

## **BAB 2**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Struktur Beton Bertulang**

Beton menurut SNI 2847:2019 adalah campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Beton bertulang merupakan beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja.

Tulangan ulir dikembangkan untuk meningkatkan kekuatan lekatan antara tulangan dengan beton, yang kemudian disebut baja tulangan deform atau ulir (BjTS), sedangkan untuk baja tulangan polos disingkat BjTP. Sifat mekanis baja tulangan diatur dalam SNI 2052:2017.

Selimit beton berfungsi sebagai pelindung tulangan terhadap cuaca, korosi, dan kebakaran. Elemen beton non-prategang yang dicor di tempat harus memiliki ketebalan selimit beton sesuai SNI 2847:2019; pasal 20.6.1.3.

#### **2.2 Faktor Kekuatan**

Kuat rencana suatu komponen struktur sehubungan dengan perilaku lentur, beban normal, geser, dan torsi harus diambil sebagai hasil kali kuat nominal yang dihitung dengan faktor reduksi kekuatan sesuai SNI 2847:2019 Pasal 21.2.1.

#### **2.3 Pembebanan Struktur**

Beban-beban yang bekerja pada struktur diantaranya beban gravitasi dan beban lateral. Beban gravitasi meliputi beban mati dan beban hidup yang membebani struktur, beban lateral dapat berupa beban angin dan beban gempa.

Struktur dan komponen struktur harus direncanakan hingga semua penampang mempunyai kuat rencana minimum sama dengan kuat perlu, yang dihitung berdasarkan kombinasi beban dan gaya terfaktor.

### 2.3.1 Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati ialah beban semua bagian dari suatu gedung yang bersifat tetap, termasuk segala unsur tambahan, komponen arsitektural dan struktural, serta instalasi-instalasi mekanikal elektrik dan *plumbing*. Jenis dan besarnya beban mati yang akan digunakan dijelaskan pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.1 Jenis Beban Mati Rencana

Material Gedung	Besar Beban	Satuan
Beton bertulang	2400	kg/m <sup>3</sup>
Baja	7850	kg/m <sup>3</sup>
Waterproofing membrane	4	kg/m <sup>2</sup>
Air	1000	kg/m <sup>3</sup>
Plafon, rangka, penggantung	18	kg/m <sup>2</sup>
Mekanikal elektrik	15	kg/m <sup>2</sup>
<i>Plumbing</i>	10	kg/m <sup>2</sup>
Adukan per cm tebal (dari semen)	21	kg/m <sup>2</sup>
Penutup lantai (keramik)	24	kg/m <sup>2</sup>
Pasir (jenuh air) per cm tebal	18	kg/m <sup>2</sup>
Pasir (kering) per cm tebal	16	kg/m <sup>2</sup>
Dinding bata ringan tebal 10 cm	120	kg/m <sup>2</sup>
Dinding partisi gypsum 2 sisi	30	kg/m <sup>2</sup>
Usuk, reng, genting	50	kg/m <sup>2</sup>
Alumunium composit panel & rangka hollow	8	kg/m <sup>2</sup>
Curtain Wall 10 mm & rangka hollow	24	kg/m <sup>2</sup>

(Sumber : PPPURG 1987)

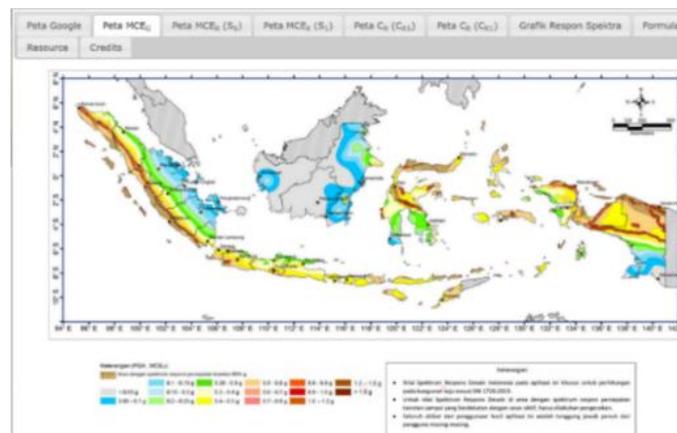
### 2.3.2 Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah beban akibat pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan. Beban hidup yang digunakan dalam perancangan bangunan gedung tidak boleh kurang dari beban merata yang ditetapkan dalam SNI 1727:2020 tabel 4.3-1.

### 2.3.3 Beban Gempa (*Earthquake*)

Gempa bumi adalah fenomena getaran yang dikaitkan dengan kejutan pada kerak bumi. Pada saat bangunan bergetar, timbul gaya dan respon struktur yang dipengaruhi oleh massa, kekakuan struktur, dan periode getar alami.

Setiap wilayah di Indonesia akan memiliki grafik spektrum respons masing-masing, tidak hanya terbatas pada 6 Wilayah Gempa seperti sebelumnya. Di bawah ini adalah peta zona gempa diseluruh wilayah Indonesia.



Gambar 2.1 Peta Gempa Indonesia

(Sumber : SNI 1726:2019)

Prosedur analisis dan desain seismik yang digunakan dalam perencanaan struktur bangunan gedung dan komponennya harus mengacu kepada pasal 7 SNI 1726:2019. Struktur bangunan gedung harus memiliki sistem penahan gaya lateral dan vertikal yang lengkap, sehingga mampu memberikan kekuatan, kekakuan, dan kapasitas disipasi energi yang cukup untuk menahan gerak tanah desain dalam batasan-batasan kebutuhan deformasi dan kekuatan yang disyaratkan. Sementara untuk metode analisa beban gempa dinamik digunakan prosedur respon spektrum.

#### 2.3.3.1 Kategori Resiko Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa

Sesuai tabel 3 SNI 1726:2019, untuk berbagai resiko struktur bangunan gedung dan non gedung, pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan  $I_e$  menurut tabel 4 SNI 1726:2019. Faktor keutamaan gempa bergantung pada kategori resiko bangunan mengikuti SNI 1727:2019 tabel 4.

### 2.3.3.2 Parameter Percepatan Terpetakan ( $S_s$ dan $S_1$ )

Berdasarkan SNI 1726:2019,  $S_s$  adalah parameter respons spektral percepatan gempa  $MCE_R$  terpetakan untuk perioda pendek redaman 5 persen.  $S_1$  adalah parameter respons spektral percepatan gempa  $MCE_R$  terpetakan untuk perioda 1,0 detik redaman 5 persen. Nilai  $S_s$  dan  $S_1$  diperoleh dari aplikasi Desain Spektra Indonesia.

### 2.3.3.3 Menentukan Kelas Situs

Klasifikasi situs diatur pada SNI 1726:2019 Pasal 5.3 tabel 5, dan digunakan untuk menentukan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. Klasifikasi kelas situs dilakukan berdasarkan hasil tahanan penetrasi standar lapangan rata-rata.

### 2.3.3.4 Faktor Implifikasi Getaran

Diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada perioda pendek 0,2 detik ( $F_a$ ) dan perioda 1 detik ( $F_v$ ) dalam penentuan respons spektral percepatan gempa  $MCE_R$ . Koefisien situs  $F_a$  dan  $F_v$  mengikuti tabel 6 dan tabel 7 SNI 1726:2019.

### 2.3.3.5 Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko tertarget ( $MCE_R$ ).

Parameter spektrum respons percepatan pada perioda pendek ( $S_{MS}$ ) dan perioda 1 detik ( $S_{M1}$ ) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan persamaan berikut:

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

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

Di mana :

$S_s$  = parameter respons spektral percepatan gempa  $MCE_R$  terpetakan perioda pendek,

$S_1$  = parameter respons spektral percepatan gempa  $MCE_R$  terpetakan perioda 1 detik.

### 2.3.3.6 Parameter Desain Spektral ( $S_{D1}$ dan $S_{DS}$ )

Parameter percepatan spektral desain untuk perioda pendek ( $S_{DS}$ ) dan perioda 1 detik ( $S_{D1}$ ), harus ditentukan dengan persamaan berikut:

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

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

Untuk periode yang lebih kecil dari  $T_0$ , nilai  $S_a$  menggunakan persamaan berikut :

$$S_a = S_{DS} \left( 0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.5)$$

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.6)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.7)$$

### 2.3.3.7 Kategori Desain Seismik

Berdasarkan nilai  $S_{DS}$ ,  $S_{D1}$  dan kategori risiko gedung akan didapatkan dua kategori desain seismik. Nilai yang diambil adalah yang paling besar dari kedua  $K_{DS}$  tersebut.

Tabel 2.2 Kategori Desain Seismik Respons Percepatan Periode Pendek,  $S_{DS}$

Nilai $S_{DS}$	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{D1} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{D1} < 0,50$	C	D
$0,50 \leq S_{D1}$	D	D
Nilai $S_{D1}$	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

(Sumber: SNI 1726:2019, pasal 6.5)

Sistem rangka pemikul momen (SRPM) adalah sistem rangka ruang dimana komponen-komponen struktur balok, kolom, dan sambungan menahan gaya-gaya yang bekerja melalui aksi lentur, geser, dan aksial. SRPM dapat dikelompokkan sebagai berikut:

a) Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB);

Suatu sistem rangka yang memenuhi ketentuan-ketentuan SNI beton pasal 1-20 dan 22, serta Pasal 21.1.2 dan 21.2. Sistem rangka ini pada dasarnya memiliki tingkat daktilitas terbatas dan hanya cocok digunakan untuk bangunan yang dikenakan maksimal  $K_{DS}$  B.

b) Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM);

Suatu sistem rangka yang selain memenuhi ketentuan-ketentuan untuk rangka pemikul momen biasa juga memenuhi ketentuan detailing pasal 21.1.2 dan 21.1.8 serta 21.3. Sistem ini pada dasarnya memiliki tingkat daktilitas sedang dan dapat digunakan untuk bangunan yang dikenakan maksimum  $K_{DS}$  C.

c) Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK);

Suatu sistem rangka yang selain memenuhi ketentuan-ketentuan untuk rangka pemikul momen biasa juga memenuhi ketentuan-ketentuan Pasal 21.1.2 hingga 21.1.8, Pasal 21.5 hingga 21.8, serta Pasal 21.11 hingga 21.13. Sistem ini memiliki tingkat daktilitas penuh dan harus digunakan untuk bangunan yang dikenakan  $K_{DS}$  D, E atau F.

Sistem struktur yang dipilih harus sesuai dengan batasan dan memperhatikan koefisien dalam jenis sistem struktur sesuai dengan SNI 1726:2019 pasal 7.2.2 tabel 12.

### 2.3.3.8 Koefisien Respon Seismik

Koefisien respons seismik ( $C_s$ ) harus ditentukan sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan pada SNI 1726:2019 pasal 7.8.1.1:

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

Dimana :

$S_{DS}$  = parameter percepatan spektrum respons desain rentang periode pendek

$I_e$  = faktor keutamaan gempa yang ditentukan kategori risiko

$R$  = faktor modifikasi respons (ditentukan oleh sistem penahan gempa yang dipilih)

Nilai  $C_s$  yang dihitung  $\leq$  dari:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{T \left( \frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.9)$$

Dan  $C_s \geq$  dari :

$$C_s = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (2.10)$$

Untuk struktur yang berlokasi di daerah dimana  $S_1$  sama dengan atau lebih besar dari 0,6g, maka  $C_s$  harus tidak kurang dari:

$$C_s = \frac{0,5 S_1}{\left( \frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.11)$$

dimana:

$S_{D1}$  = parameter percepatan spektrum respons desain pada periode 1 detik

$T$  = periode fundamental struktur (detik)

$S_1$  = parameter percepatan spektrum respons maksimum

### 2.3.3.9 Distribusi Gaya Vertikal

Gaya gempa lateral ( $F_x$ ), dalam kN, yang timbul di semua tingkat harus ditentukan dari persamaan:

$$F_x = C_{vx} \cdot V \quad (2.12)$$

$$C_{vx} = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \quad (2.13)$$

Keterangan :

$C_{vx}$  = faktor distribusi vertikal

$V$  = gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur, kilonewton (kN)

$w_i$  dan  $w_x$  = bagian berat seismik efektif total struktur ( $W$ ) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat  $i$  atau  $x$ .

$h_i$  dan  $h_x$  = tinggi dari dasar sampai tingkat  $i$  atau  $x$ , dinyatakan dalam meter

k = untuk struktur yang mempunyai perioda sebesar 2,5 detik atau lebih,  
 k = 2 untuk struktur yang mempunyai perioda antara 0,5 dan 2,5  
 detik, k harus sebesar 2 atau harus ditentukan dengan interpolasi linier  
 antara 1 dan 2.

### 2.3.3.10 Distribusi Gaya Horizontal

Distribusi horizontal gaya gempa, geser tingkat desain gempa disemua tingkat ( $V_x$ ) (kN) harus ditentukan persamaan berikut:

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad (2.14)$$

Keterangan :

- $F_i$  adalah bagian dari geser dasar seismik ( $V$ ) yang timbul ditingkat I, dinyatakan dalam kilo newton (kN)
- Geser tingkat desain gempa ( $V_x$ ) (kN) harus didistribusikan pada berbagai elemen vertikal system penahan gaya gempa ditingkat yang ditinjau berdasarkan pada kekakuan lateral relative elemen penahan vertikal dan diafragma.

### 2.3.4 Beban Angin

Beban angin adalah semua beban yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang disebabkan oleh tekanan udara. Beban angin desain minimum untuk bangunan gedung tertutup tidak boleh kecil dari 0,77 kN/m<sup>2</sup> dikalikan dengan luas dinding bangunan gedung dan 0,38 kN/m<sup>2</sup> dikalikan dengan luas atap bangunan gedung yang terproyeksikan pada bidang vertikal tegak lurus terhadap arah angin yang diasumsikan. Berdasarkan SNI 1727:2020 untuk menghitung pengaruh angin pada struktur menggunakan parameter sebagai berikut :

#### 1. Kecepatan angin dasar ( $V$ )

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

#### 2. Faktor arah angin ( $K_d$ )

Faktor arah angin ( $K_d$ ) ditentukan dari tabel dibawah ini. Efek arah angin dalam menentukan beban angin didasarkan pada analisis rasional dari kecepatan angin. Faktor arah angin mengacu pada SNI 1727:2020, tabel 26.6-1.

### 3. Kategori eksposur

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

- Kekasaran permukaan B : Daerah perkotaan dan pinggiran kota, daerah berhutan, atau daerah lain dengan penghalang berjarak dekat seukuran tempat tinggal keluarga-keluarga tunggal atau lebih besar dalam jumlah banyak.
- Kekasaran permukaan C : Dataran terbuka dengan penghalang tersebar yang memiliki tinggi umumnya kurang dari 30 ft (9,1 m). Kategori ini mencakup daerah terbuka datar dan padang rumput.
- Kekasaran permukaan D : Permukaan datar, area tanpa halangan dan permukaan air. Kategori ini termasuk hamparan lumpur halus.

Berikut kategori eksposur :

- Eksposur B : untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9,1 m). Eksposur B berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh kekasaran permukaan B, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 1500 ft (475 m). Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata lebih dari 30 ft (9,1 m), eksposur B berlaku bilamana kekasaran permukaan B beradaa dalam arah melawan angin untuk jarak lebih besar dari 2600 ft (792 m) atau 20 kali lebih tinggi bangunan atau struktur, pilih yang terbesar.
- Eksposur C : eksposur C berlaku untuk semua kasus dimana eksposur B atau ekspour D tidak berlaku.
- Eksposur D : eksposur D berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah sebagaimana ditentukan oleh kekasaran permukaan D, berlaku di arah

melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 5000 ft (1524 m) atau 20 kali lebih tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar. Eksposur D juga berlaku bilamana kekerasan permukaan tanah dekat dari situs dalam arah melawan angin adalah B atau C, dan situs yang berada dalam jarak 600 ft (183 m) atau 20 kali lebih tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar, dari kondisi eksposur D sebagaimana ditentukan dalam kalimat sebelumnya.

4. Faktor topografi ( $K_{zt}$ )

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

5. Faktor elevasi permukaan tanah ( $K_e$ )

Faktor elevasi permukaan tanah untuk menyesuaikan densitas udara ( $K_e$ ) harus ditentukan sesuai dengan tabel dibawah ini. Untuk semua elevasi boleh diambil nilai  $K_e = 1$ .

6. Faktor efek hambusan angin ( $G$ )

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

7. Koefisien eksposur tekanan kecepatan

Berdasarkan kategori eksposur yang sudah ditentukan, koefisien eksposur tekanan kecepatan ( $K_z$  atau  $K_h$ ) ditentukan dengan rumus dibawah ini :

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

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

Nilai  $\alpha$  dan  $z_g$  ditentukan dari SNI 1727:2020 tabel 26.11-1.

8. Koefisien tekanan internal ( $GC_{pi}$ )

Koefisien tekanan internal ( $GC_{pi}$ ) ditentukan berdasarkan pada klasifikasi ketertutupan bangunan gedung ditentukan dari SNI 1727:2020 pasal 26.13-1. U

9. Koefisien tekanan eksternal ( $C_p$ )

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

Tabel 2.3 Koefisien Tekanan Eksternal Dinding ( $C_p$ )

Permukaan	L/B	$C_p$	Digunakan dengan
Angin datang	Seluruh nilai	0,8	$q_z$
Angin pergi	0 - 1	- 0,5	$q_h$
	2	- 0,3	$q_h$
	$\geq 4$	- 0,2	$q_h$
Dinding tepi	Seluruh nilai	- 0,7	$q_h$

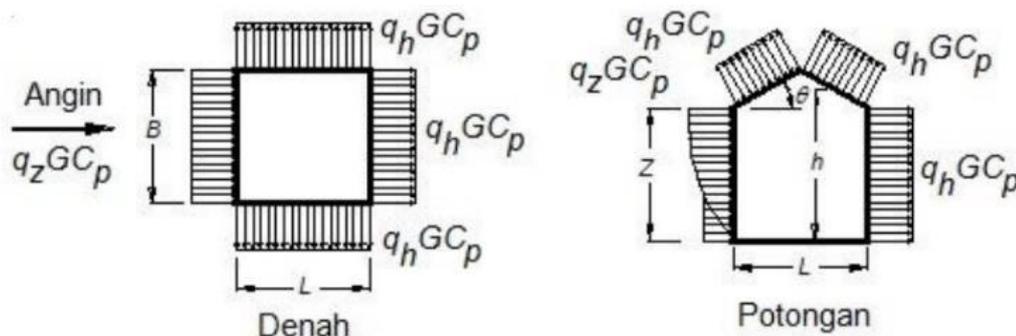
(Sumber: SNI 1727:2020)

Tabel 2.4 Koefisien Tekanan Atap Eksternal Atap ( $C_p$ )

Koefisien tekanan atap ( $C_p$ ) untuk digunakan $q_h$							
Arah angin	h/L	Di sisi angin datang			Di sisi angin pergi		
		Sudut, $\theta$ (derajat)			Sudut, $\theta$ (derajat)		
		10	15	20	10	15	$\geq 20$
Tegak lurus terhadap bubungan untuk $\theta \geq 10^\circ$	$\leq 0,25$	-0,7	-0,5	-0,3	-0,3	-0,5	-0,6
		-0,18	0,0 <sup>a</sup>	0,2			
		-0,9	-0,7	-0,4			
	0,5	-0,18	-0,18	0,0 <sup>a</sup>	-0,5	-0,5	-0,6
		-1,3 <sup>b</sup>	-1,0	-0,7			
	$\geq 1$	-0,18	-0,18	-0,18	-0,7	-0,6	-0,6

(Sumber: SNI 1727:2020)

Berikut ini gambar sistem penahan gaya angin utama



Gambar 2.2 Sistem Penahan Gaya Utama

(Sumber: SNI 1727:2020)

Perhitungan tekanan angin desain untuk SPGAU bangunan gedung pada ketinggian dalam  $\text{lb/ft}^2$  ( $\text{N/m}^2$ ) harus ditentukan oleh persamaan berikut :

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (2.15)$$

Tekanan kecepatan velositas sebagai berikut :

$$q_z = 0,613K_zK_{zt}K_dK_eV^2 \text{ (N/m}^2\text{) } V \text{ dalam m/s} \quad (2.16)$$

Dimana :

- $q$  =  $q_z$  untuk dinding sisi angin datang dan  $q_h$  untuk dinding sisi angin pergi  
 $G$  = Faktor efek hembusan angin  
 $C_p$  = Koefisien tekanan eksternal

### 2.3.5 Kombinasi Pembebanan

Besar faktor beban yang diberikan untuk masing-masing beban yang bekerja pada suatu penampang struktur akan berbeda-beda tergantung dari jenis kombinasi beban yang bersangkutan. Agar struktur dan komponen struktur memenuhi syarat kekuatan dan layak pakai terhadap bermacam-macam kombinasi beban, maka harus dipenuhi ketentuan dari kombinasi-kombinasi beban berfaktor sebagai berikut :

Tabel 2.5 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi Beban	Beban Utama	Persamaan
$U = 1,4D$	$D$	(a)
$U = 1,2D + 1,6L + 0,5(Lr \text{ atau } R)$	$L$	(b)
$U = 1,2D + 1,6(Lr \text{ atau } R) + (1,0L \text{ atau } 0,5W)$	$Lr \text{ atau } R$	(c)
$U = 1,2D + 1,0W + 1,0L + 0,5(Lr \text{ atau } R)$	$W$	(d)
$U = 1,2D + 1,0E + 1,0L$	$E$	(e)
$U = 0,9D + 1,0W$	$W$	(f)
$U = 0,9D + 1,0E$	$E$	(g)

(Sumber: SNI 2847:2019, pasal 5.3)

## 2.4 Perencanaan Desain Struktur Atas

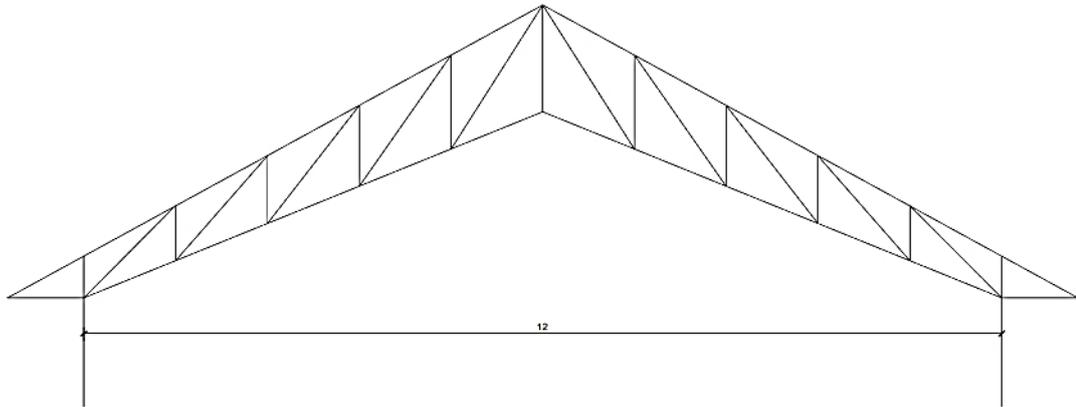
Struktur atas suatu gedung adalah seluruh bagian struktur gedung yang berada di atas muka tanah. Komponen-komponen struktur atas gedung meliputi struktur atap, balok, pelat, kolom, tangga, *shear wall*, dan *basement*.

### 2.4.1 Rangka Atap Baja

Perencanaan struktur rangka atap ini menggunakan konstruksi kuda-kuda rangka batang (*frame truss*). Perhitungan gaya dalam kuda – kuda menggunakan

program ETABS v18.1.1. Perencanaan konstruksi atap berpedoman pada SNI 1729:2020 Tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural.

Terdapat 4 atap kuda-kuda pada perencanaan struktur atap gedung *student center* Politeknik Negeri Indramayu. Berikut adalah gambar rencana kuda kuda K4.



Gambar 2.3 Rencana Kuda-kuda K4

Tahapan perencanaan rangka atap baja akan dijelaskan di bawah ini.

### 2.5.1.1 Perencanaan Panjang Truss

### 2.5.1.2 Perencanaan Gording

Pembebanan pada gording meliputi :

#### a. Beban Mati (DL)

- Berat penutup atap :  
= jarak gording x berat penutup atap per m<sup>2</sup> (kg/m)
- Berat sendiri gording

$$qx = q \cdot \sin \alpha \quad (2.17)$$

$$qy = q \cdot \cos \alpha \quad (2.18)$$

Keterangan: qx = beban mati arah x (kg/m).

qy = beban mati arah y (kg/m).

$\alpha$  = sudut kemiringan (°).

#### b. Beban hidup (LL)

Beban hidup diperhitungkan sebesar  $P = 100$  kg, berdasarkan 1727:2020. Beban hidup berada di tengah bentang gording, beban ini diperhitungkan jika ada orang yang bekerja di atas gording.

$$PLx = PL \cdot \sin \alpha \quad (2.19)$$

$$PLy = PL \cdot \cos \alpha \quad (2.20)$$

Keterangan :  $PLx$  = beban hidup arah x (kg).

$PLy$  = beban hidup arah y (kg).

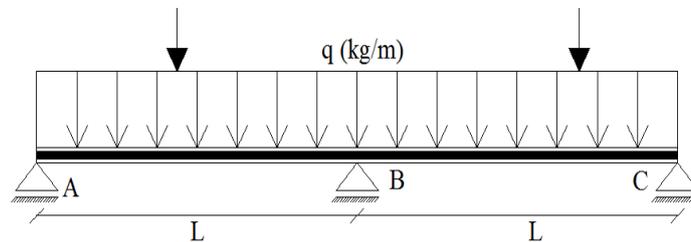
### c. Beban Angin (WL)

Beban angin diperhitungkan dengan menganggap adanya tekanan positif ( $W_t$ ) dan tekanan negatif ( $W_h$ ). Ketentuan beban angin mengikuti SNI 1727:2020.

- 1) Lokasi = Kab. Indramayu
- 2)  $V$  angin = 10,9 m/s (BMKG Kab. Majalengka)
- 3)  $W_{tekan}$  =  $C_{tk} \cdot G \cdot q \cdot \text{Jarak gording}$
- 4)  $W_{hisap}$  =  $C_{hs} \cdot G \cdot q \cdot \text{Jarak gording}$

#### 2.5.1.3 Momen Maksimum pada Gording

Gording diletakan di atas beberapa kuda-kuda, sehingga digambarkan sebagai balok menerus. Momen pada gording dapat dihitung dengan menggunakan metode persamaan 3 momen (*clapeyron*).



Gambar 2.4 Gaya yang Bekerja pada Gording

Dimana, momen pada bentang A-B-C dicari dengan persamaan :

$$M_A \left( \frac{L_1}{I_1} \right) + 2M_B \left( \frac{L_1}{I_1} + \frac{L_2}{I_2} \right) + M_C \left( \frac{L_2}{I_2} \right) = - \frac{6(A_1 + A_2) \cdot \alpha_1}{I_1 \cdot L_1} - \frac{6(A_1 + A_2) \cdot \alpha_2}{I_2 \cdot L_2} \quad (2.21)$$

#### 2.5.1.4 Kontrol Tegangan dan Lendutan Terhadap Momen

##### 1. Kontrol Tegangan

Kontrol tegangan dasar diperhitungkan sesuai menurut SNI 1729:2020.

$$\bar{\sigma} = \frac{f_y}{1,5} \quad (2.22)$$

Akibat beban tetap, yaitu beban mati + beban hidup.

$$\sigma = \frac{M_x}{\omega_y} + \frac{M_y}{\omega_x} \leq \bar{\sigma} \quad (2.23)$$

Beban sementara yaitu beban mati, beban hidup, beban angin, beban hujan, maka besarnya tegangan dasar dapat dinaikan sebesar 30%.

$$\sigma = \frac{M_x}{\omega_y} + \frac{M_y}{\omega_x} \leq 1,3 \bar{\sigma} \quad (2.24)$$

Keterangan :  
 $\sigma$  = tegangan yang bekerja (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\bar{\sigma}$  = tegangan ijin maksimal (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $M_x$  = beban arah x (kgm).  
 $M_y$  = beban arah y (kgm).

## 2. Kontrol Lendutan

Lendutan maksimum akibat beban tetap menurut SNI 1729:2020 adalah:

$$F < \frac{1}{250} L \quad (2.25)$$

Lendutan yang terjadi dihitung menggunakan rumus berikut :

$$f_x = \frac{5 \cdot q_x \cdot L^4}{348 \cdot E \cdot I_y} + \frac{1 \cdot P_x \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_y} \quad (2.26)$$

$$f_y = \frac{5 \cdot q_y \cdot L^4}{348 \cdot E \cdot I_x} + \frac{1 \cdot P_y \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x} \quad (2.27)$$

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad \text{ketentuan : } f \leq F$$

Keterangan:  
 $f_x$  = lendutan arah x (cm)  
 $f_y$  = lendutan arah y (cm)  
 $E$  = modulus elastisitas (MPa).  
 $I_x$  = momen inersia penampang x (cm<sup>4</sup>).  
 $I_y$  = momen inersia penampang y (cm<sup>4</sup>).

### 2.5.1.5 Perencanaan Sagrod

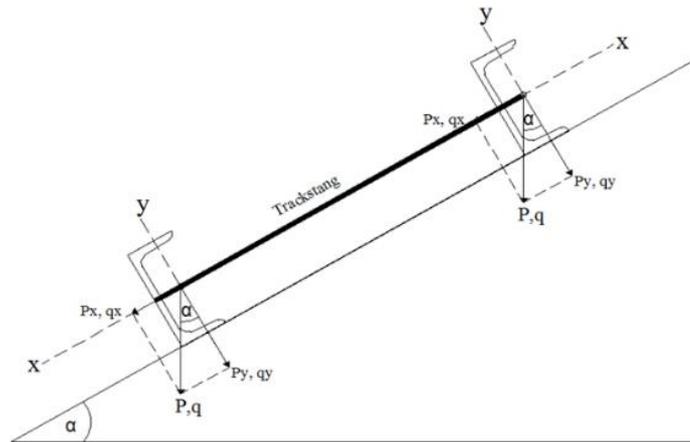
Batang tarik (*Trackstang*) atau dikenal dengan sagrod berfungsi untuk mengurangi lendutan gording pada arah sumbu x (miring atap) sekaligus untuk tegangan lendutan yang timbul pada arah x. Beban-beban

yang dipikul oleh treckstang yaitu sejajar bidang atap (sumbu x), maka gaya yang bekerja adalah gaya tarik  $G_x$  dan  $P_x$ .

$G_x$  = berat sendiri gording + penutup atap sepanjang sumbu x

$P_x$  = beban hidup arah sumbu x

$P_{total} = G_x + P_x = (q_x \cdot L) + P_x$



Gambar 2.5 Rencana Batang Tarik

Jika batang tarik yang dipasang dua buah, maka per batang tarik adalah:

$$P = \frac{P_{total}}{2} = \frac{(q_x \cdot L) + P_x}{2} \quad (2.28)$$

$$= \frac{P}{Fn} \leq \bar{\sigma} \quad (2.29)$$

$$Fn = \frac{P}{\bar{\sigma}} \quad (2.30)$$

Keterangan:

$P$  = beban hidup

$Fn$  = gaya yang terjadi

$q_x$  = beban mati arah x

$\sigma$  = tegangan yang bekerja

$L$  = lebar bentang

$\bar{\sigma}$  = tegangan ijin

### 2.5.1.6 Pembebanan Kuda-Kuda

#### 1. Beban Mati ( $q_D$ )

Beban mati terdiri dari berat penutup atap, berat sendiri gording, dan berat penutup plafon dan alat pengangtung

#### 2. Beban Hidup ( $q_L$ )

Beban hidup diperhitungkan sebesar  $P = 100 \text{ kg}$  (SNI 1727:2020).

### 3. Beban Angin (qW)

$$a) \text{ Angin Tekan (W)} = C_{tk} \cdot G \cdot q \cdot l$$

Beban angin per joint :

$$P = W \times \text{jarak gording} \times \text{jarak kuda-kuda}$$

Distribusi beban angin terhadap arah horizontal (x) dan vertikal (y)

$$\text{yaitu : } W_{tx} = P \sin \alpha$$

$$W_{ty} = P \cos \alpha$$

$$b) \text{ Angin Hisap (W)} = C_{hs} \cdot G \cdot q \cdot l$$

Beban angin per joint :

$$P = W \times \text{jarak gording} \times \text{jarak kuda-kuda}$$

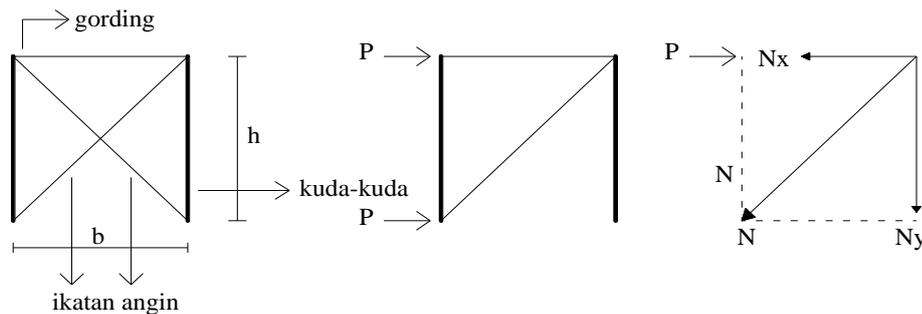
Sementara itu, distribusi beban angin terhadap arah horizontal (x) dan vertikal (y) yaitu sebagai berikut :

$$W_{hx} = P \sin \alpha$$

$$W_{hy} = P \cos \alpha$$

#### 2.5.1.7 Ikatan Angin

Ikatan angin (*bracing*) hanya bekerja menahan gaya normal (*axial*). Cara kerja ikatan angin (*bracing*) adalah jika salah satu ikatan angin bekerja sebagai batang tarik, maka yang lainnya tidak menahan gaya apapun, begitupun sebaliknya.



Gambar 2.6 Pembebanan Pada Ikatan Angin

$$\beta = \arctan \left( \frac{\text{panjang sisi miring}}{\text{jarak kuda-kuda}} \right) \quad (2.31)$$

$$\sum H = 0 \rightarrow N_x = P \quad (2.32)$$

$$N \cos \beta = P \quad (2.33)$$

$$N = P / \cos \beta \quad (2.34)$$

$$Fn = N / \bar{\sigma} \quad (2.35)$$

$$Fbr = 125\% Fn \quad (2.36)$$

$$Fbr = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (2.37)$$

$$d = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \cdot Fbr}{\pi}} \quad (2.38)$$

### 2.5.1.8 Perencanaan Sambungan

Sambungan baut adalah Jenis sambungan yang paling banyak digunakan pada rangka baja. parameter sambungan baut sebagai berikut:

- Minimal dipakai 2 buah baut
- Jarak minimum antar baut =  $3 \times df \rightarrow$  ( $df$  = diameter baut)
- Jarak minimum baut menuju ujung profil =  $1,5 \times df$

Kuat tumpu pelat yang mengalami kontak dengan baut ditentukan dengan rumus berikut berdasarkan SNI 1729:2020 :

- 1) Tegangan dasar

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}^l / 1,5 \quad (2.39)$$

- 2) Tegangan geser baut

$$\bar{\sigma}_{gs} = 0,6 \bar{\sigma} \quad (2.40)$$

- 3) Tegangan tarik baut

$$\bar{\sigma}_{tr} = 0,7 \bar{\sigma} \quad (2.41)$$

- 4) Tegangan tumpu/desak

$$\bar{\sigma}_{tu} = 1,5 \bar{\sigma} \rightarrow S_1 \geq 2d \quad (2.42)$$

$$\bar{\sigma}_{tu} = 1,2 \bar{\sigma} \rightarrow 1,5d \leq S_1 \leq 2d \quad (2.43)$$

- 5) Menentukan kekuatan satu baut

$$N_{gs} = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times \sigma_{gs} \quad (2.44)$$

$$N_{tp} = t \times d \times \bar{\sigma}_{tu} \quad (2.1)$$

- 6) Jumlah baut yang dibutuhkan

$$n = \frac{N}{N'} \quad (2.45)$$

Keterangan:

$S$  = jarak dari sumbu baut yang paling luar ke tepi bagian yang disambung (mm)

$D$  = diameter baut (mm)

$\bar{\sigma}$  = tegangan dasar ( $\text{kg/cm}^2$ )

- 7) Banyaknya baut yang dipasang pada satu baris yang sejajar arah gaya tidak boleh lebih dari 5 buah.
- 8) Jarak antara sumbu baut paling luar ke tepi atau ke ujung bagian yang disambung, tidak boleh kurang dari  $1,2 d$  dan tidak boleh lebih besar dari  $3 d$  atau  $6 d$ . Dimana  $t$  merupakan tebal terkecil bagian yang disambungkan.
- 9) Pada sambungan yang terdiri dari suatu baris baut, jarak dari sumbu ke sumbu dari 2 baut yang berurutan tidak boleh kurang dari  $2,4 d$  dan boleh lebih dari  $7 d$  atau  $14 t$ .

#### 2.5.1.9 Stabilitas Plat Sambung

Stabilitas kekuatan antara plat sambung dengan sambungan lubang baut agar tidak terjadinya kegagalan konstruksi atau terjadinya robekan pada plat.

$$F_{br} = b \cdot t \quad (2.46)$$

$$F_n = (b \cdot t) - (d + 2 \text{ mm}) \cdot t \cdot n \quad (2.47)$$

$$\sigma = T / F_n < f_y \quad (2.48)$$

$$S = F_n \cdot \bar{\sigma} > T \quad (2.49)$$

#### 2.5.1.10 Perencanaan Struktur Baja Menggunakan ETABS Versi 18.1.1

Tahapan analisis gaya batang pada rangka atap baja menggunakan program ETABS versi 18.1.1 sebagai berikut:

1. Menggambar model atap dengan model *2D trusses* dengan tumpuan sendi-rol serta panjang batang sesuai perhitungan.

2. Mendefinisikan beban yang bekerja pada atap.
3. Masukkan beban yang bekerja, seperti beban mati, beban hidup, beban angin kanan dan beban angin kiri.
4. *Run analysis*, untuk mendapat gaya dalam pada setiap batang.
5. Cek dimensi profil batang hasil perhitungan batang tarik dan batang tekan.

## 2.4.2 Pelat Lantai

Pelat adalah elemen horizontal struktur yang mendukung beban mati maupun beban hidup dan menyalurkannya ke rangka vertikal dari sistem struktur. Pelat beton bertulang ini sangat kaku dan arahnya horizontal, sehingga pada bangunan gedung, pelat ini berfungsi sebagai diafragma / unsur pengaku horizontal yang sangat bermanfaat untuk mendukung kekakuan balok portal.

### 2.4.2.1 Pelat Satu Arah

Pelat satu arah merupakan jenis pelat yang mengalami lendutan pada satu arah sumbu saja. Arah lendutan pada pelat satu arah terjadi pada arah memendek dari bentang pelat. Tulangan lentur yang digunakan sesuai dengan arah lendutan yang terjadi. Suatu pelat dikatakan satu arah jika  $\frac{L_y}{L_x} \geq 2$ .  $L_y$  merupakan sisi terpanjang, dan  $L_x$  merupakan sisi terpendek dari pelat.

### 2.4.2.2 Ketentuan Umum Desain Pelat Lantai Satu Arah

Ketebalan keseluruhan pelat ( $h$ ) tidak boleh kurang dari batas minimum sesuai persyaratan SNI 2847:2019 pasal 7.3. Tinjauan persyaratan kuat lentur pelat dilakukan dengan pendekatan faktor tahanan ( $R_n$ ) yang bisa digunakan untuk menghitung tinggi efektif ( $d$ ) dari penampang pelat lantai. Hubungan persamaan  $R_n$  dan  $M_n$  adalah.

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} R_n \cdot b d^2 \quad (2.50)$$

Keterangan:

$M_n$  = momen nominal pelat (Nmm)       $b$  = lebar pelat (1000 mm)  
 $M_u$  = momen terfaktor pelat (Nmm)       $d$  = tinggi efektif pelat (mm)

### 2.4.2.3 Sistem Penulangan Pelat Lantai Satu Arah

Sistem penulangan pelat satu arah melibatkan dua jenis tulangan, yaitu tulangan lentur dan tulangan bagi atau susut. Batas minimal tulangan lentur yang dipasang pada pelat diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 7.6.

Luas total penampang ( $A_g$ ) dihitung dengan persamaan

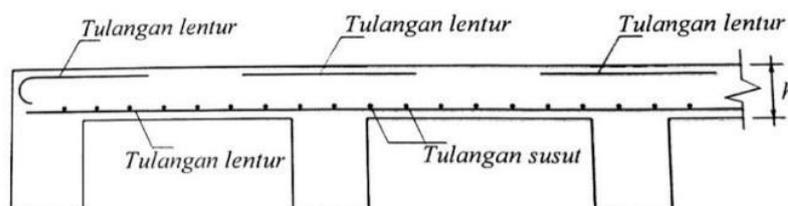
$$A_g = b \cdot h \quad (2.51)$$

dimana :  $b$  = lebar pelat persatuan meter ( $b=1000$ )

Spasi minimum tulangan pelat mengacu SNI 2847:2019 pasal 25.2 adalah nilai terbesar dari 25 mm ;  $d_b$  ; dan  $(4/3)d_{agg}$ .  $d_{agg}$  adalah ukuran nominal agregat maksimum. Sedangkan jarak maksimum tulangan lentur pelat diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 7.7.2.3, yaitu harus kurang dari  $3h$  dan 450 mm.

Tulangan lentur yang digunakan pada pelat adalah tulangan tunggal, yang hanya memperhitungkan tulangan tarik. Pada daerah lapangan, tulangan dipasang di bawah karena pada daerah lapangan mengalami momen positif. Pada daerah tumpuan, tulangan lentur dipasang pada lapisan atas, karena daerah tumpuan mengalami momen negatif sehingga bagian yang tertarik adalah sisi atas pelat.

Tulangan susut pada pelat dipasang tegak lurus dengan tulangan lentur. Tulangan susut dipasang untuk mengantisipasi tegangan dan retak akibat pengaruh perubahan susut dan temperatur dari material beton. Rasio tulangan susut minimum mengacu pada SNI 2847:2019 pasal 24.4.3.2. Spasi tulangan susut dan suhu tidak boleh dipasang melebihi nilai terkecil antara  $5h$  (5 kali tebal pelat) dan 450 mm. Pemasangan tulangan susut pada pelat biasanya dipasang pada bagian atas atau bagian bawah pada pelat, atau bahkan dipasang diatas dan dibawah. Berikut ini gambaran posisi tulangan susut



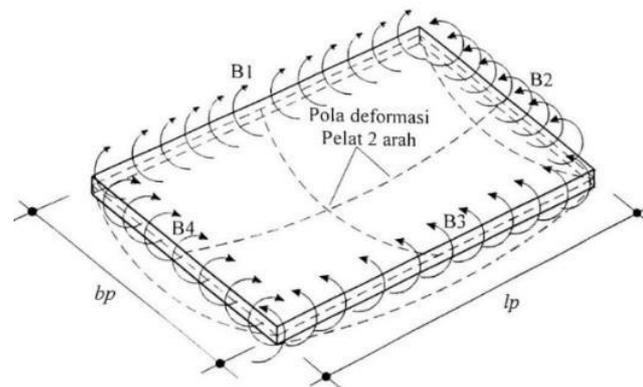
Gambar 2.7 Posisi Tulangan Lentur dan Susut pada Pelat Satu Arah

(Sumber : Lesmana, 2020)

#### 2.4.2.4 Pelat Dua Arah

Pelat dua arah merupakan struktur pelat yang mengalami lendutan pada dua arah bentangnya, sehingga tulangan lentur yang diberikan harus pada dua arah bentang tersebut dan posisinya saling tegak lurus. Pelat lantai dikategorikan sebagai pelat dua arah, jika perbandingan bentang terpanjang ( $l_y$ ) terhadap bentang terpendek ( $l_x$ ) lebih kecil sama dengan 2 ( $l_y / l_x \leq 2$ ).

Distribusi beban pelat lantai dua arah sebagian besar akan dipikul oleh balok dengan bentang terpanjang dan sisanya akan ditransfer pada balok bentang terpendek. Kekakuan dari balok pendukung mempengaruhi ketebalan pelat lantai. Pola deformasi pelat lantai dua arah disajikan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.8 Pola Deformasi pada Pelat Dua Arah

(Sumber : Lesmana, 2020)

#### 2.4.2.5 Tebal Minimum Pelat Dua Arah

Syarat tebal pelat minimum menurut SNI 2847:2019 Pasal 8.3.1.2 tergantung pada nilai  $a_f$ . Nilai  $a_f$  adalah sebagai berikut :

$$a_f = \frac{E_{cb} \cdot I_b}{E_{cs} \cdot I_s} \quad (2.52)$$

Dengan :

$E_{cb}$  = modulus elastisitas balok beton

$E_{cs}$  = modulus elastisitas pelat beton

$I_b$  = momen inersia terhadap sumbu pusat penampang bruto balok

$I_s$  = momen inersia terhadap sumbu pusat penampang bruto pelat

- a. Untuk  $a_{fm} \leq 0,2$  ketebalan pelat minimum adalah sebagai berikut ini :
1. Pelat tanpa penebalan : 125 mm
  2. Pelat dengan penebalan : 100 mm
- b. Untuk  $0,2 < a_{fm} < 0,2$  ketebalan pelat minimum harus memenuhi persamaan sebagai berikut ini :

$$h = \frac{\ell_n \left[ 0,8 + \frac{fy}{1400} \right]}{36 + 5 \cdot \beta \cdot (\alpha_m - 0,2)} \quad (2.53)$$

dan tidak boleh kurang dari 125 mm.

- c. Untuk  $a_{fm} \geq 2,0$  ketebalan pelat minimum harus memenuhi persamaan sebagai berikut ini :

$$h = \frac{\ell_n \left[ 0,8 - \frac{fy}{1400} \right]}{36 - 9 \cdot \beta} \quad (2.54)$$

dan tebal pelat tidak boleh kurang dari 90 mm.

Keterangan :

$h$  = tebal pelat minimum (cm)

$fy$  = tulangan leleh baja tulangan (Mpa)

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

$a_{fm}$  = nilai rata-rata  $a$  untuk semua balok pada tepi-tepi dari suatu panel.

$\beta$  = rasio bentang bersih dalam suatu arah memanjang terhadap arah memendek dari pelat dua arah.

$\ell_n$  = panjang bentang bersih dalam arah memanjang dari konstruksi dua arah, diukur dari muka ke muka tumpuan pada pelat tanpa balok dan muka ke muka balok atau tumpuan lain pada kasus lainnya terhadap sumbu pusat penampang bruto pelat.

#### 2.4.2.6 Momen Pelat Dua Arah

Beban yang bekerja pada pelat

$$qU = 1,2 qD + 1,6qL \tag{2.55}$$

- Keterangan:  $qU$  = beban ultimit.  
 $qD$  = beban mati pelat.  
 $qL$  = beban hidup pelat.

Mencari momen yang bekerja pada arah sumbu x dan y, dengan bantuan tabel momen Marcus. Berikut gambar tabel Marcus untuk mencari momen pelat.

$l_y / l_x$		1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	>2,5	
I	$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	44	52	59	66	73	78	84	88	93	97	100	103	106	108	110	112	125	
	$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	44	45	45	44	44	43	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	25	
II	$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	21	25	28	31	34	36	37	40	40	40	41	41	41	42	42	42	42	
	$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	21	21	20	19	18	17	16	14	13	12	12	11	11	11	10	10	8	
	$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	52	59	64	69	73	76	79	81	82	83	83	83	83	83	83	83	83	83
	$M_{ty} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	52	54	56	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
III	$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	28	33	38	42	45	48	51	53	55	57	58	59	59	60	61	61	63	
	$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	28	28	28	27	26	25	23	22	21	19	18	17	17	16	16	16	13	
	$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	68	77	85	92	98	103	107	111	113	116	118	119	120	121	122	122	125	
	$M_{ty} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	68	72	74	76	77	77	78	78	78	78	79	79	79	79	79	79	79	79
IVA	$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	22	28	34	42	49	55	62	68	74	80	85	89	93	97	100	103	125	
	$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	32	35	37	39	40	41	41	41	40	39	38	37	36	35	35	35	25	
	$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	70	79	87	94	100	105	109	112	115	117	119	120	121	122	123	123	125	
IVB	$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	32	34	36	38	39	40	41	41	42	42	42	42	42	42	42	42	42	
	$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	22	20	18	17	15	14	13	12	11	10	10	10	9	9	9	9	8	
	$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	70	74	77	79	81	82	83	84	84	84	84	84	84	83	83	83	83	
VA	$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	31	38	45	53	60	66	72	78	83	88	92	96	99	102	105	108	125	
	$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	37	39	41	41	42	42	41	41	40	39	38	37	36	35	34	33	25	
	$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	84	92	99	104	109	112	115	117	119	121	122	122	123	123	124	124	125	
VB	$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	37	41	45	48	51	53	55	56	58	59	60	60	61	61	61	62	63	
	$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	31	30	28	27	25	24	22	21	20	19	18	17	17	16	16	15	13	
	$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	84	92	98	103	108	111	114	117	119	120	121	122	122	123	123	124	125	
VIA	$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	21	26	31	36	40	43	46	49	51	53	55	56	57	58	59	60	63	
	$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	26	27	28	28	27	26	25	23	22	21	21	20	20	19	19	18	13	
	$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	55	65	74	82	89	94	99	103	106	110	114	116	117	118	119	120	125	
	$M_{ty} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	60	65	69	72	74	76	77	78	78	78	78	78	78	78	78	79	79	
VIB	$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	26	29	32	35	36	38	39	40	40	41	41	42	42	42	42	42	42	
	$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	21	20	19	18	17	15	14	13	12	12	11	11	10	10	10	10	8	
	$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	60	66	71	74	77	79	80	82	83	83	83	83	83	83	83	83	83	
	$M_{ty} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	55	57	57	57	58	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	

Keterangan : = Terletak bebas  
 = Terjepit penuh

Gambar 2.9 Momen Pelat Tabel Marcus

(Sumber : Asroni, 2010)

Keterangan tabel momen Marcus :

- $k$  = Koefisien momen yang tergantung dari  $L_y/L_x$  dan kondisi tumpuan
- $q$  = Beban merata di atas pelat ( $kg/m^2$ )
- $l_x$  = Panjang Bentang Terpendek (m)
- $l_y$  = Panjang Bentang Terpanjang (m)
- $m_{tx}$  = Momen tumpuan arah x persatuan lebar pelat ( $kg \cdot m$ )
- $m_{ty}$  = Momen tumpuan arah y persatuan lebar pelat ( $kg \cdot m$ )

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

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

#### 2.4.2.7 Penulangan Pelat Dua Arah

Langkah-langkah dalam menghitung tulangan pelat, yaitu :

1. Menghitung nilai tebal efektif (d) :

$$d = h - \text{selimut beton} - 1/2 D \quad (2.56)$$

2. Menghitung nilai rasio tulangan ( $\rho$ ) :

Hitung nilai  $\rho$  yang akan digunakan dengan persamaan :

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.57)$$

$$\rho_{min} = 1,4 / f_y \quad (2.58)$$

$$\rho_{maks} = \left( \frac{0,003 + f_y / E_s}{0,008} \right) \rho_b \quad (2.59)$$

$$\rho_{pertu} = \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot Mu}{0,85 \cdot \phi f'_c \cdot b d^2}} \right) \quad (2.60)$$

Sebelum menentukan luas tulangan terlebih dahulu meninjau nilai  $\rho$  yang didapat. Menghitung tulangan dengan syarat  $\rho_{min} < \rho < \rho_{maks}$

Jika  $\rho < \rho_{min}$ , maka menggunakan  $\rho_{min}$  maka  $A_s$  yang digunakan  $A_{s_{min}}$

Jika  $\rho > \rho_{maks}$ , pelat dibuat lebih tebal, harus dilakukan perhitungan ulang.

3. Menentukan luas tulangan ( $A_s$ ) yang diperlukan :

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad (2.61)$$

4. Memilih diameter tulangan (D) yang akan digunakan dengan penampang dihitung dengan persamaan :

$$A_{stulangan} = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (2.62)$$

5. Menghitung jumlah tulangan :

$$n = \frac{A_s}{1/4 \cdot \pi \cdot D^2} \quad (2.63)$$

6. Spasi antar tulangan. Ambil nilai  $s$  yang terkecil dari persamaan :

$$s = \frac{b}{n - 1} \text{ dimana nilai } b = 1000 \quad (2.64)$$

$$s \leq 2h, s \leq 450 \text{ mm} \quad (2.65)$$

7. Tulangan bagi / tulangan susut dan suhu

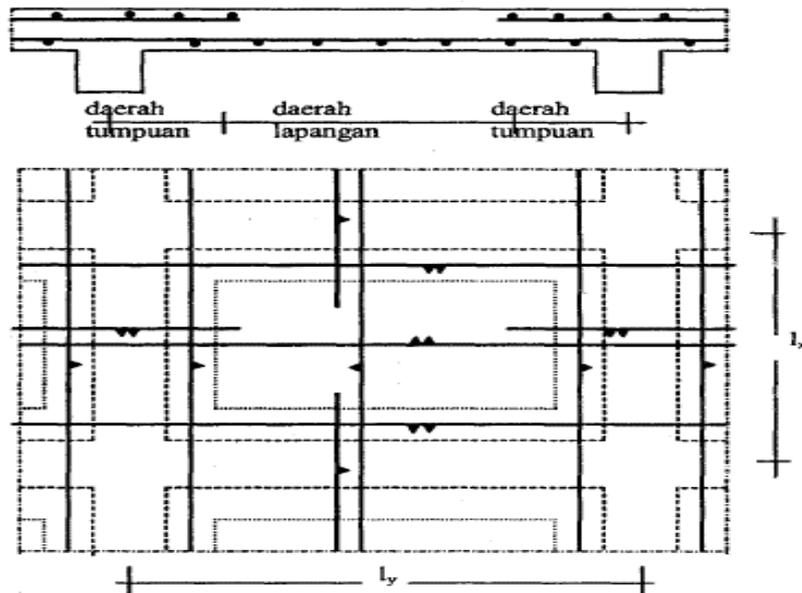
Berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 24.4.3.2 tulangan susut dan suhu menggunakan baja ulir.

8. Pengecekan tulangan, dengan syarat  $A_{s,tul} \geq A_{s,u}$

$$A_{s,tul} = \frac{1/4 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot s}{s} \text{ mm}^2 \quad (2.66)$$

Keterangan:  $A_{s,tul}$  = luas tulangan pakai ( $\text{mm}^2$ ).

$A_{s,u}$  = luas tulangan perlu ( $\text{mm}^2$ ).



Gambar 2.10 Contoh Penulangan Pelat Lantai 2 Arah

(Sumber : Asroni, 2010)

9. Pengecekan Momen Rencana :

$$\phi M_n = \phi \cdot A_{s,tul} \cdot f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.67)$$

Dengan :

$$a = \frac{A_{s,tul} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (2.68)$$

Keterangan:

$\phi Mn$  = Momen Rencana (Nmm)       $f_y$  = kuat leleh baja (MPa)  
 $d$  = tebal efektif pelat (mm)       $f'_c$  = kuat tekan beton (MPa)  
 $b$  = lebar pelat diambil 1000 mm

### 2.4.3 Balok

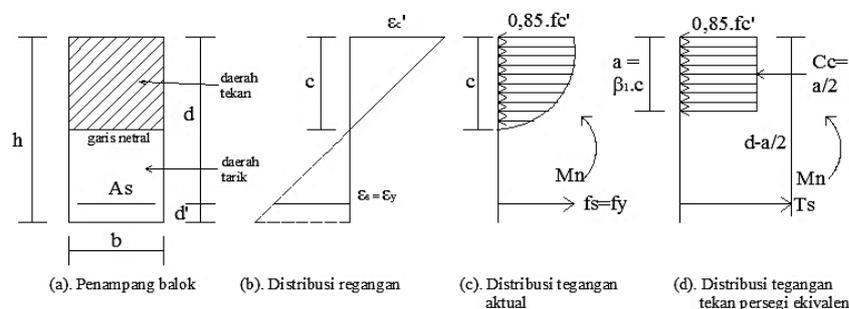
Balok adalah salah satu elemen dari komponen struktur yang berfungsi menerima beban berupa beban sendiri maupun beban dari pelat lantai yang kemudian meneruskan beban tersebut ke elemen kolom yang terletak dibawahnya.

Desain awal (*preliminary design*) penampang balok ditentukan sesuai persyaratan SNI 2847:2019 pasal 9.3.1. Dalam proses desain suatu balok beton bertulang dengan metode kekuatan (*Strength Design Method*) atau yang dikenal pula dengan metode ultimit.

Penulangan balok terhadap kuat lentur dibedakan menjadi tulangan tunggal dan tulangan rangkap. Penulangan balok ini ditentukan oleh kuat momen rencana. Momen lentur yang terfaktor dihasilkan dari beban yang bekerja, apabila momen lentur lebih besar dari kuat momen rencana maka balok harus menggunakan tulangan rangkap.

#### 2.4.3.1 Balok Persegi Panjang dengan Tulangan Tunggal

Balok dengan tulangan tunggal sering juga disebut dengan balok bertulangan sebelah atau balok dengan tulangan saja. Untuk keperluan hitungan balok persegi panjang dengan tulangan tunggal, berikut ini gambar penampang balok yang dilengkapi dengan distribusi regangan dan tegangan beton :

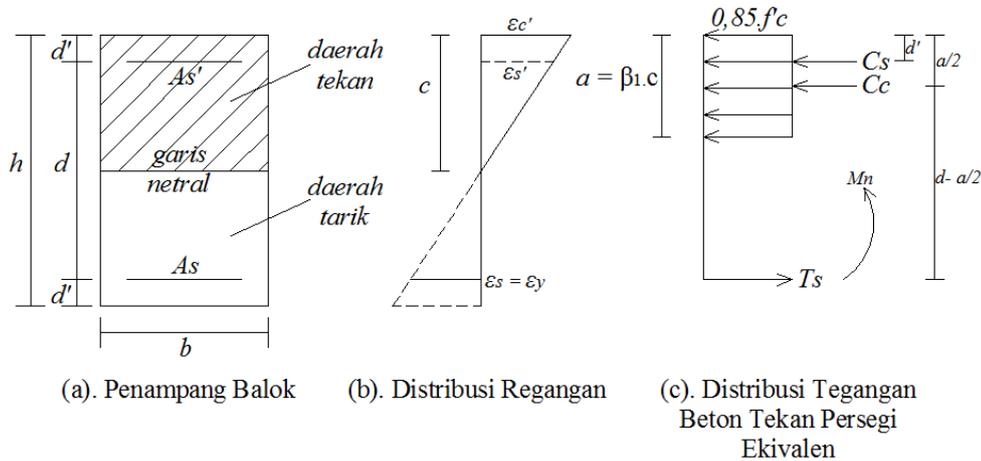


Gambar 2.11 Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tunggal

(Sumber : Asroni, 2010)

**2.4.3.2 Balok Persegi Panjang dengan Tulangan Rangkap**

Balok beton bertulangan rangkap adalah balok beton yang diberi tulangan pada penampang beton daerah tarik dan daerah tekan. Distribusi Regangan dan tegangan pada balok dengan penampang beton bertulangan rangkap:



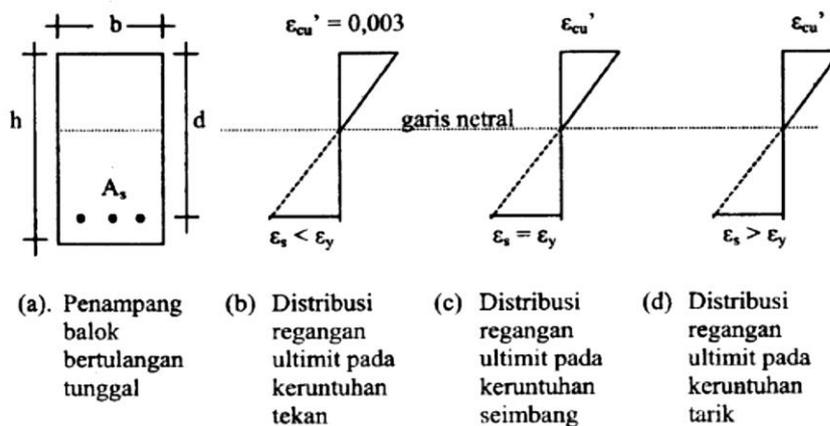
Gambar 2.12 Distribusi Regangan dan Tegangan Balok Tulangan Rangkap

(Sumber : Asroni, 2010)

**2.4.3.3 Keruntuhan Balok Lentur**

Jenis-jenis keruntuhan yang dapat terjadi pada balok beton bertulang berdasarkan persentase tulangan baja yang digunakan adalah sebagai berikut :

- a. Keruntuhan tarik (*ductile failure*): baja tulangan leleh sebelum beton hancur.
- b. Keruntuhan tekan (*brittle failure*): beton hancur sebelum baja tulangan leleh.
- c. Keruntuhan seimbang (*balanced*): beton dan baja tulangan leleh bersamaan.



Gambar 2.13 Distribusi Regangan Ultimit pada Keruntuhan Lentur

(Sumber : Asroni, 2010)

Dalam perencanaan balok direkomendasikan balok dengan tulangan yang bersifat *under reinforced* untuk memberikan peringatan yang cukup, berupa defleksi yang berlebihan, sebelum terjadinya keruntuhan.

#### 2.4.3.4 Sistem Perencanaan Balok Lentur

Sistem perencanaan baton bertulang pada penampang balok dengan keadaan seimbang (*balance*) merupakan kondisi yang paling ideal tetapi sulit dan tidak pernah dapat dicapai, sedangkan sistem perencanaan beton bertulang dengan keruntuhan tarik (*under-reinforced*) boleh digunakan, karena mudah dicapai dan dapat dijamin keamanannya karena memberikan peringatan yang cukup, seperti defleksi yang berlebihan, sebelum terjadinya keruntuhan. Secara umum ada tiga macam jenis penampang yang dapat didefinisikan :

a. Kondisi regangan berimbang (*balanced strain condition*)

Kondisi ini terjadi pada suatu penampang ketika tulangan baja tarik mencapai regangan ultimitnya sebesar 0,003. Penampang demikian dinamakan sebagai penampang seimbang.

b. Penampang terkendali tekan (*compression controlled section*)

Kondisi ini terjadi apabila regangan tulangan tarik terluar sama atau kurang dari batasan yang diizinkan, sedangkan beton mencapai regangan ultimit sebesar 0,003. Untuk tulangan baja dengan  $f_y = 400$  Mpa, batasan regangan tekan sama dengan 0,002. Kasus ini umumnya terjadi pada komponen struktur yang menerima gaya aksial dan momen lentur.

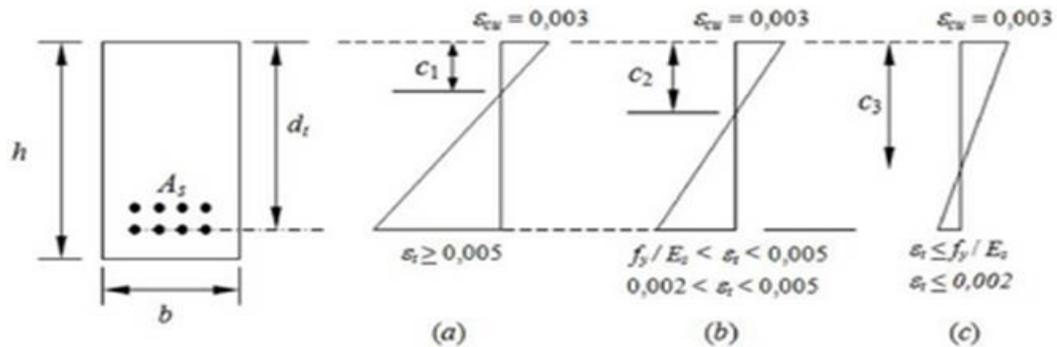
c. Penampang terkendali tarik (*tension controlled section*)

Terjadi ketika regangan baja mencapai 0,005 atau lebih, yang terjadi ketika beton mencapai regangan ultimitnya sebesar 0,003.

d. Penampang kondisi transisi

Penampang lain yang berada diantara penampang terkendali tekan dan terkendali tarik dinamakan berada pada daerah transisi. Disamping itu ditambahkan pula bahwa regangan tarik  $\epsilon_t$ , pada kuat nominal di daerah transisi, tidak boleh kurang dari 0,004 untuk setiap komponen struktur lentur tanpa beban aksial, ataupun bila ada beban aksial tidak melebihi  $0,1 \cdot f'_c \cdot A_g$ ,

dengan  $A_g$  adalah luas gross penampang beton. Berikut gambar yang menjelaskan jenis-jenis penampang pada balok.



Gambar 2.14 Jenis-jenis Kondisi Penampang Balok

(Sumber : Asroni, 2010)

Keterangan gambar diatas tentang jenis-jenis kondisi penampang pada Balok :

- Penampang terkendali tarik
- Penampang transisi
- Penampang terkendali tekan

Menurut peraturan beton Indonesia pada SNI 2847:2019, sistem perencanaan beton bertulang dibatasi dengan kondisi berikut :

- Rasio tulangan minimum, agar tulangan yang digunakan tidak terlalu sedikit, yaitu :

$$A_s \geq A_{s \min} \text{ atau } \rho \geq \rho_{\min} \text{ dengan } \rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (2.69)$$

$$A_{s \min} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d \quad (2.70)$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \text{ atau } \frac{0,25 \sqrt{f'_c}}{f_y} \rightarrow (\text{ambil nilai yang terbesar}) \quad (2.71)$$

- Luasan serta rasio tulangan maksimum, agar penampang beton dapat mendekati keruntuhan seimbang, yaitu :

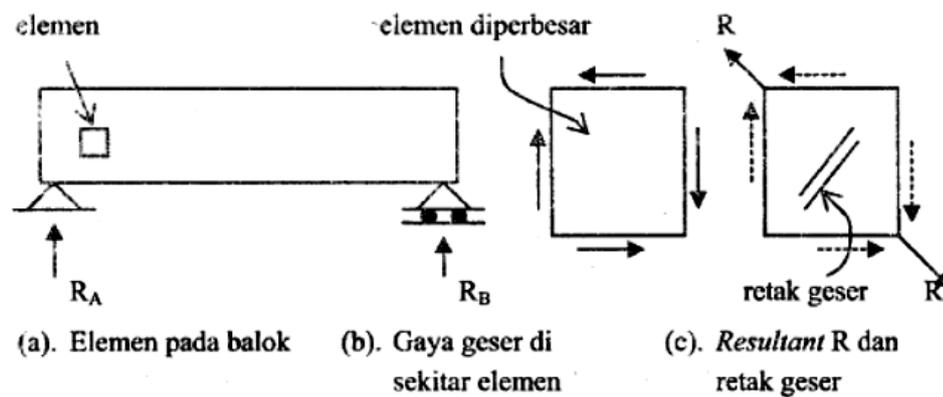
$$A_s \leq A_{s \max} \text{ atau } \rho \leq \rho_{\max} \text{ dengan } \rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (2.72)$$

$$A_{s \max} = 0,75 A_{s,b} \text{ dan } \rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b \quad (2.73)$$

### 2.4.3.5 Kuat Geser Balok

Jika ada sebuah balok yang ditumpu secara sederhana (yaitu dengan tumpuan sendi pada ujung yang satu dan tumpuan rol pada ujung lainnya), kemudian di atas balok diberi beban cukup berat, balok tersebut dapat terjadi 2 jenis retakan, yaitu retak yang arahnya vertikal dan retak yang arahnya miring.

Retak vertikal terjadi akibat kegagalan balok dalam menahan beban lentur, sehingga biasanya terjadi pada daerah lapangan balok, karena pada daerah ini timbul momen lentur paling besar. Retak miring terjadi akibat kegagalan balok dalam menahan gaya geser, biasanya terjadi pada daerah ujung (dekat tumpuan) balok, karena pada daerah ini timbul gaya geser / gaya lintang paling besar.



Gambar 2.15 Jenis Retakan pada Balok Akibat Gaya Geser

(Sumber : Asroni, 2010)

Penulangan geser pada dasarnya mempunyai empat fungsi utama, yaitu :

1. Memikul sebagian gaya geser luar rencana  $V_u$
2. Membatasi bertambahnya retak diagonal
3. Mengikat tulangan memanjang pada posisinya sehingga tulangan memanjang mempunyai kapasitas yang baik untuk memikul lentur.
4. Memberikan semacam ikatan pada daerah beton yang tertekan apabila sengkang ini berupa sengkang tertutup.

Rumus yang digunakan sebagai dasar untuk perhitungan tulangan geser / begel balok tercantum dalam pasal - pasal SNI 2847:2019, adalah sebagai berikut :

1. Pasal 22.5.1.1 SNI 2847:2019, gaya geser rencana, gaya geser nominal, gaya geser yang ditahan oleh beton dan begel dirumuskan:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.74)$$

Dengan :  $V_n$  = Gaya geser nominal (kN)

$V_c$  = Gaya geser yang ditahan oleh beton (kN)

$V_s$  = Gaya geser yang ditahan oleh begel (kN)

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

$$V_u \leq \phi \left( V_c + 0,066 \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \right) \quad (2.75)$$

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

$$V_c = 0,17 \lambda \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.76)$$

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

$$V_c = 0,17 \left( 1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.77)$$

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

$$V_c = \left[ 0,16 \lambda \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u \cdot d}{M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8}} \right] b_w \cdot d \quad (2.78)$$

$$V_c = 0,29 \lambda \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \sqrt{1 + \frac{0,29 N_u}{A_g}} \quad (2.79)$$

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

$$V_c = 0,17 \left( 1 + \frac{N_u}{3,5A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.80)$$

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

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.81)$$

Dengan :

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d}{s} \quad (2.82)$$

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

$$V_s \leq 0,66 \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.83)$$

Jika  $V_s$  melebihi nilai tersebut maka penampang harus diperbesar.

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

$$A_{v \min} = 0,062 \sqrt{f'_c} \frac{b_w \cdot s}{f_{yt}} \quad (2.84)$$

$$A_{v \min} = 0,35 \frac{b_w \cdot s}{f_{yt}} \quad (2.85)$$

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

a.  $s = d/2 \leq 600$  mm, jika  $V_s < V_{c1}$

b.  $s = d/4 \leq 300$  mm, jika  $V_{c1} < V_s < V_{c2}$

c.  $S_{maks} = \frac{A_v \cdot f_{yt}}{0,062 \sqrt{f'_c} \cdot b_w} \rightarrow f'_c > 30$  MPa (2.86)

d.  $S_{maks} = \frac{A_v \cdot f_{yt}}{0,35 b_w} \rightarrow f'_c < 30$  MPa (2.87)

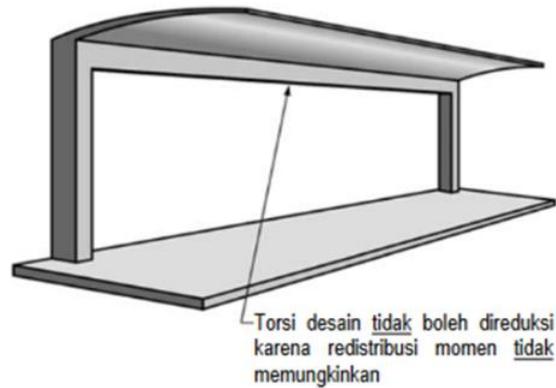
#### 2.4.3.6 Momen Puntir (Torsi)

Torsi atau momen puntir adalah momen yang bekerja terhadap sumbu longitudinal balok / elemen struktur. Torsi dapat terjadi karena adanya beban eksentrik yang bekerja pada balok tersebut.

- a. Torsi primer atau torsi kesetimbangan atau torsi statis tertentu.

Jenis torsi ini muncul apabila beban luar tidak memiliki alternatif penyaluran beban kecuali melalui torsi. Dalam kasus ini torsi diperlukan

untuk menjaga keseimbangan. Torsi primer tidak dapat direduksi oleh redistribusi gaya dalam atau oleh rotasi batang. Sebagai contoh adalah struktur pelat kantilever dalam gambar berikut :

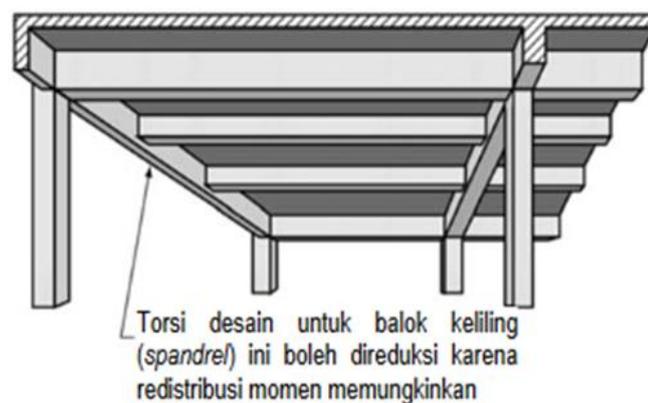


Gambar 2.16 Torsi Primer

(Sumber : SNI 2847:2019)

- b. Torsi sekunder atau torsi kompatibilitas, atau torsi statis tak tentu.

Torsi ini muncul akibat adanya kompatibilitas atau kekontinuan deformasi dari bagian-bagian struktur yang berdekatan, akibatnya momen torsi tidak dapat dihitung hanya berdasarkan kesetimbangan statik saja. Pada kasus ini dimungkinkan terjadinya redistribusi gaya-gaya dalam sehingga akan muncul kesetimbangan gaya. Momen torsi yang timbul dapat direduksi dengan redistribusi gaya-gaya dalam setelah timbulnya retak. Contoh torsi sekunder dijumpai pada balok-balok pemikul pelat lantai yang dicor monolit pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.17 Torsi Sekunder

(Sumber : SNI 2847:2019)

Pengaruh torsi dapat diabaikan dalam SNI 2847:2019 pasal 9.5.4, apabila  $T_u$  memenuhi syarat sebagai berikut :

$$T_u \leq \phi 0,083\lambda \sqrt{f'_c} \left( \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (2.88)$$

Atau tidak melebihi :

$$T_u \leq \phi 0,083\lambda \sqrt{f'_c} \left( \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0,33 A_g \lambda \sqrt{f'_c}}} \quad (2.89)$$

Dimana :  $\phi = 0,75$

$A_{cp}$  = Luas penampang bruto

$P_{cp}$  = Keliling penampang bruto

Batasan dimensi penampang yang memikul torsi dan gaya geser berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 22.7.7 adalah sebagai berikut :

1. Penampang solid

$$\sqrt{\left( \frac{V_u}{b_w \cdot d} \right)^2 + \left( \frac{T_u P_h}{1,7 A_{oh}^2} \right)} \leq \phi \left( \frac{V_c}{b_w \cdot d} + 0,66 \sqrt{f'_c} \right) \quad (2.90)$$

2. Penampang berongga

$$\left( \frac{V_u}{b_w \cdot d} \right) + \left( \frac{T_u P_h}{1,7 A_{oh}^2} \right) \leq \phi \left( \frac{V_c}{b_w \cdot d} + 0,66 \sqrt{f'_c} \right) \quad (2.91)$$

Dengan :

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

$$y_o = h - 2 \left( d + \frac{D}{2} \right)$$

$$A_{oh} = x_o \cdot y_o$$

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

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

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

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

$$T_n = \frac{2A_o A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (2.92)$$

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_n}{2A_o f_{yt} \cot \theta} \quad (2.93)$$

- Dengan :
- $A_t$  = luas satu kaki tulangan sengkang ( $\text{mm}^2$ )
  - $f_{yt}$  = kuat luluh tulangan sengkang  $\leq 400$  MPa
  - $s$  = jarak antar tulangan sengkang
  - $\theta$  = sudut retak  $45^\circ$  untuk non-prategang
  - $T_n = T_u / \phi \rightarrow \phi = 0,75$

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

$$A_t = \left(\frac{A_t}{s}\right) P_h \left(\frac{f_{yt}}{f_y}\right) \cot^2 \theta \quad (2.94)$$

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

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

$$0,062 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.95)$$

$$0,35 \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.96)$$

Dimana :

- $A_v$  = 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  $\leq 400$  Mpa

Jarak tulangan sengkang ( $s$ ) tidak boleh melebihi  $P_h / 8$  atau 300 mm.

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

$$0,42 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left( \frac{A_t}{s} \right) P_h \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (2.97)$$

$$0,42 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left( \frac{0,175 b_w}{f_{yt}} \right) P_h \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (2.98)$$

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

#### 2.4.4 Kolom

Kolom merupakan elemen struktur utama yang memikul beban kombinasi aksial tekan dan momen lentur. Pada kenyataan dilapangan, sangat jarang menemukan elemen kolom memikul murni gaya tekan. Umumnya kolom selalu memikul beban kombinasi aksial tekan dan momen.

Kolom juga merupakan elemen struktur utama yang berperan paling penting dalam memikul beban lateral (khususnya gempa) pada struktur gedung. Kegagalan kolom akan berakibat langsung runtuhnya komponen struktur lain yang berhubungan dengannya, atau bahkan merupakan batas runtuh total keseluruhan struktur bangunan.

##### 2.4.4.1 Kolom Tekan Murni

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

$$P_0 = 0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \quad (2.99)$$

Dimana :  $A_g$  = Luas total penampang kolom.

$A_{st}$  = Luas tulangan baja

Kolom vertikal sempurna tidak dapat dijumpai dalam praktek nyata, dengan mengasumsikan adanya sedikit eksentrisitas maka  $P_0$  harus direduksi. Kolom

dengan sengkang persegi dan spiral menunjukkan perilaku yang berbeda pada saat keruntuhan, pada SNI 2847:2019 memberi batasan faktor reduksi ( $\phi$ ) untuk kedua sengkang tersebut.

Kuat nominal kolom beban aksial dengan sengkang persegi :

$$\phi P_n = \phi(0,8)[0,85f'_c(A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y] \quad (2.100)$$

Kuat nominal kolom beban aksial dengan sengkang spiral :

$$\phi P_n = \phi(0,85)[0,85f'_c(A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y] \quad (2.101)$$

Dengan :  $\phi = 0,65$  untuk sengkang persegi

$\phi = 0,75$  untuk sengkang spiral

#### 2.4.4.2 Kolom Beban Aksial dan Momen

Prinsip-prinsip pada balok mengenai distribusi tegangan dan blok tegangan segiempat ekuivalen, dapat diterapkan juga pada kolom. Tinggi sumbu netral ini sangat menentukan kekuatan kolom.

Tabel 2.6 Tegangan dan Gaya-gaya pada Kolom

Tulangan Tarik	Tulangan Tekan	Gaya Dalam
$\varepsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c}$	$\varepsilon_s = 0,003 \frac{c - d'}{c}$	$C_c = 0,85 f'_c \cdot b \cdot a$
		$C_s = A_s' \cdot f'_s$
$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y$	$f_s' = E_s \cdot \varepsilon_s' \leq f_y$	$T = A_s \cdot f'_s$
		$A = \beta_1 \cdot c \leq h$

(Sumber : Setiawan, 2016)

Eksentrisitas :

$$e = \frac{M_u}{P_u} \quad (2.102)$$

Gaya tahan aksial  $P_n$  dalam keadaan runtuh :

$$P_n = C_c + C_s - T \quad (2.103)$$

$$P_n = 0,85f'_c \cdot a \cdot b + A_s' \cdot f_s' - A_s \cdot f_s \quad (2.104)$$

Momen tahanan nominal :

$$M_n = P_c \cdot e \quad (2.105)$$

$$M_n = 0,85f'_c \cdot a \cdot b \left( \frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \left( \frac{h}{2} - d' \right) - A_s \cdot f_s \left( d - \frac{h}{2} \right) \quad (2.106)$$

Keterangan :

$c$  = jarak sumbu netral (mm).

$h$  = tinggi balok (mm).

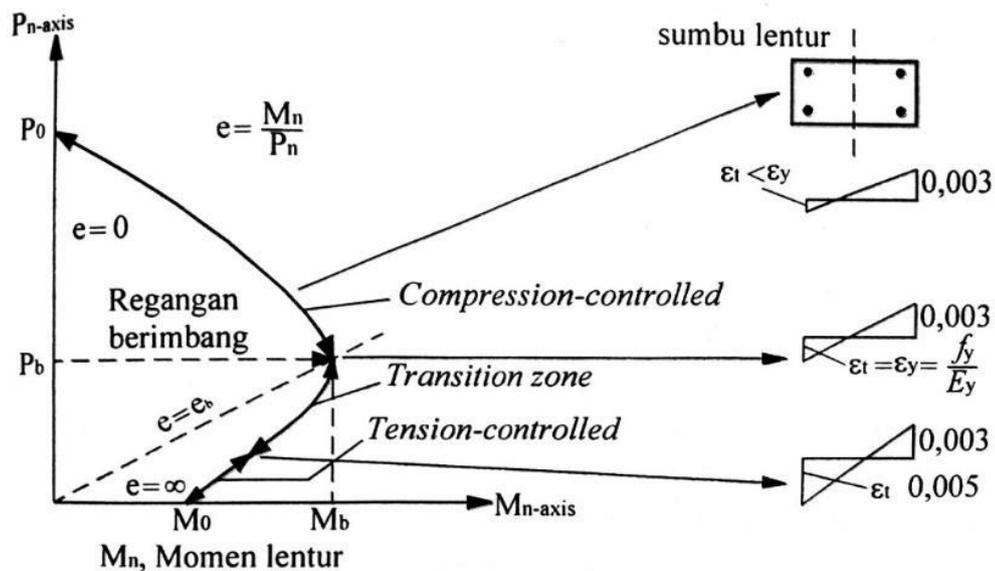
$e$  = eksentrisitas beban ke pusat plastis (mm).

$e'$  = eksentrisitas beban ke tulangan tarik (mm).

$d'$  = selimut efektif tulangan tekan (mm).

$M_u$  = Momen berfaktor (kNm)

$P_u$  = Gaya aksial berfaktor (kN)



Gambar 2.18 Diagram Interaksi Aksial – Momen Elemen Kolom

(Sumber : Lesmana, 2020)

#### 2.4.4.3 Kondisi Regangan Berimbang

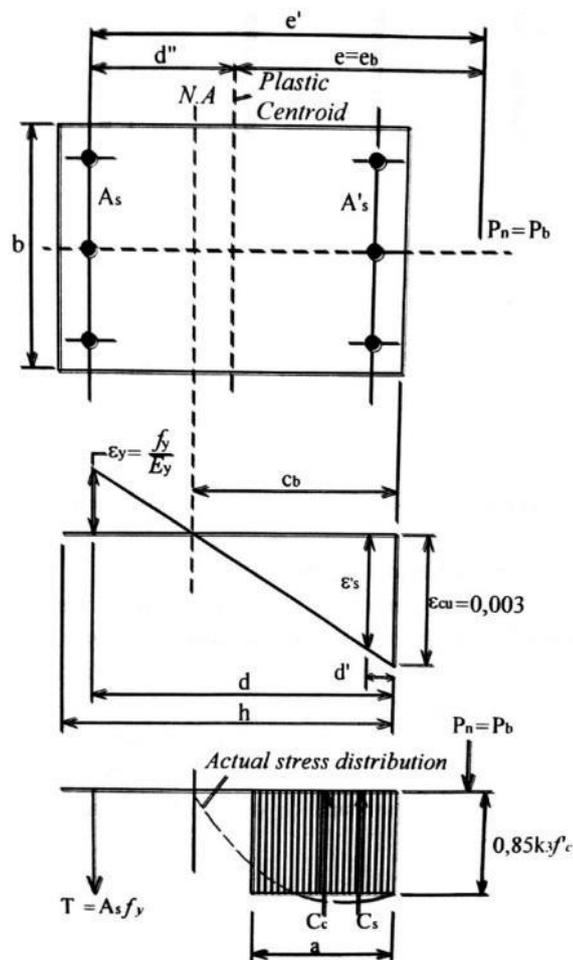
Kondisi regangan berimbang (*balanced strain condition*) atau *compression control limit* merupakan pembatas antara *compression-controlled* dan *transition zone*. Pada kondisi ini serat ekstrim tekan beton dan tarik tulangan baja terluar sama-sama mencapai keadaan batasnya yaitu  $\epsilon_c = 0,003$  dan  $\epsilon_s = f_s/E_s$ . Pada penampang persegi, kondisi regangan berimbang dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{c_b}{d} = \frac{0,003}{\frac{f_y}{E_s} + 0,003}$$

$$c_b = \frac{0,003}{\frac{f_y}{E_s} + 0,003} d = \left( \frac{600 \cdot d}{600 + f_y} \right) \quad (2.107)$$

Gaya-gaya yang terlibat dalam kondisi ini memiliki persamaan :

$$C_c = C_c + C_s - T_s \quad (2.108)$$



Gambar 2.19 Kondisi Regangan Berimbang untuk Penampang Persegi

(Sumber : Lesmana, 2020)

Nilai  $k_3$  akan dibulatkan menjadi 1,0 karena merujuk pada teori blok tegangan whitney pada teori balok. Perbedaan yang terdapat pada perhitungan blok tegangan tersebut memiliki pengaruh yang kecil dalam perhitungan kolom yang berada dibawah titik keseimbangan.

Persamaan  $C_c$  dapat dinyatakan menjadi :

$$C_c = 1,0(0,85f'_c \cdot a \cdot b) = 1,0(0,85f'_c \cdot \beta_1 \cdot c_b \cdot b) \quad (2.109)$$

dan gaya tarik ( $T$ ) dinyatakan dengan :

$$T = A_s \cdot f_y \quad (2.110)$$

sedangkan gaya tekan dari tulangan pada kondisi regangan berimbang adalah :

$$C_s = A'_s (f_y - 0,85f'_c) \quad (2.111)$$

Sehingga persamaan  $P_b$  sebagai berikut :

$$P_b = 0,85f'_c \cdot \beta_1 \cdot c_b \cdot b + A'_s (f_y - 0,85f'_c) - A_s \cdot f_y \quad (2.112)$$

Eksentrisitas  $e_b$  diukur dari pusat plastis (*plastic centroid*). Untuk penampang yang simetris, *plastic centroid* terletak pada tengah dari tinggi penampang. Dengan diperolehnya nilai  $P_b$  pada persamaan diatas, maka persamaan momen yang terdapat pada gambar 2.42 adalah

$$M_b = P_b \cdot e_b = C_c \left( d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s (d - d' - d'') + T d'' \quad (2.113)$$

#### 2.4.4.4 Desain Kekuatan: Wilayah I, II, III

Metode pendekatan untuk mendesain elemen struktur yang memikul kombinasi aksial dan momen berdasarkan metode desain kekuatan, dibagi menjadi 3 kategori.

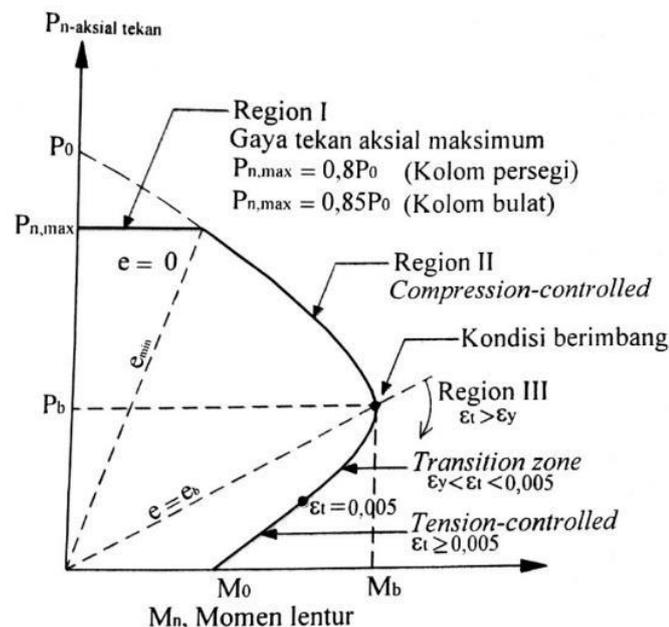
##### A. Desain pada wilayah I

Desain wilayah 1, elemen struktur memiliki momen lentur yang sangat kecil atau bahkan bisa diabaikan dan yang lebih menentukan adalah gaya aksial. Aksial tekan yang terjadi berupa  $P_{n(max)}$  dimana  $P_{n(max)} = 0,80P_0$  untuk kolom persegi dan  $P_{n(max)} = 0,85P_0$  untuk kolom bulat. Desain pada wilayah I tidak disarankan, karena gaya aksial tekan mendekati gaya tekan murni, dikhawatirkan terjadi keruntuhan tanpa peringatan (getas).

Untuk elemen struktur tak bergoyang (*non-sway*) dimana rasio kelangsingan kecil (diabaikan), elemen tersebut diperhitungkan dengan gaya aksial tekan dan pengaruh momen diabaikan, jika momen

diperhitungkan namun eksentrisitas yang terjadi kurang dari  $e_{min}$ , gaya aksial maksimum tetap menjadi parameter yang menentukan. Apabila diperhitungkan kelangsingan untuk struktur tak bergoyang, perhitungan momen harus dilakukan karena merupakan bagian dari persyaratan pembesaran momen. Namun bila hasil eksentrisitas yang dihasilkan tetap lebih kecil dari  $e_{min}$  maka perhitungan tetap digolongkan pada wilayah I.

Sedangkan untuk struktur bergoyang (*sway*), kondisi dimana wilayah I sangat jarang terjadi. Hal ini dikarenakan pada struktur bergoyang, momen yang terjadi relatif lebih besar dikarenakan beban lateral yang diterima oleh struktur sehingga interaksi pada diagram tidak mengarah pada wilayah I yang murni aksial tekan. Semua penampang yang tergolong wilayah I tergolong *compression controlled*. Faktor reduksi dari elemen struktur adalah  $\phi = 0,65$  untuk kolom persegi dan  $\phi = 0,75$  untuk kolom bulat (sengkok spiral).



Gambar 2.20 Kategori Desain untuk Elemen Kolom Tekan dan Lentur

(Sumber : Lesmana, 2020)

## B. Desain pada wilayah II

Elemen struktur pada wilayah II masuk pada kategori *compression controlled*. Dominasi beban oleh aksial tekan namun momen relatif lebih

besar daripada wilayah I. Perbedaan dari wilayah I adalah besar  $P < P_n (max)$ . Faktor reduksi dari elemen struktur adalah  $\phi = 0,65$  untuk kolom persegi dan  $\phi = 0,75$  untuk kolom bulat.

### C. Desain pada wilayah III

Pada wilayah III terdapat dua kondisi yaitu *transition zone* dan *tension controlled*. Disaat regangan yang terjadi  $f_y/E_s < \varepsilon_t < 0,005$ , maka elemen struktur tergolong *transition zone*. Sedangkan bila  $\varepsilon_t \geq 0,005$ , maka tergolong *tension controlled* dengan faktor reduksi  $\phi = 0,9$ .

Faktor reduksi kekuatan kondisi zona transisi yang digunakan adalah :  
Kolom bulat (senggang spiral) :

$$\phi = 0,75 + 0,15 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})} \leq 0,9 \quad (2.114)$$

Kolom persegi (senggang persegi) :

$$\phi = 0,65 + 0,25 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})} \leq 0,9 \quad (2.115)$$

Persamaan diatas bisa diwujudkan dalam bentuk  $c/d_t$  sehingga menjadi,

Kolom bulat (senggang spiral) :

$$\phi = 0,75 + 0,15 \left[ \frac{1}{c/d_t} - \frac{5}{3} \right] \leq 0,9 \quad (2.116)$$

Kolom persegi (senggang persegi) :

$$\phi = 0,65 + 0,25 \left[ \frac{1}{c/d_t} - \frac{5}{3} \right] \leq 0,9 \quad (2.117)$$

#### 2.4.4.5 Kombinasi Aksial Tekan dan Biaksial Momen

Kolom persegi atau bulat yang menerima beban aksial tekan dan momen lentur pada kedua sumbu (-x dan -y) secara umum metode analisa yang digunakan hampir sama dengan metode yang digunakan pada kolom dengan momen satu sumbu. Metode ini melibatkan proses “*trial and error*” untuk memperoleh posisi garis netral dalam kondisi tekan dengan eksentrisitas.

Metode *load contour method* umumnya digunakan untuk menganalisa kolom yang menerima biaksial moment. Metode ini melibatkan potongan permukaan dari grafik load contour  $P_n - M_{nx} - M_{ny}$  dengan nilai  $P_n$  konstan, seperti gambar 2.43. Persamaan non-dimensional untuk kondisi tersebut dinyatakan dalam bentuk :

$$\left(\frac{M_{nx}}{M_{0x}}\right)^{a_1} + \left(\frac{M_{ny}}{M_{0y}}\right)^{a_2} = 1,0 \quad (2.118)$$

Dimana :

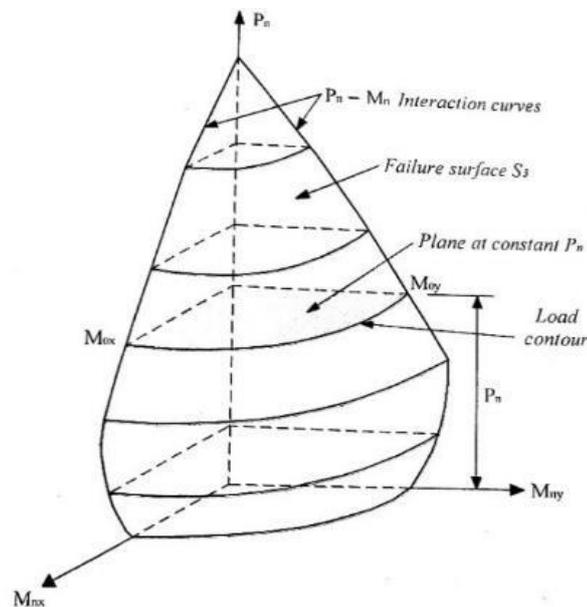
$$M_{nx} = P_n e_y$$

$$M_{ny} = P_n e_x$$

$$M_{0x} = M_{nx} \text{ dengan aksial } P_n \text{ disaat } M_{ny} = 0 \text{ atau } e_x = 0$$

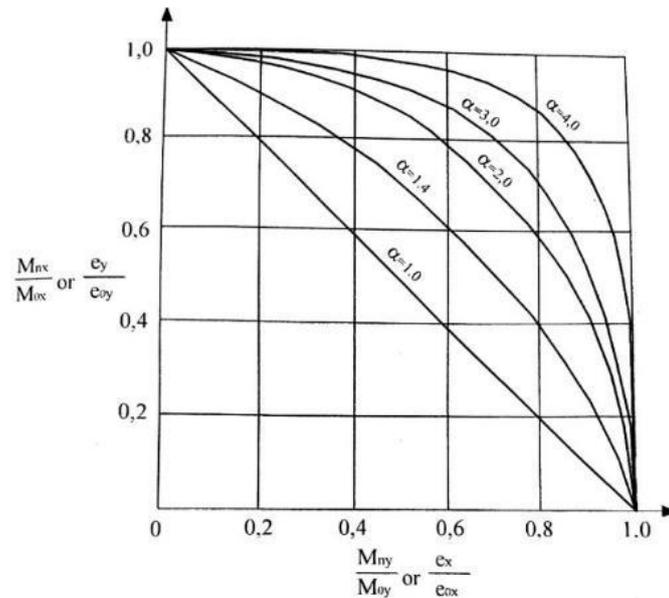
$$M_{0y} = M_{ny} \text{ dengan aksial } P_n \text{ disaat } M_{nx} = 0 \text{ atau } e_y = 0$$

Parameter  $a_1$  dan  $a_2$  adalah eksponen yang tergantung pada dimensi penampang kolom, jumlah tulangan kolom, kekuatan material beton, tegangan leleh tulangan dan ketebalan selimut beton. Dalam kondisi tertentu asumsi bahwa nilai  $a_1 = a_2 = a$  menghasilkan grafik pada gambar dibawah dan persamaan :



Gambar 2.21 Grafik *Load Contour*  $P_n - M_{nx} - M_{ny}$

(Sumber : Lesmana, 2020)



Gambar 2.22 Kurva Interaksi

(Sumber : Lesmana, 2020)

#### 2.4.4.6 Pengaruh Kelangsingan Kolom

Kelangsingan kolom dapat didefinisikan sebagai rasio antara tinggi kolom dengan jari-jari inersia penampang kolom,  $\lambda = L/r$ . Kelangsingan dapat mengakibatkan tekuk ataupun momen akibat lendutan karena faktor kelangsingan (momen sekunder).

$$\lambda = \frac{k \cdot l_u}{r} \quad (2.119)$$

dimana :

$k$  = faktor panjang efektif yang besarnya tergantung pada kekangan rotasional dan lateral ujung-ujungnya.

$l_u$  = Panjang kolom yang terkekang

$r$  = Jari-jari girasi penampang

Berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 6.2.5.1 besaran jari-jari girasi adalah :

$$r = \sqrt{I_g/A_g} \quad (2.120)$$

atau  $\rightarrow r = 0,3 \times$  dimensi arah stabilitas yang ditinjau (kolom persegi)

atau  $\rightarrow r = 0,3 D$  (kolom bulat)

Dalam proses desain kolom langsing, kekuatan kolom mengalami reduksi kekuatan akibat fenomena deformasi orde kedua, akibat dari beban yang bekerja pada kolom kemudian membuat kolom melendut kearah samping (lateral) sebesar  $\Delta$ . Selanjutnya akibat lendutan ini akan menimbulkan pembesaran momen (momen sekunder) berupa  $P\Delta$  yang akan memperbesar lendutan sebelumnya. Dengan adanya fenomena tersebut, perencanaan kolom langsing perlu memperhatikan keruntuhan akibat stabilitas struktur (*stability failure*).

Berdasarkan pengaruh kelangsingan dan pembesaran momen yang terjadi, kolom dikelompokkan menjadi dua yaitu kolom bergoyang dan kolom tak bergoyang. Adapun pembahasan lebih detailnya adalah sebagai berikut:

a. Kolom bergoyang (*sway*).

Untuk kolom bergoyang, pengaruh kelangsingan bisa diabaikan bila memenuhi persyaratan yang diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 6.2.5 yaitu :

$$\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 22 \quad (2.121)$$

Metode pembesaran momen untuk kolom bergoyang diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 6.6.4.7 yaitu :

$$M_1 = M_{1ns} + \delta_s M_{1s} \quad (2.122)$$

$$M_2 = M_{2ns} + \delta_s M_{2s} \quad (2.123)$$

Dimana :

$M_1$  = Momen ujung terkecil pada elemen struktur tekan

$M_2$  = Momen ujung terbesar pada elemen struktur tekan

$M_{1ns}$  = Momen ujung terfaktor pada ujung dimana  $M_1$  bekerja, akibat beban yang mengakibatkan goyangan samping *tidak besar*

$M_{2ns}$  = Momen ujung terfaktor pada ujung dimana  $M_2$  bekerja, akibat beban yang mengakibatkan goyangan samping *tidak besar*

$M_{1s}$  = Momen ujung terfaktor pada ujung dimana  $M_1$  bekerja, akibat beban yang mengakibatkan goyangan samping *cukup besar*

$M_{2s}$  = Momen ujung terfaktor pada ujung dimana  $M_2$  bekerja, akibat beban yang mengakibatkan goyangan samping *cukup besar*

$\delta_s$  = Faktor pembesaran momen untuk rangka bergoyang

Besaran nilai  $\delta_s$  diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 6.6.4.6.2 yaitu :

$$\delta_s = \frac{1}{1-Q} \geq 1,0 \text{ atau } \delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{0,75 \sum P_c}} \geq 1,0 \quad (2.124)$$

- Indeks stabilitas ( $Q$ ) sesuai SNI 2847:2019 pasal 6.6.4.4.1 :

$$Q = \frac{\sum P_u \Delta_0}{V_{us} l_c} \quad (2.125)$$

Dimana :

$\sum P_u$  = Beban vertikal total

$V_{us}$  = gaya geser rantai total pada tingkat yang ditinjau

$l_c$  = Panjang komponen tekan, diukur dari pusat ke pusat joint

$\Delta_0$  = Simpangan relatif antar tingkat orde pertama pada tingkat ditinjau akibat  $V_{us}$

- Beban tekuk kritis ( $P_c$ ) sesuai SNI 2847:2019 pasal 6.6.4.4.2 :

$$P_c = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{(kl_u)^2} \quad (2.126)$$

Nilai  $(EI)_{eff}$  ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 6.6.4.4.2 :

$$(EI)_{eff} = \frac{0,4E_c I_g}{1 + \beta_{dns}} \quad (2.127)$$

$$(EI)_{eff} = \frac{0,2E_c I_g + E_s I_{se}}{1 + \beta_{dns}} \quad (2.128)$$

$$(EI)_{eff} = \frac{E_c I}{1 + \beta_{dns}} \quad (2.129)$$

Besaran  $\beta_{dns}$  harus diambil sebagai rasio beban tetap aksial maksimum terfaktor yang dikaitkan dengan kombinasi beban yang sama. Dan  $I$  pada persamaan diatas harus dihitung berdasarkan SNI 2847:2019 tabel 6.6.3.1.1(b).

b. Kolom tak bergoyang (*non-sway*)

Pengaruh kelangsingan dapat diabaikan bila memenuhi syarat dalam SNI 2847:2019 pasal 6.2.5 :

$$\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 34 + 12 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \text{ dan } \frac{k \cdot l_u}{r} \leq 40 \quad (2.130)$$

$M_1 / M_2$  adalah negatif jika kolom tergolong lendutan tunggal, dan positif jika tergolong lendutan ganda.

Metode pembesaran momen untuk kolom tak bergoyang diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 6.6.4.5 yaitu :

$$M_c \leq \delta M_2 \quad (2.131)$$

dimana :

$M_c$  = momen terfaktor orde pertama  $M_2$  yang diperbesar untuk pengaruh kurvatur komponen struktur.

$\delta$  = Faktor pembesaran momen untuk mencerminkan pengaruh kurvatur komponen struktur antara ujung-ujung komponen struktur tekan.

Nilai  $M_{2,min}$  tidak boleh kurang dari :

$$M_{2,min} \leq P_u(15 + 0,03h) \quad (2.132)$$

Nilai  $\delta$  dihitung berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 6.6.4.5.2 yaitu :

$$\delta = \frac{C_m}{1 - \frac{\sum P_u}{0,75 \sum P_c}} \geq 1,0 \quad (2.133)$$

$P_u$  = Gaya aksial terfaktor, (positif untuk tekan, negatif untuk tarik)

$P_c$  = Beban tekuk kritis

$C_m$  = Faktor yang menghubungkan diagram momen aktual ke diagram momen seragam ekuivalen.

Nilai  $C_m$  ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 6.6.4.5.3 dengan ketentuan sebagai berikut :

- Kolom tanpa beban transversal yang bekerja diantara tumpuannya :

$$C_m = 0,6 - 0,4 \frac{M_1}{M_2} \quad (2.134)$$

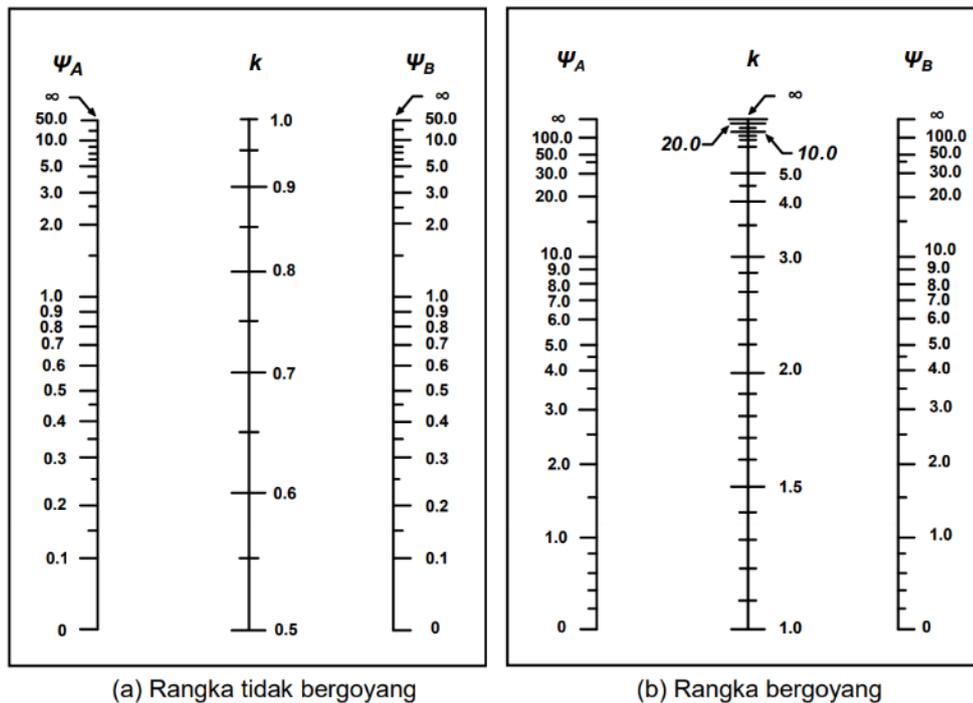
- Kolom dengan beban transversal yang bekerja diantara tumpuannya :

$$C_m = 1,0 \rightarrow \text{bila } M_{2,\min} > M_2 \quad (2.135)$$

Setelah memperoleh nilai momen dari orde kedua, syarat yang harus dipastikan berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 6.2.6 yaitu :

$$M_{u,\text{orde2}} \leq 1,4 M_{u,\text{orde2}} \quad (2.136)$$

Besaran nilai k ditentukan dengan menggunakan *Jackson & Moreland Alignment Chart* yang terdapat dalam SNI 2847:2019 gambar R6.2.5, seperti yang disajikan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.23 Faktor Panjang Efektif, k

(Sumber : SNI 2847:2019)

Keterangan :

$\Psi$  = Rasio  $\sum(EI/\ell c)$  untuk kolom terhadap  $\sum(EI/\ell)$  untuk balok pada satu ujung kolom dalam bidang yang ditinjau

$\ell$  = panjang bentang balok diukur dari pusat ke pusat join

#### 2.4.4.7 Kuat Geser Kolom

Prinsip desain geser kolom sama dengan yang konsep geser balok. Perbedaannya adalah besaran  $V_c$  memikul beban kombinasi aksial tekan dan

momen lentur, sementara balok didominasi momen lentur. Berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 22.5 kuat geser nominal kolom :

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

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.137)$$

dengan :  $V_n$  = Gaya geser nominal (kN)

$V_c$  = Gaya geser yang ditahan beton (kN)

$V_s$  = Gaya geser yang ditahan oleh begel (kN)

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

$$V_u \leq \phi \left( V_c + 0,066\sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \right) \quad (2.138)$$

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

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.139)$$

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

$$V_c = 0,17 \left( 1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda\sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.140)$$

dimana :  $N_u$  = Gaya aksial terfaktor

$A_g$  = Luas penampang kolom

$\lambda$  = 1,0 (beton normal)

$d$  = 0,8h

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

$$V_c = \left[ 0,16\lambda\sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8}} \right] b_w d \quad (2.141)$$

$$V_c = 0,29\lambda\sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{1 + \frac{0,29N_u}{A_g}} \quad (2.142)$$

dimana :  $V_u$  = Gaya geser terfaktor

$M_u$  = Momen terfaktor

$\rho_w$  = Rasio  $A_s$  terhadap  $b_w d$

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

$$V_c = 0,17 \left( 1 + \frac{N_u}{3,5A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.143)$$

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

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.144)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} - V_c \quad (2.145)$$

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

$$V_s \leq 0,66 \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.146)$$

Jika  $V_s$  melebihi nilai tersebut maka penampang harus diperbesar.

8. Luas minimum tulangan geser ( $A_{v,min}$ ), harus disediakan disemua wilayah dimana  $V_u > 0,5 \phi V_c$ . Tulangan geser yang diperlukan ( $A_{v,min}$ ) berdasarkan pasal 10.6.2.2 SNI 2847:2019 harus lebih besar dari persamaan berikut :

$$A_{v,min} = 0,062 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.147)$$

$$A_{v,min} = 0,35 \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.148)$$

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

- 8 kali diameter batang tulangan longitudinal terkecil yang dilingkupi.
- 24 kali diameter batang tulangan sengkang pengekang.
- Setengah dimensi penampang terkecil kolom.
- 300 mm

Detail penulangan sengkang kolom diatur pada SNI 2847:2019 :

- Sengkang ikat pada SNI 2847:2019, pasal 25.7.2, halaman 599

- b. Senggang spiral pada SNI 2847:2019, pasal 25.7.3, halaman 602
- c. Senggang pengekan pada SNI 2847:2019, pasal 25.7.4, halaman 604

#### 2.4.5 Dinding Geser (*Shear Wall*)

Bangunan tinggi tahan gempa umumnya menggunakan dinding geser untuk menahan kombinasi gaya geser, momen dan aksial yang timbul akibat beban gempa. Dinding geser memiliki kekakuan yang lebih baik dibandingkan dengan struktur rangka pemikul momen terbuka (*open frame*), sehingga pada saat pemikul beban gempa, dinding struktural akan menunjukkan kinerja yang lebih baik. Berdasarkan letak dan fungsinya, *shear wall* diklasifikasikan dalam 3 jenis, yaitu :

- a. *Bearing walls* adalah dinding geser yang juga mendukung sebagian besar beban gravitasi. Tembok-tembok ini juga menggunakan dinding partisi antar apartemen yang berdekatan.
- b. *Frame walls* adalah dinding geser yang menahan beban lateral, dimana beban gravitasi berasal dari frame beton bertulang. Tembok-tembok ini dibangun diantara baris kolom.
- c. *Core walls* adalah dinding geser yang terletak di dalam inti pusat dalam gedung, yang biasanya diisi tangga atau poros lift.

Dinding geser dikategorikan berdasarkan geometrinya, yaitu :

- a. *Flexural wall* (dinding langsing), yaitu dinding geser yang memiliki rasio  $h_w / l_w \geq 2$  dan desainya dikontrol oleh perilaku lentur.
- b. *Squat wall* (dinding pendek), yaitu dinding geser yang memiliki rasio  $h_w / l_w \geq 2$  dan didesainnya dikontrol oleh perilaku geser.
- c. *Coupled shear wall* (dinding berangkai), dimana momen guling yang terjadi akibat beban gempa ditahan oleh sepasang dinding yang dihubungkan oleh balok-balok perangkai sebagai gaya-gaya tarik dan tekan yang bekerja pada masing-masing dasar pasangan dinding.

Dinding geser harus didesain dengan teliti dan diberi detailing yang sesuai dengan persyaratan, sehingga dapat memikul semua beban yang bekerja. Komponen batas (*boundary element*) dapat diberikan pada ujung-ujung dinding struktural yang diberi tulangan dalam arah longitudinal dan transversal. Dinding

geser pada pratiknya selalu dihubungkan dengan sistem rangka pemikul gedung, dari penggabungan tersebut diperoleh suatu struktur yang lebih kuat dan ekonomis.

#### 2.4.5.1 Persyaratan Tulangan Dinding Geser

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

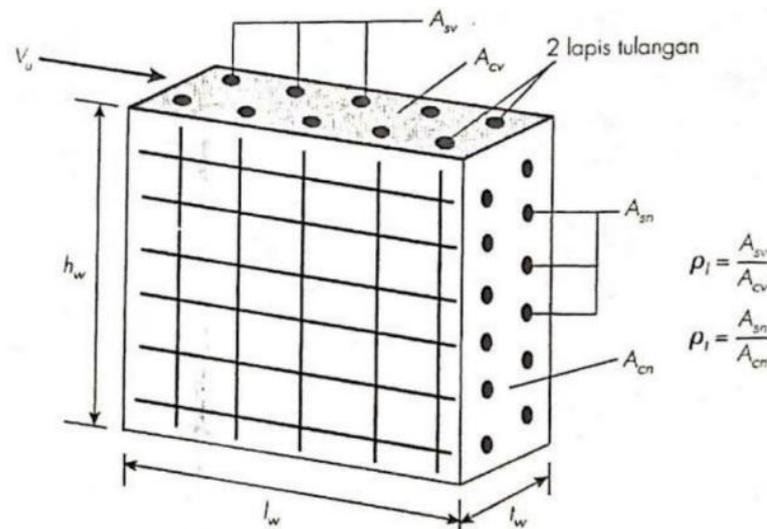
- a. Apabila tulangan geser didesain  $V_u > 0,083A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$ , rasio penulangan  $\rho_l$  dan  $\rho_t$  tidak boleh kurang dari 0,0025.

$$0,0025 \geq \rho_l = \frac{A_{sv}}{A_{cv}} \text{ atau } 0,0025 \geq \rho_t = \frac{A_{sn}}{A_{cn}} \quad (2.149)$$

Keterangan:

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

$\rho_t$  = rasio luas tulangan yang tersebar pada bidang yang tegak lurus bidang  $A_{cv}$  terhadap luas bruto beton yang tegak lurus terhadap tulangan itu.



Gambar 2.24 Tulangan Geser pada Dinding Geser

(Sumber : Setiawan, 2016)

- b. Apabila gaya geser didesain  $V_u < 0,083A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$ , maka dapat digunakan rasio tulangan minimum seperti pada dinding struktural biasa (SNI 2847:2019 pasal 11).

- 1) Rasio minimum tulangan vertikal terhadap luas bruto penampang beton ( $\rho_t$ ) harus diambil :
  - 0,0012 untuk tulangan ulir dengan diameter tidak lebih dari D16 dan  $f_y$  tidak kurang dari 420 MPa.
  - 0,0015 untuk tulangan ulir lainnya.
  - 0,0012 untuk jaring kawat baja las yang berdiameter kurang dari 16.
- 2) Rasio tulangan minimum tulangan horizontal terhadap luas bruto penampang beton ( $\rho_t$ ) harus diambil :
  - 0,0020 untuk tulangan ulir dengan diameter tidak lebih dari D16 dan  $f_y$  tidak kurang dari 420 MPa.
  - 0,0025 untuk tulangan ulir lainnya.
  - 0,0020 untuk jaring kawat baja las yang berdiameter kurang dari 16.
- 3) Jarak tulangan masing-masing arah pada dinding geser tidak boleh melebihi 450 mm.
- 4) Paling sedikit dipasang tulangan dalam dua lapis apabila  $V_u > 0,17A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$

#### 2.4.5.2 Kuat Geser

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

$$V_n = A_{cv} \left( \alpha_c \lambda \sqrt{f'_c} + \rho_t + f_y \right) \quad (2.150)$$

Dengan :

$$\alpha_c = 0,25 \text{ untuk } h_w / l_w \leq 1,5$$

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

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

$h_w$  = tinggi dinding

$l_w$  = panjang dinding

Beberapa persyaratan lain terkait perencanaan geser dinding geser adalah :

- Apabila rasio dari  $h_w / l_w < 2,0$  maka rasio penulangan vertikal ( $\rho_t$ ) tidak boleh kurang daripada rasio tulangan horizontal ( $\rho_t$ ).

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

Dinding struktural yang didesain untuk memikul beban aksial dan lentur (SNI 2847:2019 pasal 18.10.5), kuat lentur dari dinding harus ditentukan seperti halnya prosedur perhitungan kolom yang dibebani gaya aksial dan momen lentur. Tulangan pada seluruh penampang dinding termasuk pada komponen batas (*boundary element*) harus diperhitungkan untuk menentukan kapasitas dinding tersebut.

Dinding geser yang saling berpotongan di suatu titik, maka akan terbentuk penampang L atau T. Lebar sayap efektif yang terbentuk harus diambil dari nilai terkecil antara setengah jarak dinding yang bersebelahan atau 25% dari total tinggi dinding.

#### 2.4.5.3 Elemen Batas

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

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

$$c \geq \frac{l_w}{600 \left( \frac{1,5\delta_u}{h_w} \right)} \quad (2.151)$$

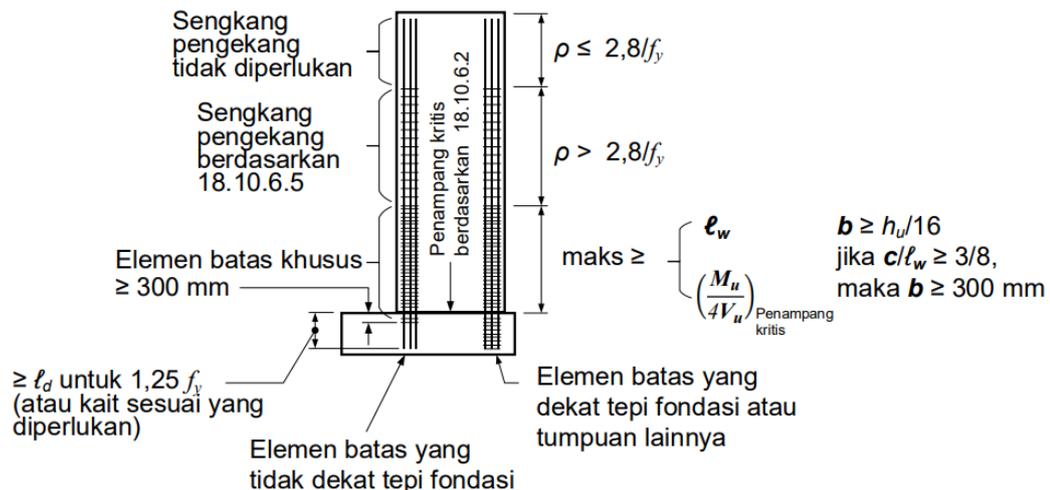
Dengan :  $\delta_u / l_w > 0,005$

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

$\delta_u$  = perpindahan desain

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

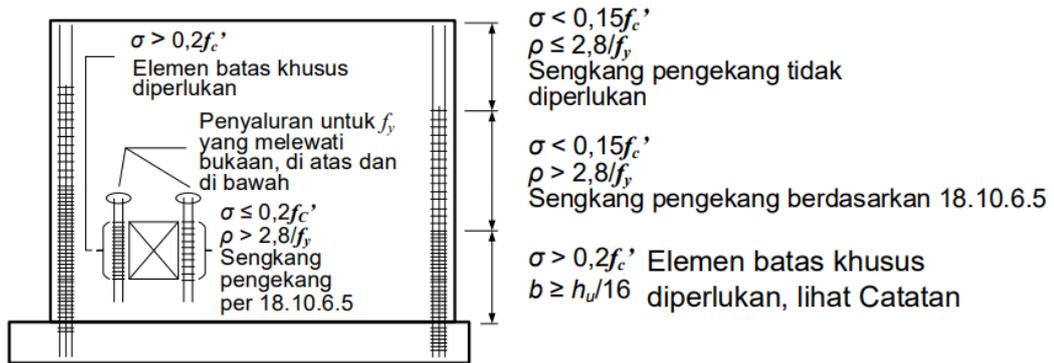
Tulangan transversal elemen batas harus diperpanjang pada arah vertikal, diatas dan dibawah penampang kritis dengan jarak minimal nilai terbesar dari  $l_w M_u / 4V_u$ .



Gambar 2.25 Desain Dinding Pendekatan Desain Berbasis Perpindahan

(Sumber : SNI 2847:2019)

2. Pendekatan desain berbasis tegangan. Dinding geser harus disediakan komponen batas di sekeliling sisi luarnya dan daerah tepi-tepi sekeliling bukaan dari dinding-dinding struktural dimana tegangan tekan seret ekstrim maksimum, akibat kombinasi pembebanan termasuk pengaruh gempa (E) melebihi  $0,2f'_c$ . Elemen batas khusus dapat dihentikan pada lokasi dimana tegangan tekan yang dihitung kurang dari  $0,15 f'_c$ .



Gambar 2.26 Desain Dinding Pendekatan Desain Berbasis Tegangan

(Sumber : SNI 2847:2019)

Dinding struktural yang memerlukan komponen batas harus memenuhi persyaratan berikut :

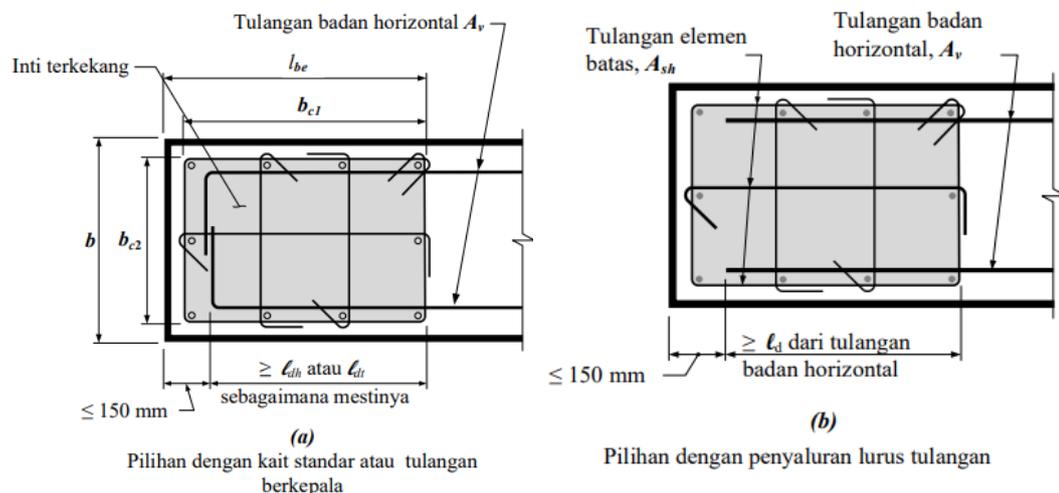
- Elemen batas harus diperpanjang pada arah horizontal dari serat tekan terluar sejauh minimal nilai terbesar dari  $c-0,1l_w$  dan  $c/2$  . Dimana  $c$  adalah tinggi sumbu netral terbesar yang dihitung untuk gaya aksial terfaktor dan kekuatan momen nominal yang sesuai dengan  $\delta_u$  yang ditinjau.
- Lebar daerah tekan lentur ( $b$ ) sepanjang jarak horizontal yang dihitung dengan (a), termasuk sayap bilamana ada, harus diambil minimal  $h_u / 16$ .
- Untuk dinding atau pilar-pilar dinding dengan  $h_w / l_w \geq 2,0$  yang secara efektif menerus dari dasar struktur hingga sisi paling atas dinding, yang didesain memiliki penampang kritis tunggal untuk beban-beban lentur dan aksial, dan dengan  $c/l_w \geq 3/8$ , lebar daerah tekan lentur  $b$  disepanjang daerah yang dihitung berdasarkan (a) harus lebih besar dari atau = 300 mm.
- Pada penampang-penampang bersayap, elemen batas harus termasuk lebar sayap efektif yang mengalami tekan dan harus diperpanjang minimal 300 mm ke dalam badan dinding.
- Tulangan transversal elemen batas harus memenuhi 18.7.5.2(a) hingga (e) dan 18.7.5.3, kecuali bila nilai  $h_x$  dalam 18.7.5.2 tidak melebihi nilai terkecil antara 350 mm dan dua pertiga ketebalan elemen batas, dan batasan spasi tulangan transversal sesuai 18.7.5.3 (a) harus diambil sepertiga dari dimensi terkecil elemen batas.
- Jumlah tulangan transversal harus sesuai SNI 2847:2019 tabel 18.10.6.4(f)

Tabel 2.7 Tulangan Transversal untuk Elemen Batas Khusus

Tulangan Transversal	Persamaan yang berlaku		
$A_{sh} / sb_c$ untuk sengkang pengeang persegi	Nilai terbesar dari	$0,3 \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(a)
		$0,09 \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(b)
$\rho_s$ untuk spiral ataupun sengkang pengeang lingkaran	Nilai terbesar dari	$0,45 \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(c)
		$0,12 \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(d)

(Sumber : SNI 2847:2019)

- g. Bila penampang kritis terjadi di dasar dinding, maka tulangan transversal elemen batas pada dasar dinding harus diperpanjang ke dalam sistem tumpuan sejauh minimal  $l_d$ . Bila elemen batas khusus berhenti pada fondasi telapak, fondasi rakit atau *pile cap*, tulangan transversal elemen batas khusus harus menerus paling sedikit 300 mm ke dalam sistem-sistem fondasi tersebut, kecuali jika diperlukan perpanjangan yang lebih besar berdasarkan 18.13.2.

Gambar 2.27 *Overlap* Tulangan Horizontal Dinding Elemen Batas Terkekang

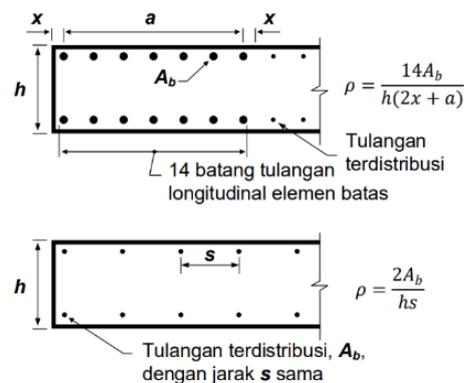
(Sumber : SNI 2847:2019)

- h. Tulangan horizontal pada badan dinding harus diperpanjang masuk sedalam 150 mm pada tepi dinding. Tulangan tersebut harus diangkur dalam inti

terkekang pada elemen batas menggunakan kait standar atau tulangan berkepala agar mencapai  $f_y$ . Bila panjang zona elemen batas terkekang cukup memadai untuk menyalurkan tulangan horizontal badan, dan  $A_v f_y / s$  tulangan badan tidak melebihi  $A_{sh} f_{yt} / s$  tulangan transversal elemen batas yang dipasang paralel dengan tulangan horizontal badan, maka tulangan horizontal badan tersebut dapat dihentikan tanpa kait standar atau kepala.

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

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



Gambar 2.28 Rasio Tulangan Longitudinal Elemen Batas Dinding Tipikal

(Sumber : SNI 2847:2019)

## 2.5 Perencanaan Desain Struktur Bawah

Struktur bawah merupakan seluruh bagian struktur bangunan yang berada di bawah permukaan tanah, diantaranya basemen dan fondasi.

### 2.5.1 Basemen

Basemen adalah ruang bawah tanah yang merupakan bagian dari bangunan gedung. Karena posisinya tersebut basemen harus mempunyai dinding yang kuat untuk menahan tanah. Faktor-faktor yang harus diperhatikan untuk menentukan tipe basemen yang akan dibangun, faktor–faktor tersebut antara lain:

- a. Ketinggian air tanah di lokasi
- b. Kemungkinan kontaminasi dari air tanah
- c. Drainase alami
- d. Jenis tanah
- e. Akses ke lokasi

Selain faktor untuk menentukan tipe basemen dalam pembangunan, dinding basemen di bawah tanah juga didesain untuk kebutuhan sebagai berikut.

- a. Kemantapan struktural
- b. Ketahanan
- c. Pengeluaran kelembaban
- d. *Buildability*

#### 2.5.1.1 Lantai Basemen

Pada dasarnya lantai basemen dapat dimodelkan seperti pelat lantai biasa, namun harus diperhatikan beberapa hal berikut ini :

1. Pembebanan lantai basemen
  - a. Beban mati
 

Beban mati pada lantai basemen terdiri dari berat sendiri pelat, beban spesi, dan beban penutup lantai.
  - b. Beban hidup
 

Beban hidup yang bekerja untuk lantai parkir = 1000 kg/m<sup>2</sup>

- c. Beban yang diperhitungkan termasuk beban tekanan uplift air yang ditentukan oleh tinggi muka air tanah.
- d. Pelat lantai basement berhubungan langsung dengan tanah, maka sebaiknya tebal selimut beton diambil  $>50$  mm.

## 2. Penulangan lantai basement

Untuk pelat lantai basement dicari dengan rumus seperti pada perencanaan pelat lantai bangunan di atas, yaitu :

- a. Momen lapangan arah x ( $M_{lx}$ ) =  $+ 0,001 \cdot q \cdot b \cdot lx^2 \cdot x$
- b. Momen lapangan arah y ( $M_{ly}$ ) =  $+ 0,001 \cdot q \cdot b \cdot lx^2 \cdot x$
- c. Momen tumpuan arah x ( $M_{tx}$ ) =  $- 0,001 \cdot q \cdot b \cdot lx^2 \cdot x$
- d. Momen tumpuan arah y ( $M_{ty}$ ) =  $- 0,001 \cdot q \cdot b \cdot lx^2 \cdot x$

Untuk penulangan pelat lantai basement dapat mengikuti prosedur yang sama dengan penulangan pelat lantai bangunan.

Langkah perhitungan penulangan pelat basement yaitu :

- a. Menghitung tebal efektif ( $d$ ) :

$$d = h - \text{selimut beton} - 1/2 D \quad (2.152)$$

- b. Menghitung nilai rasio tulangan ( $\rho$ )

Hitung nilai  $\rho$  yang akan digunakan dengan persamaan :

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.153)$$

$$\rho_{min} = 1,4 / f_y \quad (2.154)$$

$$\rho_{maks} = \left( \frac{0,003 + f_y / E_s}{0,008} \right) \rho_b \quad (2.155)$$

$$\rho_{perlu} = \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot Mu}{0,85 \cdot \phi f'_c \cdot b d^2}} \right) \quad (2.156)$$

Sebelum menentukan luas tulangan terlebih dahulu meninjau nilai  $\rho$  yang didapat. Menghitung tulangan dengan syarat  $\rho_{min} < \rho < \rho_{maks}$

Jika  $\rho < \rho_{min}$ , maka menggunakan  $\rho_{min}$  maka  $A_s$  yang digunakan  $A_{s_{min}}$

Jika  $\rho > \rho_{maks}$ , pelat dibuat lebih tebal, dan harus dihitung ulang.

- c. Menentukan luas tulangan perlu ( $A_s$ ) :

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad (2.157)$$

- d. Memilih diameter tulangan (D) yang akan digunakan :

$$A_{s_{tulangan}} = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (2.158)$$

- e. Menghitung jumlah tulangan :

$$n = \frac{A_s}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2} \quad (2.159)$$

- f. Spasi antar tulangan. Ambil nilai s yang terkecil dari persamaan:

$$s = \frac{b}{n - 1} \quad \text{dimana nilai } b = 1000 \quad (2.160)$$

$$s \leq 2h, s \leq 450 \text{ mm} \quad (2.161)$$

- g. Pengecekan tulangan, dengan syarat  $A_{ss,tul} \geq A_{ss,u}$  :

$$A_{s,tul} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot s}{s} \text{ mm}^2 \quad (2.162)$$

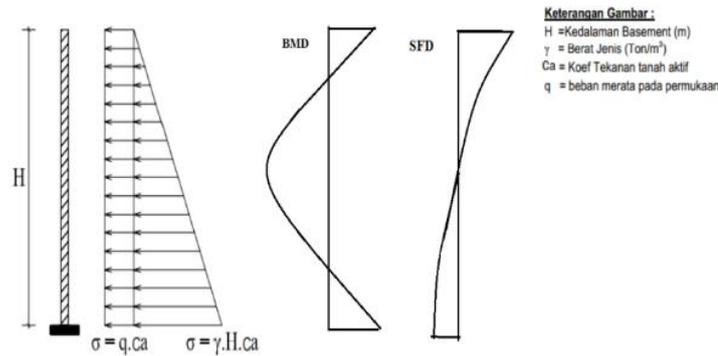
Keterangan:  $A_{s,tul}$  = luas tulangan pakai ( $\text{mm}^2$ ).

$A_{s,u}$  = luas tulangan perlu ( $\text{mm}^2$ ).

### 2.5.1.2 Dinding Basemen

Proses pertama dalam pembuatan struktur lantai basemen, pekerjaan pertama adalah pekerjaan galian, pada pekerjaan galian tanah umumnya stabilitas dinding tanah yang terbentuk akan menjadi masalah utama. Terlebih apabila galian yang dilakukan memiliki kedalaman yang cukup besar. Umumnya pada pekerjaan basemen disertai dengan pekerjaan pembuatan struktur dinding penahan tanah. Dinding penahan tanah ini dapat sekaligus menjadi dinding basemen.

Beban – beban yang diperhitungkan untuk perencanaan dinding basement adalah beban dari tekanan tanah yang nantinya beban tersebut di rubah menjadi beban merata pada dinding basement. Untuk perhitungan momen pada dinding basement dihitung dengan mengandaikan dinding basement sebagai balok kantilever permeter panjang dengan beban segitiga berupa tekanan total (tanah+air).



Gambar 2.29 Gaya – gaya yang Bekerja pada Dinding Basemen  
(Setiawan, 2016)

Tekanan tanah aktif dan pasif dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$P_a = K_a \cdot w \cdot h \quad (2.163)$$

$$P_p = K_p \cdot w \cdot h \quad (2.164)$$

Dengan  $C_a$  dan  $C_p$  adalah koefisien tanah aktif dan pasif.

Dalam ilmu mekanika tanah dikenal teori Rankie (1857) untuk menghitung tekanan aktif dan pasif. Teori Rankie mengasumsikan bahwa dinding penahan pada kondisi vertikal, tidak ada gesekan antara tanah dan dinding, tanah homogen, tak termampatkan dan isotropik selain itu tanah adalah lepas dan berada pada keadaan diam (at rest). Tekanan tanah aktif di kedalaman  $h$  pada suatu dinding penahan tanah dengan urugan tanah datar di belakang dinding, menurut teori Rankie, adalah.

$$P_a = K_a \cdot w \cdot h = w \cdot h \left( \frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} \right) \text{ atau } \left( 45 - \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.165)$$

$$K_a = tg^2 \left( 45 - \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.166)$$

Dimana  $\phi$  = sudut geser dalam arti tanah (diperoleh dari hasil penyelidikan laboratorium)

- Tegangan tanah

Tanah tidak terpengaruh air :

$$\sigma = \gamma_{unsat} \cdot H \cdot K_a \quad (2.167)$$

Tanah terpengaruh air :

$$\sigma = \gamma \cdot H \cdot K_a \rightarrow \text{dimana } \gamma = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (2.168)$$

- Tegangan air :

$$\sigma = \gamma_w \cdot H \rightarrow \text{dimana } \gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad (2.169)$$

– Tegangan tanah akibat beban merata :

$$\sigma = q \cdot K_a \quad (2.170)$$

1. Penulangan lentur

Koefisien tahanan :

$$K = \frac{M_u}{\phi b d^2} \quad (2.171)$$

Rasio tulangan :

$$\rho_{perlu} = \frac{0,85 f'_c}{f_y} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2K}{0,8 f'_c}} \right) \quad (2.172)$$

Syarat rasio penulangan  $\rightarrow \rho_{min} < \rho < \rho_{maks}$

Luas tulangan perlu :

$$A_{S_{perlu}} = \rho \cdot b \cdot d \quad (2.173)$$

$$A_{S_{min}} = \frac{1,4}{f_y} b \cdot d \quad (2.174)$$

### 2.5.1.3 Persyaratan Desain Dinding Basemen

Proses desain struktur dinding penahan tanah mengacu pada peraturan SNI 2847:2019. Berikut beberapa persyaratan desain dinding struktural yang dapat digunakan antara lain adalah :

1. Pasal 11.3.1 ketebalan minimum dinding penahan adalah 1/25 kali tinggi atau panjang dinding yang ditopang secara lateral (diambil yang terkecil), namun tidak kurang dari 100 mm.
2. Pasal 11.6.1 rasio minimum tulangan vertikal terhadap luas brutto penampang beton, harus diambil:
  - a. 0,0012 untuk tulangan ulir dengan diameter tidak lebih dari D16 dan  $f_y$  tidak kurang dari 420 Mpa.
  - b. 0,0015 untuk tulangan ulir lainnya, atau
  - c. 0,0012 untuk jaring kawat baja las yang berdiameter tidak lebih dari 16.

3. Pasal 11.6.1 rasio minimum horizontal terhadap luas brutto penampang beton,  $\rho_t$  harus diambil
  - a. 0,0020 untuk tulangan ulir dengan diameter tidak lebih dari D16 dan  $f_y$  tidak kurang dari 420 Mpa.
  - b. 0,0025 untuk tulangan ulir lainnya, atau
  - c. 0,0020 untuk jaring kawat baja las yang berdiameter tidak lebih dari 16.
4. Pasal 11.7.2.3 Apabila ketebalan dinding melebihi 250 mm, tulangan horizontal dan vertikal harus diletakkan dalam dua lapis sejajar dengan ketentuan sebagai berikut :
  - a. Satu lapis terdiri atas paling sedikit setengah dan tidak melebihi dua per tiga total kebutuhan tulangan untuk tiap arah dan harus diletakkan sejarak paling tidak 50 mm tapi tidak melebihi  $h/3$  dari permukaan eksterior.
  - b. Lapisan lainnya terdiri atas sisa tulangan yang dibutuhkan pada arah tersebut, harus diletakkan sejarak paling tidak 20 mm, tapi tidak melebihi  $h/3$  dari permukaan interior.
5. Pasal 11.7.2.1 jarak maksimum antara tulangan vertikal dan horizontal diambil dari nilai terkecil antara 450 mm atau 3 kali ketebalan dinding.
6. Tulangan minimum dari telapak dinding penahan tanah dapat diambil mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 24.4.3.2, yang menyatakan bahwa perlu disediakan tulangan susut dan suhu sebesar  $0,0018bh$  (untuk tulangan dengan  $f_y \geq 420$  Mpa), atau sebesar  $0,0020bh$  (untuk tulangan dengan  $f_y < 420$  Mpa). Persyaratan tulangan minimum untuk lentur pada balok dapat juga digunakan, yaitu :

$$A_{s,tul} = \frac{1/4 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot s}{s} \text{ mm}^2 \quad (2.175)$$

## 2.5.2 Fondasi

Struktur bawah dari suatu bangunan adalah fondasi. Fondasi berperan penting dalam menopang suatu bangunan karena merupakan komponen struktur bawah yang berfungsi untuk meneruskan gaya dari segala arah bangunan di atasnya ke tanah. Pembangunan fondasi harus dapat menjamin kestabilan bangunan

terhadap berat fondasi itu sendiri, beban-beban berguna, dan gaya-gaya luar seperti tekanan angin, gempa, dan lain-lain.

### **2.5.2.1 Jenis Fondasi**

Berdasarkan letak lapisan tanah keras, fondasi terbagi menjadi 2 macam, yaitu :

1. Fondasi dangkal (*shallow footing*) adalah fondasi yang berada pada lapisan tanah keras yang letaknya dekat dengan permukaan tanah, seperti fondasi setempat, fondasi pelat dan fondasi menerus.
2. Fondasi dalam (*deep footing*) adalah fondasi yang berada pada lapisan tanah keras yang letaknya jauh dengan permukaan tanah, seperti fondasi sumuran, fondasi tiang pancang, dan fondasi *bored pile*.

### **2.5.2.2 Pemilihan Jenis Fondasi**

Dalam pemilihan jenis fondasi yang didasarkan pada daya dukung tanah, ada beberapa hal perlu diperhatikan, yaitu :

1. Bila tanah keras terletak pada permukaan tanah atau 2-3 meter di bawah permukaan tanah, maka fondasi yang dipilih sebaiknya jenis fondasi dangkal (fondasi setempat, fondasi menerus, fondasi pelat).
2. Bila tanah keras terletak pada kedalaman hingga 10 meter atau lebih di bawah permukaan tanah maka jenis fondasi yang biasanya dipakai adalah fondasi tiang minipile dan fondasi sumuran atau fondasi *bored pile*.
3. Bila tanah keras terletak pada kedalaman hingga 20 meter atau lebih di bawah permukaan tanah maka jenis fondasi yang biasanya dipakai adalah fondasi tiang pancang.

### **2.5.2.3 Perencanaan Fondasi Bored Pile**

Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah memikul tekanan, atau tekanan maksimum yang diijinkan yang bekerja pada tanah diatas fondasi.

Daya dukung terfaktor adalah kemampuan tanah memikul tekanan atau tekanan maksimum pada batas runtuh.

Perhitungan daya dukung tanah adalah sebagai berikut:

- Daya dukung fondasi harus lebih besar dari pada beban yang dipikul oleh fondasi tersebut.
- Penurunan yang terjadi harus sesuai batas yang diizinkan (toleransi) yaitu 1” (2,54cm).
- Umumnya metode untuk menghitung daya dukung fondasi *bored pile* yaitu metode *Mayerhof* dan metode *Terzaghi*.

## 1. Metode perhitungan

### a. Metode *Mayerhof* (1956)

Menurut Meyerhof (1956) *Standard Penetration Test* (SPT) adalah sejenis percobaan dinamis dengan memasukkan suatu alat yang dinamakan *split spoon* kedalam tanah. Hasil percobaan ini diperoleh kepadatan relatif (*relative density*), sudut geser tanah ( $\phi$ ) berdasarkan nilai jumlah pukulan (N). Perkiraan kapasitas daya dukung fondasi *bored pile* pada tanah pasir dan silt didasarkan pada data uji lapangan SPT, ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$\sigma_u = 4N_b \cdot A_b + \frac{1}{50} \bar{N} \cdot A_s \quad (2.176)$$

dimana :

- $\sigma_u$  = Kapasitas ultimit tiang
- $N_b$  = Nilai N dari uji SPT di sekitar dasar tiang
- $A_b$  = Luas dasar tiang
- $\bar{N}$  = Nilai rata-rata N dari uji SPT di sekitar tiang
- $A_s$  = Luas selimut tiang

### b. Metode *Terzaghi* (1943)

Perhitungan daya dukung ultimate digunakan persamaan *Terzaghi*

- Untuk fondasi bentuk lingkaran :

$$\sigma_u = \frac{1}{F_s} [(1,3 \cdot c \cdot N_c) + (D_f \cdot \gamma_t \cdot N_q) + (0,3 \gamma_t \cdot B \cdot N_\gamma)] \quad (2.177)$$

- Untuk fondasi bentuk lajur/menerus :

$$\sigma_u = \frac{1}{F_s} [(1,3 \cdot c \cdot N_c) + (D_f \cdot \gamma_t \cdot N_q) + (0,5 \gamma_t \cdot B \cdot N_\gamma)] \quad (2.178)$$

- Untuk fondasi bentuk persegi :

$$\sigma_u = \frac{1}{F_s} [(1,3 \cdot c \cdot N_c) + (D_f \cdot \gamma_t \cdot N_q) + (0,4 \gamma_t \cdot B \cdot N_\gamma)] \quad (2.179)$$

Nilai faktor kapasitas dukung terzaghi dan faktor bentuk fondasi terdapat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.8 Faktor Kapasitas Dukung Terzaghi (1943)

$\varphi$	Keruntuhan Geser Umum			Keruntuhan Geser Lokal		
	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_c'$	$N_q'$	$N_\gamma'$
0	5,7	1,0	0,0	5,7	1,0	0,0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2
10	9,6	2,7	1,2	8,0	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,4	5,0	11,8	3,9	1,7
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2
30	37,2	22,5	19,7	19,0	8,3	5,7
34	52,6	36,5	35,0	23,7	11,7	9,0
35	57,8	41,4	42,4	25,2	12,6	10,1
40	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8
45	172,3	173,3	297,5	51,2	35,1	37,7
48	258,3	287,9	780,1	66,8	50,5	60,4
50	347,6	415,1	1153,2	81,3	65,6	87,1

(Sumber : Hardiyatmo, 2010)

Tabel 2.9 Daftar Ukuran  $S_c$  dan  $S_\gamma$

No.	Tipe Fondasi	$S_c$	$S_\gamma$
1.	Persegi	1,3	0,8
2.	Persegi panjang	1,0	1,0
3.	Lingkaran	1,3	0,6

(Sumber : Hardiyatmo, 2010)

Penyebaran tekanan pada dasar fondasi dihitung dengan persamaan :

$$\sigma = \frac{\sum p}{A} \pm \frac{M_y \cdot x}{I_y} \pm \frac{M_x \cdot y}{I_x} \quad (2.180)$$

Dimana :

$\sigma$  = Tegangan yang terjadi (N/mm<sup>2</sup>)

$\Sigma p$  = Jumlah total beban fondasi (N)

A = Luas total fondasi pile cap (mm<sup>2</sup>)

My = Momen arah y (Nmm)

Mx = Momen arah x (Nmm)

x, y = Jarak eksentrisitas dari pusat beban kolom ke pusat fondasi (mm)

Ix, Iy = Momen inersia fondasi *pile cap* terhadap sumbu-x dan sumbu-y (mm<sup>4</sup>)

Persyaratan yang harus dipenuhi :

$\sigma_{maks} \leq \sigma_{ijin}$  .....OK

Analisis daya dukung masing – masing tiang :

- Tahanan adhesi dan tanah

$$P_1 = K \cdot H \cdot c \quad (2.181)$$

dimana :  $P_1$  = Tahanan adhesi dinding tiang ultimit

K = Keliling penampang tiang

c = adhesi antara dinding tiang dengan tanah

H = Kedalaman tiang

- Tahanan gesek dinding tiang ultimit

$$P_2 = K \left( \frac{1}{2} H^2 \cdot \gamma_t \right) (1 + \tan^2 \varphi) \tan \varphi \quad (2.182)$$

dimana :

$P_2$  = Tahanan gesek dinding tiang ultimit

$\gamma$  = Berat isi tanah

K = Luas selimut tiang

H = Kedalaman tiang

$\varphi$  = Sudut gesek antara dinding tiang dan tanah

- Tahanan ujung tiang

$$P_3 = A_b \cdot \bar{\sigma}_u$$

$$P_3 = A_b \cdot [(1,3 \cdot c \cdot N_c) + (D_f \cdot \gamma_t \cdot N_q) + (0,3 \gamma_t \cdot B \cdot N_\gamma)] \quad (2.183)$$

$$P_{netto} = P_1 + P_2 + P_3 - \text{berat tiang}$$

$$P_{netto} = P_1 + P_2 + P_3 - (A \cdot L \cdot \gamma_b) \quad (2.184)$$

Dimana :

- $P_3$  = Tahanan ujung tiang ultimit
- $\gamma$  = Berat isi tanah
- $c$  = Kohesi tanah di ujung tiang
- $D_f$  = Kedalaman tiang
- $A_b$  = Luas penampang ujung tiang

## 2. Daya dukung izin

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_u}{SF} \quad (2.185)$$

dimana

- $\sigma$  = Kapasitas dukung ultimit tiang
- SF = Faktor keamanan

## 3. Jumlah tiang perlu

$$n = \frac{V_u}{P_{netto}} \quad (2.186)$$

## 4. Penulangan tiang *bored pile*

$$M_1 = \frac{M_{dasar}}{n} \quad (2.187)$$

- Gaya geser maksimum terjadi pada bagian atas fondasi akibat beban horizontal

$$H_u = \frac{H}{n} \quad (2.188)$$

- Kapasitas momen pada dasar fondasi tiang

$$M_1 = K_C^R \cdot A_{st} \cdot f_y \cdot d \quad (2.189)$$

$$A_{st} = \frac{M_1}{K_C^R \cdot f_y \cdot d} \quad (2.190)$$

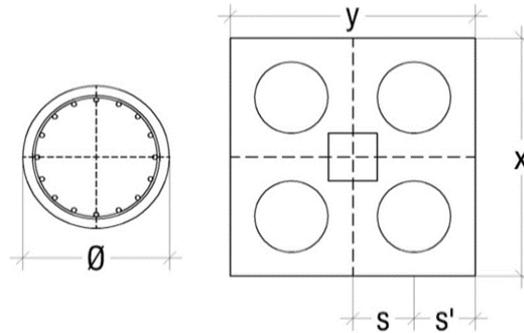
- Jumlah tulangan

$$n = A_{st} / A_s \quad (2.191)$$

- Tulangan Sengkang Spiral

$$\rho_s = \frac{4A_s(D_c - d_s)}{D_c^2 S} \quad (2.192)$$

$$S = \frac{4A_s(D_c - d_s)}{D_c^2 \rho_s} \quad (2.193)$$

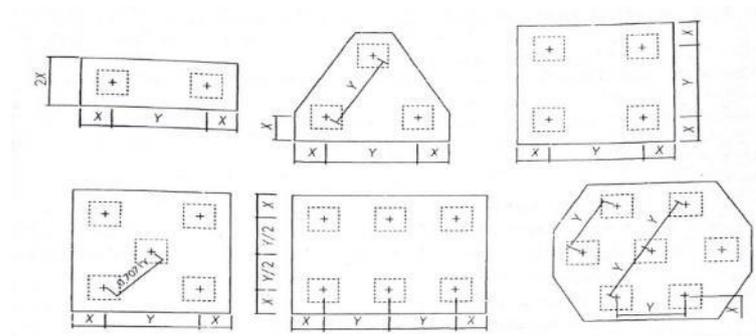


Gambar 2.30 Contoh Penulangan *Bored Pile*

(Sumber : Hardiyatmo, 2010)

#### 2.5.2.4 Perencanaan *Pile Cap*

*Pile cap* berfungsi sebagai pengikat setiap pile yang telah terpancang ke dalam tanah. *Pile cap* mendistribusikan beban vertikal analisisnya, fondasi *pile cap* dianggap sebagai material yang sangat kaku dan distribusi tekanan yang ditimbulkan akibat beban dapat dianggap linier. Pada fondasi *pile cap* setiap titik didukung secara langsung oleh tanah dibawahnya, sehingga momen lentur yang terjadi sangat kecil. Gambar dibawah ini menunjukkan beberapa jenis tiang dalam satu grup tiang. Jarak antar tiang pusat ke pusat (Y) dibatasi sebesar 2,5 hingga 3 kali diameter tiang, sedangkan jarak as tiang ke tepi *pile cap* (X) dibatasi sebesar 1 hingga 1,5 kali diameter tiang.



Gambar 2.31 Susunan Kelompok Tiang

(Sumber : Hardiyatmo, 2010)

1. Persamaan untuk menghitung tekanan aksial pada masing-masing tiang :

$$P_i = \frac{V}{n} \pm \frac{M_y \cdot x_i}{\sum x^2} \pm \frac{M_x \cdot y_i}{\sum y^2} \quad (2.194)$$

Dimana :

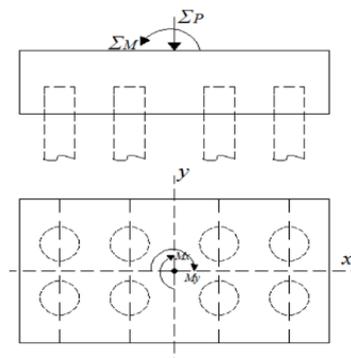
$P_i$  = Beban aksial pada ujung tiang ke-i

$V$  = Jumlah beban vertikal yang bekerja pada pusat kelompok tiang

$n$  = Jumlah tiang

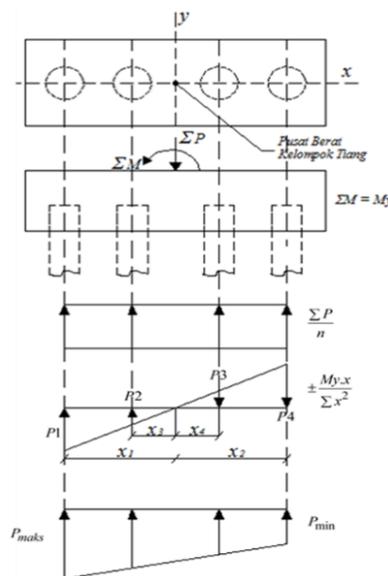
$x, y$  = Berturut-turut jarak tiang terhadap sumbu  $y$  dan  $x$

$M_x, M_y$  = Berturut-turut momen pada arah sumbu  $x$  dan  $y$



Gambar 2.32 Kelompok Tiang Dibeban Beban Aksial Dan Momen 2 Arah

(Sumber : Hardiyatmo, 2010)



Gambar 2.33 Diagram Reaksi Tiang Terhadap Gaya Aksial dan Momen

(Sumber : Hardiyatmo, 2010)

Persyaratan yang harus dipenuhi:

$$P_{terjadi} = \frac{\sum P}{n} \pm \frac{M_y \cdot x}{\sum x^2} \pm \frac{M_x \cdot y}{\sum y^2} \leq P_{netto} \quad (2.195)$$

$$P_{maks} = \frac{\sum P}{n} + \frac{M_y \cdot x}{\sum x^2} + \frac{M_x \cdot y}{\sum y^2} \leq P_{netto} \quad (2.196)$$

$$P_{min} = \frac{\sum P}{n} - \frac{M_y \cdot x}{\sum x^2} - \frac{M_x \cdot y}{\sum y^2} \leq P_{netto} \quad (2.197)$$

$P_{min}$  tidak boleh  $> 0$  (tidak boleh ada tegangan negatif)

## 2. Penulangan *pile cap*

### a. Beban beban yang bekerja pada *pile cap*

- Berat sendiri *pile cap*
- Berat tanah urug
- Gaya aksial tiang

### b. Momen yang terjadi pada sisi kolom

$$\sum M = P_1 x_1 + P_2 x_2 - P_{maks} \cdot x_3 \quad (2.198)$$

### c. Penulangan

#### 1) Rasio tulangan

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} \quad (2.199)$$

$$\rho_{perlu} = \frac{0,85 f'_c}{f_y} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2R}{0,85 f'_c}} \right) \quad (2.200)$$

$$\rho_b = 0,85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.201)$$

$$\rho_{maks} = \left( \frac{0,003 + f_y/E_s}{0,008} \right) \rho_b \quad (2.202)$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.203)$$

Dengan syarat  $\rho_{min} < \rho_{perlu} < \rho_{maks}$

#### 2) Luas tulangan perlu :

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad (2.204)$$

#### 3) Jarak antar tulangan :

$$s = \frac{\frac{1}{4}\pi d^2 S}{A_s} \text{ dengan } s \leq 2h \quad (2.205)$$

## 2.6 Analisa Struktur Menggunakan Program *ETABS Versi 18.1.1*

Program *ETABS* adalah perangkat lunak bidang teknik sipil yang digunakan untuk menghitung struktur bangunan. *ETABS* merupakan program untuk menganalisis atau menggambar desain struktur untuk bangunan bertingkat.

Perencanaan struktur gedung *student center* menggunakan bantuan program *ETABS versi 18.1.1*. Berikut ini merupakan tahapan perancangan model struktur baik *truss* maupun *frame* secara garis besar, dengan *ETABS versi 18.1.1*, yaitu:

1. Input data sistem grid dan elevasi
2. Definisikan material yang akan digunakan
3. Definisikan profil penampang yang digunakan
4. Definisikan beban dan kombinasi pembebanan
5. Menggambar model struktur
6. Aplikasikan beban pada model
7. Cek model struktur
8. Cek hasil analisa

Kelebihan program *ETABS* adalah kita tidak hanya berhenti pada analisa struktur (untuk mengetahui gaya dalam yang terjadi) saja, tapi juga bisa melanjutkan ke bagian check/desain struktur untuk mengetahui luas tulangan lentur dan geser untuk balok dengan terlebih dahulu melakukan konversi reduksi dari *ACI* ke *SNI*.