^2.f_y.\left(1 - \frac{\rho.f_y}{1,7.f'c}\right)\quad (2.21)$$

Dengan:

ϕ = faktor reduksi (0,9)

Prosedur perhitungan desain dan analisis penampang balok bertulangan tunggal dengan nilai b dan d diketahui, berikut prosedur perhitungannya:

1. Hitung nilai rasio tulangan maksimum (ρ_{maks}).
2. Hitung nilai momen rencana maksimum ($\phi M_{u maks}$).
3. Jika $M_u \leq \phi M_n$, maka tidak perlu tulangan tekan. Nilai ρ dan A_s dapat dihitung.
4. Jika $M_u \geq \phi M_n$, maka diperlukan tulangan tekan, yang dihitung dengan menggunakan perhitungan balok bertulangan rangkap.

2.2.2.2 Balok Persegi Panjang dengan Tulangan Rangkap

Balok bertulangan rangkap merupakan balok yang didesain memiliki tulangan tarik dan tekan. Penggunaan tulangan tekan dipakai pada daerah momen negatif serta dipasang pada balok yang memikul beban berat dengan persyaratan lendutan yang ketat. Berikut keuntungan balok tulangan rangkap :

1. Mengurangi lendutan jangka panjang.
2. Meningkatkan daktilitas.
3. Menghasilkan keruntuhan tarik pada struktur.
4. Memudahkan dalam fabrikasi.

Analisis balok tulangan rangkap terdapat dua kondisi tulangan tekan, yaitu tulangan tekan sudah luluh dan belum.

a. Tulangan tekan sudah luluh

Momen internal balok tulangan rangkap dibedakan menjadi dua macam. M_{u1} merupakan momen internal yang dihasilkan dari gaya tekan pada beton dan gaya tarik ekuivalen pada tulangan baja A_{s1} , sedangkan M_{u2} merupakan momen internal tambahan yang diperoleh dari gaya tekan pada penulangan tekan A_s' .

Rumus perhitungan M_{u1} :

$$M_{u1} = \phi \cdot A_{s1} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.22)$$

Dengan:

$$a = \frac{A_{s1} \cdot f_y}{0,85 \cdot f' \cdot cb} \quad (2.23)$$

Syarat batas tulangan A_{s1} adalah $\rho = (A_{s1} / bd) \leq \rho_{maks}$. Berikut rumus M_{u2} dengan asumsi tulangan tekan (A_s') sudah luluh:

$$M_{u2} = \phi \cdot A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \quad (2.24)$$

Momen nominal yang dihasilkan dari tulangan rangkap merupakan gabungan dari M_{u1} dan M_{u2} .

$$M_n = M_{u1} + M_{u2} \quad (2.25)$$

Luas tulangan total tulangan rangkap adalah jumlah dari A_{s1} dan A_s' .

$$A_s = A_{s1} + A_s' \quad (2.26)$$

Asumsi tulangan tekan sudah luluh harus memenuhi sebagai berikut:

$$\varepsilon'_s = \left(0,003 \left(\frac{c-d'}{c} \right) \right) \geq \varepsilon_s \left(\frac{f_y}{E_s} \right) \quad (2.27)$$

Dari kesamaan segitiga diatas sumbu netral, serta nilai $E_s = 200000$ MPa, maka:

$$c = \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) \cdot d^2 \quad (2.28)$$

Maka didapat disimpulkan rumus tulangan tekan yang mengalami luluh sebagai berikut:

$$(\rho - \rho') \geq 0,85 \cdot \beta_1 \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{d'}{d} \right) \cdot \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) \quad (2.29)$$

b. Tulangan tekan belum luluh

Tulangan tekan belum luluh berarti tulangan baja tarik akan luluh sebelum beton mencapai regangan maksimum (0,003) dan regangan tulangan tekan (ε_s') belum mencapai ε_y pada saat terjadi keruntuhan. Luluhnya tulangan tekan dipengaruhi oleh letaknya terhadap serat terluar (d'), semakin tinggi rasio d'/c maka tulangan tekan semakin dekat dengan sumbu netral dan semakin kecil kemungkinan tulangan tekan mencapai kuat luluhnya. Berikut rumus untuk menentukan tulangan belum luluh :

$$(\rho - \rho') \geq 0,85 \cdot \beta_1 \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{d'}{d} \right) \cdot \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) \quad (2.30)$$

Kuat momen rencana penampang dapat dicari dengan rumus berikut:

$$\phi M_n = \phi \left[C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \right] \quad (2.31)$$

Bila tulangan tekan belum luluh ($f'_s < f_y$), maka luas total tulangan tarik yang dibutuhkan untuk suatu penampang persegi adalah:

$$A_s = bd \left(\rho_{maks} \frac{\rho' f_s'}{f_y} \right) \quad (2.32)$$

2.2.2.3 Kuat Geser Balok

Balok yang mengalami pembebanan akan menimbulkan reaksi berupa gaya-gaya dalam, di antaranya adalah momen lentur dan gaya geser. Balok harus didesain terhadap gaya dalam tersebut, dalam desain balok terhadap momen lentur didapat dimensi penampang serta kebutuhan tulangan lentur. Balok harus didesain untuk mencukupi memikul gaya geser yang terjadi, apabila tulangan geser tidak dipasang maka kegagalan geser akan terjadi yang ditandai dengan lendutan kecil, kurangnya daktilitas akan mengakibatkan keruntuhan struktur secara tiba-tiba. Faktor keamanan untuk geser supaya menghindari terjadinya kegagalan geser terjadi sebelum kegagalan lentur memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan lentur yaitu sebesar $\phi = 0,75$.

Tahanan geser pada balok beton bertulang didapatkan dari kombinasi beberapa mekanisme berikut:

1. Tahanan geser beton yang didasarkan pada penampang yang masih utuh belum mengalami retak, V_z .
2. Transfer geser antar muka akibat lekatan agregat sepanjang bidang retak, V_a .
3. Tahanan yang diberikan oleh tulangan memanjang, V_d .

Beberapa rumus yang digunakan sebagai acuan untuk menghitung tulangan geser/begel balok yang terdapat dalam SNI 2847:2019, yakni sebagai berikut:

1. Pasal 22.5.1.1 SNI 2847:2019, kuat geser nominal penampang (V_n) dihitung dengan persamaan:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.33)$$

Dengan:

V_n = Gaya geser nominal (kN)

V_c = Gaya geser yang ditahan oleh beton (kN)

V_s = Gaya geser yang ditahan oleh begel (kN)

2. Pasal 22.5.1.2 SNI 2847:2019, ukuran dimensi untuk desain penampang harus memenuhi persamaan:

$$V_u \leq \phi(V_c + 0,066\sqrt{f'c}b_w d) \quad (2.34)$$

3. Pasal 22.5.5 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) tanpa gaya aksial dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17\sqrt{f'c}b_w d \quad (2.35)$$

4. Pasal 22.5.6.1 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) dengan gaya aksial tekan dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17\left(1 + \frac{N_u}{14A_g}\right)\lambda\sqrt{f'c}b_w d \quad (2.36)$$

Apabila N_u bernilai positif untuk tekan diambil dari nilai terkecil yang dihitung dengan persamaan:

$$V_c = \left[0,16\lambda\sqrt{f'c + 17\rho_w} \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h-d)}{8}} \right] b_w d \quad (2.37)$$

$$V_c = 0,16\lambda\sqrt{f'c}b_w d \sqrt{1 + \left(\frac{0,29N_u}{A_g}\right)}$$

5. Pasal 22.5.7.1 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) dengan gaya aksial tarik dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17\lambda\left(1 + \frac{N_u}{3,5A_g}\right)\lambda\sqrt{f'c}b_w d \quad (2.38)$$

6. Pasal 22.5.10.1 SNI 2847:2019, pada penampang dimana $V_u > \phi V_c$, tulangan transversal harus dipasang dan memenuhi persamaan:

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.39)$$

Dengan:

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{d} \quad (2.40)$$

7. Gaya geser maksimum yang dipikul tulangan geser (V_s) sebagai berikut:

$$V_s \leq 0,66 \sqrt{f' c b_w d} \quad (2.41)$$

Jika V_s melebihi nilai tersebut maka penampang harus diperbesar.

8. Batasan minimum tulangan geser berdasarkan pasal 9.6.3.3 SNI 2847:2019 harus diambil dari yang terbesar sesuai dengan persamaan:

$$A_{vmin} = 0,062 \sqrt{f' c \frac{b_w s}{f_{yt}}} \quad (2.42)$$

$$A_{vmin} = \frac{b_w s}{f_{yt}}$$

9. Spasi begel (s) dihitung dengan rumus berikut:

a. $s = d/2 \leq 600 \text{ mm}$, jika $V_s < V_c$

b. $s = d/4 \leq 300 \text{ mm}$, jika $V_c < V_s < V_c$

c. $S_{maks} = \frac{A_v f_{yt}}{0,062 \sqrt{f' c b_w}} \rightarrow f' c > 30 \text{ MPa}$

d. $S_{maks} = \frac{A_v f_{yt}}{0,35 \sqrt{f' c b_w}} \rightarrow f' c < 30 \text{ MPa}$

2.2.2.4 Torsi

Torsi atau momen puntir adalah momen yang bekerja terhadap sumbu longitudinal balok/elemen struktur. Torsi dapat terjadi karena adanya beban eksentrik yang bekerja pada balok tersebut. Menurut pasal 9.5.4 SNI 2847:2019, Pengaruh torsi dapat diabaikan jika T_u memenuhi syarat berikut :

$$A_s \leq \phi 0,083 \lambda \sqrt{f'c} \left(\frac{A_{cp^2}}{P_{cp}} \right) \quad (2.43)$$

Atau tidak melebihi:

$$T_u \leq \phi 0,083 \lambda \sqrt{f'c} \left(\frac{A_{cp^2}}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0,33 A_g \lambda \sqrt{f'c}}} \quad (2.44)$$

Dengan:

$$\phi = 0,75.$$

A_{cp} = Luas penampang bruto.

P_{cp} = Keliling penampang bruto.

Peraturan SNI 2847:2019 pasal 22.7.7 memberikan batasan dimensi penampang yang memikul torsi dan gaya geser:

1. Penampang Solid

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d} \right)^2 + \left(\frac{T_u}{1,7^2 A_{oh}} \right)} \leq \phi \left(\frac{V_u}{b_w d} + 0,66 \sqrt{f'c} \right) \quad (2.45)$$

Dengan:

$$x_o = b - 2 \left(d + \frac{a}{2} \right)$$

$$y_o = b - 2 \left(d + \frac{a}{2} \right)$$

$$A_{oh} = x_o y_o$$

$$A_{oh} = 0,85 A_{oh}$$

$$P_h = 2(x_o + y_o)$$

(2.46)

Setelah terbentuk retak torsi, maka momen torsi ditahan oleh kombinasi tulangan sengkang tertutup dan tulangan memanjang, Berikut perhitungan untuk keduanya:

1. Tulangan sengkang tertutup (A_t) dihitung berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 22.7.6.1:

$$T_n = \frac{2A_o A_t f_{yt}}{s} \cot \theta$$

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_n}{2A_o f_{yt} \cot \theta}$$
(2.47)

Dengan:

A_t = luas satu kaki tulangan sengkang (mm²)

f_{yt} = kuat luluh tulangan sengkang ≤ 400 MPa

s = jarak antar tulangan sengkang

θ = sudut retak 45° untuk non-prategang

$$T_n = T_u / \phi = 0,75$$
(2.48)

2. Tulangan memanjang (A_t) yang dibutuhkan dihitung dengan persamaan berikut:

$$A_t = \left(\frac{A_t}{s} \right) P_h \left(\frac{f_{yt}}{f_y} \right) \cot^2 \theta$$
(2.49)

Apabila tulangan torsi diperlukan, maka harus diperiksa terhadap syarat tulangan torsi minimal yang disyaratkan, yaitu:

1. Tulangan sengkang tertutup yang dibutuhkan untuk kombinasi geser dan torsi ($A_v + 2,4A_t$) diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 9.6.4.2 harus lebih besar dari persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
& 0,062 \sqrt{f'c \frac{b_w s}{f_{yt}}} \\
& 0,35 \sqrt{f'c \frac{b_w s}{f_{yt}}}
\end{aligned}
\tag{2.50}$$

Dengan:

A_t = luas satu kaki tulangan sengkang tertutup untuk geser

A_v = luas satu kaki tulangan sengkang tertutup untuk torsi

S = jarak antar tulangan sengkang

f_{yt} = kuat luluh tulangan sengkang ≤ 400 MPa

2. Tulangan memanjang yang diperlukan untuk torsi (A_{1min}) diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 9.6.4.3 harus lebih kecil dari persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
& 0,42 \sqrt{f'c \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{A_t}{s}\right) P_h \frac{f_{yt}}{f_y}} \\
& 0,42 \sqrt{f'c \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{0,175 b_w}{s}\right) P_h \frac{f_{yt}}{f_y}}
\end{aligned}
\tag{2.51}$$

Persyaratan nilai A_{1min} , agar tulangan tidak dari 1% volume beton.

2.2.2.5 Selimut Beton

Selimut beton merupakan pelindung tulangan terhadap cuaca atau efek lainnya diukur dari permukaan paling luar tulangan sengkang, ikat dan spiral jika 25 tulangan transversal melingkupi tulangan utama. Kondisi terpapar cuaca atau kontak dengan tanah merupakan bentuk paparan langsung, tidak hanya oleh perubahan suhu tetapi juga oleh perubahan kelembaban. Pada Tabel 2.4 di bawah ini merupakan ketebalan Selimut Beton.

Tabel 2.4 Ketebalan Selimut Beton

Paparan	Komponen Struktur	Tulangan	Ketebalan Selimut (mm)
Dicor dan secara permanen kontak dengan tanah.	Semua	Semua	75
Terpapar cuaca atau kontak dengan tanah.	Semua	Batang D19 hingga D57	50
		Batang D16, kawat Ø13 atau D13 yang lebih kecil	40
Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah.	Pelat, pelat berusuk dan dinding	Batang D43 dan D57	40
		Batang D36 dan yang lebih kecil	20
	Balok, kolom, pedestal dan batang tarik	Tulangan utama, sengkang, sengkang ikat, spiral dan sengkang pengegang	40

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019b)

2.2.3 Kolom

Struktur kolom adalah komponen struktur bangunan yang tugas utamanya adalah menyangga beban aksial tekan vertikal dengan bagian tinggi yang tidak ditopang paling tidak tiga kali dimensi lateral kecil. Apabila terjadi kegagalan pada kolom maka dapat berakibat keruntuhan komponen struktur yang lainnya bahkan bisa mengakibatkan terjadinya keruntuhan total pada keseluruhan struktur bangunan.

Menurut (Dr.Edward G.Nawy, 2010), kekuatan kolom dievaluasi berdasarkan prinsip-prinsip dasar sebagai berikut :

1. Distribusi regangannya linier diseluruh tebal kolom.
2. Tidak ada gelincir antara beton dengan tulangan baja (ini berarti regangan pada baja sama dengan regangan pada beton yang mengelilinginya)
3. Regangan beton maksimum yang diizinkan pada keadaan gagal (untuk perhitungan kekuatan) adalah 0,003 in/in.
4. Kekuatan tarik beton diabaikan dan tidak digunakan dalam perhitungan.

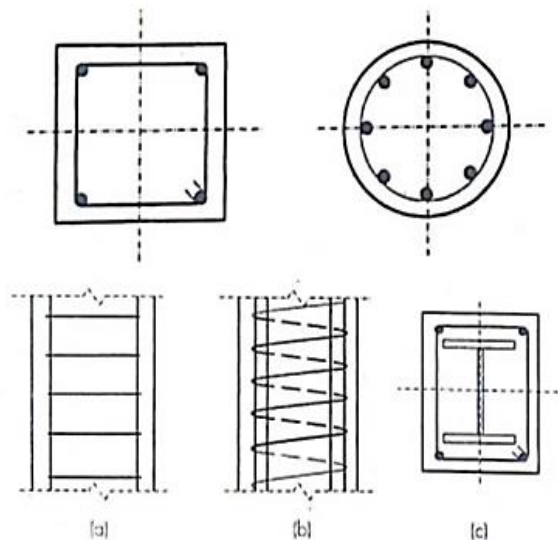
2.2.3.1 Jenis-jenis Kolom

Kolom dapat diklasifikasikan berdasarkan beban yang bekerja, bentuk dan susunan tulangnya serta panjang kolom dalam hubungannya dengan dimensi lateralnya. Berikut klasifikasi kolom dengan beberapa kategori :

1. Berdasarkan beban yang bekerja, kolom dapat diklasifikasikan menjadi :
 - a. Kolom dengan beban aksial, beban dianggap bekerja melalui pusat penampang kolom.
 - b. Kolom dengan beban eksentris, beban kolom dianggap bekerja sejarak e dari pusat penampang kolom. Jarak e dapat diukur terhadap sumbu x atau y , yang menimbulkan momen terhadap sumbu x ataupun y .
 - c. Kolom dengan beban biaksial, beban bekerja pada sembarang titik sehingga menimbulkan momen terhadap sumbu x dan y secara simultan.
2. Berdasarkan panjangnya, kolom dibedakan menjadi :
 - a. Kolom pendek, yaitu jenis kolom yang keruntuhannya diakibatkan oleh hancurnya beton atau luluhnya tulangan baja dibawah kapasitas ultimit dari kolom tersebut.
 - b. Kolom panjang, jenis kolom yang dalam perencanaannya harus memperhitungkan rasio kelangsingan dan efek tekuk, sehingga kapasitasnya berkurang dibandingkan dengan kolom pendek.
3. Berdasarkan bentuk penampangnya kolom dapat berbentuk bujur sangkar, persegi panjang, lingkaran, bentuk L, segi delapan, atau bentuk lainnya dengan ukuran sisi yang mencukupi.
4. Berdasarkan jenis tulangan sengkang yang digunakan :
 - a. Kolom dengan sengkang persegi yang mengikat tulangan vertikal dari kolom secara tegak lurus, dan disusun dengan jarak tertentu sepanjang tinggi kolom.
 - b. Kolom dengan sengkang spiral adalah kolom yang memiliki pengikat tulangan memanjang yang dipasang melingkar secara menerus sepanjang tinggi kolom. Tulangan sengkang pada kolom, baik sengkang persegi maupun sengkang spiral memiliki fungsi untuk mencegah tekuk pada

tulangan memanjang dan mencegah pecahnya selimut beton akibat beban tekan yang besar.

5. Berdasarkan kekangan dalam arah lateral, kolom dapat menjadi bagian dari suatu portal yang dikekang terhadap goyangan ataupun juga dapat menjadi bagian dari suatu portal bergoyang. Kekangan dalam arah lateral untuk struktur beton dapat diberikan oleh dinding geser. Pada portal tak bergoyang, kolom memikul beban gravitasi dan dinding geser memikul beban lateral. Pada portal bergoyang, kolom memikul seluruh beban gravitasi dan beban lateral.
6. Berdasarkan materialnya, kolom dapat berupa kolom beton bertulang biasa, kolom prategang dan kolom komposit (beton dan profil baja). Berikut ini merupakan Gambar 2.7 jenis-jenis kolom :



Gambar 2.7 Jenis-jenis kolom

(Sumber: Setiawan, 2016)

2.2.3.2 Kolom dengan Beban Aksial

Kolom dianggap menerima beban sentris, berarti beban bekerja pada pusat penampang kolom. Beban aksial tekan apabila diberikan pada kolom pendek beton bertulang, beton akan berperilaku elastis hingga batas tegangan mencapai sekitar $1/3f_c$, apabila beban pada kolom ditingkatkan hingga batas ultimit, beton akan mencapai kekuatannya maksimumnya dan tulangan baja akan mencapai luluhnya (f_y). Kapasitas beban nominal (P_0) dapat dituliskan dalam persamaan :

$$P_o = 0,85 f' c (A_g - A_{st}) + A_{st} \times f_y \quad (2.52)$$

Dimana:

A_g = Luas total penampang kolom.

A_{st} = Luas tulangan baja.

Kolom dengan vertikal sempurna tidak dapat dijumpai dalam praktik nyata, serta dengan mengasumsikan adanya sedikit eksentrisitas maka P_0 harus direduksi. Kolom dengan sengkang persegi dan spiral menunjukkan perilaku yang berbeda pada saat keruntuhan, pada SNI 2847:2019 memberi batasan faktor reduksi (ϕ) untuk kedua sengkang tersebut. Kuat nominal kolom beban aksial dengan sengkang persegi :

$$\phi P_n = \phi(0,8) \times [0,85 f' c (A_g - A_{st}) + A_{st} \times f_y] \quad (2.53)$$

Kuat nominal kolom beban aksial dengan sengkang spiral :

$$\phi P_n = \phi(0,85) \times [0,85 f' c (A_g - A_{st}) + A_{st} \times f_y] \quad (2.54)$$

Dengan:

$\phi = 0,65$ untuk sengkang persegi

$\phi = 0,75$ untuk sengkang spiral

2.2.3.3 Kolom Kombinasi Beban Aksial dan Momen Lentur

Prinsip-prinsip pada balok mengenai distribusi tegangan dan blok tegangan segi empat ekuivalennya dapat diterapkan juga pada kolom. Gambar di bawah memperlihatkan penampang melintang suatu kolom segi empat tipikal dengan diagram distribusi regangan, tegangan dan gaya. Tinggi sumbu netral ini sangat menentukan kekuatan kolom.

Persamaan keseimbangan gaya dan momen dari gambar diatas untuk kolom pendek, gaya tahan nominal P_n dalam keadaan runtuh dinyatakan sebagai berikut :

$$P_n = C_c + C_s - T$$

$$P_n = 0,85f'_c ab + A_s' f_s' - A_s f_s \quad (2.55)$$

Momen tahanan nominal M_n , yaitu sebesar $P_n \cdot e$ dapat diperoleh dengan menuliskan keseimbangan momen terhadap pusat plastis penampang. Kolom dengan tulangan simetris, pusat plastisnya sama dengan pusat geometrisnya. Berikut persamaan momen tahanan nominal :

$$M_n = P_n \cdot e$$

$$M_n = 0,85f'_c ab \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_s' \left(\frac{h}{2} - d' \right) - A_s f_s \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (2.56)$$

Tulangan tekan A_s' atau tulangan tarik A_s akan mencapai kekuatan lelehnya f_y , bergantung pada besarnya eksentrisitas (e). Tegangan f_s pada baja dapat mencapai f_y apabila keruntuhan yang terjadi berupa hancurnya beton. Apabila keruntuhan berupa lelehnya tulangan baja, besaran f_s harus disubstitusikan dengan f_y . Apabila f_s' atau f_s lebih kecil dari f_y , maka yang disubstitusikan adalah tegangan aktualnya, yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang diperoleh dari segitiga sebangun dengan distribusi regangan diseluruh tinggi penampang, yaitu persamaan :

$$f_s = \frac{E_s 0,003(d-c)}{c} \leq f_y$$

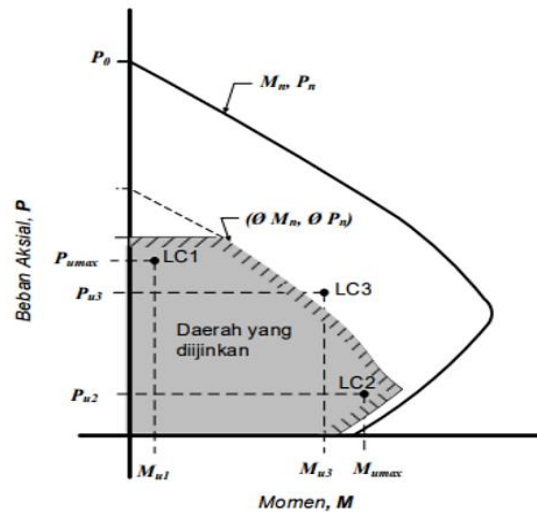
$$f_s' = \frac{E_s 0,003(d-c)}{c} \leq f_y \quad (2.57)$$

Tinggi blok tegangan beton dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\alpha = \beta_1 \leq h \quad (2.58)$$

Hasil dari kedua persamaan tersebut meninggal dua variabel yaitu f_n dan c yang dapat diselesaikan secara stimultan. Persamaan tersebut cukup komplet untuk diselesaikan pada prakteknya, karena perlu pembatasan f_s' dan f_s agar tidak melampaui f_y . Metode yang lebih baik dalam untuk keperluan praktis desain

dengan menggambarkan diagram interaksi yang memberikan beban runtuh dan momen runtuh dari suatu penampang kolom, untuk setiap eksentrisitasnya dari nol sampai tak hingga. Berikut merupakan Gambar 2.8 Diagram Interaksi Kolom dengan Beban Aksial dan Momen Lentur :



Gambar 2.8 Diagram Interaksi Kolom dengan Beban Aksial dan Momen Lentur
(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019b)

2.2.3.4 Jenis Kegagalan pada Kolom

Berdasarkan besarnya regangan pada tulang baja yang tertarik, kegagalan penampang kolom dapat dibagi menjadi sebagai berikut:

1. Kegagalan *Balanced*

Kondisi seimbang terjadi pada penampang kolom, ketika beban aksial yang bekerja sama dengan kuat nominal *balanced* ($P_n = P_{nb}$), keruntuhan diawali dengan lelehnya tulangan baja dengan regangan mencapai $\epsilon_y = f_y / E_s$, sekaligus hancurnya beton yang tertekan yang mencapai regangan 0,003. Persamaan tinggi sumbu netral kondisi *balanced* (c_b) didapat dari segitiga sebangun, yaitu:

$$c_b = \frac{600}{600 + f_y} d \beta_1 \quad (2.59)$$

Dengan:

$$\beta_1 = 0,85, \text{ untuk } 17 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 28 \text{ MPa.}$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05(f_c' - 28)}{7} \text{ untuk, } 28 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 55 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0,65, \text{ untuk } f_c' \geq 55 \text{ MPa}$$

Beban aksial nominal pada kondisi *balanced* (P_{nb}) dan eksentrisitasnya (e_b) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$P_{nb} = 0,85 f_c' a_b b = A'_s (f_s' - 0,85 f_c') - A_s f_y \quad (2.60)$$

$$M_{nb} = 0,85 f_c' a_b b \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + A'_s (f_s' - 0,85 f_c') (d - d' - d'') \quad (2.61)$$

$$e_b = \frac{M_{nb}}{P_{nb}} \quad (2.62)$$

Dimana nilai f_s' diambil sama dengan f_y , apabila tulangan tekan sudah luluh:

$$f_s' = 600 \left(\frac{C_b - d}{C_b} \right) \leq f_y \quad (2.63)$$

2. Keruntuhan Tarik

Keruntuhan tarik diawali dengan lelehnya tulangan baja yang tertarik atau ($P_n < P_{nb}$). Prosedur analisis dilakukan sebagai berikut:

- a. Asumsikan tegangan tulangan tekan $f_s' = f_y$
- b. Evaluasi P_n

$$P_n = 0,85 f_c' a b = A'_s (f_y - 0,85 f_c') - A_s f_y \quad (2.64)$$

- c. Hitung P_n dengan mengambil jumlah momen terhadap A_s

$$P_n e' = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d'') \quad (2.65)$$

Dengan:

$$e' = e + d'' \text{ atau } e + \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

$$A_s = A_s'$$

- d. Samakan P_n langkah b dan c, menghasilkan persamaan kuadrat a sebagai berikut:

$$Aa^2 + Ba + C = 0 \quad (2.66)$$

Dengan:

$$A = 0,425 f_c' b$$

$$B = 0,85 f_c' b (e' - d)$$

$$C = A_s (f_y - 0,85 f_c') (e' - d + d') - A_s f_y e'$$

Selesaikan a menggunakan persamaan berikut:

$$a = -b \pm \frac{\sqrt{b^2 - 4AC / 2A}}{2A}$$

- e. Substitusikan nilai a ke persamaan langkah b untuk mendapatkan nilai P_n dan M_n .
- f. Periksa apakah tulangan tekan sudah luluh. $\epsilon_s' \geq \epsilon_y$.
- g. Menentukan besarnya faktor reduksi ϕ yang besarnya bervariasi antara 0,65 atau 0,7 dan 0,9.

3. Keruntuhan Tekan

Keruntuhan tekan diawali dengan hancurnya beton yang tertekan atau gaya tekan melebihi gaya tekan dalam kondisi seimbang $P_n > P_{nb}$. Regangan akan mencapai 0,003, sedangkan regangan tulangan baja mencapai kurang dari ϵ_y . Berikut merupakan prosedur analisis kolom keruntuhan tekan :

- a. Hitung jarak sumbu netral kondisi seimbang:

$$C_b = \frac{600}{600 + f_y} \quad (2.67)$$

- b. Evaluasi P_n

$$P_n = 0,85 f_c' ab + A_s' (f_y - 0,85 f_c') - A_s f_y \quad (2.68)$$

- c. Hitung P_n dengan mengambil jumlah momen terhadap A_s

$$P_n e' = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d'') \quad (2.69)$$

Dengan:

$$e' = e + d'' \text{ atau } e + \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

$$A_s = A_s'$$

- d. Asumsikan nilai $c > C_b$, hitung $a = \beta_{1c}$ dan asumsikan $f_s' = f_y$
 e. Hitung nilai f_s berdasarkan nilai c :

$$f_s = E_s \frac{0,03(d-c)}{c} \leq f_y \quad (2.70)$$

- f. Hitung P_{n1} menggunakan langkah b dan P_{n2} menggunakan langkah c, jika nilai P_{n1} dan P_{n2} cukup dengan maka P_n diambil dari nilai terkecil atau reratanya.
 g. Periksa lulu tulangan tekan dengan asumsi semula, bila $\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y$. tulangan tekan sudah luluh dan jika belum maka hitung f_s' dengan rumus sebagai berikut:

$$f_s = E_s \frac{0,03(d-c)}{c} \leq f_y \quad (2.71)$$

- h. Regangan tulangan tarik (ε_t) pada kondisi keruntuhan tekan biasanya kurang dari 0,002, sehingga faktor reduksi dapat diambil 0,65 atau 0,75

untuk penampang kolom dengan sengkang spiral. Kuat penampang kolom yang mengalami keruntuhan bisa dihitung dengan persamaan Whitney berikut:

$$P_n = \frac{bhf_c'}{\frac{3he}{d^2} + 1,18} + \frac{A_s' f_y}{\frac{e}{(d-d'')} + 0,5} \quad (2.72)$$

2.2.3.5 Kuat Geser Kolom

Kuat desain geser kolom harus dihitung berdasarkan pasal 22.5 SNI 2847:2019, berikut perhitungan kuat geser nominal:

1. Pasal 22.5.1.1 SNI 2847:2019, kuat geser nominal penampang (V_n) dihitung dengan persamaan:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.73)$$

Dengan:

V_n = Gaya geser nominal (kN)

V_c = Gaya geser yang ditahan oleh beton (kN)

V_s = Gaya geser yang ditahan oleh begel (kN)

2. Pasal 22.5.1.2 SNI 2847:2019, ukuran dimensi untuk desain penampang harus memenuhi persamaan:

$$V_u = \phi(V_c + 0,066\sqrt{f_c'}b_w) \quad (2.74)$$

3. Pasal 22.5.5.1 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) tanpa gaya aksial dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f_c'}b_w d \quad (2.75)$$

4. Pasal 22.5.5.1 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) tanpa gaya aksial dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f_c' b_w d} \quad (2.76)$$

Apabila N_u bernilai positif untuk tekan diambil dari nilai terkecil yang dihitung dengan persamaan:

$$V_c = \left[0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17\rho_w \frac{V_u}{M_u - N_u} \frac{(4h-d)}{8} \right] b_w d \quad (2.77)$$

$$V_c = 0,29\lambda\sqrt{f_c'} b_w d \sqrt{1 + \frac{0,29N_u}{A_g}} \quad (2.78)$$

5. Pasal 22.5.7.1 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) dengan gaya aksial tarik dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{3,5A_g} \right) \lambda \sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.79)$$

6. Pasal 22.5.10.1 SNI 2847:2019, pada penampang dimana $V_u > \phi V_c$, tulangan transversal harus dipasang dan memenuhi persamaan:

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.80)$$

$$V_s \geq \frac{A_u f_{yt} d}{s} \quad (2.81)$$

7. Gaya geser maksimum yang dipikul tulangan geser (V_s) sebagai berikut:

$$V_c = 0,66\lambda\sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.82)$$

Jika V_s melebihi nilai tersebut maka penampang harus diperbesar.

8. Luas minimum tulangan geser (A_v, min), yang harus disediakan disemua wilayah dimana $V_u > 0,5\phi V_c$. Tulangan geser yang diperlukan (A_v, min),

berdasarkan pasal 10.6.2.2 SNI 2847:2019 harus lebih besar dari persamaan berikut:

$$A_{v,\min} = 0,062\sqrt{f_c' b_w} \quad (2.83)$$

$$A_{v,\min} = \frac{b_w S}{f_{yt}} \quad (2.84)$$

Jarak tulangan geser berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 18.4.3.3 yang dipasang tidak boleh melebihi nilai terkecil dari nilai berikut:

- a. 8 kali diameter batang tulangan longitudinal terkecil yang dilingkupi.
- b. 24 kali diameter batang tulangan sengkang pengkang.
- c. Setengah dimensi penampang terkecil kolom.
- d. 300 mm.

2.2.3.6 Rasio Kelangsingan Kolom

Elemen struktur kolom dapat dikategorikan sebagai kolom pendek atau kolom panjang. Kelangsingan kolom didefinisikan sebagai rasio antara tinggi kolom dengan jari-jari inersia penampang kolom. Batasan rasio kelangsingan kolom ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 6.2.5 yang menyatakan bahwa pengaruh kelangsingan boleh diabaikan jika (a) dan (b) terpenuhi :

1. Untuk kolom yang tidak ditahan terhadap goyangan samping

$$\frac{kl_u}{r} \leq 22 \quad (2.85)$$

2. Untuk kolom yang ditahan terhadap goyangan samping

$$\frac{kl_u}{r} \leq 34 + 12(M_1 / M_2) \quad (2.86)$$

Dan

$$\frac{kl_u}{r} \leq 40 \quad (2.87)$$

Keterangan:

M1/M2 adalah negatif jika kolom melentur dalam kurvatur tunggal, dan positif jika komponen struktur melentur dalam kurvatur ganda.

k = faktor panjang efektif kolom.

lu = panjang tak tertumpu kolom.

r = radius girasi, dengan $r = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}}$ atau 0,3h kolom persegi.

2.2.4 *Shearwall*

Shearwall adalah dinding slab beton bertulang atau pelat baja yang dipasang vertikal pada posisi gedung tertentu untuk meningkatkan kinerja struktur pada bangunan tinggi. Penggunaan *shearwall* sudah cukup banyak diaplikasikan pada bangunan bertingkat tinggi (*high rise building*), terlebih untuk gedung berlantai 20 atau lebih (Alamiati & Ryanto, 2022). Umumnya Sistem *shearwall* ini digunakan pada gedung beton bertulang.

Menurut (Widorini et al., 2021) bahwa pemodelan dengan variasi tata letak *shearwall*, memberikan kontribusi besar terhadap struktur bangunan bertingkat dalam menahan gaya lateral seperti beban gempa dan letak dinding geser pada bangunan bertingkat berpengaruh dalam hal nilai simpangan horizontal.

Dinding geser dikategorikan berdasarkan geometrinya, yaitu:

1. *Flexural wall* (dinding langsing), yaitu dinding geser yang memiliki rasio $h_w / I_w \geq 2$ dan desainnya dikontrol oleh perilaku struktur.
2. *Squat wall* (dinding pendek), yaitu dinding geser yang memiliki rasio $h_w / I_w \leq 2$ dan didesainnya dikontrol oleh perilaku geser.
3. *Couple shearwall* (dinding berangkai), dimana momen guling yang terjadi akibat beban gempa ditahan oleh sepasang dinding yang dihubungkan oleh balok-balok perangkai sebagai gaya-gaya tarik dan tekan yang bekerja pada masing-masing dasar pasangan dinding.

Komponen batas (*boundary element*) dapat diberikan pada ujung-ujung dinding struktural yang diberi tulangan dalam arah *longitudinal* dan *transversal*. Dinding geser pada praktiknya selalu dihubungkan dengan sistem rangka pemikul

gedung, dari penggabungan tersebut diperoleh suatu struktur yang lebih kuat dan ekonomis.

2.2.4.1 Preliminary Design Shearwall

Dinding geser akan didesain sebagai komponen penahan gaya vertikal dan lateral. Ketebalan minimum dinding geser harus sesuai dengan Tabel 11.3.1.1 pada SNI 2847:2019. Berikut ini merupakan Tabel 2.5 Tebal Minimum Dinding Geser (h).

Tabel 2.5 Tebal Minimum Dinding Geser (h)

Type Dinding	Ketebalan Minimum (h)	
Tumpu	Terbesar dari	100 mm
		1/25 nilai terkecil dari panjang dan tinggi dinding tidak tertumpu.
Bukan tumpu	Terbesar dari	100 mm
		1/30 nilai terkecil dari panjang dan tinggi dinding tidak tertumpu.
Basemen dan fondasi eksterior	190 mm	

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

2.2.4.2 Persyaratan Tulangan Shearwall

Tulangan geser harus disediakan dalam dua arah tegak lurus pada dinding. Rasio tulangan minimum untuk arah vertikal dan horizontal ditentukan sebagai berikut:

1. Apabila gaya geser didesain $V_u > 0,083A_{cv}\theta\sqrt{f'_c}$ rasio penulangan ρ_1 dan ρ_t tidak boleh kurang dari 0,0025.

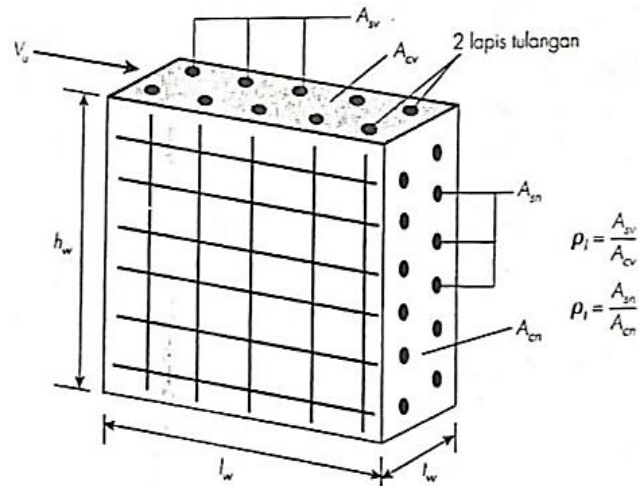
$$0,0025 \geq \rho_1 = \frac{A_{sv}}{A_{cv}}$$

$$0,0025 \geq \rho_t = \frac{A_{sv}}{A_{cv}} \quad (2.88)$$

dengan:

ρ_1 = rasio luas tulangan yang tersebar pada bidang yang tegak lurus bidang A_{cv} terhadap luas bruto beton A_{cv} .

ρ_t = rasio luas tulangan yang tersebar pada bidang yang tegak lurus bidang A_{cv} terhadap luas bruto beton yang tegak lurus terhadap tulangan tersebut.



Gambar 2.9 Tulangan Geser pada Dinding Geser

(Sumber: Aguss Setiawan, 2016)

2. Apabila gaya geser didesain $V_u > 0,083A_{cv}\rho\sqrt{f'_c}$, maka dapat digunakan rasio tulangan minimum seperti pada dinding struktural biasa (SNI 2847:2019 pasal 11).
 - a. Rasio minimum tulangan vertikal terhadap luas bruto penampang beton (ρ_1) harus diambil :
 - 1) 0,0012 untuk tulangan ulir dengan diameter tidak lebih dari D16 dan f_y tidak kurang dari 420 MPa.
 - 2) 0,0015 untuk tulangan ulir lainnya.
 - 3) 0,0012 untuk jaring kawat baja las yang berdiameter kurang dari 16.
 - b. Rasio tulangan minimum tulangan horizontal terhadap luas bruto penampang beton ρ_t harus diambil :
 - 1) 0,0020 untuk tulangan ulir dengan diameter tidak lebih dari D16 dan f_y tidak kurang dari 420 MPa.
 - 2) 0,0025 untuk tulangan ulir lainnya.
 - 3) 0,0020 untuk jaring kawat baja las yang berdiameter kurang dari 16

3. Jarak tulangan masing-masing arah pada dinding geser tidak boleh melebihi 450 mm.
4. Paling sedikit harus dipasang tulangan dalam dua lapis apabila

$$V_u > 0,17 A_{cv} \rho \sqrt{f'c}$$

2.2.4.3 Kuat Geser *Shearwall*

Kuat geser dinding geser dikatakan mencukupi apabila memenuhi kondisi berikut :

$$V_u = \phi V_n \tag{2.89}$$

Dengan:

V_u = gaya geser terfaktor

V_n = kuat geser nominal dinding geser

ϕ = faktor reduksi kekuatan

Kuat geser nominal dinding geser ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 18.10.4, yang menyatakan :

$$V_n = A_{cv} (\alpha_c \lambda \sqrt{f'c} + \rho_t f_y) \tag{2.90}$$

Dengan :

α_c = 0,25 untuk $h_w / l_w \leq 1,5$

= 0,17 untuk $h_w / l_w \geq 2,0$

= interpolasi linier antara 0,25 dan 0,17 jika h_w / l_w diantara 1,5 dan 2,0

h_w = tinggi dinding

l_w = panjang dinding

Beberapa persyaratan lain terkait perencanaan geser dinding geser adalah

1. Apabila rasio dari $h_w / l_w < 2,0$ maka rasio penulangan vertikal (ρ_1) tidak boleh kurang daripada rasio penulangan horozintal (ρ_t).

2. Kuat geser nominal sistem dinding struktural yang secara bersama-sama memikul beban lateral tidak boleh diambil melebihi $0,66 A_{cv} \vartheta \sqrt{f'_c}$ dengan A_{cv} adalah luas penampang total sistem dinding struktural dan kuat geser nominal tiap dinding vertikal individual tidak boleh diambil melebihi $0,83 A_{cw} \vartheta \sqrt{f'_c}$ dengan A_{cw} adalah luas penampang dinding yang ditinjau.
3. Untuk segmen dinding horizontal, termasuk balok kopel, nilai V_n tidak boleh melebihi $0,83 A_{cw} \vartheta \sqrt{f'_c}$ dengan A_{cw} adalah luas penampang dinding horizontal atau balok kopel.

Dinding struktural yang didesain untuk memikul beban aksial dan lentur (SNI 2847:2019 pasal 18.10.5), kuat lentur dari dinding harus ditentukan seperti halnya prosedur perhitungan kolom yang dibebani gaya aksial dan momen lentur. Tulangan pada seluruh penampang dinding termasuk pada komponen batas (*boundary element*) harus diperhitungkan untuk menentukan kapasitas dinding tersebut. Dinding geser yang saling berpotongan di suatu titik, maka akan terbentuk penampang L atau T. Lebar sayap efektif yang terbentuk harus diambil dari nilai terkecil antara setengah jarak dinding yang bersebelahan atau 25% dari total tinggi dinding.

2.2.4.4 Elemen Batas

Dinding geser akan berperilaku seperti balok kantilever selama berlangsungnya kejadian gempa bumi. Elemen batas yang dipasang di ujung-ujung suatu dinding geser dapat menerima beban yang besar. Sendi plastis dapat terbentuk pada dasar dinding yang memerlukan pendetailan tulangan guna memberikan kekuatan dan daktilitas yang mencukupi dari dinding geser tersebut. SNI 2847:2019 pasal 18.10.6 memberikan persyaratan desain untuk elemen batas, yaitu :

1. Pendekatan desain berbasis perpindahan (*displacement*), dinding atau pilar dinding dengan $h_w / l_w \geq 2,0$ yang secara efektif menerus dari dasar struktur hingga sisi paling atas dinding dan didesain untuk mempunyai penampang kritis tunggal untuk lentur dan beban aksial, harus diperkuat dengan komponen batas khusus apabila :

$$C \geq \frac{l_w}{600 \left(\frac{1,5\delta_u}{h_w} \right)} \quad (2.91)$$

Dengan:

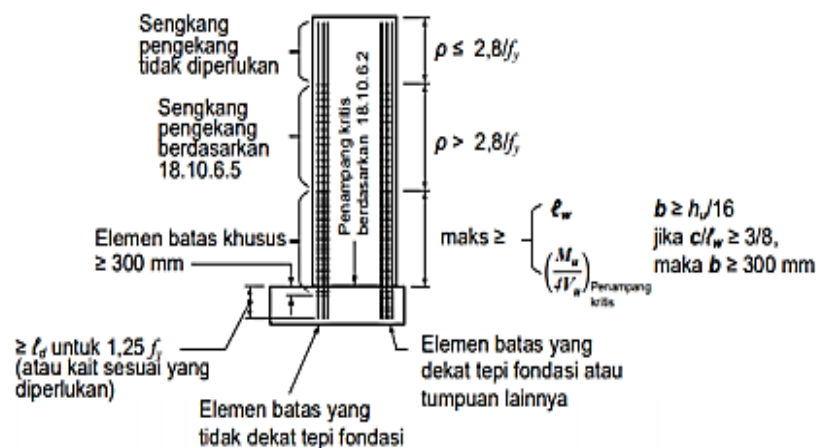
$$\delta_u l_w > 0,005$$

c = nilai tinggi sumbu netral terbesar yang dihitung untuk gaya aksial terfaktor dan kekuatan momen nominal.

δ_u = perpindahan desain.

l_w = panjang keseluruhan dinding atau segmen dinding yang ditinjau dalam arah geser.

Tulangan transversal elemen batas harus diperpanjang pada arah vertikal, diatas dan dibawah penampang kritis dengan jarak minimal nilai terbesar dari $l_w M_u / 4V_u$.



Gambar 2.10 Dinding yang Didesain dengan Pendekatan Berbasis Perpindahan
(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019b)

2. Pendekatan desain berbasis tegangan. Dinding geser harus disediakan komponen batas di sekeliling sisi luarnya dan daerah tepi-tepi sekeliling bukaan dari dinding-dinding struktural dimana tegangan tekan serat ekstrim maksimum, akibat kombinasi pembebanan termasuk pengaruh gempa (E)

melebihi $0,2 f_c$. Elemen batas khusus dapat dihentikan pada lokasi dimana tegangan tekan yang dihitung kurang dari $0,15 f_c$.



Gambar 2.11 Dinding yang Didesain dengan Pendekatan Berbasis tegangan

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

Dinding struktural yang memerlukan komponen batas harus memenuhi persyaratan berikut :

- Elemen batas harus diperpanjang pada arah horizontal dari serat tekan terluar sejauh minimal nilai terbesar dari $c - 0,1l_w$ dan $c/2$. dimana c adalah tinggi sumbu netral terbesar yang dihitung untuk gaya aksial terfaktor dan kekuatan momen nominal yang sesuai dengan δ_u yang ditinjau.
- Lebar daerah tekan lentur (b) sepanjang jarak horizontal yang dihitung dengan (a), termasuk sayap bilamana ada, harus diambil minimal $h_u / 16$.
- Untuk dinding atau pilar-pilar dinding dengan $h_w / l_w \geq 2,0$ yang secara efektif menerus dari dasar struktur hingga sisi paling atas dinding, yang didesain memiliki penampang kritis tunggal untuk beban-beban lentur dan aksial, dan dengan $c/l_w \geq 3/8$, lebar daerah tekan lentur b disepanjang daerah yang dihitung berdasarkan (a) harus lebih besar dari atau sama dengan 300 mm.
- Pada penampang-penampang bersayap, elemen batas harus termasuk lebar sayap efektif yang mengalami tekan dan harus diperpanjang minimal 300 mm ke dalam badan dinding.
- Tulangan transversal elemen batas harus memenuhi 18.7.5.2 (a) hingga (e) dan 18.7.5.3, kecuali bila nilai h_x dalam 18.7.5.2 tidak melebihi nilai terkecil antara 350 mm dan dua pertiga ketebalan elemen batas, dan batasan spasi tulangan

transversal sesuai 18.7.5.3 (a) harus diambil sepertiga dari dimensi terkecil elemen batas.

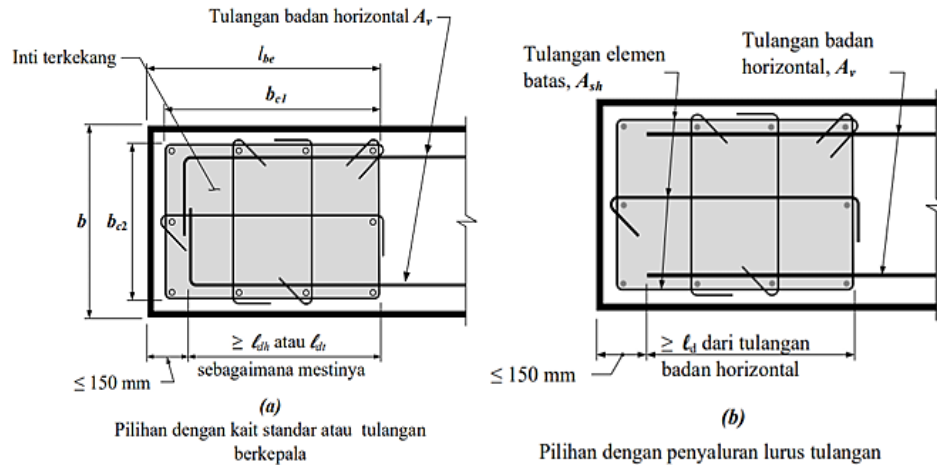
- f. Jumlah tulangan transversal harus sesuai Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Tulangan Transversal untuk Elemen Batas Khusus

Tulangan Transversal	Persamaan yang berlaku		
A_{sh} / sb_c untuk sengkang pengekang persegi	Nilai terbesar dari	$0,3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(a)
		$0,9 \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(b)
ρ_s untuk spiral ataupun sengkang pengekang lingkaran	Nilai terbesar dari	$0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(c)
		$0,12 \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(d)

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

- g. Bila penampang kritis terjadi di dasar dinding, maka tulangan transversal elemen batas pada dasar dinding harus diperpanjang ke dalam sistem tumpuan sejauh minimal ℓd . Bila elemen batas khusus berhenti pada fondasi telapak, fondasi rakit atau pile cap, tulangan transversal elemen batas khusus harus menerus paling sedikit 300 mm ke dalam sistem-sistem fondasi tersebut, kecuali jika diperlukan perpanjangan yang lebih besar berdasarkan Pasal 18.13.2.
- h. Tulangan horizontal pada badan dinding harus diperpanjang masuk sedalam 150 mm pada tepi dinding. Tulangan tersebut harus diangkur dalam inti terkekang pada elemen batas menggunakan kait standar atau tulangan berkepala agar mencapai f_y . Bila panjang zona elemen batas terkekang cukup memadai untuk menyalurkan tulangan horizontal badan, dan $A_{sh} f_{yt}/s$ tulangan badan tidak melebihi $A_{sh} f_{yt}/s$ tulangan transversal elemen batas yang dipasang paralel dengan tulangan horizontal badan, maka tulangan horizontal badan tersebut dapat dihentikan tanpa kait standar atau kepala.

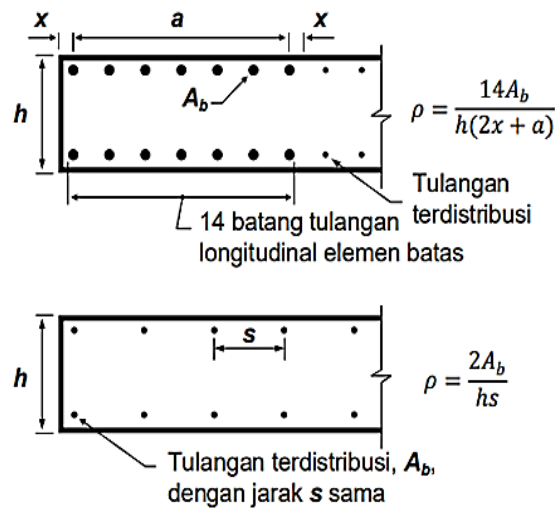


Gambar 2.12 Panjang Penyaluran Tulangan Horizontal Dinding Dalam Elemen Batas yang Terkekang

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

Dinding geser yang tidak memerlukan komponen batas, harus memenuhi berikut:

- Jika rasio tulangan longitudinal pada elemen batas dinding melebihi $2,8/f_y$, maka tulangan transversal pada elemen batas tersebut harus memenuhi 18.7.5.2 (a) hingga (e), disepanjang jarak yang dihitung sesuai 18.10.6.4 (a). Spasi arah longitudinal pada tulangan transversal tersebut tidak boleh melebihi nilai terkecil dari 200 mm dan $8d_b$ batang tulangan lentur utama terkecil, kecuali spasi tersebut tidak melebihi nilai terkecil dari 150 mm dan $6d_b$ di dalam zona sejauh nilai terbesar antara l_w dan $M_u / 4V_u$ di atas dan di bawah penampang kritis dimana pelelehan tulangan longitudinal dapat terjadi akibat perpindahan lateral inelastik yang ditinjau.
- Kecuali bila V_u pada bidang dinding lebih kecil dari $c_w 0,83A_{cw} \vartheta \sqrt{f'_c}$, maka tulangan horizontal yang berhenti pada tepi-tepi dinding struktural tanpa elemen batas harus memiliki kait standar yang melingkupi tulangan tepi atau tulangan tepi tersebut harus dilingkupi dalam sengkang U yang memiliki ukuran dan spasi yang sama dengan, serta disambung-lewatkan pada tulangan horizontal tersebut. Berikut ini adalah Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Rasio Tulangan Longitudinal untuk Elemen Batas Dinding Tipikal

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

2.2.4.5 Penelitian Terdahulu

- (Hanif, 2014) dalam penelitiannya melakukan analisis Pengaruh *ShearWall* Terhadap Simpangan Struktur Gedung Akibat Gempa Dinamis Pada sebuah pembangunan gedung delapan lantai yang diperuntukan untuk sebuah sekolah yang terletak di Pantai Indah Kapuk Jakarta-Utara, struktur atas yang digunakan hanya sebatas kolom dan balok saja, tanpa adanya struktur pengaku seperti *shearwall*. Untuk hasil dari penelitian ini adalah Kinerja Struktur Gedung Setelah gedung ditambah dengan *shearwall* terjadi perubahan simpangan, baik simpangan layan ataupun simpangan ultimit. Simpangan layan gedung akibat gempa arah X berkurang 41,52%, akibat gempa arah Y berkurang 10,36%. Simpangan ultimit gedung, arah X berkurang sebesar 30,89%, arah Y bertambah 5,94%. Dikarenakan *shearwall* lebih dominan menahan gempa arah X, sehingga simpangan ultimit arah Y bertambah menjadi 5,94%.
- (Yana, 2023) dalam penelitiannya melakukan analisis Alternatif Perencanaan Struktur Gedung Hotel Asher Bali Transit Kuta Menggunakan Dinding Geser untuk metode yang digunakan adalah perencanaan struktur beton bertulang pada bangunan tahan gempa yang menggunakan sistem ganda dan SRPMK. Hasil dari analisis Elemen

struktur yang digunakan pada perencanaan bangunan gedung ini ialah K1 (50 x 50 cm), K2 (30 x 30 cm), S1 (30 x 50 cm), S2 (30 x 40 cm), B1 (30 x 50 cm), B2 (30 x 40 cm), pelat lantai beton dengan ketebalan 15 cm, dinding geser beton setebal 30 cm dengan lebar 300 cm, dan pondasi yang digunakan ialah pondasi borepile diameter 350 cm dengan pilecap berukuran 230 cm x 230 cm x 80 cm. 2. Hasil dari kontrol syarat sistem ganda sudah memenuhi syarat dari SNI 1726:2019 yaitu untuk sistem ganda maka rangka pemikul momen harus mampu memikul paling sedikit 25% gaya seismik desain dengan tahanan gaya seismik total oleh dinding geser maksimum momen sebesar 75% dari gaya gempa yang tersedia. Hasil persentase yang didapatkan untuk arah X sebesar 72,817% dan arah Y sebesar 74,59%.

- c. (Kasus et al., 2024) dalam penelitiannya melakukan analisis Pemodelan 3D dilakukan dengan menggunakan aplikasi analisa struktur sesuai gambar kerja Gedung RS. Bhayangkara TK III Nganjuk, lalu ditambahkan *shearwall*. Metode yang digunakan adalah *Response Spektrum* untuk analisa beban lateral dan trial and error untuk perencanaan. Setelah menambahkan elemen Shear wall beban keseluruhan gedung yang diterima sebesar 4.361 ton dengan besar gaya geser statik ekuivalen 9.162.00 N. Didapatkan perencanaan 2 jenis shear wall beton 24 Mpa dengan baja 420, pertama luas 8000 x 40 x 23500 cm membentang, kedua luas total 12000 x 40 x 23500 cm berbentuk C. Penulangan menggunakan tulangan 4/3 D13-100 pada kolom dan 2 D19-100 pada badan *shearwall*.
- d. (Widorini et al., 2021) dalam penelitiannya melakukan analisis Dinding Geser pada *Desain* Bangunan Gedung Bertingkat yang Tidak Beraturan. Tujuan dari penelitiannya adalah untuk membandingkan simpangan horisontal yang terjadi akibat beban gempa pada gedung yang tidak beraturan dengan variasi letak dinding geser. Penelitian membandingkan tiga model struktur yang letak dinding gesernya berbeda. Model 1 adalah struktur yang didesain tanpa dinding geser, model 2 menggunakan dinding geser di tepi, model 3 Menggunakan dinding geser di lift. Denah bangunan memiliki denah struktur yang tidak simetris. Hal tersebut

menyebabkan simpangan horisontal yang terjadi memiliki nilai yang berbeda untuk setiap arah gempa yang terjadi, yaitu gempa arah X dan gempa arah Y. Berdasarkan hasil analisa pemodelan dengan variasi tata letak dinding geser atau shear wall, dapat ditarik kesimpulan bahwa dinding geser memberikan kontribusi besar terhadap struktur bangunan bertingkat dalam menahan gaya lateral seperti beban gempa dan letak dinding geser pada bangunan bertingkat berpengaruh dalam hal nilai simpangan horisontal. Model 2 menghasilkan nilai simpangan untuk beban gempa statis arah X yang paling kecil dengan letak dinding geser pada model 2 dibandingkan tanpa dinding geser dapat mengurangi simpangan hingga 87,04% sedangkan dengan model 3 dapat mengurangi simpangan hingga 31,18%.

- e. (Alamiati & Ryanto, 2022) dalam penelitiannya melakukan analisis Perbandingan Gedung Tanpa Dan Dengan Opening Shearwall Pada Bangunan Gedung 10 Lantai (Studi Kasus Apartemen Di Kota Bandung Dengan Pendekatan *software* struktur V.9.7.4). Dipenelitian ini juga lebih lanjut menghitung gaya geser baik statis maupun dinamik, simpangan antar lantai atau *story drift*, dan p -delta. Dalam penelitian kali ini, penulis hanya memberikan *shearwall* di dua sisi bangunan gedung ramping ini, dengan jumlah bukaan 10 per samping kanan dan samping kiri. Untuk perbandingan pemakaian *shearwall* dapat dilihat dari periode, dimana untuk bangunan yang tidak memakai *shearwall* mempunyai periode di mode 1 sebesar 2,47 detik, sementara untuk bangunan yang memakai *shearwall* hanya 1,93 detik, itu berarti bangunan yang memakai *shearwall* lebih kecil 22% dibanding dengan yang tidak memakai *shearwall*. Selain periode, simpangan antar lantai juga lebih kecil 38% , dan p -delta 27% lebih kecil dibandingkan dengan p -delta yang tidak memakai *shearwall*. Hasil dari pemasangan *shearwall* tersebut sangat signifikan diandingkan dengan bangunan yang tidak memakai *shearwall*. Selain lebih aman, dari segi ekonomis pemasangan *shearwall* ini juga tidak memerlukan pengeluaran yang besar, selain karena di dua sisi itu balok dan kolom

dihapus dan diganti dengan *shearwall*, untuk dimensi balok, dan kolom juga dilakukan optimasi.

2.3 Sistem Struktur Tahan Gempa

Sistem struktur tahan gempa adalah metode desain dan konstruksi yang bertujuan mengurangi risiko kerusakan pada bangunan saat terjadi gempa bumi. Sistem ini dirancang untuk menyerap dan mendistribusikan kombinasi beban gravitasi dan beban lateral yang dipikul oleh elemen struktur, sehingga mengurangi risiko keruntuhan pada bagian lain bangunan.

2.3.1 Sistem Struktur Rangka (*Frame System*)

Sistem rangka pemikul momen (SRPM) adalah sistem rangka yang elemen elemen struktur dan *joint*-nya mampu memikul gaya yang terjadi melalui aksi lentur, geser, dan aksial (Almufid & Santoso, 2021). Berdasarkan SNI 2847:2019 sistem rangka terbagi menjadi 3 (tiga) yaitu:

1. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB), adalah sistem rangka yang ketentuan-ketentuannya harus memenuhi SNI 2847:2019 pasal 18.3. Sistem rangka ini pada dasarnya memiliki tingkat daktilitas terbatas dan hanya cocok digunakan didaerah dengan risiko gempa yang rendah (wilayah gempa 1).
2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM), sistem rangka yang ketentuan-ketentuannya harus memenuhi SNI 2847:2019 pasal 18.4. Sistem rangka ini pada dasarnya memiliki tingkat daktilitas sedang dan cocok digunakan didaerah dengan risiko gempa yang menengah (wilayah gempa 3).
3. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), sistem rangka yang ketentuan-ketentuannya harus memenuhi SNI 2847:2019 pasal 18.6 – 18.9. Sistem rangka ini memiliki daktilitas penuh. Sistem rangka pemikul momen khusus wajib digunakan pada daerah dengan risiko gempa yang tinggi (wilayah gempa 5 dan 6) (Mahendrayu & Kartini, 2012).

2.3.2 Sistem Struktur Dinding (*Wall System*)

Sistem struktur ini mempunyai ciri khas penggunaan elemen dinding sebagai struktur utama dalam memikul beban gravitasi dan gempa. Dinding yang dipakai berupa beton bertulang (*shearwall*) atau susunan batu (*masonry*) yang

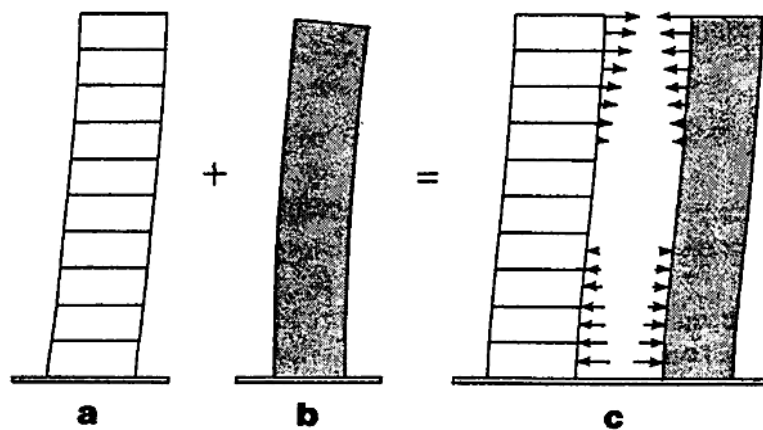
terhubung dengan elemen balok dan kolom. Kemudian untuk proses desain struktur balok dan kolom pengaruh gempa diabaikan dan hanya difokuskan memikul beban gravitasi. Berdasarkan kekakuan struktur dan biaya sistem ini efektif untuk gedung tingkat rendah dan menengah.

Berdasarkan (Badan Standarisasi Nasional, 2019b) terdapat Sistem Dinding Struktur Khusus (SDSK), yang digunakan pada struktur dengan KDS D,E, atau F. Sistem ini harus memenuhi Pasal 18.10. Selain SDSK, terdapat juga dinding struktural umum untuk struktur dengan KDS A,B, atau C. Secara prinsip desain, tidak terdapat perhitungan yang berbeda dari struktural khusus. Hal yang menjadi pembeda pada struktural umum, yaitu tidak mewajibkan penggunaan *Boundary Element* (BE).

2.3.3 Sistem Struktur Ganda (*Dual System*)

Sistem ganda adalah sistem struktural yang kerangka dasarnya lengkap memberikan dukungan untuk beban gravitasi dan ketahanan terhadap beban lateral disediakan oleh kerangka penahan momen dan dinding geser yang dirinci secara khusus atau kerangka yang diperkuat (H. Abdulabbas & A. Ismael, 2022). Berdasarkan SNI 2847:2019 rangka penahan momen pada sistem ganda harus mampu menahan setidaknya 25% dari geser dasar dan kedua sistem harus dirancang untuk menahan beban lateral total sebanding dengan kekakuan relatifnya.

Pada struktur sistem ganda, gabungan portal dengan dinding geser saling berinteraksi antar keduanya. Hal itu dikarenakan kedua sistem tersebut memiliki perilaku defleksi yang berbeda. *Shearwall* akan berperilaku *flexural/bending* mode ketika menerima beban lateral sedangkan *frame* akan terdeformasi dalam *shear mode* (Widyaningrum & Haryanto, 2019). Diagram interaksi antara portal (*frame*) dengan *shearwall* dijelaskan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Pola Deformasi dan Interaksi Portal (*frame*) dengan Dinding

(Sumber: Schueller, 1989)

- a. Deformasi mode geser untuk rangka kaku (gambar-a), sudut deformasi (lendutan) paling besar terjadi pada dasar struktur dimana terjadi geser maksimum.
- b. Deformasi mode lentuk untuk dinding geser (gambar-b), sudut deformasi (lendutan) paling besar terjadi pada bagian atas bangunan sehingga sistem dinding geser memberikan kekakuan paling kecil pada bagian atas bangunan.
- c. Interaksi antara rangka kaku dan dinding geser (gambar-c), interaksi diperoleh dengan membuat superposisi mode s defleksi terpisah yang menghasilkan kurva S datar. Perbedaan sifat defleksi antara dinding geser dan rangka kaku menyebabkan geser akibat gaya lateral akan dipikul oleh dinding geser dibagian bawah bangunan.

2.4 Pembebanan

Struktur gedung yang direncanakan harus mampu memikul dan menyalurkan beban-beban yang terjadi ke struktur bawah (fondasi) lalu disalurkan kembali ke dalam tanah. Beban merupakan gaya yang bekerja pada struktur, baik beban dari struktur itu sendiri maupun beban luar. Diasumsikan, distribusi pembebanan yang bekerja mulai dari beban pelat yang di salurkan ke balok lalu ke kolom dan oleh kolom diteruskan ke tanah melalui fondasi. Beban yang bekerja pada struktur dapat dikategorikan menjadi beban gravitasi yang mencakup beban mati (*dead load*), beban mati tambahan (*super dead load*), beban hidup (*live load*),

serta beban lateral yang meliputi beban gempa (*quake*) dan beban angin (*wind*). Acuan dalam merencanakan pembebanan ini diantaranya:

1. SNI 1726:2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung.
2. SNI 1727:2020 tentang beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain.
3. Pedoman perencanaan pembebanan untuk rumah dan gedung (PPPURG) SKBI-1.3.53.1987.

2.4.1 Beban Mati (*Dead Load*)

Berdasarkan SNI 1727:2020, beban mati merupakan berat dari masing-masing bahan/komponen yang terpasang pada bangunan termasuk kolom, balok, pelat lantai, atap, *plafond*, tangga, keramik, pintu, jendela dan komponen arsitektural dan struktural lainnya. Sedangkan menurut (PU, 1987) beban mati adalah berat dari semua bagian dari suatu gedung yang bersifat tetap, termasuk segala unsur tambahan, penyelesaian penyelesaian, mesin-mesin serta peralatan tetap yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung itu.

Penentuan beban mati untuk perancangan harus digunakan berat bahan dan konstruksi yang sebenarnya termasuk berat maksimum pengisi peralatan tetap, seperti kandungan cairan. Besarnya beban mati menggunakan nilai yang disetujui oleh pihak yang berwenang. Tabel 2.7 menampilkan berat dari komponen bangunan yang digunakan untuk menentukan beban mati.

Tabel 2.7 Berat Sendiri Bahan Bangunan

No.	Material	Berat (kg/m ³)
1.	Baja	7850
2.	Batu alam	2600
3.	Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1500
4.	Batu karang (berat tumpuk)	700
5.	Batu pecah	1450
6.	Besi tuang	7250
7.	Beton	2200
8.	Beton bertulang	2400
9.	Kayu (kelas I)	1000

No.	Material	Berat (kg/m ³)
10.	Kerikil, koral (kering udara sampai lembap, tanpa diayak)	1650
11.	Pasangan bata merah	1700
12.	Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200
13.	Pasangan batu cetak	2200
14.	Pasangan batu karang	1450
15.	Pasir (kering udara sampai lembap)	1600
16.	Tanah lempung dan lanau (kering udara sampai lembap)	1700
17.	Pasir (jenuh air)	1800
18.	Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembap)	1850
19.	Tanah lempung dan lanau (basah)	2000
20.	Timah hitam	11400

(Sumber: PPURG SKBI-1.3.53.1987)

2.4.2 Beban Mati Tambahan (*Superimposed Dead Load*)

Beban mati tambahan dimaksudkan pada beban non-struktural yang berada/menempel permanen pada elemen struktural yang tidak termasuk berat sendiri struktur. Beban mati tambahan meliputi elemen arsitektural seperti dinding, jendela, *plafond* & penggantungnya, penutup atap, serta elemen elektrikal dan perpipaan. Dalam analisis struktur, beban-beban ini dipertimbangkan karena dapat mempengaruhi perilaku struktur. Penentuan beban mati tambahan dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Penentuan beban mati tambahan

No.	Material	Berat (kg/m ²)
1.	Adukan, per cm tebal	
	- Dari semen	21
	- Dari kapur, semen merah atau tras	17
2.	Aspal, termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14
3.	Dinding pasangan bata merah dari semen	
	- Satu bata	450
	- Setengah bata	250

No.	Material	Berat (kg/m ²)
4.	Dinding pasangan batako berlubang	
	- Tebal dinding 20 cm (HB 20)	200
	- Tebal dinding 10 cm (HB 10)	120
	Tanpa lubang :	
	- Tebal dinding 15 cm	300
	- Tebal dinding 10 cm	200
5.	Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya tanpa penggantung langit-langit atau pengaku), terdiri dari:	
	- Semen asbes (eternit dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm	11
	- Kaca, dengan tebal 3 – 5 mm	10
6.	Penutup atas sirap dengan reng dan usuk/kaso, per m ² atap	40
7.	Penutup atap seng gelombang (BJLS-25) tanpa gordeng.	10
8.	Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 5 m dan untuk beban hidup maksimum 200 kg/m ²	40
9.	Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak s.k.s. minimum 0,80 m	7
10.	Penutup atap genting dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	50
11.	Penutup lantai dari ubin semen portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	24
12.	Penutup lantai dari ubin semen portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	11

(Sumber: PU, 1987)

2.4.3 Beban Hidup (*Live Load*)

Berdasarkan SNI 1727:2020 beban hidup merupakan beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan (beban angin, hujan, banjir dan gempa). Khusus pada atap terdapat beban hidup atap selama pelaksanaan pemeliharaan yang diakibatkan oleh pekerja, peralatan dan material, serta pada

masa layan struktur yang diakibatkan oleh benda bergerak, seperti tanaman atau benda dekorasi kecil yang tidak berhubungan dengan penghunian.

Beban hidup yang digunakan dalam perancangan bangunan gedung dan struktur lain harus menggunakan beban maksimum yang diharapkan terjadi akibat penghunian dan penggunaan bangunan gedung, tetapi tidak boleh kurang dari beban merata minimum yang ditetapkan dalam pasal 4.3 SNI 1727:2020. Berikut merupakan beban hidup pada lantai gedung berdasarkan SNI 1727:2020 yang disajikan dalam

Tabel 2.9 Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum, L_b dan Beban Hidup Terpusat Minimum

Hunian atau Penggunaan	Merata psf (kN/m^2)	Terpusat lb (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)		
Sistem lantai akses		
Ruang kantor	50 (2,4)	2000 (8,9)
Ruang komputer	100 (4,79)	2000 (8,9)
Gudang persenjataan dan ruang latihan	150 (7,18)	
Ruang pertemuan		
Kursi tetap (terikat di lantai)	60 (2,87)	
Lobi	100 (4,79)	
Kursi dapat dipindahkan	100 (4,79)	
Panggung pertemuan	100 (4,79)	
Lantai podium	150 (7,18)	
Balkon dan dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani. Tidak perlu melebihi 100 psf (4,79c kN/m^2)	
Jalur untuk akses pemeliharaan	40 (1,92)	300 (1,33)

Hunian atau Penggunaan	Merata psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Koridor Lantai Pertama Lantai lain	100 (4,79) sama seperti pelayanan hunian kecuali disebutkan lain	
Ruang makan dan restoran	100 (4,79)	
Dudukan mesin elevator (pada area 50 mm x 50 mm)		300 (1,33)
Konstruksi pelat lantai <i>finishing</i> ringan (pada area 25 mm x 25 mm)		200 (0,89)
Jalur penyelamatan saat kebakaran Hunian satu keluarga saja	100 (4,79) 40 (1,92)	
Tangga permanen	Pasal 4.5 SNI 1727-2020	
Garasi/Parkir Mobil penumpang saja Truk dan bus		40 (1,92)
Susunan tangga, rel pengamananan batang pegangan	Pasal 4.5 SNI 1727-2020	
Helipad	60(2,87) tidak boleh direduksi	
Rumah sakit Ruang operasi, laboratorium Ruang pasien Koridor atas lantai pertama	 60 (2,87) 40 (1,92) 80 (3,83)	 1000 (4,45) 1000 (4,45) 1000 (4,45)
Hotel (lihat rumah tinggal)		

Hunian atau Penggunaan	Merata psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Perpustakaan		
Ruang baca		1000 (4,45)
Ruang penyimpanan	60 (2,87)	1000 (4,45)
Koridor di atas lantai pertama	150 (7,18)	1000 (4,45)
	80 (3,83)	1000 (4,45)
Pabrik		
Ringan		2000 (8,90)
Berat	125 (6,00)	3000 (13,40)
	250 (11,97)	
Gedung perkantoran		
Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian		
Lobi dan koridor lantai pertama	100 (4,79)	2000 (8,90)
Kantor		2000 (8,90)
Koridor diatas lantai pertama	50 (2,40)	2000 (8,90)
	80 (3,83)	2000 (8,90)
Lembaga hukum		
Blok sel	40 (1,92)	
Koridor	100 (4,79)	
Tempat rekreasi		
Tempat bowling, kolam renang dan penggunaan yang sama	75 (3,59)	
Bangsas dansa dan ruang dansa	100 (4,79)	
Tempat menonton baik terbuka atau tertutup	100 (4,79)	

Hunian atau Penggunaan	Merata psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Stadium dan tribun/arena dengan tempat duduk tetap (terikat pada lantai)	60 (2,87)	
Rumah tinggal Hunian (satu keluarga dan dua keluarga)		
Loteng yang tidak dapat didiami tanpa gudang	10 (0,48) 20 (0,96)	
Loteng yang tidak dapat didiami dengan gudang		
Loteng yang dapat didiami dan ruang tidur	30 (1,44)	
Semua ruang kecil tangga dan balkon	40 (1,92)	
Semua hunian rumah tinggal lainnya		
Ruang pribadi dan koridor	40 (1,92)	
Ruang publik dan koridor	100 (4,79)	
Atap		
Atap datar, berhubungan dan lengkung	20 (0,96)	
Atap digunakan untuk taman atap	100 (4,79)	
Atap yang digunakan untuk tujuan lain	Sama seperti hunian dilayani	
Awning/kanopi		
Konstruksi pabrik yang didukung oleh struktur rangka kaku ringan	5(0,24) tidak boleh direduksi	200 (0,89)
Rangka tumpu layar penutup	5(0,24) tidak boleh direduksi dan berdasarkan luas tributari dari atap yang ditumpu oleh rangka	
Semua konstruksi lainnya	20 (0,96)	2000 (8,9)

Hunian atau Penggunaan	Merata psf (kN/m²)	Terpusat lb (kN)
Komponen struktur atap utama, yang berhubungan langsung dengan pekerjaan lantai Titik panel tunggal dari batang bawah rangka atap atau setiap titik sepanjang komponen struktur utama		300 (1,33)
Semua komponen struktur atap utama lainnya		300 (1,33)
Sekolah		
Ruang kelas		1000 (4,45)
Koridor diatas lantai pertama	40 (1,92)	1000 (4,45)
Koridor dilantai pertama	80 (3,83)	1000 (4,45)
	100 (4,79)	1000 (4,45)
Bak-bak/scuttles, rusuk atap kaca dan langit-langit yang dapat diakses		200 (0,89)
Pinggir jalan untuk pejalan kaki, jalan lintas kendaraan, dan jalan untuk truk-truk	250 (11,97)	8000 (35,6)
Tangga dan jalan keluar		
Rumah tinggal untuk satu dan dua keluarga saja	100 (4,79) 40 (1,92)	300 (1,33) 300 (1,33)
Toko		
Eceran		
Lantai pertama	100 (4,79)	1000 (4,45)
Lantai diatasnya	75 (3,59)	1000 (4,45)
Grosir, di semua lantai	125 (6,00)	1000 (4,45)
		1000 (4,45)
Penghalang Kendaraan	Pasal 4.5 (SNI 1727-2020)	

Hunian atau Penggunaan	Merata psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Susunan jalan dan panggung yang ditinggikan (selain jalan keluar)	60 (2,87)	
Pekarangan dan teras, jalur pejalan kaki	100 (4,79)	

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2020)

2.4.4 Beban Angin (*Wind*)

Beban angin menurut SNI 1727-2020 adalah beban yang dihasilkan oleh hembusan angin yang bekerja pada struktur bangunan. Nilai beban ini ditentukan oleh beberapa faktor, seperti kecepatan angin, letak geografis, bentuk dan ketinggian bangunan, serta kekakuan struktur. Bangunan yang berada pada lintasan angin akan menyebabkan angin berbelok atau berhenti, mengubah energi kinetik partikel udara yang bergerak menjadi energi potensial, berupa tekanan atau hisapan pada permukaan bangunan. Berdasarkan SNI 1727:2020 untuk menghitung pengaruh angin pada struktur menggunakan parameter berikut:

1. Kecepatan angin dasar (V)

Kecepatan angin dasar (V) yang digunakan dalam menentukan beban angin desain pada bangunan gedung dan struktur lain ditentukan dari data BMKG kecepatan angin harian rata-rata Kota Tasikmalaya.

2. Faktor arah angin (K_d)

Efek arah angin dalam menentukan beban angin didasarkan pada analisis rasional dari kecepatan angin. Penentuan faktor arah angin ditentukan dari Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Faktor Arah Angin (K_d)

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin (K_d)
Bangunan Gedung Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) Komponen dan Klading (K&K).	0,85
	0,85

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin (K_d)
Atap Lengkung.	0,85
Kubah Berbentuk Bundar.	1,0 ^a
Cerobong, Tangki dan Struktur Serupa Persegi.	0,90
Segi Enam.	0,95
Segi Delapan.	1,0 ^a
Bundar.	1,0 ^a
Dinding solid yang berdiri bebas, peralatan bagian atap dan panel petunjuk solid yang berdiri bebas serta panel petunjuk terikat.	0,85
Panel petunjuk terbuka dan rangka terbuka bidang tunggal	0,85
Rangka Bangka Menara Segitiga, persegi atau persegi panjang Semua penampang lainnya.	0,85 0,95

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2020)

Catatan:

^aFaktor arah angin $K_d = 0,95$ diizinkan untuk struktur bundar atau struktur segi delapan dengan sistem struktur non-asimetris.

1. Kategori eksposur

Untuk setiap arah angin yang diperhitungkan, eksposur arah melawan angin didasarkan pada kekasaran permukaan tanah yang ditentukan dari topografi alam, vegetasi, dan fasilitas yang telah dibangun. Berikut kategori kekasaran permukaan:

- a. Kekasaran permukaan B, daerah perkotaan dan pinggiran kota, daerah berhutan, atau daerah lain dengan penghalang berjarak dekat seukuran tempat tinggal keluarga tunggal atau lebih besar dalam jumlah banyak.
- b. Kekasaran permukaan C, dataran terbuka dengan penghalang tersebar yang memiliki tinggi umumnya kurang dari 9,1m. Kategori ini mencakup daerah terbuka datar dan padang rumput.
- c. Kekasaran permukaan D, permukaan datar, area tanpa halangan dan permukaan air. Kategori ini termasuk hamparan lumpur halus.

Berikut ini kategori eksposur:

- a. Eksposur B, untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-

rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9,1m), Eksposur B berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh Kekasaran Permukaan B, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 1.500 ft (457m). Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata lebih besar dari 30 ft (9,1m), Eksposur B berlaku bilamana Kekasaran Permukaan B berada dalam arah melawan angin untuk jarak lebih besar dari 2.600 ft (792 m) atau 20 kali tinggi bangunan atau struktur, pilih yang terbesar.

- b. Eksposur C, berlaku untuk semua kasus dimana eksposur B dan eksposur B tidak berlaku.
- c. Eksposur D, berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh Kekasaran Permukaan D, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 5.000 ft (1.524m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar. Eksposur D juga berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah dekat dari situs dalam arah melawan angin adalah B atau C, dan situs yang berada dalam jarak 600 ft (183 m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar, dari kondisi Eksposur D sebagaimana ditentukan dalam kalimat sebelumnya.

2. Faktor topografi K_{zt}

Efek peningkatan kecepatan angin pada daerah perkotaan secara umum tidak menimbulkan perubahan mendadak pada topografi, maka nilai $K_{zt} = 1,0$.

3. Faktor elevasi permukaan tanah

Faktor elevasi permukaan tanah untuk menyesuaikan densitas udara, K_e , harus ditentukan sesuai dengan . Untuk semua elevasi, boleh diambil nilai $K_e = 1$. Faktor Elevasi Permukaan Tanah dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Faktor Elevasi Permukaan Tanah

Elevasi tanah di atas permukaan laut (m)	Faktor elevasi permukaan tanah (K_e)
<0	Lihat catatan
0	1,00
305	0,96
610	0,93

Elevasi tanah di atas permukaan laut (m)	Faktor elevasi permukaan tanah (K_e)
914	0,90
1.219	0,86
1.524	0,83
1.829	0,80
>1.829	Lihat catatan

(Sumber Badan Standarisasi Nasional, 2020)

Catatan:

- a) Perkiraan konservatif, boleh diambil $K_e = 1,00$ dalam semua kasus.
- b) Faktor K_e harus ditentukan dari tabel di atas dengan menggunakan interpolasi atau dari rumus berikut untuk semua elevasi:

$$K_e = e^{-0,000119zg} \quad (zg = \text{elevasi tanah di atas permukaan laut dalam m}).$$

- c) Dalam semua kasus K_e boleh diambil sebesar 1,00.
4. Faktor efek hembusan angin (G)

Faktor efek hembusan angin untuk suatu bangunan gedung dan struktur lain yang kaku boleh diambil sebesar 0,85.

5. Koefisien eksposur tekanan kecepatan

Berdasarkan kategori eksposur yang sudah ditentukan, koefisien eksposur tekanan kecepatan (K_z atau K_h) ditentukan dari dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Untuk } 4,6 \leq z \leq z_g : K_z &= 2,01(z / z_g)^{2/\alpha} \\ \text{Untuk } z \leq 4,6m : K_z &= 2,01(z / z_g)^{2/\alpha} \end{aligned} \quad (2.92)$$

Nilai α dan z_g ditentukan pada Tabel 2.12 sebagai berikut :

Tabel 2.12 Nilai α dan z

Eksposur	α	$z_g(m)$
B	7,0	365,76
C	9,5	274,32
D	11,5	213,36

6. Koefisien tekanan internal (GC_{pi})

Koefisien tekanan internal (GC_{pi}) harus ditentukan dari Tabel dibawah ini berdasarkan pada klasifikasi ketertutupan bangunan gedung ditentukan dari Pasal 26.12. Koefisien tekanan internal, (GC_{pi}) ditentukan pada Tabel 2.13.

Tabel 2.13 Koefisien tekanan internal, (GC_{pi})

Klasifikasi ketertutupan	Kriteria untuk klasifikasi ketertutupan	Tekanan internal	Koefisien tekanan internal, (GC_{pi})
Bangunan tertutup	A_o kurang dari terkecil $0,01A_g$ atau $0,37 \text{ m}^2$ dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Sedang	-0,18 -0,18
Bangunan tertutup sebagian	$A_o > 1,1A_{oi}$ dan $A_o >$ terkecil dari $0,01A_g$ atau $0,37 \text{ m}^2$ dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Tinggi	-0,55 -0,55
Bagungan terbuka sebagian	Bangunan yang tidak sesuai dengan Klasifikasi tertutup, tertutup sebagian, atau klasifikasi terbuka	Sedang	-0,18 -0,18
Bangunan terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80%	Diabaikan	0,00

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2020)

Untuk bangunan tertutup sebagian yang memiliki sebuah ruangan besar tanpa sekat, koefisien tekanan internal, (GC_{pi}), harus dikalikan dengan faktor reduksi, R_i berikut ini :

$$R_i = 0,5 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{V_i}{22,800 A_{og}}}} \right) < 1,0 \quad (2.93)$$

Dimana:

A_{og} = luas total bukaan pada amplop bangunan gedung (dinding-dinding dan atap, dalam ft^2)

V_i = volume internal ruang tanpa partisi, dalam ft^3

7. Koefisien tekanan eksternal (C_p)

Koefisien tekanan eksternal dibagi menjadi koefisien untuk dinding dan atap, nilai C_p ditentukan berdasarkan Tabel 2.14 berikut :

Tabel 2.14 Koefisien Tekanan Eksternal Dinding (C_p)

Koefisien tekanan dinding (C_p)			
Permukaan	L/B	C_p	Digunakan dengan
Angin datang	Seluruh nilai	0,8	q_z
	0-1	-0,5	q_h
Angin pergi	2	-0,3	q_h
	≥ 4	-0,2	q_h
Dinding tepi	Seluruh nilai	-0,7	q_h

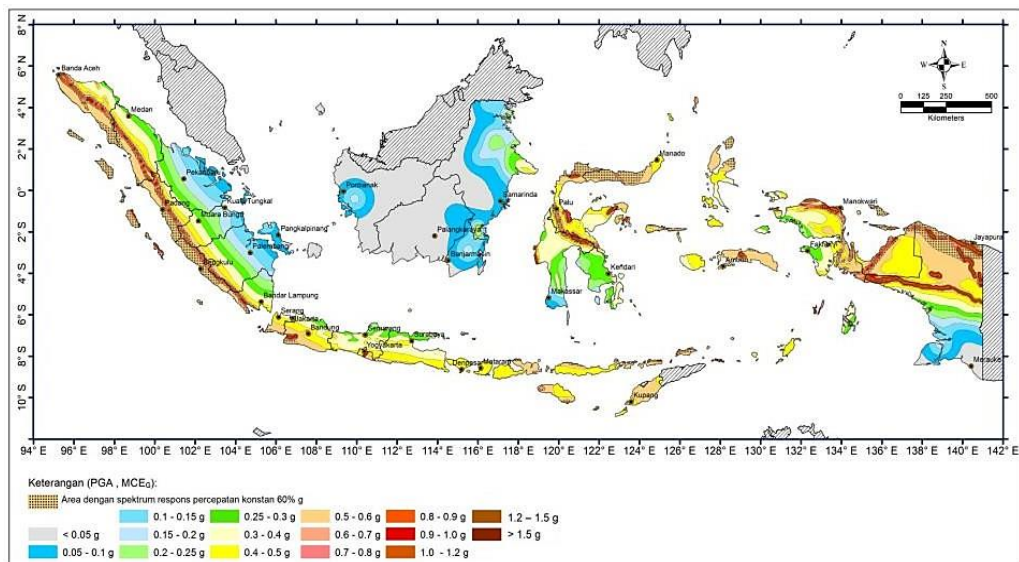
(Sumber : Badan Standarisasi Nasional, 2020)

2.4.5 Beban Gempa (*Earthquake*)

Beban gempa merupakan beban dalam arah horizontal maupun vertikal dari struktur yang ditimbulkan oleh gerakan tanah akibat gempa bumi. Berdasarkan SNI 1726:2019 gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2%. Perencanaan struktur tahan gempa bertujuan untuk mencegah terjadinya keruntuhan struktur yang dapat berakibat fatal. Beban gempa yang bekerja pada struktur dianalisis menggunakan prosedur gaya lateral statik ekuivalen dan menggunakan analisis dinamik spektrum respons ragam. Prosedur analisa dan desain seismik yang digunakan dalam perencanaan struktur bangunan gedung mengacu pada SNI 1726:2019 mengenai perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. Berikut merupakan parameter-parameter yang digunakan dalam analisa beban gempa

1. Peta Zonasi Gempa Indonesia

Wilayah Indonesia dipetakan berdasarkan tingkat risiko gempa yang ditentukan atas dasar besarnya percepatan puncak batuan dasar (*Peak Ground Acceleration, PGA*). Berikut gambar peta kegempaan Indonesia dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Peta PGA MCEG

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

2. Kategori Risiko Bangunan dan Keutamaan Gempa

Berdasarkan SNI 1726:2019 penggolongan kategori risiko bangunan dan faktor keutamaan gempa disajikan dalam Tabel 2.15 berikut :

Tabel 2.15 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan.	I	1,00
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk kategori risiko I,III dan IV.	II	1,00

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko terhadap manusia pada saat terjadi kegagalan.	III	1,25
Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk dalam kategori risiko IV.	IV	1,50

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

3. Klasifikasi situs dan koefisien situs

Penentuan klasifikasi situs berguna untuk memberikan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. 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, profil tanah harus diklasifikasikan sesuai dengan Tabel 2.20, berdasarkan profil tanah lapisan 30 m paling atas. Penetapan kelas situs harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium. Berikut merupakan Tabel 2.16 klasifikasi situs berdasarkan SNI 1726:2019:

Tabel 2.16 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	\bar{V}_s (m/s)	N atau $\bar{N}_{\bar{c}h}$	\bar{S}_v (kPa)
SA (batuan keras)	>1500 m/s	N/A	N/A
SB (batuan)	750-1500 m/s	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan)	350-750 m/s	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175-350 m/s	15-50	50-100
SE (tanah lunak)	<175 m/s	<15	<50

Kelas Situs	\bar{V}_s (m/s)	N atau $\bar{N}_{\bar{c}h}$	\bar{S}_U (kPa)
	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 $\bar{S}_U < 25$ kPa 		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisa respons spesifik-situs yang mengikuti 6.9)	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 likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah. Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) 		

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

Penentuan koefisien situs dan parameter respons spektrum percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik. 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). Berikut Tabel 2.16 dan Tabel 2.17 nilai koefisien situs (F_a dan F_v) berbagai kelas yang ada.

Tabel 2.17 Koefisien Situs F_a

Kelas Situs	Parameter respon spektral percepatan gempa MCER terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$ detik, SS					
	$SS \leq 0,25$	$SS = 0,5$	$SS = 0,75$	$SS = 1$	$SS = 1,25$	$SS = 1,5$
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	$S_S^{(a)}$					

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

Catatan:

- (a) Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik.
- (b) Untuk nilai antara S_s dapat dilakukan dengan interpolasi linier.

Nilai F_a dan F_v digunakan untuk menghitung parameter respons percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan pada periode (S_{M1}), ditentukan sebagai berikut:

$$S_{ms} = F_a S_s \quad (2.94)$$

$$S_{m1} = F_v S_1 \quad (2.95)$$

Keterangan:

S_s = Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan periode pendek,

S_1 = Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan periode 1 detik.

1. Parameter percepatan spektral desain

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}) dan pada periode 1 detik (S_{D1}) harus ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.96)$$

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.97)$$

2. Spektrum respons desain

Spektrum respons desain dibentuk setelah nilai dari S_{DS} dan S_{D1} dihitung. Kurva spektrum respons desain dikembangkan dengan mengacu Gambar 2.29 dan mengikuti ketentuan dibawah ini:

1. Untuk $T \leq T_0$, spektrum respons percepatan desain, S_a , harus diambil dari persamaan:

$$S_a = S_{DS} (0,4 + 0,6) \frac{T}{T_U} \quad (2.98)$$

Dengan:

$$T_o = 0,2 \left(\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \right) \quad (2.99)$$

T = waktu getar alami, dinyatakan dalam detik.

2. Untuk $T_0 \leq T \leq T_s$, spektrum respons percepatan desain S_a , sama dengan S_{DS} , dengan:

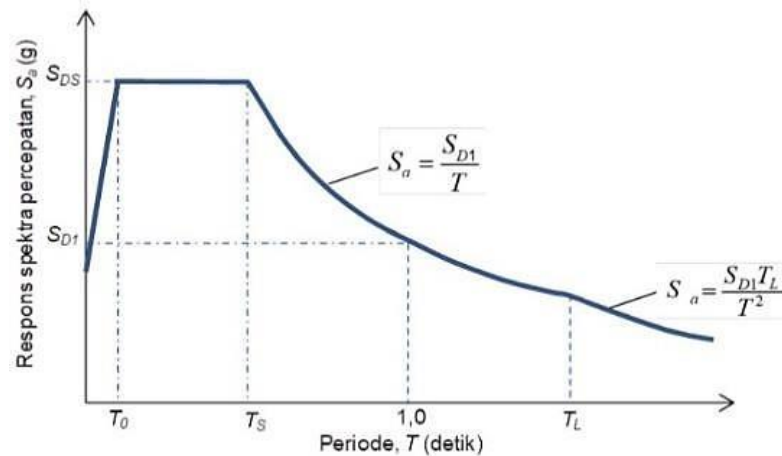
$$T_s = \left(\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \right) \quad (2.100)$$

3. Untuk periode yang lebih besar T_s dan lebih kecil atau sama dengan T_L , spektrum respon desain (S_a) diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \left(\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \right) \quad (2.101)$$

4. Untuk periode lebih besar dari T_s , respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \left(\frac{S_{D1} T_L}{T^2} \right) \quad (2.102)$$



Gambar 2.16 Grafik Spektrum Respon Desain

(Sumber : SNI 1726:2019)

3. Kategori Desain Seismik

Struktur harus ditetapkan memiliki suatu kategori desain seismik yang mengikuti SNI 1726:2019. Kategori desain seismik dinyatakan dalam huruf A sampai F, dengan huruf A dikategorikan sebagai risiko gempa paling kecil. Struktur dengan kategori risiko I, II, atau III yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, $S_1 \geq 0,75$ harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik E. Struktur yang berkategori risiko IV yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, $S_1 \geq 0,75$ harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik F. Semua struktur lainnya harus ditetapkan kategori desain seismiknya berdasarkan kategori risiko dan parameter respons spektral percepatan desain, S_{DS} dan S_{D1} . Struktur yang masuk ke dalam dua KDS, maka struktur harus ditetapkan ke dalam kategori desain seismik yang lebih parah. Berikut merupakan KDS berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} yang disajikan dalam Tabel 2.18 dan Tabel 2.19 di bawah ini.

Tabel 2.18 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Periode Pendek (SDS)

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	A
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	C	C
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

Tabel 2.19 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan Periode Pendek (SD1)

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: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

4. Pemilihan Sistem Struktur

Sistem struktur gedung dibentuk oleh komponen balok, kolom, pelat dan dinding geser. Sistem struktur penahan gaya gempa lateral dan vertikal harus dipilih sesuai KDS dan ketinggian strukturnya. Setiap sistem pemikul gaya seismik yang dipilih harus didesain dan didetailkan sesuai dengan persyaratan khusus. Sistem struktur memiliki beberapa jenis yaitu sistem dinding penumpu (SDP), sistem rangka gedung (SRG), sistem rangka pemikul momen (SRPM) berdasarkan SNI 1726 terdapat 3 jenis SRPM yaitu SRPMB (B=Biasa), SRPMM (M=Menengah), SRPMK (K=Khusus) SRPMB tidak perlu pendetailan khusus. SRPMM dan SRPMK harus memenuhi persyaratan pendetailan. dan sistem ganda (SG) yang terdiri dari rangka ruang lengkap berupa SRPM yang memikul beban gravitasi dan dinding geser memikul beban lateral. Tipe-tipe sistem struktur yang dipilih harus

mengacu pada tabel di bawah ini sesuai SNI 1726. Untuk Faktor R, C_d , Ω_0 dan untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik dapat dilihat pada Tabel 2.20

Tabel 2.20 Faktor R, C_d , Ω_0 dan untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R_a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
Sistem rangka pemikul momen								
- Rangka pemikul beton momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
- Rangka pemikul beton momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
- Rangka pemikul beton momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
- Dinding geser beton bertulang khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
- Dinding geser beton bertulang biasa	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
Sistem ganda dengan rangka pemikul momen menengah mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
- Dinding geser beton bertulang khusus	6½	2½	5	TB	TB	48	30	30
- Dinding geser beton bertulang biasa	5½	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
Sistem interaktif dinding geser-rangka dengan rangka pemikul momen beton bertulang biasa dan dinding geser beton bertulang biasa	4½	2½	4	TB	TI	TI	TI	TI

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

5. Ketidakberaturan Struktur

Struktur harus diklasifikasikan beraturan atau tidak beraturan berdasarkan pada kriteria dalam pasal 7.3.2 SNI 1726:2019. Klasifikasi tersebut harus didasarkan pada konfigurasi horizontal dan vertikal dari struktur. Struktur yang mempunyai satu atau lebih tipe ketidakberaturan seperti yang terdapat dalam Tabel 13 dan 14 SNI 1726:2019 harus dinyatakan mempunyai ketidakberaturan struktur horizontal dan ketidakberaturan struktur vertikal. Struktur-struktur yang didesain untuk kategori desain seismik sebagaimana yang terdapat dalam Tabel 13 dan tabel 14 harus memenuhi persyaratan dalam pasal-pasal yang dirujuk dalam tabel tersebut. Ketidakberaturan struktur vertikal tipe 1a, 1b atau 2 tidak perlu ditinjau jika tidak ada rasio simpangan antar lantai akibat gaya seismik lateral desain yang nilainya lebih besar dari 130% rasio simpangan antar lantai tingkat di atasnya. Pengaruh torsi tidak perlu ditinjau pada perhitungan simpangan antar lantai. Berikut merupakan Tabel 2.21 yang menunjukkan ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan struktur vertikal pada Tabel 2.22 berdasarkan SNI 1726:2019 :

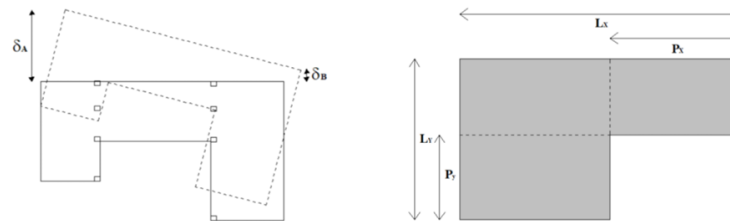
Tabel 2.21 Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan KDS
1a.	Ketidakberaturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, disalah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,2 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur dimana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 16 11.3.4	D, E, dan F B, C, D, E dan F C, D, E dan F C, D, E dan F D, E dan F B, C, D, E dan F
1b.	Ketidakberaturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu	7.3.3.1 7.3.3.4 7.3.4.2 7.7.3 7.8.4.3	E dan F D B, C, dan D C dan D

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan KDS
	ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragma kaku atau setengah kaku	7.12.1 Tabel 16 11.3.4	C dan D D B, C, dan D
2.	Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau.	7.3.3.4 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
3.	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50% daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50% dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya	7.3.3.4 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
4.	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	B, C, D,E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
5.	Ketidakberaturan sistem nonparalel didefnisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik.	7.5.3 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	C, D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F

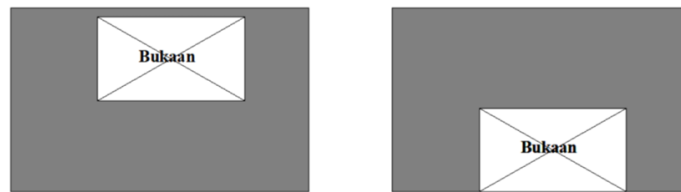
(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

Berikut merupakan Gambar 2.17 dari ketidakberaturan horizontal pada struktur:

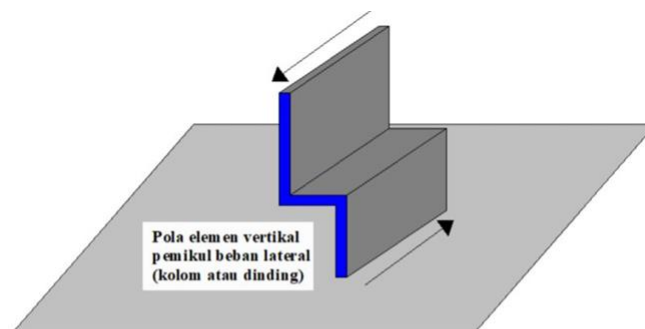


(a) Ketidakberaturan 1a dan 1b

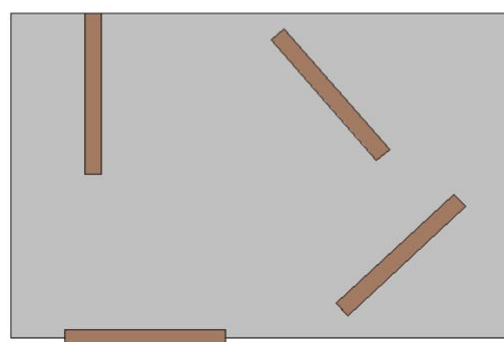
(b) Ketidakberaturan 2



(c) Ketidakberaturan 3



(d) Ketidakberaturan 4



(e) Ketidakberaturan 5

Gambar 2.17 Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur

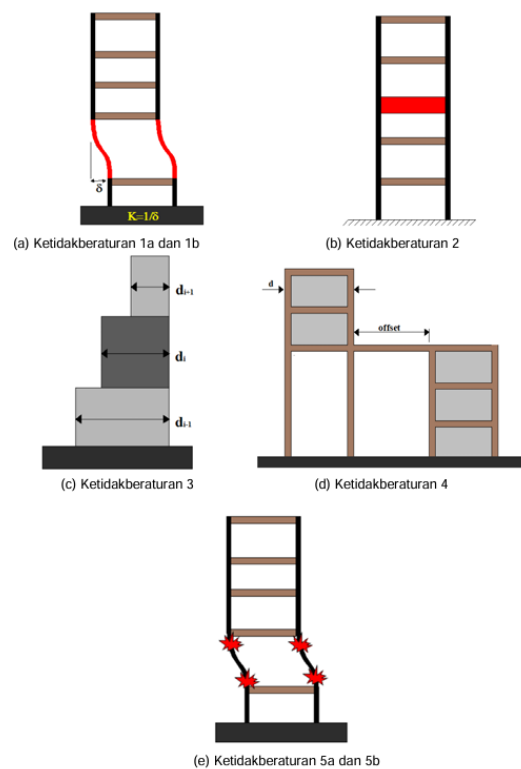
(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

Tabel 2.22 Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan KDS
1a.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel 16	D,E, dan F
1b.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	7.3.3.1 Tabel 16	E dan F D, E dan F
2.	Ketidakberaturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 16	D, E dan F
3.	Ketidakberaturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 16	D, E dan F
4.	Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.	7.3.3.3 7.3.3.4 Tabel 16	B, C, D, E,F D, E, dan F D, E, dan F
5a.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya.	7.3.3.1 Tabel 16	E dan F D, E, dan F

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan KDS
5b.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65 % kekuatan lateral tingkat di atasnya.	7.3.3.1 7.3.3.2 Tabel 16	D, E, dan F B dan C D, E, dan F

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)



Gambar 2.18 Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

Ketidakberaturan vertikal struktur bisa dilihat pada Gambar 2.18 seperti yang ditunjukkan pada gambar diatas.

6. Simpangan Antar Lantai

Simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin (Δ_a) seperti didapatkan dari Tabel 2.23 di bawah ini yaitu untuk semua tingkat.

Tabel 2.23 Simpangan Antar Tingkat Izin

Struktur	Kategori risiko		
	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.	0,025 h_{sx}	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}
Struktur dinding geser kantilever batu bata _d	0,010 h_{sx}	0,010 h_{sx}	0,010 h_{sx}
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}
Semua struktur lainnya	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}	0,010 h_{sx}

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

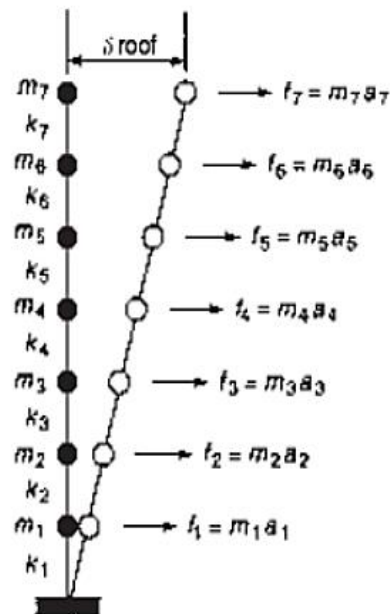
Catatan:

- h_{sx} adalah tinggi tingkat dibawah tingkat-x.
- Untuk sistem pemikul gaya seismik yang terdiri dari hanya rangka momen dalam kategori desain seismik D, E, F dan F, simpangan antar tingkat izin harus sesuai dengan persyaratan.
- Tidak boleh ada batasan simpangan antar tingkat untuk struktur satu tingkat dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.
- Struktur dimana sistem struktur dasar terdiri dari dinding geser batu bata dan didesain sebagai elemen vertikal kantilever dari dasar atau pendukung fondasinya yang dikonstruksikan sedemikian agar penyaluran momen di antara dinding geser (kopel) dapat diabaikan.

2.4.5.1 Prosedur Analisis Dinamik (Spektrum Respons Ragam)

Metode analisis respon spektrum merupakan metode analisis struktur bangunan dengan menggunakan spektrum gempa yang digambarkan dalam bentuk kurva hubungan antara periode dengan nilai percepatan bangunan ketika terkena beban gempa. Struktur gedung tidak beraturan yang tidak memenuhi ketentuan

Pasal 7.3.2 SNI 1726:2019, pengaruh gempa rencana terhadap struktur gedung tersebut harus ditentukan melalui analisis respons dinamik 3 dimensi menggunakan bantuan perangkat lunak. Upaya mencegah terjadinya respons struktur gedung terhadap pembebanan gempa yang dominan dalam rotasi, maka gerak ragam pertama (fundamental) harus dominan dalam translasi. Berikut merupakan Gambar 2.19 konsep metode respon spektrum :



Gambar 2.19 Konsep Metode Respon Spektrum

Ketentuan analisis spektrum respons ragam diatur dalam pasal 7.9 SNI 1726:2019. Berikut merupakan ketentuan-ketentuan analisis spektrum respons :

1. Jumlah Ragam

Analisis harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar 100 % dari massa struktur. Untuk mencapai ketentuan analisa ini, ragam satu badan kaku (single rigid body) dengan periode 0,05 detik, diizinkan untuk mengambil semua ragam dengan periode di bawah 0,05 detik.

2. Parameter Respons Ragam

Nilai untuk masing-masing parameter desain terkait gaya yang ditinjau, termasuk simpangan antar tingkat, gaya dukung, dan gaya elemen struktur individu untuk masing-masing ragam respons harus dihitung menggunakan

properti masing-masing ragam dan spektrum respons didefinisikan dalam R dibagi dengan kuantitas (R/I_e) . Nilai untuk perpindahan dan kuantitas simpangan antar tingkat harus dikalikan dengan kuantitas (C_d/I_e) .

3. Parameter Respons Terkombinasi

Nilai untuk masing-masing parameter yang ditinjau, yang dihitung untuk berbagai ragam, harus dikombinasikan menggunakan metode akar kuadrat jumlah kuadrat (SRSS) atau metode kombinasi kuadrat lengkap (CQC), sesuai dengan SNI 1726. Metode CQC harus digunakan untuk masing-masing nilai ragam dimana ragam yang berdekatan mempunyai korelasi silang yang signifikan di antara respons translasi dan torsi.

4. Skala Nilai Desain untuk Respons Terkombinasi

Geser dasar (V) harus dihitung dalam dua arah horizontal ortogonal menggunakan periode fundamental struktur yang dihitung T dalam masing-masing arah dan prosedur ekuivalen. Penyekalaan gaya apabila periode fundamental hasil analisis lebih besar dari $C_u.T_a$ pada suatu arah tertentu, maka periode struktur T harus diambil sebesar $C_u.T_a$. Apabila kombinasi respons untuk gaya geser dasar hasil analisis ragam (V_t) kurang dari 100 % dari gaya geser (V) yang dihitung melalui metode statik ekuivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan dengan V/V_t , dimana V adalah gaya geser dasar statik ekuivalen yang dihitung sesuai pasal ini dan V_t adalah gaya geser dasar yang didapatkan dari hasil analisis kombinasi ragam. Apabila kombinasi respons untuk gaya geser dasar hasil analisis ragam (V_t) $< C_s W$, dan dimana C_s ditentukan berdasarkan persamaan (2.15), maka simpangan harus dikalikan dengan $C_s W/V_t$.

5. Distribusi geser horizontal

Distribusi geser horizontal harus sesuai dengan persyaratan pasal 7.8.4, kecuali bahwa pembesaran torsi menurut 7.8.4.3, tidak disyaratkan bila pengaruh torsi tak terduga disertakan dalam model analisis dinamik.

6. Pengaruh P-delta

Pengaruh P-delta harus ditentukan sesuai dengan peraturan. Geser dasar yang digunakan untuk menentukan geser tingkat dan simpangan antar tingkat harus sesuai dengan ketentuan.

2.4.5.2 Prosedur Analisis Statik Ekvivalen

Prosedur perhitungan gaya lateral statik ekivalen berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 7.8, berikut prosedur perhitungannya :

1. Geser Dasar Seismik

Gaya geser dasar seismik (V) dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$V = C_s \cdot W \quad (2.103)$$

Keterangan :

C_s = koefisien respons seismik

W = Berat seismik efektif struktur

2. Perhitungan Koefisien Respons Seismik

a.) Koefisien respons seismik, C_s harus dihitung dengan persamaan:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.104)$$

Keterangan :

S_{DS} = parameter percepatan spektrum respon desain dalam rentang periode pendek

R = faktor modifikasi respon 38

I_e = faktor keutamaan gempa

b.) Nilai C_s yang dihitung menggunakan persamaan diatas tidak perlu melebihi :

$$C_{s(maks)} = \frac{S_{D1}}{\left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.105)$$

c.) Nilai C_s yang dihitung juga tidak boleh kurang dari:

$$C_{s(\min)} = 0,044 \cdot S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (2.106)$$

d.) Struktur dengan nilai $S_1 \geq 0,6g$, maka C_s dihitung :

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.107)$$

Keterangan :

SD_1 = parameter percepatan respons spektral desain pada periode sebesar 1,0 detik.

T = periode fundamental struktur (detik)

S_1 = parameter percepatan respons spektral maksimum

3. Waktu Getar Alami

Periode alami struktur (T) dalam arah yang ditinjau harus diperoleh menggunakan sifat struktur dan karakteristik deformasi elemen pemikul dalam analisis yang teruji. Periode alami tidak boleh melebihi hasil koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dari Tabel 2.24 dan periode alami pendekatan (T_a). Berikut tabel koefisien C_u :

Tabel 2.24 Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

Parameter percepatan respon spektral desain pada 1 detik, SD_1	Koefisien 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: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

Sebagai alternatif dalam melakukan analisis untuk menentukan periode alami struktur (T) diizinkan secara langsung menggunakan periode pendekatan (T_a) yang dihitung menggunakan rumus :

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.108)$$

Dengan :

h_n = ketinggian struktur (m) diatas dasar sampai tingkat tertinggi struktur.

C_t dan x ditentukan berdasarkan Tabel 2.25 dibawah ini.

Tabel 2.25 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 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 :		
- Rangka Baja Pemikul Momen	0,0724	0,8
- 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 struktur lainnya	0,0488	0,75

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

4. Distribusi Vertikal Gaya Seismik

Pada distribusi vertikal gaya gempa, gaya gempa lateral (F_x) (kN) yang timbul di semua tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut :

$$F_x = C_{vx}V \quad (2.109)$$

Dengan,

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2.110)$$

Keterangan:

- C_{vx} = Faktor distribusi vertikal
- V = Gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur, dinyatakan dalam kilonemton (kN)
- W_i dan W_x = Bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x
- h_i dan h_x = Tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m)
- K = Eksponen yang terkait dengan perioda struktur sebagai berikut: untuk struktur yang mempunyai perioda sebesar 2,5 detik atau lebih, $k = 2$, untuk struktur yang mempunyai perioda antara 0,5 dan 2,5 detik, k harus sebesar 2 atau harus ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

5. Distribusi Horizontal Gaya Gempa

Sedangkan pada distribusi horizontal gaya gempa, geser tingkat desain gempa di semua tingkat (V_x) (kN) harus ditentukan dari persamaan berikut :

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad (2.111)$$

Keterangan :

F_i adalah bagian dari geser dasar seismic (V) yang timbul di tingkat i , (kN).

Geser tingkat desain gempa (V_x) (kN) harus didistribusikan pada berbagai elemen vertikal system penahan gaya gempa di tingkat yang ditinjau berdasarkan pada kekakuan lateral relative elemen penahan vertikal dan diafragma.

6. Torsi Bawaan

Desain diafragma tidak fleksibel harus menyertakan momen torsi bawaan (M_t) yang dihasilkan dari lokasi massa struktur ditambah momen torsi tak terduga (M_{ta}) akibat perpindahan pusat massa dari lokasi aktualnya yang diasumsikan

pada masing-masing arah dengan jarak sebesar 5 % dimensi struktur tegak lurus terhadap arah gaya yang diterapkan. Sehingga :

$$M_t = V_x e \quad (2.112)$$

Keterangan :

M_t = Momen torsi bawaan.

V_x = Geser pada tingkat x ditiap arah yang ditinjau.

e = Eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan, yang dapat terjadi pada kedua arah x dan y.

7. Guling

Distribusi gaya vertikal untuk diafragma fleksibel harus memperhitungkan posisi dan distribusi massa yang didukungnya. Gaya seismik lateral (F_x) akan menghasilkan momen guling (M_x) yang dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$M_x = \tau \sum_{i=1}^n F_i (h_i - h_x) \quad (2.113)$$

keterangan : F_i = bagian dari gaya geser dasar (V) pada lantai ke-i

h_i, h_x = tinggi dari dasar ke lantai i dan x

τ = Koefisien reduksi momen guling

= 1,0 untuk 10 lantai keatas

= 0,8 untuk lantai ke-20 dari atas dan bawah

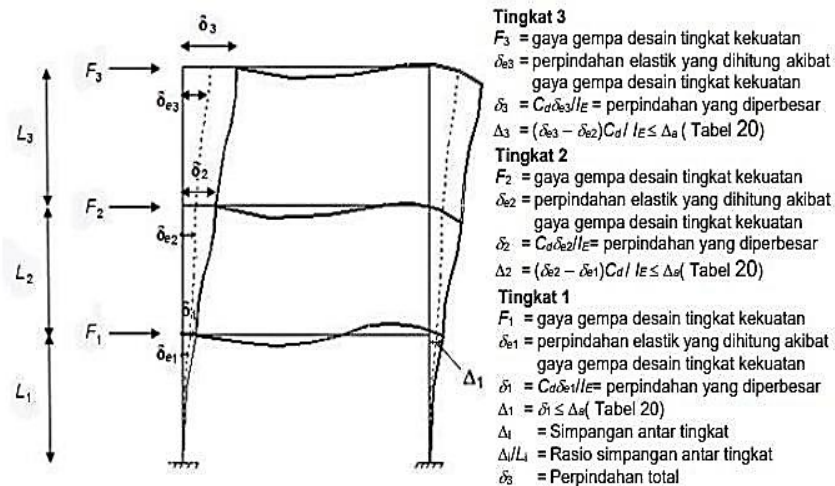
= Interpolasi linier antara 0,8 dan 1,0 untuk lantai yang terletak diantara lantai ke-20 dan ke-10 dibawah lantai puncak.

Nilai τ diizinkan untuk diambil sama dengan 1,0 untuk seluruh lantai.

8. Penentuan Simpangan Antar Lantai (Δ)

Penentuan simpangan antar tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan simpangan pada pusat massa di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau. Apabila pusat massa tidak segaris dalam arah vertikal, diizinkan untuk

menghitung simpangan di dasar tingkat berdasarkan proyeksi vertikal dari pusat massa tingkat di atasnya. Jika desain tegangan izin digunakan, Δ harus dihitung menggunakan gaya seismik desain yang ditetapkan dalam prosedur gaya lateral ekuivalen tanpa reduksi untuk desain tegangan izin. Berikut merupakan Gambar 2.20 penentuan simpangan antar lantai :



Gambar 2.20 Penentuan Simpangan Antar Lantai

(Sumber :Badan Standarisasi Nasional, 2019a)

Bagi struktur yang didesain untuk kategori desain seismik C, D, E atau F yang memiliki ketidakberaturan horizontal Tipe 1a atau 1b pada Tabel 13, simpangan antar tingkat desain, Δ , harus dihitung sebagai selisih terbesar dari simpangan titiktitik yang segaris secara vertikal di sepanjang salah satu bagian tepi struktur, di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau. Simpangan pusat massa di tingkat-x (δ_x) (mm) harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\delta = \frac{C_d \cdot \delta_{xe}}{I_e} \quad (2.114)$$

Keterangan :

C_d = Faktor pembesaran simpangan lateral dalam Tabel 12 SNI 1726:2019.

δ_{xe} = Simpangan di tingkat-x yang disyaratkan pada pasal ini, yang ditentukan dengan analisis elastik

I_e = Faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan 0

9. P-delta

Pengaruh P-delta pada geser tingkat dan momen, gaya dan momen elemen struktur yang dihasilkan, dan simpangan antar tingkat yang diakibatkannya tidak perlu diperhitungkan bila koefisien stabilitas (θ) seperti ditentukan oleh persamaan berikut sama dengan atau kurang dari 0,10 :

$$\delta = \frac{C_d \cdot \Delta x_e}{I_e} \quad (2.115)$$

Keterangan :

θ = Koefisien stabilitas

P_x = Beban desain vertikal total pada dan di atas tingkat-x, (kN);
bila menghitung , faktor beban individu tidak perlu melebihi 1,0

Δ = Simpangan antar tingkat desain seperti didefinisikan dalam penentuan simpangan antar lantai, terjadi secara serentak dengan V_x (mm)

I_e = Faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan Tabel 3 pada SNI 1726:2019

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 dalam Tabel diatas

Koefisien stabilitas (θ) tidak boleh melebihi θ_{maks} , ditentukan sebagai berikut:

$$\theta_{maks} = \frac{0,5}{\beta \cdot C_d} \leq 0,25 \quad (2.116)$$

Keterangan:

θ_{maks} = Koefisien stabilitas maksimum

β = Rasio kebutuhan geser terhadap kapasitas geser untuk tingkat

x dan $x-1$, rasio ini diizinkan secara konservatif diambil sebesar 1,0

C_d = Faktor pembesaran defleksi dalam diatas.

2.4.6 Kombinasi Pembebanan

Setiap komponen struktur dirancang untuk dapat memikul beban yang lebih besar dari pada beban layan guna memberikan jaminan keamanan terhadap kegagalan struktur. Beban-beban yang bekerja pada struktur dapat berupa kombinasi dari berbagai macam kasus beban yang mungkin terjadi pada saat yang bersamaan. Besaran faktor beban harus cukup untuk membatasi kegagalan struktur secara tiba-tiba, namun juga harus menghasilkan struktur yang seekonomis mungkin, sehingga struktur dapat berfungsi dengan baik selama umur rencana.

Berdasarkan persyaratan dalam SNI 2847:2019 pasal 5.3 besarnya kuat perlu (U) yang harus dipertimbangkan sebagai kondisi paling kritis yang harus dipikul suatu elemen struktur ditunjukkan dalam Tabel 2.26 dibawah ini.

Tabel 2.26 Kombinasi Beban

Kombinasi beban	Persamaan	Beban utama
$U = 1,4D$	(1)	D
$U = 1,2D + 1,6L + 0,5(L_r \text{ atau } R)$	(2)	L
$U = 1,2D + 1,6(L_r \text{ atau } R) + (1,0L \text{ atau } 0,5 W)$	(3)	L_r atau R
$U = 1,2D + 1,0W + 1,0L + 0,5(L_r \text{ atau } R)$	(4)	W
$U = 1,2D + 1,0E + 1,0L$	(5)	E
$U = 0,9D + 1,0W$	(6)	W
$U = 0,9D + 1,0E$	(7)	E

(Sumber: Badan Standarisasi Nasional, 2019b)

Keterangan:

U = kombinasi beban terfaktor

D = beban mati (*dead load*)

L = beban hidup (*live load*)

L_r = beban hidup atap (*live roof load*)

R = beban hujan (*rain load*)

W = beban angin (*wind load*)

E = beban gempa (*earth quake load*)

Berikut merupakan beberapa catatan tambahan untuk kombinasi beban:

1. Faktor beban hidup (L) dalam persamaan (4,5,6) diizinkan direduksi hingga 0,5, kecuali untuk garasi, tempat berkumpul publik dan luasan dimana L lebih besar dari 4,8 kN/m².
2. Bila beban angin (W) didasarkan pada tingkat layan, $1,6W$ harus digunakan sebagai pengganti dari $1,0W$ dalam persamaan (4 dan 6) dan $0,8W$ harus digunakan sebagai pengganti pada persamaan (3).