

BAB IV

HASIL/PEMBAHASAN

4.1 Preliminary Design

Tahap awal dalam perencanaan elemen struktur bangunan diawali dengan penyusunan desain awal (*preliminary design*). Perencanaan dimensi struktur tersebut dilakukan dengan mengacu pada SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan sebagai landasan perhitungan teknis.

4.1.1 Preliminary Design Pelat

Penentuan ketebalan pelat

Ketebalan pelat ditentukan dengan data sebagai berikut :

- a. Panjang bentang terpanjang (L_x) = 4000 mm
- b. Panjang bentang pendek (L_y) = 4000 mm
- c. Kuat tekan beton (f'_c) = 30 MPa
- d. Kuat leleh tulangan (f_y) = 420 MPa
- e. Rasio bentang panjang/bentang pendek (β)

$$\beta = \frac{L_y}{L_x} = \frac{4000}{4000} = 1,00$$

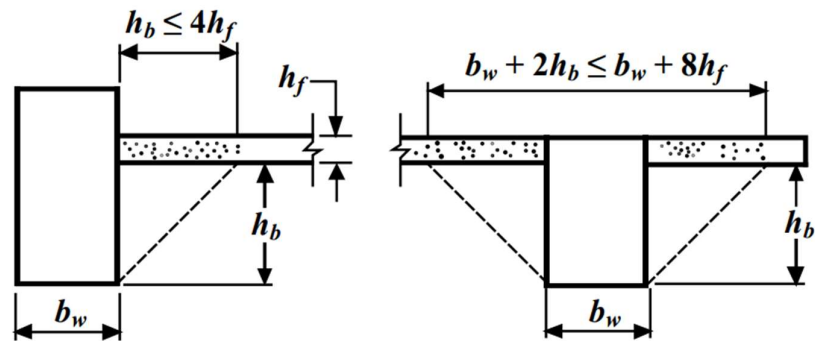
- f. Modulus elastisitas beton (E_c)

$$E_c = 4700 \times \sqrt{F'_c}$$

$$E_c = 4700 \times \sqrt{30}$$

$$E_c = 25742,96 \text{ Mpa}$$

Perhitungan α_{fm} untuk tebal pelat berdasarkan balok yang menumpu pelat. Ketentuan balok yang digunakan untuk perhitungan α_{fm} sesuai Gambar R8.4.1.8 SNI 2847:2019 dapat dilihat pada **Gambar 4.1**.



Gambar 4.1 Contoh Bagian Pelat yang Dimasukkan ke Balok Sesuai 8.4.1.8

Sumber: SNI 2847:2019

Tebal pelat asumsi $h_p = 150$ mm, sehingga perhitungan α_{fm} sebagai berikut:

1. Sisi kiri pelat (interior)

a. Balok (250 x 400 mm)

$$\text{Lebar balok } (b_w) = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi balok } (h) = 400 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi badan balok } (h_w)$$

$$h_w = h - h_p$$

$$h_w = 400 - 150$$

$$h_w = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar flange balok } (b_f)$$

$$b_f = b_w + 2 \times h_w \leq b_w + 8 \times h_p$$

$$b_f = 400 + 2 \times 250 \leq 250 + 8 \times 150$$

$$b_f = 750 \text{ mm} \leq 1450 \text{ mm}$$

$$\text{Luas bagian 1 } (A_1)$$

$$A_1 = b_w \times h_w$$

$$A_1 = 400 \times 250$$

$$A_1 = 62500 \text{ mm}^2$$

$$\text{Titik berat bagian 1 } (Y_1)$$

$$y_1 = \frac{h_w}{2}$$

$$y_1 = \frac{250}{2}$$

$$y_1 = 125 \text{ mm}$$

Luas bagian 2 (A_2)

$$A_2 = b_f \times h_p$$

$$A_2 = 750 \times 150$$

$$A_2 = 112500 \text{ mm}^2$$

Titik berat bagian 2 (Y_2)

$$y_2 = h_w + \frac{h_p}{2}$$

$$y_2 = 250 + \frac{150}{2}$$

$$y_2 = 325 \text{ mm}$$

Titik berat gabungan ($\bar{y}$)

$$\bar{y} = \frac{A_1 + y_1 + A_2 + y_2}{A_1 + A_2}$$

$$\bar{y} = \frac{62500 + 125 + 122500 + 325}{62500 + 122500}$$

$$\bar{y} = 253,571 \text{ mm}$$

Momen inersia balok (I_b)

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h_w^3 + A_1(y_1 - \bar{y})^2 + \frac{1}{12} \times b_f \times h_p^3 + A_2(y_2 - \bar{y})^2$$

$$I_b = \frac{1}{12} \times 250 \times 250^3 + 62500(125 - 253,571)^2$$

$$+ \frac{1}{12} \times 750 \times 150^3 + 112500(325 - 253,571)^2$$

$$I_b = 2,14 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

b. Pelat

Lebar pelat (L_p)

$$L_p = L_x = 4000 \text{ mm}$$

Momen inersia pelat (I_p)

$$I_p = \frac{1}{12} \times L_p \times h_p^3$$

$$I_p = \frac{1}{12} \times 3000 \times 150^3$$

$$I_p = 8,44 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

- c. Rasio kekakuan balok/pelat (α_{f1})

$$\alpha_{f1} = \frac{E_c \times I_b}{E_c \times I_p}$$

$$\alpha_{f1} = \frac{25742,96 \times 2,14 \times 10^9}{25742,96 \times 8,44 \times 10^8}$$

$$\alpha_{f1} = 2,541$$

2. Sisi kanan pelat (interior)

- a. Balok (250 x 400 mm)

$$\text{Lebar balok (} b_w \text{)} = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi balok (} h \text{)} = 400 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi badan balok (} h_w \text{)}$$

$$h_w = h - h_p$$

$$h_w = 400 - 150$$

$$h_w = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar flange balok (} b_f \text{)}$$

$$b_f = b_w + 2 \times h_w \leq b_w + 8 \times h_p$$

$$b_f = 400 + 2 \times 250 \leq 250 + 8 \times 150$$

$$b_f = 750 \text{ mm} \leq 1450 \text{ mm}$$

$$\text{Luas bagian 1 (} A_1 \text{)}$$

$$A_1 = b_w \times h_w$$

$$A_1 = 400 \times 250$$

$$A_1 = 62500 \text{ mm}^2$$

$$\text{Titik berat bagian 1 (} Y_1 \text{)}$$

$$y_1 = \frac{h_w}{2}$$

$$y_1 = \frac{250}{2}$$

$$y_1 = 125 \text{ mm}$$

$$\text{Luas bagian 2 (} A_2 \text{)}$$

$$A_2 = b_f \times h_p$$

$$A_2 = 750 \times 150$$

$$A_2 = 112500 \text{ mm}^2$$

Titik berat bagian 2 (Y_2)

$$y_2 = h_w + \frac{h_p}{2}$$

$$y_2 = 250 + \frac{150}{2}$$

$$y_2 = 325 \text{ mm}$$

Titik berat gabungan ($\bar{y}$)

$$\bar{y} = \frac{A_1 + y_1 + A_2 + y_2}{A_1 + A_2}$$

$$\bar{y} = \frac{62500 + 125 + 122500 + 325}{62500 + 122500}$$

$$\bar{y} = 253,571 \text{ mm}$$

Momen inersia balok (I_b)

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h_w^3 + A_1(y_1 - \bar{y})^2 + \frac{1}{12} \times b_f \times h_p^3 + A_2(y_2 - \bar{y})^2$$

$$I_b = \frac{1}{12} \times 250 \times 250^3 + 62500(125 - 253,571)^2$$

$$+ \frac{1}{12} \times 750 \times 150^3 + 112500(325 - 253,571)^2$$

$$I_b = 2,14 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

b. Pelat

Lebar pelat (L_p)

$$L_p = L_x = 4000 \text{ mm}$$

Momen inersia pelat (I_p)

$$I_p = \frac{1}{12} \times L_p \times h_p^3$$

$$I_p = \frac{1}{12} \times 3000 \times 150^3$$

$$I_p = 8,44 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

c. Rasio kekakuan balok/pelat (α_{f1})

$$\alpha_{f2} = \frac{E_c \times I_b}{E_c \times I_p}$$

$$\alpha_{f2} = \frac{25742,96 \times 2,14 \times 10^9}{25742,96 \times 8,44 \times 10^8}$$

$$\alpha_{f2} = 2,541$$

3. Sisi atas pelat (tepi)

a. Balok (250 x 400 mm)

$$\text{Lebar balok } (b_w) = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi balok } (h) = 400 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi badan balok } (h_w)$$

$$h_w = h - h_p$$

$$h_w = 400 - 150$$

$$h_w = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar flange balok } (b_f)$$

$$b_f = b_w + 2 \times h_w \leq b_w + 8 \times h_p$$

$$b_f = 400 + 2 \times 250 \leq 250 + 8 \times 150$$

$$b_f = 750 \text{ mm} \leq 1450 \text{ mm}$$

$$\text{Luas bagian 1 } (A_1)$$

$$A_1 = b_w \times h_w$$

$$A_1 = 400 \times 250$$

$$A_1 = 62500 \text{ mm}^2$$

$$\text{Titik berat bagian 1 } (Y_1)$$

$$y_1 = \frac{h_w}{2}$$

$$y_1 = \frac{250}{2}$$

$$y_1 = 125 \text{ mm}$$

$$\text{Luas bagian 2 } (A_2)$$

$$A_2 = b_f \times h_p$$

$$A_2 = 750 \times 150$$

$$A_2 = 112500 \text{ mm}^2$$

$$\text{Titik berat bagian 2 } (Y_2)$$

$$y_2 = h_w + \frac{h_p}{2}$$

$$y_2 = 250 + \frac{150}{2}$$

$$y_2 = 325 \text{ mm}$$

Titik berat gabungan ($\bar{y}$)

$$\bar{y} = \frac{A_1 + y_1 + A_2 + y_2}{A_1 + A_2}$$

$$\bar{y} = \frac{62500 + 125 + 122500 + 325}{62500 + 122500}$$

$$\bar{y} = 253,571 \text{ mm}$$

Momen inersia balok (I_b)

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h_w^3 + A_1(y_1 - \bar{y})^2 + \frac{1}{12} \times b_f \times h_p^3 + A_2(y_2 - \bar{y})^2$$

$$I_b = \frac{1}{12} \times 250 \times 250^3 + 62500(125 - 253,571)^2$$

$$+ \frac{1}{12} \times 750 \times 150^3 + 112500(325 - 253,571)^2$$

$$I_b = 2,14 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

b. Pelat

Lebar pelat (L_p)

$$L_p = L_x = 4000 \text{ mm}$$

Momen inersia pelat (I_p)

$$I_p = \frac{1}{12} \times L_p \times h_p^3$$

$$I_p = \frac{1}{12} \times 3000 \times 150^3$$

$$I_p = 8,44 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

c. Rasio kekakuan balok/pelat (α_f)

$$\alpha_{f3} = \frac{E_c \times I_b}{E_c \times I_p}$$

$$\alpha_{f3} = \frac{25742,96 \times 2,14 \times 10^9}{25742,96 \times 8,44 \times 10^8}$$

$$\alpha_{f3} = 2,541$$

4. Sisi bawah pelat (interior)

a. Balok (250 x 400 mm)

$$\text{Lebar balok } (b_w) = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi balok } (h) = 400 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi badan balok } (h_w)$$

$$h_w = h - h_p$$

$$h_w = 400 - 150$$

$$h_w = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar flange balok } (b_f)$$

$$b_f = b_w + 2 \times h_w \leq b_w + 8 \times h_p$$

$$b_f = 400 + 2 \times 250 \leq 250 + 8 \times 150$$

$$b_f = 750 \text{ mm} \leq 1450 \text{ mm}$$

$$\text{Luas bagian 1 } (A_1)$$

$$A_1 = b_w \times h_w$$

$$A_1 = 400 \times 250$$

$$A_1 = 62500 \text{ mm}^2$$

$$\text{Titik berat bagian 1 } (Y_1)$$

$$y_1 = \frac{h_w}{2}$$

$$y_1 = \frac{250}{2}$$

$$y_1 = 125 \text{ mm}$$

$$\text{Luas bagian 2 } (A_2)$$

$$A_2 = b_f \times h_p$$

$$A_2 = 750 \times 150$$

$$A_2 = 112500 \text{ mm}^2$$

$$\text{Titik berat bagian 2 } (Y_2)$$

$$y_2 = h_w + \frac{h_p}{2}$$

$$y_2 = 250 + \frac{150}{2}$$

$$y_2 = 325 \text{ mm}$$

Titik berat gabungan ($\bar{y}$)

$$\bar{y} = \frac{A_1 + y_1 + A_2 + y_2}{A_1 + A_2}$$

$$\bar{y} = \frac{62500 + 125 + 122500 + 325}{62500 + 122500}$$

$$\bar{y} = 253,571 \text{ mm}$$

Momen inersia balok (I_b)

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h_w^3 + A_1(y_1 - \bar{y})^2 + \frac{1}{12} \times b_f \times h_p^3 + A_2(y_2 - \bar{y})^2$$

$$I_b = \frac{1}{12} \times 250 \times 250^3 + 62500(125 - 253,571)^2 + \frac{1}{12} \times 750 \times 150^3 + 112500(325 - 253,571)^2$$

$$I_b = 2,14 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

b. Pelat

Lebar pelat (L_p)

$$L_p = L_x = 4000 \text{ mm}$$

Momen inersia pelat (I_p)

$$I_p = \frac{1}{12} \times L_p \times h_p^3$$

$$I_p = \frac{1}{12} \times 3000 \times 150^3$$

$$I_p = 8,44 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

c. Rasio kekakuan balok/pelat (α_f)

$$\alpha_{f4} = \frac{E_c \times I_b}{E_c \times I_p}$$

$$\alpha_{f4} = \frac{25742,96 \times 2,14 \times 10^9}{25742,96 \times 8,44 \times 10^8}$$

$$\alpha_{f4} = 2,541$$

Berdasarkan perhitungan tersebut di atas, nilai rata-rata rasio kekakuan balok /

plat (α_{fm}) dihitung sebagai berikut :

$$\alpha_{fm} = \frac{\alpha_{f1} + \alpha_{f2} + \alpha_{f3} + \alpha_{f4}}{4}$$

$$\alpha_{fm} = \frac{2,541 + 23,223 + 23,223 + 11,329}{4}$$

$$\alpha_{fm} = 15,079$$

Berdasarkan SNI 2847:2019 Tabel 8.3.1.2, untuk nilai $\alpha_{fm} \geq 2$, digunakan h_{min} sebagai berikut:

Jarak bersih arah memanjang (L_n)

$$L_n = 3000 - \frac{400}{2} - \frac{300}{2}$$

$$L_n = 2650 \text{ mm}$$

$$h_{min1} = \frac{L_n \times (0,8 + \frac{f_y}{1400})}{36 + 9 \times \beta} = \frac{2650 \times (0,8 + \frac{420}{1400})}{36 + 9 \times 1} = 64,778$$

$$h_{min2} = 90 \text{ mm}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, maka diambil nilai tebal pelat yaitu $h = 100 \text{ mm}$ akan digunakan sebagai desain awal untuk pelat yang nantinya akan disesuaikan dengan kebutuhan akibat pengaruh struktur.

4.1.2 Preliminary Design Balok

Direncanakan balok dengan data sebagai berikut :

- a. Bentang balok (L) = 8000 mm
- b. Mutu beton (f'_c) = 30 MPa
- c. Mutu baja tulangan (F_y) = 420 MPa
- d. Selimut beton (C_c) = 40 mm
- e. Diameter tulangan utama (D_u) = 19 mm
- f. Diameter tulangan sengkang (D_s) = 10 mm
- g. *Preliminary* sisi pendek kolom (c_1) = 700 mm
- h. *Preliminary* sisi panjang kolom (c_2) = 700 mm

Berdasarkan SNI 2847:2019 Tabel 9.3.1.1 tentang tinggi minimum balok nonprategang, maka:

$$\begin{aligned} h_{min} &\geq \frac{L}{16} \\ &\geq \frac{8000}{16} \end{aligned}$$

$$\geq 500 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{1}{3} \times h \\ &= \frac{1}{3} \times 500 \\ &= 166.67 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jadi, berdasarkan perhitungan didapatkan dimensi balok 500 x 200 mm.

Kemudian, dilakukan pengecekan kontrol sesuai dengan SNI 2847:2019 Pasal 18.6.2.1, yaitu:

$$\begin{aligned} d &= h - C_c - D_s - \frac{1}{2} D_u \\ &= 500 - 40 - 10 - \frac{1}{2} 19 \\ &= 440,5 \text{ mm} \\ L_n &= L - \frac{c1}{2} - \frac{c2}{2} \\ &= 8000 - \frac{700}{2} - \frac{700}{2} \\ &= 7300 \text{ mm} \end{aligned}$$

Syarat 1 :

$$\begin{aligned} L_n &> 4 \times d \\ 7300 &> 4 \times 440,5 \text{ mm} \\ 7300 &> 1762 \text{ mm (Memenuhi)} \end{aligned}$$

Syarat 2 di ambil nilai terkecil dari :

$$\begin{aligned} b &\geq 250 \text{ mm} \\ 200 &\geq 250 \text{ mm (Memenuhi)} \\ b &\geq 0,3 \times h \\ 200 &\geq 0,3 \times 500 \\ 200 &\geq 150 \text{ mm (Memenuhi)} \end{aligned}$$

Syarat 3 :

$$\begin{aligned} b &< c2 \\ 200 &< 700 \text{ mm (Memenuhi)} \\ b &< 0,75 \times c1 \\ 200 &< 0,75 \times 700 \\ 200 &< 525 \text{ mm (Memenuhi)} \end{aligned}$$

Jadi berdasarkan *preliminary design* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa akan digunakan balok rencana dengan ukuran 450 x 600 mm.

Tabel 4.1 Preliminary Design Balok

ID	Tipe Balok	Ln	h Min (Tabel 2.4)	bw Min (SNI 2847:2019 Pasal 18.6.2.1)	h Pakai	bw Min	bw Pakai	Balok <i>Preliminary</i> (b x h)
B1	Primer	8000	500	166.67	500	166.67	200	200 x 500
B2	Primer	3200	200	66.677	300	100	200	200 x 300
RB	Primer	8000	500	166.67	500	166.67	200	200 x 500
BA1	Sekunder	-	-	-	300	100	200	200 x 300
BA2	Sekunder	-	-	-	300	100	200	200 x 300
BT	Sekunder	-	-	-	300	100	200	200 x 300

4.1.3 Preliminary Design Kolom

Dalam menentukan *preliminary design* pada kolom mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 18.7.2 dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{I_{kolom}}{L_{kolom}} \geq \frac{I_{balok}}{L_{balok}}$$

$$\frac{1}{12} \times \frac{b}{L_{kolom}} \times h^3 \geq \frac{1}{12} \times \frac{b}{L_{balok}} \times h^3$$

$$\frac{1}{12} \times \frac{h}{4150} \times h^3 \geq \frac{1}{12} \times \frac{200}{8000} \times 700^3$$

$$\frac{h^4}{4150} \geq \frac{200}{8000} \times 343000000$$

$$h^4 \geq 8575000 \times 4150$$

$$h^4 \geq 35586250000$$

$$h \geq 355,86 \text{ mm}$$

$$h \text{ pakai} = 700 \text{ mm}$$

Jadi berdasarkan *preliminary design* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa akan digunakan kolom rencana dengan ukuran 700 x 700 mm karena telah memenuhi ketentuan minimal yang ada.

4.2 Pembebanan

Analisis struktur diawali dengan merencanakan pembebanan bangunan, yang meliputi beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa.

4.2.1 Beban Mati

Beban mati diklasifikasikan menjadi berat sendiri struktur dan beban mati tambahan (*superimposed dead load*). Berat sendiri struktur dihitung secara otomatis oleh *ETABS* selama proses pemodelan, sedangkan beban mati tambahan berupa beban merata pada pelat dan dinding. Perincian analisis beban mati tambahan dijabarkan sebagai berikut:

1. Beban mati tambahan pelat

Tabel 4.2 Beban Mati Tambahan Pelat

Material	Berat	Satuan	Keterangan
Clading dan Plafond ACP	5,5	kg/m ²	Untuk plafond
Keramik dan Spesi (tebal 3 cm)	65	kg/m ²	
<i>Waterproofing</i> /Insulasi	3	kg/m ²	Lapisan pelat beton
Elektrikal (Instalasi, Tray, dan Gantungan)	5	kg/m ²	
<i>Plumbing</i> (Sanitasi)	10	kg/m ²	
<i>Sprinkler</i> dan Gantungan	5	kg/m ²	
Tak Terduga Lantai	25	kg/m ²	
Jumlah	118,5	kg/m ²	
Dibulatkan	118,5	kg/m ²	
Input di <i>ETABS</i>	1,1621	kN/m ²	

2. Beban mati tambahan pelat atap (dak)

Tabel 4.3 Beban Mati Tambahan Pelat Atap (dak)

Material	Berat	Satuan	Keterangan
Clading dan Plafond ACP	5,5	kg/m ²	Untuk plafond
<i>Waterproofing</i> /Insulasi	3	kg/m ²	Lapisan pelat beton
Elektrikal (Instalasi, Tray, dan Gantungan)	5	kg/m ²	
<i>Plumbing</i> (Sanitasi)	10	kg/m ²	
<i>Sprinkler</i> dan Gantungan	5	kg/m ²	
Tak Terduga Lantai	25	kg/m ²	
Jumlah	53,5	kg/m ²	
Dibulatkan	53,5	kg/m ²	
Input di <i>ETABS</i>	0,5247	kN/m ²	

3. Beban mati tambahan pelat tribun

Tabel 4.4 Beban Mati Tambahan Pelat Tribun

Material	Berat	Satuan	Keterangan
Clading dan Plafond ACP	5,5	kg/m ²	Untuk plafond
<i>Waterproofing</i> /Insulasi	3	kg/m ²	Lapisan pelat beton
Tribun	27,294	kg/m ²	Massa dibagi area
Elektrikal (Instalasi, Tray, dan Gantungan)	5	kg/m ²	
<i>Plumbing</i> (Sanitasi)	10	kg/m ²	
<i>Sprinkler</i> dan Gantungan	5	kg/m ²	
Tak Terduga Lantai	25	kg/m ²	
Jumlah	80,794	kg/m ²	
Dibulatkan	80,7	kg/m ²	
Input di <i>ETABS</i>	0,7914	kN/m ²	

4. Beban mati tambahan balok lantai 2 dan 5 (h = 3,6 m)

Tabel 4.5 Beban Mati Tambahan Balok Lantai 2 dan 5 (h = 3,6 m)

Material	Berat	Tinggi Lantai (m)	Jumlah	Total
Dinding pasangan hebel	100	3,6		360
<i>Finishing</i> dinding (asumsi tebal 2 cm)	44	3,6		158,4
Clading dan Plafond ACP	5,5			5,5
Elektrikal (Instalasi, Tray, dan Gantungan)	5		2	10
<i>Plumbing</i> (Sanitasi)	10		2	20
<i>Sprinkler</i> dan gantungan	5		2	10
<i>Hydrant</i> dan gantungan	75		1	75
Tak Terduga Balok	50		1	50
Jumlah total				688,9
Dibulatkan				688,9
Input di <i>ETABS</i>				6,7558

5. Beban mati tambahan balok lantai 3 dan 4 ($h = 4,2$ m)**Tabel 4.6** Beban Mati Tambahan Balok Lantai 3 dan 4 ($h = 4,2$ m)

Material	Berat	Tinggi Lantai (m)	Jumlah	Total
Dinding pasangan hebel	100	4,2		420
<i>Finishing</i> dinding (asumsi tebal 2 cm)	44	4,2		184,8
Clading dan Plafond ACP	5,5			5,5
Elektrikal (Instalasi, Tray, dan Gantungan)	5		2	10
<i>Plumbing</i> (Sanitasi)	10		2	20
<i>Sprinkler</i> dan gantungan	5		2	10
<i>Hydrant</i> dan gantungan	75		1	75
Tak Terduga Balok	50		1	50
Jumlah total				775,3
Dibulatkan				775
Input di ETABS				7,6031

6. Beban mati tambahan balok *rooftop* ($h = 3,15$ m)**Tabel 4.7** Beban Mati Tambahan Balok *Rooftop* ($h = 3,15$ m)

Material	Berat	Tinggi Lantai (m)	Jumlah	Total
Dinding pasangan hebel	100	3,15		315
<i>Finishing</i> dinding (asumsi tebal 2 cm)	44	3,15		138,6
Clading dan Plafond ACP	5,5			5,5
Elektrikal (Instalasi, Tray, dan Gantungan)	5		2	10
<i>Plumbing</i> (Sanitasi)	10		2	20
<i>Sprinkler</i> dan gantungan	5		0,5	2,5
<i>Hydrant</i> dan gantungan	75		1	75
Tak Terduga Balok	50		1	50
Jumlah total				616,6
Dibulatkan				617
Input di ETABS				6,0468

7. Beban mati tambahan balok *tempered glass***Tabel 4.8** Beban Mati Tambahan Balok Tempered Glass

Material	Berat	Tinggi Lantai (m)	Total	Input
<i>Tempered glass laminated</i> tebal 10 mm	26	3,6	93,6	0,918
<i>Tempered glass laminated</i> tebal 10 mm	26	4,2	109,2	1,071
<i>Tempered glass laminated</i> tebal 10 mm	26	3,15	81,9	0,803

8. Beban mati tambahan balok lantai 2 dan 5 ($h = 3,6$ m) dinding partisi**Tabel 4.9** Beban Mati Tambahan Balok lantai 2 dan 5 ($h = 3,6$ m) dinding partisi

Material	Berat	Tinggi Lantai (m)	Jumlah	Total
Elektrikal (Instalasi, Tray, dan Gantungan)	5		2	10
Tak Terduga Balok	50		1	50
Jayaboard <i>Partition</i> dan rangka	53	3,6		190,8
Jumlah total				250,8
Dibulatkan				251
Input di <i>ETABS</i>				2,46

9. Beban mati tambahan balok lantai 3 dan 4 ($h = 4,2$ m) dinding partisi**Tabel 4.10** Beban Mati Tambahan Balok Lantai 3 dan 4 ($h = 4,2$ m) dinding partisi

Material	Berat	Tinggi Lantai (m)	Jumlah	Total
Elektrikal (Instalasi, Tray, dan Gantungan)	5		2	10
Tak Terduga Balok	50		1	50
Jayaboard <i>Partition</i> dan rangka	53	4,2		222,6
Jumlah total				282,6
Dibulatkan				282,6
Input di <i>ETABS</i>				2,7714

4.2.2 Beban Hidup**Tabel 4.11** Beban Hidup Sesuai Fungsi Ruangan

Fungsi Ruangan	Intensitas	Satuan
Tribun	2,87	kN/m ²
Dak/ <i>Maintenance Floor</i> (Atap bukan untuk hunian)	0,96	kN/m ²
Koridor dan Lobi	4,79	kN/m ²
Koridor di atas lantai pertama	3,83	kN/m ²
Mushola (Ruang pertemuan lainnya)	4,79	kN/m ²
Panel (Jalur untuk akses-pemeliharaan)	4,79	kN/m ²
Tangga	4,79	kN/m ²
Toilet (WC)	2,4	kN/m ²
Ruang Rapat	2,4	kN/m ²
Kantor	2,4	kN/m ²
Ruang Kelas	1,92	kN/m ²
Panggung	4,79	kN/m ²

Tabel 4.12 Beban Hidup Atap

Fungsi Ruangan	Berat Satuan (kN/m ²)	Bentang (m)	Total (kN/m)
Beban Hidup Atap	0,96	1,2	1,152

4.2.3 Beban Angin

Tabel 4.13 Beban Angin

Data			Satuan	Keterangan
Kecepatan Angin (V)	=	89,56	Mph	(HB 212-2002)-(700 tahun)
Eksposur	=	B	-	SNI 1727:2020 Tabel 26.7.3
Kekasaran permukaan	=	B	-	SNI 1727:2020 Tabel 26.7.2
K_d	=	0,85	-	Faktor arah angin
K_{zt}	=	1	-	Faktor topografi
Faktor Elevasi Tanah	=	1	-	SNI 1727:2020 Pasal 26.9

4.2.4 Beban Gempa

Perencanaan beban gempa pada struktur Gedung *Cadaster and Geoinformatics Engineering* UGM mengacu pada SNI 1726:2019, dengan menerapkan analisis respon spektrum pada perangkat lunak *ETABS*.

1. Klasifikasi situs

Berdasarkan evaluasi nilai rata-rata *Standard Penetration Test* (N-SPT) hingga kedalaman 30 meter, diperoleh nilai rata-rata (N) sebesar 21,9 untuk Titik Bor 1 (BH-1) dan 16,0 untuk Titik Bor 2 (BH-2). Karena kedua nilai tersebut berada dalam kriteria rentang 15 hingga 50, maka sesuai dengan **Tabel 2.5**, kondisi tanah di lokasi proyek ditetapkan sebagai Kelas Situs SD (Tanah Sedang). Klasifikasi ini selanjutnya digunakan sebagai acuan dasar dalam menentukan parameter beban gempa (*Response Spectrum*) desain.

2. Kategori risiko bangunan Gedung

Merujuk pada **Tabel 2.13**, fungsi gedung sekolah dan fasilitas pendidikan pada Gedung *Cadaster and Geoinformatics Engineering* UGM mengategorikan struktur ini ke dalam kategori risiko IV.

3. Faktor keutamaan gempa

Gedung *Cadaster and Geoinformatics Engineering* UGM yang termasuk dalam kategori risiko IV, menurut **Tabel 2.14** memiliki nilai faktor keutamaan gempa (I_e) 1,5.

4. Parameter respons spektral

Parameter respons spektral diperoleh dari website rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/ yang menampilkan grafik respon spektra sebagai berikut:

4/30/26, 12:17 AM

Desain Spektra Indonesia

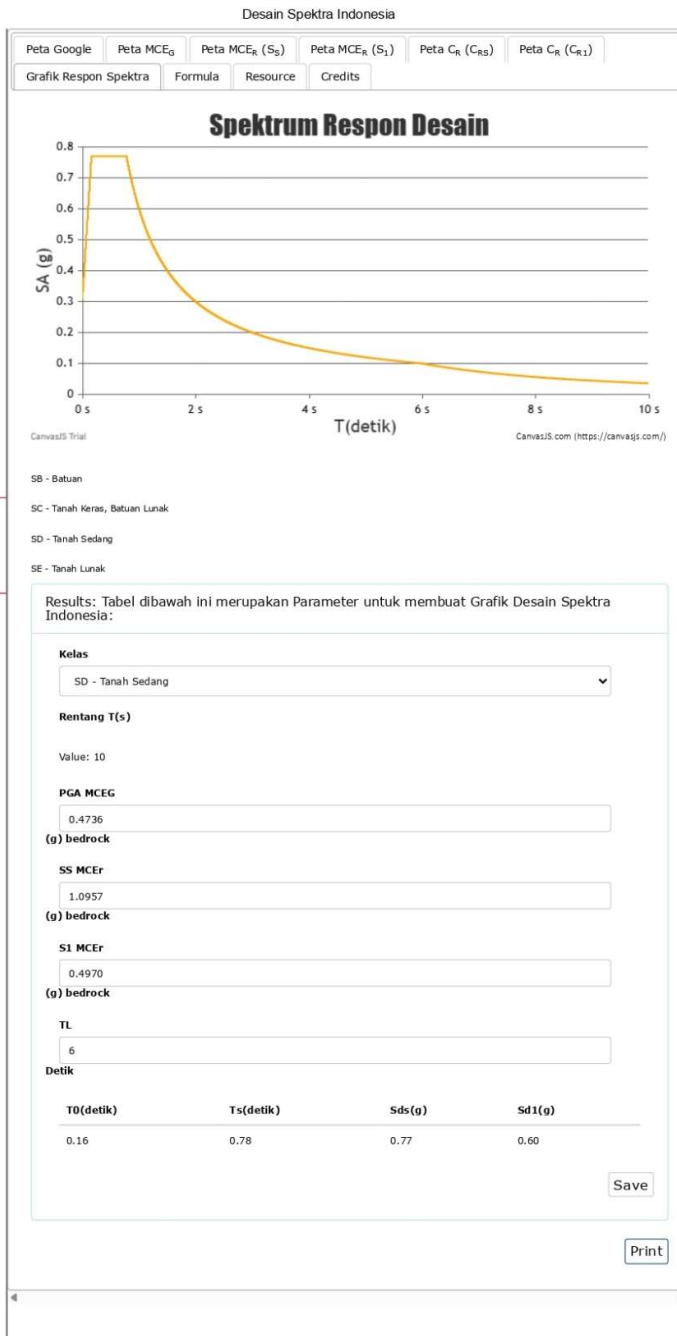



Jenis Input:

Koordinat

Lintang:

Bujur:


<https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/index.php?pga=0.4736&ss=1.0957&s1=0.4970&tl=6&kelas=4&range=10#grafik>

1/1

Gambar 4.2 Spektrum Respon Desain

Sumber: Desain Spektra Indonesia (2026)

Berdasarkan grafik tersebut, diperoleh nilai parameter percepatan respons spektral Ss sebesar 1,0957 g dan S1 sebesar 0,4970 g.

5. Faktor amplifikasi getaran, F_a dan F_v

a. Nilai koefisien situs, F_a

Melalui interpolasi linier berdasarkan nilai $S_s = 1,0957$ dan klasifikasi situs tanah sedang (SD) pada Tabel 6 SNI 1726:2019, diperoleh nilai koefisien situs F_a sebesar 1,062.

b. Nilai koefisien situs, F_v

Melalui interpolasi linier berdasarkan nilai $S_1 = 0,497$ dan kelas situs SD pada Tabel 7 SNI 1726:2019, diperoleh nilai koefisien situs F_v sebesar 1,803.

6. Parameter respons spektral

a. Parameter respon spektral percepatan maksimum (S_{MS} dan S_{M1})

$$\begin{aligned} S_{MS} &= S_s \times F_a \\ &= 1,0957 \times 1,062 \\ &= 1,164 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{M1} &= S_1 \times F_v \\ &= 0,497 \times 1,803 \\ &= 0,896 \text{ g} \end{aligned}$$

b. Parameter percepatan spektral desain (S_{DS} dan S_{D1})

$$\begin{aligned} S_{DS} &= 2/3 \times S_{MS} \\ &= 2/3 \times 1,164 \\ &= 0,776 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{D1} &= 2/3 \times S_{M1} \\ &= 2/3 \times 0,896 \\ &= 0,597 \text{ g} \end{aligned}$$

7. Kategori desain seismik (KDS)

Merujuk pada Tabel 8 dan 9 SNI 1726:2019, parameter respons percepatan periode pendek dan 1 detik mengategorikan Gedung *Cadaster and Geoinformatics Engineering* UGM ke dalam Kategori Desain Seismik (KDS) D dengan risiko kegempaan tinggi. Oleh karena itu, struktur ini wajib dirancang menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).

8. Nilai Koefisien Faktor R , Ω , dan C_d

Karena Gedung *Cadaster and Geoinformatics Engineering* UGM direncanakan menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) beton bertulang, maka parameter seismik struktur berdasarkan Pasal 7.2.2 SNI 1726:2019 ditetapkan sebagai berikut:

- a. Koefisien modifikasi respons (R) = 8
- b. Faktor kuat lebih sistem (Ω_0) = 3
- c. Faktor pembesaran defleksi (C_d) = 5,5

9. Periode Fundamental

Perhitungan periode fundamental pendekatan struktur mengacu pada ketentuan pembatasan periode minimum ($T_{a,min}$) dan periode maksimum ($T_{a,max}$) Berdasarkan hasil pemodelan pada perangkat lunak *ETABS*, diperoleh periode struktur (T_c) dan hasil kontrol periode sebagai berikut:

- a. Periode minimum ($T_{a,min}$) = $C_t \times H_n^x$ = 0,7618 detik
- b. Periode maksimum ($T_{a,max}$) = $C_t \times T_a$ = 1,06657 detik
- c. Periode hasil Analisa *ETABS* (T_c)
 - T_c arah X = 1,282 detik
 - T_c arah Y = 1,342 detik
 - Cek kontrol = $T_{a,min} < T_c < T_{a,max}$
 = $0,7618 < 1,282 < 1,06657$
 - Periode arah X, T_x = 1,06657 detik
 - Periode arah Y, T_y = 1,06657 detik

4.3 Kombinasi Pembebanan

Berdasarkan persyaratan beban minimum untuk struktur tahan gempa yang diatur dalam Pasal 4.2.2.1 dan 4.2.2.3 SNI 1726:2019, kombinasi pembebanan yang digunakan ditentukan dengan melibatkan pengaruh beban gempa horizontal (menggunakan faktor redundansi $\rho = 1,3$) dan beban gempa vertikal (menggunakan nilai $S_{DS} = 0,7756$). Adapun perumusan kombinasi pembebanan tersebut dijabarkan sebagai berikut:

a. Kombinasi Pembebanan LRFD (*Load and Resistance Factor Design*)

Digunakan untuk perancangan elemen struktur atas (seperti balok, kolom dan pelat). Kombinasi ini meninjau kondisi batas ultimit (*ultimate limit state*) dengan memfaktorkan beban kerja dan mengurangi kekuatan material, sehingga kapasitas elemen dipastikan aman dan mampu menahan kombinasi beban ekstrem tanpa mengalami keruntuhan.

Tabel 4.14 Kombinasi Pembebanan Ultimit (LRFD)

Nomor		<i>DL</i>	<i>SIDL</i>	<i>LL</i>	<i>Lr</i>	<i>R</i>	<i>Wx</i>	<i>Wy</i>	<i>Ex</i>	<i>Ey</i>
1	1.1	1,4	1,4	-	-	-	-	-	-	-
2	2.1	1,2	1,2	1,6	0,5	-	-	-	-	-
	2.2	1,2	1,2	1,6	-	0,5	-	-	-	-
3	3.1	1,2	1,2	1	1,6	-	-	-	-	-
	3.2	1,2	1,2	-	1,6	-	0,5	-	-	-
	3.3	1,2	1,2	-	1,6	-	-	0,5	-	-
	3.4	1,2	1,2	-	1,6	-	0,375	0,375	-	-
	3.5	1,2	1,2	1	-	1,6	-	-	-	-
	3.6	1,2	1,2	-	-	1,6	0,5	-	-	-
	3.7	1,2	1,2	-	-	1,6	-	0,5	-	-
	3.8	1,2	1,2	-	-	1,6	0,375	0,375	-	-
4	4.1	1,2	1,2	1	0,5	-	1	-	-	-
	4.2	1,2	1,2	1	0,5	-	-	1	-	-
	4.3	1,2	1,2	1	0,5	-	0,75	0,75	-	-
	4.4	1,2	1,2	1	-	0,5	1	-	-	-
	4.5	1,2	1,2	1	-	0,5	-	1	-	-
	4.6	1,2	1,2	1	-	0,5	0,75	0,75	-	-
5	5.1	0,9	0,9	-	-	-	1	-	-	-
	5.2	0,9	0,9	-	-	-	-	1	-	-
	5.3	0,9	0,9	-	-	-	0,75	0,75	-	-
6	6.1	1,3551	1,3551	1	-	-	-	-	1,3	0,39
	6.2	1,3551	1,3551	1	-	-	-	-	1,3	-0,39
	6.3	1,3551	1,3551	1	-	-	-	-	-1,3	0,39
	6.4	1,3551	1,3551	1	-	-	-	-	-1,3	-0,39
	6.5	1,3551	1,3551	1	-	-	-	-	0,39	1,3
	6.6	1,3551	1,3551	1	-	-	-	-	-0,39	1,3
	6.7	1,3551	1,3551	1	-	-	-	-	0,39	-1,3
	6.8	1,3551	1,3551	1	-	-	-	-	-0,39	-1,3
7	7.1	0,7449	0,7449	-	-	-	-	-	1,3	0,39
	7.2	0,7449	0,7449	-	-	-	-	-	1,3	-0,39
	7.3	0,7449	0,7449	-	-	-	-	-	-1,3	0,39
	7.4	0,7449	0,7449	-	-	-	-	-	-1,3	-0,39
	7.5	0,7449	0,7449	-	-	-	-	-	0,39	1,3
	7.6	0,7449	0,7449	-	-	-	-	-	-0,39	1,3
	7.7	0,7449	0,7449	-	-	-	-	-	0,39	-1,3

Nomor	DL	SIDL	LL	Lr	R	Wx	Wy	Ex	Ey
7.8	0,7449	0,7449	-	-	-	-	-	-0,39	-1,3

b. Kombinasi Pembebanan LRFD - OV (*Load and Resistance Factor Design - Overstressed*)

Digunakan secara spesifik untuk mengekstrak gaya reaksi tumpuan maksimum (*joint reaction*) dari struktur atas. Nilai reaksi yang telah diamplifikasi dengan faktor kuat lebih seismik (Ω_0) ini dijadikan dasar pembebanan dalam mendesain *pile cap* (poer) guna memenuhi filosofi desain kapasitas (*capacity design*), sehingga kegagalan getas (*brittle failure*) pada fondasi dapat dicegah ketika struktur atas mengalami pelelehan saat gempa kuat.

Tabel 4.15 Kombinasi Pembebanan LRFD - OV

Nomor	DL	SIDL	LL	Lr	R	Wx	Wy	Ex	Ey
1	1.1	1.4	1.4						
2	2.1	1.2	1.2	1.6	0.5				
	2.2	1.2	1.2	1.6		0.5			
3	3.1	1.2	1.2	1	1.6				
	3.2	1.2	1.2		1.6		0.5		
	3.3	1.2	1.2		1.6			0.5	
	3.4	1.2	1.2		1.6		0.375	0.375	
	3.5	1.2	1.2	1		1.6			
	3.6	1.2	1.2			1.6	0.5		
	3.7	1.2	1.2			1.6		0.5	
	3.8	1.2	1.2			1.6	0.375	0.375	
4	4.1	1.2	1.2	1	0.5		1		
	4.2	1.2	1.2	1	0.5			1	
	4.3	1.2	1.2	1	0.5		0.75	0.75	
	4.4	1.2	1.2	1		0.5	1		
	4.5	1.2	1.2	1		0.5		1	
	4.6	1.2	1.2	1		0.5	0.75	0.75	
5	5.1	0.9	0.9				1		
	5.2	0.9	0.9					1	
	5.3	0.9	0.9				0.75	0.75	
6	6.1	1.3551	1.3551	1				3	0.9
	6.2	1.3551	1.3551	1				3	-0.9
	6.3	1.3551	1.3551	1				-3	0.9
	6.4	1.3551	1.3551	1				-3	-0.9
	6.5	1.3551	1.3551	1				0.9	3
	6.6	1.3551	1.3551	1				-0.9	3
	6.7	1.3551	1.3551	1				0.9	-3
	6.8	1.3551	1.3551	1				-0.9	-3
7	7.1	0.7449	0.7449					3	0.9

Nomor		DL	SIDL	LL	Lr	R	Wx	Wy	Ex	Ey
	7.2	0.7449	0.7449						3	-0.9
	7.3	0.7449	0.7449						-3	0.9
	7.4	0.7449	0.7449						-3	-0.9
	7.5	0.7449	0.7449						0.9	3
	7.6	0.7449	0.7449						-0.9	3
	7.7	0.7449	0.7449						0.9	-3
	7.8	0.7449	0.7449						-0.9	-3

c. Kombinasi Pembebanan ASD (*Allowable Stress Design*)

Diterapkan secara khusus untuk perancangan struktur bawah yang berkaitan dengan parameter geoteknik. Pendekatan ini menggunakan beban layan aktual (tanpa difaktorkan) untuk mengevaluasi interaksi fondasi dan tanah pada kondisi batas layan (*serviceability limit state*), termasuk menghitung dimensi fondasi, mengontrol tegangan kontak, serta membatasi penurunan total dan beda penurunan.

Tabel 4.16 Kombinasi Pembebanan Izin (ASD)

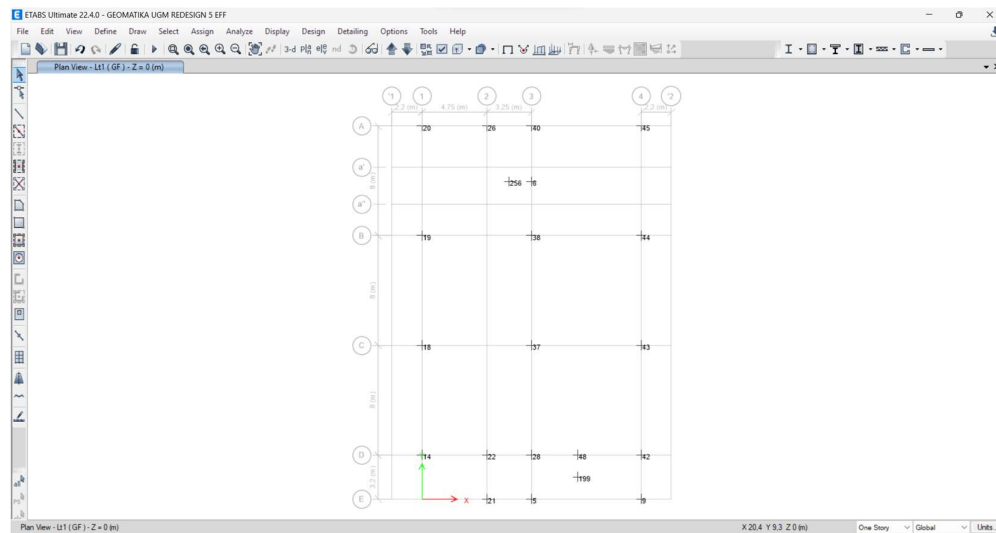
Nomor		Kode	DL	SIDL	LL	Lr	R	Wx	Wy	Ex	Ey
1	1.1	G1	1	1							
2	2.1	G2	1	1	1						
3	3.1	G3	1	1		1					
	3.2	G4	1	1			1				
4	4.1	G5	1	1	0,75	0,75					
	4.2	G6	1	1	0,75		0,75				
5	5.1	G7	1	1				0,6			
	5.2	G8	1	1					0,6		
	5.3	G9	1	1				0,45	0,45		
6	6.1	G10	1	1	0,75	0,75		0,45			
	6.2	G11	1	1	0,75	0,75			0,45		
	6.3	G12	1	1	0,75	0,75		0,3375	0,3375		
	6.4	G13	1	1	0,75		0,75	0,45			
	6.5	G14	1	1	0,75		0,75		0,45		
	6.6	G15	1	1	0,75		0,75	0,3375	0,3375		
7	7.1	G16	0,6	0,6				0,6			
	7.2	G17	0,6	0,6					0,6		
	7.3	G18	0,6	0,6				0,45	0,45		
8	8.1	N1	1,109	1,109						0,273	0,91
	8.2	N2	1,109	1,109						0,273	-0,91
	8.3	N3	1,109	1,109						-0,273	0,91
	8.4	N4	1,109	1,109						-0,273	-0,91
	8.5	N5	1,109	1,109						0,91	0,273
	8.6	N6	1,109	1,109						-0,91	0,273

Nomor	Kode	DL	SIDL	LL	Lr	R	Wx	Wy	Ex	Ey
	8.7	N7	1,109	1,109					0,91	-0,273
	8.8	N8	1,109	1,109					-0,91	-0,273
9	9.1	N9	1,081	1,081	0,75				0,2048	0,6825
	9.2	N10	1,081	1,081	0,75				0,2048	-0,6825
	9.3	N11	1,081	1,081	0,75				-0,2048	0,6825
	9.4	N12	1,081	1,081	0,75				-0,2048	-0,6825
	9.5	N13	1,081	1,081	0,75				0,6825	0,2048
	9.6	N14	1,081	1,081	0,75				-0,6825	0,2048
	9.7	N15	1,081	1,081	0,75				0,6825	-0,2048
	9.8	N16	1,081	1,081	0,75				-0,6825	-0,2048
10	10.1	N17	0,491	0,491					0,273	0,91
	10.2	N18	0,491	0,491					0,273	-0,91
	10.3	N19	0,491	0,491					-0,273	0,91
	10.4	N20	0,491	0,491					-0,273	-0,91
	10.5	N21	0,491	0,491					0,91	0,273
	10.6	N22	0,491	0,491					-0,91	0,273
	10.7	N23	0,491	0,491					0,91	-0,273
	10.8	N24	0,491	0,491					-0,91	-0,273
8	8.1	K1	1,109	1,109					0,63	2,1
	8.2	K2	1,109	1,109					0,63	-2,1
	8.3	K3	1,109	1,109					-0,63	2,1
	8.4	K4	1,109	1,109					-0,63	-2,1
	8.5	K5	1,109	1,109					2,1	0,63
	8.6	K6	1,109	1,109					-2,1	0,63
	8.7	K7	1,109	1,109					2,1	-0,63
	8.8	K8	1,109	1,109					-2,1	-0,63
9	9.1	K9	1,081	1,081	0,75				0,4725	1,575
	9.2	K10	1,081	1,081	0,75				0,4725	-1,575
	9.3	K11	1,081	1,081	0,75				-0,4725	1,575
	9.4	K12	1,081	1,081	0,75				-0,4725	-1,575
	9.5	K13	1,081	1,081	0,75				1,575	0,4725
	9.6	K14	1,081	1,081	0,75				-1,575	0,4725
	9.7	K15	1,081	1,081	0,75				1,575	-0,4725
	9.8	K16	1,081	1,081	0,75				-1,575	-0,4725
10	10.1	K17	0,491	0,491					0,63	2,1
	10.2	K18	0,491	0,491					0,63	-2,1
	10.3	K19	0,491	0,491					-0,63	2,1
	10.4	K20	0,491	0,491					-0,63	-2,1
	10.5	K21	0,491	0,491					2,1	0,63
	10.6	K22	0,491	0,491					-2,1	0,63
	10.7	K23	0,491	0,491					2,1	-0,63
	10.8	K24	0,491	0,491					-2,1	-0,63

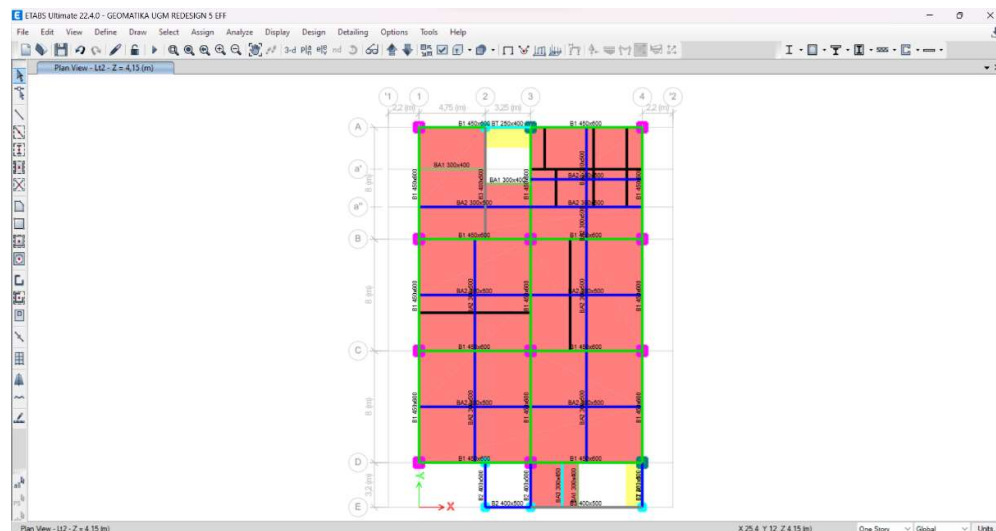
4.4 Analisa Struktur

4.4.1 Permodelan Struktur

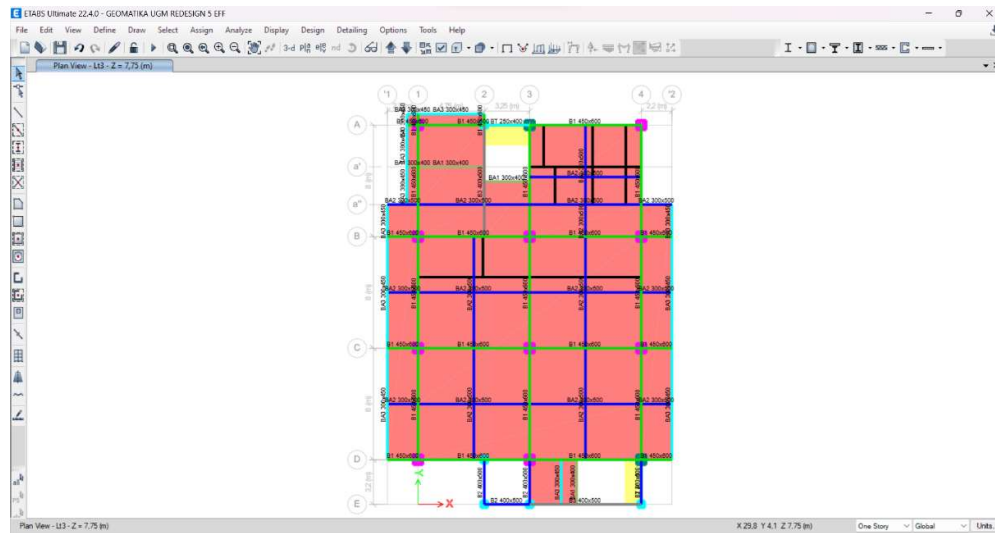
Denah pemodelan struktur untuk setiap lantai disajikan sebagai berikut. Pemodelan ini dilakukan menggunakan *ETABS* sebelum kemudian dianalisis berdasarkan rencana pembebanan yang telah ditentukan.



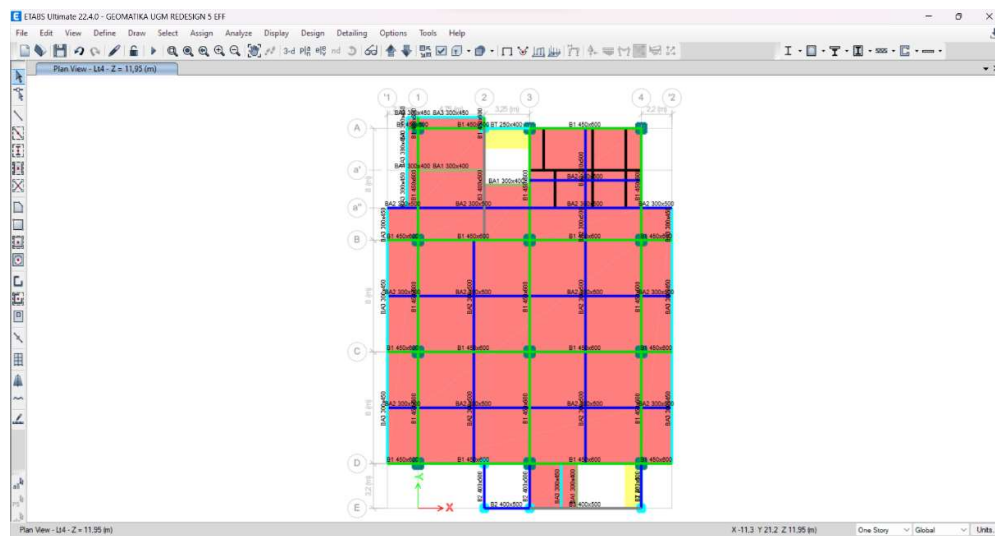
Gambar 4.3 Denah Titik *Joint*



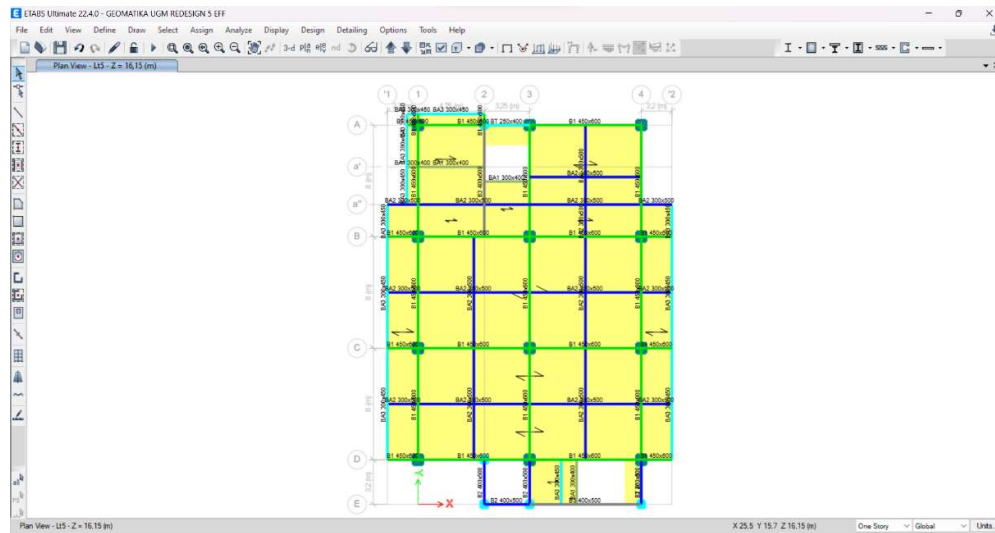
Gambar 4.4 Permodelan Balok dan Pelat 2 ($h = 4,15$ m)



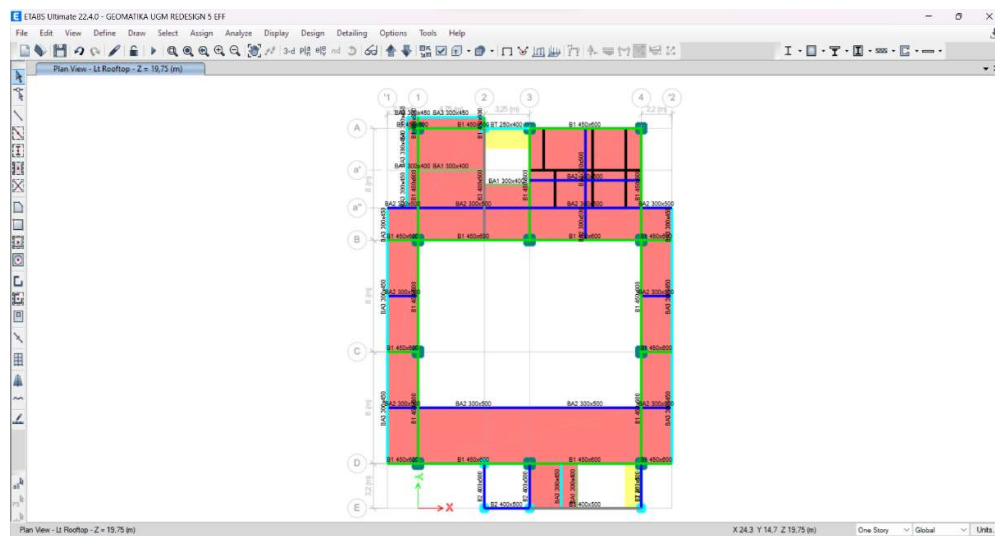
Gambar 4.5 Permodelan Balok dan Pelat 3 ($h = 7,75$ m)



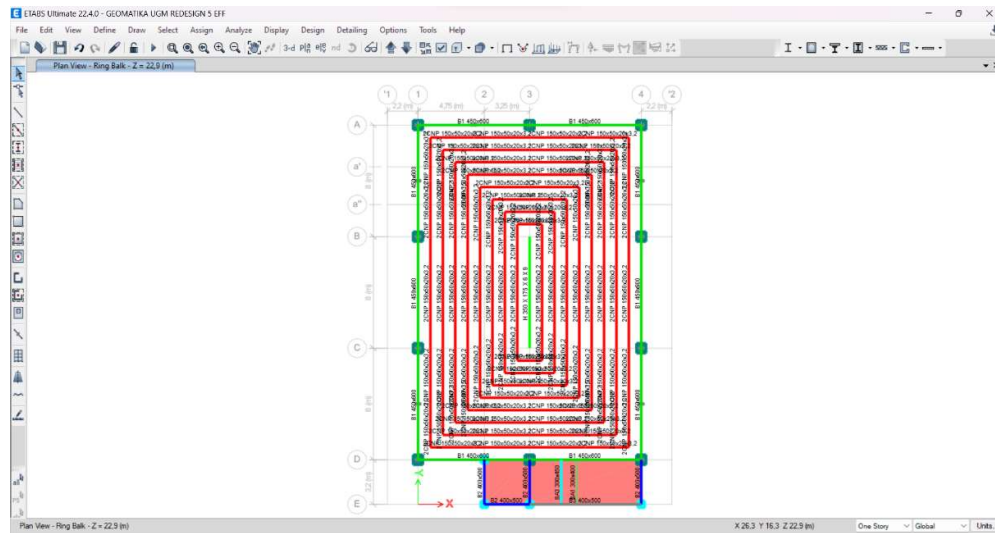
Gambar 4.6 Permodelan Balok dan Pelat 4 ($h = 11,95$ m)



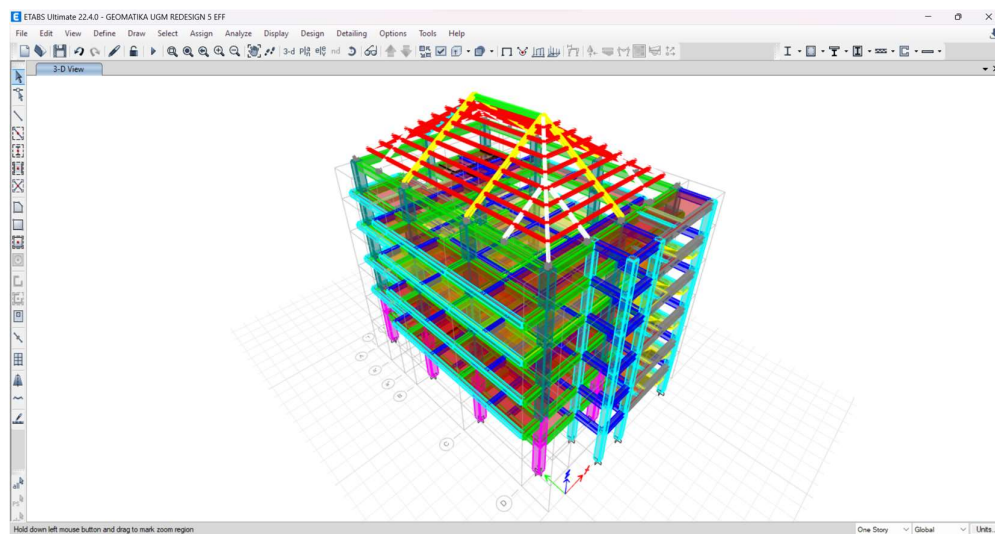
Gambar 4.7 Permodelan Balok dan Pelat 5 ($h = 16,15$ m)



Gambar 4.8 Permodelan Balok dan Pelat *Roof* ($h = 19,75$ m)



Gambar 4.9 Permodelan Balok dan Pelat Ringbalk ($h = 22,9 \text{ m}$)



Gambar 4.10 3D Permodelan Struktur pada *ETABS*

4.4.2 Analisa Struktur Hasil Desain

1. Analisa struktur tahap I

Analisis tahap pertama ini bertujuan untuk menentukan titik pusat massa, kekakuan, serta periode struktur. Parameter-parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung faktor skala pada analisis Respons Spektrum. Adapun rincian hasil dari analisis tahap 1 adalah sebagai berikut:

a. Periode struktur

Tabel 4.17 Periode Struktur

Case	Mode	Period	UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRZ
		sec						
Modal	1	1.342	0.0406	0.7426	0.0100	0.0406	0.7426	0.01
Modal	2	1.282	0.7215	0.0474	0.0291	0.7622	0.79	0.0391
Modal	3	1.114	0.0349	0.0033	0.7702	0.797	0.7933	0.8094
Modal	4	0.402	0.0103	0.1186	0.0007	0.8073	0.9119	0.8101
Modal	5	0.393	0.1129	0.0111	0.0017	0.9203	0.923	0.8118
Modal	6	0.339	0.0021	0.0002	0.1192	0.9224	0.9231	0.931
Modal	7	0.212	0.0424	0.0013	0.0001	0.9648	0.9245	0.9311
Modal	8	0.208	0.0012	0.0434	0.0000	0.966	0.9678	0.9311
Modal	9	0.18	0.0001	0.0000	0.0395	0.9661	0.9678	0.9706
Modal	10	0.136	0.0151	0.0000	0.0002	0.9812	0.9678	0.9708
Modal	11	0.134	0.0006	0.0000	0.0003	0.9817	0.9679	0.9711
Modal	12	0.13	0.0000	0.0155	0.0001	0.9817	0.9834	0.9712
Modal	13	0.128	0.0005	0.0000	0.0005	0.9822	0.9834	0.9717
Modal	14	0.127	0.0009	0.0015	0.0010	0.9831	0.9849	0.9727
Modal	15	0.117	0.0001	0.0006	0.0002	0.9832	0.9856	0.9729
Modal	16	0.113	0.0014	0.0000	0.0097	0.9846	0.9856	0.9826
Modal	17	0.11	0.0013	0.0004	0.0041	0.9859	0.986	0.9866
Modal	18	0.107	0.0010	0.0007	0.0002	0.9869	0.9867	0.9869
Modal	19	0.096	0.0000	0.0000	0.0001	0.9869	0.9867	0.9869
Modal	20	0.085	0.0020	0.0110	0.0000	0.9889	0.9977	0.9869
Modal	21	0.085	0.0104	0.0019	0.0003	0.9993	0.9996	0.9872
Modal	22	0.076	0.0003	0.0001	0.0115	0.9996	0.9996	0.9987
Modal	23	0.071	0.0004	0.0000	0.0009	1	0.9996	0.9996
Modal	24	0.069	0.0000	0.0004	0.0000	1	1	0.9996
Modal	25	0.064	0.0000	0.0000	0.0000	1	1	0.9996
Modal	26	0.063	0.0000	0.0000	0.0004	1	1	1

Berdasarkan tinjauan terhadap data partisipasi massa, model struktur ini menunjukkan kinerja yang ideal. Hal tersebut diindikasikan oleh urutan tiga ragam getar (*mode shape*). Pertama, di mana mode 1 didominasi oleh translasi arah Y ($UY = 0,7426$) dengan periode 1,342 detik, disusul oleh mode 2 berupa translasi arah X ($UX = 0,7215$) pada periode 1,282 detik. Sementara itu, mode 3 didominasi oleh perilaku rotasi atau torsi ($RZ = 0,7702$) dengan periode 1,114 detik. Selain itu, syarat akumulasi partisipasi massa berdasarkan SNI 1726-2019

juga telah terpenuhi secara maksimal, yakni mencapai 100% (Sum UX) pada ragam getar terakhir.

Sesuai ketentuan SNI 1726-2019, nilai $C_t = 0,0466$ dan nilai $x = 0,9$ dengan tinggi bangunan $H = 22,9$ m. maka diperoleh:

$T_a : 0,761833899$

$C_u : 1,4$

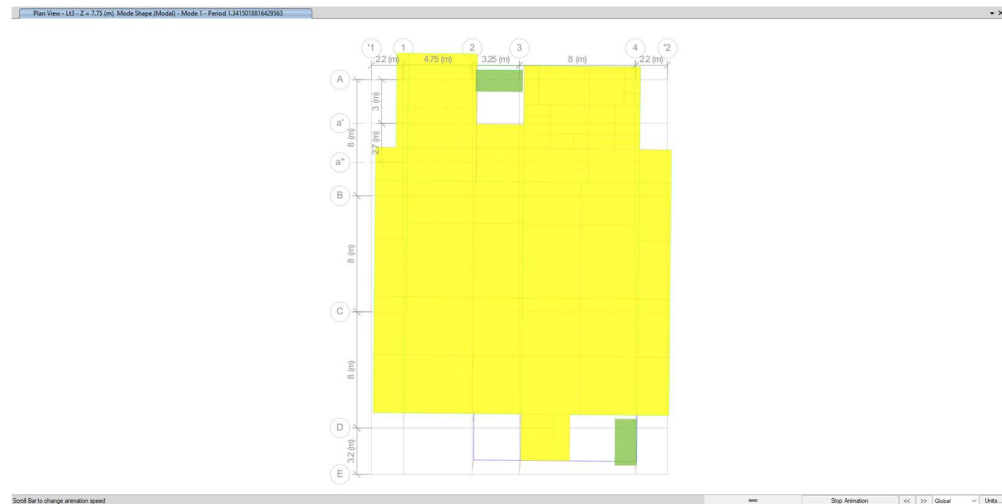
$C_u T_a : 1,066567459$

$T_c : 1,342$

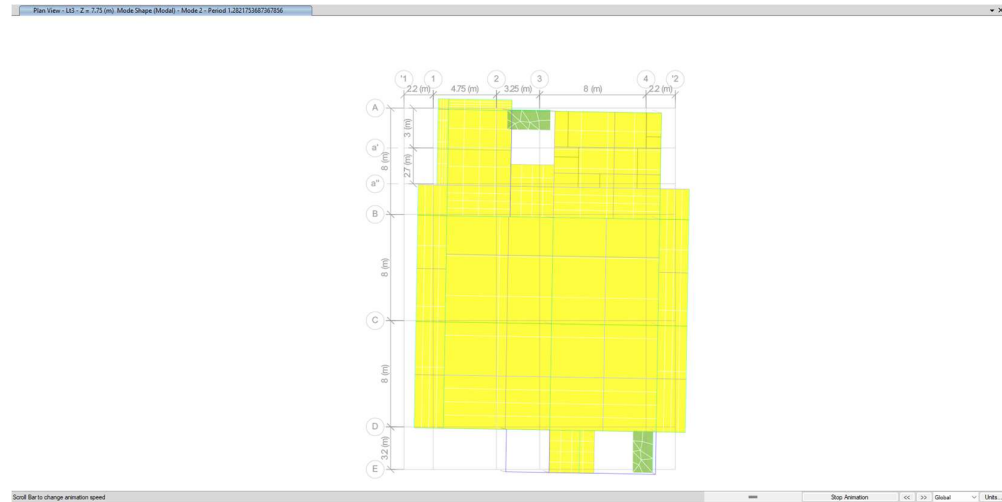
$T_c < C_u T_a$ maka $T_{pakai} = C_u T_a = 1,066567459$

Nilai T ini diperlukan untuk analisis statik ekuivalen pada tahap selanjutnya.

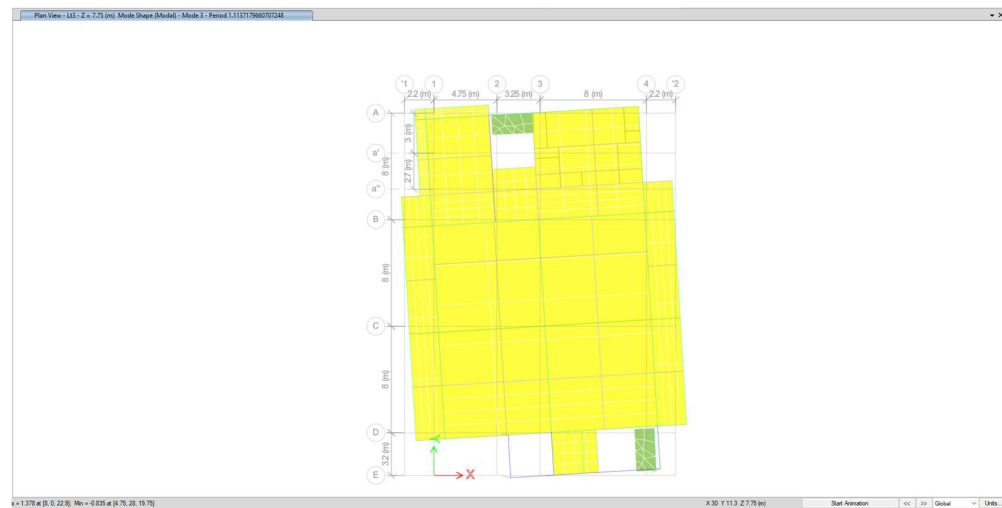
Demikian pula mode shape struktur pada tiga mode pertama memberikan pola displacement modal yang memenuhi syarat SNI 1726-2019 dimana **Gambar 4.11**, **4.12** dan **4.13** menunjukkan displacement struktur yang sesuai dengan diharapkan.



Gambar 4.11 Mode Shape 1 – $T = 1,342$; $U_Y = 0,7426$



Gambar 4.12 Mode Shape 2 – $T = 1,282$; $UX = 0,7215$



Gambar 4.13 Mode Shape 3 – $T = 1,114$; $RZ = 0,7702$

b. Ketidakberaturan torsi lateral

Tabel 4.18 dan **Tabel 4.19** di bawah menyajikan hasil pemeriksaan torsi lateral bangunan yang memuaskan dan tidak membutuhkan pembesaran eksentrisitas

Tabel 4.18 Pemeriksaan Torsi Lateral Arah X

Story	D_{maks}	D_{avg}	Rasio	$1,2.D_{avg}$	$1,4.D_{avg}$	Torsi	A_x
Ring Balk	101.258	100.422	1.0083	120.5064	140.5908	OK	1
Lt Rooftop	106.205	99.881	1.0633	119.8572	139.8334	OK	1
Lt5	92.383	86.962	1.0623	104.3544	121.7468	OK	1

Story	D _{maks}	D _{avg}	Rasio	1,2.D _{avg}	1,4.D _{avg}	Torsi	A _x
Lt4	68.749	64.767	1.0615	77.7204	90.6738	OK	1
Lt3	39.848	37.55	1.0612	45.06	52.57	OK	1
Lt2	16.141	15.294	1.0554	18.3528	21.4116	OK	1

Tabel 4.19 Pemeriksaan Torsi Lateral Arah Y

Story	D _{maks}	D _{avg}	Rasio	1,2.D _{avg}	1,4.D _{avg}	Torsi	A _x
Ring Balk	119.618	117.756	1.0158	141.3072	164.8584	OK	1
Lt Rooftop	112.334	110.316	1.0183	132.3792	154.4424	OK	1
Lt5	97.677	96.004	1.0174	115.2048	134.4056	OK	1
Lt4	72.264	71.125	1.0160	85.35	99.575	OK	1
Lt3	41.442	40.882	1.0137	49.0584	57.2348	OK	1
Lt2	16.576	16.418	1.0096	19.7016	22.9852	OK	1

c. Ketidakberaturan sudut dalam

Tabel 4.20 Pemeriksaan Sudut Dalam

Lx	18.2	m
Px	0	m
Ly	27.2	m
Py	3.2	m
Px/Lx	0.0000	
Py/Ly	0.118	
Cek	OK	

Dari **Tabel 4.20** dapat dilihat hasil pemeriksaan sudut dalam memuaskan.

d. Ketidakberaturan tingkat lunak (*soft-story*)

Hasil pemeriksaan seperti yang tertuang pada **Tabel 4.21** dan **Tabel 4.22** dibawah menunjukkan bangunan aman terhadap pengaruh kekakuan tingkat lunak (*soft-story*).

Tabel 4.21 Pemeriksaan *Soft-Story* Arah X

Story	Stiffness X	Kekakuan Tingkat > 70% Kekakuan Tingkat di atasnya	Kekakuan Tingkat > 80% dari rata-rata Kekakuan 3 Tingkat di atasnya	Ketidak-beraturan Vertikal Type 1.a
	kN/m			
Ring Balk	45136.687			
Lt Rooftop	105373.865	Yes		OK
Lt5	107961.129	Yes		OK

Story	Stiffness X	Kekakuan Tingkat > 70% Kekakuan Tingkat di atasnya	Kekakuan Tingkat > 80% dari rata-rata Kekakuan 3 Tingkat di atasnya	Ketidak-beraturan Vertikal Type 1.a
	kN/m			
Lt4	125216.131	Yes	Yes	OK
Lt3	175190.112	Yes	Yes	OK
Lt2	267714.583	Yes	Yes	OK

Tabel 4.22 Pemeriksaan *Soft-Story* Arah Y

Story	Stiffness Y	Kekakuan Tingkat > 60% Kekakuan Tingkat di atasnya	Kekakuan Tingkat > 70% dari rata-rata Kekakuan 3 Tingkat di atasnya	Ketidak-beraturan Vertikal Type 1.b
	kN/m			
Ring Balk	45136.687			
Lt Rooftop	105373.865	Yes		OK
Lt5	107961.129	Yes		OK
Lt4	125216.131	Yes	Yes	OK
Lt3	175190.112	Yes	Yes	OK
Lt2	267714.583	Yes	Yes	OK

e. Ketidakberaturan tingkat lunak (*soft-story*) ekstrim

Hasil pemeriksaan seperti yang tertuang pada **Tabel 4.23** dan **Tabel 4.24** dibawah menunjukkan bangunan aman terhadap pengaruh kekakuan tingkat lunak (*soft-story*) ekstrim.

Tabel 4.23 Pemeriksaan *Soft-Story* Ekstrim Arah X

Story	Stiffness X	Kekakuan Tingkat > 70% Kekakuan Tingkat di atasnya	Kekakuan Tingkat > 80% dari rata-rata Kekakuan 3 Tingkat di atasnya	Ketidak-beraturan Vertikal Type 1.a
	kN/m			
Ring Balk	42359.823			
Lt Rooftop	95253.864	Yes		OK
Lt5	97151.412	Yes		OK
Lt4	112822.292	Yes	Yes	OK
Lt3	159292.665	Yes	Yes	OK
Lt2	249417.355	Yes	Yes	OK

Tabel 4.24 Pemeriksaan *Soft-Story* Ekstrim Arah Y

Story	Stiffness Y	Kekakuan Tingkat > 60% Kekakuan Tingkat di atasnya	Kekakuan Tingkat > 70% dari rata-rata Kekakuan 3 Tingkat di atasnya	Ketidak- beraturan Vertikal Type 1.b
	kN/m			
Ring Balk	42359.823			
Lt Rooftop	95253.864	Yes		OK
Lt5	97151.412	Yes		OK
Lt4	112822.292	Yes	Yes	OK
Lt3	159292.665	Yes	Yes	OK
Lt2	249417.355	Yes	Yes	OK

f. Ketidakberaturan berat massa

Tabel 4.25 Pemeriksaan Berat Massa

Lantai	Massa	Cek
	kg	
Ring Balk	122719.77	OK
Lt Rooftop	369781.19	OK
Lt5	587524.63	OK
Lt4	619196.64	OK
Lt3	609187.78	OK
Lt2	562742.34	

Berat massa yang disajikan pada **Tabel 4.25** menunjukkan hasil yang memuaskan.

2. Analisa Struktur Tahap II

Tahap 2 berfokus pada penganalisaan struktur untuk memperoleh gaya geser dasar melalui pendekatan statik ekuivalen dan respons spektrum. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, gaya geser dasar pada bagian tumpuan akan dicek guna menetapkan besaran faktor skala sesuai syarat SNI 1726-2019, yang berfungsi sebagai pengali untuk pembesaran beban respons spektrum.

a. Faktor skala

Tabel 4.26 Gaya Geser Dasar Seismik

Simbol	Arah X		Arah Y	
	Kuantitas	Satuan	Kuantitas	Satuan
C_s	0.145		0.145	

Simbol	Arah X		Arah Y	
	Kuantitas	Satuan	Kuantitas	Satuan
CS_{max}	0.105		0.105	
CS_{min}	0.051	> 0,01	0.051	> 0,01
CS_{min2}	0.020708333		0.021	
Maka C_s	0.145		0.145	
W	28156.39	kN	28156.39	kN
V (SNI)	4094.38	kN	4094.38	kN
V (Etabs)	4094.39	kN	4094.38	kN

Tabel 4.27 Penskalaan Gaya

Gaya Geser		Fx	Fy
Gaya Geser Linier Statik			
Eq-x		-4094.3851	5.52E-07
Eq-y		-7.50E-06	-4094.3842
Gaya Geser LinRespSpec			
Rs-x		1981.24	255.4399
Rs-y		255.44	1943.7531
		V/Vt	0.483891952
			2.066577043
		SF Awal	1838.747
		SF Baru	3799.912079

Dari hasil analisis diperoleh gaya geser dasar statik ekivalen > Respon Spektra, maka gaya geser dasar rencana harus diskalakan.

b. Pemeriksaan kekakuan diafragma

Hasil pemeriksaan diafragma menunjukkan konstrain yang rigid seperti disajikan dalam **Tabel 4.28** dan **Tabel 4.29**.

Tabel 4.28 Pemeriksaan Kekakuan Diafragma Arah X

Story	Max Drift	Avg Drift	2(Avg Drift)	Diaphragm
	mm	mm	mm	
Ring Balk	0.001975	0.001944	0.003888	RIGID
Lt Rooftop	0.003854	0.003596	0.007192	RIGID
Lt5	0.005647	0.005295	0.01059	RIGID
Lt4	0.006905	0.006492	0.012984	RIGID
Lt3	0.006585	0.006182	0.012364	RIGID
Lt2	0.003889	0.003685	0.00737	RIGID

Tabel 4.29 Pemeriksaan Kekakuan Diafragma Arah Y

Story	Max Drift	Avg Drift	2(Avg Drift)	Diaphragm
	mm	mm	mm	
Ring Balk	0.0027	0.002556	0.005112	RIGID
Lt Rooftop	0.004098	0.003989	0.007978	RIGID
Lt5	0.006086	0.005941	0.011882	RIGID
Lt4	0.007377	0.00722	0.01444	RIGID
Lt3	0.006907	0.006796	0.013592	RIGID
Lt2	0.003994	0.003956	0.007912	RIGID

c. Pemeriksaan Pengaruh P-Delta

Tabel di bawah menunjukkan bangunan aman dari pengaruh P-Delta.

Tabel 4.30 Pemeriksaan Pengaruh P-Delta Arah X

Story	h_x	P_x	D_{maks}	V_x	q	b	q_{maks}	P-D
	mm	kN	mm	kN				
Ring Balk	3150	1890.6376	101.258	390.4095	0.04246	0.2864	0.25	tdk ada
Lt Rooftop	3600	5928.936	106.205	1363.2962	0.03499	1.0000	0.0909	tdk ada
Lt5	4200	13100.6202	92.383	2557.2089	0.03073	1.8758	0.0485	tdk ada
Lt4	4200	20349.3979	68.749	3412.0538	0.02662	2.5028	0.0363	tdk ada
Lt3	3600	27374.0172	39.848	3894.4756	0.02122	2.8567	0.0318	tdk ada
Lt2	4150	34038.6913	16.141	4094.3852	0.00882	3.0033	0.0303	tdk ada

Tabel 4.31 Pemeriksaan Pengaruh P-Delta Arah Y

Story	h_x	P_Y	D_{maks}	V_Y	q	b	q_{maks}	P-D
	mm	kN	mm	kN				
Ring Balk	3150	1890.6376	119.618	390.4095	0.05015	0.2863717	0.25	tdk ada
Lt Rooftop	3600	5928.936	112.334	1363.2962	0.03701	1	0.0909	tdk ada
Lt5	4200	13100.6202	97.677	2557.2089	0.03249	1.8757544	0.0485	tdk ada
Lt4	4200	20349.3979	72.264	3412.0539	0.02799	2.5027972	0.0363	tdk ada
Lt3	3600	27374.0172	41.442	3894.4757	0.02207	2.8566615	0.0318	tdk ada
Lt2	4150	34038.6913	16.576	4094.3843	0.00906	3.0032977	0.0303	tdk ada

3. Analisa Struktur Tahap III

Pemeriksaan simpangan maksimum

Tabel 4.32 Simpangan Maksimum Bangunan (*Displacement*)

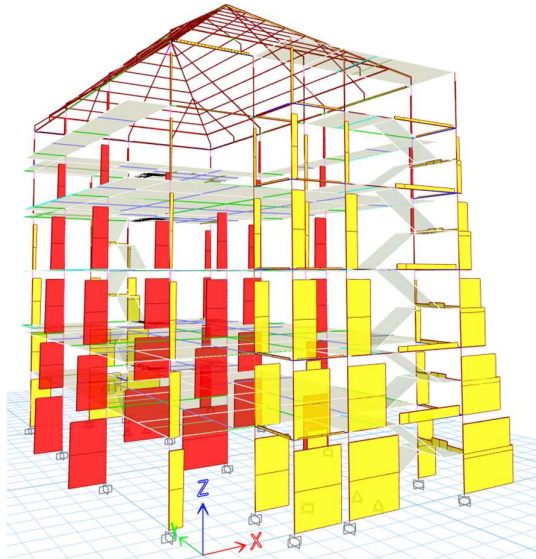
Story	Load Case	Maximum	Load Case	Maximum
		mm		mm
Ring Balk	RSX Max	11	RSY Max	1.836
Lt Rooftop	RSX Max	15	RSY Max	3
Lt5	RSX Max	26.66	RSY Max	6.321
Lt4	RSX Max	33	RSY Max	8
Lt3	RSX Max	27	RSY Max	6
Lt2	RSX Max	19	RSY Max	4

4. Analisa Struktur Tahap IV

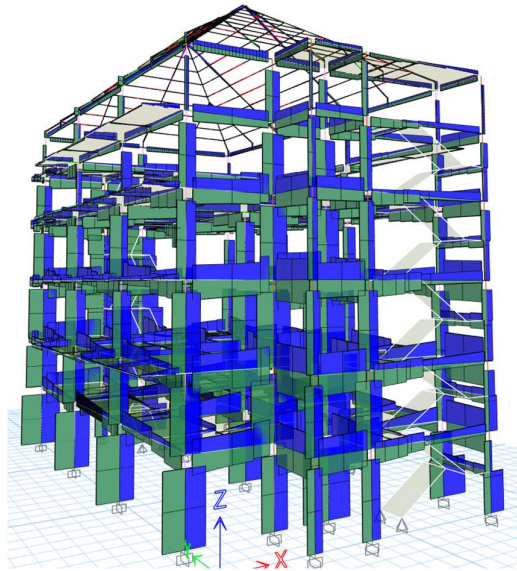
Sebagaimana tahap sebelumnya, analisis struktur tahap 4 ini baru dapat dilaksanakan apabila *output* dari tahap 2 dan 3 telah memenuhi persyaratan Standar Bangunan. Fokus pada tahap ini adalah memilih pemodelan yang paling efisien dan optimal dari beberapa alternatif yang ada. Model terpilih tersebut kemudian dianalisis ulang dengan parameter yang telah disesuaikan berdasarkan evaluasi sebelumnya. Adanya modifikasi minor, seperti pergeseran balok anak atau penyesuaian elevasi balok ring, umumnya tidak berdampak signifikan terhadap pemenuhan kriteria awal, sehingga analisis tidak perlu diulang dari tahap 1.

Selanjutnya, keluaran dari analisis tahap 4 yang berupa gaya dalam pada elemen struktur (kolom dan balok) harus divalidasi agar sesuai dengan kaidah mekanika teknik. Validasi ini meliputi inspeksi visual terhadap *output* perangkat lunak, dilanjutkan dengan kontrol keseimbangan gaya dalam secara manual pada elemen-elemen yang kritis.

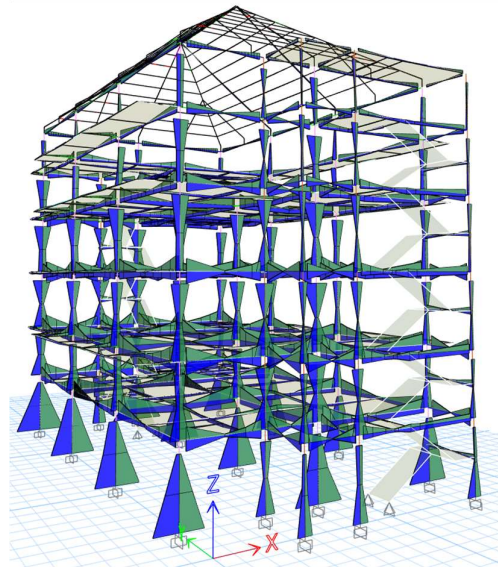
Apabila teridentifikasi anomali pada nilai gaya dalam yang umumnya dipicu oleh kesalahan input data, pemodelan, atau asumsi dasar maka evaluasi menyeluruh harus dilakukan. Revisi berskala besar (*mayor*) akibat kesalahan ini akan mengubah perilaku struktur secara keseluruhan, yang mewajibkan pengulangan analisis dari tahap 1. Namun, berdasarkan hasil pemeriksaan pada analisis tahap 4 ini, gaya-gaya dalam yang dihasilkan sudah rasional dan tidak ditemukan adanya kejanggalan, sehingga proses analisis tidak perlu diulang dari awal.



Gambar 4.14 Gaya Internal Aksial P Akibat Envelope LRFD



Gambar 4.15 Gaya Internal Geser V2-2 Akibat Envelope LRFD



Gambar 4.16 Gaya Internal Momen Lentur M3-3 Akibat Envelope LRFD

4.5 Perhitungan Sambungan Baja dan Penulangan Struktur Atas

4.5.1 Sambungan Baja

Perhitungan dan analisis sambungan baja pada perencanaan ini dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak IDEA StatiCa. Pada bab ini, lampiran keluaran (*report*) hasil analisis secara mendetail hanya menampilkan sambungan pelat dasar (*base plate*). Sementara itu, hasil perhitungan untuk sambungan *rafter* ke *rafter* serta kolom ke *rafter* disajikan secara ringkas dalam bentuk tabel rekapitulasi sambungan baja.

1. *Cross-sections*

Tabel 4.33 *Cross-sections* Sambungan Baja

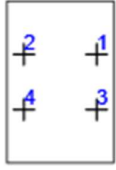
Name	Material
1 - COL BAJA EFF (H 294x200x8)	A36

2. *Anchors*

Tabel 4.34 *Anchors* pada Sambungan Baja

Name	Bolt assembly	Diameter [mm]	f_u [MPa]	Gross area [mm ²]
16 A325M	16 A325M	16	830,0	201

Tabel 4.35 Detail *Anchors* pada Sambungan Baja

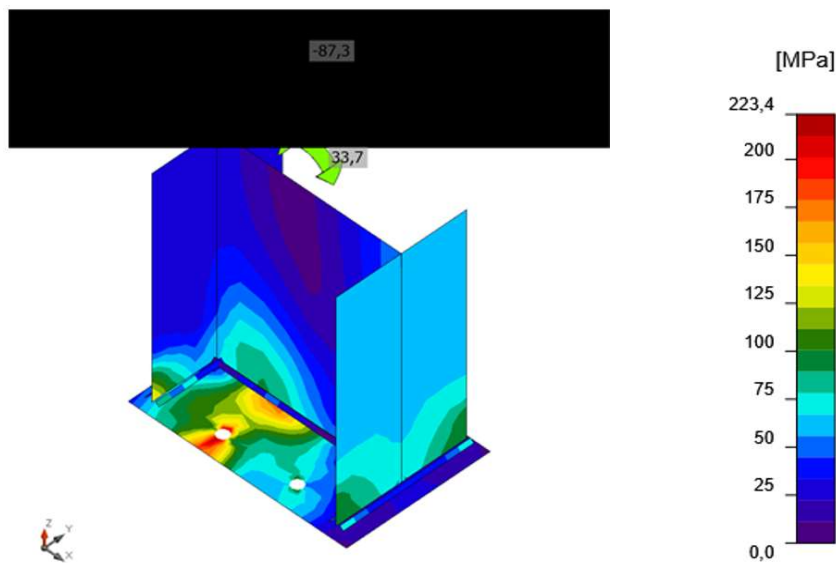
Shape	Item	Loads	N _r [kN]	V [kN]	ϕN_{cbg} [kN]	ϕV_{cp} [kN]	U _{tt} [%]	U _{ts} [%]	U _{ts} [%]	Status
	A1	LE1	58,2	0,0	122,7	271,9	95,1	0,0	92,0	OK
	A2	LE1	58,2	0,0	122,7	271,9	95,1	0,0	92,0	OK
	A3	LE1	0,2	0,0	122,7	271,9	95,1	0,0	92,0	OK
	A4	LE1	0,1	0,0	122,7	271,9	95,1	0,0	92,0	OK

3. *Load effects***Tabel 4.36** *Load Effects* pada Sambungan Baja

Name	Member	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
LE1	COL	-87,3	0,0	0,0	0,0	33,7	0,0

4. *Foundation block***Tabel 4.37** *Foundation Block* pada Sambungan Baja

Item	Value	Unit
CB 1		
Dimensions	700 x 700	mm
Depth	1000	mm
Anchor	16 A325M	
Anchoring length	400	mm
Shear force transfer	Friction	

5. *Summary*

Tabel 4.38 Summary Results

Name	Value	Check status
Analysis	100,0%	OK
Plates	$0,0 < 5,0\%$	OK
Anchors	$95,1 < 100\%$	OK
Welds	$38,7 < 100\%$	OK
Concrete block	$23,3 < 100\%$	OK
Shear	$0,1 < 100\%$	OK
Buckling	Not calculated	

6. Plates

Tabel 4.39 Detail Plates Sambungan Baja

Name	f_y [MPa]	Thickness [mm]	Loads	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{Pl} [%]	σ_{cEd} [MPa]	Check status
COL-bfl 1	248,2	12,0	LE1	95,8	0,0	0,0	OK
COL-tfl 1	248,2	12,0	LE1	120,2	0,0	0,0	OK
COL-w 1	248,2	8,0	LE1	88,1	0,0	0,0	OK
BP1	248,2	20,0	LE1	222,3	0,0	0,0	OK

7. Design Data

Tabel 4.40 Design Data Sambungan Baja

Material	f_y [MPa]	ϵ_{lim} [%]
A36	248,2	5,0
Grade	ϕN_{sa} [kN]	ϕV_{sa} [kN]
16 A325M - 1	91,2	50,8

8. Weld sections

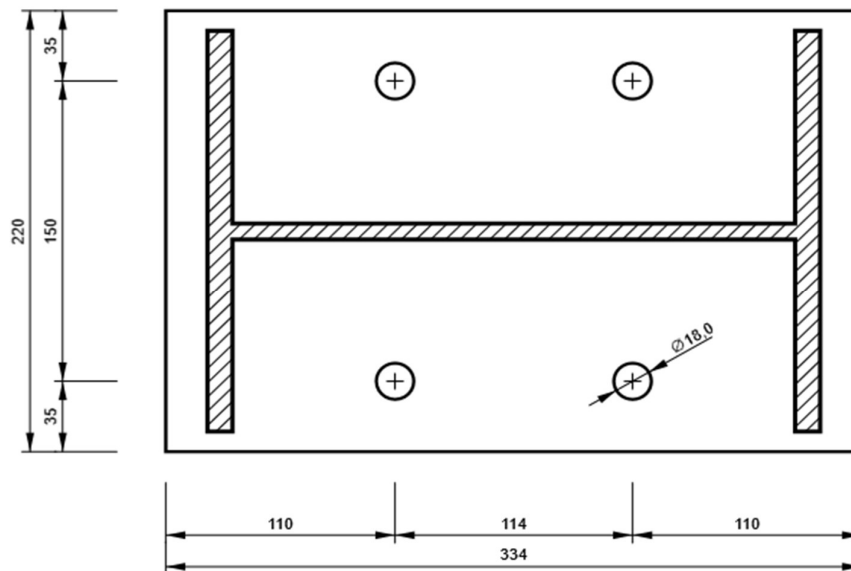
Tabel 4.41 Weld Sections Sambungan Baja

Item	Edge	X_u	T_h [mm]	L_s [mm]	L [mm]	L_c [mm]	Loads	F_n [kN]	ϕR_n [kN]	U_t [%]	Status
BP1	COL-bfl 1	E70xx	▲7,1▲	▲10▲	200	20	LE1	11,5	43,2	26,7	OK
		E70xx	▲7,1▲	▲10▲	200	20	LE1	13,4	42,4	31,6	OK
BP1	COL-tfl 1	E70xx	▲7,1▲	▲10▲	199	20	LE1	12,1	32,3	37,6	OK
		E70xx	▲7,1▲	▲10▲	200	20	LE1	15,3	39,7	38,7	OK
BP1	COL-w 1	E70xx	▲7,1▲	▲10▲	281	20	LE1	10,8	46,1	23,4	OK
		E70xx	▲7,1▲	▲10▲	281	20	LE1	11,1	46,1	24,1	OK

Keterangan:

ϵ_{Pl}	Plastic strain
σ_{cEd}	Contact stress
σ_{Ed}	Eq. stress
f_y	Yield strength
ϵ_{lim}	Limit of plastic strain

N_f	Tension force
V	Resultant of shear forces V_y, V_z in bolt
ϕN_{cbg}	Concrete breakout strength in tension – ACI 318-14 – 17.4.2
ϕV_{cp}	Concrete pryout strength in shear – ACI 318-14 – 17.5.3
U_t	Utilization in tension
U_s	Utilization in shear
U_{ts}	Utilization in tension and shear
ϕN_{sa}	Steel strength of anchor in tension - ACI 318-14 – 17.4.1
ϕV_{sa}	Steel strength of anchor in shear - ACI 318-14 – 17.5.1
T_h	Throat thickness of weld
L_s	Leg size of weld
L	Length of weld
L_c	Length of weld critical element
F_n	Force in weld critical element
ϕR_n	Weld resistance AISC 360-16 J2.4
U_t	Utilization
A_1	Loaded area
A_2	Supporting area
σ	Average stress in concrete
U_t	Utilization
V	Shear force
ϕV_r	Shear resistance
μ	Coefficient of friction between base plate and concrete block
U_t	Utilization



Gambar 4.17 Detail Sambungan *Baseplate*

Berikut ini merupakan tabel rekapitulasi sambungan baja.

Tabel 4.42 Rekapitulasi Sambungan Baja

No	Jenis Sambungan	Profil Baja	Jumlah dan Spesifikasi Baut /Angkur	Dimensi Pelat Ujung	Regangan Plastis Maksimum
1.	Sambungan <i>Baseplate</i>	Kolom: IWF 294x200x8x12	4 buah angkur tipe 16A325M, $\phi 16$ mm.	334 mm x 220 mm	0,0 % (<5%, Aman)
2.	Sambungan Kolom ke Rafter A	Kolom: IWF 294x200x8x12 Rafter: IWF 198x99x4,5x7	4 buah baut tipe 16A325M (diameter lubang $\phi 18$ mm)	375 mm x 178 mm	1,14% (<5%, Aman)
3.	Sambungan Kolom ke Rafter B	Kolom: IWF 294x200x8x12 Rafter: IWF 198x99x4,5x7	4 buah baut tipe 16A325M (diameter lubang $\phi 18$ mm)	262 mm x 104 mm	0,05% (<5%, Aman)
4.	Sambungan Kolom ke Rafter C	Kolom: IWF 294x200x8x12 Rafter: IWF 298x149x5,5x8	6 buah baut tipe 22A325M (diameter lubang $\phi 24$ mm)	384 mm x 155 mm	4,35% (<5%, Aman)
5.	Sambungan Rafter ke Rafter (5 Sambungan)	Rafter: IWF 350x175x7x11	Disambung dengan las penuh (<i>fully welded</i>)	Pipa pusat dengan diameter luar 425 mm	3,63% (<5%, Aman)
6.	Sambungan Rafter ke Rafter (3 Sambungan)	Rafter: IWF 350x175x7x11	Disambung dengan las penuh (<i>fully welded</i>)	Pipa pusat dengan diameter luar 425 mm	2,12% (<5%, Aman)

4.5.2 Penulangan Struktur Pelat

Perhitungan penulangan struktur pelat menggunakan *output* as tulangan longitudinal dan tulangan geser yang diperoleh dari hasil analisa struktur *ETABS*.

1. Data dan Spesifikasi Pelat Beton Bertulang

a. Geometri Pelat Beton Bertulang

Lebar pelat arah X (L_1)

$$L_1 = 4400 \text{ mm}$$

Lebar pelat arah Y (L_2)

$$L_2 = 5200 \text{ mm}$$

Tebal pelat (t)

$$t = 125 \text{ mm}$$

b. Geometri Tulangan

Diameter tulangan (D)

$$D = 10 \text{ mm}$$

Tebal selimut beton (C_c)

$$C_c = 20 \text{ mm}$$

Spasi tulangan bawah arah sumbu X (S_{Bot-X})

$$S_{Bot-X} = 200 \text{ mm}$$

Spasi tulangan atas arah sumbu X (S_{Top-X})

$$S_{Top-X} = 200 \text{ mm}$$

Spasi tulangan bawah arah sumbu Y (S_{Bot-Y})

$$S_{Bot-Y} = 200 \text{ mm}$$

Spasi tulangan atas arah sumbu Y (S_{Top-Y})

$$S_{Top-Y} = 200 \text{ mm}$$

c. Spesifikasi Material Beton dan Tulangan

Kuat tekan beton (f'_c)

$$f'_c = 30 \text{ MPa}$$

Tegangan leleh baja (f_{yu})

$$f_{yu} = 420 \text{ MPa}$$

d. Data Pembebanan

Momen maksimum akibat M11 ($M11_{Max}$)

$$M11_{Max} = 5,32 \text{ kNm}$$

Momen minimum akibat M11 ($M11_{Min}$)

$$M11_{Min} = -5,42 \text{ kNm}$$

Momen maksimum akibat M22 ($M22_{Max}$)

$$M22_{Max} = 6,02 \text{ kNm}$$

Momen minimum akibat M22 ($M22_{Min}$)

$$M22_{Min} = -5,95 \text{ kNm}$$

Momen maksimum akibat M12 ($M12_{Max}$)

$$M12_{Max} = 4,20 \text{ kNm}$$

Momen minimum akibat M12 ($M12_{Min}$)

$$M_{12_{\text{Min}}} = -4,50 \text{ kNm}$$

e. Properti Material dan Penampang

Tebal efektif penampang (d)

$$\begin{aligned} d &= t - C_c - D - \frac{D}{2} \\ &= 125 - 20 - 10 - \frac{10}{2} \\ &= 90 \text{ mm} \end{aligned}$$

Modulus elastisitas beton (E_c)

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \times \sqrt{f'c} \\ &= 4700 \times \sqrt{30} \\ &= 25743 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Faktor distribusi tegangan beton (β_1)

$$\beta_1 = 0,85$$

2. Perhitungan Tulangan Lentur Pelat beton Bertulang

a. Perhitungan Tulangan Bawah Arah Sumbu X (Lapangan)

1) Kontrol spasi

Spasi tulangan ($S_{\text{Bot-X}}$)

$$S_{\text{Bot-X}} = 200 \text{ mm}$$

Spasi maksimum 1 (S_{max1})

$$\begin{aligned} S_{\text{max1}} &= 2 \times t \\ &= 2 \times 125 \\ &= 250 \text{ mm} \end{aligned}$$

Spasi maksimum 2 (S_{max2})

$$S_{\text{max2}} = 450 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $s \leq S_{\text{max1}}$ atau S_{max2})

Jumlah tulangan per 1 meter analisis (n)

$$\begin{aligned} n &= \frac{1000}{s} \\ &= \frac{1000}{200} \\ &= 5 \text{ buah/m} \end{aligned}$$

Jarak bersih antar tulangan (S_n)

$$\begin{aligned}
 S_n &= s - D \\
 &= 200 - 10 \\
 &= 190 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $S_n > D$ atau 25 mm)

2) Kontrol luas tulangan

Tulangan terpasang ($A_{s_{use}}$)

$$\begin{aligned}
 A_{s_{use}} &= n \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \\
 &= 5 \times \frac{3,14}{4} \times 10^2 \\
 &= 392,7 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 1 ($A_{s_{min1}}$)

$$\begin{aligned}
 A_{s_{min1}} &= 0,2\% \times b \times t \\
 &= 0,2\% \times 1000 \times 125 \\
 &= 250 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 2 ($A_{s_{min2}}$)

$$\begin{aligned}
 A_{s_{min2}} &= 0,18\% \times \frac{420}{f_{yu}} \times b \times t \\
 &= 0,18\% \times \frac{420}{420} \times 1000 \times 125 \\
 &= 225 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 3 ($A_{s_{min3}}$)

$$\begin{aligned}
 A_{s_{min3}} &= 0,14\% \times b \times t \\
 &= 0,14\% \times 1000 \times 125 \\
 &= 175 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $A_{s_{use}} > A_{s_{min1}}$ atau $A_{s_{min2}}$ atau $A_{s_{min3}}$)

3) Kontrol tahanan momen

Garis tekan beton (a)

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_s \times f_{yu}}{(0,85 \times f'_c \times b)} \\
 &= \frac{392,7 \times 420}{(0,85 \times 30 \times 1000)} \\
 &= 6,47 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Kapasitas lentur (M_n)

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s \times f_{yu} \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \\
 &= 392,7 \times 420 \times \left(90 - \frac{6,47}{2}\right) \\
 &= 14,31 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Garis netral beton (c)

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{6,47}{0,85} \\
 &= 7,61 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Regangan tulangan Tarik (ϵ_s)

$$\begin{aligned}
 \epsilon_s &= \frac{(d-c)}{c \times 0,003} \\
 &= \frac{(90-7,61)}{7,61 \times 0,003} \\
 &= 0,032
 \end{aligned}$$

Faktor reduksi (Φ)

$$\Phi = 0,9$$

Kapasitas lentur reduksi ($\Phi.M_n$)

$$\begin{aligned}
 \Phi.M_n &= 0,9 \times 14,31 \\
 &= 12,88 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Wood armer moment (M11+)

$$\begin{aligned}
 M_{11+} &= M_{11_{Max}} + |M_{12_{Max}} \text{ or } M_{12_{Min}}| \\
 &= 5,32 + 4,5 \\
 &= 9,82 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Moment ultimate (M11+)

$$\begin{aligned}
 M_{11+} &= 0 \text{ or } M_{11_{Max}} + |M_{12_{Max}} \text{ or } M_{12_{Min}}| \\
 &= 5,32 + 4,5 \\
 &= 9,82 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $\Phi.M_n > M_u$)

b. Perhitungan Tulangan Atas Arah Sumbu X (Tumpuan)

1) Kontrol spasi

Spasi tulangan (S_{Top-X})

$$S_{Top-X} = 200 \text{ mm}$$

Spasi maksimum 1 ($S_{\max 1}$)

$$\begin{aligned} S_{\max 1} &= 2 \times t \\ &= 2 \times 125 \\ &= 250 \text{ mm} \end{aligned}$$

Spasi maksimum 2 ($S_{\max 2}$)

$$S_{\max 2} = 450 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $s \leq S_{\max 1}$ atau $S_{\max 2}$)

Jumlah tulangan per 1 meter analisis (n)

$$\begin{aligned} n &= \frac{1000}{s} \\ &= \frac{1000}{200} \\ &= 5 \text{ buah/m} \end{aligned}$$

Jarak bersih antar tulangan (S_n)

$$\begin{aligned} S_n &= s - D \\ &= 200 - 10 \\ &= 190 \text{ mm} \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $S_n > D$ atau 25 mm)

2) Kontrol luas tulangan

Tulangan terpasang ($A_{s_{\text{use}}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{\text{use}}} &= n \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \\ &= 5 \times \frac{3,14}{4} \times 10^2 \\ &= 392,7 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 1 ($A_{s_{\min 1}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{\min 1}} &= 0,2\% \times b \times t \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 125 \\ &= 250 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 2 ($A_{s_{\min 2}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{\min 2}} &= 0,18\% \times \frac{420}{f_{yu}} \times b \times t \\ &= 0,18\% \times \frac{420}{420} \times 1000 \times 125 \\ &= 225 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 3 ($A_{s_{min3}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{min3}} &= 0,14\% \times b \times t \\ &= 0,14\% \times 1000 \times 125 \\ &= 175 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $A_{s_{use}} > A_{s_{min1}}$ atau $A_{s_{min2}}$ atau $A_{s_{min3}}$)

3) Kontrol tahanan momen

Garis tekan beton (a)

$$\begin{aligned} a &= \frac{A_s \times f_{yu}}{(0,85 \times f'_c \times b)} \\ &= \frac{392,7 \times 420}{(0,85 \times 30 \times 1000)} \\ &= 6,47 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kapasitas lentur (Mn)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_{yu} \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \\ &= 392,7 \times 420 \times \left(90 - \frac{6,47}{2} \right) \\ &= 14,31 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Garis netral beton (c)

$$\begin{aligned} c &= \frac{a}{\beta_1} \\ &= \frac{6,47}{0,85} \\ &= 7,61 \text{ mm} \end{aligned}$$

Regangan tulangan Tarik (ϵ_s)

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{(d-c)}{c \times 0,003} \\ &= \frac{(90-7,61)}{7,61 \times 0,003} \\ &= 0,032 \end{aligned}$$

Faktor reduksi (Φ)

$$\Phi = 0,9$$

Kapasitas lentur reduksi ($\Phi.M_n$)

$$\begin{aligned} \Phi.M_n &= 0,9 \times 14,31 \\ &= 12,88 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Wood armer moment (M11-)

$$M_{11-} = M_{11_{Min}} + |M_{12_{Max}} \text{ or } M_{12_{Min}}|$$

$$= -5,42 + (-4,5)$$

$$= -9,92 \text{ kNm}$$

Moment ultimate (M_{11-})

$$M_{11-} = 0 \text{ or } M_{11_{Min}} + |M_{12_{Max}} \text{ or } M_{12_{Min}}|$$

$$= 5,42 + (4,5)$$

$$= 9,92 \text{ kNm}$$

(Syarat terpenuhi, $\Phi \cdot M_n > M_u$)

c. Perhitungan Tulangan Bawah Arah Sumbu Y (Lapangan)

1) Kontrol spasi

Spasi tulangan (S_{Bot-Y})

$$S_{Bot-Y} = 200 \text{ mm}$$

Spasi maksimum 1 (S_{max1})

$$S_{max1} = 2 \times t$$

$$= 2 \times 125$$

$$= 250 \text{ mm}$$

Spasi maksimum 2 (S_{max2})

$$S_{max2} = 450 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $s \leq S_{max1}$ atau S_{max2})

Jumlah tulangan per 1 meter analisis (n)

$$n = \frac{1000}{s}$$

$$= \frac{1000}{200}$$

$$= 5 \text{ buah/m}$$

Jarak bersih antar tulangan (S_n)

$$S_n = s - D$$

$$= 200 - 10$$

$$= 190 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $S_n > D$ atau 25 mm)

2) Kontrol luas tulangan

Tulangan terpasang ($A_{s_{use}}$)

$$\begin{aligned}
 A_{S_{use}} &= n \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \\
 &= 5 \times \frac{3,14}{4} \times 10^2 \\
 &= 392,7 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 1 ($A_{S_{min1}}$)

$$\begin{aligned}
 A_{S_{min1}} &= 0,2\% \times b \times t \\
 &= 0,2\% \times 1000 \times 125 \\
 &= 250 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 2 ($A_{S_{min2}}$)

$$\begin{aligned}
 A_{S_{min2}} &= 0,18\% \times \frac{420}{f_{yu}} \times b \times t \\
 &= 0,18\% \times \frac{420}{420} \times 1000 \times 125 \\
 &= 225 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 3 ($A_{S_{min3}}$)

$$\begin{aligned}
 A_{S_{min3}} &= 0,14\% \times b \times t \\
 &= 0,14\% \times 1000 \times 125 \\
 &= 175 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

3) Kontrol tahanan momen

Garis tekan beton (a)

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_s \times f_{yu}}{(0,85 \times f'_c \times b)} \\
 &= \frac{392,7 \times 420}{(0,85 \times 30 \times 1000)} \\
 &= 6,47 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Kapasitas lentur (M_n)

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s \times f_{yu} \times \left(d - D - \frac{a}{2} \right) \\
 &= 392,7 \times 420 \times \left(90 - 10 - \frac{6,47}{2} \right) \\
 &= 12,66 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Garis netral beton (c)

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{6,47}{0,85}
 \end{aligned}$$

$$= 7,61 \text{ mm}$$

Regangan tulangan Tarik (ϵ_s)

$$\begin{aligned}\epsilon_s &= \frac{(d-c)}{c \times 0,003} \\ &= \frac{(90-7,61)}{7,61 \times 0,003} \\ &= 0,032\end{aligned}$$

Faktor reduksi (Φ)

$$\Phi = 0,9$$

Kapasitas lentur reduksi ($\Phi.M_n$)

$$\begin{aligned}\Phi.M_n &= 0,9 \times 12,66 \\ &= 11,40 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Wood armer moment (M_{22+})

$$\begin{aligned}M_{22+} &= M_{22_{Max}} + |M_{12_{Max}} \text{ or } M_{12_{Min}}| \\ &= 6,02 + (4,5) \\ &= 10,52 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Moment ultimate (M_{22+})

$$\begin{aligned}M_{22+} &= 0 \text{ or } M_{22_{Max}} + |M_{12_{Max}} \text{ or } M_{12_{Min}}| \\ &= 6,02 + (4,5) \\ &= 10,52 \text{ kNm}\end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $\Phi.M_n > M_u$)

d. Perhitungan Tulangan Atas Arah Sumbu Y (Tumpuan)

1) Kontrol spasi

Spasi tulangan (S_{Top-Y})

$$S_{Top-Y} = 200 \text{ mm}$$

Spasi maksimum 1 (S_{max1})

$$\begin{aligned}S_{max1} &= 2 \times t \\ &= 2 \times 125 \\ &= 250 \text{ mm}\end{aligned}$$

Spasi maksimum 2 (S_{max2})

$$S_{max2} = 450 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $s \leq S_{max1}$ atau S_{max2})

umlah tulangan per 1 meter analisis (n)

$$\begin{aligned} n &= \frac{1000}{s} \\ &= \frac{1000}{200} \\ &= 5 \text{ buah/m} \end{aligned}$$

Jarak bersih antar tulangan (S_n)

$$\begin{aligned} S_n &= s - D \\ &= 200 - 10 \\ &= 190 \text{ mm} \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $S_n > D$ atau 25 mm)

2) Kontrol luas tulangan

Tulangan terpasang ($A_{s_{use}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{use}} &= n \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \\ &= 5 \times \frac{3,14}{4} \times 10^2 \\ &= 392,7 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 1 ($A_{s_{min1}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{min1}} &= 0,2\% \times b \times t \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 125 \\ &= 250 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 2 ($A_{s_{min2}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{min2}} &= 0,18\% \times \frac{420}{f_{yu}} \times b \times t \\ &= 0,18\% \times \frac{420}{420} \times 1000 \times 125 \\ &= 225 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 3 ($A_{s_{min3}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{min3}} &= 0,14\% \times b \times t \\ &= 0,14\% \times 1000 \times 125 \\ &= 175 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

3) Kontrol tahanan momen

Garis tekan beton (a)

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_s \times f_{yu}}{(0,85 \times f'c \times b)} \\
 &= \frac{392,7 \times 420}{(0,85 \times 30 \times 1000)} \\
 &= 6,47 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Kapasitas lentur (Mn)

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s \times f_{yu} \times \left(d - D - \frac{a}{2} \right) \\
 &= 392,7 \times 420 \times \left(90 - 10 - \frac{6,47}{2} \right) \\
 &= 12,66 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Garis netral beton (c)

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{6,47}{0,85} \\
 &= 7,61 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Regangan tulangan Tarik (ϵ_s)

$$\begin{aligned}
 \epsilon_s &= \frac{(d-c)}{c \times 0,003} \\
 &= \frac{(90-7,61)}{7,61 \times 0,003} \\
 &= 0,032
 \end{aligned}$$

Faktor reduksi (Φ)

$$\Phi = 0,9$$

Kapasitas lentur reduksi ($\Phi.M_n$)

$$\begin{aligned}
 \Phi.M_n &= 0,9 \times 12,66 \\
 &= 11,40 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Wood armer moment (M22-)

$$\begin{aligned}
 M22- &= M22_{Min} + |M12_{Max} \text{ or } M12_{Min}| \\
 &= -5,95 + (-4,5) \\
 &= -10,45 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Moment ultimate (M22-)

$$\begin{aligned}
 M22- &= 0 \text{ or } M22_{Min} + |M12_{Max} \text{ or } M12_{Min}| \\
 &= 5,95 + (4,5) \\
 &= 10,45 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $\Phi.M_n > M_u$)

Perhitungan penulangan struktur pelat bondek menggunakan output as tulangan longitudinal dan tulangan geser yang diperoleh dari hasil analisa struktur *ETABS* v.22.

1. Data dan Spesifikasi Pelat Bondek

a. Geometri Pelat

Lebar pelat arah X (L_1)

$L_1 = 4400 \text{ mm}$

Lebar pelat arah Y (L_2)

$L_2 = 5200 \text{ mm}$

Tebal pelat (t)

$t = 100 \text{ mm}$

b. Pelat Bondek

Tebal standard (t_b) = 0,7 mm-BMT

Tinggi gelombang (h_b) = 50 mm

Lebar efektif (b_b) = 995 mm

Yield strength (f_y) = 560 MPa

Luas baja bondek terpasang ($A_{s \text{ Bondek}}$) = 857,59 mm²

Momen Inersia (I_{Bondek}) = 422063,58 mm⁴

c. Geometri Tulangan

Diameter *wiremesh* (D)

$D = 10 \text{ mm}$

Tebal selimut beton (C_c)

$C_c = 20 \text{ mm}$

Spasi tulangan atas arah sumbu X ($S_{\text{Top-X}}$)

$S_{\text{Top-X}} = 200 \text{ mm}$

Spasi tulangan atas arah sumbu Y ($S_{\text{Top-Y}}$)

$S_{\text{Top-Y}} = 200 \text{ mm}$

d. Spesifikasi Material Beton dan Tulangan

Kuat tekan beton (f'_c)

$f'_c = 30 \text{ MPa}$

Tegangan leleh baja (f_{yu})

$$f_{yu} = 420 \text{ MPa}$$

e. Data Pembebanan

Momen maksimum akibat M11 ($M_{11\text{Max}}$)

$$M_{11\text{Max}} = 5,32 \text{ kNm}$$

Momen minimum akibat M11 ($M_{11\text{Min}}$)

$$M_{11\text{Min}} = -5,42 \text{ kNm}$$

Momen maksimum akibat M22 ($M_{22\text{Max}}$)

$$M_{22\text{Max}} = 6,02 \text{ kNm}$$

Momen minimum akibat M22 ($M_{22\text{Min}}$)

$$M_{22\text{Min}} = -5,95 \text{ kNm}$$

f. Properti Material dan Penampang

Tebal efektif penampang (d)

$$\begin{aligned} d &= t - C_c - D - \frac{D}{2} \\ &= 100 - 20 - 10 - \frac{10}{2} \\ &= 65 \text{ mm} \end{aligned}$$

Modulus elastisitas beton (E_c)

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \times \sqrt{f'c} \\ &= 4700 \times \sqrt{30} \\ &= 25743 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Faktor distribusi tegangan beton (β_1)

$$\beta_1 = 0,85$$

2. Perhitungan Kapasitas Lentur Pelat Bondek

a. Perhitungan Baja Bondek Bawah Arah Sumbu X (Lapangan)

1) Kontrol luas baja

Baja terpasang (A_{Suse})

$$A_{\text{Suse}} = 857,59 \text{ mm}^2$$

Baja minimum 1 (A_{Smin1})

$$\begin{aligned} A_{\text{Smin1}} &= 0,2\% \times b \times t \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 100 \end{aligned}$$

$$= 200 \text{ mm}^2$$

Baja minimum 2 ($A_{s_{\min 2}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{\min 2}} &= 0,18\% \times \frac{420}{f_{yu}} \times b \times t \\ &= 0,18\% \times \frac{420}{420} \times 1000 \times 100 \\ &= 180 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Baja minimum 3 ($A_{s_{\min 3}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{\min 3}} &= 0,14\% \times b \times t \\ &= 0,14\% \times 1000 \times 100 \\ &= 140 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $A_{s_{\text{use}}} > A_{s_{\min 1}}$ atau $A_{s_{\min 2}}$ atau $A_{s_{\min 3}}$)

2) Kontrol tahanan momen

Garis tekan beton (a)

$$\begin{aligned} a &= \frac{A_s \times f_{yu}}{(0,85 \times f'_c \times b)} \\ &= \frac{857,59 \times 560}{(0,85 \times 30 \times 1000)} \\ &= 18,83 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kapasitas lentur (M_n)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_{yu} \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \\ &= 857,59 \times 560 \times \left(65 - \frac{18,83}{2}\right) \\ &= 26,69 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Garis netral beton (c)

$$\begin{aligned} c &= \frac{a}{\beta_1} \\ &= \frac{18,83}{0,85} \\ &= 22,16 \text{ mm} \end{aligned}$$

Regangan tulangan Tarik (ϵ_s)

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{(d-c)}{c \times 0,003} \\ &= \frac{(65-22,16)}{22,16 \times 0,003} \\ &= 0,006 \end{aligned}$$

Faktor reduksi (Φ)

$$\Phi = 0,9$$

Kapasitas lentur reduksi ($\Phi.M_n$)

$$\begin{aligned}\Phi.M_n &= 0,9 \times 26,69 \\ &= 24,02 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Momen *ultimate* (M_u)

$$\begin{aligned}M_u &= M_{11}_{\text{Max}} \\ &= 5,32 \text{ kNm}\end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $\Phi.M_n > M_u$)

b. Perhitungan Tulangan Atas Arah Sumbu X (Tumpuan)

1) Kontrol spasi

Spasi tulangan ($S_{\text{Top-X}}$)

$$S_{\text{Top-X}} = 200 \text{ mm}$$

Spasi maksimum 1 (S_{max1})

$$\begin{aligned}S_{\text{max1}} &= 2 \times t \\ &= 2 \times 100 \\ &= 200 \text{ mm}\end{aligned}$$

Spasi maksimum 2 (S_{max2})

$$S_{\text{max2}} = 450 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $s \leq S_{\text{max1}}$ atau S_{max2})

Jumlah tulangan per 1 meter analisis (n)

$$\begin{aligned}n &= \frac{1000}{s} \\ &= \frac{1000}{200} \\ &= 5 \text{ buah/m}\end{aligned}$$

Jarak bersih antar tulangan (S_n)

$$\begin{aligned}S_n &= s - D \\ &= 200 - 10 \\ &= 190 \text{ mm}\end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $S_n > D$ atau 25 mm)

2) Kontrol luas tulangan

Tulangan terpasang ($A_{s_{use}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{use}} &= n \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \\ &= 5 \times \frac{3,14}{4} \times 10^2 \\ &= 392,7 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 1 ($A_{s_{min1}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{min1}} &= 0,2\% \times b \times t \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 100 \\ &= 200 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 2 ($A_{s_{min2}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{min2}} &= 0,18\% \times \frac{420}{f_{yu}} \times b \times t \\ &= 0,18\% \times \frac{420}{420} \times 1000 \times 100 \\ &= 180 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 3 ($A_{s_{min3}}$)

$$\begin{aligned} A_{s_{min3}} &= 0,14\% \times b \times t \\ &= 0,14\% \times 1000 \times 100 \\ &= 140 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $A_{s_{use}} > A_{s_{min1}}$ atau $A_{s_{min2}}$ atau $A_{s_{min3}}$)

3) Kontrol tahanan momen

Garis tekan beton (a)

$$\begin{aligned} a &= \frac{A_s \times f_{yu}}{(0,85 \times f'_c \times b)} \\ &= \frac{392,7 \times 420}{(0,85 \times 30 \times 1000)} \\ &= 6,47 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kapasitas lentur (Mn)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_{yu} \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \\ &= 392,7 \times 420 \times \left(65 - \frac{6,47}{2}\right) \\ &= 10,19 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Garis netral beton (c)

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

$$= \frac{6,47}{0,85}$$

$$= 7,61 \text{ mm}$$

Regangan tulangan Tarik (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \frac{(d-c)}{c \times 0,003}$$

$$= \frac{(65-7,61)}{7,61 \times 0,003}$$

$$= 0,023$$

Faktor reduksi (Φ)

$$\Phi = 0,9$$

Kapasitas lentur reduksi ($\Phi.M_n$)

$$\Phi.M_n = 0,9 \times 10,19$$

$$= 9,17 \text{ kNm}$$

Momen *ultimate* (M_u)

$$M_u = M_{11 \text{ Min}}$$

$$= 5,42 \text{ kNm}$$

(Syarat terpenuhi, $\Phi.M_n > M_u$)

c. Perhitungan Baja Bondek Bawah Arah Sumbu Y (Lapangan)

1) Kontrol luas baja

Baja terpasang ($A_{s \text{ use}}$)

$$A_{s \text{ use}} = 857,59 \text{ mm}^2$$

Baja minimum 1 ($A_{s \text{ min1}}$)

$$A_{s \text{ min1}} = 0,2\% \times b \times t$$

$$= 0,2\% \times 1000 \times 100$$

$$= 200 \text{ mm}^2$$

Baja minimum 2 ($A_{s \text{ min2}}$)

$$A_{s \text{ min2}} = 0,18\% \times \frac{420}{f_{yu}} \times b \times t$$

$$= 0,18\% \times \frac{420}{420} \times 1000 \times 100$$

$$= 180 \text{ mm}^2$$

Baja minimum 3 ($A_{s \text{ min3}}$)

$$A_{s \text{ min3}} = 0,14\% \times b \times t$$

$$= 0,14\% \times 1000 \times 100$$

$$= 140 \text{ mm}^2$$

(Syarat terpenuhi, $A_{s_{use}} > A_{s_{min1}}$ atau $A_{s_{min2}}$ atau $A_{s_{min3}}$)

2) Kontrol tahanan momen

Garis tekan beton (a)

$$a = \frac{A_s \times f_{yu}}{(0,85 \times f'_c \times b)}$$

$$= \frac{857,59 \times 560}{(0,85 \times 30 \times 1000)}$$

$$= 18,83 \text{ mm}$$

Kapasitas lentur (Mn)

$$M_n = A_s \times f_{yu} \times \left(d - D - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 857,59 \times 560 \times \left(65 - 10 - \frac{18,83}{2} \right)$$

$$= 26,69 \text{ kNm}$$

Garis netral beton (c)

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

$$= \frac{18,83}{0,85}$$

$$= 22,16 \text{ mm}$$

Regangan tulangan Tarik (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \frac{(d-c)}{c \times 0,003}$$

$$= \frac{(65-22,16)}{22,16 \times 0,003}$$

$$= 0,006$$

Faktor reduksi (Φ)

$$\Phi = 0,9$$

Kapasitas lentur reduksi ($\Phi.M_n$)

$$\Phi.M_n = 0,9 \times 26,69$$

$$= 24,02 \text{ kNm}$$

Momen *ultimate* (M_u)

$$M_u = M_{22_{Max}}$$

$$= 6,02 \text{ kNm}$$

(Syarat terpenuhi, $\Phi.M_n > M_u$)

d. Perhitungan Tulangan Atas Arah Sumbu Y (Tumpuan)

1) Kontrol spasi

Spasi tulangan (S_{Top-Y})

$$S_{Top-Y} = 200 \text{ mm}$$

Spasi maksimum 1 (S_{max1})

$$S_{max1} = 2 \times t$$

$$= 2 \times 100$$

$$= 200 \text{ mm}$$

Spasi maksimum 2 (S_{max2})

$$S_{max2} = 450 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $s \leq S_{max1}$ atau S_{max2})

umlah tulangan per 1 meter analisis (n)

$$n = \frac{1000}{s}$$

$$= \frac{1000}{200}$$

$$= 5 \text{ buah/m}$$

Jarak bersih antar tulangan (S_n)

$$S_n = s - D$$

$$= 200 - 10$$

$$= 190 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $S_n > D$ atau 25 mm)

2) Kontrol luas tulangan

Tulangan terpasang (A_{suse})

$$A_{suse} = n \times \frac{\pi}{4} \times D^2$$

$$= 5 \times \frac{3,14}{4} \times 10^2$$

$$= 392,7 \text{ mm}^2$$

Tulangan minimum 1 (A_{smin1})

$$A_{smin1} = 0,2\% \times b \times t$$

$$= 0,2\% \times 1000 \times 100$$

$$= 200 \text{ mm}^2$$

Tulangan minimum 2 (A_{smin2})

$$\begin{aligned} A_{smin2} &= 0,18\% \times \frac{420}{f_{yu}} \times b \times t \\ &= 0,18\% \times \frac{420}{420} \times 1000 \times 100 \\ &= 180 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Tulangan minimum 3 (A_{smin3})

$$\begin{aligned} A_{smin3} &= 0,14\% \times b \times t \\ &= 0,14\% \times 1000 \times 100 \\ &= 140 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

3) Kontrol tahanan momen

Garis tekan beton (a)

$$\begin{aligned} a &= \frac{A_s \times f_{yu}}{(0,85 \times f'_c \times b)} \\ &= \frac{392,7 \times 420}{(0,85 \times 30 \times 1000)} \\ &= 6,47 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kapasitas lentur (M_n)

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \times f_{yu} \times \left(d - D - \frac{a}{2} \right) \\ &= 392,7 \times 420 \times \left(65 - 10 - \frac{6,47}{2} \right) \\ &= 10,19 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Garis netral beton (c)

$$\begin{aligned} c &= \frac{a}{\beta_1} \\ &= \frac{6,47}{0,85} \\ &= 7,61 \text{ mm} \end{aligned}$$

Regangan tulangan Tarik (ϵ_s)

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{(d-c)}{c \times 0,003} \\ &= \frac{(65-7,61)}{7,61 \times 0,003} \\ &= 0,023 \end{aligned}$$

Faktor reduksi (Φ)

$$\Phi = 0,9$$

Kapasitas lentur reduksi ($\Phi.M_n$)

$$\Phi.M_n = 0,9 \times 10,19$$

$$= 9,17 \text{ kNm}$$

Momen *ultimate* (M_u)

$$M_u = M_{22_{Min}}$$

$$= 5,95 \text{ kNm}$$

(Syarat terpenuhi, $\Phi.M_n > M_u$)

Tabel 4.43 Rekapitulasi Penulangan Pelat

Pelat	Tebal plat ekuivalen, t (mm)	Tulangan, d_s (mm)	Jenis Tulangan	Spasi tulangan, s (mm)		Tulangan	
				Tumpuan	Lapangan	Tumpuan	Lapangan
S1 Beton	125	10	Bawah	200	200	D10-200	D10-200
			Atas	200	200	D10-200	D10-200
S1 Bondek	125	10	Bawah	-	-	-	-
			Atas	200	200	D10-200	D10-200

4.5.3 Lendutan Pada Pelat

1. Lendutan pada Pelat

Kapasitas Retak Lentur

Momen inersia pelat (I_g)

$$\begin{aligned}
 I_g &= \frac{1}{12} \times b \times t^3 \\
 &= \frac{1}{12} \times 1000 \times 100^3 \\
 &= 83333333,33 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Tegangan retak (f_r)

$$\begin{aligned}
 f_r &= 0,62 \times \sqrt{f'_c} \\
 &= 0,62 \times \sqrt{30} \\
 &= 3,40 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Garis netral (y)

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{t}{2} \\
 &= \frac{100}{2}
 \end{aligned}$$

$$= 50 \text{ mm}$$

Kapasitas retak lentur (M_{cr})

$$M_{cr} = \frac{f_r \times I_g}{y}$$

$$= 5,67 \text{ kNm}$$

Momen inersia retak (I_{cr})

$$I_{cr} = 0,25 \times I_g$$

$$= 0,25 \times 83333333,33$$

$$= 20833333,33 \text{ mm}^4$$

a. Lendutan Arah Sumbu X

Ma lapangan (+) ($M_{11_{Max}}$)

$$M_{11_{Max}} = 5,32 \text{ kNm}$$

Ma tumpuan (-) ($M_{11_{Min}}$)

$$M_{11_{Min}} = -5,42 \text{ kNm}$$

M_{cr}/Ma lapangan

$$= \frac{5,67}{5,32} = 1,06 \text{ (} M_{cr} > Ma, \text{ belum retak)}$$

M_{cr}/Ma tumpuan

$$= \frac{5,67}{5,42} = 1,04 \text{ (} M_{cr} > Ma, \text{ belum retak)}$$

Karena belum retak maka $I_e = I_g$

$$I_e \text{ lapangan} = 83333333,33 \text{ mm}^4$$

$$I_e \text{ tumpuan} = 83333333,33 \text{ mm}^4$$

$$I_e \text{ rata rata} = 83333333,33 \text{ mm}^4$$

1) Lendutan seketika

Lendutan seketika akibat beban (σ_i)

$$\sigma_i = \frac{5}{48} \times \frac{L^2}{E_c \times I_g} \times [M_{Lap} + 0,2 \times M_{Tum}]$$

$$= \frac{5}{48} \times \frac{4400^2}{25743 \times 83333333,33} \times [5,32 + 0,2 \times 5,42]$$

$$= 6,02 \text{ mm}$$

Syarat lendutan seketika ($\sigma_{i \text{ All}}$)

$$\sigma_{i \text{ All}} = \frac{L}{360}$$

$$= \frac{4400}{360}$$

$$= 12,22 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $\sigma_i \text{ All} > \sigma_i$)

2) Lendutan jangka panjang

Faktor jangka panjang

$$= \frac{2}{1+50 \rho'}$$

$$= \frac{2}{1+50 \left(\frac{392,7}{1000 \times 65} \right)}$$

$$= 1,54$$

Lendutan jangka panjang (σ_{lt})

$$\sigma_{lt} = \left(\sigma_i \times \frac{2}{1+50 \rho'} \right)$$

$$= (3,08 \times 1,54)$$

$$= 6,02 \text{ mm}$$

Syarat lendutan jangka panjang ($\sigma_{lt \text{ All}}$)

$$\sigma_{lt \text{ All}} = \frac{L}{240}$$

$$= \frac{4400}{240}$$

$$= 18,33 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $\sigma_{lt \text{ All}} > \sigma_{lt}$)

b. Lendutan Arah Sumbu Y

Ma lapangan (+) ($M22_{\text{Max}}$)

$$M22_{\text{Max}} = 6,02 \text{ kNm}$$

Ma tumpuan (-) ($M22_{\text{Min}}$)

$$M22_{\text{Min}} = -5,95 \text{ kNm}$$

Mcr/Ma lapangan

$$= \frac{5,67}{6,02} = 0,94 \text{ (Mcr} < \text{Ma, retak)}$$

Mcr/Ma tumpuan

$$= \frac{5,67}{5,95} = 0,95 \text{ (Mcr} < \text{Ma, retak)}$$

Ie lapangan

$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \\
&= (0,94)^3 \times 83333333,33 + [1 - (0,94)^3] 20833333,33 \leq 83333333,33 \\
&= 72744165 \text{ mm}^4
\end{aligned}$$

Ie tumpuan

$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} < I_g \\
&= (0,95)^3 \times 83333333,33 + [1 - (0,95)^3] 20833333,33 \leq 83333333,33 \\
&= 74414061 \text{ mm}^4
\end{aligned}$$

Ie rata rata

$$\begin{aligned}
&= 0,5 \text{ Ie lapangan} + 0,5 \text{ Ie tumpuan} \\
&= (0,5 \times 72744165) + (0,5 \times 74414061) \\
&= 73579113 \text{ mm}^4
\end{aligned}$$

1) Lendutan seketika

Lendutan seketika akibat beban (σ_i)

$$\begin{aligned}
\sigma_i &= \frac{5}{48} \times \frac{L^2}{E_c \times I_g} \times [M_{Lap} + 0,2 \times M_{Tum}] \\
&= \frac{5}{48} \times \frac{4400^2}{25743 \times 73579113} \times [6,02 + 0,2 \times 5,95] \\
&= 7,67 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Syarat lendutan seketika ($\sigma_{i \text{ All}}$)

$$\begin{aligned}
\sigma_{i \text{ All}} &= \frac{L}{360} \\
&= \frac{4400}{360} \\
&= 12,22 \text{ mm}
\end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $\sigma_{i \text{ All}} > \sigma_i$)

2) Lendutan jangka panjang

Faktor jangka panjang

$$\begin{aligned}
&= \frac{2}{1 + 50 \rho'} \\
&= \frac{2}{1 + 50 \left(\frac{392,7}{1000 \times 55}\right)} \\
&= 1,47
\end{aligned}$$

Lendutan jangka panjang (σ_{lt})

$$\begin{aligned}\sigma_{lt} &= \left(\sigma_i \times \frac{2}{1+50 \rho'} \right) \\ &= (7,67 \times 1,47) \\ &= 11,27 \text{ mm}\end{aligned}$$

Syarat lendutan jangka panjang ($\sigma_{lt \text{ All}}$)

$$\begin{aligned}\sigma_{lt \text{ All}} &= \frac{L}{240} \\ &= \frac{4400}{240} \\ &= 18,33 \text{ mm}\end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $\sigma_{lt \text{ All}} > \sigma_{lt}$)

2. Lendutan Pelat Bondek

Momen inersia penampang koposit (I_{comp})

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{25743} = 7.77$$

$$A_{tr} = n \times A_s = 7.77 \times 857.59 = 6663.47 \text{ mm}^2$$

$$I_{s-tr} = n \times I_s = 7.77 \times 422063.58 = 3279433.8 \text{ mm}^2$$

$$A_c = b \times t = 1000 \times 100 = 100000 \text{ mm}^2$$

$$I_c = \frac{1}{12} \times b \times t^3 = \frac{1}{12} \times 1000 \times 100^3 = 83333333.33 \text{ mm}^4$$

Garis netral komposit dari serat bawah (Y_{na})

$$Y_{na} = \frac{(A_c \times y_c) + (A_{tr} \times y_s)}{(A_c + A_{tr})}$$

$$Y_{na} = \frac{(A_c \times y_c) + (A_{tr} \times y_s)}{(A_c + A_{tr})} = 48.44 \text{ mm}$$

$$I_{comp} = [I_c + A_c \times (Y_{na} - y_c)^2] + [I_{s-tr} + A_{tr} \times (Y_{na} - y_c)^2]$$

$$I_{comp} = [83333333.33 + 100000 \times (48.44 - 50)^2] + [3279433.8 + 6663.47 \times (48.44 - 25)^2]$$

$$I_{comp} = 90517266 \text{ mm}^4$$

Tegangan retak (Fr)

$$Fr = 0,62 \times \sqrt{f'c}$$

$$= 0,62 \times \sqrt{30}$$

$$= 3,40 \text{ Mpa}$$

Garis netral tarik (yt)

$$Y_t = Y_{na}$$

$$= 48.44 \text{ mm}$$

Kapasitas retak lentur (M_{cr})

$$M_{cr} = \frac{f_r \times I_{comp}}{y_t}$$

$$M_{cr} = \frac{3.40 \times 90517266}{48.44}$$

$$= 6353919 \text{ Nmm}$$

$$= 6.35 \text{ kNm}$$

Momen inersia retak (I_{cr})

$$I_{cr} = 0,25 \times I_{comp}$$

$$= 0,25 \times 90517266$$

$$= 22629316.5 \text{ mm}^4$$

a. Lendutan Arah Sumbu X

Ma lapangan (+) ($M_{11_{Max}}$)

$$M_{11_{Max}} = 5,32 \text{ kNm}$$

Ma tumpuan (-) ($M_{11_{Min}}$)

$$M_{11_{Min}} = -5,42 \text{ kNm}$$

M_{cr}/Ma lapangan

$$= \frac{6,35}{5,32} = 1,19 \text{ (} M_{cr} > Ma, \text{ belum retak)}$$

M_{cr}/Ma tumpuan

$$= \frac{6,35}{5,42} = 1,17 \text{ (} M_{cr} > Ma, \text{ belum retak)}$$

Momen inersia efektif (I_e)

$$I_{e \text{ lapangan}} = I_{comp} = 90517266 \text{ mm}^4$$

$$I_{e \text{ tumpuan}} = I_{comp} = 90517266 \text{ mm}^4$$

$$I_{e \text{ rata-rata}} = 0,5 I_{e \text{ lapangan}} + 0,5 I_{e \text{ tumpuan}} = 90517266 \text{ mm}^4$$

1) Lendutan seketika

Lendutan seketika akibat beban (σ_i)

$$\sigma_i = \frac{5}{48} \times \frac{L^2}{E_c \times I_{comp}} \times [M_{Lap} + 0,2 \times M_{Tum}]$$

$$= \frac{5}{48} \times \frac{4400^2}{25743 \times 90517266} \times [5,32 + 0,2 \times 5,42]$$

$$= 5,54 \text{ mm}$$

Syarat lendutan seketika ($\sigma_{i \text{ All}}$)

$$\begin{aligned}\sigma_{i \text{ All}} &= \frac{L}{360} \\ &= \frac{4400}{360} \\ &= 12,22 \text{ mm}\end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $\sigma_{i \text{ All}} > \sigma_i$)

2) Lendutan jangka panjang

Karena pelat baja bondek menahan gaya tarik (momen positif) dan tidak diasumsikan adanya tulangan baja tekan di daerah lapangan, maka rasio tulangan tekan $\rho' = 0$.

Faktor jangka panjang

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{2}{1+50 \rho'} \\ &= \frac{2}{1+50 (0)} \\ &= 2\end{aligned}$$

Lendutan jangka panjang (σ_{lt})

$$\begin{aligned}\sigma_{lt} &= (\sigma_i \times \lambda) \\ &= (5,54 \times 2) \\ &= 11,08 \text{ mm}\end{aligned}$$

Syarat lendutan jangka panjang ($\sigma_{lt \text{ All}}$)

$$\begin{aligned}\sigma_{lt \text{ All}} &= \frac{L}{240} \\ &= \frac{4400}{240} \\ &= 18,33 \text{ mm}\end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $\sigma_{lt \text{ All}} > \sigma_{lt}$)

b. Lendutan Arah Sumbu Y

Ma lapangan (+) ($M_{22 \text{ Max}}$)

$$M_{22 \text{ Max}} = 6,02 \text{ kNm}$$

Ma tumpuan (-) ($M_{22 \text{ Min}}$)

$$M_{22 \text{ Min}} = -5,95 \text{ kNm}$$

M_{cr}/Ma lapangan

$$= \frac{6,35}{6,02} = 1,05 \text{ (Mcr} > \text{Ma, belum retak)}$$

Mcr/Ma tumpuan

$$= \frac{6,35}{5,95} = 1,07 \text{ (Mcr} > \text{Ma, belum retak)}$$

$$I_{\text{e lapangan}} = I_{\text{comp}} = 90517266 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{e tumpuan}} = I_{\text{comp}} = 90517266 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{e rata-rata}} = 0,5 I_{\text{e lapangan}} + 0,5 I_{\text{e tumpuan}} = 90517266 \text{ mm}^4$$

1) Lendutan seketika

Lendutan seketika akibat beban (σ_i)

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{5}{48} \times \frac{L^2}{E_c \times I_{\text{comp}}} \times [M_{\text{Lap}} + 0,2 \times M_{\text{Tum}}] \\ &= \frac{5}{48} \times \frac{4400^2}{25743 \times 90517266} \times [6,02 + 0,2 \times 5,95] \\ &= 6,24 \text{ mm} \end{aligned}$$

Syarat lendutan seketika ($\sigma_{i \text{ All}}$)

$$\begin{aligned} \sigma_{i \text{ All}} &= \frac{L}{360} \\ &= \frac{4400}{360} \\ &= 12,22 \text{ mm} \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $\sigma_{i \text{ All}} > \sigma_i$)

2) Lendutan jangka panjang

Faktor jangka panjang

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{2}{1+50 \rho'} \\ &= \frac{2}{1+50 (0)} \\ &= 2 \end{aligned}$$

Lendutan jangka panjang (σ_{lt})

$$\begin{aligned} \sigma_{lt} &= \left(\sigma_i \times \frac{2}{1+50 \rho'} \right) \\ &= (6,75 \times 2) \\ &= 12,48 \text{ mm} \end{aligned}$$

Syarat lendutan jangka panjang ($\sigma_{lt \text{ All}}$)

$$\sigma_{lt \text{ All}} = \frac{L}{240}$$

$$= \frac{4400}{240}$$

$$= 18,33 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, $\sigma_{lt \text{ All}} > \sigma_{lt}$)

Tabel 4.44 Rekapitulasi Perbandingan Lendutan Pelat

Arah Tinjauan	Jenis Lendutan	Pelat Konvensional	Pelat Komposit	Batas Izin	Status
Sumbu X	Seketika (σ_i)	6,02 mm	5,54 mm	12,22 mm	Aman
	Jangka Panjang (σ_{lt})	9,27 mm	11,08 mm	18,33 mm	Aman
Sumbu Y	Seketika (σ_i)	7,67 mm	6,24 mm	12,22 mm	Aman
	Jangka Panjang (σ_{lt})	11,27 mm	12,48 mm	18,33 mm	Aman

Berdasarkan hasil perhitungan dan tabel rekapitulasi di atas dengan menggunakan parameter ketebalan ekuivalen ($t = 100 \text{ mm}$), dapat ditarik beberapa kesimpulan terkait perilaku mekanika penampang kedua pelat:

1. Pemenuhan Syarat Kelayakan

Kedua alternatif desain pelat, baik beton bertulang konvensional maupun komposit bondek, terbukti aman dan layak digunakan. Seluruh nilai lendutan yang terjadi masih berada jauh di bawah batas izin batas aman yang disyaratkan, yaitu $L/360$ untuk lendutan seketika dan $L/240$ untuk lendutan jangka panjang.

2. Keunggulan Kekakuan Seketika Bondek

Pelat komposit bondek menghasilkan lendutan seketika yang lebih kecil daripada pelat konvensional, yaitu 5,54 mm terhadap 6,02 mm pada arah X (8,0% lebih kecil) dan 6,24 mm terhadap 7,67 mm pada arah Y (18,6% lebih kecil). Perbedaan ini dapat ditelusuri langsung dari langkah perhitungan a) sampai f) melalui dua mekanisme. Pertama, transformasi dek baja menghasilkan $I_{comp} = 90.517.266 \text{ mm}^4$, atau 8,6% lebih besar daripada I_g pelat konvensional ($83.333.333 \text{ mm}^4$); pada arah X, ketika kedua penampang belum retak, rasio lendutan $5,54/6,02 = 0,92$ identik dengan rasio $I_g/I_{comp} = 0,92$. Kedua, I_{comp} yang lebih besar menaikkan momen retak dari 5,67 kNm menjadi 6,35 kNm, sehingga

pada arah Y ($M_a = 6,02 \text{ kNm}$) pelat konvensional sudah retak dan momen inersia efektifnya turun menjadi $73.579.113 \text{ mm}^4$ ($0,88I_g$), sedangkan pelat bondek belum retak dan tetap menggunakan I_{comp} . Mekanisme kedua inilah yang menyebabkan selisih lendutan seketika pada arah Y lebih besar daripada arah X.

3. Pengaruh Rangkak dan Susut Jangka Panjang

Sebaliknya, lendutan jangka panjang pelat bondek lebih besar, yaitu 11,08 mm terhadap 9,27 mm pada arah X dan 12,48 mm terhadap 11,27 mm pada arah Y. Penyebabnya terletak pada faktor pengali $\lambda_\Delta = \xi / (1 + 50\rho')$, bukan pada kekakuan penampang. Pada pelat konvensional, tulangan atas di daerah lapangan ($A_s' = 392,7 \text{ mm}^2/\text{m}$) berfungsi sebagai tulangan tekan yang menahan rangkak beton: dengan $\rho' = 392,7 / (1000 \times 65) = 0,0060$ pada arah X diperoleh $\lambda_\Delta = 2 / (1 + 50 \times 0,0060) = 1,54$, dan dengan $\rho' = 392,7 / (1000 \times 55) = 0,0071$ pada arah Y diperoleh $\lambda_\Delta = 1,47$. Pada pelat bondek, dek baja berada di serat bawah sebagai tulangan tarik dan tidak terdapat tulangan tekan di daerah lapangan, sehingga $\rho' = 0$ dan $\lambda_\Delta = 2,0$. Dengan demikian, meskipun lendutan seketikanya 8–19% lebih kecil, lendutan jangka panjang pelat bondek menjadi 11–20% lebih besar karena faktor pengalinya 30–36% lebih tinggi. Seluruh nilai masih memenuhi batas $L/240 = 18,33 \text{ mm}$.

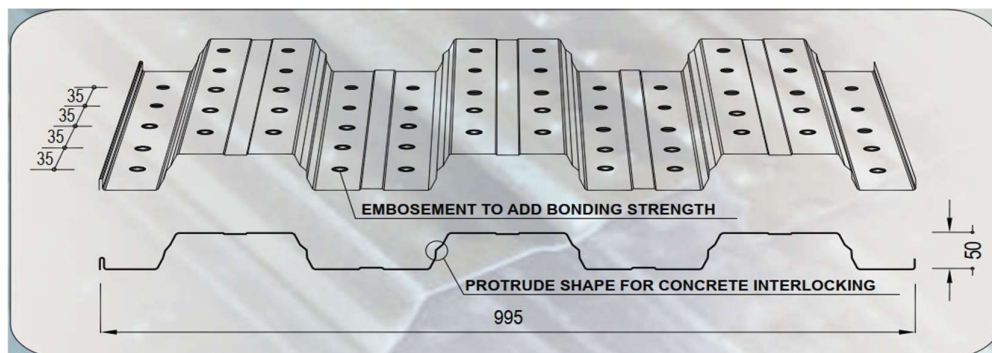
Faktor ξ merupakan koefisien empiris yang menggabungkan pengaruh rangkak dan susut dalam satu pengali dan dikalibrasi terutama untuk pelat beton bertulang konvensional. Secara mekanis, rangkak memperbesar kelengkungan akibat beban tetap karena modulus efektif beton turun menjadi $E_{c,\text{eff}} = E_c / (1 + \phi)$, dengan ϕ adalah koefisien rangkak, sedangkan susut menimbulkan kelengkungan tambahan yang tidak bergantung pada beban dan besarnya dipengaruhi regangan susut bebas serta letak tulangan terhadap titik berat penampang (Gilbert & Ranzi, 2011). Pada pelat komposit, dek baja yang kedap air menyebabkan beton hanya mengering dari permukaan atas, sehingga regangan susut tidak seragam sepanjang tebal pelat; kajian eksperimental menunjukkan bahwa gradien susut ini memperbesar lendutan jangka panjang dibandingkan prediksi yang mengasumsikan susut seragam (Gilbert dkk., 2012). Evaluasi terhadap beberapa standar desain juga menunjukkan bahwa Eurocode

4 cenderung meremehkan lendutan jangka panjang pelat komposit karena tidak memperhitungkan susut tak seragam, sedangkan AS/NZS 2327:2017 yang memperhitungkannya secara eksplisit memberikan prediksi yang lebih akurat (L. A. M. Oliveira dkk., 2021). Oleh karena itu, lendutan jangka panjang pelat bondek pada **Tabel 4.35** dipandang sebagai estimasi berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019, dan sisa margin terhadap batas izin ($18,33 - 12,48 = 5,85$ mm pada arah Y) berfungsi sebagai cadangan terhadap efek susut tidak seragam tersebut. Untuk memperjelas dasar faktor pengali tersebut, lendutan jangka panjang dapat diuraikan menjadi komponen rangkai dan komponen susut yang dihitung secara terpisah. Kerangka perhitungan yang digunakan dalam SNI 2847:2019 dan pendekatan terpisah menurut ACI 435R-95 dirangkum sebagai berikut (American Concrete Institute, 1995; Badan Standardisasi Nasional, 2019c; Gilbert & Ranzi, 2011):

- a. Lendutan tambahan jangka panjang menurut SNI 2847:2019 Pasal 24.2.4.1: $\Delta_{lt} = \lambda_{\Delta} \times \Delta_{i,tetap}$, dengan $\lambda_{\Delta} = \xi / (1 + 50\rho')$. Satu faktor λ_{Δ} mewakili gabungan rangkai dan susut, sedangkan $\rho' = A_s' / (b \times d)$ adalah rasio tulangan tekan di tengah bentang untuk komponen menerus.
- b. Komponen rangkai: $\Delta_{cp} = k_r \times C_t \times \Delta_{i,tetap}$, dengan $k_r = 0,85 / (1 + 50\rho')$ dan C_t adalah koefisien rangkai beton pada waktu t , yang nilainya bergantung pada kelembapan relatif, umur beton saat dibebani, dan ukuran penampang (American Concrete Institute, 1995).
- c. Kelengkungan susut: $\phi_{sh} = 0,7 \times (\epsilon_{sh}/h) \times (\rho - \rho')^{1/3} \times [(\rho - \rho')/\rho]^{1/2}$ untuk $(\rho - \rho') \leq 3,0\%$, dan $\phi_{sh} = \epsilon_{sh}/h$ untuk $(\rho - \rho') > 3,0\%$, dengan ϵ_{sh} adalah regangan susut bebas, h tebal pelat, serta ρ dan ρ' dinyatakan dalam persen.
- d. Lendutan susut: $\Delta_{sh} = K_{sh} \times \phi_{sh} \times \ell^2$, dengan $K_{sh} = 0,125$ untuk bentang sederhana, $0,090$ untuk bentang dengan satu ujung menerus, $0,065$ untuk bentang dengan kedua ujung menerus, dan $0,50$ untuk kantilever.
- e. Lendutan total jangka panjang yang dibandingkan dengan batas izin: $\Delta_{total} = \Delta_{cp} + \Delta_{sh} + \Delta_{i,hidup}$ (pendekatan terpisah), atau $\Delta_{total} = \lambda_{\Delta} \times \Delta_{i,tetap} + \Delta_{i,hidup}$ (SNI 2847:2019).

Persamaan b) sampai d) menunjukkan mengapa tulangan tekan sangat menentukan. Tulangan tekan menahan perpindahan beton di zona tekan akibat rangkai (faktor k_r) dan sekaligus mengurangi kelengkungan susut karena kekangan tulangan menjadi lebih simetris terhadap tinggi penampang (suku $\rho - \rho'$). Sebaliknya, pada penampang dengan tulangan yang hanya terletak di serat bawah, susut beton di serat atas tidak terkekang sehingga penampang melengkung ke bawah searah dengan lendutan akibat beban. Pada pelat bondek, kondisi ini diperburuk oleh pengeringan satu sisi karena dek baja kedap air, sehingga regangan susut di serat atas lebih besar daripada di serat bawah (Gilbert & Ranzi, 2011). Pendekatan terpisah memerlukan parameter material C_t dan ε_{sh} yang harus ditetapkan berdasarkan kondisi lingkungan dan umur pembebanan (American Concrete Institute, 1995) sehingga pada penelitian ini pendekatan tersebut digunakan sebagai kerangka interpretasi mekanisme, sedangkan pemeriksaan terhadap batas izin tetap menggunakan faktor λ_Δ sesuai SNI 2847:2019.

Selain itu, batas $L/240$ pada Tabel 24.2.2 SNI 2847:2019 berlaku untuk bagian lendutan yang terjadi setelah pemasangan elemen nonstruktural, yaitu jumlah lendutan jangka panjang akibat seluruh beban tetap dan lendutan seketika akibat penambahan beban hidup (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Pada perhitungan di atas, faktor λ_Δ dikalikan dengan lendutan seketika akibat seluruh beban. Karena $\lambda_\Delta \geq 1$, hasil tersebut tidak lebih kecil daripada $\lambda_\Delta \Delta_{i,tetap} + \Delta_{i,hidup}$, sehingga pemeriksaan yang dilakukan bersifat konservatif.



Gambar 4.18 Profil Pelat *Union Deck W-1000*

Sumber: Brosur Union Deck (2026)

4.5.4 Penulangan Struktur Balok

Perhitungan penulangan struktur balok menggunakan output as tulangan longitudinal dan tulangan geser yang diperoleh dari hasil analisa struktur *ETABS*.

1. Data dan Spesifikasi Balok Beton Bertulang

a. Geometri Balok

Lebar balok (b)	: 450 mm
Tinggi balok (h)	: 600 mm
Panjang bentang balok (L)	: 8000 mm
Sisi kolom sejajar panjang bentang balok (C_1)	: 700 mm
Sisi kolom pertemuan dengan balok (C_2)	: 700 mm

b. Geometri Tulangan

Diameter tulangan lentur sisi atas (D_A)	: 25 mm
Diameter tulangan lentur sisi bawah (D_B)	: 25 mm
Diameter tulangan geser (D_S)	: 13 mm
Diameter tulangan torsi (D_T)	: 16 mm
Selimut beton terhadap sengkang (t_s)	: 40 mm
Jumlah kaki sengkang tumpuan (n_{Tump})	: 3 buah
Jumlah kaki sengkang lapangan (n_{Lap})	: 3 buah
Spasi sengkang tumpuan (s_{Tump})	: 100 mm
Spasi sengkang lapangan (s_{Lap})	: 150 mm
Tulangan torsi longitudinal tumpuan ($n_{TumpTorsi}$)	: 4 buah
Tulangan torsi longitudinal lapangan ($n_{LapTorsi}$)	: 2 buah

c. Spesifikasi Material Beton dan Tulangan

Kuat tekan beton (f'_c)	: 30 MPa
Tegangan leleh tulangan lentur (f_{yd})	: 420 MPa
Tegangan leleh tulangan geser (f_{ys})	: 420 MPa

d. Beban Momen dan Gaya Geser Rencana (*Output ETABS*)

Momen positif (sisi bawah) tumpuan (Mu_{Tump}^+)	: 423,31 kNm
Momen positif (sisi bawah) lapangan (Mu_{Lap}^+)	: 503,97 kNm
Momen negatif (sisi atas) tumpuan (Mu_{Tump}^-)	: -682,41 kNm
Momen negatif (sisi atas) lapangan (Mu_{Lap}^-)	: -501,09 kNm

Gaya geser tumpuan (V_{uTump})	: 431,22 kN
Gaya geser lapangan (V_{uLap})	: 370,02 kN
Gaya geser gravitasi tumpuan (V_{gTump})	: 273,96 kN
Momen torsi (T_u)	: 43,06 kNm
Gaya aksial (P_u)	: 58,38 kN

e. Faktor Reduksi

Faktor reduksi lentur (Φ_b)	: 0,90
Faktor reduksi geser (Φ_v)	: 0,75
Faktor reduksi torsi (Φ_t)	: 0,75
Jenis torsi	: Kompatibilitas

2. Syarat Geometri dan Kapasitas Momen

Gaya aksial tekan terfaktor

Gaya aksial izin elemen struktur balok

$$= 0,1 \times A_g \times f'_c$$

$$= 0,1 \times b \times h \times f'_c$$

$$= 0,1 \times 450 \times 600 \times 30$$

$$= 810 \text{ kN}$$

$$\text{Gaya aksial } (P_u) : 58,38 \text{ kN}$$

(Balok sebagai elemen lentur)

a. Syarat Geometri Balok

1) Syarat Bentang Bersih (SNI 2847:2019 Pasal 18.6.2.1)

Bentang bersih balok

$$L_n = L - C_1$$

$$= 8000 - 700 \text{ mm}$$

$$= 7300 \text{ mm}$$

Syarat 1

$$d = 534 \text{ mm}$$

$$4d = 4 \times 534$$

$$= 2136 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, bentang bersih komponen struktur tidak boleh $< 4d$)

2) Syarat Lebar Minimum (SNI 2847:2019 Pasal 18.6.2.1)

Rasio lebar dan tinggi balok

$$b = 450 \text{ mm}$$

Syarat 2

$$0,3 h = 0,3 \times 600$$

$$= 180 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, perbandingan lebar dan tinggi balok tidak boleh $< 0,3$)

3) Syarat Lebar Minimum (SNI 2847:2019 Pasal 18.6.2.1)

Lebar balok

$$b = 450 \text{ mm}$$

Syarat 3

$$250 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, lebar balok tidak boleh kurang dari 250 mm)

4) Syarat Lebar Maksimum (SNI 2847:2019 Pasal 18.6.2.1)

Lebar balok

$$b = 450 \text{ mm}$$

Syarat 4

$$b < C_2 + (2 \times C_1) \text{ atau } (2 \times 0,75 \times C_1)$$

$$450 < 700 + (2 \times 700) \text{ atau } (2 \times 0,75 \times 700)$$

$$450 < 2100 \text{ atau } 1750 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, lebar balok harus kurang dari $C_2 + C_1$ atau $0,75 C_1$)

b. Panjang Area Tumpuan

Syarat panjang area tumpuann

$$2 \times h = 2 \times 600$$

$$= 1200 \text{ mm}$$

Panjang area tumpuan

$$L_n/4 = 7300/4$$

$$= 1825 \text{ mm}$$

Panjang area tumpuan yang digunakan

$$L_{\text{Tump}} = 1825 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, panjang area tumpuan memenuhi)

c. Kapasitas Momen Nominal Balok

1) Kapasitas Momen Tumpuan

$$M_n^+ \text{ Tumpuan} = 504,16 \text{ kNm}$$

$$M_n^- \text{ Tumpuan} = 820,41 \text{ kNm}$$

(Memenuhi syarat, $M_n^+ \text{ Tumpuan} > 50\% M_n^- \text{ Tumpuan}$)

2) Kapasitas Momen Lapangan

$$M_n^+ \text{ Lapangan} = 593,88 \text{ kNm}$$

$$M_n^- \text{ Lapangan} = 593,88 \text{ kNm}$$

(Memenuhi syarat, $M_n^+ \text{ Lapangan} > 25\% M_n^- \text{ Tumpuan}$;

Memenuhi syarat $M_n^- \text{ Lapangan} > 25\% M_n^- \text{ Tumpuan}$)

d. *Probable Momen Capacity*1) M_{pr} Positif di Tumpuan

Garis tekan balok

$$\begin{aligned} a_{pr}(+) &= \frac{1,25 \times A_s \times f_{yd}}{0,85 \times f'_c \times b} \\ &= \frac{1,25 \times 2454,37 \times 420}{0,85 \times 30 \times 450} \\ &= 112,29 \text{ mm} \end{aligned}$$

M_{pr} tumpuan positif

$$\begin{aligned} M_{pr}(+) &= 1,25 \times A_s \times f_{yd} \left(d - \frac{a_{pr}(+)}{2} \right) \\ &= 1,25 \times 2454,37 \times 420 \left(534 - \frac{112,29}{2} \right) \\ &= 615,74 \text{ kNm} \end{aligned}$$

2) M_{pr} Negatif di Tumpuan

Garis tekan balok

$$\begin{aligned} a_{pr}(-) &= \frac{1,25 \times A_s \times f_{yd}}{0,85 \times f'_c \times b} \\ &= \frac{1,25 \times 4417,86 \times 420}{0,85 \times 30 \times 450} \\ &= 202,12 \text{ mm} \end{aligned}$$

M_{pr} tumpuan negatif

$$\begin{aligned} M_{pr}(-) &= 1,25 \times A_s \times f_{yd} \left(d - \frac{a_{pr}(-)}{2} \right) \\ &= 1,25 \times 4417,86 \times 420 \left(523 - \frac{202,12}{2} \right) \\ &= 978,63 \text{ kNm} \end{aligned}$$

3. Perhitungan Tulangan Lentur

Perhitungan penulangan lentur balok pada subbab ini ditinjau berdasarkan empat kondisi gaya dalam utama, yaitu momen tumpuan negatif, momen tumpuan positif, momen lapangan positif, dan momen lapangan negatif. Untuk efisiensi penulisan laporan tanpa mengurangi substansi analisis, penjabaran langkah perhitungan secara terperinci hanya ditampilkan satu kali sebagai contoh representatif, yakni pada tinjauan Momen Tumpuan Negatif. Adapun perhitungan untuk ketiga kondisi momen lainnya dilakukan dengan prosedur analitis yang sama persis, di mana hasil akhirnya langsung dirangkum dan disajikan dalam tabel rekapitulasi desain.

a. Momen Tumpuan Negatif (Tulangan Tumpuan Sisi Atas)

Faktor distribusi tegangan beton (β_1) = 0,85

Rasio tulangan *balance* (ρ_b)

$$\begin{aligned}(\rho_b) &= \frac{\beta_1 \times 0,85 \times f'_c}{f_{yd}} \times \frac{600}{600 + f_{yd}} \\&= \frac{0,85 \times 0,85 \times 30}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\&= 3,04 \%\end{aligned}$$

Tahanan tegangan balok ($R_{\max}$)

$$\begin{aligned}R_{\max} &= 0,75 \times \rho_b \times f_{yd} \times \left(1 - \frac{0,5 \times 0,75 \times \rho_b \times f_{yd}}{0,85 \times f'_c}\right) \\&= 0,75 \times 3,04\% \times 420 \times \left(1 - \frac{0,5 \times 0,75 \times 3,04\% \times 420}{0,85 \times 30}\right) \\&= 7,77 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Jarak tulangan terluar ke sisi luar beton (d_{sA})

$$\begin{aligned}d_{sA} &= t_s + D_s + \frac{D_u}{2} \\&= 40 + 13 + \frac{25}{2} \\&= 65,5 \text{ mm}\end{aligned}$$

Jarak vertikal antar tulangan (t_{DA})

$$\begin{aligned}t_{DA} &= 25 + D_u \\&= 25 + 25 \\&= 50 \text{ mm}\end{aligned}$$

Jumlah tulangan maksimum satu (1) baris horizontal (n_s)

$$\begin{aligned}
 n_s &= \frac{b-2 \times d_{sA}}{25+D_u} \\
 &= \frac{450-2 \times 64}{25+2} \\
 &= 6,44 \sim 7 \text{ buah}
 \end{aligned}$$

1) Kontrol tahanan tegangan

Momen nominal (M_n)

$$\begin{aligned}
 M_n &= \frac{M_u(Tu)}{\phi_b} \\
 &= \frac{682,41}{0,9} \\
 &= 758,23 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Jarak pusat tulangan terhadap sisi beton (d')

$$d' = 77 \text{ mm}$$

Tinggi efektif balok (d)

$$\begin{aligned}
 d &= h - d' \\
 &= 600 - 77 \\
 &= 523 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Tegangan nominal (R_n)

$$\begin{aligned}
 R_n &= \frac{M_n \times 10^6}{b \times d^2} \\
 &= \frac{758,23 \times 10^6}{450 \times 523^2} \\
 &= 6,16 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $R_n < R_{max}$)

2) Rasio tulangan yang diperlukan

Rasio tulangan perlu (ρ)

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{0,85 \times f'c}{f_{yd}} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times R_n}{0,85 \times f'c}} \right) \\
 &= \frac{0,85 \times 30}{420} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 6,16}{0,85 \times 30}} \right) \\
 &= 1,71 \%
 \end{aligned}$$

Rasio tulangan minimum 1 (ρ_{min1})

$$\rho_{min1} = \frac{\sqrt{f'c}}{4 \times f_{yd}}$$

$$= \frac{\sqrt{30}}{4 \times 420}$$

$$= 0,33 \%$$

Rasio tulangan minimum 2 ($\rho_{\min 2}$)

$$\rho_{\min 2} = \frac{1,4}{f_{yd}}$$

$$= \frac{1,4}{420}$$

$$= 0,33 \%$$

Rasio tulangan maksimum

$$\rho_{\max} = 0,025 = 2,5 \%$$

Rasio digunakan

$$\rho_{use} = 1,71 \%$$

(Syarat terpenuhi, $\rho_{\min} < \rho < \rho_{\max}$)

3) Luas tulangan perlu

Luas tulangan yang diperlukan (A_s)

$$A_s = \rho_{use} \times b \times d$$

$$= 1,71 \% \times 450 \times 523$$

$$= 4016,25 \text{ mm}^2$$

Jumlah tulangan yang digunakan (n)

$$n = \frac{A_s}{\frac{\pi}{4} \times D^2}$$

$$= \frac{4016,25}{\frac{3,14}{4} \times 25^2}$$

$$= 8,186 \sim 9 \text{ buah (9 D25)}$$

Luas tulangan terpasang ($A_{s_{use}}$)

$$A_{s_{use}} = n \times \frac{\pi}{4} \times D^2$$

$$= 9 \times \frac{3,14}{4} \times 25^2$$

$$= 4417,86 \text{ mm}^2$$

Jumlah baris tulangan (n_b)

$$n_b = \frac{n}{n_s}$$

$$= \frac{9}{7}$$

$$= 1,285 \sim 2 \text{ baris}$$

Syarat baris tulangan, $n_b < 3$

(Syarat terpenuhi, diameter tulangan sudah cukup)

4) Matriks posisi tulangan

Tabel 4.45 Matriks Posisi Tulangan Balok

Notasi	Baris ke	Jumlah (n)	Jarak Verikal (mm)	Jumlah Jarak (mm)	Luas (mm ²)
7 D25	1	7	65,5	458,5	3436,1
2 D25	2	2	115,5	231	981,7
TOTAL					
9 D25	n =	9	181	689,5	4417,9

5) Letak titik berat tulangan

Jarak pusat tulangan terhadap sisi beton (d')

$$\begin{aligned}
 d' &= \frac{\sum(n_i \times y_i)}{n} \\
 &= \frac{(7 \times 65,5) + 4 \times 115,5}{9} \\
 &= 76,61 \sim 77 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, d' estimasi $>$ d' hitung)

Tinggi efektif balok (d)

$$\begin{aligned}
 d &= h - d' \\
 &= 600 - 77 \\
 &= 523 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Garis tekan balok (a)

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_s \times f_{yd}}{0,85 \times f'c \times b} \\
 &= \frac{4417,86 \times 420}{0,85 \times 30 \times 450} \\
 &= 161,7 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

6) Tahanan momen balok

Momen nominal (M_n)

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s \times f_{yd} \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \times 10^{-6} \\
 &= 4417,86 \times 420 \times \left(523 - \frac{161,7}{2}\right) \times 10^{-6} \\
 &= 820,41 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Tahanan momen

$$\begin{aligned}\Phi_b \times M_n &= 0,9 \times 820,41 \\ &= 738,37 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Momen ultimate negatif tumpuan (M_{uTump-}) = 682,41 kNm

(Syarat terpenuhi, $\Phi_b \times M_n > M_u$)

4. Perhitungan Tulangan Geser dan Torsi

Perhitungan penulangan geser dan torsi transversal balok pada subbab ini ditinjau berdasarkan dua kondisi penampang utama, yaitu pada daerah tumpuan dan daerah lapangan. Untuk efisiensi penulisan laporan tanpa mengurangi substansi analisis, penjabaran langkah perhitungan secara terperinci hanya ditampilkan satu kali sebagai contoh representatif, yakni pada tinjauan Tulangan Geser dan Torsi Tumpuan. Adapun perhitungan untuk kondisi penampang di daerah lapangan dilakukan dengan prosedur analitis yang sama persis, di mana hasil akhirnya langsung dirangkum dan disajikan dalam tabel rekapitulasi desain penulangan balok.

Parameter Tahanan Geser Beton

Luas penampang torsi (A_{CP})

$$\begin{aligned}A_{CP} &= b \times h \\ &= 450 \times 600 \\ &= 270.000 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Keliling penampang torsi (P_{CP})

$$\begin{aligned}P_{CP} &= 2 \times (b + h) \\ &= 2 \times (450 + 600) \\ &= 2100 \text{ mm}\end{aligned}$$

Luas penampang torsi kritis (A_{OH})

$$\begin{aligned}A_{OH} &= (b - 2 \times t_s - D_s) \times (h - 2 \times t_s - D_s) \\ &= (450 - 2 \times 40 - 13) \times (600 - 2 \times 40 - 13) \\ &= 180.999 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Keliling penampang torsi kritis (P_h)

$$\begin{aligned}
 P_h &= 2 \times [(b - 2 \times t_s - D_s) + (h - 2 \times t_s - D_s)] \\
 &= 2 \times [(450 - 2 \times 40 - 13) + (600 - 2 \times 40 - 13)] \\
 &= 1728 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

0,85 x Luas penampang torsi kritis (A_o)

$$\begin{aligned}
 A_o &= 0,85 \times A_{OH} \\
 &= 0,85 \times 180.999 \\
 &= 153.849,15 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

a. Tulangan Geser Tumpuan dan Torsi Tumpuan

1) Gaya geser tumpuan balok

Gaya geser *ultimate* (V_{uTump})

$$V_{uTump} = 431,22 \text{ kN}$$

Gaya geser probable (V_{Pr})

$$\begin{aligned}
 V_{Pr} &= \frac{M_{Pr(+)} + M_{Pr(-)}}{L_n} \\
 &= \frac{615,74 + 1,63}{7300} \\
 &= 218,41 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Gaya geser gravitasi tumpuan (V_{gTump})

$$V_{gTump} = 273,96 \text{ kN}$$

Gaya geser desain (V_e)

$$\begin{aligned}
 V_e &= V_{Pr} + V_{gTump} \\
 &= 218,41 + 273,96 \\
 &= 492,37 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Gaya geser pakai (V_{uuse})

$$V_{uuse} = 492,37 \text{ kN}$$

Tahanan geser beton (V_c)

$$\begin{aligned}
 V_c &= \frac{1}{6} \times \sqrt{f'c} \times b \times d \\
 &= \frac{1}{6} \times \sqrt{30} \times 450 \times 523 \\
 &= 214,84 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Kebutuhan tulangan geser (V_s)

$$V_s = \frac{V_u}{\phi_v} - V_c$$

$$= \frac{492,37}{0,75} - 214,84$$

$$= 441,65 \text{ kN}$$

($V_s > 0$, maka dibutuhkan tulangan geser desain)

2) Pemeriksaan penampang geser balok

Tahanan geser beton maksimum ($V_{c_{\max}}$)

$$V_{c_{\max}} = \frac{2}{3} \times \sqrt{f'c} \times b \times d$$

$$= \frac{2}{3} \times \sqrt{30} \times 450 \times 523$$

$$= 859,38 \text{ kN}$$

Kebutuhan tulangan geser (V_s)

$$V_s = \frac{V_u}{\phi_v} - V_c$$

$$= \frac{492,37}{0,75} - 214,84$$

$$= 441,65 \text{ kN}$$

(Syarat terpenuhi, $V_s < V_{c_{\max}}$, penampang geser cukup)

3) Kontrol spasi geser

Jarak tulangan maksimum 1 ($s_{\max 1}$)

$$s_{\max 1} = \frac{d}{4}$$

$$= \frac{523}{4}$$

$$= 130,75 \text{ mm}$$

Jarak tulangan maksimum 2 ($s_{\max 2}$)

$$s_{\max 2} = 6 \times D$$

$$= 6 \times 25$$

$$= 150 \text{ mm}$$

Jarak tulangan maksimum 3 ($s_{\max 3}$)

$$s_{\max 3} = 150 \text{ mm}$$

Jarak tulangan yang digunakan (S_{use})

$$S_{\text{use}} = 100 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, Cek spasi sudah oke)

4) Kontrol tahanan geser

Jumlah kaki tulangan Sengkang (n)

$$n = 3 \text{ buah}$$

Kebutuhan tulangan geser (V_s)

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{V_u}{\phi_v} - V_c \\ &= \frac{492,37}{0,75} - 214,84 \\ &= 441,65 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kebutuhan luas per jarak tulangan geser (A_v/s)

$$\begin{aligned} \frac{A_v}{s} &= \frac{V_s}{f_{ys} \times d} \\ &= \frac{441,65}{420 \times 523} \\ &= 2,01 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

Tulangan geser minimum 1 (A_v/s_{min1})

$$\begin{aligned} \frac{A_v}{s_{min1}} &= 0,062 \times \frac{\sqrt{f'c} \times b}{f_{ys}} \\ &= 0,062 \times \frac{\sqrt{30} \times 450}{420} \\ &= 0,36 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

Tulangan geser minimum 2 (A_v/s_{min2})

$$\begin{aligned} \frac{A_v}{s_{min2}} &= 0,35 \times \frac{b}{f_{ys}} \\ &= 0,35 \times \frac{450}{420} \\ &= 0,38 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

Luas per jarak tulangan geser digunakan ($A_{v_{use}}/s$)

$$\begin{aligned} A_{v_{use}}/s &= \frac{n \times \left(\frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \right)}{s} \\ &= \frac{3 \times \left(\frac{1}{4} \times 3,14 \times 13^2 \right)}{125} \\ &= 3,98 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

Tahanan geser beton (V_c)

$$V_c = \frac{1}{6} \times \sqrt{f'c} \times b \times d$$

$$= \frac{1}{6} \times \sqrt{30} \times 450 \times 523$$

$$= 214,84 \text{ kN}$$

Tahanan geser baja (V_s)

$$V_s = \frac{A_v}{s} \times (f_{yd} \times d)$$

$$= 3,98 \times (420 \times 523)$$

$$= 874,68 \text{ kN}$$

Gaya geser balok (V_u/Φ_v)

$$V_u/\Phi_v = \frac{492,37}{0,75}$$

$$= 656,49 \text{ kN}$$

(Syarat terpenuhi, $\Phi V_c + \Phi V_s > V_u$)

5) Torsi tumpuan balok

Torsi *ultimate* (T_u)

$$T_u = 43,06 \text{ kNm}$$

Tahanan retak torsi 1 (T_{cr1})

$$T_{cr1} = \Phi t \left[\frac{1}{12} \times \sqrt{f'c} \times \left(\frac{ACP^2}{P_{CP}} \right) \right]$$

$$= 0,75 \times \left[\frac{1}{12} \times \sqrt{30} \times \left(\frac{270000^2}{2100} \right) \right]$$

$$= 11,88 \text{ kNm}$$

Tahanan retak torsi 2 (T_{cr2})

$$T_{cr2} = \Phi t \left[0,33 \times \sqrt{f'c} \times \left(\frac{ACP^2}{P_{CP}} \right) \right]$$

$$= 0,75 \times \left[0,33 \times \sqrt{30} \times \left(\frac{270000^2}{2100} \right) \right]$$

$$= 47,06 \text{ kNm}$$

Torsi pakai (T_u) = 43,06 kNm

($T_{cr} < T_u$, maka diperlukan tulangan torsi desain)

6) Pemeriksaan penampang torsi balok

Tegangan geser + torsi (σ_{gt})

$$\sigma_{gt} = \sqrt{\left(\frac{V_u}{b \times d} \right)^2 + \left(\frac{T_u \times P_h}{1,7 \times A_{OH}^2} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{492,37}{450 \times 523} \right)^2 + \left(\frac{43,06 \times 1728}{1,7 \times 180999^2} \right)^2}$$

$$= 2,48 \text{ MPa}$$

Tahanan tegangan geser + torsi beton (σ_{ngt})

$$\begin{aligned}\sigma_{ngt} &= \phi v \left(\frac{Vc}{b \times d} \right) + \frac{2}{3} \times \sqrt{f'c} \\ &= 0,75 \times \left(\frac{214,84}{450 \times 523} \right) + \frac{2}{3} \times \sqrt{30} \\ &= 3,42 \text{ MPa}\end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $\sigma_{gt} < \sigma_{ngt}$, penampang torsi cukup)

7) Kontrol spasi torsi

Jarak tulangan maksimum 1 ($s_{\max 1}$)

$$\begin{aligned}s_{\max 1} &= \frac{P_h}{8} \\ &= \frac{1728}{8} \\ &= 216 \text{ mm}\end{aligned}$$

Jarak tulangan maksimum 2 ($s_{\max 2}$)

$$\begin{aligned}s_{\max 2} &= \frac{D_T}{0,042} \\ &= \frac{16}{0,042} \\ &= 380,95 \text{ mm}\end{aligned}$$

Jarak tulangan maksimum 3 ($s_{\max 3}$)

$$s_{\max 3} = 300 \text{ mm}$$

Jarak tulangan yang digunakan (S_{use})

$$S_{use} = 100 \text{ mm}$$

(Syarat terpenuhi, Cek spasi sudah oke)

8) Kontrol tahanan geser dan torsi

Kebutuhan tulangan torsi (T_n)

$$\begin{aligned}T_n &= \frac{T_u}{\phi_t} \\ &= \frac{43,06}{0,75} \\ &= 57,42 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Kebutuhan luas per jarak tulangan torsi (A_t/s)

$$A_t/s = \frac{T_n}{2 \times A_o \times f_{ys} \times \cot(45^\circ)}$$

$$= \frac{57,42}{2 \times 153849,15 \times 420 \times \cot(45^\circ)}$$

$$= 0,44 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

Kebutuhan luas per jarak tulangan geser (A_v/s)

$$A_v/s = \frac{V_s}{f_y d}$$

$$= \frac{441,65}{420 \times 523}$$

$$= 2,01 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

Kebutuhan tulangan geser dan torsi

$$= \frac{A_v}{s} + 2 \times \frac{A_t}{s}$$

$$= 2,01 + 2 \times 0,44$$

$$= 2,9 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

Luas per jarak tulangan geser digunakan ($A_{v_{use}}/s$)

$$A_{v_{use}}/s = \frac{n \times \left(\frac{1}{4} \times \pi \times D^2\right)}{s}$$

$$= \frac{3 \times \left(\frac{1}{4} \times 3,14 \times 13^2\right)}{125}$$

$$= 3,98 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

(Syarat terpenuhi, untuk cek torsi dan geser sudah oke)

Notasi tulangan sengkang digunakan = 3 D13-100

5. Perhitungan Tulangan Torsi Longitudinal

Perhitungan kebutuhan tulangan torsi longitudinal balok pada subbab ini dievaluasi berdasarkan dua area penempatan, yaitu pada daerah tumpuan dan daerah lapangan. Mengacu pada efektivitas penyusunan laporan, penjabaran tahapan perhitungan secara terperinci hanya diberikan satu kali sebagai contoh acuan, yakni pada tinjauan Tulangan Torsi Longitudinal Tumpuan. Tahapan analisis untuk kebutuhan tulangan torsi longitudinal di daerah lapangan diaplikasikan dengan persamaan matematis yang sama, sehingga rincian perhitungannya tidak dituliskan berulang dan hasil kapasitas akhirnya akan ditabulasikan pada akhir subbab.

a. Tulangan Torsi Longitudinal Tumpuan

1) Kebutuhan tulangan torsi longitudinal

Kebutuhan tulangan torsi longitudinal

$$\begin{aligned}
 &= \frac{A_t}{s} \times P_h \times \frac{f_{ys}}{f_{yd}} \times \cot^2(45^\circ) \\
 &= 0,44 \times 1728 \times \frac{420}{420} \times \cot^2(45^\circ) \\
 &= 767,73 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan torsi longitudinal minimum 1

$$\begin{aligned}
 &= 0,42 \times \sqrt{f'c} \times \frac{A_{CP}}{f_{ys}} - \frac{A_t}{s} \times P_h \times \frac{f_{ys}}{f_y} \\
 &= 0,42 \times \sqrt{30} \times \frac{270000}{420} - 0,44 \times 1728 \times \frac{420}{420} \\
 &= 711,12 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan torsi longitudinal minimum 2

$$\begin{aligned}
 &= 0,42 \times \sqrt{f'c} \times \frac{A_{CP}}{f_{ys}} - 0,175 \times b \times \frac{P_h}{f_{ys}} \times \frac{f_{ys}}{f_y} \\
 &= 0,42 \times \sqrt{30} \times \frac{270000}{420} - 0,175 \times 450 \times \frac{1728}{420} \times \frac{420}{420} \\
 &= 1154,85 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Jumlah tulangan torsi tambahan ($n_{\text{TumpTorsi}}$)

$$n_{\text{TumpTorsi}} = 4 \text{ buah}$$

Tulangan longitudinal perlu untuk lentur (A_s)

$$\begin{aligned}
 A_s &= 2274,39 + 4016,25 \\
 &= 6290,64 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan longitudinal perlu untuk lentur + torsi

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{A_t}{s} \times P_h \times \frac{f_{ys}}{f_{yd}} \times \cot^2(45^\circ) \right) + A_s \\
 &= 767,73 + 6290,64 \\
 &= 7058,37 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan longitudinal lentur terpasang ($A_{s\text{use}}$)

$$\begin{aligned}
 A_{s\text{use}} &= 2454,37 + 5399,61 \\
 &= 7853,98 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tulangan longitudinal torsi terpasang ($A_{s\text{Tuse}}$)

$$\begin{aligned}
 A_{s\text{Tuse}} &= n \times \left(\frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \right) \\
 &= 4 \times \left(\frac{1}{4} \times 3,14 \times 16^2 \right)
 \end{aligned}$$

$$= 804,25 \text{ mm}^2$$

Sisa luas tulangan longitudinal yang dibutuhkan = 0 mm²

(Syarat terpenuhi, torsi terakomodasi)

2) Syarat spasi tulangan longitudinal

Spasi horizontal

$$= \frac{b - (2 \times ts) - (2 \times Ds) - D}{5 - 1}$$

$$= \frac{450 - (2 \times 40) - (2 \times 13) - 25}{4}$$

$$= 79,75 \text{ mm}$$

Spasi vertikal atas

$$= \frac{h}{2} - (\text{Max jarak vertikal})$$

$$= \frac{600}{2} - (115,5 + 50)$$

$$= 134,5 \text{ mm}$$

Spasi vertikal bawah

$$= \frac{h}{2} - (\text{Max jarak vertikal})$$

$$= \frac{600}{2} - (115,5)$$

$$= 184,5 \text{ mm}$$

Spasi vertikal = 234,5 mm

(Syarat terpenuhi, $s < 300 \text{ mm}$)

Notasi tulangan torsi = 2 D16

Berikut ini merupakan tabel rekapitulasi penulangan struktur balok:

Tabel 4.46 Rekapitulasi Penulangan Lentur Balok

Frame	Lebar balok, b (mm)	x	Tinggi balok, h (mm)	Jenis Tulangan	Moment Ultimate (kNm)		Moment Nominal (Mn)=Mu/ob		Tegangan Nominal (Rn) = Mn*10^6/(b*d^2)		As min 1 (mm²) (fc')0.5 / (4 * fy) * b * d SNI 2847-2019 9.6.1.2		As min 2 (mm²) 1.4 / fy * b * d SNI 2847-2019 9.6.1.2		As Hitung (mm²)		As Etabs (mm²)		Tulangan		As Tulangan (mm²)	
					Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
B1	450	x	600	Atas	-682,41	-501,09	-758,23	-556,77	6,11	4,33	770,23	784,17	787,50	801,75	3995,02	2736,57	3844,00	1171,00	9D25	6D25	4417,86	2945,24
				Bawah	423,31	503,97	470,34	559,96	3,66	4,36	784,17	784,17	801,75	801,75	2271,87	2754,08	2720,00	2716,00	6D25	6D25	2945,24	2945,24
B2	400	x	500	Atas	-320,25	-126,82	-355,83	-140,91	4,68	1,85	568,59	568,59	581,33	581,33	2164,36	799,71	2134,00	792,00	6D22	3D22	2280,80	1140,40
				Bawah	252,04	212,39	280,05	235,98	3,68	3,10	568,59	568,59	581,33	581,33	1659,32	1378,40	1703,00	1364,00	5D22	4D22	1900,66	1520,53
B3	500	x	600	Atas	-961,02	-240,25	-1067,79	-266,95	7,81	1,85	852,56	876,19	871,67	895,83	5991,74	1228,76	5373,00	1176,00	13D25	3D25	6381,36	1472,62
				Bawah	480,51	486,96	533,90	541,07	3,70	3,75	876,19	876,19	895,83	895,83	2566,90	2604,63	2446,00	2482,00	6D25	6D25	2945,24	2945,24
BA1	300	x	400	Atas	-62,69	-46,60	-69,66	-51,77	2,04	1,52	330,10	330,10	337,50	337,50	512,81	376,79	508,00	374,00	2D19	2D19	567,06	567,06
				Bawah	38,94	68,39	43,27	75,98	1,27	2,22	330,10	330,10	337,50	337,50	313,24	561,71	335,00	557,00	2D19	2D19	567,06	567,06
BA2	300	x	500	Atas	-276,41	-84,74	-307,13	-94,16	5,86	1,64	408,84	427,91	418,00	437,50	2016,43	530,04	1883,00	527,00	8D19	5D19	2268,23	1417,64
				Bawah	173,89	218,11	193,22	242,35	3,62	4,22	427,91	427,91	437,50	437,50	1180,84	1451,02	1121,00	1441,00	5D19	6D19	1417,64	1701,17
BA3	300	x	450	Atas	-86,14	-62,03	-95,71	-68,93	2,14	1,54	377,54	377,54	386	386	617,46	438,85	611,00	434,00	3D22	3D22	1140,40	1140,40
				Bawah	103,87	149,97	115,41	166,64	2,58	3,73	377,54	377,54	386	386	752,09	1116,51	743,00	434,00	3D22	3D22	1140,40	1140,40
BT	250	x	400	Atas	-138,74	-51,57	-154,15	-57,29	6,06	2,01	260,01	275,08	265,83	281,25	1334,45	421,54	1350,00	645,00	5D19	3D19	1417,64	850,59
				Bawah	113,18	53,82	125,76	59,80	4,94	2,10	260,01	275,08	265,83	281,25	1053,15	440,84	1103,00	696,00	4D19	3D19	1134,11	850,59
RB	450	x	600	Atas	-145,72	-37,51	-161,91	-41,67	1,25	0,32	788,57	788,57	806,25	806,25	735,65	185,78	827,00	827,00	3D19	3D19	850,59	850,59
				Bawah	84,46	90,21	93,84	100,23	0,72	0,77	788,57	788,57	806,25	806,25	421,73	450,92	827,00	827,00	3D19	3D19	850,59	850,59

Tabel 4.47 Rekapitulasi Penulangan Geser Balok

Frame	Lebar balok, b (mm)	x	Tinggi balok, h (mm)	Gaya Geser, Vu (kN)		Av/s Etabs (mm ² /mm)		Spasi Hitung ($A_v \cdot f_y \cdot d$) / ($(V_u / \phi) \cdot (0.17 \cdot (f_c)^{0.5} \cdot b \cdot d)$) (mm)		Spasi Etabs (0.25 * PI) * db ² * n) / (Av/s etabs) (mm)		Spasi max 1 (mm) d / 4 dan d / 2 SNI 2847-2019 18.6.4.4		Spasi max 2 (mm) 6 db SNI 2847-2019 18.6.4.4		Spasi max 3 (mm) 150 mm2 SNI 2847-2019 18.6.4.4		Spasi max 1 (mm) Ph / 8 SNI 2847-2019 9.7.6.3.3		Spasi max 2 (mm) 300 mm SNI 2847-2019 9.7.6.3.3		Spasi Pakai (mm)		Tulangan	
				Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
B1	450	x	600	431,22	370,20	3,18	2,60	255	332	125	153	134	267	150	-	150	-	216,0	216,0	300	300	100	150	(D13+1CTD 13)-100	(D13+1CT D13)-150
B2	400	x	500	306,74	285,06	2,25	1,76	197	223	118	151	109	218	132	-	150	-	178,5	178,5	300	300	100	150	D13-100	D13-150
B3	500	x	600	614,18	590,91	3,32	2,30	209	221	160	231	134	267	150	-	150	-	228,5	228,5	300	300	100	100	(D13+2CTD 10)-100	(D13+2CT D10)-150
BA1	300	x	400	80,70	79,17	0,11	0,09	2823	3334	2518	2920	-	-	-	-	150	-	-	-	300	300	100	150	D13-100	D13-150
BA2	300	x	500	223,81	137,86	0,98	0,35	277	792	271	758	-	-	-	-	150	-	-	-	300	300	100	150	D13-100	D13-150
BA3	300	x	450	117,92	110,85	0,31	0,26	871	1077	843	1035	-	-	-	-	150	-	-	-	300	300	100	150	D13-100	D13-150
BT	250	x	400	100,92	97,47	1,17	0,37	672	732	228	709	-	-	-	-	151	-	-	-	300	300	100	150	D13-100	D13-150
RB	450	x	600	202,72	191,58	1,17	1,10	1329	1983	228	241	-	-	-	-	150	-	-	-	300	300	100	150	D13-100	D13-150

Tabel 4.48 Rekapitulasi Penulangan Torsi Balok Geser

Frame	Lebar balok, b (mm)	x	Tinggi balok, h (mm)	Gaya Aksial, Pu (kN)	Gaya Torsi, Tu (kNm)	Batas aksial lentur, (kN) Agfe'/10 SNI 2847-2019 9.5.2.1	Rasio Batas aksial lentur	ϕ Torsi Beton, ϕ Tcr (kNm) 0.33 * (fc')0.5 * AcP2 / Pcp SNI 2847-2019 Tabel 22.7.5.1	Rasio Torsi	Tahanan Geser Beton, Vc (kN) 0.17 * (fc')0.5 * b * d SNI 2847-2019 22.5.5.1	Tegangan Ultimate Geser+Torsi, Vs+T (Mpa) SNI 2847-2019 22.7.7.1	Kapasitas Tegangan Beton, ϕ Vn (Mpa) SNI 2847-2019 22.7.7.1	Rasio Vc	Spasi Pakai (mm)		Cek Spasi Sengkang		At/s, (mm ² /m m) SNI 2847-2019 22.7.6.1	Av+t/s pasang		Tu<0.25 ϕ Tcr SNI 2847-2019 R22.7.4
														Tump.	Lap.	Tump.	Lap.		Tump.	Lap.	
B1	450	x	600	43,06	58,38	810	0,05	47,53	1,23	223,96	2,32	3,62	aman	100	150	aman	aman	0,49	3,98	3,98	perlu
B2	400	x	500	197,66	2,15	600	0,33	30,43	0,07	162,39	1,76	3,62	aman	100	150	aman	aman	0,03	2,65	2,65	tidak perlu

Frame	Lebar balok, b (mm)	x	Tinggi balok, h (mm)	Gaya Aksial, Pu (kN)	Gaya Torsi, Tu (kNm)	Batas aksial lentur, (kN) Agfc/10 SNI 2847-2019 9.5.2.1	Rasio Batas aksial lentur	φTorsi Beton, φTer (kNm) 0.33 * (fc')0.5 * Acp2 / Pcp SNI 2847-2019 Tabel 22.7.5.1	Rasio Torsi	Tahanan Geser Beton, Vc (kN) 0.17 * (fc')0.5 * b * d SNI 2847-2019 22.5.5.1	Tegangan Ultimate Geser+Torsi, Vs+t (Mpa) SNI 2847-2019 22.7.7.1	Kapasitas Tegangan Beton, φVn (Mpa) SNI 2847-2019 22.7.7.1	Rasio Vc	Spasi Pakai (mm)		Cek Spasi Senggang		At/s, (mm2/m m) SNI 2847-2019 22.7.6.1	Av+t/s pasang		Tu<0.25 φTer SNI 2847-2019 R22.7.4
														Tump.	Lap.	Tump.	Lap.		Tump.	Lap.	
B3	500	x	600	0,00	1,59	900	0,00	56,02	0,03	248,84	2,3	3,62	aman	100	150	aman	aman	0,01	5,31	3,54	tidak perlu
BA1	300	x	400	0,00	2,20	360	0,00	14,08	0,16	94,28	0,86	3,62	aman	100	150	aman	aman	0,06	2,65	1,77	tidak perlu
BA2	300	x	500	0,00	11,28	450	0,00	19,26	0,59	122,21	2,06	3,62	aman	100	150	aman	aman	0,25	2,65	1,77	perlu
BA3	300	x	450	0,00	21,10	405	0,00	16,64	1,27	107,82	2,26	3,62	aman	100	150	aman	aman	0,42	2,65	1,77	perlu
BT	250	x	400	319,47	0,25	300	1,06	7,91	0,03	78,56	1,20	3,62	aman	100	150	aman	aman	0,01	2,65	1,77	tidak perlu
RB	450	x	600	47,28	5,98	810	0,06	47,53	0,13	225,22	0,86	3,62	aman	100	150	aman	aman	0,06	2,65	1,77	tidak perlu

Tabel 4.49 Rekapitulasi Penulangan Torsi Balok Lentur

Frame	Lebar balok, b (mm)	x	Tinggi balok, h (mm)	Jenis Tulangan	As Tulangan (mm²)		As+A1 Tulangan (mm²)		As Tulangan (mm²)		Cek As min < As Tulangan		Tulangan Tengah	
					Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
B1	450	x	600	Longitudinal Atas	3995,02	2736,57	7562,48	6338,1	8167,36	6694,73	aman	aman	4D16	4D16
				Longitudinal Bawah	2720	2754,08								
B2	400	x	500	Longitudinal Atas	2164,36	799,71	4916,89	3227,64	4338,54	2437,88	tidak perlu	tidak perlu	2D10	2D10
				Longitudinal Bawah	1703	1378,40								

4.5.5 Penulangan Struktur Kolom

Perhitungan penulangan struktur kolom menggunakan output as tulangan longitudinal dan tulangan geser yang diperoleh dari hasil Analisa struktur *ETABS*.

1. Data dan Spesifikasi Kolom Beton Bertulang

a. Geometri Kolom

Sisi pendek kolom (b) : 700 mm

Sisi panjang kolom (h) : 700 mm

Tinggi kolom (L) : 4200 mm

b. Geometri Balok

Tinggi balok atas (h_a) : 600 mm

Tinggi balok bawah (h_b) : 600 mm

c. Spesifikasi Material Beton

Kuat tekan beton (f'_c) : 30 MPa

Tegangan leleh baja (tulangan utama) (f_{yu}) : 420 MPa

Tegangan leleh baja (tulangan sengkang) (f_{ys}) : 420 Mpa

Modulus elastisitas baja (E_s) : 200000 MPa

d. Geometri Tulangan

Jumlah tulangan sisi pendek kolom (n_b) : 6 buah

Jumlah tulangan sisi panjang kolom (n_h) : 6 buah

Tebal selimut beton (d_s) : 40 mm

Diameter tulangan utama (D_u) : 25 mm

Diameter tulangan sengkang (D_s) : 13 mm

Jumlah kaki tulangan geser sisi panjang (n_{Tump-x}) : 6 kaki

Jumlah kaki tulangan geser sisi pendek (n_{Tump-y}) : 6 kaki

Jumlah kaki tulangan geser sisi panjang (n_{Lap-x}) : 2 kaki

Jumlah kaki tulangan geser sisi pendek (n_{Lap-y}) : 2 kaki

Spasi sengkang tumpuan (s_{Tump}) : 150 mm

Spasi sengkang lapangan (s_{Lap}) : 150 mm

Jumlah tulangan utama (n) : 20 D25

e. Nilai Faktor Reduksi

Faktor reduksi kuat geser (ϕ_v) : 0,75

f. Jarak Tulangan

Jarak antar tulangan sisi pendek kolom (x_1)

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{b - (2 \times ds) - (2 \times Ds) - Du}{n - 1} \\ &= \frac{700 - (2 \times 40) - (2 \times 13) - 2}{6 - 1} \\ &= 113,8 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jarak antar tulangan sisi panjang kolom (y_1) :

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{h - (2 \times ds) - (2 \times Ds) - D}{n - 1} \\ &= \frac{700 - (2 \times 40) - (2 \times 13) - 2}{6 - 1} \\ &= 113,8 \text{ mm} \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, Jarak tulangan memenuhi syarat)

g. Rasio Tulangan

Luas total penampang tulangan (A_s)

$$\begin{aligned} A_s &= n \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \\ &= 20 \times \frac{3.14}{4} \times 25^2 \\ &= 9817 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas penampang kolom (A_g)

$$\begin{aligned} A_g &= b \times h \\ &= 700 \times 700 \\ &= 490000 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Rasio tulangan (ρ)

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{A_s}{A_g} \\ &= \frac{9817}{490000} \\ &= 2 \% \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, Rasio tulangan $1\% < \rho < 6\%$)

h. Data Pembebanan Aksial, Geser, dan Momen

Tabel 4.50 Data Pembebanan Aksial, Geser dan Momen pada Kolom

No. Load	Pu	Mu-X	Mu-Y	
	(kN)	(kNm)	(kNm)	
Load 1	-2,0	-17,2	-233,8	(Pmax)
Load 2	5235,1	803,4	336,9	(Pmin)
Load 3	2183,8	-953,8	-408,5	
Load 4	5235,1	803,4	336,9	
Load 5	15,8	-397,4	-952,4	
Load 6	4578,3	-51,6	1052,3	

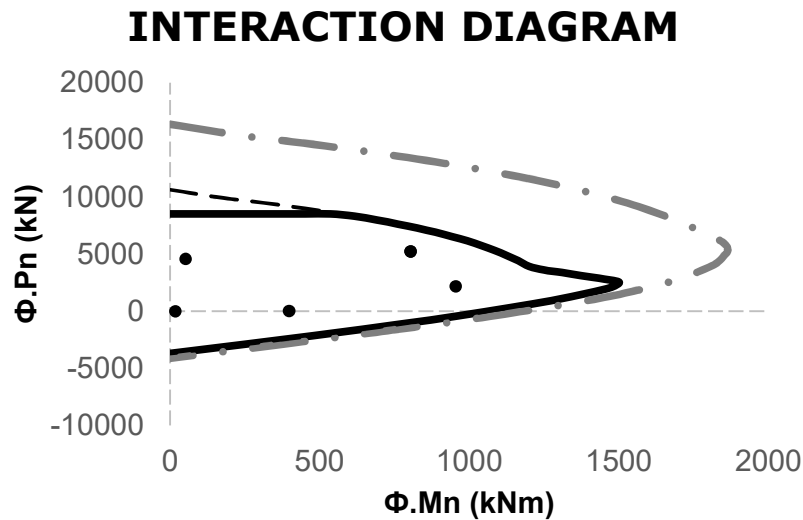
$$V_{uTump-X} = 434,09 \text{ kN}$$

$$V_{uTump-Y} = 435,74 \text{ kN}$$

$$V_{uLap-X} = 434,09 \text{ kN}$$

$$V_{uLap-Y} = 435,74 \text{ kN}$$

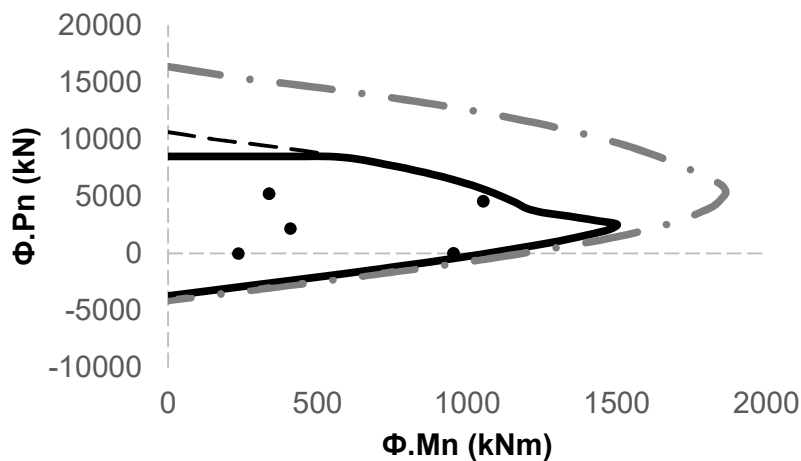
2. Perhitungan Diagram Kapasitas Kolom Beton Bertulang Uniaxial Arah X

**Gambar 4.19** Diagram Kapasitas Aksial Momen Arah X

Tabel 4.51 Kontrol Beban Aksial dan Momen Arah X

Loads	Kontrol Beban Aksial			Kontrol Beban Momen (kNm)				c	ϕ	Overall Status
	Pu	$\phi \times P_n$	Status	Mu	$\phi \times M_n$	Ratio	Status	(mm)		
Load1	-2,00	-3711,01	OK	17,2	1059,80	0,02	OK	125,40	0,90	OK
Load2	5235,10	8511,36	OK	803,4	1092,04	0,74	OK	460,91	0,65	OK
Load3	2183,80	8511,36	OK	953,80	1478,91	0,64	OK	224,13	0,90	OK
Load4	5235,10	8511,36	OK	803,4	1092,04	0,74	OK	460,91	0,65	OK
Load5	15,80	8511,36	OK	397,4	1064,03	0,37	OK	126,06	0,90	OK
Load6	4578,30	8511,36	OK	51,60	1149,74	0,04	OK	420,89	0,65	OK

3. Perhitungan Diagram Kapasitas Kolom Beton Bertulang Uniaxial Arah Y

INTERACTION DIAGRAM**Gambar 4.20** Diagram Kapasitas Aksial Momen Arah Y**Tabel 4.52** Kontrol Beban Aksial dan Momen Arah Y

Loads	Kontrol Beban Aksial			Kontrol Beban Momen (kNm)				c	ϕ	Overall Status
	Pu	$\phi \times P_n$	Status	Mu	$\phi \times M_n$	Ratio	Status	(mm)		
Load1	-2,00	-3711,01	OK	233,8	1059,80	0,22	OK	125,40	0,90	OK
Load2	5235,1	8511,36	OK	336,9	1092,04	0,31	OK	460,91	0,65	OK
Load3	2183,8	8511,36	OK	408,5	1478,91	0,28	OK	224,13	0,90	OK
Load4	5235,1	8511,36	OK	336,9	1092,04	0,31	OK	460,91	0,65	OK
Load5	15,80	8511,36	OK	952,4	1064,03	0,90	OK	126,06	0,90	OK
Load6	4578,3	8511,36	OK	1052,3	1149,74	0,92	OK	420,89	0,65	OK

4. Perhitungan Diagram Kapasitas Kolom Beton Bertulang Biaxial

Nilai momen resultan (M_r)

$$M_r = \sqrt{(M_x^2 + M_y^2)}$$

Perputaran sudut terhadap sumbu Y (α)

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{M_y}{M_x} \right)$$

Tinggi efektif balok dengan perputaran sudut (d_α)

$$d_\alpha = \cos \left(\left(\tan^{-1} \left(\frac{dx}{dy} \right) \right) - \alpha \right) \times \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

Tinggi sumbu netral pada sudut α saat kondisi seimbang (c_b)

$$c_b = \frac{600}{600 + f_y} \times d_\alpha$$

Tinggi ekuivalent penampang terhadap perputaran sudut (h')

$$h' = \sqrt{Lc^2 + Wc^2} \times \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{Lc}{Wc} \right) + \alpha \right)$$

5. Persyaratan Tulangan Longitudinal dan Confinement

a. Syarat Geometri

1) Syarat sisi pendek

Sisi pendek penampang (b) : 700 mm

Syarat sisi pendek harus lebih besar dari 300 mm

(Syarat terpenuhi)

2) Syarat rasio dimensi penampang

Sisi pendek kolom (b) : 700 mm

Syarat rasio dimensi harus lebih besar ($0,4 \times h$)

$$\begin{aligned} 0,4 \times h &= 0,4 \times 700 \\ &= 280 \text{ mm} \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi)

3) Syarat rasio tulangan

Batas atas rasio tulangan (ρ_{Max})

$$\rho_{Max} = 6 \%$$

Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = 2 \%$$

Batas bawah rasio tulangan (ρ_{Min})

$$\rho_{Min} = 1 \%$$

(Syarat terpenuhi, $1\% < \rho < 6\%$)

b. Pemeriksaan Strong Column Weak Beam

1) Momen nominal tumpuan balok

$$\text{Momen nominal tumpuan (-) balok arah Y (M}_{nb\ Y-}) : 504,16 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen nominal tumpuan (+) balok arah Y (M}_{nb\ Y+}) : 820,41 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen nominal tumpuan (-) balok arah X (M}_{nb\ X-}) : 593,88 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen nominal tumpuan (+) balok arah X (M}_{nb\ X+}) : 593,88 \text{ kNm}$$

2) Momen nominal kolom

$$\text{Momen nominal kolom sumbu X (M}_{nk-X}) : 5006,54 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen nominal kolom sumbu Y (M}_{nk-Y}) : 2094,5 \text{ kNm}$$

3) Pemeriksaan SCWB momen arah X kolom

$$\sum M_{nk\ X} > 1,2 M_{nb\ Y\ (-)} + M_{nb\ Y\ (+)}$$

$$\begin{aligned} 2 \times M_{nk-X} &= 2 \times 5006,54 \\ &= 10013,09 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1,2 \times M_{nbY-} + M_{nbY+} &= 1,2 \times (504,16 + 820,41) \\ &= 1589,49 \text{ kNm} \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, SCWB memenuhi)

4) Pemeriksaan SCWB momen arah Y kolom

$$\sum M_{nk\ Y} > 1,2 M_{nb\ X\ (-)} + M_{nb\ X\ (+)}$$

$$\begin{aligned} 2 \times M_{nk-Y} &= 2 \times 2094,5 \\ &= 4189 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1,2 \times M_{nbX-} + M_{nbX+} &= 1,2 \times (593,88 + 593,88) \\ &= 1425,32 \text{ kNm} \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, pemeriksaan SCWB terpenuhi)

c. Syarat Zona Confinement

1) Dimensi kolom sumbu kuat

$$\text{Lebar sisi pendek kolom (Arah Y) (b) : 700 mm}$$

$$\text{Lebar sisi panjang kolom (Arah X) (h) : 700 mm}$$

$$\text{Jarak tulangan terluar (d}_l)$$

$$\begin{aligned}
 d_1 &= b - d_s - D_s - \frac{D_u}{2} \\
 &= 700 - 40 - 13 - \frac{25}{2} \\
 &= 634,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

2) Dimensi kolom sumbu lemah

Lebar sisi pendek kolom (Arah Y) (b) : 700 mm

Lebar sisi panjang kolom (Arah X) (h) : 700 mm

Jarak tulangan terluar (d_1)

$$\begin{aligned}
 d_1 &= b - d_s - D_s - \frac{D_u}{2} \\
 &= 700 - 40 - 13 - \frac{25}{2} \\
 &= 634,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

3) Zona sendi plastis dan tumpuan

Zona sendi plastis 1 (L_{o1})

$$\begin{aligned}
 L_{o1} &= \frac{1}{6} \times L_n \\
 &= \frac{1}{6} \times \left(L - \frac{ha}{2} - \frac{hb}{2} \right) \\
 &= \frac{1}{6} \times \left(4200 - \frac{600}{2} - \frac{600}{2} \right) \\
 &= \frac{1}{6} \times 3600 \\
 &= 600 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Zona sendi plastis 2 (L_{o2})

$$L_{o2} = h = 700 \text{ mm}$$

Zona sendi plastis 3 (L_{o3})

$$L_{o3} = 450 \text{ mm}$$

Spasi sengkang ikat pertama pada tumpuan (S_i)

$$\begin{aligned}
 S_i &= 0,5 \times S_{Max} \text{ terkecil} \\
 &= 0,5 \times 150 \\
 &= 75 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Sengkang ikat pada penampang kolom (S_i tidak boleh $> 2 \times S_{max}$ terkecil)

$$= 2 \times 150$$

$$= 300 \text{ mm}$$

Zona sendi plastis yang digunakan (L_o pakai)

$$L_o \text{ pakai} = 700 \text{ mm}$$

Panjang area tumpuan (L_{Tump})

$$\begin{aligned} L_{Tump} &= \frac{1}{4} \times L_n \\ &= \frac{1}{4} \times 3600 \\ &= 900 \text{ mm} \end{aligned}$$

(Syarat terpenuhi, $L_{Tump} > L_o$)

4) Confinement zona sendi plastis

Luas penampang beton (A_g)

$$\begin{aligned} A_g &= b \times h \\ &= 700 \times 700 \\ &= 490000 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas penampang inti beton (A_{ch})

$$\begin{aligned} A_{ch} &= (b - 2(d_s - D_s)) \times (h - 2(d_s - D_s)) \\ &= (700 - 2 \times 40 - 13) \times (700 - 2 \times 40 - 13) \\ &= 368449 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Faktor keutamaan beton (K_f)

$$\begin{aligned} K_f &= \frac{f'_c}{175} + 0,6 > 1 \\ &= \frac{30}{175} + 0,6 > 1 \\ &= 0,77 > 1 \end{aligned}$$

(Maka digunakan $K_f = 1$)

Faktor keefektifan pengekangan (K_n)

$$\begin{aligned} K_n &= \frac{n}{n-2} \\ &= \frac{20}{20-2} \\ &= 1,11 \end{aligned}$$

5) Sisi panjang beton/sumbu kuat (arah X)

$$\text{Ash/s y (Ash/s use)} = \frac{n_{Tump-X} \times \frac{\pi}{4} \times D_s^2}{s_{Tump} \times (h - 2 \times d_s \times D_s)}$$

$$= \frac{6 \times \frac{3,14}{4} \times 13^2}{150 \times (700 - 2 \times 40 \times 13)}$$

$$= 0,87 \%$$

$$\text{Ash/s min 1} = 0,3 \times \left(\frac{f'c}{f_{yv}} \right) \times \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right)$$

$$= 0,3 \times \left(\frac{30}{420} \right) \times \left(\frac{490000}{368449} - 1 \right)$$

$$= 0,71 \%$$

$$\text{Ash/s min 2} = 0,09 \times \frac{f'c}{f_{yv}}$$

$$= 0,09 \times \frac{30}{420}$$

$$= 0,64 \%$$

$$\text{Ash/s min 3} = 0,2 \times k_f \times k_n \times \frac{P_u}{f_{yv} + A_{ch}}$$

$$= 0,2 \times 1 \times 1,11 \times \frac{5235,1 \times 1000}{420 + 368449}$$

$$= 0,75 \%$$

(Syarat terpenuhi)

6) Sisi pendek beton/sumbu lemah (arah Y)

$$\text{Ash/s y (Ash/s use)} = \frac{n r_{ump} - x \times \frac{\pi}{4} \times D s^2}{s_{Tump} \times (h - 2 \times d s \times D s)}$$

$$= \frac{6 \times \frac{3,14}{4} \times 13^2}{150 \times (700 - 2 \times 40 \times 13)}$$

$$= 0,87 \%$$

$$\text{Ash/s min 1} = 0,3 \times \left(\frac{f'c}{f_{yv}} \right) \times \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right)$$

$$= 0,3 \times \left(\frac{30}{420} \right) \times \left(\frac{490000}{368449} - 1 \right)$$

$$= 0,71 \%$$

$$\text{Ash/s min 2} = 0,09 \times \frac{f'c}{f_{yv}}$$

$$= 0,09 \times \frac{30}{420}$$

$$= 0,64 \%$$

$$\text{Ash/s min 3} = 0,2 \times k_f \times k_n \times \frac{P_u}{f_{yv} + A_{ch}}$$

$$= 0,2 \times 1 \times 1,11 \times \frac{5235,1 \times 1000}{420 + 36844}$$

$$= 0,75 \%$$

(Syarat terpenuhi)

6. Perhitungan Tulangan Geser/Transversal

Tabel 4.53 Rekapitulasi Rasio Kapasitas Penampang Kolom

Loads	Ratio			Pu	Mux	Muy	Pn	Mnx	Mny
	X	Y	Biaxial						
Load1	0,01	0,16	0,16	-2	17.2	233.8	-4638,76	104,44	1419,60
Load2	0,45	0,29	0,53	5235,1	803.4	336.9	9047,39	1509,64	633,06
Load3	0,52	0,25	0,58	2183,8	953.8	408.5	9047,39	1652,90	707,91
Load4	0,45	0,29	0,53	5235,1	803.4	336.9	9047,39	1509,64	633,06
Load5	0,28	0,74	0,79	15,8	397.4	952.4	9047,39	501,90	120285
Load6	0,03	0,86	0,86	4578,3	51.6	1052.3	9047,39	59,95	1222,52

Perhitungan kebutuhan penulangan geser atau transversal kolom pada subbab ini ditinjau berdasarkan kondisi penampang di daerah tumpuan dan lapangan, yang masing-masing dievaluasi terhadap gaya geser pada sumbu kuat (arah X) maupun sumbu lemah (arah Y). Untuk efisiensi penyusunan laporan tanpa mengurangi substansi analisis, penjabaran langkah perhitungan secara terperinci hanya ditampilkan satu kali sebagai contoh representatif, yakni pada tinjauan Tulangan Geser Tumpuan Sumbu Kuat (Arah X). Adapun evaluasi kapasitas geser untuk sumbu lemah (arah Y) maupun penampang di daerah lapangan dilakukan dengan prosedur matematis yang sama persis, sehingga rincian perhitungannya tidak dituliskan berulang dan hasil akhirnya akan langsung dirangkum pada tabel rekapitulasi penulangan kolom.

a. Tulangan Geser Tumpuan

1) Gaya Geser Tumpuan Kolom

Momen probable X kolom Ketika 1,25 fy (M_{pr-X})

M_{pr-X} = Nilai maksimum Mnx

$$= 1652,9 \text{ kNm}$$

Momen probable Y kolom Ketika 1,25 fy (M_{pr-Y})

M_{pr-Y} = Nilai maksimum Mny

$$= 1419,6 \text{ kNm}$$

Gaya geser probable X kolom (V_{pr-X})

$$\begin{aligned}
 V_{pr-X} &= 2 \times \frac{M_{pr-Y}}{L_n} \\
 &= 2 \times \frac{1419,6}{\frac{3600}{1000}} \\
 &= 788,67 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Gaya geser probable Y kolom (V_{pr-Y})

$$\begin{aligned}
 V_{pr-Y} &= 2 \times \frac{M_{pr-X}}{L_n} \\
 &= 2 \times \frac{1652,9}{\frac{3600}{1000}} \\
 &= 918,28 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Gaya geser sumbu kuat ($V_{uTump-X}$) : 434,09 kN

Gaya geser sumbu lemah ($V_{uTump-Y}$) : 435,74 kN

Gaya geser ultimate sumbu kuat (V_{ux}) : 788,67 kN

Gaya geser ultimate sumbu lemah (V_{uy}) : 918,28 kN

Gaya geser rencana sumbu kuat (V_{ux}/ϕ)

$$\begin{aligned}
 \frac{V_{ux}}{\phi} &= \frac{788,67}{0,75} \\
 &= 1051,56 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Gaya geser rencana sumbu lemah (V_{uy}/ϕ)

$$\begin{aligned}
 \frac{V_{uy}}{\phi} &= \frac{918,28}{0,75} \\
 &= 1224,37 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Tahanan geser beton sumbu kuat (V_{cx})

$$\begin{aligned}
 V_{cx} &= 0,17 \times \left(1 + \frac{Nu}{14 \times Ag}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'c} \times h \times d1 \\
 &= 0,17 \times \left(1 + \frac{5629,8}{14 \times 490000}\right) \times 1 \times \sqrt{30} \times 700 \times 634,5 \\
 &= 729,16 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Tahanan geser beton sumbu lemah (V_{cy})

$$\begin{aligned}
 V_{cy} &= 0,17 \times \left(1 + \frac{Nu}{14 \times Ag}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'c} \times b \times d1 \\
 &= 0,17 \times \left(1 + \frac{5629,8}{14 \times 490000}\right) \times 1 \times \sqrt{30} \times 700 \times 634,5 \\
 &= 729,16 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Setengah kapasitas geser beton sumbu kuat ($1/2 V_{cx}$)

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \times V_{cx} &= \frac{1}{2} \times 729,16 \\ &= 364,58 \text{ kN}\end{aligned}$$

Setengah kapasitas geser beton sumbu lemah ($1/2 V_{cy}$)

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \times V_{cy} &= \frac{1}{2} \times 729,16 \\ &= 364,58 \text{ kN}\end{aligned}$$

($V_u > \phi V_c$; diperlukan tulangan geser arah X)

($V_u > \phi V_c$; diperlukan tulangan geser arah Y)

2) Dimensi Tulangan Geser Sumbu Kuat Arah X

Kontrol Spasi

Jika $f'_c > 70 \text{ Mpa}$ atau $P_u > 0,3 \times A_g \times f'_c$, maka ikat silang harus mengikat semua tulangan longitudinal.

Jarak antar kaki sengkang (H_x)

$$\begin{aligned}H_x &= \frac{b - (2 \times ds) - (2 \times Ds) - Du}{n - 1} \\ &= \frac{700 - (2 \times 40) - (2 \times 13) - 2}{6 - 1} \\ &= 113,8 \text{ mm}\end{aligned}$$

Batas jarak antar kaki sengkang ($H_{x\text{Max}}$)

$$P_u > 0,3 \times A_g \times f'_c$$

$$5489,3 > 0,3 \times 490000 \times 30$$

$$5489,3 > 4410 \text{ (Maka } H_{x\text{Max}} = 200 \text{ mm)}$$

$$H_{x\text{Max}} = 200 \text{ mm}$$

Spasi maksimum 1 (S_{max1})

$$\begin{aligned}S_{\text{max1}} &= \frac{b}{4} \\ &= \frac{700}{4} \\ &= 175 \text{ mm}\end{aligned}$$

Spasi maksimum 2 (S_{max2})

$$\begin{aligned}S_{\text{max2}} &= 100 + \frac{(350 - H)}{3} \\ &= 100 + \frac{(350 - 113,8)}{3} \\ &= 178,73 \text{ (Maka digunakan } S_{\text{max2}} = 150 \text{ mm)}\end{aligned}$$

Spasi maksimum 3 ($S_{\max 3}$)

$$\begin{aligned} S_{\max 3} &= 6 \times Du \\ &= 6 \times 25 \\ &= 150 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jarak tulangan geser yang digunakan (S_{use})

$$S_{\text{use}} = 150 \text{ mm}$$

(Syarah terpenuhi, cek spasi sudah oke)

Kontrol Tahanan Geser

Tahanan geser perlu terbesar sumbu kuat (V_{sx})

$$\begin{aligned} V_{sx} &= \frac{V_{ux}}{\phi} - V_{cx} \\ &= \frac{788,67}{0,75} - 729,16 \\ &= 322,39 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Av/s &= \frac{V_{sx}}{f_{ys} \times d_1} \\ &= \frac{322,39}{420 \times 634,5} \\ &= 1,21 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Av/s_{2 \text{ min}} &= 0,062 \times \sqrt{f'c} \times \frac{h}{f_{ys}} \\ &= 0,062 \times \sqrt{30} \times \frac{700}{420} \\ &= 0,57 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Av/s_{3 \text{ min}} &= 0,35 \times \frac{h}{f_{ys}} \\ &= 0,35 \times \frac{700}{420} \\ &= 0,58 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

Jumlah kaki geser tumpuan ($n_{\text{Tump-X}}$) : 6 kaki

Luas tulangan terpasang (Av/s_{use})

$$\begin{aligned} Av/s_{\text{use}} &= \frac{n_{\text{Tump-X}} \times \frac{1}{4} \times \pi \times D_s^2}{s_{\text{use}}} \\ &= \frac{6 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 13^2}{150} \\ &= 5,31 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

Luas tulangan perlu ($Av/s_{\max}$) : 1,21 mm²

(Syarat terpenuhi, $A_v/s_{use} > A_v/s_{max}$)

Tahanan geser beton (V_{cx})

$$\begin{aligned} V_{cx} &= 0,17 \times \left(1 + \frac{Nu}{14 \times Ag} \right) \times \lambda \times \sqrt{f'c} \times h \times d1 \\ &= 0,17 \times \left(1 + \frac{5629,8}{14 \times 490000} \right) \times 1 \times \sqrt{30} \times 700 \times 634,5 \\ &= 729,16 \text{ kN} \end{aligned}$$

Tahanan geser tulangan ($V_{Sterpasang}$)

$$\begin{aligned} V_{Sterpasang} &= \left(\frac{Av}{s} \right)_{use} \times f_{ys} \times d \\ &= 5,31 \times 420 \times 634,5 \\ &= 1414,87 \text{ kN} \end{aligned}$$

Gaya geser kolom (V_{ux}/ϕ) : 1051,56 kN

(Syarat terpenuhi, $\phi V_c + \phi V_s > V_u$)

Tulangan digunakan 6 D13-150

Berikut ini merupakan rekapitulasi perhitungan penulangan struktur kolom.

Tabel 4.54 Rekapitulasi Penulangan Lentur Kolom

Frame	Panjang kolom, b (mm)	x	lebar kolom, h (mm)	Tekan Ultimate, Pu (kN)	As Etabs (mm ²)	As Perlu	Tulangan	As Tulangan (mm ²)	Momen tahanan kolom, Mnc (kNm)		Momen tahanan balok, Mnb Tumpuan (kNm)		Momen tahanan balok, Mnb Lapangan (kNm)		Cek ρmin dan ρmax 1% < ρ < 6% SNI 2847-2019 18.7.4.1	Syarat Geometri b > 300 mm dan b/h > 0.4 SNI 2847-2019 18.7.2.1	SCWB 2 * Mnc >= 1.2 * (Mnb- + Mnb+) SNI 2847-2019 18.7.3.2	
									x	y	-	+	-	+			x	y
K1	700	x	700	5235,10	4900	9817	20D25	9817,48	5006,54	2094,50	504,16	820,41	593,88	593,88	aman	aman	aman	aman
K2	500	x	500	2573,00	2500	7602,65	20D22	7602,65	555,11	304,72	355,83	280,05	140,91	235,98	aman	aman	aman	aman

Tabel 4.55 Rekapitulasi Penulangan Geser Kolom

Frame	Panjang kolom, b (mm)	x	lebar kolom, h (mm)	Luas Efektif Penampang, Ach (mm ²)	Av/s Hitung (mm ² /mm)		Spasi max 1 (mm) b / 4 SNI 2847-2019 18.7.5.3	Spasi max 2 (mm) 6 db SNI 2847-2019 18.7.5.3	Spasi max 3 (mm) 100 <= 100 + (350 - ix) / 3 <= 150 SNI 2847-2019 18.7.5.3	Av/s Pakai (mm ² /mm)		Cek Av/s < 1 (aman)		Cek Spasi		Tulangan	
					Tump.	Lap.				Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
K1	700	x	700	384400	0,63	0,63	175	150	150	5,31	1,77	0,12	0,35	aman	aman	(D13+4CTD13)-150	D13-150
K2	500	x	500	176400	-1,11	-1,11	125	132	150	6,37	2,04	0,07	0,20	aman	aman	(D13+4CTD13)-125	D13-130

4.6 Perhitungan Penulangan Struktur Bawah

4.6.1 Perencanaan *Borepile*

Proses perhitungan penulangan untuk struktur *borepile* dan *pilecap* ini dilakukan dengan memanfaatkan output luasan tulangan (A_s) longitudinal dan geser yang dihasilkan dari analisis struktur menggunakan *ETABS*.

1. Data Tanah

Kegiatan penyelidikan tanah dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanik tanah di lokasi proyek pembangunan gedung baru di Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Penyelidikan lapangan dilaksanakan pada bulan Oktober 2025 yang meliputi pengujian pemboran inti (*core drilling*) sebanyak 2 titik (BH-01 dan BH-02) sedalam 30 meter dengan uji *Standard Penetration Test* (SPT) setiap interval 2 meter, serta pengujian sondir (*Dutch Cone Penetration Test*) sebanyak 2 titik (S-1 dan S-2) sedalam 8 meter. Pengujian laboratorium dilakukan terhadap sampel tanah tak terganggu dan terganggu meliputi kadar air, berat jenis, distribusi ukuran butir, dan uji geser langsung. Posisi titik penyelidikan lapangan ditunjukkan pada gambar berikut dibawah ini.



Gambar 4.21 Lokasi Titik Pekerjaan Penyelidikan Tanah

Sumber: Data Laporan Penyelidikan Tanah (2025)



Gambar 4.22 Dokumentasi Uji Bor

Sumber: Data Laporan Penyelidikan Tanah (2025)



Gambar 4.23 Dokumentasi Uji Sondir

Sumber: Data Laporan Penyelidikan Tanah (2025)

Adapun rincian data hasil pengujian secara komprehensif dapat dilihat pada Lampiran Penyelidikan Tanah.

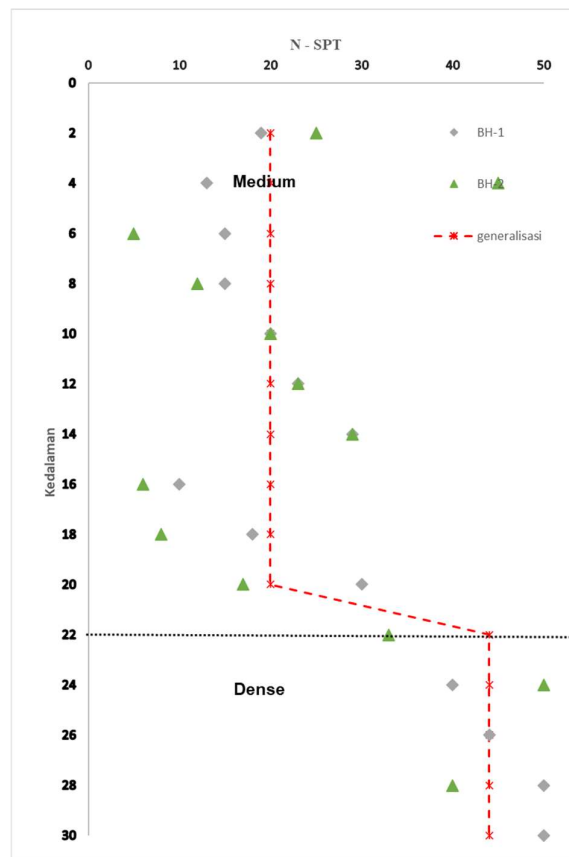
2. Analisis Data Tanah

Berikut merupakan hasil analisa klasifikasi data tanah.

Tabel 4.56 Hasil Analisa Klasifikasi Tanah

Depth (m)	BH-1		Depth (m)	BH-2	
	N-SPT	Keterangan		N-SPT	Keterangan
2	19	<i>Sand Medium</i>	2	25	<i>Sand Medium</i>

Depth (m)	BH-1		Depth (m)	BH-2	
	N-SPT	Keterangan		N-SPT	Keterangan
4	13		4	45	Sand Dense
6	15		6	5	Sand Loose
8	15		8	12	Sand Medium
10	20		10	20	
12	23		12	23	
14	29		14	29	
16	10		16	6	Sand Loose
18	18		18	8	
20	30	Clayey Sand Dense	20	17	Sand Medium
22	60	Sand Very Dense	22	33	Sand Dense
24	40	Sand Dense	24	50	
26	44		26	51	Sand Very Dense
28	50		28	40	Sand Dense
30	50		30	51	Sand Very Dense



Gambar 4.24 Variasi N-SPT Terhadap Kedalaman Tanah

Klasifikasi tanah didasarkan pada korelasi nilai N-SPT terhadap konsistensi tanah non-kohefif (*cohesionless soil*). Profil pelapisan tanah dari kedua titik bor menunjukkan dominasi tanah pasir dengan variasi kepadatan sebagai berikut:

a. Titik bor 1 (BH-1)

1) Kedalaman 2-18 m

Pada kedalaman ini, tanah didominasi oleh lapisan pasir dengan kepadatan sedang (*Sand Medium*), dengan rentang nilai N-SPT 10 hingga 29.

2) Kedalaman 20 m

Pada kedalaman ini, terdapat sisipan lapisan pasir kelepungan padat (*Clayey Sand Dense*) dengan nilai N-SPT 30.

3) Kedalaman 22 m

Pada kedalaman ini, ditemukan lapisan pasir sangat padat (*Sand Very Dense*) dengan nilai N-SPT melonjak hingga 60.

4) Kedalaman 24-30 m

Pada kedalaman ini, lapisan berupa pasir padat (*Sand Dense*) dengan nilai N-SPT yang stabil di angka 40 hingga 50.

b. Titik bor 2 (BH-2)

1) Kedalaman 2-18 m

Pada kedalaman ini, stratigrafi tanah sangat bervariasi. Diawali dengan pasir sedang (N=25) di 2 m, menyisip pasir padat (N=45) di 4 m, lalu turun drastis menjadi pasir lepas (*Sand Loose*) di 6 m (N=5). Kedalaman 8 m – 14 m kembali menjadi pasir sedang (N=12–29), namun melemah kembali menjadi pasir lepas pada kedalaman 16 m – 18 m (N=6–8).

2) Kedalaman 20-24 m

Pada kedalaman ini, kepadatan tanah mulai meningkat dari pasir sedang (N=17) menjadi pasir padat (N=33 hingga 50).

3) Kedalaman 26-30 m

Kedalaman ini merupakan lapisan tanah pendukung yang sangat baik, berselang-seling antara pasir sangat padat (N=51) di kedalaman 26 m dan 30 m, serta pasir padat (N=40) di kedalaman 28 m.

Selanjutnya, analisa data tanah dilengkapi menggunakan tabel dari Bowles, 1984 sebagai berikut.

Tabel 4.57 Klasifikasi Data Tanah Berdasarkan Data N-SPT

<i>Cohesionless Soil/Sol Pulvérulent</i>					
N (<i>blows</i>)	0 - 3	4 - 10	11 - 30	31 - 50	>50
γ (kN/m ³)	-	12 - 16	14 - 18	16 - 20	18 - 23
ϕ (°)	-	25 - 32	28 - 36	30 - 40	>35
State	<i>Very Loose</i>	<i>Loose</i>	<i>Medium</i>	<i>Dense</i>	<i>Very Dense</i>
Dr (%)	0 - 15	15 - 35	35 - 65	65 - 85	85 - 100
<i>Cohesive Soil/Sol Cohérent</i>					
N (<i>blows</i>)	<4	4 - 6	6 - 15	16 - 25	>25
γ (kN/m ³)	14 - 18	16 - 18	16 - 20	6 - 15	>20
qu (kPa)	<25	20 - 50	30 - 60	40 - 200	>100
Consistency	<i>Very Soft</i>	<i>Soft</i>	<i>Medium</i>	<i>Stiff</i>	<i>Hard</i>

Sumber: Bowles (1984)

Meninjau hasil uji penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium, selanjutnya menentukan parameter data tanah untuk desain perencanaan lebih lanjut. Berikut ini merupakan hasil parameter data tanah.

Tabel 4.58 Parameter Data Tanah

Depth (m)	Ketebalan (m)	Keterangan	N avg	e	γ_{SAT} (t/m ²)	γ_{dry} (t/m ³)	γ_{unsat} (t/m ³)	C' (t/m ²)	E (KPa)	v (nu)	ϕ' (°)
0-22	22	<i>Medium Sand</i>	20	0,77	1,8	1,3	1,55	1,3	20000	0,2	29,5
22-30	8	<i>Dense Sand</i>	44	0,86	1,95	1,5	1,73	1,6	62500	0,2	31,5

3. Analisa Daya Dukung Fondasi

Perhitungan daya dukung aksial fondasi dilakukan menggunakan metode OCDI 2020. Berdasarkan data tanah yang diperoleh dari hasil uji lapangan, nilai N-SPT yang digunakan dalam analisis ini tidak memerlukan koreksi nilai N (langsung menggunakan data lapangan), sesuai dengan prosedur perhitungan yang ditetapkan dalam metode tersebut.

Metode OCDI 2020 membedakan pendekatan perhitungan daya dukung berdasarkan jenis tanah (pasir dan lempung). Analisis ini direncanakan menggunakan fondasi jenis *borepile* dengan diameter 80 cm. Persamaan umum yang digunakan untuk menghitung daya dukung ultimit (Q_{ult}) adalah sebagai berikut:

a. Tanah Pasir

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s$$

$$Q_{ult} = 300 \times N \times A_p + 2 \times N_p \times A_s$$

b. Tanah Lempung

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s$$

$$Q_{ult} = 6 \times C_p \times A_p + C_a \times A_s$$

Keterangan:

Q_{ult} = Daya dukung ultimit fondasi

Q_p = Daya dukung ujung fondasi

Q_s = Daya dukung selimut fondasi

N = Nilai N-SPT tanah di sekitar ujung bawah tiang

N_p = Rata-rata nilai N dari seluruh panjang penetrasi bawah

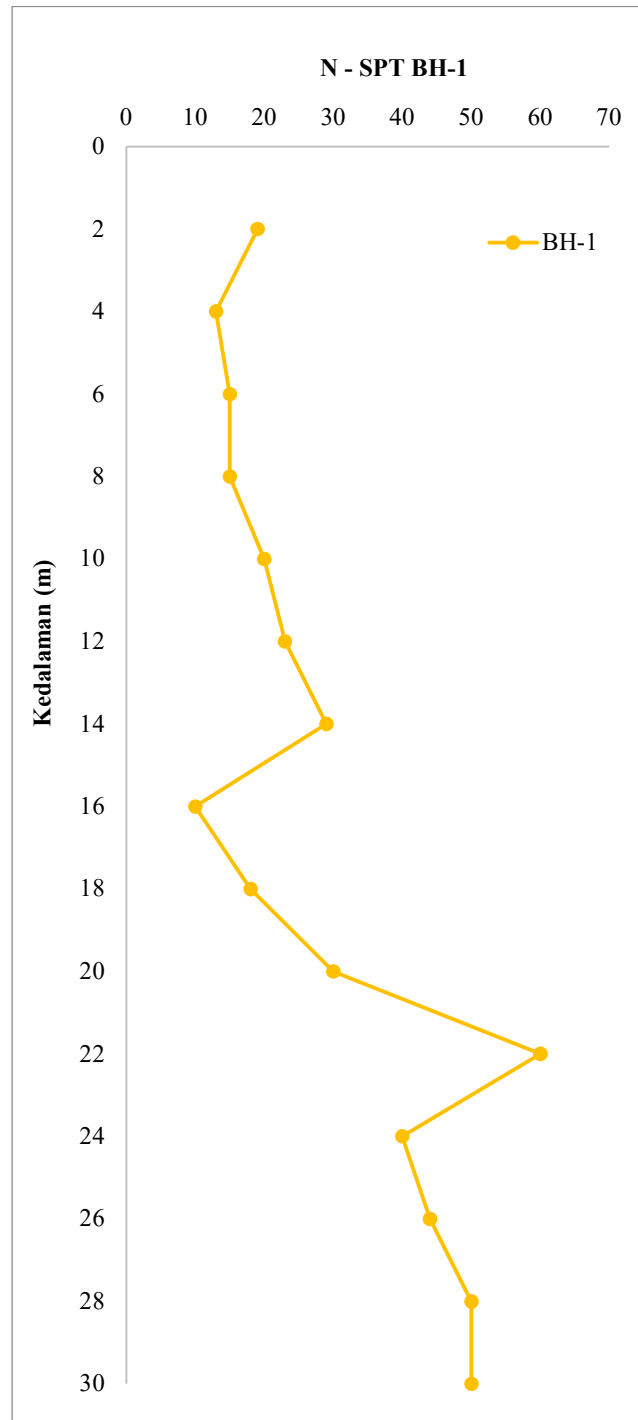
A_p = Luas penampang ujung bawah tiang

A_s = Luas selimut tiang

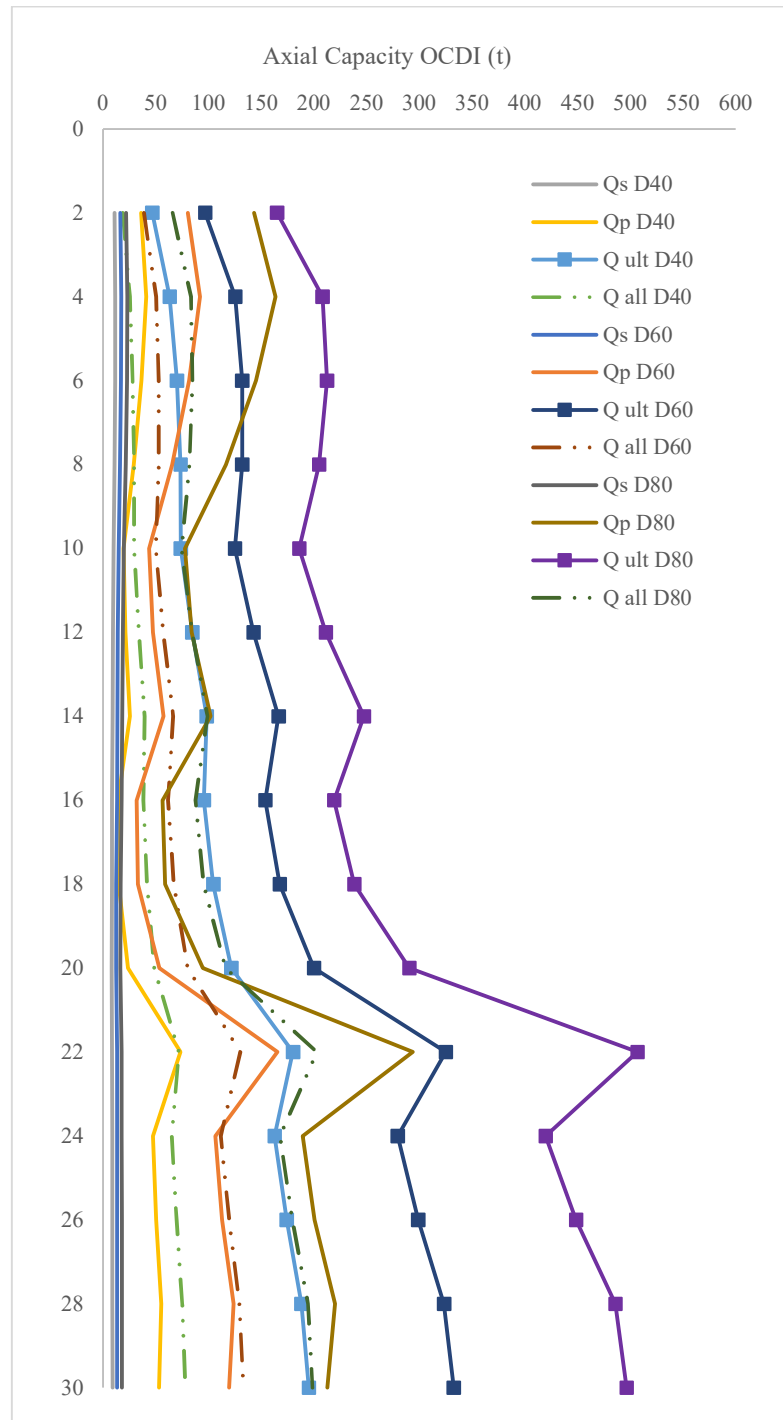
C_p = Kohesi di ujung tiang

C_a = Adhesi rata-rata sepanjang tiang tertanam

Daya dukung tiang dihitung menggunakan *borepile* diameter 80 cm. Berikut adalah grafik daya dukung masing-masing titik bor.



Gambar 4.25 Data N-SPT BH1



Gambar 4.26 Kapasitas Aksial *Borepile*

Tabel 4.59 Rekapitulasi Daya Dukung *Borepile* BH-1 D40

BOREPILE				
BH-1 (D40)				
Depth (m)	Luciano Decourt			
	Qs (ton)	Qp (ton)	Qult (ton)	Q allowable SF = 2,5 (ton)
2	10,8	35,8	46,6	18,6
4	11,5	40,8	63,1	25,3
6	11,3	36,2	69,8	27,9
8	10,7	29,1	73,4	29,4
10	9,9	19,4	73,6	29,4
12	9,4	21,0	84,5	33,8
14	9,2	25,5	98,2	39,3
16	8,7	14,1	95,5	38,2
18	8,3	14,7	104,4	41,7
20	8,2	23,7	121,5	48,6
22	8,7	73,4	179,9	72,0
24	8,7	47,3	162,5	65,0
26	8,8	50,1	174,2	69,7
28	8,9	55,0	187,9	75,2
30	9,0	53,1	195,1	78,0

Tabel 4.60 Rekapitulasi Daya Dukung *Borepile* BH-1 D60

BOREPILE				
BH-1 (D60)				
Depth (m)	Luciano Decourt			
	Qs (ton)	Qp (ton)	Qult (ton)	Q allowable SF = 2,5 (ton)
2	16,2	80,6	96,8	38,7
4	17,2	91,9	125,3	50,1
6	16,9	81,6	131,9	52,8
8	16,1	65,4	131,9	52,8
10	14,8	43,7	125,0	50,0
12	14,0	47,2	142,5	57,0
14	13,8	57,3	166,4	66,6
16	13,0	31,8	153,8	61,5
18	12,4	33,1	167,6	67,0

BOREPILE				
BH-1 (D60)				
Depth (m)	Luciano Decourt			
	Qs (ton)	Qp (ton)	Qult (ton)	Q allowable SF = 2,5 (ton)
20	12,3	53,3	200,1	80,0
22	13,0	165,2	325,0	130,0
24	13,1	106,3	279,2	111,7
26	13,2	112,8	298,8	119,5
28	13,4	123,7	323,1	129,2
30	13,5	119,6	332,5	133,0

Tabel 4.61 Rekapitulasi Daya Dukung *Borepile* BH-1 D80

BOREPILE				
BH-1 (D80)				
Depth (m)	Luciano Decourt			
	Qs (ton)	Qp (ton)	Qult (ton)	Q allowable SF = 2,5 (ton)
2	21,6	143,3	164,9	65,9
4	23,0	163,4	207,9	83,2
6	22,6	145,0	212,2	84,9
8	21,4	116,4	205,0	82,0
10	19,7	77,7	186,1	74,4
12	18,7	84,0	211,0	84,4
14	18,4	101,9	247,4	98,9
16	17,3	56,5	219,2	87,7
18	16,5	58,9	238,2	95,3
20	16,4	94,8	290,5	116,2
22	17,4	293,6	506,7	202,7
24	17,4	189,0	419,5	167,8
26	17,6	200,5	448,6	179,4
28	17,8	219,9	485,8	194,3
30	18,0	212,6	496,4	198,6

Tabel 4.62 Rekapitulasi Daya Dukung *Borepile* BH-2 D40

BOREPILE				
BH-2 (D40)				
Depth (m)	Luciano Decourt			
	Qs (ton)	Qp (ton)	Qult (ton)	Q allowable SF = 2,5 (ton)
2	13,8	47,1	60,9	24,4
4	18,8	84,8	117,5	47,0
6	14,1	12,1	58,8	23,5
8	12,4	23,3	82,4	33,0
10	11,2	19,4	89,8	35,9
12	10,5	21,0	101,8	40,7
14	10,1	25,5	116,5	46,6
16	9,3	8,5	108,8	43,5
18	8,7	10,9	119,9	48,0
20	8,4	13,4	130,8	52,3
22	8,3	40,4	166,1	66,4
24	8,5	59,1	193,3	77,3
26	8,7	58,1	201,1	80,4
28	8,7	44,0	195,7	78,3
30	8,8	54,2	214,7	85,9

Tabel 4.63 Rekapitulasi Daya Dukung *Borepile* BH-2 D60

BOREPILE				
BH-2 (D60)				
Depth (m)	Luciano Decourt			
	Qs (ton)	Qp (ton)	Qult (ton)	Q allowable SF = 2,5 (ton)
2	18,4	90,5	108,9	43,6
4	43,6	97,8	141,4	56,6
6	70,3	117,8	188,1	75,2
8	98,3	148,9	247,2	98,9
10	131,3	387,8	519,1	207,6
12	165,6	447,3	612,9	245,2
14	202,0	428,2	630,2	252,1
16	239,8	359,0	598,8	239,5
18	275,8	112,6	388,4	155,4

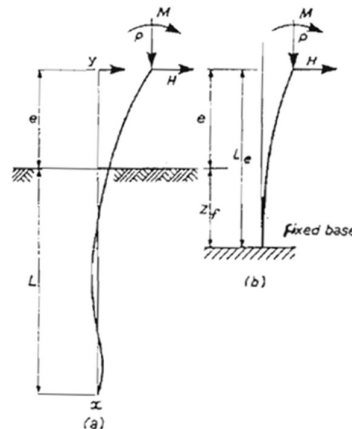
BOREPILE				
BH-2 (D60)				
Depth (m)	Luciano Decourt			
	Qs (ton)	Qp (ton)	Qult (ton)	Q allowable SF = 2,5 (ton)
20	310,3	74,3	384,6	153,8
22	343,6	70,7	414,4	165,7
24	375,8	74,4	450,2	180,1
26	407,3	75,6	482,9	193,2
28	438,2	81,4	519,6	207,8
30	468,5	80,2	548,7	219,5

Tabel 4.64 Rekapitulasi Daya Dukung *Borepile* BH-2 D80

BOREPILE				
BH-2 (D80)				
Depth (m)	Luciano Decourt			
	Qs (ton)	Qp (ton)	Qult (ton)	Q allowable SF = 2,5 (ton)
2	27,6	188,5	216,1	86,5
4	97,8	339,3	404,6	161,9
6	117,8	48,3	141,8	56,7
8	148,9	93,1	211,4	84,5
10	387,8	77,7	218,4	87,4
12	447,3	84,0	245,7	98,3
14	428,2	101,9	283,9	113,6
16	359,0	33,9	234,5	93,8
18	112,6	43,6	261,7	104,7
20	74,3	53,7	288,5	115,4
22	70,7	161,5	412,9	165,2
24	74,4	236,3	504,8	201,9
26	75,6	232,4	518,4	207,3
28	81,4	176,0	479,4	191,8
30	80,2	216,8	537,9	215,2

4. Aspek Material dan Letak Titik Jepit Fondasi

Letak titik jepit tanah terhadap tiang fondasi (Z_f) dihitung dengan perumusan sebagai berikut pada **Gambar 4.17**.



Gambar 4.27 *Partly Embedded Pile and Equivalent Fixed Base Pile or Column*

5. Analisa Fondasi Berdasarkan Beban Kerja Struktur Atas

a. Data Beban

1) Kombinasi ASD Gravitasi

Tabel 4.65 Kombinasi ASD Gravitasi

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
max	36,4817	219,87	3845,7	257,079	90,046	8,7663

2) Kombinasi Gempa Nominal

Tabel 4.66 Kombinasi Gempa Nominal

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
max	271,583	299,36	4029,6	640,584	730,57	25,4457

3) Kombinasi Gempa Kuat

Tabel 4.67 Kombinasi Gempa Kuat

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
max	600,114	428,1	4651,2	1221,28	1626,3	50,0079

b. Rencana Jumlah Tiang

Diameter pile (D) = 80 cm

Kedalaman (H) = 24 m

Angka Keamanan (SF) = 2,5

$$\text{Daya Dukung Ultimate (Q}_{ult}\text{)} = 419,5 \text{ ton}$$

$$\text{Kuat Tekan Izin (P}_{izin}\text{)} = 167,8 \text{ ton}$$

$$\text{Kuat Tekan Izin Material (P}_{izin \text{ material}}\text{)} = - \text{ ton}$$

$$\text{Gaya Neg. Skin Friction (P}_{neg. \text{ Skin friction}}\text{)} = 0 \text{ ton}$$

Jumlah pile (n)

$$\begin{aligned} n &= \frac{P}{P_{izin}} \\ &= \frac{497,07}{167,8} \\ &= 2,962 \sim 4 \text{ buah} \end{aligned}$$

c. Data Beban Poer

$$\text{Jarak fondasi tepi – sisi luar beton } (\alpha) = 0,6$$

Dimensi (p x l x t)

$$= 3,2 \times 3,2 \times 1,3 \text{ m}$$

$$= 13,312 \text{ m}^3$$

$$\text{Berat (W)} = \text{Dimensi} \times \text{berat jenis}$$

$$W = 13,312 \times 24$$

$$= 319,488 \text{ kN}$$

$$= 31,9488 \text{ ton}$$

d. Data Pile

$$\text{Diameter (D)} = 80 \text{ cm}$$

$$\text{Keliling (K)} = \pi \times D$$

$$= \frac{22}{7} \times 80$$

$$= 251,3 \text{ cm}$$

$$\text{Luas (A)} = \frac{\pi}{4} \times D^2$$

$$= \frac{\pi}{4} \times 80^2$$

$$= 5026,55 \text{ cm}^2$$

$$\text{Jarak Antar Tiang (S)} = 2,5 \times D$$

$$= 2,5 \times 80$$

$$= 200 \text{ cm}$$

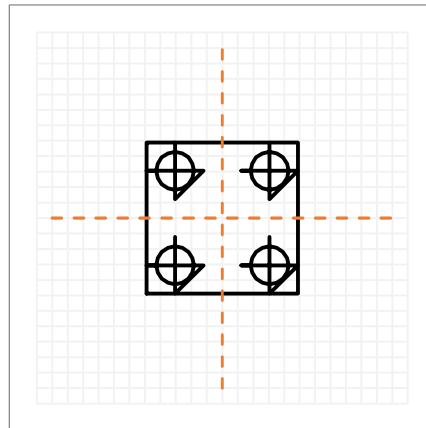
Konfigurasi Tiang

$$\begin{aligned}
 S_x &= \frac{S}{100} \\
 &= \frac{200}{100} \\
 &= 2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_y &= \frac{S}{100} \\
 &= \frac{200}{100} \\
 &= 2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.68 Konfigurasi Tiang *Borepile*

No	Jumlah	x	nx^2
1	2	-1	2
2	2	1	2
Total	4		4
No	Jumlah	y	ny^2
1	2	-1	2
2	2	1	2
Total	4		4



Gambar 4.28 Sketsa Penentuan Jumlah Tiang

$$n_x \text{ per baris} = 2 \text{ buah}$$

$$n_y \text{ per baris} = 2 \text{ buah}$$

$$\text{Jumlah tiang 1 poer} = 4 \text{ buah}$$

$$X \text{ max} = 100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$$

$$Y \text{ max} = 100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$$

e. Perhitungan *Pile*

1) Kombinasi ASD Gravitasi

Gaya tekan kombinasi ASD gravitasi

$$\begin{aligned}\sum P &= F_z + W \\ &= 384,57 + 31,9488 \\ &= 416,52 \text{ ton}\end{aligned}$$

Kuat tekan maksimal 1 tiang

$$\begin{aligned}p_{\max} &= \frac{\sum P}{n} + \frac{M_x \times y_i}{y^2} + \frac{M_y \times x_i}{x^2} \\ &= \frac{416,5}{4} + \frac{26 \times 1}{4} + \frac{9 \times 1}{4} \\ &= 104,1 + 6,427 + 2,251 \\ &= 112,8072 \text{ ton}\end{aligned}$$

Kuat tekan minimal 1 tiang

$$\begin{aligned}p_{\min} &= \frac{\sum P}{n} + \frac{M_x \times y_i}{y^2} + \frac{M_y \times x_i}{x^2} \\ &= \frac{416,5}{4} + \frac{26 \times -1}{4} + \frac{9 \times -1}{4} \\ &= 104,1 + (-5,427) + (-2,251) \\ &= 95,45095 \text{ ton}\end{aligned}$$

2) Kombinasi ASD Gempa Nominal

Gaya tekan kombinasi ASD gempa nominal

$$\begin{aligned}\sum P &= F_z + W \\ &= 402,96 + 31,9488 \\ &= 434,91 \text{ ton}\end{aligned}$$

Kuat tekan maksimal 1 tiang

$$\begin{aligned}p_{\max} &= \frac{\sum P}{n} + \frac{M_x \times y_i}{y^2} + \frac{M_y \times x_i}{x^2} \\ &= \frac{434,9}{4} + \frac{64 \times 1}{4} + \frac{73,1 \times 1}{4} \\ &= 108,7 + 16,015 + 18,264 \\ &= 143,0056 \text{ ton}\end{aligned}$$

Kuat tekan minimal 1 tiang

$$\begin{aligned}p_{\min} &= \frac{\sum P}{n} + \frac{M_x \times y_i}{y^2} + \frac{M_y \times x_i}{x^2} \\ &= \frac{434,9}{4} + \frac{64 \times -1}{4} + \frac{73,1 \times -1}{4} \\ &= 108,7 + (-16,015) + (-18,264)\end{aligned}$$

$$= 74,44802 \text{ ton}$$

3) Kombinasi ASD Gempa Kuat

Gaya tekan kombinasi ASD gempa kuat

$$\begin{aligned}\sum P &= F_z + W \\ &= 465,12 + 31,9488 \\ &= 497,07 \text{ ton}\end{aligned}$$

Kuat tekan maksimal 1 tiang

$$\begin{aligned}p_{\max} &= \frac{\sum P}{n} + \frac{M_x \times y_i}{y^2} + \frac{M_y \times x_i}{x^2} \\ &= \frac{497,1}{4} + \frac{122 \times 1}{4} + \frac{163 \times 1}{4} \\ &= 124,3 + 30,532 + 40,657 \\ &= 195,4556 \text{ ton}\end{aligned}$$

Kuat tekan minimal 1 tiang

$$\begin{aligned}p_{\min} &= \frac{\sum P}{n} + \frac{M_x \times y_i}{y^2} + \frac{M_y \times x_i}{x^2} \\ &= \frac{497,1}{4} + \frac{122 \times -1}{4} + \frac{163 \times -1}{4} \\ &= 124,3 + (-30,532) + (-40,657) \\ &= 53,07848 \text{ ton}\end{aligned}$$

$$\text{SF gravitasi} = 2,5$$

$$\text{SF gempa nominal} = 1,92$$

$$\text{SF gempa kuat} = 1,6$$

$$P \text{ izin tekan} = 167,8 \text{ ton}$$

Tabel 4.69 Rekapitulasi Daya Dukung Fondasi

Kombinasi	P max (ton)	Faktor P izin	P izin tekan (ton)	Cek P tekan
ASD Gravitasi	112,81	100%	167,8	OKE
ASD Gempa Nominal	143,01	130%	218,14	OKE
ASD Gempa Kuat	195,46	156%	261,77	OKE

f. Efisiensi Tiang Grup

$$\begin{aligned}\Theta &= \arctan\left(\frac{D}{S}\right) \\ &= \arctan\left(\frac{80}{200}\right) \\ &= \arctan(0,4)\end{aligned}$$

$$= 21,80141$$

Efisiensi converse labare (η)

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \theta \left(\frac{(n-1) \times m + (m-1) \times n}{90 \times m \times n} \right) \\ &= 1 - 21,8 \left(\frac{(2-1) \times 2 + (2-1) \times 2}{90 \times 2 \times 2} \right) \\ &= 1 - 0,2422 \\ &= 0,757762\end{aligned}$$

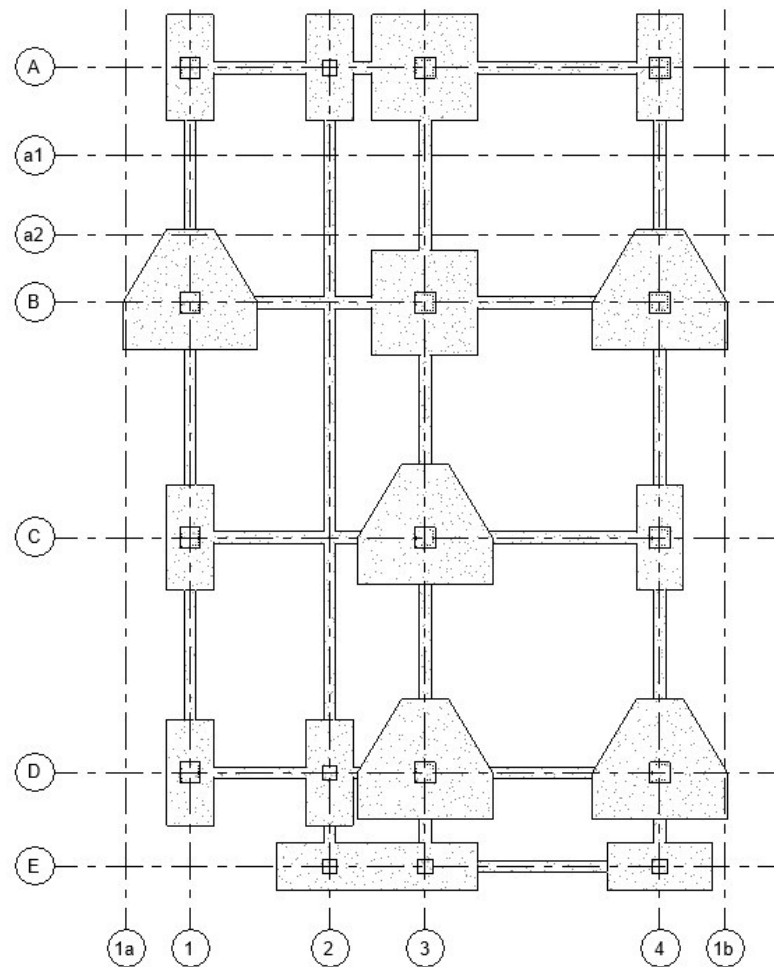
$$P_{\text{izin grup}} = P_{\text{izin 1 tiang}} \times \eta \times n$$

$$P_{\text{max grup}} = P_{\text{max 1 tiang}} \times n$$

Tabel 4.70 Rekapitulasi Daya Dukung Fondasi Grup

Kombinasi	$P_{\text{max grup}}$ (ton)	Faktor P_{izin}	P_{izin} tekan (ton)	Cek P_{tekan}
ASD Gravitasi	451,23	100%	508,61	OKE
ASD Gempa Nominal	572,02	130%	661,19	OKE
ASD Gempa Kuat	781,82	156%	793,43	OKE

Sehingga didapatkan *layout* fondasi rencana. Berikut adalah *layout* kebutuhan fondasi rencana dengan kedalaman yang dibagi berdasarkan area.



Gambar 4.29 *Layout Kebutuhan Fondasi Rencana*

6. Penulangan Tiang *Borepile*

a. Geometri Tiang dan Material

Diameter tiang (D)	= 800 mm
Selimut beton bersih (cc)	= 50 mm
Mutu beton (f'_c)	= 30 MPa
Mutu baja tulangan longitudinal (f_y)	= 420 MPa
Mutu baja tulangan transversal (f_{yt})	= 420 MPa
Diameter agregat maksimal (d_{agg})	= 40 mm

b. Konfigurasi Tulangan

Diameter tulangan longitudinal (d_b)	= 19 mm
--	---------

Diameter tulangan transversal (d_s)	= 13 mm
Jumlah tulangan longitudinal (n)	= 9 buah
Spasi sengkang zona tumpuan (s_o)	= 100 mm
Spasi sengkang luar zona tumpuan (s_m)	= 200 mm

c. Gaya Dalam Terfaktor

Tabel 4.71 Gaya Dalam Terfaktor pada *Borepile*

	P (kN)	M (kNm)
P-max (Aksial Tekan Maks)	2002	1
P-min (Aksial Tarik/Min)	-178,3	28
M-max (Momen Maks)	1044,2	222,5

ϕM_n dihitung otomatis berdasarkan diagram interaksi (*fiber discretization Hognestad parabolic*)

Gaya geser terfaktor (V_u) = 162,3087 kN

d. Desain Tulangan Longitudinal

1) Cek rasio tulangan (ρ)

Luas 1 batang tulangan (A_b)

$$\begin{aligned}
 A_b &= \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 19^2 \\
 &= 283,53 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Luas total tulangan longitudinal (A_s)

$$\begin{aligned}
 A_s &= n \times A_b \\
 &= 9 \times 283,53 \\
 &= 2551,76 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Luas penampang tiang (A_g)

$$\begin{aligned}
 A_g &= \frac{\pi}{4} \times D^2 \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 800^2 \\
 &= 502,655 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Rasio tulangan (ρ)

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{A_s}{A_g} \\
 &= \frac{2551,76}{502,655} \\
 &= 0,508\%
 \end{aligned}$$

Rasio minimum ($\rho_{\min}$)

$$\rho_{\min} = 0,5 \% \text{ (ACI 18.13.7.5.1)}$$

Rasio maksimum ($\rho_{\max}$)

$$\rho_{\min} = 6 \% \text{ (ACI 21.6.3.1)}$$

$$\text{Cek } 0,508\% \geq 0,5 \% \text{ (Oke)}$$

2) Cek spasi bersih antar tulangan

Diameter pitch tulangan (D_p)

$$\begin{aligned} D_p &= D - (2 \times cc) - (2 \times ds) - db \\ &= 800 - (2 \times 50) - (2 \times 13) - 19 \\ &= 655 \text{ mm} \end{aligned}$$

Spasi bersih aktual (s')

$$\begin{aligned} s' &= D_p \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) - db \\ &= 655 \sin\left(\frac{\pi}{9}\right) - 19 \\ &= 205 \text{ mm} \end{aligned}$$

Spasi bersih minimal ($s'_{\min}$)

$$\begin{aligned} s'_{\min} &= \text{nilai maksimum (25; db; } d_{\text{agg}}/2) \\ &= 25 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Cek } 205 \text{ mm} \geq 25 \text{ mm (Oke)}$$

3) Kapasitas aksial murni

Aksial nominal maksimum (P_o)

$$\begin{aligned} P_o &= 0,85 \times f'c \times (A_g - A_s) + f_y \times A_s \\ &= 0,85 \times 30 \times (502,655 - 2551,76) + 420 \times 2551,76/1000 \\ &= 13,824 \text{ kN} \end{aligned}$$

Aksial maksimum tertahan ($P_n \text{ max}$)

$$\begin{aligned} P_n \text{ max} &= 0,8 \times P_o \\ &= 0,8 \times 13,824 \\ &= 11,059 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi P_n \text{ max} &= 0,65 \times P_n \text{ max} \\ &= 0,65 \times 11,059 \\ &= 7,189 \text{ kN} \end{aligned}$$

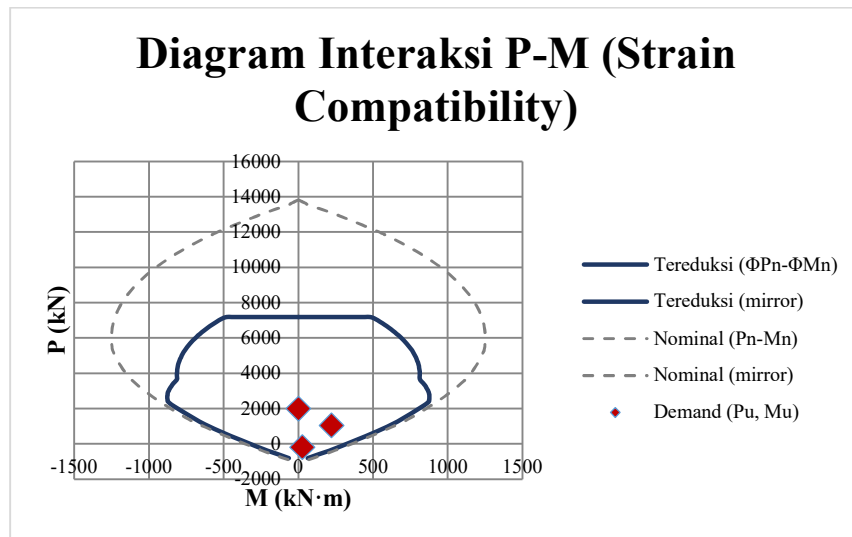
$$\begin{aligned}
 \phi T_n \text{ (tarik)} &= -0,9 \times f_y \times A_s \\
 &= -0,9 \times 420 \times 2551,76 \\
 &= -964,56 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

4) Cek interaksi aksial-lentur (P-M)-Strain Compatibility

Tabel 4.72 Interaksi Aksial Lentur

Kondisi	Pu (kN)	Mu (kNm)	ϕM_n (kNm)	Mu/ ϕM_n	Status
P-max	2002	1	808,7	0,12 %	Oke
P-min	-178,3	28	270,1	10,35 %	Oke
M-max	1044,2	222,5	608,5	36,57 %	Oke

Diagram interaksi aksial-momen (Strain Compatibility)



Gambar 4.30 Diagram Interaksi P-M (*Strain Compatibility*)

e. Desain Tulangan Transversal

1) Cek kapasitas geser

Tinggi efektif (d)

$$\begin{aligned}
 d &= D - cc - ds - \frac{db}{2} \\
 &= 800 - 50 - 13 - \frac{19}{2} \\
 &= 727,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Faktor beton (λ)

$$\lambda = 1 + \left(\frac{Nu}{14 \times Ag} \right)$$

$$= 1 + \left(\frac{178}{14 \times 502,655} \right)$$

$$= 1$$

Geser nominal beton (V_c)

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times D \times d \\ &= 0,17 \times 1 \times \sqrt{30} \times 800 \times 727,5 \\ &= 541,92 \text{ kN} \end{aligned}$$

Sengkang 2 kaki (A_v)

$$\begin{aligned} A_v &= 2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times d_s^2 \right) \\ &= 2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 13^2 \right) \\ &= 265,46 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Geser nominal sengkang (V_s)

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{A_v \times f_{yt} \times d}{s_o} \\ &= \frac{265,46 \times 420 \times 727,5}{100} \\ &= 811,13 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\Phi \text{ Geser } (\Phi_v) = 0,75 \text{ (ACI 21.2.1)}$$

$$\begin{aligned} \Phi V_n &= \Phi v \times (V_c + V_s) \\ &= 0,75 \times (541,92 + 811,13) \\ &= 1014,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{Cek } 1014,8 \text{ kN} \geq 162,3 \text{ kN (Oke)}$$

2) Detail sengkang

Lo min (L_o)

$$\begin{aligned} L_o &= \text{maks } (3D; 600) \\ &= 3 \times 800 \\ &= 2400 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$ds_{\min} = 13 \text{ mm}$$

$$\text{Cek } ds: 13 \text{ mm} \geq 13 \text{ mm (Oke)}$$

$$\begin{aligned} s_o \text{ max} &= \min (D/4; 6db; 100 \leq 100 + (350 - h_s)/3 \leq 150) \\ &= 114 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Cek } s_o: 100 \text{ mm} \leq 114 \text{ mm (Oke)}$$

$$\begin{aligned} sm \text{ max} &= \min (12db; 300; D/2) \\ &= 228 \text{ mm} \end{aligned}$$

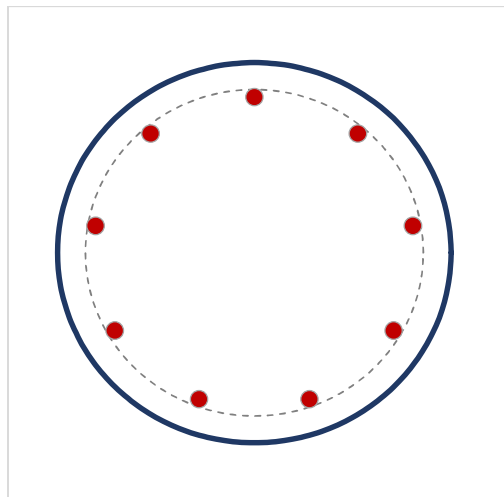
Cek sm: $200 \text{ mm} \leq 228 \text{ mm}$ (Oke)

$$\begin{aligned} \rho_s \text{ min} &= \frac{0,06 \times f'c}{f_y t} \\ &= \frac{0,06 \times 30}{420} \\ &= 0,429 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_s \text{ aktual} &= \frac{4 \times A_{sp}}{D_c \times s_o} \\ &= \frac{4 \times \frac{\pi}{4} \times ds^2}{(D - 2 \times cc - ds) \times s_o} \\ &= \frac{4 \times \frac{\pi}{4} \times 19^2}{(800 - 2 \times 50 - 19) \times 100} \\ &= 0,773 \% \end{aligned}$$

Cek ρ_s : $0,773 \% \geq 0,429 \%$ (Oke)

f. Detail Desain dan Sketsa *Cross-Section*



Gambar 4.31 Sketsa *Cross-Section Borepile* PC1

Keterangan:

Diameter (D) = 800 mm

Jumlah tulangan = 9 buah

Diameter tulangan = D19

Rasio (ρ) = 0,508 %

Sengkang Lo	= D13-100
Sengkang luar Lo	= D13-200
Lo min	= 2400 mm
Selimut beton	= 50 mm

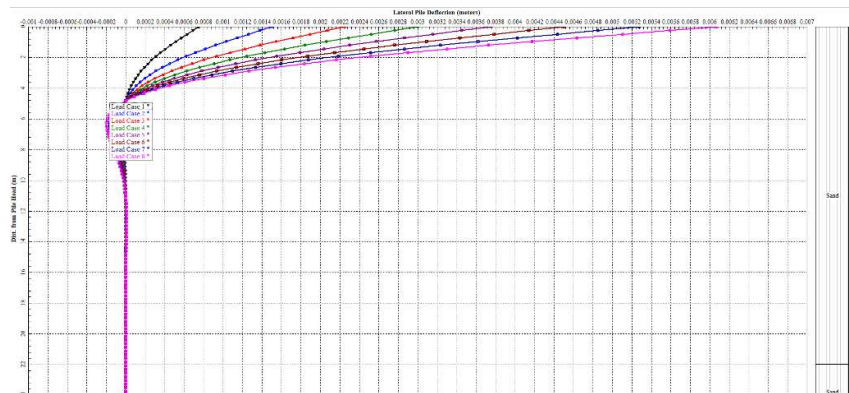
Sehingga didapatkan layout fondasi rencana. Berikut adalah *layout* kebutuhan fondasi rencana dengan kedalaman yang dibagi berdasarkan area.

Berikut tabel rekapitulasi kebutuhan fondasi.

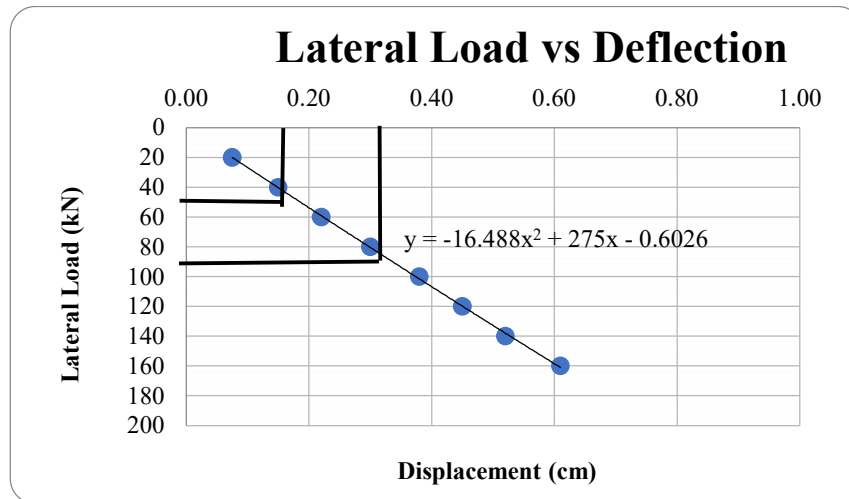
7. Kapasitas Lateral Fondasi

Estimasi kapasitas lateral tiang sesuai dengan besar deformasi lateral izin kepala tiang. Besar deformasi lateral izin tiang adalah 6 mm untuk service dan 12 mm untuk gempa kuat.

Dengan berbagai beban lateral sehingga didapatkan defleksi dari masing masing beban lateral seperti pada gambar berikut di bawah ini.



Gambar 4.32 Defleksi Berbagai Beban Lateral



Gambar 4.33 Grafik Kapasitas Lateral

Diperoleh kapasitas lateral gempa nominal adalah 158,462 kN dan gempa kuat 305,655 kN. Berikut adalah nilai gaya horizontal (geser dasar) kombinasi service dan gempa kuat.

Tabel 4.73 *Base Shear* Kombinasi Gempa Nominal

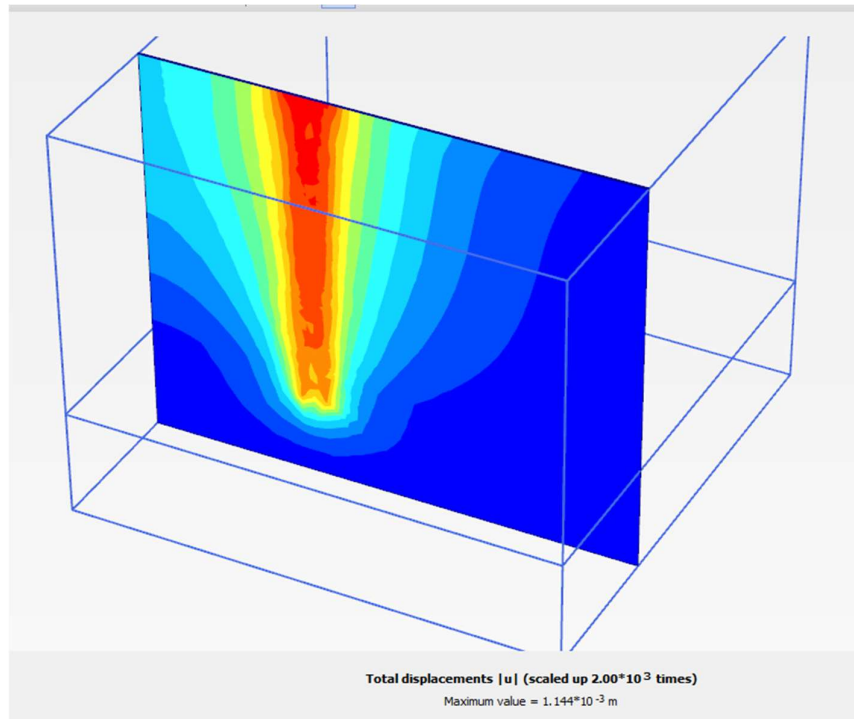
V gempa nominal (kN)	Jumlah Pile (buah)	V izin gempa nominal 1 tiang (kN)	V izin gempa nominal (kN)	Cek
5182,5176	43	158,462	6813,854	OK

Tabel 4.74 *Base Shear* Kombinasi Gempa Kuat

V gempa kuat (kN)	Jumlah Pile (buah)	V izin gempa kuat 1 tiang (kN)	V izin gempa kuat (kN)	Cek
11321,34	43	305,655	13143,151	OK

8. *Settlement* Fondasi

Analisa penurunan pondasi tiang grup menggunakan *software Plaxis 3D* dengan parameter tanah pada **Tabel 4.49** Analisa pemampatan meliputi pemampatan segera dikarenakan tanah dasar merupakan tanah pasir.



Gambar 4.34 Analisa Pemampatan Fondasi

Berikut merupakan tabel rekapitulasi penulangan *borepile*:

Tabel 4.75 Rekapitulasi Penulangan *Borepile*

Tipe	Mutu Baja Tulangan (Mpa)	Tulangan Longitudinal	Rasio (%)	Selimit Beton (mm)	Senggang Lo	Senggang Luar Lo	Lo min (m)
Borepile PC 1	420	9D19	0,51	75	D13-100	D13-200	2,4
Borepile PC 2	420	9D19	0,51	75	D13-100	D13-200	2,4
Borepile PC 3	420	15D19	0,85	75	D13-100	D13-200	2,4

4.6.2 Perencanaan Tulangan *Pile Cap*

Desain penulangan *pile cap* didasarkan pada data *output* dari perangkat lunak *CSI SAFE*, yang kemudian dianalisis lebih lanjut melalui perhitungan menggunakan *Microsoft Excel*.

1. Output *CSI SAFE***Tabel 4.76** *Output Gaya Dalam CSI SAFE*

	Fx	Fy	Fgravitasi	Mx	My	Mz
	kN	kN	kN	kNm	kNm	kNm
FX MAX	-860,525	-243,235	6544,355	-1789,27	-2337,94	-71,2056
FX MIN	818,5749	641,733	-1950,26	1340,258	2237,999	56,8869
FY MAX	-468,455	-546,721	5579,446	-1581,43	-1691,74	-61,7449
FY MIN	818,5749	641,733	-1950,26	1340,258	2237,999	56,8869
FZ MAX	-860,525	-243,235	6544,355	-1789,27	-2337,94	-71,2056
FZ MIN	818,5749	641,733	-1950,26	1340,258	2237,999	56,8869
MX MAX	-860,525	-243,235	6544,355	-1789,27	-2337,94	-71,2056
MX MIN	467,054	441,1546	1713,142	1724,727	1671,628	65,633
MY MAX	-860,525	-243,235	6544,355	-1789,27	-2337,94	-71,2056
MY MIN	818,5749	641,733	-1950,26	1340,258	2237,999	56,8869
MZ MAX	-860,525	-243,235	6544,355	-1789,27	-2337,94	-71,2056
MZ MIN	467,054	441,1546	1713,142	1724,727	1671,628	65,633

2. *Point Spring*

$$F'_c = 30 \text{ MPa}$$

$$E = 4700 \times \sqrt{30}$$

$$= 25742,96 \text{ MPa}$$

$$D \text{ pile} = 800 \text{ mm}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \times D^2$$

$$= \frac{\pi}{4} \times 800^2$$

$$= 502655 \text{ mm}^2$$

$$L \text{ Pile} = 24000 \text{ mm}$$

$$EA/L = E \times \frac{A}{L}$$

$$= 25742,96 \times \frac{502655}{24000}$$

$$= 539159 \text{ kN/m}$$

$$EA/L \text{ L Pile} = 391233,63 \text{ kN/m}$$

Dipakai 391233,63 kN/m

3. Data Material

$$F'_c = 30 \text{ MPa}$$

$$F_y = 420 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}
 E_c &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\
 &= 4700 \times \sqrt{30} \\
 &= 25742,96 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

4. Data Geometri

$$\begin{aligned}
 h &= 1400 \text{ mm} \\
 \text{Cover (c)} &= 75 \text{ mm} \\
 d &= h - \text{cover} \\
 &= 1400 - 75 \\
 &= 1325 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

5. Tulangan Bawah

$$\begin{aligned}
 \text{Mu (per m lari)} &= 840,88 \text{ kNm/m} \\
 d_b &= 25 \text{ mm} \\
 s &= 200 \text{ mm} \\
 A_s &= \left(\frac{1000}{200} \right) \times \frac{\pi}{4} \times 25^2 \\
 &= 2454,37 \text{ mm}^2/\text{m} \\
 A_{s \text{ min}} &= 0,18\% \times 1000 \times d \\
 &= 0,18\% \times 1000 \times 1325 \\
 &= 2385 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

Cek $A_s > A_{s \text{ min}}$ (Syarat memenuhi)

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_s \times f_y}{(0,85 \times f'_c \times b)} \\
 &= \frac{2454,37 \times 420}{(0,85 \times 30 \times 1000)} \\
 &= 40,42 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\phi = 0,9$$

$$\begin{aligned}
 \phi \text{ Mn} &= \phi \times A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \\
 &= 0,9 \times 2454,37 \times 420 \times \left(1325 - \frac{40,42}{2} \right) \\
 &= 1210,52 \text{ kNm/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Capacity Ratio} &= \frac{Mu}{\phi Mn} \\
 &= \frac{840,88}{1210,52} \\
 &= 0,695
 \end{aligned}$$

Cek *capacity ratio* < 1 (Syarat memenuhi)

Berikut merupakan rekapitulasi kebutuhan *pilecap* dan tiang fondasi.

Tabel 4.77 Rekapitulasi Kebutuhan *Pilecap* dan Tiang Fondasi

Tipe Pilecap	Mutu Beton (MPa)	Jumlah Titik	Dimensi Borepile (m)	Jumlah Tiang	Jarak Antar Tiang (m)	Jarak Tiang Terluar Ke Sisi Pilecap (m)	Dimensi Pilecap (m)
PC 1	30	2	0,8	4	2	0,8	3.6 x 3.6 x 1.4
PC 2	30	5	0,8	3	3	0,8	4.6 x 4.1 x 1.4
PC 3	30	10	0,8	2	2	0,8	3.6 x 1.6 x 1.4
Total Jumlah Pilecap							17
Total Jumlah Tiang							43

Berikut merupakan rekapitulasi penulangan *pilecap*.

Tabel 4.78 Rekapitulasi Penulangan *Pilecap*

Tipe	Mutu Baja Tulangan (MPa)	Tulangan Bawah	Tulangan Atas
PC 1	420	D25-200	D25-100
PC 2	420	D25-150	D25-150
PC 3	420	D25-150	D25-150

4.6.3 Pemeriksaan Penurunan Tanah Menggunakan Plaxis 3D

Respons regangan vertikal tanah ditampilkan oleh Plaxis dalam bentuk kontur pergerakan arah sumbu Z (Uz). Berdasarkan hasil *running* pembebanan pada titik fondasi kritis, diperoleh nilai penurunan total maksimum (S_{terjadi}) sebesar 1,14 mm.

Nilai penurunan maksimum ini kemudian dikontrol terhadap persyaratan SNI 8460:2017 (Persyaratan Perancangan Geoteknik). Evaluasi keamanan desain ditinjau melalui dua kriteria:

1. Kontrol Penurunan Total Maksimum

Berdasarkan SNI 8460:2017, batas izin penurunan total maksimum (S_{izin}) dirumuskan sesuai dengan rumus (2.56).

$$\begin{aligned}
 S_{\max \text{izin}} &= 15 \text{ cm} + \frac{b}{600} \\
 &= 150 \text{ mm} + \frac{3600}{600} \\
 &= 156 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Melihat nilai S_{terjadi} yang hanya sebesar 1,14 mm, nilai tersebut sangat jauh berada di bawah ambang batas toleransi (yang nilai minimumnya saja sudah melebihi 150 mm. Oleh karena itu, syarat penurunan total dinyatakan aman

2. Kontrol Penurunan Beda (*Differential Settlement*)

Batas izin untuk beda penurunan antar titik fondasi menurut standar dirumuskan sesuai dengan rumus (2.57).

$$\begin{aligned}
 \Delta S_{\text{izin}} &= \frac{L_n}{300} \\
 &= \frac{7300}{300} \\
 &= 24,33 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Karena pemodelan Plaxis 3D dilakukan pada satu titik fondasi kritis, besaran beda penurunan aktual antar kolom tidak diekstrak secara langsung. Namun, secara teoritis, nilai beda penurunan (ΔS) antar dua titik tidak akan pernah lebih besar dari nilai penurunan total maksimumnya ($S_{\max}$).

Mengingat penurunan total maksimum yang terjadi sangat kecil (hanya 1,14 mm), maka dapat dipastikan bahwa nilai beda penurunannya pun akan berada di bawah 1,14 mm. Nilai ini sangat aman dan memenuhi persyaratan ΔS , sehingga desain fondasi pada proyek ini dapat disimpulkan sangat kaku, stabil, dan terhindar dari risiko retak struktural akibat pergerakan tanah dasar.

4.6.4 Perencanaan *Tie Beam*

Perencanaan struktur *tie beam* menggunakan *output* beda penurunan (*differential settlement*) yang diperoleh dari hasil analisa menggunakan *software* Plaxis.

1. Data Material dan Penampang

a. Geometri *tie beam*

$$\text{Panjang bersih tie beam (} L_n \text{)} = 7300 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar tie beam (} b \text{)} = 400 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi tie beam (h)} = 450 \text{ mm}$$

$$\text{Selimut beton (Cc)} = 50 \text{ mm}$$

b. Material *tie beam*

$$\text{Kuat tekan beton (f'c)} = 30 \text{ MPa}$$

$$\text{Kuat leleh tulangan longitudinal (fy)} = 420 \text{ MPa}$$

$$\text{Kuat leleh tulangan transversal (fyv)} = 420 \text{ MPa}$$

$$\text{Nilai beton biasa } (\lambda) = 1$$

$$\text{Nilai koefisien kuat tekan beton } (\beta_1) = 0,84$$

c. Geometri tulangan *tie beam*

$$\text{Diameter tulangan longitudinal (Db)} = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter tulangan sengkang (Ds)} = 10 \text{ mm}$$

$$\text{Jumlah tulangan negatif tumpuan (sisi atas) (n1)} = 3 \text{ buah}$$

$$\text{Jumlah tulangan positif tumpuan (sisi bawah) (n2)} = 3 \text{ buah}$$

$$\text{Jumlah tulangan negatif lapangan (sisi atas) (n3)} = 3 \text{ buah}$$

$$\text{Jumlah tulangan positif lapangan (sisi bawah) (n4)} = 3 \text{ buah}$$

$$\text{Spasi tumpuan geser (STump)} = 150 \text{ mm}$$

$$\text{Spasi lapangan geser (SLap)} = 200 \text{ mm}$$

$$\text{Jumlah kaki tumpuan geser (nTump)} = 2 \text{ buah}$$

$$\text{Jumlah kaki lapangan geser (nLap)} = 2 \text{ buah}$$

$$\text{Tinggi efektif tie beam (d)}$$

$$d = h - Cc - Ds - \frac{Db}{2}$$

$$= 450 - 50 - 10 - \frac{16}{2}$$

$$= 382 \text{ mm}$$

$$\text{Jarak vertikal antar tulangan (tDA)}$$

$$t_{DA} = 25 + Du$$

$$= 25 + 16$$

$$= 41 \text{ mm}$$

Jumlah tulangan maksimum satu baris horizontal (n_s)

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{(b - 2 \times D_{SA})}{(25 + D)} \\ &= \frac{(400 - 2 \times (50 + 10 \frac{16}{2}))}{(25 + 16)} \\ &= 6,44 \sim 7 \text{ buah} \end{aligned}$$

2. Data Beban

Beda penurunan/differential settlement Δ (*output plaxis*) = 1,14 mm

Tinggi tingkat dasar bangunan (h_n) = 4,15 m

Beban dinding per m^2 ($q_{A\text{dinding}}$) = 0,94 kN/m²

3. Syarat Geometri

Lebar tie beam (b) = 400 mm

$$\begin{aligned} \text{Syarat 1 } (L_n/20) &= \frac{7300}{20} \\ &= 365 \text{ mm} \end{aligned}$$

Syarat 2 (450 mm) = 400 < 450 mm (Memenuhi syarat)

4. Perhitungan Gaya Aksial, Geser, dan Momen

a. Beban yang terjadi pada *tie beam*

Modulus elastisitas (E_c)

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \sqrt{f'c} \\ &= 4700 \sqrt{30} \\ &= 25742,96 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Inersia penampang (I_g)

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{1}{12} \times b \times h^3 \\ &= \frac{1}{12} \times 400 \times 450^3 \\ &= 3037500000 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Berat jenis beton bertulangan (B_{Jc}) = 23,54 kN/m³

Beban merata akibat berat sendiri (q_{DL})

$$\begin{aligned} q_{DL} &= B_{Jc} \times b \times h \\ &= 23,54 \times 400 \times 450 \\ &= 4,24 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Beban merata akibat beban dinding (q_{SIDL})

$$\begin{aligned} q_{SIDL} &= q_{Adinding} \times h_n \\ &= 0,98 \times 4,15 \\ &= 4,07 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Beban merata ultimit akibat beban gravitasi (q_D)

$$\begin{aligned} q_D &= 1,4 \times (q_{DL} + q_{SIDL}) \\ &= 1,4 \times (4,24 + 4,04) \\ &= 11,63 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

b. Gaya geser pada *tie beam*

Gaya geser tumpuan akibat *differential settlement* (V_{diff})

$$\begin{aligned} V_{diff} &= 12 \times Ec \times Ig \times \Delta / 1000 \\ &= 12 \times 252742,96 \times 3037500000 \times 1,14 / 1000 \\ &= 2,76 \text{ kN} \end{aligned}$$

Gaya geser ultimit tumpuan akibat beban gravitasi ($V_{D \text{ Tump}}$)

$$\begin{aligned} V_{D \text{ Tump}} &= q_D \times \frac{Ln}{2} \\ &= 11,63 \times \frac{7300}{2} \\ &= 42,45 \text{ kN} \end{aligned}$$

Gaya geser ultimit lapangan akibat beban gravitasi ($V_{D \text{ Lap}}$)

$$\begin{aligned} V_{D \text{ Lap}} &= q_D \times \frac{Ln}{4} \\ &= 11,63 \times \frac{7300}{4} \\ &= 21,23 \text{ kN} \end{aligned}$$

c. Momen pada *tie beam*

Momen tumpuan akibat *differential settlement* (M_{diff})

$$\begin{aligned} M_{diff} &= 6 \times Ec \times Ig \times \frac{\Delta}{Ln^2} \\ &= 6 \times 25742,96 \times 3037500000 \times \frac{1,14}{7300^2} \\ &= 10,07 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Momen ultimit tumpuan akibat beban gravitasi ($M_{D \text{ Tump}}$)

$$\begin{aligned} M_{D \text{ Tump}} &= -\frac{1}{12} \times q_D \times L n^2 \\ &= -\frac{1}{12} \times 11,63 \times 7300^2 \\ &= -51,65 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Momen ultimit lapangan akibat beban gravitasi ($M_{D \text{ Lap}}$)

$$\begin{aligned} M_{D \text{ Lap}} &= \frac{1}{24} \times q_D \times L n^2 \\ &= \frac{1}{24} \times 11,63 \times 7300^2 \\ &= 25,82 \text{ kNm} \end{aligned}$$

5. Pemeriksaan Kapasitas Lentur

Tulangan Lentur Tumpuan Negatif (Sisi Atas)

Diameter tulangan longitudinal (D_b) = 16 mm

Jarak bersih antar tulangan

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{(b - 2 \times C_c - 2 \times d_s - n \times d_b)}{(n - 1)} \right) \\ &= \left(\frac{(400 - 2 \times 50 - 2 \times 10 - 3 \times 16)}{(3 - 1)} \right) \\ &= 116 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jumlah lapis tulangan (n) = 1 lapis

a. Kontrol luas tulangan

Luas tulangan terpasang

$$\begin{aligned} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d b^2 \\ &= 3 \times \frac{\pi}{4} \times 16^2 \\ &= 603,19 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas tulangan minimum 1

$$\begin{aligned} &= \frac{\sqrt{f'c}}{(4 \times f_y)} \times b \times d \\ &= \frac{\sqrt{30}}{(4 \times 420)} \times 400 \times 382 \\ &= 498,17 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas tulangan minimum 2

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1,4}{(4 \times f_y)} \times b \times d \\
 &= \frac{1,4}{(4 \times 420)} \times 400 \times 382 \\
 &= 509,33 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

(Kapasitas memenuhi)

b. Kontrol tahanan momen

Garis tekan beton (a)

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_s \times f_{yu}}{(0,85 \times f'_c \times b)} \\
 &= \frac{603,19 \times 420}{(0,85 \times 30 \times 400)} \\
 &= 24,84 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Kapasitas lentur (Mn)

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s \times f_{yu} \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \\
 &= 603,19 \times 420 \times \left(382 - \frac{24,84}{2} \right) \\
 &= 93,63 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Garis netral beton (c)

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{24,84}{0,84} \\
 &= 29,72 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Regangan tulangan tarik (ϵ_s)

$$\begin{aligned}
 \epsilon_s &= \frac{(d-c)}{c \times 0,003} \\
 &= \frac{(382-29,72)}{29,72 \times 0,003} \\
 &= 0,036
 \end{aligned}$$

Faktor reduksi (Φ) = 0,9

Kapasitas lentur reduksi

$$\begin{aligned}
 \Phi \times M_n &= 0,9 \times 93,63 \\
 &= 84,27 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Momen ultimate (Mu tumpuan (-)) = 61,72 kNm

(Kapasitas memenuhi)

Tulangan yang digunakan = 3 D16

6. Pemeriksaan Kapasitas Geser

Tulangan Geser Tumpuan

a. Gaya Geser

Gaya geser (V_u) = 45,21 kN

Faktor reduksi (Φ) = 0,75

Gaya terfaktor

$$\frac{V_u}{\Phi} = \frac{45,21}{0,75}$$

$$= 60,28 \text{ kN}$$

Tahanan geser beton maksimum

$$= 0,33 \times \sqrt{f'c} \times b \times d$$

$$= 0,33 \times \sqrt{30} \times 400 \times 450$$

$$= 276,18 \text{ kN}$$

b. Kontrol Spasi

Spasi digunakan (S) = 150 mm

Spasi max 1

$$\frac{d}{4} \text{ atau } \frac{d}{2} = 191 \text{ mm}$$

Spasi max 2 (300 mm atau 600 mm) = 600 mm

(Kapasitas Memenuhi)

c. Kontrol Tahanan Geser

Luas tulangan geser terpasang

$$= n \times \frac{\pi}{4} \times ds^2$$

$$= 3 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2$$

$$= 157,08 \text{ mm}^2$$

Tahanan geser tulangan

$$= A_v \times f_y \times \frac{d}{s}$$

$$= 157,08 \times 420 \times \frac{382}{150}$$

$$= 168,01 \text{ kN}$$

Batas tahanan geser tulangan

$$= 0,66 \times \sqrt{f'c} \times b \times d$$

$$= 0,66 \times \sqrt{30} \times 400 \times 382$$

$$= 552,37 \text{ kN}$$

Tahanan geser beton (V_c)

$$V_c = 0,17 \times \sqrt{f'c} \times b \times d$$

$$= 0,17 \times \sqrt{30} \times 400 \times 382$$

$$= 142,28 \text{ kN}$$

Tahanan geser (V_n)

$$V_n = V_c + V_s$$

$$= 142,28 + 168,01$$

$$= 310,29 \text{ kN}$$

Tahanan geser terfaktor

$$\phi \times V_n = 0,75 \times 310,29$$

$$= 232,72 \text{ kN}$$

(Kapasitas Memenuhi)

Tulangan yang digunakan = 2 D10-150

Berikut merupakan rekapitulasi penulangan *tie beam*:

Tabel 4.79 Rekapitulasi Penulangan *Tie Beam*

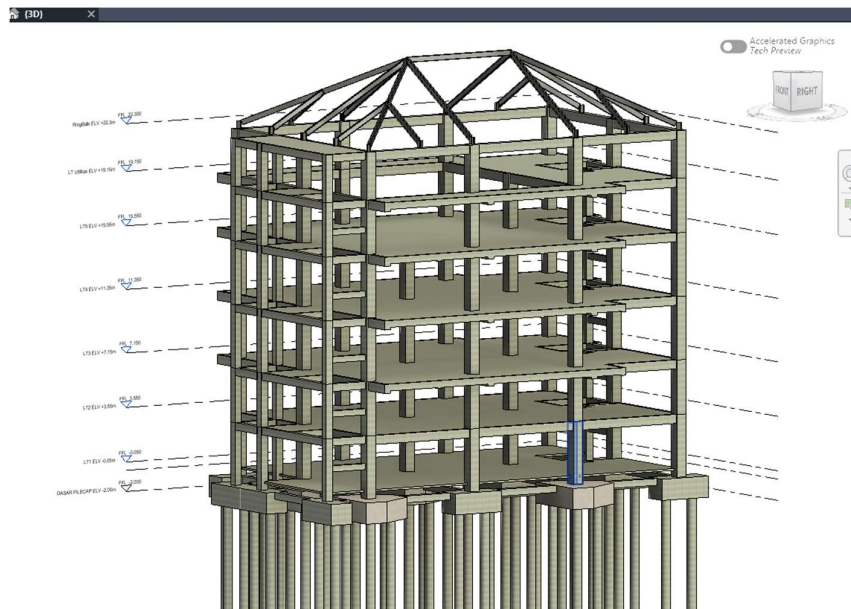
Tipe	Settlement	Mutu Baja Tulangan (Mpa)	Selimut	Posisi	Tulangan Longitudinal		Tulangan Sengkang	
					Tumpuan	Lapangan	Tumpuan	Lapangan
TB 400 x 450 mm	1.14 mm	420	50 mm	Atas	3D16	3D16	D10-150	D10-200
				Bawah	3D16	3D16	D10-150	D10-200

4.7 Memodelkan 3D dengan *Revit*

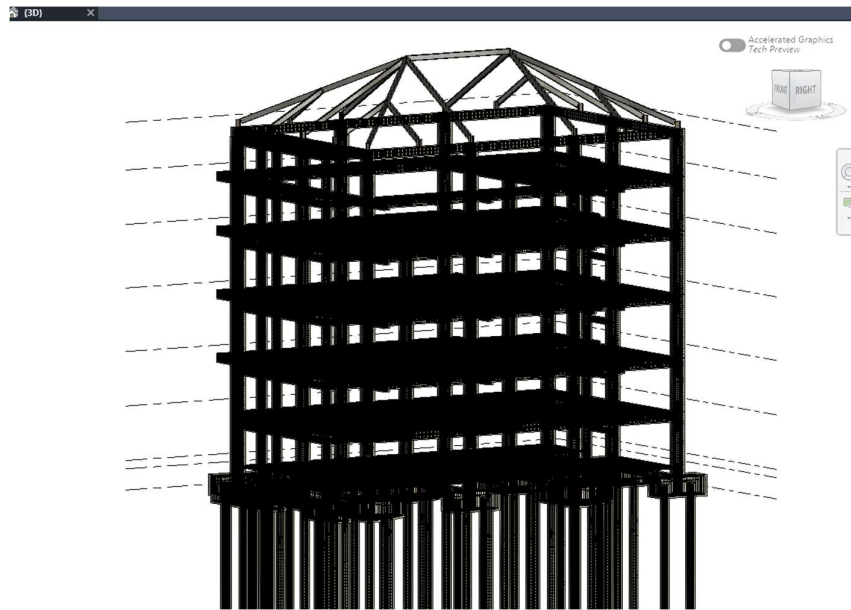
4.7.1 Ekstrak Model *ETABS* ke *Revit*

Setelah seluruh dimensi penampang dan kebutuhan penulangan struktur dipastikan memenuhi persyaratan teknis, tahapan berikutnya dalam alur *Building Information Modeling* (BIM) adalah menyusun representasi visual secara tiga dimensi.

Pemodelan fisik ini berperan krusial sebagai basis data geometris sebelum elemen struktur diintegrasikan dengan aspek waktu dan biaya proyek. Mengacu pada hasil perhitungan matematis beserta *output* analisis gaya dalam dari program *ETABS*, seluruh elemen struktur tersebut kemudian dimodelkan secara mendetail menggunakan perangkat lunak *Autodesk Revit* sebagaimana disajikan pada **Gambar 4.35** dan **Gambar 4.36** berikut.



Gambar 4.35 Permodelan 3D Elemen Struktur dengan *Revit*



Gambar 4.36 Permodelan 3D Tulangan dengan *Revit*

4.7.2 Quantity Take Off/Scheduling

Fitur *quantity take off* (QTO) atau *scheduling* pada perangkat lunak *Revit* dimanfaatkan untuk mengekstraksi volume pekerjaan secara presisi berdasarkan pemodelan 3D yang telah disusun. Rincian volume pekerjaan yang dihasilkan dari proses ini mencakup elemen kolom, balok, pelat, *tie beam*, serta *pile cap*. Berikut adalah rekapitulasi hasil *quantity take off* dari pemodelan struktur Gedung *Cadaster and Geoinformatics Engineering* UGM:

<Floor Schedule>			
A	B	C	D
Level	Type	Area	Volume
LT1 ELV -0.05m			
LT1 ELV -0.05m	S 125	392 m ²	49.05 m ³
LT2 ELV +3.55m			
LT2 ELV +3.55m	D 125	378 m ²	37.76 m ³
LT3 ELV +7.15m			
LT3 ELV +7.15m	D 125	467 m ²	46.71 m ³
LT4 ELV +11.35m			
LT4 ELV +11.35m	D 125	467 m ²	46.71 m ³
LT5 ELV +15.55m			
LT5 ELV +15.55m	D 125	467 m ²	46.71 m ³
LT Utilitas ELV +19.15m			
LT Utilitas ELV +19.15m	D 125	211 m ²	21.11 m ³
RingBalk ELV +22.3m			
RingBalk ELV +22.3m	D 125	36 m ²	3.60 m ³

Gambar 4.37 *Quantity Take Off* Pengecoran Pelat

<Structural Column Schedule>			
A	B	C	D
Base Level	Type	Count	Volume
MTA ELV -0.60m			
MTA ELV -0.60m	K55	5	5.12 m ³
MTA ELV -0.60m	K77	12	23.75 m ³
LT2 ELV +3.55m			
LT2 ELV +3.55m	K55	5	4.47 m ³
LT2 ELV +3.55m	K77	12	20.73 m ³
LT3 ELV +7.15m			
LT3 ELV +7.15m	K55	5	5.22 m ³
LT3 ELV +7.15m	K77	12	24.26 m ³
LT4 ELV +11.35m			
LT4 ELV +11.35m	K55	5	5.22 m ³
LT4 ELV +11.35m	K77	12	24.26 m ³
LT5 ELV +15.55m			
LT5 ELV +15.55m	K55	5	4.48 m ³
LT5 ELV +15.55m	K77	11	19.16 m ³
LT Utilitas ELV +19.15m			
LT Utilitas ELV +19.15m	K55	4	3.12 m ³
LT Utilitas ELV +19.15m	K77	10	15.40 m ³
RingBalk ELV +22.3m			
RingBalk ELV +22.3m	WVF 300.200.8.12	18	0.06 m ³

Gambar 4.38 *Quantity Take Off* Pengecoran Kolom

Structural Foundation Schedule				
<Structural Foundation Schedule>				
A	B	C	D	E
Level	Type	Count	Volume	Elevation at Bottom
MTA ELV -0.60m				
MTA ELV -0.60m	B PC 1	8	51.01 m³	-24600
MTA ELV -0.60m	B PC 2	15	95.85 m³	-24600
MTA ELV -0.60m	B PC 3	20	127.61 m³	-24600
MTA ELV -0.60m	PC 1	2	36.29 m³	-2000
MTA ELV -0.60m	PC 2	5	105.77 m³	-2000
MTA ELV -0.60m	PC 3	10	79.86 m³	-2000

Gambar 4.39 *Quantity Take Off* Pengecoran Fondasi

Structural Framing Schedule				
<Structural Framing Schedule>				
A	B	C	D	E
Reference Level	Type	Count	Cut Length	Volume
MTA ELV -0.60m				
MTA ELV -0.60m	TB 40.45	27	100490	17.39 m³
LT1 ELV -0.05m				
LT1 ELV -0.05m	BT 25.40	2	5250	0.53 m³
LT2 ELV +3.55m				
LT2 ELV +3.55m	B1 45.60	16	116800	27.68 m³
LT2 ELV +3.55m	B2 40.50	6	25675	4.80 m³
LT2 ELV +3.55m	B3 50.60	1	7300	1.99 m³
LT2 ELV +3.55m	BA1 30.40	3	9900	0.97 m³
LT2 ELV +3.55m	BA2 30.50	13	98050	11.50 m³
LT2 ELV +3.55m	BA3 30.45	1	2775	0.29 m³
LT2 ELV +3.55m	BP 15.20	9	19550	0.32 m³
LT2 ELV +3.55m	BT 25.40	2	5250	0.53 m³
LT3 ELV +7.15m				
LT3 ELV +7.15m	B1 45.60	22	131400	29.72 m³
LT3 ELV +7.15m	B2 40.50	7	26375	4.92 m³
LT3 ELV +7.15m	B3 50.60	1	7300	1.99 m³
LT3 ELV +7.15m	BA1 30.40	3	10775	1.01 m³
LT3 ELV +7.15m	BA2 30.50	19	110800	12.96 m³
LT3 ELV +7.15m	BA3 30.45	9	48525	5.78 m³
LT3 ELV +7.15m	BP 15.20	7	13100	0.22 m³
LT3 ELV +7.15m	BT 25.40	2	5250	0.53 m³
LT4 ELV +11.35m				
LT4 ELV +11.35m	B1 45.60	22	131400	29.72 m³
LT4 ELV +11.35m	B2 40.50	7	26375	4.92 m³
LT4 ELV +11.35m	B3 50.60	1	7300	1.99 m³
LT4 ELV +11.35m	BA1 30.40	3	10775	1.01 m³
LT4 ELV +11.35m	BA2 30.50	19	110800	12.96 m³
LT4 ELV +11.35m	BA3 30.45	9	48525	5.78 m³
LT4 ELV +11.35m	BP 15.20	7	13100	0.22 m³
LT4 ELV +11.35m	BT 25.40	2	5250	0.53 m³
LT5 ELV +15.55m				
LT5 ELV +15.55m	B1 45.60	22	131400	29.72 m³
LT5 ELV +15.55m	B2 40.50	7	26375	4.92 m³
LT5 ELV +15.55m	B3 50.60	1	7300	1.99 m³

Gambar 4.40 *Quantity Take Off* Pengecoran Balok

<Rebar Schedule Dengan Bondek>				
A	B	C	D	E
Partition	Host Mark	Type	Total Bar Length	Berat Total (Kg)
B1				
B1 - LT 2	B1	D13	2653600 mm	2764.914469
B1 - LT 2	B1	D16	552000 mm	871.241554
B1 - LT 2	B1	D25	1978000 mm	7621.945564
			5183600 mm	11258.101588
B1 - LT 3	B1	D13	3046825 mm	3174.634658
B1 - LT 3	B1	D16	619300 mm	977.463577
B1 - LT 3	B1	D25	2225025 mm	8573.821754
			5891150 mm	12725.919989
B1 - LT 4	B1	D13	3081525 mm	3210.79027
B1 - LT 4	B1	D16	619300 mm	977.463577
B1 - LT 4	B1	D25	2232925 mm	8604.263296
			5933750 mm	12792.517142
B1 - LT 5	B1	D13	3081525 mm	3210.79027
B1 - LT 5	B1	D16	619300 mm	977.463577
B1 - LT 5	B1	D25	2232925 mm	8604.263296
			5933750 mm	12792.517142
B1 - LT 6	B1	D13	535000 mm	557.442433
B1 - LT 6	B1	D16	99400 mm	156.886613
B1 - LT 6	B1	D25	366000 mm	1410.329665
			1000400 mm	2124.658711
B1 - LT UTILITAS	B1	D13	1848425 mm	1925.963607
B1 - LT UTILITAS	B1	D16	381900 mm	602.766575
B1 - LT UTILITAS	B1	D25	1369675 mm	5277.850501
			3600000 mm	7806.580583
B2				
B2 - LT 2	B2	D10	63050 mm	38.872693
B2 - LT 2	B2	D13	372900 mm	388.542586
B2 - LT 2	B2	D22	320900 mm	957.579008
			756850 mm	1384.994287
B2 - LT 3	B2	D10	65300 mm	40.259903
B2 - LT 3	B2	D13	386100 mm	402.296306
B2 - LT 3	B2	D22	333275 mm	994.506525
			784675 mm	1437.062733
B2 - LT 4	B2	D10	65300 mm	40.259903
B2 - LT 4	B2	D13	386100 mm	402.296306
B2 - LT 4	B2	D22	333275 mm	994.506525
			784675 mm	1437.062733
B2 - LT 5	B2	D10	65300 mm	40.259903
B2 - LT 5	B2	D13	386100 mm	402.296306
B2 - LT 5	B2	D22	333275 mm	994.506525
			784675 mm	1437.062733

Gambar 4.41 *Quantity Take Off* Penulangan

Perbandingan volume pada pengecoran elemen kolom ini disajikan sebagai sampel representatif untuk mengevaluasi perbedaan antara *Quantity Take Off* (QTO) *Revit* dan perhitungan manual.

Pada lantai 1 ($h = 4,15$ m)

a. Kolom 500 x 500 mm (jumlah 5 buah)

$$= 0,5 \times 0,5 \times 4,15 \times 5$$

$$= 5,1875 \text{ m}^3$$

b. Kolom 700 x 700 mm (jumlah 12 buah)

$$= 0,7 \times 0,7 \times 4,15 \times 12$$

$$= 24,402 \text{ m}^3$$

Maka, total pengecoran kolom lantai 1 = $5,1875 + 24,402 \text{ m}^3$

$$= 29,59 \text{ m}^3$$

Berikut merupakan tabel perbandingan antara hasil perhitungan volume pengecoran kolom antara *Quantity Take Off* (QTO) *Revit* dan secara manual.

Tabel 4.80 Perbandingan Volume Pengecoran Kolom

Lantai	Tipe Kolom	Jumlah Kolom	Volume Revit (QTO)	Volume Manual
Lantai 1	Kolom 500 x 500 mm	5	5,12 m ³	5,19 m ³
	Kolom 700 x 700 mm	12	23,75 m ³	24,40 m ³
Lantai 2	Kolom 500 x 500 mm	5	4,47 m ³	4,5 m ³
	Kolom 700 x 700 mm	12	20,73 m ³	21,17 m ³
Lantai 3	Kolom 500 x 500 mm	5	5,22 m ³	5,25 m ³
	Kolom 700 x 700 mm	12	24,26 m ³	24,70 m ³
Lantai 4	Kolom 500 x 500 mm	5	5,22 m ³	5,25 m ³
	Kolom 700 x 700 mm	12	24,26 m ³	24,70 m ³
Lantai 5	Kolom 500 x 500 mm	5	4,48 m ³	4,5 m ³
	Kolom 700 x 700 mm	11	19,16 m ³	19,40 m ³
Lantai 6 (Utilitas)	Kolom 500 x 500 mm	4	3,12 m ³	3,15 m ³
	Kolom 700 x 700 mm	10	15,40 m ³	15,43 m ³
Total			155,19 m ³	157,64 m ³

Analisis komparasi pada **Tabel 4.80** menunjukkan adanya perbedaan volume sebesar kurang lebih 1,55% (2,45 m³), di mana perhitungan manual menghasilkan total volume yang lebih besar (157,64 m³) dibandingkan ekstraksi *Quantity Take Off* (QTO) *Revit* (155,19 m³). Selisih ini terjadi karena hitungan manual menghitung volume pertemuan kolom dengan balok dan pelat lebih dari sekali, sedangkan *Revit* menghitung volume pertemuan tersebut satu kali saja. Oleh karena itu, pemodelan menggunakan perangkat lunak BIM terbukti memberikan estimasi *net volume* yang lebih efisien dan presisi, sehingga data *Quantity Take Off* (QTO) *Revit* tersebut menjadi acuan yang paling tepat dan akurat dalam penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) guna mencegah pembengkakan anggaran (*overbudgeting*).

4.7.3 Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Menyusun rencana anggaran biaya (RAB) dari hasil volume yang telah diperoleh dari *Revit*. Penyusunan RAB untuk pekerjaan model eksisting diperoleh nilai sebesar Rp 20.433.012.036,80 dengan nilai PPN 11% sehingga didapatkan total kontrak pembangunan struktur sebesar Rp 22.680.643.360,84. Sedangkan penyusunan RAB untuk pekerjaan *redesign* dengan pelat beton konvensional diperoleh nilai sebesar Rp 20.629.462.764,30 dengan nilai PPN 11% sehingga didapatkan total kontrak pembangunan struktur hasil *redesign* (pelat beton

konvensional) sebesar Rp 22.898.703.668,37. Sementara itu, penyusunan RAB untuk pekerjaan *redesign* dengan pelat bondek diperoleh nilai sebesar Rp 20.149.532.342,30 dengan nilai PPN 11% sehingga didapatkan total kontrak pembangunan struktur hasil *redesign* sebesar Rp 22.365.980.899,95.

REKAPITULASI RENCANA ANGGARAN BIAYA EKSISTING

NAMA PEKERJAAN : PEMBANGUNAN GEDUNG *CADASTER AND GEOINFORMATICS ENGINEERING* UGM
 LOKASI : Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.
 PEMILIK PROYEK : -
 TAHUN ANGGARAN : 2026

No	URAIAN PEKERJAAN	JUMLAH HARGA (Rp.)
1	2	3
I.	PEKERJAAN PERSIAPAN	Rp 279.049.672,00
II.	PEKERJAAN TANAH DAN URUGAN	Rp 109.605.892,00
III.	PEKERJAAN PONDASI	Rp 3.527.386.692,62
IV.	PEKERJAAN STRUKTUR ATAS	
IV.1	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 1	Rp 2.007.638.348,61
IV.2	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 2 (elv. +3,55 m)	Rp 2.779.098.031,00
IV.3	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 3 (elv. +7,15 m)	Rp 3.167.911.495,00
IV.4	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 4 (elv. +11,35 m)	Rp 2.999.015.043,00
IV.5	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 5 (elv. +15,55 m)	Rp 2.949.650.738,00
IV.6	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 6/Utilitas (elv. +19,15 m)	Rp 1.789.631.133,00
IV.7	Pekerjaan Struktur Atas Lantai Ringbalk (elv. +22,3 m)	Rp 824.024.991,56
	JUMLAH PEKERJAAN STRUKTUR	Rp 20.433.012.036,80
	PPN 11%	Rp 2.247.631.324,05
	TOTAL HARGA	Rp 22.680.643.360,84
	PEMBULATAN	Rp 22.680.640.000,00

Gambar 4.42 Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya Eksisting

REKAPITULASI RENCANA ANGGARAN BIAYA EFISIENSI PELAT BETON

NAMA PEKERJAAN : PEMBANGUNAN GEDUNG *CADASTER AND GEOINFORMATICS ENGINEERING* UGM
 LOKASI : Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.
 PEMILIK PROYEK : -
 TAHUN ANGGARAN : 2026

No	URAIAN PEKERJAAN	JUMLAH HARGA (Rp.)
1	2	3
I.	PEKERJAAN PERSIAPAN	Rp 279.049.672,00
II.	PEKERJAAN TANAH DAN URUGAN	Rp 99.640.558,75
III.	PEKERJAAN PONDASI	Rp 2.201.278.374,17
IV.	PEKERJAAN STRUKTUR ATAS	
IV.1	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 1	Rp 1.567.140.402,50
IV.2	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 2 (elv. +3,55 m)	Rp 3.035.703.874,00
IV.3	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 3 (elv. +7,15 m)	Rp 3.574.310.126,00
IV.4	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 4 (elv. +11,35 m)	Rp 3.559.783.864,00
IV.5	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 5 (elv. +15,55 m)	Rp 3.356.856.386,00
IV.6	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 6/Utilitas (elv. +19,15 m)	Rp 2.333.038.425,00
IV.7	Pekerjaan Struktur Atas Lantai Ringbalk (elv. +22,3 m)	Rp 622.661.081,88
	JUMLAH PEKERJAAN STRUKTUR	Rp 20.629.462.764,30
	PPN 11%	Rp 2.269.240.904,07
	TOTAL HARGA	Rp 22.898.703.668,37
	PEMBULATAN	Rp 22.898.700.000,00

Gambar 4.43 Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya Efisiensi Pelat Beton

REKAPITULASI RENCANA ANGGARAN BIAYA EFISIENSI BONDEK

NAMA PEKERJAAN : PEMBANGUNAN GEDUNG *CADASTER AND GEOINFORMATICS ENGINEERING* UGM
 LOKASI : Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.
 PEMILIK PROYEK : -
 TAHUN ANGGARAN : 2026

No	URAIAN PEKERJAAN	JUMLAH HARGA (Rp.)
1	2	3
I.	PEKERJAAN PERSIAPAN	Rp 279.049.672,00
II.	PEKERJAAN TANAH DAN URUGAN	Rp 99.640.558,75
III.	PEKERJAAN PONDASI	Rp 2.201.278.374,17
IV.	PEKERJAAN STRUKTUR ATAS	
IV.1	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 1	Rp 1.567.140.402,50
IV.2	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 2 (elv. +3,55 m)	Rp 2.944.541.650,00
IV.3	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 3 (elv. +7,15 m)	Rp 3.464.764.650,00
IV.4	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 4 (elv. +11,35 m)	Rp 3.450.238.388,00
IV.5	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 5 (elv. +15,55 m)	Rp 3.247.310.910,00
IV.6	Pekerjaan Struktur Atas Lantai 6/Utilitas (elv. +19,15 m)	Rp 2.281.193.729,00
IV.7	Pekerjaan Struktur Atas Lantai Ringbalk (elv. +22,3 m)	Rp 614.374.007,88
	JUMLAH PEKERJAAN STRUKTUR	Rp 20.149.532.342,30
	PPN 11%	Rp 2.216.448.557,65
	TOTAL HARGA	Rp 22.365.980.899,95
	PEMBULATAN	Rp 22.365.980.000,00

Gambar 4.44 Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya Efisiensi Bondek

Tabel 4.81 Rekapitulasi Perbandingan RAB

Item	Eksisting	<i>Redesign</i> Konvensional	Selisih Konvensional - Eksisting	<i>Redesign</i> Bondek	Selisih Bondek- Konvensional
Biaya Pekerjaan Persiapan dan Struktur Bawah	Rp 3.916.042.256,62	Rp 2.579.968.604,92	(-34,1%)	Rp 2.579.968.604,92	(0%)
Biaya Pekerjaan Struktur Atas	Rp 16.516.969.780,18	Rp 18.049.494.159,38	(-9,3%)	Rp 17.569.563.737,38	(-2,7%)
Total Biaya Sebelum PPN	Rp 20.433.012.036,80	Rp 20.629.462.764,30	(+0,96%)	Rp 20.149.532.342,30	(-2,3%)

Tabel 4.81 menunjukkan bahwa penghapusan dinding geser menggeser biaya dari struktur bawah ke struktur atas. Biaya pekerjaan persiapan dan struktur bawah turun Rp1.336.073.651,70 (34,1%). Penurunan ini konsisten dengan mekanisme penyaluran beban lateral ke fondasi. Pada sistem ganda, dinding geser memikul porsi terbesar gaya geser dasar dan, sebagai kantilever vertikal, mengakumulasi momen guling dari seluruh tingkat pada dasar dinding yang sempit. Momen tersebut harus ditahan oleh pasangan gaya tarik-tekan pada kelompok tiang di bawah dinding, sehingga dibutuhkan *pile cap* yang besar dengan jumlah tiang yang banyak (Paulay & Priestley, 1992; Taranath, 2010). Pada SRPMK, momen guling ditahan oleh gaya aksial kolom yang tersebar pada lengan momen selebar denah

bangunan, sehingga reaksi fondasi terbagi lebih merata (Smith & Coull, 1991). Akibatnya, desain ulang cukup menggunakan 17 *pile cap* dengan total 43 tiang *borepile* D80, dengan jumlah tiang per *pile cap* hanya dua hingga empat buah. (Tabel 4.77). *Pile cap* yang lebih kecil juga mengurangi volume galian dan urugan, sehingga biaya pekerjaan tanah ikut turun. Sebaliknya, biaya struktur atas naik Rp1.532.504.379,20 (9,3%). Kenaikan ini terjadi karena pada SRPMK seluruh gaya gempa harus dipikul oleh aksi lentur balok dan kolom, sedangkan pada sistem ganda rangka cukup memikul sekurang-kurangnya 25% gaya seismik desain (Badan Standardisasi Nasional, 2019a). Selain memikul gaya yang lebih besar, rangka juga harus cukup kaku untuk membatasi simpangan antartingkat tanpa bantuan dinding dan harus memenuhi persyaratan kolom kuat–balok lemah (Moehle, 2015; Moehle & Hooper, 2016).

Perubahan biaya pada kedua kelompok pekerjaan tersebut bersumber dari perubahan dimensi dan volume elemen struktur, yang dirangkum pada Tabel 4.82 berdasarkan rincian RAB (Lampiran VI). Pada struktur atas, kolom utama tetap berukuran 700×700 mm, kolom K2 membesar dari 400×400 mm menjadi 500×500 mm, dan penampang balok utama berubah dari 400×700 mm dan 400×600 mm menjadi 450×600 mm, 500×600 mm, dan 400×500 mm, sementara tiga dinding geser dihilangkan. Pada struktur bawah, jumlah tipe *pile cap* berkurang dari enam menjadi tiga dan volume beton *pile cap* turun 13,9%, tetapi biaya pekerjaan *pile cap* justru naik Rp105,91 juta karena kebutuhan tulangannya meningkat dari 15.802 kg menjadi 23.683 kg. Seluruh penurunan biaya fondasi berasal dari pekerjaan tiang *borepile*, yang turun Rp1,43 miliar seiring berkurangnya panjang total pengeboran sebesar 27,0%. Dengan demikian, efisiensi fondasi pada penelitian ini terutama berupa berkurangnya kebutuhan tiang, bukan mengecilnya *pile cap*.

Tabel 4.82 Perbandingan Dimensi dan Volume Elemen Struktur Desain Eksisting dan *Redesign*

Elemen	Desain eksisting (sistem ganda)	<i>Redesign</i> (SRPMK Tanpa <i>Shearwall</i>)
Kolom utama	K1A/K1B 700×700 mm	K1/K1A 700×700 mm
Kolom K2	400×400 mm	500×500 mm
Balok utama	B1, B2 400×700 mm; B3 400×600 mm	B1 450×600 mm; B2 400×500 mm; B3 500×600 mm

Elemen	Desain eksisting (sistem ganda)	<i>Redesign</i> (SRPMK Tanpa <i>Shearwall</i>)
Balok anak	B4, BA1, BA2, BC 300 × 600 mm; BA3 300 × 500 mm (lantai atas 300 × 400–500 mm)	BA1 300 × 400 mm; BA2 300 × 500 mm; BA3 300 × 450 mm; BT 250 × 400 mm
Dinding geser	Shearwall A (lantai 1–5), B dan C (lantai 1–6)	Tidak ada
<i>Tie beam</i>	450 × 800 mm	400 × 450 mm
Pelat lantai	Beton konvensional, t = 100 mm	Konvensional atau bondek BMT 0,70 mm, t = 125 mm
<i>Pile cap</i>	6 tipe (PC1, PC3, PC4, PC6, PC12, PC15); beton 257,85 m ³ ; tulangan 15.802 kg	3 tipe (PC2, PC3, PC4); beton 221,92 m ³ ; tulangan 23.683 kg
Pengeboran <i>borepile</i> D80	710,55 m (62 tiang)	518,74 m (43 tiang)

Jika kedua arah perubahan tersebut digabungkan, setiap Rp1,00 penghematan pada struktur bawah diimbangi oleh kenaikan Rp1,15 pada struktur atas. Akibatnya, *redesign* SRPMK dengan pelat konvensional justru lebih mahal Rp196.450.727,50 (0,96%) daripada desain eksisting. Temuan ini menunjukkan bahwa pada gedung enam lantai ini penghapusan dinding geser tidak dengan sendirinya menghasilkan efisiensi biaya, karena manfaatnya pada fondasi habis terserap oleh kebutuhan rangka yang lebih kuat dan kaku. Temuan ini sejalan dengan Shakeel dkk. (2024) yang mendapati bahwa pada gedung tujuh lantai, sistem ganda lebih ekonomis daripada sistem rangka pemikul momen. Porsi biaya struktur atas terhadap biaya total juga meningkat dari 80,8% pada desain eksisting menjadi 87,5% pada *redesign*, sehingga biaya total menjadi semakin sensitif terhadap efisiensi elemen struktur atas, termasuk sistem pelat.

Efisiensi biaya total baru tercapai setelah pelat konvensional diganti dengan pelat bondek. Penggunaan pelat bondek menurunkan biaya struktur atas sebesar Rp479.930.422,00 (2,66%) dibandingkan *redesign* dengan pelat konvensional, akibat berkurangnya volume tulangan dan volume beton pelat. Penghematan ini lebih besar daripada kenaikan netto akibat penghapusan dinding geser, sehingga total biaya *redesign* dengan pelat bondek menjadi Rp20.149.532.342,30, atau lebih rendah Rp283.479.694,50 (1,39%) daripada desain eksisting. Dengan kata lain, efisiensi biaya total diperoleh dari kombinasi kedua perubahan: penghapusan dinding geser menyumbang +Rp196.450.727,50, sedangkan penggantian sistem

pelat menyumbang -Rp479.930.422,00. Biaya struktur bawah kedua *redesign* sama karena fondasi direncanakan satu kali untuk kedua skenario pelat.

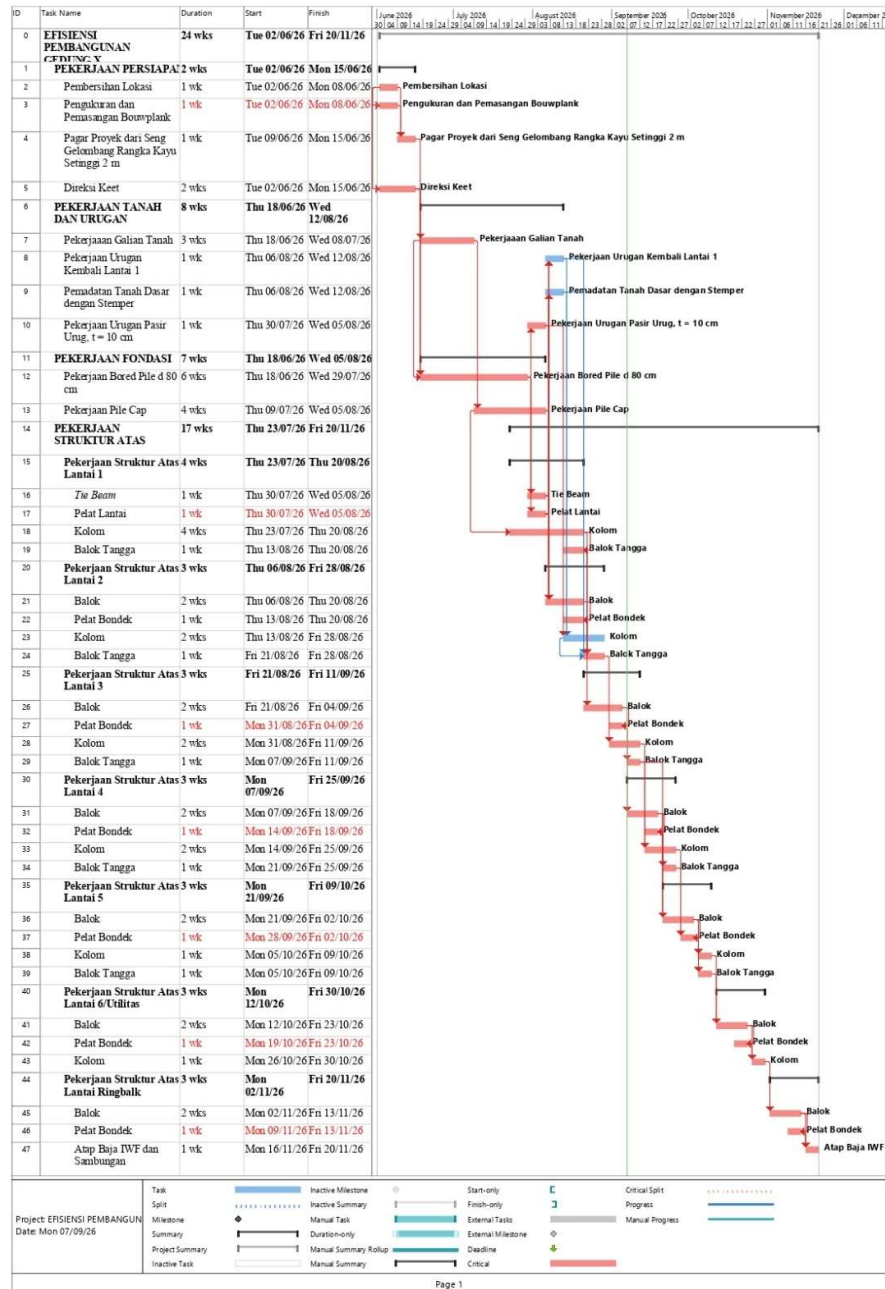
Penggunaan pelat bondek menurunkan biaya struktur atas sebesar Rp479.930.422,00 (2,66%) dibandingkan *redesign* dengan pelat konvensional, akibat berkurangnya volume tulangan dan volume beton pelat. Dengan demikian, total biaya *redesign* dengan pelat bondek lebih rendah Rp283.479.694,50 (1,39%) daripada desain eksisting. Biaya struktur bawah kedua *redesign* sama karena fondasi direncanakan satu kali untuk kedua skenario pelat.

Terdapat dua catatan dalam menafsirkan hasil ini. Pertama, karena fondasi direncanakan satu kali untuk kedua skenario pelat, pengurangan berat sendiri pelat bondek belum dimanfaatkan untuk mengefisienkan fondasi, sehingga penghematan pelat bondek yang diperoleh merupakan batas bawah. Kedua, selisih biaya total antardesain relatif kecil (-1,39% hingga +0,96%) dan berada pada orde yang sama dengan ketidakpastian estimasi volume, misalnya selisih 1,55% antara QTO *Revit* dan hitungan manual pada sampel kolom (**Tabel 4.80**). Namun, karena ketiga RAB disusun dengan metode QTO dan harga satuan yang sama, sebagian ketidakpastian tersebut bersifat sistematis dan saling meniadakan dalam perbandingan relatif. Dengan demikian, hasil ini paling tepat dimaknai sebagai keunggulan biaya yang tipis namun konsisten pada *redesign* dengan pelat bondek.

4.8 Penjadwalan Proyek dengan *Microsoft Project*

Penjadwalan disusun untuk desain ulang dengan pelat bondek. Berdasarkan RAB desain tersebut, diperoleh bobot setiap pekerjaan yang selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan jadwal menggunakan *Microsoft Project*. Adapun *output* penjadwalan yang diperoleh dari *Microsoft Project* adalah direncanakan struktur Gedung *Cadaster and Geoinformatics Engineering* UGM diselesaikan dengan durasi waktu pengerjaan selama 24 minggu, mulai tanggal 2 Juni 2026 hingga 20 November 2026. Waktu operasional proyek berjalan selama lima hari kerja (Senin–Jumat) dengan durasi 8 jam per hari, yaitu pukul 08.00 – 12.00 WIB, lalu terdapat

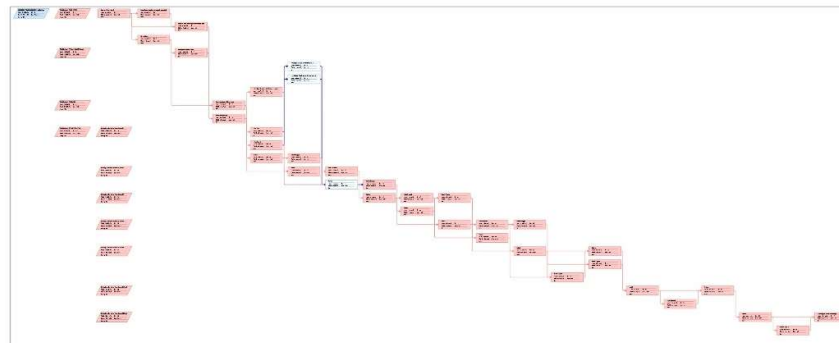
waktu istirahat selama satu (1) jam, kemudian dilanjutkan pukul 13.00 – 17.00 WIB.



Gambar 4.45 Gantt Chart Redesain Struktur Gedung Cadaster and Geoinformatics Engineering UGM



Gambar 4.46 Kurva S Redesain Gedung *Cadaster and Geoinformatics Engineering UGM*



Gambar 4.47 *Network Planning* Redesain Gedung *Cadaster and Geoinformatics Engineering UGM*

4.9 Pembuatan Simulasi 5D Menggunakan *Navisworks*

Pengintegrasian model 3D, Rencana Anggaran Biaya (RAB), dan penjadwalan dilakukan melalui perangkat lunak *Autodesk Navisworks* guna menghasilkan simulasi pelaksanaan proyek yang selaras dengan perencanaan awal. Melalui simulasi berbasis 5D ini, diperoleh representasi visual yang komprehensif mengenai progres pekerjaan yang terikat langsung dengan alokasi durasi waktu dan biaya dari tahap awal hingga penyelesaian proyek.

Gambar 4.48 menunjukkan hasil simulasi pada *Navisworks* yang merupakan visualisasi dari integrasi *Revit* dan *Microsoft Project*. Simulasi 5D dapat diakses pada **Gambar 4.49**.



Gambar 4.48 Hasil Simulasi *Navisworks*



Gambar 4.49 Simulasi 5D *Navisworks*