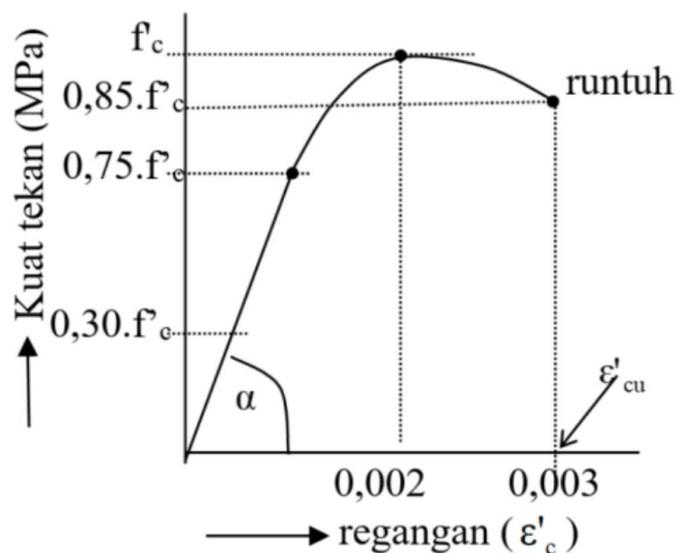


## BAB 3 LANDASAN TEORI

### 3.1 Struktur Beton Bertulang

Beton bertulang merupakan gabungan dari material beton polos dan tulangan baja yang saling bekerja sama, sehingga beton memiliki kekuatan untuk memikul tegangan tarik (Lesmana, 2020). Hubungan antara tegangan regangan tekan beton dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3.1 Hubungan Tegangan Dan Regangan Beton

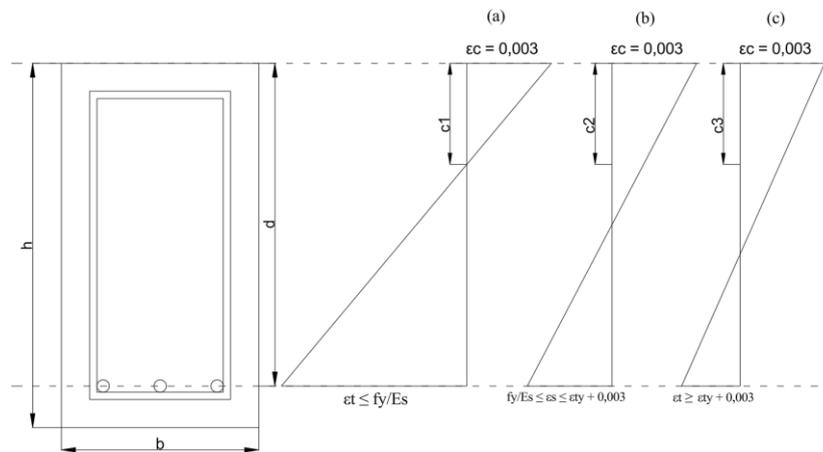
(Sumber: Ir Ali Asroni, 2017)

Menurut Ir Ali Asroni (2017) terdapat 3 perilaku yang menunjukkan perilaku tegangan regangan tekan beton sebagai berikut.

- a. Pada saat beban tekan mencapai  $0,3f_c'$  sampai  $0,4f_c'$ , perilaku tegangan regangan beton pada dasarnya masih linear ( $f_c'$  merupakan kekuatan batas tekan beton).
- b. Pada saat beban melebihi  $0,3f_c'$  sampai  $0,4f_c'$ , retak-retak lekatan mulai terbentuk. Pada saat ini mulai terjadi deviasi pada hubungan tegangan-regangan dari kondisi linear.
- c. Pada saat beban tekan mencapai  $0,75f_c'$  sampai  $0,9f_c'$ , retak-retak lekatan tersebut merambat ke mortar sehingga terbentuk pola retak yang kontinu.

### 3.2 Daktilitas

Daktilitas merupakan kemampuan struktur untuk berdeformasi hingga melewati batas elastisnya tanpa mengalami kegagalan (Lesmana, 2020). Baja tulangan mempengaruhi sifat daktilitas pada beton sehingga beton memiliki sifat daktail saat diberi tulangan. Namun, banyaknya jumlah tulangan baja mempengaruhi garis netral (c) pada tegangan regangan beton, apabila tulangan dipasang terlalu banyak beton akan getas dimana beton runtuh sebelum tulangannya leleh.



Gambar 3.2 Diagram Regangan Pada Balok Lentur, (a) *compression-controlled section*, (b) *transition region*, dan (c) *tension-controlled section*.

(Sumber: Hassoun & Al-Manaseer, 2020)

### 3.3 Sistem Struktur Bangunan Gedung Tahan Gempa

Dalam mendesain struktur bangunan gedung tahan gempa, harus diperhatikan kekuatan dan kemampuan layan dari struktur bangunan tersebut. Kedua aspek tersebut harus dipenuhi agar ketika terjadi gempa pada struktur bangunan, tidak ada korban jiwa akibat keruntukan struktur dan kondisi idealnya struktur gedung hanya mengalami kerusakan non-struktural sehingga bisa segera dihuni kembali pasca gempa. Secara umum, terdapat 3 sistem struktur yang sering digunakan oleh para *engineers* (Lesmana, 2019).

#### a. Sistem rangka struktural

Sistem struktur ini terdiri dari rangkaian balok dan kolom sebagai komponen struktur utamanya. Adapun komponen struktur sekundernya bisa terdiri dari balok sekunder, pelat lantai, dan tangga. Komponen sekunder berfungsi untuk

memikul beban dan kemudian menyalurkan beban tersebut ke dalam komponen struktur utama.

b. Sistem dinding struktur

Sistem struktur ini mempunyai dinding struktur yang difungsikan secara khusus untuk memikul beban lateral berupa gempa. Istilah dinding struktur ini biasanya lebih dikenal dengan istilah dinding geser atau *shear wall*. Dalam sistem ini, perlu diperhatikan penempatan dinding struktur demi mencegah efek torsi yang berlebihan pada struktur.

c. Sistem ganda

Sistem ganda merupakan sistem struktur gabungan struktur rangka dan dinding struktur. Kombinasi kedua struktur ini sangat menguntungkan karena interaksi antar rangka dan dinding struktur akan membuat penyerapan energi yang lebih besar. Dengan adanya kekakuan dinding struktur yang besar, perilaku struktur bangunan gedung saat terjadi gempa lebih terkontrol.

### **3.4 Pembebanan**

Menurut Badan Standarisasi Nasional (2020), beban merupakan gaya atau tindakan lain akibat berat semua bahan bangunan, penghuni dan properti, dampak lingkungan, perbedaan gerakan dan gaya penahan akibat dari perubahan dimensi. Pembebanan gedung diatur dalam SNI 1727:2020.

#### **3.4.1 Beban mati**

Menurut Badan Standarisasi Nasional (2020) beban mati merupakan berat semua material konstruksi terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, langit-langit, tangga, partisi tetap, penyelesaian akhir, bangunan dan komponen arsitektur dan struktural lainnya serta peralatan servis terpasang lainnya, termasuk derek dan sistem pengangkutan material. Beban mati diatur dalam SNI 1727:2020 Pasal 3.1 Hal-21.

#### **3.4.2 Beban hidup**

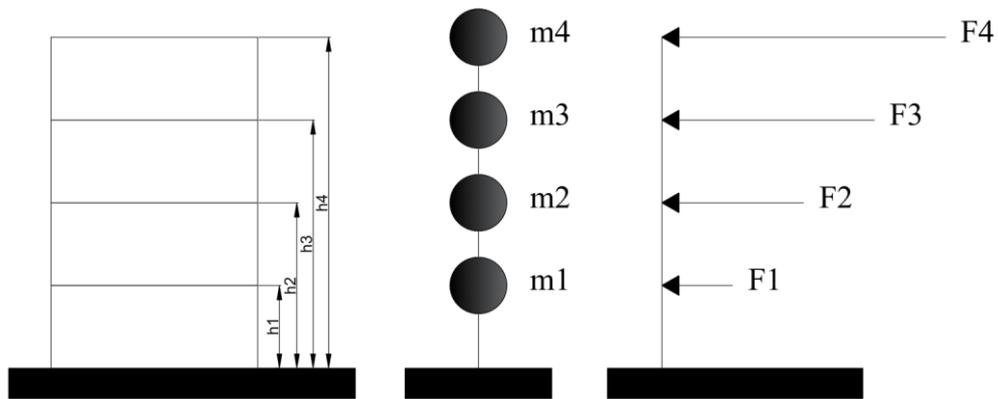
Beban hidup menurut Badan Standarisasi Nasional (2020) merupakan beban yang disebabkan oleh pengguna dan penghuni atau bangunan lain yang tidak termasuk beban dan beban lingkungan, seperti beban hujan, beban seismik, beban atau beban permanen. Beban hidup diatur dalam SNI 1727:2020 Pasal 4 Hal-25.

### 3.4.3 Beban gempa

Beban gempa merupakan energi yang dilepas selama gempa bumi terjadi sehingga mempengaruhi struktur bangunan. Berdasarkan SNI 1726:2019 terdapat 3 jenis prosedur yang digunakan untuk menganalisis beban gempa yang terjadi pada struktur yaitu prosedur *static equivalent*, *response spectrum (RS)*, dan *linear time history*.

#### a. *Static Equivalent*

Prosedur analisis statik ekuivalen merupakan metode pendekatan untuk mempresentasikan pengaruh beban dinamik gempa menjadi beban statik yang berupa gaya terpusat yang terdistribusi pada tiap tingkat struktur bangunan sesuai besaran massa pada tingkat yang di tinjau (Lesmana, 2020). Metode ini diatur dalam SNI 1726:2019 pasal 7.8 Hal-59. Berikut konsep dasar dan tahapan analisis beban gempa menggunakan prosedur analisis statik ekuivalen.

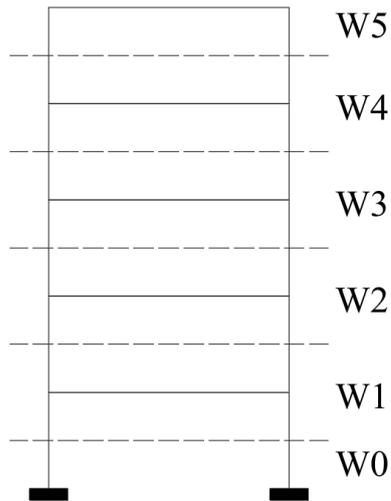


Gambar 3.3 Konsep Dasar Metode Statik Ekuivalen

(Sumber: Lesmana, 2020)

#### 1) Perhitungan berat seismik ( $W$ )

Pada tahap ini akan dilakukan proses perhitungan berat pada tiap tingkat berdasarkan sumbu memanjang dan melintang untuk memperoleh gaya gempa pada setiap sumbu dan tiap level tingkat. Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.7.2 Hal-68, berat seismik meliputi beban mati, beban mati tambahan, dan beban hidup.



Gambar 3.4 Konsep Perhitungan Beban Pada Bangunan

(Sumber: Lesmana, 2020)

2) Estimasi periode struktur (T)

Penentuan periode struktur diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.8.2 Hal-71.

Ada 2 pendekatan yang digunakan antara lain

- Pendekatan 1 (Pasal 7.8.2.1 Hal-72)

$$T_a = C_t \times h_n^x \quad (3.1)$$

Dengan nilai  $C_t$  dan  $x$  diperoleh dari SNI 1726:2019 Tabel 18 Hal-72

Tabel 3.1 Nilai Parameter Periode Pendekatan

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

(Sumber: SNI 1726:2019 Tabel 18 Hal 72)

- Pendekatan 2 (Pasal 7.8.2.1 Hal-72)

$$T_a = 0,1 N \quad (3.2)$$

Dengan nilai  $N$  merupakan jumlah tingkat.

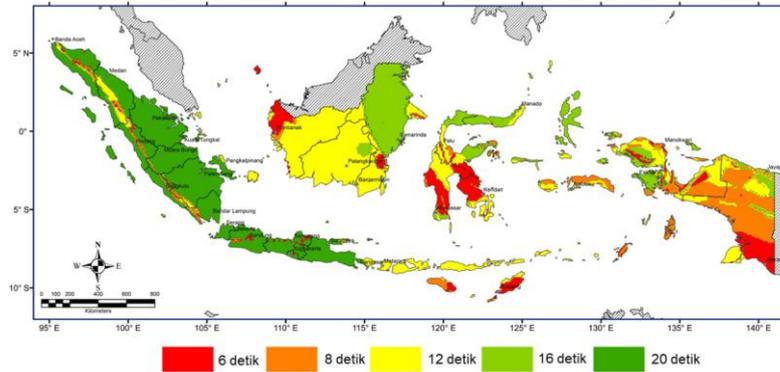
Apabila periode struktur ditentukan dengan perangkat lunak *ETABS* atau *TSD*, maka nilai  $T$  tidak boleh melampaui  $C_u T_a$  dan tidak boleh kurang dari  $T_a$ .

3) Perhitungan gaya geser ( $V$ )

Perhitungan gaya geser seismik struktur diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.8 Hal-69.

$$V = C_s \times W \tag{3.3}$$

Untuk menghitung nilai koefisien seismik ( $C_s$ ) dibutuhkan parameter pendukung seperti panjang periode ( $T_L$ ) (SNI 1726:2019 Gambar 20 Hal-238), faktor keamanan ( $I_e$ ) (SNI 1726:2019 Pasal 4.1.2 Tabel 4 Hal-25), faktor modifikasi ( $R$ ) (SNI 1726:2019 Tabel 12 Hal-49).



Gambar 3.5 Peta transisi periode panjang ( $T_L$ ) Wilayah Indonesia

(Sumber: SNI 1726:2019 Gambar 20 Hal-238)

Tabel 3.2 Pemilihan Faktor Keutamaan Gempa

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, $I_e$
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,5

(Sumber: Tabel 4 SNI 1727:2020 Hal 25)

Tabel 3.3 Faktor  $R$ ,  $C_d$ , dan  $\Omega_0$  Untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respon	Faktor kuat lebih sistem	Faktor pembesaran defleksi	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur					
				Kategori desain seismik					
				B	C	D	E	F	
<b>C. Sistem rangka pemikul momen</b>									
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB	
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5,5	TB	TB	40	30	TI	
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4,5	3	4	TB	TB	10	TI	TI	
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3,5	3	3	TB	TB	TI	TI	TI	

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respon	Faktor kuat lebih sistem	Faktor pembesaran defleksi	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D	E	F
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4,5	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2,5	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4,5	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul beban	6	3	5,4	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2,5	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canal dingin pemikul momen khusus dengan pembautan	3,5	3	5,5	10	10	10	10	10

(Sumber : SNI 1726:2019 Tabel 12 Hal 50)

Pada SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1.1 ditentukan nilai  $C_s$  dan juga membatasi nilai maksimum dan minimumnya.

$$C_{s\text{ perlu}} = \frac{S_{ds}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.4)$$

Untuk  $T \leq T_L$

$$C_{s\text{ max}} = \frac{S_{sd1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.5)$$

Untuk  $T > T_L$

$$C_{s\text{ max}} = \frac{T_L \cdot S_{d1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.6)$$

$C_s$  harus tidak kurang dari

$$C_{s\text{ min}} = 0,044 \cdot S_{ds} \cdot I_e \quad (3.7)$$

Jika  $S_I$  sama dengan atau lebih besar dari 0,6g,  $C_s$  harus tidak kurang dari

$$C_{s\text{ min}} = \frac{0,5}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.8)$$

#### 4) Perhitungan gaya gempa (F)

Perhitungan gaya gempa (F) diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.8.3 Hal 73. Rumus yang digunakan merupakan sebagai berikut.

$$F = C_{vx} \times V \quad (3.9)$$

dimana:

$V$  = gaya geser dasar total bangunan

$$C_{vx} = \frac{W_{xx} h_i^k}{\sum_{i=1}^n W_{ix} h_i^k}, \text{ dengan nilai } k \text{ apabila nilai } T_a \text{ kurang dari } 0,5 \text{ maka}$$

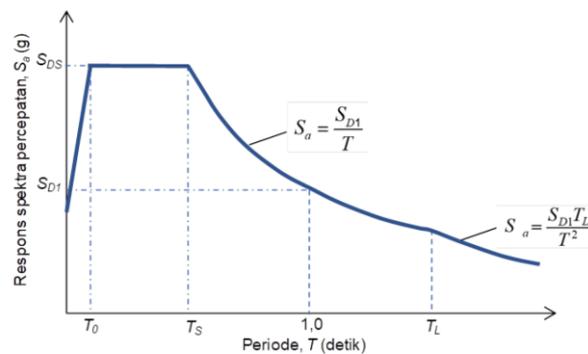
nilai  $k=1$ , jika nilai  $T_a$  lebih dari 2,5 maka nilai  $k=2$ , jika nilai  $T_a$  diantara 0,5 sampai 2,5 maka  $k$  menggunakan interpolasi.

b. *Response Spectrum (RS)*

Prosedur analisis respons spektrum merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui respon struktur terhadap getaran seismik berdasarkan spektrum respons. Spektrum respons digunakan untuk memperkirakan respon maksimum struktur terhadap gerakan tanah akibat gempa. Untuk memodelkan grafik respon spektrum diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 6.4 Gambar 3 Hal 35-36. Untuk membuat grafik respon spektrum, diperlukan data seismik gempa ( $S_l$ ,  $S_s$ , dll). Untuk nilai  $T_L$  dapat dilihat pada SNI 1726:2019 Gambar 20 Hal-238. Untuk mencari  $T_0$  dan  $T_s$  menggunakan rumus berikut.

$$T_0 = 0,2 x \frac{S_{d1}}{S_{ds}} \quad (3.10)$$

$$T_s = \frac{S_{d1}}{S_{ds}} \quad (3.11)$$



Gambar 3.6 Grafik respon spektrum

(Sumber: SNI 1726:2019 Gambar 3 Hal-36)

Untuk  $T < T_0$

$$S_a = S_{ds} (0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0}) \quad (3.12)$$

Untuk  $T_0 < T \leq T_s$

$$S_a = S_{ds} \quad (3.13)$$

Untuk  $T_s < T \leq T_L$

$$S_a = \frac{S_{d1}}{T} \quad (3.14)$$

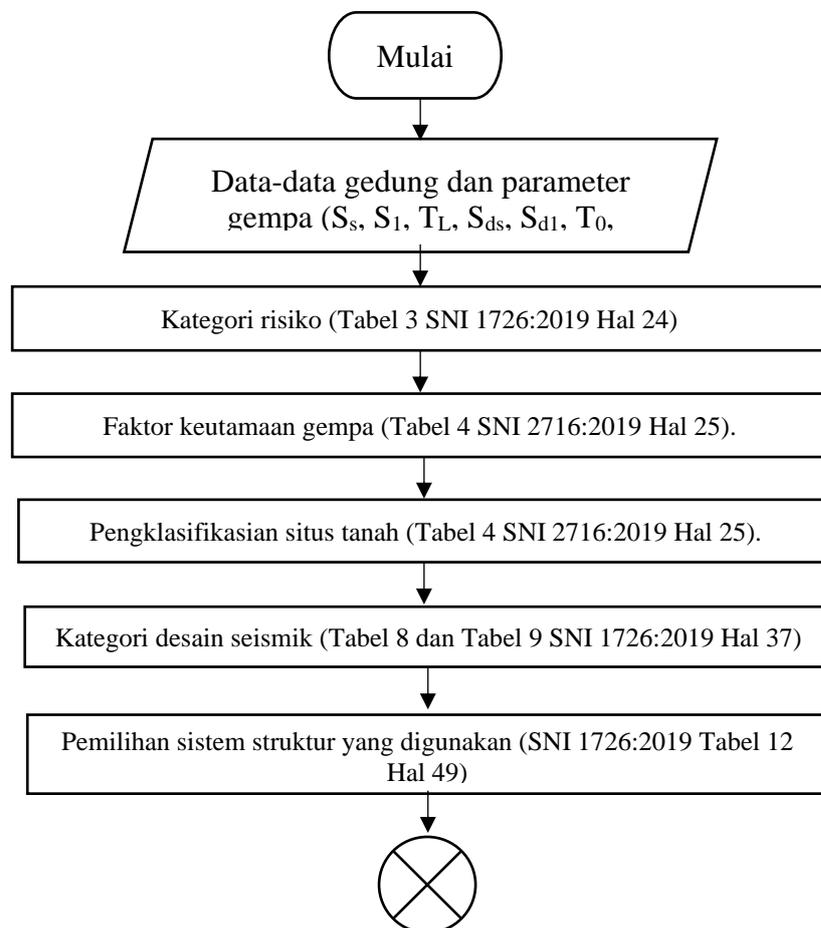
Untuk  $T > T_L$

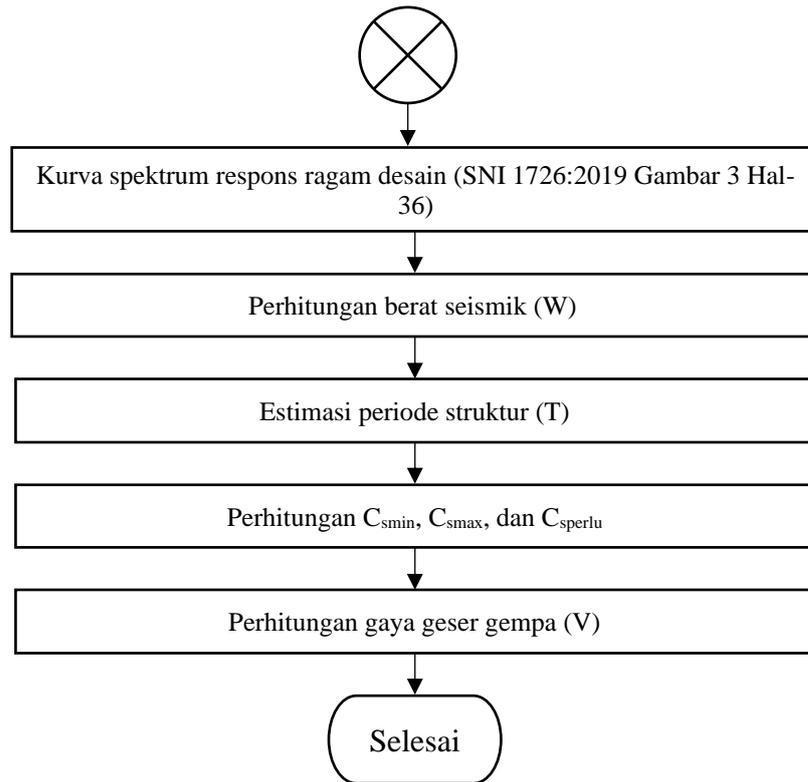
$$S_a = \frac{T_L \cdot S_{d1}}{T^2} \quad (3.15)$$

c. *Linear Time History (LTH)*

Menurut Lesmana (2020), metode *linear time history* merupakan metode analisa beban gempa dengan menggunakan rekaman gempa asli (*ground motion*) yang diperoleh secara langsung dari alat peredam gempa (*seismograph*). Metode ini diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.9.2 Hal-78. Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.2.3 Hal-79 mensyaratkan minimal pemakaian rekaman gempa asli (*ground motion*) minimal 3 dan tidak disebutkan untuk penggunaan maksimalnya.

Berikut merupakan diagram alir analisis perhitungan gaya gempa.





Gambar 3.7 Diagram Alir Analisis Gaya Geser Gempa (V) Sesuai SNI 1726:2019  
(Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2025)

### 3.4.4 Kombinasi beban

Menurut Badan Standarisasi Nasional (2020), kombinasi beban digunakan untuk memastikan bahwa struktur dapat menahan berbagai kombinasi pembebanan yang mungkin terjadi selama masa pakainya. Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.5.3 gaya seismik untuk memikul kombinasi beban yang ditetapkan yaitu 100% gaya satu arah ditambah 30% gaya untuk arah tegak lurus.

a. Kombinasi beban dasar

- 1)  $1,4D$
- 2)  $1,2D + 1,6 L + 0,5 (Lr \text{ atau } S \text{ atau } R)$
- 3)  $1,2D + 1,6 (Lr \text{ atau } S \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5 W)$
- 4)  $1,2D + E + L + 0,5 (Lr \text{ atau } S \text{ atau } R)$
- 5)  $0,9D + E$

b. Kombinasi yang digunakan

- 1)  $1,4D$
- 2)  $1,2D + 1,6 L$

$$3) 1,2D + E + L$$

$$4) 0,9D + E$$

Dikarenakan dalam perencanaan beban mati terbagi menjadi dua yaitu *Super Dead Load* (SDL) dan *Dead Load* (DL).

$$1) 1,4DL + 1,4 SDL$$

$$2) 1,2D + 1,2 SDL + 1,6 L$$

$$3) 1,2D + 1,2 SDL + E + L$$

$$4) 0,9D + 0,9 SDL + E$$

c. Pengaruh beban gempa horizontal (Eh) dan vertikal (Ev)

Pada SNI 1726:2019 dijabarkan pengaruh beban gempa. Pengaruh beban gempa (E) pada kombinasi 3 harus ditentukan sesuai dengan persamaan sebagai berikut.

$$E = Eh + Ev \quad (3.16)$$

Sedangkan untuk kombinasi 4, beban gempa dijabarkan sebagai berikut.

$$E = Eh - Ev \quad (3.17)$$

$$Eh = \rho \times Q_E \quad (3.18)$$

$$Ev = 0,2S_{DS} \times D \quad (3.19)$$

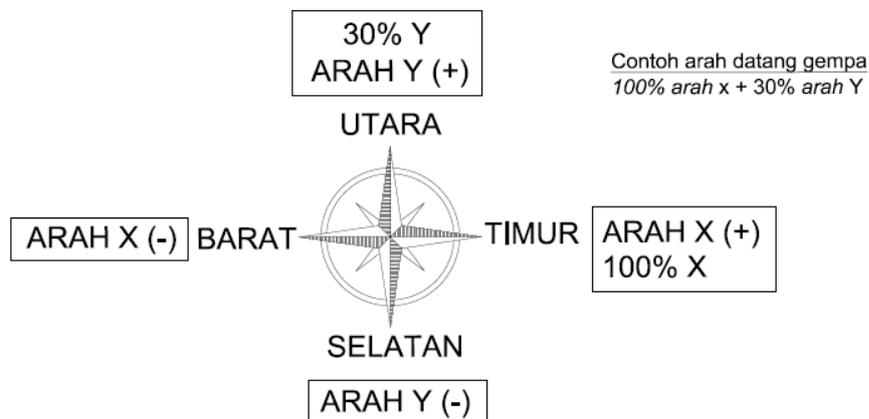
Keterangan:

$\rho$  = faktor redudansi

$Q_E$  = Pengaruh gaya gempa horizontal

$S_{DS}$  = Parameter percepatan spektrum respons desain pada perioda pendek

d. Arah pembebanan



Gambar 3.8 Ilustrasi Arah Datang Gempa

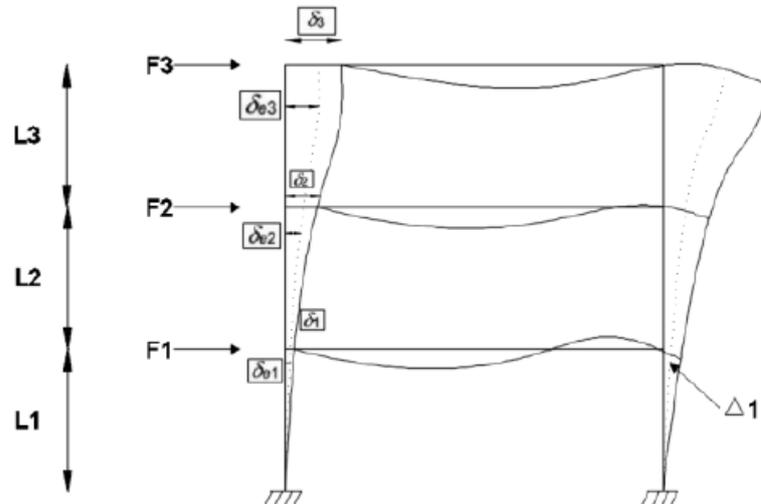
(Sumber : Hasil Analisis Penulis, 2025)

Berdasarkan gambar diatas maka kombinasi beban gempa dijabarkan menjadi:

- 1)  $1,4DL + 1,4 SDL$
- 2)  $1,2D + 1,2 SDL + 1,6 L$
- 3)  $(1,2 + 0,2S_{DS}) DL + (1,2 + 0,2S_{DS}) SDL + 1. \rho . Ex + 0,3. \rho . Ey + L$
- 4)  $(1,2 + 0,2S_{DS}) DL + (1,2 + 0,2S_{DS}) SDL + 0,3. \rho . Ex + 1. \rho . Ey + L$
- 5)  $(0,9 - 0,2S_{DS}) DL + (0,9 - 0,2S_{DS}) SDL + 1. \rho . Ex + 0,3. \rho . Ey$
- 6)  $(0,9 - 0,2S_{DS}) DL + (0,9 - 0,2S_{DS}) SDL + 0,3. \rho . Ex + 1. \rho . Ey$

### 3.5 Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar tingkat merupakan perpindahan horizontal di bagian atas tingkat yang ditinjau relatif terhadap bagian bawahnya. Simpangan antar tingkat diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.8.6 Hal-75.



Gambar 3.9 Simpangan Antar Lantai

(Sumber : SNI 1726, 2019)

Untuk menghitung simpangan antar tingkat menggunakan rumus berikut:

$$\Delta = \frac{C_d \times \delta_{ex}}{I_e} \quad (3.20)$$

dimana:

$C_d$  = faktor pembesaran simpangan lateral

$\delta_{ex}$  = simpangan di tingkat-x yang disyaratkan pada pasal ini, yang ditentukan dengan analisis elastik

$I_e$  = faktor keutamaan gempa

### 3.5 Pelat

Pelat lantai merupakan struktur dengan bidang permukaan yang lurus, datar dan tebalnya lebih kecil dibandingkan struktur lainnya yang berfungsi untuk menerima beban yang akan disalurkan ke struktur lainnya (Zebua, 2018). Pelat lantai diberi tulangan baja dengan posisi melintang dan memanjang yang diikat dengan kawat bendrat serta tidak menempel pada permukaan pelat bagian bawah maupun atas.

Secara umum pelat lantai dibagi menjadi dua tipe yaitu pelat satu arah (*one way*) dan pelat dua arah. Pelat satu arah merupakan jenis pelat yang mengalami lendutan pada satu arah sumbunya, sebaliknya, pelat dua arah merupakan pelat yang mengalami lendutan pada kedua arah sumbunya. Ketentuan pelat satu arah diatur pada SNI 2847:2019 Pasal 7 Hal-119, sedangkan pelat dua arah diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 8 Hal-131.

Dalam meninjau syarat kuat lentur, pelat dalam ketebalan tertentu diharuskan memikul momen terfaktor yang terjadi dengan pendekatan faktor tahanan ( $R_n$ ). Berikut hubungan persamaan  $R_n$  dan  $M_n$ .

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = R_n \cdot b \cdot d^2 \quad (3.21)$$

Dimana:

$M_n$  = Momen nominal pelat (Nmm)

$M_u$  = Momen terfaktor pelat (Nmm)

$b$  = Lebar pelat ( $b = 1000$  mm)

$d$  = Tinggi efektif pelat (mm)

Dalam SNI 2847:2019 Tabel 8.6.1.1 mengatur luasan minimum tulangan lentur pelat nonprategang.

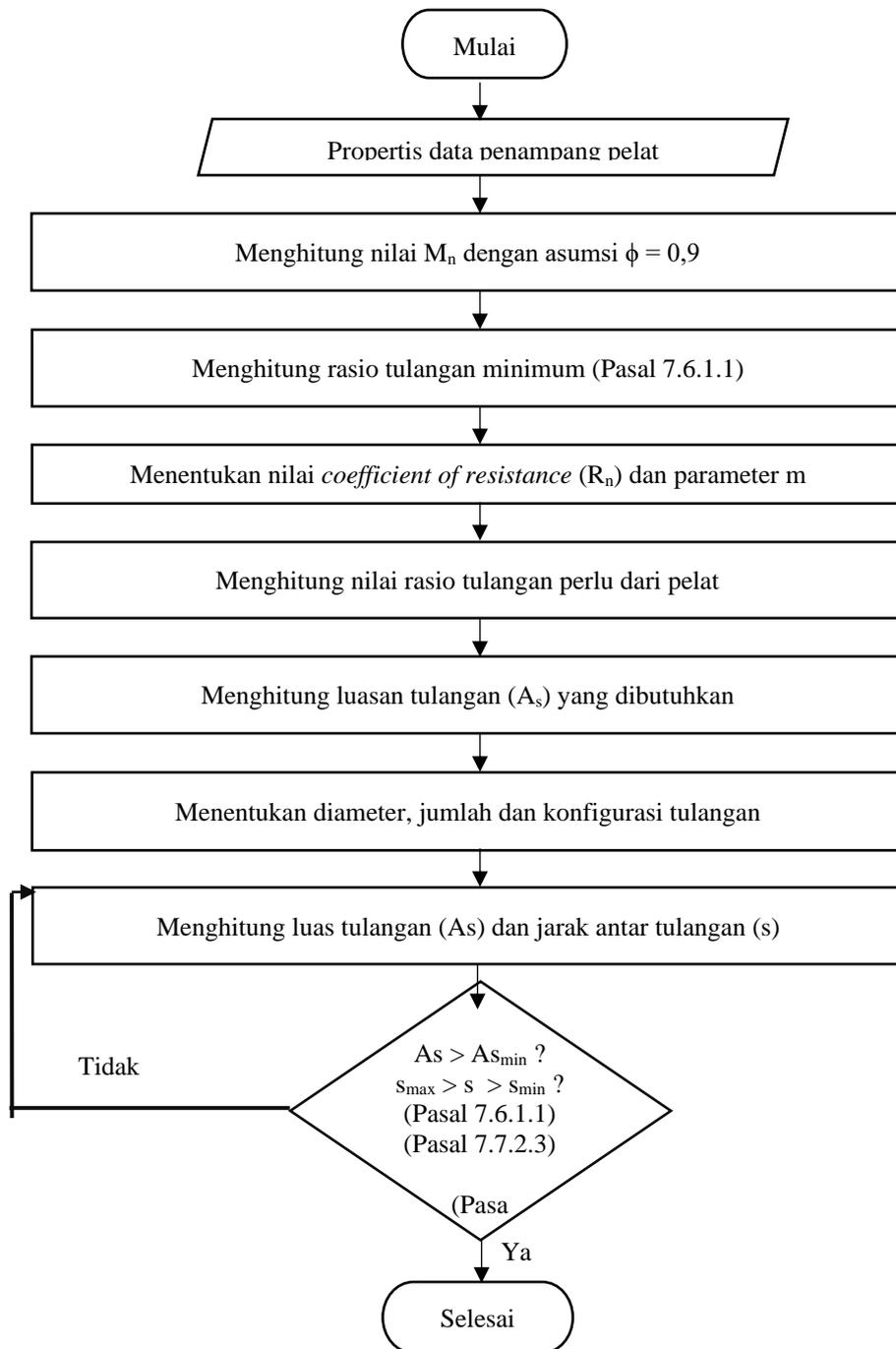
$$A_g = b \times h \quad (3.22)$$

dimana:

$b$  = Lebar pelat per satuan meter ( $b = 1000$  mm)

$h$  = Tebal pelat (mm)

Berikut diagram alir prosedur desain tulangan lentur pelat.



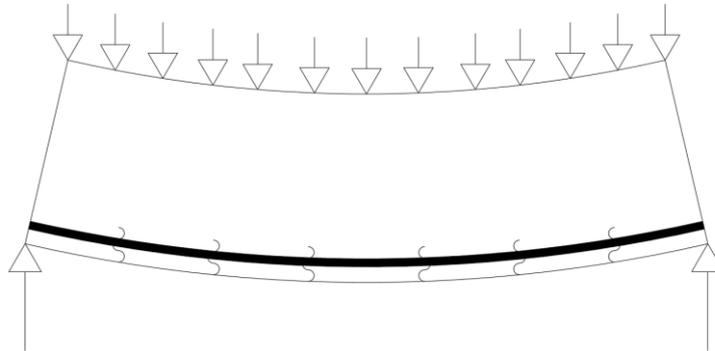
Gambar 3.10 Diagram Alir Prosedur Desain Tulangan Lentur Pelat

(Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2025)

### 3.7 Balok

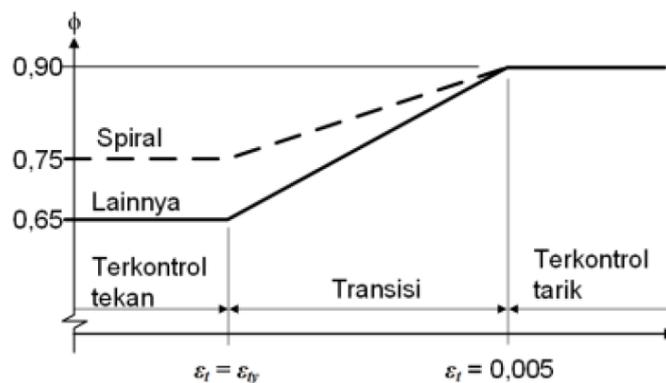
Balok merupakan salah satu elemen utama penyusun struktur gedung yang umumnya terpasang secara horizontal atau lateral (Lesmana, 2020). Fungsi utama

balok yaitu menyalurkan beban kedalam elemen kolom berupa gaya dan momen. Terdapat beberapa gaya dan momen yang terjadi pada balok yaitu gaya aksial, gaya geser, momen torsi dan momen lentur.



Gambar 3.11 Lentur Pada Balok Beton Bertulang

(Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2025)

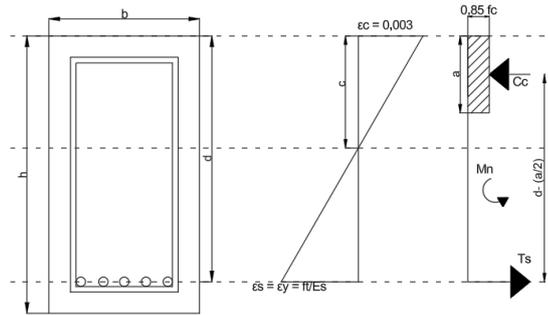


Gambar 3.12 Variasi nilai faktor reduksi ( $\phi$ ) sesuai kategori penampang

((Sumber : SNI 2847:2019 Gambar R21.2.2b))

Dalam tahap menghitung parameter  $\epsilon_t$ , dapat juga digunakan  $c/d_t$ , untuk memastikan bahwa penampang dapat terjaga dalam kondisi tarik, regangan pada tulangan tarik perlu mencapai angka 0,005 dan regangan pada beton harus berada di angka 0,003 (Lesmana, 2020). Dengan menggunakan persamaan segitiga sebangun, maka didapatkan:

$$\frac{c}{d_t} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_t + \epsilon_{cu}} = \frac{0,003}{0,005 + 0,003} = 0,375$$



Gambar 3.13 Diagram Tegangan Regangan Balok Tulangan Tunggal

(Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2025)

Lesmana (2020), berdasarkan diagram tegangan dan regangan balok didapatkan persamaan untuk mendapatkan nilai momen nominal balok ( $M_n$ ) adalah

$$M_n = T (d - a/2) = C (d - a/2) \quad (3.23)$$

Gaya tekan (C) pada penampang adalah

$$C = 0,85 \times f'_c \times b \times \beta_1 \times c \quad (3.24)$$

Berdasarkan SNI 2847:2019 Hal. 478, nilai  $\beta_1$  dipengaruhi oleh nilai  $f'_c$ :

- Jika  $17 \text{ Mpa} \leq f'_c \leq 28 \text{ Mpa}$ , maka nilai  $\beta_1$  diambil sebesar 0,85
- Jika  $28 \text{ Mpa} < f'_c \leq 55 \text{ Mpa}$ , maka nilai  $\beta_1$  diambil sebesar  $0,85 - 0,05 (f'_c - 28)/7$
- Jika  $55 \text{ Mpa} < f'_c$ , maka nilai  $\beta_1$  diambil sebesar 0,65

Gaya tarik (T) pada tulangan baja adalah

$$T = A_s \times f_y = \rho \times b \times d \times f_y \quad (3.25)$$

Karena nilai  $C = T$ , maka

$$0,85 \times f'_c \times b \times \beta_1 \times c = \rho \times b \times d \times f_y \quad (3.26)$$

$$a = \beta_1 \times c \quad (3.27)$$

$$0,85 \times f'_c \times b \times a = \rho \times b \times d \times f_y \quad (3.28)$$

Nilai tinggi blok tekan (a) adalah

$$a = \rho \frac{f_y}{0,85 \times f'_c} \times d \quad (3.29)$$

Jika persamaan 3.28 disubstitusikan kedalam persamaan 3.22, maka rumus momen nominal menjadi

$$M_n = \rho b d \times f_y (d - \rho \frac{f_y}{0,85 \times f'_c} \times d) = \rho b d^2 \times f_y (1 - \rho m/2) \quad (3.30)$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f'_c} \quad (3.31)$$

Persamaan 3.9 jika dibagi dengan  $bd^2$  akan menghasilkan parameter koefisien resistansi ( $R_n$ )

$$R_n = \frac{M_n}{bd^2} = \rho \times f_y (1 - \rho m/2) \quad (3.32)$$

Sehingga persamaan rasio tulangan bisa didapatkan sebagai berikut

$$\rho = \frac{1}{m} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times m \times R_n}{f_y}} \right) \quad (3.33)$$

Pada SNI 2849:2019 Pasal 9.6.1.2 mengatur bahwa rasio tulangan minimal pada elemen lentur balok diambil terbesar dari dua persamaan berikut ini

$$\rho_{min} = \frac{0,25\sqrt{f_c'}}{f_y} \quad (3.34)$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (3.35)$$

Sedangkan rasio tulangan seimbang adalah

$$\rho_b = \frac{0,85 \times f_c' \times \beta_1}{f_y} \frac{\epsilon_{cu}}{f_y/E_s + \epsilon_{cu}} \quad (3.36)$$

Demi menjamin penampang terkontrol tarik, maka rasio tulangan yang digunakan harus dibawah rasio tulangan seimbang. Kategori penampang juga bisa diperiksa melalui regangan tulangan tarik yang terjadi ( $\epsilon_t$ )

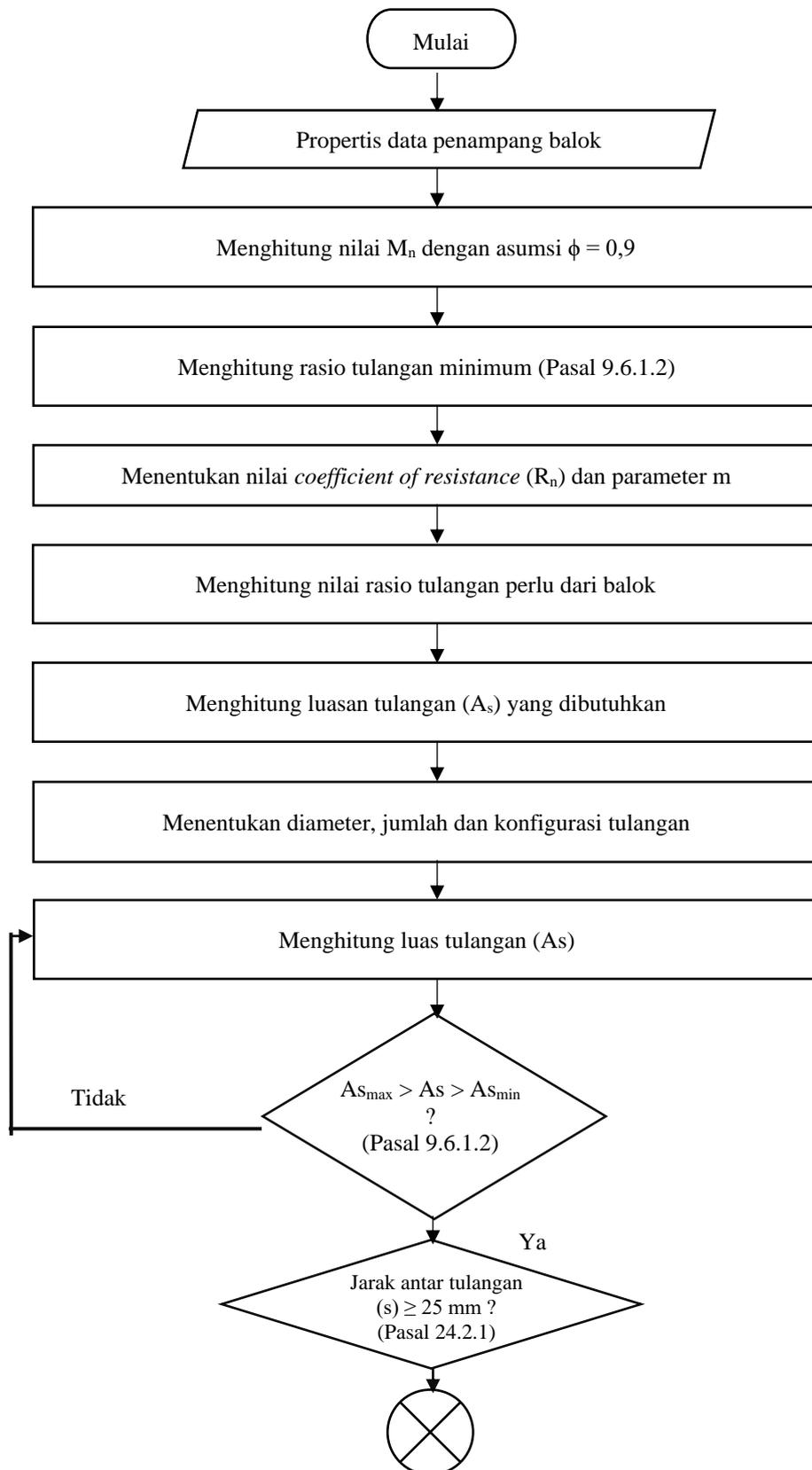
$$\epsilon_t = 0,003 \frac{(d_t - c)}{c} \quad (3.37)$$

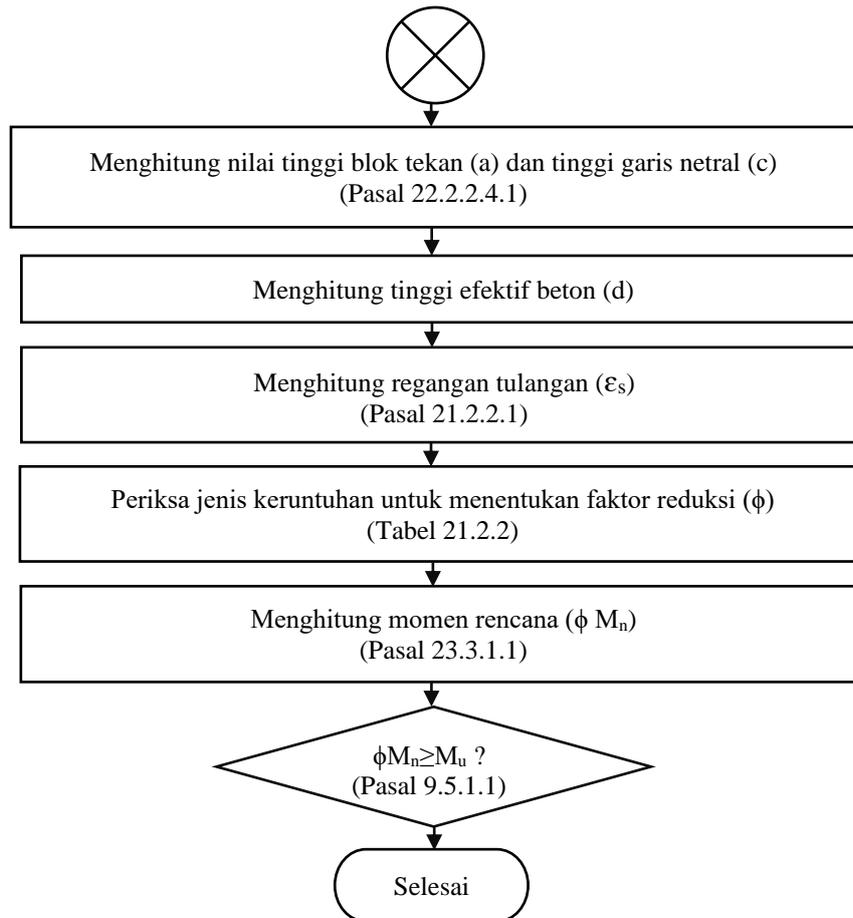
Jika  $\epsilon_t \geq 0,005$  maka balok tergolong terkontrol tarik, bila  $\epsilon_t < 0,002$  maka balok tergolong terkontrol tekan dan diantara kedua itu balok tergolong transisi.

Keterangan:

- a : Tinggi blok tekan beton (mm).
- d : Tinggi efektif balok (mm).
- b : Lebar balok (mm).
- $f_c'$  : Kuat tekan beton (Mpa).
- $A_s$  : Luas tulangan (mm<sup>2</sup>).
- $f_y$  : Kuat leleh tulangan (Mpa).
- $\beta_1$  : Koefisien reduksi tinggi garis netral.
- $\rho$  : Rasio tulangan.
- $\epsilon_s$  : Regangan tulangan baja.
- $\epsilon_{cu}$  : Regangan penampang beton.

Prosedur desain tulangan longitudinal pada balok berdasarkan SNI 2847:2019, dapat dilihat pada diagram alir berikut ini.

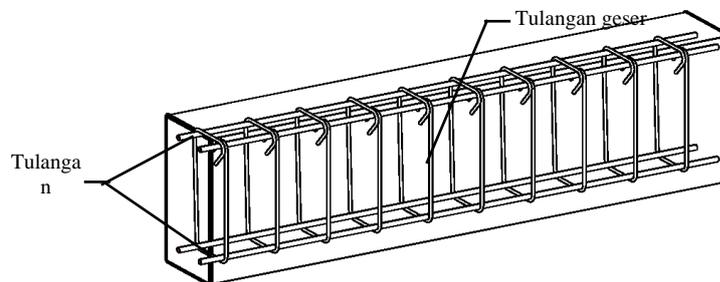




Gambar 3.14 Diagram Alir Prosedur Desain Tulangan Lentur Balok

(Sumber : Hasil Analisis Penulis, 2025)

Selain momen lentur yang perlu ditahan oleh balok, ada gaya geser yang dapat menyebabkan patahan pada balok. Bentuk dan ukuran dari retakan yang muncul dapat ditangani dengan menambahkan tulangan geser pada balok, yang biasanya dipasang tegak lurus terhadap tulangan lenturnya (Lesmana, 2020)



Gambar 3.15 Sengkang Pada Balok

(Sumber : Hasil Analisis Penulis, 2025)

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 22.5.1.1 persamaan untuk kuat geser nominal ( $V_n$ ) adalah:

$$V_n = V_c + V_s \quad (3.38)$$

Dimana nilai kuat geser beton ( $V_c$ ) didapatkan dari persamaan

$$V_c = 0,17 \times \lambda \times \sqrt{f_c} \times b \times d \quad (3.39)$$

Pemeriksaan dimensi penampang beton apakah mampu untuk memikul beban geser melalui persamaan

$$V_u \leq \phi (V_c + 0,66 \times \sqrt{f_c} \times b \times d) \quad (3.40)$$

Pada proses desain, kebutuhan tulangan geser didasarkan pada nilai geser *ultimate* terhadap nilai geser beton ( $\phi V_c$ ).

a. Kategori C ( $V_u \leq 0,5 \phi V_c$ ), pada kondisi ini secara teoritis balok tidak memerlukan tulangan geser.

b. Kategori B ( $0,5 \phi V_c \leq V_u \leq \phi V_c$ ), pada kondisi dapat digunakan tulangan geser minimum, nilai  $A_v$  min harus lebih besar dari persamaan berikut ini (Pasal 9.6.3.3)

$$A_v \min = 0,062 \sqrt{f_c} b.s / f_yt \quad (3.41)$$

$$A_v \min = 0,35 b.s / f_yt \quad (3.42)$$

c. Kategori A ( $\phi V_c < V_u$ ), pada kondisi ini nilai  $V_s$  dan  $A_v$  minimum diperoleh dari persamaan berikut ini (Pasal 22.5.10.1 dan Pasal 22.5.10.5.3)

$$V_s = (V_u - \phi V_c) / \phi \quad (3.43)$$

$$A_v = (V_s . s) / (f_yt . d) \quad (3.44)$$

Spasi ( $s$ ) maksimum tulangan geser ditentukan berdasarkan tabel berikut ini

Tabel 3.4 Spasi Maksimum Tulangan Geser Balok

$V_s$	Maksimum $s$ (mm)	
$\leq 0,33.b.d.\sqrt{f_c}$	Terkecil dari	$d/2$
		600
$\geq 0,33.b.d.\sqrt{f_c}$	Terkecil dari	$d/4$
		300

(Sumber : SNI 2847:2019, Tabel 9.7.6.2.2)

Dengan catatan bahwa nilai faktor reduksi ( $\phi$ ) kuat geser pada beton adalah sebesar 0,75 (Pasal 21.2.1).

Keterangan :

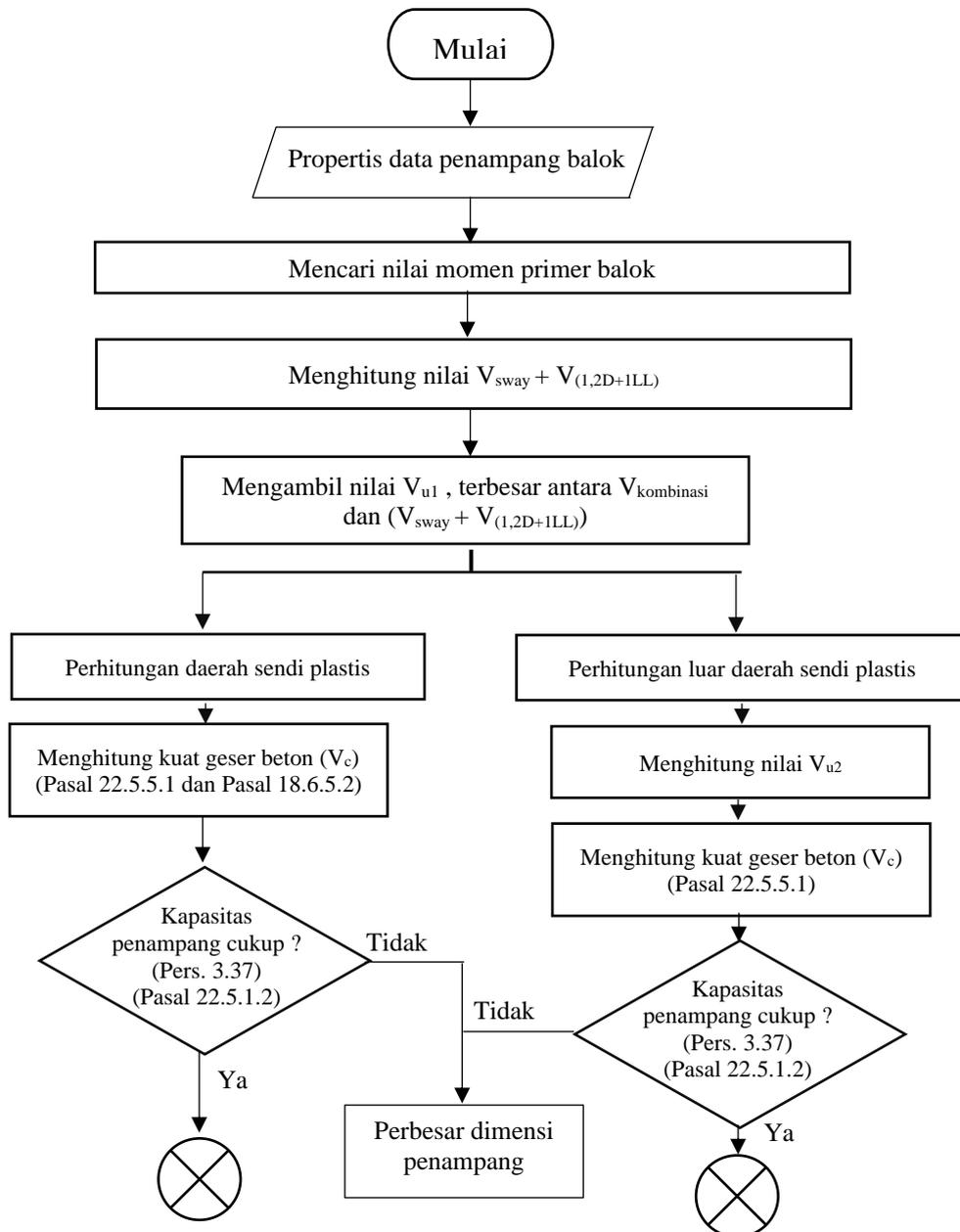
$V_u$  : Gaya geser *ultimate* (kN).

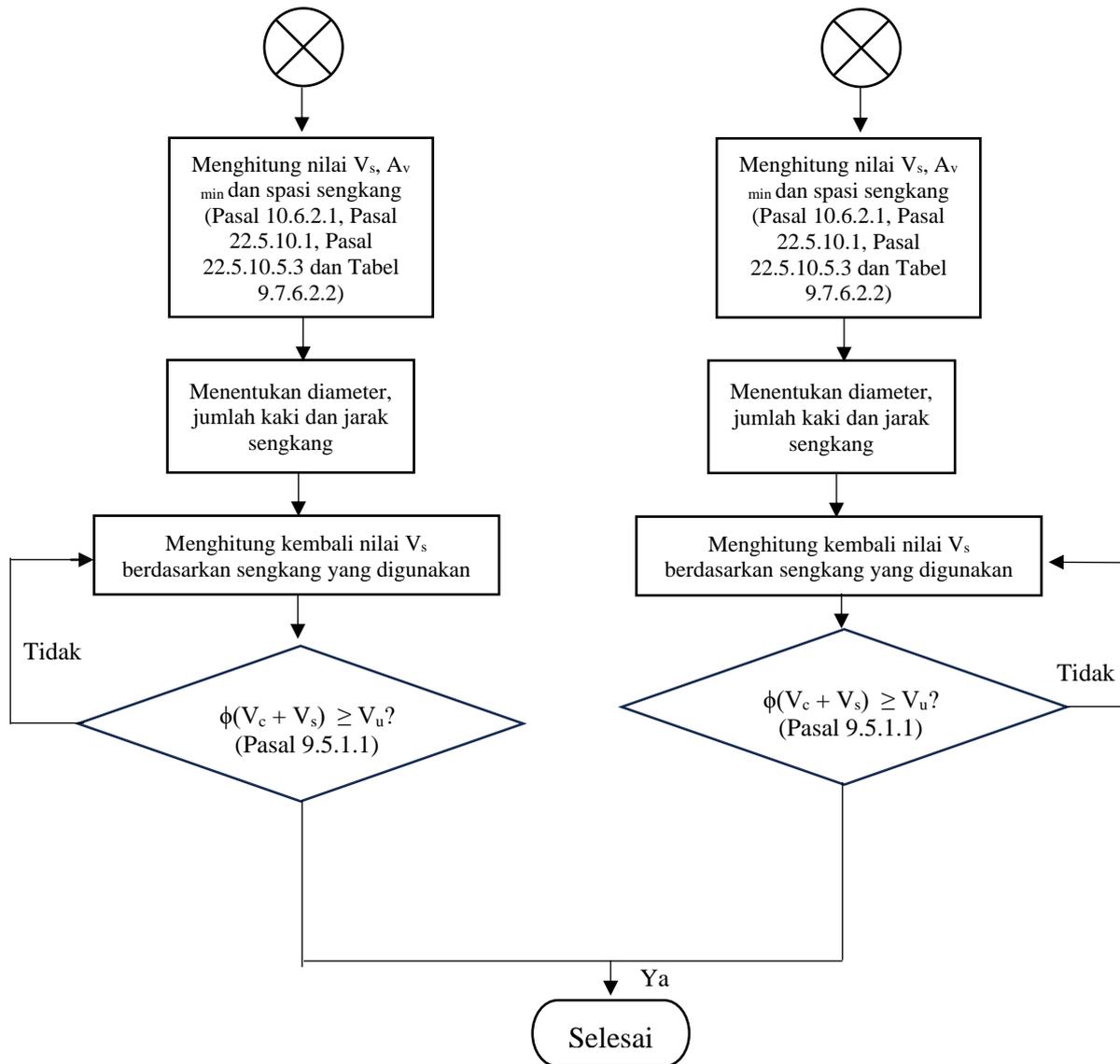
$V_c$  : Kuat geser beton (kN).

$V_s$  : Kuat geser tulangan geser (kN).

- b : lebar penampang beton (mm).
- d : Tinggi efektif penampang beton (mm).
- s : Spasi tulangan geser (mm).
- $f_{yt}$  : Kuat leleh tulangan geser (Mpa).
- $A_v$  : Luas tulangan geser (mm<sup>2</sup>).
- $\lambda$  : Koefisien faktor modifikasi beton (pada beton normal diambil sebesar 1).

Prosedur desain tulangan transversal (sengkang) pada balok berdasarkan SNI 2847:2019, dapat dilihat pada diagram alir berikut ini.

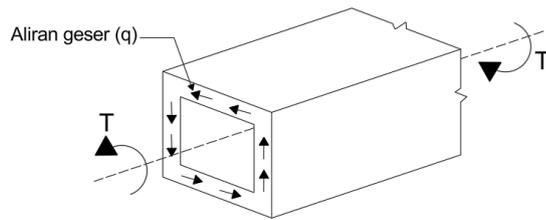




Gambar 3.16 Diagram Alir Prosedur Desain Tulangan Sengkang Balok

(Sumber : Hasil Analisis Penulis, 2025)

Torsi yang terjadi pada balok merupakan momen yang berputar di sumbu longitudinal balok, sehingga menyebabkan balok itu berputar. Umumnya, momen torsi muncul pada balok yang hanya menerima beban di salah satu sisi, sementara sisi lainnya tidak terbebani. Contoh kasus yang sering terlihat adalah pada balok tepi.



Gambar 3.17 Gaya Torsi Pada Balok

(Sumber : SNI 2847:2019, Gambar 22.7)

Karena torsi dalam balok melibatkan kombinasi geser dan torsi, perencanaan untuk tulangan torsi perlu mencakup tulangan transvers dan longitudinal. Biasanya, pengaruh torsi diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 22.7.1, di mana pengaruh torsi pada balok dapat diabaikan apabila nilai torsi pada balok melebihi torsi ultimate ( $\phi T_n \geq T_u$ ) (Lesmana, 2020). Nilai torsi nominal ( $T_n$ ) didapatkan berdasarkan persamaan berikut ini.

Torsi statis tertentu (torsi kesetimbangan)

$$T_n = 0,083 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times (A_{cp}^2 / P_{cp}) \quad (3.45)$$

$$A_{cp} = b \times h \quad (3.46)$$

$$P_{cp} = 2 (b + h) \quad (3.47)$$

Penampang balok harus dipastikan mampu memikul torsi melalui persamaan berikut ini

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1,7 A_o h^2}\right)^2} \leq 0,75 \left(\frac{V_c}{b \cdot d} + 0,66 \sqrt{f'_c}\right) \quad (3.48)$$

$$A_o h = (b - 2 \times t_s) \times (h - 2 \times t_s) \quad (3.49)$$

$$P_h = 2 ((b - 2 \times t_s) + (h - 2 \times t_s)) \quad (3.50)$$

Karena torsi pada balok mempengaruhi tulangan geser dan longitudinal, maka luasan tulangan geser ( $A_t$ ) dan longitudinal ( $A_l$ ) akibat pengaruh torsi ditentukan melalui persamaan berikut ini ( $\phi = 0,75$ )

$$A_t = \frac{T_u \times s}{\phi \times 2 \times A_o \times f_{yt}} \tan 45^\circ \quad (3.51)$$

$$A_l = \frac{T_u \times P_h}{\phi \times 2 \times A_o \times f_{yt}} \cot 45^\circ \quad (3.52)$$

$$A_o = 0,85 A_o h \quad (3.53)$$

Jika luasan yang dihitung lebih besar dari luasan sebelumnya, maka perlu adanya penyesuaian luas tulangan yang baru. Setelah didapatkan luasan tulangan geser dan longitudinal yang baru, untuk memastikan bahwa luasan tersebut mampu memikul momen torsi pada balok perlu diperiksa melalui persamaan berikut ini

$$T_n (\text{geser}) = \phi \frac{2 \times A_o \times A_t \times f_{yt}}{s} \cot 45^\circ \geq T_u \quad (3.54)$$

$$T_n (\text{longitudinal}) = \phi \frac{2 \times A_o \times A_t \times f_y}{P_h} \tan 45^\circ \geq T_u \quad (3.55)$$

Keterangan :

$T_n$  : Momen torsi nominal (kNm)

$T_u$  : Momen torsi *ultimate* (kNm)

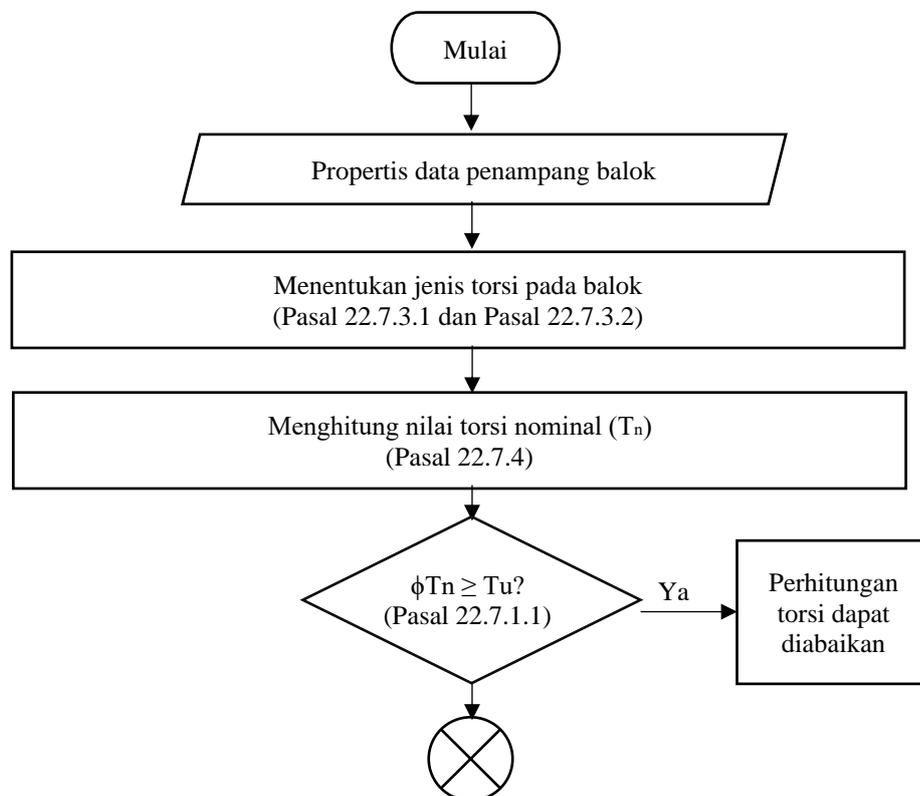
$A_{cp}$  : Luas penampang balok (mm<sup>2</sup>).

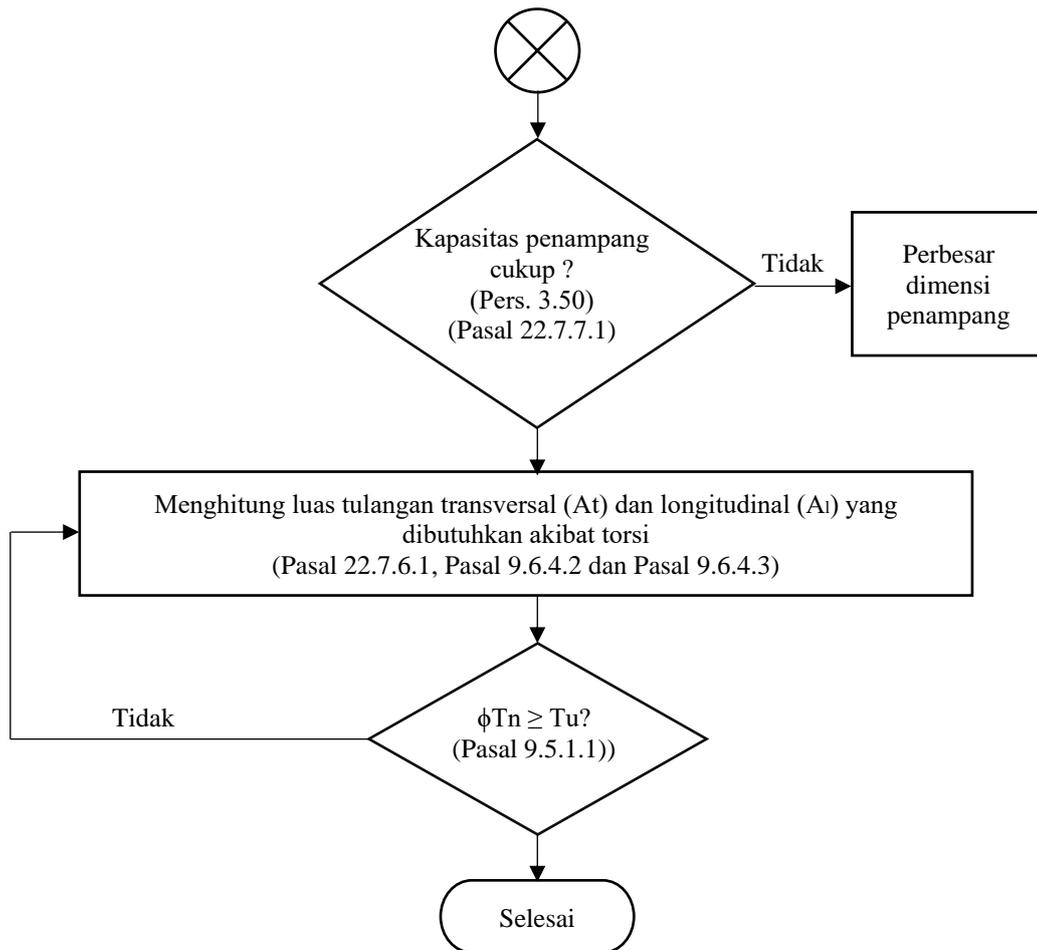
$P_{cp}$  : Keliling penampang balok (mm).

$A_{oh}$  : Keliling penampang balok dengan as sengkang (mm).

$P_h$  : Luas penampang balok dengan as sengkang (mm<sup>2</sup>).

Prosedur desain tulangan torsi pada balok berdasarkan SNI 2847:2019, dapat dilihat pada diagram alir berikut ini.





Gambar 3.18 Diagram Alir Prosedur Desain Tulangan Torsi Balok

(Sumber : Hasil Analisis Penulis, 2024)

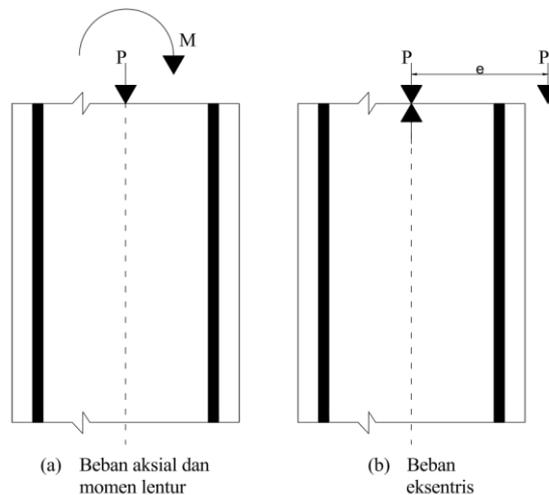
### 3.8 Kolom

Kolom merupakan elemen struktur utama yang memikul beban kombinasi aksial tekan dan momen lentur (Lesmana, 2020). Kolom juga merupakan elemen struktur yang berperan memikul beban lateral pada struktur gedung. Perencanaan elemen struktur kolom diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 10 Hal-211 dan Pasal 18.7 Hal-384.

Berdasarkan kelangsingannya, kolom dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu kolom pendek dan kolom langsing. Perbedaan mendasar dari kedua jenis kolom terletak berdasarkan jenis kerutuhannya. Kolom pendek tergolong keruntuhan material, dimana kolom tersebut hancur akibat beban yang dipikul melebihi dari kekuatan material penyusunnya. Kolom panjang tergolong keruntuhan tekuk, dimana kolom tersebut hancur akibat penampang kolom yang terlalu langsing

sehingga ketika menerima beban aksial tekan lalu mengalami tekuk meskipun belum mencapai batas kekuatan materialnya.

Kolom juga dibedakan menjadi dua akibat sistem struktur dan tipe pembebanan, yaitu kolom tak bergoyang dan kolom bergoyang. Kolom tak bergoyang terjadi pada struktur yang mengalami beban gravitasi yang simetris, sehingga kolom tidak mengalami perpindahan secara lateral. Kolom bergoyang terjadi pada struktur yang mengalami beban gravitasi yang tidak simetris, sehingga membuat kolom mengalami perpindahan lateral (bergoyang).



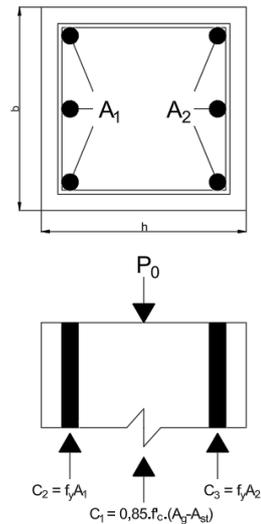
Gambar 3.19. (a) Beban aksial dan momen lentur (b) Beban eksentris

(Sumber: Lesmana, 2020)

Keadaan beban aksial yang bekerja pada kolom, dibedakan menjadi 5 kondisi yaitu, beban aksial sentris, beton tekan menentukan, seimbang, tulangan tarik menentukan, dan beban  $P = 0$ .

a. Kondisi beban sentris

Pada kondisi ini beban bekerja pada sumbu (as) longitudinal kolom, sehingga beton maupun baja tulangan semuanya menahan beban tekan. Kekuatan penampang kolom dianggap semua baja tulangan sudah mencapai leleh dan regangan tekan beton sudah mencapai batas maksimum.



Gambar 3.20. Beban Terkonsentrasi

(Sumber: Lesmana, 2020)

$$P_0 = 0,85f'_c(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y \quad (3.56)$$

Keterangan:

$A_g$  : Luasan penampang kolom

$A_{st}$  : Luasan tulangan longitudinal (memanjang) kolom.

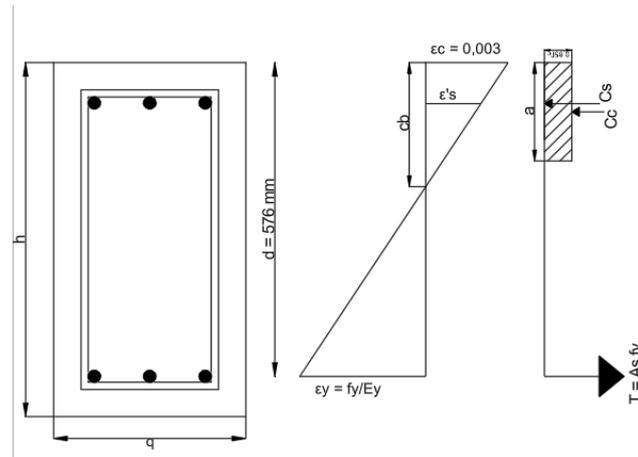
Berdasarkan SNI 2847:2019 Tabel 22.4.2.1 Hal-481, kuat nominal yang digunakan dalam desain tidak boleh melebihi  $0,8P_0$ .

b. Kondisi beton tekan menentukan

Pada kondisi ini kolom terjadi sedikit beban tarik sehingga sebagian baja tulangan tarik belum leleh sedangkan sebagian tetap menahan beban tekan yang cukup besar. Pada sedikit tulangan baja yang terkena tarik belum mengalami leleh, tulangan baja yang mengalami tekan sudah leleh, dan regangan tekan beton telah mencapai batas ultimitnya.

c. Kondisi seimbang

Pada kondisi ini, penampang kolom dalam keadaan seimbang, maka tulangan tarik mengalami kelelahan bersamaan dengan regangan tekan beton mencapai batas ultimitnya.



Gambar 3.21. Kondisi Regangan Berimbang Untuk Penampang Persegi  
(Sumber: Lesmana, 2020)

Sehingga persamaan  $C_c$ ,  $T$ ,  $C_s$ , dan  $P_b$ , sebagai berikut.

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot c_b \cdot \beta_1 \cdot b \quad (3.57)$$

$$T_s = A_s \cdot f_y \quad (3.58)$$

$$C_s = A'_s (f_y - 0,85 f'_c) \quad (3.59)$$

$$P_b = 0,85 \cdot f'_c \cdot c_b \cdot \beta_1 \cdot b + A'_s (f_y - 0,85 f'_c) - A_s f_y \quad (3.60)$$

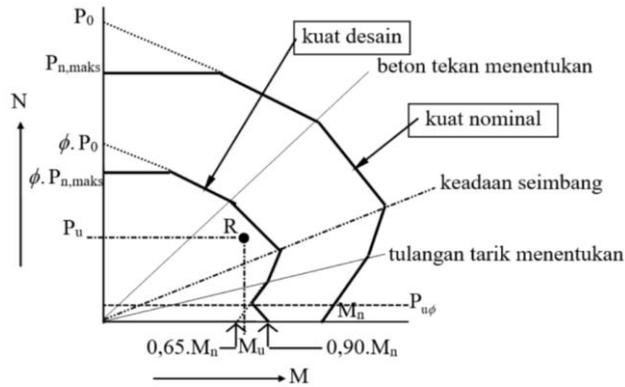
d. Kondisi tulangan tarik menentukan

Pada kondisi ini luas penampang beton tekan semakin kecil, sehingga regangan tekan beton juga semakin kecil. Namun sebaliknya, luas penampang tarik semakin besar, sehingga regangan tulangan tarik melebihi batas leleh.

e. Kondisi beban  $P = 0$

Pada kondisi ini beban aksial  $P=0$  yang berarti kolom hanya menahan momen lentur. Karena hanya menahan momen lentur, maka kolom tersebut dihitung seperti balok biasa.

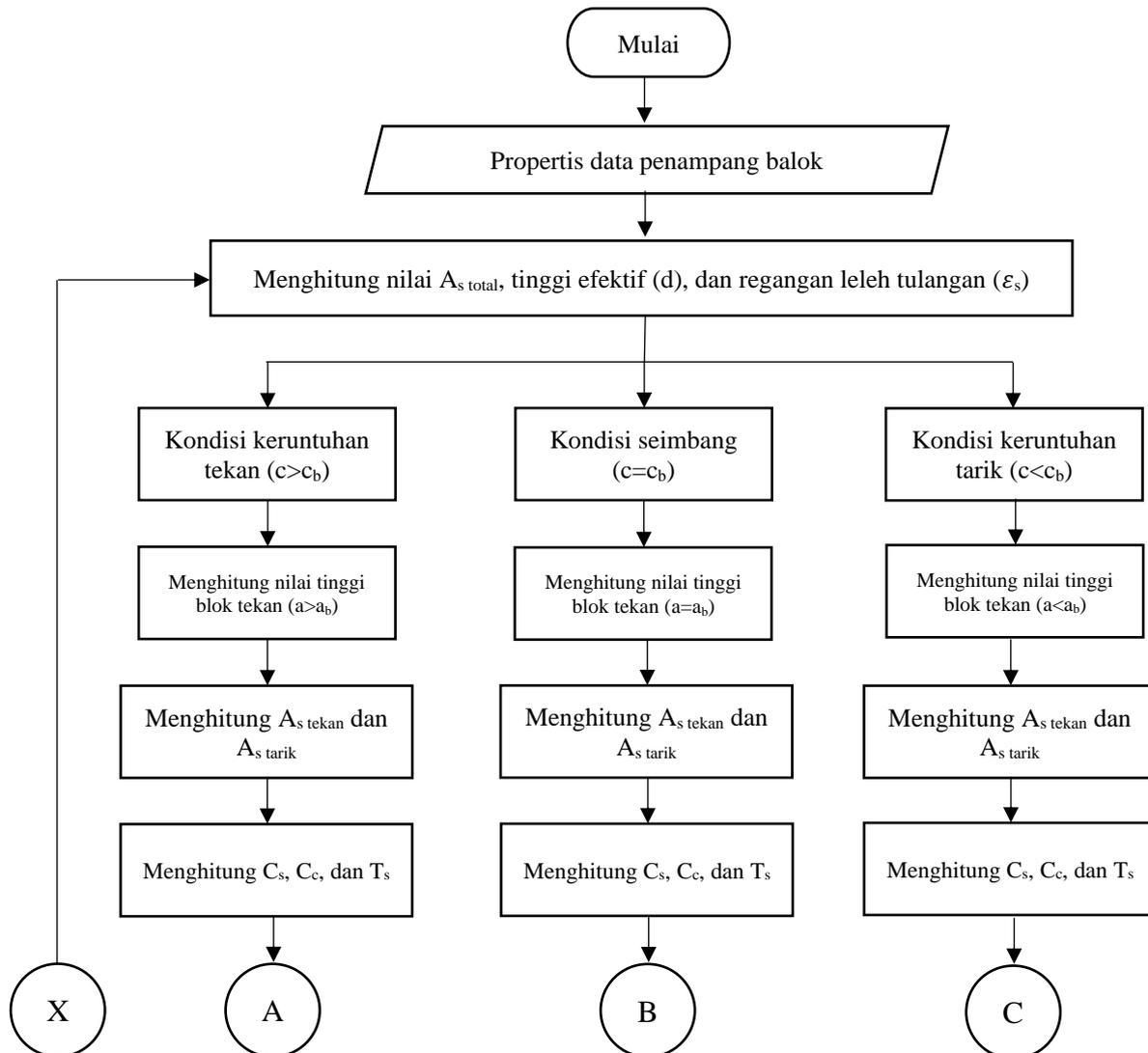
Interaksi dari beban aksial tekan ( $P$ ) dan momen lentur ( $M$ ) diwujudkan dalam sebuah kurva yang dikenal sebagai diagram interaksi  $P$ - $M$  (aksial momen) kolom. Manfaat dari diagram interaksi yaitu dapat memberikan gambaran tentang kekuatan dari kolom

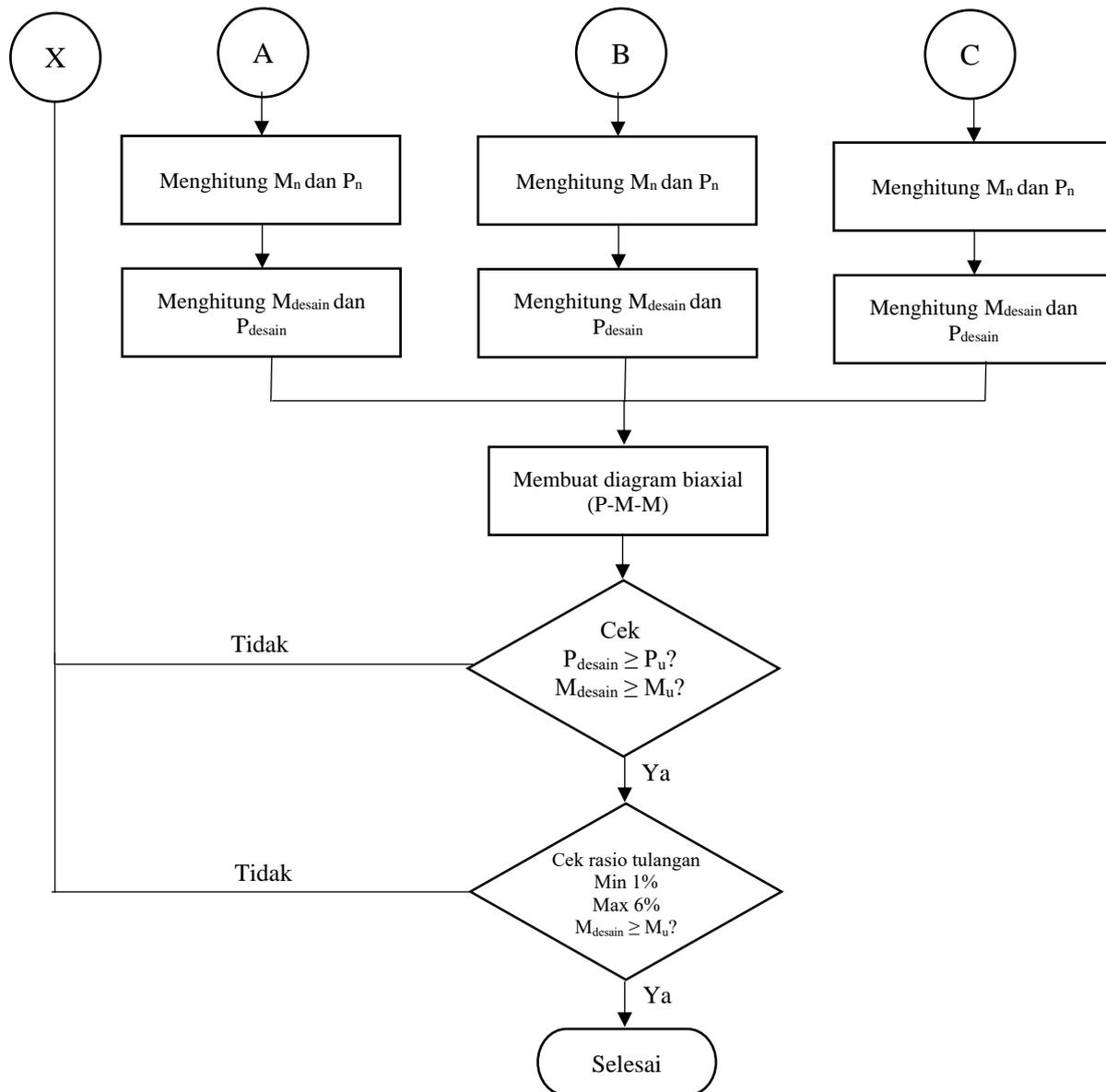


Gambar 3.22. Diagram Interaksi Kolom

(Ir Ali Asroni, n.d.)

Langkah desain tulangan longitudinal pada kolom dapat dilihat pada diagram alir berikut ini.





Gambar 3.23. Diagram Alir Prosedur Desain Tulangan Lentur Kolom

(Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2025)

Dalam mendesain kapasitas kolom, perlu menerapkan konsep *strong column-weak beam* yakni konsep desain struktur dengan menjamin kekuatan kolom lebih besar dibandingkan kekuatan balok. Tujuan konsep ini yaitu saat terjadi beban bolak-balik gempa, sendi plastis yang pertama kali muncul harus pada komponen struktur balok, kemudian selanjutnya muncul pada komponen struktur kolom.

$$\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb} \quad (3.61)$$

Dalam mendesain tulangan geser pada kolom sama halnya dengan yang telah dijelaskan pada konsep geser balok. Hal yang menjadi perbedaan adalah besaran

nilai kuat geser yang berasal dari material beton yaitu  $V_c$ . Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 22.5.6.1 Hal-486, persamaan  $V_c$  untuk elemen kolom adalah

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14.A_g}\right) \lambda \cdot \sqrt{f'c} \cdot b_w \cdot d \quad (3.62)$$

Dimana:

- $N_u$  : Gaya aksial terfaktor
- $A_g$  : Luas penampang kolom
- $\lambda$  : 1,0 (beton normal)
- $d$  : tinggi efektif

Berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 18.7.6.1.1, dijelaskan bahwa gaya geser desain  $V_e$  perlu ditentukan melalui analisis terhadap gaya maksimum yang mungkin timbul di area joint di setiap sisi kolom. Gaya-gaya di joint ini harus dihitung dengan memanfaatkan kekuatan lentur maksimum yang mungkin ada,  $M_{pr}$ , di setiap sisi kolom yang berhubungan dengan beban aksial terfaktor,  $P_u$ , yang diterapkan pada kolom. Gaya geser kolom tersebut tidak boleh melebihi nilai geser yang dihitung berdasarkan kekuatan joint yang terkait  $M_{pr}$  balok yang menghubungkan ke joint. Nilai  $V_e$  tidak diperbolehkan kurang dari geser terfaktor yang didapat dari analisis struktur.

Menurut Anugrah Pamungkas, 2021 menjelaskan bahwa kuat rencana  $V_e$  di tentukan dari 3 hal berikut.

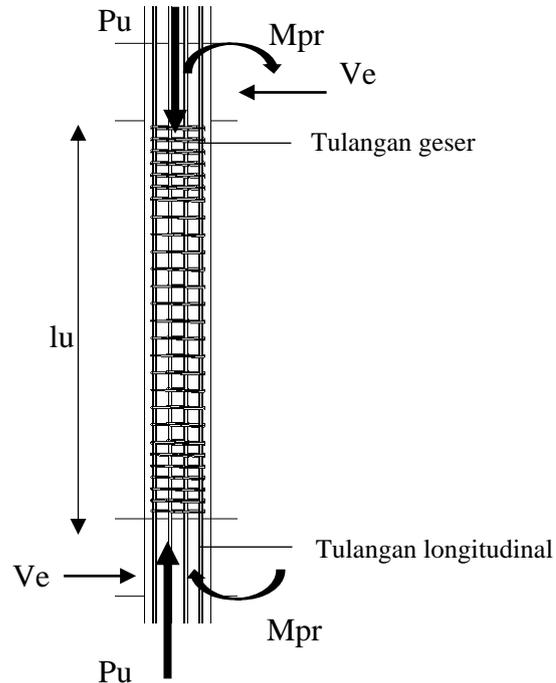
- a. Kapasitas momen kolom yang dihitung berdasarkan tulangan longitudinal kolom yang direncanakan menghasilkan  $V_{e-k}$ .
- b. Kapasitas momen balok menghasilkan  $V_{e-b}$ .
- c. Gaya geser dari hasil perhitungan analisis struktur, menghasilkan  $V_u$ .

Dimana ketiganya harus memenuhi :  $V_u \leq V_{e-k} \leq V_{e-b}$ . Untuk menyusun tulangan geser pada kolom dapat dilakukan langkah-langkah berikut.

- a. Hitung  $V_{e-k}$ , dalam perhitungan  $V_{e-k}$  kualitas baja ditingkatkan menjadi 1,25fy dan faktor reduksi yang diterapkan adalah  $\phi = 1$ , sedangkan nilai  $M_n$  diperoleh dari kombinasi nilai terbesar.

$$M_{pr} = \frac{M_n}{\phi} \quad (3.63)$$

$$V_{e-k} = \frac{M_{prtop} + M_{prbot}}{l_u} \quad (3.64)$$

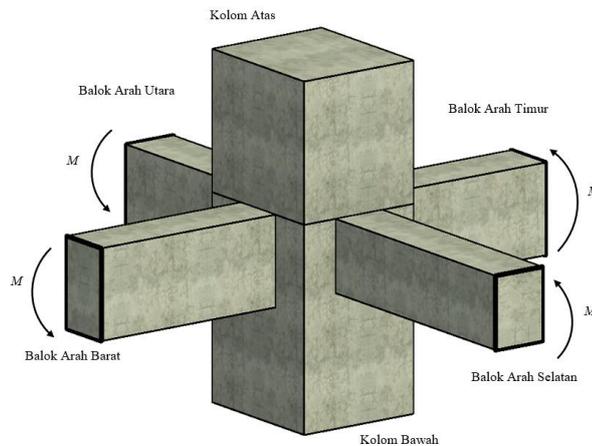


Gambar 3.24 Momen  $M_{pr}$  Kolom

(Sumber: Buku Contoh Laporan Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang, 2021)

- b. Dalam analisis penguatan geser kolom, perhatian juga diberikan kepada momen balok yang ada di sisi kolom pada sumbu-X dan sumbu-Y, serta gaya geser yang dihasilkan oleh balok tersebut. Kualitas baja yang dipakai ditetapkan menjadi  $1,25f_y$ .

$$V_{e-b} = \frac{(M_{pr(Bki)}) + (M_{pr(Bka)})}{l_u} \quad (3.65)$$



Gambar 3.25 Momen Probabilitas Balok Pada Kolom

(Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2025)

- c. Nilai  $V_u$  di dapat dari analisis struktur yang dihasilkan dari bantuan program.
- d. Mencari nilai  $V_c$ , menurut SNI 2847:2019 Pasal 18.7.6.2 untuk nilai  $V_c$  dianggap 0 apabila syarat berikut terpenuhi
  - 1) Gaya geser akibat 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  $A_g f_c' / 20$ .

- e. Menurut SNI 2847:2019 pasal 22.5.10.5.3, nilai  $V_s$  untuk tulangan geser dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$V_{e-k} = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{l_u} \tag{3.66}$$

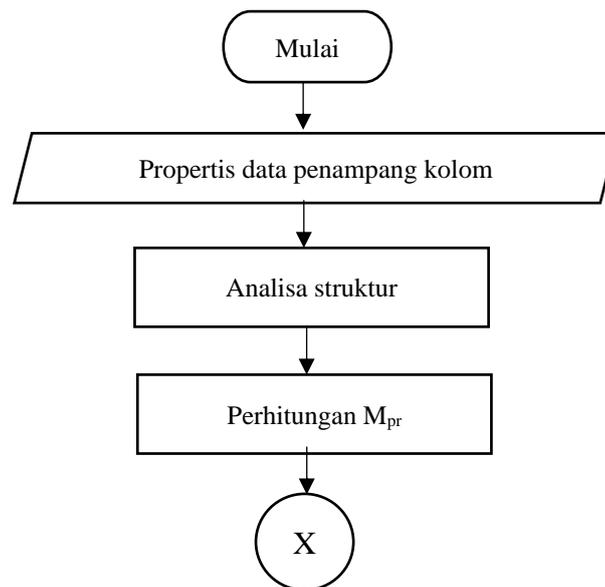
- f. Gaya geser total  $V_n$  yang dapat ditahan oleh beton dihitung dengan persamaan berikut.

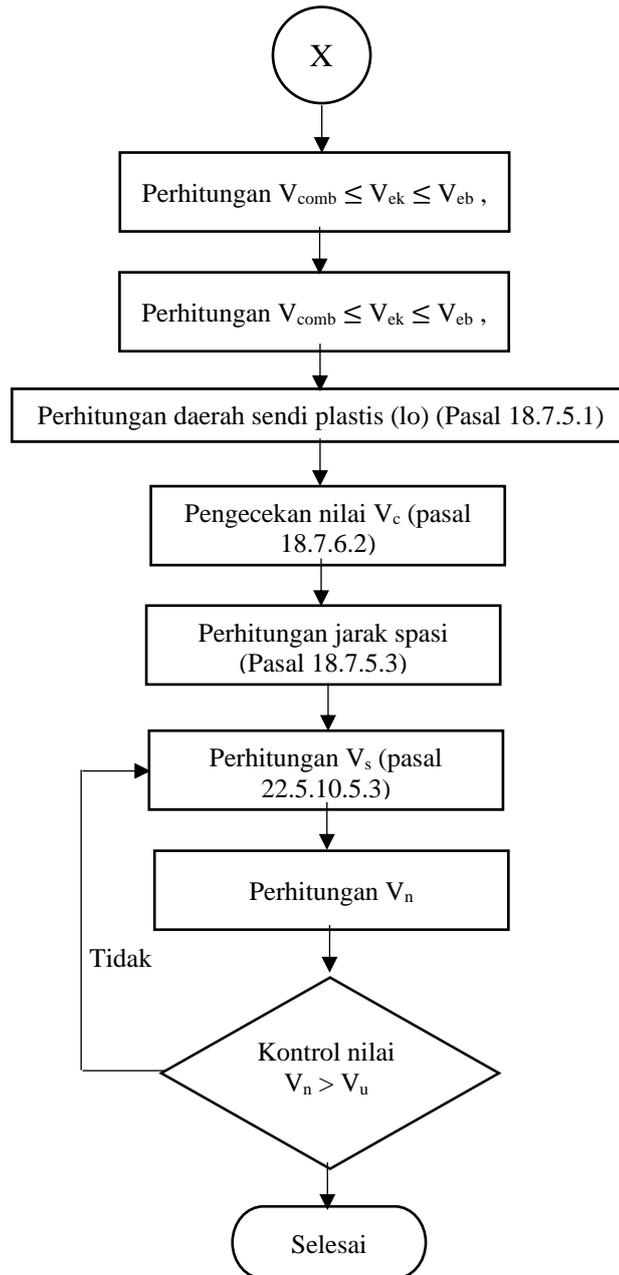
$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) \tag{3.67}$$

Nilai  $\phi V_n$  harus lebih besar dari nilai  $V_e$ .

- g. Kontrol tulangan geser menurut SNI 2847:2019 pasal 10.7.6.5.2 sebagai berikut.
  - 1) Jika  $V_s \leq 0,33 \times \sqrt{f_c} \times b_w \times d$ , maka untuk spasi maksimum kolom nonprategang  $d/2$  atau 600 mm.
  - 2) Jika  $V_s \geq 0,33 \times \sqrt{f_c} \times b_w \times d$ , maka untuk spasi maksimum kolom nonprategang  $d/4$  atau 300 mm.

Adapun diagram alir desain tulangan geser kolom sebagai berikut.





Gambar 3.26 Diagram Alir Perhitungan Tulangan Geser Kolom

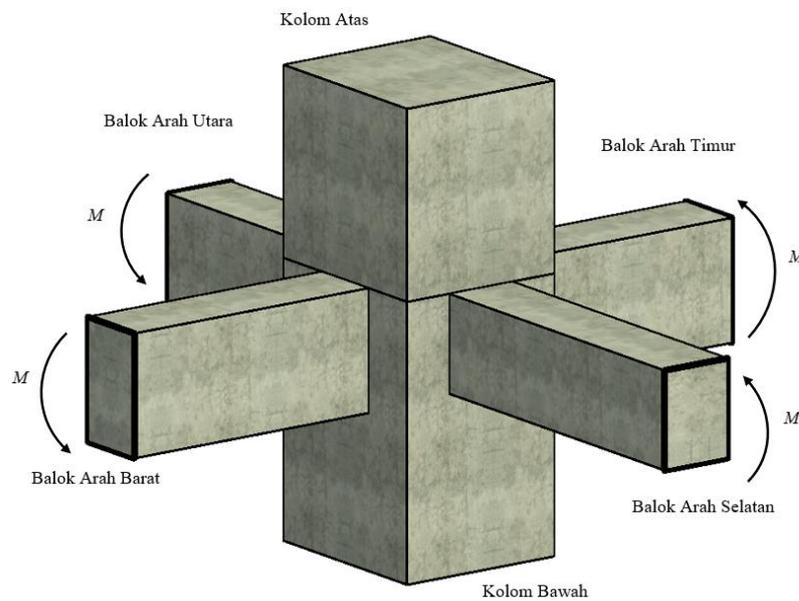
(Sumber : Hasil Analisa Penulis, 2025)

### 3.9 Hubungan Balok-Kolom (HBK)

Perbedaan yang paling terlihat antara struktur SRMK dengan struktur lainnya (SRMB dan SRMM) merupakan dengan adanya perhitungan sambungan balok kolom yang dikenal dengan istilah hubungan balok kolom (HBK) (Lesmana, 2019). HBK yang dimaksud disini merupakan perhitungan menentukan jumlah tulangan

geser (sengkang) yang akan dipasang pada daerah sambungan balok kolom pada struktur.

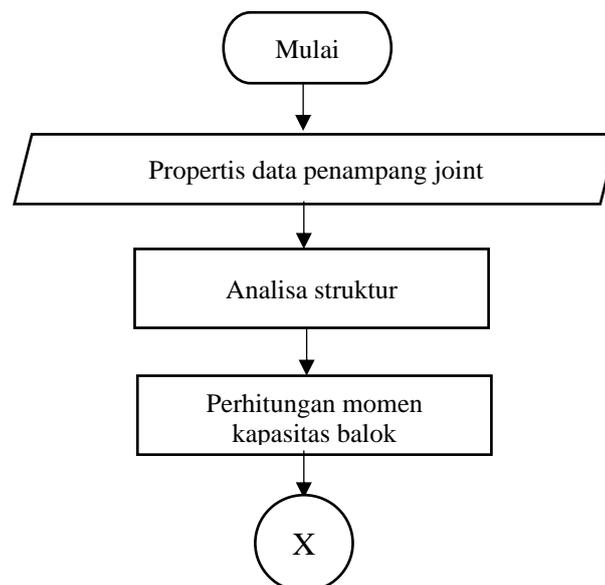
Beberapa gaya yang terjadi seperti gaya tarik pada tulangan, momen akibat balok, dan gaya geser pada ujung kolom dan pada bagian tengah HBK. Kombinasi gaya tersebut bekerja pada satu titik temu yang memiliki potensi kegagalan geser bila tidak direncanakan dengan baik. Untuk mendesain HBK mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 18.8 Hal-392.

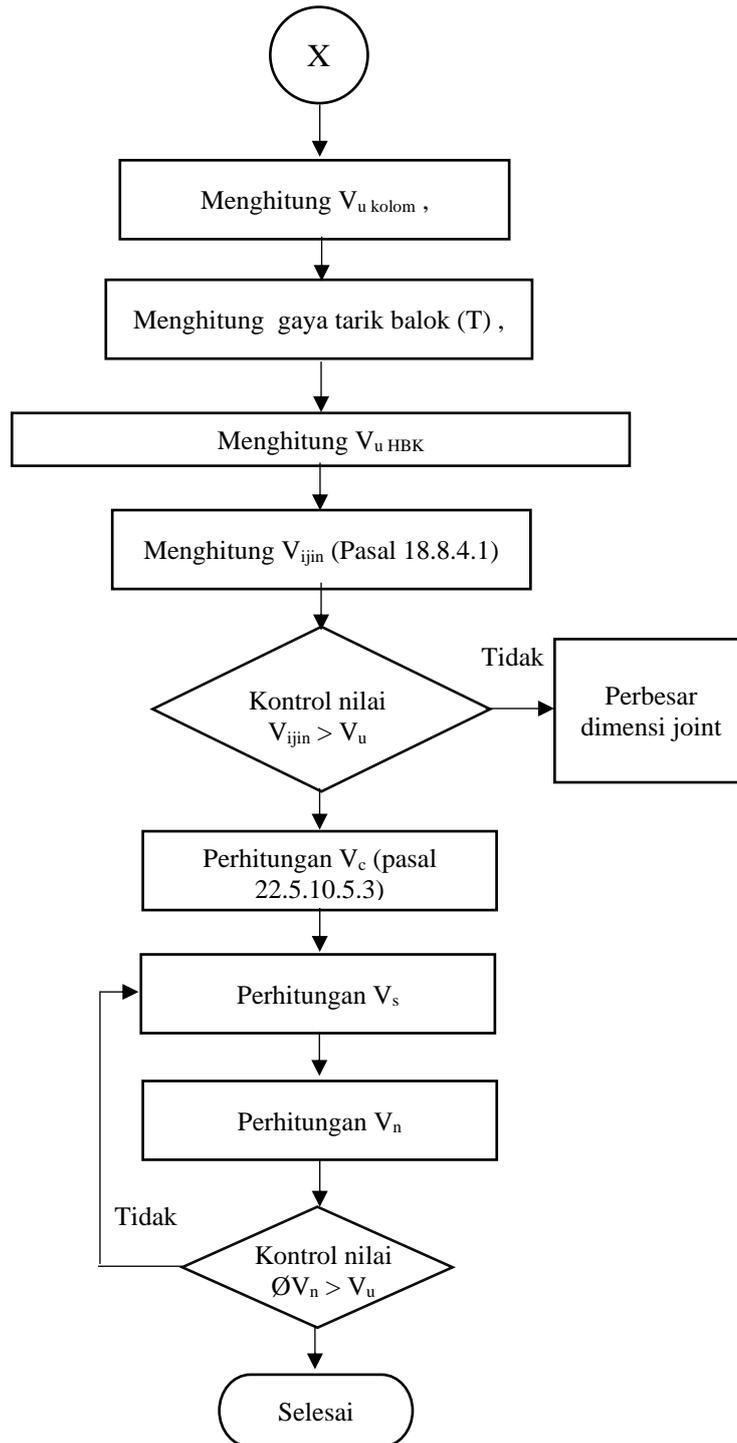


Gambar 3.27 Model 3D Skema Analisis HBK

(Sumber: Lesmana, 2019)

Adapun diagram alir desain tulangan geser joint sebagai berikut.





Gambar 3.28 Diagram Alir Prosedur Desain Tulangan Geser Joint

(Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2025)