

## **BAB IV**

### **HASIL/PEMBAHASAN**

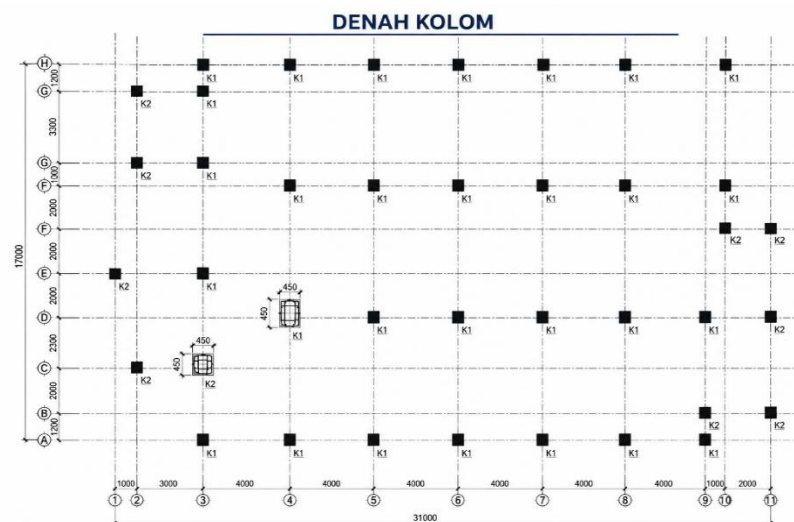
#### **4.1 Evaluasi Struktur Existing**

Sebelum dilakukan perencanaan ulang, terlebih dahulu dilakukan evaluasi terhadap *Detailed Engineering Design* (DED) eksisting yang diperoleh dari PT. ACE Engineering and Construction menggunakan perangkat lunak ETABS. Evaluasi bertujuan memberikan justifikasi teknis atas perlunya perencanaan ulang, sebagaimana diidentifikasi pada Bab I. Seluruh elemen struktur dimodelkan berdasarkan DED eksisting dengan mutu beton tunggal  $f'_c$  25 MPa dan mutu baja tulangan  $f_y$  420 MPa, kemudian diverifikasi terhadap SNI 1726-2019, SNI 1727-2020, dan SNI 2847-2019.

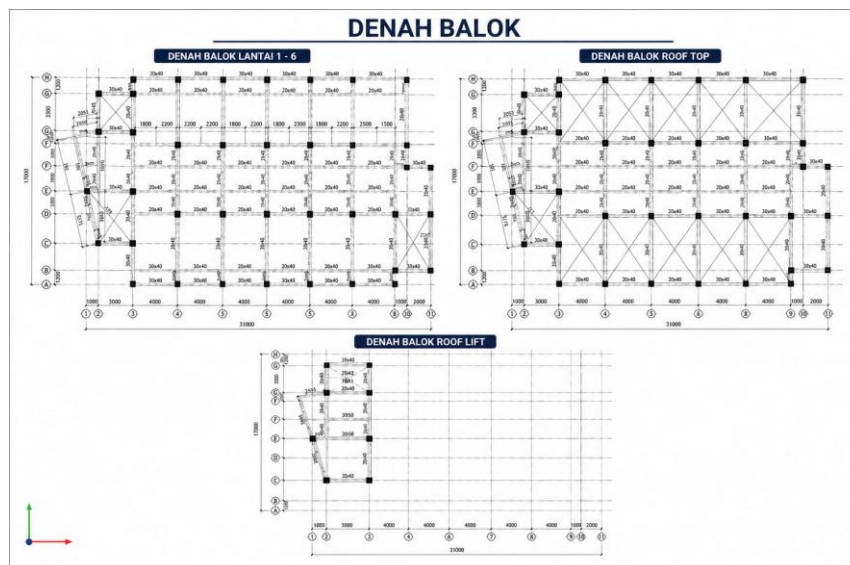
Objek evaluasi adalah kecukupan desain terhadap standar terkini, bukan kondisi fisik bangunan di lapangan. Seluruh konfigurasi tulangan diambil dari gambar rencana asli. Evaluasi disusun dalam dua tingkat peninjauan yang dibedakan secara tegas. Peninjauan pertama adalah kinerja struktur secara global (kekakuan lateral, stabilitas, dan perilaku dinamik), meliputi ragam getar dan partisipasi massa, simpangan antar tingkat, serta pengaruh P-delta menurut SNI 1726-2019. Peninjauan kedua adalah kapasitas dan pendetailan elemen struktur terhadap ketentuan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) SNI 2847-2019. Perbedaan ini penting karena kedua tingkat memiliki implikasi berbeda terhadap kesimpulan: kinerja global mencerminkan kecukupan sistem struktur menahan gaya gempa secara keseluruhan, sedangkan kapasitas elemen mencerminkan kecukupan tiap komponen memikul gaya dalam dan memenuhi persyaratan kedaktailan.

#### 4.1.1 Desain Geometri Model Existing

Seluruh dimensi elemen struktur dimodelkan pada ETABS sesuai dengan gambar DED yang diperoleh dari PT. ACE Engineering and Construction. Konfigurasi elemen disajikan pada **Gambar 4.1** untuk denah kolom dan **Gambar 4.2** untuk denah balok berikut:



**Gambar 4.1** Denah Kolom Struktur Existing  
Sumber: PT. ACE Engineering and Construction



**Gambar 4.2** Denah Balok Struktur Existing  
Sumber: PT. ACE Engineering and Construction

Detail konfigurasi tulangan pada masing-masing elemen struktur existing ditampilkan secara rinci pada **Tabel 4.1** berikut: `

**Tabel 4.1** Konfigurasi Tulangan Elemen Struktur Eksisting

| Elemen                | Dimensi<br>(mm) | Tul.<br>Longitudinal | Sengkang<br>Tumpuan | Sengkang<br>Lapangan |
|-----------------------|-----------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| <p>Balok Induk B1</p> | 300 × 500       | 4D19                 | 2D10–150            | 2D10–200             |
| <p>Balok Induk B2</p> | 300 × 400       | 3D19                 | 2D10–150            | 2D10–200             |
| <p>Balok Anak B3</p>  | 200 × 400       | 2D16                 | 2D10–150            | 2D10–200             |

| Elemen               | Dimensi<br>(mm) | Tul.<br>Longitudinal | Sengkang<br>Tumpuan | Sengkang<br>Lapangan |
|----------------------|-----------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| <p>Balok Anak B4</p> | 200 × 300       | 2D16                 | 2D10-150            | 2D10-200             |
| <p>Kolom K1</p>      | 450 × 650       | 16D19                | 4D10-100            | 4D10-100             |
| <p>Kolom K2</p>      | 450 × 450       | 12D19                | 4D10-100            | 2D10-100             |

Sumber: PT. ACE Engineering and Construction

#### 4.1.2 Kontrol Kinerja Struktur

Kontrol kinerja global dilakukan terhadap hasil analisis ETABS mengacu pada SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1 (analisis ragam), Pasal 7.8.6 (penentuan simpangan), Pasal 7.12.1 (batas simpangan), dan Pasal 7.8.7 (pengaruh P-delta). Sesuai fokus pada struktur tipikal, tingkat 7 (atap) tidak ditinjau pada kontrol simpangan dan P-delta karena perpindahan pada tingkat tersebut merupakan artefak model bernilai tidak wajar; peninjauan dilakukan pada tingkat 1 hingga 6.

### 1. Ragam Getar dan Partisipasi Massa

Analisis ragam menggunakan 40 ragam getar. Tiga ragam pertama merepresentasikan perilaku dinamik dominan: ragam 1 ( $T = 1,107$  detik) merupakan translasi arah X dengan partisipasi massa  $U_X = 0,773$ ; ragam 2 ( $T = 0,982$  detik) merupakan translasi arah Y dengan  $U_Y = 0,754$ ; ragam 3 ( $T = 0,876$  detik) merupakan rotasi (torsi) dengan  $R_Z = 0,740$ . Dua ragam translasi mendahului ragam rotasi, menunjukkan perilaku dinamik yang teratur, dengan periode fundamental arah X lebih besar daripada arah Y ( $T_X = 1,107$  detik  $>$   $T_Y = 0,982$  detik) yang konsisten terhadap kekakuan lateral arah X yang lebih rendah. Adapun rekapitulasi hasil analisis ragam yang ditunjukkan pada **Tabel 4.2** berikut:

**Tabel 4.2** Ragam Getar dan Partisipasi Massa Kumulatif Struktur Eksisting

| Ragam | T (detik) | UX     | UY     | RZ     | $\Sigma UX$ | $\Sigma UY$ |
|-------|-----------|--------|--------|--------|-------------|-------------|
| 1     | 1,107     | 0,7732 | 0,0006 | 0,0238 | 0,7732      | 0,0006      |
| 2     | 0,982     | 0,0028 | 0,7541 | 0,0299 | 0,7760      | 0,7547      |
| 3     | 0,876     | 0,0215 | 0,0307 | 0,7405 | 0,7975      | 0,7853      |
| 4     | 0,350     | 0,1032 | 0,0000 | 0,0019 | 0,9007      | 0,7853      |
| 5     | 0,303     | 0,0007 | 0,0768 | 0,0285 | 0,9014      | 0,8622      |
| 6     | 0,275     | 0,0009 | 0,0373 | 0,0743 | 0,9023      | 0,8994      |
| 7     | 0,213     | 0,0293 | 0,0000 | 0,0000 | 0,9316      | 0,8994      |
| 8     | 0,183     | 0,0008 | 0,0090 | 0,0239 | 0,9324      | 0,9084      |

Partisipasi massa kumulatif melampaui 90% pada ragam ke-4 untuk arah X ( $\Sigma U_X = 0,901$ ) dan ragam ke-8 untuk arah Y ( $\Sigma U_Y = 0,908$ ). Dengan 40 ragam, partisipasi massa akhir mencapai 99,99% pada kedua arah. Jumlah ragam memenuhi persyaratan partisipasi massa minimum 90% menurut SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1.1.

## 2. Kontrol Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar tingkat merupakan selisih perpindahan lateral antara dua tingkat berurutan dan menjadi indikator kinerja struktur terhadap beban gempa. Simpangan elastis  $\delta_{xe}$  dari analisis ETABS diperbesar dengan faktor amplifikasi defleksi menurut SNI 1726-2019, dengan  $C_d = 5,5$  dan  $I_e = 1,0$  menggunakan rumus 31 sebagai berikut:

$$\delta_x = \frac{C_d \cdot \delta_{xe}}{I_e} \quad (31)$$

Sebagai contoh, untuk tingkat 2 (simpangan elastis antar tingkat terbesar), dengan  $\delta_{eX} = 7,715$  mm:

$$\Delta_X = \frac{C_d \cdot \delta_{eX}}{I_e} = \frac{5,5 \times 7,715}{1,0} = 42,433 \text{ mm}$$

$$\Delta_Y = \frac{C_d \cdot \delta_{eY}}{I_e} = \frac{5,5 \times 6,723}{1,0} = 36,977 \text{ mm}$$

Batas simpangan antar tingkat izin untuk kategori risiko II ditentukan dengan rumus 33 menurut SNI 1726-2019. Untuk tingkat 2 ( $h_{sx} = 3.300$  mm) :

$$\Delta_a = 0,020 \cdot h_{sx} \text{ (Kategori Risiko I dan II)} \quad (33)$$

$$\Delta_a = 0,020 \cdot h_{sx} = 0,020 \times 3.300 = 66,000 \text{ mm}$$

Batas simpangan untuk KDS D dibagi faktor redundansi  $\rho = 1,3$  sebagai batas pembanding konservatif:

$$\frac{\Delta_a}{\rho} = \frac{66,000}{1,3} = 50,769 \text{ mm}$$

Struktur memenuhi persyaratan simpangan apabila rasio simpangan terhadap batas kurang dari 1,0. Untuk tingkat 2:

$$\frac{\Delta_X}{\frac{\Delta_a}{\rho}} = \frac{42,433}{50,769} = 0,836$$

$$\frac{\Delta_Y}{\frac{\Delta_a}{\rho}} = \frac{36,977}{50,769} = 0,728$$

Nilai simpangan diperbesar dan rasio per tingkat disajikan pada **Tabel 4.3**. Batas  $\Delta_a/\rho = 51,538$  mm untuk tingkat 6 ( $h_{sx} = 3.350$  mm) dan 50,769 mm untuk tingkat 1–5 sebagai berikut:

**Tabel 4.3** Kontrol Simpangan Antar Tingkat Struktur Eksisting

| Tingkat | $\Delta X$ (mm) | $\Delta Y$ (mm) | $\Delta_a/\rho$ (mm) | Status    |
|---------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------|
| 6       | 17,980          | 17,413          | 51,538               | <b>OK</b> |
| 5       | 26,603          | 25,514          | 50,769               | <b>OK</b> |
| 4       | 35,866          | 33,704          | 50,769               | <b>OK</b> |
| 3       | 42,410          | 38,836          | 50,769               | <b>OK</b> |
| 2       | 42,433          | 36,977          | 50,769               | <b>OK</b> |
| 1       | 23,881          | 19,101          | 50,769               | <b>OK</b> |

Seluruh simpangan pada tingkat 1 hingga 6 kurang dari batas  $\Delta_a/\rho$  yang merupakan batas izin SNI 1726-2019 dan dinyatakan dalam status “**OK**”.

### 3. Kontrol P-Delta (Koefisien Stabilitas $\theta$ )

Pengaruh P-delta merupakan efek orde kedua akibat beban gravitasi pada struktur dalam kondisi tersimpangkan. Signifikansi efek diukur melalui koefisien stabilitas  $\theta$ ; apabila  $\theta$  tidak melampaui batas, pengaruh P-delta boleh diabaikan. Koefisien stabilitas dihitung dengan SNI 1726-2019 sebagai rumus 37 berikut:

$$\theta = \frac{P_x \cdot \Delta_x \cdot I_e}{V_x \cdot h_{sx} \cdot C_d} \quad (37)$$

Untuk tingkat 2, dengan beban gravitasi total di atas tingkat  $P_x = 36.965,258$  kN dan  $h_{sx} = 3.300$  mm:

$$\theta_x = \frac{36.965,258 \times 42,433 \times 1,0}{1.340,362 \times 3.300 \times 5,5} = 0,0645$$

$$\theta_y = \frac{36.965,258 \times 36,977 \times 1,0}{1.519,045 \times 3.300 \times 5,5} = 0,0496$$

Batas koefisien stabilitas dihitung dengan SNI 1726-2019 dihitung menggunakan rumus 38, dengan  $\beta = 1,0$ :

$$\theta_{\max} = \frac{0,5}{\beta \cdot C_d} \leq 0,25 \quad (38)$$

$$\theta_{maks} = \frac{0,5}{\beta \cdot C_d} = \frac{0,5}{1,0 \times 5,5} = 0,091 \leq 0,25$$

Rekapitulasi nilai  $\theta$  per tingkat disajikan pada **Tabel 4.4** berikut:

**Tabel 4.4** Kontrol P-Delta Struktur Eksisting

| Tingkat | $\theta_X$ | $\theta_Y$ | $\theta_{maks}$ | Status    |
|---------|------------|------------|-----------------|-----------|
| 6       | 0,0149     | 0,0127     | 0,091           | <b>OK</b> |
| 5       | 0,0278     | 0,0234     | 0,091           | <b>OK</b> |
| 4       | 0,0427     | 0,0350     | 0,091           | <b>OK</b> |
| 3       | 0,0567     | 0,0455     | 0,091           | <b>OK</b> |
| 2       | 0,0645     | 0,0496     | 0,091           | <b>OK</b> |
| 1       | 0,0421     | 0,0299     | 0,091           | <b>OK</b> |

Seluruh nilai koefisien stabilitas pada tingkat 1 hingga 6 kurang dari  $\theta_{maks} = 0,091$ , dengan nilai terbesar 0,0645 pada tingkat 2 arah X. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh P-delta pada struktur eksisting dinyatakan aman dengan status “**OK**”.

Ketiga aspek kinerja global, ragam getar dan partisipasi massa, simpangan antar tingkat, serta pengaruh P-delta memenuhi persyaratan SNI 1726-2019. Partisipasi massa terpenuhi dengan perilaku dinamik teratur (translasi mendahului rotasi), simpangan antar tingkat memenuhi batas izin (rasio maksimum 0,836), dan pengaruh P-delta tidak signifikan ( $\theta$  maksimum 0,0645). Dari aspek kekakuan lateral dan stabilitas, struktur eksisting memenuhi persyaratan kinerja seismik global.

#### 4.1.3 Evaluasi Kapasitas Elemen Struktur

Evaluasi elemen dikelompokkan menurut jenis kapasitas dan ketentuan yang ditinjau, memisahkan dua aspek peninjauan: aspek kapasitas (kuat rencana penampang terhadap gaya dalam rencana - lentur, geser, torsi, *joint*) dan aspek *detailing* (pemenuhan ketentuan pendetailan kedaktailan SRPMK - spasi sengkang, luas pengekangan). Konsekuensi perbaikan kedua sumbu berbeda: ketidakcukupan kapasitas ditangani melalui penambahan luas tulangan atau perubahan dimensi, sedangkan ketidakpemenuhan *detailing* ditangani melalui penyesuaian tata letak tulangan transversal.

##### 1. Kapasitas Lentur Balok

Kapasitas lentur nominal dihitung dengan rumus 115 sesuai SNI 2847-2019 berikut:

$$M_n = A_{\{s,pasang\}} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) ; \phi \cdot M_n \geq M_u \quad (115)$$

Peninjauan dilakukan pada tumpuan negatif (lokasi momen terbesar). Sebagai contoh untuk B1 ( $A_s$  terpasang 4D19 = 1.134,115 mm<sup>2</sup>):

$$\phi M_n = 0,9 \times 196,791 = 177,112 \text{ kN}\cdot\text{m} < M_u = 214,529 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

sehingga kapasitas lentur tidak terpenuhi, dengan  $A_{s,perlu} = 1.403,916 \text{ mm}^2$  melampaui terpasang. Hasil seluruh balok disajikan pada **Tabel 4.5** berikut:

**Tabel 4.5** Evaluasi Kapasitas Lentur Tumpuan Negatif

| Elemen | $A_s$<br>terpasang<br>(mm <sup>2</sup> ) | $A_s$ perlu<br>(mm <sup>2</sup> ) | $\phi M_n$<br>(kN·m) | $M_u$<br>(kN·m) | Rasio<br>$M_u/\phi M_n$ | Status            |
|--------|------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
| B1     | 1.134,115                                | 1.403,916                         | 177,112              | 214,529         | 1,211                   | <b>NOT<br/>OK</b> |
| B2     | 850,586                                  | 970,016                           | 103,685              | 116,800         | 1,127                   | <b>NOT<br/>OK</b> |

| Elemen | As<br>terpasang<br>(mm <sup>2</sup> ) | As perlu<br>(mm <sup>2</sup> ) | $\phi M_n$<br>(kN·m) | Mu<br>(kN·m) | Rasio<br>Mu/ $\phi M_n$ | Status            |
|--------|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|-------------------|
| B3     | 402,124                               | 540,263                        | 50,485               | 75,364       | 1,493                   | <b>NOT<br/>OK</b> |
| B4     | 402,124                               | 86,768                         | 35,284               | 8,459        | 0,240                   | <b>OK</b>         |

Kapasitas lentur tidak terpenuhi pada tiga dari empat balok, dengan rasio  $M_u/\phi M_n$  antara 1,127 dan 1,493 yang dinyatakan dengan status “**NOT OK**”. Rasio tertinggi terjadi pada B3 (1,493), sedangkan B4 memenuhi dengan rasio 0,240 karena momen rencana yang dipikulnya kecil. Pada balok yang tidak memenuhi, luas tulangan tarik terpasang lebih kecil daripada luas tulangan perlu terhadap momen rencana.

## 2. Kapasitas Geser Balok

Kapasitas geser ditinjau terpisah pada zona tumpuan (sendi plastis) dan lapangan. Gaya geser rencana kedua zona berasal dari basis berbeda. Pada zona tumpuan, gaya geser rencana adalah geser desain kapasitas  $V_e$  menurut Ps. 18.6.5.1 yang disajikan pada rumus 116 dan rumus 118 berikut:

$$M_{pr} = A_{\{s,pasang\}} \cdot 1,25f_y \cdot \left(d - \frac{a_{pr}}{2}\right) \quad (116)$$

$$V_e = \frac{M_{\{pr,kiri\}} + M_{\{pr,kanan\}}}{l_n} \pm \frac{w_u \cdot l_n}{2} \quad (118)$$

Nilai  $V_e$  ditentukan oleh kuat lentur terpasang balok (melalui  $M_{pr}$ ), bukan oleh besar gaya gempa hasil analisis. Pada zona lapangan, gaya geser rencana  $V_u$  diambil langsung dari kombinasi beban terfaktor hasil analisis ETABS.

Pada zona sendi plastis, kontribusi beton diambil nol ( $V_c = 0$ ) bila  $V_{pr} \geq 1/2 V_e$  dan  $P_u < A_g f'_c / 20$  (Ps. 18.6.5.2), sehingga mengikuti persamaan 121, persamaan 122, dan persamaan 123 berikut:

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d; \quad (121)$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yw} \cdot d}{s}; V_{\{s, \max\}} = 0,66 \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (122)$$

$$\phi(V_c + V_s) \geq V_u \quad (\phi = 0,75) \quad (123)$$

Berikut disajikan hasil evaluasi kapasitas geser balok existing yang terdapat pada **Tabel 4.6** berikut:

**Tabel 4.6** Evaluasi Kapasitas Geser Per Zona

| Elemen | Zona     | Vc (kN) | $\phi V_n$<br>(kN) | Vu/Ve<br>(kN) | Rasio<br>$\phi V_n / V_u$ | Status            |
|--------|----------|---------|--------------------|---------------|---------------------------|-------------------|
| B1     | Tumpuan  | 114,878 | 234,763            | 257,171       | 0,913                     | <b>NOT<br/>OK</b> |
| B1     | Lapangan | 114,878 | 197,612            | 317,552       | 0,622                     | <b>NOT<br/>OK</b> |
| B2     | Tumpuan  | 89,378  | 182,652            | 192,933       | 0,947                     | <b>NOT<br/>OK</b> |
| B2     | Lapangan | 89,378  | 153,747            | 143,079       | 1,075                     | <b>OK</b>         |
| B3     | Tumpuan  | 59,840  | 160,993            | 83,134        | 1,937                     | <b>OK</b>         |
| B3     | Lapangan | 59,840  | 131,965            | 83,134        | 1,587                     | <b>OK</b>         |
| B4     | Tumpuan  | 42,840  | 115,257            | 17,313        | 6,657                     | <b>OK</b>         |
| B4     | Lapangan | 42,840  | 94,475             | 17,313        | 5,457                     | <b>OK</b>         |

Status “**NOT OK**” menunjukkan kapasitas geser tidak terpenuhi pada balok induk B1 (kedua zona) dan B2 (zona tumpuan), dengan rasio  $\phi V_n / V_u$  antara 0,622 dan 0,947. Balok anak B3 dan B4 memenuhi kapasitas geser pada kedua zona dengan rasio 1,587 hingga 6,657.

### 3. Interaksi Torsi Balok

Interaksi geser–torsi dan lentur–torsi ditinjau menurut Ps. 22.7. Pada seluruh balok, torsi tergolong torsi kompatibilitas dan cek dimensi penampang terpenuhi; interaksi pada zona tertentu tidak terpenuhi. Hasil evaluasi interaksi torsi disajikan pada **Tabel 4.7** berikut:

**Tabel 4.7** Evaluasi Interaksi Torsi

| Elemen | Cek     | Geser+Torsi | Geser+Torsi | Lentur+Torsi | Lentur+Torsi |
|--------|---------|-------------|-------------|--------------|--------------|
|        | Dimensi | Tump.       | Lap.        | Tump.        | Lap.         |
| B1     | OK      | NOT OK      | NOT OK      | NOT OK       | OK           |
| B2     | OK      | NOT OK      | OK          | NOT OK       | OK           |
| B3     | OK      | OK          | OK          | NOT OK       | OK           |
| B4     | OK      | OK          | OK          | OK           | OK           |

Tidak memenuhinya interaksi torsi terkonsentrasi pada zona tumpuan balok induk (B1 dan B2), sebagian pada balok anak B3, dan memenuhi pada B4. Status “OK” pada lembar Kesimpulan merujuk pada pemeriksaan dimensi penampang torsi; pemeriksaan interaksi geser–torsi dan lentur–torsi merupakan peninjauan tersendiri yang tidak terpenuhi pada sebagian zona.

### 4. Kapasitas dan Pendetailan Kolom

Kolom K1 dan K2 memenuhi kapasitas lentur, rasio tulangan longitudinal ( $\rho = 1,55\%$  untuk K1, dalam rentang  $1\% - 6\%$ ), syarat kolom kuat–balok lemah (SCWB), dan kapasitas geser terhadap  $V_s$  perlu. Ketidakpemuhan terjadi pada luas pengekangan minimum zona sendi plastis (Ps. 18.7.5.1) dengan mengacu pada persamaan 166 dan persamaan 167 dengan hasil sebagai berikut:

$$\left(\frac{A_{sh}}{s}\right)_{min} = 3,142 > \left(\frac{A_{sh}}{s}\right)_{terpasang} = 3,054$$

Hasil evaluasi pengekgangan kolom disajikan pada **Tabel 4.8** berikut:

**Tabel 4.8** Evaluasi Luas Pengekgangan Kolom

| Kolom | (Ash/s) min | (Ash/s) terpasang | Status pengekgangan           |
|-------|-------------|-------------------|-------------------------------|
| K1    | 3,142       | 3,054             | <b>NOT OK</b><br>(rasio 1,03) |
| K2    | 3,142       | 3,054             | <b>NOT OK</b><br>(rasio 1,03) |

Status pengekgangan “**NOT OK**” pada kolom menunjukan rasio dari nilai  $(A_{sh}/s)_{min}$  terhadap  $(A_{sh}/s)_{terpasang}$  yang lebih dari 1,00 yang mengindikasikan kapasitas  $(A_{sh}/s)_{terpasang}$  belum mencapai  $(A_{sh}/s)_{min}$  sebagai batas minimum.

## 5. Kuat Geser Hubungan Balok–Kolom (Joint)

Kuat geser joint dihitung dengan SNI 2847-2019 Ps. 18.8.4.1 ditinjau pada kedua arah gempa yang mengacu pada rumus 203. Hasil evaluasi kuat geser joint disajikan pada **Tabel 4.9** berikut:

$$V_{nx} = c \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_{jx} ; \phi \cdot V_n \geq V_{\{u,joint\}} \quad (\phi = 0,85) \quad (203)$$

**Tabel 4.9** Evaluasi Kuat Geser Joint

| Joint | Arah | $\phi V_n$ (kN) | $V_u$ (kN) | Rasio $\phi V_n/V_u$ | Status    |
|-------|------|-----------------|------------|----------------------|-----------|
| K1    | X    | 860,625         | 761,481    | 1,130                | <b>OK</b> |
| K1    | Y    | 1795,625        | 977,756    | 1,836                | <b>OK</b> |
| K2    | X    | 860,625         | 766,020    | 1,124                | <b>OK</b> |
| K2    | Y    | 860,625         | 766,020    | 1,124                | <b>OK</b> |

Kuat geser joint untuk K1 dan K2 terpenuhi pada kedua arah dengan status

“OK” yang menunjukkan  $\phi V_n > V_u$ .

#### 4.1.4 Justifikasi Perencanaan Ulang

Rekapitulasi hasil evaluasi disajikan pada dua aspek. **Tabel 4.10** merangkum kontrol kinerja struktur yang disajikan sebagai berikut:

**Tabel 4.10** Rekapitulasi Kinerja Global Struktur Eksisting

| Aspek Kinerja           | Parameter Kritis                      | Syarat      |
|-------------------------|---------------------------------------|-------------|
| Partisipasi massa       | $\Sigma U_X, \Sigma U_Y$ akhir 99,99% | $\geq 90\%$ |
| Simpangan antar tingkat | rasio maks 0,836 (tingkat 2, X)       | $< 1,0$     |
| P-delta                 | $\theta$ maks 0,0645 (tingkat 2, X)   | $< 0,091$   |

Dan **Tabel 4.11** merangkum kapasitas dan pendetailan elemen yang disajikan sebagai berikut:

**Tabel 4.11** Rekapitulasi Kapasitas dan Pendetailan Elemen

| Elemen        | Lentur               | Geser                | Torsi                | Joint | Spasi               | Pengekangan |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|---------------------|-------------|
| B1<br>300×500 | <b>NOT</b>           | <b>NOT</b>           | <b>NOT</b>           | —     | <b>NOT</b>          | —           |
|               | <b>OK</b><br>(1,211) | <b>OK</b><br>(0,622) | <b>OK</b>            |       | <b>OK</b>           |             |
| B2<br>300×400 | <b>NOT</b>           | <b>NOT</b>           | <b>NOT</b>           | —     | <b>NOT</b>          | —           |
|               | <b>OK</b><br>(1,127) | <b>OK</b><br>(tump.) | <b>OK</b><br>(tump.) |       | <b>OK</b>           |             |
| B3<br>200×400 | <b>NOT</b>           | <b>OK</b>            | <b>NOT</b>           | —     | <b>NOT</b>          | —           |
|               | <b>OK</b><br>(1,493) | (1,59—<br>1,94)      | <b>OK</b><br>(tump.) |       | <b>OK</b><br>(lap.) |             |
| B4<br>200×300 | <b>OK</b>            | <b>OK</b>            | <b>OK</b>            | —     | <b>NOT</b>          | —           |
|               | (0,240)              | (5,46—<br>6,66)      |                      |       | <b>OK</b>           |             |

| Elemen        | Lentur    | Geser                  | Torsi | Joint                | Spasi              | Pengekangan             |
|---------------|-----------|------------------------|-------|----------------------|--------------------|-------------------------|
| K1<br>450×650 | <b>OK</b> | <b>OK</b><br>(thd. Vs) | —     | <b>OK</b><br>(1,130) | <b>OK</b>          | <b>NOT OK</b><br>(1,03) |
| K2<br>450×450 | <b>OK</b> | <b>OK</b><br>(thd. Vs) | —     | <b>OK</b><br>(1,124) | <b>NOT OK lap.</b> | <b>NOT OK</b><br>(1,03) |

Catatan:

Angka dalam kurung: rasio  $Mu/\phi Mn$  (lentur) atau  $\phi Vn/Vu$  (geser/joint).

Hasil evaluasi menunjukkan perbedaan capaian antara aspek kinerja global dan aspek kapasitas - pendetailan elemen struktur. Pada aspek kinerja global, seluruh parameter yang ditinjau - partisipasi massa, simpangan antar tingkat, dan pengaruh P-delta - memenuhi persyaratan SNI 1726-2019, yang mengindikasikan bahwa struktur eksisting memiliki kekakuan lateral dan stabilitas yang memadai terhadap beban gempa rencana.

Pada aspek kapasitas dan pendetailan elemen, evaluasi terhadap SNI 2847-2019 mengungkap sejumlah ketidaksesuaian yang ditunjukkan pada status "**NOT OK**" dapat dikelompokkan menjadi dua kategori dengan implikasi berbeda. Pertama, ketidakcukupan kapasitas ditemukan pada balok induk B1 dan B2 (lentur dan geser) serta balok B3 (lentur), sementara balok anak justru menunjukkan kapasitas geser yang melebihi kebutuhan; interaksi torsi juga tidak terpenuhi pada zona tumpuan B1, B2, dan B3. Ketidaksesuaian pada kolom hanya terjadi pada pendetailan, yang bersifat tata letak tulangan. Seluruh balok tidak memenuhi ketentuan spasi sengkang, sedangkan kolom K1 dan K2 tidak memenuhi ketentuan luas pengekangan. Perbedaan mendasar antara kedua kategori ini terletak pada basis acuan evaluasinya: ketidakcukupan kapasitas lentur dan geser ditinjau terhadap gaya dalam rencana hasil analisis ETABS sesuai SNI 1726-2019 dan SNI 1727-2020, sedangkan ketidaksesuaian spasi sengkang dan pengekangan ditinjau langsung terhadap ketentuan pendetailan SNI 2847-2019.

Berdasarkan kedua aspek peninjauan, justifikasi teknis bagi perencanaan ulang bertumpu pada ketidaksesuaian kapasitas dan pendetailan elemen struktur terhadap ketentuan SNI 2847-2019. Kebutuhan penyesuaian yang diidentifikasi bersifat

spesifik untuk masing-masing elemen: pada balok induk B1 dan B2, diperlukan penambahan tulangan lentur, penyesuaian tulangan geser di zona sendi plastis, serta penyesuaian spasi sengkang; pada balok anak, B3 memerlukan penambahan tulangan lentur disertai penyesuaian spasi, sementara B4 hanya memerlukan penyesuaian spasi; pada kolom, K1 dan K2 memerlukan penambahan luas tulangan pengekangan di zona sendi plastis. Ketidakpenuhan elemen ini menjadikan perencanaan ulang sebagai keharusan teknis, yang sekaligus menjadi basis kajian pengaruh variasi mutu beton terhadap *embodied carbon* pada bangunan yang diteliti.

## **4.2 Preliminary Design**

*Preliminary design* merupakan tahap penentuan dimensi awal komponen struktur (balok, kolom, dan pelat) sebelum analisis struktur penuh dilakukan. Dimensi awal ini berperan penting karena menjadi masukan bagi pemodelan struktur tiga dimensi pada ETABS, sekaligus mempengaruhi distribusi kekakuan, periode getar alami, dan gaya dalam yang dihasilkan. Penetapan dimensi mengacu pada ketentuan SNI 2847-2019, dengan mempertimbangkan persyaratan geometri Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Pada penelitian ini, dimensi awal ditetapkan untuk tiga variasi mutu beton ( $f'_c = 25, 30, \text{ dan } 35 \text{ MPa}$ ) guna mengkaji pengaruh mutu beton terhadap optimasi dimensi dan *embodied carbon*.

### **4.2.1 Preliminary Design Balok**

Balok merupakan komponen struktur horizontal yang memikul beban gravitasi dari pelat dan meneruskannya ke kolom melalui mekanisme lentur dan geser. Pada sistem SRPMK, balok juga berperan sebagai lokasi terbentuknya sendi plastis saat gempa kuat, sehingga dimensinya harus memenuhi persyaratan daktilitas. Penentuan tinggi minimum balok nonprategang mengacu pada SNI 2847-2019 Tabel 9.3.1.1 untuk mengendalikan lendutan, sedangkan persyaratan lebar minimum penampang mengacu pada SNI 2847-2019 Pasal 18.6.2.1 untuk komponen lentur SRPMK.

### Contoh Perhitungan - Balok Induk B1 ( $f'_c$ 25 MPa)

#### 1. Data Perencanaan

|                                          |                  |
|------------------------------------------|------------------|
| Panjang balok (as-ke-as), $L$            | = 6000 mm        |
| Dimensi kolom searah bentang, $c_1$      | = 600 mm         |
| Dimensi kolom tegak lurus bentang, $c_2$ | = 500 mm         |
| Kuat tekan beton, $f'_c$                 | = 25 MPa         |
| Kuat leleh tulangan, $f_y$               | = 420 MPa        |
| Selimut beton bersih, $cc$               | = 30 mm          |
| Diameter tulangan Sengkang, $d_s$        | = 10 mm          |
| Diameter tulangan longitudinal, $d_b$    | = 19 mm          |
| Kondisi tumpuan                          | = Menerus 2 sisi |

#### 2. Penentuan Bentang Bersih ( $l_n$ )

Bentang bersih  $l_n$  dihitung dari muka kolom ke muka kolom, dengan mengurangi setengah dimensi kolom di masing-masing ujung (SNI 2847-2019, Pasal 9.3.1.1 dan R18.6.2.1)

$$l_n = L - c_1$$

$$l_n = 6000 - 600$$

$$l_n = 5400 \text{ mm}$$

#### 3. Tinggi Minimum Balok (SNI 2847-2019 Tabel 9.3.1.1)

Ketentuan tinggi minimum balok nonprategang untuk mengendalikan lendutan (SNI 2847-2019 Tabel 9.3.1.1) yang mengacu pada **Tabel 2.54** syarat geometri balok.

Digunakan pendekatan  $h_{min} = L / 16$  (untuk kondisi perletakan sederhana):

$$h_{min} = \frac{L}{16} = \frac{6000}{16} = 375 \text{ mm}$$

Diambil tinggi balok  $h = 500 \text{ mm} \geq h_{min} = 375 \text{ mm} \rightarrow$  **MEMENUHI**.

#### 4. Lebar Minimum bw (SNI 2847-2019 Pasal 18.6.2.1)

Untuk sistem SRPMK, persyaratan lebar minimum penampang balok diambil nilai terbesar dari dua syarat. SNI 2847-2019 Pasal 18.6.2.1 mensyaratkan:

$$bw \geq \max (0,3 \times h; 250 \text{ mm})$$

$$bw \geq \max (0,3 \times 500; 250 \text{ mm})$$

$$bw \geq \max (150 \text{ mm}; 250 \text{ mm})$$

$$bw \geq 250 \text{ mm}$$

$$bw, \text{ min} = 250 \text{ mm}$$

Diambil lebar balok  $b = 300 \text{ mm} \geq bw, \text{ min} = 250 \text{ mm} \rightarrow \text{MEMENUHI}$ .

#### 5. Tinggi Efektif Penampang (d)

Tinggi efektif d dihitung pada persamaan 107 berikut:

$$d = h - c_c - d_s - \frac{d_b}{2} \quad (107)$$

$$d = 500 - 30 - 10 - \frac{19}{2}$$

$$d = 450,5 \text{ mm}$$

#### 6. Kontrol Bentang Bersih

SNI 2847-2019 Pasal 18.6.2.1 mensyaratkan panjang bentang bersih tidak kurang dari empat kali tinggi efektif balok yang dihitung sebagai berikut.

$$\text{Syarat: } l_n \geq 4d$$

$$4d = 4 \times 450,5 = 1802 \text{ mm}$$

$$l_n = 5400 \text{ mm}$$

$$l_n = 5400 \text{ mm} \geq 4d = 1802 \text{ mm} \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

#### 7. Kontrol Proyeksi Lebar Balok Melampaui Kolom

Proyeksi lebar balok yang melampaui lebar kolom pada masing-masing sisi tidak boleh melebihi min ( $c_2$ ;  $0,75c_1$ ). Persyaratan ini bertujuan agar beton di luar kolom tidak menjadi tidak terkekang saat gempa terjadi yang dihitung sebagai berikut:

$$b \leq c_2 + 2 \times \min(c_2; 0,75c_1)$$

$$\text{Batas} = \min(c_2; 0,75 \times c_1) = \min(500; 450) = 450\text{mm}$$

$$\text{Proyeksi} = 300 \leq 500 + 2 \times 450\text{mm}$$

$$\text{Proyeksi} = 300 \leq 1400\text{mm} \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

Dimensi balok induk **B1 f'c 25 MPa = 300 × 500 mm**. Prosedur yang sama diterapkan pada seluruh tipe balok untuk ketiga variasi mutu beton, yang direkapitulasi pada **Tabel 4.12** berikut:

**Tabel 4.12** Rekapitulasi *Preliminary Design* Balok

| Nama                                                  | Status           | L<br>(mm) | h min<br>(mm) | h pakai<br>(mm) | b<br>min<br>(mm) | b<br>pakai<br>(mm) | Dimensi<br>(mm) |
|-------------------------------------------------------|------------------|-----------|---------------|-----------------|------------------|--------------------|-----------------|
| <b><i>Preliminary Design Balok (f'c = 25 MPa)</i></b> |                  |           |               |                 |                  |                    |                 |
| B1                                                    | Balok Induk      | 6000      | 375,00        | 500             | 250              | 300                | <b>300×500</b>  |
| B2                                                    | Balok Induk      | 4.000     | 250,00        | 400             | 250              | 300                | <b>300×400</b>  |
| B3                                                    | Balok Anak       | 4.000     | 250,00        | 400             | -                | 200                | <b>200×400</b>  |
| B4                                                    | Balok Anak       | 2.000     | 125,00        | 300             | -                | 200                | <b>200×300</b>  |
| BB                                                    | Balok<br>Bordes  | 3.000     | 187,50        | 350             | -                | 250                | <b>250×350</b>  |
| RBL                                                   | Balok Lift       | 3.000     | 187,50        | 300             | -                | 200                | <b>200×300</b>  |
| BAT1                                                  | Balok<br>Praktis | 5.500     | -             | 300             | -                | 200                | <b>200×300</b>  |
| BAT2                                                  | Balok<br>Praktis | 4.000     | -             | 300             | -                | 150                | <b>150×300</b>  |
| <b><i>Preliminary Design Balok (f'c = 30 MPa)</i></b> |                  |           |               |                 |                  |                    |                 |
| B1                                                    | Balok Induk      | 6000      | 375,00        | 450             | 250              | 300                | <b>300×450</b>  |
| B2                                                    | Balok Induk      | 4.000     | 250,00        | 350             | 250              | 300                | <b>300×350</b>  |
| B3                                                    | Balok Anak       | 4.000     | 250,00        | 300             | -                | 200                | <b>200×300</b>  |
| B4                                                    | Balok Anak       | 2.000     | 125,00        | 250             | -                | 200                | <b>200×250</b>  |

|                                                              |               |       |        |     |     |     |                |
|--------------------------------------------------------------|---------------|-------|--------|-----|-----|-----|----------------|
| BB                                                           | Balok Bordes  | 3.000 | 187,50 | 300 | -   | 200 | <b>200×300</b> |
| RBL                                                          | Balok Lift    | 3.000 | 187,50 | 300 | -   | 150 | <b>150×300</b> |
| BAT1                                                         | Balok Praktis | 5.500 | -      | 300 | -   | 150 | <b>150×300</b> |
| BAT2                                                         | Balok Praktis | 4.000 | -      | 200 | -   | 150 | <b>150×200</b> |
| <b>Preliminary Design Balok (<math>f'_c = 35</math> MPa)</b> |               |       |        |     |     |     |                |
| B1                                                           | Balok Induk   | 6000  | 375,00 | 400 | 250 | 250 | <b>250×400</b> |
| B2                                                           | Balok Induk   | 4.000 | 250,00 | 350 | 250 | 250 | <b>250×350</b> |
| B3                                                           | Balok Anak    | 4.000 | 250,00 | 350 | -   | 200 | <b>200×350</b> |
| B4                                                           | Balok Anak    | 2.000 | 125,00 | 250 | -   | 200 | <b>200×250</b> |
| BB                                                           | Balok Bordes  | 3.000 | 187,50 | 300 | -   | 200 | <b>200×300</b> |
| RBL                                                          | Balok Lift    | 3.000 | 187,50 | 300 | -   | 200 | <b>200×300</b> |
| BAT1                                                         | Balok Praktis | 5.500 | -      | 300 | -   | 150 | <b>150×300</b> |
| BAT2                                                         | Balok Praktis | 4.000 | -      | 200 | -   | 150 | <b>150×200</b> |

#### 4.2.2 Preliminary Design Kolom

Kolom merupakan komponen struktur vertikal yang memikul kombinasi gaya aksial tekan dan momen lentur dua arah. Pada sistem SRPMK, kolom dirancang berdasarkan filosofi *strong column–weak beam*, yaitu kolom harus lebih kuat daripada balok yang merangka padanya agar mekanisme keruntuhan terjadi pada balok terlebih dahulu (sendi plastis pada balok), mencegah keruntuhan getas tingkat lunak (*soft story*).

Dimensi kolom ditentukan dari persyaratan geometri SRPMK (SNI 2847-2019 Pasal 18.7.2.1) pada tahap desain awal sesuai dengan persamaan 142 sebagai berikut:

$$b \geq 300 \text{ mm} ; \frac{b}{h} \geq 0,4 \quad (142)$$

### Contoh Perhitungan - Kolom K1 ( $f'_c$ 25 MPa)

#### 1. Data Perencanaan

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| Tinggi/panjang kolom (as-ke-as), L | = 3300 mm |
| Sisi panjang kolom, h              | = 600 mm  |
| Sisi pendek kolom, b               | = 500 mm  |
| Kuat tekan beton, $f'_c$           | = 25 MPa  |
| Kuat leleh tulangan, $f_y$         | = 420 MPa |
| Selimut beton bersih, cc           | = 40 mm   |
| Diameter tulangan longitudinal, db | = 19 mm   |
| Diameter tulangan Sengkang, ds     | = 10 mm   |

#### 2. Syarat Geometri SRPMK

SNI 2847-2019 Pasal 18.7.2.1 menetapkan persyaratan geometri minimum untuk kolom SRPMK sebagai berikut:

Syarat (1) - dimensi penampang terkecil:

$$b_{min} = 500 \text{ mm} \geq 300 \text{ mm} \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

Syarat (2) - rasio dimensi penampang:

$$\frac{b_{pendek}}{h_{panjang}} = \frac{500}{600} = 0,833 \geq 0,4 \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

Dimensi kolom K1 = **600 × 500 mm** telah memenuhi seluruh batasan geometri SRPMK.

Prosedur yang sama diterapkan pada seluruh tipe kolom untuk ketiga variasi mutu beton, direkapitulasi pada **Tabel 4.13** berikut:

**Tabel 4.13** Rekapitulasi *Preliminary Design* Kolom

| <b>Tipe</b>                                           | <b>b<br/>(mm)</b> | <b>h<br/>(mm)</b> | <b>b ≥ 300</b>  | <b>b/h ≥<br/>0,4</b> | <b>Dimensi</b> | <b>Keterangan</b> |
|-------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------------|----------------|-------------------|
| <b><i>Preliminary Design Kolom (f'c = 25 MPa)</i></b> |                   |                   |                 |                      |                |                   |
| K1                                                    | 500               | 600               | <b>MEMENUHI</b> | 0,833                | <b>500×600</b> | Kolom struktural  |
| K2                                                    | 500               | 500               | <b>MEMENUHI</b> | 1,000                | <b>500×500</b> | Kolom struktural  |
| KA                                                    | 200               | 200               | -               | 1,000                | <b>200×200</b> | Kolom praktis     |
| <b><i>Preliminary Design Kolom (f'c = 30 MPa)</i></b> |                   |                   |                 |                      |                |                   |
| K1                                                    | 500               | 550               | <b>MEMENUHI</b> | 0,909                | <b>500×550</b> | Kolom struktural  |
| K2                                                    | 450               | 450               | <b>MEMENUHI</b> | 1,00                 | <b>450×450</b> | Kolom struktural  |
| KA                                                    | 150               | 200               | -               | 0,750                | <b>150×200</b> | Kolom praktis     |
| <b><i>Preliminary Design Kolom (f'c = 35 MPa)</i></b> |                   |                   |                 |                      |                |                   |
| K1                                                    | 500               | 500               | <b>MEMENUHI</b> | 1,00                 | <b>500×500</b> | Kolom struktural  |
| K2                                                    | 400               | 400               | <b>MEMENUHI</b> | 1,00                 | <b>400×400</b> | Kolom struktural  |
| KA                                                    | 150               | 200               | -               | 0,750                | <b>150×200</b> | Kolom praktis     |

#### 4.2.3 Preliminary Design Pelat Lantai

Pelat lantai diklasifikasikan menjadi pelat satu arah dan pelat dua arah berdasarkan rasio bentang panjang terhadap bentang pendek (SNI 2847-2019 Pasal 8.1). Apabila rasio bentang  $\leq 2$ , pelat berperilaku dua arah dan beban disalurkan ke keempat sisi tumpuan; apabila  $> 2$ , pelat berperilaku satu arah. Tebal minimum pelat dua arah nonprategang ditentukan berdasarkan rasio kekakuan lentur relatif antara balok dan pelat ( $\alpha_{fm}$ ), sesuai SNI 2847-2019 Tabel 8.3.1.2.

#### Contoh Perhitungan – Pelat S1

##### 1. Data Perencanaan

Bentang arah pendek,  $L_x = 4.000$  mm

Bentang arah panjang,  $L_y = 5.500$  mm

Kuat tekan beton,  $f'_c = 25$  MPa

Kuat leleh tulangan,  $f_y = 420$  MPa

Tebal pelat rencana,  $t = 120$  mm

Selimut beton,  $cc = 20$  mm

Balok penumpu keempat sisi panel (lokasi sudut):  $2 \times B1$  ( $300 \times 500$  mm) pada sisi memanjang (arah Y) dan  $2 \times B2$  ( $300 \times 400$  mm) pada sisi melintang (arah X)

##### 2. Identifikasi Jenis Pelat (SNI 2847-2019 Pasal 8.1):

Dalam mengidentifikasi jenis plat digunakan persamaan 171 sebagai berikut:

$$\frac{L_y}{L_x} \leq 2 \Rightarrow \text{two-way slab} \quad ; \quad \frac{L_y}{L_x} > 2 \Rightarrow \text{one-way slab} \quad (171)$$

$$\frac{L_y}{L_x} = \frac{5.500}{4.000} = 1,375 \leq 2 \rightarrow \text{Pelat Dua Arah}$$

Pada pelat dua arah, tiap panel ditumpu oleh empat balok pada keempat sisinya. Karena rasio kekakuan tiap balok dapat berbeda, rasio kekakuan rata-rata ( $\alpha_{fm}$ ) dihitung dari keempat balok penumpu ( $\alpha_{f1}$ ,  $\alpha_{f2}$ ,  $\alpha_{f3}$ ,  $\alpha_{f4}$ ). Contoh perhitungan

diuraikan pada pelat S1, yang ditumpu dua balok B1 (sisi memanjang) dan dua balok B2 (sisi melintang).

### 3. Lebar Efektif Penampang Balok-T ( $b_e$ ).

Balok dicor monolit dengan pelat, balok berperilaku sebagai penampang T dengan *flens* efektif berupa pelat di kedua sisi badan. Lebar efektif *flens* diukur dari sisi badan sebesar nilai terkecil antara  $(h - t)$  dan  $4t$  pada tiap sisi (SNI 2847-2019 Pasal 8.4.1.8) yang dihitung dengan persamaan berikut:

Balok memanjang B1 ( $h = 500$  mm):

$$\begin{aligned} b_{e,B1} &= b_w + 2 \times \min(h - t ; 4t) \\ &= 300 + 2 \times \min(500 - 120 ; 4 \times 120) \\ &= 300 + 2 \times \min(380 ; 480) = 1.060 \text{ mm} \end{aligned}$$

Balok melintang B2 ( $h = 400$  mm):

$$\begin{aligned} b_{e,B2} &= b_w + 2 \times \min(h - t ; 4t) \\ &= 300 + 2 \times \min(400 - 120 ; 4 \times 120) \\ &= 300 + 2 \times \min(280 ; 480) = 860 \text{ mm} \end{aligned}$$

### 4. Momen Inersia Balok-T ( $I_b$ ).

Penampang T dibagi menjadi badan persegi ( $b_w \times h$ ) dan sayap tambahan ( $((b_e - b_w) \times t)$  di bagian atas. Momen inersia dihitung terhadap titik berat penampang komposit melalui dua tahap: penentuan letak titik berat dan penerapan teorema sumbu sejajar yang dihitung sebagai berikut:

**Balok B1** ( $b_w = 300$ ,  $h = 500$ ,  $t = 120$ ,  $b_e = 1.060$ ). Luas dan letak titik berat tiap bagian (diukur dari serat bawah):

$$A_{badan} = b_w h = 300 \times 500 = 150.000 \text{ mm}^2; y_{badan} = \frac{h}{2} = 250 \text{ mm}$$

$$A_{sayap} = (b_e - b_w)t = 760 \times 120 = 91.200 \text{ mm}^2; y_{sayap} = h - \frac{t}{2} = 440 \text{ mm}$$

$$\bar{y} = \frac{A_{badan} y_{badan} + A_{sayap} y_{sayap}}{A_{badan} + A_{sayap}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{150.000 \times 250 + 91.200 \times 440}{241.200} \\
&= 321,840 \text{ mm} \\
I_{b,B1} &= \left[ \frac{b_w h^3}{12} + A_{badan} (y_{badan} - \bar{y})^2 \right] + \left[ \frac{(b_e - b_w) t^3}{12} + A_{sayap} (y_{sayap} - \bar{y})^2 \right] \\
I_{b,B1} &= \left[ \frac{300 \times 500^3}{12} + 150.000 (250 - 321,841)^2 \right] + \left[ \frac{760 \times 120^3}{12} + 91.200 (440 - 321,841)^2 \right] \\
&= 5,282 \times 10^9 \text{ mm}^4
\end{aligned}$$

**Balok B2** ( $b_w = 300$ ,  $h = 400$ ,  $t = 120$ ,  $b_e = 860$ ). Dengan prosedur sama:

$$A_{badan} = 300 \times 400 = 120.000 \text{ mm}^2; \quad y_{badan} = 200 \text{ mm}$$

$$A_{sayap} = 560 \times 120 = 67.200 \text{ mm}^2; \quad y_{sayap} = 340 \text{ mm}$$

$$\bar{y} = \frac{120.000 \times 200 + 67.200 \times 340}{187.200} = 250,260 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
I_{b,B2} &= \left[ \frac{300 \times 400^3}{12} + 120.000 (200 - 250,260)^2 \right] + \left[ \frac{560 \times 120^3}{12} + 67.200 (340 - 250,260)^2 \right] \\
&= 2,525 \times 10^9 \text{ mm}^4
\end{aligned}$$

## 5. Momen Inersia Pelat (Is) dan Rasio Kekakuan ( $\alpha_f$ )

Momen inersia pelat dihitung untuk lebar *tributary* sebesar bentang yang tegak lurus terhadap balok yang ditinjau. Karena balok dan pelat dicor monolit dengan mutu beton sama ( $E_{cb} = E_{cs}$ ),  $\alpha_f = I_b/I_s$  (SNI 2847-2019 Pers. 8.10.2.7b) yang dihitung sebagai berikut:

**Balok memanjang B1 (arah Y)** ditumpu jalur pelat selebar bentang tegak lurus, yaitu  $L_x = 4.000 \text{ mm}$ :

$$I_{s,B1} = \frac{L_x t^3}{12} = \frac{4.000 \times 120^3}{12} = 5,760 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\alpha_{f1} = \alpha_{f2} = \frac{5,282 \times 10^9}{5,760 \times 10^8} = 9,170$$

**Balok melintang B2 (arah X)** ditumpu jalur pelat selebar bentang tegak lurus, yaitu  $L_y = 6.000 \text{ mm}$ :

$$I_{s,B2} = \frac{L_y t^3}{12} = \frac{6.000 \times 120^3}{12} = 8,640 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\alpha_{f3} = \alpha_{f4} = \frac{2,525 \times 10^9}{8,640 \times 10^8} = 2,922$$

Hasil perhitungan keempat balok penumpu direkapitulasi pada **Tabel 4.14** sebagai berikut:

**Tabel 4.14** Momen Inersia dan Rasio Kekakuan Balok-T Penumpu Pelat S1

| Balok                   | Posisi | Dimensi<br>(mm) | be<br>(mm) | $\bar{y}$ (mm) | Ib (mm <sup>4</sup> ) | Is (mm <sup>4</sup> ) | $\alpha_f$ |
|-------------------------|--------|-----------------|------------|----------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| B1<br>( $\alpha_{f1}$ ) | sisi Y | 300×500         | 1.060      | 321,841        | $5,282 \times 10^9$   | $5,760 \times 10^8$   | 9,170      |
| B1<br>( $\alpha_{f2}$ ) | sisi Y | 300×500         | 1.060      | 321,841        | $5,282 \times 10^9$   | $5,760 \times 10^8$   | 9,170      |
| B2<br>( $\alpha_{f3}$ ) | sisi X | 300×400         | 860        | 250,256        | $2,525 \times 10^9$   | $8,640 \times 10^8$   | 2,922      |
| B2<br>( $\alpha_{f4}$ ) | sisi X | 300×400         | 860        | 250,256        | $2,525 \times 10^9$   | $8,640 \times 10^8$   | 2,922      |

## 6. Rasio Kekakuan Rata-Rata ( $\alpha_{fm}$ ).

Diambil rata-rata rasio kekakuan keempat balok penumpu pelat yang dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{fm} &= \frac{\alpha_{f1} + \alpha_{f2} + \alpha_{f3} + \alpha_{f4}}{4} \\
 &= \frac{9,170 + 9,170 + 2,922 + 2,922}{4} \\
 &= 6,046
 \end{aligned}$$

Karena  $\alpha_{fm} = 6,046 > 2,0$ , digunakan formula tebal minimum SNI 2847-2019 Tabel 8.3.1.2 kondisi  $\alpha_{fm} > 2,0$  yang dimana  $h$  minimum merupakan nilai terbesar antara:

$$h_{min} = \frac{l_{n,panjang} \left( 0,8 + \frac{f_y}{1.400} \right)}{36 + 9\beta} \text{ atau } 90 \text{ mm}$$

#### 7. Tebal Minimum Pelat (SNI 2847-2019 Tabel 8.3.1.2, kondisi $\alpha_{fm} > 2,0$ )

Tebal minimum bergantung pada rasio bentang bersih  $\beta$ , yaitu perbandingan bentang bersih arah panjang terhadap bentang bersih arah pendek. Bentang bersih ( $l_n$ ) diukur dari muka-ke-muka tumpuan, yaitu bentang as-ke-as dikurangi lebar balok induk penumpu (as kolom = 300 mm untuk B1 dan B2) yang dihitung sebagai berikut:

Bentang bersih arah panjang (sumbu Y, dibatasi balok B1 memanjang):

$$l_{n,panjang} = L_y - b_{kolom} = 6.000 - 300 = 5.700 \text{ mm}$$

Bentang bersih arah pendek (sumbu X, dibatasi balok B2 melintang):

$$l_{n,pendek} = L_x - b_{kolom} = 4.000 - 300 = 3.700 \text{ mm}$$

Rasio bentang bersih:

$$\beta = \frac{l_{n,panjang}}{l_{n,pendek}} = \frac{5.700}{3.700} = 1,5405$$

Tebal minimum untuk kondisi  $\alpha_{fm} > 2,0$ :

$$\begin{aligned} h_{min} &= \frac{l_{n,panjang} \left( 0,8 + \frac{f_y}{1.400} \right)}{36 + 9\beta} \\ &= \frac{5.700 \left( 0,8 + \frac{420}{1.400} \right)}{36 + 9 \times 1,5405} \\ &= \frac{5.700 \times 1,100}{49,865} \\ &= 125,740 \text{ mm} \end{aligned}$$

Prosedur yang sama diterapkan pada tipe pelat S2. Hasil direkapitulasi pada **Tabel 4.15** sebagai berikut:

**Tabel 4.15** Rekapitulasi *Preliminary Design* Pelat Lantai

| Tipe | Lx<br>(mm) | Ly<br>(mm) | $\alpha f1$ | $\alpha f2$ | $\alpha f3$ | $\alpha f4$ | $\alpha fm$ | hmin<br>(mm) | t pakai<br>(mm) |
|------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-----------------|
| S1   | 4.000      | 6.000      | 9,170       | 9,170       | 2,922       | 2,922       | 6,046       | 125,740      | 120             |
| S2   | 4.000      | 6.000      | 15,836      | 15,836      | 5,100       | 5,100       | 10,468      | 125,740      | 100             |
| ST   | 1.500      | 4.500      | -           | -           | -           | -           | -           | -            | 140             |

Nilai hmin yang melampaui tebal rencana pada S1 dan S2 merupakan konsekuensi pendekatan konservatif formula SNI 2847-2019 Tabel 8.3.1.2; seluruh tebal ini diverifikasi melalui kontrol lendutan aktual pada **Subbab 4.6.4**. S2 direncanakan lebih tipis karena memikul beban atap yang lebih ringan. ST (140 mm) merupakan tangga ditetapkan lebih tebal untuk mengakomodasi tambahan anak tangga.

### 4.3 Pembebanan

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

Berat sendiri struktur (*self-weight*) dihitung secara otomatis oleh ETABS berdasarkan karakteristik material yang telah ditetapkan pada model. Selain itu, beban mati tambahan (*Superimposed Dead Load* atau SIDL) dimasukkan secara manual sebagai beban permanen non-struktural dengan mempertimbangkan komponen bangunan gedung yang bersifat semi permanen, seperti dinding, penutup lantai, plafon, dan elemen pendukung lainnya. Besaran beban tersebut mengacu pada ketentuan yang tercantum dalam PPURG-1987.

### 1. Beban Mati Tambahan Pelat Lantai (SIDL Lantai)

Beban mati tambahan pada pelat lantai merupakan akumulasi berat berbagai elemen nonstruktural permanen yang bekerja pada pelat. Setiap komponen beban ditentukan berdasarkan referensi PPURG - 1987 Tabel 2 tentang berat komponen bangunan gedung, kemudian dimasukkan ke dalam model ETABS sebagai beban merata dengan satuan  $\text{kN/m}^2$  pada masing-masing pelat lantai. Beban mati tambahan untuk pelat lantai ditunjukkan pada **Tabel 4.16** sebagai berikut:

**Tabel 4.16** Beban Mati Tambahan Pelat Lantai

| No                       | Komponen Beban                               | Spesifikasi        | Berat Referensi                  | Beban ( $\text{kN/m}^2$ )                        |
|--------------------------|----------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1                        | Penutup lantai keramik (ubin semen portland) | $t = 1 \text{ cm}$ | $24 \text{ kg/m}^2$ per cm tebal | $24 \times 1 \times 0,00981 = 0,235$             |
| 2                        | Adukan/spesi (mortar semen)                  | $t = 2 \text{ cm}$ | $21 \text{ kg/m}^2$ per cm tebal | $21 \times 2 \times 0,00981 = 0,412$             |
| 3                        | Langit-langit eternity + penggantung kayu    | -                  | $11 + 7 = 18 \text{ kg/m}^2$     | $18 \times 0,00981 = 0,177$                      |
| 4                        | Instalasi mekanikal & elektrik               | -                  | $\approx 20 \text{ kg/m}^2$      | $20 \times 0,00981 = 0,196$                      |
| <b>TOTAL SIDL Lantai</b> |                                              |                    |                                  | <b><math>\approx 1,020 \text{ kN/m}^2</math></b> |

**Konversi:**  $1 \text{ kg/m}^2 = 9,81/1000 \text{ kN/m}^2 = 0,00981 \text{ kN/m}^2$

### 2. Beban Mati Tambahan Pelat Atap (SIDL Atap)

SIDL pelat atap berbeda dengan lantai karena menggunakan lapisan *waterproofing* sebagai pengganti penutup keramik.

Beban mati tambahan untuk pelat atap ditunjukkan pada **Tabel 4.17** sebagai berikut:

**Tabel 4.17** Beban Mati Tambahan Pelat Atap

| No                     | Komponen Beban                         | Spesifikasi | Berat Referensi                          | Beban (kN/m <sup>2</sup> )                         |
|------------------------|----------------------------------------|-------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1                      | Waterproofing<br>(aspal)               | t = 1 cm    | 14 kg/m <sup>2</sup> per cm<br>tebal     | $14 \times 1 \times 0,00981$<br>= 0,137            |
| 2                      | Screed beton ringan<br>(perata)        | t = 3 cm    | $\approx 18$ kg/m <sup>2</sup> per<br>cm | $18 \times 3 \times 0,00981$<br>= 0,530            |
| 3                      | Langit-langit eternit<br>+ penggantung | -           | 18 kg/m <sup>2</sup>                     | $18 \times 0,00981 =$<br>0,177                     |
| 4                      | Instalasi ME atap                      | -           | $\approx 10$ kg/m <sup>2</sup>           | $10 \times 0,00981 =$<br>0,098                     |
| <b>TOTAL SIDL Atap</b> |                                        |             |                                          | <b><math>\approx 0,942</math> kN/m<sup>2</sup></b> |

**Konversi:**  $1 \text{ kg/m}^2 = 9,81/1000 \text{ kN/m}^2 = 0,00981 \text{ kN/m}^2$

### 3. Beban Dinding pada Balok

Dinding yang bertumpu pada balok dimodelkan sebagai beban merata dengan satuan kN/m yang bekerja sepanjang elemen balok. Besarnya beban dinding dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$q_{\text{dinding}} = \text{berat satuan (kg/m}^2\text{)} \times \text{tinggi bersih dinding (m)} \times 0,00981 \text{ (kN/kgf)}$$

Tinggi bersih dinding diperoleh dari selisih antara tinggi antar lantai dan dimensi tinggi balok yang menopang dinding tersebut.

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

Beban hidup ditentukan berdasarkan ketentuan PPURG-1987 Tabel 3 dan SNI 1727-2020 Tabel 4.3.1 dengan menyesuaikan fungsi ruang pada setiap lantai bangunan. Bangunan yang diteliti berfungsi sebagai hunian sementara (mess atau asrama), sehingga kategori pembebanan yang digunakan termasuk dalam kategori

hunian residensial. Adapun koefisien reduksi beban hidup yang digunakan dalam perencanaan portal dan analisis gempa mengacu pada PPURG -1987 Tabel 4 terdapat pada **Tabel 4.18** sebagai berikut:

**Tabel 4.18** Beban Hidup

| No | Fungsi Ruang                    | Beban<br>Hidup<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | Koef.<br>Reduksi<br>Portal | Koef.<br>Reduksi<br>Gempa | Referensi                 |
|----|---------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1  | Kamar tidur / hunian (mess)     | 1,96                                   | 0,75                       | 0,30                      | PPURG-1987 Tabel 3        |
| 2  | Koridor / gang hunian           | 2,94                                   | 0,75                       | 0,30                      | PPURG-1987 Tabel 3        |
| 3  | Tangga (hunian/asrama)          | 2,94                                   | 0,75                       | 0,30                      | PPURG-1987 Tabel 3        |
| 4  | Atap datar (tidak dapat dihuni) | 0,96                                   | -                          | -                         | SNI 1727-2020 Tabel 4.3-1 |

**Konversi:** Kamar tidur/hunian:  $200 \text{ kg/m}^2 = 200 \times 0,00981 = 1,962 \text{ kN/m}^2 \approx 1,96 \text{ kN/m}^2$ .  
 Koridor/tangga hunian:  $300 \text{ kg/m}^2 = 300 \times 0,00981 = 2,943 \text{ kN/m}^2 \approx 2,94 \text{ kN/m}^2$ .  
 Atap datar:  $20 \text{ psf} = 0,96 \text{ kN/m}^2$  (SNI 1727-2020).

#### 4.3.3 Beban Angin

Perhitungan beban angin dilakukan untuk Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) mengacu pada SNI 1727-2020 Pasal 26, dengan tinggi total struktur ( $h_n$ ) sebesar 23,85 m sehingga termasuk kategori *low-rise building*. Gedung Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia diklasifikasikan sebagai Kategori Risiko II dengan periode ulang kecepatan angin dasar  $R = 700$  tahun.

Substitusi periode ulang  $R = 700$  tahun ke persamaan HB 212-2002 *Handbook Level I*:

$$V_R = 70 - 56 (700)^{-0,1}$$

$$V_R = 40,9 \text{ m/s} = 91,49 \text{ mph}$$

Nilai  $V_R = 91,49$  mph tersebut selanjutnya diinput sebagai *Wind Speed* pada dialog *Wind Load Pattern* (ASCE 7-16) di ETABS, bersama parameter SPGAU lainnya sebagai berikut pada **Tabel 4.19** sebagai berikut:

**Tabel 4.19** Parameter SPGAU

| Parameter                                    | Nilai Input ETABS                                          |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <i>Wind Speed (V)</i>                        | 91,49069 mph                                               |
| Kategori Risiko bangunan                     | II                                                         |
| Periode ulang (R)                            | 700 tahun                                                  |
| <i>Exposure Type</i>                         | B                                                          |
| <i>Ground Elevation Factor (Ke)</i>          | 1                                                          |
| <i>Topographical Factor (Kzt)</i>            | 1                                                          |
| <i>Gust Factor (G)</i>                       | 0,85                                                       |
| <i>Directionality Factor (Kd)</i>            | 0,85                                                       |
| <i>Exposure From</i>                         | <i>Frame and Shell Objects<br/>(Include Frame Objects)</i> |
| <i>Wind Pressure Coefficients (Cpw, Cpl)</i> | <i>Program Determined</i>                                  |
| <i>Top Story</i>                             | <i>Story7 (Atap)</i>                                       |
| <i>Bottom Story</i>                          | <i>Base</i>                                                |

Eksposur bangunan menggunakan opsi *Exposure from Frame and Shell Objects* dengan *Include Frame Objects*, sehingga geometri eksposur dihitung ETABS dari elemen *frame* dan *shell* aktual pada model. Koefisien tekanan *windward* dan *leeward* (Cpw, Cpl) menggunakan skema *Program Determined*, dihitung otomatis berdasarkan rasio panjang-lebar (L/B) geometri bangunan aktual mengacu Tabel 27.3-1 SNI 1727-2020. Ketinggian eksposur diatur dari *Bottom Story = Base* hingga *Top Story = Story7* (level atap), mencakup seluruh tinggi struktur bangunan.

Berdasarkan parameter tersebut, ETABS menghitung koefisien eksposur tekanan velositas (Kz) dan tekanan velositas (qz) secara otomatis untuk tiap elevasi sesuai Pasal 26.10 SNI 1727-2020, yang selanjutnya digunakan sebagai beban angin desain SPGAU dalam analisis struktur pada model ETABS.

#### 4.3.4 Beban Gempa dan Parameter Seismik

Analisis beban gempa dilakukan menggunakan metode Analisis Respons Spektrum (ARS) sesuai dengan ketentuan SNI 1726-2019. Parameter seismik ditentukan berdasarkan peta gempa yang tercantum dalam SNI 1726-2019 untuk lokasi proyek Gedung C.3 Mess TKA di Kabupaten Grobogan, serta hasil klasifikasi situs yang diperoleh dari data *Standard Penetration Test* (SPT).

##### 1. Klasifikasi Situs

Klasifikasi situs tanah ditentukan berdasarkan nilai *Standard Penetration Test* (SPT) sesuai dengan ketentuan Pasal 5.3 SNI 1726-2019. Berdasarkan hasil pengujian dan karakteristik tanah yang diperoleh, lokasi penelitian termasuk dalam kategori Situs Kelas SE atau tanah lunak.

##### 2. Kategori Risiko Bangunan Gedung

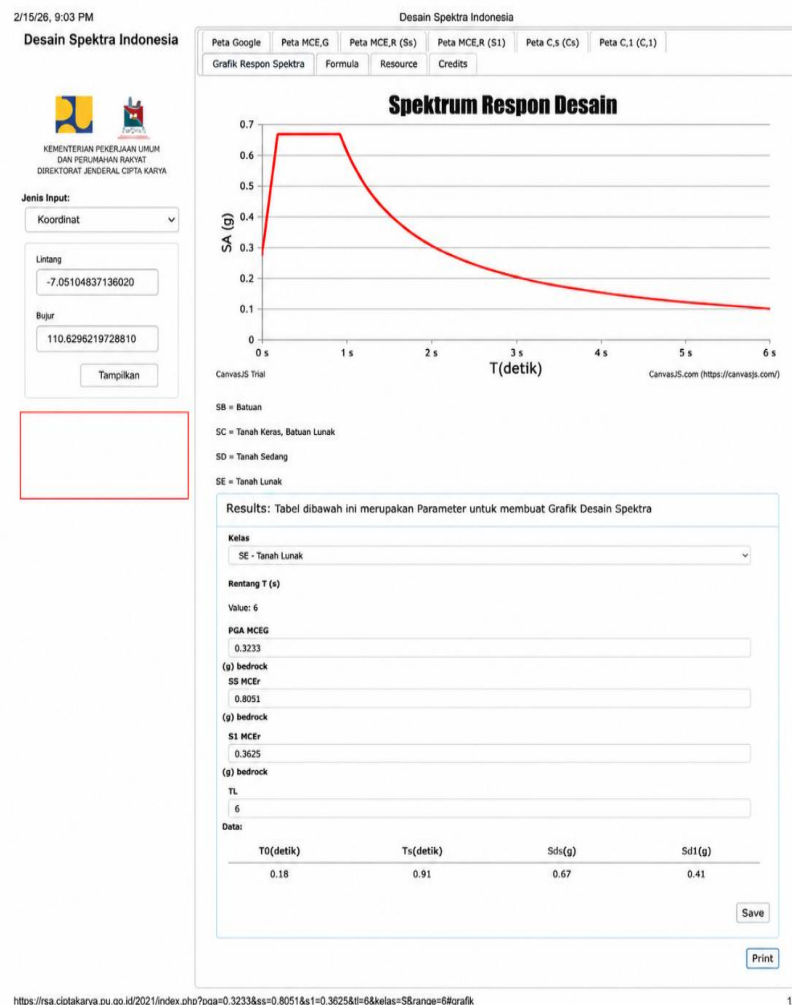
Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 4.1.2 tabel 1 s.d. tabel 2. Bangunan mess yang menjadi objek penelitian pada tugas akhir ini termasuk dalam **kategori risiko II**.

### 3. Faktor Keutamaan Gempa

Berdasarkan hasil kategori risiko bangunan yang menunjukkan kategori II, maka faktor keutamaan gempa pada Gedung Mess TKA yang menjadi objek penelitian sesuai dengan SNI 1726-2019 Tabel 4 adalah **1,0**.

### 4. Parameter Percepatan Batuan Dasar ( $S_s$ dan $S_1$ )

Nilai  $S_s$  dan  $S_1$  dibaca dari peta gempa SNI 1726-2019 menggunakan *website* Desain Spektra Indonesia seperti pada **Gambar 4.3** berikut:



**Gambar 4.3** Spektrum Respon Desain

Sumber: Desain Spektra Indonesia

Berikut merupakan rekapitulasi parameter seismik yang diambil dari **Gambar 4.3** berdasarkan lokasi proyek Gedung C.3 Mess TKA ditampilkan pada **Tabel 4.20** sebagai berikut:

**Tabel 4.20** Parameter Dasar Seismik

| No | Parameter                                             | Nilai                           | Sumber                                                               |
|----|-------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|    |                                                       | -7.05104837136929°              |                                                                      |
| 1  | Koordinat Proyek<br>(Lintang, Bujur)                  | LS,<br>110.6296219738810°<br>BT | Lokasi Proyek                                                        |
| 2  | Percepatan Batuan<br>Dasar Periode<br>Pendek, Ss (g)  | 0,8051 g                        | Peta Gempa SNI 1726-<br>2019 Gambar 9 (Desain<br>Spektra Indonesia)  |
| 3  | Percepatan Batuan<br>Dasar Periode 1<br>Detik, S1 (g) | 0,3625 g                        | Peta Gempa SNI 1726-<br>2019 Gambar 10 (Desain<br>Spektra Indonesia) |
| 4  | Klasifikasi Situs<br>Faktor Amplifikasi               | SE                              | Data SPT                                                             |
| 5  | Situs Periode<br>Pendek, Fa<br>Faktor Amplifikasi     | 1,2559                          | SNI 1726-2019 Tabel 6                                                |
| 6  | Situs Periode<br>Panjang, Fv                          | 2,5500                          | SNI 1726-2019 Tabel 7                                                |

## 5. Parameter Respons Spektrum Desain

### a. Spektrum Respons MCER:

$$\begin{aligned}
 SMS &= F_a \times S_s \\
 &= 1,2559 \times 0,8051 \\
 &= \mathbf{1,011 \text{ g}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SM1 &= F_v \times S1 \\
 &= 2,5500 \times 0,3625 \\
 &= \mathbf{0,924 \text{ g}}
 \end{aligned}$$

b. Spektrum Desain ( $2/3 \times MCER$ ):

$$\begin{aligned}
 S_{DS} &= 2/3 \times SMS \\
 &= 2/3 \times 1,0111 \\
 &= \mathbf{0,674 \text{ g}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{D1} &= 2/3 \times 0,9244 \\
 &= 2/3 \times 0,9244 \\
 &= \mathbf{0,616 \text{ g}}
 \end{aligned}$$

c. Periode Kontrol Spektrum:

$$\begin{aligned}
 T_o &= 0,2 \times S_{D1}/S_{DS} \\
 &= 0,2 \times 0,6741/0,6163 \\
 &= \mathbf{0,183 \text{ detik}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_S &= S_{D1}/S_{DS} \\
 &= 0,6741/0,6163 \\
 &= \mathbf{0,914 \text{ detik}}
 \end{aligned}$$

d. Kategori Desain Seismik (KDS):

KDS ditentukan berdasarkan nilai  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$  sesuai SNI 1726-2019 Tabel 8 (berdasarkan  $S_{DS}$ ) dan Tabel 9 (berdasarkan  $S_{D1}$ ) untuk Kategori Risiko II. KDS yang dipakai adalah yang lebih tinggi dari kedua tabel sebagai berikut:

KDS berdasarkan  $S_{DS} = \mathbf{0,674 \text{ g}} \rightarrow \mathbf{KDS = D}$

KDS berdasarkan  $S_{D1} = \mathbf{0,616 \text{ g}} \rightarrow \mathbf{KDS = D}$

KDS yang digunakan = **D**

e. Parameter Sistem Struktur:

Parameter sistem struktur SRPMK beton bertulang dari SNI 1726-2019 Tabel 12 sebagai berikut:

Faktor keutamaan gempa (kategori risiko II):  $I_e = 1,0$

Koefisien modifikasi respons:  $R = 8$

Faktor kuat lebih sistem:  $\Omega_0 = 3$

Faktor pembesaran defleksi:  $C_d = 5,5$

## 6. Periode Fundamental Pendekatan

Periode fundamental pendekatan dihitung dengan SNI 1726-2019 Pers. (36). Untuk SRPMK beton bertulang (SNI 1726-2019 Tabel 18):  $C_t = 0,0466$  dan  $x = 0,9$ , dengan tinggi struktur seismik  $h_n = 23,95$  m dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T_a &= C_t \times h_n^x \\ &= 0,0466 \times 23,95^{0,9} \\ &= \mathbf{0,812 \text{ detik}} \end{aligned}$$

Periode Maksimum yang Diizinkan:

Nilai  $C_u$  dari SNI 1726-2019 Tabel 18 berdasarkan  $S_{D1}$ . Untuk  $S_{D1} = 0,616$  g  $\rightarrow C_u = 1,4$ .

$$\begin{aligned} T_{max} &= C_u \times T_a \\ &= 1,4 \times 0,812 \\ &= \mathbf{1,137 \text{ detik}} \end{aligned}$$

### Contoh Perhitungan – Analisis Gaya Gempa ( $f'c$ 25 MPa)

Periode hasil analisis ragam ETABS untuk  $f'c$  25 MPa:  $T_{c,X} = 1,077$  detik dan  $T_{c,Y} = 0,986$  detik. Periode diambil nilai terkecil antara periode analisis dan batas atas (SNI 1726-2019 Pasal 7.8.2) yang dihitung sebagai berikut:

$$T_X = \min(T_{maks}; T_{c,X}) = \min(1,137; 1,077) = 1,077 \text{ detik}$$

$$T_Y = \min(T_{maks}; T_{c,Y}) = \min(1,137; 0,986) = 0,986 \text{ detik}$$

## 7. Koefisien Respons Seismik ( $C_s$ )

Koefisien respons seismik dasar dihitung dengan SNI 1726-2019 sebagai berikut:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{R/I_e} = \frac{0,674}{8/1,0} = 0,084$$

Batas atas koefisien respons seismik dihitung dengan SNI 1726-2019, untuk masing-masing arah menggunakan periode terpakai. Untuk  $f'c$  25 Mpa dihitung sebagai berikut:

$$C_{s,maks,X} = \frac{S_{D1}}{T_X \cdot (R/I_e)} = \frac{0,616}{1,077 \times (8/1,0)} = 0,072$$

$$C_{s,maks,Y} = \frac{S_{D1}}{T_Y \cdot (R/I_e)} = \frac{0,616}{0,986 \times (8/1,0)} = 0,078$$

Batas bawah koefisien respons seismik dihitung dengan SNI 1726-2019:

$$\begin{aligned} C_{s,min,1} &= \max(0,044 \cdot S_{DS} \cdot I_e ; 0,01) \\ &= \max(0,044 \times 0,674 \times 1,0 ; 0,01) \\ &= 0,030 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{s,min,2} &= \frac{0,5 \cdot S_1}{\frac{R}{I_e}} \\ &= \frac{0,5 \times 0,3625}{\frac{8}{1,0}} \\ &= 0,023 \quad (\text{berlaku jika } S_1 \geq 0,6 \text{ g}) \end{aligned}$$

karena  $S_1 = 0,3625 \text{ g} < 0,6 \text{ g}$ , batas bawah kedua ( $C_{s,min,2}$ ) tidak menentukan.

Koefisien respons seismik yang dipakai diperoleh dengan membatasi  $C_s$  dasar terhadap  $C_s$ , maks (batas atas) dan  $C_s$ , min (batas bawah), sesuai SNI 1726-2019 Pasal 7.8.1.1 sebagai berikut:

$$C_{s,pakai} = \max[\min(C_s ; C_{s,maks}) ; C_{s,min,1}]$$

Untuk  $f'c$  25 MPa, arah X:

$$\begin{aligned} C_{s,pakai,X} &= \max[\min(0,084 ; 0,072) ; 0,030] \\ &= \max[0,072 ; 0,030] \\ &= 0,072 \end{aligned}$$

Untuk  $f'c$  25 MPa, arah Y:

$$\begin{aligned} C_{s,pakai,Y} &= \max[\min(0,084; 0,078); 0,030] \\ &= \max[0,078; 0,030] \\ &= 0,078 \end{aligned}$$

Nilai  $C_s$  dasar (0,084) dibatasi oleh  $C_s$ , maks pada kedua arah karena periode struktur telah melewati  $T_s = 0,914$  detik, sehingga koefisien respons seismik mengikuti cabang  $S_{D1}/[T \cdot (R/I_e)]$  pada kurva spektrum desain.

## 8. Berat Seismik Efektif dan Gaya Geser Dasar

Berat seismik efektif struktur ( $W$ ) merupakan akumulasi berat seluruh tingkat. Untuk  $f'c$  25 MPa, akumulasi berat disajikan pada **Tabel 4.21** sebagai berikut:

**Tabel 4.21** Distribusi Massa Bangunan

| Tingkat          | Massa (ton) | Berat (kN)        |
|------------------|-------------|-------------------|
| 7 (atap)         | 44,842      | 439,824           |
| 6                | 233,342     | 2.288,197         |
| 5                | 354,803     | 3.479,507         |
| 4                | 357,859     | 3.509,479         |
| 3                | 358,006     | 3.510,919         |
| 2                | 358,048     | 3.511,330         |
| 1                | 357,859     | 3.509,479         |
| <b>Total (W)</b> |             | <b>20.248,371</b> |

Gaya geser dasar seismik dihitung dengan SNI 1726-2019. Untuk  $f'c$  25 Mpa sebagai berikut:

$$V_X = C_{s,pakai,X} \cdot W = 0,072 \times 20.248,371 = 1.448,243 \text{ kN}$$

$$V_Y = C_{s,pakai,Y} \cdot W = 0,078 \times 20.248,371 = 1.581,904 \text{ kN}$$

Sebagai pembandingan, gaya geser dasar statik ekuivalen yang dihitung otomatis oleh ETABS (dari *load pattern* dengan tipe *Seismic*) untuk  $f'c$  25 MPa adalah  $V_X =$

1.448,465 kN dan  $V_Y = 1.581,839$  kN. Nilai ini nyaris identik dengan hasil perhitungan manual (selisih  $< 0,03\%$ ), yang mengonfirmasi kebenaran parameter  $C_s$  dan  $W$  yang dimasukkan ke dalam model. Perbandingan gaya geser dasar statik manual terhadap ETABS untuk ketiga mutu disajikan pada **Tabel 4.22** sebagai berikut:

**Tabel 4.22** Gaya Geser Dasar Statik

| Mutu   | $V_X$          | $V_X$         | Selisih<br>X | $V_Y$          | $V_Y$         | Selisih<br>Y |
|--------|----------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
|        | manual<br>(kN) | ETABS<br>(kN) |              | manual<br>(kN) | ETABS<br>(kN) |              |
| f'c 25 | 1.448,243      | 1.448,465     | 0,015%       | 1.581,904      | 1.581,839     | 0,004%       |
| f'c 30 | 1.264,217      | 1.268,635     | 0,349%       | 1.359,017      | 1.358,751     | 0,020%       |
| f'c 35 | 1.185,026      | 1.189,167     | 0,349%       | 1.185,026      | 1.189,167     | 0,349%       |

Gaya geser dasar hasil analisis respons spektrum ETABS diskalakan agar tidak kurang dari gaya geser statik ekuivalen, sesuai SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1.4.1.

Faktor skala awal ditentukan dari percepatan gravitasi dibagi  $R/I_e$  (SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1.2) dihitung sebagai berikut:

$$SF_0 = \frac{g}{R/I_e} = \frac{9,80665}{8/1,0} = 1,226 \text{ m/s}^2 = 1.225,831 \text{ mm/s}^2$$

Gaya geser respons spektrum ETABS sebelum penskalaan (*unscaled*) untuk f'c 25 MPa:  $V_{i,X} = 1.134,516$  kN dan  $V_{i,Y} = 1.236,562$  kN. Faktor penskalaan gaya dihitung sebagai rasio gaya geser statik terhadap gaya geser respons spektrum, minimum 1 (SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1.4.1) dihitung sebagai berikut:

$$f_X = \max\left(1; \frac{V_X}{V_{i,X}}\right) = \max\left(1; \frac{1.448,243}{1.134,516}\right) = 1,277$$

$$f_Y = \max\left(1; \frac{V_Y}{V_{i,Y}}\right) = \max\left(1; \frac{1.581,904}{1.236,562}\right) = 1,279$$

Faktor skala baru yang diterapkan pada load case respons spektrum:

$$SF_X = SF_0 \cdot f_X = 1.225,831 \times 1,277 = 1.564,810 \text{ mm/s}^2$$

$$SF_Y = SF_0 \cdot f_Y = 1.225,831 \times 1,279 = 1.568,177 \text{ mm/s}^2$$

Faktor skala ini menjamin gaya geser dasar dari analisis dinamik respons spektrum tidak kurang dari gaya geser dasar statik ekuivalen, sebagaimana disyaratkan SNI 1726-2019.

## 9. Rekapitulasi Parameter Seismik

Parameter percepatan gempa ( $S_s$ ,  $S_1$ ,  $F_a$ ,  $F_v$ ) beserta parameter respons spektral desain ( $SDS$ ,  $SD_1$ ) dan parameter sistem struktur ( $I_e$ ,  $R$ ,  $\Omega_0$ ,  $C_d$ ) bernilai sama untuk ketiga skenario mutu beton terdapat pada **Tabel 4.23** sebagai berikut:

**Tabel 4.23** Parameter Seismik Perencanaan

| Parameter     | Nilai (ketiga mutu) |
|---------------|---------------------|
| $S_s$ (g)     | 0,8051              |
| $S_1$ (g)     | 0,3625              |
| $F_a$         | 1,256               |
| $F_v$         | 2,550               |
| $SDS$ (g)     | 0,674               |
| $SD_1$ (g)    | 0,616               |
| $T_0$ (detik) | 0,183               |
| $T_s$ (detik) | 0,914               |
| $I_e$         | 1,0                 |
| $R$           | 8                   |
| $\Omega_0$    | 3                   |
| $C_d$         | 5,5                 |
| KDS           | D                   |

Hal ini konsisten dengan kerangka SNI 1726-2019, di mana parameter tersebut ditentukan oleh kondisi seismik lokasi dan tipe sistem penahan gaya lateral, yang keduanya dipertahankan konstan pada penelitian ini.

Sebaliknya, periode fundamental struktur, koefisien respons seismik terpakai, berat seismik efektif, dan gaya geser dasar menunjukkan variasi antar skenario mutu yang disajikan pada **Tabel 4.24** sebagai berikut:

**Tabel 4.24** Perbandingan Gaya Gempa

| Parameter                   | f'c 25     | f'c 30     | f'c 35     |
|-----------------------------|------------|------------|------------|
| $T_a$ (detik)               | 0,812      | 0,812      | 0,812      |
| $C_u \cdot T_a$ (detik)     | 1,137      | 1,137      | 1,137      |
| $T_{c,X}$ (detik)           | 1,077      | 1,156      | 1,144      |
| $T_{c,Y}$ (detik)           | 0,986      | 1,058      | 1,175      |
| $T_X$ dipakai (detik)       | 1,077      | 1,137      | 1,137      |
| $T_Y$ dipakai (detik)       | 0,986      | 1,058      | 1,137      |
| $C_{s,pakai,X}$             | 0,072      | 0,068      | 0,068      |
| $C_{s,pakai,Y}$             | 0,078      | 0,073      | 0,068      |
| $W$ (kN)                    | 20.248,371 | 18.665,676 | 17.496,449 |
| $V_X$ (kN)                  | 1.448,243  | 1.264,217  | 1.185,026  |
| $V_Y$ (kN)                  | 1.581,904  | 1.359,017  | 1.185,026  |
| $f_X$                       | 1,277      | 1,312      | 1,339      |
| $f_Y$                       | 1,279      | 1,264      | 1,294      |
| $SF_X$ (mm/s <sup>2</sup> ) | 1.564,810  | 1.608,087  | 1.641,345  |
| $SF_Y$ (mm/s <sup>2</sup> ) | 1.568,177  | 1.549,888  | 1.585,774  |

Berat seismik efektif menurun seiring peningkatan mutu beton (20.248 → 18.666 → 17.496 kN), karena mutu yang lebih tinggi memungkinkan dimensi elemen struktur yang lebih kecil sehingga massa total struktur berkurang. Penurunan berat ini berdampak langsung pada penurunan gaya geser dasar seismik.

#### 4.4 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan disusun mengikuti SNI 1727-2020 mengenai beban desain minimum, dengan pengaruh beban gempa mengacu SNI 1726-2019. Kombinasi metode tegangan izin (*Allowable Stress Design*, ASD) digunakan untuk desain struktur bawah (geoteknik), yaitu pondasi tiang pancang dan *pile cap*, sedangkan kombinasi metode ultimit (*Load Resistance Factor Design*, LRFD) digunakan untuk desain elemen struktur atas beton bertulang.

##### 4.4.1 Kombinasi Metode Ultimit (LRFD)

Hasil kalkulasi kombinasi pembebanan metode ultimit (LRFD) digunakan untuk desain elemen struktur atas beton bertulang dengan mempertimbangkan nilai:

- a. ( $S_{DS}$ ) : 0.6741
- b. Redundansi ( $\rho$ ) : 1.3 (SNI 1726-2019 Pasal 7.3.4)

Efek beban gempa mengikuti SNI 1726-2019 Pasal 7.3.3, terdiri atas komponen horizontal  $E_h = \rho \cdot Q_E$  dan komponen vertikal  $E_v = 0,2 \cdot S_{DS} \cdot D$ . Pada kombinasi metode ultimit (LRFD), beban bekerja dalam nilai terfaktor penuh tanpa faktor konversi 0,7. Koefisien beban mati pada kombinasi gempa menjadi  $1,2 + 0,2 \cdot S_{DS} = 1,335$  (mencakup gempa vertikal ke bawah) atau  $0,9 - 0,2 \cdot S_{DS} = 0,765$  untuk kombinasi dengan arah gempa vertikal ke atas. Faktor beban gempa horizontal diambil sebesar faktor redundansi  $\rho = 1,3$ , sehingga koefisien arah utama  $E = \rho = 1,3$  dan arah tegak lurus  $E = 0,3 \cdot \rho = 0,39$ , mengikuti kaidah kombinasi 100% + 30% (SNI 1726-2019 Pasal 7.5.3).

Berikut merupakan kombinasi pembebanan metode ultimit (LRFD) disajikan pada **Tabel 4.25** sebagai berikut:

| <b>Tabel 4.25 Kombinasi Pembebanan Metode Ultimit (LRFD)</b> |           |             |           |                      |          |                      |                      |                      |                      |
|--------------------------------------------------------------|-----------|-------------|-----------|----------------------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Nomor</b>                                                 | <b>DL</b> | <b>SIDL</b> | <b>LL</b> | <b>L<sub>r</sub></b> | <b>R</b> | <b>W<sub>x</sub></b> | <b>W<sub>y</sub></b> | <b>E<sub>x</sub></b> | <b>E<sub>y</sub></b> |
| 1.00                                                         | 1,4       | 1,4         |           |                      |          |                      |                      |                      |                      |
| 2.00                                                         | 1,2       | 1,2         | 1,6       | 0,5                  |          |                      |                      |                      |                      |
|                                                              | 1,2       | 1,2         | 1,6       |                      | 0,5      |                      |                      |                      |                      |



| Nomor | DL     | SIDL   | LL | L <sub>r</sub> | R | W <sub>x</sub> | W <sub>y</sub> | E <sub>x</sub> | E <sub>y</sub> |
|-------|--------|--------|----|----------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       | 0,7652 | 0,7652 |    |                |   |                |                | -0,39          | 1,3            |
|       | 0,7652 | 0,7652 |    |                |   |                |                | 0,39           | -1,3           |
|       | 0,7652 | 0,7652 |    |                |   |                |                | -0,39          | -1,3           |

Sumber: SNI 1726-2019

#### 4.4.2 Kombinasi Metode Tegangan Izin (ASD)

Hasil kalkulasi kombinasi pembebanan metode tegangan izin (ASD) digunakan struktur bawah (geoteknik), yaitu pondasi tiang pancang dan *pile cap* dengan mempertimbangkan nilai:

- (S<sub>DS</sub>) : 0.6741
- Redundansi ( $\rho$ ) : 1.3 (SNI 1726-2019 Pasal 7.3.4)
- Faktor kuat lebih sistem ( $\Omega_0$ ) : 2,5

Efek beban gempa desain E mengikuti SNI 1726-2019 Pasal 7.3.3, terdiri atas komponen horizontal  $E_h = \rho \cdot Q_E$  dan komponen vertikal  $E_v = 0,2 \cdot S_{DS} \cdot D$ . Pada kombinasi ASD, faktor 0,7 diterapkan sebagai konversi ke basis tegangan izin. Koefisien beban mati pada kombinasi gempa nominal menjadi  $1 + 0,7 \cdot 0,2 \cdot S_{DS} = 1,094$  (mencakup gempa vertikal) atau  $0,6 - 0,7 \cdot 0,2 \cdot S_{DS} = 0,506$  untuk kombinasi dengan arah gempa vertikal ke atas. Aplikasi gempa arah utama dan tegak lurus mengikuti kaidah 100% + 30% (SNI 1726-2019).

Adapun rekapitulasi hasil kombinasi pembebanan tegangan izin yang disajikan pada **Tabel 4.26** sebagai berikut:

**Tabel 4.26** Kombinasi Pembebanan Tegangan Izin (ASD)

| Kode | DL | SIDL | LL   | L <sub>r</sub> | R | W <sub>x</sub> | W <sub>y</sub> | E <sub>x</sub> | E <sub>y</sub> |
|------|----|------|------|----------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| G1   | 1  | 1    |      |                |   |                |                |                |                |
| G2   | 1  | 1    | 1    |                |   |                |                |                |                |
| G3   | 1  | 1    |      | 1              |   |                |                |                |                |
| G4   | 1  | 1    |      |                | 1 |                |                |                |                |
| G5   | 1  | 1    | 0,75 | 0,75           |   |                |                |                |                |

| Kode | DL    | SIDL  | LL   | Lr   | R    | W <sub>x</sub> | W <sub>y</sub> | E <sub>x</sub> | E <sub>y</sub> |
|------|-------|-------|------|------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| G6   | 1     | 1     | 0,75 |      | 0,75 |                |                |                |                |
| G7   | 1     | 1     |      |      |      | 0,6            |                |                |                |
| G8   | 1     | 1     |      |      |      |                | 0,6            |                |                |
| G9   | 1     | 1     |      |      |      | 0,45           | 0,45           |                |                |
| G10  | 1     | 1     | 0,75 | 0,75 |      | 0,45           |                |                |                |
| G11  | 1     | 1     | 0,75 | 0,75 |      |                | 0,45           |                |                |
| G12  | 1     | 1     | 0,75 | 0,75 |      | 0,3375         | 0,3375         |                |                |
| G13  | 1     | 1     | 0,75 |      | 0,75 | 0,45           |                |                |                |
| G14  | 1     | 1     | 0,75 |      | 0,75 |                | 0,45           |                |                |
| G15  | 1     | 1     | 0,75 |      | 0,75 | 0,3375         | 0,3375         |                |                |
| G16  | 0,6   | 0,6   |      |      |      | 0,6            |                |                |                |
| G17  | 0,6   | 0,6   |      |      |      |                | 0,6            |                |                |
| G18  | 0,6   | 0,6   |      |      |      | 0,45           | 0,45           |                |                |
| N1   | 1,094 | 1,094 |      |      |      |                |                | 0,2730         | 0,9100         |
| N2   | 1,094 | 1,094 |      |      |      |                |                | 0,2730         | -0,9100        |
| N3   | 1,094 | 1,094 |      |      |      |                |                | -0,2730        | 0,9100         |
| N4   | 1,094 | 1,094 |      |      |      |                |                | -0,2730        | -0,9100        |
| N5   | 1,094 | 1,094 |      |      |      |                |                | 0,9100         | 0,2730         |
| N6   | 1,094 | 1,094 |      |      |      |                |                | -0,9100        | 0,2730         |
| N7   | 1,094 | 1,094 |      |      |      |                |                | 0,9100         | -0,2730        |
| N8   | 1,094 | 1,094 |      |      |      |                |                | -0,9100        | -0,2730        |
| N9   | 1,071 | 1,071 | 0,75 |      |      |                |                | 0,2048         | 0,6825         |
| N10  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |      |      |                |                | 0,2048         | -0,6825        |
| N11  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |      |      |                |                | -0,2048        | 0,6825         |
| N12  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |      |      |                |                | -0,2048        | -0,6825        |
| N13  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |      |      |                |                | 0,6825         | 0,2048         |
| N14  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |      |      |                |                | -0,6825        | 0,2048         |
| N15  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |      |      |                |                | 0,6825         | -0,2048        |
| N16  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |      |      |                |                | -0,6825        | -0,2048        |
| N17  | 0,506 | 0,506 |      |      |      |                |                | 0,2730         | 0,9100         |

| Kode | DL    | SIDL  | LL   | L <sub>r</sub> | R | W <sub>x</sub> | W <sub>y</sub> | E <sub>x</sub> | E <sub>y</sub> |
|------|-------|-------|------|----------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| N18  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | 0,2730         | -0,9100        |
| N19  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | -0,2730        | 0,9100         |
| N20  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | -0,2730        | -0,9100        |
| N21  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | 0,9100         | 0,2730         |
| N22  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | -0,9100        | 0,2730         |
| N23  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | 0,9100         | -0,2730        |
| N24  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | -0,9100        | -0,2730        |
| K1   | 1,094 | 1,094 |      |                |   |                |                | 0,5250         | 1,7500         |
| K2   | 1,094 | 1,094 |      |                |   |                |                | 0,5250         | -1,7500        |
| K3   | 1,094 | 1,094 |      |                |   |                |                | -0,5250        | 1,7500         |
| K4   | 1,094 | 1,094 |      |                |   |                |                | -0,5250        | -1,7500        |
| K5   | 1,094 | 1,094 |      |                |   |                |                | 1,7500         | 0,5250         |
| K6   | 1,094 | 1,094 |      |                |   |                |                | -1,7500        | 0,5250         |
| K7   | 1,094 | 1,094 |      |                |   |                |                | 1,7500         | -0,5250        |
| K8   | 1,094 | 1,094 |      |                |   |                |                | -1,7500        | -0,5250        |
| K9   | 1,071 | 1,071 | 0,75 |                |   |                |                | 0,3938         | 1,3125         |
| K10  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |                |   |                |                | 0,3938         | -1,3125        |
| K11  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |                |   |                |                | -0,3938        | 1,3125         |
| K12  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |                |   |                |                | -0,3938        | -1,3125        |
| K13  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |                |   |                |                | 1,3125         | 0,3938         |
| K14  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |                |   |                |                | -1,3125        | 0,3938         |
| K15  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |                |   |                |                | 1,3125         | -0,3938        |
| K16  | 1,071 | 1,071 | 0,75 |                |   |                |                | -1,3125        | -0,3938        |
| K17  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | 0,5250         | 1,7500         |
| K18  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | 0,5250         | -1,7500        |
| K19  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | -0,5250        | 1,7500         |
| K20  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | -0,5250        | -1,7500        |
| K21  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | 1,7500         | 0,5250         |
| K22  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | -1,7500        | 0,5250         |
| K23  | 0,506 | 0,506 |      |                |   |                |                | 1,7500         | -0,5250        |

| Kode | DL    | SIDL  | LL | L <sub>r</sub> | R | W <sub>x</sub> | W <sub>y</sub> | E <sub>x</sub> | E <sub>y</sub> |
|------|-------|-------|----|----------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| K24  | 0,506 | 0,506 |    |                |   |                |                | -1,7500        | -0,5250        |

Sumber: SNI 1726-2019

Keterangan:

G = gravitasi

N = gempa nominal

K = gempa kuat/maksimal

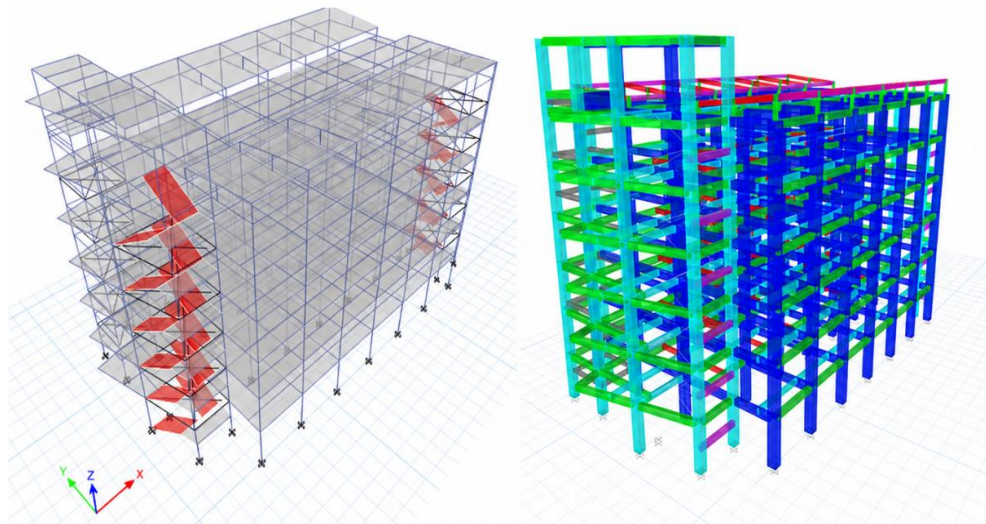
## 4.5 Analisis Struktur

### 4.5.1 Permodelan Struktur pada ETABS

Analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak CSI ETABS versi 20. Permodelan struktur disusun dalam bentuk tiga dimensi dengan mengacu pada geometri denah dan potongan bangunan yang terdapat pada *Detailed Engineering Design* (DED) eksisting. Elemen kolom dan balok dimodelkan sebagai elemen *frame*, sedangkan pelat lantai dimodelkan sebagai elemen *shell*. Kondisi perletakan pada dasar struktur diasumsikan sebagai perletakan jepit (*fixed support*) pada elevasi pondasi untuk merepresentasikan perilaku pondasi tiang pancang yang tertanam hingga mencapai lapisan tanah keras.

Model ETABS disusun dalam tiga skenario terpisah, yaitu Skenario A ( $f'c = 25$  MPa), Skenario B ( $f'c = 30$  MPa), dan Skenario C ( $f'c = 35$  MPa). Pada setiap skenario, properti material disesuaikan dengan mutu beton yang digunakan, sedangkan dimensi elemen struktur dioptimalkan melalui proses iteratif. Gambar berikut memperlihatkan contoh representasi tampilan model tiga dimensi struktur yang dikembangkan menggunakan ETABS.

Adapun bentuk penmodelan 3D struktur di ETABS pada **Gambar 4.4** sebagai berikut:



**Gambar 4.4** Permodelan Struktur pada ETABS

#### 4.5.2 Ketidakberaturan Struktur

Evaluasi ketidakberaturan struktur dilakukan untuk memastikan bahwa bangunan memenuhi persyaratan konfigurasi struktur sebagaimana diatur dalam SNI 1726-2019 Tabel 13 (ketidakberaturan horizontal) dan Tabel 14 (ketidakberaturan vertikal). Pemeriksaan meliputi ketidakberaturan horizontal dan vertikal yang berpotensi memengaruhi respons struktur terhadap beban gempa. Hasil evaluasi digunakan sebagai dasar dalam menentukan kesesuaian metode analisis yang diterapkan pada model struktur. Tinjauan ini menentukan konsekuensi perencanaan, meliputi pembesaran gaya elemen kolektor, faktor amplifikasi torsi aksidental, dan penetapan faktor redundansi  $\rho$ .

##### 1. Ketidakberaturan Horizontal

###### a. H1a/H1b - Ketidakberaturan Torsi

Pemeriksaan rasio simpangan maksimum terhadap simpangan rata-rata pada

kedua ujung tingkat. Ketidakberaturan torsi 1a terjadi bila  $1,2 < \Delta_{maks}/\Delta_{rata} \leq 1,4$ , dan torsi berlebihan 1b bila  $\Delta_{maks}/\Delta_{rata} > 1,4$  (SNI 1726-2019 Tabel 13) yang direkapitulasi pada **Tabel 4.27** sebagai berikut:

**Tabel 4.27** Rasio Simpangan

| Tingkat | f'c 25 X | f'c 25 Y | f'c 30 X | f'c 30 Y | f'c 35 X | f'c 35 Y |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 6       | 1,131    | 1,149    | 1,119    | 1,147    | 1,142    | 1,073    |
| 5       | 1,138    | 1,154    | 1,134    | 1,141    | 1,160    | 1,094    |
| 4       | 1,146    | 1,144    | 1,143    | 1,136    | 1,171    | 1,093    |
| 3       | 1,148    | 1,141    | 1,146    | 1,134    | 1,176    | 1,094    |
| 2       | 1,146    | 1,146    | 1,146    | 1,138    | 1,174    | 1,097    |
| 1       | 1,140    | 1,175    | 1,141    | 1,164    | 1,167    | 1,133    |

Seluruh rasio pada ketiga mutu berada di bawah 1,2, sehingga **tidak terjadi** ketidakberaturan torsi (H.1) pada tingkat yang ditinjau. Nilai maksimum: f'c 25 = 1,175 (Y, tingkat 1); f'c 30 = 1,164 (Y, tingkat 1); f'c 35 = 1,176 (X, tingkat 3).

#### **b. H2 - Ketidakberaturan Sudut Dalam**

Peninjauan proyeksi sudut dalam (*re-entrant corner*) terhadap dimensi denah. Ketidakberaturan 2 terjadi bila proyeksi melebihi 15% dimensi denah pada kedua arah secara bersamaan (SNI 1726-2019 Tabel 13). Dimensi denah struktur:  $L_x = 31$  m,  $P_x = 7$  m,  $L_y = 17$  m,  $P_y = 7,5$  m yang dihitung dengan persamaan berikut:

$$\frac{P_x}{L_x} = \frac{7}{31} = 0,226 \quad \frac{P_y}{L_y} = \frac{7,5}{17} = 0,441$$

karena  $P_x/L_x = 0,226 > 0,15$  dan  $P_y/L_y = 0,441 > 0,15$ , proyeksi sudut dalam melebihi 15% pada kedua arah secara bersamaan, sehingga struktur **memenuhi kriteria ketidakberaturan sudut dalam** (kode H.2).

Sebagai konsekuensi ketidakberaturan H.2, SNI 1726-2019 Pasal 7.3.3.4 mensyaratkan gaya desain ditingkatkan 25% untuk sambungan diafragma ke

elemen vertikal dan untuk elemen kolektor beserta sambungannya pada struktur KDS D. Gaya diafragma per tingkat dihitung dengan SNI 1726-2019 yang diformulasikan dengan rumus berikut:

$$F_{px} = \frac{\sum_{i=x}^n F_i}{\sum_{i=x}^n w_i} \cdot w_{px}$$

dengan batas  $0,2 \cdot S_{DS} \cdot I_e \cdot w_{px} \leq F_{px} \leq 0,4 \cdot S_{DS} \cdot I_e \cdot w_{px}$ , kemudian dikalikan faktor 1,25 (peningkatan 25%). Sebagai contoh untuk tingkat 5:

$$F_{px,5} = \text{median}(K ; L ; I) \times 1,25 = 1.052,457 \times 1,25 = 1.315,571 \text{ kN}$$

Adapun rekapitulasi untuk gaya diafragma pada **Tabel 4.28** sebagai berikut:

**Tabel 4.28** Gaya Diafragma

| Tingkat | Fpx, X final | Fpx, Y final | Faktor skala | Faktor skala |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|         | (kN)         | (kN)         | X            | Y            |
| 6       | 820,861      | 873,428      | 1,322        | 1,362        |
| 5       | 1.315,571    | 1315,571     | 1,100        | 1,095        |
| 4       | 1.347,772    | 1347,772     | 0,826        | 0,833        |
| 3       | 1.347,772    | 1347,772     | 0,698        | 0,707        |
| 2       | 1.347,772    | 1347,772     | 0,640        | 0,646        |
| 1       | 1.347,772    | 1347,772     | 0,621        | 0,623        |

Peninjauan Pasal 7.3.3.4 dibatasi pada perhitungan gaya diafragma di atas. Penelitian ini difokuskan pada evaluasi perilaku global struktur (periode fundamental, gaya geser dasar, simpangan antar tingkat, dan distribusi gaya dalam utama), sehingga efek peningkatan gaya 25% pada elemen kolektor dan sambungan diafragma tidak diperhitungkan lebih lanjut dalam desain elemen transfer lokal, karena ketentuan tersebut lebih berpengaruh pada desain elemen transfer gaya lokal daripada respons global sistem struktur secara keseluruhan.

### c. H3 - Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

Diperiksa luas bukaan diafragma terhadap luas diafragma bruto. Ketidakberaturan 3 terjadi bila luas bukaan melebihi 50% luas diafragma (SNI 1726-2019 Tabel 13) yang dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A_{total} &= ((L_x \times L_y) - (P_x \times P_y)) \\ &= (31 \times 17) - (7 \times 7,5) \\ &= 474,500 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{bukaan} &= \text{Luas Lift} + \text{Luas Tangga} \\ &= (3,3 \times 3) + (2 \times (3 \times 4,3)) \\ &= 35,700 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{A_{bukaan}}{A_{total}} = \frac{35,700}{474.500} = 0,075 < 0,50$$

Berdasarkan denah struktur, luas bukaan pada diafragma (area tangga dan void) tidak melebihi 50% luas diafragma, sehingga **tidak terjadi** ketidakberaturan diskontinuitas diafragma.

### d. H4 - Ketidakberaturan Pergeseran Tegak Lurus Bidang

Ketidakberaturan H.4 terjadi apabila terdapat pergeseran (*offset*) elemen vertikal penahan gaya lateral dalam arah tegak lurus bidanganya antara dua tingkat berurutan, sehingga gaya lateral harus ditransfer melalui diafragma sebagai balok transfer. Berdasarkan evaluasi konfigurasi struktur, seluruh kolom sebagai elemen penahan gaya lateral tersusun menerus pada garis kolom (*grid*) yang sama dari tingkat dasar hingga atap, tanpa adanya pergeseran posisi kolom dalam arah tegak lurus bidang antar tingkat. Jalur transfer gaya lateral berlangsung langsung melalui kolom yang kontinu tanpa memerlukan elemen transfer. Dengan demikian, struktur **tidak mengalami** ketidakberaturan horizontal tipe H.4.

### e. H5 - Ketidakberaturan Sistem Penahan Gaya Lateral Tidak Paralel

Ketidakberaturan H.5 terjadi apabila elemen sistem penahan gaya lateral tidak sejajar atau tidak simetris terhadap sumbu ortogonal utama bangunan, sehingga pembebanan pada satu arah memicu respons torsi pada arah tegak lurus nya. Pada struktur ini, seluruh sistem rangka pemikul momen (balok dan kolom) terkonfigurasi sejajar terhadap sumbu ortogonal utama bangunan (arah X dan arah Y), membentuk grid struktur yang teratur. Elemen geometrik minor yang tidak sejajar, seperti konfigurasi tangga, tidak berfungsi sebagai bagian dari sistem utama penahan gaya lateral dan karenanya tidak memengaruhi keteraturan sistem. Dengan demikian, struktur **tidak mengalami** ketidakberaturan horizontal tipe H.5.

## 2. Ketidakberaturan Vertikal

### a. V1a/V1b - Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak

Pemeriksaan kekakuan lateral tiap tingkat terhadap tingkat di atasnya. Ketidakberaturan tingkat lunak 1a terjadi bila kekakuan suatu tingkat  $< 70\%$  kekakuan tingkat di atasnya atau  $< 80\%$  rata-rata tiga tingkat di atasnya; tingkat lunak berlebihan 1b bila  $< 60\%$  atau  $< 70\%$  rata-rata (SNI 1726-2019 Tabel 14) yang disajikan pada **Tabel 4.29** sebagai berikut:

**Tabel 4.29** Kekakuan Tingkat Lunak

|   | <b>f'c 25 X</b> | <b>f'c 25 Y</b> | <b>f'c 30 X</b> | <b>f'c 30 Y</b> | <b>f'c 35 X</b> | <b>f'c 35 Y</b> |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 6 | 97.497,046      | 109.343,919     | 72.258,171      | 85.798,625      | 68.802,430      | 65.070,597      |
| 5 | 139.937,175     | 158.706,380     | 108.674,900     | 125.750,417     | 104.885,560     | 95.259,693      |
| 4 | 153.981,997     | 176.846,317     | 120.806,258     | 140.113,917     | 116.841,595     | 105.744,758     |
| 3 | 163.782,490     | 194.690,029     | 129.363,548     | 154.226,043     | 124.708,312     | 116.486,804     |
| 2 | 202.117,283     | 247.047,780     | 163.206,535     | 196.779,955     | 156.624,875     | 149.843,143     |
| 1 | 366.388,206     | 429.864,965     | 303.134,890     | 344.028,404     | 289.777,159     | 260.979,342     |

Batas kekakuan tingkat < 70% tingkat di atasnya memicu V.1a. sehingga **tidak terjadi** ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (V.1).

#### b. V2 - Ketidakberaturan Berat (Massa)

Pemeriksaan massa tiap tingkat terhadap tingkat yang berdekatan. Ketidakberaturan 2 terjadi bila massa suatu tingkat melebihi 150% massa tingkat di atas atau di bawahnya. Sesuai SNI 1726-2019 Tabel 14, tingkat atap yang lebih ringan dari tingkat di bawahnya tidak perlu ditinjau. Pada model ETABS, tingkat 6 dan tingkat 7 merupakan tingkat atap (*rooftop*) yang lebih ringan, sehingga keduanya dikecualikan dari peninjauan massa. Peninjauan dilakukan pada tingkat tipikal (tingkat 1–5) yang disajikan pada Tabel 4.30 berikut:

**Tabel 4.30** Perbandingan Massa Antar Tingkat

| Tingkat | f'c 25 massa | rasio | f'c 30 massa | rasio | f'c 35 massa | rasio |
|---------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| 5       | 354.802,800  | –     | 329.051,200  | –     | 309.384,300  | –     |
| 4       | 357.859,300  | 1,009 | 331.586,600  | 1,008 | 311.948,400  | 1,008 |
| 3       | 358.006,100  | 1,000 | 331.696,700  | 1,000 | 312.095,100  | 1,000 |
| 2       | 358.048,000  | 1,000 | 331.728,100  | 1,000 | 312.137,100  | 1,000 |
| 1       | 357.859,300  | 0,999 | 331.586,600  | 1,000 | 311.948,400  | 0,999 |

Massa antar tingkat tipikal (tingkat 1–5) relatif seragam dengan rasio mendekati 1,0, sehingga **tidak terjadi** ketidakberaturan massa (V.2). Perbedaan massa yang besar hanya terjadi pada transisi menuju tingkat atap (tingkat 6 dan 7) yang lebih ringan, yang dikecualikan dari peninjauan sesuai SNI 1726-2019 Tabel 14.

#### c. V3 - Ketidakberaturan Geometri Vertikal

Diperiksa dimensi sistem penahan gaya lateral antar tingkat. Ketidakberaturan 3 terjadi bila dimensi horizontal sistem penahan suatu tingkat melebihi 130% dimensi tingkat yang berdekatan (SNI 1726-2019 Tabel 14). Dimensi elemen

penahan konsisten di seluruh tingkat, sehingga **tidak terjadi** ketidakberaturan geometri vertikal.

**d. V4 - Diskontinuitas Arah Bidang Elemen Penahan Gaya Lateral Vertikal**

Ketidakberaturan V.4 terjadi apabila terdapat pergeseran (*offset*) elemen vertikal penahan gaya lateral dalam arah bidangnya sendiri antara dua tingkat berurutan, yang memaksa transfer gaya melalui diafragma dan elemen kolektor. Berbeda dengan H.4 yang meninjau pergeseran tegak lurus bidang, V.4 meninjau pergeseran searah bidang elemen. Berdasarkan evaluasi sistem struktur vertikal, kolom sebagai elemen pemikul gaya lateral tersusun menerus dari level dasar hingga atap tanpa pergeseran searah bidang, *offset*, maupun elemen transfer. Kontinuitas ini memastikan jalur distribusi gaya vertikal dan lateral berlangsung langsung dan konsisten antar tingkat. Oleh karena itu, struktur **tidak mengalami** ketidakberaturan vertikal tipe V.4.

**e. V5a/V5b. Ketidakberaturan Kuat Tingkat (Diskontinuitas Kuat Lateral)**

Peninjauan kuat lateral tiap tingkat terhadap tingkat di atasnya. Ketidakberaturan tingkat lemah 5a terjadi bila kuat lateral suatu tingkat  $< 80\%$  tingkat di atasnya, dan tingkat lemah berlebihan 5b bila  $< 65\%$  (SNI 1726-2019 Tabel 14). Adapun rekapitulasi dari kuat leteral antar tingkat yang ditunjukkan pada **Tabel 4.31** berikut:

**Tabel 4.31** Kuat Lateral Antar Tingkat

| <b>Tingkat</b> | <b>f<sub>c</sub> 25 X</b> | <b>f<sub>c</sub> 25 Y</b> | <b>f<sub>c</sub> 30 X</b> | <b>f<sub>c</sub> 30 Y</b> | <b>f<sub>c</sub> 35 X</b> | <b>f<sub>c</sub> 35 Y</b> |
|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 6              | 365,156                   | 393,719                   | 317,864                   | 329,838                   | 292,098                   | 286,399                   |
| 5              | 723,720                   | 791,155                   | 632,765                   | 673,916                   | 588,699                   | 586,130                   |
| 4              | 1.016,182                 | 1.116,746                 | 886,658                   | 954,886                   | 827,892                   | 828,117                   |
| 3              | 1.240,423                 | 1.363,185                 | 1.081,804                 | 1.168,026                 | 1.012,129                 | 1.013,311                 |
| 2              | 1.388,054                 | 1.520,349                 | 1.211,137                 | 1.304,803                 | 1.134,487                 | 1.135,158                 |

| Tingkat | f'c 25 X  | f'c 25 Y  | f'c 30 X  | f'c 30 Y  | f'c 35 X  | f'c 35 Y  |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1       | 1.448,243 | 1.581,904 | 1.264,217 | 1.359,017 | 1.185,026 | 1.185,026 |

Kuat lateral tiap tingkat selalu lebih besar dari tingkat di atasnya, **sehingga tidak terjadi** ketidakberaturan kuat tingkat. Rangkuman status tiap jenis ketidakberaturan untuk tingkat yang ditinjau (tingkat 1–6) disajikan pada **Tabel 4.32** berikut:

**Tabel 4.32** Rekapitulasi Peninjauan Ketidakberaturan Struktur

| Jenis Ketidakberaturan        | f'c 25             | f'c 30             | f'c 35             |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| H.1a/1b Torsi                 | -                  | -                  | -                  |
|                               | H.2                | H.2                | H.2                |
| H.2 Sudut Dalam               | (0,226 &<br>0,441) | (0,226 &<br>0,441) | (0,226 &<br>0,441) |
| H.3 Diafragma                 | -                  | -                  | -                  |
| H.4 Pergeseran $\perp$ Bidang | -                  | -                  | -                  |
| H.5 Sistem Nonparalel         | -                  | -                  | -                  |
| V.1a/1b Kekakuan              | -                  | -                  | -                  |
| Tingkat Lunak                 | -                  | -                  | -                  |
| V.2 Massa                     | -                  | -                  | -                  |
| V.3 Geometri Vertikal         | -                  | -                  | -                  |
| V.4 Diskontinuitas            | -                  | -                  | -                  |
| Bidang                        | -                  | -                  | -                  |
| V.5a/5b Kuat Tingkat          | -                  | -                  | -                  |

Satu-satunya ketidakberaturan yang terpicu pada ketiga mutu beton adalah **ketidakberaturan sudut dalam (H.2)**, yang berasal dari geometri denah dan bernilai identik untuk ketiga mutu (bergantung dimensi bangunan, bukan mutu beton). Konsekuensinya berupa penerapan Pasal 7.3.3.4 sebagaimana diuraikan pada pembahasan H.2. Kemudian untuk nilai faktor redundansi, karena struktur

berkategori KDS D dan tidak memenuhi kondisi pengecualian redundansi (Pasal 7.3.4.2), faktor redundansi  $\rho = 1,3$  diterapkan pada seluruh kombinasi beban gempa.

#### 4.5.3 Kontrol Kinerja Struktur

Kontrol kinerja struktur dilakukan terhadap hasil analisis ETABS untuk memastikan bahwa seluruh elemen memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, dan stabilitas yang ditetapkan dalam SNI 1726-2019 dan SNI 2847-2019. Pemeriksaan meliputi kontrol simpangan antar lantai (*interstory drift*), partisipasi massa, periode getar, serta kapasitas elemen struktur dalam menahan kombinasi pembebanan yang bekerja.

##### 1. Kontrol Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar tingkat merupakan selisih perpindahan lateral antara dua tingkat berurutan yang menjadi indikator utama kinerja struktur terhadap beban gempa. Kontrol simpangan dilakukan dengan membandingkan simpangan antar tingkat yang diperbesar terhadap batas simpangan izin, mengikuti tiga tahap berikut:

###### a. Simpangan Antar Tingkat Diperbesar

Simpangan elastis  $\delta_{xe}$  dari analisis ETABS diperbesar dengan faktor amplifikasi defleksi sesuai SNI 1726-2019 Pers. (44), dengan  $C_d = 5,5$  dan  $I_e = 1,0$  sesuai dengan persamaan 31 berikut:

$$\delta_x = \frac{C_d \cdot \delta_{xe}}{I_e} \quad (31)$$

Simpangan antar tingkat  $\Delta$  merupakan selisih  $\delta_x$  dua tingkat berurutan. Sebagai contoh, untuk tingkat 5 f'c 25 Mpa yang dihitung sebagai berikut:

**Arah X** (simpangan elastis antar tingkat  $\delta_{eX} = 4,995$  mm):

$$\Delta_x = \frac{C_d \cdot \delta_{eX}}{I_e}$$

$$= \frac{5,5 \times 4,995}{1,0}$$

$$= 27,473 \text{ mm}$$

**Arah Y** (simpangan elastis antar tingkat  $\delta_{eY} = 4,623 \text{ mm}$ ):

$$\Delta_Y = \frac{C_d \cdot \delta_{eY}}{I_e}$$

$$= \frac{5,5 \times 4,623}{1,0}$$

$$= 25,427 \text{ mm}$$

b. Batas Simpangan Antar Tingkat Izin

Simpangan antar tingkat dibatasi untuk mengendalikan kerusakan elemen struktural maupun non-struktural serta menjaga stabilitas struktur secara keseluruhan. Batas simpangan izin untuk kategori risiko II ditentukan dengan SNI 1726-2019, dengan  $h_{sx}$  tinggi tingkat. Untuk tingkat 5 ( $h_{sx} = 3.300 \text{ mm}$ ) yang dihitung sebagai berikut:

$$\Delta_a = 0,020 \cdot h_{sx}$$

$$= 0,020 \times 3.300$$

$$= 66,000 \text{ mm}$$

Batas simpangan untuk KDS D dibagi faktor redundansi  $\rho = 1,3$  sebagai batas pembanding konservatif:

$$\frac{\Delta_a}{\rho} = \frac{66,000}{1,3} = 50,769 \text{ mm}$$

c. Kontrol Rasio Simpangan

Struktur dinyatakan memenuhi persyaratan kinerja simpangan apabila simpangan antar tingkat yang terjadi tidak melampaui batas izin, yang ditunjukkan oleh rasio simpangan terhadap batas kurang dari 1,0.

Untuk tingkat 5  $f'c$  25 Mpa yang dihitung sebagai berikut:

**Arah X:**

$$\frac{\Delta_x}{\Delta_a/\rho} = \frac{27,473}{50,769} = 0,541$$

**Arah Y:**

$$\frac{\Delta_y}{\Delta_a/\rho} = \frac{25,427}{50,769} = 0,501$$

Kedua rasio kurang dari 1,0, sehingga simpangan antar tingkat pada tingkat 5  $f'c$  25 MPa **memenuhi** batas izin. Nilai simpangan diperbesar  $\Delta$  (mm) dan rasio  $\Delta/(\Delta_a/\rho)$  per tingkat untuk tingkat 1–6. Batas  $\Delta_a/\rho = 51,538$  mm untuk tingkat 6 ( $h_{sx} = 3.350$  mm) dan 50,769 mm untuk tingkat 1–5 ( $h_{sx} = 3.300$  mm).

Rekapitulasi nilai simpangan arah X dan arah Y ditunjukkan pada **Tabel 4.33** dan **Tabel 4.34** berikut:

**Tabel 4.33** Nilai Simpangan Arah X

| Tingkat | $f'c$ 25 $\Delta$ | rasio | $f'c$ 30 $\Delta$ | rasio | $f'c$ 35 $\Delta$ | rasio |
|---------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
| 6       | 19,448            | 0,377 | 22,369            | 0,434 | 21,555            | 0,418 |
| 5       | 27,473            | 0,541 | 30,838            | 0,607 | 30,024            | 0,591 |
| 4       | 35,970            | 0,709 | 39,991            | 0,788 | 38,863            | 0,765 |
| 3       | 41,784            | 0,823 | 46,068            | 0,907 | 44,819            | 0,883 |
| 2       | 40,568            | 0,799 | 43,978            | 0,866 | 43,098            | 0,849 |
| 1       | 21,835            | 0,430 | 22,962            | 0,452 | 22,522            | 0,444 |

**Tabel 4.34** Nilai Simpangan Arah Y

| Tingkat | $f'c$ 25 $\Delta$ | rasio | $f'c$ 30 $\Delta$ | rasio | $f'c$ 35 $\Delta$ | rasio |
|---------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
| 6       | 17,144            | 0,333 | 18,326            | 0,356 | 21,016            | 0,408 |
| 5       | 25,427            | 0,501 | 27,225            | 0,536 | 30,981            | 0,610 |
| 4       | 33,550            | 0,661 | 36,135            | 0,712 | 41,453            | 0,817 |
| 3       | 38,698            | 0,762 | 41,783            | 0,823 | 48,185            | 0,949 |
| 2       | 37,020            | 0,729 | 39,974            | 0,787 | 46,112            | 0,908 |

| Tingkat | f'c 25 Δ | rasio | f'c 30 Δ | rasio | f'c 35 Δ | rasio |
|---------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| 1       | 19,322   | 0,381 | 20,806   | 0,410 | 23,760   | 0,468 |

Seluruh rasio simpangan antar tingkat pada tingkat 1–6 untuk ketiga mutu berada di bawah 1,0, sehingga simpangan memenuhi batas izin. Rasio terbesar terjadi pada f'c 35 arah Y tingkat 3 (0,949), yang masih di bawah batas.

## 2. Kontrol P-Delta (Koefisien Stabilitas $\theta$ )

Pengaruh P-delta merupakan efek orde kedua akibat beban gravitasi yang bekerja pada struktur dalam kondisi tersimpangkan, yang menimbulkan momen dan simpangan tambahan. Signifikansi efek ini diukur melalui koefisien stabilitas  $\theta$ ; apabila  $\theta$  tidak melampaui batas, pengaruh P-delta boleh diabaikan dalam analisis.

Koefisien stabilitas dihitung dengan SNI 1726-2019 yang disajikan pada persamaan 37 berikut:

$$\theta = \frac{P_x \cdot \Delta_x \cdot I_e}{V_x \cdot h_{sx} \cdot C_d} \quad (37)$$

Untuk tingkat 5 f'c 25 MPa, dengan beban gravitasi total di atas tingkat  $P_x = 13.127,430$  kN dan  $h_{sx} = 3.300$  mm yang dihitung sebagai berikut:

**Arah X** ( $\Delta_x = 27,473$  mm;  $V_x = 723,720$  kN):

$$\theta_x = \frac{13.127,430 \times 27,473 \times 1,0}{723,720 \times 3.300 \times 5,5} = 0,027$$

**Arah Y** ( $\Delta_y = 25,427$  mm;  $V_y = 791,156$  kN):

$$\theta_y = \frac{13.127,430 \times 25,427 \times 1,0}{791,156 \times 3.300 \times 5,5} = 0,023$$

Batas koefisien stabilitas dihitung dengan SNI 1726-2019, dengan rasio kebutuhan geser  $\beta = 1,0$ :

$$\begin{aligned} \theta_{maks} &= \frac{0,5}{\beta \cdot C_d} \\ &= \frac{0,5}{1,0 \times 5,5} \\ &= 0,091 \leq 0,25 \end{aligned}$$

karena  $\theta_x = 0,027$  dan  $\theta_y = 0,023$  keduanya kurang dari  $\theta_{maks} = 0,091$  (dan kurang dari 0,10), pengaruh P-delta pada tingkat 5 f'c 25 MPa tidak signifikan dan masih dalam rasio yang aman.

Rekapitulasi kontrol P-Delta untuk arah X dan Y ditunjukkan pada **Tabel 4.35** dan **Tabel 4.36** sebagai berikut:

**Tabel 4.35** Kontrol P-Delta Arah X

| Tingkat | f'c 25 0X | f'c 30 0X | f'c 35 0X |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 6       | 0,015     | 0,019     | 0,020     |
| 5       | 0,027     | 0,034     | 0,035     |
| 4       | 0,041     | 0,051     | 0,051     |
| 3       | 0,054     | 0,066     | 0,067     |
| 2       | 0,060     | 0,072     | 0,073     |
| 1       | 0,037     | 0,044     | 0,044     |

**Tabel 4.36** Kontrol P-Delta Arah Y

| Tingkat | f'c 25 0Y | f'c 30 0Y | f'c 35 0Y |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 6       | 0,012     | 0,015     | 0,019     |
| 5       | 0,023     | 0,028     | 0,036     |
| 4       | 0,035     | 0,042     | 0,055     |
| 3       | 0,045     | 0,055     | 0,072     |
| 2       | 0,050     | 0,060     | 0,078     |
| 1       | 0,030     | 0,037     | 0,047     |

Seluruh nilai  $\theta$  pada tingkat 1–6 untuk ketiga mutu berada di bawah batas  $\theta_{maks} = 0,091$ , sehingga struktur tidak memerlukan amplifikasi pengaruh P-delta maupun desain ulang. Nilai  $\theta$  terbesar terjadi pada f'c 35 arah Y tingkat 2 (0,078), yang masih di bawah ambang batas. Nilai  $\theta$  cenderung meningkat seiring peningkatan mutu beton, karena dimensi elemen yang lebih kecil menghasilkan kekakuan lateral yang lebih rendah dan simpangan yang sedikit lebih besar.

### 3. Partisipasi Massa dan Jumlah Ragam Getar

Analisis respons dinamik struktur dilakukan dengan metode analisis ragam spektrum respons. Ragam getar (*mode shape*) merepresentasikan pola deformasi bebas struktur pada frekuensi alaminya, yang secara umum terbagi menjadi ragam translasi (perpindahan lateral dominan pada satu arah horizontal) dan ragam rotasi atau torsi (rotasi dominan terhadap sumbu vertikal). Partisipasi massa (*mass participation ratio*) tiap ragam menyatakan proporsi massa struktur yang teraktivasi oleh ragam tersebut, dinyatakan dalam UX dan UY untuk translasi arah X dan Y, serta RZ untuk rotasi terhadap sumbu vertikal. Sesuai SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1.1, analisis ragam harus menyertakan jumlah ragam yang cukup hingga partisipasi massa ragam terkombinasi mencapai paling sedikit 90% dari massa aktual struktur pada masing-masing arah horizontal ortogonal.

Secara umum, karakteristik dinamik ketiga skenario mutu menunjukkan pola yang serupa: dua ragam pertama merupakan ragam translasi pada kedua arah horizontal ortogonal, diikuti ragam ketiga yang merupakan ragam rotasi (torsi) dengan partisipasi massa rotasi RZ berkisar 0,69–0,72. Struktur dengan perilaku dinamik yang baik dicirikan oleh dominasi ragam translasi pada ragam-ragam awal dan munculnya ragam torsi pada urutan setelahnya, sebagaimana teramati pada seluruh skenario mutu. Rekapitulasi partisipasi massa dan periode ragam untuk ketiga mutu beton disajikan pada **Tabel 4.37** sebagai berikut:

**Tabel 4.37** Rekapitulasi Kontrol Kinerja Struktur

| Parameter                        | f <sub>c</sub> 25           | f <sub>c</sub> 30           | f <sub>c</sub> 35           |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Periode ragam 1<br>(detik)       | 1,077                       | 1,156                       | 1,175                       |
| Ragam 1 – jenis<br>(partisipasi) | Translasi X (UX<br>= 0,741) | Translasi X (UX<br>= 0,736) | Translasi Y (UY<br>= 0,725) |
| Periode ragam 2<br>(detik)       | 0,986                       | 1,058                       | 1,144                       |

| Parameter                          | f'c 25                   | f'c 30                   | f'c 35                   |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ragam 2 – jenis (partisipasi)      | Translasi Y (UY = 0,743) | Translasi Y (UY = 0,750) | Translasi X (UX = 0,660) |
| Periode ragam 3 (detik)            | 0,861                    | 0,927                    | 0,973                    |
| Ragam 3 – jenis (partisipasi)      | Rotasi (RZ = 0,715)      | Rotasi (RZ = 0,718)      | Rotasi (RZ = 0,695)      |
| Ragam pencapaian Sum UX $\geq$ 90% | ke-7                     | ke-7                     | ke-7                     |
| Ragam pencapaian Sum UY $\geq$ 90% | ke-6                     | ke-6                     | ke-8                     |
| Sum UX akhir (40 ragam)            | 0,9999                   | 0,9999                   | 0,9999                   |
| Sum UY akhir (40 ragam)            | 0,9998                   | 0,9999                   | 0,9999                   |

Partisipasi massa kumulatif pada masing-masing arah horizontal telah melampaui 90% sebelum ragam ke-8 pada seluruh skenario mutu, sehingga jumlah 40 ragam yang digunakan memenuhi persyaratan partisipasi massa minimum SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1.1 dengan margin yang memadai (partisipasi akhir mendekati 100%). Pada penelitian ini, analisis dilakukan dengan 40 ragam getar untuk setiap skenario mutu beton. Jumlah 40 ragam dipilih untuk memastikan konvergensi partisipasi massa hingga mendekati 100% pada seluruh arah, mengingat persyaratan minimum 90% menurut SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1.1 telah terpenuhi jauh sebelum ragam terakhir. Penggunaan jumlah ragam yang memadai ini juga menjamin tertangkapnya ragam-ragam getar dengan frekuensi lebih tinggi (periode ragam ke-40 sekitar 0,04 detik), sehingga respons dinamik struktur terwakili secara menyeluruh.

Ditinjau dari urutan ragam dominan, pada f'c 25 dan f'c 30 MPa ragam fundamental (ragam ke-1) didominasi translasi arah X, sedangkan pada f'c 35 MPa ragam fundamental didominasi translasi arah Y. Pergeseran urutan ragam translasi

dominan ini konsisten dengan perilaku periode getar yang tidak monoton terhadap mutu beton, sebagaimana telah diuraikan pada Subbab 4.3.4, dan menegaskan bahwa karakteristik dinamik struktur dipengaruhi oleh interaksi massa dan kekakuan lateral secara simultan. Meskipun demikian, pada ketiga skenario ragam torsi tetap muncul pada ragam ketiga (bukan pada ragam pertama atau kedua), yang menunjukkan bahwa respons translasi mendominasi respons torsi dan struktur tidak mengalami kopel torsi-translasi yang tidak diinginkan pada ragam-ragam awal.

#### **4.6 Perencanaan Struktur Atas**

Perencanaan penulangan struktur atas dilakukan berdasarkan gaya dalam hasil analisis ETABS dengan mengacu pada ketentuan SNI 2847-2019. Perencanaan mencakup elemen balok, kolom, sambungan balok-kolom, dan pelat lantai.

##### **4.6.1 Penulangan Balok**

Balok direncanakan sebagai bagian dari Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), sehingga harus memenuhi persyaratan tambahan sebagaimana diatur dalam Pasal 18.6 SNI 2847-2019. Persyaratan tersebut meliputi batasan rasio tulangan minimum dan maksimum, ketentuan tulangan longitudinal minimum pada daerah sambungan, serta pembatasan jarak antar sengkang. Perhitungan kapasitas lentur dan geser dilakukan secara terpisah berdasarkan gaya dalam yang diperoleh dari ETABS.

#### **Contoh Perhitungan - Balok Induk B1 ( $f'_c$ 25 MPa)**

##### **1. Data Perencanaan**

|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| Lebar balok, $b$                          | = 300 mm  |
| Tinggi balok, $h$                         | = 500 mm  |
| Kuat tekan beton, $f'_c$                  | = 25 MPa  |
| Kuat leleh tulangan longitudinal, $f_y$   | = 420 MPa |
| Kuat leleh tulangan transversal, $f_{yv}$ | = 420 MPa |

|                                                  |                                     |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Selimut beton bersih, cc                         | = 30 mm                             |
| Diameter tulangan longitudinal, db               | = 19 mm                             |
| Diameter tulangan sengkang, ds                   | = 10 mm                             |
| Faktor distribusi tegangan blok tekan, $\beta_1$ | = 0,85 ( $f'_c \leq 28$ MPa)        |
| Faktor reduksi lentur, $\phi$                    | = 0,90 (penampang terkendali tarik) |
| Faktor reduksi geser dan torsi, $\phi$           | = 0,75                              |

Gaya dalam terfaktor diperoleh dari kombinasi beban LRFD hasil analisis ETABS pada penampang kritis. Momen lentur terfaktor:  $M_u = 218,767$  kNm (tumpuan, atas/negatif);  $122,041$  kNm (tumpuan, bawah/positif);  $119,290$  kNm (lapangan, bawah/positif); dan  $10,633$  kNm (lapangan, atas/negatif). Gaya geser terfaktor  $V_u = 332,490$  kN. Gaya torsi terfaktor  $T_u = 9,401$  kNm dengan gaya aksial terfaktor  $P_u = 1,712$  kN.

## 2. Tinggi Efektif Penampang (d)

Tinggi efektif balok dihitung dari serat tekan terluar hingga titik berat tulangan tarik, dengan asumsi satu lapis tulangan (SNI 2847-2019 Pasal 18.6) yang disajikan pada persamaan 107 berikut:

$$\begin{aligned}
 d &= h - \text{selimut} - d_s - \frac{d_b}{2} \\
 &= 500 - 30 - 10 - \frac{19}{2} \\
 &= 450,5 \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{107}$$

## 3. Penulangan Lentur Balok B1

Penulangan lentur ditinjau pada empat kondisi momen kritis yang dihasilkan analisis ETABS: tumpuan atas (momen negatif di muka kolom akibat kombinasi gempa), tumpuan bawah (momen positif di muka kolom), lapangan bawah (momen positif di tengah bentang), dan lapangan atas (momen negatif di tengah bentang). Setiap kondisi dihitung lengkap dari momen terfaktor hingga kapasitas momen

tereduksi. Luas tulangan minimum dan maksimum berlaku sama untuk seluruh kondisi karena dimensi penampang identik.

#### **Luas Tulangan Minimum (berlaku semua kondisi)**

Luas tulangan tarik tidak boleh kurang dari nilai minimum. Diambil nilai terbesar dari dua persamaan (SNI 2847-2019 Pasal 9.6.1.2) yang dihitung sebagai berikut:

$$A_{s,min1} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4 f_y} b d = \frac{\sqrt{25}}{4 \times 420} \times 300 \times 450,5 = 402,232 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min2} = \frac{1,4}{f_y} b d = \frac{1,4}{420} \times 300 \times 450,5 = 450,500 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min} = \max(402,232 ; 450,500) = 450,500 \text{ mm}^2$$

#### **Luas Tulangan Maksimum (berlaku semua kondisi)**

Untuk menjamin daktilitas penampang (regangan tarik tulangan cukup besar saat runtuh), luas tulangan dibatasi (SNI 2847-2019 Pasal 18.6.3.1) yang dihitung sebagai berikut:

$$A_{s,max} = 0,025 b d = 0,025 \times 300 \times 450,5 = 3.378,750 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan perlu pada tiap kondisi dihitung dengan menyelesaikan persamaan keseimbangan momen terhadap tinggi blok tekan, dinyatakan dalam bentuk (SNI 2847-2019) yang disajikan pada persamaan 112 berikut:

$$A_{s,hitung} = \left( \frac{0,85 f'_c \cdot b}{f_y} \right) \left( d - \sqrt{d^2 - \frac{2(M_u/\phi)}{0,85 f'_c \cdot b}} \right) \quad (112)$$

##### **a. Tumpuan Atas (Momen Negatif)**

Momen terfaktor  $M_u = 218,767 \text{ kNm}$ . Luas tulangan dihitung sebagai berikut:

$$A_{s,hitung} = \frac{0,85 \times 25 \times 300}{420} \left( 450,5 - \sqrt{450,5^2 - \frac{2 \times 218,767 \times \frac{10^6}{0,9}}{0,85 \times 25 \times 300}} \right)$$

$$= 1.435,324 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan ETABS pada penampang ini  $A_s$ , ETABS = 1.438 mm<sup>2</sup>. Luas tulangan perlu diambil nilai terbesar:

$$\begin{aligned} A_{s,perlu} &= \max(A_{s,\min} ; A_{s,hitung} ; A_{s,ETABS}) \\ &= \max(450,500 ; 1.435,324 ; 1.438) \\ &= 1.438 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Jumlah tulangan dihitung dari luas perlu dibagi luas satu batang, dibulatkan ke atas (minimum 2 batang):

$$n = \frac{A_{s,perlu}}{\frac{1}{4} \pi d_b^2} = \frac{1.438}{\frac{1}{4} \pi \times 19^2} = 5,070 \approx 6 \text{ batang} \rightarrow \mathbf{6D19}$$

$$A_{s,pasang} = 6 \times \frac{1}{4} \pi \times 19^2 = 1.701,172 \text{ mm}^2$$

Kontrol:

$$A_{s, \min} < A_{s, pasang} < A_{s, \max} \rightarrow 450,50 < 1.701,17 < 3.378,75 \rightarrow \mathbf{MEMENUHI.}$$

Kapasitas momen tereduksi penampang terpasang:

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi A_{s,pasang} f_y \left( d - \frac{A_{s,pasang} f_y}{2 \times 0,85 f'_c b} \right) \times 10^{-6} \\ &= 0,9 \times 1.701,172 \times 420 \left( 450,5 - \frac{1.701,172 \times 420}{2 \times 0,85 \times 25 \times 300} \right) \times 10^{-6} \\ &= 253,656 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Kontrol:

$$\phi \cdot M_n \geq M_u \rightarrow 253,656 \geq 218,767 \rightarrow \mathbf{MEMENUHI.}$$

## b. Tumpuan Bawah (Momen Positif)

Momen terfaktor  $M_u = 122,041 \text{ kNm}$ . Luas tulangan hitung:

$$\begin{aligned} A_{s,hitung} &= \frac{0,85 \times 25 \times 300}{420} \left( 450,5 - \sqrt{450,5^2 - \frac{2 \times 122,0411 \times \frac{10^6}{0,9}}{0,85 \times 25 \times 300}} \right) \\ &= 758,769 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas tulangan ETABS As, ETABS = 766 mm<sup>2</sup>. Luas tulangan perlu:

$$\begin{aligned} A_{s,perlu} &= \max(A_{s,\min} ; A_{s,hitung} ; A_{s,ETABS}) \\ &= \max(450,500 ; 758,769 ; 766) \\ &= 766 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$n = \frac{A_{s,perlu}}{\frac{1}{4} \pi d_b^2} = \frac{766}{\frac{1}{4} \pi \times 19^2} = 2,702 \approx 3 \text{ batang} \rightarrow \mathbf{3D19}$$

$$A_{s,pasang} = 3 \times \frac{1}{4} \pi \times 19^2 = 850,586 \text{ mm}^2$$

Kontrol:

$$A_{s,\min} < A_{s,pasang} < A_{s,\max} \rightarrow 450,50 < 850,586 < 3.378,75 \rightarrow \mathbf{MEMENUHI.}$$

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi A_{s,pasang} f_y \left( d - \frac{A_{s,pasang} f_y}{2 \times 0,85 f'_c b} \right) \times 10^{-6} \\ &= 0,9 \times 850,586 \times 420 \left( 450,5 - \frac{850,586 \times 420}{2 \times 0,85 \times 25 \times 300} \right) \times 10^{-6} \\ &= 135,837 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Kontrol:

$$\phi \cdot M_n \geq M_u \rightarrow 135,837 \geq 122,041 \rightarrow \mathbf{MEMENUHI.}$$

### c. Lapangan Bawah (Momen Positif)

Momen terfaktor Mu = 119,2898 kNm. Luas tulangan hitung:

$$\begin{aligned} A_{s,hitung} &= \frac{0,85 \times 25 \times 300}{420} \left( 450,5 - \sqrt{450,5^2 - \frac{2 \times 119,2898 \times \frac{10^6}{0,9}}{0,85 \times 25 \times 300}} \right) \\ &= 740,622 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas tulangan ETABS As, ETABS = 764 mm<sup>2</sup>. Luas tulangan perlu:

$$\begin{aligned} A_{s,perlu} &= \max(A_{s,\min} ; A_{s,hitung} ; A_{s,ETABS}) \\ A_{s,perlu} &= \max(450,500 ; 740,622 ; 764) \\ &= 764 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$n = \frac{A_{s,perlu}}{\frac{1}{4}\pi d_b^2} = \frac{764}{\frac{1}{4}\pi \times 19^2} = 2,702 \approx 3 \text{ batang} \rightarrow \mathbf{3D19}$$

$$A_{s,pasang} = 3 \times \frac{1}{4}\pi \times 19^2 = 850,586 \text{ mm}^2$$

Kontrol:

$$A_{s, \min} < A_{s, pasang} < A_{s, \max} \rightarrow 450,50 < 850,59 < 3.378,75 \rightarrow \mathbf{MEMENUHI.}$$

#### d. Lapangan Atas (Momen Negatif)

Momen terfaktor  $M_u = 10,6328 \text{ kNm}$ . Luas tulangan hitung:

$$A_{s,hitung} = \frac{0,85 \times 25 \times 300}{420} \left( 450,5 - \sqrt{450,5^2 - \frac{2 \times 10,6328 \times \frac{10^6}{0,9}}{0,85 \times 25 \times 300}} \right)$$

$$= 62,727 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan ETABS  $A_s$ , ETABS = 93 mm<sup>2</sup>. Luas tulangan perlu:

$$A_{s,perlu} = \max(A_{s,\min} ; A_{s,hitung} ; A_{s,ETABS})$$

$$A_{s,perlu} = \max(450,500 ; 62,727 ; 93)$$

$$= 450,500 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{450,500}{\frac{1}{4}\pi \times 19^2} = 1,591 \approx 2 \text{ batang} \rightarrow \mathbf{2D19}$$

$$A_{s,pasang} = 2 \times \frac{1}{4}\pi \times 19^2 = 567,057 \text{ mm}^2$$

Kontrol:

$$A_{s, \min} < A_{s, pasang} < A_{s, \max} \rightarrow 450,50 < 567,06 < 3.378,75 \rightarrow \mathbf{MEMENUHI.}$$

#### Rekapitulasi penulangan lentur B1:

Tumpuan atas **6D19** ( $A_s = 1.701,17 \text{ mm}^2$ ); tumpuan bawah **3D19** ( $A_s = 850,59 \text{ mm}^2$ ); lapangan bawah **3D19** ( $A_s = 850,59 \text{ mm}^2$ ); lapangan atas **2D19** ( $A_s = 567,06 \text{ mm}^2$ ).

Rekapitulasi penulangan lentur balok disajikan pada **Tabel 4.38** sebagai berikut:

**Tabel 4.38** Rekapitulasi Penulangan Lentur Balok

| Frame                                | Lebar<br>balok,<br>b<br>(mm) | x | Tinggi<br>balok, h<br>(mm) | Jenis<br>Tulangan | Moment            |        | As min 1 (mm2)           |        | As min 2 (mm2)           |        | As Hitung |        | As Etabs |        | Tulangan |      | As Tulangan |        |
|--------------------------------------|------------------------------|---|----------------------------|-------------------|-------------------|--------|--------------------------|--------|--------------------------|--------|-----------|--------|----------|--------|----------|------|-------------|--------|
|                                      |                              |   |                            |                   | Ultimate<br>(kNm) | Lap.   | SNI 2847-2019<br>9.6.1.2 |        | SNI 2847-2019<br>9.6.1.2 |        | (mm2)     |        | (mm2)    |        | Tump.    | Lap. | Tump.       | Lap.   |
|                                      |                              |   |                            |                   |                   |        | Tump.                    | Lap.   | Tump.                    | Lap.   | Tump.     | Lap.   | Tump.    | Lap.   |          |      |             |        |
| Penulangan Lentur Balok (f'c 25 MPa) |                              |   |                            |                   |                   |        |                          |        |                          |        |           |        |          |        |          |      |             |        |
| B1                                   | 300                          | x | 500                        | Atas              | 218,77            | 10,63  | 402,23                   | 402,23 | 450,50                   | 450,50 | 1435,32   | 62,73  | 1438,00  | 93,00  | 6D19     | 2D19 | 1701,17     | 567,06 |
|                                      |                              |   |                            | Bawah             | 122,04            | 119,29 | 402,23                   | 402,23 | 450,50                   | 450,50 | 758,77    | 740,62 | 766,00   | 764,00 | 3D19     | 3D19 | 850,59      | 850,59 |
| B2                                   | 300                          | x | 400                        | Atas              | 110,89            | 35,65  | 312,95                   | 312,95 | 350,50                   | 350,50 | 915,79    | 276,27 | 918,00   | 463,00 | 4D19     | 2D19 | 1134,11     | 567,06 |
|                                      |                              |   |                            | Bawah             | 69,06             | 59,80  | 312,95                   | 312,95 | 350,50                   | 350,50 | 549,68    | 472,36 | 560,00   | 670,00 | 2D19     | 3D19 | 567,06      | 850,59 |
| B3                                   | 200                          | x | 400                        | Atas              | 94,95             | 38,69  | 208,63                   | 208,63 | 233,67                   | 233,67 | 808,93    | 305,12 | 782,00   | 573,00 | 3D19     | 3D19 | 850,59      | 850,59 |
|                                      |                              |   |                            | Bawah             | 51,61             | 54,84  | 208,63                   | 208,63 | 233,67                   | 233,67 | 413,69    | 441,35 | 413,00   | 734,00 | 2D19     | 3D19 | 567,06      | 850,59 |
| B4                                   | 200                          | x | 300                        | Atas              | 8,26              | 2,96   | 150,00                   | 150,00 | 168,00                   | 168,00 | 88,19     | 31,31  | 171,00   | 171,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |
|                                      |                              |   |                            | Bawah             | 1,09              | 2,10   | 150,00                   | 150,00 | 168,00                   | 168,00 | 11,43     | 22,17  | 171,00   | 171,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |
| BAT1                                 | 200                          | x | 300                        | Atas              | 16,10             | 24,19  | 150,89                   | 150,89 | 169,00                   | 169,00 | 173,97    | 266,26 | 230,00   | 358,00 | 2D13     | 3D13 | 265,46      | 398,20 |
|                                      |                              |   |                            | Bawah             | 15,00             | 7,62   | 150,89                   | 150,89 | 169,00                   | 169,00 | 161,66    | 80,79  | 254,00   | 205,00 | 2D13     | 2D13 | 265,46      | 265,46 |
| BAT2                                 | 150                          | x | 300                        | Atas              | 5,66              | 1,84   | 113,17                   | 113,17 | 126,75                   | 126,75 | 60,00     | 19,28  | 100,00   | 48,00  | 2D13     | 2D13 | 265,46      | 265,46 |
|                                      |                              |   |                            | Bawah             | 2,07              | 2,47   | 113,17                   | 113,17 | 126,75                   | 126,75 | 21,70     | 25,93  | 51,00    | 35,00  | 2D13     | 2D13 | 265,46      | 265,46 |
| BB                                   | 250                          | x | 350                        | Atas              | 52,44             | 6,28   | 224,70                   | 224,70 | 251,67                   | 251,67 | 490,93    | 55,42  | 630,00   | 353,00 | 4D16     | 2D16 | 804,25      | 402,12 |
|                                      |                              |   |                            | Bawah             | 37,38             | 17,91  | 224,70                   | 224,70 | 251,67                   | 251,67 | 342,79    | 160,25 | 428,00   | 404,00 | 3D16     | 3D16 | 603,19      | 603,19 |
| RBL                                  | 200                          | x | 300                        | Atas              | 31,63             | 9,05   | 150,00                   | 150,00 | 168,00                   | 168,00 | 357,04    | 96,81  | 380,00   | 184,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |
|                                      |                              |   |                            | Bawah             | 22,95             | 12,58  | 150,00                   | 150,00 | 168,00                   | 168,00 | 253,50    | 135,63 | 259,00   | 167,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |
| Penulangan Lentur Balok (f'c 30 MPa) |                              |   |                            |                   |                   |        |                          |        |                          |        |           |        |          |        |          |      |             |        |
| B1                                   | 300                          | x | 450                        | Atas              | 204,97            | 9,86   | 391,72                   | 391,72 | 400,50                   | 400,50 | 1510,27   | 65,41  | 1556,00  | 96,00  | 6D19     | 2D19 | 1701,17     | 567,06 |

| Frame | Lebar<br>balok,<br>b<br>(mm) | x | Tinggi<br>balok, h<br>(mm) | Jenis<br>Tulangan                    | Moment            |        | As min 1 (mm2) |         | As min 2 (mm2) |        | As Hitung |        | As Etab |        | Tulangan |      | As Tulangan |        |
|-------|------------------------------|---|----------------------------|--------------------------------------|-------------------|--------|----------------|---------|----------------|--------|-----------|--------|---------|--------|----------|------|-------------|--------|
|       |                              |   |                            |                                      | Ultimate<br>(kNm) | Lap.   | SNI 2847-2019  |         | SNI 2847-2019  |        | (mm2)     |        | (mm2)   |        | Tump.    | Lap. | Tump.       | Lap.   |
|       |                              |   |                            |                                      |                   |        | 9.6.1.2        | 9.6.1.2 | Tump.          | Lap.   | Tump.     | Lap.   | Tump.   | Lap.   |          |      |             |        |
| B2    | 300                          | x | 350                        | Bawah                                | 111,47            | 114,41 | 391,72         | 391,72  | 400,50         | 400,50 | 777,74    | 799,56 | 791,00  | 811,00 | 3D19     | 3D19 | 850,59      | 850,59 |
|       |                              |   |                            | Atas                                 | 103,86            | 34,96  | 293,91         | 293,91  | 300,50         | 300,50 | 1007,01   | 316,98 | 1034,00 | 324,00 | 4D19     | 2D19 | 1134,11     | 567,06 |
|       |                              |   |                            | Bawah                                | 57,82             | 58,17  | 293,91         | 293,91  | 300,50         | 300,50 | 535,24    | 538,58 | 549,00  | 552,00 | 2D19     | 2D19 | 567,06      | 567,06 |
| B3    | 200                          | x | 300                        | Atas                                 | 66,00             | 30,84  | 163,34         | 163,34  | 167,00         | 167,00 | 802,95    | 345,29 | 791,00  | 335,00 | 3D19     | 2D19 | 850,59      | 567,06 |
|       |                              |   |                            | Bawah                                | 29,32             | 41,68  | 163,34         | 163,34  | 167,00         | 167,00 | 327,25    | 477,71 | 327,00  | 750,00 | 2D19     | 3D19 | 567,06      | 850,59 |
|       |                              |   |                            | Atas                                 | 7,65              | 2,86   | 131,71         | 131,71  | 134,67         | 134,67 | 102,29    | 37,74  | 138,00  | 138,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |
| B4    | 200                          | x | 250                        | Bawah                                | 1,48              | 1,55   | 131,71         | 131,71  | 134,67         | 134,67 | 19,43     | 20,32  | 138,00  | 138,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |
|       |                              |   |                            | Atas                                 | 22,82             | 0,96   | 123,97         | 123,97  | 126,75         | 126,75 | 251,92    | 10,04  | 337,00  | 124,00 | 3D13     | 2D13 | 398,20      | 265,46 |
|       |                              |   |                            | Bawah                                | 14,16             | 4,47   | 123,97         | 123,97  | 126,75         | 126,75 | 152,85    | 47,08  | 238,00  | 202,00 | 2D13     | 2D13 | 265,46      | 265,46 |
| BAT1  | 150                          | x | 300                        | Atas                                 | 3,24              | 0,47   | 75,07          | 75,07   | 76,75          | 76,75  | 57,03     | 8,16   | 74,00   | 24,00  | 2D13     | 2D13 | 265,46      | 265,46 |
| BAT2  | 150                          | x | 200                        | Bawah                                | 0,99              | 1,68   | 75,07          | 75,07   | 76,75          | 76,75  | 17,20     | 29,28  | 36,00   | 40,00  | 2D13     | 2D13 | 265,46      | 265,46 |
|       |                              |   |                            | Atas                                 | 34,78             | 3,23   | 164,32         | 164,32  | 168,00         | 168,00 | 389,93    | 34,06  | 529,00  | 231,00 | 3D16     | 2D16 | 603,19      | 402,12 |
|       |                              |   |                            | Bawah                                | 22,04             | 12,04  | 164,32         | 164,32  | 168,00         | 168,00 | 240,85    | 129,10 | 290,00  | 362,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |
| BB    | 200                          | x | 300                        | Atas                                 | 29,17             | 8,17   | 123,24         | 123,24  | 126,00         | 126,00 | 329,98    | 87,47  | 355,00  | 142,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |
|       |                              |   |                            | Bawah                                | 20,76             | 11,39  | 123,24         | 123,24  | 126,00         | 126,00 | 229,44    | 122,82 | 246,00  | 154,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |
|       |                              |   |                            | Penulangan Lentur Balok (F'c 35 MPa) |                   |        |                |         |                |        |           |        |         |        |          |      |             |        |
| B1    | 250                          | x | 400                        | Atas                                 | 182,15            | 44,71  | 308,57         | 308,57  | 292,08         | 292,08 | 1574,58   | 347,17 | 1633,00 | 359,00 | 6D19     | 2D19 | 1701,17     | 567,06 |
|       |                              |   |                            | Bawah                                | 94,11             | 101,93 | 308,57         | 308,57  | 292,08         | 292,08 | 756,45    | 824,05 | 797,00  | 850,00 | 3D19     | 3D19 | 850,59      | 850,59 |
|       |                              |   |                            | Atas                                 | 99,75             | 33,01  | 264,55         | 264,55  | 250,42         | 250,42 | 965,81    | 298,99 | 1017,00 | 308,00 | 4D19     | 2D19 | 1134,11     | 567,06 |
| B2    | 250                          | x | 350                        | Bawah                                | 53,55             | 57,01  | 264,55         | 264,55  | 250,42         | 250,42 | 494,38    | 528,15 | 520,00  | 546,00 | 2D19     | 2D19 | 567,06      | 567,06 |
|       |                              |   |                            | Atas                                 | 95,09             | 49,26  | 211,64         | 211,64  | 200,33         | 200,33 | 941,18    | 458,37 | 959,00  | 453,00 | 4D19     | 2D19 | 1134,11     | 567,06 |
|       |                              |   |                            | Bawah                                | 45,31             | 50,09  | 211,64         | 211,64  | 200,33         | 200,33 | 419,58    | 466,57 | 424,00  | 763,00 | 2D19     | 3D19 | 567,06      | 850,59 |
| B3    | 200                          | x | 350                        | Atas                                 | 11,76             | 3,99   | 142,27         | 142,27  | 134,67         | 134,67 | 158,36    | 52,73  | 154,00  | 138,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |
|       |                              |   |                            | Bawah                                | 2,39              | 1,53   | 142,27         | 142,27  | 134,67         | 134,67 | 31,53     | 20,11  | 138,00  | 138,00 | 2D16     | 2D16 | 402,12      | 402,12 |

| Frame | Lebar<br>balok,<br>b<br>(mm) | x | Tinggi<br>balok, h<br>(mm) | Jenis<br>Tulangan | Moment            |         | As min 1 (mm2) |         | As min 2 (mm2) |         | As Hitung |        | As Etabas |        | Tulangan |       | As Tulangan |        |      |       |      |
|-------|------------------------------|---|----------------------------|-------------------|-------------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|-----------|--------|-----------|--------|----------|-------|-------------|--------|------|-------|------|
|       |                              |   |                            |                   | Ultimate<br>(kNm) | 9.6.1.2 | SNI 2847-2019  | 9.6.1.2 | SNI 2847-2019  | 9.6.1.2 | 9.6.1.2   | Tump.  | Lap.      | Tump.  | Lap.     | Tump. | Lap.        | Tump.  | Lap. | Tump. | Lap. |
|       |                              |   |                            |                   |                   |         |                |         |                |         |           |        |           |        |          |       |             |        |      |       |      |
| BAT1  | 150                          | x | 300                        | Atas              | 15,17             | 27,27   | 133,90         | 133,90  | 126,75         | 126,75  | 163,23    | 301,41 | 211,00    | 401,00 | 2D13     | 4D13  | 265,46      | 530,93 |      |       |      |
|       |                              |   |                            | Bawah             | 16,85             | 6,17    | 133,90         | 133,90  | 126,75         | 126,75  | 182,04    | 65,19  | 279,00    | 163,00 | 3D13     | 2D13  | 398,20      | 265,46 |      |       |      |
| BAT2  | 150                          | x | 200                        | Atas              | 3,38              | 0,52    | 81,08          | 81,08   | 76,75          | 76,75   | 59,31     | 8,91   | 74,00     | 22,00  | 2D13     | 2D13  | 265,46      | 265,46 |      |       |      |
|       |                              |   |                            | Bawah             | 1,06              | 1,68    | 81,08          | 81,08   | 76,75          | 76,75   | 18,39     | 29,27  | 35,00     | 40,00  | 2D13     | 2D13  | 265,46      | 265,46 |      |       |      |
| BB    | 200                          | x | 300                        | Atas              | 35,80             | 3,50    | 177,48         | 177,48  | 168,00         | 168,00  | 398,02    | 36,96  | 545,00    | 226,00 | 3D16     | 2D16  | 603,19      | 402,12 |      |       |      |
|       |                              |   |                            | Bawah             | 23,02             | 12,72   | 177,48         | 177,48  | 168,00         | 168,00  | 250,45    | 136,16 | 310,00    | 370,00 | 2D16     | 2D16  | 402,12      | 402,12 |      |       |      |
| RBL   | 200                          | x | 300                        | Atas              | 41,49             | 14,04   | 177,48         | 177,48  | 168,00         | 168,00  | 465,92    | 150,56 | 514,00    | 182,00 | 3D16     | 2D16  | 603,19      | 402,12 |      |       |      |
|       |                              |   |                            | Bawah             | 31,74             | 17,23   | 177,48         | 177,48  | 168,00         | 168,00  | 350,42    | 185,73 | 388,00    | 221,00 | 2D16     | 2D16  | 402,12      | 402,12 |      |       |      |

#### 4. Penulangan Geser Balok B1

Pada SRPMK, gaya geser desain ditentukan berdasarkan *capacity design*, yaitu nilai terbesar antara gaya geser akibat momen probable (Mpr) di kedua ujung balok dan gaya geser maksimum dari kombinasi ETABS (SNI 2847-2019 Pasal 18.6.5.1). Tinggi efektif untuk geser dihitung dengan sengkang D10 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} d &= h - c_c - d_s - \frac{d_b}{2} \\ &= 500 - 30 - 10 - \frac{19}{2} \\ &= 450,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Gaya geser desain yang menentukan:  $V_u = 332,49 \text{ kN}$  (sama untuk daerah tumpuan dan lapangan).

**Kapasitas Geser Beton ( $V_c$ )** (SNI 2847-2019 Pasal 22.5.5.1):

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \lambda \sqrt{f'_c} b d \\ &= 0,17 \times 1,0 \times \sqrt{25} \times 300 \times 450,5 \times 10^{-3} \\ &= 114,878 \text{ kN} \end{aligned}$$

##### a. Spasi Tulangan Geser - Daerah Tumpuan

Sengkang tertutup 3 kaki D10. Spasi maksimum dari kondisi geser diperoleh dengan menyamakan kapasitas geser tereduksi terhadap gaya geser terfaktor yang dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} s &= \frac{\frac{1}{4} \pi d_s^2 \cdot n_{kaki} \cdot f_{yv} \cdot d \times 10^{-3}}{\frac{V_u}{\phi} - V_c} \\ &= \frac{\frac{1}{4} \pi \times 10^2 \times 3 \times 420 \times 450,5 \times 10^{-3}}{\frac{332,49}{0,75} - 114,878} \\ &= 135,736 \text{ mm} \end{aligned}$$

Sebagai pembanding, spasi dihitung dari kebutuhan tulangan geser hasil analisis ETABS,  $A_v/s$ , ETABS = 2,34 mm<sup>2</sup>/mm:

$$\begin{aligned}
 s_{ETABS} &= \frac{\frac{1}{4} \pi d_s^2 \cdot n_{kaki}}{\frac{A_v}{s_{ETABS}}} \\
 &= \frac{\frac{1}{4} \pi \times 10^2 \times 3}{2,34} \\
 &= 100,692 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

### Spasi Maksimum Daerah Sendi Plastis

Sepanjang 2h dari muka kolom, SNI 2847-2019 Pasal 18.6.4.4. Diambil nilai terkecil dari persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 s_{maks} &= \min\left(\frac{d}{4} ; 6d_b ; 150\right) \\
 &= \min\left(\frac{450,5}{4} ; 6 \times 19 ; 150\right) \\
 &= \min(112,625 ; 114 ; 150) \\
 &= 112,625 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Spasi terpasang diambil nilai terkecil dari spasi geser ETABS dan spasi maksimum sendi plastis:  $\min(100,692; 112,625; 114; 150) = 100,692 \text{ mm}$ , digunakan spasi tumpuan  $s = \mathbf{100 \text{ mm}} \rightarrow \mathbf{MEMENUHI}$ . Senggang pertama dipasang  $\leq 50 \text{ mm}$  dari muka kolom (SNI 2847-2019 Pasal 18.6.4.1).

### b. Spasi Tulangan Geser - Daerah Lapangan

Dengan  $V_u = 332,49 \text{ kN}$ :

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{\frac{1}{4} \pi d_s^2 \cdot n_{kaki} \cdot f_{yv} \cdot d \times 10^{-3}}{\frac{V_u}{\phi} - V_c} \\
 &= \frac{\frac{1}{4} \pi \times 10^2 \times 3 \times 420 \times 450,5 \times 10^{-3}}{\frac{332,49}{0,75} - 114,878}
 \end{aligned}$$

$$= 135,736 \text{ mm}$$

Spasi berdasarkan tulangan geser ETABS ( $A_v/s$ , ETABS = 2,34 mm<sup>2</sup>/mm):

$$s_{ETABS} = \frac{\frac{1}{4}\pi \times 10^2 \times 3}{2,34}$$

$$= 100,692 \text{ mm}$$

Spasi maksimum di luar sendi plastis (SNI 2847-2019 Pasal 18.6.4.6):  $s \leq d/2$   
 $= 225,25 \text{ mm}$ . Spasi terpasang diambil terkecil dari spasi geser ETABS dan spasi maksimum:  $\min(100,692; 225,25) = 100,692 \text{ mm} \rightarrow$  digunakan spasi lapangan  $s =$   
**100 mm  $\rightarrow$  MEMENUHI.**

Rekapitulasi penulangan geser balok disajikan pada **Tabel 4.39** sebagai berikut:

**Tabel 4.39** Rekapitulasi Penulangan Geser Balok

| Frame                               | Lebar<br>balok,<br>b<br>(mm) | x | Tinggi<br>balok,<br>h<br>(mm) | Spasi Hitung           |        |                        |      |                                                                |       |                                                                 |        |                                                  |     |                                                  |   |                                                  |   |        |        | Spasi Pakai<br>(mm) |                  | Tulangan |  |
|-------------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|------------------------|--------|------------------------|------|----------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------|---|--------------------------------------------------|---|--------|--------|---------------------|------------------|----------|--|
|                                     |                              |   |                               | Gaya Geser, Vu<br>(kN) |        | Av/s Etabs<br>(mm2/mm) |      | $(Av * fy * d) / ((Vu/\phi) - (0.17*(f'c)^{0.5}*b*d))$<br>(mm) |       | Spasi Etabs<br>( $0.25*PI()^2db^2*n$ )<br>/(Av/s etabs)<br>(mm) |        | Spasi max 1<br>(mm)<br>SNI 2847-2019<br>18.6.4.4 |     | Spasi max 2<br>(mm)<br>SNI 2847-2019<br>18.6.4.4 |   | Spasi max 3<br>(mm)<br>SNI 2847-2019<br>18.6.4.4 |   |        |        |                     |                  |          |  |
|                                     |                              |   |                               |                        |        |                        |      |                                                                |       |                                                                 |        |                                                  |     |                                                  |   |                                                  |   |        |        |                     |                  |          |  |
|                                     |                              |   |                               |                        |        |                        |      |                                                                |       |                                                                 |        |                                                  |     |                                                  |   |                                                  |   |        |        |                     |                  |          |  |
|                                     |                              |   |                               |                        |        |                        |      |                                                                |       |                                                                 |        |                                                  |     |                                                  |   |                                                  |   | Tump.  | Lap.   |                     |                  |          |  |
| Penulangan Geser Balok (f'c 25 MPa) |                              |   |                               |                        |        |                        |      |                                                                |       |                                                                 |        |                                                  |     |                                                  |   |                                                  |   |        |        |                     |                  |          |  |
| B1                                  | 300                          | x | 500                           | 332,49                 | 332,49 | 2,34                   | 2,34 | 136                                                            | 136   | 101                                                             | 101    | 113                                              | 225 | 114                                              | - | 150                                              | - | 100,00 | 100,00 | (D10+1CTD10)-100    | (D10+1CTD10)-100 |          |  |
| B2                                  | 300                          | x | 400                           | 113,62                 | 113,62 | 1,41                   | 1,30 | 372                                                            | 372   | 111                                                             | 121    | 88                                               | 175 | 114                                              | - | 150                                              | - | 80,00  | 100,00 | D10-80              | D10-100          |          |  |
| B3                                  | 200                          | x | 400                           | 131,60                 | 126,90 | 0,78                   | 0,74 | 200                                                            | 211   | 201                                                             | 212    | -                                                | -   | -                                                | - | 150                                              | - | 100,00 | 150,00 | D10-100             | D10-150          |          |  |
| B4                                  | 200                          | x | 300                           | 39,05                  | 33,10  | 0,48                   | 0,41 | 1803                                                           | 12904 | 327                                                             | 383    | -                                                | -   | -                                                | - | 150                                              | - | 100,00 | 150,00 | D10-100             | D10-150          |          |  |
| BAT1                                | 200                          | x | 300                           | 58,20                  | 44,59  | 0,75                   | 0,57 | 485                                                            | 1023  | 209                                                             | 276    | -                                                | -   | -                                                | - | 150                                              | - | 100,00 | 150,00 | D10-100             | D10-150          |          |  |
| BAT2                                | 150                          | x | 300                           | 3,26                   | 1,57   | 0,00                   | 0,00 | -598                                                           | -553  | 157080                                                          | 157080 | -                                                | -   | -                                                | - | 150                                              | - | 100,00 | 150,00 | D10-100             | D10-150          |          |  |
| BB                                  | 250                          | x | 350                           | 70,37                  | 62,61  | 0,76                   | 0,67 | 672                                                            | 1032  | 207                                                             | 234    | -                                                | -   | -                                                | - | 150                                              | - | 100,00 | 150,00 | D10-100             | D10-150          |          |  |
| RBL                                 | 200                          | x | 300                           | 40,46                  | 34,43  | 0,52                   | 0,44 | 1498                                                           | 5433  | 302                                                             | 357    | -                                                | -   | -                                                | - | 150                                              | - | 100,00 | 150,00 | D10-100             | D10-150          |          |  |
| Penulangan Geser Balok (f'c 30 MPa) |                              |   |                               |                        |        |                        |      |                                                                |       |                                                                 |        |                                                  |     |                                                  |   |                                                  |   |        |        |                     |                  |          |  |
| B1                                  | 300                          | x | 450                           | 315,22                 | 310,23 | 1,94                   | 1,90 | 129                                                            | 131   | 121                                                             | 124    | 100                                              | 200 | 114                                              | - | 150                                              | - | 100,00 | 100,00 | (D10+1CTD10)-100    | (D10+1CTD10)-100 |          |  |
| B2                                  | 300                          | x | 350                           | 141,69                 | 125,14 | 0,92                   | 1,34 | 189                                                            | 239   | 171                                                             | 117    | 75                                               | 150 | 114                                              | - | 150                                              | - | 70,00  | 100,00 | D10-70              | D10-100          |          |  |
| B3                                  | 200                          | x | 300                           | 96,92                  | 92,31  | 0,80                   | 0,74 | 200                                                            | 216   | 196                                                             | 212    | -                                                | -   | -                                                | - | 150                                              | - | 100,00 | 150,00 | D10-100             | D10-150          |          |  |
| B4                                  | 200                          | x | 250                           | 29,16                  | 23,37  | 0,45                   | 0,36 | 10518                                                          | -2064 | 349                                                             | 436    | -                                                | -   | -                                                | - | 150                                              | - | 100,00 | 150,00 | D10-100             | D10-150          |          |  |
| BAT1                                | 150                          | x | 300                           | 41,50                  | 24,05  | 0,23                   | 0,31 | 839                                                            | -5012 | 683                                                             | 507    | -                                                | -   | -                                                | - | 150                                              | - | 100,00 | 150,00 | D10-100             | D10-150          |          |  |

| Frame                               | Lebar<br>balok,<br>b<br>(mm) | x | Tinggi<br>balok,<br>h<br>(mm) | Gaya Geser, Vu<br>(kN) |        | Av/s Etabs<br>(mm <sup>2</sup> /mm) |      | Spasi Hitung<br>( $A_v \cdot f_y \cdot d$ ) /<br>( $(V_u/\phi) -$<br>( $0.17 \cdot (f'c)^{0.5} \cdot b \cdot d$ )<br>(mm)) |       | Spasi Etabs<br>( $0.25 \cdot \pi I() \cdot d b^2 \cdot n$ )<br>( $(A_v/s \text{ etabs})$<br>(mm)) |        | Spasi max 1<br>(mm)<br>SNI 2847-2019<br>18.6.4.4 |      | Spasi max 2<br>(mm)<br>SNI 2847-2019<br>18.6.4.4 |      | Spasi max 3<br>(mm)<br>SNI 2847-2019<br>18.6.4.4 |      | Spasi Pakai<br>(mm) |        | Tulangan        |                  |
|-------------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|------------------------|--------|-------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------|------|--------------------------------------------------|------|--------------------------------------------------|------|---------------------|--------|-----------------|------------------|
|                                     |                              |   |                               |                        |        |                                     |      |                                                                                                                            |       |                                                                                                   |        |                                                  |      |                                                  |      |                                                  |      |                     |        |                 |                  |
|                                     |                              |   |                               | Tump.                  | Lap.   | Tump.                               | Lap. | Tump.                                                                                                                      | Lap.  | Tump.                                                                                             | Lap.   | Tump.                                            | Lap. | Tump.                                            | Lap. | Tump.                                            | Lap. | Tump.               | Lap.   | Tump.           | Lap.             |
| BAT2                                | 150                          | x | 200                           | 2,26                   | 1,17   | 0,00                                | 0,00 | -550                                                                                                                       | -509  | 157080                                                                                            | 157080 | -                                                | -    | -                                                | -    | 150                                              | -    | 100,00              | 150,00 | D10-100         | D10-150          |
| BB                                  | 200                          | x | 300                           | 30,39                  | 26,44  | 0,17                                | 0,17 | -2594                                                                                                                      | -1424 | 924                                                                                               | 924    | -                                                | -    | -                                                | -    | 150                                              | -    | 100,00              | 150,00 | D10-100         | D10-150          |
| RBL                                 | 150                          | x | 300                           | 34,77                  | 28,72  | 0,45                                | 0,37 | 1489                                                                                                                       | 5376  | 349                                                                                               | 425    | -                                                | -    | -                                                | -    | 150                                              | -    | 100,00              | 150,00 | D10-100         | D10-150          |
| Penulangan Geser Balok (f'c 35 MPa) |                              |   |                               |                        |        |                                     |      |                                                                                                                            |       |                                                                                                   |        |                                                  |      |                                                  |      |                                                  |      |                     |        |                 |                  |
| B1                                  | 250                          | x | 400                           | 262,38                 | 257,45 | 1,92                                | 1,87 | 133                                                                                                                        | 136   | 123                                                                                               | 126    | 88                                               | 175  | 114                                              | -    | 150                                              | -    | 80,00               | 100,00 | (D10+1CTD10)-80 | (D10+1CTD10)-100 |
| B2                                  | 250                          | x | 350                           | 126,04                 | 115,15 | 1,35                                | 1,24 | 214                                                                                                                        | 254   | 116                                                                                               | 127    | 75                                               | 150  | 114                                              | -    | 150                                              | -    | 70,00               | 100,00 | D10-70          | D10-100          |
| B3                                  | 200                          | x | 350                           | 99,29                  | 94,53  | 0,83                                | 0,77 | 276                                                                                                                        | 302   | 189                                                                                               | 204    | -                                                | -    | -                                                | -    | 150                                              | -    | 100,00              | 150,00 | D10-100         | D10-150          |
| B4                                  | 200                          | x | 250                           | 30,79                  | 25,51  | 0,47                                | 0,39 | 31149                                                                                                                      | -2014 | 334                                                                                               | 403    | -                                                | -    | -                                                | -    | 150                                              | -    | 100,00              | 150,00 | D10-100         | D10-150          |
| BAT1                                | 150                          | x | 300                           | 78,71                  | 80,08  | 1,01                                | 1,03 | 251                                                                                                                        | 244   | 156                                                                                               | 153    | -                                                | -    | -                                                | -    | 150                                              | -    | 100,00              | 100,00 | D10-100         | D10-100          |
| BAT2                                | 150                          | x | 200                           | 2,26                   | 1,16   | 0,00                                | 0,00 | -503                                                                                                                       | -469  | 157080                                                                                            | 157080 | -                                                | -    | -                                                | -    | 150                                              | -    | 100,00              | 150,00 | D10-100         | D10-150          |
| BB                                  | 200                          | x | 300                           | 44,25                  | 27,25  | 0,17                                | 0,17 | 2001                                                                                                                       | -1158 | 924                                                                                               | 924    | -                                                | -    | -                                                | -    | 150                                              | -    | 100,00              | 150,00 | D10-100         | D10-150          |
| RBL                                 | 200                          | x | 300                           | 47,61                  | 41,99  | 0,61                                | 0,54 | 1300                                                                                                                       | 3140  | 258                                                                                               | 291    | -                                                | -    | -                                                | -    | 150                                              | -    | 100,00              | 150,00 | D10-100         | D10-150          |

## 5. Penulangan Torsi Balok B1

Balok pada struktur statis tak tentu mengalami torsi kompatibilitas akibat beban gravitasi pelat/balok anak yang bertumpu secara eksentris (SNI 2847-2019 Pasal 22.7.3). Momen torsi terfaktor  $T_u = 9,4006$  kNm dan gaya aksial terfaktor terkecil  $P_u = 1,7123$  kN.

### Parameter Geometri Penampang Torsi (SNI 2847-2019 Pasal 22.7.6.1)

$$x_o = b - 2c_c - d_s = 300 - 2(30) - 10 = 230 \text{ mm}$$

$$y_o = h - 2c_c - d_s = 500 - 2(30) - 10 = 430 \text{ mm}$$

$$A_{oh} = x_o \cdot y_o = 230 \times 430 = 98.900 \text{ mm}^2$$

$$A_o = 0,85 A_{oh} = 0,85 \times 98.900 = 84.065 \text{ mm}^2$$

$$P_h = 2(x_o + y_o) = 2(230 + 430) = 1.320 \text{ mm}$$

$$A_{cp} = b \cdot h = 300 \times 500 = 150.000 \text{ mm}^2$$

$$P_{cp} = 2(b + h) = 2(300 + 500) = 1.600 \text{ mm}$$

### Momen Retak Torsi (SNI 2847-2019 Tabel 22.7.5.1, $\lambda = 1,0$ untuk beton normal):

$$\begin{aligned} \phi T_{cr} &= \phi \cdot \frac{1}{3} \lambda \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \times 10^{-6} \\ &= 0,75 \times \frac{1}{3} \times \sqrt{25} \times \frac{150.000^2}{1.600} \times 10^{-6} \\ &= 17,578 \text{ kNm} \end{aligned}$$

### Pengecekan Kebutuhan Tulangan Torsi (SNI 2847-2019 Pasal 22.7.4.1).

Tulangan torsi diperlukan apabila  $T_u > \frac{1}{4}\phi T_{cr}$ :

$$T_u = 9,401 \text{ kNm} > \frac{\phi T_{cr}}{4} = \frac{17,578}{4} = 4,395 \text{ kNm} \rightarrow \text{tulangan torsi diperlukan}$$

### Momen Torsi Desain (torsi kompatibilitas) (SNI 2847-2019 Pasal 22.7.3.2):

$$T_{u,pakai} = \min(T_u ; \phi T_{cr}) = \min(9,401 ; 17,578) = 9,401 \text{ kNm}$$

**Pengecekan Kecukupan Penampang (SNI 2847-2019 Pasal 22.7.7.1)**

Tegangan geser-torsi gabungan tidak boleh melebihi kapasitas tekan diagonal beton yang dihitung dengan persamaan 130 berikut:

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1,7 \cdot A_{oh}^2}\right)^2} \leq \phi \cdot \left(\frac{V_c}{b_w \cdot d} + 0,66 \cdot \sqrt{f_c}\right) \quad (130)$$

$$2,571 \text{ MPa} \leq 0,75 \left( \frac{114,878 \times 10^3}{300 \times 450,5} + 0,66\sqrt{25} \right) = 3,301 \text{ MPa} \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

**Tulangan Transversal Torsi (At/s) (SNI 2847-2019 Pasal 22.7.6.1)**

$$\begin{aligned} \frac{A_t}{s} &= \frac{T_{u,pakai} \times 10^6}{2 \phi A_o f_{yv}} \\ &= \frac{9,401 \times 10^6}{2 \times 0,75 \times 84.065 \times 420} \\ &= 0,178 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

**Kebutuhan Transversal Minimum (SNI 2847-2019 Pasal 9.6.4.2).**

Diambil nilai terbesar (berlaku untuk daerah tumpuan dan lapangan):

$$\begin{aligned} \frac{A_{v+t}}{s}_{\min} &= \max \left( 0,062\sqrt{f'_c} \frac{b}{f_{yv}} ; 0,35 \frac{b}{f_{yv}} \right) \\ &= \max \left( 0,062\sqrt{25} \frac{300}{420} ; 0,35 \frac{300}{420} \right) \\ &= \max(0,221 ; 0,250) = 0,250 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

**a. Daerah Tumpuan****Tulangan Transversal Geser (Av/s)**

Dengan gaya geser terfaktor tumpuan  $V_u = 332,490 \text{ kN}$ :

$$\begin{aligned} \frac{A_v}{s} &= \frac{\frac{V_u \times 10^3}{\phi} - V_c \times 10^3}{f_{yv} d} \\ &= \frac{\frac{332,490 \times 10^3}{0,75} - 114,8780 \times 10^3}{420 \times 450,5} \end{aligned}$$

$$= 1,736 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

**Kebutuhan Transversal Gabungan Geser + Torsi ( $A_{v+t}/s$ ) (SNI 2847-2019**

R9.5.4.3):

$$\begin{aligned}\frac{A_{v+t}}{s} &= \frac{A_v}{s} + 2 \frac{A_t}{s} \\ &= 1,736 + 2 \times 0,178 \\ &= 2,091 \text{ mm}^2/\text{mm}\end{aligned}$$

**Tulangan Transversal Terpasang**

Sengkang tertutup 3 kaki D10 pada spasi tumpuan 90 mm:

$$\begin{aligned}\frac{A_{v+t}}{s_{pasang}} &= \frac{n_{kaki} \cdot \frac{1}{4} \pi d_s^2}{s} \\ &= \frac{3 \times \frac{1}{4} \pi \times 10^2}{100} \\ &= 2,356 \text{ mm}^2/\text{mm}\end{aligned}$$

**Kontrol:**

$$\begin{aligned}\frac{A_{v+t}}{s_{pasang}} &\geq \max\left(\frac{A_{v+t}}{s} ; \frac{A_{v+t}}{s_{\min}}\right) \\ 2,356 &\geq \max(2,091 ; 0,250) = 2,091 \rightarrow \text{MEMENUHI}\end{aligned}$$

## **b. Daerah Lapangan**

**Tulangan Transversal Geser ( $A_v/s$ )**

Dengan gaya geser terfaktor lapangan  $V_u = 332,490 \text{ kN}$ :

$$\begin{aligned}\frac{A_v}{s} &= \frac{\frac{V_u \times 10^3}{\phi} - V_c \times 10^3}{f_{yv} d} \\ &= \frac{\frac{332,490 \times 10^3}{0,75} - 114,8780 \times 10^3}{420 \times 450,5} \\ &= 1,736 \text{ mm}^2/\text{mm}\end{aligned}$$

**Kebutuhan Transversal Gabungan Geser + Torsi ( $A_{v+t}/s$ ):**

$$\frac{A_{v+t}}{s} = \frac{A_v}{s} + 2 \frac{A_t}{s}$$

$$= 1,736 + 2 \times 0,178$$

$$= 2,091 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

### **Tulangan Transversal Terpasang**

Sengkang tertutup 4 kaki D10 pada spasi lapangan 100 mm:

$$\begin{aligned} \frac{A_{v+t}}{s_{pasang}} &= \frac{n_{kaki} \cdot \frac{1}{4} \pi d_s^2}{s} \\ &= \frac{3 \times \frac{1}{4} \pi \times 10^2}{100} \\ &= 2,356 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

### **Kontrol:**

$$\begin{aligned} \frac{A_{v+t}}{s_{pasang}} &\geq \max\left(\frac{A_{v+t}}{s} ; \frac{A_{v+t}}{s_{\min}}\right) \\ 2,356 &\geq \max(2,091 ; 0,250) = 2,091 \rightarrow \text{MEMENUHI} \end{aligned}$$

**Penulangan transversal B1:** sengkang tertutup (D10+1CTD10)-100 pada daerah tumpuan dan (D10+1CTD10)-100 pada daerah lapangan, dengan kait seismik 135°.

Rekapitulasi penulangan geser torsi balok disajikan pada **Tabel 4.40** sebagai berikut:

**Tabel 4.40** Rekapitulasi Penulangan Geser Torsi Balok

| Frame                                     | Lebar<br>balok,<br>b<br>(mm) | x | Tinggi<br>balok,<br>h<br>(mm) | Gaya<br>Torsi,<br>Tu<br>(kNm) | φTorsi                              | Tegangan                                 | At/s,                         | Av/s,                      | Av+t/s,                   | Av+t/s pasang | Av+t/s                               | Av+t/s                               | Cek Av+t | Tu<0.25φTcr<br>SNI 2847-<br>2019 R22.7.4 |      |       |      |             |
|-------------------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------|------------------------------------------|------|-------|------|-------------|
|                                           |                              |   |                               |                               | Beton, φTcr                         | Ultimate                                 | (mm2/mm)                      | (mm2/mm)                   | (mm2/mm)                  |               | min1,                                | min2,                                |          |                                          |      |       |      |             |
|                                           |                              |   |                               |                               | (kNm)                               | Geser+Torsi,                             | (mm2/mm)                      | (mm2/mm)                   | (mm2/mm)                  |               | (mm2/mm)                             | (mm2/mm)                             |          |                                          |      |       |      |             |
|                                           |                              |   |                               |                               | SNI 2847-<br>2019 Tabel<br>22.7.5.1 | Vs+t (Mpa)<br>SNI 2847-<br>2019 22.7.7.1 | SNI 2847-<br>2019<br>22.7.6.1 | SNI 2847-2019<br>22.5.10.1 | SNI 2847-2019<br>22.7.6.2 |               | SNI 2847-<br>2019 Tabel<br>9.6.4.2 a | SNI 2847-<br>2019 Tabel<br>9.6.4.2 b |          |                                          |      |       |      |             |
|                                           |                              |   |                               |                               | Tump.                               | Lap.                                     | Tump.                         | Lap.                       | Tump.                     |               | Lap.                                 | Tump.                                |          |                                          | Lap. | Tump. | Lap. |             |
| Penulangan Geser Torsi Balok (f'c 25 MPa) |                              |   |                               |                               |                                     |                                          |                               |                            |                           |               |                                      |                                      |          |                                          |      |       |      |             |
| B1                                        | 300,00                       | x | 500,00                        | 9,40                          | 17,58                               | 2,57                                     | 0,18                          | 1,74                       | 1,74                      | 2,09          | 2,09                                 | 2,36                                 | 2,36     | 0,23                                     | 0,25 | aman  | aman | perlu       |
| B2                                        | 300,00                       | x | 400,00                        | 4,29                          | 12,86                               | 1,19                                     | 0,11                          | 0,42                       | 0,42                      | 0,63          | 0,63                                 | 1,96                                 | 1,57     | 0,23                                     | 0,25 | aman  | aman | perlu       |
| B3                                        | 200,00                       | x | 400,00                        | 2,14                          | 5,00                                | 1,98                                     | 0,09                          | 0,79                       | 0,74                      | 0,97          | 0,93                                 | 1,57                                 | 1,05     | 0,15                                     | 0,17 | aman  | aman | perlu       |
| B4                                        | 200,00                       | x | 300,00                        | 0,43                          | 4,50                                | 0,80                                     | 0,03                          | 0,09                       | 0,01                      | 0,14          | 0,07                                 | 1,57                                 | 1,05     | 0,15                                     | 0,17 | aman  | aman | tidak perlu |
| BAT1                                      | 200,00                       | x | 300,00                        | 0,01                          | 3,38                                | 1,15                                     | 0,00                          | 0,32                       | 0,15                      | 0,33          | 0,15                                 | 1,57                                 | 1,05     | 0,15                                     | 0,17 | aman  | aman | tidak perlu |
| BAT2                                      | 150,00                       | x | 300,00                        | 0,04                          | 2,81                                | 0,10                                     | 0,00                          | -0,26                      | -0,28                     | -0,25         | -0,28                                | 1,57                                 | 1,05     | 0,11                                     | 0,13 | aman  | aman | tidak perlu |
| BB                                        | 250,00                       | x | 350,00                        | 6,95                          | 7,98                                | 1,75                                     | 0,26                          | 0,23                       | 0,15                      | 0,75          | 0,67                                 | 1,57                                 | 1,05     | 0,19                                     | 0,21 | aman  | aman | perlu       |
| RBL                                       | 200,00                       | x | 300,00                        | 0,05                          | 4,50                                | 0,80                                     | 0,00                          | 0,10                       | 0,03                      | 0,11          | 0,04                                 | 1,57                                 | 1,05     | 0,15                                     | 0,17 | aman  | aman | tidak perlu |
| Penulangan Geser Torsi Balok (f'c 30 MPa) |                              |   |                               |                               |                                     |                                          |                               |                            |                           |               |                                      |                                      |          |                                          |      |       |      |             |
| B1                                        | 300,00                       | x | 450,00                        | 9,88                          | 16,64                               | 2,61                                     | 0,21                          | 1,66                       | 1,62                      | 2,08          | 2,04                                 | 2,36                                 | 2,36     | 0,25                                     | 0,25 | aman  | aman | perlu       |
| B2                                        | 300,00                       | x | 350,00                        | 4,41                          | 11,61                               | 1,57                                     | 0,13                          | 0,70                       | 0,54                      | 0,95          | 0,79                                 | 2,24                                 | 1,57     | 0,25                                     | 0,25 | aman  | aman | perlu       |
| B3                                        | 200,00                       | x | 300,00                        | 1,52                          | 3,70                                | 1,87                                     | 0,09                          | 0,65                       | 0,60                      | 0,84          | 0,79                                 | 1,57                                 | 1,05     | 0,16                                     | 0,17 | aman  | aman | perlu       |
| B4                                        | 200,00                       | x | 250,00                        | 0,40                          | 3,80                                | 0,68                                     | 0,03                          | -0,04                      | -0,12                     | 0,02          | -0,06                                | 1,57                                 | 1,05     | 0,16                                     | 0,17 | aman  | aman | tidak perlu |
| BAT1                                      | 150,00                       | x | 300,00                        | 0,35                          | 2,31                                | 1,04                                     | 0,04                          | 0,13                       | -0,06                     | 0,20          | 0,01                                 | 1,57                                 | 1,05     | 0,12                                     | 0,13 | aman  | aman | tidak perlu |
| BAT2                                      | 150,00                       | x | 200,00                        | 0,03                          | 1,76                                | 0,10                                     | 0,00                          | -0,29                      | -0,31                     | -0,28         | -0,30                                | 1,57                                 | 1,05     | 0,12                                     | 0,13 | aman  | aman | tidak perlu |



**c. Tulangan Longitudinal Torsi (Al) (SNI 2847-2019 Pasal 22.7.6.1):**

$$A_l = \frac{A_t}{s} P_h = 0,178 \times 1.320 = 234,300 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} A_{l,\min} &= 0,42 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}}{f_y} - \frac{A_t}{s} P_h \\ &= 0,42 \sqrt{25} \frac{150.000}{420} - 234,300 \\ &= 750,000 - 234,300 \\ &= 515,700 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Diambil nilai terbesar: Al, pakai = max (234,30; 515,70) = 515,70 mm<sup>2</sup>.

$$n = \frac{515,700}{\frac{1}{4} \pi \times 16^2} = 2,566 \approx 4 \text{ batang} \rightarrow \mathbf{4D16}$$

$$A_{s,\text{pasang}} = 4 \times \frac{1}{4} \pi \times 16^2 = 804,248 \text{ mm}^2$$

Tulangan longitudinal torsi didistribusikan merata pada keliling penampang **4D16** (804,248 mm<sup>2</sup>) dipasang di sisi badan, 2 batang per sisi di tengah tinggi penampang.

Rekapitulasi penulangan lentur torsi balok disajikan pada **Tabel 4.41** sebagai berikut:

**Tabel 4.41** Rekapitulasi Penulangan Lentur Torsi Balok

| Frame                                      | Lebar<br>balok, b<br>(mm) | x | Tinggi<br>balok, h<br>(mm) | Gaya<br>Torsi, Tu<br>(kNm) | φTorsi Beton,                       | A1                        | A1                              | Jenis<br>Tulangan | As Tulangan |        | As+A1 Tulangan |         | As Tulangan |         | Cek                  |             | Tulangan |      |
|--------------------------------------------|---------------------------|---|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------|--------|----------------|---------|-------------|---------|----------------------|-------------|----------|------|
|                                            |                           |   |                            |                            | φTcr<br>(kNm)                       | (mm2)                     | min<br>(mm2)                    |                   | (mm2)       |        | (mm2)          |         | (mm2)       |         | As min < As Tulangan |             | Tengah   |      |
|                                            |                           |   |                            |                            | SNI 2847-<br>2019 Tabel<br>22.7.5.1 | 2847-<br>2019<br>22.7.6.1 | SNI<br>2847-<br>2019<br>9.6.4.3 |                   | Tump.       | Lap.   | Tump.          | Lap.    | Tump.       | Lap.    | Tump.                | Lap.        | Tump.    | Lap. |
| Penulangan Lentur Torsi Balok (f'c 25 MPa) |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 |                   |             |        |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| B1                                         | 300,00                    | x | 500,00                     | 9,40                       | 17,58                               | 234,30                    | 515,70                          | Atas              | 1438,00     | 450,50 | 2719,70        | 1730,20 | 3356,01     | 1938,36 | aman                 | aman        | 4D16     | 4D16 |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 766,00      | 764,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| B2                                         | 300,00                    | x | 400,00                     | 4,29                       | 12,86                               | 118,34                    | 481,66                          | Atas              | 918,00      | 463,00 | 1959,66        | 1614,66 | 2232,10     | 1665,04 | aman                 | aman        | 4D13     | 4D13 |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 560,00      | 670,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| B3                                         | 200,00                    | x | 400,00                     | 2,14                       | 5,00                                | 85,61                     | 314,39                          | Atas              | 808,93      | 573,00 | 1537,02        | 1621,39 | 1683,11     | 1966,64 | aman                 | aman        | 2D13     | 2D13 |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 413,69      | 734,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| B4                                         | 200,00                    | x | 300,00                     | 0,43                       | 4,50                                | 19,12                     | 280,88                          | Atas              | 171,00      | 171,00 | 622,88         | 622,88  | 804,25      | 804,25  | tidak perlu          | tidak perlu | -        | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 171,00      | 171,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| BAT1                                       | 200,00                    | x | 300,00                     | 0,01                       | 3,38                                | 0,45                      | 299,55                          | Atas              | 230,00      | 358,00 | 783,55         | 862,55  | 530,93      | 796,39  | tidak perlu          | tidak perlu | -        | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 254,00      | 205,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| BAT2                                       | 150,00                    | x | 300,00                     | 0,04                       | 2,81                                | 2,49                      | 222,51                          | Atas              | 126,75      | 126,75 | 476,01         | 476,01  | 530,93      | 530,93  | tidak perlu          | tidak perlu | -        | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 126,75      | 126,75 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| BB                                         | 250,00                    | x | 350,00                     | 6,95                       | 7,98                                | 236,79                    | 200,71                          | Atas              | 630,00      | 353,00 | 1294,79        | 993,79  | 1672,90     | 1069,71 | aman                 | aman        | 2D13     | 2D13 |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 428,00      | 404,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |

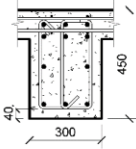
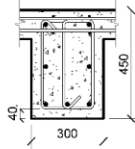
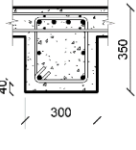
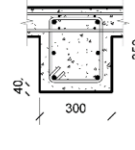
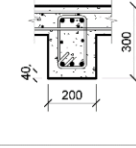
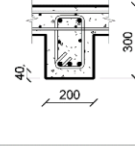
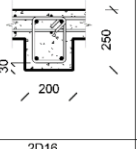
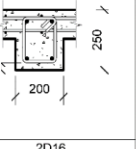
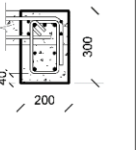
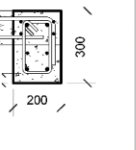
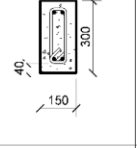
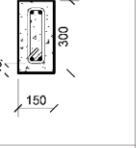
| Frame                                      | Lebar<br>balok, b<br>(mm) | x | Tinggi<br>balok, h<br>(mm) | Gaya<br>Torsi, Tu<br>(kNm) | φTorsi Beton,                       | A1                        | A1<br>min                | Jenis<br>Tulangan | As Tulangan        |                    | As+A1 Tulangan     |                    | As Tulangan        |                    | Cek<br>As min < As Tulangan |             | Tulangan<br>Tengah |      |
|--------------------------------------------|---------------------------|---|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|-------------|--------------------|------|
|                                            |                           |   |                            |                            | φTcr<br>(kNm)                       | (mm <sup>2</sup> )        | (mm <sup>2</sup> )       |                   | (mm <sup>2</sup> ) | (mm <sup>2</sup> ) | (mm <sup>2</sup> ) | (mm <sup>2</sup> ) | (mm <sup>2</sup> ) | (mm <sup>2</sup> ) | Tump.                       | Lap.        | Tump.              | Lap. |
|                                            |                           |   |                            |                            | SNI 2847-<br>2019 Tabel<br>22.7.5.1 | 2847-<br>2019<br>22.7.6.1 | 2847-<br>2019<br>9.6.4.3 |                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |
| RBL                                        | 200,00                    | x | 300,00                     | 0,05                       | 4,50                                | 2,30                      | 297,70                   | Atas              | 380,00             | 184,00             | 936,70             | 649,70             | 804,25             | 804,25             | tidak perlu                 | tidak perlu | -                  | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                          | Bawah             | 259,00             | 168,00             |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |
| Penulangan Lentur Torsi Balok (f'c 30 MPa) |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                          |                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |
| B1                                         | 300,00                    | x | 450,00                     | 9,88                       | 16,64                               | 257,42                    | 482,00                   | Atas              | 1556,00            | 400,50             | 2829,00            | 1693,50            | 3118,82            | 1701,17            | aman                        | aman        | 2D19               | 2D19 |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                          | Bawah             | 791,00             | 811,00             |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |
| B2                                         | 300,00                    | x | 350,00                     | 4,41                       | 11,61                               | 130,52                    | 444,59                   | Atas              | 1034,00            | 324,00             | 2027,59            | 1320,59            | 2103,30            | 1536,24            | aman                        | aman        | 2D16               | 2D16 |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                          | Bawah             | 549,00             | 552,00             |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |
| B3                                         | 200,00                    | x | 300,00                     | 1,52                       | 3,70                                | 68,32                     | 260,32                   | Atas              | 802,95             | 345,29             | 1390,52            | 1355,61            | 1683,11            | 1399,58            | aman                        | aman        | 2D13               | 2D13 |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                          | Bawah             | 327,25             | 750,00             |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |
| B4                                         | 200,00                    | x | 250,00                     | 0,40                       | 3,80                                | 20,02                     | 253,84                   | Atas              | 138,00             | 138,00             | 529,84             | 529,84             | 804,25             | 804,25             | tidak perlu                 | tidak perlu | -                  | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                          | Bawah             | 138,00             | 138,00             |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |
| BAT1                                       | 150,00                    | x | 300,00                     | 0,35                       | 2,31                                | 21,80                     | 224,67                   | Atas              | 337,00             | 126,75             | 799,67             | 553,42             | 663,66             | 530,93             | tidak perlu                 | tidak perlu | -                  | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                          | Bawah             | 238,00             | 202,00             |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |
| BAT2                                       | 150,00                    | x | 200,00                     | 0,03                       | 1,76                                | 2,04                      | 162,28                   | Atas              | 76,75              | 76,75              | 315,78             | 315,78             | 530,93             | 530,93             | tidak perlu                 | tidak perlu | -                  | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                          | Bawah             | 76,75              | 76,75              |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |
| BB                                         | 200,00                    | x | 300,00                     | 0,01                       | 4,93                                | 0,38                      | 328,26                   | Atas              | 529,00             | 231,00             | 1147,26            | 921,26             | 1005,31            | 804,25             | tidak perlu                 | tidak perlu | -                  | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                          | Bawah             | 290,00             | 362,00             |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |
| RBL                                        | 150,00                    | x | 300,00                     | 0,03                       | 3,08                                | 1,99                      | 244,48                   | Atas              | 355,00             | 142,00             | 845,48             | 540,48             | 804,25             | 804,25             | tidak perlu                 | tidak perlu | -                  | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                          | Bawah             | 246,00             | 154,00             |                    |                    |                    |                    |                             |             |                    |      |

| Frame                                      | Lebar<br>balok, b<br>(mm) | x | Tinggi<br>balok, h<br>(mm) | Gaya<br>Torsi, Tu<br>(kNm) | φTorsi Beton,                       | A1                        | A1                              | Jenis<br>Tulangan | As Tulangan |        | As+A1 Tulangan |         | As Tulangan |         | Cek                  |             | Tulangan |      |
|--------------------------------------------|---------------------------|---|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------|--------|----------------|---------|-------------|---------|----------------------|-------------|----------|------|
|                                            |                           |   |                            |                            | φTcr<br>(kNm)                       | (mm2)                     | min<br>(mm2)                    |                   | (mm2)       |        | (mm2)          |         | (mm2)       |         | As min < As Tulangan |             | Tengah   |      |
|                                            |                           |   |                            |                            | SNI 2847-<br>2019 Tabel<br>22.7.5.1 | 2847-<br>2019<br>22.7.6.1 | SNI<br>2847-<br>2019<br>9.6.4.3 |                   | Tump.       | Lap.   | Tump.          | Lap.    | Tump.       | Lap.    | Tump.                | Lap.        | Tump.    | Lap. |
| Penulangan Lentur Torsi Balok (f'c 35 MPa) |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 |                   |             |        |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| B1                                         | 250,00                    | x | 400,00                     | 6,10                       | 11,38                               | 195,75                    | 482,00                          | Atas              | 1633,00     | 359,00 | 2825,86        | 1604,86 | 3118,82     | 1701,17 | aman                 | aman        | 2D19     | 2D19 |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 797,00      | 850,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| B2                                         | 250,00                    | x | 350,00                     | 4,08                       | 9,44                                | 139,14                    | 444,59                          | Atas              | 1017,00     | 308,00 | 1915,52        | 1232,52 | 1966,64     | 1399,58 | aman                 | aman        | 2D13     | 2D13 |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 520,00      | 546,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| B3                                         | 200,00                    | x | 350,00                     | 1,61                       | 6,59                                | 67,77                     | 260,32                          | Atas              | 959,00      | 458,37 | 1729,35        | 1567,72 | 1701,17     | 1134,11 | tidak perlu          | tidak perlu | -        | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 424,00      | 763,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| B4                                         | 200,00                    | x | 250,00                     | 0,54                       | 4,11                                | 26,89                     | 253,84                          | Atas              | 158,36      | 142,27 | 569,55         | 553,45  | 804,25      | 804,25  | tidak perlu          | tidak perlu | -        | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 142,27      | 142,27 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| BAT1                                       | 150,00                    | x | 300,00                     | 0,01                       | 2,50                                | 0,63                      | 224,67                          | Atas              | 211,00      | 401,00 | 755,59         | 829,59  | 663,66      | 1061,86 | tidak perlu          | tidak perlu | -        | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 279,00      | 163,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| BAT2                                       | 150,00                    | x | 200,00                     | 0,03                       | 1,90                                | 2,54                      | 162,28                          | Atas              | 81,08       | 81,08  | 337,10         | 337,10  | 530,93      | 530,93  | tidak perlu          | tidak perlu | -        | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 81,08       | 81,08  |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| BB                                         | 200,00                    | x | 300,00                     | 0,01                       | 5,32                                | 0,45                      | 328,26                          | Atas              | 545,00      | 226,00 | 1209,51        | 950,51  | 1005,31     | 804,25  | tidak perlu          | tidak perlu | -        | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 310,00      | 370,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |
| RBL                                        | 200,00                    | x | 300,00                     | 0,03                       | 5,32                                | 1,49                      | 244,48                          | Atas              | 514,00      | 182,00 | 1255,47        | 756,47  | 1005,31     | 804,25  | tidak perlu          | tidak perlu | -        | -    |
|                                            |                           |   |                            |                            |                                     |                           |                                 | Bawah             | 388,00      | 221,00 |                |         |             |         |                      |             |          |      |

Detail penulangan balok untuk ketiga variasi mutu beton disajikan pada **Gambar 4.5–4.7** berikut:

| Frame                   | Suport Region            | Span Region     |
|-------------------------|--------------------------|-----------------|
| Balok<br>B1<br>300.500  |                          |                 |
|                         | Top Longitudinal bars    | 6D19            |
|                         | Mid Longitudinal bars    | 4D16            |
|                         | Bottom Longitudinal bars | 3D19            |
|                         | Transversal bars         | (D10+1CTD10)-80 |
| Balok<br>B2<br>300.400  |                          |                 |
|                         | Top Longitudinal bars    | 4D19            |
|                         | Mid Longitudinal bars    | 4D13            |
|                         | Bottom Longitudinal bars | 2D19            |
|                         | Transversal bars         | D10-70          |
| Balok<br>B3<br>200.400  |                          |                 |
|                         | Top Longitudinal bars    | 3D19            |
|                         | Mid Longitudinal bars    | 2Ø8             |
|                         | Bottom Longitudinal bars | 2D19            |
|                         | Transversal bars         | D10-100         |
| Balok<br>B4<br>200.300  |                          |                 |
|                         | Top Longitudinal bars    | 2D16            |
|                         | Mid Longitudinal bars    | -               |
|                         | Bottom Longitudinal bars | 2D16            |
|                         | Transversal bars         | D10-100         |
| Balok<br>BB<br>250.350  |                          |                 |
|                         | Top Longitudinal bars    | 2D16            |
|                         | Mid Longitudinal bars    | 2D13            |
|                         | Bottom Longitudinal bars | 2D16            |
|                         | Transversal bars         | D10-100         |
| Balok<br>RBL<br>200.300 |                          |                 |
|                         | Top Longitudinal bars    | 2D16            |
|                         | Mid Longitudinal bars    | -               |
|                         | Bottom Longitudinal bars | 2D16            |
|                         | Transversal bars         | D10-100         |

**Gambar 4.5** Detail Penulangan Balok  $f'_c$  25 MPa

| Frame                                                                                                        | Suport Region                                                                        | Span Region      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Balok<br>B1<br>300.450      |    |                  |
|                                                                                                              | 6D19                                                                                 | 2D19             |
|                                                                                                              | 2D19                                                                                 | 2D19             |
|                                                                                                              | 3D19                                                                                 | 3D19             |
|                                                                                                              | (D10+1CTD10)-80                                                                      | (D10+1CTD10)-100 |
| Balok<br>B2<br>300.350      |    |                  |
|                                                                                                              | 4D19                                                                                 | 2D19             |
|                                                                                                              | 2D16                                                                                 | 2D16             |
|                                                                                                              | 2D19                                                                                 | 2D19             |
|                                                                                                              | D10-70                                                                               | D10-100          |
| Balok<br>B3<br>200.300     |   |                  |
|                                                                                                              | 3D19                                                                                 | 2D19             |
|                                                                                                              | 2Ø8                                                                                  | 2Ø8              |
|                                                                                                              | 2D19                                                                                 | 3D19             |
|                                                                                                              | D10-100                                                                              | D10-150          |
| Frame                                                                                                        | Suport Region                                                                        | Span Region      |
| Balok<br>B4<br>200.250    |   |                  |
|                                                                                                              | 2D16                                                                                 | 2D16             |
|                                                                                                              | -                                                                                    | -                |
|                                                                                                              | 2D16                                                                                 | 2D16             |
|                                                                                                              | D10-100                                                                              | D10-150          |
| Balok<br>BB<br>200.300    |   |                  |
|                                                                                                              | 3D16                                                                                 | 2D16             |
|                                                                                                              | 2D13                                                                                 | 2D13             |
|                                                                                                              | 2D16                                                                                 | 2D16             |
|                                                                                                              | D10-100                                                                              | D10-150          |
| Balok<br>RBL<br>150.300  |  |                  |
|                                                                                                              | 2D16                                                                                 | 2D16             |
|                                                                                                              | -                                                                                    | -                |
|                                                                                                              | 2D16                                                                                 | 2D16             |
|                                                                                                              | D10-100                                                                              | D10-150          |

**Gambar 4.6** Detail Penulangan Balok  $f'_c$  30 MPa

| Frame                    | Suport Region   | Span Region      |
|--------------------------|-----------------|------------------|
| Balok<br>B1<br>250.450   |                 |                  |
| Top Longitudinal bars    | 6D19            | 2D19             |
| Mid Longitudinal bars    | 2D19            | 2D19             |
| Bottom Longitudinal bars | 3D19            | 3D19             |
| Transversal bars         | (D10+1CTD10)-80 | (D10+1CTD10)-100 |
| Balok<br>B2<br>250.350   |                 |                  |
| Top Longitudinal bars    | 4D19            | 2D19             |
| Mid Longitudinal bars    | 2D13            | 2D13             |
| Bottom Longitudinal bars | 2D19            | 2D19             |
| Transversal bars         | D10-70          | D10-100          |
| Balok<br>B3<br>200.350   |                 |                  |
| Top Longitudinal bars    | 3D19            | 2D19             |
| Mid Longitudinal bars    | 2Ø8             | 2Ø8              |
| Bottom Longitudinal bars | 2D19            | 3D19             |
| Transversal bars         | D10-100         | D10-150          |

| Frame                    | Suport Region | Span Region |
|--------------------------|---------------|-------------|
| Balok<br>B4<br>200.250   |               |             |
| Top Longitudinal bars    | 2D16          | 2D16        |
| Mid Longitudinal bars    | -             | -           |
| Bottom Longitudinal bars | 2D16          | 2D16        |
| Transversal bars         | D10-100       | D10-150     |
| Balok<br>BB<br>200.300   |               |             |
| Top Longitudinal bars    | 3D16          | 2D16        |
| Mid Longitudinal bars    | 2D13          | 2D13        |
| Bottom Longitudinal bars | 2D16          | 2D16        |
| Transversal bars         | D10-100       | D10-150     |
| Balok<br>RBL<br>200.300  |               |             |
| Top Longitudinal bars    | 2D16          | 2D16        |
| Mid Longitudinal bars    | -             | -           |
| Bottom Longitudinal bars | 2D16          | 2D16        |
| Transversal bars         | D10-100       | D10-150     |

**Gambar 4.7** Detail Penulangan Balok  $f'_c$  35 MPa

#### 4.6.2 Penulangan Kolom

Kolom direncanakan dengan menerapkan konsep *Strong Column–Weak Beam* (SCWB) sesuai Pasal 18.7.3.2 SNI 2847-2019, yang mensyaratkan bahwa jumlah kapasitas momen nominal kolom harus lebih besar atau sama dengan 1,2 kali jumlah kapasitas momen nominal balok. Peningkatan mutu beton pada setiap skenario memberikan pengaruh signifikan terhadap optimasi dimensi kolom, karena peningkatan nilai  $f'_c$  secara langsung meningkatkan kapasitas aksial dan lentur ( $P_n - M_n$ ) elemen kolom.

#### Contoh Perhitungan - Kolom K1 ( $f'_c$ 25 MPa)

##### 1. Data Perencanaan

|                                                  |           |
|--------------------------------------------------|-----------|
| Lebar kolom, $b$                                 | = 600 mm  |
| Tinggi kolom, $h$                                | = 500 mm  |
| Kuat tekan beton, $f'_c$                         | = 25 MPa  |
| Kuat leleh tulangan longitudinal, $f_y$          | = 420 MPa |
| Kuat leleh tulangan transversal, $f_{yv}$        | = 420 MPa |
| Diameter tulangan longitudinal, $d_b$            | = 19 mm   |
| Diameter tulangan sengkang, $d_s$                | = 10 mm   |
| Selimut beton, $t_p$                             | = 40 mm   |
| Jumlah tulangan longitudinal terpasang           | = 20D19   |
| Faktor reduksi tekan (kolom bersengkang), $\phi$ | = 0,65    |
| Faktor reduksi geser, $\phi$                     | = 0,75    |

Gaya dalam terfaktor diperoleh dari analisis ETABS: gaya tekan terfaktor  $P_u = 2.851,5826$  kN; gaya geser terfaktor  $V_u = 273,448$  kN. Momen tahanan kolom dan balok untuk pengecekan *strong column–weak beam* diambil dari kapasitas momen nominal masing-masing elemen pada joint yang ditinjau.

## 2. Rasio Tulangan Longitudinal (SNI 2847-2019 Pasal 18.7.4.1)

Luas tulangan ETABS pada penampang ini  $A_s$ , ETABS = 5.336 mm<sup>2</sup>.

Direncanakan jumlah tulangan longitudinal terpasang = 20D19:

Luas total tulangan longitudinal dihitung sebagai berikut:

$$A_{st} = n \cdot \frac{1}{4} \pi d_b^2 = 20 \times \frac{1}{4} \pi \times 19^2 = 5.670,575 \text{ mm}^2$$

Kontrol:

$$A_{st} \geq A_{sEtabs} \rightarrow 5.336 \geq 5.670,575 \rightarrow \text{MEMENUHI.}$$

Rasio tulangan dihitung sebagai berikut:

$$\rho = \frac{A_{st}}{b \cdot h} = \frac{5.670,570}{600 \times 500} = 0,0189 = 1,890\%$$

$$\text{Kontrol: } 1\% \leq \rho = 1,89\% \leq 6\% \rightarrow \text{MEMENUHI.}$$

## 3. Diagram Interaksi Aksial-Lentur (P-M)

Diagram interaksi P–M merupakan representasi grafis dari kapasitas penampang kolom terhadap kombinasi beban aksial dan momen lentur, yang secara teoretis dikonstruksi dengan memvariasikan posisi garis netral  $c$  dari kondisi tarik dominan hingga tekan dominan sesuai ketentuan SNI 2847-2019. Pada setiap nilai  $c$ , tinggi blok tegangan dihitung sebagai  $a = \beta_1 c$ , regangan setiap lapisan tulangan  $\epsilon_{si} = 0,003(c-d_i)/c$ , tegangan tulangan  $f_{si} = E_s \cdot \epsilon_{si}$  (dibatasi  $\pm f_y$ ), gaya tekan beton  $C_c = 0,85 f'_c \cdot b \cdot a$ , dan resultan gaya tulangan  $C_s = \sum F_{si}$ , sehingga diperoleh  $P_n = C_c + C_s$  dan  $M_n = M_c + M_s$ . Setiap titik pada diagram kemudian direduksi dengan faktor reduksi kekuatan  $\phi = 0,65$  untuk kolom bersengkang (*tied column*) sesuai kondisi terkendali tekan (*compression-controlled*). Kapasitas aksial sentris penampang dihitung dengan persamaan 158, persamaan 159 dan persamaan 159 sebagai berikut:

$$P_o = 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} \quad (158)$$

$$P_{no} = 0,80 \cdot P_o \quad (159)$$

$$\phi P_{n,max} = 0,65 \cdot P_{no} \quad (160)$$

Pembentukan kurva interaksi secara utuh melalui perhitungan manual membutuhkan tabulasi berulang atas variasi letak garis netral ( $c$ ) yang cukup luas, nilai numerik diagram interaksi  $P$ - $M$  beserta  $\phi P_n$ , max dalam penelitian ini diperoleh dengan menggunakan program bantu spColumn yang berbasis ACI 318-14 - setara dengan SNI 2847-2019 karena SNI tersebut mengadopsi ACI 318-14 sebagai acuannya. Seluruh kombinasi gaya dalam ( $P_u$ ,  $M_u$ ) hasil analisis ETABS harus berada di dalam kurva  $\phi P_n$ – $\phi M_n$ . Sebagai contoh penerapan, berikut disajikan hasil untuk kolom K1  $f'_c$  25 MPa (500×600 mm):

#### a. Penambahan Gaya Dalam

Gaya dalam pada kolom K1 dengan dimensi 500×600 mm diperoleh dari hasil analisis struktur menggunakan program ETABS, mencakup gaya aksial ( $P$ ) dan momen lentur pada dua arah sumbu lokal ( $M_2$  dan  $M_3$ ) akibat kombinasi pembebanan berfaktor sesuai SNI 1727-2020 dan SNI 1726-2019. Enam kondisi ekstrem gaya dalam diambil dari hasil *envelope* seluruh kombinasi pembebanan untuk merepresentasikan kondisi kritis desain. Rekapitulasi keenam kondisi tersebut disajikan pada **Tabel 4.42** berikut:

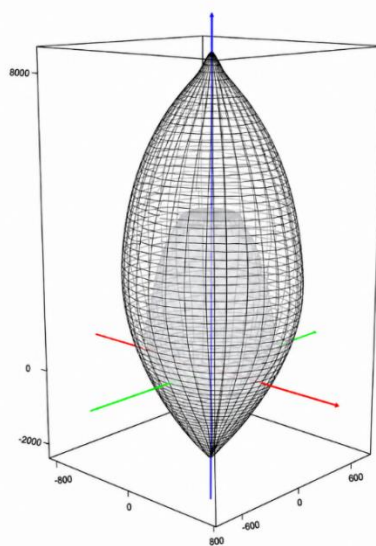
**Tabel 4.42** Rekapitulasi Gaya Dalam Aksial-Lentur Kolom K1

| Kondisi       | P (kN)    | M2 (kN-m) | M3 (kN-m) |
|---------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>P max</b>  | 793,679   | 13,490    | 21,310    |
| <b>P min</b>  | -2829,876 | -170,412  | -167,656  |
| <b>M2 Max</b> | -509,098  | 289,646   | 66,817    |
| <b>M2 Min</b> | -2052,757 | -290,346  | -59,881   |
| <b>M3 Max</b> | -600,190  | 117,136   | 179,742   |
| <b>M3 Min</b> | -1638,148 | -77,004   | -190,160  |

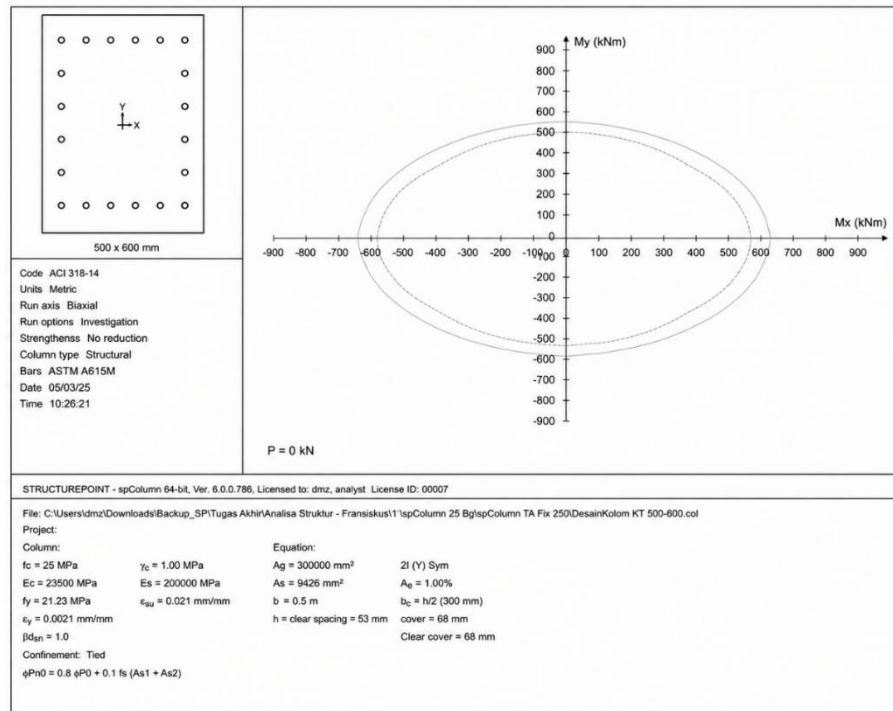
Ketentuan tanda gaya aksial pada Tabel 4.x mengacu pada keluaran ETABS, yakni gaya tarik ditandai positif dan gaya tekan ditandai negatif. Aturan ini berbeda dari yang berlaku pada pemeriksaan kapasitas penampang menggunakan program spColumn (mengacu pada ACI 318-14), di mana gaya tekan ditandai positif dan gaya tarik ditandai negatif. Perbedaan penandaan tersebut merupakan ketentuan baku masing-masing perangkat lunak dan telah diperhitungkan secara konsisten dalam proses transfer data antarprogram; nilai absolut gaya dalam tidak mengalami perubahan, yang berbeda hanyalah notasi tandanya pada kedua sistem tersebut.

#### b. Diagram Interaksi

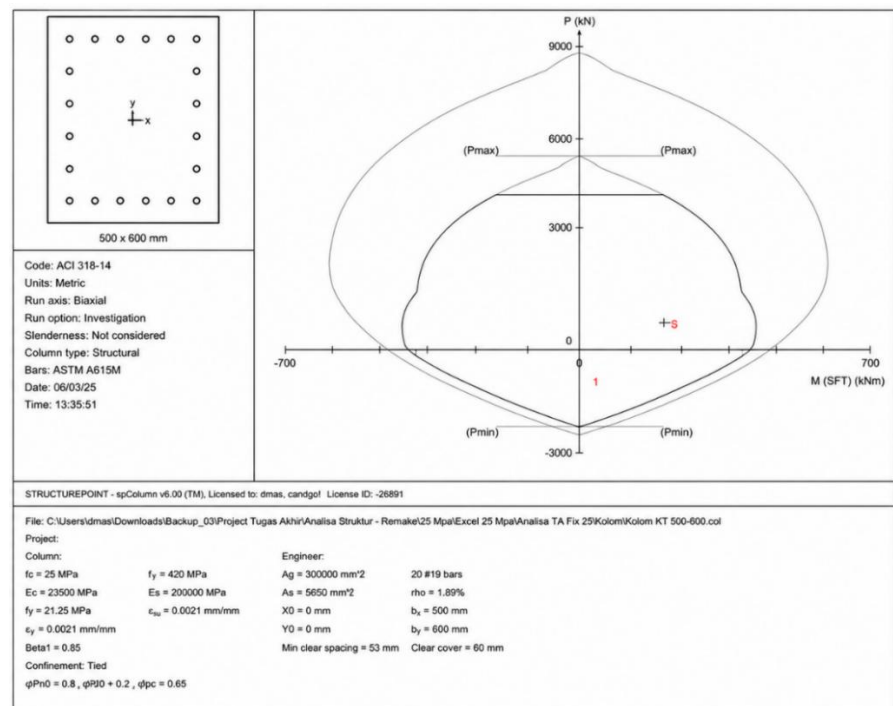
Pemeriksaan dilakukan dengan program spColumn (ACI 318-14) untuk penampang 500×600 mm dengan tulangan 20D19 ( $f'_c = 25$  MPa,  $f_y = 420$  MPa). Program menghasilkan diagram interaksi tiga dimensi (P–M<sub>x</sub>–M<sub>y</sub>) sebagaimana disajikan pada **Gambar 4.8**, serta penampang diagram interaksi dua dimensi pada sudut momen resultan tertentu (**Gambar 4.9–4.11**) yang memuat titik-titik kombinasi beban  $P_u$ – $M_u$  hasil analisis ETABS untuk verifikasi kecukupan kapasitas penampang.



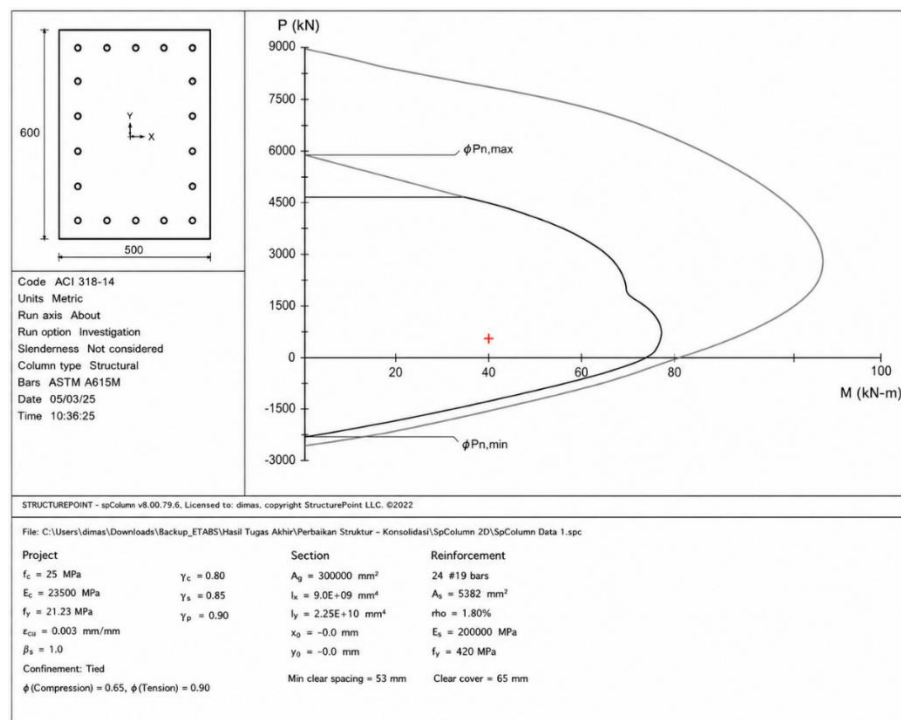
**Gambar 4.8** Diagram Interaksi Biaksial Tiga Dimensi Kolom K1  $f'_c$  25 MPa



**Gambar 4.9** Diagram Interaksi Biaksial Mx–My pada P = 0 kN



**Gambar 4.10** Diagram Interaksi P–M pada Sudut Resultan 57°



**Gambar 4.11** Diagram Interaksi P–M, Penampang Setengah ( $M = 0$  s.d.  $700 \text{ kN}\cdot\text{m}$ )

Berdasarkan Gambar 4.x hingga 4.z, seluruh titik kombinasi beban terfaktor ( $P_u$ ,  $M_u$ ) yang diperoleh dari hasil analisis ETABS berada di dalam kurva kapasitas  $\phi P_n$ – $\phi M_n$ , yang mengindikasikan bahwa penampang kolom K1 ( $500 \times 600 \text{ mm}$ ) memiliki kapasitas yang mencukupi terhadap kombinasi beban aksial-lentur yang bekerja.

### c. Beban Terfaktor dan Momen Kapasitas

Peninjauan kecukupan kapasitas penampang kolom K1 dilakukan dengan membandingkan gaya dalam terfaktor ( $P_u$ ,  $M_{ux}$ ,  $M_{uy}$ ) hasil analisis ETABS terhadap momen kapasitas tereduksi ( $\phi M_{nx}$ ,  $\phi M_{ny}$ ) pada sudut beban yang bersesuaian, sebagaimana dihasilkan oleh program spColumn. Rasio kapasitas terhadap tuntutan ( $\phi M_n/M_u$ ) digunakan sebagai indikator kecukupan, dengan syarat rasio harus lebih besar dari 1,0 pada seluruh kondisi pembebanan yang ditinjau.

Rekapitulasi hasil verifikasi keenam kondisi ekstrem disajikan pada **Tabel 4.43** berikut:

**Tabel 4.43** Beban Terfaktor terhadap Momen Kapasitas Kolom K1  $f'_c$  25 MPa

| No | $P_u$ (kN) | $M_{ux}$<br>(kN-m) | $M_{uy}$<br>(kN-m) | $\phi M_{nx}$<br>(kN-m) | $\phi M_{ny}$<br>(kN-m) | $\phi M_n/\mu$ | NA<br>Depth<br>(mm) | dt<br>(mm) | $\epsilon_t$ | $\phi$ |
|----|------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------|--------------|--------|
| 1  | -793.68    | 13.49              | 21.31              | 156.26                  | 246.85                  | 11.584         | 151                 | 565        | 0.00830      | 0.900  |
| 2  | 2829.88    | -170.41            | -167.66            | -268.20                 | -263.86                 | 1.574          | 482                 | 657        | 0.00109      | 0.650  |
| 3  | 509.10     | 289.65             | 66.82              | 535.21                  | 123.47                  | 1.848          | 250                 | 646        | 0.00475      | 0.879  |
| 4  | 2052.76    | -290.35            | -59.88             | -471.86                 | -97.32                  | 1.625          | 407                 | 650        | 0.00179      | 0.650  |
| 5  | 600.19     | 117.14             | 179.74             | 235.86                  | 361.92                  | 2.014          | 267                 | 607        | 0.00383      | 0.799  |
| 6  | 1638.15    | -77.00             | -190.16            | -152.22                 | -375.90                 | 1.977          | 330                 | 571        | 0.00220      | 0.659  |

Nilai  $P_u$  pada Tabel 4.y mengikuti ketentuan tanda spColumn (tekan positif, tarik negatif), sehingga secara angka berkorespondensi dengan Tabel 4.x namun dengan tanda yang berlawanan - sebagai contoh, kondisi P min = -2829,876 kN pada Tabel 4.x (aturan tanda ETABS, tarik positif) merepresentasikan gaya tekan besar yang sama dengan  $P_u = 2829,88$  kN pada baris ke-2 Tabel 4.y.

Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa seluruh enam kondisi kombinasi beban memiliki rasio  $\phi M_n/\mu$  lebih besar dari 1,0, dengan nilai terendah sebesar 1,574 pada kondisi baris ke-2 (kondisi P min/tekan maksimum menurut ketentuan tanda spColumn) dan nilai tertinggi sebesar 11,584 pada baris ke-1 (kondisi P max menurut Tabel 4.x, gaya aksial relatif kecil dengan momen lentur yang juga kecil sehingga kapasitas jauh melampaui kebutuhan). Dengan demikian, seluruh kondisi pembebanan terfaktor berada di dalam kurva interaksi  $\phi P_n - \phi M_n$ , sehingga penampang kolom K1 (500×600 mm) dinyatakan memenuhi syarat kekuatan

(*strength requirement*) sesuai SNI 2847-2019 terhadap kombinasi gaya aksial dan lentur biaksial yang bekerja.

Selain kapasitas kekuatan, Tabel 4.y turut menampilkan parameter regangan tarik netto tulangan terluar ( $\epsilon_t$ ) dan faktor reduksi kekuatan ( $\phi$ ) aktual pada setiap kondisi. Nilai  $\epsilon_t$  yang bervariasi antara 0,00109 hingga 0,00830 menunjukkan bahwa seluruh kondisi berada pada daerah transisi hingga terkendali tekan (*compression-controlled/transition zone*) sesuai SNI 2847-2019 Pasal 21.2, dengan  $\phi$  aktual bervariasi antara 0,650 (batas bawah kolom bersengkang pada kondisi terkendali tekan penuh) hingga 0,900 (mendekati kondisi terkendali tarik). Variasi ini konsisten dengan kedalaman garis netral (*NA Depth*) yang berkisar antara 151 mm hingga 482 mm terhadap kedalaman efektif tulangan terluar ( $d_t$ ) yang relatif tetap pada rentang 565–657 mm, mengonfirmasi bahwa perilaku penampang bergeser dari dominasi tarik menuju dominasi tekan seiring meningkatnya gaya aksial terfaktor.

#### 4. *Strong Column–Weak Beam* (SNI 2847-2019 Pasal 18.7.3.2)

Kolom harus lebih kuat daripada balok yang merangka pada joint agar sendi plastis terbentuk pada balok terlebih dahulu sesuai dengan persamaan 144 sebagai berikut:

$$\Sigma M_{nc} \geq 1,2 \cdot \Sigma (M_n^- + M_n^+) \quad (144)$$

##### a. Arah sumbu X

Momen nominal kolom  $\Sigma M_{nc} = 271,40$  kNm (dievaluasi pada kondisi aksial yang menghasilkan  $M_{nc}$  terkecil). Momen nominal balok yang merangka:  $M_{nb}^- = 253,66$  kNm dan  $M_{nb}^+ = 135,84$  kNm:

$$2 \times 271,4 = 542,8 \geq 1,2(253,656 + 135,837) = 467,4 \text{ kNm} \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

**b. Arah sumbu Y**

$\Sigma M_{nc} = 176,42 \text{ kNm}$ ;  $M_{nb}^- = 134,24 \text{ kNm}$  dan  $M_{nb}^+ = 71,12 \text{ kNm}$ :

$$2 \times 176,42 = 352,84 \geq 1,2(134,24 + 71,12) = 246,43 \text{ kNm} \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

**5. Tulangan Kekangan / Confinement (SNI 2847-2019 Pasal 18.7.5)**

**Luas Inti Beton Terkekang ( $A_{ch}$ )**

Diukur ke as sengkang terluar dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A_{ch} &= (b - 2t_p)(h - 2t_p) \\ &= (600 - 2 \times 40)(500 - 2 \times 40) \\ &= 520 \times 420 \\ &= 218.400 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

**Kebutuhan Tulangan Kekangan**

Diambil nilai terbesar dari dua persamaan (SNI 2847-2019 Pasal 18.7.5.4), dengan  $b_c = b - 2t_p = 520 \text{ mm}$  dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{A_{sh}}{s_{\min 1}} &= 0,3 \frac{b_c f'_c}{f_{yv}} \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \\ &= 0,3 \times \frac{520 \times 25}{420} \left( \frac{300.000}{218.400} - 1 \right) \\ &= 3,469 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{A_{sh}}{s_{\min 2}} &= 0,09 \frac{b_c f'_c}{f_{yv}} \\ &= 0,09 \times \frac{520 \times 25}{420} \\ &= 2,786 \text{ mm}^2/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\frac{A_{sh}}{s_{\min}} = \max(3,469 ; 2,786) = 3,469 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

**Tulangan Kekangan Terpasang**

Sengkang 5 kaki D10 pada spasi  $s = 100 \text{ mm}$ :

$$\frac{A_{sh}}{s_{\text{pasang}}} = \frac{n_{\text{kaki}} \cdot \frac{1}{4} \pi d_s^2}{s}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{5 \times \frac{1}{4} \pi \times 10^2}{100} \\
&= 3,927 \text{ mm}^2/\text{mm} \geq 3,469 \rightarrow \text{MEMENUHI}
\end{aligned}$$

**Spasi Maksimum Daerah Sendi Plastis (SNI 2847-2019 Pasal 18.7.5.3)**

Panjang daerah sendi plastis  $l_o = \max(h; l_n/6; 450)$ . Spasi maksimum diambil nilai terkecil dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
s_{maks} &= \min\left(\frac{b}{4}; 6d_b; s_o\right); s_o = \max\left(100; \min\left(100 + \frac{350-i_x}{3}; 150\right)\right) \\
s_{maks} &= \min\left(\frac{600}{4}; 6 \times 19; 150\right) = \min(150; 114; 150) = 114 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Digunakan spasi  $s = 100 \text{ mm} \leq 114 \text{ mm} \rightarrow \text{MEMENUHI}$ .

**6. Kuat Geser Kolom (SNI 2847-2019 Pasal 18.7.6)**

Gaya geser desain  $V_u = 273,4476 \text{ kN}$  (tumpuan). Kapasitas geser beton dengan kontribusi gaya aksial (SNI 2847-2019 Pasal 22.5.6.1), dengan  $N_u$  = gaya aksial terfaktor terkecil = 0 (konservatif) dan  $d_w = b - t_p - d_s - d_b/2$  dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
V_c &= 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g}\right) \sqrt{f'_c} h d_w \times 10^{-3} \\
&= 0,17(1 + 0) \sqrt{25} \times 500 \times 540,500 \times 10^{-3} \\
&= 229,710 \text{ kN}
\end{aligned}$$

**$A_v/s$  Hitung:**

$$\begin{aligned}
\frac{A_v}{s} &= \frac{\frac{V_u \times 10^3}{\phi} - V_c \times 10^3}{f_{yv} d_w} \\
&= \frac{\frac{273,448 \times 10^3}{0,75} - 229,713 \times 10^3}{420 \times 540,500} \\
&= 0,594 \text{ mm}^2/\text{mm}
\end{aligned}$$

**$A_v/s$  Minimum** (SNI 2847-2019 Pasal 10.6.2.2):

$$\begin{aligned}
 \frac{A_v}{s}_{\min} &= \max \left( 0,062 \sqrt{f'c} \frac{h}{f_{yv}} ; 0,35 \frac{h}{f_{yv}} \right) \\
 &= \max \left( 0,062 \sqrt{25} \frac{500}{420} ; 0,35 \frac{500}{420} \right) \\
 &= \max(0,369 ; 0,417) \\
 &= 0,417 \text{ mm}^2/\text{mm}
 \end{aligned}$$

Kebutuhan *confinement* ( $A_{sh}/s = 3,469$ ) jauh lebih menentukan daripada kebutuhan geser ( $A_v/s = 0,594$ ), tulangan transversal kolom K1 dikendalikan oleh kekangan. **Tulangan transversal K1: (D10+3CTD10)-100** pada daerah tumpuan (sendi plastis) dan D10-100 pada daerah lapangan, dengan kait seismik 135°.

Hasil perhitungan penulangan kolom lainnya direkapitulasi pada **Tabel 4.44** dan **Tabel 4.45** sebagai berikut:

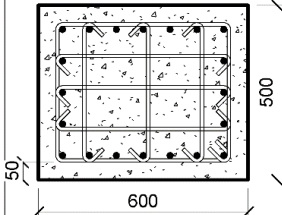
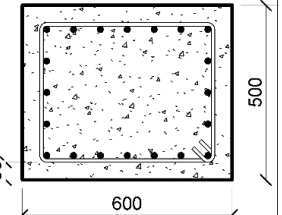
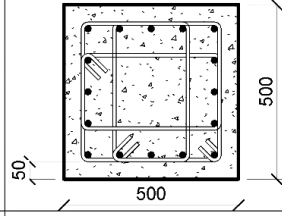
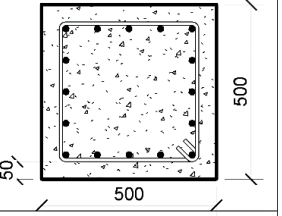
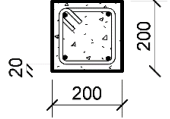
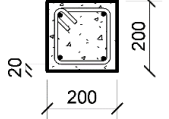
**Tabel 4.44** Rekapitulasi Penulangan Lentur Kolom

| Frame                                | Panjang kolom, b (mm) | x | lebar kolom, h (mm) | Tekan Ultimate, Pu (kN) | As Etabs (mm2) | As Perlu (mm2) | Tulangan | As Tulangan (mm2) | Momen tahanan kolom, Mnc (kNm) |        | Momen tahanan balok, Mnb sumbu x (kNm) |        | Momen tahanan balok, Mnb sumbu y (kNm) |        | Cek pmin dan pmax 1%<p<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    |
|                                      |                       |   |                     |                         |                |                |          |                   |                                |        |                                        |        |                                        |        |                                                  |                                                             |                                                            |      |
|                                      |                       |   |                     |                         |                |                |          |                   |                                |        |                                        |        |                                        |        |                                                  |                                                             |                                                            |      |
| Penulangan Lentur Kolom (f'c 25 MPa) |                       |   |                     |                         |                |                |          |                   |                                |        |                                        |        |                                        |        |                                                  |                                                             |                                                            |      |
| K1                                   | 600                   | x | 500                 | 2851,58                 | 5336,00        | 5670,57        | 20D19    | 5670,57           | 271,40                         | 176,42 | 253,66                                 | 135,84 | 134,24                                 | 71,12  | aman                                             | aman                                                        | aman                                                       | aman |
| K2                                   | 500                   | x | 500                 | 2175,77                 | 3659,00        | 4536,46        | 16D19    | 4536,46           | 297,73                         | 81,24  | 99,18                                  | 69,12  | 47,69                                  | 47,69  | aman                                             | aman                                                        | aman                                                       | aman |
| KA                                   | 200                   | x | 200                 | 30,42                   | 400,00         | 530,93         | 4D13     | 530,93            | -                              | -      | -                                      | -      | -                                      | -      | aman                                             | -                                                           | -                                                          | -    |
| Penulangan Lentur Kolom (f'c 30 MPa) |                       |   |                     |                         |                |                |          |                   |                                |        |                                        |        |                                        |        |                                                  |                                                             |                                                            |      |
| K1                                   | 550                   | x | 500                 | 2800,29                 | 5001,00        | 5670,57        | 20D19    | 5670,57           | 122,70                         | 301,41 | 115,48                                 | 61,07  | 227,51                                 | 121,26 | aman                                             | aman                                                        | aman                                                       | aman |
| K2                                   | 450                   | x | 450                 | 2007,77                 | 3413,00        | 4536,46        | 16D19    | 4536,46           | 236,82                         | 115,30 | 19,32                                  | 19,32  | 66,54                                  | 35,79  | aman                                             | aman                                                        | aman                                                       | aman |
| KA                                   | 150                   | x | 200                 | 23,98                   | 331,00         | 530,93         | 4D13     | 530,93            | -                              | -      | -                                      | -      | -                                      | -      | aman                                             | -                                                           | -                                                          | -    |
| Penulangan Lentur Kolom (f'c 35 MPa) |                       |   |                     |                         |                |                |          |                   |                                |        |                                        |        |                                        |        |                                                  |                                                             |                                                            |      |
| K1                                   | 500                   | x | 500                 | 2737,99                 | 4581,00        | 5670,57        | 20D19    | 5670,57           | 161,77                         | 315,38 | 115,10                                 | 60,98  | 194,50                                 | 104,97 | aman                                             | aman                                                        | aman                                                       | aman |
| K2                                   | 400                   | x | 400                 | 1948,30                 | 4226,00        | 4536,46        | 16D19    | 4536,46           | 184,62                         | 143,13 | 82,28                                  | 36,15  | 28,55                                  | 28,55  | aman                                             | aman                                                        | aman                                                       | aman |
| KA                                   | 150                   | x | 200                 | 53,42                   | 369,00         | 530,93         | 4D13     | 530,93            | -                              | -      | -                                      | -      | -                                      | -      | aman                                             | -                                                           | -                                                          | -    |

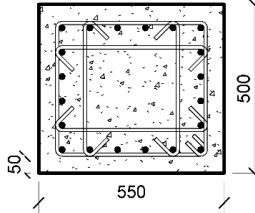
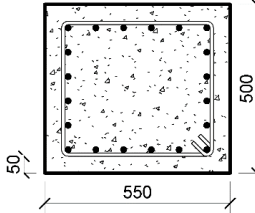
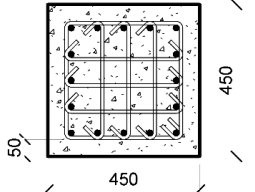
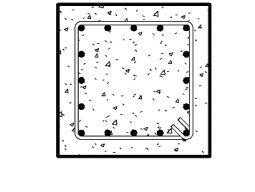
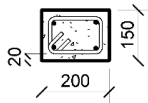
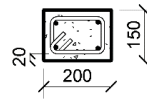
**Tabel 4.45** Rekapitulasi Penulangan Geser Kolom

| Frame                               | Panjang | x | lebar | Gaya Geser, |          | Av/s Etabs |          | Av/s Hitung |           | Ash/s    | Ash/s min 1 | Ash/s min 2 | Av/s min 1 | Av/s min 2 | Av/s Pakai |         | Cek   |          | Cek Spasi |      | Cek  | Tulangan             |         |
|-------------------------------------|---------|---|-------|-------------|----------|------------|----------|-------------|-----------|----------|-------------|-------------|------------|------------|------------|---------|-------|----------|-----------|------|------|----------------------|---------|
|                                     | kolom   |   | kolom | Vu          |          |            |          | hitung      | (mm2/mm)  | (mm2/mm) | (mm2/mm)    | (mm2/mm)    | (mm2/mm)   | (mm2/mm)   |            | Av/s <1 |       | Ash/s <1 |           |      |      |                      |         |
|                                     | b       |   | h     | (kN)        | (mm2/mm) | (mm2/mm)   | (mm2/mm) | 2019        | 2019      | 2019     | 10.6.2.2    | 10.6.2.2    | Tump.      | Lap.       | Tump.      | Lap.    | Tump. | Lap.     |           |      |      |                      |         |
|                                     | (mm)    |   | (mm)  |             |          |            |          |             |           |          |             |             |            |            |            |         |       |          |           |      |      |                      |         |
| Penulangan Geser Kolom (F'c 25 MPa) |         |   |       |             |          |            |          |             |           |          |             |             |            |            |            |         |       |          |           |      |      |                      |         |
| K1                                  | 600     | x | 500   | 273,45      | 0,00     | 2,95       | 0,00     | 0,59        | -<br>1,01 | 3,93     | 3,47        | 2,79        | 0,37       | 0,42       | 3,93       | 1,57    | 0,75  | 0,27     | aman      | aman | 0,88 | (D10+3CT<br>D10)-100 | D10-100 |
| K2                                  | 500     | x | 500   | 273,45      | 0,00     | 2,95       | 0,00     | 0,96        | -<br>1,01 | 3,14     | 3,13        | 2,25        | 0,37       | 0,42       | 3,14       | 1,57    | 0,94  | 0,27     | aman      | aman | 1,00 | (D10+2CT<br>D10)-100 | D10-100 |
| KA                                  | 200     | x | 200   | 34,90       | 0,00     | 0,59       | 0,00     | 0,27        | -<br>0,40 | 1,57     | 1,61        | 0,86        | 0,15       | 0,17       | 1,57       | 1,57    | 0,38  | 0,11     | -         | -    | -    | D10-100              | D10-100 |
| Penulangan Geser Kolom (F'c 30 MPa) |         |   |       |             |          |            |          |             |           |          |             |             |            |            |            |         |       |          |           |      |      |                      |         |
| K1                                  | 550     | x | 500   | 227,87      | 0,00     | 2,46       | 0,00     | 0,37        | -<br>1,11 | 4,71     | 3,96        | 3,02        | 0,40       | 0,42       | 4,71       | 1,57    | 0,52  | 0,27     | aman      | aman | 0,84 | (D10+4CT<br>D10)-100 | D10-100 |
| K2                                  | 450     | x | 450   | 227,87      | 0,00     | 2,78       | 0,00     | 0,85        | -<br>1,00 | 3,93     | 3,80        | 2,38        | 0,36       | 0,38       | 3,93       | 1,57    | 0,71  | 0,24     | aman      | aman | 0,97 | (D10+3CT<br>D10)-100 | D10-100 |
| KA                                  | 150     | x | 200   | 22,54       | 0,00     | 0,54       | 0,00     | 0,19        | -<br>0,44 | 1,57     | 1,66        | 0,71        | 0,16       | 0,17       | 1,57       | 1,57    | 0,34  | 0,11     | -         | -    | -    | D10-100              | D10-100 |
| Penulangan Geser Kolom (F'c 35 MPa) |         |   |       |             |          |            |          |             |           |          |             |             |            |            |            |         |       |          |           |      |      |                      |         |
| K1                                  | 500     | x | 500   | 227,87      | 0,00     | 2,46       | 0,00     | 0,44        | -<br>1,20 | 4,71     | 4,38        | 3,15        | 0,44       | 0,42       | 4,71       | 1,57    | 0,52  | 0,28     | aman      | aman | 0,93 | (D10+4CT<br>D10)-100 | D10-100 |
| K2                                  | 400     | x | 400   | 227,87      | 0,00     | 3,18       | 0,00     | 1,17        | -<br>0,96 | 4,71     | 4,50        | 2,40        | 0,35       | 0,33       | 4,71       | 1,57    | 0,67  | 0,22     | aman      | aman | 0,95 | (D10+4CT<br>D10)-100 | D10-100 |
| KA                                  | 150     | x | 200   | 23,70       | 0,00     | 0,64       | 0,00     | 0,18        | -<br>0,48 | 1,57     | 1,94        | 0,83        | 0,17       | 0,17       | 1,57       | 1,57    | 0,41  | 0,11     | -         | -    | -    | D10-100              | D10-100 |

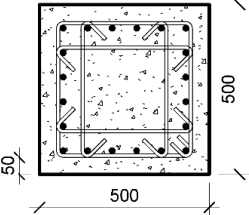
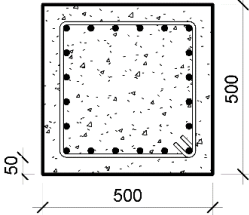
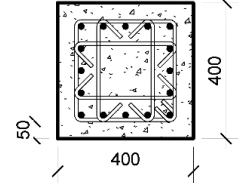
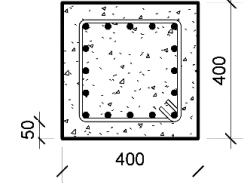
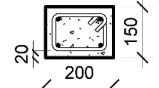
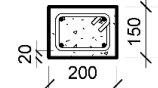
Detail penulangan kolom untuk ketiga variasi mutu beton disajikan pada **Gambar 4.12–4.14** berikut:

| Frame                  | Support Region                                                                        | Span Region                                                                           |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Kolom<br>K1<br>600.500 |     |    |
| Longitudinal bars      | 20D19                                                                                 | 20D19                                                                                 |
| Transversal bars       | (D10+3CTD10)-100                                                                      | D10-100                                                                               |
| Kolom<br>K2<br>500.500 |    |   |
| Longitudinal bars      | 16D19                                                                                 | 16D19                                                                                 |
| Transversal bars       | (D10+2CTD10)-100                                                                      | D10-100                                                                               |
| Kolom<br>KA<br>200.200 |  |  |
| Longitudinal bars      | 4D13                                                                                  | 4D13                                                                                  |
| Transversal bars       | D10-100                                                                               | D10-100                                                                               |

**Gambar 4.12** Detail Penulangan Kolom  $f'_c$  25 MPa

| Frame                  | Support Region                                                                       | Span Region                                                                          |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Kolom<br>K1<br>550.500 |    |   |
| Longitudinal bars      | 20D19                                                                                | 20D19                                                                                |
| Transversal bars       | (D10+4CTD10)-100                                                                     | D10-100                                                                              |
| Kolom<br>K2<br>450.450 |    |   |
| Longitudinal bars      | 16D19                                                                                | 16D19                                                                                |
| Transversal bars       | (D10+3CTD10)-100                                                                     | D10-100                                                                              |
| Kolom<br>KA<br>150.200 |  |  |
| Longitudinal bars      | 4D13                                                                                 | 4D13                                                                                 |
| Transversal bars       | D10-100                                                                              | D10-100                                                                              |

**Gambar 4.13** Detail Penulangan Kolom  $f'_c$  30 MPa

| Frame                  | Support Region                                                                       | Span Region                                                                          |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Kolom<br>K1<br>500.500 |    |   |
| Longitudinal bars      | 20D19                                                                                | 20D19                                                                                |
| Transversal bars       | (D10+4CTD10)-100                                                                     | D10-100                                                                              |
| Kolom<br>K2<br>400.400 |    |   |
| Longitudinal bars      | 16D19                                                                                | 16D19                                                                                |
| Transversal bars       | (D10+4CTD10)-100                                                                     | D10-100                                                                              |
| Kolom<br>KA<br>150.200 |  |  |
| Longitudinal bars      | 4D13                                                                                 | 4D13                                                                                 |
| Transversal bars       | D10-100                                                                              | D10-100                                                                              |

**Gambar 4.14** Detail Penulangan Kolom  $f'_c$  35 MPa

#### 4.6.3 Perencanaan Sambungan Balok – Kolom

Daerah sambungan (*joint*) balok-kolom merupakan zona kritis SRPMK karena mengalami konsentrasi tegangan geser tinggi saat sendi plastis terbentuk di ujung balok. Desain joint dilakukan dalam lima tahap (SNI 2847-2019 Pasal 18.8): penentuan lebar dan luas efektif joint, perhitungan gaya tulangan balok pada kondisi *probable*, perhitungan gaya geser kolom akibat *beam hinging*, perhitungan gaya geser total joint per arah gempa, serta verifikasi kapasitas geser nominal dan panjang penyaluran kait.

#### Contoh Perhitungan – Joint Kolom K1 dengan Balok B1 dan B2 ( $f'_c$ 25 MPa)

##### 1. Lebar dan Luas Efektif Joint (SNI 2847-2019 Pasal 18.8.4.3).

Lebar efektif *joint* tiap sisi diambil nilai terkecil dari  $(bb + h)$  dan  $(bb + 2x)$ , dengan  $bb$  = lebar balok dan  $x$  = jarak tepi balok ke tepi kolom. Untuk balok B1 ( $bb = 300$  mm) yang merangka pada kolom K1 (500 mm arah X dan 600 mm arah Y) diperoleh lebar efektif joint arah X  $b_j = 500$  mm dan arah Y  $h_j = 600$  mm. Luas efektif joint masing-masing arah dihitung sebagai berikut:

$$A_{j,X} = b_j \cdot h = 500 \times 500 = 250.000 \text{ mm}^2$$

$$A_{j,Y} = h_j \cdot b = 600 \times 600 = 360.000 \text{ mm}^2$$

##### 2. Gaya Tulangan Balok pada Kondisi Probable.

Tulangan balok mengalami tegangan *probable*  $f_{pr} = 1,25f_y$  (SNI 2847-2019 Pasal 18.8.2.1) dihitung sebagai berikut:

$$f_{pr} = 1,25 f_y = 1,25 \times 420 = 525 \text{ MPa}$$

Gaya tarik tulangan atas B1 (6D19,  $A_s = 1.701,172 \text{ mm}^2$ ) dan bawah (3D19,  $A_s = 850,586 \text{ mm}^2$ ) dihitung sebagai berikut:

$$F_{s,atas} = A_{s,atas} f_{pr} = 1.701,172 \times 525 \times 10^{-3} = 893,116 \text{ kN}$$

$$F_{s,bawah} = A_{s,bawah} f_{pr} = 850,586 \times 525 \times 10^{-3} = 446,558 \text{ Kn}$$

Gaya tarik tulangan atas B2 (4D19,  $A_s = 1.134,115 \text{ mm}^2$ ) dan bawah (2D19,  $A_s = 567,057 \text{ mm}^2$ ) dihitung sebagai berikut:

$$F_{s,atas} = A_{s,atas} f_{pr} = 1.134,115 \times 525 \times 10^{-3} = 595,410 \text{ kN}$$

$$F_{s,bawah} = A_{s,bawah} f_{pr} = 567,057 \times 525 \times 10^{-3} = 297,705 \text{ kN}$$

### 3. Gaya Geser Akibat Balok

Pada *joint* interior, tulangan atas pada satu sisi dan tulangan bawah pada sisi berlawanan keduanya leleh tarik. Gaya geser dari balok untuk arah gempa X dan Y dihitung sebagai berikut:

$$V_{balok,X}(B2) = F_{s,atas} + F_{s,bawah} = 595,410 + 297,705 = 893,116 \text{ kN}$$

$$V_{balok,Y}(B1) = F_{s,atas} + F_{s,bawah} = 893,116 + 446,558 = 1.339,673 \text{ kN}$$

### 4. Gaya Geser Kolom (*Beam Hinging*)

Gaya geser kolom dihitung dari momen *probable* ( $M_{pr}$ ) balok yang merangka pada *joint* dan gaya geser balok  $V_e$ , dibagi tinggi bersih kolom  $L_n = L - h_b = 3.300 - 500 = 2.800 \text{ mm}$  (SNI 2847-2019 R18.8.4). Nilai  $M_{pr}$  dan  $V_e$  diambil dari hasil perhitungan kapasitas balok pada kondisi sendi plastis yaitu momen *probable*  $M_{pr} = (A_s \cdot f_{pr}) (d - a/2)$  dengan tegangan *probable*  $f_{pr} = 1,25 \cdot f_y = 525 \text{ MPa}$  dan faktor reduksi  $\phi = 1,0$ , serta gaya geser sendi plastis  $V_e$ .

### 5. Kapasitas Geser Nominal *Joint* (SNI 2847-2019 Pasal 18.8.4.1).

Untuk konfigurasi *joint* terkekang pada keempat sisi (*interior*), kuat geser nominal *joint* dihitung dengan rumus 203 berikut:

$$\phi V_n = \phi \cdot c \cdot \lambda \sqrt{f'_c} A_j \quad (203)$$

### a. Tinjauan Arah X

Pada sisi melintang, joint dirangka oleh dua balok B2 (300 × 400 mm) dengan momen probable  $M_{pr}^- = 180,886$  kNm,  $M_{pr}^+ = 97,394$  kNm, dan gaya geser sendi plastis  $V_e = 170,842$  kN.

Gaya geser dari balok arah X dihitung dari penjumlahan gaya tarik tulangan atas dan gaya tekan (setara gaya tarik tulangan bawah pada sisi berlawanan):

Gaya geser kolom arah X ( $h = 500$  mm,  $L_n = 2.800$  mm) dihitung sebagai berikut:

$$V_{kolom,X} = \frac{(M_{pr}^+ + M_{pr}^-) + (V_{e,3} + V_{e,4}) \frac{h}{2}}{L_n}$$

$$V_{kolom,X} = \frac{(97,394 + 180,886) \times 10^6 + (170,842 + 170,842) \times 10^3 \times \frac{500}{2}}{2.800}$$

$$= 129,893 \text{ kN}$$

Gaya geser total joint arah X dihitung sebagai berikut:

$$V_{u,joint X} = V_{balok,X} - V_{kolom,X} = 893,116 - 129,893 = 763,222 \text{ kN}$$

Untuk arah X, luas efektif joint  $A_j$ ,  $X = b_j \times h = 500 \times 500 = 250.000 \text{ mm}^2$  ( $b_j$  = lebar efektif joint arah X,  $h$  = lebar kolom arah X), sehingga kuat geser nominal tereduksi dihitung sebagai berikut:

$$\phi V_{n,X} = 0,85 \times 1 \times 1,0 \times \sqrt{25} \times 250.000 \times 10^{-3} = 1.062,500 \text{ kN}$$

Faktor Keamanan Joint Arah X dihitung sebagai berikut:

$$SF_X = \frac{\phi V_{n,X}}{V_{u,joint X}} = \frac{1.062,500}{763,222} = 1,392$$

### b. Tinjauan Arah Y

Untuk arah gempa Y, balok yang merangka adalah dua balok B1 (sisi memanjang) dengan  $M_{pr}^+ = 339,787$  kNm,  $M_{pr}^- = 185,534$  kNm, dan  $V_e = 268,197$  kN;  $h = 500$  mm adalah lebar kolom arah X dihitung sebagai berikut:

$$V_{kolom,Y} = \frac{(M_{pr}^+ + M_{pr}^-) + (V_{e,1} + V_{e,2}) \frac{h}{2}}{L_n}$$

$$V_{kolom,Y} = \frac{(339,787 + 185,534) \times 10^6 + (268,197 + 268,197) \times 10^3 \times \frac{500}{2}}{2.800}$$

$$= 235,507 \text{ kN}$$

Gaya geser joint arah Y dihitung sebagai berikut:

$$V_{u,joint Y} = V_{balok,Y} - V_{kolom,Y} = 1.339,673 - 235,507 = 1.104,166 \text{ kN}$$

Dengan  $\phi = 0,85$  (SNI 2847-2019 Pasal 21.2.4.3),  $c = 1$ , dan  $\lambda = 1,0$ . Untuk arah Y (Aj, Y = 360.000 mm<sup>2</sup>):

$$\phi V_{n,Y} = 0,85 \times 1 \times 1,0 \times \sqrt{25} \times 360.000 \times 10^{-3} = 1.530,000 \text{ kN}$$

Faktor Keamanan Joint Arah Y (SF =  $\phi V_n / V_u$ ) dihitung sebagai berikut:

$$SF_Y = \frac{\phi V_{n,Y}}{V_{u,joint Y}} = \frac{1.530,000}{1.104,166} = 1,386$$

## 6. Panjang Penyaluran Kait (ldh) (SNI 2847-2019 Pasal 18.8.5.1)

Tulangan balok diangkur dalam joint dengan kait standar 90° dihitung sebagai berikut:

$$l_{dh} = \max \left( \frac{f_y d_b}{5,4 \lambda \sqrt{f'_c}} ; 8d_b ; 150 \right)$$

$$= \max \left( \frac{420 \times 19}{5,4 \times 1,0 \times \sqrt{25}} ; 152 ; 150 \right)$$

$$= 295,556 \text{ mm}$$

Digunakan ldh = 295,556 mm. Hasil perhitungan joint untuk seluruh tipe kolom pada ketiga variasi mutu beton direkapitulasi pada **Tabel 4.46** sebagai berikut:

**Tabel 4.46** Rekapitulasi Perencanaan Sambungan Balok–Kolom

| Kolom | Dimensi<br>(mm) | Vu,X<br>(kN) | $\phi V_n,X$<br>(kN) | SF X  | Vu,Y<br>(kN) | $\phi V_n,Y$<br>(kN) | SF Y  | ldh<br>(mm) |
|-------|-----------------|--------------|----------------------|-------|--------------|----------------------|-------|-------------|
| K1    | 600×500         | 763,222      | 1.062,500            | 1,392 | 1.104,166    | 1.530,000            | 1,386 | 295,556     |
| K2    | 500×500         | 767,701      | 1.062,500            | 1,384 | 767,701      | 1.062,500            | 1,384 | 295,556     |
| K1    | 550×500         | 780,750      | 1.163,910            | 1,491 | 1.130,421    | 1.408,332            | 1,246 | 269,804     |
| K2    | 450×450         | 785,474      | 942,767              | 1,200 | 785,474      | 942,767              | 1,200 | 269,804     |

| Kolom | Dimensi<br>(mm) | Vu,X<br>(kN) | $\phi Vn,X$<br>(kN) | SF X  | Vu,Y<br>(kN) | $\phi Vn,Y$<br>(kN) | SF Y  | ldh<br>(mm) |
|-------|-----------------|--------------|---------------------|-------|--------------|---------------------|-------|-------------|
| K1    | 500×500         | 787,328      | 1.257,167           | 1,597 | 1.162,205    | 1.257,167           | 1,082 | 249,790     |
| K2    | 400×400         | 792,031      | 804,587             | 1,016 | 792,031      | 804,587             | 1,016 | 249,790     |

#### 4.6.4 Penulangan Pelat Lantai

Pelat lantai direncanakan sebagai pelat dua arah (*two-way slab*). Perencanaan pembebanan dan penulangan dilakukan menggunakan metode koefisien momen sesuai SNI 2847-2019 dengan memanfaatkan gaya dalam hasil analisis ETABS. Tiga tipe pelat yang ditinjau meliputi pelat tipikal lantai (S1), pelat atap (S2), dan pelat tangga (ST).

#### Contoh Perhitungan – Pelat S1

##### 1. Data Perencanaan

Tebal pelat,  $t$  = 120 mm

Diameter tulangan,  $d_s$  = 10 mm

Selimut beton,  $cc$  = 20 mm

Kuat tekan beton,  $f'_c$  = 25 MPa

Kuat leleh tulangan,  $f_y$  = 420 MPa

Spasi tulangan rencana,  $s$  = 150 mm

Lebar tinjauan (per meter),  $b$  = 1.000 mm

Faktor reduksi lentur,  $\phi$  = 0,90

Momen lentur terfaktor diperoleh dari analisis elemen *shell* ETABS pada kondisi tumpuan dan lapangan untuk masing-masing arah (sumbu x dan sumbu y).

##### 2. Tinggi Efektif Penampang.

Tinggi efektif arah x (lapis luar) dan arah y (lapis kedua) dihitung terpisah (SNI

2847-2019 Pers. 172–173) dihitung sebagai berikut:

$$d_x = t - c_c - \frac{d_s}{2} = 120 - 20 - \frac{10}{2} = 95 \text{ mm}$$

$$d_y = t - c_c - d_s - \frac{d_s}{2} = 120 - 20 - 10 - \frac{10}{2} = 85 \text{ mm}$$

### 3. Luas Tulangan Minimum

Luas tulangan minimum dihitung sebagai berikut

$$A_{s,\min 1} = \frac{0,0018 \times 420}{f_y} b t = \frac{0,0018 \times 420}{420} \times 1.000 \times 120 = 216 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,\min 2} = 0,0014 b t = 0,0014 \times 1.000 \times 120 = 168 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,\min} = \max(216 ; 168) = 216 \text{ mm}^2$$

### 4. Luas Tulangan Terpasang (D10-150):

Luas tulangan terpasang dihitung sebagai berikut:

$$A_{s,pasang} = \frac{b}{s} \cdot \frac{1}{4} \pi d_s^2 = \frac{1.000}{150} \times \frac{1}{4} \pi \times 10^2 = 523,599 \text{ mm}^2$$

#### a. Tumpuan Arah X (Momen Negatif)

Momen terfaktor  $M_u = 15,786 \text{ kNm}$ . Luas tulangan dihitung dengan tinggi efektif  $d_x = 95 \text{ mm}$  dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A_{s,hitung} &= \frac{0,85 f' c b}{f_y} \left( d_x - \sqrt{d_x^2 - \frac{2 \frac{M_u}{\phi}}{0,85 f' c b}} \right) \\ &= \frac{0,85 \times 25 \times 1.000}{420} \left( 95 - \sqrt{95^2 - \frac{2 \times 15,786 \times \frac{10^6}{0,9}}{0,85 \times 25 \times 1.000}} \right) \\ &= 461,781 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas tulangan perlu:  $A_s, \text{ perlu} = \max (216; 461,78) = 461,78 \text{ mm}^2$ . Kontrol rasio:

$$\frac{A_{s,\text{perlu}}}{A_{s,\text{pasang}}} = \frac{461,781}{523,599} = 0,882 < 1 \rightarrow \text{MEMENUHI (D10-150)}$$

#### b. Lapangan Arah X (Momen Positif)

Momen terfaktor  $M_u = 6,409 \text{ kNm}$  dengan  $d_x = 95 \text{ mm}$  dihitung sebagai berikut:

$$A_{s,\text{hitung}} = \frac{0,85 \times 25 \times 1.000}{420} \left( 95 - \sqrt{95^2 - \frac{2 \times 6,409 \times \frac{10^6}{0,9}}{0,85 \times 25 \times 1.000}} \right)$$

$$= 181,917 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan perlu:  $A_s, \text{ perlu} = \max (216; 181,92) = 216 \text{ mm}^2$  (tulangan minimum menentukan). Kontrol:

$$\frac{216}{523,599} = 0,413 < 1 \rightarrow \text{MEMENUHI (D10-150)}$$

#### c. Tumpuan Arah Y (Momen Negatif)

Momen terfaktor  $M_u = 12,959 \text{ kNm}$ . Luas tulangan dihitung dengan tinggi efektif  $d_y = 85 \text{ mm}$  dihitung sebagai berikut:

$$A_{s,\text{hitung}} = \frac{0,85 \times 25 \times 1.000}{420} \left( 85 - \sqrt{85^2 - \frac{2 \times 12,959 \times \frac{10^6}{0,9}}{0,85 \times 25 \times 1.000}} \right)$$

$$= 424,257 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan perlu:  $A_s, \text{ perlu} = \max(216 ; 424,26) = 424,26 \text{ mm}^2$ . Kontrol:

$$\frac{424,257}{523,599} = 0,810 < 1 \rightarrow \text{MEMENUHI (D10-150)}$$

#### d. Lapangan Arah Y (Momen Positif)

Momen terfaktor  $M_u = 6,307$  kNm dengan  $d_y = 85$  mm dihitung sebagai berikut:

$$A_{s,hitung} = \frac{0,85 \times 25 \times 1.000}{420} \left( 85 - \sqrt{85^2 - \frac{2 \times 6,307 \times 10^6 / 0,9}{0,85 \times 25 \times 1.000}} \right)$$

$$= 200,993 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan perlu:  $A_s, \text{ perlu} = \max (216 ; 200,99) = 216 \text{ mm}^2$  (tulangan minimum menentukan). Kontrol:

$$\frac{216}{523,599} = 0,413 < 1 \rightarrow \text{MEMENUHI (D10-150)}$$

#### 5. Kontrol Lendutan

Lendutan pelat dua arah dikontrol terhadap lendutan jangka panjang izin sesuai SNI 2847-2019 Tabel 24.2.2. Lendutan dihitung dengan metode Branson (SNI 2847-2019 Pasal 24.2.3) berdasarkan momen inersia efektif  $I_e$ , ditinjau pada kedua bentang: arah sumbu 1 (X,  $L_x = 4.000$  mm) dan arah sumbu 2 (Y,  $L_y = 6.000$  mm).

#### Kapasitas Retak Lentur

Momen inersia penampang utuh, tegangan retak, garis netral, momen retak, dan momen inersia retak dihitung sebagai berikut:

$$I_g = \frac{1}{12} b t^3 = \frac{1}{12} \times 1.000 \times 120^3 = 144 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$f_r = 0,62 \lambda \sqrt{f'_c} = 0,62 \times 1,0 \times \sqrt{25} = 3,100 \text{ MPa}; y = \frac{t}{2} = 60 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y} = \frac{3,100 \times 144 \times 10^6}{60} \times 10^{-6} = 7,440 \text{ kNm}; I_{cr} = 0,25 I_g = 36 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

#### a. Arah Sumbu 1 (X), $L_x = 4.000$ mm.

Momen layan dari kombinasi DL, SIDL, dan LL:  $M_a, \text{ lapangan} = 1,971 + 1,641 + 1,254 = 4,866$  kNm;  $M_a, \text{ tumpuan} = -(2,707 + 2,051 + 1,901) = -6,659$  kNm.

Karena  $M_{cr}/M_a > 1$  pada kedua lokasi, momen inersia efektif diambil  $I_e = I_g$  (penampang belum retak), sehingga  $I_e$ , rata-rata =  $144 \times 10^6 \text{ mm}^4$ .

Lendutan seketika tiap beban dihitung dengan  $\delta_i = (5/48) \cdot (L^2/(E_c \cdot I_e)) \cdot [M_{lap} + 0,2 \cdot M_{tump}]$  dihitung sebagai berikut:

$$\delta_{i,DL} = \frac{5}{48} \times \frac{4.000^2}{23.500 \times 144 \times 10^6} \times (1,971 + 0,2 \times 2,707) \times 10^6 = 1,237 \text{ mm}$$

$$\delta_{i,SIDL} = 1,010 \text{ mm}; \quad \delta_{i,LL} = 0,805 \text{ mm}$$

Faktor jangka panjang ( $\rho' = 0$ , sehingga  $\lambda \Delta$  bergantung pada konfigurasi tulangan tekan pelat) dan lendutan jangka panjang total dihitung sebagai berikut:

$$\lambda_{\Delta} = \frac{2}{1 + 50\rho'} = 1,529$$

$$\begin{aligned} \Delta_{LT} &= (\delta_{i,DL} + \delta_{i,SIDL})\lambda_{\Delta} + \delta_{i,LL} \\ &= (1,237 + 1,010) \times 1,529 + 0,805 \\ &= 4,242 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\Delta_{izin,x} = \frac{L_x}{480} = \frac{4.000}{480} = 8,333 \text{ mm} \rightarrow \Delta_{LT} = 4,242 < 8,333 \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

#### **b. Arah Sumbu 2 (Y), $L_y = 6.000 \text{ mm}$**

Dengan prosedur identik dan momen layan arah Y ( $M_a$ , lapangan =  $4,798 \text{ kNm}$ ;  $M_a$ , tumpuan =  $-6,341 \text{ kNm}$ ;  $I_e = I_g$ ) yang dihitung sebagai berikut:

$$\delta_{i,DL} = 2,682 \text{ mm}; \quad \delta_{i,SIDL} = 2,254 \text{ mm}; \quad \delta_{i,LL} = 1,787 \text{ mm}$$

$$\Delta_{LT} = (2,682 + 2,254) \times 1,529 + 1,787 = 9,334 \text{ mm}$$

$$\Delta_{izin,y} = \frac{L_y}{480} = \frac{6.000}{480} = 12,50 \text{ mm} \rightarrow \Delta_{LT} = 9,334 < 12,50 \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

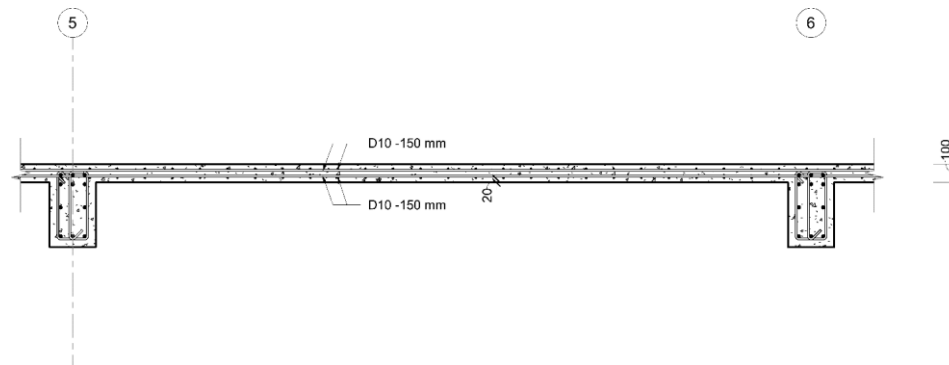
Kedua arah memenuhi syarat lendutan jangka panjang, sehingga tebal pelat S1  $t = 120 \text{ mm}$  memadai.

Hasil perhitungan penulangan seluruh tipe pelat untuk ketiga variasi mutu beton direkapitulasi pada **Tabel 4.47** sebagai berikut:

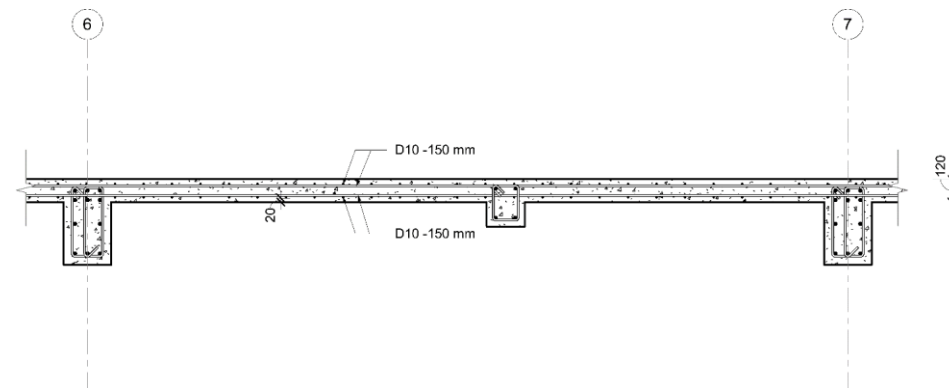
**Tabel 4.47** Rekapitulasi Penulangan Lentur Pelat

| Slab                                 | tebal plat, t (mm) | Tulangan, ds (mm) | Jenis Tulangan | Moment Ultimate (kNm) |       | Spasi tulangan, s (mm) |     | As min 1 (mm2) SNI 2847-2019 7.6.1.1 |        | As min 2 (mm2) SNI 2847-2019 8.6.1.1 |        | As Hitung (mm2) |        | Tulangan |         | As Tulangan (mm2) |        | Cek rasio As Tulangan <1 (aman) |      |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|----------------|-----------------------|-------|------------------------|-----|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|-----------------|--------|----------|---------|-------------------|--------|---------------------------------|------|
|                                      |                    |                   |                | Tump                  | Lap   | Tump                   | Lap | Tump                                 | Lap    | Tump                                 | Lap    | Tump            | Lap    | Tump     | Lap     | Tump              | Lap    | Tump                            | Lap  |
| Penulangan Lentur Pelat (F'c 25 MPa) |                    |                   |                |                       |       |                        |     |                                      |        |                                      |        |                 |        |          |         |                   |        |                                 |      |
| S1                                   | 120                | 10                | sumbu x        | 7,77                  | 4,08  | 150                    | 150 | 216,00                               | 216,00 | 168,00                               | 168,00 | 221,59          | 115,05 | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,42                            | 0,41 |
|                                      |                    |                   | sumbu y        | 7,36                  | 6,18  | 150                    | 150 | 216,00                               | 216,00 | 168,00                               | 168,00 | 235,42          | 196,82 | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,45                            | 0,41 |
| S2                                   | 100                | 10                | sumbu x        | 2,77                  | 2,01  | 150                    | 150 | 180,00                               | 180,00 | 140,00                               | 140,00 | 99,14           | 71,61  | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,34                            | 0,34 |
|                                      |                    |                   | sumbu y        | 3,75                  | 2,68  | 150                    | 150 | 180,00                               | 180,00 | 140,00                               | 140,00 | 156,26          | 110,78 | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,34                            | 0,34 |
| ST                                   | 140                | 13                | sumbu x        | 16,15                 | 20,22 | 150                    | 150 | 252,00                               | 252,00 | 196,00                               | 196,00 | 430,52          | 545,07 | D13-150  | D13-150 | 884,88            | 884,88 | 0,49                            | 0,62 |
|                                      |                    |                   | sumbu y        | 22,48                 | 10,02 | 150                    | 150 | 252,00                               | 252,00 | 196,00                               | 196,00 | 712,55          | 302,93 | D13-150  | D13-150 | 884,88            | 884,88 | 0,81                            | 0,34 |
| Penulangan Lentur Pelat (F'c 30 MPa) |                    |                   |                |                       |       |                        |     |                                      |        |                                      |        |                 |        |          |         |                   |        |                                 |      |
| S1                                   | 120                | 10                | sumbu x        | 10,36                 | 4,01  | 150                    | 150 | 216,00                               | 216,00 | 168,00                               | 168,00 | 296,04          | 112,71 | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,57                            | 0,41 |
|                                      |                    |                   | sumbu y        | 10,28                 | 7,08  | 150                    | 150 | 216,00                               | 216,00 | 168,00                               | 168,00 | 330,67          | 225,17 | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,63                            | 0,43 |
| S2                                   | 100                | 10                | sumbu x        | 3,62                  | 2,13  | 150                    | 150 | 180,00                               | 180,00 | 140,00                               | 140,00 | 129,39          | 75,76  | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,34                            | 0,34 |
|                                      |                    |                   | sumbu y        | 4,57                  | 3,14  | 150                    | 150 | 180,00                               | 180,00 | 140,00                               | 140,00 | 190,77          | 129,73 | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,36                            | 0,34 |
| ST                                   | 140                | 13                | sumbu x        | 16,06                 | 18,05 | 150                    | 150 | 252,00                               | 252,00 | 196,00                               | 196,00 | 424,95          | 479,62 | D13-150  | D13-150 | 884,88            | 884,88 | 0,48                            | 0,54 |
|                                      |                    |                   | sumbu y        | 22,11                 | 8,81  | 150                    | 150 | 252,00                               | 252,00 | 196,00                               | 196,00 | 689,53          | 263,99 | D13-150  | D13-150 | 884,88            | 884,88 | 0,78                            | 0,30 |
| Penulangan Lentur Pelat (F'c 35 MPa) |                    |                   |                |                       |       |                        |     |                                      |        |                                      |        |                 |        |          |         |                   |        |                                 |      |
| S1                                   | 120                | 10                | sumbu x        | 13,20                 | 6,05  | 150                    | 150 | 216,00                               | 216,00 | 168,00                               | 168,00 | 378,18          | 170,61 | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,72                            | 0,41 |
|                                      |                    |                   | sumbu y        | 13,16                 | 5,11  | 150                    | 150 | 216,00                               | 216,00 | 168,00                               | 168,00 | 424,52          | 161,07 | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,81                            | 0,41 |
| S2                                   | 100                | 10                | sumbu x        | 4,37                  | 2,09  | 150                    | 150 | 180,00                               | 180,00 | 140,00                               | 140,00 | 156,56          | 74,17  | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,34                            | 0,34 |
|                                      |                    |                   | sumbu y        | 7,14                  | 4,41  | 150                    | 150 | 180,00                               | 180,00 | 140,00                               | 140,00 | 300,22          | 182,92 | D10-150  | D10-150 | 523,60            | 523,60 | 0,57                            | 0,35 |
| ST                                   | 140                | 13                | sumbu x        | 17,74                 | 18,69 | 150                    | 150 | 252,00                               | 252,00 | 196,00                               | 196,00 | 468,51          | 494,48 | D13-150  | D13-150 | 884,88            | 884,88 | 0,53                            | 0,56 |
|                                      |                    |                   | sumbu y        | 24,74                 | 9,59  | 150                    | 150 | 252,00                               | 252,00 | 196,00                               | 196,00 | 769,47          | 286,87 | D13-150  | D13-150 | 884,88            | 884,88 | 0,87                            | 0,32 |

Detail penulangan pelat lantai disajikan pada **Gambar 4.15** dan **Gambar 4.16** berikut:



**Gambar 4.15** Detail Penulangan Pelat S2 ( $t = 100$  mm)



**Gambar 4.16** Detail Penulangan Pelat S1 ( $t = 120$  mm)

## 4.7 Perencanaan Struktur Bawah

Struktur bawah terdiri atas pondasi tiang pancang, *pile cap*, dan *tie beam*. Pondasi direncanakan dalam empat tahap: penentuan kapasitas aksial dan lateral tiang tunggal, distribusi gaya pada kelompok tiang dari hasil analisis ETABS, desain *pile cap* (geser dan lentur), serta desain *tie beam*. Seluruh prosedur material dan penulangan mengacu pada SNI 2847-2019, sedangkan kapasitas tiang mengacu pada SNI 8460-2017.

### 4.7.1 Perencanaan Tiang Pancang (*Spun Pile*)

Kapasitas dukung tiang pancang ditentukan berdasarkan hasil investigasi tanah yang diperoleh dari *Standard Penetration Test* (SPT). Selanjutnya, gaya dalam berupa  $P_u$ ,  $M_u$ , dan  $V_u$  yang bekerja pada setiap kolom diperoleh dari hasil analisis ETABS menggunakan kombinasi pembebanan yang paling kritis sesuai SNI 1726-2019. Tiang pancang yang digunakan adalah *spun pile* prategang diameter 400 mm dengan panjang 30 m dan mutu beton  $f'_c = 52$  MPa. Kapasitas aksial ditentukan dari nilai minimum antara kapasitas bahan dan kapasitas berdasarkan data SPT (metode Meyerhof, 1976), sedangkan kapasitas lateral ditentukan dengan metode Elastik Winkler (Matlock & Reese, 1956).

### Contoh Perhitungan – Tiang Pancang ( $f'_c$ 25 MPa)

#### 1. Data Perencanaan

|                                                             |                        |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|
| Diameter tiang, $D$                                         | = 0,4 m (400 mm)       |
| Panjang tiang, $L$                                          | = 30 m                 |
| Kuat tekan beton tiang, $f'_c$                              | = 52 MPa               |
| Berat jenis beton, $w_c$                                    | = 24 kN/m <sup>3</sup> |
| Nilai N-SPT rata-rata tertimbang sepanjang tiang, $\bar{N}$ | = 42,867               |
| Nilai N-SPT di sekitar dasar tiang, $N_b$                   | = 65                   |

## 2. Luas Penampang dan Berat Tiang:

Luas penampang dan berat tiang dihitung sebagai berikut:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,4)^2 = 0,126 \text{ m}^2$$

$$W_p = A \cdot L \cdot w_c = 0,126 \times 30 \times 24 = 90,478 \text{ Kn}$$

## 3. Kapasitas Aksial Berdasarkan Kekuatan Bahan

Kapasitas aksial tiang berdasarkan kekuatan bahan (SNI 2847-2019) dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{n,bahan} &= 0,30 f'_c A - 1,2 W_p \\ &= 0,30 \times 52.000 \times 0,126 - 1,2 \times 90,478 \\ &= 1.851,780 \text{ kN} \end{aligned}$$

## 4. Kapasitas Aksial Berdasarkan Data SPT (Meyerhof, 1976)

Nilai N-SPT rata-rata tertimbang sepanjang tiang  $\bar{N} = 42,867$ ; nilai SPT di sekitar dasar tiang  $N_b = 65$ .

### Luas Ujung dan Selimut Tiang:

$$A_b = \frac{\pi}{4} D^2 = 0,126 \text{ m}^2; \quad A_s = \pi D L = \pi \times 0,4 \times 30 = 37,699 \text{ m}^2$$

### Kapasitas Nominal SPT

Diambil nilai minimum antara persamaan utama dan batas atas (SNI 8460-2017):

$$\begin{aligned} P_{n,SPT} &= 40 N_b A_b + \bar{N} A_s \\ &= 40 \times 65 \times 0,126 + 42,867 \times 37,699 \\ &= 1.942,761 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{n,batas} &= 380 \bar{N} A_b \\ &= 380 \times 42,867 \times 0,126 \\ &= 2.046,980 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$P_{n,SPT} = \min(1.942,761 ; 2.046,980) = 1.942,761 \text{ kN}$$

## 5. Kapasitas Aksial Nominal Tiang

Kapasitas bahan pada persamaan 45 memakai tegangan izin  $0,30 f'_c$  sehingga  $P_{n,bahan} = 1.851,780$  kN sudah berada pada tingkat izin. Kapasitas geoteknik  $P_{n,SPT} = 1.942,761$  kN merupakan kapasitas nominal yang direduksi dengan faktor keamanan per kombinasi pembebanan. Daya dukung izin diambil sebagai nilai terkecil di antara keduanya sesuai persamaan 48

## 6. Daya Dukung Izin dengan Faktor Keamanan per Kombinasi ASD

Daya dukung izin tiang diperoleh dengan membagi kapasitas nominal dengan faktor keamanan (SF), yang besarnya berbeda untuk tiap kombinasi pembebanan ASD sesuai tingkat keandalan beban. Penetapan SF untuk kondisi statik dan gempa mengacu pada hasil Konsensus TPKB (Tim Penjamin Keandalan Bangunan) DKI Jakarta tanggal 6 Mei 2015 mengenai Faktor Keamanan Daya Dukung Fondasi (Pasal 17). Berdasarkan konsensus tersebut, daya dukung aksial izin untuk kondisi gempa diperbolehkan dinaikkan terhadap daya dukung izin statik, yaitu sebesar 1,30 kali untuk kondisi gempa desain/nominal dan 1,56 kali untuk kondisi gempa maksimum yang sesuai persamaan 48 berikut:

$$P_{ijin} = \frac{P_n}{SF} \quad (48)$$

Dengan faktor keamanan statik  $SF = 2,5$  sebagai acuan dasar, faktor keamanan untuk kombinasi gempa diperoleh dengan membagi SF statik terhadap faktor kenaikan daya dukung tersebut dihitung sebagai berikut:

$$SF_{ASDN1} = \frac{SF_{statik}}{1,30} = \frac{2,5}{1,30} = 1,923 \quad (\text{gempa desain/nominal})$$

$$SF_{ASDK1} = \frac{SF_{statik}}{1,56} = \frac{2,5}{1,56} = 1,603 \quad (\text{gempa maksimum})$$

Dengan demikian, untuk kombinasi tetap/gravitasi (ASDG2) digunakan  $SF = 2,500$ ; kombinasi dengan beban gempa nominal (ASDN1)  $SF = 1,923$ ; dan kombinasi dengan beban gempa maksimum (ASDK1)  $SF = 1,603$  dihitung sebagai berikut:

$$P_{n,ASDG2} = \frac{1.942,761}{2,500} = 777,104 \text{ kN}$$

$$P_{n,ASDN1} = \frac{1.942,761}{1,923} = 1.010,236 \text{ kN}$$

$$P_{n,ASDK1} = \frac{1.942,761}{1,603} = 1.212,283 \text{ kN}$$

Daya dukung izin tiang diambil sebagai nilai terkecil terhadap kapasitas bahan:

$$P_{ijin,ASDG2} = \min(1.851,780 ; 777,104) = 777,104 \text{ kN}$$

$$P_{ijin,ASDN1} = \min(1.851,780 ; 1.010,236) = 1.010,236 \text{ kN}$$

$$P_{ijin,ASDK1} = \min(1.851,780 ; 1.212,283) = 1.212,283 \text{ kN}$$

Pada ketiga kombinasi, kapasitas geoteknik menentukan karena nilainya lebih kecil daripada kapasitas bahan.

## 7. Distribusi Gaya pada Kelompok Tiang

Gaya yang bekerja pada tiap tiang dalam kelompok dihitung dari beban terfaktor kolom dan momen dua arah (SNI 8460-2017) dihitung dengan rumus 56 berikut:

$$P_{ut} = \frac{|P_u + 1,2 W_{pc}|}{n} + \frac{|M_x| x_{\max}}{\sum x^2} + \frac{|M_y| y_{\max}}{\sum y^2} \quad (56)$$

dengan  $W_{pc}$  = berat sendiri *pile cap*,  $n$  = jumlah tiang,  $M_x/M_y$  = momen dua arah,  $x/y$  = jarak tiang ke pusat kelompok.

### Kondisi Menentukan (*Governing*)

Contoh pemeriksaan titik pondasi ditinjau pada ***pile cap* PC1, titik 241, kombinasi ASDK1**, dengan tiang tunggal ( $n = 1$ ). Karena hanya satu tiang, kontribusi momen terhadap distribusi gaya bernilai nol ( $x_{\max} = y_{\max} = 0$ ), sehingga dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{ut} &= \frac{|P_u + 1,2 W_{pc}|}{n} \\ &= \frac{|1.182,587 + 1,2 \times \frac{1.000 \times 1.000 \times 800}{10^9} \times 24|}{1} \\ &= 1.205,628 \text{ kN} \end{aligned}$$

### Kontrol Daya Dukung Aksial:

$$\frac{P_{ut}}{P_{ijin,ASDK1}} = \frac{1.205,628}{1.212,283} = 0,995 < 1 \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

Rasio 0,995 menunjukkan tiang bekerja sangat mendekati kapasitas izinnnya pada kondisi gempa, kondisi ini menentukan jumlah tiang yang diperlukan.

### Kapasitas Lateral

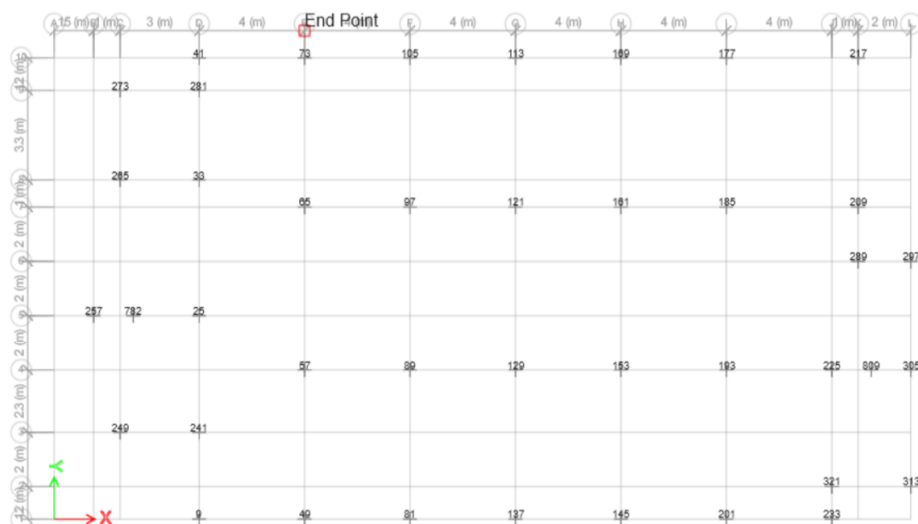
Kapasitas lateral nominal tiang dihitung dengan metode Elastik Winkler menghasilkan  $H_n = 452,47$  kN, yang juga dibagi faktor keamanan per kombinasi. Untuk ASDK1:

$$H_{ijin,ASDK1} = \frac{H_n}{SF} = \frac{452,470}{1,603} = 282,341 \text{ kN}$$

Gaya geser per tiang pada kondisi governing  $V_{ut} = 219,92$  kN. Kontrol:

$$\frac{V_{ut}}{H_{ijin,ASDK1}} = \frac{219,920}{282,341} = 0,779 < 1 \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

Adapun gambar titik pondasi sebagai dasar perhitungan kebutuhan tiang pancang disajikan pada **Gambar 4.17** berikut:



**Gambar 4.17** Titik Pondasi

Rekapitulasi kebutuhan tiang pancang per titik untuk setiap variasi mutu disajikan pada **Tabel 4.48** berikut:

**Tabel 4.48** Kebutuhan Tiang Pancang

| No.                                  | Titik Pondasi | Pilecap | b (mm) | x | h (mm) | Tebal Pilecap (mm) | Diameter tiang, D (mm) | Jumlah baris tiang, n |   | Jumlah Tiang | Jarak antar tiang (mm) |      | Jarak tiang ke tepi (mm) |     | Gaya Tekan, Pu (kN) | Momen, Mu (kNm) | Momen, Mu (kNm) | Gaya Geser, Vu (kN) | Gaya Geser, Vu (kN) |
|--------------------------------------|---------------|---------|--------|---|--------|--------------------|------------------------|-----------------------|---|--------------|------------------------|------|--------------------------|-----|---------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|
|                                      |               |         |        |   |        |                    |                        | x                     | y |              | x                      | y    | x                        | y   |                     |                 |                 |                     |                     |
|                                      |               |         |        |   |        |                    |                        |                       |   |              |                        |      |                          |     |                     |                 |                 |                     |                     |
| Kebutuhan Tiang Pancang (f'c 25 MPa) |               |         |        |   |        |                    |                        |                       |   |              |                        |      |                          |     |                     |                 |                 |                     |                     |
| 14                                   | 273           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1063                | 283,07          | 113,38          | 41,85               | 104,31              |
| 37                                   | 297           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 615,5               | 210,92          | 81,26           | 24,23               | 63,65               |
| 21                                   | 313           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 985,4               | 296,41          | 125,40          | 64,72               | 166,84              |
| 40                                   | 782           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 46,81               | 14,29           | 9,56            | 16,81               | 62,59               |
| 41                                   | 809           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 58,43               | 12,90           | 4,84            | 26,42               | 77,99               |
| 38                                   | 9             | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1214                | 430,80          | 137,61          | 42,25               | 132,01              |
| 35                                   | 49            | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1341                | 385,80          | 140,34          | 44,21               | 117,46              |
| 26                                   | 73            | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1327                | 369,90          | 138,84          | 43,23               | 112,65              |
| 23                                   | 81            | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1281                | 345,31          | 139,93          | 43,94               | 104,58              |
| 27                                   | 105           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1274                | 331,77          | 136,91          | 41,49               | 100,78              |
| 4                                    | 113           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1261                | 305,50          | 136,68          | 41,42               | 93,24               |
| 17                                   | 137           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1267                | 317,71          | 139,54          | 43,70               | 96,68               |
| 25                                   | 145           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1272                | 324,02          | 139,15          | 43,47               | 98,60               |
| 10                                   | 169           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1246                | 312,02          | 135,99          | 40,92               | 94,69               |
| 8                                    | 177           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1410                | 329,67          | 137,95          | 42,69               | 102,50              |
| 33                                   | 201           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1282                | 337,33          | 138,82          | 43,36               | 103,09              |
| 6                                    | 217           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 991,3               | 340,17          | 126,72          | 38,77               | 100,06              |

| No. | Titik Pondasi | Pilecap | b (mm) | x | h (mm) | Tebal Pilecap (mm) | Diameter tiang, D (mm) | Jumlah baris tiang, n |   | Jumlah Tiang | Jarak antar tiang (mm) |      | Jarak tiang ke tepi (mm) |     | Gaya Tekan, Pu (kN) | Momen, Mu (kNm) | Momen, Mu (kNm) | Gaya Geser, Vu (kN) | Gaya Geser, Vu (kN) |
|-----|---------------|---------|--------|---|--------|--------------------|------------------------|-----------------------|---|--------------|------------------------|------|--------------------------|-----|---------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|
|     |               |         |        |   |        |                    |                        | x                     | y |              | x                      | y    | x                        | y   |                     |                 |                 |                     |                     |
| 28  | 241           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1183                | 372,34          | 107,72          | 50,92               | 217,43              |
| 2   | 249           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1219                | 322,62          | 100,58          | 37,20               | 150,96              |
| 36  | 265           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1594                | 281,81          | 89,46           | 30,38               | 96,98               |
| 11  | 281           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1537                | 287,43          | 111,98          | 38,22               | 118,44              |
| 24  | 289           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1531                | 229,48          | 91,84           | 37,02               | 83,07               |
| 7   | 305           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1554                | 230,95          | 106,13          | 160,38              | 168,16              |
| 31  | 321           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1566                | 332,78          | 115,45          | 47,07               | 203,54              |
| 22  | 33            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1826                | 473,20          | 106,62          | 38,27               | 188,57              |
| 1   | 57            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1927                | 397,10          | 107,98          | 33,99               | 126,44              |
| 29  | 65            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1930                | 381,85          | 100,87          | 30,44               | 122,22              |
| 15  | 89            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1929                | 358,42          | 111,44          | 34,36               | 115,34              |
| 13  | 97            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1930                | 343,81          | 105,52          | 31,44               | 110,61              |
| 19  | 121           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1893                | 314,93          | 105,42          | 31,40               | 100,83              |
| 34  | 129           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1890                | 327,86          | 110,87          | 34,10               | 104,91              |
| 16  | 153           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1922                | 335,38          | 110,50          | 33,91               | 107,86              |
| 30  | 161           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1914                | 323,27          | 105,07          | 31,10               | 103,87              |
| 12  | 185           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 2056                | 337,63          | 109,87          | 35,47               | 108,60              |
| 20  | 193           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1916                | 349,21          | 110,44          | 34,03               | 112,78              |
| 9   | 209           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1703                | 389,13          | 106,99          | 38,82               | 139,43              |
| 32  | 233           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1958                | 376,12          | 128,26          | 38,32               | 127,08              |
| 5   | 257           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1904                | 294,43          | 112,85          | 111,56              | 181,35              |
| 3   | 25            | PC4     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 4            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 2112                | 443,10          | 112,26          | 38,49               | 144,07              |
| 39  | 41            | PC4     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 4            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 2290                | 446,11          | 133,24          | 38,59               | 148,54              |

| No.                                  | Titik Pondasi | Pilecap | b (mm) | x | h (mm) | Tebal Pilecap (mm) | Diameter tiang, D (mm) | Jumlah baris tiang, n |   | Jumlah Tiang | Jarak antar tiang (mm) |      | Jarak tiang ke tepi (mm) |     | Gaya Tekan, Pu (kN) | Momen, Mu (kNm) | Momen, Mu (kNm) | Gaya Geser, Vu (kN) | Gaya Geser, Vu (kN) |
|--------------------------------------|---------------|---------|--------|---|--------|--------------------|------------------------|-----------------------|---|--------------|------------------------|------|--------------------------|-----|---------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|
|                                      |               |         |        |   |        |                    |                        | x                     | y |              | x                      | y    | x                        | y   |                     |                 |                 |                     |                     |
| 18                                   | 225           | PC4     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 4            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 2258                | 360,98          | 121,65          | 48,38               | 115,18              |
| Kebutuhan Tiang Pancang (f'c 30 MPa) |               |         |        |   |        |                    |                        |                       |   |              |                        |      |                          |     |                     |                 |                 |                     |                     |
| 11                                   | 9             | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1099,0489           | 383,99          | 138,97          | 40,46               | 115,77              |
| 2                                    | 217           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 936,8821            | 315,48          | 130,25          | 37,98               | 91,92               |
| 10                                   | 249           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1007,4308           | 256,31          | 75,16           | 27,69               | 127,93              |
| 5                                    | 273           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 917,8821            | 216,90          | 86,39           | 32,04               | 81,63               |
| 13                                   | 297           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 523,752             | 166,95          | 58,35           | 15,81               | 50,43               |
| 9                                    | 313           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 804,3051            | 243,50          | 94,45           | 49,19               | 143,41              |
| 36                                   | 782           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 42,9186             | 8,97            | 8,32            | 17,57               | 51,97               |
| 39                                   | 809           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 49,8503             | 8,13            | 5,09            | 26,11               | 67,17               |
| 17                                   | 49            | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1260,7437           | 347,09          | 139,87          | 40,71               | 105,16              |
| 31                                   | 73            | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1244,1795           | 331,77          | 141,58          | 40,43               | 100,68              |
| 20                                   | 81            | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1213,0715           | 311,69          | 139,66          | 40,59               | 94,27               |
| 29                                   | 105           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1204,9924           | 298,67          | 140,04          | 39,07               | 90,70               |
| 14                                   | 113           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1194,6621           | 276,39          | 139,78          | 38,94               | 84,30               |
| 16                                   | 137           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1200,9479           | 287,93          | 139,32          | 40,38               | 87,52               |
| 32                                   | 145           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1205,5194           | 296,27          | 138,97          | 40,17               | 89,89               |
| 19                                   | 169           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1185,4705           | 285,37          | 139,07          | 38,42               | 86,42               |
| 27                                   | 177           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1338,0601           | 303,88          | 141,41          | 40,54               | 93,97               |
| 21                                   | 201           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1218,5932           | 310,71          | 138,61          | 39,99               | 94,58               |
| 15                                   | 209           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1641,2965           | 358,40          | 108,73          | 37,96               | 126,43              |
| 1                                    | 241           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1010,4173           | 298,60          | 80,66           | 37,85               | 181,08              |

| No. | Titik Pondasi | Pilecap | b (mm) | x | h (mm) | Tebal Pilecap (mm) | Diameter tiang, D (mm) | Jumlah baris tiang, n |   | Jumlah Tiang | Jarak antar tiang (mm) |      | Jarak tiang ke tepi (mm) |     | Gaya Tekan, Pu (kN) | Momen, Mu (kNm) | Momen, Mu (kNm) | Gaya Geser, Vu (kN) | Gaya Geser, Vu (kN) |
|-----|---------------|---------|--------|---|--------|--------------------|------------------------|-----------------------|---|--------------|------------------------|------|--------------------------|-----|---------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|
|     |               |         |        |   |        |                    |                        | x                     | y |              | x                      | y    | x                        | y   |                     |                 |                 |                     |                     |
| 24  | 257           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1672,5256           | 223,36          | 83,10           | 94,63               | 142,56              |
| 25  | 265           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1456,2102           | 214,81          | 66,25           | 21,52               | 74,03               |
| 7   | 281           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1444,2874           | 221,08          | 84,77           | 28,56               | 91,24               |
| 3   | 289           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1408,0107           | 185,15          | 66,38           | 25,80               | 68,81               |
| 12  | 305           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1411,2712           | 179,95          | 80,94           | 139,61              | 148,05              |
| 4   | 321           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1508,9058           | 276,29          | 85,56           | 34,36               | 174,81              |
| 23  | 25            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1955,184            | 395,99          | 111,78          | 35,45               | 126,62              |
| 28  | 33            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1703,5068           | 425,46          | 108,57          | 37,26               | 170,43              |
| 35  | 57            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1898,0419           | 356,44          | 108,61          | 31,68               | 112,18              |
| 33  | 65            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1893,9029           | 341,47          | 102,72          | 28,27               | 108,05              |
| 37  | 89            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1882,5657           | 322,04          | 111,56          | 31,74               | 102,35              |
| 30  | 97            | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1885,0733           | 308,12          | 106,66          | 29,05               | 97,99               |
| 18  | 121           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1850,6759           | 283,72          | 106,58          | 29,03               | 89,82               |
| 22  | 129           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1847,7958           | 295,92          | 110,98          | 31,47               | 93,61               |
| 34  | 153           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1877,2311           | 305,44          | 110,62          | 31,27               | 96,96               |
| 40  | 161           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1869,2584           | 294,42          | 106,15          | 28,66               | 93,42               |
| 41  | 185           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 2024,2109           | 309,88          | 111,61          | 33,63               | 98,06               |
| 38  | 193           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1876,5704           | 320,51          | 110,88          | 31,62               | 102,17              |
| 26  | 225           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 2148,7914           | 334,08          | 120,69          | 45,17               | 105,60              |
| 6   | 233           | PC3     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1836,2565           | 346,30          | 129,43          | 36,57               | 115,87              |
| 8   | 41            | PC4     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 4            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 2099,3077           | 399,35          | 137,86          | 37,56               | 131,77              |

| No.                                  | Titik Pondasi | Pilecap | b (mm) | x | h (mm) | Tebal Pilecap (mm) | Diameter tiang, D (mm) | Jumlah baris tiang, n |   | Jumlah Tiang | Jarak antar tiang (mm) |      | Jarak tiang ke tepi (mm) |     | Gaya Tekan, Pu (kN) | Momen, Mu (kNm) | Momen, Mu (kNm) | Gaya Geser, Vu (kN) | Gaya Geser, Vu (kN) |
|--------------------------------------|---------------|---------|--------|---|--------|--------------------|------------------------|-----------------------|---|--------------|------------------------|------|--------------------------|-----|---------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|
|                                      |               |         |        |   |        |                    |                        | x                     | y |              | x                      | y    | x                        | y   |                     |                 |                 |                     |                     |
|                                      |               |         |        |   |        |                    |                        |                       |   |              |                        |      |                          |     |                     |                 |                 |                     |                     |
| Kebutuhan Tiang Pancang (f'c 35 MPa) |               |         |        |   |        |                    |                        |                       |   |              |                        |      |                          |     |                     |                 |                 |                     |                     |
| 33                                   | 9             | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 926,5829            | 338,81          | 119,32          | 34,91               | 97,76               |
| 30                                   | 217           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 852,8393            | 298,08          | 140,28          | 39,70               | 83,08               |
| 34                                   | 249           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1035,9272           | 209,59          | 48,98           | 22,41               | 117,73              |
| 36                                   | 273           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 862,4118            | 172,17          | 70,60           | 30,40               | 72,43               |
| 39                                   | 297           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 523,9701            | 138,33          | 45,13           | 14,44               | 44,04               |
| 37                                   | 313           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 787,2872            | 211,29          | 60,08           | 36,23               | 132,03              |
| 40                                   | 782           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 42,342              | 10,88           | 8,55            | 19,79               | 58,63               |
| 41                                   | 809           | PC1     | 1000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 1                     | 1 | 1            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 50,7531             | 10,32           | 4,91            | 24,76               | 68,62               |
| 13                                   | 33            | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1631,1017           | 377,21          | 123,79          | 43,86               | 149,74              |
| 17                                   | 49            | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1180,3874           | 311,63          | 119,38          | 34,43               | 92,08               |
| 25                                   | 73            | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1159,8103           | 295,96          | 151,83          | 42,87               | 87,72               |
| 19                                   | 81            | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1134,7904           | 282,03          | 119,18          | 34,30               | 82,92               |
| 21                                   | 105           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1128,8524           | 268,17          | 149,85          | 41,15               | 79,41               |
| 22                                   | 113           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1123,6896           | 254,16          | 149,44          | 40,97               | 75,19               |
| 20                                   | 137           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1130,9184           | 267,14          | 118,80          | 34,06               | 78,50               |
| 18                                   | 145           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1139,9358           | 279,92          | 118,49          | 33,88               | 81,86               |
| 24                                   | 169           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1115,4402           | 267,01          | 148,63          | 40,42               | 78,16               |
| 14                                   | 177           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1257,9863           | 286,59          | 150,67          | 42,32               | 85,42               |
| 23                                   | 201           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1144,8936           | 296,08          | 118,06          | 33,65               | 86,57               |
| 26                                   | 209           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1484,3848           | 337,42          | 115,39          | 38,05               | 111,63              |
| 35                                   | 233           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1711,3714           | 328,95          | 109,94          | 31,33               | 104,89              |
| 28                                   | 241           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1003,2579           | 245,06          | 53,35           | 30,33               | 163,77              |

| No. | Titik Pondasi | Pilecap | b (mm) | x | h (mm) | Tebal Pilecap (mm) | Diameter tiang, D (mm) | Jumlah baris tiang, n |   | Jumlah Tiang | Jarak antar tiang (mm) |      | Jarak tiang ke tepi (mm) |     | Gaya Tekan, Pu (kN) | Momen, Mu (kNm) | Momen, Mu (kNm) | Gaya Geser, Vu (kN) | Gaya Geser, Vu (kN) |
|-----|---------------|---------|--------|---|--------|--------------------|------------------------|-----------------------|---|--------------|------------------------|------|--------------------------|-----|---------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|
|     |               |         |        |   |        |                    |                        | x                     | y |              | x                      | y    | x                        | y   |                     |                 |                 |                     |                     |
| 16  | 257           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1586,4744           | 176,95          | 59,79           | 97,35               | 127,65              |
| 15  | 265           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1399,1741           | 168,16          | 51,65           | 16,57               | 62,77               |
| 32  | 281           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1274,3493           | 161,50          | 68,31           | 25,87               | 65,33               |
| 27  | 289           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1367,3023           | 148,66          | 58,57           | 27,98               | 54,22               |
| 29  | 305           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1286,479            | 155,35          | 55,75           | 125,63              | 135,34              |
| 31  | 321           | PC2     | 2000   | x | 1000   | 800                | 400                    | 2                     | 1 | 2            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1342,5654           | 240,44          | 54,37           | 25,94               | 162,34              |
| 11  | 25            | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 2040,3475           | 347,84          | 111,06          | 37,56               | 105,28              |
| 38  | 41            | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1802,3458           | 351,03          | 147,46          | 39,43               | 110,73              |
| 5   | 57            | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1826,3521           | 315,87          | 99,77           | 28,03               | 94,27               |
| 2   | 65            | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1842,2861           | 301,14          | 110,57          | 29,93               | 90,75               |
| 4   | 89            | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1854,2045           | 289,02          | 101,72          | 28,32               | 87,67               |
| 3   | 97            | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1854,6599           | 274,20          | 114,51          | 30,62               | 83,36               |
| 9   | 121           | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1815,6171           | 258,71          | 114,33          | 30,55               | 77,94               |
| 10  | 129           | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1812,4012           | 272,36          | 101,25          | 28,11               | 81,81               |
| 6   | 153           | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1846,9019           | 286,44          | 101,06          | 28,01               | 86,21               |
| 7   | 161           | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1838,5273           | 273,48          | 113,99          | 30,27               | 82,51               |
| 1   | 185           | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1973,9131           | 289,95          | 118,41          | 34,29               | 86,82               |
| 8   | 193           | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 1833,807            | 303,18          | 101,03          | 28,08               | 91,38               |
| 12  | 225           | PC3     | 2000   | x | 2000   | 800                | 400                    | 2                     | 2 | 3            | 1000                   | 1000 | 500                      | 500 | 2021,5936           | 310,64          | 109,97          | 40,48               | 88,58               |

#### 4.7.2 Perencanaan *Pilecap*

*Pile cap* dilakukan untuk mendistribusikan beban yang diterima kolom ke kelompok tiang pancang secara merata. Dimensi dan penulangan *pile cap* ditentukan berdasarkan kombinasi gaya dalam yang paling kritis dengan mempertimbangkan kapasitas geser dan lentur elemen. Perencanaan mencakup pemeriksaan kuat geser satu arah, kuat geser dua arah (*punching shear*), dan penulangan lentur dua arah.

#### Contoh Perhitungan – PC1 ( $f'_c$ 25 MPa)

##### 1. Data Perencanaan

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| Panjang sumbu x, b             | = 1.000 mm |
| Panjang sumbu y, h             | = 1.000 mm |
| Tebal <i>pile cap</i> , t      | = 800 mm   |
| Diameter tulangan, $d_s$       | = 19 mm    |
| Selimut beton, cc              | = 50 mm    |
| Kuat tekan beton, $f'_c$       | = 25 MPa   |
| Kuat leleh tulangan, $f_y$     | = 420 MPa  |
| Spasi tulangan, s              | = 150 mm   |
| Jumlah tiang dalam kelompok, n | = 1        |

##### 2. Tinggi Efektif Penampang

Dihitung terpisah untuk dua arah (lapis luar dan lapis dalam) dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 d_x &= t - c_c - \frac{d_s}{2} \\
 &= 800 - 50 - \frac{19}{2} \\
 &= 740,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_y &= t - c_c - d_s - \frac{d_s}{2} \\
 &= 800 - 50 - 19 - \frac{19}{2} \\
 &= 721,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

### 3. Penulangan Lentur *Pile cap*

Momen lentur *pile cap* diperoleh dari reaksi tiang terhadap penampang kritis di muka kolom. Luas tulangan minimum (SNI 2847-2019 Pasal 7.6.1.1 dan 8.6.1.1), berlaku kedua arah dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 A_{s,min1} &= \frac{0,0018 \times 420}{f_y} b t \\
 &= \frac{0,0018 \times 420}{420} \times 1.000 \times 800 \\
 &= 1.440 \text{ mm}^2 \\
 A_{s,min2} &= 0,0014 b t \\
 &= 0,0014 \times 1.000 \times 800 \\
 &= 1.120 \text{ mm}^2 \\
 A_{s,min} &= \max(1.440 ; 1.120) = 1.440 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

#### a. Lentur Arah X

Momen terfaktor  $M_u = 296,4115 \text{ kNm}$ . Luas tulangan dengan  $d_x = 740,5 \text{ mm}$  (SNI 2847-2019 Pers. 66, tanpa faktor  $\phi$  pada momen karena momen sudah dalam kondisi nominal) dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 A_{s,hitung} &= \frac{0,85 f'_c b}{f_y} \left( d_x - \sqrt{d_x^2 - \frac{2 M_u}{0,85 f'_c b}} \right) \\
 &= \frac{0,85 \times 25 \times 1.000}{420} \left( 740,5 - \sqrt{740,5^2 - \frac{2 \times 296,4111 \times 10^6}{0,85 \times 25 \times 1.000}} \right) \\
 &= 965,502 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Luas tulangan perlu:  $A_s, \text{ perlu} = \max(1.440 ; 965,50) = 1.440 \text{ mm}^2$  (tulangan minimum menentukan). Tulangan terpasang D19-150:

$$\begin{aligned} A_{s,pasang} &= \frac{b}{s} \cdot \frac{1}{4} \pi d_s^2 \\ &= \frac{1.000}{150} \times \frac{1}{4} \pi \times 19^2 \\ &= 1.890,192 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Kontrol:

$A_{s,\text{perlu}}/A_{s,\text{pasang}} = 1.440/1.890,19 = 0,762 < 1 \rightarrow \text{MEMENUHI (D19-150)}.$

#### b. Lentur Arah Y

Momen terfaktor  $M_u = 125,3974 \text{ kNm}$  dengan  $d_y = 721,5 \text{ mm}$ :

$$\begin{aligned} A_{s,\text{hitung}} &= \frac{0,85 \times 25 \times 1.000}{420} \left( 721,5 - \sqrt{721,5^2 - \frac{2 \times 125,397 \times 10^6}{0,85 \times 25 \times 1.000}} \right) \\ &= 416,184 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas tulangan perlu:  $A_s, \text{ perlu} = \max(1.440 ; 416,18) = 1.440 \text{ mm}^2.$

Kontrol:

$1.440/1.890,19 = 0,762 < 1 \rightarrow \text{MEMENUHI (D19-150)}.$

### 4. Kuat Geser *Pile cap*

#### a. Geser Satu Arah -Arah X (SNI 2847-2019 Pasal 22.5)

Penampang kritis ditinjau sejarak  $d$  dari muka kolom. Jarak bidang kritis terhadap sisi luar *pile cap* = 0,350 m, lebih kecil daripada panjang kantilever *pile cap*, sehingga bidang kritis berada di luar *pile cap* dan **tidak diperlukan tinjauan geser satu arah arah X** ( $V_{ux} = 0$ ).

### b. Geser Satu Arah -Arah Y

Bidang kritis berada di dalam *pile cap* sehingga tinjauan diperlukan. Gaya geser terfaktor diperoleh dari reaksi tiang dikurangi berat sendiri *pile cap* dan tanah pada zona kritis dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_{uy} &= \sum P_{uy} - W_1 - W_2 \\ &= 1.108,905 - 128,640 - 0 \\ &= 980,265 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kuat geser beton diambil nilai terkecil dari tiga persamaan (SNI 2847-2019 Tabel 22.5.5.1), dengan  $b = 2.000 \text{ mm}$  (lebar bidang geser),  $d = 700 \text{ mm}$ ,  $\beta_c = 1$ :

$$\begin{aligned} V_{c1} &= \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \frac{\sqrt{f'_c}}{6} b d \times 10^{-3} \\ &= \left(1 + \frac{2}{1}\right) \frac{\sqrt{25}}{6} \times 2.000 \times 700 \times 10^{-3} \\ &= 3.500,000 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{c2} &= \left(\frac{\alpha_s d}{b} + 2\right) \frac{\sqrt{f'_c}}{12} b d \times 10^{-3} \\ &= \left(\frac{40 \times 700}{2.000} + 2\right) \frac{\sqrt{25}}{12} \times 2.000 \times 700 \times 10^{-3} \\ &= 9.333,333 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{c3} &= \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} b d \times 10^{-3} \\ &= \frac{1}{3} \sqrt{25} \times 2.000 \times 700 \times 10^{-3} \\ &= 2.333,333 \text{ kN} \end{aligned}$$

Diambil  $V_c = \min(3.500,000 ; 9.333,333 ; 2.333,333) = 2.333,333 \text{ kN}$ . Dengan  $\phi = 0,75$ :

$$\phi V_c = 0,75 \times 2.333,333 = 1.750,00 \text{ kN} \geq V_{uy} = 980,265 \text{ kN} \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

**c. Geser Dua Arah / *Punching*** (SNI 2847-2019 Pasal 22.6).

Penampang kritis berbentuk keliling sejarak  $d/2$  dari muka kolom, menghasilkan bidang geser pons  $b_p = 600 + d = 1.300$  mm pada kedua arah, dengan luas bidang  $A_p = b_o \times d$  dan keliling  $b_o = 4 \times 1.300 = 5.200$  mm. Tegangan geser pons izin diambil nilai terkecil dari tiga persamaan (SNI 2847-2019 Tabel 22.6.5.2), dengan  $\beta_c = 1$  (rasio sisi kolom) dan  $\alpha_s = 40$ :

$$\begin{aligned} f_{p1} &= \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \frac{\sqrt{f'_c}}{6} \\ &= \left(1 + \frac{2}{1}\right) \frac{\sqrt{25}}{6} \\ &= 2,500 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{p2} &= \left(\frac{\alpha_s d}{b_o} + 2\right) \frac{\sqrt{f'_c}}{12} \\ &= \left(\frac{40 \times 700}{5.200} + 2\right) \frac{\sqrt{25}}{12} \\ &= 3,077 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{p3} &= \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} \\ &= \frac{1}{3} \sqrt{25} \\ &= 1,667 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Diambil  $f_p = \min(2,500 ; 3,077 ; 1,667) = 1,667$  MPa. Kuat geser pons nominal dengan  $A_p = 3,640$  m<sup>2</sup> dan  $\phi = 0,75$ :

$$\phi V_{np} = \phi A_p f_p \times 10^3 = 0,75 \times 3,640 \times 1,667 \times 10^3 = 4.550,000 \text{ kN}$$

$$\phi V_{np} = 4.550,000 \text{ kN} \geq P_{uk} = 1.617,352 \text{ kN} \rightarrow \text{MEMENUHI}$$

*Pile cap* PC1 dengan tebal 800 mm memenuhi seluruh kontrol geser, dengan rasio terbesar 0,560 pada geser satu arah arah Y.

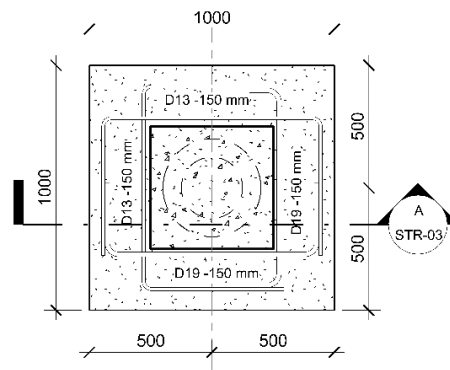
Rekapitulasi penulangan lentur *pile cap* disajikan pada **Tabel 4.49** sebagai berikut:

**Tabel 4.49** Rekapitulasi Penulangan Lentur *Pile cap*

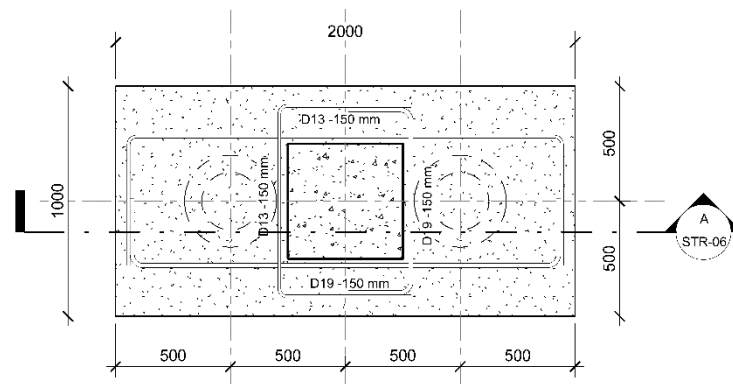
| <i>Pilecap</i>                                | Panjang sumbu<br>x, b (mm) | x | Panjang sumbu<br>y, h (mm) | tebal plat,<br>t (mm) | Jenis<br>Tulangan | Moment<br>Ultimate<br>(kNm) | Spasi<br>tulangan, s<br>(mm) | As min 1<br>(mm2)<br>SNI 2847-<br>2019 7.6.1.1 | As min 2<br>(mm2)<br>SNI 2847-<br>2019 8.6.1.1 | As<br>Hitung<br>(mm2) | Tulangan | As<br>Tulangan<br>(mm2) | Cek rasio<br>As Tulangan <1<br>(aman) |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|----------|-------------------------|---------------------------------------|
| Penulangan Lentur <i>Pilecap</i> (f'c 25 MPa) |                            |   |                            |                       |                   |                             |                              |                                                |                                                |                       |          |                         |                                       |
| PC1                                           | 1000                       | x | 1000                       | 800                   | sumbu x           | 296,41                      | 150                          | 1440,00                                        | 1120,00                                        | 965,50                | D19-150  | 1890,19                 | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 125,40                      | 150                          | 1440,00                                        | 1120,00                                        | 416,18                | D19-150  | 1890,19                 | 0,76                                  |
| PC2                                           | 1000                       | x | 2000                       | 800                   | sumbu x           | 430,80                      | 150                          | 1440,00                                        | 1120,00                                        | 1411,76               | D19-150  | 1890,19                 | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 140,34                      | 150                          | 2880,00                                        | 2240,00                                        | 464,61                | D19-150  | 3780,38                 | 0,76                                  |
| PC3                                           | 2000                       | x | 2000                       | 800                   | sumbu x           | 473,20                      | 150                          | 2880,00                                        | 2240,00                                        | 1537,26               | D19-150  | 3780,38                 | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 128,26                      | 150                          | 2880,00                                        | 2240,00                                        | 424,51                | D19-150  | 3780,38                 | 0,76                                  |
| PC4                                           | 2000                       | x | 2000                       | 800                   | sumbu x           | 446,11                      | 150                          | 2880,00                                        | 2240,00                                        | 1448,39               | D19-150  | 3780,38                 | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 133,24                      | 150                          | 2880,00                                        | 2240,00                                        | 441,03                | D19-150  | 3780,38                 | 0,76                                  |
| Penulangan Lentur <i>Pilecap</i> (f'c 25 MPa) |                            |   |                            |                       |                   |                             |                              |                                                |                                                |                       |          |                         |                                       |
| PC1                                           | 1000                       | x | 1000                       | 800                   | sumbu x           | 383,99                      | 150                          | 1440,00                                        | 1120,00                                        | 1252,08               | D19-150  | 1890,19                 | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 138,97                      | 150                          | 1440,00                                        | 1120,00                                        | 461,04                | D19-150  | 1890,19                 | 0,76                                  |
| PC2                                           | 1000                       | x | 2000                       | 800                   | sumbu x           | 358,40                      | 150                          | 1440,00                                        | 1120,00                                        | 1167,55               | D19-150  | 1890,19                 | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 141,58                      | 150                          | 2880,00                                        | 2240,00                                        | 468,45                | D19-150  | 3780,38                 | 0,76                                  |
| PC3                                           | 2000                       | x | 2000                       | 800                   | sumbu x           | 425,46                      | 150                          | 2880,00                                        | 2240,00                                        | 1378,57               | D19-150  | 3780,38                 | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 129,43                      | 150                          | 2880,00                                        | 2240,00                                        | 428,16                | D19-150  | 3780,38                 | 0,76                                  |
| PC4                                           | 2000                       | x | 2000                       | 800                   | sumbu x           | 399,35                      | 150                          | 2880,00                                        | 2240,00                                        | 1293,36               | D19-150  | 3780,38                 | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 137,86                      | 150                          | 2880,00                                        | 2240,00                                        | 456,12                | D19-150  | 3780,38                 | 0,76                                  |

| <i>Pilecap</i>                                | Panjang sumbu<br>x, b (mm) | x | Panjang sumbu<br>y, h (mm) | tebal plat,<br>t (mm) | Jenis<br>Tulangan | Moment<br>Ultimate<br>(kNm) | Spasi<br>tulangan, s<br>(mm) | As min 1<br>(mm <sup>2</sup> )<br>SNI 2847-<br>2019 7.6.1.1 | As min 2<br>(mm <sup>2</sup> )<br>SNI 2847-<br>2019 8.6.1.1 | As<br>Hitung<br>(mm <sup>2</sup> ) | Tulangan | As<br>Tulangan<br>(mm <sup>2</sup> ) | Cek rasio<br>As Tulangan <1<br>(aman) |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Penulangan Lentur <i>Pilecap</i> (f'c 25 MPa) |                            |   |                            |                       |                   |                             |                              |                                                             |                                                             |                                    |          |                                      |                                       |
| PC1                                           | 1000                       | x | 1000                       | 800                   | sumbu x           | 338,81                      | 150                          | 1440,00                                                     | 1120,00                                                     | 1100,93                            | D19-150  | 1890,19                              | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 140,28                      | 150                          | 1440,00                                                     | 1120,00                                                     | 465,03                             | D19-150  | 1890,19                              | 0,76                                  |
| PC2                                           | 1000                       | x | 2000                       | 800                   | sumbu x           | 377,21                      | 150                          | 1440,00                                                     | 1120,00                                                     | 1227,22                            | D19-150  | 1890,19                              | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 151,83                      | 150                          | 2880,00                                                     | 2240,00                                                     | 502,29                             | D19-150  | 3780,38                              | 0,76                                  |
| PC3                                           | 2000                       | x | 2000                       | 800                   | sumbu x           | 351,03                      | 150                          | 2880,00                                                     | 2240,00                                                     | 1134,81                            | D19-150  | 3780,38                              | 0,76                                  |
|                                               |                            |   |                            |                       | sumbu y           | 147,46                      | 150                          | 2880,00                                                     | 2240,00                                                     | 487,79                             | D19-150  | 3780,38                              | 0,76                                  |

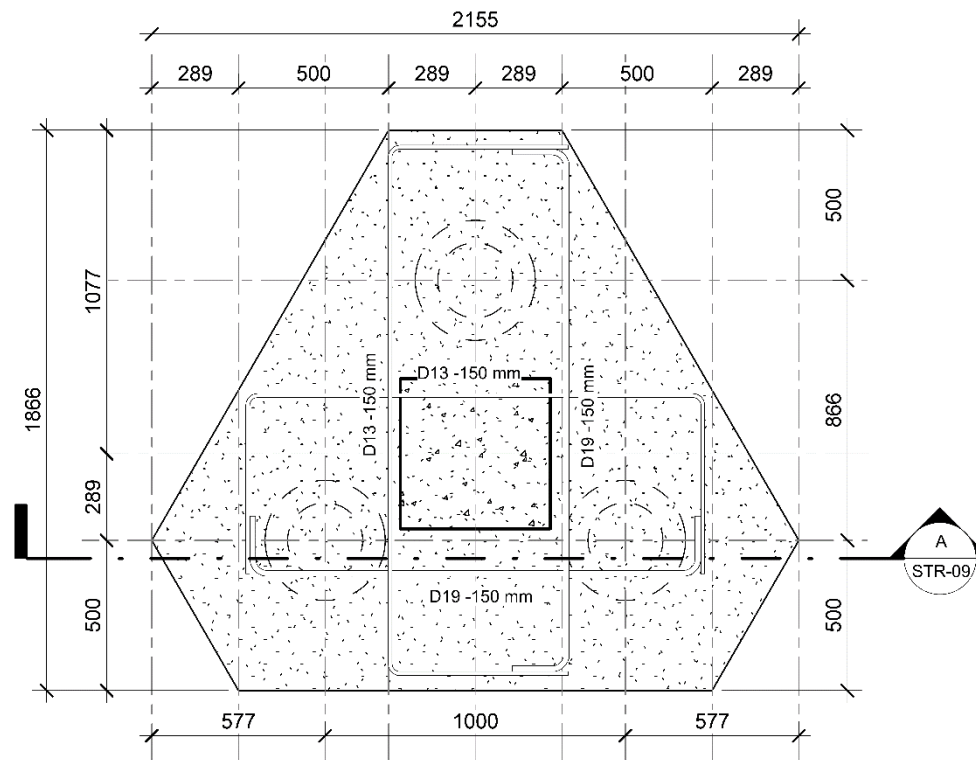
Detail penulangan *pilecap* untuk setiap tipe disajikan pada **Gambar 4.18–4.22** berikut:



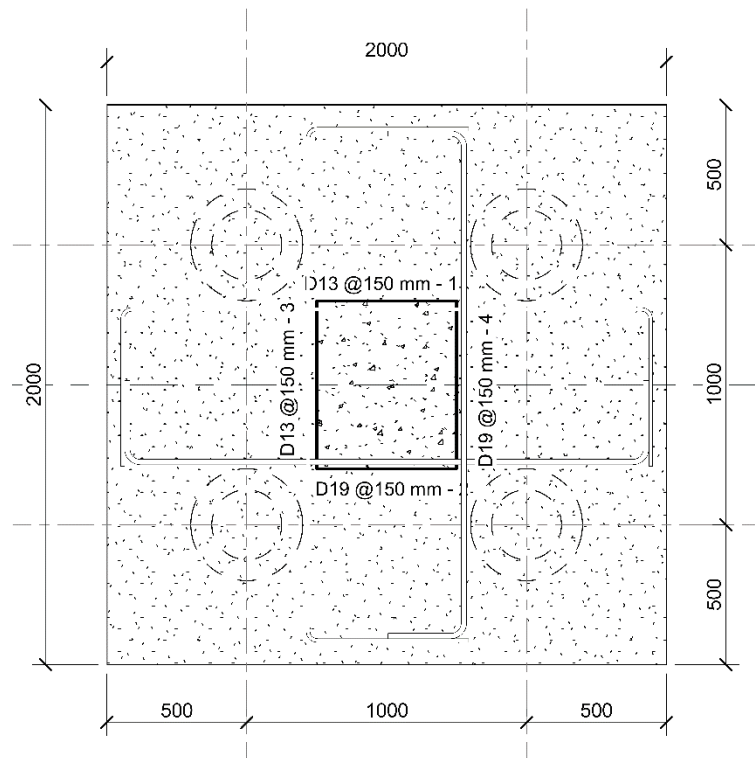
**Gambar 4.18** Detail Penulangan Pilecap PC1 (1 Tiang)



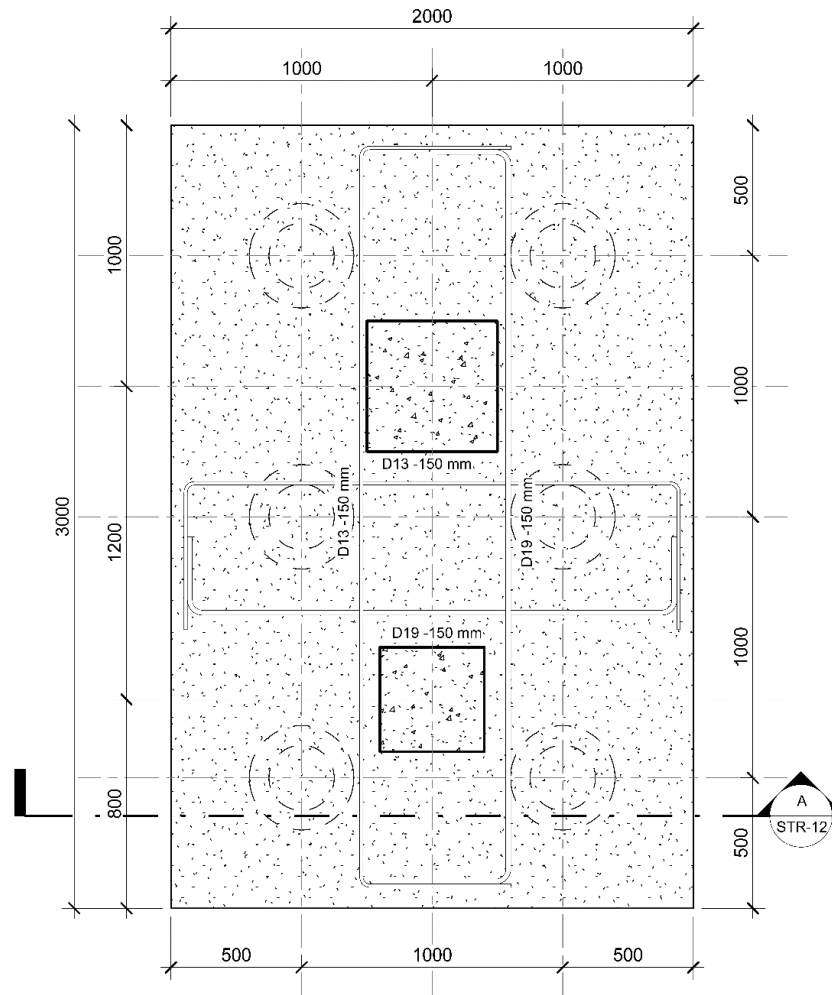
**Gambar 4.19** Detail Penulangan Pilecap PC2 (2 Tiang)



**Gambar 4.20** Detail Penulangan Pilecap PC3 (3 Tiang)



**Gambar 4.21** Detail Penulangan Pilecap PC4 (4 Tiang)



**Gambar 4.22** Detail Penulangan Pilecap PC6 (6 Tiang)

### 4.7.3 Perencanaan *Tie beam*

*Tie beam* (balok pengikat) direncanakan untuk menghubungkan *pile cap* sehingga mampu menahan gaya horizontal akibat gempa sesuai Pasal 7.14.6.2 SNI 1726-2019, sekaligus mengurangi potensi penurunan diferensial (*differential settlement*) antar pondasi.

#### Contoh Perhitungan – TB1 ( $f'_c$ 25 MPa)

##### 1. Data Perencanaan

|                                                             |                 |
|-------------------------------------------------------------|-----------------|
| Lebar <i>tie beam</i> , $b$                                 | = 300 mm        |
| Tinggi <i>tie beam</i> , $h$                                | = 500 mm        |
| Panjang bersih, $L_n$                                       | = 5.500 mm      |
| Diameter tulangan longitudinal, $d_b$                       | = 19 mm         |
| Diameter tulangan sengkang, $d_s$                           | = 10 mm         |
| Selimut beton, $c_c$                                        | = 50 mm         |
| Kuat tekan beton, $f'_c$                                    | = 25 MPa        |
| Kuat leleh tulangan, $f_y$                                  | = 420 MPa       |
| Aksial gravitasi kolom, $P_g$                               | = 2.851,5826 kN |
| Parameter percepatan respons spektral periode pendek, $SDS$ | = 0,6763        |
| Faktor reduksi lentur, $\phi$                               | = 0,90          |

##### 2. Tinggi Efektif Penampang:

Tinggi efekti penampang dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 d &= h - c_c - d_s - \frac{d_b}{2} \\
 &= 500 - 50 - 10 - \frac{19}{2} \\
 &= 430,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

### 3. Gaya Aksial *Tie beam* (SNI 1726-2019 Pasal 7.14.6.2)

*Tie beam* memikul 10% dari beban aksial kolom dikali SDS dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_u &= 0,10 \times S_{DS} \times P_g \\ &= 0,10 \times 0,6763 \times 2.851,5826 \\ &= 192,850 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kontrol terhadap kapasitas aksial penampang:  $P_u = 192,85 \text{ kN}$  dibandingkan  $0,1 \cdot A_g \cdot f'_c = 0,1 \times 300 \times 500 \times 25 \times 10^{-3} = 375 \text{ kN}$ . Karena  $P_u < 375 \text{ kN}$ , *Tie beam* tidak diperhitungkan sebagai komponen tekan dominan, melainkan didesain sebagai balok lentur biasa.

### 4. Momen Akibat Beda Penurunan

Momen akibat *differential settlement*  $M_{diff} = 0$ , karena tidak terdapat data beda penurunan ( $\Delta = 0$ ). Momen terfaktor diambil dari momen beban mati:  $M_u = 40,329 \text{ kNm}$  (tumpuan).

### 5. Penulangan Lentur *Tie beam*

Penulangan lentur *Tie beam* ditinjau pada dua kondisi: daerah tumpuan (momen negatif di muka *pile cap*) dan daerah lapangan (momen positif di tengah bentang). Luas tulangan minimum dan maksimum berlaku sama untuk kedua kondisi karena dimensi penampang identik.

#### Luas Tulangan Minimum (berlaku semua kondisi)

*Tie beam* menggunakan persamaan  $A_{s,min}$  spesifik (SNI 2847-2019 Pasal 9.6.1.2 dengan bentuk yang digunakan pada lembar perhitungan):

$$\begin{aligned} A_{s,min1} &= \frac{0,5 f'_c}{4 f_y} b d \\ &= \frac{0,5 \times 25}{4 \times 420} \times 300 \times 430,5 \\ &= 960,938 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{s,min2} &= \frac{1,4}{f_y} b d \\
 &= \frac{1,4}{420} \times 300 \times 430,5 \\
 &= 430,500 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$A_{s,min} = \max(960,938 ; 430,500) = 960,938 \text{ mm}^2$$

**Luas Tulangan Maksimum (berlaku semua kondisi):**

$$\begin{aligned}
 A_{s,max} &= 0,025 b d \\
 &= 0,025 \times 300 \times 430,5 \\
 &= 3.228,750 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

**a. Daerah Tumpuan (Momen Negatif)**

Momen terfaktor  $M_u = 40,329 \text{ kNm}$ . Luas tulangan hitung dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 A_{s,hitung} &= \frac{0,85 \times 25 \times 300}{420} \left( 430,5 - \sqrt{430,5^2 - \frac{2 \times 40,329 \times \frac{10^6}{0,9}}{0,85 \times 25 \times 300}} \right) \\
 &= 252,716 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Luas tulangan perlu (tulangan minimum menentukan):

$$\begin{aligned}
 A_{s,perlu} &= \max(A_{s,min} ; A_{s,hitung}) = \max(960,938 ; 252,716) \\
 &= 960,938 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$n = \frac{960,938}{\frac{1}{4}\pi \times 19^2} = 3,390 \approx 5 \text{ batang} \rightarrow 5D19$$

$$A_{s,pasang} = 5 \times \frac{1}{4}\pi \times 19^2 = 1417,644 \text{ mm}^2$$

Kontrol:

$$A_{s,min} < A_{s,pasang} < A_{s,max} \rightarrow 960,938 < 1417,644 < 3.228,750 \rightarrow$$

**MEMENUHI.**

### b. Daerah Lapangan (Momen Positif)

Momen terfaktor  $M_u = 0$  kNm (tidak terdapat momen lapangan dominan pada TB1 karena beban merata kecil dan tidak ada beda penurunan). Karena momen lapangan tidak menentukan, luas tulangan perlu dikendalikan sepenuhnya oleh tulangan minimum dihitung sebagai berikut:

$$A_{s,hitung} \approx 0 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,perlu} = \max(A_{s,min} ; A_{s,hitung}) = \max(960,938 ; 0) = 960,938 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{960,938}{\frac{1}{4}\pi \times 19^2} = 3,390 \approx 4 \text{ batang} \rightarrow 4D19$$

$$A_{s,pasang} = 4 \times \frac{1}{4}\pi \times 19^2 = 1.134,115 \text{ mm}^2$$

Kontrol:

$$A_{s,min} < A_{s,pasang} < A_{s,max} \rightarrow 960,938 < 1.134,115 < 3.228,750 \rightarrow$$

**MEMENUHI.**

**Rekapitulasi penulangan lentur TB1:** tumpuan 5D19 (atas) dan lapangan 5D19 (bawah), keduanya dikendalikan tulangan minimum  $A_{s,min} = 960,938 \text{ mm}^2$ .

### 6. Penulangan Geser *Tie beam*

Penulangan geser *Tie beam* ditinjau pada daerah tumpuan dan lapangan dengan prosedur yang sama seperti penulangan geser balok

Gaya geser terfaktor:  $V_u = 43,995$  kN (tumpuan) dan  $V_u = 21,998$  kN (lapangan).

**Kapasitas Geser Beton ( $V_c$ )** (SNI 2847-2019 Pasal 22.5.5.1), berlaku kedua daerah:

$$V_c = 0,17 \lambda \sqrt{f'_c} b d = 0,17 \times 1,0 \times \sqrt{25} \times 300 \times 430,5 \times 10^{-3} = 109,778 \text{ kN}$$

**Spasi Maksimum Tulangan Transversal** (SNI 2847-2019 Pasal 18.6.4.4), berlaku kedua daerah. Diambil nilai terkecil dari:

$$\begin{aligned} s_{maks} &= \min\left(\frac{d}{4} ; 6d_b ; 150\right) \\ &= \min\left(\frac{430,5}{4} ; 6 \times 19 ; 150\right) \end{aligned}$$

$$= \min(107,625 ; 114,000 ; 150,000)$$

$$= 107,625 \text{ mm}$$

#### a. Daerah Tumpuan

Sengkang tertutup 2 kaki D10. Spasi dari kondisi geser diperoleh dengan menyamakan kapasitas geser tereduksi terhadap gaya geser terfaktor ( $V_u = 43,995$  kN) dihitung sebagai berikut:

$$s_{hitung} = \frac{\frac{1}{4} \pi d_s^2 n f_{yv} \cdot d \times 10^{-3}}{\frac{V_u}{\phi} - 0,17 \sqrt{f'c} b d \times 10^{-3}}$$

$$= \frac{\frac{1}{4} \pi \times 10^2 \times 2 \times 420 \times 430,5 \times 10^{-3}}{\frac{43,995}{0,75} - 109,778}$$

$$= -555,618 \text{ mm}$$

Nilai spasi hitung negatif menunjukkan bahwa gaya geser terfaktor jauh lebih kecil daripada kapasitas geser beton ( $V_u/\phi = 58,660 \text{ kN} < V_c = 109,778 \text{ kN}$ ), sehingga secara teoritis tulangan geser tidak diperlukan dan spasi sengkang dikendalikan sepenuhnya oleh spasi maksimum:

$$s_{pakai} = s_{maks} = 107,625 \text{ mm} \rightarrow \text{digunakan } s = 100 \text{ mm}$$

Digunakan sengkang **D10-100** ( $\leq s_{maks} = 114 \text{ mm}$ )  $\rightarrow$  **MEMENUHI**. Sengkang pertama dipasang  $\leq 50 \text{ mm}$  dari muka *pile cap*.

#### b. Daerah Lapangan

Sengkang tertutup 2 kaki D10. Spasi dari kondisi geser ( $V_u = 21,998$  kN) dihitung sebagai berikut:

$$s_{hitung} = \frac{\frac{1}{4} \pi \times 10^2 \times 2 \times 420 \times 430,5 \times 10^{-3}}{\frac{21,998}{0,75} - 109,778}$$

$$= -353,046 \text{ mm}$$

Sama seperti daerah tumpuan, spasi hitung negatif menunjukkan gaya geser terfaktor jauh lebih kecil daripada kapasitas geser beton ( $V_u/\phi = 29,330 \text{ kN} < V_c = 109,778 \text{ kN}$ ), sehingga spasi dikendalikan oleh spasi maksimum. Berbeda dengan daerah tumpuan, pada daerah lapangan (di luar daerah sendi plastis) batas spasi maksimum yang berlaku adalah  $s \leq d/2$  (SNI 2847-2019 Pasal 18.6.4.6):

$$s_{maks,lap} = \frac{d}{2} = \frac{430,5}{2} = 215,250 \text{ mm}$$

$$s_{pakai} = \min(s_{maks,lap} ; 150)$$

$$= \min(215,250 ; 150,000)$$

$$= 150,000 \text{ mm} \rightarrow \text{digunakan } s = 150 \text{ mm}$$

Digunakan sengkang **D10-150** → **MEMENUHI**. Seluruh sengkang menggunakan kait seismik 135°.

Rekapitulasi penulangan lentur dan geser *Tie Beam* disajikan secara berurutan pada **Tabel 4.50** dan **Tabel 4.51** sebagai berikut:

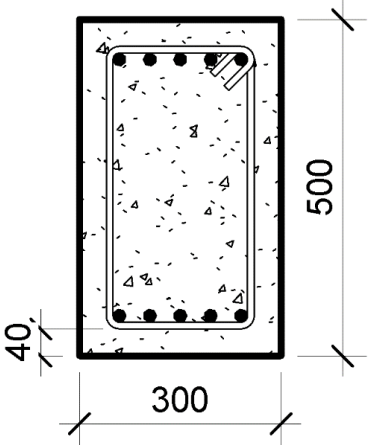
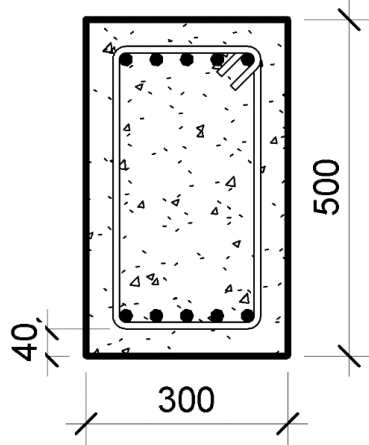
**Tabel 4.50** Rekapitulasi Penulangan Lentur *Tie beam*

| Frame | Lebar<br><i>Tie beam</i> , b<br>(mm) | x | Tinggi<br><i>Tie beam</i> , h<br>(mm) | Jenis<br>Tulangan | Moment Beban  |       | Moment Ultimate |      | As min 1 (mm <sup>2</sup> )<br>SNI 2847-2019<br>9.6.1.2 |         | As min 2 (mm <sup>2</sup> )<br>SNI 2847-2019<br>9.6.1.2 |        | As Hitung<br>(mm <sup>2</sup> ) |        | Tulangan |      | As Tulangan<br>(mm <sup>2</sup> ) |         | Cek<br>As min < As<br>Tulangan < As<br>Max |      |
|-------|--------------------------------------|---|---------------------------------------|-------------------|---------------|-------|-----------------|------|---------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|----------|------|-----------------------------------|---------|--------------------------------------------|------|
|       |                                      |   |                                       |                   | Mati<br>(kNm) |       | (kNm)           |      | Tump                                                    |         | Lap                                                     |        | Tump                            |        | Lap      |      | Tump                              |         | Lap                                        |      |
|       |                                      |   |                                       |                   | Tump          | Lap   | Tump            | Lap  | Tump                                                    | Lap     | Tump                                                    | Lap    | Tump                            | Lap    | Tump     | Lap  | Tump                              | Lap     | Tump                                       | Lap  |
| TB1   | 300                                  | x | 500                                   | Atas              | 40,33         | 20,16 | 40,33           | 0,00 | 960,94                                                  | 960,94  | 430,50                                                  | 430,50 | 252,72                          | 252,72 | 5D19     | 5D19 | 1417,64                           | 1417,64 | aman                                       | aman |
|       |                                      |   |                                       | Bawah             | 40,33         | 20,16 | 40,33           | 0,00 | 960,94                                                  | 960,94  | 430,50                                                  | 430,50 | 252,72                          | 252,72 | 5D19     | 5D19 | 1417,64                           | 1417,64 | aman                                       | aman |
| TB1   | 300                                  | x | 500                                   | Atas              | 40,33         | 20,16 | 40,33           | 0,00 | 1153,13                                                 | 1153,13 | 430,50                                                  | 430,50 | 251,87                          | 251,87 | 5D19     | 5D19 | 1417,64                           | 1417,64 | aman                                       | aman |
|       |                                      |   |                                       | Bawah             | 40,33         | 20,16 | 40,33           | 0,00 | 1153,13                                                 | 1153,13 | 430,50                                                  | 430,50 | 251,87                          | 251,87 | 5D19     | 5D19 | 1417,64                           | 1417,64 | aman                                       | aman |
| TB1   | 300                                  | x | 500                                   | Atas              | 40,33         | 20,16 | 40,33           | 0,00 | 1345,31                                                 | 1345,31 | 430,50                                                  | 430,50 | 251,28                          | 251,28 | 5D19     | 5D19 | 1417,64                           | 1417,64 | aman                                       | aman |
|       |                                      |   |                                       | Bawah             | 40,33         | 20,16 | 40,33           | 0,00 | 1345,31                                                 | 1345,31 | 430,50                                                  | 430,50 | 251,28                          | 251,28 | 5D19     | 5D19 | 1417,64                           | 1417,64 | aman                                       | aman |

**Tabel 4.51** Rekapitulasi Penulangan Geser *Tie beam*

| Frame | Lebar<br><i>Tie beam</i> , b<br>(mm) | x | Tinggi<br><i>Tie beam</i> , h<br>(mm) | Gaya Geser<br>Beban Mati, Vu<br>(kN) |       | Gaya Geser, Vu<br>(kN) |       | Spasi Hitung<br>( $A_v * f_y * d / ((V_u / \phi) - (0.17 * (f'_c)^{0.5} * b * d))$ )<br>(mm) |         | Spasi max 1 (mm)<br>SNI 2847-2019<br>18.6.4.4 |        | Spasi max 2<br>(mm)<br>SNI 2847-2019<br>18.6.4.4 |     | Spasi max 3<br>(mm)<br>SNI 2847-2019<br>18.6.4.4 |     | Spasi Pakai<br>(mm) |     | Tulangan |         |
|-------|--------------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|-------|------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------|-----|---------------------|-----|----------|---------|
|       |                                      |   |                                       | Tump                                 |       | Lap                    |       | Tump                                                                                         |         | Lap                                           |        | Tump                                             |     | Lap                                              |     | Tump                |     | Lap      |         |
|       |                                      |   |                                       | Tump                                 | Lap   | Tump                   | Lap   | Tump                                                                                         | Lap     | Tump                                          | Lap    | Tump                                             | Lap | Tump                                             | Lap | Tump                | Lap | Tump     | Lap     |
| TB1   | 300,00                               | x | 500,00                                | 44,00                                | 22,00 | 44,00                  | 22,00 | -555,62                                                                                      | -353,05 | 107,63                                        | 215,25 | 114,00                                           | -   | 150,00                                           | -   | 100,00              | 150 | D10-100  | D10-150 |
| TB1   | 300,00                               | x | 500,00                                | 44,00                                | 22,00 | 44,00                  | 22,00 | -461,10                                                                                      | -312,36 | 107,63                                        | 215,25 | 114,00                                           | -   | 150,00                                           | -   | 100,00              | 150 | D10-100  | D10-150 |
| TB1   | 300,00                               | x | 500,00                                | 44,00                                | 22,00 | 44,00                  | 22,00 | -398,73                                                                                      | -282,43 | 107,63                                        | 215,25 | 114,00                                           | -   | 150,00                                           | -   | 100,00              | 150 | D10-100  | D10-150 |

Detail penulangan *tie beam* disajikan pada **Gambar 4.23** berikut:

| Frame                     | Suport Region                                                                       | Span Region                                                                          |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tie Beam<br>TB<br>300.500 |  |  |
| Top Longitudinal bars     | 5D19                                                                                | 5D19                                                                                 |
| Mid Longitudinal bars     | -                                                                                   | -                                                                                    |
| Bottom Longitudinal bars  | 5D19                                                                                | 5D19                                                                                 |
| Transversal bars          | D10-150                                                                             | D10-150                                                                              |

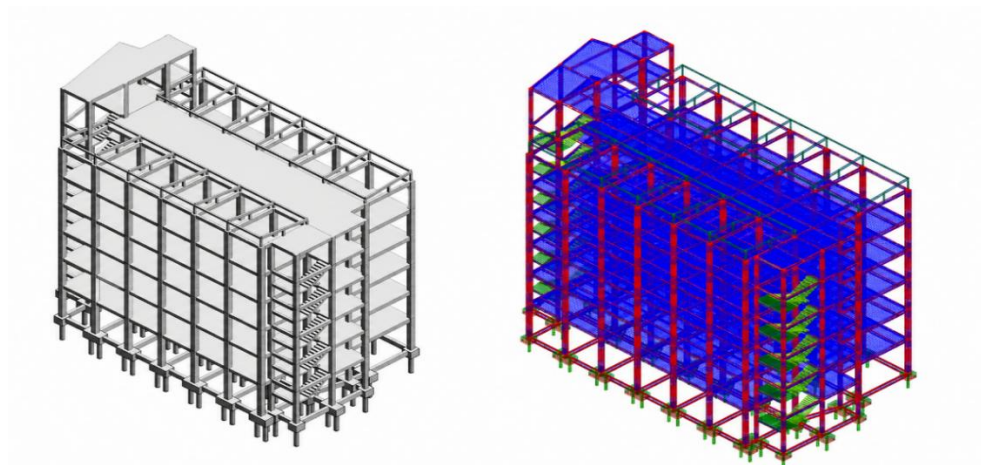
**Gambar 4.23** Detail Penulangan Tie beam TB1

#### 4.8 Permodelan BIM 3D dan *Quantity Take-off*

Setelah seluruh dimensi dan penulangan elemen struktur ditetapkan, dilakukan pemodelan informasi bangunan tiga dimensi (*Building Information Modeling* atau BIM 3D) menggunakan Autodesk Revit 2026. Proses pemodelan dilakukan secara terpisah untuk masing-masing skenario. Data *Quantity Take-Off* (QTO) diekstraksi secara otomatis dari model BIM, meliputi volume beton ( $\text{m}^3$ ), luas bekisting ( $\text{m}^2$ ), dan massa tulangan (kg) untuk setiap elemen dan setiap lantai. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) dan analisis *embodied carbon*.

##### 4.8.1 Permodelan 3D

Seluruh elemen struktur dimodelkan berdasarkan dimensi hasil analisis ETABS untuk masing-masing skenario. Setiap elemen dilengkapi dengan informasi material, dimensi penampang, serta atribut identifikasi yang diperlukan untuk proses *quantity take-off*. Pemodelan dilakukan secara bertahap pada setiap lantai, dimulai dari struktur bawah yang meliputi tiang pancang, *pile cap*, dan *tie beam*, kemudian dilanjutkan ke struktur atas yang terdiri atas kolom, balok, dan pelat lantai. Hasil pemodelan tiga dimensi seluruh elemen struktur disajikan pada **Gambar 4.24** berikut:



**Gambar 4.24** Permodelan 3D Struktur

#### 4.8.2 Quantity Take-Off (QTO)

*Quantity Take-Off* (QTO) adalah proses perhitungan kuantitas material bangunan yang diekstraksi secara otomatis dari model *Building Information Modeling* (BIM) tiga dimensi menggunakan fitur *Schedule/Quantities* pada Autodesk Revit. Hasil ekstraksi berupa data volume beton ( $\text{m}^3$ ), luas bekisting ( $\text{m}^2$ ), dan massa tulangan baja (kg) untuk setiap elemen struktural pada masing-masing lantai bangunan. Tingkat akurasi data QTO sangat ditentukan oleh ketelitian proses pemodelan dan konsistensi parameter yang diberikan pada setiap elemen, sehingga data yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) serta perhitungan *embodied carbon*. Adapun contoh dari beberapa pengambilan QTO dari Revit seperti yang disajikan pada **Gambar 4.25–4.27** berikut:

**QUANTITY TAKE OFF – KOLOM**

| <35 Column Volume> |            |                    |                     |       |               |           | <Rebar Volume Check> |           |              |                  |            |
|--------------------|------------|--------------------|---------------------|-------|---------------|-----------|----------------------|-----------|--------------|------------------|------------|
| A                  | B          | C                  | D                   | E     | F             | G         | A                    | B         | C            | D                | E          |
| Workset            | Type       | Volume             | Formwork Area       | Count | System Length | Perimeter | Story                | Partition | Bar Diameter | Total Bar Length | Weight     |
| 01. Floor 01       |            |                    |                     |       |               |           | 01. Floor 01         |           |              |                  |            |
| 01. Floor 01       | K1 500.500 | 26.01 $\text{m}^3$ | 212.80 $\text{m}^2$ | 28    | 106.40 m      | 2.00 m    | 01. Floor 01         | K1        | 10 mm        | 3327.80 m        | 2051.71 kg |
| 01. Floor 01       | K2 400.400 | 6.55 $\text{m}^3$  | 66.88 $\text{m}^2$  | 11    | 41.80 m       | 1.60 m    | 01. Floor 01         | K1        | 19 mm        | 4387.60 m        | 9765.48 kg |
| 02. Floor 02       |            |                    |                     |       |               |           | 01. Floor 01         | K2        | 10 mm        | 1034.55 m        | 637.84 kg  |
| 02. Floor 02       | K1 500.500 | 22.54 $\text{m}^3$ | 184.80 $\text{m}^2$ | 28    | 92.40 m       | 2.00 m    | 01. Floor 01         | K2        | 19 mm        | 1370.60 m        | 3050.55 kg |
| 02. Floor 02       | K2 400.400 | 5.74 $\text{m}^3$  | 58.08 $\text{m}^2$  | 11    | 36.30 m       | 1.60 m    | 02. Floor 02         |           |              |                  |            |
| 03. Floor 03       |            |                    |                     |       |               |           | 02. Floor 02         | K1        | 10 mm        | 3093.30 m        | 1907.14 kg |
| 03. Floor 03       | K1 500.500 | 22.54 $\text{m}^3$ | 184.80 $\text{m}^2$ | 28    | 92.40 m       | 2.00 m    | 02. Floor 02         | K1        | 19 mm        | 2492.00 m        | 5546.45 kg |
| 03. Floor 03       | K2 400.400 | 5.74 $\text{m}^3$  | 58.08 $\text{m}^2$  | 11    | 36.30 m       | 1.60 m    | 02. Floor 02         | K2        | 10 mm        | 964.43 m         | 594.60 kg  |
| 04. Floor 04       |            |                    |                     |       |               |           | 02. Floor 02         | K2        | 19 mm        | 774.40 m         | 1723.58 kg |
| 04. Floor 04       | K1 500.500 | 22.54 $\text{m}^3$ | 184.80 $\text{m}^2$ | 28    | 92.40 m       | 2.00 m    | 03. Floor 03         |           |              |                  |            |
| 04. Floor 04       | K2 400.400 | 5.74 $\text{m}^3$  | 58.08 $\text{m}^2$  | 11    | 36.30 m       | 1.60 m    | 03. Floor 03         | K1        | 10 mm        | 3093.30 m        | 1907.14 kg |
| 05. Floor 05       |            |                    |                     |       |               |           | 03. Floor 03         | K1        | 19 mm        | 2492.00 m        | 5546.45 kg |
| 05. Floor 05       | K1 500.500 | 22.54 $\text{m}^3$ | 184.80 $\text{m}^2$ | 28    | 92.40 m       | 2.00 m    | 03. Floor 03         | K2        | 10 mm        | 964.43 m         | 594.60 kg  |
| 05. Floor 05       | K2 400.400 | 5.74 $\text{m}^3$  | 58.08 $\text{m}^2$  | 11    | 36.30 m       | 1.60 m    | 03. Floor 03         | K2        | 19 mm        | 774.40 m         | 1723.58 kg |
| 06. Floor 06       |            |                    |                     |       |               |           | 04. Floor 04         |           |              |                  |            |
| 07. Rooftop        | K1 500.500 | 2.02 $\text{m}^3$  | 16.40 $\text{m}^2$  | 2     | 8.20 m        | 2.00 m    | 04. Floor 04         | K1        | 10 mm        | 3093.30 m        | 1907.14 kg |
| 07. Rooftop        | K2 400.400 | 3.89 $\text{m}^3$  | 39.36 $\text{m}^2$  | 6     | 24.60 m       | 1.60 m    | 04. Floor 04         | K1        | 19 mm        | 2492.00 m        | 5546.45 kg |
| 07. Rooftop        | KA 150.200 | 0.86 $\text{m}^3$  | 28.16 $\text{m}^2$  | 42    | 40.23 m       | 0.70 m    | 04. Floor 04         | K2        | 10 mm        | 964.43 m         | 594.60 kg  |
|                    |            |                    |                     |       |               |           | 04. Floor 04         | K2        | 19 mm        | 774.40 m         | 1723.58 kg |
|                    |            |                    |                     |       |               |           | 05. Floor 05         |           |              |                  |            |
|                    |            |                    |                     |       |               |           | 05. Floor 05         | K1        | 10 mm        | 3093.30 m        | 1907.14 kg |
|                    |            |                    |                     |       |               |           | 05. Floor 05         | K1        | 19 mm        | 2506.00 m        | 5577.61 kg |
|                    |            |                    |                     |       |               |           | 05. Floor 05         | K2        | 10 mm        | 964.43 m         | 594.60 kg  |
|                    |            |                    |                     |       |               |           | 05. Floor 05         | K2        | 19 mm        | 778.80 m         | 1733.38 kg |

**Gambar 4.25** *Quantity Take-Off* Kolom

### QUANTITY TAKE OFF – BALOK

| <35 Beam Volume>     |             |          |               |           |               | <Rebar Volume Check> |           |              |                  |            |
|----------------------|-------------|----------|---------------|-----------|---------------|----------------------|-----------|--------------|------------------|------------|
| A                    | B           | C        | D             | E         | F             | A                    | B         | C            | D                | E          |
| Workset              | Type        | Volume   | Formwork Area | Perimeter | System Length | Story                | Partition | Bar Diameter | Total Bar Length | Weight     |
| 00. Bottom Structure |             |          |               |           |               | 01. Floor 01         | BB        | 10 mm        | 37.98 m          | 23.41 kg   |
| 00. Bottom Structure | TB 300.500  | 24.36 m³ | 258.18 m²     | 1.00 m    | 258.18 m      | 01. Floor 01         | BB        | 13 mm        | 11.75 m          | 12.24 kg   |
| 01. Floor 01         |             |          |               |           |               | 01. Floor 01         | BB        | 16 mm        | 32.78 m          | 51.73 kg   |
| 01. Floor 01         | BB 200.300  | 0.31 m³  | 3.96 m²       | 0.66 m    | 6.00 m        | 02. Floor 02         | B1        | 10 mm        | 1717.10 m        | 1058.66 kg |
| 01. Floor 01         | RBL 200.300 | 0.65 m³  | 10.08 m²      | 0.80 m    | 12.60 m       | 02. Floor 02         | B1        | 19 mm        | 1233.65 m        | 2745.74 kg |
| 02. Floor 02         |             |          |               |           |               | 02. Floor 02         | B2        | 10 mm        | 1383.73 m        | 853.12 kg  |
| 02. Floor 02         | B1 250.450  | 8.85 m³  | 132.25 m²     | 1.15 m    | 115.00 m      | 02. Floor 02         | B2        | 13 mm        | 295.33 m         | 307.71 kg  |
| 02. Floor 02         | B2 250.350  | 8.69 m³  | 136.58 m²     | 0.95 m    | 143.76 m      | 02. Floor 02         | B2        | 19 mm        | 862.90 m         | 1920.56 kg |
| 02. Floor 02         | B3 200.350  | 4.87 m³  | 89.17 m²      | 0.80 m    | 111.47 m      | 02. Floor 02         | B3        | 8 mm         | 230.75 m         | 91.05 kg   |
| 02. Floor 02         | B4 200.250  | 0.55 m³  | 16.80 m²      | 0.70 m    | 24.00 m       | 02. Floor 02         | B3        | 10 mm        | 768.25 m         | 473.65 kg  |
| 02. Floor 02         | BB 200.300  | 0.31 m³  | 3.96 m²       | 0.66 m    | 6.00 m        | 02. Floor 02         | B3        | 19 mm        | 653.10 m         | 1453.61 kg |
| 02. Floor 02         | RBL 200.300 | 0.65 m³  | 10.08 m²      | 0.80 m    | 12.60 m       | 02. Floor 02         | B4        | 10 mm        | 125.10 m         | 77.13 kg   |
| 03. Floor 03         |             |          |               |           |               | 02. Floor 02         | B4        | 16 mm        | 105.05 m         | 165.80 kg  |
| 03. Floor 03         | B1 250.450  | 8.85 m³  | 132.25 m²     | 1.15 m    | 115.00 m      | 02. Floor 02         | BB        | 10 mm        | 37.98 m          | 23.41 kg   |
| 03. Floor 03         | B2 250.350  | 8.69 m³  | 136.58 m²     | 0.95 m    | 143.76 m      | 02. Floor 02         | BB        | 13 mm        | 11.75 m          | 12.24 kg   |
| 03. Floor 03         | B3 200.350  | 4.87 m³  | 89.17 m²      | 0.80 m    | 111.47 m      | 02. Floor 02         | BB        | 16 mm        | 32.78 m          | 51.73 kg   |
| 03. Floor 03         | B4 200.250  | 0.55 m³  | 16.80 m²      | 0.70 m    | 24.00 m       |                      |           |              |                  |            |
| 03. Floor 03         | BB 200.300  | 0.31 m³  | 3.96 m²       | 0.66 m    | 6.00 m        |                      |           |              |                  |            |
| 03. Floor 03         | RBL 200.300 | 0.65 m³  | 10.08 m²      | 0.80 m    | 12.60 m       |                      |           |              |                  |            |
| 04. Floor 04         |             |          |               |           |               |                      |           |              |                  |            |
| 04. Floor 04         | B1 250.450  | 8.85 m³  | 132.25 m²     | 1.15 m    | 115.00 m      |                      |           |              |                  |            |
| 04. Floor 04         | B2 250.350  | 8.69 m³  | 136.58 m²     | 0.95 m    | 143.76 m      |                      |           |              |                  |            |
| 04. Floor 04         | B3 200.350  | 4.87 m³  | 89.17 m²      | 0.80 m    | 111.47 m      |                      |           |              |                  |            |
| 04. Floor 04         | B4 200.250  | 0.55 m³  | 16.80 m²      | 0.70 m    | 24.00 m       |                      |           |              |                  |            |
| 04. Floor 04         | BB 200.300  | 0.31 m³  | 3.96 m²       | 0.66 m    | 6.00 m        |                      |           |              |                  |            |
| 04. Floor 04         | RBL 200.300 | 0.65 m³  | 10.08 m²      | 0.80 m    | 12.60 m       |                      |           |              |                  |            |

Gambar 4.26 Quantity Take-Off Balok

### QUANTITY TAKE OFF – PELAT

| <35 Floor Volume>    |             |          |           |           |               | <Rebar Volume Check> |           |              |                  |            |
|----------------------|-------------|----------|-----------|-----------|---------------|----------------------|-----------|--------------|------------------|------------|
| A                    | B           | C        | D         | E         | F             | A                    | B         | C            | D                | E          |
| Workset              | Type        | Volume   | Area      | Perimeter | System Length | Story                | Partition | Bar Diameter | Total Bar Length | Weight     |
| 00. Bottom Structure | Slab 120 mm | 1.28 m³  | 10.67 m²  | -         | -             | 01. Floor 01         | BB        | 10 mm        | 37.98 m          | 23.41 kg   |
| 02. Floor 02         | Slab 120 mm | 53.99 m³ | 449.89 m² | -         | -             | 01. Floor 01         | BB        | 13 mm        | 11.75 m          | 12.24 kg   |
| 03. Floor 03         | Slab 120 mm | 53.99 m³ | 449.89 m² | -         | -             | 01. Floor 01         | BB        | 16 mm        | 32.78 m          | 51.73 kg   |
| 04. Floor 04         | Slab 120 mm | 53.99 m³ | 449.89 m² | -         | -             | 02. Floor 02         | B1        | 10 mm        | 1717.10 m        | 1058.66 kg |
| 05. Floor 05         | Slab 120 mm | 53.99 m³ | 449.89 m² | -         | -             | 02. Floor 02         | B1        | 19 mm        | 1233.65 m        | 2745.74 kg |
| 06. Floor 06         | Slab 120 mm | 53.99 m³ | 449.89 m² | -         | -             | 02. Floor 02         | B2        | 10 mm        | 1383.73 m        | 853.12 kg  |
| 07. Rooftop          | Slab 100 mm | 15.80 m³ | 158.00 m² | -         | -             | 02. Floor 02         | B2        | 13 mm        | 295.33 m         | 307.71 kg  |
| 07. Rooftop          | Slab 120 mm | 5.42 m³  | 45.19 m²  | -         | -             | 02. Floor 02         | B2        | 19 mm        | 862.90 m         | 1920.56 kg |
| 08. Roof Lift        | Slab 100 mm | 4.73 m³  | 47.34 m²  | -         | -             | 02. Floor 02         | B3        | 8 mm         | 230.75 m         | 91.05 kg   |
|                      |             |          |           |           |               | 02. Floor 02         | B3        | 10 mm        | 768.25 m         | 473.65 kg  |
|                      |             |          |           |           |               | 02. Floor 02         | B3        | 19 mm        | 653.10 m         | 1453.61 kg |
|                      |             |          |           |           |               | 02. Floor 02         | B4        | 10 mm        | 125.10 m         | 77.13 kg   |
|                      |             |          |           |           |               | 02. Floor 02         | B4        | 16 mm        | 105.05 m         | 165.80 kg  |
|                      |             |          |           |           |               | 02. Floor 02         | BB        | 10 mm        | 37.98 m          | 23.41 kg   |
|                      |             |          |           |           |               | 02. Floor 02         | BB        | 13 mm        | 11.75 m          | 12.24 kg   |
|                      |             |          |           |           |               | 02. Floor 02         | BB        | 16 mm        | 32.78 m          | 51.73 kg   |

Gambar 4.27 Quantity Take-Off Pelat

#### 4.9 Analisis *Embodied carbon*

Subbab ini menyajikan hasil kuantifikasi *embodied carbon* (EC) pada modul A1–A3 (*cradle-to-gate*) untuk tiga skenario mutu beton hasil perencanaan ulang, yaitu Skenario A ( $f'_c$  25 MPa), Skenario B ( $f'_c$  30 MPa), dan Skenario C ( $f'_c$  35 MPa). Analisis disusun secara bertingkat mengikuti alur perhitungan sebagai berikut: dimulai dari faktor emisi material sebagai basis perhitungan, dilanjutkan dengan akumulasi EC total beserta distribusinya, kemudian keterkaitannya dengan anggaran biaya, serta analisis metrik komparatif (RRV,  $\Delta EC\%$ , REKV, dan CCER). Subbab ini ditutup dengan penentuan skenario optimal, disertai catatan mengenai keterbatasan interpretasi hasil.

##### 4.9.1 Penentuan Nilai *Embodied carbon Factor* (ECF)

Faktor emisi (*embodied carbon factor*, ECF) merupakan basis seluruh perhitungan pada subbab ini. ECF menyatakan intensitas emisi gas rumah kaca yang dilepaskan per satuan massa material sepanjang tahap A1–A3, yaitu ekstraksi bahan baku, transportasi ke pabrik, dan manufaktur. Nilai ECF material referensi disajikan pada **Tabel 4.52** sebagai berikut:

**Tabel 4.52** Nilai ECF Material

| Material               | ECF (kgCO <sub>2</sub> e/kg) | Sumber           |
|------------------------|------------------------------|------------------|
| Semen Portland (CEM I) | 0,839800                     | ICE v4.1         |
| Pasir beton            | 0,004358                     | ICE v4.1         |
| Kerikil/batu split     | 0,004358                     | ICE v4.1         |
| <i>Fly ash</i> (PFA)   | 0,008000                     | ICE v2.0 (BSRIA) |
| Air                    | 0,001000                     | -                |
| Baja tulangan ulir     | 1,720000                     | ICE v4.1         |

Lebarnya rentang nilai ECF antar material mengindikasikan bahwa pemilihan jenis dan proporsi material berpotensi menjadi salah satu variabel kunci yang

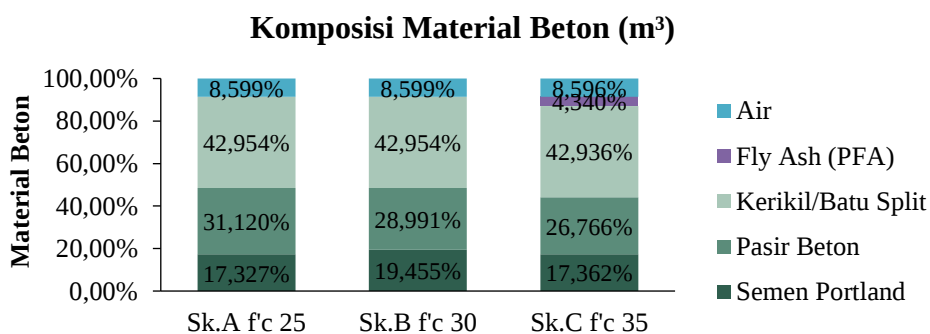
memengaruhi besaran *total embodied carbon*. Faktor emisi semen Portland (0,8398 kgCO<sub>2</sub>e/kg) jauh melampaui agregat (0,004358 kgCO<sub>2</sub>e/kg) dan air (0,001 kgCO<sub>2</sub>e/kg), sedangkan baja tulangan (1,72 kgCO<sub>2</sub>e/kg) merupakan faktor emisi tertinggi di antara seluruh material penyusun.

Konsekuensi tersebut tampak jelas ketika ECF ditransformasikan menjadi karbon beton per m<sup>3</sup> melalui komposisi campuran (*mix design*) tiap skenario. Koefisien massa material penyusun beton per m<sup>3</sup> bersumber dari AHSP untuk masing-masing mutu. Komposisi campuran beton per mutu disajikan pada **Tabel 4.53** sebagai berikut:

**Tabel 4.53** Komposisi Massa Material Beton per m<sup>3</sup>

| Komponen                              | Sk.A<br>f'c 25 | Sk.B<br>f'c 30 | Sk.C<br>f'c 35 | % Sk.A      | % Sk.B      | % Sk.C      |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| Semen Portland                        | 407            | 457            | 408            | 17,326%     | 19,455%     | 17,362%     |
| Pasir beton                           | 731            | 681            | 629            | 31,120%     | 28,991%     | 26,766%     |
| Kerikil/split                         | 1.009          | 1.009          | 1.009          | 42,954%     | 42,954%     | 42,936%     |
| <i>Fly ash</i> (PFA)                  | 0              | 0              | 102            | 0,000%      | 0,000%      | 4,340%      |
| Air                                   | 202            | 202            | 202            | 8,599%      | 8,599%      | 8,596%      |
| <b>Total Massa (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>2.349</b>   | <b>2.349</b>   | <b>2.350</b>   | <b>100%</b> | <b>100%</b> | <b>100%</b> |

Adapun grafik yang mempresentasikan komposisi material beton antar variasi yang disajikan pada **Gambar 4.28** berikut:



**Gambar 4.28** Komposisi Material Beton

Perhitungan ECF beton per m<sup>3</sup> dilakukan dengan menjumlahkan hasil kali massa tiap material penyusun terhadap ECF masing-masing, kemudian dibagi dengan total massa beton per m<sup>3</sup> untuk memperoleh ECF dalam satuan kgCO<sub>2</sub>e/kg yang diformulasikan pada rumus 3 dan rumus 4 sebagai berikut:

$$ECF_{beton} = \frac{EC_{beton/m^3}}{\rho_{beton}} \quad (3)$$

$$EC_{beton/m^3} = \sum_{i=1}^n (M_i \times ECF_i) \quad (4)$$

Substitusi untuk **Skenario A (f'c 25 MPa):**

$$\begin{aligned} EC_{beton/m^3,A} &= (407 \times 0,8398) + (731 \times 0,004358) + (1009 \times 0,004358) \\ &\quad + (0 \times 0,008) + (202 \times 0,001) \\ EC_{\frac{beton}{m^3},A} &= 341,798600 + 3,185698 + 4,397222 + 0 + 0,202000 \\ &= 349,583520 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3 \\ ECF_{beton,A} &= \frac{349,583520}{2349} \\ &= \mathbf{0,148822 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}} \end{aligned}$$

Substitusi untuk **Skenario B (f'c 30 MPa):**

$$\begin{aligned} EC_{beton/m^3,B} &= (457 \times 0,8398) + (681 \times 0,004358) + (1009 \times 0,004358) \\ &\quad + (0 \times 0,008) + (202 \times 0,001) \\ EC_{\frac{beton}{m^3},B} &= 383,788600 + 2,967798 + 4,397222 + 0 + 0,202000 \\ &= 391,355620 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3 \\ ECF_{beton,B} &= \frac{391,355620}{2349} \\ &= \mathbf{0,166605 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}} \end{aligned}$$

Substitusi untuk **Skenario C (f'c 35 MPa):**

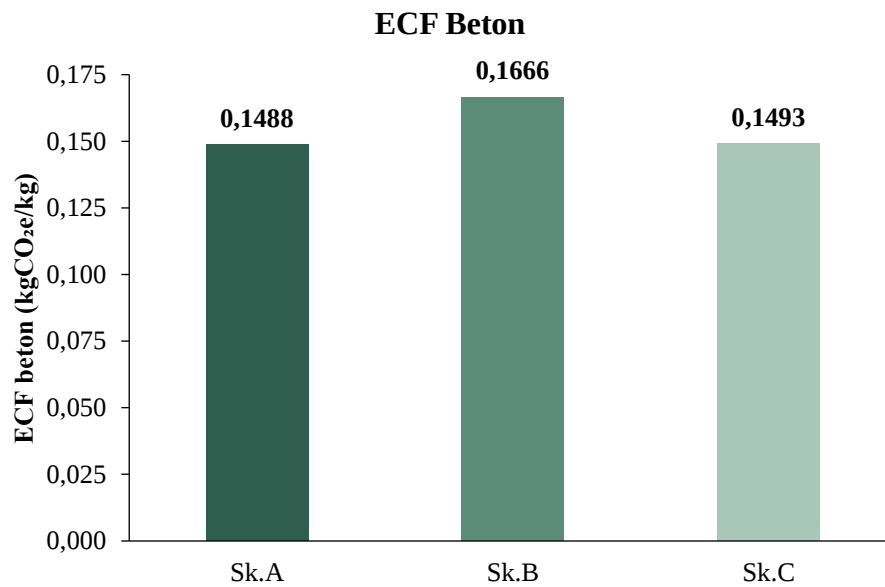
$$\begin{aligned}
 EC_{beton/m^3,C} &= (408 \times 0,8398) + (629 \times 0,004358) + (1009 \times 0,004358) \\
 &\quad + (102 \times 0,008) + (202 \times 0,001) \\
 EC_{\frac{beton}{m^3},C} &= 342,638400 + 2,741182 + 4,397222 + 0,816000 + 0,20200 \\
 &= 350,794804 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3 \\
 ECF_{beton,C} &= \frac{350,794804}{2350} \\
 &= \mathbf{0,149274 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}}
 \end{aligned}$$

Hasil kalkulasi ECF beton per skenario beserta kontribusi tiap material disajikan pada **Tabel 4.54** sebagai berikut:

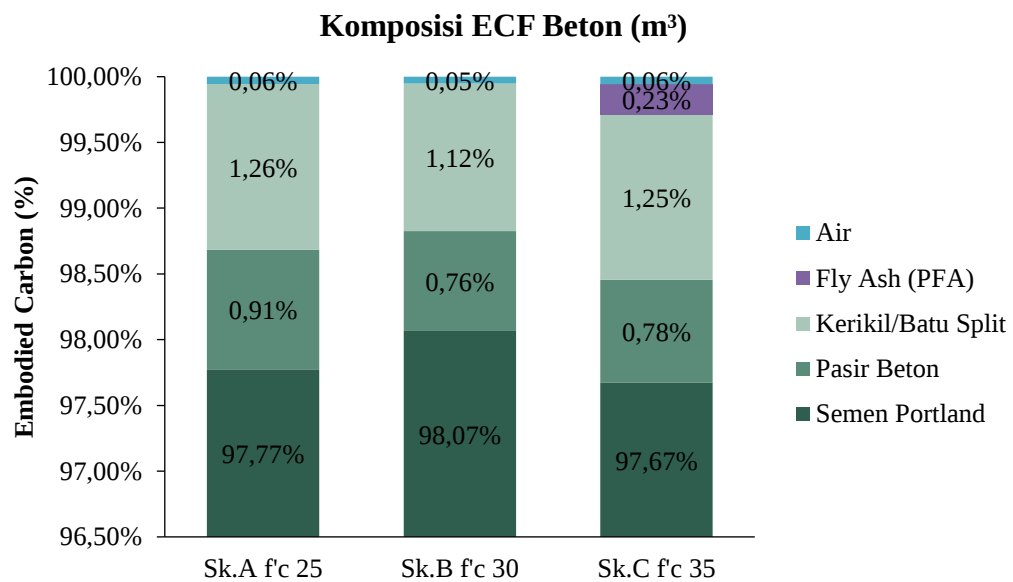
**Tabel 4.54** Kalkulasi ECF Beton per Skenario

| <b>Komponen</b>                                       | <b>EC A</b>    | <b>EC B</b>    | <b>EC C</b>    | <b>%<br/>Sk.A</b> | <b>%<br/>Sk.B</b> | <b>%<br/>Sk.C</b> |
|-------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Semen Portland                                        | 341,799        | 383,789        | 342,638        | 97,77%            | 98,07%            | 97,67%            |
| Pasir beton                                           | 3,186          | 2,968          | 2,741          | 0,91%             | 0,76%             | 0,78%             |
| Kerikil/split                                         | 4,397          | 4,397          | 4,397          | 1,26%             | 1,12%             | 1,25%             |
| <i>Fly ash</i> (PFA)                                  | 0              | 0              | 0,816          | 0,00%             | 0,00%             | 0,23%             |
| Air                                                   | 0,202          | 0,202          | 0,202          | 0,06%             | 0,05%             | 0,06%             |
| <b>EC beton<br/>(kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>)</b> | <b>349,584</b> | <b>391,356</b> | <b>350,795</b> |                   |                   |                   |
| <b>Total Massa<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b>             | <b>2.349</b>   | <b>2.349</b>   | <b>2.350</b>   |                   |                   |                   |
| <b>ECF beton<br/>(kgCO<sub>2</sub>e/kg)</b>           | <b>0,1488</b>  | <b>0,1666</b>  | <b>0,1492</b>  |                   |                   |                   |

Adapun grafik yang mempresentasikan hasil kalkulasi ECF beton per skenario yang disajikan pada **Gambar 4.29** dan **Gambar 4.30** berikut:



**Gambar 4.29** Nilai ECF Beton



**Gambar 4.30** Komposisi ECF Beton

Kontribusi semen terhadap total karbon beton pada Skenario A (349,584 kgCO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup>) mencapai 341,799 kgCO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup>, atau setara 97,77% dari keseluruhan nilai; proporsi ini bahkan lebih tinggi pada Skenario B (98,07%) dan relatif serupa pada Skenario C (97,67%). Temuan ini menunjukkan disproporsi, walaupun secara proporsi massa semen hanya berkisar 17,3–19,4% dari total bobot campuran sebesar 2.349–2.350 kg/m<sup>3</sup>, kontribusinya terhadap jejak karbon justru mendominasi hampir keseluruhan nilai. Pola ini mengonfirmasi salah satu prinsip fundamental dalam teknologi beton rendah karbon, yaitu bahwa besaran *embodied carbon* beton tidak ditentukan oleh massa total material, melainkan oleh proporsi kandungan bahan pengikat di dalamnya. Sebagai perbandingan, agregat yang mengisi sekitar 74% dari massa campuran hanya mengandung kurang dari 2,2% total karbon sehingga intervensi reduksi karbon yang diarahkan pada agregat maupun air, dalam lingkup tahap A1–A3, secara kuantitatif tidak memberikan dampak yang signifikan.

Perbandingan ketiga skenario juga mengungkap dua mekanisme yang bekerja pada arah berlawanan dalam menentukan intensitas karbon beton. Pada transisi dari Skenario A ke B, peningkatan kandungan semen dari 407 kg/m<sup>3</sup> menjadi 457 kg/m<sup>3</sup> untuk mencapai mutu f'c 30 MPa berdampak pada kenaikan ECF beton sebesar 11,9%, dari 0,148822 menjadi 0,166605 kgCO<sub>2e</sub>/kg. Sebaliknya, pada transisi dari Skenario B ke C, meskipun target mutu dinaikkan lebih tinggi lagi menjadi f'c 35 MPa, kandungan semen justru ditekan kembali ke 408 kg/m<sup>3</sup> dan sebagian fungsi pengikat digantikan dengan 102 kg/m<sup>3</sup> *fly ash*. Substitusi ini berhasil menekan ECF beton kembali ke 0,149274 kgCO<sub>2e</sub>/kg - nilai yang hampir menyamai Skenario A - dikarenakan ECF *fly ash* hanya sebesar 0,008000 kgCO<sub>2e</sub>/kg, atau sekitar 1% dari ECF semen. Mekanisme substitusi ini yang menjelaskan Skenario C mampu mencapai mutu beton tertinggi di antara ketiga skenario, namun dengan intensitas karbon per m<sup>3</sup> yang justru lebih rendah dibandingkan Skenario B.

Faktor emisi untuk tiang pancang diperhitungkan secara terpisah dari elemen struktural lainnya, karena nilainya merepresentasikan ECF produk jadi (produk akhir), bukan ECF material mentah. Angka ini diambil dari *Environmental Product Declaration* (EPD) produk PC *Spun Pile Ø400 Green Mix* (nomor registrasi S-P-

13859, WIKA Beton, 2024), yang mencantumkan emisi sebesar 20,6 kgCO<sub>2</sub> per meter panjang tiang dengan berat linier 191 kg/m. Dengan membagi nilai emisi tersebut terhadap berat linier, diperoleh faktor emisi per satuan massa yang diformulasikan pada rumus berikut:

$$ECF_{pile} = \frac{q_{CO_2}}{w}$$

$$ECF_{pile} = \frac{20,6}{191} = 0,107853 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$$

Angka ini bersifat komprehensif karena telah memperhitungkan seluruh komponen penyusun produk - beton mutu f'c 52 MPa, baja prategang, tulangan spiral, serta konsumsi energi pada proses produksi, termasuk *spinning* dan *steam curing*. Dibandingkan terhadap ECF tiang pancang dari proses produksi konvensional (0,123000 kgCO<sub>2</sub>e/kg), produk *green mix* ini menghasilkan reduksi emisi sebesar 12,3%, sebagaimana dihitung sebagai berikut:

$$R_{green} = \frac{0,123000 - 0,107853}{0,123000} \times 100\% = 12,3\%$$

Spesifikasi dan jenis tiang pancang yang digunakan tidak berubah pada seluruh skenario yang dianalisis, nilai ECF pile bersifat tetap (konstan) di seluruh skenario; dengan demikian, setiap perbedaan *embodied carbon* pada elemen pondasi antar skenario disebabkan oleh perubahan jumlah tiang yang digunakan, bukan oleh perubahan faktor emisinya. Konsistensi nilai ECF ini memiliki arti penting secara metodologis, sebab memungkinkan tiang pancang berfungsi sebagai indikator dari efek kuantitas - setiap perubahan pada jejak karbon tiang pancang dapat diinterpretasikan secara langsung sebagai representasi perubahan volume/jumlah tiang, tanpa terpengaruh oleh variasi faktor emisi.

#### 4.9.2 Perhitungan *Embodied carbon* per Skenario

Perhitungan EC dilakukan pada tingkat elemen struktural dengan memisahkan kontribusi beton, tulangan, dan tiang pancang. Formulasi umum yang digunakan mengikuti persamaan berikut.

$$EC_{beton} = V_{beton} \times \rho_{beton} \times ECF_{beton}$$

$$EC_{tulangan} = M_{tulangan} \times ECF_{tulangan}$$

$$EC_{tiang} = M_{tiang} \times ECF_{tiang}$$

$$EC_{total} = EC_{beton} + EC_{tulangan} + EC_{tiang}$$

Sebagai contoh perhitungan, diambil elemen kolom Lantai 1 pada Skenario A dengan volume beton 41,460 m<sup>3</sup> dan massa tulangan 15.512,540 kg.

$$M_{beton} = 41,460 \times 2349 = 97.389,540 \text{ kg}$$

$$EC_{beton} = 97.389,540 \times 0,148822 = 14.493,733 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$EC_{tulangan} = 15.512,540 \times 1,72 = 26.681,569 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$EC_{total} = 14.493,733 + 26.681,569 = 41.175,302 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Dasar kuantitas (*quantity take-off*, QTO) struktur atas hasil pemodelan BIM 3D disajikan pada **Tabel 4.55** sebagai berikut:

**Tabel 4.55** Rekapitulasi QTO Struktur Atas per Skenario

| Skenario | V Beton Kolom (m <sup>3</sup> ) | V Beton Balok (m <sup>3</sup> ) | V Beton Pelat (m <sup>3</sup> ) | Total V Beton (m <sup>3</sup> ) | M Tul. Kolom (kg) | M Tul. Balok (kg) | M Tul. Pelat (kg) | Total M Tul. (kg)  |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| A        | 232,200                         | 205,940                         | 325,190                         | <b>763,330</b>                  | 63.174,780        | 64.626,880        | 48.744,500        | <b>176.546,160</b> |
| B        | 206,150                         | 168,700                         | 325,190                         | <b>700,040</b>                  | 63.525,830        | 60.382,540        | 48.744,500        | <b>172.652,870</b> |
| C        | 181,570                         | 154,830                         | 325,190                         | <b>661,590</b>                  | 63.172,990        | 57.971,510        | 48.744,500        | <b>169.889,000</b> |

Sedangkan kuantitas struktur bawah disajikan pada **Tabel 4.56** sebagai berikut:

**Tabel 4.56** Rekapitulasi QTO Struktur Bawah per Skenario

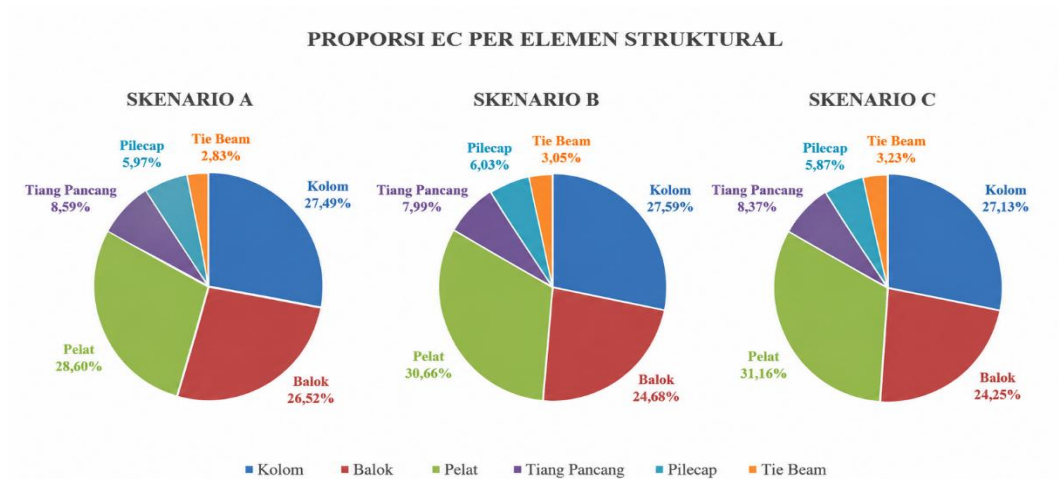
| Skenario | Jumlah Titik Tiang | Panjang/Tiang (m) | Total Panjang (m) | Massa Tiang (kg) | V Beton Pilecap (m <sup>3</sup> ) | M Tul. Pilecap (kg) | V                                |                      |
|----------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|
|          |                    |                   |                   |                  |                                   |                     | Beton Tie beam (m <sup>3</sup> ) | M Tul. Tie beam (kg) |
| A        | 96                 | 30                | 2.880             | 550.080          | 81,350                            | 7.421,450           | 23,460                           | 6.597,840            |
| B        | 89                 | 30                | 2.670             | 509.970          | 75,550                            | 6.944,400           | 24,050                           | 6.751,300            |
| C        | 86                 | 30                | 2.580             | 492.780          | 73,050                            | 6.782,700           | 24,360                           | 6.943,120            |

Hasil kalkulasi EC per elemen struktural disajikan pada **Tabel 4.57** sebagai berikut:

**Tabel 4.57** Rekapitulasi EC per Elemen Struktural (kgCO<sub>2</sub>e)

| Elemen          | Skenario A         | Skenario B         | Skenario C         |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Kolom           | 189.833,915        | 189.942,389        | 172.351,355        |
| Balok           | 183.151,464        | 169.879,662        | 154.024,557        |
| Pelat           | 197.521,605        | 211.105,474        | 197.915,502        |
| Tiang pancang   | 59.328,000         | 55.002,000         | 53.148,000         |
| <i>Pilecap</i>  | 41.203,513         | 41.511,285         | 37.291,804         |
| <i>Tie beam</i> | 19.549,514         | 21.024,339         | 20.487,528         |
| <b>Total</b>    | <b>690.588,011</b> | <b>688.465,148</b> | <b>635.218,747</b> |

Adapun grafik presentase EC setiap variasi yang disajikan pada **Gambar 4.31** berikut:



**Gambar 4.31** Proporsi EC Per Elemen Struktural

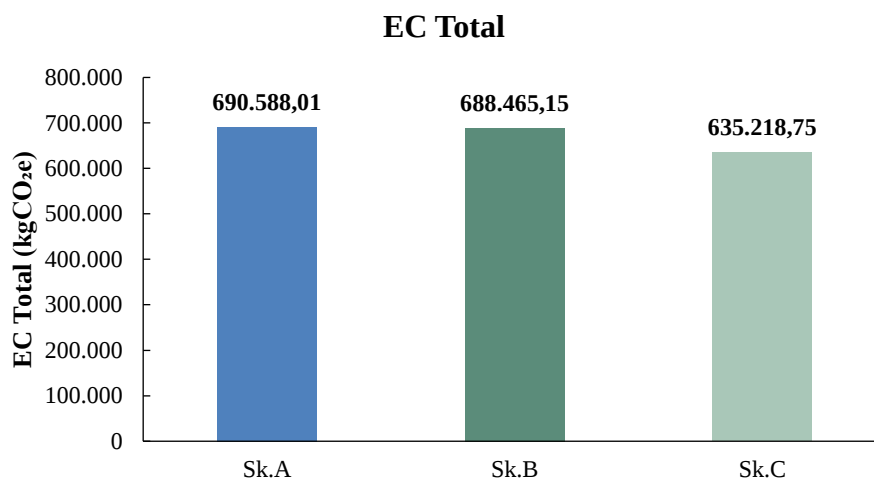
**Gambar 4.31** menunjukkan bahwa pelat merupakan elemen penyumbang EC terbesar pada ketiga skenario, diikuti kolom dan balok.

Rekapitulasi EC berdasarkan lingkup struktur disajikan pada **Tabel 4.58** sebagai berikut:

**Tabel 4.58** Rekapitulasi EC per Lingkup Struktur (kgCO<sub>2e</sub>)

| Lingkup            | Skenario A         | Skenario B         | Skenario C         |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Struktur atas      | 570.506,984        | 570.927,525        | 524.291,414        |
| Struktur bawah     | 120.081,028        | 117.537,624        | 110.927,332        |
| <b>Grand total</b> | <b>690.588,011</b> | <b>688.465,148</b> | <b>635.218,747</b> |

Adapun grafik EC total setiap variasi yang disajikan pada **Gambar 4.32** berikut:



**Gambar 4.32** EC Total

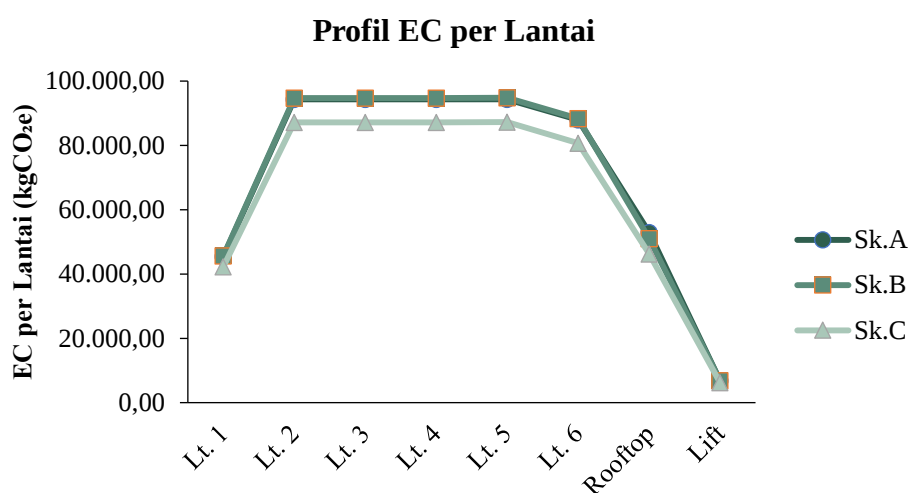
Distribusi EC per lantai dihitung sebagai verifikasi internal konsistensi model: lantai tipikal dengan geometri, dimensi, dan penulangan identik harus menghasilkan EC yang sama persis, sehingga penyimpangan nilai akan menandakan kesalahan pemodelan atau ekstraksi kuantitas. Kemudian, untuk mengetahui pada bagian bangunan mana reduksi karbon benar-benar terjadi, karena reduksi tidak tersebar merata. Distribusi EC per lantai pada struktur atas disajikan pada **Tabel 4.59** sebagai berikut:

**Tabel 4.59** Distribusi EC per Lantai - Struktur Atas (kgCO<sub>2</sub>e)

| Lantai | Skenario A | Skenario B | Skenario C |
|--------|------------|------------|------------|
| Lt. 1  | 45.436,728 | 45.609,466 | 42.308,932 |
| Lt. 2  | 94.323,736 | 94.759,676 | 87.188,205 |
| Lt. 3  | 94.323,736 | 94.759,676 | 87.188,205 |
| Lt. 4  | 94.323,736 | 94.759,676 | 87.188,205 |
| Lt. 5  | 94.340,575 | 94.830,128 | 87.258,656 |
| Lt. 6  | 87.978,599 | 88.336,208 | 80.693,357 |

| Lantai       | Skenario A         | Skenario B         | Skenario C         |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Rooftop      | 52.941,670         | 51.039,755         | 46.243,647         |
| Lift         | 6.838,205          | 6.832,940          | 6.222,209          |
| <b>Total</b> | <b>570.506,984</b> | <b>570.927,525</b> | <b>524.291,414</b> |

Adapun grafik EC per lantai setiap variasi yang disajikan pada **Gambar 4.33** berikut:



**Gambar 4.33** Profil EC per Lantai

Profil pada Gambar 4.33 memperlihatkan empat pola. Lantai 2 sampai lantai 4 menghasilkan nilai yang identik pada masing-masing skenario, yaitu 94.323,736 kgCO<sub>2e</sub> pada Skenario A, dan lantai 5 berselisih 16,839 kgCO<sub>2e</sub> atau 0,018% terhadap ketiganya. Kesamaan ini mengonfirmasi konsistensi pemodelan pada lantai tipikal. Lantai 1 menyumbang 45.436,728 kgCO<sub>2e</sub> atau sekitar 48% dari lantai tipikal karena [sebutkan sebabnya: lingkup elemen yang dimodelkan pada lantai tersebut]. Lantai 6, rooftop, dan lift menurun berturut-turut mengikuti berkurangnya luas lantai dan jumlah elemen struktur. Kurva Skenario A dan B hampir berimpit pada seluruh lantai, sedangkan kurva Skenario C berada konsisten di bawah keduanya.

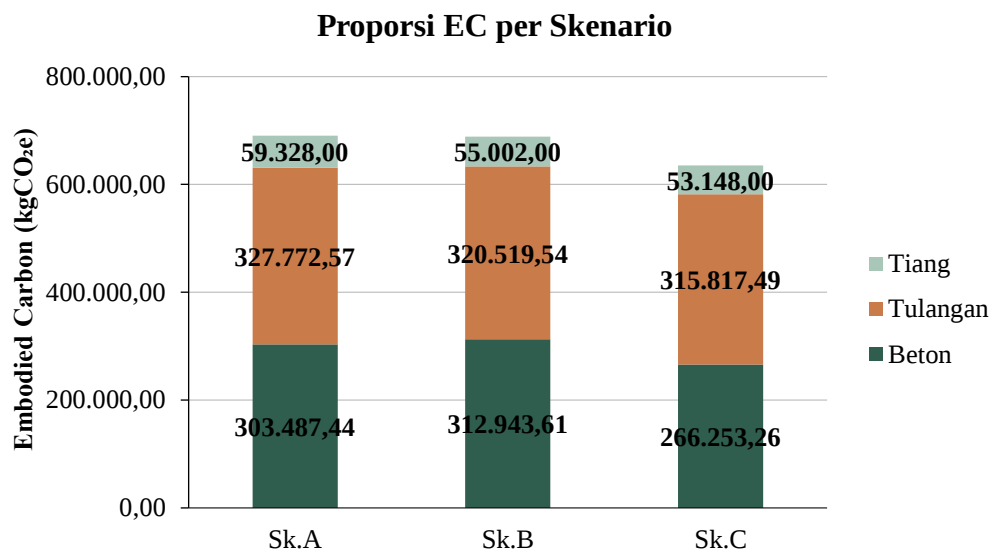
Pola yang paling perlu diperhatikan terjadi pada transisi Skenario A ke Skenario B. Pada lantai 1 sampai lantai 6, EC justru naik antara 0,380% dan 0,519%, sedangkan pada rooftop EC turun 3,592% atau 1.901,915 kgCO<sub>2e</sub>. Perbedaan arah ini disebabkan oleh proporsi pelat pada tiap lantai. Volume beton pelat tidak berubah antar skenario karena tebalnya dipertahankan 120 mm, sehingga hanya kolom dan balok yang volumenya dapat berkurang. Pada lantai tipikal, pelat mengisi 46,67% volume beton, yaitu 59,31 dari 127,08 m<sup>3</sup>, sehingga reduksi volume total hanya mencapai 7,649% dan lebih kecil daripada kenaikan ECF sebesar 11,949%, yang membuat EC beton naik. Pada rooftop, pelat hanya mengisi 29,16% volume, yaitu 21,22 dari 72,78 m<sup>3</sup>, sedangkan balok mengisi 57,67%, sehingga reduksi volume mencapai 12,641% dan melampaui kenaikan ECF, yang membuat EC beton turun. Arah perubahan karbon akibat kenaikan mutu karena itu tidak seragam di seluruh bangunan, melainkan bergantung pada proporsi elemen yang volumenya dapat berkurang terhadap elemen yang volumenya tetap. Setelah sebaran menurut lokasi diketahui, dekomposisi berikutnya dilakukan menurut komponen material penyusunnya.

Pemisahan menurut komponen material diperlukan karena tulangan merespons kenaikan mutu beton dengan cara yang berbeda dari beton itu sendiri. ECF baja bernilai konstan 1,72 kgCO<sub>2e</sub>/kg pada seluruh skenario, sehingga EC tulangan berubah semata-mata mengikuti massa terpasang dan tidak dipengaruhi interaksi volume dan ECF yang mengendalikan EC beton. Proporsi EC menurut komponen materialnya disajikan pada **Tabel 4.60** sebagai berikut:

**Tabel 4.60** Proporsi EC menurut Komponen Material (kgCO<sub>2e</sub>)

| <b>Komponen</b>  | <b>Skenario A</b>  | <b>Skenario B</b>  | <b>Skenario C</b>  |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| EC beton         | 303.487,437        | 312.943,608        | 266.253,256        |
| EC tulangan      | 327.772,574        | 320.519,540        | 315.817,490        |
| EC tiang pancang | 59.328,000         | 55.002,000         | 53.148,000         |
| <b>Total</b>     | <b>690.588,011</b> | <b>688.465,148</b> | <b>635.218,747</b> |

Adapun grafik proporsi EC per skenario yang disajikan pada **Gambar 4.34** berikut:



**Gambar 4.34** Proporsi EC per Skenario

Tabel 4.60 memperlihatkan bahwa tulangan merupakan penyumbang EC terbesar pada Skenario A (47,462% dari total) dan tetap menjadi komponen dominan pada Skenario C (49,718%). Fakta ini menunjukkan bahwa strategi reduksi karbon yang hanya berfokus pada mutu beton memiliki batas efektivitas, karena hampir separuh total EC bersumber dari baja tulangan yang faktor emisinya tidak dapat diubah melalui variasi mutu beton.

Pada Skenario B, yaitu EC beton justru meningkat 9.456,171 kgCO<sub>2</sub>e (3,116%) dibanding Skenario A meskipun volume beton turun 63,290 m<sup>3</sup>. Peningkatan ini disebabkan kenaikan ECF (11,949%) melampaui reduksi volume (8,291%), sehingga efek kenaikan intensitas karbon mengalahkan efek penghematan volume. Sebaliknya, pada Skenario C reduksi volume (13,328%) terjadi bersamaan dengan ECF yang praktis tidak berubah terhadap Skenario A, sehingga reduksi EC beton tercapai secara penuh sebesar 37.234,181 kgCO<sub>2</sub>e (12,269%).

Elemen pelat berfungsi sebagai kontrol internal dalam penelitian ini. Volume

beton pelat (325,190 m<sup>3</sup>) dan massa tulangan pelat (48.744,500 kg) identik pada ketiga skenario karena dimensi dan penulangan pelat tidak berubah akibat variasi mutu beton. Dengan demikian, perubahan EC pelat antar skenario merupakan cerminan langsung dari perubahan ECF semata, tanpa tercampur efek perubahan volume. EC pelat Skenario B (211.105,474 kgCO<sub>2</sub>e) yang lebih tinggi 6,877% dibanding Skenario A mengonfirmasi secara empiris bahwa kenaikan ECF pada Skenario B benar-benar menaikkan karbon, bukan artefak perhitungan.

Nilai ECI (*Embodied carbon Intensity*) dihitung dengan membagi EC total terhadap GFA sebesar 3.493 m<sup>2</sup> yang dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$ECI = \frac{EC_{total}}{Luas\ lantai\ total}$$

$$ECI_A = \frac{690.588,011}{3493} = 197,706 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$$

$$ECI_B = \frac{688.465,148}{3493} = 197,099 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$$

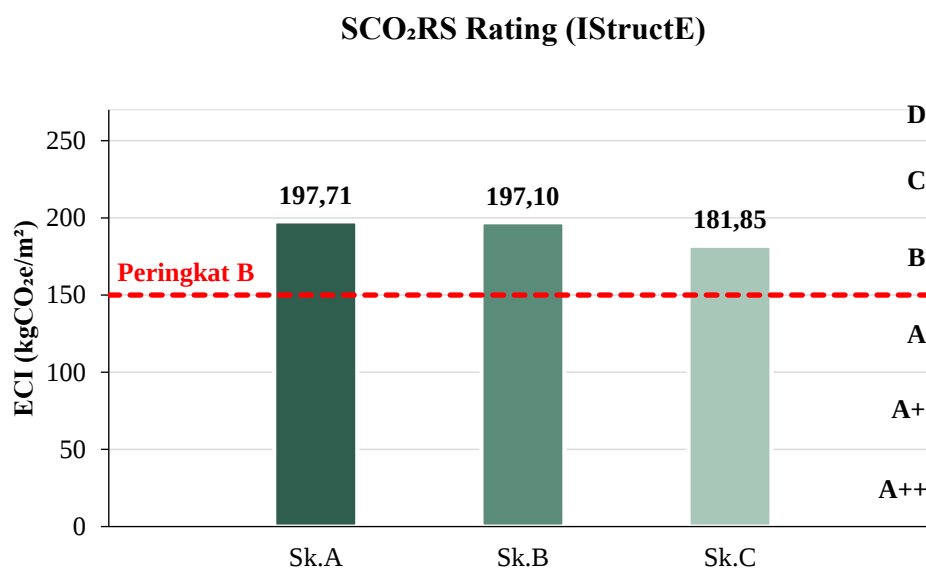
$$ECI_C = \frac{635.218,747}{3493} = 181,855 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$$

Hasil pemetaan ECI ke dalam skala SCO<sub>2</sub>RS (*Structural Carbon Rating System*) yang diterbitkan oleh *Institution of Structural Engineers* (IStructE) disajikan pada **Tabel 4.61** sebagai berikut:

**Tabel 4.61** Nilai ECI dan Peringkat SCO<sub>2</sub>RS per Skenario

| Skenario       | EC Total<br>(kgCO <sub>2</sub> e) | GFA<br>(m <sup>2</sup> ) | ECI<br>(kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> ) | Peringkat<br>SCO <sub>2</sub> RS |
|----------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|
| A (f'c 25 MPa) | 690.588,011                       | 3.493                    | 197,706                                      | B                                |
| B (f'c 30 MPa) | 688.465,148                       | 3.493                    | 197,099                                      | B                                |
| C (f'c 35 MPa) | 635.218,747                       | 3.493                    | 181,855                                      | B                                |

Adapun grafik nilai ECI dan peringkat SCO<sub>2</sub>RS per skenario yang disajikan pada **Gambar 4.35** berikut:



**Gambar 4.35** Peringkat SCO<sub>2</sub>RS per Skenario

Ketiga skenario memperoleh peringkat SCO<sub>2</sub>RS yang sama, yaitu B, karena seluruh nilai ECI berada dalam rentang  $150 < \text{ECI} \leq 200 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ . Perlu dicatat bahwa Skenario C dengan ECI 181,855 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> berjarak 18,145 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> dari ambang batas peringkat A ( $\text{ECI} \leq 150 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ ). Kesamaan peringkat ini menunjukkan bahwa variasi mutu beton dalam rentang yang diteliti tidak cukup untuk memindahkan bangunan ke kelas kinerja karbon yang lebih tinggi. Implikasinya, peningkatan peringkat SCO<sub>2</sub>RS memerlukan intervensi di luar variabel mutu beton, misalnya reduksi massa tulangan atau penggunaan baja tulangan dengan kandungan daur ulang tinggi, mengingat tulangan menyumbang hampir separuh EC total sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.60.

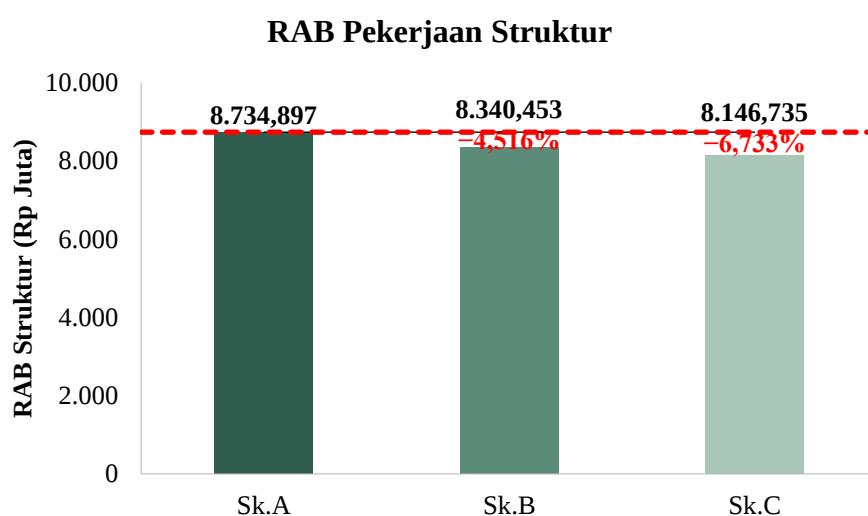
#### 4.9.3 Perhitungan Rencana Anggaran Biaya Struktur per Skenario

Berdasarkan hasil QTO dari model BIM dengan harga satuan pekerjaan mengacu pada AHSP dan Daftar Harga Satuan Pokok (DHSP). Rekapitulasi RAB disajikan pada **Tabel 4.62** sebagai berikut:

**Tabel 4.62** Rekapitulasi RAB Pekerjaan Struktur per Skenario

| Skenario       | RAB (Rp)          | Selisih terhadap Sk.A<br>(Rp) | Selisih terhadap<br>Sk.A (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|------------------------------|
| A (f'c 25 MPa) | 8.734.896.533,095 | -                             | -                            |
| B (f'c 30 MPa) | 8.340.452.910,183 | -394.443.622,912              | -4,516%                      |
| C (f'c 35 MPa) | 8.146.734.904,493 | -588.161.628,603              | -6,733%                      |

Adapun grafik RAB pekerjaan struktur per skenario yang disajikan pada **Gambar 4.36** berikut:



**Gambar 4.36** RAB Pekerjaan Struktur per Skenario

Tabel 4.62 menunjukkan bahwa kenaikan mutu beton justru menurunkan total biaya struktur. Skenario C menghasilkan RAB terendah, yaitu Rp 8.146.734.904,493 atau lebih rendah Rp 588.161.628,603 (6,733%) dibanding Skenario A. Pola ini bertolak belakang dengan asumsi awal bahwa mutu beton yang lebih tinggi akan berbiaya lebih mahal.

Mekanisme yang menjelaskan pola tersebut adalah bahwa kenaikan harga satuan beton per m<sup>3</sup> akibat mutu yang lebih tinggi dikompensasi secara berlebih oleh reduksi kuantitas pada beberapa lini pekerjaan sekaligus, yaitu penurunan volume beton struktur atas sebesar 101,740 m<sup>3</sup> (13,328%), penurunan massa tulangan sebesar 6.657,160 kg (3,771%), serta pengurangan jumlah titik tiang pancang dari 96 menjadi 86 titik (10,417%). Reduksi ini merupakan konsekuensi kapasitas penampang yang lebih besar pada mutu tinggi, sehingga dimensi elemen struktural dapat diperkecil sambil tetap memenuhi persyaratan SNI. Dengan kata lain, penghematan biaya tidak berasal dari material beton itu sendiri, melainkan dari efek berantai pengecilan dimensi terhadap seluruh rantai pekerjaan struktur.

#### 4.9.4 Analisis Rasio Reduksi Volume (RRV)

Rasio Reduksi Volume (RRV) mengukur besarnya penurunan kuantitas material antar skenario, dinyatakan dalam persen. Metrik ini dihitung secara terpisah untuk beton (berbasis volume, m<sup>3</sup>), tulangan (berbasis massa, kg), dan tiang pancang (berbasis massa, kg), serta dipisahkan menurut lingkup struktur atas dan struktur bawah. Pemisahan tersebut diperlukan agar RRV dapat dipasangkan secara konsisten dengan  $\Delta EC\%$  material yang sesuai pada perhitungan REKV di Subbab 4.9.6. yang dihitung dengan persamaan berikut:

$$RRV_{x \rightarrow y} = \frac{Q_x - Q_y}{Q_x} \times 100\%$$

dengan Q menyatakan volume beton (m<sup>3</sup>) atau massa tulangan/tiang (kg). Nilai RRV positif menandakan terjadi reduksi kuantitas, sedangkan nilai negatif menandakan terjadi penambahan kuantitas.

Sebagai contoh perhitungan, RRV beton struktur atas untuk transisi A→C dengan volume beton Skenario A sebesar 763,330 m<sup>3</sup> dan Skenario C sebesar 661,590 m<sup>3</sup> yang dihitung sebagai berikut:

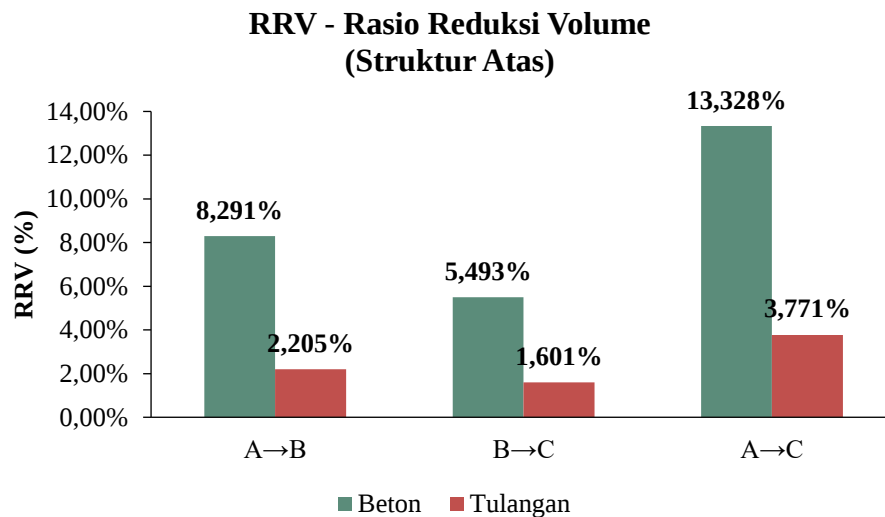
$$\begin{aligned}
 RRV_{beton,atas,A \rightarrow C} &= \frac{763,330 - 661,590}{763,330} \times 100\% \\
 &= \frac{101,740}{763,330} \times 100\% \\
 &= 13,328\%
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan RRV untuk seluruh pasangan dan lingkup disajikan pada **Tabel 4.63** sebagai berikut:

**Tabel 4.63** Rasio Reduksi Volume (RRV) per Material dan Lingkup Struktur (%)

| Lingkup<br>Struktur | RRV   | RRV   | RRV    | RRV      | RRV      | RRV      |
|---------------------|-------|-------|--------|----------|----------|----------|
|                     | Beton | Beton | Beton  | Tulangan | Tulangan | Tulangan |
|                     | A→B   | B→C   | A→C    | A→B      | B→C      | A→C      |
| Struktur atas       | 8,291 | 5,493 | 13,328 | 2,205    | 1,601    | 3,771    |
| Struktur bawah      | 4,971 | 2,199 | 7,060  | 2,308    | -0,220   | 2,093    |
| Tiang pancang       | 7,292 | 3,371 | 10,417 | -        | -        | -        |

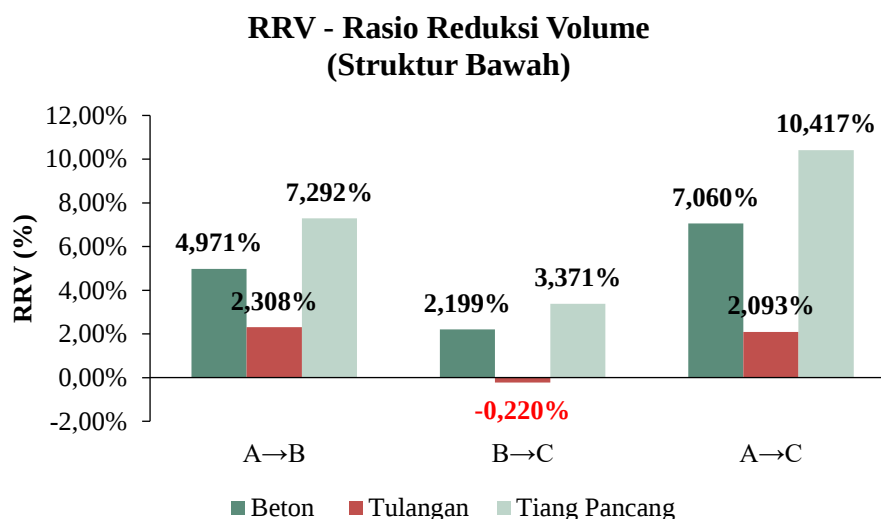
Adapun grafik hasil perhitungan RRV struktur atas yang disajikan pada **Gambar 4.37** berikut:



**Gambar 4.37** Rasio Reduksi Volume Struktur Atas

Tabel 4.63 menunjukkan bahwa reduksi kuantitas terjadi secara konsisten pada hampir seluruh material dan lingkup, dengan yang terbesar pada beton struktur atas (13,328% untuk A→C). Pola ini konsisten dengan mekanisme perencanaan kapasitas: mutu beton yang lebih tinggi meningkatkan kapasitas penampang, sehingga dimensi kolom dan balok dapat diperkecil.

Adapun grafik hasil perhitungan RRV struktur bawah yang disajikan pada **Gambar 4.38** berikut:



**Gambar 4.38** Rasio Reduksi Volume Struktur Bawah

Terdapat satu nilai negatif, yaitu RRV tulangan struktur bawah pada transisi B→C sebesar  $-0,220\%$ , yang menandakan massa tulangan struktur bawah justru bertambah 30,120 kg dari Skenario B (13.695,700 kg) ke Skenario C (13.725,820 kg). Penambahan ini bersumber dari *tie beam*, yang massa tulangannya naik dari 6.751,300 kg menjadi 6.943,120 kg. Fenomena ini dapat dijelaskan sebagai berikut: pengurangan jumlah titik tiang pancang dari 89 menjadi 86 titik memperbesar jarak antar *pilecap*, sehingga bentang efektif *tie beam* bertambah dan menuntut penulangan lentur yang lebih besar. Dengan demikian, reduksi pada satu elemen (tiang pancang) menghasilkan konsekuensi penambahan pada elemen lain (*tie beam*).

#### 4.9.5 Analisis Reduksi *Embodied carbon* ( $\Delta EC\%$ )

Metrik  $\Delta EC\%$  mengukur persentase perubahan *embodied carbon* antar skenario. Sebagaimana RRV, metrik ini dihitung secara terpisah untuk beton dan tulangan

agar dapat dipasangkan secara konsisten pada perhitungan REKV yang diformulasikan pada rumus berikut:

$$\Delta EC\%_{x \rightarrow y} = \frac{EC_x - EC_y}{EC_x} \times 100\%$$

Nilai  $\Delta EC\%$  positif menandakan terjadi reduksi karbon, sedangkan nilai negatif menandakan karbon justru meningkat.

Sebagai contoh perhitungan,  $\Delta EC\%$  beton struktur atas untuk transisi A→B dengan EC beton struktur atas Skenario A sebesar 266.847,588 kgCO<sub>2e</sub> dan Skenario B sebesar 273.964,588 kgCO<sub>2e</sub> yang dihitung sebagai berikut:

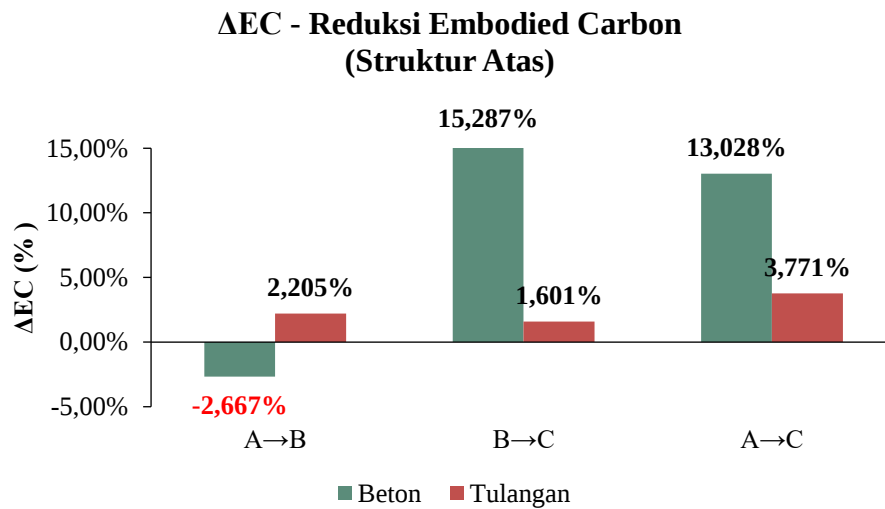
$$\begin{aligned} \Delta EC\%_{beton, atas, A \rightarrow B} &= \frac{266.847,588 - 273.964,588}{266.847,588} \times 100\% \\ &= \frac{-7.117,000}{266.847,588} \times 100\% \\ &= -2,667\% \end{aligned}$$

Rekapitulasi perhitungan  $\Delta EC\%$  disajikan pada **Tabel 4.64** sebagai berikut:

**Tabel 4.64** Reduksi *Embodied carbon* ( $\Delta EC\%$ )

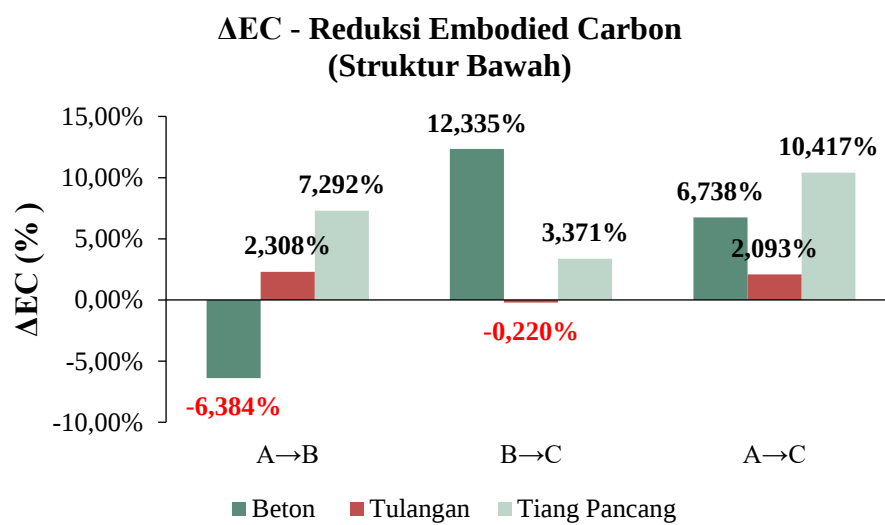
| Lingkup Struktur | $\Delta EC\%$ | $\Delta EC\%$ | $\Delta EC\%$ | $\Delta EC\%$ | $\Delta EC\%$ | $\Delta EC\%$ |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                  | Beton         | Beton         | Beton         | Tulangan      | Tulangan      | Tulangan      |
|                  | A→B           | B→C           | A→C           | A→B           | B→C           | A→C           |
| Struktur atas    | -2,667        | 15,287        | 13,028        | 2,205         | 1,601         | 3,771         |
| Struktur bawah   | -6,384        | 12,335        | 6,738         | 2,308         | -0,220        | 2,093         |
| Tiang pancang    | 7,292         | 3,371         | 10,417        | -             | -             | -             |

Adapun grafik perhitungan  $\Delta EC\%$  struktur atas yang disajikan pada **Gambar 4.39** berikut:



**Gambar 4.39** Reduksi *Embodied carbon* ( $\Delta EC\%$ ) Struktur Atas

Adapun grafik perhitungan  $\Delta EC\%$  struktur bawah yang disajikan pada **Gambar 4.40** berikut:



**Gambar 4.40** Reduksi *Embodied carbon* ( $\Delta EC\%$ ) Struktur Bawah

Tabel 4.64 memperlihatkan temuan paling signifikan dalam analisis ini, yaitu  $\Delta EC\%$  beton bernilai negatif pada transisi A→B, baik untuk struktur atas (-2,667%) maupun struktur bawah (-6,384%). Artinya, kenaikan mutu beton dari  $f'c$  25 MPa ke  $f'c$  30 MPa justru meningkatkan *embodied carbon* komponen beton, meskipun volume beton berkurang. Temuan ini secara langsung membantah asumsi umum bahwa kenaikan mutu beton selalu berbanding lurus dengan efisiensi karbon.

Penjelasan dapat diuraikan sebagai berikut. EC beton merupakan hasil perkalian volume dengan ECF. Pada transisi A→B, volume beton struktur atas turun 8,291%, namun ECF naik 11,949%. Karena kenaikan ECF melampaui penurunan volume, hasil perkaliannya justru naik. Sumber kenaikan ECF adalah kandungan semen yang meningkat dari 407 kg/m<sup>3</sup> ke 457 kg/m<sup>3</sup> (naik 12,285%) tanpa adanya mekanisme substitusi apapun. Dengan kata lain, Skenario B “membayar” kenaikan mutu sepenuhnya dengan semen, dan karena semen menyumbang lebih dari 98% karbon beton (Tabel 4.54), konsekuensinya langsung terasa pada EC.

Sebaliknya, transisi B→C menghasilkan  $\Delta EC\%$  beton yang sangat besar (15,287% untuk struktur atas), karena dua efek bekerja searah sekaligus: volume turun 5,493% dan ECF turun 10,401% (dari 0,166605 menjadi 0,149274 kgCO<sub>2e</sub>/kg) berkat substitusi *fly ash* sebesar 102 kg/m<sup>3</sup>.

Pada tingkat total keseluruhan (Tabel 4.57), transisi A→B tetap menghasilkan reduksi positif namun sangat kecil, yaitu 2.122,863 kgCO<sub>2e</sub> (0,307%). Reduksi yang nyaris nol ini bukan karena tidak ada perubahan, melainkan karena ketiga komponen berubah dengan arah yang berlawanan: EC beton naik 9.456,171 kgCO<sub>2e</sub>, sedangkan EC tulangan turun 7.253,034 kgCO<sub>2e</sub> dan EC tiang pancang turun 4.326,000 kgCO<sub>2e</sub>. Selisih ketiganya menyisakan reduksi neto sebesar 2.122,863 kgCO<sub>2e</sub>. Kondisi ini menunjukkan bahwa dekomposisi per komponen material diperlukan. Pada tingkat total, EC Skenario B lebih rendah 0,307% daripada Skenario A; pada tingkat komponen, EC betonnya justru meningkat 3,116%. Analisis yang berhenti pada angka total tidak menangkap perbedaan arah ini.

Transisi A→C menghasilkan reduksi karbon terbesar, yaitu 55.369,264 kgCO<sub>2e</sub> (8,018%), yang berasal dari kontribusi seluruh komponen secara searah: EC beton

turun 37.234,181 kgCO<sub>2</sub>e, EC tulangan turun 11.955,084 kgCO<sub>2</sub>e, dan EC tiang pancang turun 6.180,000 kgCO<sub>2</sub>e.

#### 4.9.6 Analisis Rasio Efisiensi Karbon – Volume (REKV)

REKV merupakan metrik diagnostik yang mengukur proporsi reduksi karbon yang berasal dari reduksi kuantitas material dibandingkan pengaruh perubahan ECF. Metrik ini dihitung sebagai rasio antara  $\Delta EC\%$  (Subbab 4.9.5) terhadap RRV (Subbab 4.9.4) pada material dan lingkup yang sama yang diformulasikan pada persamaan berikut:

$$REKV_{x \rightarrow y} = \frac{\Delta EC\%_{x \rightarrow y}}{RRV_{x \rightarrow y}}$$

Interpretasi nilai REKV mengikuti kaidah berikut:

- **REKV = 1,000** - reduksi karbon sepenuhnya bersumber dari reduksi kuantitas material, tanpa kontribusi perubahan ECF. Kondisi ini terjadi apabila ECF material konstan antar skenario.
- **REKV > 1,000** - reduksi karbon melampaui reduksi kuantitas, artinya penurunan ECF turut memperkuat reduksi karbon. Semakin besar nilainya, semakin dominan kontribusi perbaikan ECF.
- **0 < REKV < 1,000** - reduksi karbon lebih kecil daripada reduksi kuantitas, artinya kenaikan ECF menggerus sebagian manfaat reduksi volume.
- **REKV < 0 (negatif)** - reduksi kuantitas terjadi, namun karbon justru meningkat karena kenaikan ECF sepenuhnya membatalkan manfaat reduksi volume.

Sebagai contoh perhitungan, REKV beton struktur atas untuk transisi A→B sebagai berikut:

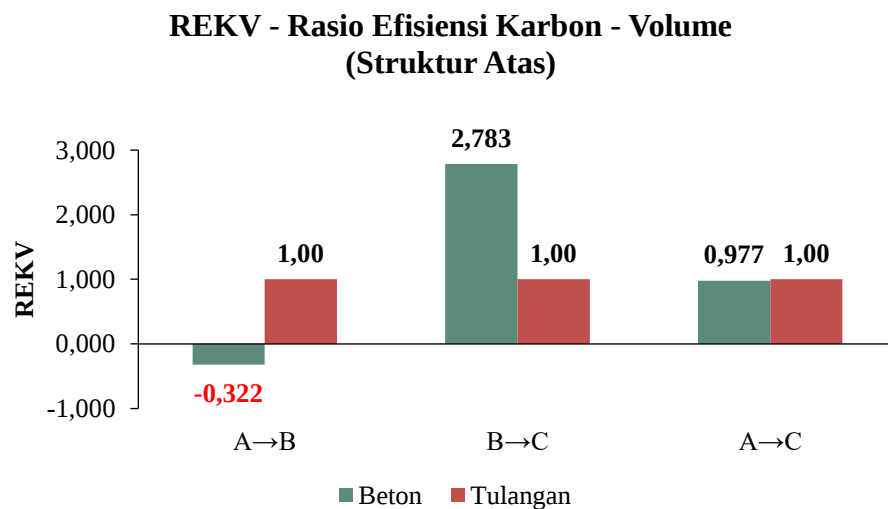
$$\begin{aligned} REKV_{beton,atas,A \rightarrow B} &= \frac{-2,667\%}{8,291\%} \\ &= -0,322 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan REKV untuk seluruh pasangan dan lingkup disajikan pada **Tabel 4.65**.

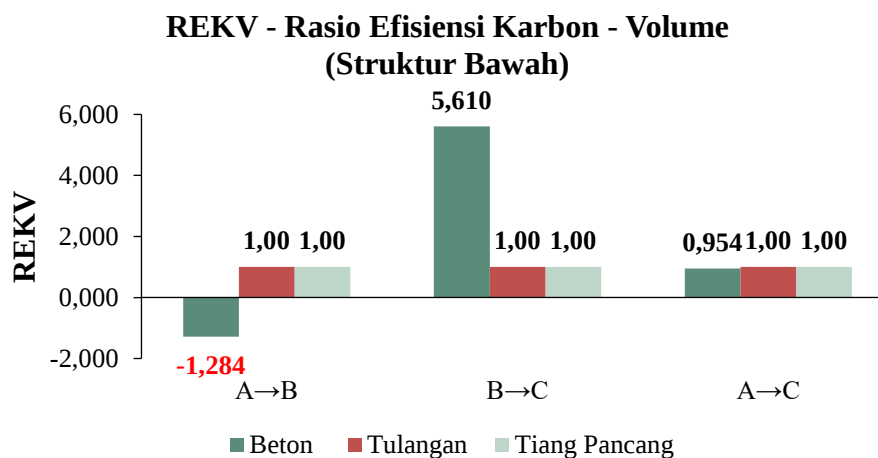
**Tabel 4.65** Rasio Efisiensi Karbon–Volume (REKV)

| Lingkup<br>Struktur | REKV   | REKV  | REKV  | REKV     | REKV     | REKV     |
|---------------------|--------|-------|-------|----------|----------|----------|
|                     | Beton  | Beton | Beton | Tulangan | Tulangan | Tulangan |
|                     | A→B    | B→C   | A→C   | A→B      | B→C      | A→C      |
| Struktur<br>atas    | -0,322 | 2,783 | 0,977 | 1,000    | 1,000    | 1,000    |
| Struktur<br>bawah   | -1,284 | 5,610 | 0,954 | 1,000    | 1,000    | 1,000    |
| Tiang<br>pancang    | 1,000  | 1,000 | 1,000 | -        | -        | -        |

Adapun grafik hasil perhitungan REKV yang disajikan pada **Gambar 4.41** dan **Gambar 4.42** berikut:



**Gambar 4.41** Rasio Efisiensi Karbon–Volume (REKV) Struktur Atas



**Gambar 4.42** Rasio Efisiensi Karbon–Volume (REKV) Struktur Bawah

REKV tulangan bernilai tepat 1,000 pada seluruh pasangan dan lingkup. Hasil ini bukan kebetulan, melainkan konsekuensi matematis dari ECF baja tulangan yang konstan ( $1,72 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ ) di seluruh skenario. Karena  $\text{EC tulangan} = \text{massa} \times 1,72$ , maka persentase perubahan EC tulangan pasti identik dengan persentase perubahan massanya, sehingga rasio keduanya selalu 1,000. Nilai ini berfungsi sebagai verifikasi internal bahwa rantai perhitungan RRV dan  $\Delta\text{EC}\%$  berjalan konsisten; penyimpangan dari 1,000 akan mengindikasikan kesalahan perhitungan. Hal yang sama berlaku untuk tiang pancang, yang ECF-nya juga konstan ( $0,107853 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ ).

REKV beton pada transisi A→B bernilai negatif ( $-0,322$  untuk struktur atas dan  $-1,284$  untuk struktur bawah). Tanda negatif ini secara diagnostik menyatakan bahwa reduksi volume beton benar-benar terjadi, namun karbon justru naik karena kenaikan ECF membatalkan seluruh manfaatnya dan bahkan berbalik arah. Nilai  $-1,284$  pada struktur bawah menunjukkan kondisi yang lebih parah dibanding struktur atas: kenaikan karbon bahkan melampaui besaran reduksi volumenya sendiri.

REKV beton pada transisi B→C bernilai jauh di atas 1,000 ( $2,783$  untuk struktur atas dan  $5,610$  untuk struktur bawah). Nilai ini menandakan bahwa reduksi karbon yang dicapai jauh melampaui apa yang dapat dijelaskan oleh reduksi volume

semata. Pada struktur bawah, nilai 5,610 berarti reduksi karbon 5,610 kali lebih besar daripada reduksi volumenya - selisih ini sepenuhnya berasal dari perbaikan ECF akibat substitusi *fly ash*. Dengan demikian, REKV berhasil mengisolasi kontribusi *mix design* sebagai mekanisme reduksi karbon yang terpisah dari mekanisme efisiensi struktural.

REKV beton pada transisi A→C mendekati 1,000 (0,977 untuk struktur atas dan 0,954 untuk struktur bawah). Nilai yang hampir tepat 1,000 ini memiliki makna diagnostik yang spesifik: reduksi karbon dari Skenario A ke Skenario C hampir sepenuhnya dijelaskan oleh reduksi volume material, sementara kontribusi ECF praktis nol. Hal ini konsisten dengan Tabel 4.54, yang menunjukkan ECF Skenario C (0,149274 kgCO<sub>2</sub>e/kg) hampir identik dengan Skenario A (0,148822 kgCO<sub>2</sub>e/kg) - hanya berbeda 0,304%. Sedikit di bawah 1,000 karena ECF Skenario C sesungguhnya masih sangat sedikit lebih tinggi dari Skenario A, sehingga menggerus tipis manfaat reduksi volume.

Temuan keempat ini memiliki implikasi desain yang penting. Keunggulan Skenario C terhadap Skenario A tidak bersumber dari beton yang “lebih hijau” per satuan massa, melainkan dari fakta bahwa Skenario C mampu mencapai mutu *f'c* 35 MPa tanpa menaikkan intensitas karbon betonnya, sehingga seluruh manfaat efisiensi struktural (reduksi volume 13,328%) dapat dipanen secara utuh. Peran *fly ash* di sini bukan menurunkan ECF di bawah Skenario A, melainkan menetralkan kenaikan ECF yang seharusnya menyertai kenaikan mutu - sebagaimana terjadi pada Skenario B yang tidak menggunakan substitusi.

#### 4.9.7 Analisis *Carbon Cost-Effectiveness Ratio* (CCER)

CCER mengukur efisiensi reduksi *embodied carbon* terhadap perubahan biaya secara langsung antar skenario, dihitung untuk tiga pasangan perbandingan: A→B, B→C, dan A→C dengan persamaan berikut:

$$CCER_{x \rightarrow y} = \frac{EC_x - EC_y}{RAB_y - RAB_x}$$

dengan satuan CCER adalah kgCO<sub>2</sub>e/Rupiah.

Sesuai ketentuan Bab III, CCER hanya dihitung apabila terjadi reduksi *embodied carbon* antar skenario, yaitu  $EC_y < EC_x$  sehingga pembilang ( $EC_x - EC_y$ ) bernilai positif. Apabila karbon tidak turun (pembilang  $\leq 0$ ), pasangan skenario tersebut dikeluarkan dari perhitungan CCER dan ditandai terdominasi pada aspek karbon tanpa diperingkat.

Hasil peninjauan gate karbon disajikan pada **Tabel 4.66** sebagai berikut:

**Tabel 4.66** Gate Karbon per Pasangan Skenario

| Pasangan | EC <sub>x</sub><br>(kgCO <sub>2e</sub> ) | EC <sub>y</sub><br>(kgCO <sub>2e</sub> ) | Pembilang EC <sub>x</sub> – EC <sub>y</sub><br>(kgCO <sub>2e</sub> ) | Status<br>Gate |
|----------|------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------|
| A→B      | 690.588,011                              | 688.465,148                              | +2.122,863                                                           | LOLOS          |
| B→C      | 688.465,148                              | 635.218,747                              | +53.246,402                                                          | LOLOS          |
| A→C      | 690.588,011                              | 635.218,747                              | +55.369,264                                                          | LOLOS          |

Ketiga pasangan memiliki pembilang positif, sehingga seluruhnya lolos gate karbon dan berhak diperingkat berdasarkan nilai CCER.

Perhitungan CCER untuk masing-masing pasangan diuraikan sebagai berikut:

Pasangan A→B:

$$\begin{aligned}
 CCER_{A \rightarrow B} &= \frac{690.588,011 - 688.465,148}{8.340.452.910,183 - 8.734.896.533,095} \\
 &= \frac{2.122,863}{-394.443.622,912} \\
 &= -5,382 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

Pasangan B→C:

$$\begin{aligned}
 CCER_{B \rightarrow C} &= \frac{688.465,148 - 635.218,747}{8.146.734.904,493 - 8.340.452.910,183} \\
 &= \frac{53.246,402}{-193.718.005,691} \\
 &= -2,749 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

Pasangan A→C:

$$CCER_{A \rightarrow C} = \frac{690.588,011 - 635.218,747}{8.146.734.904,493 - 8.734.896.533,095}$$

$$= \frac{55.369,264}{-588.161.628,603}$$

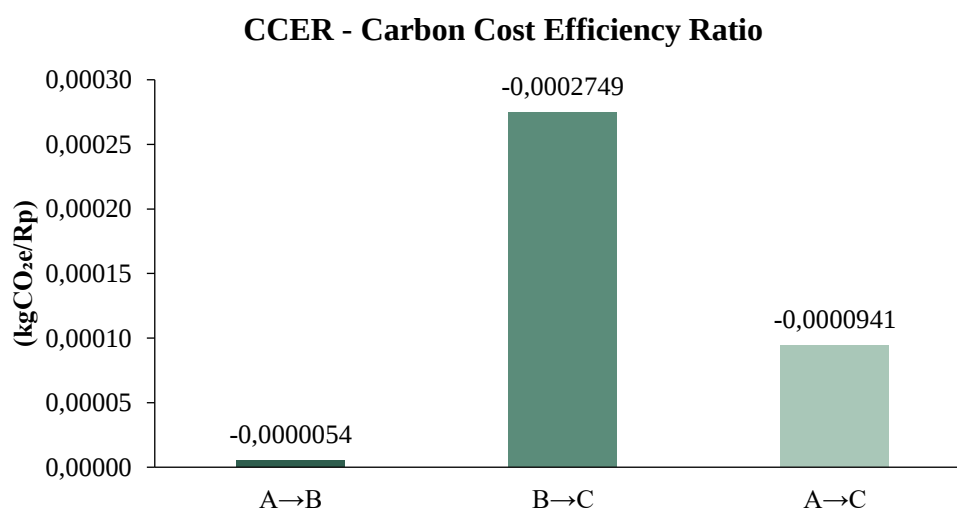
$$= -9,414 \times 10^{-5}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan CCER disajikan pada **Tabel 4.67** sebagai berikut:

**Tabel 4.67** Hasil Perhitungan CCER per Pasangan Skenario

| Pasangan | $\Delta EC = EC_x - EC_y$ (kgCO <sub>2</sub> e) | $\Delta RAB = RAB_y - RAB_x$ (Rp) | CCER (kgCO <sub>2</sub> e/Rp) | Arah Biaya  |
|----------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------|
| A→B      | +2.122,863                                      | -394.443.622,912                  | $-5,382 \times 10^{-6}$       | Biaya turun |
| B→C      | +53.246,402                                     | -193.718.005,691                  | $-2,749 \times 10^{-4}$       | Biaya turun |
| A→C      | +55.369,264                                     | -588.161.628,603                  | $-9,414 \times 10^{-5}$       | Biaya turun |

Adapun grafik hasil perhitungan CCER yang disajikan pada **Gambar 4.43** berikut:



**Gambar 4.43** Carbon Cost Efficiency Ratio

Seluruh nilai CCER pada Tabel 4.67 bertanda negatif. Tanda negatif ini bukan menandakan kinerja yang buruk, melainkan konsekuensi aritmetis dari penyebut ( $\Delta RAB$ ) yang bernilai negatif pada seluruh pasangan, karena RAB justru menurun seiring kenaikan mutu beton sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.62. Dengan pembilang positif (karbon turun, seluruh pasangan lolos gate) dan penyebut negatif (biaya turun), hasil baginya niscaya negatif.

Kondisi ini merepresentasikan bahwa reduksi *embodied carbon* dicapai bersamaan dengan penurunan biaya, sehingga tidak terjadi *trade-off* antara tujuan lingkungan dan tujuan ekonomi. Tidak terdapat “biaya tambahan” yang harus dibayar untuk memperoleh reduksi karbon.

Pembacaan nilai CCER mengikuti kaidah interpretasi yang telah ditetapkan pada Bab III, yaitu:

- Apabila biaya **naik** ( $\Delta RAB > 0$ , CCER positif): **nilai lebih tinggi lebih baik**, karena setiap tambahan biaya menghasilkan reduksi EC yang lebih besar.
- Apabila biaya **turun** ( $\Delta RAB < 0$ , CCER negatif): **nilai lebih rendah lebih baik**, karena setiap penurunan biaya menghasilkan reduksi EC yang lebih besar.

Seluruh pasangan pada penelitian ini berada pada kondisi biaya turun, maka kaidah kedua yang berlaku: **nilai CCER paling rendah (paling negatif) menandakan efisiensi karbon-biaya terbaik.**

Kaidah ini dapat diverifikasi melalui pembacaan nilai mutlakanya. Nilai CCER menyatakan besarnya reduksi karbon ( $\text{kgCO}_2\text{e}$ ) yang diperoleh per satu Rupiah perubahan biaya, sehingga semakin besar nilai mutlakanya, semakin banyak karbon yang direduksi per Rupiah. Seluruh nilai CCER pada penelitian ini bertanda negatif, nilai mutlak terbesar berarti nilai CCER terendah.

Peringkat berdasarkan nilai CCER disajikan pada **Tabel 4.68** sebagai berikut:

**Tabel 4.68** Peringkat Efisiensi Karbon–Biaya Berdasarkan CCER

| Peringkat | Pasangan | CCER<br>(kgCO <sub>2</sub> e/Rp) | Nilai Mutlak<br> CCER  | Interpretasi                                   |
|-----------|----------|----------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|
| 1         | B→C      | $-2,749 \times 10^{-4}$          | $2,749 \times 10^{-4}$ | Reduksi karbon terbesar per Rupiah penghematan |
| 2         | A→C      | $-9,414 \times 10^{-5}$          | $9,414 \times 10^{-5}$ | Reduksi karbon menengah per Rupiah penghematan |
| 3         | A→B      | $-5,382 \times 10^{-6}$          | $5,382 \times 10^{-6}$ | Reduksi karbon terkecil per Rupiah penghematan |

Transisi B→C menempati peringkat pertama dengan CCER  $-2,749 \times 10^{-4}$  kgCO<sub>2</sub>e/Rp. Nilai ini bermakna bahwa setiap Rp 1,00 penghematan biaya pada transisi dari Skenario B ke Skenario C menghasilkan reduksi  $2,749 \times 10^{-4}$  kgCO<sub>2</sub>e. Dinyatakan dalam satuan yang lebih intuitif, setiap penghematan Rp 1.000.000,00 menghasilkan reduksi sebesar 274,866 kgCO<sub>2</sub>e.

Sebagai pembandingan, transisi A→B hanya menghasilkan 5,382 kgCO<sub>2</sub>e reduksi per Rp 1.000.000,00 penghematan - sekitar 51 kali lebih kecil. Perbedaan yang sangat besar ini konsisten dengan temuan pada Subbab 4.9.5, yaitu bahwa perubahan antar komponen pada transisi A→B berlawanan arah sehingga reduksi karbon totalnya hanya 2.122,863 kgCO<sub>2</sub>e, meskipun penghematan biayanya cukup besar (Rp 394.443.622,912). Dengan kata lain, Skenario B “menghabiskan” potensi penghematan biaya tanpa memberikan imbal balik reduksi karbon yang berarti.

Transisi A→C, meskipun menghasilkan reduksi karbon absolut terbesar (55.369,264 kgCO<sub>2</sub>e), menempati peringkat kedua karena penghematan biayanya juga paling besar (Rp 588.161.628,603), sehingga rasio karbon per Rupiah-nya lebih kecil dibanding B→C. Hal ini menunjukkan CCER mengukur efisiensi perubahan karbon terhadap perubahan biaya, bukan besarnya reduksi karbon itu sendiri.

#### 4.9.8 Penentuan Skenario Optimal

##### 1. Tingkat 1 - Syarat mutlak (kepatuhan SNI)

Seluruh skenario yang tidak memenuhi persyaratan struktural SNI 2847-2019, SNI 1727-2020, dan SNI 1726-2019 dieliminasi tanpa mempertimbangkan nilai EC maupun RAB. Hasil evaluasi kepatuhan disajikan pada **Tabel 4.69** sebagai berikut:

**Tabel 4.69** Hasil Evaluasi Tingkat 1 - Kepatuhan SNI

| Skenario | $f'_c$<br>(MPa) | Kepatuhan<br>SNI 2847-<br>2019 | Kepatuhan<br>SNI 1726-<br>2019 | Kepatuhan<br>SNI 1727-<br>2020 | Status |
|----------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|
| A        | 25              | Terpenuhi                      | Terpenuhi                      | Terpenuhi                      | LOLOS  |
| B        | 30              | Terpenuhi                      | Terpenuhi                      | Terpenuhi                      | LOLOS  |
| C        | 35              | Terpenuhi                      | Terpenuhi                      | Terpenuhi                      | LOLOS  |

Ketiga skenario memenuhi seluruh persyaratan struktural sebagaimana telah diuraikan pada Subbab 4.2 hingga 4.7, sehingga seluruhnya lolos Tingkat 1 dan berhak dilanjutkan ke tingkat berikutnya.

##### 2. Tingkat 2 - Penyaringan kelayakan transisi (gate karbon)

Setiap transisi berpasangan disaring melalui prasyarat gate reduksi karbon, yaitu transisi wajib menurunkan *embodied carbon* ( $EC_y < EC_x$ ). Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.66, ketiga pasangan (A→B, B→C, A→C) memiliki pembilang positif dan lolos gate karbon. Tidak terdapat transisi yang gagal gate.

##### 3. Tingkat 3 - Penentuan optimal (CCER)

Di antara transisi yang lolos Tingkat 2, skenario optimal ditentukan berdasarkan nilai CCER terbaik. Sesuai kaidah interpretasi Bab III dan kondisi biaya turun yang berlaku pada seluruh pasangan (Subbab 4.9.7), nilai CCER terbaik adalah nilai

**paling rendah**, yaitu yang memberikan reduksi *embodied carbon* terbesar per satuan penghematan biaya.

Berdasarkan Tabel 4.68, pasangan dengan CCER terbaik adalah **B→C** dengan nilai  $-2,749 \times 10^{-4}$  kgCO<sub>2e</sub>/Rp. Skenario tujuan dari transisi tersebut adalah **Skenario C**. Penetapan Skenario C sebagai skenario optimal didukung oleh konvergensi seluruh indikator sebagaimana direkapitulasi pada **Tabel 4.70** sebagai berikut:

**Tabel 4.70** Rekapitulasi Indikator Penentuan Skenario Optimal

| <b>Indikator</b>                             | <b>Skenario A</b> | <b>Skenario B</b> | <b>Skenario C</b>             | <b>Skenario Terbaik</b> |
|----------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Kepatuhan SNI                                | LOLOS             | LOLOS             | LOLOS                         | Setara                  |
| EC total (kgCO <sub>2e</sub> )               | 690.588,011       | 688.465,148       | 635.218,747                   | C                       |
| ECI (kgCO <sub>2e</sub> /m <sup>2</sup> )    | 197,706           | 197,099           | 181,855                       | C                       |
| Peringkat SCO <sub>2</sub> RS                | B                 | B                 | B                             | Setara                  |
| RAB (Rp)                                     | 8.734.896.533,095 | 8.340.452.910,183 | 8.146.734.904,493             | C                       |
| Volume beton struktur atas (m <sup>3</sup> ) | 763,330           | 700,040           | 661,590                       | C                       |
| Massa tulangan struktur atas (kg)            | 176.546,160       | 172.652,870       | 169.889,000                   | C                       |
| Jumlah titik tiang pancang                   | 96                | 89                | 86                            | C                       |
| CCER terbaik                                 | -                 | -                 | $-2,749 \times 10^{-4}$ (B→C) | C                       |

Tabel 4.70 menunjukkan bahwa Skenario C unggul pada seluruh indikator kuantitatif secara simultan: EC total terendah, ECI terendah, RAB terendah, volume material terendah, serta CCER terbaik. Tidak terdapat indikator yang menunjukkan keunggulan Skenario A atau Skenario B, kecuali peringkat SCO<sub>2</sub>RS yang setara pada ketiganya.

Dengan demikian, **Skenario C (f'c 35 MPa) ditetapkan sebagai skenario optimal**. Penetapan ini bersifat tegas karena Skenario C mendominasi kedua skenario lainnya - memberikan *embodied carbon* lebih rendah dan biaya lebih rendah secara bersamaan, sehingga tidak memerlukan pertimbangan *trade-off* apapun.

Perlu ditegaskan bahwa keunggulan Skenario C tidak bersumber dari mutu betonnya yang lebih tinggi semata. Sebagaimana ditunjukkan oleh perbandingan dengan Skenario B, kenaikan mutu tanpa substitusi SCM justru menaikkan intensitas karbon beton. Keunggulan Skenario C bersumber dari kombinasi dua mekanisme yang bekerja searah: (1) efisiensi struktural, yaitu mutu tinggi memungkinkan pengecilan dimensi elemen sehingga volume beton, massa tulangan, dan jumlah tiang pancang berkurang; dan (2) netralisasi ECF, yaitu substitusi *fly ash* menahan kenaikan intensitas karbon yang seharusnya menyertai kenaikan kandungan semen, sehingga manfaat efisiensi struktural dapat dipanen secara utuh tanpa tergerus. Analisis REKV pada Subbab 4.9.6 (nilai 0,977 untuk A→C) mengonfirmasi mekanisme kedua ini secara kuantitatif.

#### **4.10 Building Information Modeling 5D (BIM 5D)**

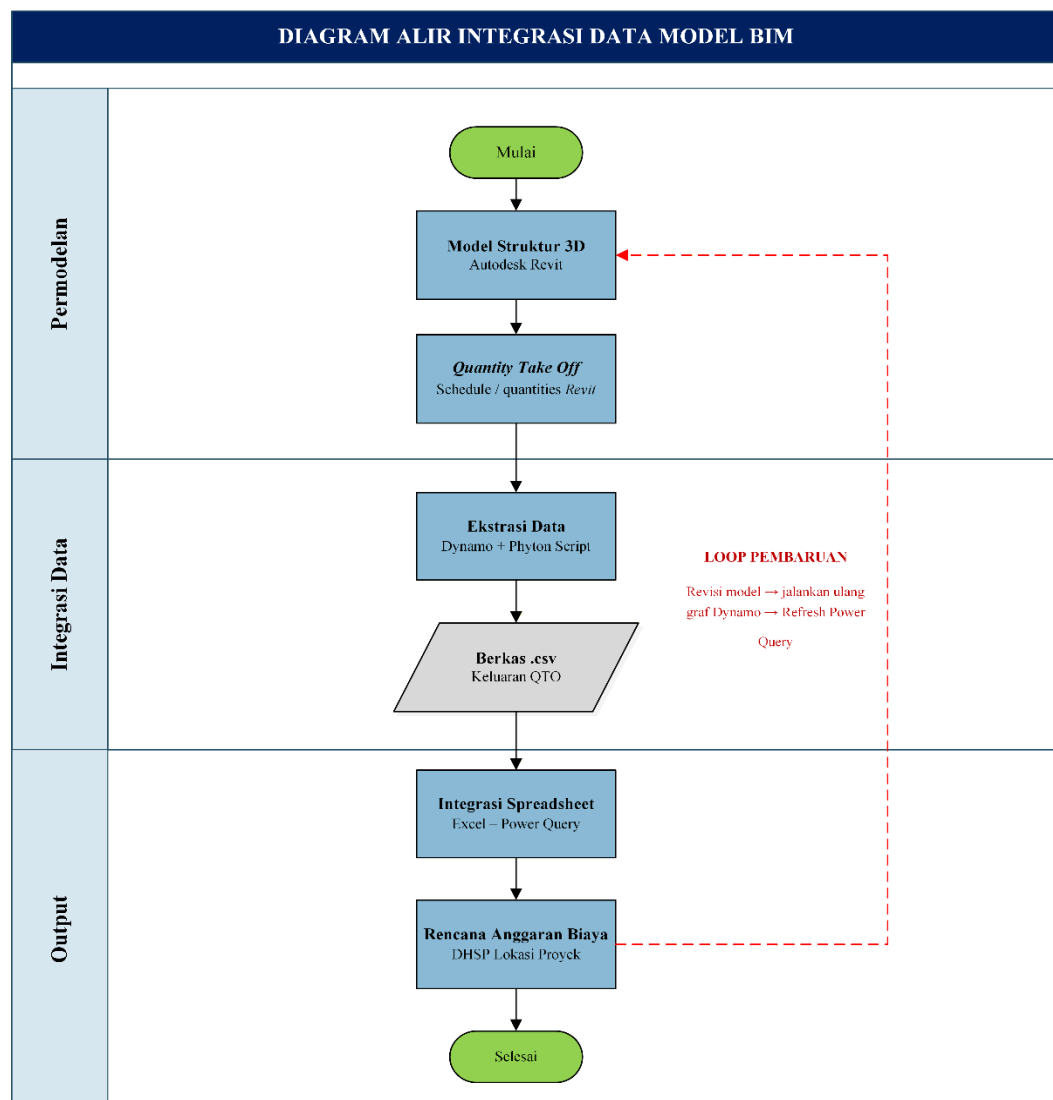
Penerapan *Building Information Modeling* (BIM) 5D pada objek penelitian, yaitu integrasi antara model geometri tiga dimensi (3D), dimensi waktu (4D), dan dimensi biaya (5D). Pembahasan disusun mengikuti urutan aliran data yang sebenarnya terjadi dalam penelitian ini: mulai dari ekstraksi kuantitas pekerjaan dari model *Revit*, penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB), penyusunan jadwal pelaksanaan, hingga penggabungan informasi biaya dan waktu ke dalam satu model terpadu.

#### 4.10.1 Rencana Anggaran Biaya (RAB) Konstruksi

##### 1. Alur Integrasi Data Model BIM

Ekstraksi kuantitas dalam penelitian ini dilakukan melalui serangkaian algoritma *visual programming* menggunakan *Dynamo* yang terintegrasi di dalam *Autodesk Revit*, dengan keluaran berupa tabel volume pekerjaan yang terhubung langsung ke *excel* estimasi biaya.

Alur integrasi secara menyeluruh disajikan pada **Gambar 4.44** berikut:



**Gambar 4.44** Diagram Alir Integrasi Data Model BIM ke RAB

Tahapan integrasi sistem tersebut diuraikan sebagai berikut:

**a. Inisiasi Lingkungan Kerja (*Workspace Initialization*)**

Proses dimulai dengan meluncurkan aplikasi *visual programming Dynamo* yang terintegrasi di dalam *Autodesk Revit*. Selanjutnya, lembar kerja baru (*New Project/Workspace*) dibuat sebagai kanvas untuk menyusun algoritma ekstraksi data.

**b. Pemilihan Tabel Rekapitulasi (*View Selection*)**

Langkah pertama dalam ekstraksi adalah menggunakan node *Views*. Node ini berfungsi untuk mengidentifikasi dan menyeleksi *Schedule/Quantities*, yaitu tabel rekapitulasi material yang memuat volume, luas, jumlah, dan dimensi elemen, yang telah disusun sebelumnya di dalam *Revit*. Pada penelitian ini disusun delapan *schedule* untuk setiap skenario mutu beton, sebagaimana dirangkum pada **Tabel 4.71** sebagai berikut:

**Tabel 4.71** *Schedule/Quantities Revit*

| No | Nama<br><i>Schedule</i> | Elemen yang Dicakup                                  | Besaran Keluaran Utama                                                     |
|----|-------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 1  | <i>SpunPile Volume</i>  | Tiang pancang PC <i>spun pile</i><br>Ø400 mm         | Panjang total (m'), jumlah titik, volume (m <sup>3</sup> )                 |
| 2  | <i>Pilecap Volume</i>   | <i>Pilecap</i> PC1–PC6 dan beton pengisi tiang       | Volume (m <sup>3</sup> ), luas bekisting (m <sup>2</sup> ), jumlah         |
| 3  | <i>PIT Lift Volume</i>  | Dinding dan pelat <i>pit lift</i>                    | Volume (m <sup>3</sup> ), luas bekisting (m <sup>2</sup> )                 |
| 4  | <i>Column Volume</i>    | Kolom K1, K2, dan KA                                 | Volume (m <sup>3</sup> ), luas bekisting (m <sup>2</sup> ), jumlah, tinggi |
| 5  | <i>Beam Volume</i>      | <i>Tie beam</i> TB dan balok B1, B2, B3, B4, BB, RBL | Volume (m <sup>3</sup> ), luas bekisting (m <sup>2</sup> ), bentang        |

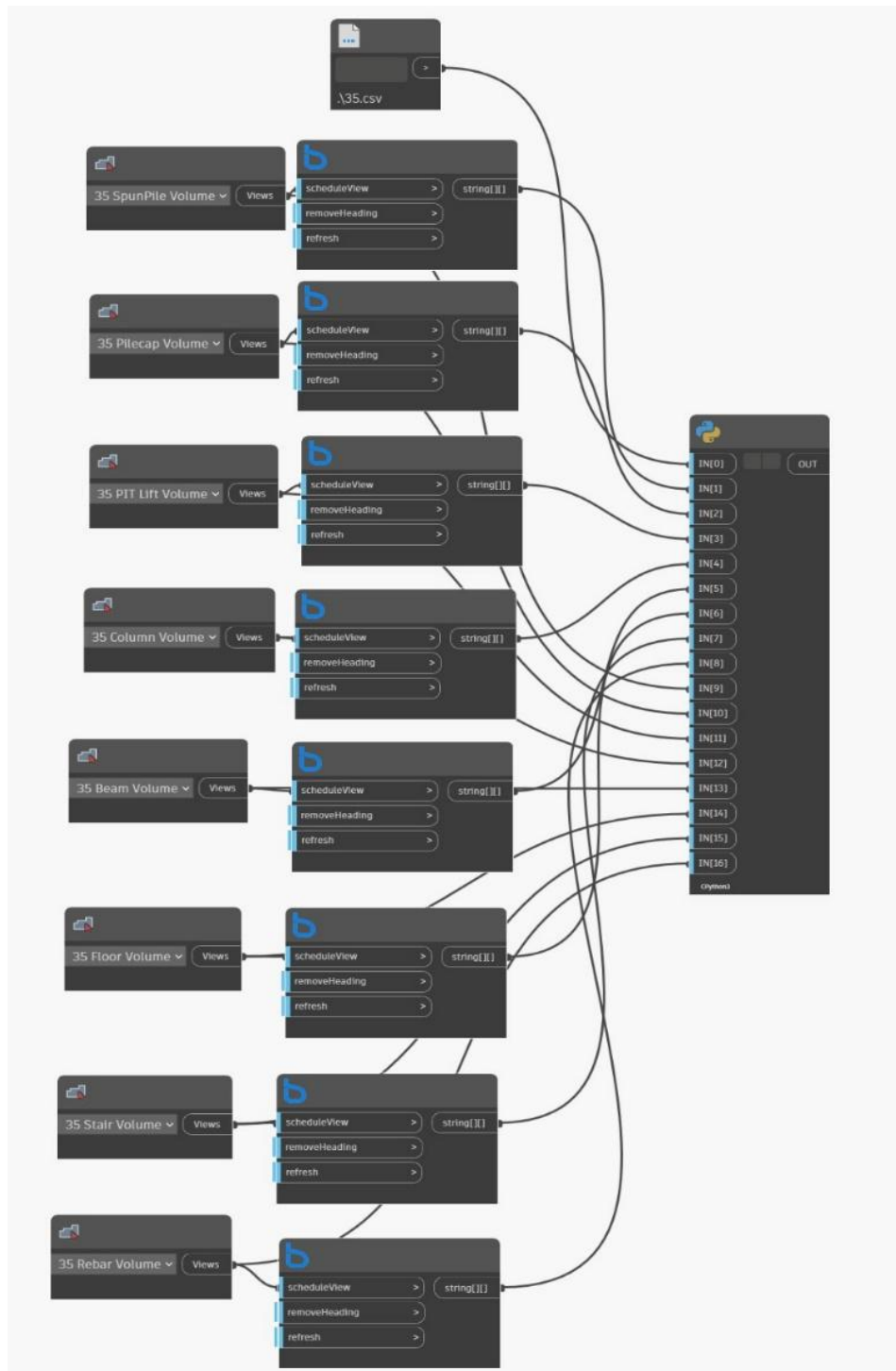
| No | Nama<br><i>Schedule</i>       | Elemen yang Dicakup              | Besaran Keluaran Utama                                     |
|----|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 6  | <i>Floor</i><br><i>Volume</i> | Pelat lantai dan pelat atap      | Volume (m <sup>3</sup> ), luas (m <sup>2</sup> )           |
| 7  | <i>Stair</i><br><i>Volume</i> | Tangga Tipe A dan Tipe B         | Volume (m <sup>3</sup> ), luas bekisting (m <sup>2</sup> ) |
| 8  | <i>Rebar</i><br><i>Volume</i> | Tulangan seluruh elemen struktur | Diameter (mm), panjang total (m), massa (kg)               |

Perlu ditegaskan bahwa kolom luas pada *schedule* elemen beton bukan merupakan luas permukaan total elemen, melainkan luas bidang yang membutuhkan bekisting, karena bidang yang berimpit dengan elemen lain telah dikecualikan melalui parameter terhitung (*calculated parameter*). Sebagai contoh verifikasi, *pilecap* PC1 berukuran 1,0 m × 1,0 m dengan tinggi 0,8 m sebanyak 3 unit menghasilkan volume 2,400 m<sup>3</sup> dan luas bekisting 9,600 m<sup>2</sup>, yang setara dengan  $3 \times (4 \times 1,0 \text{ m} \times 0,8 \text{ m})$ , yakni hanya keempat sisi tegaknya. Dengan demikian, luas bekisting dalam RAB tetap bersumber dari model BIM dan tidak dihitung ulang secara manual.

### c. Penguraian Data Mentah (*Data Parsing dengan BimorphNodes*)

Data *view* yang telah dipilih kemudian dihubungkan ke node *Schedule.GetData*. Node ini merupakan bagian dari *custom package BimorphNodes*, yang secara spesifik memiliki utilitas untuk membaca, mengekstrak, dan menguraikan data dari *schedule Revit* ke dalam format *list* (daftar matriks) di dalam *Dynamo*, sehingga data tersebut dapat dimanipulasi lebih lanjut. Setiap node *Schedule.GetData* dikonfigurasi dengan parameter *removeHeading* dan *refresh* agar keluarannya berupa data murni tanpa baris judul dan selalu termutakhirkan terhadap kondisi model saat graf dijalankan.

Susunan graf *Dynamo* yang digunakan disajikan pada **Gambar 4.45** sebagai berikut:

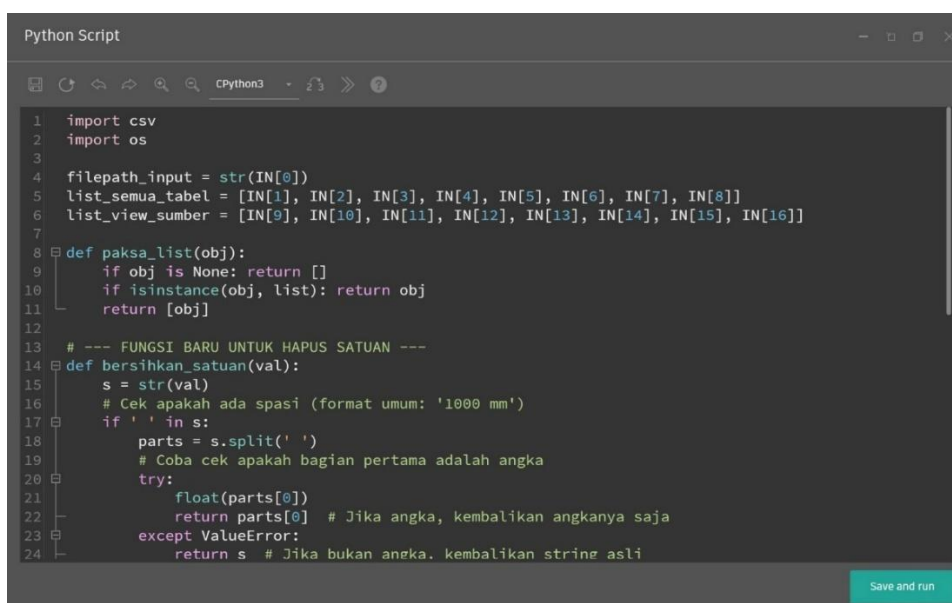


**Gambar 4.45** Algoritma *Dynamo* untuk Ekstraksi Kuantitas

#### d. Pemrosesan Data Kustom (*Python Scripting*)

Keluaran (*output*) data dari *BimorphNodes* didistribusikan ke dalam node *Python Script* sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.46**. Node ini menerima tujuh belas masukan, yaitu IN [0] berupa alamat direktori berkas keluaran, IN [1]–IN [8] berupa delapan *list* data hasil penguraian *schedule*, dan IN [9]–IN [16] berupa delapan nama *view* yang berfungsi sebagai penanda judul blok pada berkas keluaran.

Pada node ini disematkan kode yang dirancang untuk melakukan tahapan *data cleansing*. Fungsi *paksa\_list* menyeragamkan tipe keluaran agar seluruh masukan diperlakukan sebagai *list*, sedangkan fungsi *bersihkan\_satuan* mengeksekusi logika pembersihan satuan dimensi dengan memisahkan nilai numerik dari karakter satuan yang menyertainya (misalnya “1000 mm” menjadi “1000”) serta menormalisasi *delimiter* agar format data siap dibaca sebagai tipe data numerik. Tahapan ini bersifat menentukan, sebab keluaran *schedule Revit* secara bawaan menyertakan simbol satuan pada nilai numeriknya sehingga tidak dapat langsung dioperasikan secara aritmetik di dalam *excel*. Adapun contoh gambar dokumentasi untuk *Python Script* yang disajikan pada **Gambar 4.46** berikut:



```

Python Script
C:\Python3

1  import csv
2  import os
3
4  filepath_input = str(IN[0])
5  list_semua_tabel = [IN[1], IN[2], IN[3], IN[4], IN[5], IN[6], IN[7], IN[8]]
6  list_view_sumber = [IN[9], IN[10], IN[11], IN[12], IN[13], IN[14], IN[15], IN[16]]
7
8  def paksa_list(obj):
9      if obj is None: return []
10     if isinstance(obj, list): return obj
11     return [obj]
12
13  # --- FUNGSI BARU UNTUK HAPUS SATUAN ---
14  def bersihkan_satuan(val):
15      s = str(val)
16      # Cek apakah ada spasi (format umum: '1000 mm')
17      if ' ' in s:
18          parts = s.split(' ')
19          # Coba cek apakah bagian pertama adalah angka
20          try:
21              float(parts[0])
22              return parts[0] # Jika angka, kembalikan angkanya saja
23          except ValueError:
24              return s # Jika bukan angka, kembalikan string asli

```

**Gambar 4.46** Node *Python Script* untuk *Data Cleansing* Keluaran *Schedule*

#### e. Ekspor Data Geometri (*File Path & CSV Output*)

Hasil pemrosesan *Python* tersebut dihubungkan dengan parameter masukan berupa node *Directory Path* atau *File Path*. Sistem diprogram untuk secara otomatis menuliskan *list* data yang telah bersih menjadi dokumen *Comma Separated Values* (.csv) pada direktori lokal yang telah ditentukan, dengan penamaan berkas mengikuti skenario mutu beton (25.csv, 30.csv, dan 35.csv). Setiap blok data dalam berkas tersebut diawali baris penanda nama *schedule* asalnya, sehingga ketertelusuran antara baris data dan elemen sumbernya tetap terjaga.

#### f. Integrasi Data Otomatis (*Excel Power Query*)

Tahap akhir dilakukan di luar lingkungan BIM, yakni pada *Microsoft Excel*. Berkas CSV yang dihasilkan tidak dimasukkan melalui metode salin-tempel manual, melainkan diimpor menggunakan fitur *Get Data (Power Query)*. Melalui fitur ini, *Excel* secara otomatis mengidentifikasi struktur dokumen, memecah *delimiter* menjadi kolom-kolom yang sesuai, dan memuatnya sebagai *Excel Table* dinamis pada lembar kerja tersendiri untuk setiap skenario. Hasil pemuatan data tersebut ditunjukkan pada **Gambar 4.47** sebagai berikut:

The screenshot shows an Excel spreadsheet with data imported from CSV files. The data is organized into tables for different concrete strength scenarios (25, 30, 35). The table includes columns for Item, Type, and various numerical values.

| Item | Type                          | Value 1 | Value 2 | Value 3 |
|------|-------------------------------|---------|---------|---------|
| 00.  | SpunPile PC1                  | 90      | 3       | 6,95    |
| 00.  | SpunPile PC2                  | 1020    | 34      | 78,81   |
| 00.  | SpunPile PC3                  | 1174    | 39      | 90,7    |
| 00.  | SpunPile PC4                  | 240     | 8       | 18,54   |
| 00.  | SpunPile PC5                  | 360     | 12      | 27,82   |
| 00.  | Beton Pengisi Tiang Fc 10 Mpa | 4,9     | 0       | 96      |
| 00.  | PC1 1000.1000                 | 2,8     | 9,6     | 3       |
| 00.  | PC2 1000.2000                 | 27,2    | 81,6    | 17      |
| 00.  | PC3 2000.2000                 | 28,81   | 66,01   | 13      |
| 00.  | PC4 2000.2000                 | 6,4     | 12,8    | 2       |
| 00.  | PC5 2000.3000                 | 9,6     | 16      | 2       |
| 00.  | PIT Lift 120 m                | 0,76    | 6,3     |         |

**Gambar 4.47** Hasil Pemuatan Data CSV ke Excel melalui Power Query

Kedelapan *schedule* dimuat sebagai satu berkas tunggal, penamaan kolom hasil pemuatan bersifat generik (*Column1* hingga *Column7*) dan makna setiap kolom mengikuti blok *schedule* yang bersangkutan. Pemetaan kolom tersebut disajikan pada **Tabel 4.72** dan menjadi acuan bagi rumus pengambilan nilai pada lembar kerja RAB.

**Tabel 4.72** Pemetaan Kolom Berkas CSV Hasil Ekstraksi

| <b>Blok Schedule</b>                                 | <b>Column1</b>          | <b>Column2</b>            | <b>Column3</b>           | <b>Column4</b>                   | <b>Column5</b>           |
|------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| <i>SpunPile Volume</i>                               | <i>Workset</i>          | Tipe tiang                | Panjang total (m')       | Jumlah titik                     | Volume (m <sup>3</sup> ) |
| <i>Pilecap, PIT Lift, Column, Beam, Floor, Stair</i> | <i>Workset</i> (lantai) | Tipe elemen               | Volume (m <sup>3</sup> ) | Luas bekisting (m <sup>2</sup> ) | Jumlah / bentang         |
| <i>Rebar Volume</i>                                  | <i>Workset</i> (lantai) | <i>Partition</i> (elemen) | Diameter (mm)            | Panjang total (m)                | Massa (kg)               |

Rangkaian tahapan tersebut membentuk satu jalur data tunggal dari model geometri hingga rekapitulasi biaya. Perlu ditegaskan bahwa pembaruan data pada alur ini bersifat semi-otomatis, bukan sepenuhnya otomatis. Apabila terjadi revisi dimensi elemen pada model *Revit*, pembaruan RAB tidak terjadi dengan sendirinya pada saat berkas *Excel* dibuka. Urutan pembaruan yang harus ditempuh adalah: (1) model *Revit* direvisi sehingga *schedule* ikut termutakhirkan; (2) graf *Dynamo* dijalankan ulang, baik melalui antarmuka *Dynamo* maupun *Dynamo Player*, sehingga berkas .csv ditimpa dengan data terbaru; dan (3) *Excel Table* hasil *Power Query* dimutakhirkan melalui perintah *Refresh*, yang selanjutnya memicu perhitungan ulang seluruh lembar kerja RAB yang mengacu pada tabel tersebut. Dengan demikian, kontribusi utama alur ini bukan pada peniadaan intervensi pengguna, melainkan pada penghapusan tahap pemindahan data secara manual, yang merupakan sumber galat transkripsi paling umum dalam estimasi

konvensional. Rantai pembaruan tersebut ditunjukkan sebagai *loop* bergaris putus-putus pada **Gambar 4.44**.

Keluaran akhir dari alur ini berupa satu tabel volume pekerjaan untuk setiap scenario mutu beton, yang mencakup volume beton (m<sup>3</sup>), luas bekisting (m<sup>2</sup>), dan massa tulangan (kg) pada setiap elemen dan setiap lantai bangunan. Tabel volume tersebut selanjutnya dikalikan dengan harga satuan pekerjaan yang disusun berdasarkan AHSP Bidang Cipta Karya SE DJBK No. 47 Tahun 2026 dan Daftar Harga Satuan Pekerjaan (DHSP) dengan harga upah, bahan dan alat sesuai dengan lokasi proyek, sehingga terbentuk RAB untuk masing-masing skenario.

## 2. Rencana Anggaran Biaya Skenario Optimum

Skenario C (f'c 35 MPa) ditetapkan sebagai skenario optimum berdasarkan hasil pembahasan analisis *embodied carbon*. Rencana Anggaran Biaya lengkap untuk skenario tersebut, yang mencakup pekerjaan persiapan, pekerjaan tanah, pekerjaan struktur bawah, dan pekerjaan beton struktur atas dari Lantai 1 hingga Lantai Roof Lift, disajikan pada **Tabel 4.73** sebagai berikut:

**Tabel 4.73** Rencana Anggaran Biaya Konstruksi Lengkap (f'c 35 MPa)

| NO         | JENIS PEKERJAAN                                         | SATUAN | VOLUME | HARGA SATUAN     | JUMLAH HARGA (Rp.) | TOTAL HARGA (Rp.)          |
|------------|---------------------------------------------------------|--------|--------|------------------|--------------------|----------------------------|
| <b>I</b>   | <b>PEKERJAAN PERSIAPAN</b>                              |        |        |                  |                    | <b>Rp 511.930.670,99</b>   |
| 1          | Pembersihan lapangan dan perataan                       | m2     | 527,00 | Rp 11.291,50     | Rp 5.950.620,50    |                            |
| 2          | Pengukuran dan pemasangan bouwplank/marking             | m'     | 104,00 | Rp 151.823,65    | Rp 15.789.659,60   |                            |
| 3          | Direksi Keet / gudang kerja                             | m2     | 28,80  | Rp 2.281.203,98  | Rp 65.698.674,62   |                            |
| 4          | Papan nama proyek                                       | buah   | 1,00   | Rp 1.381.464,26  | Rp 1.381.464,26    |                            |
| 5          | Pagar pengaman kerja                                    | m'     | 130,00 | Rp 495.951,50    | Rp 64.473.695,00   |                            |
| 6          | Jalan sementara                                         | m2     | 500,00 | Rp 598.293,55    | Rp 299.146.773,20  |                            |
| 7          | Mobilisasi dan Demobilisasi Alat                        | Ls     | 1,00   | Rp 59.489.783,81 | Rp 59.489.783,81   |                            |
| <b>II</b>  | <b>PEKERJAAN TANAH</b>                                  |        |        |                  |                    | <b>Rp 9.780.000,00</b>     |
| 1          | <b>Galian tanah :</b>                                   |        |        |                  |                    |                            |
|            | - Galian tanah pile cap                                 | m3     | 79,20  | Rp 36.149,85     | Rp 2.860.000,00    |                            |
|            | - Galian tanah tie beam                                 | m3     | 46,47  | Rp 36.149,85     | Rp 1.600.000,00    |                            |
|            | - Galian tanah pit lift                                 | m3     | 6,40   | Rp 36.149,85     | Rp 200.000,00      |                            |
| 2          | <b>Urugan tanah dipadatkan</b>                          |        |        |                  |                    |                            |
|            | - Urugan kembali bekas galian                           | m3     | 44,02  | Rp 56.457,50     | Rp 2.400.000,00    |                            |
| 3          | <b>Urugan pasir :</b>                                   |        |        |                  |                    |                            |
|            | - Urugan pasir dipadatkan dibawah lantai kerja pile cap | m3     | 4,40   | Rp 311.074,50    | Rp 1.360.000,00    |                            |
|            | - Urugan pasir dipadatkan dibawah lantai kerja tie beam | m3     | 3,87   | Rp 311.074,50    | Rp 1.200.000,00    |                            |
|            | - Urugan pasir dipadatkan dibawah Lantai Kerja pit lift | m3     | 0,53   | Rp 311.074,50    | Rp 160.000,00      |                            |
| <b>III</b> | <b>PEKERJAAN STRUKTUR BAWAH</b>                         |        |        |                  |                    | <b>Rp 2.483.391.585,63</b> |

| NO   | JENIS PEKERJAAN                                  | SATUAN | VOLUME   | HARGA SATUAN    | JUMLAH HARGA (Rp.)  | TOTAL HARGA (Rp.)          |
|------|--------------------------------------------------|--------|----------|-----------------|---------------------|----------------------------|
| 1    | <b>Pekerjaan Pondasi Tiang Pancang</b>           |        |          |                 |                     |                            |
|      | - Pekerjaan jacking pile                         | m'     | 2.584,00 | Rp 767.412,07   | Rp 1.982.992.793,53 |                            |
|      | - Pekerjaan penyambungan las tiang               | m'     | 223,68   | Rp 16.630,19    | Rp 3.719.865,13     |                            |
|      | - Pekerjaan hacking pile head                    | m3     | 83,88    | Rp 67.298,00    | Rp 5.644.991,49     |                            |
| 2    | <b>Pile cap beton type PC1, 100 x 100 cm</b>     |        |          |                 |                     |                            |
|      | - Lantai Kerja Beton f'c 10 Mpa dibawah pile cap | m3     | 0,30     | Rp 1.214.782,80 | Rp 364.434,84       |                            |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                    | m3     | 4,80     | Rp 1.558.992,60 | Rp 7.483.164,48     |                            |
|      | - Pembesian Ulir D19                             | kg     | 252,39   | Rp 16.866,32    | Rp 4.256.891,01     |                            |
|      | - Pembesian Ulir D13                             | kg     | 172,86   | Rp 16.866,32    | Rp 2.915.512,42     |                            |
|      | - Bekisting                                      | m2     | 19,20    | Rp 195.085,44   | Rp 3.745.640,45     |                            |
| 3    | <b>Pile cap beton type PC2, 100 x 200 cm</b>     |        |          |                 |                     |                            |
|      | - Lantai Kerja Beton f'c 10 Mpa dibawah pile cap | m3     | 1,90     | Rp 1.214.782,80 | Rp 2.308.087,32     |                            |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                    | m3     | 30,40    | Rp 1.558.992,60 | Rp 47.393.375,04    |                            |
|      | - Pembesian Ulir D19                             | kg     | 1.480,09 | Rp 16.866,32    | Rp 24.963.674,53    |                            |
|      | - Pembesian Ulir D13                             | kg     | 956,20   | Rp 16.866,32    | Rp 16.127.577,10    |                            |
|      | - Bekisting                                      | m2     | 91,20    | Rp 195.085,44   | Rp 17.791.792,13    |                            |
| 4    | <b>Pile cap beton type PC3, 200 x 200 cm</b>     |        |          |                 |                     |                            |
|      | - Lantai Kerja Beton f'c 10 Mpa dibawah pile cap | m3     | 1,82     | Rp 1.214.782,80 | Rp 2.210.904,70     |                            |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                    | m3     | 26,57    | Rp 1.558.992,60 | Rp 41.422.433,38    |                            |
|      | - Pembesian Ulir D19                             | kg     | 1.177,66 | Rp 16.866,32    | Rp 19.862.792,77    |                            |
|      | - Pembesian Ulir D13                             | kg     | 831,27   | Rp 16.866,32    | Rp 14.020.467,49    |                            |
|      | - Bekisting                                      | m2     | 62,04    | Rp 195.085,44   | Rp 12.103.100,70    |                            |
| 6    | <b>Pile cap beton type PC6, 300 x 200 cm</b>     |        |          |                 |                     |                            |
|      | - Lantai Kerja Beton f'c 10 Mpa dibawah pile cap | m3     | 0,60     | Rp 1.214.782,80 | Rp 728.869,68       |                            |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                    | m3     | 4,80     | Rp 1.558.992,60 | Rp 7.483.164,48     |                            |
|      | - Pembesian Ulir D19                             | kg     | 215,00   | Rp 16.866,32    | Rp 3.626.259,23     |                            |
|      | - Pembesian Ulir D13                             | kg     | 123,26   | Rp 16.866,32    | Rp 2.078.942,85     |                            |
|      | - Bekisting                                      | m2     | 8,00     | Rp 195.085,44   | Rp 1.560.683,52     |                            |
| 7    | <b>Tie beam beton type TB1, 300 x 500 cm</b>     |        |          |                 |                     |                            |
|      | - Lantai Kerja Beton f'c 10 Mpa dibawah tie beam | m3     | 3,85     | Rp 1.214.782,80 | Rp 4.676.913,78     |                            |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                    | m3     | 24,36    | Rp 1.558.992,60 | Rp 37.977.059,74    |                            |
|      | - Pembesian Ulir D19                             | kg     | 5.570,09 | Rp 17.701,24    | Rp 98.597.522,19    |                            |
|      | - Pembesian Ulir D10                             | kg     | 1.373,03 | Rp 17.420,74    | Rp 23.919.204,13    |                            |
|      | - Bekisting                                      | m2     | 258,18   | Rp 207.002,07   | Rp 53.443.794,43    |                            |
| 8    | <b>Pit lift, t = 12 cm</b>                       |        |          |                 |                     |                            |
|      | - Lantai Kerja Beton f'c 10 Mpa dibawah pit lift | m3     | 0,53     | Rp 1.214.782,80 | Rp 643.834,88       |                            |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                    | m3     | 2,04     | Rp 1.558.992,60 | Rp 3.180.344,90     |                            |
|      | - Pembesian Ulir D19                             | kg     | 258,61   | Rp 16.866,32    | Rp 4.361.799,53     |                            |
|      | - Pembesian Ulir D13                             | kg     | 148,68   | Rp 16.866,32    | Rp 2.507.684,75     |                            |
|      | - Bekisting                                      | m2     | 6,30     | Rp 281.190,69   | Rp 1.771.501,35     |                            |
| 9    | <b>Beton Pengisi Tiang t = 1 meter</b>           |        |          |                 |                     |                            |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                    | m3     | 4,44     | Rp 1.558.992,60 | Rp 6.921.927,14     |                            |
|      | - Pembesian Ulir D13                             | kg     | 927,44   | Rp 17.701,24    | Rp 16.416.841,74    |                            |
|      | - Pembesian Polos Ø8                             | kg     | 239,24   | Rp 17.420,74    | Rp 4.167.738,79     |                            |
| IV   | <b>PEKERJAAN BETON STRUKTUR ATAS</b>             |        |          |                 |                     | <b>Rp 5.663.343.318,87</b> |
| IV.1 | <b>PEKERJAAN BETON LANTAI 1 (DASAR)</b>          |        |          |                 |                     | <b>Rp 429.807.676,01</b>   |
| 1    | <b>Kolom beton type K1, 50 x 50 cm</b>           |        |          |                 |                     |                            |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                    | m3     | 26,01    | Rp 1.558.992,60 | Rp 40.549.397,53    |                            |
|      | - Pembesian Ulir D19                             | kg     | 9.765,48 | Rp 17.701,24    | Rp 172.861.144,26   |                            |
|      | - Pembesian Ulir D10                             | kg     | 2.051,71 | Rp 17.420,74    | Rp 35.742.314,67    |                            |
|      | - Bekisting                                      | m2     | 212,80   | Rp 223.779,25   | Rp 47.620.225,14    |                            |
| 2    | <b>Kolom beton type K2, 40 x 40 cm</b>           |        |          |                 |                     |                            |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                    | m3     | 6,55     | Rp 1.558.992,60 | Rp 10.211.401,53    |                            |
|      | - Pembesian Ulir D19                             | kg     | 3.050,55 | Rp 17.701,24    | Rp 53.998.529,88    |                            |

| NO   | JENIS PEKERJAAN                             | SATUAN | VOLUME   | HARGA SATUAN    | JUMLAH HARGA (Rp.) | TOTAL HARGA (Rp.)        |
|------|---------------------------------------------|--------|----------|-----------------|--------------------|--------------------------|
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 637,84   | Rp 17.420,74    | Rp 11.111.647,35   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 66,88    | Rp 223.779,25   | Rp 14.966.356,47   |                          |
| 3    | <b>Balok beton type BB, 20 x 30 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 0,31     | Rp 1.558.992,60 | Rp 483.287,71      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 51,73    | Rp 17.701,24    | Rp 915.685,35      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 12,24    | Rp 17.701,24    | Rp 216.663,23      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 23,41    | Rp 17.420,74    | Rp 407.819,62      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 3,96     | Rp 233.497,75   | Rp 924.651,10      |                          |
| 4    | <b>Balok beton type RBL 20 x 30 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 30 Mpa, ready mix               | m3     | 0,65     | Rp 1.558.992,60 | Rp 1.013.345,19    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 93,12    | Rp 17.701,24    | Rp 1.648.339,84    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 51,60    | Rp 17.420,74    | Rp 898.910,39      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 10,08    | Rp 233.497,75   | Rp 2.353.657,36    |                          |
| 5    | <b>Pekerjaan tangga A</b>                   |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 2,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.193.690,09    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 410,75   | Rp 16.866,32    | Rp 6.927.841,76    |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                        | kg     | 60,11    | Rp 16.585,82    | Rp 996.973,76      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 21,63    | Rp 226.504,19   | Rp 4.899.285,63    |                          |
| 6    | <b>Pekerjaan tangga B</b>                   |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 2,63     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.100.150,54    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 408,26   | Rp 16.866,32    | Rp 6.885.844,62    |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                        | kg     | 59,98    | Rp 16.585,82    | Rp 994.817,60      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 21,57    | Rp 226.504,19   | Rp 4.885.695,38    |                          |
| IV.2 | <b>PEKERJAAN BETON LANTAI 2 (EL. +3.30)</b> |        |          |                 |                    | <b>Rp 937.863.991,28</b> |
| 1    | <b>Kolom beton type K1, 50 x 50 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 22,54    | Rp 1.558.992,60 | Rp 35.139.693,20   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 5.546,45 | Rp 17.701,24    | Rp 98.179.064,78   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 1.907,14 | Rp 17.420,74    | Rp 33.223.797,71   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 184,80   | Rp 223.779,25   | Rp 41.354.406,05   |                          |
| 2    | <b>Kolom beton type K2, 40 x 40 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 5,74     | Rp 1.558.992,60 | Rp 8.948.617,52    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 1.723,58 | Rp 17.701,24    | Rp 30.509.510,13   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 594,60   | Rp 17.420,74    | Rp 10.358.374,38   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 58,08    | Rp 223.779,25   | Rp 12.997.099,04   |                          |
| 3    | <b>Balok beton type B1, 25 x 45 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 8,85     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.797.084,51   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 2.745,74 | Rp 17.701,24    | Rp 48.603.013,70   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 1.058,66 | Rp 17.420,74    | Rp 18.442.644,84   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 132,25   | Rp 233.497,75   | Rp 30.880.077,90   |                          |
| 4    | <b>Balok beton type B2, 25 x 35 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 8,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.547.645,69   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 1.920,56 | Rp 17.701,24    | Rp 33.996.301,18   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 307,71   | Rp 17.701,24    | Rp 5.446.849,79    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 853,12   | Rp 17.420,74    | Rp 14.861.985,12   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 136,58   | Rp 233.497,75   | Rp 31.891.123,17   |                          |
| 5    | <b>Balok beton type B3, 20 x 35 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 4,87     | Rp 1.558.992,60 | Rp 7.592.293,96    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 1.453,61 | Rp 17.701,24    | Rp 25.730.705,29   |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                        | kg     | 91,05    | Rp 17.420,74    | Rp 1.586.158,74    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 473,65   | Rp 17.420,74    | Rp 8.251.335,40    |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 89,17    | Rp 233.497,75   | Rp 20.820.994,68   |                          |
| 6    | <b>Balok beton type B4, 20 x 25 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 0,55     | Rp 1.558.992,60 | Rp 857.445,93      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 165,80   | Rp 17.701,24    | Rp 2.934.866,26    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 77,13    | Rp 17.420,74    | Rp 1.343.661,98    |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 16,80    | Rp 233.497,75   | Rp 3.922.762,26    |                          |
| 7    | <b>Balok beton type BB, 20 x 30 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 0,31     | Rp 1.558.992,60 | Rp 483.287,71      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 51,73    | Rp 17.701,24    | Rp 915.685,35      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 12,24    | Rp 17.701,24    | Rp 216.663,23      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 23,41    | Rp 17.420,74    | Rp 407.819,62      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 3,96     | Rp 233.497,75   | Rp 924.651,10      |                          |
| 8    | <b>Balok beton type RBL 20 x 30 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 0,65     | Rp 1.558.992,60 | Rp 1.013.345,19    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 93,12    | Rp 17.701,24    | Rp 1.648.339,84    |                          |

| NO   | JENIS PEKERJAAN                             | SATUAN | VOLUME   | HARGA SATUAN    | JUMLAH HARGA (Rp.) | TOTAL HARGA (Rp.)        |
|------|---------------------------------------------|--------|----------|-----------------|--------------------|--------------------------|
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 51,60    | Rp 17.420,74    | Rp 898.910,39      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 10,08    | Rp 233.497,75   | Rp 2.353.657,36    |                          |
| 9    | <b>Plat t=12cm</b>                          |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 53,99    | Rp 1.558.992,60 | Rp 84.170.010,47   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 7.858,30 | Rp 16.866,32    | Rp 132.540.618,17  |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 449,89   | Rp 273.820,69   | Rp 123.189.190,22  |                          |
| 10   | <b>Pekerjaan tangga A</b>                   |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 2,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.193.690,09    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 410,75   | Rp 16.866,32    | Rp 6.927.841,76    |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                        | kg     | 60,11    | Rp 16.585,82    | Rp 996.973,76      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 21,63    | Rp 226.504,19   | Rp 4.899.285,63    |                          |
| 11   | <b>Pekerjaan tangga B</b>                   |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 2,63     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.100.150,54    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 408,26   | Rp 16.866,32    | Rp 6.885.844,62    |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                        | kg     | 59,98    | Rp 16.585,82    | Rp 994.817,60      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 21,57    | Rp 226.504,19   | Rp 4.885.695,38    |                          |
| IV.3 | <b>PEKERJAAN BETON LANTAI 3 (EL. +6.60)</b> |        |          |                 |                    | <b>Rp 937.863.991,28</b> |
| 1    | <b>Kolom beton type K1, 50 x 50 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 22,54    | Rp 1.558.992,60 | Rp 35.139.693,20   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 5.546,45 | Rp 17.701,24    | Rp 98.179.064,78   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 1.907,14 | Rp 17.420,74    | Rp 33.223.797,71   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 184,80   | Rp 223.779,25   | Rp 41.354.406,05   |                          |
| 2    | <b>Kolom beton type K2, 40 x 40 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 5,74     | Rp 1.558.992,60 | Rp 8.948.617,52    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 1.723,58 | Rp 17.701,24    | Rp 30.509.510,13   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 594,60   | Rp 17.420,74    | Rp 10.358.374,38   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 58,08    | Rp 223.779,25   | Rp 12.997.099,04   |                          |
| 3    | <b>Balok beton type B1, 25 x 45 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 8,85     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.797.084,51   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 2.745,74 | Rp 17.701,24    | Rp 48.603.013,70   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 1.058,66 | Rp 17.420,74    | Rp 18.442.644,84   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 132,25   | Rp 233.497,75   | Rp 30.880.077,90   |                          |
| 4    | <b>Balok beton type B2, 25 x 35 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 8,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.547.645,69   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 1.920,56 | Rp 17.701,24    | Rp 33.996.301,18   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 307,71   | Rp 17.701,24    | Rp 5.446.849,79    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 853,12   | Rp 17.420,74    | Rp 14.861.985,12   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 136,58   | Rp 233.497,75   | Rp 31.891.123,17   |                          |
| 5    | <b>Balok beton type B3, 20 x 35 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 4,87     | Rp 1.558.992,60 | Rp 7.592.293,96    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 1.453,61 | Rp 17.701,24    | Rp 25.730.705,29   |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                        | kg     | 91,05    | Rp 17.420,74    | Rp 1.586.158,74    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 473,65   | Rp 17.420,74    | Rp 8.251.335,40    |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 89,17    | Rp 233.497,75   | Rp 20.820.994,68   |                          |
| 6    | <b>Balok beton type B4, 20 x 25 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 0,55     | Rp 1.558.992,60 | Rp 857.445,93      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 165,80   | Rp 17.701,24    | Rp 2.934.866,26    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 77,13    | Rp 17.420,74    | Rp 1.343.661,98    |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 16,80    | Rp 233.497,75   | Rp 3.922.762,26    |                          |
| 7    | <b>Balok beton type BB, 20 x 30 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 0,31     | Rp 1.558.992,60 | Rp 483.287,71      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 51,73    | Rp 17.701,24    | Rp 915.685,35      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 12,24    | Rp 17.701,24    | Rp 216.663,23      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 23,41    | Rp 17.420,74    | Rp 407.819,62      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 3,96     | Rp 233.497,75   | Rp 924.651,10      |                          |
| 8    | <b>Balok beton type RBL 20 x 30 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 0,65     | Rp 1.558.992,60 | Rp 1.013.345,19    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 93,12    | Rp 17.701,24    | Rp 1.648.339,84    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 51,60    | Rp 17.420,74    | Rp 898.910,39      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 10,08    | Rp 233.497,75   | Rp 2.353.657,36    |                          |
| 9    | <b>Plat t=12cm</b>                          |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 53,99    | Rp 1.558.992,60 | Rp 84.170.010,47   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 7.858,30 | Rp 16.866,32    | Rp 132.540.618,17  |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 449,89   | Rp 273.820,69   | Rp 123.189.190,22  |                          |
| 10   | <b>Pekerjaan tangga A</b>                   |        |          |                 |                    |                          |

| NO   | JENIS PEKERJAAN                             | SATUAN | VOLUME   | HARGA SATUAN    | JUMLAH HARGA (Rp.) | TOTAL HARGA (Rp.)        |
|------|---------------------------------------------|--------|----------|-----------------|--------------------|--------------------------|
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 2,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.193.690,09    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 410,75   | Rp 16.866,32    | Rp 6.927.841,76    |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                        | kg     | 60,11    | Rp 16.585,82    | Rp 996.973,76      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 21,63    | Rp 226.504,19   | Rp 4.899.285,63    |                          |
| 11   | <b>Pekerjaan tangga B</b>                   |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 2,63     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.100.150,54    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 408,26   | Rp 16.866,32    | Rp 6.885.844,62    |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                        | kg     | 59,98    | Rp 16.585,82    | Rp 994.817,60      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 21,57    | Rp 226.504,19   | Rp 4.885.695,38    |                          |
| IV.4 | <b>PEKERJAAN BETON LANTAI 4 (EL. +9.90)</b> |        |          |                 |                    | <b>Rp 937.863.991,28</b> |
| 1    | <b>Kolom beton type K1, 50 x 50 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 22,54    | Rp 1.558.992,60 | Rp 35.139.693,20   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 5.546,45 | Rp 17.701,24    | Rp 98.179.064,78   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 1.907,14 | Rp 17.420,74    | Rp 33.223.797,71   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 184,80   | Rp 223.779,25   | Rp 41.354.406,05   |                          |
| 2    | <b>Kolom beton type K2, 40 x 40 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 5,74     | Rp 1.558.992,60 | Rp 8.948.617,52    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 1.723,58 | Rp 17.701,24    | Rp 30.509.510,13   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 594,60   | Rp 17.420,74    | Rp 10.358.374,38   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 58,08    | Rp 223.779,25   | Rp 12.997.099,04   |                          |
| 3    | <b>Balok beton type B1, 25 x 45 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 8,85     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.797.084,51   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 2.745,74 | Rp 17.701,24    | Rp 48.603.013,70   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 1.058,66 | Rp 17.420,74    | Rp 18.442.644,84   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 132,25   | Rp 233.497,75   | Rp 30.880.077,90   |                          |
| 4    | <b>Balok beton type B2, 25 x 35 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 8,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.547.645,69   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 1.920,56 | Rp 17.701,24    | Rp 33.996.301,18   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 307,71   | Rp 17.701,24    | Rp 5.446.849,79    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 853,12   | Rp 17.420,74    | Rp 14.861.985,12   |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 136,58   | Rp 233.497,75   | Rp 31.891.123,17   |                          |
| 5    | <b>Balok beton type B3, 20 x 35 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 4,87     | Rp 1.558.992,60 | Rp 7.592.293,96    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                        | kg     | 1.453,61 | Rp 17.701,24    | Rp 25.730.705,29   |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                        | kg     | 91,05    | Rp 17.420,74    | Rp 1.586.158,74    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 473,65   | Rp 17.420,74    | Rp 8.251.335,40    |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 89,17    | Rp 233.497,75   | Rp 20.820.994,68   |                          |
| 6    | <b>Balok beton type B4, 20 x 25 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 0,55     | Rp 1.558.992,60 | Rp 857.445,93      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 165,80   | Rp 17.701,24    | Rp 2.934.866,26    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 77,13    | Rp 17.420,74    | Rp 1.343.661,98    |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 16,80    | Rp 233.497,75   | Rp 3.922.762,26    |                          |
| 7    | <b>Balok beton type BB, 20 x 30 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 0,31     | Rp 1.558.992,60 | Rp 483.287,71      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 51,73    | Rp 17.701,24    | Rp 915.685,35      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 12,24    | Rp 17.701,24    | Rp 216.663,23      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 23,41    | Rp 17.420,74    | Rp 407.819,62      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 3,96     | Rp 233.497,75   | Rp 924.651,10      |                          |
| 8    | <b>Balok beton type RBL 20 x 30 cm</b>      |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 0,65     | Rp 1.558.992,60 | Rp 1.013.345,19    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                        | kg     | 93,12    | Rp 17.701,24    | Rp 1.648.339,84    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 51,60    | Rp 17.420,74    | Rp 898.910,39      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 10,08    | Rp 233.497,75   | Rp 2.353.657,36    |                          |
| 9    | <b>Plat t=12cm</b>                          |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 53,99    | Rp 1.558.992,60 | Rp 84.170.010,47   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                        | kg     | 7.858,30 | Rp 16.866,32    | Rp 132.540.618,17  |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 449,89   | Rp 273.820,69   | Rp 123.189.190,22  |                          |
| 10   | <b>Pekerjaan tangga A</b>                   |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 2,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.193.690,09    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 410,75   | Rp 16.866,32    | Rp 6.927.841,76    |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                        | kg     | 60,11    | Rp 16.585,82    | Rp 996.973,76      |                          |
|      | - Bekisting                                 | m2     | 21,63    | Rp 226.504,19   | Rp 4.899.285,63    |                          |
| 11   | <b>Pekerjaan tangga B</b>                   |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix               | m3     | 2,63     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.100.150,54    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                        | kg     | 408,26   | Rp 16.866,32    | Rp 6.885.844,62    |                          |

| NO          | JENIS PEKERJAAN                              | SATUAN | VOLUME   | HARGA SATUAN    | JUMLAH HARGA (Rp.) | TOTAL HARGA (Rp.)        |
|-------------|----------------------------------------------|--------|----------|-----------------|--------------------|--------------------------|
|             | - Pembesian Polos Ø8                         | kg     | 59,98    | Rp 16.585,82    | Rp 994.817,60      |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 21,57    | Rp 226.504,19   | Rp 4.885.695,38    |                          |
| <b>IV.5</b> | <b>PEKERJAAN BETON LANTAI 5 (EL. +13.20)</b> |        |          |                 |                    | <b>Rp 938.589.034,23</b> |
| 1           | <b>Kolom beton type K1, 50 x 50 cm</b>       |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 22,54    | Rp 1.558.992,60 | Rp 35.139.693,20   |                          |
|             | - Pembesian Ulir D19                         | kg     | 5.577,61 | Rp 17.701,24    | Rp 98.730.635,55   |                          |
|             | - Pembesian Ulir D10                         | kg     | 1.907,14 | Rp 17.420,74    | Rp 33.223.797,71   |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 184,80   | Rp 223.779,25   | Rp 41.354.406,05   |                          |
| 2           | <b>Kolom beton type K2, 40 x 40 cm</b>       |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 5,74     | Rp 1.558.992,60 | Rp 8.948.617,52    |                          |
|             | - Pembesian Ulir D19                         | kg     | 1.733,38 | Rp 17.701,24    | Rp 30.682.982,32   |                          |
|             | - Pembesian Ulir D10                         | kg     | 594,60   | Rp 17.420,74    | Rp 10.358.374,38   |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 58,08    | Rp 223.779,25   | Rp 12.997.099,04   |                          |
| 3           | <b>Balok beton type B1, 25 x 45 cm</b>       |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 8,85     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.797.084,51   |                          |
|             | - Pembesian Ulir D19                         | kg     | 2.745,74 | Rp 17.701,24    | Rp 48.603.013,70   |                          |
|             | - Pembesian Ulir D10                         | kg     | 1.058,66 | Rp 17.420,74    | Rp 18.442.644,84   |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 132,25   | Rp 233.497,75   | Rp 30.880.077,90   |                          |
| 4           | <b>Balok beton type B2, 25 x 35 cm</b>       |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 8,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.547.645,69   |                          |
|             | - Pembesian Ulir D19                         | kg     | 1.920,56 | Rp 17.701,24    | Rp 33.996.301,18   |                          |
|             | - Pembesian Ulir D13                         | kg     | 307,71   | Rp 17.701,24    | Rp 5.446.849,79    |                          |
|             | - Pembesian Ulir D10                         | kg     | 853,12   | Rp 17.420,74    | Rp 14.861.985,12   |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 136,58   | Rp 233.497,75   | Rp 31.891.123,17   |                          |
| 5           | <b>Balok beton type B3, 20 x 35 cm</b>       |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 4,87     | Rp 1.558.992,60 | Rp 7.592.293,96    |                          |
|             | - Pembesian Ulir D19                         | kg     | 1.453,61 | Rp 17.701,24    | Rp 25.730.705,29   |                          |
|             | - Pembesian Polos Ø8                         | kg     | 91,05    | Rp 17.420,74    | Rp 1.586.158,74    |                          |
|             | - Pembesian Ulir D10                         | kg     | 473,65   | Rp 17.420,74    | Rp 8.251.335,40    |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 89,17    | Rp 233.497,75   | Rp 20.820.994,68   |                          |
| 6           | <b>Balok beton type B4, 20 x 25 cm</b>       |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 0,55     | Rp 1.558.992,60 | Rp 857.445,93      |                          |
|             | - Pembesian Ulir D16                         | kg     | 165,80   | Rp 17.701,24    | Rp 2.934.866,26    |                          |
|             | - Pembesian Ulir D10                         | kg     | 77,13    | Rp 17.420,74    | Rp 1.343.661,98    |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 16,80    | Rp 233.497,75   | Rp 3.922.762,26    |                          |
| 7           | <b>Balok beton type BB, 20 x 30 cm</b>       |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 0,31     | Rp 1.558.992,60 | Rp 483.287,71      |                          |
|             | - Pembesian Ulir D16                         | kg     | 51,73    | Rp 17.701,24    | Rp 915.685,35      |                          |
|             | - Pembesian Ulir D13                         | kg     | 12,24    | Rp 17.701,24    | Rp 216.663,23      |                          |
|             | - Pembesian Ulir D10                         | kg     | 23,41    | Rp 17.420,74    | Rp 407.819,62      |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 3,96     | Rp 233.497,75   | Rp 924.651,10      |                          |
| 8           | <b>Balok beton type RBL 20 x 30 cm</b>       |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 0,65     | Rp 1.558.992,60 | Rp 1.013.345,19    |                          |
|             | - Pembesian Ulir D16                         | kg     | 93,12    | Rp 17.701,24    | Rp 1.648.339,84    |                          |
|             | - Pembesian Ulir D10                         | kg     | 51,60    | Rp 17.420,74    | Rp 898.910,39      |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 10,08    | Rp 233.497,75   | Rp 2.353.657,36    |                          |
| 9           | <b>Plat t=12cm</b>                           |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 53,99    | Rp 1.558.992,60 | Rp 84.170.010,47   |                          |
|             | - Pembesian Ulir D10                         | kg     | 7.858,30 | Rp 16.866,32    | Rp 132.540.618,17  |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 449,89   | Rp 273.820,69   | Rp 123.189.190,22  |                          |
| 10          | <b>Pekerjaan tangga A</b>                    |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 2,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.193.690,09    |                          |
|             | - Pembesian Ulir D13                         | kg     | 410,75   | Rp 16.866,32    | Rp 6.927.841,76    |                          |
|             | - Pembesian Polos Ø8                         | kg     | 60,11    | Rp 16.585,82    | Rp 996.973,76      |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 21,63    | Rp 226.504,19   | Rp 4.899.285,63    |                          |
| 11          | <b>Pekerjaan tangga B</b>                    |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 2,63     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.100.150,54    |                          |
|             | - Pembesian Ulir D13                         | kg     | 408,26   | Rp 16.866,32    | Rp 6.885.844,62    |                          |
|             | - Pembesian Polos Ø8                         | kg     | 59,98    | Rp 16.585,82    | Rp 994.817,60      |                          |
|             | - Bekisting                                  | m2     | 21,57    | Rp 226.504,19   | Rp 4.885.695,38    |                          |
| <b>IV.6</b> | <b>PEKERJAAN BETON LANTAI 6 (EL. +16.50)</b> |        |          |                 |                    | <b>Rp 870.888.552,92</b> |
| 1           | <b>Kolom beton type K1, 50 x 50 cm</b>       |        |          |                 |                    |                          |
|             | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                | m3     | 23,27    | Rp 1.558.992,60 | Rp 36.277.757,80   |                          |
|             | - Pembesian Ulir D19                         | kg     | 2.986,00 | Rp 17.701,24    | Rp 52.855.914,58   |                          |

| NO   | JENIS PEKERJAAN                                    | SATUAN | VOLUME   | HARGA SATUAN    | JUMLAH HARGA (Rp.) | TOTAL HARGA (Rp.)        |
|------|----------------------------------------------------|--------|----------|-----------------|--------------------|--------------------------|
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 1.907,14 | Rp 17.420,74    | Rp 33.223.797,71   |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 187,60   | Rp 223.779,25   | Rp 41.980.987,96   |                          |
| 2    | <b>Kolom beton type K2, 40 x 40 cm</b>             |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 5,85     | Rp 1.558.992,60 | Rp 9.120.106,71    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                               | kg     | 1.414,88 | Rp 17.701,24    | Rp 25.045.136,11   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 594,60   | Rp 17.420,74    | Rp 10.358.374,38   |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 58,96    | Rp 223.779,25   | Rp 13.194.024,79   |                          |
| 3    | <b>Balok beton type B1, 25 x 45 cm</b>             |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 8,85     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.797.084,51   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                               | kg     | 2.745,74 | Rp 17.701,24    | Rp 48.603.013,70   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 1.058,66 | Rp 17.420,74    | Rp 18.442.644,84   |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 132,25   | Rp 233.497,75   | Rp 30.880.077,90   |                          |
| 4    | <b>Balok beton type B2, 25 x 35 cm</b>             |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 8,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.547.645,69   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                               | kg     | 1.920,56 | Rp 17.701,24    | Rp 33.996.301,18   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                               | kg     | 307,71   | Rp 17.701,24    | Rp 5.446.849,79    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 853,12   | Rp 17.420,74    | Rp 14.861.985,12   |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 136,58   | Rp 233.497,75   | Rp 31.891.123,17   |                          |
| 5    | <b>Balok beton type B3, 20 x 35 cm</b>             |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 4,87     | Rp 1.558.992,60 | Rp 7.592.293,96    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                               | kg     | 1.453,61 | Rp 17.701,24    | Rp 25.730.705,29   |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                               | kg     | 91,05    | Rp 17.420,74    | Rp 1.586.158,74    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 473,65   | Rp 17.420,74    | Rp 8.251.335,40    |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 89,17    | Rp 233.497,75   | Rp 20.820.994,68   |                          |
| 6    | <b>Balok beton type B4, 20 x 25 cm</b>             |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 0,55     | Rp 1.558.992,60 | Rp 857.445,93      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                               | kg     | 165,80   | Rp 17.701,24    | Rp 2.934.866,26    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 77,13    | Rp 17.420,74    | Rp 1.343.661,98    |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 16,80    | Rp 233.497,75   | Rp 3.922.762,26    |                          |
| 7    | <b>Balok beton type BB, 20 x 30 cm</b>             |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 0,16     | Rp 1.558.992,60 | Rp 249.438,82      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                               | kg     | 26,16    | Rp 17.701,24    | Rp 463.064,54      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                               | kg     | 6,25     | Rp 17.701,24    | Rp 110.632,78      |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 11,95    | Rp 17.420,74    | Rp 208.177,89      |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 1,98     | Rp 233.497,75   | Rp 462.325,55      |                          |
| 8    | <b>Balok beton type RBL 20 x 30 cm</b>             |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 0,65     | Rp 1.558.992,60 | Rp 1.013.345,19    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D16                               | kg     | 93,12    | Rp 17.701,24    | Rp 1.648.339,84    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 51,60    | Rp 17.420,74    | Rp 898.910,39      |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 10,08    | Rp 233.497,75   | Rp 2.353.657,36    |                          |
| 9    | <b>Plat t=12cm</b>                                 |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 53,99    | Rp 1.558.992,60 | Rp 84.170.010,47   |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 7.858,30 | Rp 16.866,32    | Rp 132.540.618,17  |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 449,89   | Rp 273.820,69   | Rp 123.189.190,22  |                          |
| 10   | <b>Pekerjaan tangga A</b>                          |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 2,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.193.690,09    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                               | kg     | 410,75   | Rp 16.866,32    | Rp 6.927.841,76    |                          |
|      | - Pembesian Polos Ø8                               | kg     | 60,11    | Rp 16.585,82    | Rp 996.973,76      |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 21,63    | Rp 226.504,19   | Rp 4.899.285,63    |                          |
| IV.7 | <b>PEKERJAAN BETON LANTAI ROOFTOP (EL. +19.85)</b> |        |          |                 |                    | <b>Rp 539.654.892,30</b> |
| 1    | <b>Kolom beton type K1, 50 x 50 cm</b>             |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 2,02     | Rp 1.558.992,60 | Rp 3.149.165,05    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                               | kg     | 240,38   | Rp 17.701,24    | Rp 4.255.025,03    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 150,68   | Rp 17.420,74    | Rp 2.624.957,71    |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 16,40    | Rp 223.779,25   | Rp 3.669.979,76    |                          |
| 2    | <b>Kolom beton type K2, 40 x 40 cm</b>             |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 3,89     | Rp 1.558.992,60 | Rp 6.064.481,21    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D19                               | kg     | 562,21   | Rp 17.701,24    | Rp 9.951.816,39    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 357,35   | Rp 17.420,74    | Rp 6.225.302,87    |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 39,36    | Rp 223.779,25   | Rp 8.807.951,42    |                          |
| 3    | <b>Kolom beton type KA, 15 x 20 cm</b>             |        |          |                 |                    |                          |
|      | - Beton f'c 35 Mpa, ready mix                      | m3     | 0,86     | Rp 1.558.992,60 | Rp 1.340.733,64    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D13                               | kg     | 234,13   | Rp 17.701,24    | Rp 4.144.392,26    |                          |
|      | - Pembesian Ulir D10                               | kg     | 92,00    | Rp 17.420,74    | Rp 1.602.708,45    |                          |
|      | - Bekisting                                        | m2     | 28,16    | Rp 223.779,25   | Rp 6.301.623,78    |                          |

| NO   | JENIS PEKERJAAN                                      | SATUAN | VOLUME   | HARGA SATUAN    | JUMLAH HARGA (Rp.) | TOTAL HARGA (Rp.)       |
|------|------------------------------------------------------|--------|----------|-----------------|--------------------|-------------------------|
| 4    | <b>Balok beton type B1, 25 x 45 cm</b>               |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 8,85     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.797.084,51   |                         |
|      | - Pembesian Ulir D19                                 | kg     | 2.745,74 | Rp 17.701,24    | Rp 48.603.013,70   |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 1.058,66 | Rp 17.420,74    | Rp 18.442.644,84   |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 132,25   | Rp 233.497,75   | Rp 30.880.077,90   |                         |
| 5    | <b>Balok beton type B2, 25 x 35 cm</b>               |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 8,69     | Rp 1.558.992,60 | Rp 13.547.645,69   |                         |
|      | - Pembesian Ulir D19                                 | kg     | 1.920,56 | Rp 17.701,24    | Rp 33.996.301,18   |                         |
|      | - Pembesian Ulir D13                                 | kg     | 307,71   | Rp 17.701,24    | Rp 5.446.849,79    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 853,12   | Rp 17.420,74    | Rp 14.861.985,12   |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 136,58   | Rp 233.497,75   | Rp 31.891.123,17   |                         |
| 6    | <b>Balok beton type B3, 20 x 35 cm</b>               |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 4,87     | Rp 1.558.992,60 | Rp 7.592.293,96    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D19                                 | kg     | 1.453,61 | Rp 17.701,24    | Rp 25.730.705,29   |                         |
|      | - Pembesian Polos Ø8                                 | kg     | 91,05    | Rp 17.420,74    | Rp 1.586.158,74    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 473,65   | Rp 17.420,74    | Rp 8.251.335,40    |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 89,17    | Rp 233.497,75   | Rp 20.820.994,68   |                         |
| 10   | <b>Balok beton type BAT-1, 15 x 30 cm</b>            |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 3,27     | Rp 1.558.992,60 | Rp 5.097.905,80    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D13                                 | kg     | 347,18   | Rp 17.701,24    | Rp 6.145.517,89    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 263,48   | Rp 17.420,74    | Rp 4.590.017,63    |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 58,03    | Rp 233.497,75   | Rp 13.549.874,64   |                         |
| 11   | <b>Balok beton type BAT-2, 15 x 20 cm</b>            |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 2,93     | Rp 1.558.992,60 | Rp 4.567.848,32    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D13                                 | kg     | 434,23   | Rp 17.701,24    | Rp 7.686.411,18    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 252,01   | Rp 17.420,74    | Rp 4.390.201,70    |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 53,90    | Rp 233.497,75   | Rp 12.585.528,91   |                         |
| 12   | <b>Plat t=12cm</b>                                   |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 5,42     | Rp 1.558.992,60 | Rp 8.449.739,89    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 771,37   | Rp 16.866,32    | Rp 13.010.174,80   |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 45,19    | Rp 273.820,69   | Rp 12.373.956,98   |                         |
| 12   | <b>Plat t=10cm</b>                                   |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 15,80    | Rp 1.558.992,60 | Rp 24.632.083,08   |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 2.711,06 | Rp 16.866,32    | Rp 45.725.610,92   |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 158,00   | Rp 273.820,69   | Rp 43.263.669,02   |                         |
| IV.8 | <b>PEKERJAAN BETON LANTAI ROOF LIFT (EL. +23.95)</b> |        |          |                 |                    | <b>Rp 70.811.189,57</b> |
| 1    | <b>Balok beton type B1, 25 x 45 cm</b>               |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 1,12     | Rp 1.558.992,60 | Rp 1.746.071,71    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D19                                 | kg     | 309,32   | Rp 17.701,24    | Rp 5.475.348,79    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 115,29   | Rp 17.420,74    | Rp 2.008.437,58    |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 14,49    | Rp 233.497,75   | Rp 3.383.382,45    |                         |
| 2    | <b>Balok beton type B2, 25 x 35 cm</b>               |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 1,84     | Rp 1.558.992,60 | Rp 2.868.546,38    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D19                                 | kg     | 396,84   | Rp 17.701,24    | Rp 7.024.561,67    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D13                                 | kg     | 54,47    | Rp 17.701,24    | Rp 964.186,76      |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 173,05   | Rp 17.420,74    | Rp 3.014.659,75    |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 27,04    | Rp 233.497,75   | Rp 6.313.779,25    |                         |
| 3    | <b>Balok beton type B3, 20 x 35 cm</b>               |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 0,32     | Rp 1.558.992,60 | Rp 498.877,63      |                         |
|      | - Pembesian Ulir D19                                 | kg     | 97,65    | Rp 17.701,24    | Rp 1.728.526,48    |                         |
|      | - Pembesian Polos Ø8                                 | kg     | 5,58     | Rp 17.420,74    | Rp 97.207,75       |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 27,51    | Rp 17.420,74    | Rp 479.244,67      |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 5,60     | Rp 233.497,75   | Rp 1.307.587,42    |                         |
| 4    | <b>Plat t=10cm</b>                                   |        |          |                 |                    |                         |
|      | - Beton f' c 35 Mpa, ready mix                       | m3     | 4,73     | Rp 1.558.992,60 | Rp 7.374.035,00    |                         |
|      | - Pembesian Ulir D10                                 | kg     | 804,21   | Rp 16.866,32    | Rp 13.564.064,82   |                         |
|      | - Bekisting                                          | m2     | 47,34    | Rp 273.820,69   | Rp 12.962.671,46   |                         |

Rekapitulasi RAB Skenario C per jenis pekerjaan disajikan pada **Tabel 4.74** berikut sebagai ringkasan dari tabel rincian RAB di atas.

**Tabel 4.74** Rekapitulasi RAB (f'c 35 MPa)

| NO                                          | JENIS PEKERJAAN                               | TOTAL HARGA<br>(Rp.)       |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| I                                           | PEKERJAAN PERSIAPAN                           | Rp 511.930.670,99          |
| II                                          | PEKERJAAN TANAH                               | Rp 9.780.000,00            |
| III                                         | PEKERJAAN STRUKTUR BAWAH                      | Rp 2.483.391.585,63        |
| IV.1                                        | PEKERJAAN BETON LANTAI 1 (DASAR)              | Rp 429.807.676,01          |
| IV.2                                        | PEKERJAAN BETON LANTAI 2 (EL. +3.30)          | Rp 937.863.991,28          |
| IV.3                                        | PEKERJAAN BETON LANTAI 3 (EL. +6.60)          | Rp 937.863.991,28          |
| IV.4                                        | PEKERJAAN BETON LANTAI 4 (EL. +9.90)          | Rp 937.863.991,28          |
| IV.5                                        | PEKERJAAN BETON LANTAI 5 (EL. +13.20)         | Rp 938.589.034,23          |
| IV.6                                        | PEKERJAAN BETON LANTAI 6 (EL. +16.50)         | Rp 870.888.552,92          |
| IV.7                                        | PEKERJAAN BETON LANTAI ROOFTOP (EL. +19.85)   | Rp 539.654.892,30          |
| IV.8                                        | PEKERJAAN BETON LANTAI ROOF LIFT (EL. +23.95) | Rp 70.811.189,57           |
| <b>JUMLAH HARGA PEKERJAAN (A)</b>           |                                               | <b>Rp 8.668.445.575,48</b> |
| <b>PPN 11% (B)</b>                          |                                               | <b>Rp 953.529.013,30</b>   |
| <b>TOTAL HARGA PEKERJAAN + PPN11% (A+B)</b> |                                               | <b>Rp 9.621.974.588,79</b> |

#### 4.10.2 Penjadwalan Konstruksi

Penjadwalan disusun untuk **Skenario C (f'c 35 MPa)**, yaitu skenario terpilih pada analisis *embodied carbon* dan biaya. Seluruh bobot pekerjaan diturunkan dari Rencana Anggaran Biaya Skenario C sebelum PPN, yaitu sebesar **Rp 8.668.445.575,48**.

Bobot setiap item dihitung sebagai rasio harga item pekerjaan terhadap harga total pekerjaan dihitung sebagai berikut:

$$\text{Bobot pekerjaan} = \frac{\text{Harga item pekerjaan}}{\text{Harga total pekerjaan}} \times 100\%$$

dengan  $H_i$  = jumlah harga item ke- $i$  (Rp) dan  $n = 89$  item pekerjaan.

Bobot tersebut kemudian didistribusikan secara merata sepanjang durasi pelaksanaan item diformulasikan dengan persamaan berikut:

$$b_{i,t} = \frac{\text{Bobot}_i}{D_i} \quad \text{untuk } t \in [t_{\text{mulai},i}, t_{\text{selesai},i}]$$

dengan  $D_i$  = durasi item ke- $i$  (minggu)

#### **Contoh perhitungan - Pekerjaan *jacking pile* (*spunpile*)**

Jumlah harga item pekerjaan *jacking pile* (penetrasi, pengelasan, dan *hacking pile*):

$$\begin{aligned} H_{\text{jacking}} &= \text{Rp } 1.982.992.793,53 + \text{Rp } 3.719.865,13 + \text{Rp } 5.644.991,49 \\ &= \text{Rp } 1.992.357.650,15 \end{aligned}$$

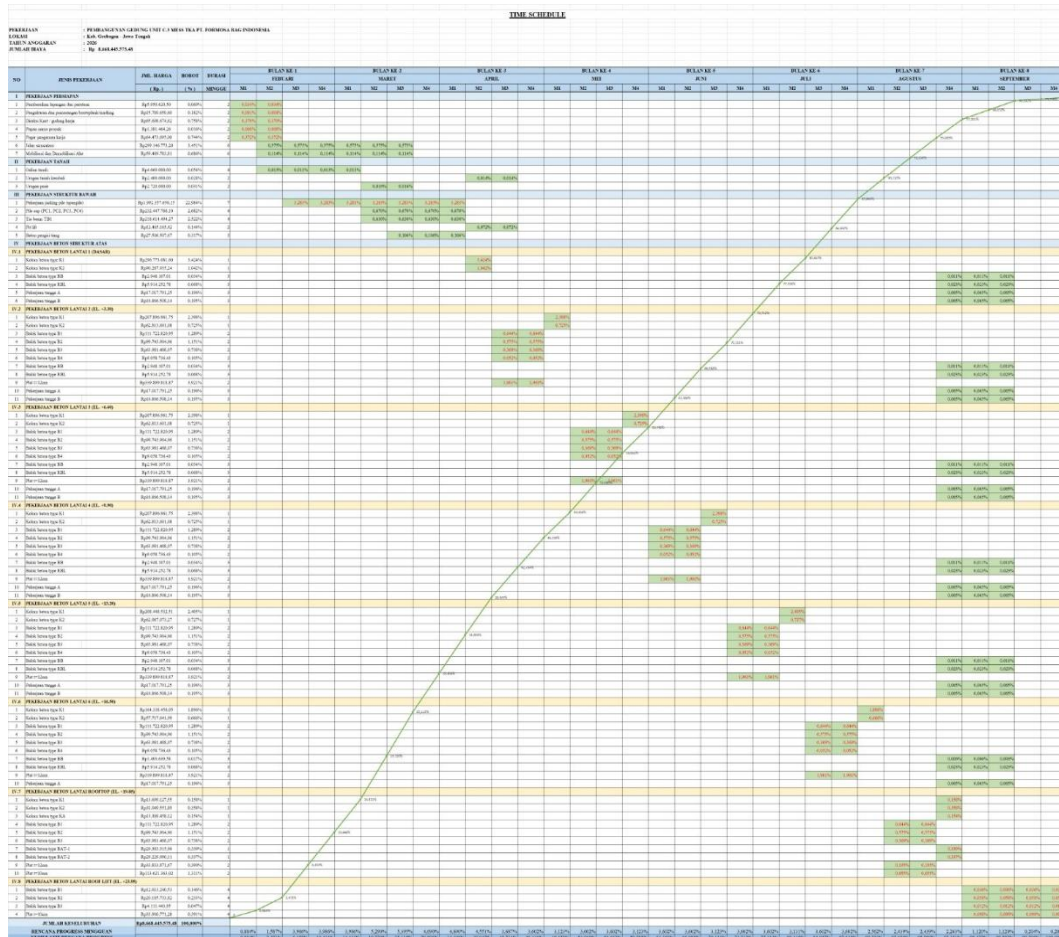
Bobot pekerjaan dihitung sebagai berikut:

$$\text{Bobot}_{\text{jacking}} = \frac{1.992.357.650,15}{8.668.445.575,48} \times 100\% = 22,984\%$$

Distribusi mingguan dengan durasi  $D = 7$  minggu:

$$b_{\text{jacking},t} = \frac{22,984\%}{7} = 3,283\% \text{ per minggu} \quad (t = 3 \text{ s.d. } 9)$$

Pemetaan progres kumulatif terhadap waktu menghasilkan kurva S rencana sebagaimana disajikan pada **Gambar 4.48** sebagai berikut:



**Gambar 4.48** Kurva S Rencana Pelaksanaan Konstruksi Skenario C ( $f'c$  35 MPa)

Hasil penjumlahan seluruh bobot item terverifikasi sebesar **100%**, dan kumulatif rencana progres mencapai tepat 100% pada minggu ke-32.

Kurva S yang terbentuk dapat dibagi menjadi tiga fase:

- **Fase awal (minggu ke-1 s.d. ke-4), kumulatif 10,444%.** Laju progres masih rendah karena hanya pekerjaan persiapan dan galian tanah yang berjalan. Kemiringan meningkat tajam mulai minggu ke-3 saat pekerjaan *jacking pile* dimulai.

- **Fase produktif (minggu ke-5 s.d. ke-24), kumulatif naik dari 14,431% menjadi 87,649%.** Laju progres tertinggi terjadi pada minggu ke-7 (5,395% per minggu) akibat tumpang tindih (*overlap*) antara *jacking pile*, *pile cap*, tie beam, dan beton pengisi tiang. Setelah pekerjaan struktur bawah selesai pada minggu ke-11, laju progres stabil pada kisaran 3,123%–3,602% per minggu mengikuti siklus lantai 3 mingguan.
- **Fase akhir (minggu ke-25 s.d. ke-32), kumulatif naik dari 90,210% menjadi 100,000%.** Laju progres menurun karena volume pekerjaan pada elevasi atas (Rooftop dan Roof Lift) jauh lebih kecil dibandingkan lantai tipikal.

Rekapitulasi bobot per divisi pekerjaan disajikan pada **Tabel 4.75** sebagai berikut:

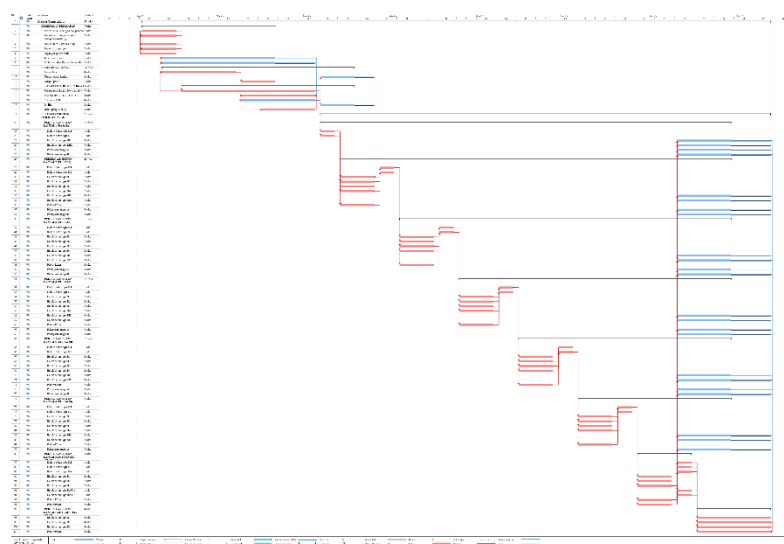
**Tabel 4.75** Rekapitulasi Bobot Pekerjaan Skenario C (f'c 35 MPa)

| No            | Divisi Pekerjaan              | Jumlah Item | Jumlah Harga (Rp)       | Bobot (%)      |
|---------------|-------------------------------|-------------|-------------------------|----------------|
| I             | Pekerjaan Persiapan           | 7           | 511.930.670,99          | 5,906          |
| II            | Pekerjaan Tanah               | 3           | 9.780.000,00            | 0,113          |
| III           | Pekerjaan Struktur Bawah      | 5           | 2.483.391.585,63        | 28,649         |
| IV            | Pekerjaan Beton Struktur Atas | 74          | 5.663.343.318,87        | 65,333         |
| <b>Jumlah</b> |                               | <b>89</b>   | <b>8.668.445.575,48</b> | <b>100,000</b> |

Pekerjaan beton struktur atas mendominasi bobot proyek (65,333%), diikuti pekerjaan struktur bawah (28,649%) yang di dalamnya pekerjaan *jacking pile* sendiri menyumbang 22,984% - bobot terbesar untuk satu item tunggal. Konsekuensi penjadwalannya adalah kurva S memiliki kemiringan yang relatif curam sejak minggu ke-3, karena pekerjaan pondasi yang bernilai besar telah mulai berjalan pada fase awal proyek.

Kemiringan maksimum tidak terjadi di pertengahan proyek, melainkan lebih awal (minggu ke-7, atau 21,875% dari total durasi). Penyebabnya adalah konsentrasi nilai pada pekerjaan *jacking pile* (bobot 22,984%) yang dijadwalkan pada fase awal. Implikasi praktisnya adalah kebutuhan arus kas (*cash flow*) proyek terkonsentrasi pada empat bulan pertama: pada akhir bulan ke-4 (minggu ke-16), 59,785% dari nilai RAB atau setara Rp 5.182.397.937,68 telah harus terserap.

Bobot dan durasi yang telah ditetapkan selanjutnya disusun menjadi jaringan kerja pada *Microsoft Project 2021* dengan metode lintasan kritis (*Critical Path Method*). Diagram batang (*Gantt chart*) hasil penyusunan jaringan kerja disajikan pada **Gambar 4.49**.



**Gambar 4.49** Diagram batang (*Gantt chart*)

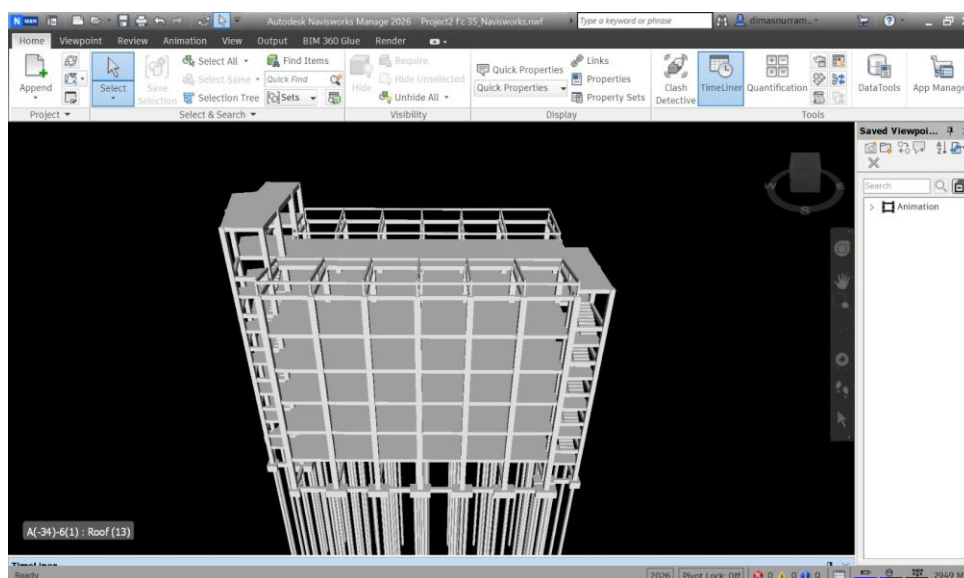
Hasil penyusunan jaringan kerja memberikan durasi total 32 minggu dengan Lintasan kritis melewati pekerjaan persiapan, pekerjaan *jacking pile*, pekerjaan *pile cap*, pekerjaan kolom Lantai 1, rangkaian pekerjaan balok, pelat, dan kolom dari Lantai 2 hingga Rooftop, serta pekerjaan balok dan pelat Lantai Roof Lift. Pada pekerjaan struktur atas, lintasan kritis membentuk siklus lantai (*floor cycle*) selama tiga minggu, yaitu dua minggu untuk pekerjaan balok dan pelat, dilanjutkan satu minggu untuk pekerjaan kolom lantai di atasnya.

### 4.10.3 Integrasi BIM 5D

Sub bab 4.10.1 menghasilkan dimensi ketiga (geometri) dan dimensi kelima (biaya) dalam bentuk data tabel, sementara Sub bab 4.10.2 menghasilkan dimensi keempat (waktu). Integrasi ketiganya dalam satu lingkungan tunggal dilakukan menggunakan *Autodesk Navisworks Manage 2026* melalui modul **TimeLiner**, sehingga geometri, jadwal, dan biaya terhubung pada tingkat objek.

#### 1. Federasi Model

Model struktur Skenario C dari *Autodesk Revit* diekspor ke format *Industry Foundation Classes* (.ifc), kemudian digabungkan ke dalam berkas proyek berformat .nwf. Format .nwf dipilih karena hanya menyimpan referensi ke berkas sumber, sehingga perubahan pada model *Revit* dapat diperbarui tanpa menyusun ulang keseluruhan proyek. Model federasi yang dihasilkan disajikan pada **Gambar 4.50** sebagai berikut:



**Gambar 4.50** Model Federasi Struktur Skenario C pada Autodesk Navisworks

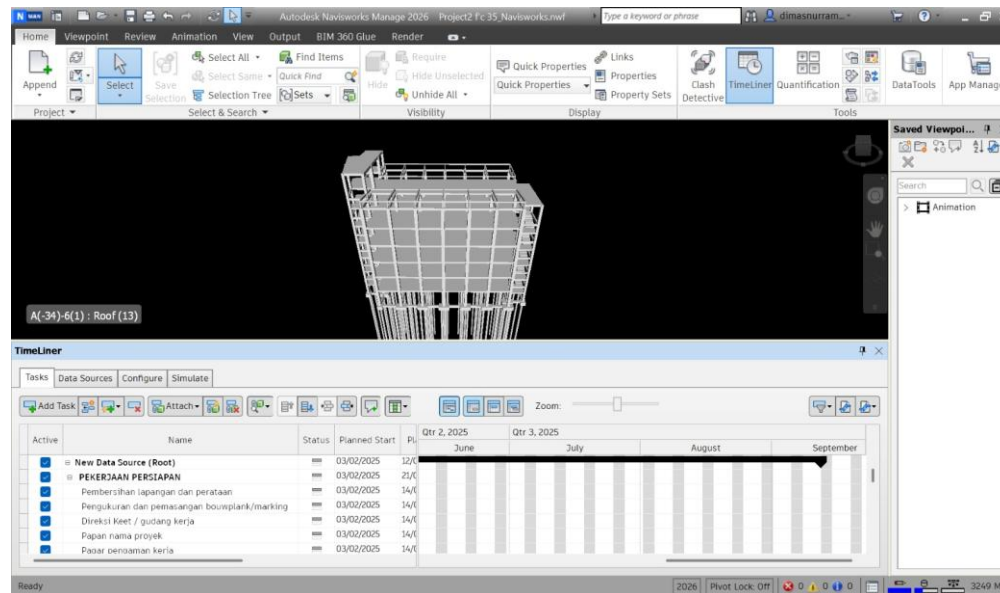
Model mencakup seluruh elemen struktural yang menjadi objek penelitian, yaitu tiang pancang, *pile cap*, tie beam, kolom, balok, pelat, dan tangga, dari elevasi

pondasi hingga Lantai Roof Lift pada EL. +23,95. Pengelompokan elemen dilakukan menggunakan fitur *Search Sets*, bukan *Selection Sets*. *Search Sets* menyimpan kriteria pencarian berdasarkan parameter objek, misalnya nama tipe dan level lantai. Konsekuensinya, apabila model *Revit* diperbarui, keanggotaan kelompok akan diperbarui secara otomatis dan keterkaitannya dengan tugas penjadwalan tetap terjaga.

## 2. Pengaitan Jadwal dan Biaya

Jadwal dari *Microsoft Project* diimpor melalui tab *Data Sources* pada modul *TimeLiner*. Hasil impor mempertahankan struktur *Work Breakdown Structure* dari *Microsoft Project*, yaitu divisi pekerjaan sebagai *summary task* dan 89 item pekerjaan sebagai tugas pelaksanaan.

Struktur hasil impor disajikan pada **Gambar 4.51** sebagai berikut:



**Gambar 4.51** Struktur Tugas Hasil Impor Jadwal pada Modul *TimeLiner*

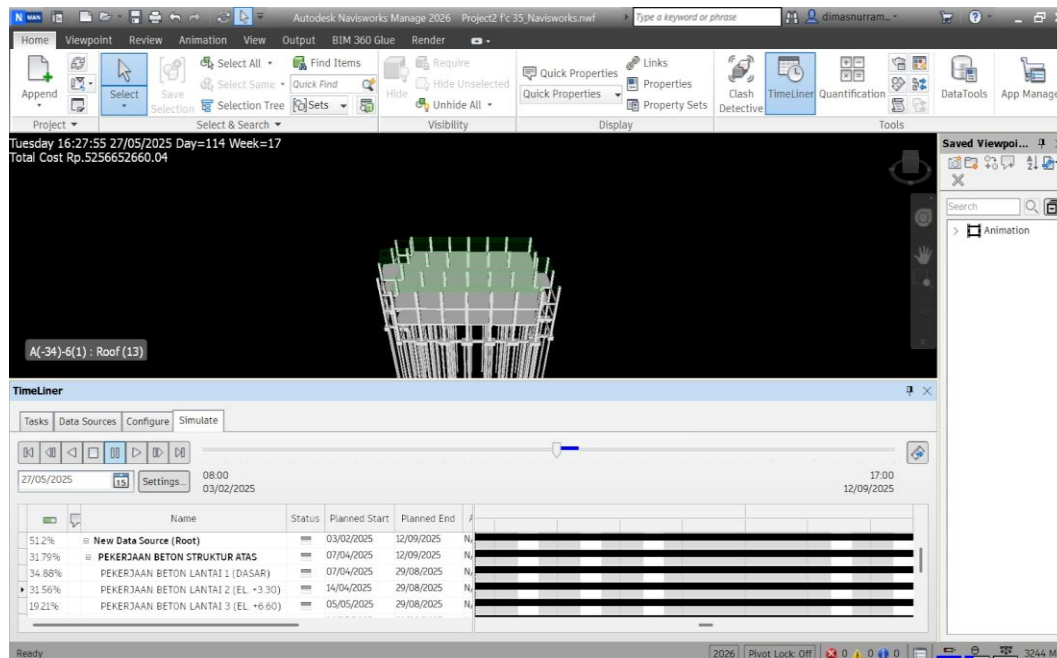
Pengaitan objek model dengan tugas penjadwalan dilakukan melalui perintah *Attach Set*, yaitu mengaitkan setiap tugas dengan *Search Set* yang bersesuaian. Setiap tugas diberi tipe *Construct*, sehingga pada simulasi objek akan muncul

secara bertahap mengikuti tanggal rencananya. Tahap ini menghasilkan model BIM 4D, yaitu setiap objek geometri telah memiliki atribut waktu.

Dimensi kelima dibentuk dengan mengaktifkan kolom biaya pada TimeLiner. Nilai biaya pada setiap item pekerjaan di *Microsoft Project*, yang bersumber langsung dari jumlah harga item pekerjaan pada RAB, terbawa pada saat impor sehingga setiap item pekerjaan membawa nilai biaya masing-masing. Rantai keterhubungan data yang terbentuk adalah objek *Revit* → *Search Set* → tugas TimeLiner → biaya rencana.

### 3. Simulasi

Simulasi dijalankan melalui tab *Simulate*, dengan *overlay text* dikonfigurasi untuk menampilkan tanggal, hari ke-*n*, minggu ke-*n*, dan biaya kumulatif. Hasil simulasi pada salah satu titik waktu disajikan pada **Gambar 4.52** sebagai berikut:



**Gambar 4.52** Simulasi BIM 5D