

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Teknologi di bidang konstruksi sudah mengalami perkembangan pesat. Perkembangan yang paling terlihat adalah perkembangan pada material konstruksi. Dahulu pengerjaan konstruksi rumah, jembatan, dan sebagainya menggunakan material tanah, kayu, dan batu. Namun kini material tersebut telah beralih menjadi beton dan baja. Beton bertulang adalah gabungan antara beton dan baja. Beton bertulang banyak digunakan pada konstruksi bangunan di Indonesia karena bersifat kuat, pengerjaan relatif mudah dan murah.

2.2 Beton Bertulang

Beton merupakan suatu material hasil percampuran pasir, kerikil, batu pecah atau agregat lainnya yang dicampur menjadi satu dengan pasta yang terbuat dari semen yang berperan sebagai pengikat dan air sebagai pemicu reaksi kimia dalam proses pengerasan. Terkadang satu atau lebih bahan aditif ditambahkan untuk menghasilkan beton dengan karakteristik tertentu.

Seperti substansi-substansi batuan lainnya, beton memiliki kuat tekan yang tinggi dan kuat tarik yang rendah. Beton bertulang adalah kombinasi antara beton dan baja dimana tulangan baja berfungsi menyediakan kuat tarik yang tidak dimiliki beton. Tulangan baja juga dapat menahan gaya tekan sehingga digunakan pada kolom dan berbagai kondisi lainnya.

Modulus elastisitas beton sangat bergantung pada mutu beton. Mutu beton adalah kekuatan tekan beton yang diuji pada saat usia beton mencapai 28 hari. Maka berdasarkan SNI 2847-2013, modulus elastisitas beton (E_c) dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$E_c = W_c^{1,5} \cdot 0,043\sqrt{f_c'} \dots\dots\dots (2.1.a)$$

Dengan nilai W_c diantara 1440 – 2560 kg/m³

Sedangkan untuk beton normal, nilai E_c dapat ditentukan sebagai berikut:

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \dots\dots\dots(2.1.b)$$

2.3 Baja Tulangan

Baja tulangan adalah baja karbon atau paduan yang berbentuk batang berpenampang bundar yang digunakan untuk penulangan beton. Berdasarkan bentuknya, baja tulangan beton dibedakan menjadi 2 (dua) jenis yaitu baja tulangan beton polos dan baja tulangan beton sirip/ulir.

Baja tulangan digunakan pada konstruksi beton untuk menahan gaya dalam berupa tarik yang dihasilkan akibat pembebanan. Maka berdasarkan SNI 2847-2013, modulus elastisitas baja tulangan (E_s) dapat diambil sebesar 200000 MPa. Tulangan pada balok dan kolom harus menggunakan tulangan ulir. Kecuali tulangan geser atau pada beton pretegang yang menggunakan tulangan polos.

Dengan penggunaan beton bertulang sebagai bahan utama struktur yang semakin banyak maka berkembang pula produksi tulangan baja pabrikasi dengan berbagai standar ukuran. Berikut adalah berbagai ukuran diameter dan penamaan baja tulangan polos dan tulangan ulir yang digunakan berdasarkan pada SNI 2052-2017 :

Tabel 2.1 Ukuran Baja Tulangan Polos

No	Penamaan	Diameter nominal (d)	Luas penampang nominal (A)	Berat nominal per meter*
		mm	mm ²	kg/m
1	P 6	6	28	0,222
2	P 8	8	50	0,395
3	P 10	10	79	0,617
4	P 12	12	113	0,888
5	P 14	14	154	1,208
6	P 16	16	201	1,578
7	P 19	19	284	2,226
8	P 22	22	380	2,984
9	P 25	25	491	3,853
10	P 28	28	616	4,834
11	P 32	32	804	6,313
12	P 36	36	1018	7,990
13	P 40	40	1257	9,865
14	P 50	50	1964	15,413

CATATAN:

- *sebagai referensi
- Cara menghitung luas penampang nominal, keliling nominal, berat nominal dan ukuran adalah sebagai berikut:
 - a) Luas penampang nominal (A)

$$A = 0,7854 \times d^2 \quad (\text{mm}^2)$$
 d = diameter nominal (mm)
 - b) Berat nominal = $\frac{0,785 \times 0,7854 \times d^2}{100}$ (kg/m)

Tabel 2.2 Ukuran Baja Tulangan Ulir/Sirip

No	Pena- maan	Diameter nominal (d)	Luas penam- pang nominal (A)	Tinggi sirip (H)		Jarak sirip melintang (P) Maks	Lebar sirip membujur (T) Maks	Berat nominal per meter
				min	maks			
		mm	mm ²	mm	mm	mm	mm	kg/m
1	S 6	6	28	0,3	0,6	4,2	4,7	0,222
2	S 8	8	50	0,4	0,8	5,6	6,3	0,395
3	S 10	10	79	0,5	1,0	7,0	7,9	0,617
4	S 13	13	133	0,7	1,3	9,1	10,2	1,042
5	S 16	16	201	0,8	1,6	11,2	12,6	1,578
6	S 19	19	284	1,0	1,9	13,3	14,9	2,226
7	S 22	22	380	1,1	2,2	15,4	17,3	2,984
8	S 25	25	491	1,3	2,5	17,5	19,7	3,853
9	S 29	29	661	1,5	2,9	20,3	22,8	5,185
10	S 32	32	804	1,6	3,2	22,4	25,1	6,313
11	S 36	36	1018	1,8	3,6	25,2	28,3	7,990
12	S 40	40	1257	2,0	4,0	28,0	31,4	9,865
13	S 50	50	1964	2,5	5,0	35,0	39,3	15,413
14	S 54	54	2290	2,7	5,4	37,8	42,3	17,978
15	S 57	57	2552	2,9	5,7	39,9	44,6	20,031

CATATAN:

1. Diameter nominal hanya dipergunakan untuk perhitungan parameter nominal lainnya dan tidak perlu diukur
2. Cara menghitung luas penampang nominal, keliling nominal, berat nominal dan ukuran sirip/ulir adalah sebagai berikut:
 - a) Luas penampang nominal (A)

$$A = 0,7854 \times d^2 \quad (\text{mm}^2)$$
d = diameter nominal (mm)
 - b) Berat nominal = $\frac{0,785 \times 0,7854}{100} d^2 \times 0,7$ (kg/m)
 - c) Jarak sirip melintang maksimum = 0,70 d
 - d) Tinggi sirip minimum = 0,05 d
Tinggi sirip maksimum = 0,10 d
 - e) Jumlah 2 (dua) sirip membujur maksimum = 0,25 K
Keliling nominal (K)
 $K = 0,3142 \times d$ (mm)

2.4 Perencanaan Struktur Atas (*Upper Structure*)

Struktur bangunan terdiri dari struktur bawah (*sub structure*) dan struktur atas (*upper structure*). Struktur bawah yang dimaksud adalah pondasi dan struktur bangunan yang berada dibawah tanah, sedangkan yang dimaksud struktur atas adalah struktur bangunan yang berada diatas permukaan tanah seperti kolom, balok, pelat, tangga, lift, dan sebagainya. Beban-beban yang bekerja pada struktur seperti beban mati (*dead load*), beban hidup (*live load*), beban gempa (*earthquake*), dan

beban angin (*wind load*) menjadi bahan perhitungan awal dalam perencanaan struktur.

2.5 Kolom

Berdasarkan SNI 2847-2013 kolom adalah komponen struktur bangunan yang tugas utamanya menyangga beban aksial tekan vertikal dengan bagian tinggi yang tidak ditopang paling tidak tiga kali dimensi lateral terkecil. Fungsi kolom adalah sebagai penerus beban seluruh bangunan ke pondasi. Kolom merupakan lokasi kritis yang dapat menyebabkan keruntuhan, baik keruntuhan tingkat maupun keruntuhan total.

Menurut SNI 2847-2013 ada empat ketentuan terkait perhitungan kolom:

1. Kolom harus dirancang untuk memikul beban aksial terfaktor yang bekerja pada semua lantai atau atap dan momen maksimum yang berasal dari beban terfaktor pada satu bentang terdekat dari lantai atau atap yang ditinjau.
2. Pada konstruksi rangka atau struktur menerus pengaruh dari adanya beban tak seimbang pada lantai atau atap terhadap kolom luar maupun dalam harus diperhitungkan. Demikian pula pengaruh dari beban eksentris.
3. Dalam menghitung momen akibat beban gravitasi yang bekerja pada kolom, ujung-ujung terjauh kolom dapat dianggap jepit, selama ujung-ujung tersebut menyatu (monolit) dengan komponen struktur lainnya.
4. Momen-momen yang bekerja pada setiap level lantai atau atap harus didistribusikan pada kolom di atas dan di bawah lantai tersebut berdasarkan kekakuan relatif kolom.

2.5.1 Perencanaan Kolom

Komponen struktur yang dibebani beban aksial harus direncanakan terhadap momen maksimum yang menyertai beban aksial tersebut. Beban aksial terfaktor (P_u) tidak boleh melebihi kuat tekan rencana (ϕP_n) yang dituliskan secara matematis sebagai berikut :

$$P_u \leq \phi P_n \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan ϕ adalah faktor reduksi kekuatan beton yang nilainya berdasarkan SNI 2847-2013 pasal 9.3.2.2 sebagai berikut:

- ~ Komponen struktur dengan tulangan spiral, $\phi = 0,75$
- ~ Komponen struktur bertulang lainnya, $\phi = 0,65$

Berdasarkan SNI 2847-2013 pasal 10.3.6 kekuatan tekan rencana (ϕP_n) maksimum dari komponen struktur tekan yang dibebani gaya aksial dengan eksentrisitas nol tidak boleh lebih besar dari $\phi P_{n(max)}$ yang dapat diperhitungkan dengan persamaan berikut:

1. Komponen struktur non-prategang dengan tulangan spiral:

$$\phi P_{n(max)} = 0,85 \phi [0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \dots\dots\dots (2.3.a)$$

2. Komponen struktur non-prategang dengan tulangan pengikat:

$$\phi P_{n(max)} = 0,80 \phi [0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \dots\dots\dots (2.3.b)$$

dengan f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

f_y = Tegangan leleh baja (MPa)

A_g = Luas penampang kolom (mm²)

A_{st} = Luas penampang tulangan (mm²)

Sementara luas penampang kolom (A_g) yang diperlukan dengan rasio penulangan (ρ_g) dapat dihitung dengan rumus:

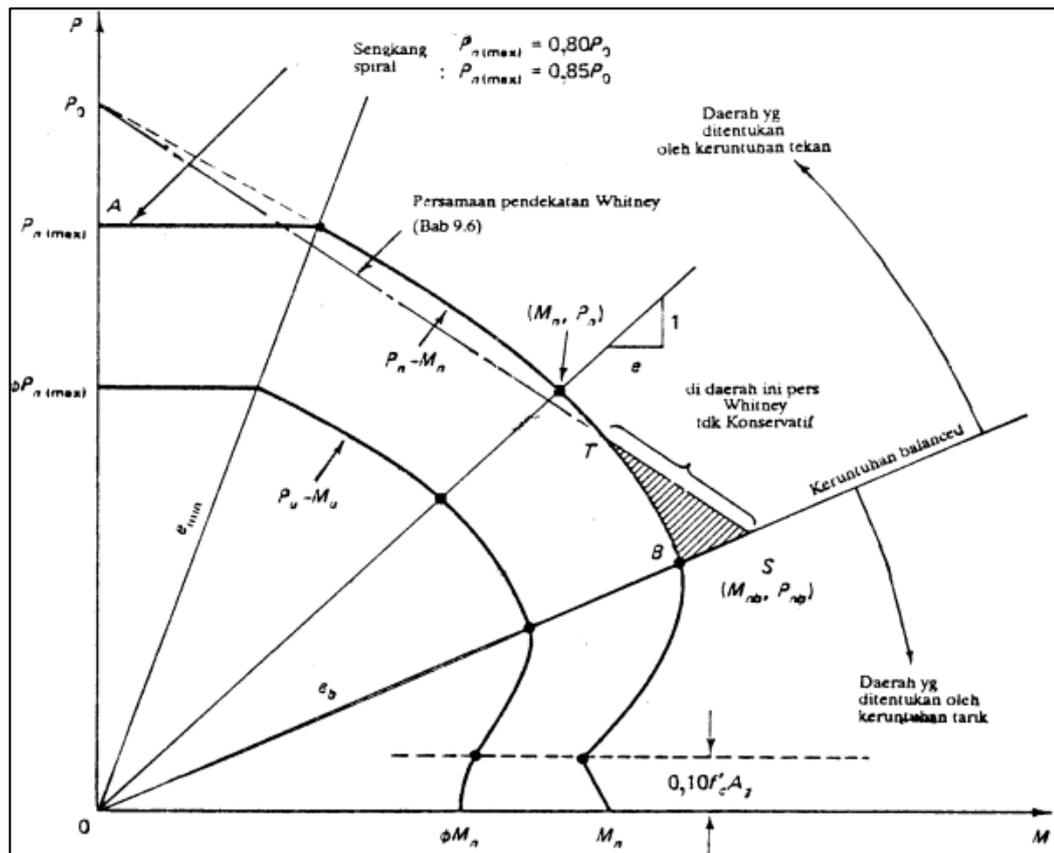
$$A_g = \frac{P_u}{0,80 \phi [0,85 f'_c (1 - P_g) + f_y P_g]} \dots\dots\dots (2.4)$$

2.5.2 Diagram Interaksi Kolom

Kapasitas penampang kolom beton bertulang untuk dapat menahan kombinasi gaya aksial dan momen lentur dapat digambarkan dalam bentuk suatu kurva interaksi antara kedua gaya tersebut. Kurva tersebut dinamakan sebagai diagram interaksi P-M kolom.

Setiap titik dalam kurva menunjukkan kombinasi antara kekuatan gaya nominal P_n dan kekuatan momen nominal M_n . Diagram interaksi dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah yang menunjukkan keruntuhan tekan dan daerah yang menunjukkan keruntuhan tarik yang dibatasi oleh titik *balanced* (titik B). Berikut

contoh ilustrasi pembuatan diagram P-M untuk penampang segiempat tipikal seperti pada Gambar 2.1 (Nawy, 1998: 343).



Gambar 2.1 Diagram interaksi kekuatan gaya aksial-momen (P - M) tipikal pada kolom

Langkah-langkah perhitungan diagram interaksi kolom:

1. Menentukan dimensi kolom rencana dan menghitung luas bruto kolom (A_g).
2. Menentukan mutu baja tulangan (f_y) dan beton (f'_c), serta ukuran dimensi penampang baja tulangan rencana (d_b).
3. Menentukan nilai β_1 , dengan mengacu pada SNI 2847-2013 Pasal 10.2.7.3 menyatakan bahwa:
Untuk f'_c antara 17 dan 28 MPa, β_1 harus diambil sebesar 0,85. Untuk f'_c diatas 28 MPa, β_1 harus direduksi sebesar 0,05 untuk setiap kelebihan kekuatan sebesar 7 MPa di atas 28 MPa, tetapi β_1 tidak boleh diambil kurang dari 0,65.
4. Menentukan nilai E_s , dengan mengacu pada SNI 2847-2013 Pasal 8.5.2 menyatakan bahwa:

Modulus elastisitas, E_s , untuk tulangan nonprategang diizinkan untuk diambil sebesar 200000 MPa.

5. Menentukan nilai regangan ultimit beton (ε_{cu}), SNI 2847-2013 mensyaratkan nilai ε_{cu} sebesar 0,003

6. Menghitung nilai ε_y dengan rumus:

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \dots\dots\dots(2.5)$$

7. Menghitung luas tulangan total beton dengan rumus:

$$A_{st} = n \cdot A_s \quad , \text{dengan } n = \text{jumlah tulangan} \dots\dots\dots(2.6)$$

8. Menentukan jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tarik longitudinal (d).

9. Menghitung nilai c_b dengan rumus:

$$c_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_y + \varepsilon_{cu}} d \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

10. Menghitung nilai a_b dengan rumus:

$$a_b = \beta_1 \cdot c_b \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

11. Menentukan jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tekan longitudinal (d').

12. Menentukan jarak dari pusat tulangan ke tengah penampang kolom (d'').

13. Menghitung nilai P_o dengan rumus:

$$P_o = 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

14. Menghitung nilai $P_{n(max)}$ dengan rumus:

$$P_{n(max)} = 0,8 \cdot P_o \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

15. Menghitung nilai M_o dengan rumus:

$$M_o = f_y \cdot A'_s \cdot \left(d - \frac{a_b}{2} \right) \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

16. Menghitung nilai M_n dengan rumus:

$$M_n = 0,8 \cdot M_o \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

17. Menghitung nilai ε_s' dengan rumus:

$$\varepsilon_s' = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{c_b} \right) \cdot (c_b - d') \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

18. Menghitung nilai ε_s dengan rumus:

$$\varepsilon_s = \left(\frac{\varepsilon_y}{d - c_b} \right) \cdot \left(\frac{h}{2} - c_b \right) \dots\dots\dots(2.14)$$

19. Menghitung nilai C_c dengan rumus:

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \dots\dots\dots(2.15)$$

20. Menghitung nilai C_s dengan rumus:

$$C_s = A_s' (f_y - 0,85 f'_c) \text{ dengan } A_s' = \text{luas setengah tulangan total} \dots\dots\dots(2.16)$$

21. Menghitung nilai T_s dengan rumus:

$$T_s = A_s' \cdot f_y \dots\dots\dots(2.17)$$

22. Menghitung nilai P_b dengan rumus:

$$P_b = C_c + C_s - T_s \dots\dots\dots(2.18)$$

23. Menghitung nilai M_b dengan rumus:

$$M_b = C_c \left(d - \frac{a_b}{2} - d'' \right) + C_s (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \dots\dots\dots(2.19)$$

24. Mengulangi langkah di atas dengan menggunakan diameter tulangan yang berbeda. Lalu membentuk diagram interaksi dengan nilai M_n sebagai sumbu x dan nilai P_n sebagai sumbu y.

25. Memplot hasil perhitungan gaya aksial dan momen kolom dari hasil analisis struktur ke diagram interaksi P-M untuk menentukan rasio tulangan kolom.

26. Menghitung luas tulangan yang diperlukan.

2.6 Balok

Balok merupakan elemen struktural yang utamanya memikul beban lateral. Beban-beban yang bekerja pada balok akan menghasilkan gaya geser dan momen lentur, serta timbulnya gaya-gaya dalam berupa tarik dan tekan. Berdasarkan SNI 2847-2013, dimensi balok dapat ditentukan dengan menggunakan Tabel 2.3 bila lendutan tidak diperhitungkan.

Tabel 2.3 Tebal Minimum Balok dan Pelat Satu Arah

komponen struktur	Tebal minimum, h			
	tertumpu sederhana	satu ujung menerus	kedua ujung menerus	kantilever
	komponen struktur tidak menumpu atau tidak dihubungkan dengan partisi atau konstruksi lainnya yang mungkin rusak oleh lendutan besar			
pelat masif satu arah	$\ell/20$	$\ell/24$	$\ell/28$	$\ell/10$
balok dan pelat rusuk satu arah	$\ell/16$	$\ell/18,5$	$\ell/21$	$\ell/8$
<p>CATATAN:</p> <p>Panjang bentang dalam mm.</p> <p>Nilai yang diberikan harus digunakan langsung untuk komponen struktur dengan beton normal dan tulangan tulangan Mutu 420 MPa. Untuk kondisi lain, nilai di atas harus dimodifikasikan sebagai berikut:</p> <p>(a) Untuk struktur beton ringan dengan berat jenis (equilibrium density), w_c, di antara 1440 sampai 1840 kg/m³, nilai tadi harus dikalikan dengan $(1,65 - 0,0003w_c)$ tetapi tidak kurang dari 1,09.</p> <p>(b) Untuk f_y selain 420 MPa, nilainya harus dikalikan dengan $(0,4 + f_y/700)$.</p>				

2.6.1 Faktor Reduksi Kekuatan

Kuat nominal yang diberikan oleh suatu komponen struktur, sambungan dengan komponen struktur lain, dan penampangnya, sehubungan dengan lentur, beban normal, geser dan torsi, harus diambil sebesar kekuatan nominal dihitung sesuai dengan persyaratan dan asumsi dari Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung SNI 2847:2013 Pasal 9.3, faktor reduksi kekuatan (ϕ) ditentukan sebagai berikut:

- a) Penampang terkendali tarik $(\phi = 0,9)$
- b) Penampang terkendali tekan
 - (1) Komponen struktur dengan tulangan spiral $(\phi = 0,75)$
 - (2) Komponen struktur dengan bertulang lainnya $(\phi = 0,65)$
- c) Geser dan torsi $(\phi = 0,75)$
- d) Tumpuan pada beton $(\phi = 0,65)$

2.6.2 Penulangan Lentur

Tulangan minimum pada komponen struktur lentur pada setiap penampang komponen struktur lentur di mana tulangan tarik diperlukan analisis, seperti yang disediakan dalam SNI 2847-2013 pasal 10.5.

$$A_{s,min} = \frac{0,25\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w \cdot d \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana:

$A_{s,min}$ = Luas tulangan longitudinal

f'_c = Kuat tekan beton

f_y = Tegangan leleh

b_w = Lebar badan balok

d = Tinggi efektif

Nilai A_s tidak boleh kurang dari $A_{s,min}$, dan tidak boleh lebih kecil dari:

$$A_{s,min} = 1,4b_w \cdot d/f_y \dots\dots\dots (2.21)$$

Batasan rasio penulangan:

$$\rho \leq 0,75\rho_b \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\rho = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \quad \rho \text{ tidak boleh melebihi } 0,025 \dots\dots\dots (2.23)$$

$$\rho_b = \frac{0,85\beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \dots\dots\dots (2.24)$$

Berdasarkan factor β_1 dapat dihitung dengan:

- Untuk kuat tekan beton, f'_c kurang atau sama dengan 28 MPa, maka $\beta_1 = 0,85$.
- Untuk $28 \text{ MPa} < f'_c < 56 \text{ MPa}$, harus direduksi sebesar 0,05 untuk setiap kelebihan 7 MPa namun nilai β_1 tidak boleh kurang dari 0,65.

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left(\frac{f'_c - 28 \text{ MPa}}{7 \text{ MPa}} \right) \dots\dots\dots (2.25)$$

ρ = Rasio penulangan actual

b_w = Lebar badan balok

d = Tinggi efektif balok

A_s = Luas tulangan actual

ρ_b = Rasio penulangan *balanced*

Penulangan pada balok bertujuan agar balok kuat menahan gaya dalam berupa tarik yang ditimbulkan oleh momen yang berkerja pada balok. Karena kemampuan beton menahan tarik yang rendah, balok yang kuat menahan momen akibat pembebanan tetap harus diberi tulangan minimum sesuai rasio tulangan minimum (ρ_{\min}). Rasio tulangan adalah persentase luasan tulangan yang terdapat pada suatu penampang beton.

Rasio tulangan yang dibutuhkan (ρ_{pertu}) dapat diperhitungan dengan persamaan berikut :

$$\rho_{pertu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) \dots\dots\dots (2.26)$$

dengan

$$m = \frac{f_y}{0,85 f'_c} \dots\dots\dots (2.27)$$

dan

$$R_n = \frac{M_u}{0,80 \cdot b \cdot d^2} \dots\dots\dots (2.28)$$

Rasio tulangan tidak boleh kurang dari rasio tulangan minimum (ρ_{\min}) dan tidak boleh lebih dari rasio tulangan maksimum (ρ_{\max}) yang besarnya dapat diperhitungakan sebagai berikut:

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \dots\dots\dots (2.29)$$

dan

$$\rho_{max} = 0,75 \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \dots\dots\dots (2.30)$$

Berdasarkan rasio tulangan maka dapat diperhitungakan luasan tulagan baja (A_s) yang diperlukan dengan persamaan berikut:

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \dots\dots\dots (2.31)$$

2.6.3 Penulangan Geser

Berdasarkan SNI 2847-2013, dalam merencanakan balok beton bertulang terhadap geser dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\phi V_n \geq V_u \dots\dots\dots (2.32)$$

dengan V_u = Gaya geser terfaktor

V_n = Gaya geser nominal

ϕ = Faktor reduksi geser = 0,75

dimana $V_u = V_c + V_s \dots\dots\dots (2.33)$

Kapasitas geser beton dan tulangan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \dots\dots\dots (2.34)$$

dan

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \dots\dots\dots (2.35)$$

dimana A_v adalah luasan tulangan geser yang berada pada jarak s

Untuk elemen struktur yang mengalami tekan aksial, kapasitas geser beton yaitu:

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

Untuk elemen struktur yang mengalami gaya tarik aksial:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{0,29N_u}{A_g} \right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \dots\dots\dots (2.37)$$

N_u / A_g dinyatakan dalam MPa.

Dimana:

V_c = Kekuatan geser nominal beton

V_s = Kekuatan geser nominal tulangan

λ = Faktor modifikasi

λ = 0,85 (untuk beton pasir ringan)

λ = 0,75 (untuk beton ringan semuanya)

λ = 1 (untuk beton normal)

s = Spasi antar tulangan geser

2.6.4 Penulangan Torsi

Tulangan yang dibutuhkan untuk memikul torsi harus ditambahkan pada tulangan yang diperlukan untuk memikul geser, lentur ataupun gaya aksial. Tulangan yang diperlukan untuk memikul torsi harus disediakan sehingga tahanan torsi dari penampang ϕT_n sama dengan atau lebih besar dari momen torsi terfaktor T_u yang dihitung dari beban-beban terfaktor yang bekerja. Maka $\phi T_n > T_u$.

Perencanaan terhadap torsi yang diatur dalam SNI 2847:2013 Pasal 11.5 diturunkan dengan menggunakan analogi rangka batang seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Setelah terbentuknya retak torsi, momen torsi ditahan oleh tulangan sengkang dan tulangan memanjang. Bagian beton di luar tulangan sengkang menjadi tidak efektif dan umumnya diabaikan dalam desain.

Berdasarkan SNI 2847:2013 Pasal 11.5.1, pengaruh torsi T_u dapat diabaikan apabila $T_u \leq \phi T_{cr}/4$, atau dapat dituliskan:

$$T_u \leq \phi 0,083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \dots\dots\dots(2.38)$$

Apabila nilai T_u melebihi nilai pada persamaan 2.21, maka semua T_u harus dipikul oleh tulangan sengkang tertutup dan tulangan memanjang. Momen torsi T_u dihitung pada penampang kritis yang terletak sejarak d dari muka tumpuan. Nilai ϕ diambil sebesar 0,75.

Untuk torsi kompatibilitas, momen torsi yang digunakan untuk desain dapat ditentukan berdasarkan nilai terkecil dari T_u dari beban terfaktor dan persamaan 2.16.

$$T_{u2} \leq \phi 0,33 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \dots\dots\dots(2.39)$$

Berdasarkan SNI 2847:2013 Pasal 11.5.3.1 memberikan batasan untuk ukuran penampang balok yang memikul torsi dan gaya geser:

a) Untuk penampang pejal:

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d} \right)^2 + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1,7 \cdot A_{oh}^2} \right)^2} \geq \phi \left[\left(\frac{V_u}{b_w d} \right) + 0,66 \sqrt{f'_c} \right] \dots\dots\dots(2.40)$$

b) Untuk penampang berlubang:

$$\left(\frac{V_u}{b_w d}\right) + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1,7 \cdot A_{oh}^2}\right) \geq \phi \left[\left(\frac{V_u}{b_w d}\right) + 0,66 \sqrt{f'_c} \right] \dots\dots\dots(2.41)$$

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

a) Tulangan sengkang tertutup, A_t , dihitung berdasarkan SNI 2847:2013 Pasal 11.5.3.6, yaitu:

$$T_n = \frac{2A_0 \cdot A_t \cdot f_{yt} \cdot \cot\theta}{s} \dots\dots\dots(2.42)$$

dengan:

$$T_n = T_u / \phi \quad \phi = 0,75$$

A_t = luas satu buah kaki tulangan sengkang

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

s = jarak antar tulangan sengkang

$$A_0 = 0,85 A_{oh}$$

$\theta = 45^\circ$ untuk balok non-prategang

Persamaan 2.19 dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_n}{2A_0 f_{yt} \cot\theta} \dots\dots\dots(2.43)$$

Jarak tulangan sengkang yang diperuntukan untuk memikul momen torsi tidak boleh melebihi $P_h/8$ atau 300 mm. untuk penampang berlubang yang memikul torsi, maka jarak tulangan sengkang diukur dari pusat ke tepi dinding dalam tidak boleh kurang dari $0,5 A_{oh} / P_h$.

b) Perhitungan tulang memanjang, A_l , yang dibutuhkan dihitung berdasarkan SNI 2847:2013 Pasal 11.5.3.7, yaitu:

$$A_l = \left(\frac{A_t}{s}\right) P_h \left(\frac{f_{yt}}{f_y}\right) \cot^2\theta \dots\dots\dots(2.44)$$

Luas tulangan yang dibutuhkan untuk memikul torsi harus dijumlahkan dengan kebutuhan tulangan untuk lentur atau gaya aksial yang bekerja bersama dengan momen torsi tersebut. Pembatasan lain untuk tulangan memanjang pemikul torsi disebutkan dalam SNI 2847:2013 Pasal 11.5.6.2 dan 11.5.6.3, yaitu:

- (1) Diameter batang tulangan memanjang haruslah minimal sama dengan 1/24 jarak sengkang namun tidak boleh kurang dari 10 mm.
- (2) Tulangan memanjang yang dibutuhkan untuk memikul torsi harus didistribusikan pada keliling sengkang tertutup dengan jarak maksimum 300 mm.
- (3) Pada setiap sudut sengkang tertutup harus ditempatkan minimal satu batang tulangan memanjang. Tulangan pada sudut-sudut ini cukup efektif untuk memikul torsi dan mencegah retak torsi.
- (4) Tulangan torsi harus dipasang melebihi jarak minimal ($b_t + d$) di luar daerah di mana tulangan torsi dibutuhkan secara teoritis, dengan b_t adalah lebar dari penampang melintang yang memiliki tulangan pemikul torsi.

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

- a) Tulangan sengkang tertutup yang dibutuhkan untuk kombinasi geser dan torsi diatur dalam SNI 2847:2013 Pasal 11.5.5.2:

$$A_{vt} = A_v + 2A_t \geq \frac{0,33b_w \cdot s}{f_{yt}} \quad (\text{untuk } f'_c \leq 30 \text{ MPa}) \dots \dots \dots (2.45)$$

$$\geq 0,062 \sqrt{f'_c} \left(\frac{b_w s}{f_{yt}} \right) \quad (\text{untuk } f'_c \geq 30 \text{ MPa}) \dots \dots \dots (2.46)$$

dengan

A_v = luas dua kaki tulangan sengkang tertutup untuk geser

A_t = luas satu kaki tulangan sengkang tertutup untuk torsi

s = jarak tulangan sengkang

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

Jarak tulangan sengkang, s , tidak boleh melebihi $p_h/8$ atau 300 mm

- b) Tulangan memanjang minimal yang diperlukan untuk torsi diatur dalam SNI 2847:2013 Pasal 11.5.5.3:

$$A_{l_{\min}} = \left(\frac{0,41 \sqrt{f'_c} A_{cp}}{f_y} \right) - \left(\frac{A_t}{s} \right) P_h \left(\frac{f_{yt}}{f_y} \right) \dots\dots\dots(2.47)$$

Nilai A_l/s tidak boleh diambil kurang dari $0,175 b_w/f_{yt}$.

2.7 Pelat Lantai

Pelat lantai merupakan elemen struktur berupa bidang lurus, datar atau tidak melengkung yang memikul beban vertikal (beban hidup dan beban mati) dalam dua arah yaitu arah memanjang dan arah melintang. Pelat lantai harus direncanakan kaku, rata, lurus dan waterpass (mempunyai ketinggian yang sama dan tidak miring). Dalam perencanaannya pelat lantai dibedakan menjadi 2 berdasarkan rasio sisi panjang dan sisi pendeknya yaitu pelat satu arah dan pelat dua arah.

2.7.1 Pelat Satu Arah

Pelat satu arah adalah pelat yang memiliki rasio sisi panjang dan sisi pendeknya lebih dari atau sama dengan dua ($L_y / L_x \geq 2,0$). Berdasarkan SNI 2847-2013, tebal minimum untuk pelat satu arah bila lendutan tidak diperhitungkan dapat diambil sama dengan balok yang dapat dilihat pada Tabel 2.3.

2.7.2 Pelat Dua Arah

Pelat dua arah adalah pelat yang memiliki rasio sisi panjang dan sisi pendeknya kurang dari dua ($L_y / L_x < 2,0$). Berdasarkan SNI 2847-2013, tebal pelat dengan balok yang menghubungkan tumpuan pada semua sisinya harus memenuhi ketentuan sebagai berikut:

- Untuk $\alpha_{fm} \leq 0,2$ ketebalan minimum harus memenuhi persyaratan pada pasal 9.5.3.2
- Untuk $0,2 < \alpha_{fm} < 2,0$ ketebalan minimum harus memenuhi persamaan :

$$h_{\min} = \frac{l_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 5\beta(\alpha_m - 0,2)} \quad (\text{tidak kurang dari } 125 \text{ mm}) \dots\dots\dots(2.48)$$

c. Untuk $\alpha_{fm} > 2,0$ ketebalan minimum harus memenuhi persamaan :

$$h_{min} = \frac{l_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 9\beta} \quad \text{(tidak kurang dari 90 mm)} \dots\dots\dots (2.49)$$

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

Dimana :

h = Tebal pelat (mm).

l_n = Bentang bersih dalam arah memanjang (mm).

f_y = Tegangan leleh baja (MPa).

β = Rasio bentang bersih arah memanjang terhadap arah melintang dari pelat dua arah (l_{ny}/l_{nx}).

α_{fm} = Nilai rata-rata α_f

$$\alpha_f = \frac{E_{cb}I_b}{E_{cs}I_s} \dots\dots\dots(2.50)$$

Dimana :

E = Modulus elastisitas beton (MPa)

I = Momen inersia (mm⁴)

2.7.3 Desain Tulangan Pelat Berdasarkan Momen Hasil Analisis Elemen Hingga

Hasil analisis pelat dengan program analisis struktur umumnya berupa m_x , m_y , m_{xy} yang merupakan momen per satuan lebar. Hasil momen ini harus dimodifikasi terlebih dahulu sebelum digunakan untuk menentukan penulangan pada pelat. Tulangan pada bagian bawah pelat atau lapangan didesain untuk mempunyai kapasitas menahan momen positif sebesar:

$$mr_{rx} = m_x + |m_{xy}| \geq 0 \dots\dots\dots(2.51)$$

$$mr_{ry} = m_y + |m_{xy}| \geq 0 \dots\dots\dots(2.52)$$

Sedangkan untuk bagian atas pelat atau tumpuan didesain untuk mempunyai kapasitas momen negatif sebesar:

$$mr_{rx} = m_x - |m_{xy}| \leq 0 \quad \dots\dots\dots(2.53)$$

$$mr_{ry} = m_y - |m_{xy}| \leq 0 \quad \dots\dots\dots(2.54)$$

Ada empat asumsi dalam pemodelan pelat lantai yaitu:

Shell : Pelat diasumsikan menerima gaya vertikal akibat beban mati dan hidup, juga menerima gaya horizontal atau lateral akibat gempa.

Membrane : Pelat diasumsikan menerima gaya horizontal saja.

Plate : Pelat diasumsikan menerima gaya vertikal saja, akibat beban mati dan beban hidup.

Thick Plate : Pelat diasumsikan mempunyai ketebalan lebih, biasanya digunakan untuk jalan beton, tempat parkir dan pelat yang berfungsi sebagai fondasi.

2.8 Syarat Selimut Beton

SNI 2847-2013 mensyaratkan tebal minimum selimut beton untuk beton cor setempat (non-prategang) adalah sebagai berikut:

- | | |
|---|------|
| a. Beton yang dicor di atas dan selalu berhubungan dengan tanah | = 75 |
| b. Beton yang berhubungan dengan tanah atau cuaca: | |
| Tulangan D-19 hingga D-57 | = 50 |
| Tulangan D-16, kawat M-16 ulir atau polos, dan yang lebih kecil | = 40 |
| c. Beton yang tidak berhubungan dengan cuaca atau tanah: | |
| Slab, dinding, balok usuk: | |
| Tulangan D-44 dan D-57 | = 40 |
| Tulangan D-36 dan yang lebih kecil | = 20 |
| Balok, kolom: | |
| Tulangan utama, pengikat, sengkang, spiral | = 40 |
| Komponen struktur cangkang, pelat lipat: | |
| Tulangan D-19 dan yang lebih besar | = 20 |
| Tulangan D-16, kawat M-16 ulir atau polos, dan yang lebih kecil | = 13 |

2.9 Perencanaan Struktur Bawah (*Sub Structure*)

Sub structure adalah bagian yang mendukung struktur yang bertindak sebagai dukungan, kerangka dasar atau landasan yang mendukung struktur yang berdiri di atasnya. Suatu bangunan tidak dapat berdiri sendiri dan membutuhkan struktur pendukung berupa fondasi.

Fondasi adalah bagian bangunan yang berfungsi mendukung seluruh beban dari bangunan yang disalurkan ke tanah dibawahnya. Kekuatan fondasi sangat bergantung dari tanah yang mendukung. Perancangan fondasi dipengaruhi oleh :

- Berat bangunan yang harus didukung
- Jenis tanah dan daya dukungnya
- Kedalaman muka air tanah
- Kedalaman tanah keras
- *Settlement* pada tanah
- Lokasi dan situasi proyek pembangunan

2.10 Fondasi

Secara umum fondasi tiang adalah elemen struktur yang berfungsi meneruskan beban kepada tanah, baik beban arah vertikal maupun horizontal. Fondasi tiang memperoleh daya dukung dari tahanan friksi selimut tiang dan tahanan ujung pada ujung tiang.

2.10.1 Daya Dukung Fondasi Tiang

Penentuan daya dukung fondasi tiang menggunakan data sondir menurut *Meyerhoff* dapat diperhitungkan sebagai berikut:

$$Q_u = \frac{Q_c \cdot A}{3} + \frac{TF \cdot K}{5} \dots\dots\dots (2.55)$$

- dengan
- Q_u = Daya dukung tanah
 - Q_c = Nilai *conus* hasil data sondir
 - A = Luas penampang tiang
 - K = Keliling penampang tiang
 - TF = Nilai *Total Friction* hasil data sondir

Sedangkan untuk daya dukung fondasi tiang menggunakan data SPT dengan metode *Meyerhoff* adalah sebagai berikut :

$$Q_u = 40N_b \cdot A_p + 0,2N \cdot A_s \dots\dots\dots (2.56)$$

dengan N_b = Nilai N-SPT pada elevasi dasar tiang pancang
 A_p = Luas penampang tiang
 N = Nilai N-SPT rata-rata
 A_s = Luas selimut tiang

2.10.2 Daya Dukung Kelompok Tiang

Daya dukung kelompok tiang tidak cukup hanya meninjau daya dukung satu tiang yang berdiri sendiri, sebab daya dukung kelompok tiang belum tentu sama dengan daya dukung satu tiang dikalikan jumlah tiang. Penentuan daya dukung kelompok tiang dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu untuk kelompok tiang dengan tiang yang terdiri dari tahanan ujung dan kelompok tiang yang terdiri dari tahanan ujung dan tahanan friksi.

Untuk kelompok tiang yang terdiri dari tahanan ujung, kemampuan-kemampuan tiang akan sama dengan kemampuan tiang tunggal dikalikan jumlah tiang. Sehingga dapat dirumuskan :

$$Q_{ug} = n_p \times Q_u \dots\dots\dots (2.57)$$

dengan Q_{ug} = Daya dukung kelompok tiang
 n_p = Jumlah tiang pada kelompok tiang
 Q_u = Daya dukung tiang tunggal

Sedangkan untuk kelompok tiang yang terdiri dari tahanan ujung dan tahanan friksi, kelompok tiang harus ditinjau secara keseluruhan. Efisiensi tiang tunggal dalam kelompok tiang dapat dihitung dengan rumus :

$$E_g = 1 - \frac{\theta}{90} \left\{ \frac{(n-1)m + (m-1)n}{mn} \right\} \dots\dots\dots (2.58)$$

dengan E_g = Efisiensi tiang tunggal
 m = Jumlah baris tiang
 n = Jumlah tiang dalam satu baris
 θ = Arc tan (D/S) dalam derajat

D = panjang sisi tiang

S = Jarak antara tiang dari as ke as

Maka dayang dukung kelompok tiang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Q_{ug} = E_g \cdot n_p \cdot Q_u \dots\dots\dots (2.59)$$

Peninjauan kelompok tiang juga dapat dilakukan dengan metode *Feld*, yaitu dengan menganggap kelompok tiang sebagai blok tiang. Perhitungan daya dukung blok tiang dirumuskan sebagai berikut:

$$Q_u = L_g \cdot B_g \cdot q_p + \sum [2(L_g + B_g) \Delta H \cdot q_s] \dots\dots\dots (2.60)$$

dengan Q_u = Daya dukung blok tiang

L_g = Panjang blok tiang

B_g = Lebar blok tiang

q_p = Tahanan ujung tiang

q_s = Tahanan selimut tiang

ΔH = Panjang segmen tiang

2.11 Pembebanan

Berdasarkan SNI 1727-2013, semua komponen struktur dan fondasi harus direncanakan terhadap berbagai beban yang bekerja. Beban-beban yang bekerja pada struktur terdiri dari beban mati, beban hidup, beban angin, beban gempa, beban air hujan, dan sebagainya.

2.11.1 Beban Mati

Beban mati adalah berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, *finishing*, klasing gedung dan komponen arsitektural dan struktural lainnya serta peralatan terpasang lain termasuk berat keran.

Untuk beton bertulang perhitungan beban dapat dilakukan dengan mengalikan volume beton bertulangan yang digunakan pada balok, kolom, pelat dan sebagainya dengan berat jenis beton bertulang yaitu 2400 kg/m^3 .

2.11.2 Beban Hidup

Beban hidup adalah beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur gedung lainnya yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir dan beban mati.

Beban hidup yang digunakan dalam perencanaan gedung dan struktur lain haruslah beban maksimum yang diharapkan terjadi akibat penghunian dan penggunaan bangunan gedung. Dimana beban merata minimum dan beban terpusat minimum diatur pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Beban Hidup Merata Minimum dan Beban Hidup Terpusat Minimum-Bersambung

Hunian atau penggunaan	Merata psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)		
Sistem lantai akses		
Ruang kantor	50 (2,4)	2 000 (8,9)
Ruang komputer	100 (4,79)	2 000 (8,9)
Gudang persenjataan dan ruang latihan	150 (7,18) ^a	
Ruang pertemuan		
Kursi tetap (terikat di lantai)	100 (4,79) ^a	
Lobi	100 (4,79) ^a	
Kursi dapat dipindahkan	100 (4,79) ^a	
Panggung pertemuan	100 (4,79) ^a	
Lantai podium	150 (7,18) ^a	
Balkon dan dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani. Tidak perlu melebihi 100 psf (4,79 kN/m ²)	
Jalur untuk akses pemeliharaan	40 (1,92)	300 (1,33)

Koridor Lantai pertama Lantai lain	100 (4,79) sama seperti pelayanan hunian kecuali disebutkan lain	
Ruang makan dan restoran	100 (4,79) ^a	
Hunian (lihat rumah tinggal)		
Ruang mesin elevator (pada daerah 2 in.x 2 in. [50 mmx50 mm])		300 (1,33)
Konstruksi pelat lantai <i>finishing</i> ringan (pada area 1 in.x 1 in. [25 mm x 25 mm])		200 (0,89)
Jalur penyelamatan terhadap kebakaran Hunian satu keluarga saja	100 (4,79) 40 (1,92)	
Tangga permanen	Lihat pasal 4.5	
Garasi/Parkir Mobil penumpang saja Truk dan bus	40 (1,92) ^{a,b,c}	

Hunian atau penggunaan	Merata psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Susunan tangga, rel pengamandan batang pegangan	Lihat pasal 4.5	
Helipad	60 (2,87) ^{d,e} tidak boleh direduksi	^{e,f,g}
Rumah sakit: Ruang operasi, laboratorium Ruang pasien Koridor diatas lantai pertama	60 (2,87) 40 (1,92) 80 (3,83)	1 000 (4,45) 1 000 (4,45) 1 000 (4,45)
Hotel (lihat rumah tinggal)		
Perpustakaan Ruang baca Ruang penyimpanan Koridor di atas lantai pertama	60 (2,87) 150 (7,18) ^{a, h} 80 (3,83)	1 000 (4,45) 1 000 (4,45) 1 000 (4,45)
Pabrik Ringan Berat	125 (6,00) ^a 250 (11,97) ^a	2 000 (8,90) 3 000 (13,40)
Gedung perkantoran: Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian Lobi dan koridor lantai pertama Kantor Koridor di atas lantai pertama	100 (4,79) 50 (2,40) 80 (3,83)	2 000 (8,90) 2 000 (8,90) 2 000 (8,90)
Lembaga hukum Blok sel Koridor	40 (1,92) 100 (4,79)	
Tempat rekreasi Tempat bowling, Kolam renang, dan penggunaan yang sama Bangsal dansa dan Ruang dansa Gimnasium Tempat menonton baik terbuka atau tertutup Stadium dan tribun/arena dengan tempat duduk tetap (terikat pada lantai)	75 (3,59) ^a 100 (4,79) ^a 100 (4,79) ^a 100 (4,79) ^{a,k} 60 (2,87) ^{a,k}	

Rumah tinggal		
Hunian (satu keluarga dan dua keluarga)		
Loteng yang tidak dapat didiami tanpa gudang	10 (0,48) ^f	
Loteng yang tidak dapat didiami dengan gudang	20 (0,96) ^m	
Loteng yang dapat didiami dan ruang tidur	30 (1,44)	
Semua ruang kecuali tangga dan balkon	40 (1,92)	
Semua hunian rumah tinggal lainnya		
Ruang pribadi dan koridor yang melayani mereka	40 (1,92)	
Ruang publik ^a dan koridor yang melayani mereka	100 (4,79)	

Hunian atau penggunaan	Merata psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Atap		
Atap datar, berbubung, dan lengkung	20 (0,96) ⁿ	
Atap digunakan untuk taman atap	100 (4,79)	
Atap yang digunakan untuk tujuan lain	Sama seperti hunian dilayani ^a	i
Atap yang digunakan untuk hunian lainnya		
Awning dan kanopi		
Konstruksi pabrik yang didukung oleh struktur rangka kaku ringan	5 (0,24) tidak boleh direduksi	
Rangka tumpu layar penutup	5 (0,24) tidak boleh direduksi dan berdasarkan luas tributari dari atap yang ditumpu oleh rangka	200 (0,89)
Semua konstruksi lainnya	20 (0,96)	2 000 (8,9)
Komponen struktur atap utama, yang terhubung langsung dengan pekerjaan lantai		
Titik panel tunggal dari batang bawah rangka atap atau setiap titik sepanjang komponen struktur utama yang mendukung atap diatas pabrik, gudang, dan perbaikan garasi		300 (1,33)
Semua komponen struktur atap utama lainnya		300 (1,33)
Semua permukaan atap dengan beban pekerja pemeliharaan		

Sekolah		
Ruang kelas	40 (1,92)	1 000 (4,5)
Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	1 000 (4,5)
Koridor lantai pertama	100 (4,79)	1 000 (4,5)
Bak-bak/ <i>scuttles</i> , rusuk untuk atap kaca dan langit-langit yang dapat diakses		200 (0,89)
Pinggir jalan untuk pejalan kaki, jalan lintas kendaraan, dan lahan/jalan untuk truk-truk	250 (11,97) ^{a,p}	8 000 (35,6) ^q
Tangga dan jalan keluar	100 (4,79)	300 ^r
Rumah tinggal untuk satu dan dua keluarga saja	40 (1,92)	300 ^r
Gudang diatas langit-langit	20 (0,96)	
Gudang penyimpan barang sebelum disalurkan ke pengecer (jika diantisipasi menjadi gudang penyimpanan, harus dirancang untuk beban lebih berat)		
Ringan	125 (6,00) ^a	
Berat	250 (11,97) ^a	

Hunian atau penggunaan	Merata psf (kN/m ²)	Terpusat lb (kN)
Toko		
Eceran		1 000 (4,45)
Lantai pertama	100 (4,79)	1 000 (4,45)
Lantai di atasnya	75 (3,59)	1 000
Grosir, di semua lantai	125 (6,00) ^a	(4,45)
Penghalang kendaraan	Lihat Pasal 4.5	
Susuran jalan dan panggung yang ditinggikan (selain jalan keluar)	60 (2,87)	
Pekarangan dan teras, jalur pejalan kaki	100 (4,79) ^a	

2.11.3 Beban Gempa

Beban gempa adalah beban horizontal yang diakibatkan oleh gelombang gempa. Ketentuan mengenai beban gempa berbeda-beda tergantung pada probabilitas terjadinya gempa pada suatu daerah. Pada daerah dengan frekuensi gempa yang rendah dan sangat rendah, beban gempa harus diperhitungkan sebagai beban gempa minimum. Besarnya beban gempa rencana tergantung pada jenis tanah dan kegunaan gedung. Beban gempa diatur lebih lanjut dalam SNI 1726-2012.

2.11.4 Kombinasi Pembebanan

Berbagai kombinasi beban dasar yang harus diperhitungkan adalah sebagai berikut :

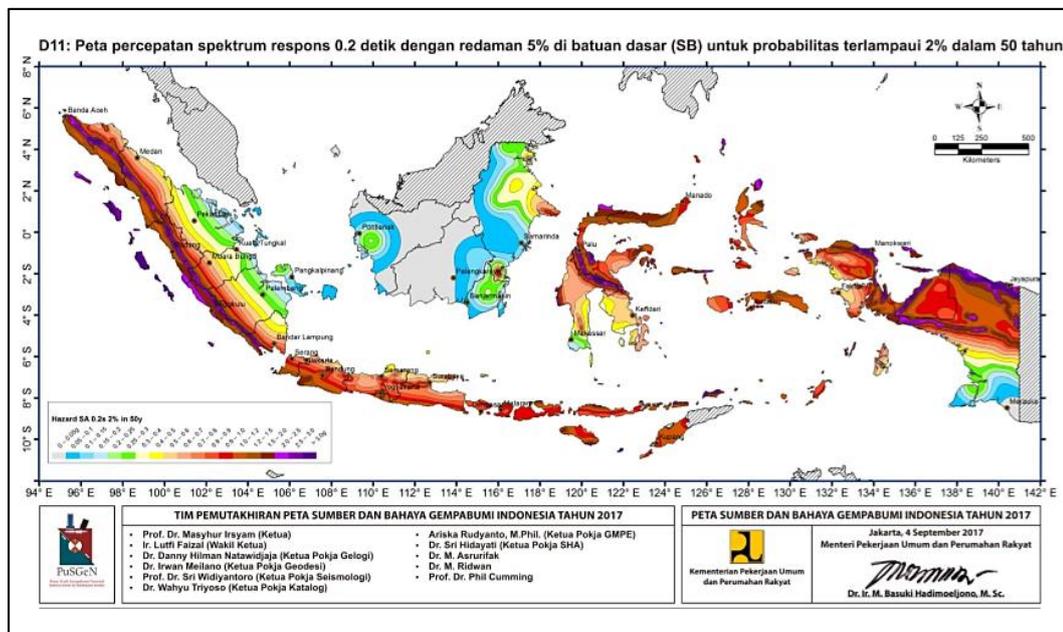
1. 1,4D
2. 1,2D + 1,6L + 0,5 (L_f atau S atau R)
3. 1,2D + 1,6 (L_f atau S atau R) + (L atau 0,5W)
4. 1,2D + 1,0W + L + 0,5 (L_f atau S atau R)
5. 1,2D + 1,0E + L + 0,2S
6. 0,9D + 1,0W
7. 0,9D + 1,0E

Dimana :

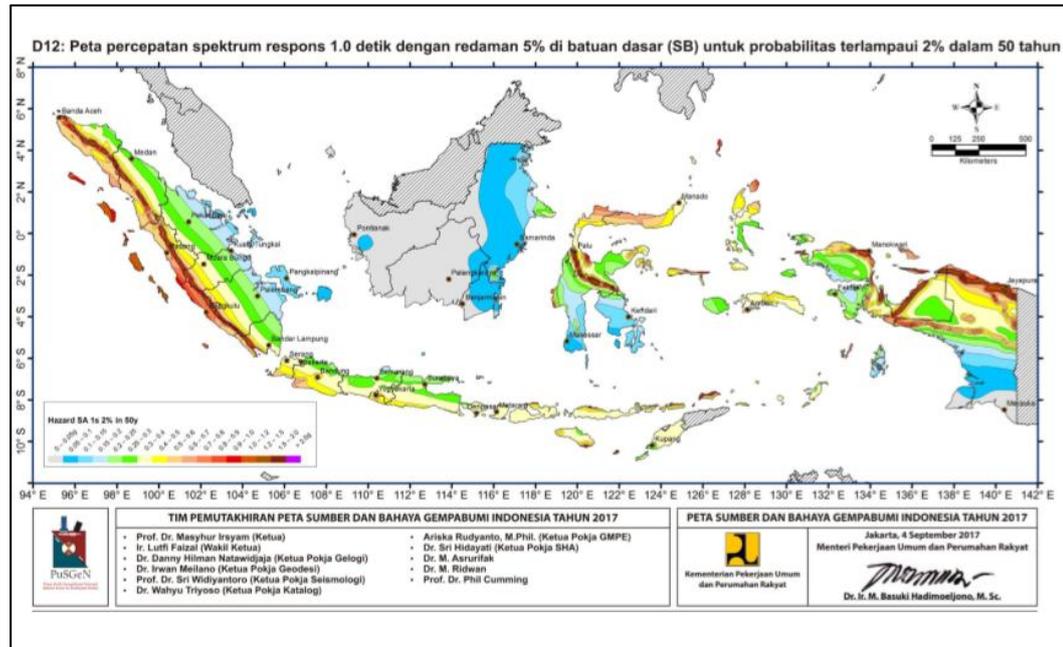
D = Beban mati	S = Beban salju
L = Beban hidup	W = Beban angin
L _f = Beban hidup atap	E = Beban gempa
R = Beban hujan	

2.12 Perencanaan Gempa

Gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlewat besarannya selama umur struktur bangunan 50 tahun yang sebesar 2 persen. Dalam perencanaan struktur terhadap gempa, yang terlebih dahulu harus dilakukan adalah menentukan percepatan spektrum dimana percepatan spektrum ditentukan berdasarkan Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 yaitu peta zonasi gempa yang terdapat pada SNI 1726-2012. Dari peta zonasi tersebut akan diperoleh nilai respons percepatan perioda pendek (S_s) dan respon percepatan perioda 1 detik (S_1). Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat telah mengeluarkan peta gempa 2017 sebagai berikut:



Gambar 2.2 Gempa respons percepatan perioda pendek, S_s



Gambar 2.3 Gempa respon percepatan perioda 1 detik, S_1

2.12.1 Faktor Keutamaan dan Kategori Risiko Struktur Bangunan

Berdasarkan SNI 1726-2012, kategori risiko gempa dikelompokkan berdasarkan jenis pemanfaatan bangunan yang dibagi dalam 4 kategori risiko seperti pada Tabel 2.5. Faktor keutamaan adalah faktor pembesaran gaya gempa rencana berdasarkan pada kategori risiko bangunan. Besar faktor keutamaan untuk masing-masing kategori risiko seperti pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non-Gedung-Bersambung

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: <ul style="list-style-type: none"> - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I

<p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik 	II
<p>Gedung dan non gedung 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 non gedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	III
<p>Gedung dan non gedung yang ditunjukkan 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 sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, 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 non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV

Tabel 2.6 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,00
III	1,25
IV	1,50

2.12.2 Klasifikasi Kelas Situs dan Koefisien Situs F_a dan F_v

Penentuan kelas situs harus dilakukan untuk menentukan faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. Dalam menentukan kelas situs diperlukan penelitian kondisi tanah sampai pada kedalaman 30 m hingga diperoleh data-data tanah berupa kecepatan gelombang geser, tahanan penetrasi standar, atau kuat geser niralir. Selanjutnya pembagian kelas situs berdasarkan SNI 1726-2012 dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Klasifikasi Situs

Kelas situs	\bar{v}_z (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	15sampai 50	50 sampai100
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		
SF (tanah khusus,yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 6.10.1)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan Indeks Plasitisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{s}_u < 50$ kPa		

CATATAN: N/A = tidak dapat dipakai

Setelah menentukan kelas situs tanah dimana konstruksi akan direncanakan maka selanjutnya diperoleh nilai koefisien situs F_a dan F_v dengan menggunakan nilai pada Tabel 2.8 dan Tabel 2.9 (SNI 1726-2012). Untuk nilai yang berada diantara nilai tertera maka dapat dilakukan interpolasi.

Tabel 2.8 Koefisien Situs, F_a

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa (MCE _R) terpetakan pada periode pendek, T=0,2 detik, S_z				
	$S_z \leq 0,25$	$S_z = 0,5$	$S_z = 0,75$	$S_z = 1,0$	$S_z \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	SS ^b				

CATATAN:

- (a) Untuk nilai-nilai antara S_z dapat dilakukan interpolasi linier
 (b) SS= Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 6.10.1

Tabel 2.9 Koefisien Situs, F_v

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa MCE _R terpetakan pada periode 1 detik, S_1				
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF	SS ^b				

CATATAN :

- (a) Untuk nilai-nilai antara S_1 dapat dilakukan interpolasi linier
 (b) SS= Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 6.10.1

Dari Tabel 2.8 dan Tabel 2.9 diperoleh nilai koefisien situs F_a dan F_v sehingga nilai S_{DS} dan S_{D1} dapat diperhitungkan dengan rumus:

$$S_{DS} = \frac{2}{3}(S_z \cdot F_a) \dots\dots\dots (2.61.a)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3}(S_1 \cdot F_v) \dots\dots\dots (2.61.b)$$

2.12.3 Kategori Desain Seismik

Setelah diperoleh hasil S_{DS} dan S_{DI} maka kategori desain seismik dapat ditentukan. Kategori desain seismik adalah ketentuan yang digunakan dalam merencanakan bangunan sesuai dengan percepatan respons. Kategori desain seismik dapat ditentukan berdasarkan pada Tabel 2.10 dan Tabel 2.11 (SNI 1726-2012).

Tabel 2.10 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek

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 2.11 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik

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

2.12.4 Analisis Spektrum Respons Desain

Berdasarkan SNI 1726-2012, bila spektrum respons desain diperlukan dan prosedur gerak tanah dari spesifik situs tidak digunakan maka kurva spektrum respons desain harus dikembangkan dengan mengikuti ketentuan berikut :

1. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain (S_a) harus diambil dari persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \dots\dots\dots (2.62)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil atau sama dengan T_S , spektrum respons percepatan desain (S_a) sama dengan nilai S_{DS} .

3. Untuk periode lebih besar dari T_s , spektrum respons percepatan desain (S_a) diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \dots\dots\dots(2.63)$$

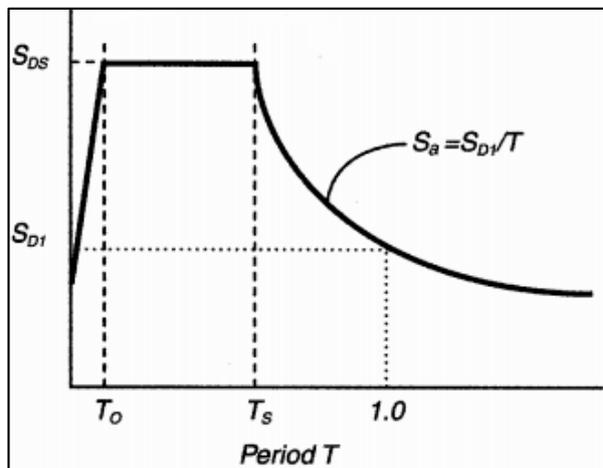
dengan, S_{DS} = Parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek.

S_{D1} = Parameter respons spektral percepatan desain periode 1 detik.

T = Periode getar fundamental

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$



Gambar 2.4 Spektrum respons desain

2.12.5 Periode Fundamental Struktur

Periode fundamental struktur (T), dalam arah yang ditinjau harus diperoleh dari properti struktur dan karakteristik deformasi elemen penahan gaya gempa. Periode fundamental struktur dapat diperoleh dengan program analisa struktur dan hasilnya tidak boleh melebihi batasan atas pada periode yang dihitung (C_u dan T_a).

Nilai C_u dapat dilihat pada Tabel 2.12 dan untuk perioda fundamental perkiraan (T_a) dapat dihitung dengan persamaan:

$$T_a = C_t h_n^x \dots \dots \dots (2.64)$$

dengan, C_t = koefisien pada Tabel 2.10

x = koefisien pada Tabel 2.10

h_n = ketinggian total bangunan

Tabel 2.12 Koefisien untuk Batas Atas Perioda yang Dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	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

Tabel 2.13 Nilai Parameter Perioda Pendekatan C_t dan x

Tipe struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka pemikul 100 persen gaya gempa yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya gempa:		
Rangka baja pemikul momen	0,0724 ^a	0,8
Rangka beton pemikul momen	0,0466 ^a	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731 ^a	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731 ^a	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488 ^a	0,75

2.12.6 Sistem Penahan Gaya Gempa

Sistem penahan gaya gempa yang akan digunakan tergantung pada kategori desain seismik yang diperoleh dari perhitungan sebelumnya. Untuk mendapatkan sistem penahan gaya gempa yang sesuai dan efisien, sistem penahan gempa dan parameter-parameternya dapat dilihat pada Tabel 2.14 berikut ini.

Tabel 2.14 Faktor R^a , C_d^b , dan Ω_0^g untuk Sistem Penahan Gaya Gempa-Bersambung

Sistem penahan-gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat-lebih sistem, Ω_0^g	Faktor pembesaran defleksi, C_d^b	Batasan sistem struktur dan batasan tinggistruktur, h_n (m) ^c				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^d	E ^d	F ^e
A. Sistem dinding penumpu	7.1.1	7.1.2	7.1.3	7.1.4	7.1.5	7.1.6	7.1.7	7.1.8
1. Dinding geser beton bertulang khusus	5	2½	5	TB	TB	48	48	30
2. Dinding geser beton bertulang biasa	4	2½	4	TB	TB	TI	TI	TI
3. Dinding geser beton polos didetail	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
4. Dinding geser beton polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
5. Dinding geser pracetak menengah	4	2½	4	TB	TB	12 ^k	12 ^k	12 ^k
6. Dinding geser pracetak biasa	3	2½	3	TB	TI	TI	TI	TI
7. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5	2½	3½	TB	TB	48	48	30
8. Dinding geser batu bata bertulang menengah	3½	2½	2¼	TB	TB	TI	TI	TI
9. Dinding geser batu bata bertulang biasa	2	2½	1¼	TB	48	TI	TI	TI
10. Dinding geser batu bata polos didetail	2	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
11. Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
12. Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
13. Dinding geser batu bata ringan (AAC) bertulang biasa	2	2½	2	TB	10	TI	TI	TI
14. Dinding geser batu bata ringan (AAC) polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
15. Dinding rangka ringan (kayu) dilapisi dengan panel struktur kayu yang ditujukan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	6½	3	4	TB	TB	20	20	20
16. Dinding rangka ringan (baja canai dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang ditujukan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	6½	3	4	TB	TB	20	20	20
17. Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2	2½	2	TB	TB	10	TI	TI
18. Sistem dinding rangka ringan (baja canai dingin) menggunakan bresing strip datar	4	2	3½	TB	TB	20	20	20
B. Sistem rangka bangunan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2	4	TB	TB	48	48	30
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	6	2	5	TB	TB	48	48	30
3. Rangka baja dengan bresing konsentris biasa	3¼	2	3¼	TB	TB	10 ^f	10 ^f	TI ^f
4. Dinding geser beton bertulang khusus	6	2½	5	TB	TB	48	48	30
5. Dinding geser beton bertulang biasa	5	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
6. Dinding geser beton polos detail	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
7. Dinding geser beton polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Dinding geser pracetak menengah	5	2½	4½	TB	TB	12 ^k	12 ^k	12 ^k

9. Dinding geser pracetak biasa	4	2½	4	TB	TI	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2	4	TB	TB	48	48	30
11. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	5	2	4½	TB	TB	48	48	30
12. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing biasa	3	2	3	TB	TB	TI	TI	TI
13. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	6½	2½	5½	TB	TB	48	48	30
14. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	6	2½	5	TB	TB	48	48	30
15. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	5	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
16. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5½	2½	4	TB	TB	48	48	30
17. Dinding geser batu bata bertulang menengah	4	2½	4	TB	TB	TI	TI	TI
18. Dinding geser batu bata bertulang biasa	2	2½	2	TB	48	TI	TI	TI
19. Dinding geser batu bata polos didetail	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
20. Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
21. Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
22. Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
23. Dinding rangka ringan (baja canai dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22

24. Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2½	2½	2½	TB	TB	10	TB	TB
25. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	48	48	30
26. Dinding geser pelat baja khusus	7	2	6	TB	TB	48	48	30
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ^{h'}	TI ^{h'}	TI ^{h'}
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI ^{h'}	TI ^{h'}	TI ^{h'}
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan	3½	3°	3½	10	10	10	10	10

D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 persen gaya gempa yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
3. Dinding geser beton bertulang khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
4. Dinding geser beton bertulang biasa	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	6	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
7. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	7½	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
8. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	7	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
9. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
10. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5½	3	5	TB	TB	TB	TB	TB
11. Dinding geser batu bata bertulang menengah	4	3	3½	TB	TB	TI	TI	TI
12. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
13. Dinding geser pelat baja khusus	8	2½	6½	TB	TB	TB	TB	TB

E. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen menengah mampu menahan paling sedikit 25 persen gaya gempayang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus ⁷	6	2½	5	TB	TB	10	TI	TI ^{h,k}
2. Dinding geser beton bertulang khusus	6½	2½	5	TB	TB	48	30	30
3. Dinding geser batu bata bertulang biasa	3	3	2½	TB	48	TI	TI	TI
4. Dinding geser batu bata bertulang menengah	3½	3	3	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	5½	2½	4½	TB	TB	48	30	TI
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing biasa	3½	2½	3	TB	TB	TI	TI	TI
7. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
8. Dinding geser beton bertulang biasa	5½	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
F. 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
G. Sistem kolom kantilever didetail untuk memenuhi persyaratan untuk :								
1. Sistem kolom baja dengan kantilever khusus	2½	1¼	2½	10	10	10	10	10
2. Sistem kolom baja dengan kantilever biasa	1¼	1¼	1¼	10	10	TI	TI ^{h,j}	TI ^{h,j}
3. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	2½	1¼	2½	10	10	10	10	10
4. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	1½	1¼	1½	10	10	TI	TI	TI
5. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	1	1¼	1	10	TI	TI	TI	TI
6. Rangka kayu	1½	1½	1½	10	10	10	TI	TI
H. Sistem baja tidak didetail secara khusus untuk ketahanan seismik, tidak termasuk sistem kolom kantilever	3	3	3	TB	TB	TI	TI	TI

2.12.7 Evaluasi Ketidakberaturan Konfigurasi Struktur

Setelah ditentukan kategori risiko konstruksi yang akan diperhitungkan, perlu diketahui juga bentuk dari konstruksi tersebut untuk mengetahui metode analisis gaya gempa yang cocok. Berikut ini adalah tipe-tipe dan penjelasan ketidakberaturan baik secara horizontal maupun vertikal yang terangkum dalam Tabel 2.15 dan Tabel 2.16 (SNI 1726-2012).

Tabel 2.15 Ketidakberaturan Horizontal

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a.	Ketidakberaturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar lantai tingkat maksimum, torsi yang dihitung termasuk tak terduga, di sebuah ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,2 kali simpangan antar lantai 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.	7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel13 12.2.2	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 lantai tingkat maksimum, torsi yang dihitung termasuk tak terduga, di sebuah ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,4 kali simpangan antar lantai 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.	7.3.3.1 7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel13 12.2.2	E dan F D B, C, dan D C dan D C dan D D B, C, dan D
2.	Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua proyeksi denah struktur dari sudut dalam lebih besar dari 15 persen dimensi denah struktur dalam arah yang ditentukan.	7.3.3.4 Tabel13	D, E, dan F D, E, dan F
3.	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat diafragma dengan diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 persen daerah diafragma bruto yang melingkupinya, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50 persen dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.	7.3.3.4 Tabel13	D, E, dan F D, E, dan F
4.	Ketidakberaturan pergeseran melintang terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran melintang terhadap bidang elemen vertikal.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel13 12.2.2	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 didefinisikan ada jika elemen penahan gaya lateral vertikal tidak paralel atau simetris terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem penahan gaya gempa.	7.5.3 7.7.3 Tabel13 12.2.2	C, D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F

Tabel 2.16 Ketidakberaturan Vertikal

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat di mana kekakuan lateralnya kurang dari 70 persen kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 persen kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel13	D, E, dan F
1b.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat di mana kekakuan lateralnya kurang dari 60 persen kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 persen kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	7.3.3.1 Tabel13	E dan F D, E, dan F
2.	Ketidakberaturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif semua tingkat lebih dari 150 persen massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel13	D, E, dan F
3.	Ketidakberaturan Geometri Vertikal didefinisikan ada jika dimensi horisontal sistem penahan gaya gempa di semua tingkat lebih dari 130 persen dimensi horisontal sistem penahan gaya gempa tingkat di dekatnya.	Tabel13	D, E, dan F
4.	Diskontinuitas Arah Bidang dalam Ketidakberaturan Elemen Penahan Gaya Lateral Vertikal didefinisikan ada jika pegeseran arah bidang elemen penahan gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen penahan di tingkat di bawahnya.	7.3.3.3 7.3.3.4 Tabel 13	B, C, D, E, dan F D, E, dan F D, E, dan F
5a.	Diskontinuitas dalam Ketidakberaturan Kuat Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kuat lateral tingkat kurang dari 80 persen kuat lateral tingkat di atasnya. Kuat lateral tingkat adalah kuat lateral total semua elemen penahan seismik yang berbagi geser tingkat untuk arah yang ditinjau.	7.3.3.1 Tabel13	E dan F D, E, dan F
5b.	Diskontinuitas dalam Ketidakberaturan Kuat Lateral Tingkat yang Berlebihan didefinisikan ada jika kuat lateral tingkat kurang dari 65 persen kuat lateral tingkat di atasnya. Kuat tingkat adalah kuat total semua elemen penahan seismik yang berbagi geser tingkat untuk arah yang ditinjau.	7.3.3.1 7.3.3.2 Tabel13	D, E, dan F B dan C D, E, dan F