

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Struktur Beton Bertulang

Beton memiliki karakteristik utama berupa kuat terhadap beban tekan, tetapi juga bersifat getas / mudah patah atau rusak terhadap beban tarik. Di sisi lain, baja tulangan memiliki kekuatan tarik yang lebih baik daripada kekuatan tekannya. Penggabungan kedua material ini secara komposit akan didapatkan material baru yang disebut beton bertulang. Material ini mengkombinasikan sifat unggul dari kedua penyusunnya, yaitu baja tulangan mampu menahan beban tarik dan beton mampu menahan beban tekan (Asroni, 2017).

2.1.1 Material Beton

Berdasarkan SNI 2847:2019 beton merupakan bahan bangunan komposit berupa campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Menurut (Asroni, 2017) kekuatan beton terdiri dari kuat tekan beton, kuat tarik beton, dan modulus elastisitas beton.

Kuat tekan beton merupakan besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur ketika dibebani dengan gaya tekan tertentu. Gaya tekan tersebut dihasilkan oleh mesin tekan melalui uji tekan yang dapat dilakukan terhadap benda uji berbentuk silinder atau kubus (Untu et al., 2015).

Kuat tekan beton diberi notasi f'_c , yaitu kuat tekan benda uji beton yang berumur 28 hari sesuai dengan ketentuan. Nilai kuat tekan beton dapat dihitung menggunakan persamaan (2.1):

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Keterangan:

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

P = besar beban tekan (N)

A = luas penampang beton (mm²)

Kuat tarik beton adalah salah satu parameter penting dalam desain struktur beton untuk memperhitungkan fenomena retak pada struktur beton. Kuat tarik beton biasanya 8-15% dari kuat tekan beton. Selain dengan menggunakan hasil tes tarik, nilai kuat tarik beton (f_{ct}) juga bisa dilakukan dengan pendekatan berdasarkan hasil kuat tekan (f'_c) pada persamaan (2.2).

$$f_{ct} = 0,5\sqrt{f'_c} \text{ hingga } f_{ct} = 0,6\sqrt{f'_c} ; \text{ untuk beton normal} \quad (2.2)$$

Menurut SNI 2847:2019 Pasal 19.2.2.1 modulus elastisitas beton (E_c) didefinisikan sebagai kemiringan garis yang digambar dari tegangan nol hingga tegangan tekan sebesar $0,45f'_c$. Modulus elastisitas beton sensitif terhadap modulus elastisitas agregat dan proporsi campuran beton. Nilai modulus elastisitas terukur berkisar antara 80% hingga 120% dari nilai terhitung. Modulus elastisitas beton untuk beton normal dapat ditentukan melalui persamaan (2.3) berikut.

$$E_c = \sqrt{4700 f'_c} \quad (2.3)$$

2.1.2 Material Tulangan Baja

Tulangan baja umumnya terdiri dari tulangan polos (BjTP) dan tulangan baja sirip/ulir (BjTS). Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 20.2.2.2 nilai modulus elastisitas baja dapat diambil sebesar 200.000 Mpa. Sifat mekanis tulangan baja berdasarkan SNI 2052:2017 dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat Mekanis Baja Tulangan Beton

Kelas Baja Tulangan	Kuat Leleh (f_y)	Kuat Tarik (f_u)
	Mpa	Mpa
BjTP 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350
BjTS 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350
BjTS 420A	Min. 420 Maks. 545	Min. 525
BjTS 420B	Min. 420 Maks. 545	Min. 525
BjTS 520	Min. 520 Maks 645	Min. 650

Kelas Baja Tulangan	Kuat Leleh (fy)	Kuat Tarik (fu)
	Mpa	Mpa
BjTS 550	Min. 550 Maks 675	Min. 687,5
BjTS 700	Min. 700 Maks 825	Min. 805

Pada beton bertulang tulangan ulir diutamakan untuk menahan beban tarik pada struktur beton bertulang, sedangkan beban tekan yang bekerja cukup ditahan oleh betonnya. Sehingga dalam penggunaannya pada gedung disarankan untuk menggunakan tulangan baja ulir sebagai tulangan utama karena bentuk penampangnya yang bersirip mampu meningkatkan lekatan dengan beton serta mengurangi lebar retak beton pada daerah tarik (Setiawan, 2016).

2.1.3 Selimut Beton

Selimut beton diukur dari permukaan paling luar tulangan yang digunakan dengan tujuan untuk melindungi tulangan dari pengaruh dari luar seperti kebakaran, cuaca, korosi atau efek lainnya, serta berguna untuk mengembangkan lekatan antara baja tulangan dengan beton (Antonius, 2021). Tebal selimut beton diatur dalam SNI 2847 Pasal 20.6.1.3 seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tebal 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 Φ 13 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,	Tulangan utama,	40

Paparan	Komponen Struktur	Tulangan	Ketebalan Selimut, mm
	kolom, pedestal, dan batang tarik	sengkang, sengkang ikat, spiral, dan sengkang penyangkang	

2.2 Perencanaan Struktur Atas

2.2.1 Pelat Lantai

Pelat beton bertulang merupakan struktur tipis berbahan beton bertulang yang dipasang secara horizontal. Beban yang bekerja pada pelat ini bersifat tegak lurus terhadap permukaannya. Karena kekakuannya, pelat lantai berperan sebagai diafragma dalam konstruksi gedung, berfungsi sebagai pengaku horizontal yang memperkuat kekakuan balok portal (Asroni, 2017).

Pelat lantai dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu pelat satu arah dan pelat dua arah. Perbedaan keduanya didasari oleh arah penyaluran beban. Pelat satu arah adalah pelat beton bertulang yang hanya memiliki tulangan utama dalam satu arah. Hal ini terjadi ketika beban yang bekerja pada pelat terutama menimbulkan momen lentur sepanjang satu arah saja. Pelat satu arah memiliki rasio antara bentang panjang (l_y) dan bentang pendek (l_x) lebih besar atau sama dengan 2 ($l_y/l_x \geq 2$), sehingga hampir seluruh beban disalurkan ke arah bentang yang lebih pendek.

Sedangkan pelat dua arah merupakan pelat berbentuk segi empat yang ditumpu oleh elemen struktur yang sangat kaku pada keempat sisinya, seperti balok atau dinding geser. Pelat dua arah memiliki rasio antara bentang panjang (l_y) dan bentang pendek (l_x) kurang dari 2 ($l_y/l_x < 2$). Karena pelat ini menahan momen lentur pada kedua arah, tulangan utamanya dipasang dalam dua arah bentang yang saling tegak lurus.

2.2.1.1 Preliminary Design Pelat Lantai

Tebal minimum pelat satu arah untuk beton berat normal dan f_y 420 MPa sesuai pada SNI 2847:2019 Tabel 7.3.1.1. Adapun detailnya dapat dilihat pada

Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.3 Ketebalan Minimum Pelat Satu Arah

Kondisi Tumpuan	h minimum
Tumpuan Sederhana	l/20
Satu Ujung Menerus	l/24
Kedua Ujung Menerus	l/28
Kantilever	l/10

Tebal minimum pelat dua arah yang mempunyai balok di semua sisinya sesuai dengan SNI 2847:2019 Tabel 8.3.1.2. Adapun detailnya dapat dilihat pada Tabel 2.4. Ketebalan pelat lantai dipengaruhi beberapa parameter yang diantaranya, panjang bentang bersih pelat lantai (l_n), rasio panjang bentang bersih terpanjang dengan bentang bersih terpendek (β), kuat leleh tulangan baja, dan nilai rata-rata (α_{fm}) dari keempat balok perangkai.

Tabel 2.4 Tabel Tebal Minimum Pelat Dua Arah

α_{fm}	h minimum, mm	
$\alpha_{fm} \leq 0,2$	Pasal 8.3.1.1 berlaku	
$0,2 < \alpha_{fm} \leq 2,0$	Terbesar dari:	$\frac{l_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 5\beta(\alpha_{fm} - 0,2)}$
		125
$\alpha_{fm} > 2,0$	Terbesar dari:	$\frac{l_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 9\beta}$
		90

2.2.1.2 Penulangan Pelat

Pelat dua arah adalah pelat yang mengalami lendutan pada kedua arah bentangnya. Oleh karena itu, tulangan lentur harus dipasang pada kedua arah tersebut secara tegak lurus. Besaran minimum luas tulangan lentur ($A_{s,min}$) untuk pelat dua arah telah ditetapkan dalam SNI 2847:2019 Pasal 8.6.1, seperti yang tercantum dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Tabel Luas Minimum Tulangan Lentur untuk Pelat Dua Arah

Jenis Tulangan	f_y (MPa)	$A_{s \min}$ (mm ²)	
Batang ulir	< 420	0,0020 A_g	
Batang ulir atau kawat las	≥ 420	Terbesar dari:	$\frac{0,0018 \times 421}{f_y} A_g$
			0,0014 A_g

Spasi tulangan maksimum untuk tulangan lentur pada pelat menurut SNI 2847:2019 pasal 7.7.2.2, harus kurang dari 3 kali tebal pelat (3h) atau 450 mm, diambil yang terkecil. Untuk spasi minimum tulangan pelat mengacu pada SNI 2847:2019 pasal 25.2, yaitu nilai terbesar dari 25 mm, diameter batang tulangan (db), atau 4/3 dari ukuran nominal agregat maksimum ($4/3d_{agg}$). Untuk tulangan susut dan suhu, spasi maksimum tidak boleh melebihi nilai terkecil antara 5 kali tebal pelat (5h) dan 450 mm.

2.2.2 Balok

Balok berperan sebagai elemen horizontal penghubung kolom yang memberikan stabilitas dan kapasitas pemikul beban. Fungsinya mencakup sebagai penyalur beban pelat lantai ke kolom melalui gaya dan momen, dan berpotensi sebagai penahan gempa dengan menyerap energi melalui sendi plastis. Perilaku balok dipengaruhi momen lentur sehingga memerlukan tulangan lentur, gaya geser sehingga memerlukan tulangan geser, dan momen torsi yang menyebabkan puntir sehingga membutuhkan tulangan torsi.

2.2.2.1 Preliminary Design Balok

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 9.3.1 dalam menentukan tinggi minimum balok nonprategang untuk beton mutu normal dan tulangan mutu 420 MPa tidak boleh kurang dari batas minimum yang dapat dilihat pada

Tabel 2.6. Dan untuk minimum lebar balok (b_w) berdasarkan Pasal 18.6.2, yaitu sekurangnya nilai terkecil dari 0,3h dan 250 mm.

Tabel 2.6 Batas Tinggi Minimum Balok

Kondisi Perletakan	Minimum (h)
Perletakan Sederhana	1/16
Menerus Satu Sisi	1/18,5
Menerus Dua Sisi	1/21
Kantilever	1/8

2.2.2.2 Detailing Tulangan Balok

2.2.2.2.1 Detailing Tulangan Lentur Balok

Fenomena lentur menyebabkan timbulnya tegangan tarik dan tekan pada balok. Serat atas penampang muncul tegangan tekan, sedangkan serat bawah mengalami tegangan tarik. Kondisi disaat tegangan tarik dan tegangan tekan belum mencapai batas kekuatan dari materialnya (beton maupun tulangan). Distribusi tegangan dan regangan berupa garis linear, sehingga balok masih berperilaku elastis.

Terdapat beberapa persyaratan batas tulangan lentur minimum untuk balok nonprategang diatur dalam SNI 2847:2019.

1. Batasan lendutan yang terjadi tidak boleh melebihi lendutan izin maksimum yang diatur secara lengkap pada SNI 2847:2019 Pasal 24.2.
2. Batasan regangan pada tulangan tarik balok memiliki batasan yang diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 9.3.3.1. Untuk balok yang memiliki nilai $P_u < 0,10(f'_c)(A_g)$ nilai regangan pada tulangan tariknya adalah sekurang kurangnya $\epsilon_t = 0,004$.
3. Momen terfaktor (M_u) yang digunakan menurut SNI 2847:2019 Pasal 9.4.2.1 mengisyaratkan bahwa nilai M_u diperkenankan dihitung pada muka tumpuan. Penggunaan nilai momen pada muka tumpuan dimaksudkan agar balok lebih ekonomis.
4. Perhitungan momen rencana harus disesuaikan dengan kategori balok. Berdasarkan besarnya gaya aksialnya balok dapat digolongkan menjadi dua. Bila $P_u < 0,01.f'_c.A_g$ maka perhitungan momen rencana harus sesuai

dengan SNI 2847:2019 Pasal 22.3. Sedangkan jika $P_u > 0,01 \cdot f_c \cdot A_g$ maka perhitungan momen rencana harus sesuai dengan SNI 2847:2019 Pasal 22.4.

5. Pada SNI 2847:2019 Pasal 9.6.1.2 yang mengatur mengenai luas tulangan minimal yang harus tersedia untuk elemen lentur balok adalah sebagai berikut.

$$A_{smin} = \frac{0,25\sqrt{f_c}}{f_y} b_w d \quad (2.4)$$

$$A_{smin} = \frac{1,4}{f_y} b_w d \quad (2.5)$$

Keterangan:

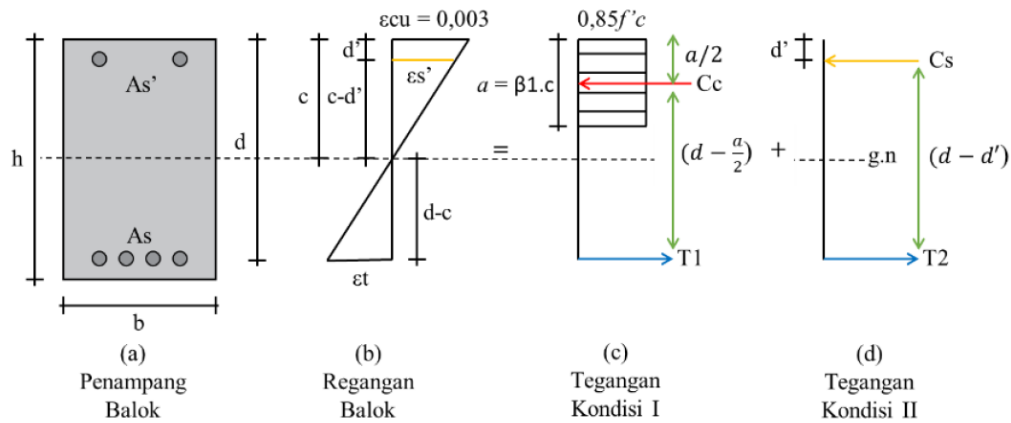
A_s = luas tulangan tarik lentur (mm^2)

A_{smin} = luas minimum tulangan lentur (mm^2)

b_w = lebar komponen struktur lentur (mm)

d = tinggi efektif penampang komponen struktur lentur (mm)

Berdasarkan kebutuhan tulangannya, balok dapat bertulang tunggal ataupun bertulang rangkap. Balok tulangan rangkap merupakan balok yang memiliki tulangan tarik (A_s) dan tulangan tekan (A'_s) pada penampangnya. Beton memiliki kuat tekan yang tinggi sehingga peran utama dari tulangan tekan yaitu untuk mengontrol deformasi, mengurangi pengaruh rangkakan dan susut pada balok, serta meningkatkan daktilitas struktur balok. Dalam desain tulangan rangkap sama halnya dengan desain tulangan tunggal, yang menjadi perbedaan yaitu adanya sumbangan kekuatan dari tulangan tekan pada daerah tekan balok yang diberi notasi (*compression of steel*). Sedangkan untuk kuat tekan balok berawal dari C menjadi C_c (*compression of concrete*) agar menyesuaikan dengan variabel tulangan tekan. Konsep analisa tulangan rangkap pada balok dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Konsep Analisa Tulangan Rangkap

Balok tulangan rangkap memiliki tulangan tarik (A_s) pada daerah tegangan tarik dan tulangan tekan (A'_s) pada sisi tegangan tekan. Jarak titik berat tulangan tekan (A'_s) terhadap serat tekan terluar dari penampang balok diberi notasi d' . Dengan adanya tulangan tekan maka regangan tulangan tekan juga diperhitungkan dengan notasi $\epsilon's$. Adapun untuk mempermudah analisa tulangan rangkap, berikut mekanisme tegangan-regangan balok tulangan rangkap.

1. Kondisi 1

Pada kondisi ini belum memperhitungkan tulangan tekan dalam kontribusi kekuatan. Pada kondisi ini gaya tarik diubah menjadi T_1 yang menandakan gaya tarik pada kondisi 1. Penggunaan simbol T_1 dikarenakan gaya tarik dibagi menjadi dua yaitu T_1 dan T_2 . Sehingga dapat ditulis $T = T_1 + T_2$.

$$T_1 = A_{s1} \cdot f_y \quad (2.6)$$

Gaya tekan beton (C_c)

$$C_c = 0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot a \quad (2.7)$$

dimana $T_1 = C_c$ sehingga dapat ditulis sebagai berikut.

$$M_{n1} = T_1 \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.8)$$

$$M_{n1} = A_{s1} f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.9)$$

Sehingga tulangan tarik dapat ditulis:

$$M_{n1} = A_{s1} f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.10)$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (2.11)$$

2. Kondisi 2

Pada kondisi 2, parameter yang digunakan yaitu gaya tekan (C_s) yang disumbang oleh tulangan tekan (A'_s) dan gaya tarik (T_1) yang disumbang oleh tulangan tarik (A_{s1}). Posisi gaya C_s sejarak d' dengan serat terluar penampang balok sehingga lengan momen antara gaya tekan (C_s) dan gaya tarik (T_1) dari kondisi 2 ($d - d'$). Berikut penjelasan dari persamaan kondisi 2.

Gaya tulangan tarik (A_{s2}):

$$T_2 = A_{s2} \cdot f_y \quad (2.12)$$

Gaya tekan dari tulangan tekan (C_s):

$$C_s = A'_s \cdot f_s' \quad (2.13)$$

Dengan $T_2 = C_s$, dan f_s' adalah tegangan leleh pada tulangan tekan (A'_s). Sehingga momen nominal pada kondisi 2:

$$M_{n2} = T_2 (d - d') \quad (2.14)$$

$$M_{n2} = A_{s2} \cdot f_y (d - d') \quad (2.15)$$

dengan tulangan tekan dapat ditulis:

$$A'_s = A_{s2} \quad (2.16)$$

Berdasarkan penjelasan kondisi 1 dan kondisi 2 maka dapat diperoleh nilai momen nominal (M_n) untuk balok tulangan rangkap:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (2.17)$$

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (2.18)$$

dengan nilai C_c :

$$T = C_c + C_s \quad (2.19)$$

$$C_c = C_s - T = (A'_s f_s') - (A_s f_y) \quad (2.20)$$

sehingga momen nominal menjadi:

$$M_n = (A'_s f_s') - (A_s f_y) \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + (A'_s f_s') \cdot (d - d') \quad (2.21)$$

2.2.2.2.2 Detailing Tulangan Geser Balok

Kekuatan geser nominal (V_n) merupakan penjumlahan dari kuat geser beton (V_c) dengan kuat geser dari tulangan geser (V_s), atau seperti pada persamaan (2.22).

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.22)$$

Keterangan:

V_n = gaya geser nominal balok (N)

V_c = kekuatan geser nominal yang disediakan oleh beton (N)

V_s = kekuatan geser nominal yang diberikan oleh penulangan geser (N)

Nilai kuat geser beton (V_c) mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 22.5.5.1 seperti pada persamaan (2.23). Atau diambil nilai terkecil antara persamaan (2.24) hingga persamaan (2.26).

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f_c b_w d} \quad (2.23)$$

$$V_c = \left(0,16\lambda\sqrt{f_c} + 17\rho_w \frac{V_u \cdot d}{M_u} \right) b_w d \quad (2.24)$$

$$V_c = \left(0,16\lambda\sqrt{f_c} + 17\rho_w \right) b_w d \quad (2.25)$$

$$V_c = 0,29\lambda\sqrt{f_c b_w d} \quad (2.26)$$

Tulangan geser (V_s) yang digunakan pada tulangan geser dengan posisi tegak lurus, maka digunakan persamaan (2.27).

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (2.27)$$

Dengan disarankan nilai V_s diambil tidak lebih besar dari persamaan (2.28)

$$V_s = 0,66\sqrt{f_c b_w d} \quad (2.28)$$

Keterangan:

λ = faktor modifikasi, untuk beton normal = 1,0

b_w = lebar penampang balok (mm)

d = tinggi efektif balok (mm)

ρ_w = rasio tulangan tarik ($A_s/b_w.d$)

V_u = gaya geser ultimate hasil analisis struktur (N)

M_u = momen ultimate hasil analisis struktur (Nmm)

A_v = luas tulangan sengkang (mm^2)

f_{yt} = kuat tarik baja tulangan (N/mm^2)

s = jarak antar tulangan sengkang (mm)

f'_c = kuat tekan beton bertulang (N/mm^2)

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 9.5.1.1 dalam metode desain kuat geser, persyaratan geser nominal dengan faktor reduksi $\phi = 0,75$ adalah sebagai berikut:

$$V_u \leq \phi V_n \quad (2.29)$$

Ukuran dimensi untuk desain penampang harus memenuhi persamaan (2.30) untuk meminimalisasi keruntuhan diagonal tekan dalam beton dan batas perkembangan retak. Apabila tidak memenuhi syarat, dimensi penampang harus diperbesar.

$$V_u \leq \phi V_n = \phi \left(V_c + 0,66\sqrt{f'_c} b_w d \right) \quad (2.30)$$

Keterangan:

V_n = gaya geser nominal balok (N)

V_u = gaya geser ultimate balok (N)

ϕ = faktor reduksi geser

Sehingga luasan tulangan geser (A_v) diharapkan tidak terlalu kecil atau terlalu besar untuk mencegah keruntuhan akibat getas, juga memastikan tulangan

geser mengalami leleh saat terjadi retak atau daktil. Maka, sesuai SNI 2847:2019 Pasal 9.6.3.3, nilai $A_{v,min}$ dapat diperoleh dengan nilai terbesar dari persamaan berikut.

$$A_{v,min} = 0,062\sqrt{f_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.31)$$

Atau

$$A_{v,min} = \frac{0,35b_w s}{f_{yt}} \quad (2.32)$$

Untuk menentukan jarak tulangan geser (s), jarak maksimum tulangan geser harus diambil nilai terkecil dari persamaan berikut:

$$V_s \leq V_{c1} = 0,33\sqrt{f_c} b_w d ; S_{maks} = d/2 \text{ atau } 600\text{mm} \quad (2.33)$$

$$V_s > V_{c1} = 0,33\sqrt{f_c} b_w d ; S_{maks} = d/4 \text{ atau } 300\text{mm} \quad (2.34)$$

2.2.2.2.3 Detailing Tulangan Torsi Balok

Balok yang membutuhkan tulangan torsi adalah balok yang memiliki nilai persyaratan sesuai yang disebutkan dalam SNI 2847:2019 Pasal 22.7.1.1 sebagai berikut.

$$\phi T_{th} \geq T_u \quad (2.35)$$

$$T_{th} = 0,083\lambda\sqrt{f_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (2.36)$$

Keterangan:

T_{th} = nilai torsi *threshold* (Nmm)

T_u = nilai torsi terfaktor dari hasil analisis struktur (Nmm)

ϕ = faktor reduksi (0,75)

λ = faktor modifikasi, untuk beton normal = 1,0

A_{cp} = luas yang dibatasi oleh keliling luar penampang beton (m^2)

P_{cp} = keliling luar penampang beton (mm)

Batasan penampang balok dalam pengaruh torsi harus memenuhi persamaan dalam SNI 2847:2019 Pasal 22.7.7.1 yang dapat dilihat pada

persamaan (2.37). Apabila penampang tidak memenuhi persyaratan maka dimensi penampang perlu diperbesar.

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d}\right)^2 + \left(\frac{T_u P_h}{1,7 A_0 h^2}\right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + 0,66 \sqrt{f_c}\right) \quad (2.37)$$

Keterangan:

A_{ch} = luas daerah dalam tulangan geser (mm^2)

P_h = keliling daerah dalam tulangan geser (mm)

d = $\geq 0,85$, tinggi efektif balok (mm)

h = tinggi penampang balok (mm)

Kekuatan momen torsi nominal (T_n) diambil diantara nilai terkecil antara persamaan berikut sesuai dengan SNI 2847:2019 Pasal 22.7.6.1.

$$T_n = \frac{2A_0 A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (2.38)$$

$$T_n = \frac{2A_0 A_t f_y}{P_h} \cot \theta \quad (2.39)$$

Keterangan:

T_n = kuat nominal torsi nominal (Nmm)

A_0 = Luas bruto yang dilingkup oleh lintasan alir geser, $A_0 = 0,85 A_{oh}$ (mm^2)

A_t = luas 1 kaki sengkang tertutup yang menahan torsi dalam spasi s (mm^2)

f_{yt} = kuat leleh tulangan transversal (MPa)

f_y = kuat leleh tulangan yang disyaratkan (MPa)

s = spasi tulangan transversal yang terpasang (mm)

θ = 45° , untuk balok beton nonprategang.

Pengaruh torsi diproyeksikan pada tulangan transversal dan tulangan longitudinal. Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 9.6.4.2 luas tulangan transversal (torsi) harus diambil dari nilai maksimum antara persamaan (2.40) dan (2.41).

$$\frac{(A_v + 2A_t)_{\min}}{s} \geq 0,062\sqrt{f_c} \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (2.40)$$

$$\frac{(A_v + 2A_t)_{\min}}{s} \geq 0,35 \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (2.41)$$

Batasan spasi tulangan torsi transversal diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 9.7.6.3.3 sesuai persamaan (2.42)

$$s \leq \frac{P_h}{8} \leq 300\text{mm} \quad (2.42)$$

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 9.6.4.3 jika tulangan torsi longitudinal diperlukan, luasan minimum tulangan ($A_{t \min}$) harus lebih kecil dari persamaan (2.43) dan (2.44).

$$A_{t \min(1)} = 0,42\sqrt{f_c} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{A_t}{s} \right) \rho_h \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (2.43)$$

$$A_{t \min(2)} = 0,42\sqrt{f_c} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{0,175b_w}{f_{yt}} \right) \rho_h \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (2.44)$$

Batasan spasi tulangan torsi transversal diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 9.7.6.3.3 tidak boleh melebihi $p_h/8$ dan 300 mm. Sedangkan dalam Pasal 9.7.5.3 batasan spasi tulangan torsi longitudinal diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 9.7.5.3 sesuai persamaan (2.45).

$$s \leq (b_t + d) \quad (2.45)$$

Dalam analisis torsi terdapat batasan mutu material, yaitu mutu beton bertulang $\sqrt{f_c} \leq 8,3$ MPa. Kemudian mutu tulangan harus memenuhi syarat, f_y atau $f_{yt} \leq 420$ MPa.

2.2.2.3 Syarat Desain Balok SRPMK

Dalam mendesain balok SRPMK sesuai SNI 2847:2019 harus memenuhi Pasal 18.6.

2.2.2.3.1 Syarat Dimensi Balok SRPMK

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.6.2.1 dimensi balok SRPMK harus

memenuhi kriteria sebagai berikut:

1. Panjang bentang bersih (l_n) tidak boleh kurang 4 kali tinggi efektif ($l_n \geq 4d$)
2. Lebar penampang balok (b_w) tidak kurang dari 0,3 kali tinggi penampang atau kurang dari 250 mm. ($b_w \geq 0,3 h$ atau 250 mm)
3. Proyeksi lebar balok yang melampaui lebar kolom penumpu tidak boleh melebihi nilai terkecil dari c_2 dan $0,75c_1$ pada masing-masing sisi kolom.

2.2.2.3.2 Syarat Tulangan Lentur Balok SRPMK

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.6.3 terdapat beberapa syarat untuk tulangan lentur balok yaitu:

1. Balok-balok harus memiliki setidaknya dua batang tulangan menerus pada sisi atas dan bawah penampang.
2. Jumlah tulangan baik di sebelah atas atau di sebelah bawah penampang (A_s) tidak boleh kurang dari persamaan berikut dan rasio tulangan (ρ) tidak boleh melebihi 0,025.

$$\frac{0,25\sqrt{f_c}}{f_y} b_w d \quad (2.46)$$

$$\frac{1,4}{f_y} b_w d \quad (2.47)$$

Dengan batasan:

$$\leq A_g \leq 0,025b_w d \quad (2.48)$$

3. Kekuatan momen positif (M_n^+) pada muka kolom tidak boleh kurang dari setengah kekuatan momen negatif (M_n^-) pada muka kolom tersebut, atau dapat dinyatakan pada persamaan berikut.

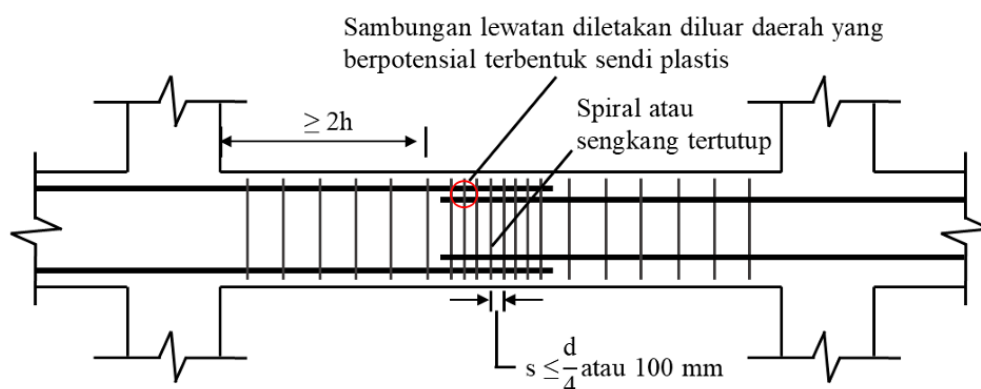
$$M_n^+ \geq \frac{1}{2}(M_n^-) \quad (2.49)$$

4. Kekuatan momen positif (M_n^+) dan kekuatan momen negatif (M_n^-) pada semua penampang di sepanjang bentang balok tidak boleh kurang dari

seperempat kekuatan momen maksimum pada muka kedua tumpuan, atau dapat dinyatakan pada persamaan berikut.

$$(M_n^+) \text{ atau } (M_n^-) \geq \frac{1}{4}(M_{\text{maks}}) \quad (2.50)$$

5. Sambungan lewatan tulangan longitudinal balok diizinkan jika sengkang pengegang dipasang sepanjang sambungan lewatan. Spasi tulangan sengkang yang mengikat sambungan lewatan tersebut tidak boleh melebihi nilai terkecil dari $d/4$ dan 100 mm. Sambungan lewatan tidak boleh berada pada lokasi hubungan balok-kolom, pada daerah hingga sejarak dua kali tinggi balok dari muka kolom, serta pada daerah yang menunjukkan kemungkinan terjadi peleleh lentur akibat deformasi lateral yang melampaui perilaku elastik. Sambungan lewatan tersebut dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 2.2 Persyaratan Sambungan Lewatan Balok SRPMK

2.2.2.3.3 Syarat Tulangan Transversal Balok SRPMK

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.6.4 terdapat beberapa syarat untuk tulangan transversal yaitu:

1. Sengkang pengegang harus dipasang sepanjang jarak yang sama dengan dua kali tinggi balok ($2h$) yang diukur dari muka kolom penumpu ke arah tengah bentang kedua ujung balok.
2. Sengkang pertama pada daerah $2h$ harus dipasang tidak lebih dari 50mm dari muka kolom penumpu.

3. Jarak tulangan sengkang sepanjang $2h$ harus dipasang tidak boleh melebihi nilai terkecil dari $d/4$, $6d_b$ (d_b = diameter tulangan utama balok), dan 150 mm.
4. Sengkang harus dipasang dengan spasi tidak lebih dari $d/2$ disepanjang bentang balok diluar sendi plastis.
5. Sengkang pengekang pada balok diizinkan terdiri dari dua batang tulangan, yaitu sebuah sengkang yang mempunyai kait gempa pada kedua ujungnya dan ikat silang sebagai penutup. Ikat silang berurutan yang mengikat batang tulangan longitudinal yang sama harus memiliki kait 90 derajat yang dipasang selang-seling pada sisi yang berlawanan dari komponen struktur lentur.

2.2.2.3.4 Syarat Kekuatan Geser Balok SRPMK

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.6.5 tulangan transversal untuk balok SRPMK harus didesain dengan beberapa syarat yaitu:

1. Gaya geser desain (V_e) harus dihitung dari tinjauan gaya-gaya pada bagian balok di antara kedua muka joint. Momen-momen dengan tanda berlawanan yang terkait dengan kekuatan momen lentur maksimum yang mungkin terjadi (M_{pr}) harus diasumsikan bekerja pada muka-muka joint dan balok dibebani dengan beban gravitasi tributari terfaktor di sepanjang bentangnya. M_{pr} merupakan kuat momen lentur diujung balok yang ditentukan dengan menganggap kuat tarik pada tulangan memanjang sebesar minimum $1,25f_y$ dimana f_y kekuatan leleh yang disyaratkan.
2. Tulangan geser sepanjang daerah sendi plastis ($2h$) harus didesain untuk menahan geser dengan mengasumsikan nilai $V_c = 0$, apabila gaya geser akibat gempa lebih besar atau sama dengan 50% dari kuat geser perlu maksimum disepanjang bentang tersebut, dan apabila gaya aksial tekan terfaktor (P_u) termasuk akibat gempa lebih kecil dari $A_g f'_c/20$.

2.2.3 Kolom

Kolom merupakan elemen struktur yang memikul beban kombinasi aksial tekan dan momen lentur. Kolom juga merupakan elemen utama yang memikul beban lateral pada gedung.

2.2.3.1 Preliminary Design Kolom

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.2.1 batasan dimensi kolom harus memenuhi dua persyaratan, yaitu:

1. Dimensi penampang terkecil, diukur pada garis lurus yang menjadi pusat geometri, tidak kurang dari 300 mm.
2. Rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus nya tidak kurang dari 0,4.

2.2.3.2 Kondisi Aksial Tekan Sentris

Berdasarkan SNI 2847:2019 secara umum kuat dari kolom yang dibebani secara sentris P_o , dapat ditulis berdasarkan Pasal 22.4.2.2 pada persamaan (2.51) berikut. Penampang dibebani oleh P_o secara sentris sehingga membuat kolom memberikan reaksi perlawanan yang berasal dari tulangan baja dan beton.

$$P_o = 0,85f_c(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y \quad (2.51)$$

Keterangan:

A_g = luas penampang kolom

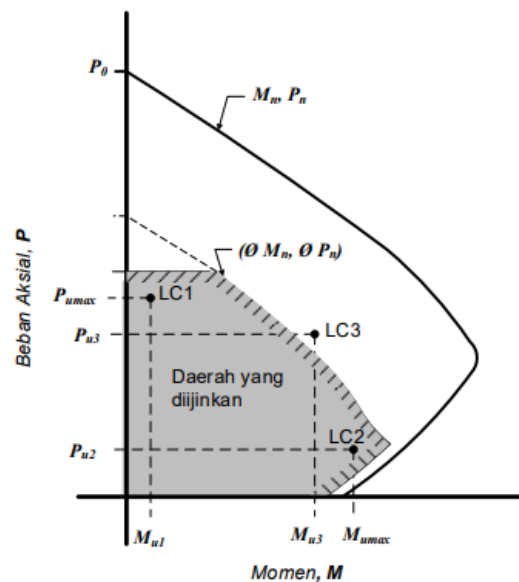
A_{st} = luas tulangan longitudinal kolom

Berdasarkan SNI 2847:2019 pada Tabel 22.4.2.1 untuk mengantisipasi eksentrisitas insidental, kekuatan tekan aksial nominal (P_n) tidak boleh melebihi $P_{n,max}$ $0,80P_o$ untuk sengkang persegi dan $0,85P_o$ untuk sengkang spiral. Berdasarkan Pasal 10.6.1.1, batas minimum rasio tulangan adalah 1% dan batas maksimum adalah 8% untuk kasus umum terhadap luas total penampang kolom (A_g).

2.2.3.3 Kolom Beton dengan Beban Aksial Tekan dan Momen

Kolom umumnya menahan beban aksial tekan sekaligus momen lentur. Momen lentur ini dapat berasal dari memikul momen lentur yang berasal dari balok, beban lateral, atau eksentrisitas akibat ketidaksempurnaan konstruksi. Oleh karena itu, desain kolom harus mempertimbangkan interaksi antara beban aksial dan momen lentur (Setiawan, 2016).

Interaksi dari gaya aksial tekan (P) dan momen (M) diwujudkan dalam sebuah kurva yang kemudian dikenal dengan diagram interaksi P-M elemen kolom, seperti yang terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Diagram Interaksi P – M Elemen Kolom

Dalam kondisi tegangan berimbang, terjadi saat serat beton tekan mencapai regangan maksimum $\epsilon_c = 0,003$ dan tulangan baja mencapai tegangan leleh $\epsilon_s = f_y/E_s$ (Setiawan, 2016). Kondisi regangan berimbang dapat dinyatakan dengan persamaan (2.52).

$$\frac{c_b}{d} = \frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{E_s}} \quad (2.52)$$

Untuk $E = 200.000$, maka:

$$c_b = \frac{600}{600 + f_y} d \quad (2.53)$$

Gaya-gaya yang terlibat dalam kondisi ini memiliki persamaan berikut:

$$P_b = C_c + C_s - T \quad (2.54)$$

dengan:

$$C_c = 0,85f_c a_b b \quad (2.55)$$

$$C_s = A'_s (f_s - 0,85f_c) \quad (2.56)$$

$$T = A_s f_y \quad (2.57)$$

Persamaan untuk menghitung nilai tekan aksial pada saat kondisi regangan berimbang dapat dihitung dengan persamaan (2.58).

$$P_b = 0,85f_c a_b b + A'_s (f_s - 0,85f_c) - A_s f_y \quad (2.58)$$

Tinggi balok untuk tegangan ekuivalen dapat dilihat pada persamaan (2.59).

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

Kemudian persamaan momen akibat gaya eksentrisitas dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$M_b = P_b \times e_b = C_c \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s (d - d' - d'') + T d'' \quad (2.60)$$

2.2.3.4 Desain Geser Kolom

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 22.5.6.1 gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) dengan gaya aksial tekan dapat dihitung menggunakan nilai yang terkecil dari persamaan (2.61) sampai dengan persamaan (2.63).

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f_c} b_w d \quad (2.61)$$

$$V_c = 0,16 \lambda \sqrt{f_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8}} \quad (2.62)$$

$$V_u = 0,29\lambda\sqrt{f_c}b_w d \sqrt{1 + \frac{0,29N_u}{A_g}} \quad (2.63)$$

Namun, persamaan (2.62) tidak berlaku jika memenuhi persamaan (2.64).

$$M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8} \leq 0 \quad (2.64)$$

Terkait kebutuhan tulangan geser pada kolom ditandai dengan persamaan (2.65).

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.65)$$

Keterangan:

V_u = gaya geser terfaktor

N_u = gaya aksial terfaktor

M_u = momen terfaktor

λ = 1,0 (beton normal)

ρ_w = rasio a_s terhadap bwd

2.2.3.5 Syarat Desain Kolom SRPMK

Syarat desain kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.7.

2.2.3.5.1 Syarat Dimensi Penampang Kolom

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.2.1 penampang kolom harus memenuhi dua syarat berikut:

1. Dimensi penampang terkecil, diukur pada garis lurus yang melalui pusat geometri, tidak kurang dari 300 mm.
2. Rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus nya tidak kurang dari 0,4.

2.2.3.5.2 Syarat Kekuatan Lentur Minimum Kolom SRPMK

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3.2 kekuatan lentur kolom harus memenuhi persyaratan pada persamaan (2.66).

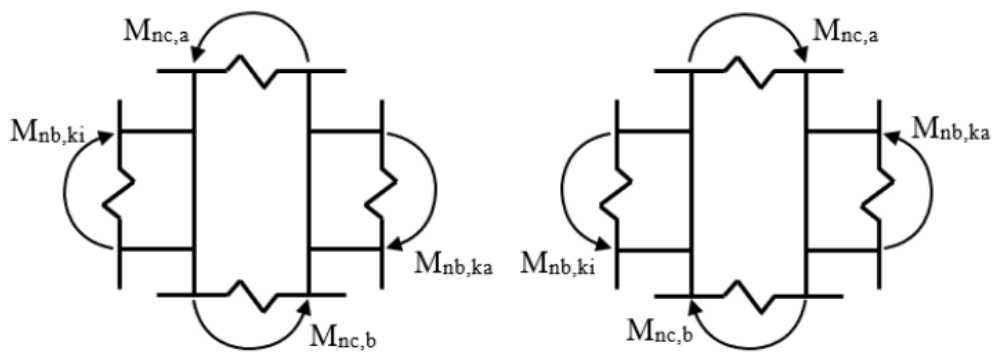
$$\sum M_{nc} \geq (1,2)\sum M_{nb} \quad (2.66)$$

Keterangan:

$\sum M_{nc}$ = jumlah kekuatan lentur nominal kolom-kolom yang merangka ke dalam *joint*, yang dievaluasi di muka-muka *joint*

$\sum M_{nb}$ = jumlah kekuatan lentur nominal balok-balok yang merangka ke dalam *joint*, yang dievaluasi di muka-muka *joint*

Pendekatan ini dikenal sebagai kolom kuat – balok lemah (*strong column – weak beam*), yang diharapkan kolom tidak akan mengalami kegagalan lebih dulu daripada balok (Setiawan, 2016). Konsep momen yang berkerja pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Konsep *Strong Column – Weak Beam*

2.2.3.5.3 Syarat Tulangan Lentur Kolom SRPMK

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.4 tulangan lentur pada kolom perlu mempertimbangkan beberapa syarat berikut:

1. Luas tulangan longitudinal (A_{st}) tidak boleh kurang dari $0,01A_g$ dan tidak boleh lebih dari $0,06A_g$.
2. Jumlah tulangan lentur pada kolom dengan sengkang bundar harus minimum 6.
3. Sambungan mekanis harus memenuhi Pasal 18.2.7 dan sambungan las Pasal 18.2.8. Sambungan lewatan diizinkan hanya dalam daerah tengah tinggi kolom dan harus didesain sebagai sambungan lewatan tarik.

2.2.3.5.4 Syarat Tulangan Transversal Kolom SRPMK

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.1 tulangan transversal harus dipasang sepanjang l_o dari masing-masing muka hubungan balok kolom di kedua ujungnya dengan syarat tidak boleh kurang dari nilai terbesar antara poin berikut:

1. Tinggi kolom pada muka *joint* atau pada penampang dimana pelelehan lentur dimungkinkan terjadi.
2. Seperenam (1/6) tinggi bersih kolom.
3. 450 mm.

Persyaratan tulangan transversal pun diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.2 dengan ketentuan berikut:

1. Tulangan transversal harus terdiri dari spiral tunggal atau spiral saling bertumpuk (*overlap*), sengkang pengekok bundar, atau sengkang pengekok persegi, dengan atau tanpa ikat silang.
2. Setiap tekukan ujung sengkang pengekok persegi dan ikat silang harus mengait batang tulangan longitudinal terluar.
3. Ikatan silang yang berurutan harus diselang-seling ujungnya sepanjang tulangan longitudinal dan sekeliling perimeter penampang dengan syarat jarak antar tulangan transversal tidak melebihi 350 mm.

Jarak atau spasi pada tulangan transversal pada daerah l_o yang diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.3 tidak melebihi nilai terkecil dari ketentuan berikut:

1. Seperempat (1/4) dimensi terkecil penampang kolom.
2. Enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil ($6.d_b$).
3. S_o yang dihitung melalui persamaan (2.67), dengan hasil tidak melebihi 150 mm dan tidak perlu kurang dari 100 mm.

$$s_o = 100 + \left(\frac{350 - h_x}{3} \right) \quad (2.67)$$

Persyaratan jumlah tulangan transversal harus sesuai dengan Tabel 2.7 sesuai dengan yang tertera pada SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.4.

Tabel 2.7 Tulangan Transversal untuk Kolom SRPMK

Tulangan Transversal	Kondisi	Persamaan yang Berlaku		
A _{sh} /S _{bc} untuk sejangkang persegi	P _u ≤ 0,3 A _g f'c dan f'c ≤ 70 MPa	Terbesar dari (a) dan (b)	$0,3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_c}{f_{yt}}$	(a)
	P _u > 0,3 A _g f'c dan f'c > 70 MPa	Terbesar dari (a), (b), dan (c)	$0,09 \frac{f_c}{f_{yt}}$	(b)
			$0,2k_f k_n \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}}$	(c)
ρ _s untuk spiral atau sejangkang pengekang lingkaran	P _u ≤ 0,3 A _g f'c dan f'c ≤ 70 MPa	Terbesar dari (d) dan (e)	$0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_c}{f_{yt}}$	(d)
	P _u > 0,3 A _g f'c dan f'c > 70 MPa	Terbesar dari (d), (e), dan (f)	$0,12 \frac{f_c}{f_{yt}}$	(e)
			$0,35k_f \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}}$	(f)

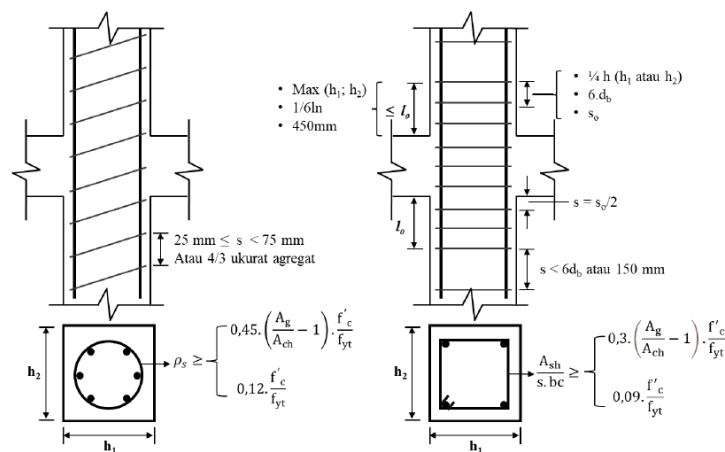
Dengan faktor kekuatan beton (k_f) dan faktor keefektifan pengekang (k_n) dihitung berdasarkan persamaan (2.68) dan persamaan (2.69).

$$k_f = \frac{f_c}{175} + 0,6 \geq 1,0 \quad (2.68)$$

$$k_n = \frac{n_1}{n_1 - 2} \quad (2.69)$$

Dengan n_1 adalah jumlah batang atau bundel tulangan longitudinal di sekeliling inti kolom dengan sengkang persegi yang ditumpu secara lateral oleh sudut dari sengkang pengegang atau kait seismik.

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.5 spasi tulangan transversal di luar daerah l_0 tidak melebihi nilai terkecil dari enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil dan 150 mm, kecuali bila tulangan transversal yang lebih besar disyaratkan dalam Pasal 18.7.4.3 dan 18.7.6.



Gambar 2.5 Persyaratan Tulangan Transversal untuk Sengkang Spiral dan Sengkang Tertutup Persegi

2.2.3.5.5 Syarat Kekuatan Geser Kolom SRPMK

SNI 2847:2019 dalam Pasal 18.7.6.1.1 menyatakan bahwa gaya geser desain (V_e) harus ditentukan dari kekuatan lentur maksimum (M_{pr}) yang mungkin terjadi di setiap ujung kolom yang terkait dengan rentang beban aksial terfaktor (P_u) yang bekerja pada kolom.

$$V_e = \frac{M_{pr a} + M_{pr b}}{l_c} \quad (2.70)$$

Keterangan:

$M_{pr a}$ = kuat momen maksimum sisi atas kolom

$M_{pr b}$ = kuat momen maksimum sisi bawah kolom

l_c = panjang kolom yang ditinjau

Gaya geser kolom tersebut tidak perlu melebihi nilai geser yang dihitung dari kekuatan *joint* berdasarkan M_{pr} balok yang merangka ke hubungan balok-kolom tersebut. Nilai V_e tidak boleh kurang dari geser terfaktor yang dihasilkan melalui perhitungan analisis struktur.

Selain itu berdasarkan SNI 2847:2019 tulangan transversal sepanjang l_o berdasarkan Pasal 18.7.5.1 harus didesain untuk menahan geser dengan mengasumsikan $V_c = 0$ bila syarat berikut ini terpenuhi.

1. Gaya geser akibat beban gempa berdasarkan Pasal 18.7.6.1 setidaknya setengah kekuatan geser perlu maksimum di sepanjang l_o .
2. Gaya tekan aksial terfaktor (P_u) termasuk pengaruh gempa kurang dari $A_g f'_c / 20$.

2.2.4 Hubungan Balok-Kolom (HBK)

Hubungan balok-kolom atau *joint* merupakan daerah pertemuan antara kolom dan balok pada struktur rangka gedung yang harus direncanakan dengan baik. persyaratan suatu HBK dijelaskan dalam SNI 2847:2019 dalam Pasal 18.8 dengan ketentuan sebagai berikut.

1. Gaya-gaya pada tulangan longitudinal balok di muka HBK harus dihitung dengan mengasumsikan tegangan pada tulangan tarik lentur adalah $1,25f_y$.
2. Tulangan longitudinal balok yang dihentikan di dalam suatu kolom harus diteruskan ke muka terjauh dari inti kolom terkekang.
3. Bila tulangan longitudinal balok diteruskan melalui HBK, dimensi kolom yang paralel dengan tulangan balok tersebut tidak boleh kurang dari 20 kali diameter tulangan longitudinal terbesar balok untuk beton normal. Untuk beton ringan, dimensinya tidak boleh kurang dari 26 kali diameter tulangan.
4. Tinggi HBK (h) tidak boleh kurang dari setengah balok-balok yang merangka pada HBK tersebut dan yang menyebabkan geser pada HBK sebagai bagian dari sistem pemikul gaya seismik.

Dalam Pasal 18.8.3.1 tulangan transversal yang digunakan pada HBK sama dengan ketentuan pada tulangan transversal yang diperlukan pada ujung-ujung kolom. Namun berdasarkan Pasal 18.8.3.2 jika pada keempat sisi HBK terdapat balok yang merangka dan lebar dari setiap baloknya setidaknya tiga perempat ($3/4$) lebar kolom, jumlah tulangan yang diperlukan diizinkan untuk direduksi setengahnya, dan spasi tulangan transversal diizinkan untuk ditingkatkan hingga 150 mm dari ketinggian balok terendah yang merangka pada HBK.

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.8.4.1 kekuatan geser (V_n) HBK tidak boleh melebihi persyaratan yang tertera dalam Tabel Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Kekuatan Geser Nomninal (V_n) HBK

Konfigurasi HBK	V_n
Untuk HBK yang terkekang oleh balok-balok pada keempat sisinya	$1,7\lambda\sqrt{f_c}A_j$
Untuk HBK yang terkekang oleh balok-balok pada ketiga sisinya atau dua sisi berlawanan	$1,2\lambda\sqrt{f_c}A_j$
Untuk kasus-kasus lainnya	$1,0\lambda\sqrt{f_c}A_j$

Dimana nilai λ diambil sebesar 1,0 untuk beton normal dan luas penampang efektif (A_j) dalam suatu HBK dihitung berdasarkan Pasal 18.8.4.3 melalui persamaan (2.71). Luas efektif HBK dapat dilihat pada Gambar 2.6.

$$A_j = h_j \times b_j \quad (2.71)$$

Keterangan:

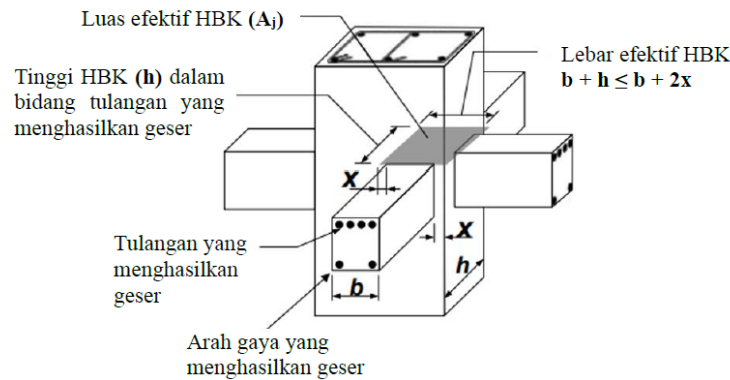
A_j = luas penampang efektif HBK (m^2)

h_j = tinggi efektif HBK (m)

b_j = panjang kolom yang ditinjau (m)

Tinggi HBK harus sebesar lebar kolom. Dan lebar efektif HBK harus selebar kolom, kecuali bila ada balok yang merangka ke dalam kolom yang lebih

lebar, maka lebar efektif HBK tidak boleh melebihi nilai terkecil antara lebar balok ditambah tinggi HBK, dan dua kali jarak tegak lurus yang lebih kecil dari sumbu longitudinal balok ke sisi kolom.



Gambar 2.6 Luas Hubungan Balok-Kolom Efektif

2.3 Sistem Bangunan Berperedam Tambahan *Tuned Mass Damper* (TMD)

Tuned Mass Damper (TMD) merupakan suatu sistem yang terdiri dari massa, pegas, dan peredam yang diatur sedemikian rupa sehingga frekuensi alami dan nilai redamannya dapat berfungsi untuk menyerap getaran pada struktur utama. Sistem ini bergetar seperti struktur utama, dan bekerja untuk mereduksi getaran pada kondisi resonansi juga mengurangi amplitudo getaran pada struktur utama (Sunaryanto, 2016).

Banyak teknologi pengendalian getaran telah diadopsi untuk mengurangi kerusakan dan memperbaiki kinerja struktural. Setiap sistem memiliki keterbatasan dan kelebihanannya sendiri dan pilihan sistem kontrol tertentu biasanya diputuskan dengan mempertimbangkan sejumlah faktor seperti efektivitas, kenyamanan, biaya. Terdapat beberapa jenis peredam getaran diantaranya *Passive Tuned Mass Damper*, *Semi-Active Mass Damper*, dan *Active Mass Damper*.

Sistem TMD pasif tidak memerlukan tambahan energi luar untuk mereduksi respons struktur. Sistem ini dianggap konvensional karena sepenuhnya bergantung pada komponen yang melekat pada struktur. Sedangkan TMD semi-aktif dikembangkan dengan peningkatan kemampuan dan sifat adaptasi dari sistem kontrol. Sistem tersebut terdiri dari sensor, *computer control*, aktuator, dan

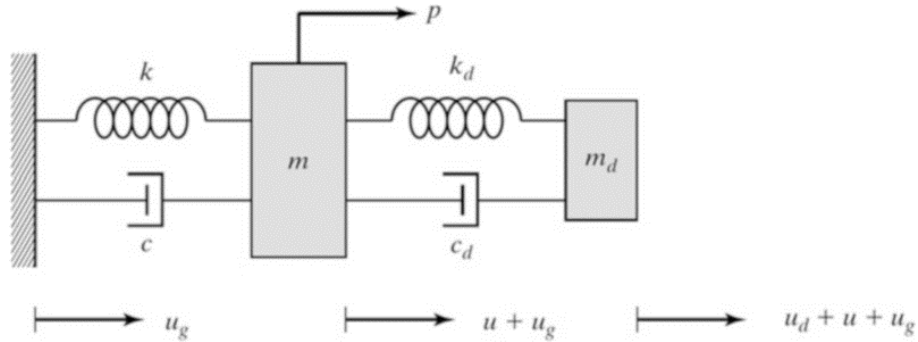
passive damper device. Besaran respon struktur akibat beban yang bekerja dapat diketahui dari sensor. *Computer control* pada sistem tersebut berfungsi sebagai pengirim informasi dari sensor menjadi sinyal kontrol kepada aktuator yang berfungsi dalam pengaturan kinerja *passive damper device*. Dan sistem TMD aktif merupakan pengembangan dari sistem kontrol semi-aktif. Fungsi aktuator tidak hanya sebagai pengatur *passive damper device*, namun dapat menghasilkan gaya kontrol yang melawan beban gempa dengan mengumpan balik data respon struktur, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem kontrol aktif tidak hanya bergantung pada komponen yang melekat pada struktur untuk menjalankan fungsinya.

Penerapan *Tuned Mass Damper* telah diterapkan pada beberapa gedung tinggi yang ada di dunia. Gedung Taipei 101 yang terletak di Distrik Xinyi, Taipei, Taiwan dengan ketinggian total bangunan 508 meter memiliki pendulum TMD seberat 660 ton yang didesain mampu mereduksi deformasi akibat beban angin sebesar 30% disamping juga melawan beban gempa 2.500 tahunan. TMD tipe pendulum pun digunakan pada Crystal Tower di Osaka, Jepang yang memiliki tinggi bangunan 157 meter untuk mengurangi gerakan yang diinduksi angin dengan menggunakan penyimpanan termal es pendingin dan pemanas udara dengan berat total 540 ton yang digantung sebagai pendulum. Sistem ini dirancang dan diharapkan dapat mengurangi perpindahan struktur sebesar 50% (Connor & Laflamme, 2014).

Salah satu TMD yang digunakan adalah Pendulum *Tuned Mass Damper* (PTMD). Ketika elemen yang memberi kekakuan adalah sebuah bandul, PTMD menyerap gaya sebagian besar energi yang dihasilkan oleh kekuatan eksternal, meminimalkan amplitudo getaran, dan mengurangi kemungkinan kerusakan pada struktur elemen. PTMD sangat sederhana dan merespon dengan cepat terhadap gerakan struktur. Keuntungan PTMD yang perlu diperhatikan adalah bandul dapat berotasi ke segala arah sehingga menghasilkan disipasi energi untuk beban yang diterapkan ke berbagai arah (García et al., 2021).

(Connor & Laflamme, 2014) menjelaskan teori penerapan *tuned mass damper* pada struktur, dimana konsep dari struktur yang dilengkapi dengan TMD

diilustrasikan sebagai dua buah sistem massa. Struktur berderajat kebebasan tunggal yang teredam dijelaskan pada Gambar 2.7. Dimana struktur utama diasumsikan menerima gaya eksternal dan gerakan tanah. Persamaan gerak dari sistem tersebut dapat dituliskan pada persamaan (2.72).



Gambar 2.7 Struktur Berderajat Kebebasan Tunggal Dengan Peredam TMD

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d + m_d \ddot{u} = -m_d a_g \quad (2.72)$$

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u - c_d \dot{u}_d - k_d u_d = -m a_g + p \quad (2.73)$$

Dalam sistem tersebut notasi d mengarah pada TMD. Struktur utama terdiri dari massa (m), kekakuan pegas (k), dan redaman (c). Dan TMD terdiri dari massa (m_d), kekakuan (k_d), dan redaman *damper* (c_d).

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (2.74)$$

$$c = 2\xi\omega m \quad (2.75)$$

$$\omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d} \quad (2.76)$$

$$c_d = 2\xi_d \omega_d m_d \quad (2.77)$$

Dimana ω merupakan frekuensi natural dari struktur utama dan ω_d frekuensi natural peredam. Rasio massa diperoleh dengan membagi massa peredam dengan massa struktur utama seperti pada persamaan (2.78).

$$\mu = \frac{m_d}{m} \quad (2.78)$$

Untuk persamaan gerak yang mengatur massa struktur dan massa TMD tertera pada persamaan berikut.

$$\text{Massa struktur } (1 + \mu)\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = \frac{P}{m} - \mu\ddot{u}_d \quad (2.79)$$

$$\text{Massa TMD } \ddot{u}_d + 2\xi_d\omega_d\dot{u}_d + \omega_d^2u_d = -\ddot{u} \quad (2.80)$$

Persamaan (2.81) merupakan perkiraan yang hampir optimal untuk frekuensi peredam yang digunakan untuk mengilustrasikan prosedur desain. Namun, berdasarkan (Hartog, 1947) diperlukan frekuensi rasio optimum (r_{opt}) dan rasio redaman optimum (ξ_{opt}) yang diperoleh melalui persamaan (2.82) dan persamaan (2.83) dengan tujuan untuk meminimalkan respon maksimum struktur terhadap beban harmonik.

$$\omega_d = \omega \quad (2.81)$$

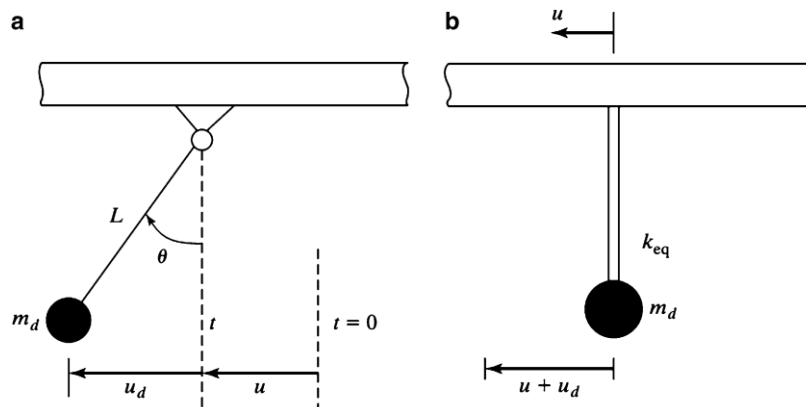
$$r_{\text{opt}} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (2.82)$$

$$\xi_{\text{d,opt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (2.83)$$

Kekakuan untuk kombinasi frekuensi tertera pada persamaan (2.84).

$$k_d = \mu k \quad (2.84)$$

Gambar 2.8a menunjukkan pendulum sederhana yang terpasang pada lantai. Pergerakan lantai dapat menggerakkan pendulum tersebut. Gerakan relatif pendulum menghasilkan gaya horizontal yang melawan gerakan lantai. Tindakan ini dapat direpresentasikan oleh sistem SDOF ekuivalen yang terpasang pada lantai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8b.



Gambar 2.8 Pendulum *Tuned Mass Damper*

Persamaan gerak untuk arah horizontal adalah sebagai berikut

$$T \sin \theta + \frac{W_d}{g} (\ddot{u} + \ddot{u}_d) = 0 \quad (2.85)$$

Dimana T adalah tegangan pada kabel. Dan jika nilai θ maka persamaan (2.86) dapat berlaku.

$$u_d = L \sin \theta \approx L \theta \quad (2.86)$$

$$T \approx W_d$$

Pengenalannya pendekatan ini mengubah persamaan (2.85) menjadi persamaan (2.87).

$$m_d \ddot{u}_d + \frac{W_d}{L} u_d = -m_d \ddot{u} \quad (2.87)$$

Sehingga dapat disimpulkan bahwa kekakuan pegas geser ekuivalen adalah sebagai persamaan (2.88).

$$k_{eq} = \frac{W_d}{L} \quad (2.88)$$

Frekuensi alami bandul berhubungan k_{eq} dapat dinyatakan dalam persamaan (2.89). Dan dapat diperoleh periode alami bandul pada persamaan (2.90).

$$\omega_d^2 = \frac{k_{eq}}{m_d} = \frac{g}{L} \quad (2.89)$$

$$T_d = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (2.90)$$

2.4 Pembebanan

Beban adalah gaya luar yang bekerja pada suatu struktur, yang dapat berasal dari berbagai sumber, baik dari alam maupun aktivitas manusia, yang meliputi beban gravitasi (seperti beban mati dan beban hidup) serta beban lateral (seperti beban angin dan beban gempa) (Setiawan, 2016). Dalam perencanaan struktur, identifikasi beban yang bekerja sangat penting untuk memastikan bahwa struktur yang direncanakan aman dan kuat.

Adapun acuan yang digunakan dalam merencanakan pembebanan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPURG 1987).
2. SNI 1727:2020 tentang pembebanan minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain.
3. SNI 1726:2019 tentang cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.

2.4.1 Beban Mati

SNI 1727:2020 Pasal 3.1.1 menjelaskan bahwa beban mati merupakan total berat seluruh komponen permanen yang terpasang pada struktur bangunan, mencakup elemen-elemen konstruksi seperti dinding, lantai, atap, plafon, tangga, partisi tetap, material *finishing*, klading, serta komponen arsitektural dan struktural lainnya. Dalam proses perancangan harus digunakan berat bahan dan konstruksi yang sebenarnya, namun apabila data spesifik tidak tersedia, maka dapat digunakan nilai standar yang telah mendapatkan persetujuan dari pihak yang berwenang. Berdasarkan PPURG-1987 nilai beban mati ditentukan seperti Tabel 2.9

Tabel 2.9 Tabel Berat Sendiri Bahan Bangunan

Material	Berat (kg/m ³)
Baja	7850
Batu alam	2600
Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1500
Batu karang (berat tumpuk)	700
Batu pecah	1450
Besi tuang	7250
Beton	2200
Beton bertulang	2400

Material	Berat (kg/m³)
Kayu (kelas I)	1000
Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1650
Pasangan bata merah	1700
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200
Pasangan batu cetak	2200
Pasangan batu karang	1450
Pasir (kering udara sampai lembab)	1600
Pasir (jenuh air)	1800
Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1850
Tanah, lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	1700
Tanah, lempung dan lanau (basah)	2000
Timah hitam	11400

2.4.2 Beban Hidup

Menurut SNI 1727:2020 beban hidup adalah beban dinamis akibat aktivitas penghuni dan penggunaan bangunan (seperti manusia, perabot bergerak, atau peralatan tidak tetap), yang bukan termasuk beban mati atau lingkungan (angin/gempa), dengan nilai minimum yang akan digunakan mengacu pada Tabel 2.10 yang ditetapkan dalam standar tersebut.

Tabel 2.10 Beban Hidup

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_o	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat
	psf (kN/m²)	(No. Pasal)	(No. Pasal)	Lb (kN)
Sistem Lantai Akses				
– Ruang	2,4	Ya	Ya	8,9

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_0	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat
	psf (kN/m ²)	(No. Pasal)	(No. Pasal)	Lb (kN)
kantor				
– Ruang komputer	4,79	Ya	Ya	8,9
Gedung Perkantor				
– Lobi dan koridor lantai pertama	4,79	Ya	Ya	8,90
– Kantor	2,40	Ya	Ya	8,90
– Koridor di atas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	8,90
Atap				
– Atap datar, berbubung, dan lengkung	0,96	Ya		
– Atap yang digunakan penghuni	Sama dengan penggunaan yang dilayaninya	Ya		
– Atap untuk tempat berkumpul	4,70			

2.4.3 Beban Angin

Menurut SNI 1727:2020, beban angin didefinisikan sebagai seluruh gaya yang timbul pada bangunan atau komponen bangunan akibat pengaruh angin, baik dalam bentuk tekanan maupun hisapan, yang wajib dipertimbangkan dalam perancangan struktur untuk menjamin keamanan bangunan terhadap efek angin. Perhitungan beban angin ini penting untuk memastikan stabilitas dan kekuatan struktur dalam menghadapi berbagai kondisi pembebanan akibat angin.

2.4.3.1 Kategori Resiko Bangunan (KRG)

Kategori risiko bangunan mengacu pada ketentuan SNI 1726:2019 Pasal 4.1 yang ditentukan berdasarkan fungsi suatu bangunan. Kategori risiko bangunan ini dapat dilihat pada Tabel 2.15.

2.4.3.2 Kecepatan Angin Dasar (V)

Menurut SNI 1727:2020 Pasal 26.5.1, kecepatan angin dasar (V) untuk perhitungan beban angin ditentukan berdasarkan Buku Peta Angin Indonesia sesuai dengan kategori risiko bangunan I sampai kategori risiko bangunan IV.

2.4.3.3 Faktor Arah Angin (K_d)

Nilai faktor arah (K_d) angin diambil berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 26.5.3 dan diambil berdasarkan tipe struktur yang diperhitungkan. Nilai K_d dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Faktor Arah Angin (K_d)

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin (K_d)
Bangunan Gedung	
Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU)	0,85
Komponen dan Klading (K&K)	0,85
Atap lengkung	0,85
Kubah berbentuk bundar	1,0 ^a

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin (K_d)
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 penunjuk solid yang berdiri bebas serta panel penunjuk terikat	0,85
Panel penunjuk terbuka dan rangka terbuka bidang tunggal	0,85
Rangka batang menara	
Segitiga, persegi, atau persegi panjang	0,85
Semua penampang lainnya	0,95

2.4.3.4 Kategori Kekasaran Permukaan

Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 26.7.2 kategori kekasaran permukaan ditentukan berdasarkan:

1. Kekasaran Permukaan B

Daerah perkotaan, pinggir kota, daerah berhutan, daerah lain yang memiliki perhalang berdekatan.

2. Kekasaran Permukaan C

Dataran terbuka, dengan penghalang tersebar memiliki yang memiliki tinggi < 9,1 m. Kategori ini mencakup daerah terbuka datar dan padang rumput.

3. Kekasaran Permukaan D

Permukaan datar, area tanpa halangan dan permukaan air, mencakup hamparan lumpur halus.

2.4.3.5 Faktor Topografi (K_{zt})

Faktor topografi lokasi bangunan sangat memengaruhi besar beban angin karena bentuk topografi pada daerah tersebut dapat memengaruhi kecepatan angin. Sesuai SNI 1727:2020 Pasal 26.8.2 nilai faktor topografi (K_{zt}) dapat dihitung dengan persamaan (2.91).

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (2.91)$$

Dengan K_1 , K_2 , dan K_3 disesuaikan dengan kondisi topografi daerah sekitar bangunan. Jika kondisi situs dan lokasi bangunan tidak berdekatan dengan bukit, tebing, atau kondisi topografi khusus lainnya, maka $K_{zt} = 1,0$.

2.4.3.6 Faktor Elevasi Permukaan Tanah (K_e)

Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 26.9 faktor elevasi permukaan tanah (K_e) digunakan untuk menyesuaikan densitas udara. Untuk semua elevasi nilai K_e boleh diambil 1.

2.4.3.7 Efek Hembusan Angin (G)

Dalam SNI 1727:2020 Pasal 26.11.1 faktor efek hembusan angin untuk bangunan yang kaku boleh diambil sebesar 0,85 atau dihitung dengan beberapa parameter yang berpengaruh.

1. Intensitas Turbulensi Pada Ketinggian z (I_z)

Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 26.11.4 nilai I_z dihitung pada ketinggian z , dimana z adalah tinggi ekuivalen dari bangunan gedung atau struktur yang ditentukan sebesar $0,6h$. I_z dapat dihitung melalui persamaan berikut.

$$I_z = c \left(\frac{10^{1/6}}{z} \right) \quad (2.92)$$

Keterangan:

I_z = intensitas turbulensi pada ketinggian z

c = konstanta exposure daratan

z = tinggi ekuivalen dari bangunan sebesar $0,6h$ (m)

Berikut konstanta eksposur dataran yang digunakan sesuai dengan yang tertera dalam SNI 1727:2020 Pasal 26.11.4

Tabel 2.12 Tabel Konstanta Eksposur Dataran

Eksposur	α	Z_g (m)	\hat{a}	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	l (m)	ϵ	Z_{\min} (m) ^a
B	7,0	365,76	1/7	0,84	1/4,0	0,45	0,30	97,54	1/30	9,14
C	9,5	274,32	1/9,5	1,00	1/6,5	0,65	0,20	152,4	1/5,0	4,57
D	11,5	213,36	1/11,5	1,00	1/9,0	0,80	0,15	198,12	1/8,0	2,13

2. Respon Latar Belakang (Q)

Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 26.11.4 nilai respon latar belakang (Q) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0,63 \left(\frac{B + h}{L_z} \right)^{0,63}}} \quad (2.93)$$

Keterangan:

Q = respon latar belakang

B = lebar bangunan (m)

h = tinggi bangunan (m)

L_z = skala panjang integral dan turbulensi pada ketinggian ekuivalen

3. Efek Hembusan Angin Syarat (G)

Untuk struktur kaku nilai faktor hembusan angin (G) harus diambil sebesar 0,85 atau dihitung menggunakan persamaan berikut. Nilai hasil perhitungan harus dipastikan memiliki nilai yang lebih besar untuk dapat digunakan.

$$G = 0,925 \left(\frac{1 + 0,7g_q I_z Q}{1 + 0,7g_v I_z} \right) \quad (2.94)$$

Keterangan:

G = faktor hembusan angin

Q = respon latar belakang

g_q = 3,4 (SNI 1727:2020 Pasal 26.11.4)

g_v = 3,4 (SNI 1727:2020 Pasal 26.11.4)

I_z = intensitas turbulensi pada ketinggian z

2.4.3.8 Koefisien Eksposur Tekanan Kecepatan (k_z)

Berdasarkan kategori eksposur yang sudah ditentukan, koefisien eksposur tekanan kecepatan (K_z) dipengaruhi oleh ketinggian di atas permukaan tanah dan ditentukan dengan persamaan dibawah ini.

$$\text{Untuk } 4,6 \text{ m} \leq z \leq z_g, \text{ maka } K_z = 2,01 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (2.95)$$

$$\text{Untuk } z < 4,6 \text{ m, maka } K_z = 2,01 \left(\frac{15}{z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (2.96)$$

Keterangan:

K_z = koefisien eksposur tekanan kecepatan

Z_g = konstanta eksposur dataran sesuai Tabel 2.12

2.4.3.9 Tekanan Kecepatan (q_z)

Tekanan kecepatan (q_z) ditentukan berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 26.10.2 yang dihitung dengan persamaan (2.97).

$$q_z = 0,613 K_z K_{zt} K_d K_e V^2 \quad (2.97)$$

Keterangan:

q_z = tekanan kecepatan pada ketinggian z

K_z = koefisien eksposure tekanan kecepatan

K_{zt} = koefisien eksposure tekanan kecepatan

K_d = faktor arah angin

K_e = faktor elevasi permukaan tanah

V = kecepatan angin dasar

2.4.3.10 Koefisien Tekanan Eksternal (C_p) dan Internal (GC_{pi})

Koefisien tekanan eksternal (C_p) diambil berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 27.3 pada Tabel 2.13. Sedangkan koefisien tekanan internal (GC_{pi}) diambil berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 26.13 dan dapat dilihat pada Tabel 2.14.

Tabel 2.13 Koefisien Tekanan Eksternal (C_p)

Permukaan	L/B	C_p
Dinding di sisi angin datang	Seluruh nilai	0,8
	0-1	-0,5
Dinding di sisi angin pergi	2	-0,3
	≥ 4	-0,2
Dinding tepi	Seluruh nilai	-0,7

Tabel 2.14 Koefisien Tekanan Internal, (GC_{pi})

Klasifikasi Ketertutupan	Kriteria untuk Klasifikasi Ketertutupan	Tekanan Internal	Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})
Bangunan Tertutup	$A_o < 0,01 A_g$ atau 4 ft^2	Sedang	-0,18
	$A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$		-0,18
Bangunan Tertutup Sebagian	$A_o > 1,1 A_{oi}$ dan $A_o > 0,01 A_g$ atau 4 ft^2	Tinggi	-0,55
	$A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$		-0,55
Bangunan Terbuka	Bangunan yang tidak sesuai dengan klasifikasi tertutup, tertutup	Sedang	-0,18
			-0,18

Klasifikasi Ketertutupan	Kriteria untuk Klasifikasi Ketertutupan	Tekanan Internal	Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})
Sebagian	sebagian, atau klasifikasi terbuka		
Bangunan Terbuka Sebagian	Setiap dinding minimal terbuka 80%	Diabaikan	0,00

2.4.3.11 Tekanan Angin Desain (P)

Tekanan angin desain (P) diperhitungkan berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 27.3.1 dan dapat dilihat pada persamaan (2.98).

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (2.98)$$

Keterangan:

q = tekanan kecepatan pada ketinggian z

G = faktor hembusan angin

GC_p = koefisien tekanan eksternal

GC_{pi} = koefisien tekanan internal

2.4.3.12 Beban Angin Desain Minimum

Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 27.1.5 beban angin yang digunakan dalam beban angin untuk bangunan gedung tertutup atau tertutup sebagian tidak boleh kurang dari 0,77 kN/m² dikalikan dengan luas dinding bangunan gedung, serta 0,38 kN/m² dari luas pada atap gedung yang dikasih tanda terhadap bidang yang tegak lurus dengan arah angin horizontal.

2.4.4 Beban Gempa

Beban gempa adalah beban dalam arah horizontal yang bekerja pada struktur akibat pergerakan tanah selama gempa, baik secara vertikal maupun horizontal. (Setiawan, 2016). Beban ini harus diperhitungkan dalam perancangan

struktur agar bangunan mampu menahan gaya dinamis tersebut dan tetap aman serta stabil. Menurut SNI 1726:2019 beban gempa merupakan bagian dari beban desain yang harus diperhitungkan dengan menggunakan metode analisis statis dan metode analisis dinamis. Analisis statis menggunakan prinsip distribusi gaya geser dasar struktur ke seluruh elevasi bangunan. Sementara itu, analisis dinamis dilakukan melalui analisis respon spektrum dan analisis riwayat waktu. Dalam menentukan beban gempa diperlukan perhitungan dan penentuan parameter beban gempa.

2.4.4.1 Faktor Keutamaan Gempa dan Kategori Risiko

Kategori risiko bangunan ditentukan dari jenis pemanfaatan bangunan tersebut berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 4.1.2 yang dapat dilihat pada Tabel 2.15. Pengaruh gempa terhadapnya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan gempa (I_e) yang dapat dilihat pada Tabel 2.16.

Tabel 2.15 Kategori Risiko untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: <ul style="list-style-type: none"> – Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan – Fasilitas sementara – Gudang penyimpanan – Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> – Perumahan – Rumah toko dan rumah kantor – Pasar – Gedung perkantoran – Gedung apartemen/rumah susun 	II

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<ul style="list-style-type: none"> – Pusat perbelanjaan/mall – Bangunan industri – Fasilitas manufaktur – Pabrik 	
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bioskop – Gedung pertemuan – Stadion – Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat – Fasilitas penitipan anak – Penjara – Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan nongedung, tidak termasuk dalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Pusat pembangkit listrik biasa – Fasilitas penanganan air – Fasilitas penanganan limbah – Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam katogori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung</p>	III

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<p>bahan beracun atau peledak dimana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	
<p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bangunan-bangunan monumental – Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan – Rumah ibadah – Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat – Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya – Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat – Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat – Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	<p>IV</p>

Tabel 2.16 Tabel Faktor Keutamaan Gempa

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa (I_e)
I atau II	1
III	1,25
IV	1,5

2.4.4.2 Klasifikasi Situs

Klasifikasi situs digunakan untuk menentukan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. Penetapan kelas situs harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan laboratorium. Tabel 2.17 merupakan klasifikasi kelas situs berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 5 dengan profil tanah lapisan 30 m paling atas. Jika sifat tanah yang memadai tidak tersedia untuk penentuan kelas situs, maka kelas situs SE (tanah lunak) harus digunakan sesuai dengan persyaratan Pasal 6.2, kecuali jika pemerintah/dinas yang berwenang memiliki data geoteknik yang dapat menentukan kelas situs lainnya

Tabel 2.17 Klasifikasi Situs

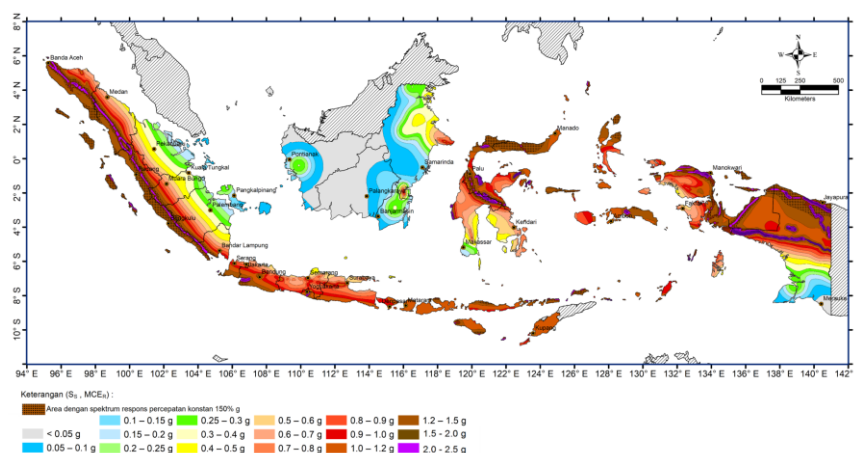
Kelas Situs	\bar{V}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir $\bar{s}_u < 25$ kPa		

Kelas Situs	\bar{V}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u (kPa)
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: <ol style="list-style-type: none"> 1. Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersedimentasi lemah 2. Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan H > 3 m) 3. Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan H > 7,5 m dengan indeks plastisitas PI > 75) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan H > 35 m dengan $\bar{s}_u < 50$ kPa		

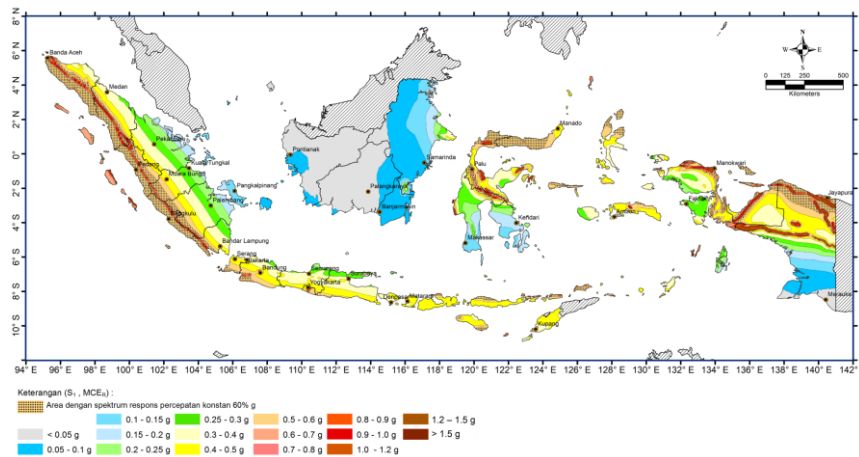
N/A = tidak dapat dipakai

2.4.4.3 Parameter Percepatan Gempa Batuan Dasar

Parameter percepatan gempa batuan dasar terdiri dari S_s (percepatan batuan dasar pada perioda pendek 0,2 detik) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada perioda 1 detik). S_s dan S_1 harus ditetapkan masing-masing dari respon spektral percepatan 0,2 detik dan 1 detik dalam peta gempa untuk perioda ulang 2500 tahun atau dengan kemungkinan MCE_R 2% terlampaui dalam 50 tahun. Peta parameter untuk S_s dan S_1 diatur dalam SNI 1726:2019 sesuai dengan Gambar 2.9 dan Gambar 2.10.



Gambar 2.9 Peta Parameter S_s

Gambar 2.10 Peta Parameter S_1

2.4.4.4 Koefisien Situs

Koefisien situs adalah nilai koefisien untuk merambatkan percepatan gempa lapisan batuan ke lapisan permukaan. Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.2 untuk penentuan respons spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada perioda 0,2 detik dan perioda 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran perioda pendek (F_a) dan faktor amplifikasi getaran terkait percepatan yang mewakili getaran perioda 1 detik (F_v). Koefisien situs F_a dan F_v dapat dilihat pada SNI 1726:2019 seperti pada Tabel 2.18 dan Tabel 2.19.

Tabel 2.18 Tabel Koefisien Situs F_a

Kelas Situs	Parameter Respon Spectral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget MCE_R Terpetakan Pada Perioda Pendek, $T = 0,2$ Detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS (situs memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs spesifik)					

Tabel 2.19 Tabel Koefisien Situs F_v

Kelas Situs	Parameter Respon Spectral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget MCE_R Terpetakan Pada Periode 1 Detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS (situs memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs spesifik)					

2.4.4.5 Parameter Sprektrum Respon Percepatan

Parameter spektrum respon percepatan periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs ditentukan dengan persamaan berikut.

$$S_{MS} = F_a \times S_S \quad (2.99)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \quad (2.100)$$

Keterangan:

S_S = parameter respon spektral percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode pendek

S_1 = parameter respon spektral percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode 1 detik

2.4.4.6 Parameter Percepatan Spektral Desain

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.3 parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}) dan pada periode 1 detik (S_{D1}) ditentukan melalui persamaan berikut.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.101)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.102)$$

2.4.4.7 Kategori Desain Seismik

Dalam SNI 1726:2019 Pasal 6.5 kategori desain seismik ditentukan berdasarkan kategori risiko bangunan dan parameter respons spektral percepatan desain pada perioda pendek (S_{DS}) dan perioda 1 detik (S_{D1}), sesuai dengan Tabel 2.20 dan Tabel 2.21.

Tabel 2.20 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Nilai S_{DS}

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

Tabel 2.21 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Nilai S_{D1}

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

Berdasarkan SNI 2847:2019 terdapat Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM), yaitu rangka dimana komponen balok, pelat, kolom, dan joint menahan gaya melalui lentur, geser, dan gaya aksial.. SRPM dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)

Merupakan suatu sistem rangka yang memenuhi ketentuan pada SNI

2847:2019 pasal 18.3. Pada pasal ini menyatakan bahwa SRPMB hanya bisa dikenakan untuk struktur pada KDS B. Sistem ini hanya memiliki tingkat daktilitas yang terbatas.

2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)

Merupakan suatu sistem rangka yang memenuhi ketentuan pada SNI 2847:2019 pasal 18.4. Struktur yang termasuk kedalam struktur pada KDS C dapat menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM). Sistem ini hanya memiliki tingkat daktilitas menengah.

3. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Merupakan suatu sistem rangka yang memenuhi ketentuan pada SNI 2847:2019 pasal 18.2.3 hingga 18.2.8 dan 18.6 hingga 18.8. Struktur yang termasuk kedalam struktur pada KDS D, E, atau F dapat menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Sistem ini memiliki tingkat daktilitas yang penuh.

2.4.4.8 Respon Spektrum Desain

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.4 apabila spektrum respons desain diperlukan oleh tata cara ini dan prosedur gerak tanah dari spesifik-situs tidak digunakan, maka kurva spektrum respons desain harus dikembangkan dengan mengacu Gambar 2.11 dan mengikuti ketentuan di bawah ini.

1. Jika perioda yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain (S_a) harus di ambil dari persamaan di bawah ini.

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.103)$$

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{DI}}{S_{DS}} \quad (2.104)$$

2. Setiap perioda yang lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain (S_a) sama dengan S_{DS} .

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.105)$$

3. Untuk perioda lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan desain (S_a) diambil berdasarkan persamaan berikut.

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.106)$$

4. Untuk perioda lebih besar dari T_L , respons spektral percepatan desain (S_a) diambil berdasarkan persamaan berikut.

$$S_a = \frac{S_{D1}T_L}{T^2} \quad (2.107)$$

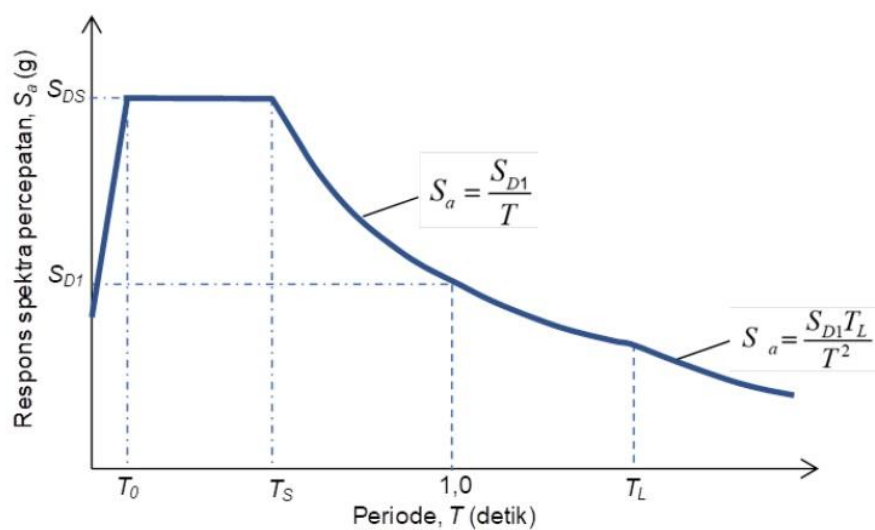
Keterangan:

S_{DS} = parameter respon spektral percepatan desain pada perioda pendek

S_{D1} = parameter respons spektral percepatan desain pada perioda 1 detik

T = perioda getar fundamental struktur

T_L = peta transisi perioda panjang yang ditunjukkan pada Gambar 20 SNI 1726:2019



Gambar 2.11 Respon Spektrum Desain

2.4.4.9 Koefisien Rancangan

Koefisien rancangan terdiri dari faktor modifikasi respon (R), faktor reduksi pengaruh daktilitas dari sistem (C_d), dan faktor kuat lebih sistem (Ω_0). Faktor modifikasi respon (R) digunakan untuk mereduksi kekuatan lateral dari struktur dengan mempertimbangkan karakteristik dari sistem yang terpilih. Besar nilai koefisien rancang diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.2.2 pada bagian C yaitu sistem rangka pemikul momen sesuai dengan Tabel 2.22.

Tabel 2.22 Faktor F , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem Pemikul Gaya Seismik	R_a	Ω_0^b	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
C. Sistem Rangka Pemikul Momen								
Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5,5	TB	TB	48	30	TI
Rangka baja pemikul momen menengah	4,5	3	4	TB	TB	10	TI	TI
Rangka baja pemikul momen biasa	3,5	3	3	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ^m	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4,5	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2,5	TB	TI	TI	TI	TI
Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4,5	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5,5	48	48	30	TI	TI
Rangka baja dan beton komposit	3	3	2,5	TB	TI	TI	TI	TI

Sistem Pemikul Gaya Seismik	R_a	Ω_0^b	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
pemikul momen biasa								
Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan ⁿ	3,5	3	3,5	10	10	10	10	10

2.4.4.10 Perhitungan Gaya Lateral Ekuivalen

2.4.4.10.1 Gaya Geser Dasar Seismik (V)

Gaya geser dasar merupakan bentuk representasi atau penyederhanaan dari getaran gempa bumi yang berdampak pada dasar bangunan, lalu dijadikan sebagai beban gempa desain yang perlu diperhitungkan dalam perancangan struktur tahan gempa. Gaya ini kemudian akan didistribusikan secara vertikal sepanjang tinggi bangunan menjadi gaya horizontal pada setiap lantai struktur (Zacharias, 2023). Gaya geser dasar seismik (V), dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan (2.108) berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1.

$$V = C_s W \quad (2.108)$$

Keterangan:

C_s = koefisien respons seismik

W = berat seismik efektif

2.4.4.10.2 Koefisien Respon Seismik

Nilai dari koefisien respon seismik (C_s) harus ditentukan sesuai dengan persamaan (2.109).

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_c}\right)} \quad (2.109)$$

Keterangan:

S_{DS} = parameter percepatan spektral desain untuk perioda pendek

R = koefisien modifikasi respons

I_e = faktor keutamaan gempa

Nilai C_s yang dihitung sesuai dengan persamaan di atas tidak perlu melebihi nilai C_s pada persamaan (2.110) dan (2.111).

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.110)$$

Untuk $T \geq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.111)$$

Nilai C_s yang telah dihitung tidak kurang dari nilai C_s pada persamaan (2.112).

$$C_s = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (2.112)$$

Sebagai tambahan, untuk struktur yang berlokasi di daerah dimana S_1 sama dengan atau lebih besar dari 0,6g, maka C_s harus tidak kurang dari C_s pada persamaan (2.114).

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.113)$$

Keterangan:

S_{D1} = parameter percepatan spektral desain untuk perioda 1,0 detik

T = perioda fundamental struktur (detik)

S_1 = parameter percepatan respons spektral maksimum

2.4.4.10.3 Berat Seismik Efektif (W)

Dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.7.2 beban seismik efektif struktur (W) harus menyertakan seluruh beban mati. Pada kebutuhan pemodelan *tuned mass damper*, *Element Self Mass*, *Additional Mass*, dan *Specified Load Pattern* pun harus disertakan pada pendefinisian sumber massa berat seismik efektif. Namun, beban mati sendiri dan massa dari *tuned mass damper* tidak perlu disertakan karena sudah termasuk ke dalam *Element Self* dan *Additional Mass* (Khan & Baig, 2020).

2.4.4.10.4 Periode Fundamental

Pada dasarnya perioda fundamental struktur (T) dapat dihasilkan dari *software*, namun perioda fundamental struktur tidak boleh melebihi hasil perkalian koefisien untuk batasan atas pada perioda yang dihitung (C_u) Tabel 2.23 dan perioda fundamental pendekatan (T_a) yang ditentukan sesuai persamaan (2.114). Sebagai alternatif dalam melakukpn analisis apabila nilai T tidak tersedia, diizinkan secara langsung menggunakan perioda fundamental pendekatan (T_a).

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.114)$$

Keterangan:

T_a = perioda pendekatan fundamental (detik)

C_t = parameter perioda pendekatan

x = parameter perioda pendekatan

Nilai parameter perioda pendekatan C_t dan x diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.8.2.1 seperti pada Tabel 2.23.

Tabel 2.23 Nilai Parameter Perioda 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		

Tipe Struktur	C_t	x
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 sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Sedangkan nilai batas atas perioda fundamental adalah:

$$T = C_u T_a \quad (2.115)$$

Keterangan:

T = perioda fundamental (detik)

C_u = koefisien perioda batas atas

T_a = perioda pendekatan fundamental (detik)

Tabel 2.24 Tabel Koefisien Perioda Batas Atas

Parameter Percepatan Respons Spektral Desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
≥ 0,4	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
≤ 0,1	1,7

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.4.1 apabila perioda fundamental hasil analisis struktur menggunakan komputer lebih besar dari C_u.T_a pada suatu arah tertentu, maka perioda struktur (T) harus diambil sebesar C_u.T_a.

2.4.4.10.5 Distribusi Vertikal Gaya Seismik

Gaya seismik lateral (F_x) di semua tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut.

$$F_x = C_{vx} V \quad (2.116)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2.117)$$

Keterangan:

F_x = gaya seismik vertikal (kN)

C_{vx} = faktor distribusi vertikal

w_i, w_x = berat seismik efektif total struktur (W) yang dikenakan pada tingkat i atau x

h_i, h_x = tinggi dasar sampai tingkat i atau x (m)

k = eksponen yang terkait dengan perioda struktur

$k = 1$, untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik

$k = 2$, untuk struktur dengan $T \geq 2,5$ detik (atau ditentukan dengan interpolasi linier)

2.4.4.10.6 Distribusi Horizontal Gaya Seismik

Geser tingkat desain seismik di semua tingkat (V_x) harus ditentukan dengan persamaan (2.118).

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad (2.118)$$

Keterangan:

V_x = geser tingkat seismik (kN)

F_i = bagian dari geser dasar seismik (V) pada tingkat ke- i (kN)

Geser tingkat desain seismik (V_x) harus didistribusikan pada berbagai elemen vertikal sistem pemikul gaya seismik di tingkat yang ditinjau berdasarkan pada kekakuan lateral relatif elemen pemikul vertikal dan diafragma.

2.5 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan struktur atas mengacu pada SNI 1726:2019 Pasal 4.2.2.1. Untuk struktur yang mengalami gaya lateral berupa gempa mendapat kombinasi beban tambahan sesuai dengan SNI 1726:2019 Pasal 4.2.2.3.

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

Kombinasi pembebanan dengan pengaruh beban seismik dalam Pasal 4.2.2.3 pada SNI 1726 : 2019 sebagai berikut.

6. 1,2 D + 1,0 E_v + 1,0 E_h + 1,0 L
7. 0,9 D + 1,0 E_v + 1,0 E_h

Berdasarkan pada SNI 1726:2019 Pasal 7.4.2.1 pengaruh beban seismik horizontal harus ditentukan dengan persamaan (2.120).

$$E_h = \rho Q_e \quad (2.119)$$

Keterangan:

E_h = pengaruh beban seismik horizontal

ρ = faktor redudansi (SNI 1726 : 2019 Pasal 7.3.4.2)

Q_e = pengaruh gaya seismik horizontal (Pasal 7.5.4)

Pengaruh beban seismik vertikal berdasarkan pasal 7.4.2.2 harus ditentukan dengan persamaan (2.120).

$$E_v = 0,2S_{DS}D \quad (2.120)$$

Keterangan:

E_v = pengaruh beban seismik vertikal

S_{DS} = percepatan respons spektral desain pada periode pendek

D = pengaruh beban mati

Faktor beban untuk L pada kombinasi 3,4, dan 7 diizinkan diambil sama dengan 0,5 untuk semua fungsi ruang apabila L_0 dalam SNI 1727:2019 kurang dari sama dengan $4,78 \text{ kN/m}^2$, kecuali garasi atau ruang pertemuan publik.

2.6 Analisis Perilaku Struktur

2.6.1 Jumlah Ragam

Sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1 analisis pada struktur harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar 100% dari massa struktur dan berlaku untuk masing-masing arah yang ditinjau. Jika nilai partisipasi massa belum memenuhi maka diharuskan untuk menambahkan jumlah ragam agar mencapai partisipasi massa yang ditentukan.

2.6.2 Skala Gempa

Berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.4.1 menyebutkan bahwa gaya geser dasar dinamik harus lebih besar dari 100% gaya geser statiknya. Gaya geser dasar dinamik yang dimaksud adalah hasil analisis respon spektrum maupun riwayat waktu. Bila gaya geser dasar dinamik bernilai lebih kecil dari gaya geser statiknya maka harus dilakukan penyesuaian.

$$\text{Skala-x} = \frac{V}{V_{dx}} \quad (2.121)$$

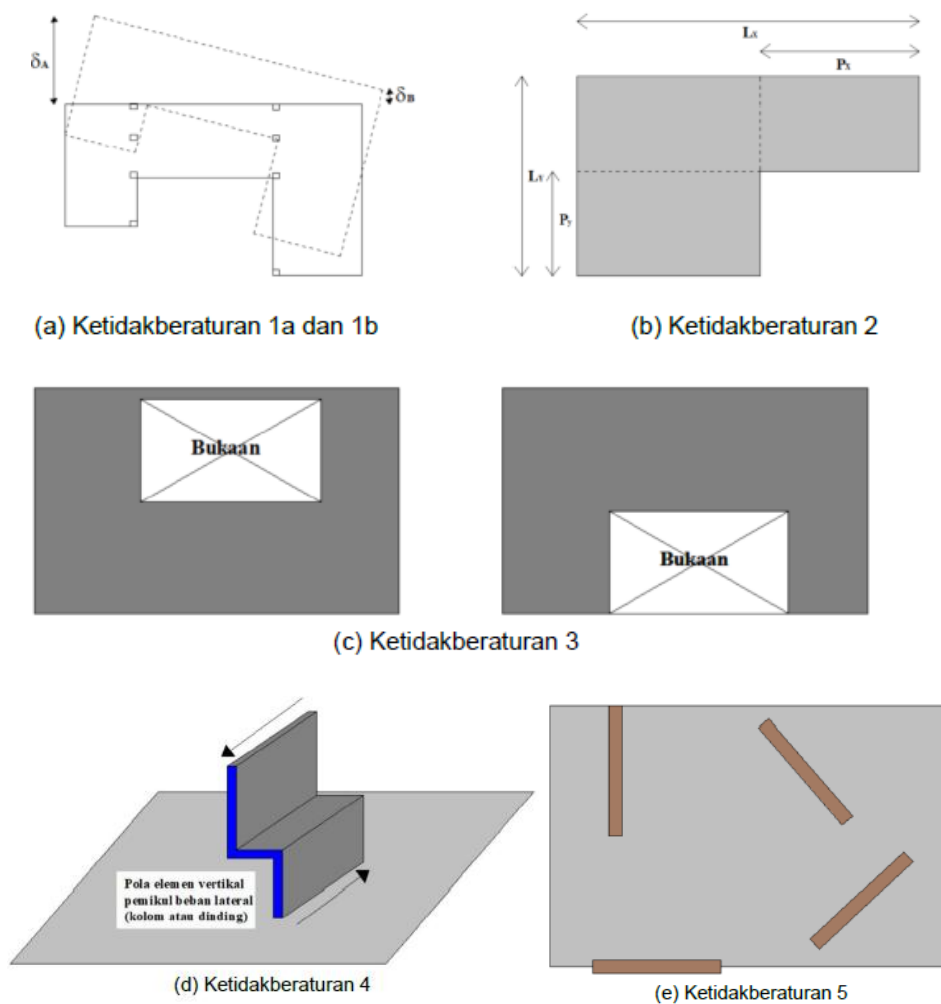
$$\text{Skala-y} = \frac{V}{V_{dy}} \quad (2.122)$$

$$\text{Faktor skala x} = \left(g \times \frac{I_c}{R} \right) \times \left(\frac{v}{V_{dx}} \right) \quad (2.123)$$

$$\text{Faktor skala } y = \left(g \times \frac{I_e}{R} \right) \times \left(\frac{v}{V_{dy}} \right) \quad (2.124)$$

2.6.3 Ketidakberaturan Struktur

Ketidakberaturan struktur diklasifikasikan berdasar ketidakberaturan struktur horizontal dan ketidakberaturan struktur vertikal. Ketidakberaturan struktur horizontal diatur pada SNI 1726:2019 Pasal 7.3.2.1 sedangkan ketidakberaturan struktur vertikal diatur pada Pasal 7.3.2.2. Gambar 2.12 berikut merupakan gambar ketidakberaturan struktur horizontal pada struktur.

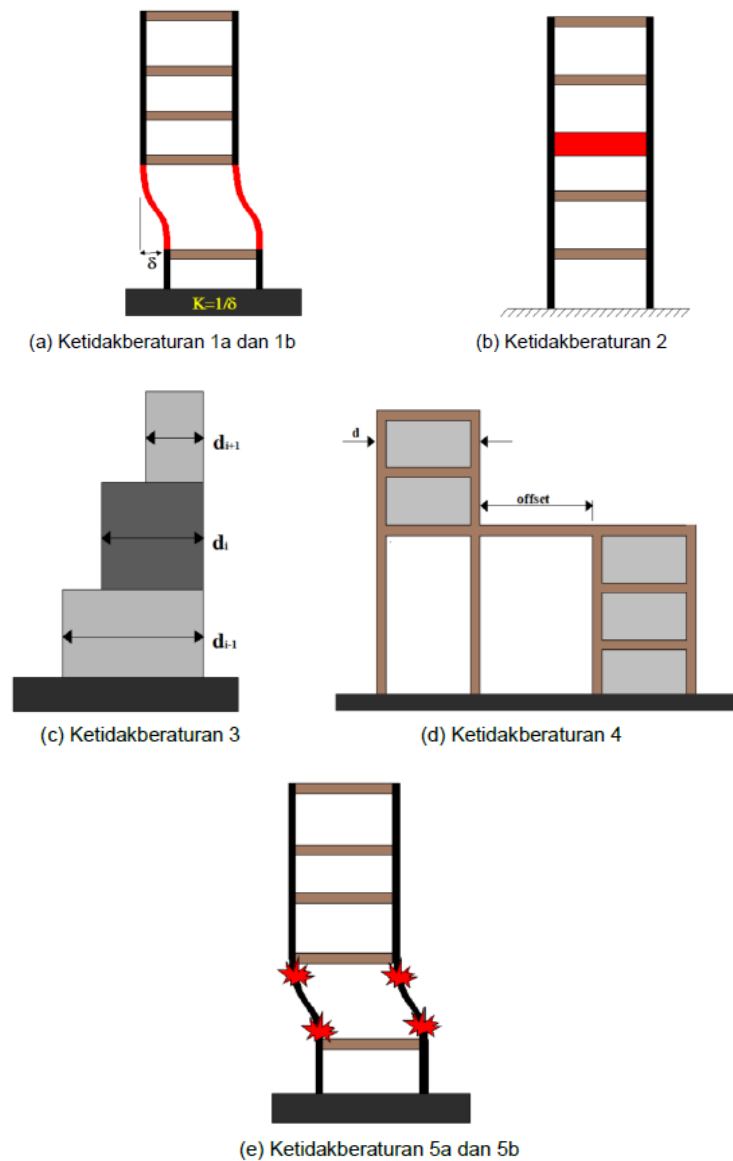


Gambar 2.12 Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur

Tabel 2.25 Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur

	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan
1a	Ketidakteraturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah 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 di mana diafragma kaku atau setengah kaku.
1b	Ketidakteraturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu 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 dimana diafragma kaku atau setengah kaku.
2	Ketidakteraturan 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.
3	Ketidakteraturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau lebih besar dari 50% daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50% dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.
4	Ketidakteraturan 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.
5	Ketidakteraturan sistem nonparalel didefinisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik.

Gambar 2.13 berikut merupakan gambar ketidakberaturan struktur vertikal pada struktur.



Gambar 2.13 Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur

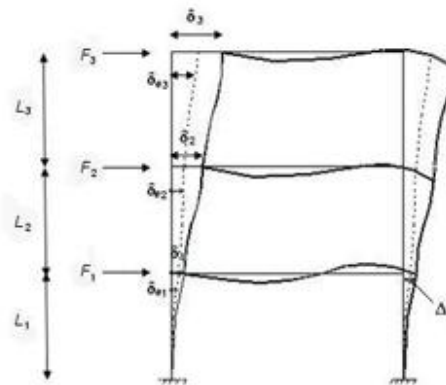
Tabel 2.26 Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur

Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan	
1a	Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak didefinisikan ada jika suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.
1b	Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan didefinisikan

Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan	
	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.
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
3	Ketidakberaturan geometri vertikal didefinisikan ada jika dimensi sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130% dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tinggi di dekatnya.
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.
5a	Ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekakuan lateral tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80% kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekakuan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.
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. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau

2.6.4 Simpangan Antar Tingkat

Pada SNI 1726:2019 Pasal 7.8.6 dijelaskan bahwa simpangan antar tingkat (Δ) harus dihitung berdasarkan perbedaan simpangan yang terjadi pada pusat massa diatas dan dibawah tingkat yang ditinjau. Berdasarkan SNI 1726:2019 simpangan yang terjadi pada struktur dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Penentuan Simpangan Antar Tingkat

Parameter yang dibutuhkan untuk memperhitungkan simpangan antar tingkat adalah faktor keutamaan struktur gedung (I_e), faktor pembesaran simpangan lateral (C_d), dan perbedaan *displacement* yang terjadi pada tingkat ke- n dengan tingkat dibawahnya (δ). Simpangan antar tingkat desain yang terjadi tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin. Berdasarkan SNI 1726:2019 simpangan antar tingkat izin dapat dilihat pada Tabel 2.27

Simpangan pusat masa di tingkat ke- x harus dihitung dengan persamaan (2.125).

$$\Delta x = C_d \frac{\delta_{xe}}{I_e} \quad (2.125)$$

Tabel 2.27 Simpangan Antar Tingkat Izin, Δ_a

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 yan telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	$0,025h_{sx}^c$	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$

Struktur	Kategori Risiko		
	I atau II	III	IV
Semua struktur lainnya	0,020h _{sx}	0,015h _{sx}	0,010h _{sx}

Dengan nilai h_{sx} merupakan tinggi tingkat dibawah tingkat ke-x. Selain itu nilai yang terjadi juga harus dilakukan kontrol. Hasil *displacement* yang diperoleh dari analisis *Software* tidak boleh melebihi $H/240$.

2.7 Analisis Riwayat Waktu

Analisis riwayat waktu adalah sebuah pendekatan dinamis yang menggambarkan perilaku struktur dengan memasukkan data rekaman gempa dan menghitung respons struktur dalam rentang waktu tertentu (Isneini et al., 2023). Pada analisis riwayat waktu prosedur yang paling penting adalah penyetaraan intensitas gempa. Proses ini bisa dilakukan dengan metode *time history scaling* ataupun *spectral matching*. Analisis riwayat waktu diatur dalam SNI 1726:2019 pada pasal 7.9.2. Untuk analisa riwayat waktu linier diperlukan paling sedikit tiga data *ground motion*. *Ground motion* yang dipilih harus memiliki bentuk yang serupa dengan respon spektra pada lokasi tertentu yang mewakili 3 jenis gempa yaitu *shallow crustal*, *benioff*, dan *megathrust*.

Gempa *shallow crustal* merupakan gempa dengan durasi getaran 10 hingga 40 detik yang terjadi pada kerak bumi dengan kedalaman relatif dangkal kurang dari 30 meter. Sehingga gelombang seismik yang dihasilkan mengalami pelemahan energi yang relatif kecil sebelum mencapai permukaan tanah dan percepatan tanah yang terjadi cukup besar. Gempa *benioff* merupakan gempa dengan durasi 30 hingga 90 detik yang terjadi pada lempeng samudra yang menujam pada zona subduksi dengan kedalaman berkisar 60 km sampai dengan 300 km. Gempa *benioff* memiliki nilai percepatan tanah puncak (PGA) sedang hingga tinggi, tergantung pada magnitudo dan jarak terhadap sumber gempa. Sedangkan gempa *megathrust* merupakan gempa yang terjadi pada bidang kontak antara dua lempeng tektonik pada zona subduksi. Gempa ini memiliki magnitudo yang besar dengan kedalaman sumber gempa relatif dangkal yaitu sekitar 10 hingga 50 km dan durasi getaran yang sangat panjang.