

BAB II

PERANCANGAN STRUKTUR ATAS DAN BAWAH

2.1. Data Umum Proyek

2.1.1 Data Proyek

Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta berlokasi di Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Bangunan ini memiliki luas dengan ukuran 4.256 m² dan terdiri 4 lantai dengan tambahan rooftop di bagian atasnya. Elevasi tertinggi gedung mencapai +12,6 m hingga rooftop. Tinggi antar lantai pada gedung ini sama pada setiap lantainya hingga atap dengan tinggi +4,2 m.

2.1.2 Data Jumlah dan Fungsi lantai

Perancangan Gedung Fakultas Teknik Mesin memiliki 4 lantai yang mana tiap lantai memiliki fungsi ruangan masing-masing. Detail dapat dilihat pada tabel 2.1 sebagai berikut :

Tabel 2. 1 Data Jumlah Dan Fungsi Lantai

Lantai	Tinggi	Elevasi	Fungsi
Lantai 1	4.2	+0,00	Laboratorium dan Kantor
Lantai 2	4.2	+4.20	Kantor dosen dan Ruang Diskusi
Lantai 3	4.2	+8.40	Ruang Kelas
Atap	4.2	+12.60	Atap

2.1.3 Data Material Struktur

Data material struktur merupakan informasi mengenai jenis material yang digunakan dalam pembangunan struktur. Pada perencanaan Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta, data material struktur

diperoleh berdasarkan ketentuan dan acuan yang sesuai dengan standar SNI, yaitu:

Mutu beton : $f_c' = 30 \text{ Mpa}$

Mutu Besi Ulir (D) : $f_y = 420 \text{ Mpa}$

Mutu Besi Polos ($\emptyset$) : $f_y = 280 \text{ Mpa}$

Modulus Elastisitas : $4700\sqrt{f_c'} \text{ (Mpa)}$

: $4700\sqrt{30} \text{ (Mpa)}$

: 25742.96 Mpa

2.2 Perencanaan Sistem Struktur

Sebelum melakukan perancangan struktur gedung, diperlukan penentuan beberapa pertimbangan terkait sistem struktur sesuai dengan panduan SNI 1726:2019. Dalam standar tersebut dijelaskan bahwa pada bangunan gedung beton bertulang, Sistem Rangka Pemikul Momen (RPM) digunakan untuk menahan beban lateral maupun beban lainnya yang bekerja pada struktur. Sistem ini dibagi menjadi tiga kategori, yaitu:

1. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB).
2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM).
3. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).

Fokus analisis pada Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta adalah pemeriksaan struktur beton bertulang pada setiap lantai dan keseluruhan bangunan dengan menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), dengan Kategori Desain Seismik (KDS) D.

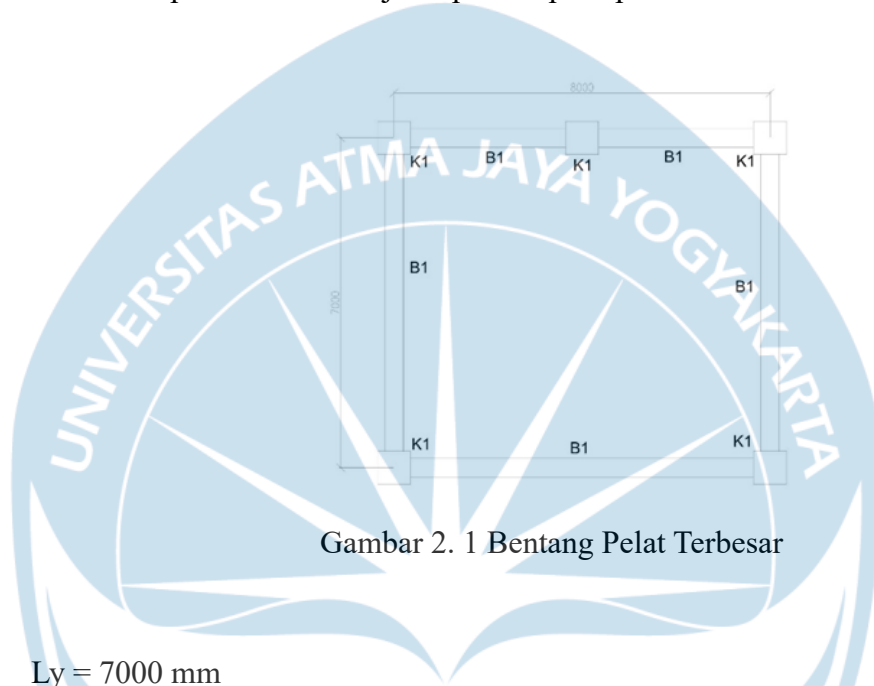
2.3 Preliminary Design

Preliminary design dilakukan sebagai perhitungan awal sekaligus pedoman dasar dalam proses pemodelan struktur. Pada perencanaan pembangunan Gedung Fakultas Teknik Mesin ini, acuan yang digunakan adalah SNI 2847:2019. Dalam tahapan preliminary design, penulis menyajikan salah satu contoh perhitungan yang

meliputi elemen pelat, kolom, dan balok. Karena preliminary design merupakan upaya untuk menentukan kondisi awal dimensi struktur, maka prosesnya memerlukan pendekatan trial and error agar hasil perhitungan valid, sehingga masih dimungkinkan mengalami perubahan secara berkelanjutan.

2.3.1 Menentukan Tebal Pelat Lantai

Apabila diketahui jenis pelat seperti pada Gambar 2.1 maka :



Gambar 2. 1 Bentang Pelat Terbesar

$$L_y = 7000 \text{ mm}$$

$$L_x = 8000 \text{ mm}$$

Untuk menentukan tebal pelat yang akan digunakan, acuan yang dipakai berasal dari SNI 2847:2019, yaitu Tabel 7.3.1.1 untuk pelat satu arah dan Pasal 8.3.1.2 untuk pelat dua arah. Adapun perhitungannya dapat dilihat sebagai berikut:

$$\text{Nilai } \beta_1 = \frac{l_y}{l_x} = \frac{7000}{8000} = 1.14 \text{ maka digunakan pelat 2 arah}$$

Diasumsikan tebal pelat 130 mm

$$\text{Maka, nilai } \alpha_{fm} = \frac{E_{cb} \times l_b}{E_{cs} \times l_s} \text{ karena } E_{cb} = E_{cs} \text{ maka } \alpha_{fm} = \frac{l_b}{l_s}$$

$$\alpha_1 = \frac{\frac{1}{12} \times 400 \times 700^3}{\frac{1}{12} \times 4000 \times 130^3} = 15,612$$

$$\alpha_2 = \frac{\frac{1}{12} \times 250 \times 300^3}{\frac{1}{12} \times 3500 \times 130^3} = 0,877$$

$$\alpha_3 = \frac{\frac{1}{12} \times 400 \times 700^3}{\frac{1}{12} \times 4000 \times 130^3} = 15,612$$

$$\alpha_4 = \frac{\frac{1}{12} \times 250 \times 300^3}{\frac{1}{12} \times 4000 \times 130^3} = 0,768$$

$$\alpha_{fm} = \frac{\Sigma \alpha}{4} = \frac{15,612 + 0,877 + 15,612 + 0,768}{4} = 8.217$$

untuk $0,2 < \alpha_{fm} \leq 2$ maka digunakan rumus:

$$h = \frac{\ln(0,8 + \frac{f_y}{1400})}{36 + 5\beta (\alpha_{fm}^{0-0,2})} \geq 125 \text{ mm}$$

$$\ln = 4000 - \left(\frac{400}{2}\right) - \left(\frac{250}{2}\right) = 3675$$

$$f_y = 280 \text{ MPa}$$

$$\beta = \frac{3675}{3500 - \left(\frac{400}{2}\right) - \left(\frac{250}{2}\right)} = 1,15$$

$$h = \frac{3675 (0,8 + \frac{280}{1400})}{36 + (9 \times 1.15)} = 79.17 \leq 90 \text{ mm (OK!)}$$

Maka digunakan tebal Pelat 130mm.

2.3.2 Menentukan Dimensi Balok

Dalam menentukan dimensi balok mengetahui bentang antar kolom merupakan informasi yang diperlukan. Tinggi balok (h) dapat ditentukan dengan mengacu pada SNI 2847;2019 Tabel 9.3.1.1, lebar balok akan ditentukan berdasarkan SNI 2847; 2019 Pasal 18.6.2.1, perencanaan balok juga harus mempertimbangkan syarat pada SNI 2847;2019, Pasal 18.6.2.1., dengan demikian perhitungan balok dapat dihitung sebagai berikut :

1. Balok Induk Tipe 1 (B1)

$$L = 8000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi balok (h)} &= L/16 \\ &= 8000 / 16 \\ &= 500 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lebar balok (b)} &= 2/3 h \\ &= 2/3 \times 500 \text{ mm} \\ &= 333,3 \approx 350 \text{ mm} \end{aligned}$$

2. Balok Induk Tipe 2 (B2)

$$L = 7000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tinggi balok (h)} &= L/16 \\
 &= 7000 / 16 \\
 &= 437,5 \approx 450 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Lebar balok (b)} &= 2/3 h \\
 &= 2/3 \times 450 \text{ mm} \\
 &= 300 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

3. Balok Induk Tipe 3 (B3)

$$L = 6000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tinggi balok (h)} &= L/16 \\
 &= 6000 / 16 \\
 &= 375 \approx 400 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Lebar balok (b)} &= 2/3 h \\
 &= 2/3 \times 400 \\
 &= 266,6 \approx 300 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

4. Balok Anak (BA)

$$L = 4000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tinggi balok (h)} &= L/16 \\
 &= 4000 / 16 \\
 &= 250 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Lebar balok (b)} &= 2/3 h \\
 &= 2/3 \times 250 \text{ mm} \\
 &= 166,6 \text{ mm} \approx 250 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Tabel 2. 2 Rekapitulasi Ukuran Balok

No	Kode Balok	Bentang (mm)	b (mm)	h (mm)	Asumsi
1	B1	8000	350	500	350 x 500
2	B2	7000	300	450	300 x 450
3	B3	6000	300	400	300 x 400
4	BA	4000	250	250	250 x 250

2.3.3 Menentukan Dimensi Kolom

Dalam menentukan desain awal dimensi kolom, penulis memperhatikan beban-beban pada tributary area yang ditopang oleh satu kolom struktur. Berdasarkan hal tersebut, perhitungan dimensi kolom dapat dilakukan sebagai berikut:

Diketahui :

Tinjauan beban pelat lantai :

Tabel 2. 3 Beban Pelat Lantai

Beban Pelat	3,06072	kN/m ²
Beban SIDL	2,76618	kN/m ²
Beban Hidup	4,79	kN/m ²
Beban Ultimit	14,65628	kN/m ²
Beban Aksial	1465,628	kN

Tinjauan Pelat Atap

Tabel 2. 4 Beban Pelat Atap

Beban Pelat	2,58984	kN/m ²
Beban SIDL	1,50663	kN/m ²
Beban Hidup	0.96	kN/m ²
Beban Ultimit	6,451764	kN/m ²
Beban Aksial	645,1764	kN

$$\text{Luasan pelat} = 56 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Luas aksial total} &= 1465,628 (3) + 645,1764 (1) \\ &= 5042,0604 \end{aligned}$$

$$\text{Luas penampang bruto} = 380245,8824$$

$$\begin{aligned} \text{Lebar, panjang kolom (b,h)} &= \sqrt{380245,8824} \\ &= 616,6408 \approx 700 \text{ mm} \end{aligned}$$

Karena perhitungan *preliminary design* keseluruhan sama, maka rekapitulasi *preliminary design* kolom Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 *preliminary design* Kolom

Dimensi kolom		Cek dimensi penampang kolom SRPMK			
B (mm)	H (mm)	B<H	B≥300 mm	Perbandingan b/h > 0,4	
700	700	OK!	OK!	1	OK!
500	500	OK!	OK!	1	OK!

2.4 Perancangan Pelat Lantai 2 Arah

Dalam perencanaan pelat pada Gedung Fakultas Teknik mesin di Yogyakarta, penulis menggunakan metode *finite element method* (FEM), dengan bantuan *software* Etabs, hasil analisis akan mengeluarkan output gaya dalam M11 dan M22 serta deformasi pada pelat. Hasil analisis akan digunakan untuk melakukan perhitungan desain detail tulangan dengan mengacu pada ketentuan SNI 2847:2019. Berikut perhitungan desain pelat pada Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta :

Diketahui data sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 F'_c &= 30 \text{ Mpa} \\
 F_y &= 420 \text{ Mpa} \\
 L_x &= 7000 \text{ mm} \\
 L_y &= 8000 \text{ mm} \\
 \text{Selimut beton (cc)} &= 20 \text{ mm} \\
 \text{Diameter tul. (db)} &= 12 \text{ mm} \\
 \text{Tebal pelat (t)} &= 130 \text{ mm} \\
 \text{Tebal efektif penampang (d)} &= h - cc - ds - (db/2) \\
 &= 130 - 20 - 12 - (12/2) = 92 \text{ mm} \\
 \text{Modulus elastisitas beton (Ec)} &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\
 &= 4700 \times \sqrt{30} = 25743 \\
 \beta_1 &= 0,85 - 0,05 \times \frac{(F'_c - 28)}{7} = 0,8357
 \end{aligned}$$

Momen dari Etabs

$$M_{11 \text{ max}} = 6,9 \quad \text{kNm}$$

$$M_{11 \text{ min}} = -14,85 \quad \text{kNm}$$

$$M_{22 \text{ max}} = 7,027 \quad \text{kNm}$$

$$M_{22 \text{ min}} = -14,671 \quad \text{kNm}$$

Perhitungan Penulangan Lentur (analisis untuk per meter lari)

Arah momen positif M_{11}

$$M_u = 6,9 \text{ kNm}$$

$$\text{Spasi tulangan (s)} = 150$$

$$\begin{aligned} S_{\text{max}} &= 2 \times t \\ &= 2 \times 130 = 260 \text{ mm} \end{aligned}$$

Cek spasi :

$$\begin{aligned} S &\leq S_{\text{max}} \\ 150 \text{ mm} &\leq 260 \text{ mm} \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

Jumlah tulangan negatif tumpuan (n)

$$\begin{aligned} \text{Analisis per 1m} &= b/s \\ &= 1000 / 150 = 6,6667 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jarak bersih antar tulangan} &= S - d_b \\ &= 150 - 12 = 138 \text{ mm} \end{aligned}$$

Cek jarak bersih

$$\begin{aligned} \text{Jarak bersih} &\geq d_b, 25 \text{ mm} \\ 138 \text{ mm} &\geq 12 \text{ mm}, 25 \text{ mm} \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \\ &= 6,6667 \times \frac{\pi}{4} \times 12^2 \\ &= 753,982 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s \text{ min 1} &= 0,2\% \times b \times t \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 130 \\ &= 260 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s \text{ min } 2 &= \text{nilai max dari } \frac{(0,18\% \times 420)}{f_y} \times b \times t \text{ atau } 0,14\% \times b \times t \\ &= 351 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Cek as min :

$$\begin{aligned} A_s \text{ pasang} &\geq A_s \text{ min} \\ 753,982 &\geq 260 \text{ mm}^2, 351 \text{ mm}^2 \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi balok beton (a)} &= \frac{(a_s \times f_y)}{(0,85 \times f_{c'} \times b)} \\ &= \frac{(753,982 \times 420)}{(0,85 \times 30 \times 1000)} \\ &= 8,279 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kapasitas lentur (mn)} &= a_s \times f_y \times \left(\frac{d-a}{2}\right) \\ &= 753,982 \times 420 \times \left(\frac{92-12}{2}\right) \\ &= 18,549 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lokasi garis netral (c)} &= \frac{a}{\beta_1} \\ &= \frac{8,279}{0,8357} \\ &= 9,907 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Regangan tulangan tarik } (\epsilon_s) &= 0,003 \times \frac{(d-c)}{c} \\ &= 0,003 \times \frac{(92-9,907)}{9,907} \\ &= 0,016 \end{aligned}$$

$$\Phi = 0,9$$

$$\begin{aligned} \phi M_n &= 0,9 \times 18,549 \\ &= 16,694 \end{aligned}$$

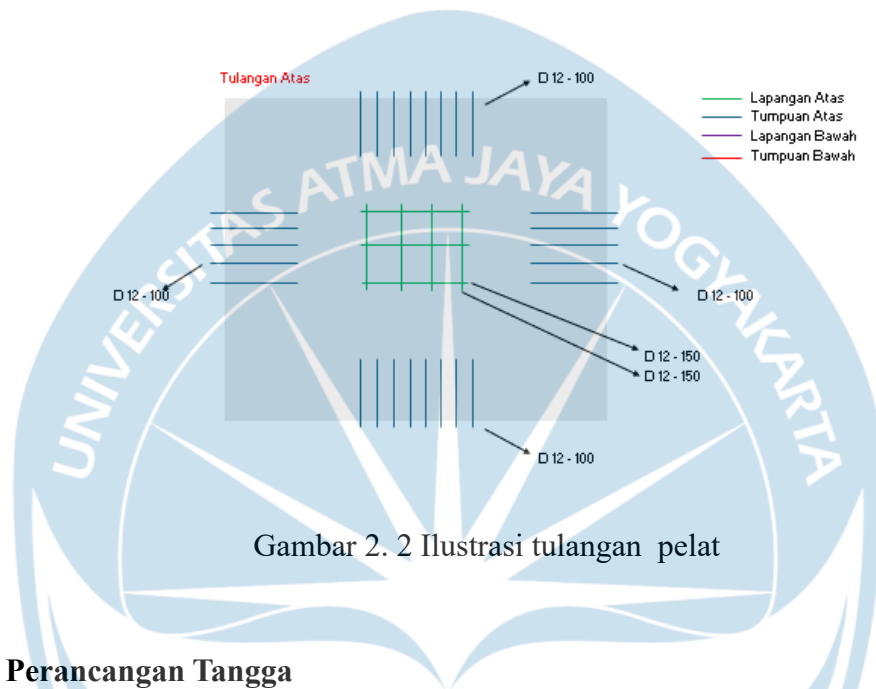
Cek kapasitas:

$$\begin{aligned} \phi M_n &> M_u \\ 16,694 &> 6,9 \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

Kemudian perhitungan dilakukan untuk semua arah sesuai output gaya dalam sehingga diperoleh rekapitulasi seperti tabel dibawah ini.

Tabel 2. 6 Rekapitulasi penulangan pelat

	Lx	Ly
Tumpuan	D12 - 100	D12 - 100
Lapangan	D12 - 150	D12 - 150



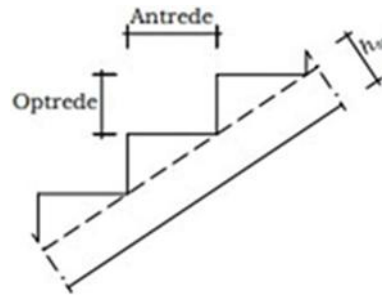
Gambar 2. 2 Ilustrasi tulangan pelat

2.5 Perancangan Tangga

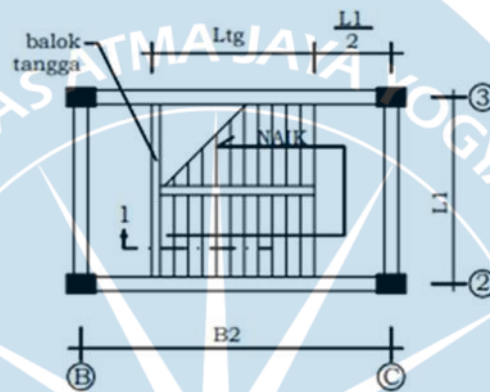
2.5.1 Denah Ruang Tangga

Dalam merencanakan tangga, langkah awal yang dilakukan adalah membuat denah ruang tangga. Menurut Haryanto (2008), terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan ruang tangga, antara lain:

1. Ukuran lebar bordes harus minimal sama dengan lebar tangga.
2. Tinggi anak tangga (*optrede/O*) disarankan berada pada kisaran 150 mm hingga 200 mm, sedangkan lebar pijakan (*antrede/A*) minimal 280 mm sampai 300 mm. Gambaran mengenai *optrede* dan *antrede* dapat dilihat pada gambar 2.2 dan gambar 2.3



Gambar 2. 3 Ilustrasi Optrede dan Antrede



Gambar 2. 4 Denah Tangga

Perhitungan jumlah anak tangga antar lantai menggunakan rumus berikut.

$$n_{tg} = \frac{hlt}{o}$$

Perhitungan lebar tangga atau L_{tg} menggunakan rumus berikut.

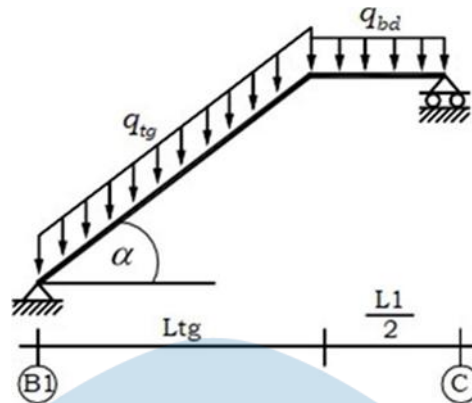
$$L_{tg} = \left(\frac{1}{2} \frac{hlt}{o} - 1 \right) A$$

Sudut kemiringan tangga dicari dengan rumus berikut.

$$L_{tg} = \tan^{-1} \left(\frac{o}{A} \right)$$

2.5.2 Perencanaan Beban Tangga

Perhitungan beban tangga dilakukan setelah diketahui dimensi ruang tangga beserta sudut kemiringannya. Selanjutnya, tebal pelat tangga (htg) dapat ditentukan secara perkiraan. Beban pada tangga dibagi menjadi dua jenis, yaitu beban q_{tg} dan q_{bd} . Letak masing-masing beban tersebut dapat dilihat pada ilustrasi berikut.



Gambar 2. 5 Ilustrasi Letak Beban q_{tg} dan q_{bd}

Persamaan perhitungan tangga dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 2. 7 Perhitungan Tangga

	Berat sendiri Tangga	
Beban q_{tg} :	Berat anak tangga	$= \frac{1}{2} O \times \text{berat volume beton}$
	Berat ubin & spesi	$= 0,05 \times \text{berat volume ubin}$
	Berat railing (diperkirakan)	$= \text{diperkirakan}$
Beban q_{bd} :	Berat sendiri tangga	$= h_{tg} \times \text{berat volume beton}$
	Berat ubin & spesi	$= 0,05 \times \text{berat volume ubin}$
	Berat railing (diperkirakan)	$= \text{diperkirakan}$

Lalu, setelah beban q_{tg} dan q_{bd} ditentukan, dicari M_u dan V_u dengan rumus berikut.

$$M_u = 1,4M_{DL}$$

$$M_u = 1,2M_{DL} + 1,6 M_{LL}$$

Dari dua persamaan diatas, dipilih kombinasi terbesar untuk menjadi M_u .

$$V_u = 1,4V_{DL}$$

$$V_u = 1,2V_{DL} + 1,6 V_{LL}$$

Dari dua persamaan diatas, dipilih kombinasi terbesar untuk menjadi V_u .

Setelah beban tangga dari q_{tg} dan q_{bd} dihitung, dicari beban fondasi tangga untuk menentukan dimensi fondasi tangga.

Setelah beban untuk fondasi tangga dihitung, dicari tegangan netto tanah dengan persamaan berikut.

$$\sigma_{\text{netto}} = \sigma_{\text{tanah}} - (d - h_{\text{pondasi}})(\gamma_{\text{tana}}) - h_{\text{pondasi}} - \gamma_{\text{beton}}$$

Berikut adalah contoh perhitungan beban tangga untuk perancangan tangga Gedung Fakultas Teknik Mesin.

$$\text{Lebar Bordes} = 2400 \text{ mm}$$

$$\text{Optrede (O)} = 175 \text{ mm}$$

$$\text{Antrode (A)} = 300 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal Pelat Tangga} = 150 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi antar lantai (Het)} = 4200 \text{ mm}$$

$$\text{Jumlah anak tangga (n)} = \frac{Het}{O} = \frac{4200}{175} = 24 \text{ buah}$$

$$\text{Lebar Tangga (L}_{tg}) = \left(\frac{1}{2} \times \frac{Het}{O} - 1 \right) \times A$$

$$= \left(\frac{1}{2} \times 24 - 1 \right) \times 300$$

$$= 3350 \text{ mm}$$

$$\alpha = \arctan \frac{1}{A} = \arctan \frac{1}{300} = 27^\circ$$

1. Beban qtg

$$\text{Berat Sendiri Tangga} = (\text{htg} / \cos \alpha) \times \text{berat volume beton}$$

$$= (0,15 \times \cos 28) \times 24$$

$$= 4,091 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Berat ubin \& spesi} = (\frac{1}{2} \times O) \times \text{berat volume ubin}$$

$$= 0,05 \times 21$$

$$= 1,05 \text{ kN/ m}^2$$

$$\text{Berat Railling(Asumsi)} = 1 \text{ kN/m}^2$$

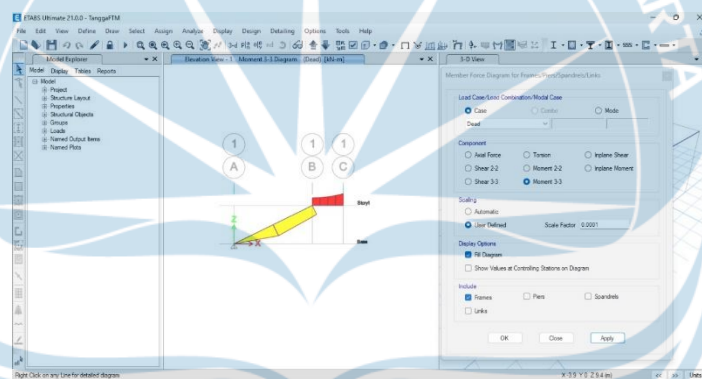
$$\text{Total beban qtg} = 8,085 \text{ kN/m}^2$$

2. Beban qbd

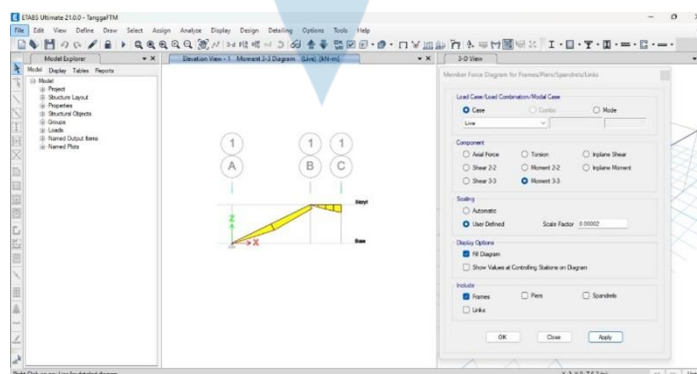
$$\text{Berat Sendiri Tangga} = \text{htg} \times \text{berat volume beton}$$

	$= 0,15 \times 24$
Berat ubin & spesi	$= 0,05 \times \text{berat volume ubin}$
	$= 0,05 \times 21$
	$= 1,05 \text{ kN/m}^2$
Berat Railling(Asumsi)	$= 1 \text{ kN/m}^2$
Total beban qbd	$= 5,65 \text{ kN/m}^2$
Beban hidup	$= 4,79 \text{ kN/m}^2$

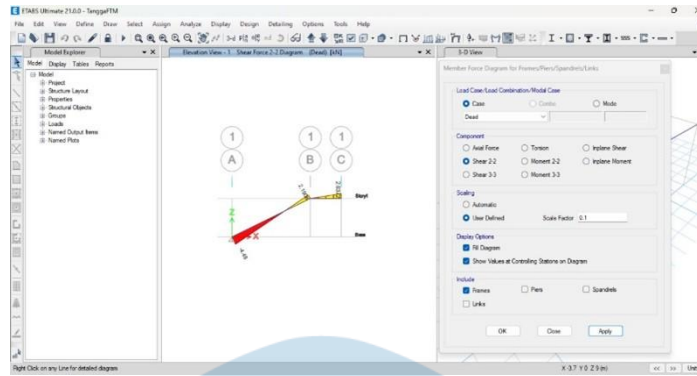
Setelah itu, beban-beban tangga dimasukkan ke dalam ETABS untuk mencari besarnya momen dan geser dari dimensi tangga dan beban yang telah dihitung. Berikut adalah gambar pemodelan tangga di ETABS.



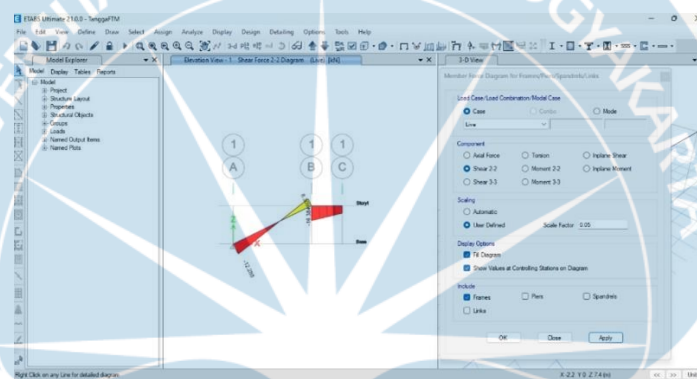
Gambar 2. 6 BMD akibat beban mati pada tangga



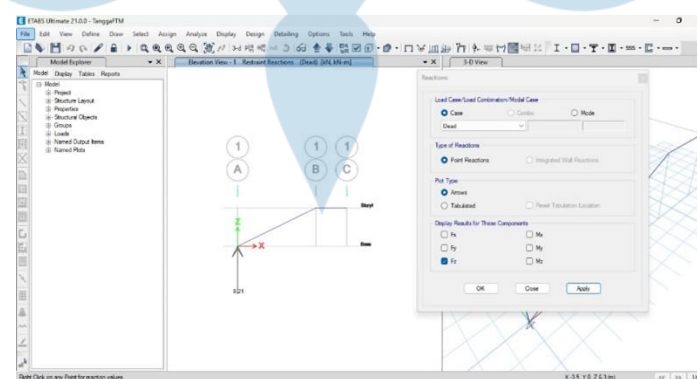
Gambar 2. 7 BMD akibat beban hidup pada tangga



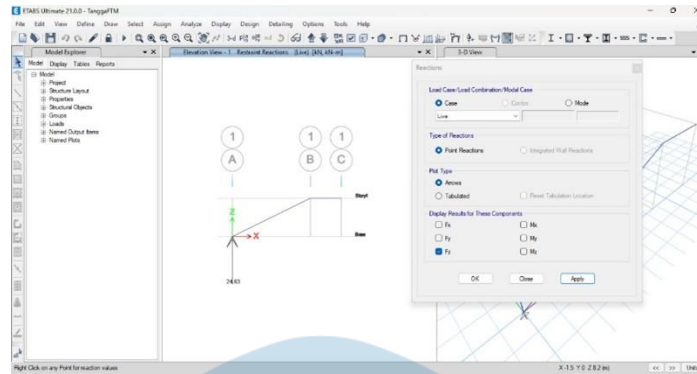
Gambar 2. 8 SFD akibat beban mati pada tangga



Gambar 2. 9 SFD akibat beban hidup pada tangga



Gambar 2. 10 Diagram joint akibat beban mati pada tangga



Gambar 2. 11 Diagram joint akibat beban hidup pada tangga

Dari ETABS diatas, didapatkan pembebanan sebesar berikut ini.

Pembebanan :

$$\text{MDL} = 22,792 \quad \text{kNm}$$

$$\text{MLL} = 13,4659 \quad \text{kNm}$$

$$\text{VDL} = 19,171 \quad \text{kN}$$

$$\text{VLL} = 11,358 \quad \text{kN}$$

Kombinasi pembebanan :

$$\text{MU1} = 31,9088 \quad \text{kNm}$$

$$\text{MU2} = 48,89584 \quad \text{kNm}$$

$$\text{VU1} = 26,8394 \quad \text{Kn}$$

$$\text{VU2} = 41,178 \quad \text{Kn}$$

Dipilih :

$$\text{Mur} = 48,89584 \quad \text{kNm}$$

$$\text{Vur} = 41,178 \quad \text{Kn}$$

2.5.3 Perencanaan Beban Tangga

Luas tulangan tangga (A_{tg}) dihasilkan dari momen rencana (M_{ur}).

Gaya geser rencana (V_{ur}) digunakan untuk cek ketebalan dari tangga (h_{tg}) dengan syarat $V_c \geq V_{ur}$. Tebal tangga perlu diperbesar apabila $V_c < V_{ur}$.

Momen rencana pelat fondasi dapat dihitung dengan persamaan:

$$m_u = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{u\max} + \sigma_{u\min}}{2} \right) \left(\frac{B}{2} + e - \frac{1}{2} b t g \right)^2$$

$$v_u = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{u\max} + \sigma_{u\min}}{2} \right) \left(\frac{B}{2} + e - \frac{1}{2} b t g \right)^2$$

Tegangan terfaktor tangga yang telah dihitung pada perencanaan beban tangga, kemudian dihitung untuk menentukan penulangan pelat fondasi tangga. Setelah itu, lebar fondasi tangga (B) diperkirakan dengan asumsi. Panjang tegak lurus bidang gambar dianggap 1 satuan Panjang (1 meter), kemudian cek tegangan pada tanah yang terjadi dengan rumus berikut.

$$\sigma_{\max} = \frac{Q_{tg}}{B} + 6 \frac{Q_{tg}(e)}{B^2} \leq \sigma_{\text{netto}}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{Q_{tg}}{B} - 6 \frac{Q_{tg}(e)}{B^2} \leq 0$$

Berikut adalah perhitungan penulangan tangga untuk bangunan Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta.

2.5.4 Perhitungan Rencana Penulangan Tangga Tumpuan

$$M_{ux} = 24,44792 \text{ kNm}$$

Direncanakan :

$$\text{Tulangan Pokok} = 12 \text{ mm}$$

$$\text{Tulangan Susut} = 10 \text{ mm}$$

$$f_y \text{ Tulangan Pokok} = 400 \text{ Mpa}$$

$$f_y \text{ Tulangan Susut} = 240 \text{ Mpa}$$

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

$$B = 1500 \text{ mm}$$

$$\text{Selimut Beton} = 20 \text{ mm}$$

$$H_{tg} = 162 \text{ mm}$$

$$D_s = 136 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \rho &= -\frac{0,85 f'_c}{f_y} \left[1 - \sqrt{\frac{4M_{ux}}{1,7 \phi f'_c b d^2}} \right] \\ &= -\frac{0,85 \times 30}{400} \left[1 - \sqrt{\frac{4 \times 24,44792 \times 10^6}{1,7 \times 0,9 \times 30 \times 1500 \times 136^2}} \right] \\ &= 0,002497 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{s \text{ min}} = 0,002bh = 486 \text{ mm}$$

$$A_{s \text{ perlu}} = \rho b d = 509,32 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{0,25\pi d^2 b}{A_s} \\
 &= \frac{0,25\pi 12^2 1000}{509,32} \\
 &= 333,08 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

Digunakan D 12-300

Cek Gaya Geser :

$$V_c = 0,17\sqrt{f'_c} b d = 0,17 \times \sqrt{30} \times 1500 \times 136 / 1000 = 189,95 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 0,75 V_c = 142,463 > 41,178$$

Tulangan Susut :

$$A_{s \text{ min}} = 486 \text{ mm}^2$$

$$S = 242,40684 \text{ mm}$$

Digunakan P10-200

2.5.5 Perhitungan Rencana Penulangan Tangga Lapangan

$$M_{ux} = 39,116672 \text{ kNm}$$

Direncanakan :

$$\text{Tulangan Pokok} = 12 \text{ mm}$$

$$\text{Tulangan Susut} = 10 \text{ mm}$$

$$f_y \text{ Tulangan Pokok} = 400 \text{ Mpa}$$

$$f_y \text{ Tulangan Susut} = 240 \text{ Mpa}$$

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

$$B = 1500 \text{ mm}$$

$$\text{Selimut Beton} = 20 \text{ mm}$$

$$H_{tg} = 162 \text{ mm}$$

$$D_s = 136 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 \rho &= -\frac{0,85 f'_c}{f_y} \left[1 - \sqrt{\frac{4M_{ux}}{1,7\phi f'_c b d^2}} \right] \\
 &= -\frac{0,85 \times 30}{400} \left[1 - \sqrt{\frac{4 \times 39,116672 \times 10^6}{1,7 \times 0,9 \times 30 \times 1500 \times 136^2}} \right] \\
 &= 0,004045 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$A_{s \text{ min}} = 0,002bh = 486 \text{ mm}$$

$$A_{s \text{ perlu}} = \rho b d = 825,13 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{0,25\pi d^2 b}{A_s} \\
 &= \frac{0,25\pi 12^2 1000}{825,13} \\
 &= 205,6 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

Digunakan D 12-200

Cek Gaya Geser :

$$V_c = 0,17\sqrt{f'_c} b d = 0,17 \times \sqrt{30} \times 1500 \times 136 / 1000 = 189,95 \text{ kN}$$

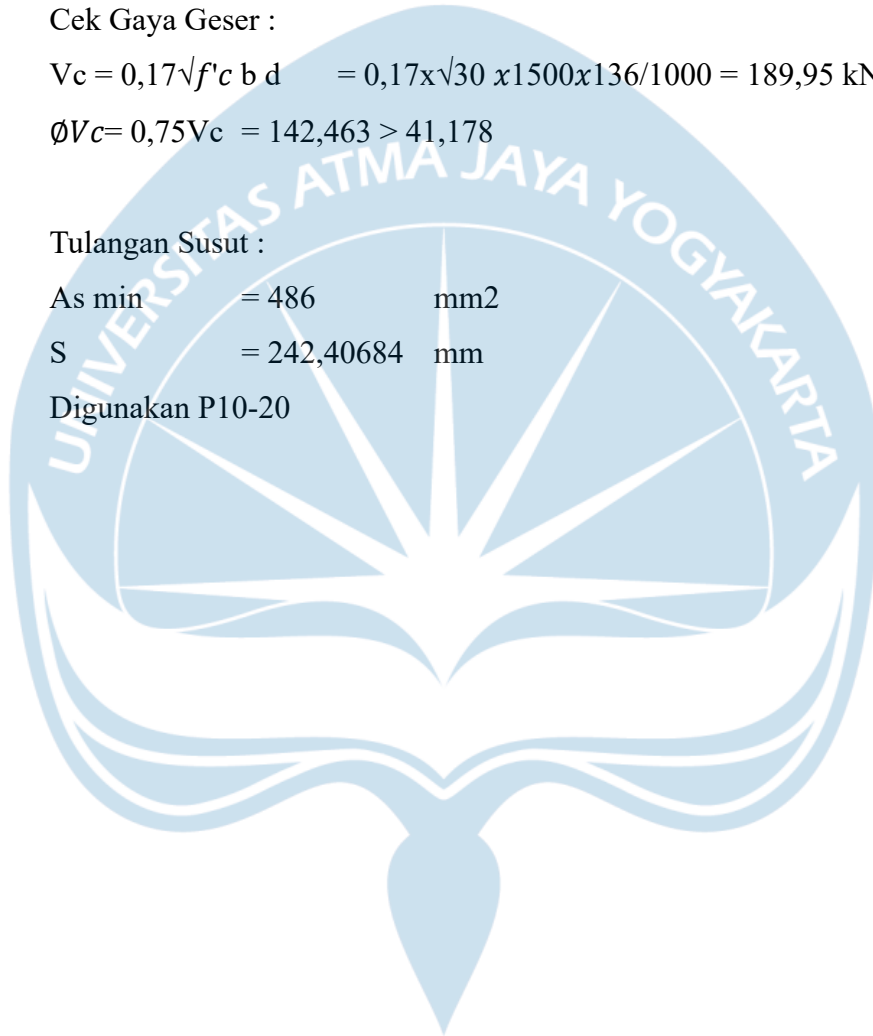
$$\phi V_c = 0,75 V_c = 142,463 > 41,178$$

Tulangan Susut :

$$A_{s \text{ min}} = 486 \quad \text{mm}^2$$

$$S = 242,40684 \quad \text{mm}$$

Digunakan P10-20



2.6 Penentuan Sistem Struktur

Mengacu pada SNI 1726:2019 yang menggunakan konsep *life safety*, dasar pemikirannya adalah bahwa ketika terjadi gempa besar sesuai dengan zona gempa, struktur bangunan akan mengalami kerusakan sebanding dengan energi gempa yang diserap. Artinya, kerusakan akibat gempa masih dimungkinkan, namun bangunan tidak boleh mengalami keruntuhan agar tetap dapat digunakan untuk proses evakuasi. Oleh karena itu, diperlukan penetapan sejumlah parameter tambahan yang berfungsi sebagai data pendukung dalam perhitungan beban gempa maupun parameter lainnya, sebagai berikut:

1. Penentuan kategori Resiko

Tabel 3 – Kategori risiko bangunan gedung dan nongedung untuk beban gempa (lanjutan)

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah ibadah - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat - Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	IV

Gambar 2. 12 SNI 1726 : 2019 Tabel 3– Kategori risiko bangunan gedung dan nongedung untuk beban gempa

Berdasarkan tabel pada gambar tersebut, Gedung Fakultas Teknik Mesin yang berlokasi di Yogyakarta dikategorikan sebagai bangunan dengan risiko tingkat IV, karena termasuk dalam fasilitas pendidikan..

2. Penentuan Faktor Keutamaan Gempa

Tabel 4 – Faktor keutamaan gempa

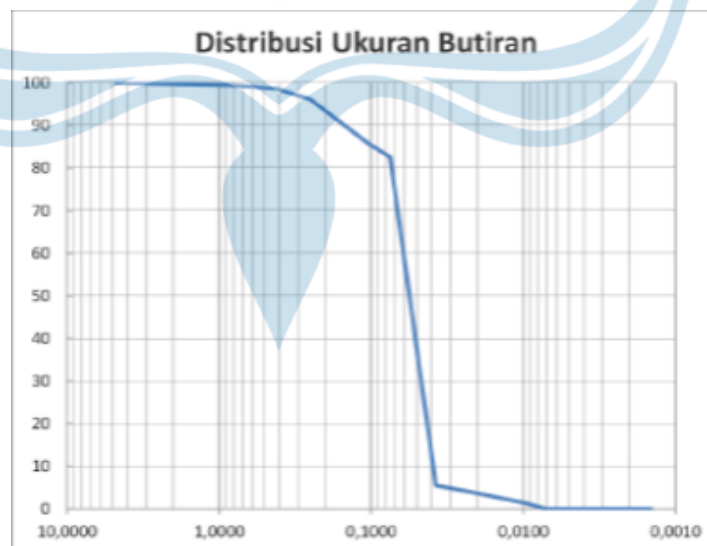
Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Gambar 2. 13 SNI 1726:2019 Tabel 4 - Faktor Keutamaan Gempa

Berdasarkan tabel pada gambar tersebut, Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta tergolong dalam kategori risiko IV, sehingga faktor keutamaan gempa (I_e) untuk bangunan ini adalah 1,50.

3. Penentuan Klasifikasi Situs

Klasifikasi situs tanah diperoleh melalui perhitungan data tanah yang didapat dari Laboratorium Penyelidikan Tanah Universitas Atma Jaya Yogyakarta dengan melihat nilai N-rerata. Perhitungan data tanah dan grafik tersebut ada dalam tabel berikut:



Gambar 2. 14 Grafik BH-1 N rerata

Tabel 2. 8 Hasil Perhitungan N-rerata BH-1

Kedalaman (m)	N (SPT)	T (m)	$N'' = T/N$
1-3	2	2	1
3-5	4	2	0,5
5-6	7	1	0,14
6-8	7	2	0,29
8-11	10	3	0,30
11-13	12	2	0,17
13-15	15	2	0,13
15-17	24	2	0,08
17-19	44	2	0,05
19-22	32	3	0,09
22-23	17	1	0,06
23-25	18	2	0,11
25-27	17	2	0,12
27-29	24	2	0,08
29-30	30	1	0,03
jumlah		30	3,16
N-rerata			9,5076
Kelas situs Tanah			SE (tanah lunak)

Berdasarkan hasil perhitungan dari data yang diperoleh, nilai N-rerata adalah sebesar 9,5076. Dari nilai tersebut dapat ditentukan bahwa kelas situs tanah pada Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta termasuk dalam kategori SE (tanah lunak), sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut.

Kelas situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{s}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	<15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir $\bar{s}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)		

Gambar 2. 15 Penentuan Klasifikasi Situs

Berdasarkan hasil penyelidikan tanah pada bangunan Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta didapatkan bahwa klasifikasi situsnya termasuk ke dalam kelas situs SE (Tanah Lunak) sesuai tabel yang tertera di atas.

4. Penentuan Parameter Respon Spektra

Nama Kota : Yogyakarta

PGAm = 0.5013 g

CRs = 0.9-0.95

CR1 = 0.85-0.9

Ss = 1.107

S1 = 0.507

TL = 6 s

Fa = 1.0144

Fv = 2.186

Sms = 1.123

Sm1 = 0.108

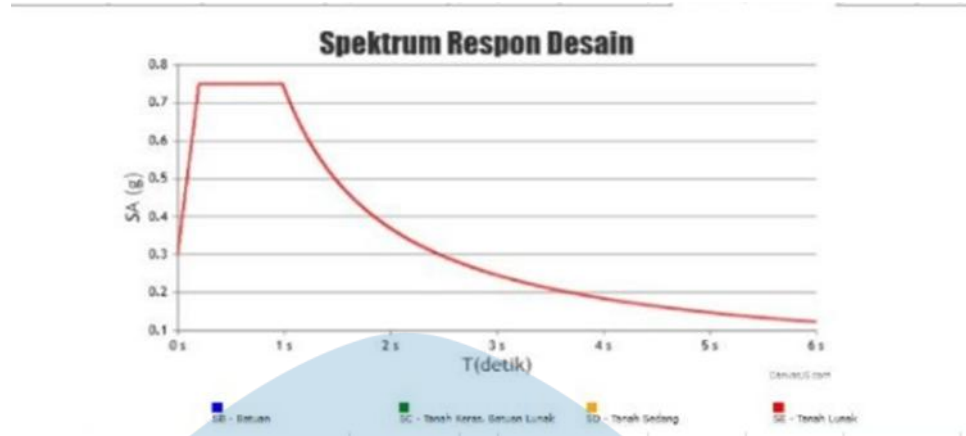
Sds = 0.748

Sd1 = 0.739

T0 = 0.197 s

Ts = 0.987 s

Berikut adalah grafik respons spektrum dari data-data di atas yang tertera pada gambar 2.16.



Gambar 2. 16 Grafik Respon Spektrum

5. Penentuan Periode Fundamental Gedung

Tipe struktur	C_t	α
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilindungi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenal gaya seismik:		
• Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
• Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Gambar 2. 17 Penentuan Periode Fundamental Gedung

Berdasarkan Gambar 2.17 di atas, struktur Gedung Fakultas Teknik Mesin menggunakan sistem rangka beton pemikul momen, dengan nilai $C_t = 0,0466$ dan $\alpha = 0,9$. Parameter tersebut digunakan untuk menghitung periode fundamental pendekatan (T_a) dalam satuan detik, dengan memperhitungkan ketinggian total struktur (h_n).

6. Penentuan Kategori Desain Seismik (KDS)

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

Gambar 2. 18 Penentuan Kategori Desain Seismik (KDS)

Berdasarkan gambar 2.18 diatas, dengan $S_{DS} = 0,748$ g maka termasuk kategori resiko IV. Maka, kategori desain seismik pada bangunan Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta adalah D.

7. Penentuan Koefisien Modifikasi Respons (R)

Tabel 12 – Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk sistem pemikul gaya seismik (lanjutan)

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_x (m) ^d					
				Kategori desain seismik					
				B	C	D ^e	E ^e	F ^e	
19. Dinding geser batu bata polos didetail	2	2%	2	TB	Ti	Ti	Ti	Ti	
20. Dinding geser batu bata polos biasa	1%	2%	1%	TB	Ti	Ti	Ti	Ti	
21. Dinding geser batu bata prategang	1%	2%	1%	TB	Ti	Ti	Ti	Ti	
22. Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser	7	2%	4%	TB	TB	22	22	22	
23. Dinding rangka ringan (baja canal dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	7	2%	4%	TB	TB	22	22	22	
24. Dinding rangka ringan dengan panel geser dan semua material lainnya	2%	2%	2%	TB	TB	10	TB	TB	
25. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2%	5	TB	TB	48	48	30	
26. Dinding geser pelat baja khusus	7	2	6	TB	TB	48	48	30	
C. Sistem rangka pemikul momen									
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5%	TB	TB	TB	TB	TB	
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5%	TB	TB	48	30	Ti	
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4%	3	4	TB	TB	10 ^e	Ti ^e	Ti ^e	
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3%	3	3	TB	TB	Ti ^e	Ti ^e	Ti ^e	
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ^h	8	3	5%	TB	TB	TB	TB	TB	
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4%	TB	TB	Ti	Ti	Ti	
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2%	TB	Ti	Ti	Ti	Ti	
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5%	TB	TB	TB	TB	TB	
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4%	TB	TB	Ti	Ti	Ti	

Gambar 2. 19 Penentuan Koefisien Modifikasi Respons (R)

Berdasarkan gambar tabel diatas, sistem pemikul gaya seismik bangunan Gedung Fakultas Teknik Mesin di Yogyakarta adalah rangka beton bertulang pemikul momen khusus, sehingga nilai $R = 8$, $\Omega_0 = 3$, dan $C_d = 5,5$.

2.7 Perencanaan Pembebanan Struktur

2.7.1 Beban Mati

Beban mati (Dead Load) merupakan seluruh komponen permanen yang terdapat pada struktur, seperti kolom, balok, pelat lantai, dan elemen struktural lainnya. Perhitungan beban mati biasanya dilakukan secara otomatis oleh perangkat lunak pemodelan struktur. Nilai beban mati tersebut

dipengaruhi oleh jenis material yang digunakan serta dimensi elemen yang dimasukkan ke dalam model struktur.

- Berat satuan lantai atap
 - Waterproofing 2cm = 0,41 kN/m²
 - Spesi 3cm = 0,62 kN/m²
 - Plafon, MEP, dll = 0,470663 kN/m²
 - DL = 1,50663 kN/m²
- Berat satuan lantai tipikal
 - Pasir 5 cm = 0,78 kN/m²
 - Spesi 3 cm = 0,61 kN/m²
 - Partisi = 0,72 kN/m²
 - Plafon, ME, dll = 0,65618 kN/m²
 - DL = 2,76618 kN/m²
- Berat satuan balok
 - B1 700 X 400 mm = 53,76 kN
 - B2 600 X 300 mm = 30,24 kN
 - B3 500 X 300 mm = 21,19 kN
 - BA 300 X 250 mm = 7,20 kN
- Berat satuan kolom
 - K1 800 X 800 mm = 64,51 kN
 - K2 600 X 600 mm = 36,28 kN

2.7.2 Beban Hidup

Beban hidup (Live Load) merupakan beban yang timbul akibat aktivitas manusia dan penggunaan bangunan di dalam Gedung Fakultas Teknik Mesin. Beban ini mencakup segala kegiatan dan pergerakan yang terjadi selama bangunan digunakan, sehingga bersifat tidak tetap dan dapat berubah-ubah tergantung fungsi ruang serta intensitas pemakaiannya..

Tabel 2. 9 Rekap Beban Hidup Ruangan

No	Penggunaan	LL
1	selasar lantai 1	4,79
2	selasar diatas lantai 1	3,83

No	Penggunaan	LL
3	laboratium	4,8
4	Ruang kelas	3,83
5	Toilet	2,4
6	Musholla	3
7	Ruang penyimpanan	3,6
8	Kantor	2,4
9	Gudang	4,79
10	Atap	0,96

2.7.3 Beban Gempa

Perencanaan pembebanan struktur dilakukan untuk menentukan besarnya beban yang akan bekerja pada bangunan ketika terjadi gempa. Selain itu, perhitungan beban pada setiap lantai bertujuan untuk memperoleh gaya geser seismik yang muncul akibat pengaruh gempa. Proses perencanaan ini mengacu pada ketentuan SNI 1726:2019 sebagai pedoman utama.

Nilai periode fundamental awal struktur (T_a) yang diperoleh dari hasil analisis menggunakan program pemodelan struktur harus dibatasi dan tidak boleh melebihi nilai batas atas (C_u). Berdasarkan SNI 1726:2019, periode fundamental struktur ditentukan menggunakan rumus berikut:

$$a-EQx=Ct-EQx \times h_n x \quad a-EQy=Ct-EQy \times h_n x$$

Setelah memperoleh periode fundamental struktur (T_a), langkah selanjutnya adalah menghitung nilai eksponen (K) yang berhubungan dengan periode struktur. Perhitungan nilai K ini mengacu pada SNI 1726:2019, sesuai dengan ketentuan pada Pasal 7.8.3, dan dapat ditentukan melalui rumus berikut:

1. $T \leq 0,5$ detik, $K = 1$
2. $T \geq 2,5$ detik, $K = 2$
3. $0,5 < T < 2,5$ detik, $K = 0,5T + 0,75$

Setelah memperoleh beberapa parameter sebelumnya, gaya geser dasar seismik (V) pada arah yang ditentukan dapat dihitung sesuai dengan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1. Perhitungannya menggunakan koefisien respons seismik (C_s) serta berat seismik efektif (W), dengan rumus sebagai berikut:

$$x = Vy = CsW$$

Setelah semua parameter diperoleh, gaya seismik lateral, F_x (kN), pada setiap tingkat ditentukan menurut persamaan di SNI 1726:2019 Pasal 7.8.3, dengan langkah awal menentukan nilai faktor distribusi vertikal (C_{vx}) sebagai berikut:

$$v_x = w_x / \sum w_i$$

Setelah memperoleh nilai faktor distribusi vertikal (C_{vx}), langkah berikutnya adalah menghitung gaya seismik lateral (F_x) pada setiap tingkat bangunan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$x = C_{vx}V$$

Berikut adalah perhitungan untuk tiap bangunan yang ada di dalam wilayah proyek Fakultas Teknik Mesin.

Perhitungan Berat Bangunan

- Berat Lantai Atap

Pelat Lantai	=	2631.2 kN
B1 700 X 400 mm	= 23 X 53,76	= 1236,4 kN
B2 600 X 300 mm	= 12 X 30,24	= 362,8 kN
B3 500 X 300 mm	= 46 X 21.19	= 974.74 kN
BA 300 X 250 mm	= 30 X 7.20	= 216 kN
K1 800 X 800 mm	= 39 X 64,51	= 2468,2 kN
K2 600 X 600 mm	= 27 X 36.28	= 961.16 kN
W lantai Atap	=	2499.36 kN

- Berat Lantai 3

Pelat Lantai	=	3102,7 kN
B1 700 X 400 mm	= 23 X 53,76	= 1236,4 kN
B2 600 X 300 mm	= 12 X 30,24	= 362,8 kN
B3 500 X 300 mm	= 46 X 21.19	= 974.74 kN
BA 300 X 250 mm	= 30 X 7.20	= 216 kN
K1 800 X 800 mm	= 39 X 64,51	= 2468,2 kN
K2 600 X 600 mm	= 27 X 36.28	= 961.16 kN
W lantai 3	=	5955,152 kN

- Berat Lantai 2

Pelat Lantai	=	3102,7 kN
B1 700 X 400 mm	= 23 X 53,76	= 1236,4 kN
B2 600 X 300 mm	= 12 X 30,24	= 362,8 kN
B3 500 X 300 mm	= 46 X 21.19	= 974.74 kN
BA 300 X 250 mm	= 30 X 7.20	= 216 kN
K1 800 X 800 mm	= 39 X 64,51	= 2468,2 kN
K2 600 X 600 mm	= 27 X 36.28	= 961.16 kN
K3 300 X 500 mm	= 5 X 24.72	= 123.61 kN
W lantai 2	=	5481,04 kN

- Berat Lantai 1

Pelat Lantai	=	3102,7 kN
B1 700 X 400 mm	= 23 X 53,76	= 1236,4 kN
B2 600 X 300 mm	= 12 X 30,24	= 362,8 kN
B3 500 X 300 mm	= 46 X 21.19	= 974.74 kN
BA 300 X 250 mm	= 30 X 7.20	= 216 kN
K1 800 X 800 mm	= 39 X 64,51	= 2468,2 kN
K2 600 X 600 mm	= 27 X 36.28	= 961.16 kN
W lantai 1	=	6609,9 kN

- Nilai T

$$T_a = 0.0466 \times 16.8^{0.9} = 0.590 \text{ detik}$$

- Nilai K

$$K = 0,5 T + 0,75 = 1,1$$

Tabel 2. 10 Rekapitulasi Beban Gempa Tiap Lantai Metode Statik Ekuivalen

LANTAI	W (KN)	Hx (m)	Wi x h ^k	Fx (KN)	Cvx
4	974430.17	16.8	251508.8	2434.40186	0.31777
3	1523974.94	12.8	287014.1	2778.06416	0.362629
2	1476014.35	8.4	170608	1651.34709	0.215555
1	1590924.84	4.2	82350.19	797.083249	0.104046
Jumlah	5565344.3		791481	7660.896	

2.7.4 Kombinasi Pembebanan

Perancangan struktur bangunan Fakultas Teknik Mesin dilakukan dengan menggunakan kombinasi pembebanan yang mengacu pada ketentuan SNI 1726:2019. Adapun kombinasi pembebanan yang akan dianalisis adalah sebagai berikut:

1. $1,4 \text{ DL} + 1,4 \text{ SIDL}$
2. $1,2 \text{ DL} + 1,2 \text{ SIDL} + 1,6 \text{ LL}$
3. $1.35 \text{ D} + E_x \text{ TT} + 0.3E_\gamma + \text{L}$
4. $1.35 \text{ D} - E_x \text{ TT} + 0.3E_\gamma + \text{L}$
5. $1.35 \text{ D} + E_x \text{ TT} - 0.3E_\gamma + \text{L}$
6. $1.35 \text{ D} - E_x \text{ TT} - 0.3E_\gamma + \text{L}$
7. $1.35 \text{ D} + E_x \text{ TT}^- + 0.3E_\gamma + \text{L}$
8. $1.35 \text{ D} - E_x \text{ TT}^- + 0.3E_\gamma + \text{L}$
9. $1.35 \text{ D} + E_x \text{ TT}^- - 0.3E_\gamma + \text{L}$
10. $1.35 \text{ D} - E_x \text{ TT}^- - 0.3E_\gamma + \text{L}$
11. $1.35 \text{ D} + E_\gamma \text{ TT} + 0.3E_x + \text{L}$
12. $1.35 \text{ D} - E_\gamma \text{ TT} + 0.3E_x + \text{L}$
13. $1.35 \text{ D} + E_\gamma \text{ TT} - 0.3E_x + \text{L}$
14. $1.35 \text{ D} - E_\gamma \text{ TT} - 0.3E_x + \text{L}$
15. $1.35 \text{ D} + E_\gamma \text{ TT}^- + 0.3E_x + \text{L}$
16. $1.35 \text{ D} - E_\gamma \text{ TT}^- + 0.3E_x + \text{L}$
17. $1.35 \text{ D} + E_\gamma \text{ TT}^- - 0.3E_x + \text{L}$
18. $1.35 \text{ D} - E_\gamma \text{ TT}^- - 0.3E_x + \text{L}$

$$19. 0.75 D + E_x TT + 0.3E_\gamma$$

$$20. 0.75 D - E_x TT + 0.3E_\gamma$$

$$21. 0.75 D + E_x TT - 0.3E_\gamma$$

$$22. 0.75 D - E_x TT - 0.3E_\gamma$$

$$23. 0.75 D + E_x TT^- + 0.3E_\gamma$$

$$24. 0.75 D - E_x TT^- + 0.3E_\gamma$$

$$25. 0.75 D + E_x TT^- - 0.3E_\gamma$$

$$26. (0.75 D - E_x TT^- - 0.3E_\gamma$$

$$27. 0.75 D + E_\gamma TT + 0.3E_x$$

$$28. 0.75 D - E_\gamma TT + 0.3E_x$$

$$29. 0.75 D + E_\gamma TT - 0.3E_x$$

$$30. 0.75 D - E_\gamma TT - 0.3E_x$$

$$31. 0.75 D + E_\gamma TT^- + 0.3E_x$$

$$32. 0.75 D - E_\gamma TT^- + 0.3E_x$$

$$33. 0.75 D + E_\gamma TT^- - 0.3E_x$$

$$34. 0.75 D - E_\gamma TT^- - 0.3E_x$$

2.8 Pengecekan Ketidakberaturan

2.8.1 Ketidakberaturan Horizontal

Ketidakberaturan horizontal muncul apabila distribusi massa, kekakuan, atau kekuatan pada suatu bangunan tidak merata dalam arah horizontal, sehingga dapat menimbulkan respons dinamis yang tidak diinginkan saat gempa terjadi. Berdasarkan SNI 1726:2019, ketidakberaturan horizontal dibagi menjadi lima jenis, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.11.

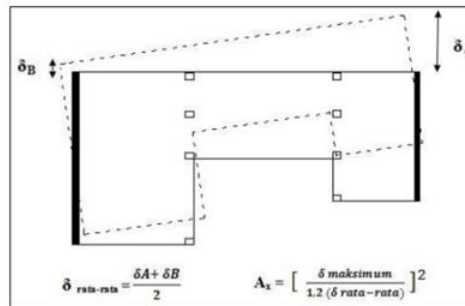
Tabel 2. 11 Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a	Ketidakberaturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,2 kali simpangan antar tingkat rata-rata dikedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	0 0 0 0 Tabel 2.15 0	D, E, dan F B, C, D, E, dan F F C, D, E, dan F C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
1b	Ketidakberaturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	0 0 0 0 0 0 Tabel 2.15	E dan F D B, C, dan D C dan D C dan D D B, C, dan D
2	Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15 % dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau.	0 Tabel 2.15	D, E, dan F D, E, dan F
3	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma	0	D, E, dan F D, E, dan F

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
	didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 % daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50 % dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.	Tabel 2.15	
4	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.	0 0 0 Tabel 2.15 0	B, C, D,E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
5	Ketidakberaturan sistem nonparalel didefinisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik.	0 0 Tabel 2.15 0	C, D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F

1. Ketidakberaturan Torsi (Tipe 1a dan 1b)

Ketidakberaturan torsi (1a) terjadi apabila simpangan lateral maksimum pada salah satu ujung struktur yang melintang terhadap sumbu vertikal melebihi 1,2 kali simpangan rata-rata di kedua ujung struktur tersebut. Sementara itu, ketidakberaturan torsi berlebihan (1b) terjadi apabila simpangan antar tingkat maksimum pada salah satu ujung struktur melintang terhadap sumbu melebihi 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Ketidakberaturan horizontal tipe 1a dan 1b pada struktur ditunjukkan pada Gambar 2.20.



Gambar 2. 20 Ketidakberaturan Horizontal 1a dan 1b

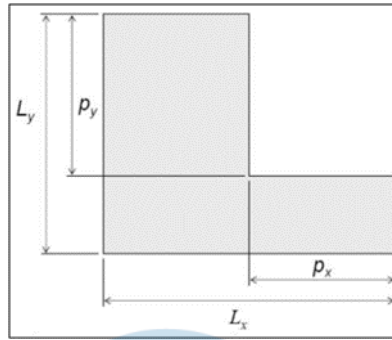
Berdasarkan hasil pemeriksaan terhadap ketidakberaturan horizontal tipe 1a dan 1b pada model struktur yang telah dibuat, diperoleh bahwa tidak ditemukan adanya ketidakberaturan tersebut. Hasil lengkap pemeriksaan dapat dilihat pada Tabel 2.12 berikut:

Tabel 2. 12 Hasil Analisis Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal Torsi Tipe 1a dan 1b

Lantai	Arah X		Arah Y	
	$\Delta_{\max}/\Delta_{\text{avg}}$	Cek	$\Delta_{\max}/\Delta_{\text{avg}}$	Cek
Atap	1.032	OK	1.007	OK
3	1.016	OK	1.004	OK
2	1.01	OK	1.006	OK
1	1.009	OK	1.008	OK

2. Ketidakberaturan Sudut Dalam

Ketidakberaturan tipe 2 muncul pada bangunan yang memiliki denah berbentuk L,T,U,Y atau bentuk lain dengan sudut dalam yang menonjol. Contoh bentuk ketidakberaturan ini dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2. 21 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 2



Gambar 2. 22 Pemodelan Ketidakberaturan Horizontal Sudut Dalam

Berdasarkan Gambar 2.22 pada pemodelan yang telah dibuat, nilai P_x dan P_y yang didapatkan dan dapat dilihat pada tabel 2.13 :

Tabel 2. 13 Nilai Px dan Py

Lx	56	m
Px	24	m
Ly	17	m
Py	4	m
Lx/Px	0.3036	
Ly/Py	0.1667	
Cek	H.2	

Berdasarkan tabel perhitungan diatas, didapati ketidakberaturan horizontal tipe2 dan cek konsekuensi H.2.

3. Ketidakberaturan diskontinuitas Diafragma

Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma terjadi ketika luas void >50% dari luas total denah. Pada Gedung Fakultas Teknik Mesin tidak terjadi ketidakberaturan diskontinuitas diafragma, karena total luas void < 50% dari total luas denah.



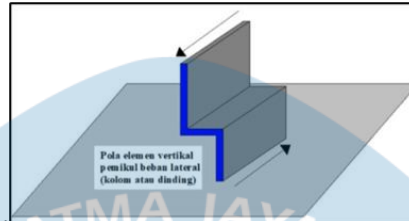
Gambar 2. 23 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 3

Tabel 2. 14 Perhitungan Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

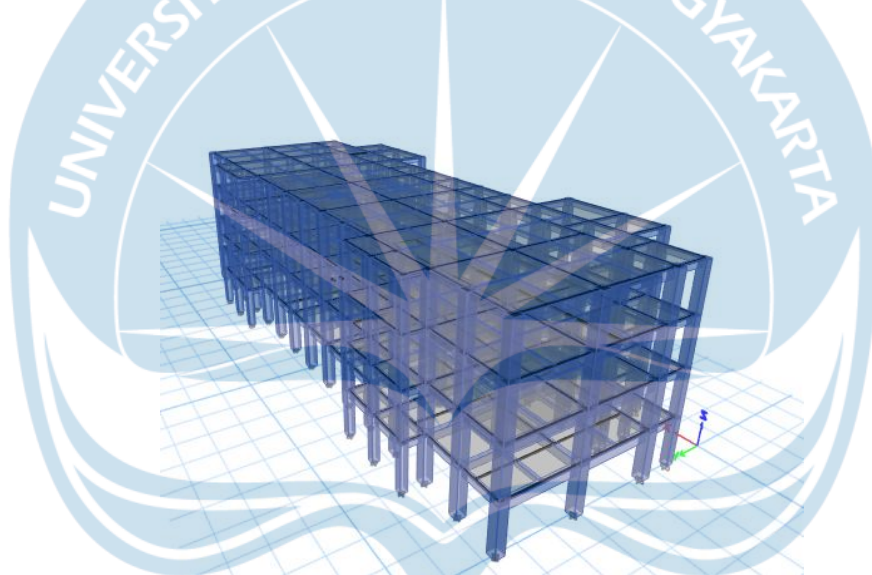
Syarat 1		
A_{total}	1064	m ²
A_{bukaan}	50.28	m ²
Cek	OK	

4. Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak turus terhadap bidang

Ketidakberaturan tipe 4 terjadi apabila elemen struktur, seperti balok atau dinding geser, mengalami pergeseran tegak lurus terhadap bidangnya. Kondisi ini biasanya disebabkan oleh perbedaan ketinggian antarsegmen bangunan atau perubahan arah pada elemen struktural. Hasil pemeriksaannya ditunjukkan pada Gambar 2.24.



Gambar 2. 24 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 4



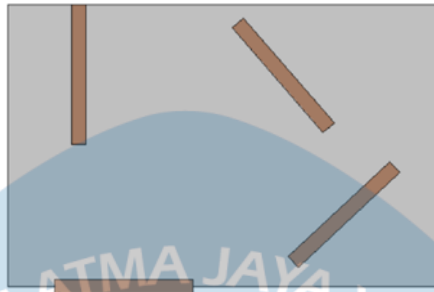
Gambar 2. 25 Struktur Bangunan Pada Etabs

Berdasarkan hasil pengecekan terhadap ketidakberaturan yang disebabkan oleh pergeseran tegak lurus terhadap bidang, diperoleh bahwa proyeksi denah struktur menunjukkan elemen kolom menerus hingga ke pondasi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat ketidakberaturan horizontal tipe 4 pada struktur tersebut.

5. Ketidakberaturan sistem nonparalel

Ketidakberaturan tipe 5 muncul ketika elemen-elemen struktur penahan

gaya lateral, seperti dinding geser atau rangka baja maupun beton, tidak searah dengan sumbu utama bangunan atau membentuk sudut yang bervariasi terhadap arah utama gaya gempa. Proses pemeriksaan ketidakberaturan ini dapat dilihat pada Gambar 2.26.



Gambar 2. 26 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 5

Berdasarkan hasil pemeriksaan terhadap ketidakberaturan sistem nonparalel, diketahui bahwa seluruh elemen kolom dan balok tersusun sejajar dengan arah sumbu X dan Y. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat ketidakberaturan horizontal tipe 5 pada struktur tersebut.

2.8.2 Ketidakberaturan Vertikal

Ketidakberaturan vertikal muncul apabila distribusi massa, kekakuan, atau kekuatan pada arah vertikal bangunan tidak merata, sehingga dapat menimbulkan respons dinamis yang tidak seimbang ketika terjadi gempa. Berdasarkan SNI 1726:2019, ketidakberaturan vertikal dibagi menjadi lima jenis, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.15.

Tabel 2. 15 Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel 2.15	D, E, dan F

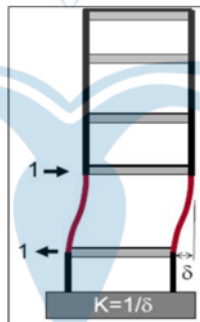
	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1b	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	0 Tabel 2.15	E dan F D, E, dan F
2	Ketidakberaturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 2.15	D, E, dan F
3	Ketidakberaturan Geometri Vertikal didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130 % dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tingkat didekatnya.	Tabel 2.15	D, E, dan F
4	Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.	0 0 Tabel 2.15	B, C, D, E, dan F D, E, dan F D, E, dan F
5a	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	0 Tabel 2.15	E dan F D, E, dan F
5b	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah	0 0 Tabel 2.15	D, E, dan F B dan C D, E, dan F

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
	kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.		

1. Ketidakberaturan Kekakuan Vertikal (Tipe 1a dan 1b)

Ketidakberaturan vertikal tipe 1a terjadi apabila kekakuan suatu lantai berkurang lebih dari 70% dibandingkan lantai di atasnya, atau kurang dari 80% terhadap rata-rata kekakuan tiga lantai di atasnya. Lantai lunak ini menjadi titik lemah dalam struktur, karena saat gempa terjadi, lantai tersebut berpotensi mengalami deformasi berlebihan hingga kegagalan total.

Sementara itu, ketidakberaturan vertikal tipe 1b muncul ketika kekuatan lateral suatu lantai kurang dari 80% dibandingkan dengan lantai di atasnya. Lantai yang lemah seperti ini cenderung menerima gaya geser yang lebih besar dan berisiko runtuh terlebih dahulu saat gempa. Ketidakberaturan vertikal tipe 1a dan 1b pada struktur ditunjukkan pada Gambar 2.27.



Gambar 2. 27 Ketidakberaturan Vertikal 1a dan 1b

Berdasarkan hasil pemeriksaan terhadap ketidakberaturan vertikal tipe 1a dan 1b pada model struktur yang telah dibuat, diperoleh bahwa tidak terdapat ketidakberaturan tersebut. Hasil lengkap pemeriksaan ditampilkan pada Tabel 2.16 berikut.

Tabel 2. 16 Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekakuan	Cek	Kekakuan	Cek
	kN/m		kN/m	
4	272378.649		286400.862	
3	428074.161	OK	447430.771	OK
2	534925.248	OK	556598.892	OK
1	1102598.97	OK	1143398.82	OK

2. Ketidakberaturan Berat (Tipe 2)

Ketidakberaturan vertikal tipe 2 terjadi apabila massa suatu lantai melebihi 150% dari massa lantai di atasnya. Perbedaan massa yang cukup besar ini dapat memengaruhi respons dinamis bangunan, sehingga meningkatkan gaya inersia dan memperbesar potensi terjadinya kegagalan struktural. Ketidakberaturan vertikal tipe 2 pada struktur ditunjukkan pada Gambar 2.28 berikut.



Gambar 2. 28 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 2

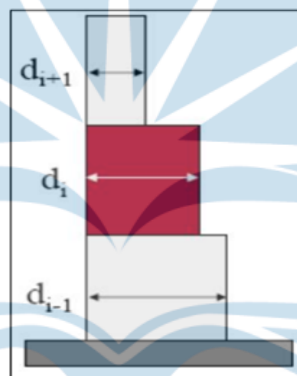
Berdasarkan hasil pemeriksaan terhadap ketidakberaturan akibat perbedaan berat (massa), diketahui bahwa pada struktur yang ditinjau tidak terdapat ketidakberaturan vertikal tipe 2. Hasil analisis tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.17 berikut.

Tabel 2. 17 Perhitungan ketidakberaturan Berat Massa

Lantai	Massa	Cek
	kg	
4	1151479.16	OK
3	1551809.92	OK
2	1503481.24	OK
1	1618556.79	OK

3. Ketidakberaturan Geometri Vertikal (Tipe 3)

Ketidakberaturan vertikal tipe 3 terjadi apabila dimensi horizontal bangunan berubah lebih dari 130% dibandingkan dengan lantai di atas atau di bawahnya. Perubahan dimensi yang signifikan ini dapat menimbulkan konsentrasi tegangan pada area transisi, sehingga meningkatkan potensi munculnya retakan maupun keruntuhan lokal. Ketidakberaturan vertikal tipe 3 ditunjukkan pada Gambar 2.29 berikut.



Gambar 2. 29 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 3

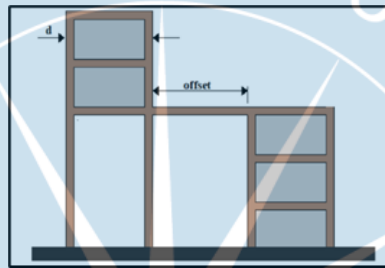
Berdasarkan hasil pemeriksaan, diketahui bahwa pada struktur yang ditinjau tidak ditemukan adanya ketidakberaturan vertikal tipe 3. Data hasil pengecekan tersebut disajikan pada Tabel 2.18 berikut.

Tabel 2. 18 Rekapitan Ketidakberaturan Tipe 3

Lantai	L	Cek
	mm	
4	800	
3	800	OK
2	800	OK
1	800	OK

4. Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral (Tipe 4)

Ketidakteraturan vertikal tipe 4 terjadi apabila elemen-elemen struktur pemikul gaya lateral, seperti dinding geser atau kolom, tidak menerus dari bagian atas hingga ke bawah bangunan. Ketidakberlanjutan elemen vertikal tersebut dapat mengakibatkan gaya gempa tidak tersalurkan secara optimal, sehingga meningkatkan risiko terjadinya deformasi berlebih maupun kegagalan lokal pada area transisi. Ketidakberaturan vertikal tipe 4 ditunjukkan pada Gambar 2.30 berikut.

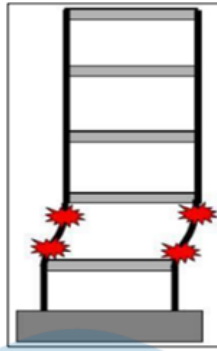


Gambar 2. 30 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 4

Berdasarkan hasil pemeriksaan terhadap ketidakberaturan akibat diskontinuitas arah bidang pada elemen penahan gaya lateral vertikal, diperoleh bahwa struktur tidak mengalami ketidakberaturan vertikal tipe 4. Hal ini disebabkan karena tidak terdapat shear wall maupun core wall yang mengalami offset pada struktur tersebut.

5. Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebih akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat (Tipe 5)

Ketidakteraturan vertikal tipe 5 terjadi apabila kekuatan lateral suatu lantai lebih rendah dibandingkan dengan lantai di atasnya, sehingga lantai tersebut menjadi titik lemah dalam sistem struktur. Lantai yang lebih lemah akan menerima gaya gempa yang lebih besar dibandingkan lantai lainnya, sehingga berpotensi mengalami deformasi berlebihan atau bahkan runtuh terlebih dahulu. Ketidakberaturan vertikal tipe 5 ditunjukkan pada Gambar 2.31 berikut.



Gambar 2.31 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 4

Berdasarkan pemeriksaan, didapatkan hasil tidak terjadi ketidakberaturan vertikal seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.19 berikut.

Tabel 2. 19 Rekapitulasi Ketidakberaturan Tipe 5

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekuatan kN	Cek	Kekuatan kN	Cek
4	2392.3212		2383.9102	
3	5126.6754	OK	5115.5229	OK
2	6783.0984	OK	6776.1704	OK
1	7583.7028	OK	7583.7028	OK

2.8.3 Konsekuensi Ketidakberaturan

Setelah dilakukan pemeriksaan terhadap ketidakberaturan, baik horizontal maupun vertikal, apabila ditemukan adanya satu atau lebih jenis ketidakberaturan, maka perlu dilakukan peninjauan terhadap konsekuensi dari ketidakberaturan tersebut sesuai ketentuan yang berlaku. Pada struktur Gedung Fakultas Teknik Mesin, teridentifikasi adanya ketidakberaturan horizontal tipe 2, sehingga perlu mengacu pada ketentuan SNI 1726:2019 Pasal 7.3.3.4 dan Tabel 16. Pemenuhan persyaratan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.31 dan Gambar 2.32 berikut.

7.3.3.4 Peningkatan gaya akibat ketidakberaturan untuk kategori desain seismik D hingga F

Untuk struktur dengan kategori desain seismik D, E, atau F dan mempunyai ketidakberaturan struktur horizontal Tipe 1a, 1b, 2, 3, atau 4 pada Tabel 13 atau ketidakberaturan struktur vertikal Tipe 4 pada Tabel 14, gaya desain yang ditentukan berdasarkan 0 harus ditingkatkan 25 % untuk elemen-elemen sistem pemikul gaya seismik di bawah ini:

1. Sambungan antara diafragma dengan elemen-elemen vertikal dan dengan elemen-elemen kolektor;
2. Elemen kolektor dan sambungannya, termasuk sambungan-sambungan ke elemen vertikal dari sistem pemikul gaya seismik.

PENGECUALIAN Gaya yang dihitung menggunakan efek gaya seismik, termasuk faktor kuat lebih sesuai 0, tidak perlu diperbesar.

Gambar 2. 31 SNI 1726-2019 Pasal 7.3.3.4

Berdasarkan hasil peninjauan terhadap Pasal 7.3.3.4 pada SNI 1726:2019 dengan mempertimbangkan kategori desain seismik Gedung Fakultas Teknik Mesin, pasal tersebut dapat diabaikan. Hal ini dikarenakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, elemen pelat lantai hanya dirancang sebagai elemen penahan beban gravitasi dan tidak difungsikan sebagai elemen diafragma.

Tabel 16 – Prosedur analisis yang diizinkan

Kategori desain seismik	Karakteristik struktur	Analisis gaya lateral ekuivalen pasal 0	Analisis spektrum respons ragam pasal 0	Prosedur respons riwayat waktu seismik pasal 0
B, C	Semua struktur	I	I	I
D, E, F	Bangunan dengan kategori risiko I atau II yang tidak lebih 2 tingkat diatas dasar	I	I	I
	Struktur tanpa ketidakberaturan struktural dan ketinggiannya tidak melebihi 48,8 m	I	I	I
	Struktur tanpa ketidakberaturan struktural dengan ketinggian melebihi 48,8 m dan $T < 3,5 T_c$	I	I	I
	Struktur dengan ketinggian tidak melebihi 48,8 m dan hanya memiliki ketidakberaturan horizontal tipe 2,3,4 atau 5 atau ketidakberaturan vertikal tipe 4, 5a atau 5b	I	I	I
	Semua struktur lainnya	TI	I	I

CATATAN I: Diizinkan, TI: Tidak Diizinkan

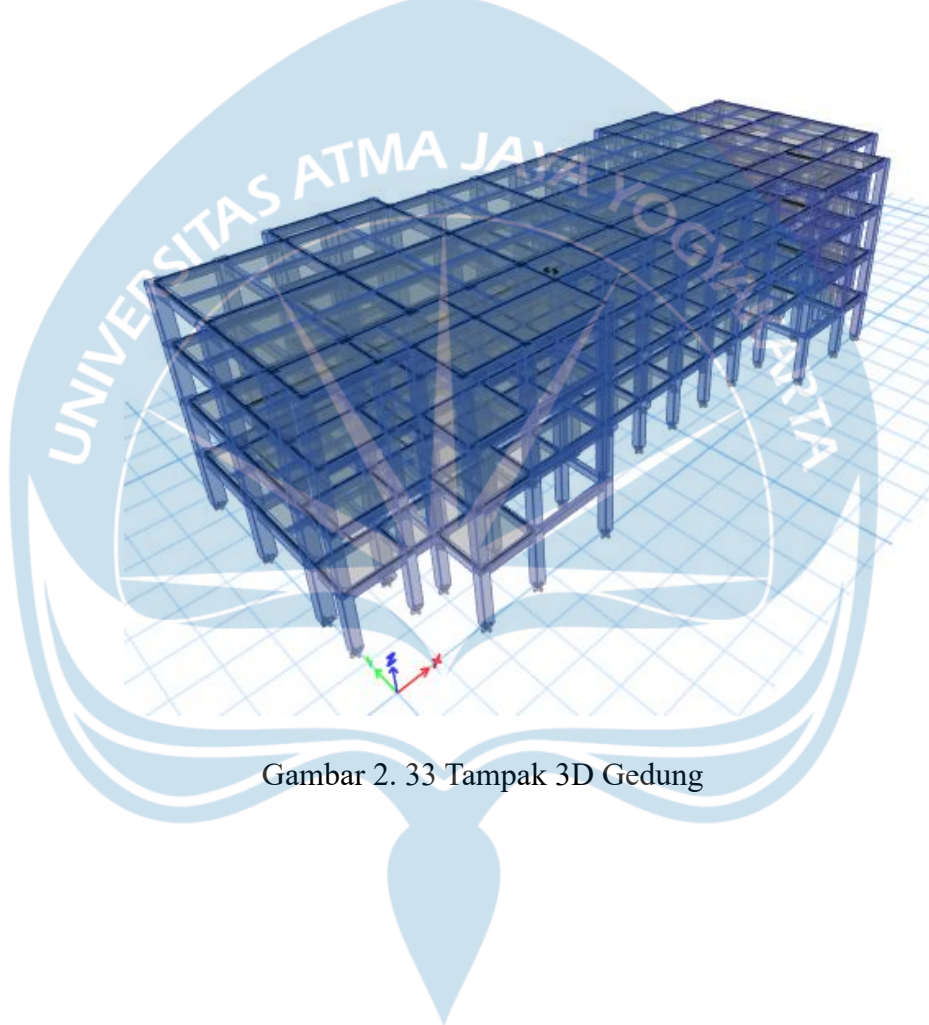
Gambar 2. 32 SNI 1726-2019 Tabel 16

Berdasarkan Tabel 16 pada SNI 1726:2019 serta dengan menyesuaikan kategori desain seismik bangunan Gedung Fakultas Teknik Mesin, maka pemenuhan terhadap pasal konsekuensi dilakukan dengan memastikan bahwa prosedur analisis yang diperbolehkan meliputi analisis gaya lateral ekuivalen, analisis respons ragam, dan analisis respons riwayat waktu seismik.

2.9 Pemodelan Struktur

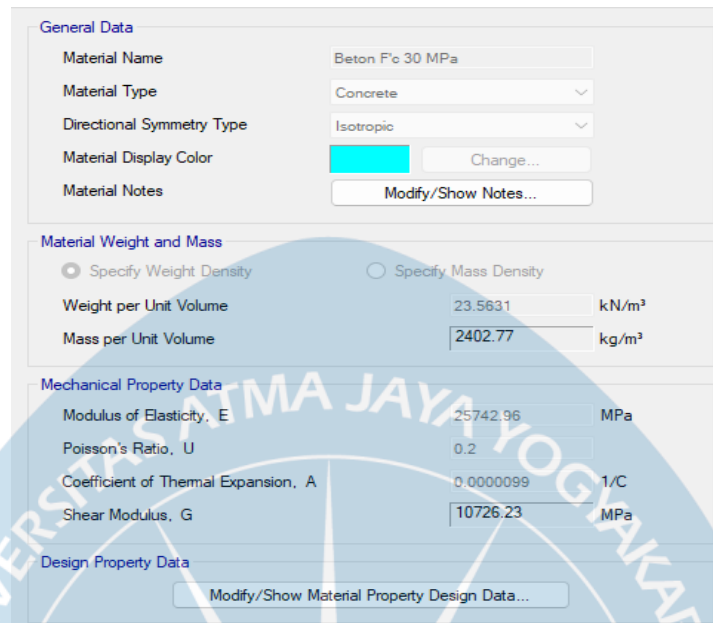
Pemodelan struktur pada perancangan Gedung Fakultas Teknik Mesin ini dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS, yang mencakup elemen rangka beton, pelat beton, serta pemodelan atap dak. Berikut ditampilkan visualisasi model struktur hasil pemodelan menggunakan etabs.

1. Pemodelan keseluruhan gedung



Gambar 2. 33 Tampak 3D Gedung

2. Material beton $F_c = 30 \text{ Mpa}$



General Data

Material Name	Beton Fc 30 MPa
Material Type	Concrete
Directional Symmetry Type	Isotropic
Material Display Color	 Change...
Material Notes	Modify/Show Notes...

Material Weight and Mass

☒ Specify Weight Density ☐ Specify Mass Density

Weight per Unit Volume	23.5631	kN/m ³
Mass per Unit Volume	2402.77	kg/m ³

Mechanical Property Data

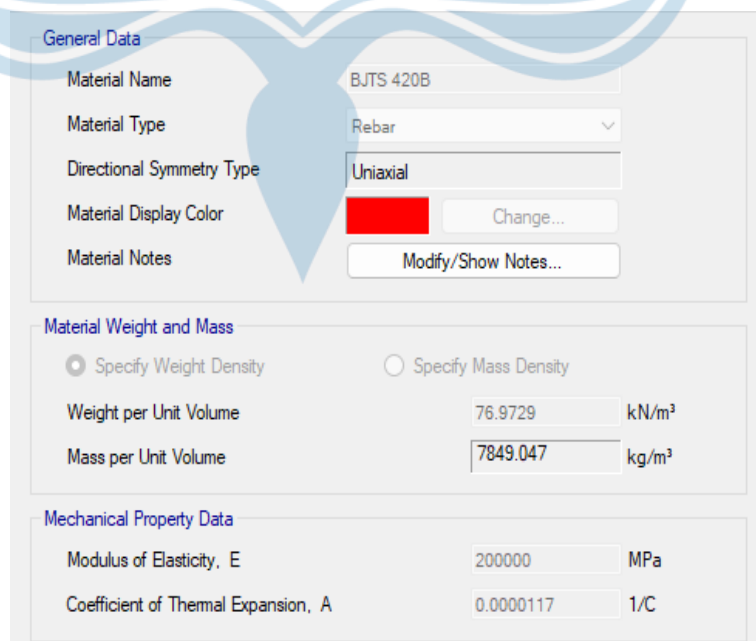
Modulus of Elasticity, E	25742.96	MPa
Poisson's Ratio, U	0.2	
Coefficient of Thermal Expansion, A	0.0000099	1/C
Shear Modulus, G	10726.23	MPa

Design Property Data

Modify/Show Material Property Design Data...

Gambar 2. 34 Material Beton $F_c = 30 \text{ Mpa}$

3. Material baja tulangan sirip (BJTS) = 420 Mpa



General Data

Material Name	BJTS 420B
Material Type	Rebar
Directional Symmetry Type	Uniaxial
Material Display Color	 Change...
Material Notes	Modify/Show Notes...

Material Weight and Mass

☒ Specify Weight Density ☐ Specify Mass Density

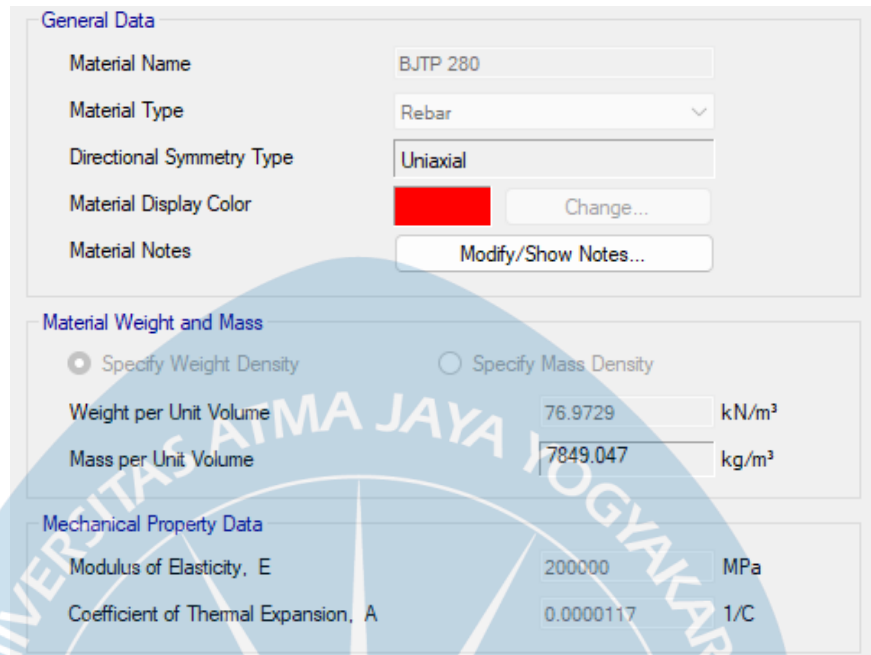
Weight per Unit Volume	76.9729	kN/m ³
Mass per Unit Volume	7849.047	kg/m ³

Mechanical Property Data

Modulus of Elasticity, E	200000	MPa
Coefficient of Thermal Expansion, A	0.0000117	1/C

Gambar 2. 35 Material Baja 420 Mpa

4. Material baja tulangan polos (BJTP) = 280 MPa



General Data

Material Name	BJTP 280
Material Type	Rebar
Directional Symmetry Type	Uniaxial
Material Display Color	Change...
Material Notes	Modify/Show Notes...

Material Weight and Mass

☒ Specify Weight Density ☐ Specify Mass Density

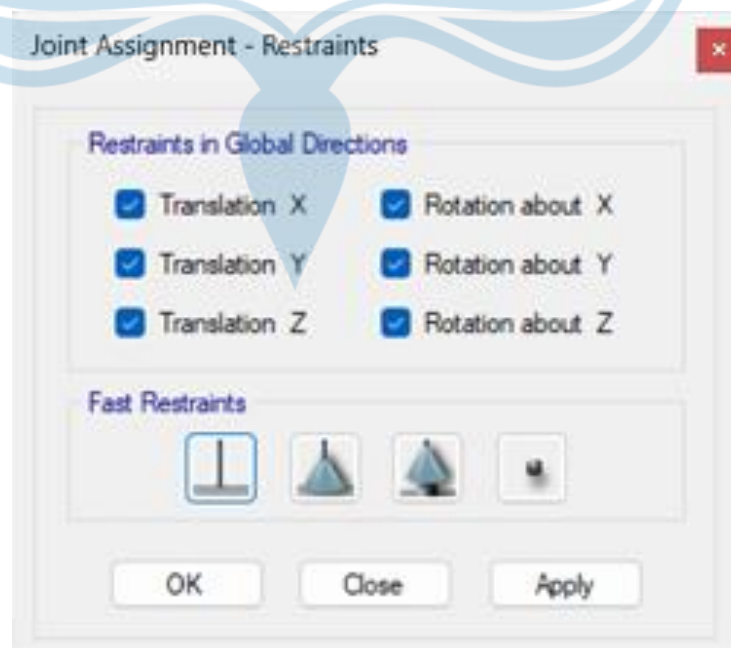
Weight per Unit Volume	76.9729	kN/m ³
Mass per Unit Volume	7849.047	kg/m ³

Mechanical Property Data

Modulus of Elasticity, E	200000	MPa
Coefficient of Thermal Expansion, A	0.0000117	1/C

Gambar 2. 36 Material Baja 280 Mpa

5. Tumpuan bangunan



Joint Assignment - Restraints

Restraints in Global Directions

☒ Translation X	☒ Rotation about X
☒ Translation Y	☒ Rotation about Y
☒ Translation Z	☒ Rotation about Z

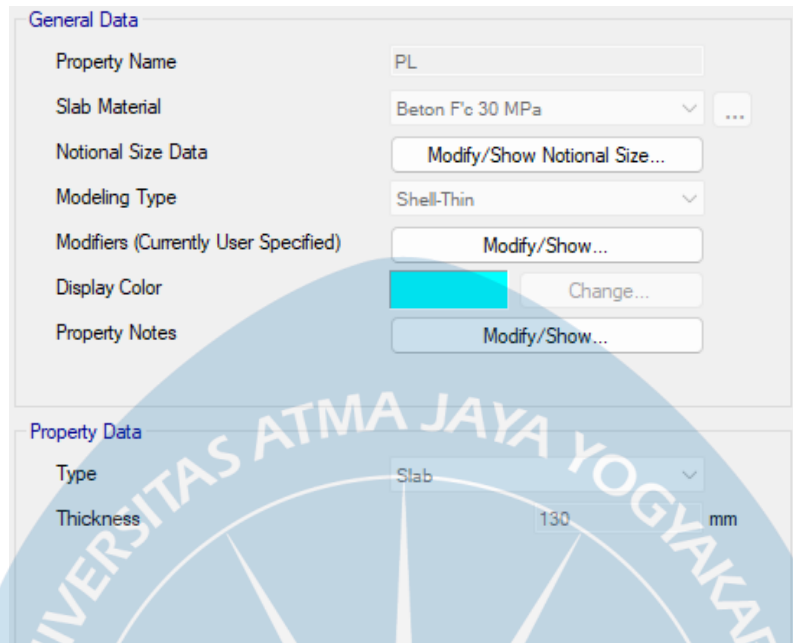
Fast Restraints

☒ ☐ ☐ ☐

OK Close Apply

Gambar 2. 37 Tumpuan Jepit Penuh

6. Tebal Pelat Lantai



General Data

Property Name: PL

Slab Material: Beton F'c 30 MPa

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Modeling Type: Shell-Thin

Modifiers (Currently User Specified): Modify/Show...

Display Color: Change...

Property Notes: Modify/Show...

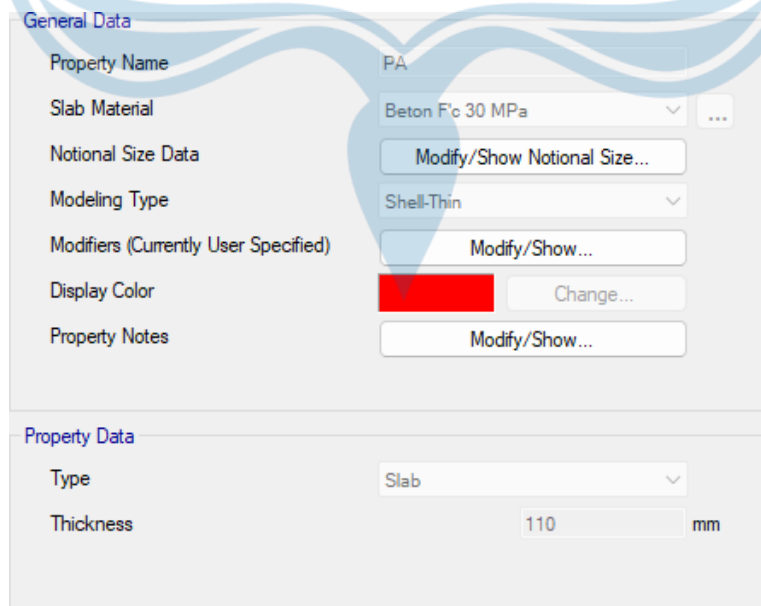
Property Data

Type: Slab

Thickness: 130 mm

Gambar 2. 38 Tebal Ukuran Pellat Lantai

7. Tebal Pelat Atap



General Data

Property Name: PA

Slab Material: Beton F'c 30 MPa

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Modeling Type: Shell-Thin

Modifiers (Currently User Specified): Modify/Show...

Display Color: Change...

Property Notes: Modify/Show...

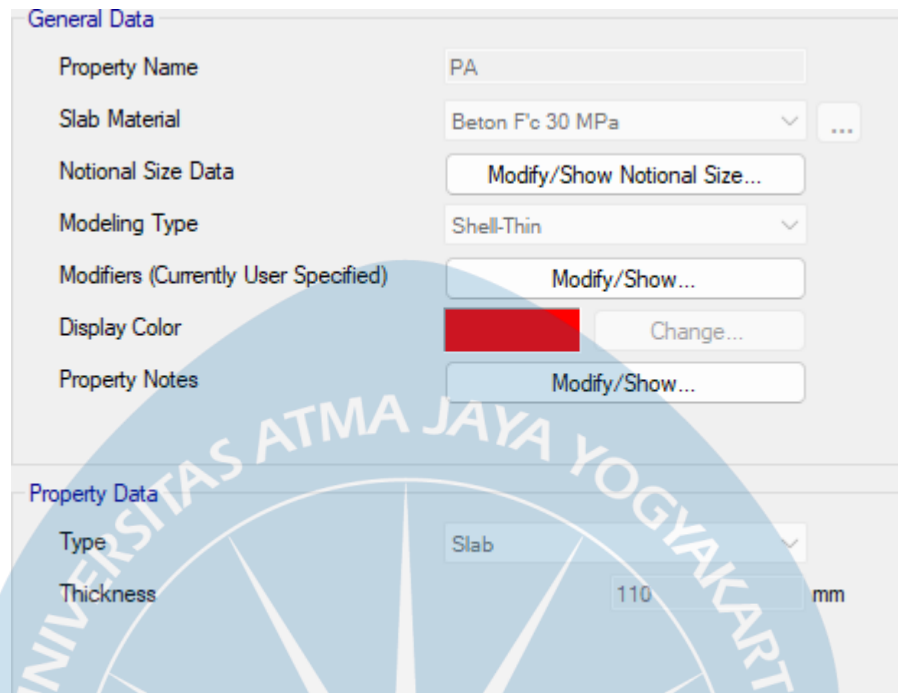
Property Data

Type: Slab

Thickness: 110 mm

Gambar 2. 39 Tebal Ukuran Pelat Atap

8. Tebal Pelat Tangga



The screenshot shows a software interface for defining a slab property. The 'General Data' section includes fields for Property Name (PA), Slab Material (Beton F'c 30 MPa), Notional Size Data (Modify/Show Notional Size...), Modeling Type (Shell-Thin), Modifiers (Currently User Specified) (Modify/Show...), Display Color (a red color swatch with a Change... button), and Property Notes (Modify/Show...). The 'Property Data' section includes Type (Slab) and Thickness (110 mm).

Gambar 2. 40 Tebal Pelat Tangga (ganti)

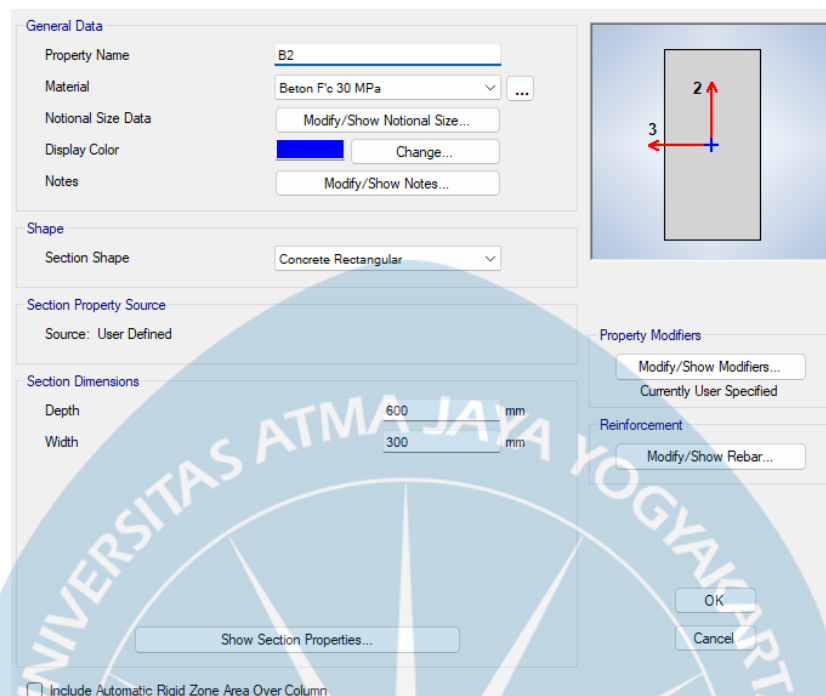
9. Dimensi Balok Induk 1



The screenshot shows a software interface for defining a beam property. The 'General Data' section includes fields for Property Name (B1), Material (Beton F'c 30 MPa), Notional Size Data (Modify/Show Notional Size...), Display Color (a light gray color swatch with a Change... button), and Notes (Modify/Show Notes...). The 'Shape' section includes Section Shape (Concrete Rectangular). The 'Section Property Source' section includes Source (User Defined). The 'Section Dimensions' section includes Depth (700 mm) and Width (400 mm). The 'Property Modifiers' section includes a button for Modify/Show Modifiers... (Currently User Specified). The 'Reinforcement' section includes a button for Modify/Show Rebar... The interface also includes an 'OK' button, a 'Cancel' button, and a checkbox for 'Include Automatic Rigid Zone Area Over Column'.

Gambar 2. 41 Dimensi Balok Induk 1

10. Dimensi Balok Induk 2



General Data

Property Name: B2

Material: Beton F'c 30 MPa

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color: Change...

Notes: Modify/Show Notes...

Shape

Section Shape: Concrete Rectangular

Section Property Source

Source: User Defined

Section Dimensions

Depth: 600 mm

Width: 300 mm

Show Section Properties...

☐ Include Automatic Rigid Zone Area Over Column

Property Modifiers

Modify/Show Modifiers...
Currently User Specified

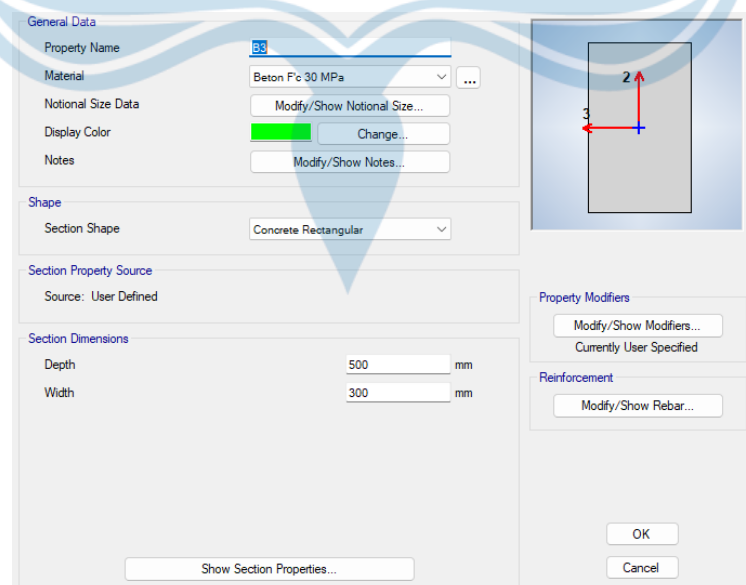
Reinforcement

Modify/Show Rebar...

OK
Cancel

Gambar 2. 42 Dimensi Balok Induk 2

11. Dimensi Balok Induk 3



General Data

Property Name: B3

Material: Beton F'c 30 MPa

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color: Change...

Notes: Modify/Show Notes...

Shape

Section Shape: Concrete Rectangular

Section Property Source

Source: User Defined

Section Dimensions

Depth: 500 mm

Width: 300 mm

Show Section Properties...

Property Modifiers

Modify/Show Modifiers...
Currently User Specified

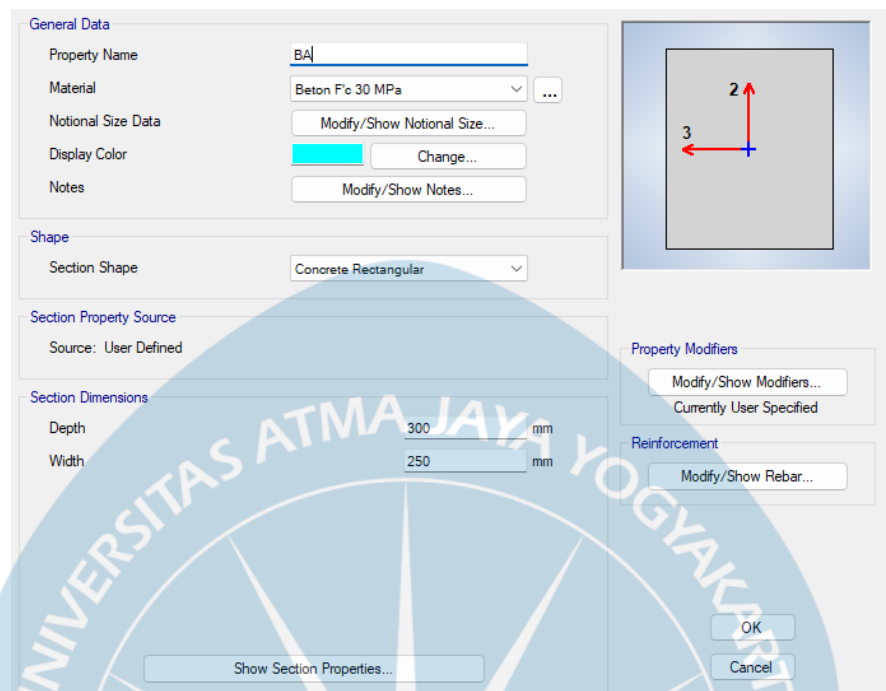
Reinforcement

Modify/Show Rebar...

OK
Cancel

Gambar 2. 43 Dimensi Balok Induk 3

12. Dimensi Balok Anak



General Data

Property Name: BA

Material: Beton F'c 30 MPa

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color: Change...

Notes: Modify/Show Notes...

Shape

Section Shape: Concrete Rectangular

Section Property Source

Source: User Defined

Section Dimensions

Depth: 300 mm

Width: 250 mm

Property Modifiers

Modify/Show Modifiers...
Currently User Specified

Reinforcement

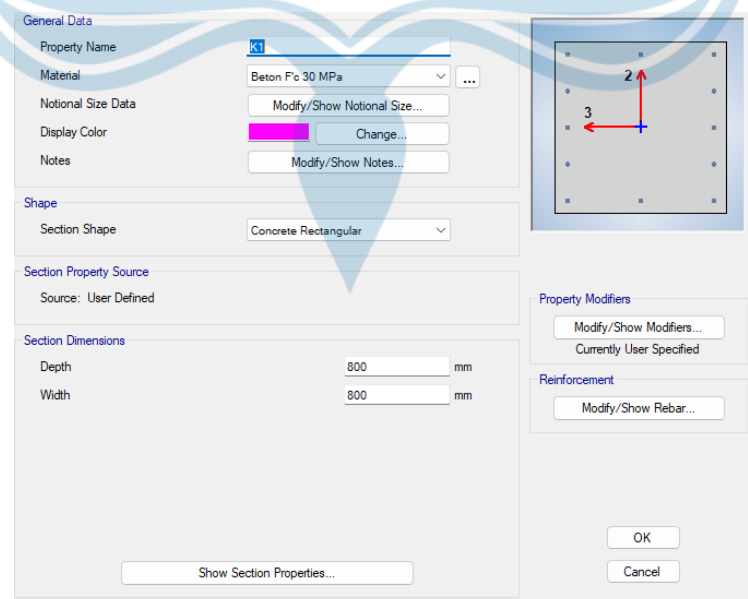
Modify/Show Rebar...

OK
Cancel

Show Section Properties...

Gambar 2. 44 Dimensi Balok Anak

13. Dimensi Kolom K1



General Data

Property Name: K1

Material: Beton F'c 30 MPa

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color: Change...

Notes: Modify/Show Notes...

Shape

Section Shape: Concrete Rectangular

Section Property Source

Source: User Defined

Section Dimensions

Depth: 800 mm

Width: 800 mm

Property Modifiers

Modify/Show Modifiers...
Currently User Specified

Reinforcement

Modify/Show Rebar...

OK
Cancel

Show Section Properties...

Gambar 2. 45 Dimensi Kolom K1

14. Dimensi Kolom K2

General Data

Property Name: K2

Material: Beton F'c 30 MPa

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color: Change...

Notes: Modify/Show Notes...

Shape

Section Shape: Concrete Rectangular

Section Property Source

Source: User Defined

Section Dimensions

Depth: 600 mm

Width: 600 mm

Property Modifiers

Modify/Show Modifiers...
Currently User Specified

Reinforcement

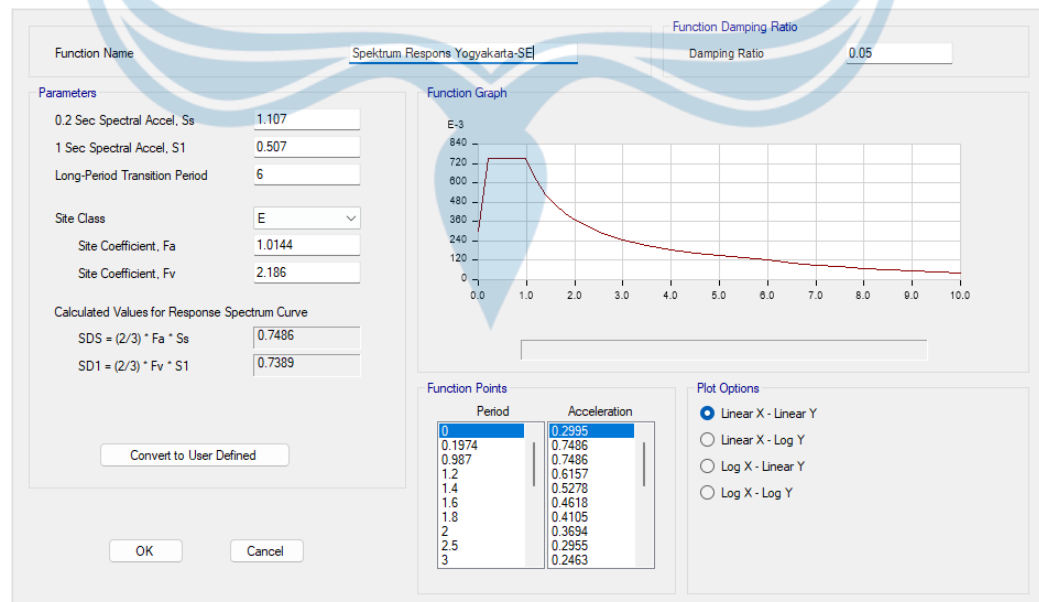
Modify/Show Rebar...

OK
Cancel

Show Section Properties...

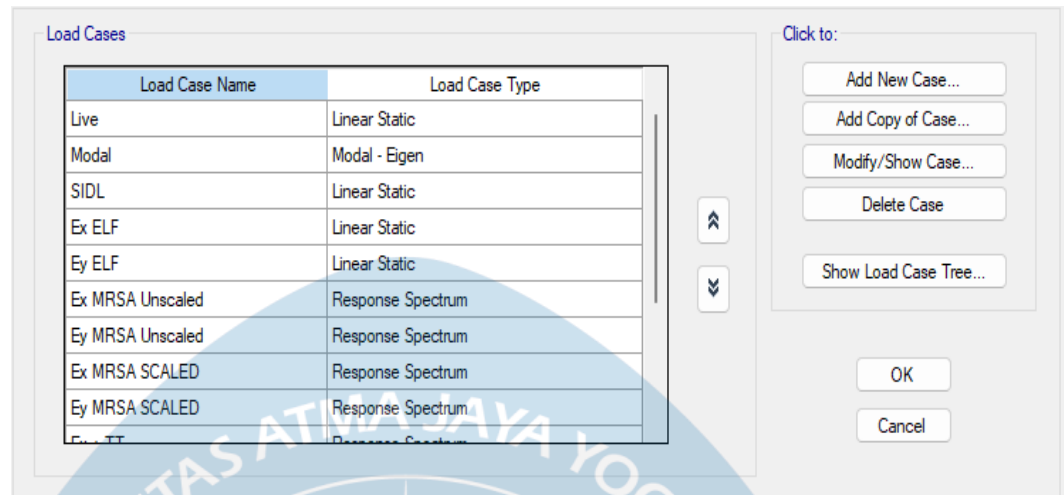
Gambar 2. 46 Dimensi Kolom K2

15. Respon Spektrum



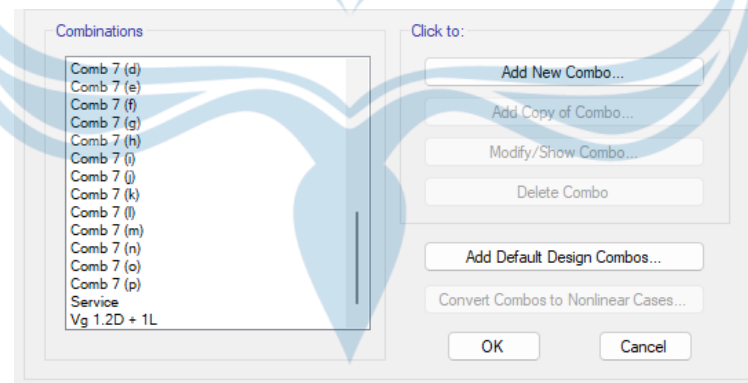
Gambar 2. 47 Respon Spektrum

16. Load Case Gedung



Gambar 2. 48 Load Case Gedung

17. Load Combination Gedung



Gambar 2. 49 Load Combination Gedung

18. Load Pattern Gedung

Loads

Load	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load
Dead	Dead	1	
Dead	Dead	1	
Live	Live	0	
SIDL	Super Dead	0	
Ex ELF	Seismic	0	ASCE 7-16
Ey ELF	Seismic	0	ASCE 7-16

Gambar 2. 50 Load Pattern Gedung

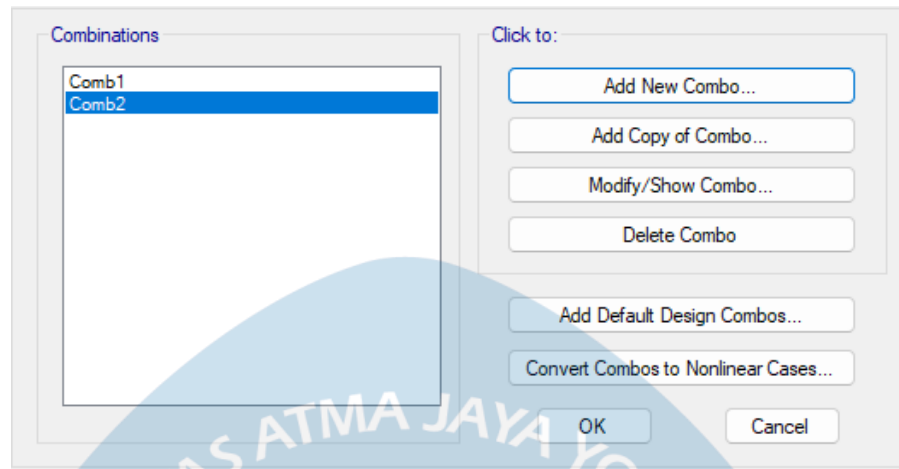
19. Load Case Tangga

Load Cases

Load Case Name	Load Case Type
Dead	Linear Static
Live	Linear Static
Modal	Modal - Eigen
SIDL	Linear Static

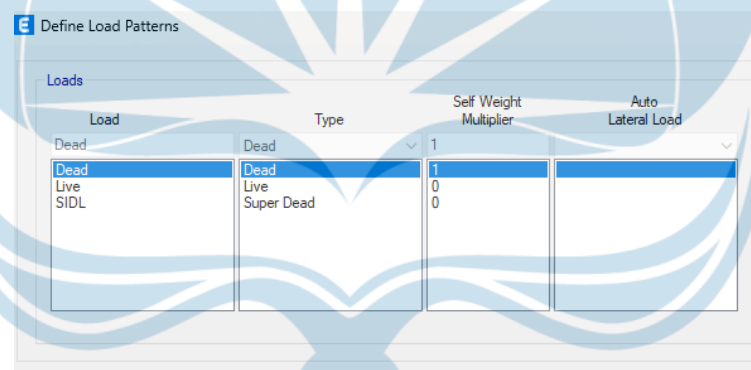
Gambar 2. 51 Load Case Tangga

20. Load Combination Tangga



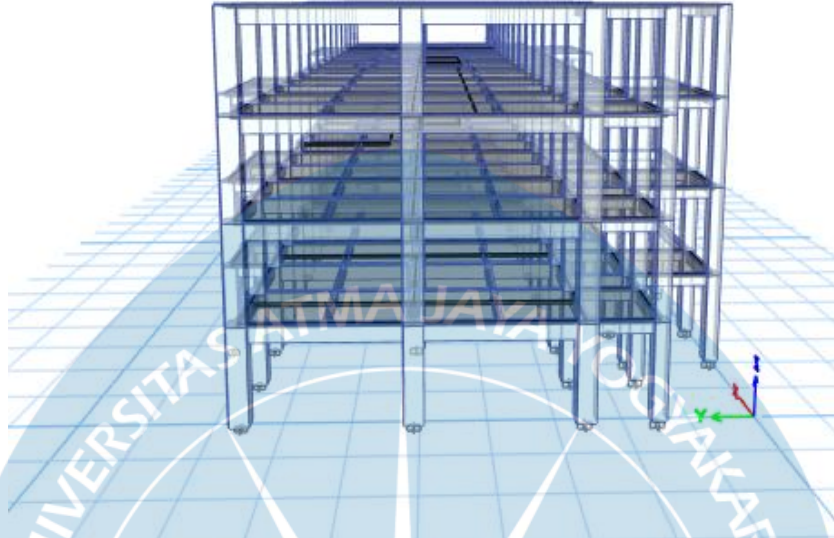
Gambar 2. 52 Load Combination Tangga

21. Load Pattern Tangga



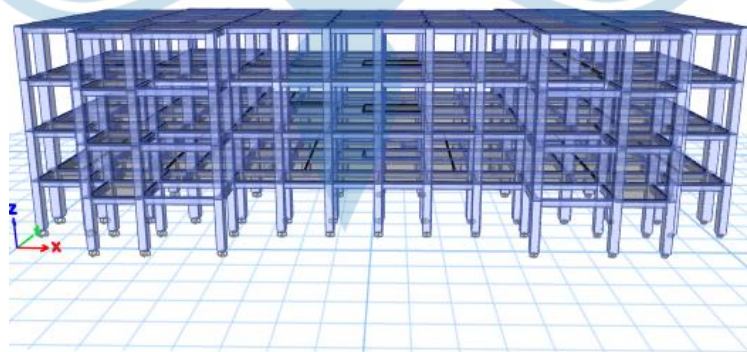
Gambar 2. 53 Load Pattern Tangga

22. Arah Memendek Gedung



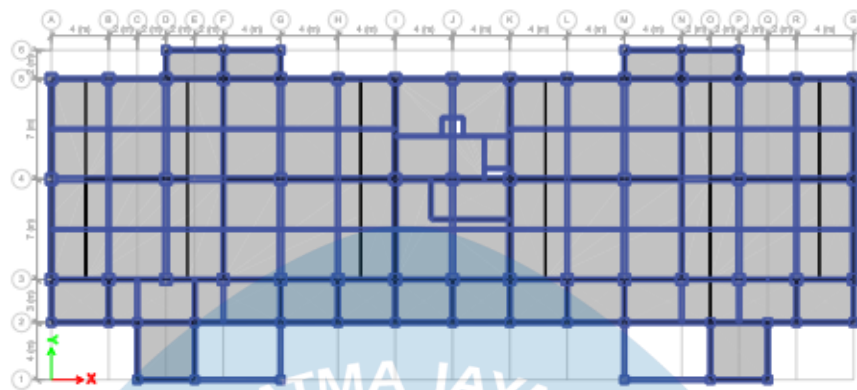
Gambar 2. 54 Arah Memendek Gedung

23. Arah Memanjang Gedung



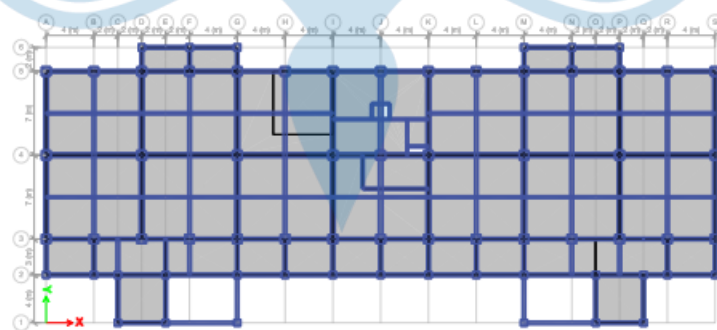
Gambar 2. 55 Arah Memanjang Gedung

24. Denah Balok Kolom Lantai 1



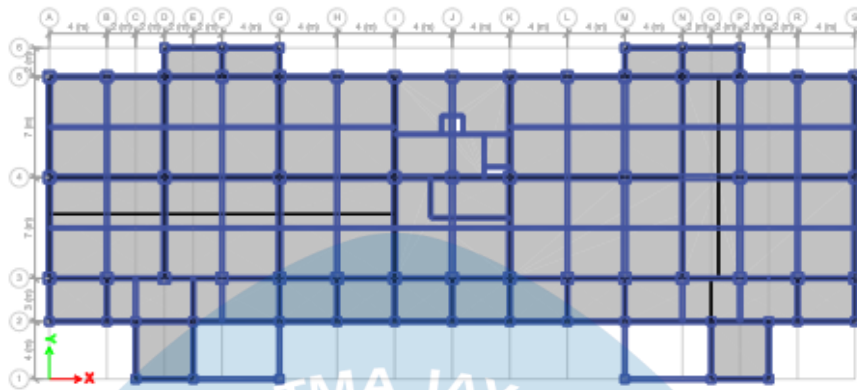
Gambar 2. 56 Denah Lantai 1

25. Denah Balok Kolom Lantai 2



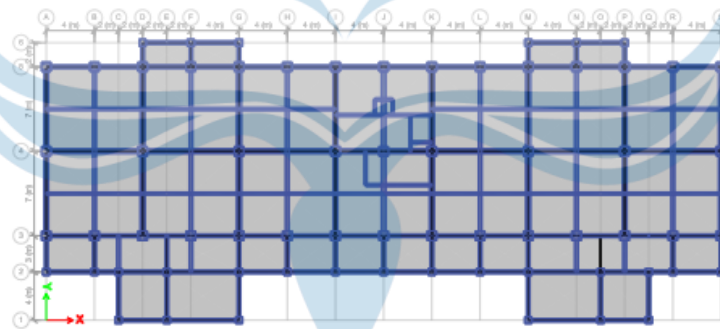
Gambar 2. 57 Denah Lantai 2

26. Denah Balok Kolom Lantai 3



Gambar 2. 58 Denah lantai 3

27. Denah Balok Kolom Lantai Atap



Gambar 2. 59 Denah Atap

2.10 Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar lantai, atau story drift, merupakan selisih perpindahan lateral antara dua lantai yang berdekatan pada suatu bangunan akibat pengaruh beban lateral seperti gempa bumi atau angin. Konsep ini memiliki peran penting dalam perencanaan struktur, karena bertujuan untuk menjaga kestabilan bangunan serta mencegah terjadinya kerusakan pada elemen struktural maupun non-struktural.

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.12, simpangan antar lantai pada tingkat desain ditentukan sebagai perbedaan defleksi di pusat massa antara dua lantai berurutan. Defleksi pada suatu lantai, yang umumnya dinyatakan dengan simbol δx , dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\delta x = \frac{C_d \times \delta_{xe}}{I_e}$$

Di mana C_d merupakan faktor amplifikasi defleksi, δ_{xe} adalah defleksi elastis hasil analisis struktur, dan I_e merupakan faktor keutamaan gempa yang bergantung pada tingkat kepentingan bangunan. Pembatasan nilai simpangan antar lantai diperlukan untuk menjamin keselamatan penghuni serta menjaga keutuhan struktur bangunan.

Untuk sistem pemikul gaya seismik yang terdiri dari hanya rangka momen pada struktur yang di desain untuk kategori desain seismik D, E atau F. Simpangan antar tingkat desain tidak boleh melebihi $\Delta a/p$ untuk semua tingkat. P harus ditentukan sesuai dengan 0.

Tabel 20 – Simpangan antar tingkat izin, $\Delta_a^{a,b}$

Struktur	Kategori risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	0,025 h_{sx} ^c	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}
Struktur dinding geser kantilever batu bata ^d	0,010 h_{sx}	0,010 h_{sx}	0,010 h_{sx}
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}
Semua struktur lainnya	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}	0,010 h_{sx}

Gambar 2. 60 Tabel 20 Simpangan Antar Tingkat Izin

Simpangan Antar tingkat izin (tabel) $\Delta_a = 0.015 h$

Faktor reduksi $\rho = 1,3$

Story Drift inelastik izin $\Delta / \rho = 0.01 h$ (untuk KDS D)

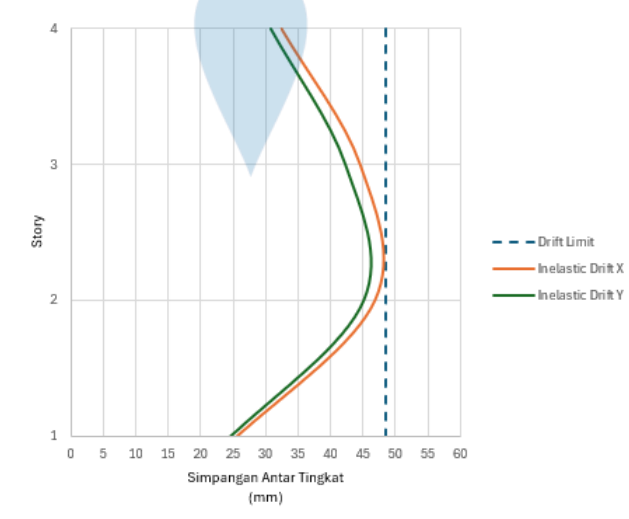
Faktor Pembesaran Desfleksi $C_d = 5.5$

Faktor keutamaan Gempa $I_e = 1.5$

Story Drift Inelastik $\Delta = \delta \times C_d / I_e$

Tabel 2. 20 Rekapitan Simpangan Antar Lantai

Story	Displacement		Elastic Drift		h	Inelastif Drift		Drift Limit	Cek
	δeX	δeY	δeX	δeY		ΔX	ΔY		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		
4	40.844	39.05	8.868	8.421	4200	32.516	30.877	48.4615 3846	OK
3	31.976	30.629	12.17 5	11.559	4200	44.641	42.383	48.4615 3846	OK
2	19.801	19.07	12.79 9	12.332	4200	46.929	45.217	48.4615 3846	OK
1	7.002	6.738	7.002	6.738	4200	25.674	24.706	48.4615 3846	OK



Gambar 2. 61 Grafik Simpangan Antar Lantai

2.11 Pengaruh P-Delta

Pengaruh P -delta pada geser tingkat dan momen, gaya dan momen elemen stuktur yang dihasilkan, dan simpangan antar tingkat yang diakibatkannya tidak perlu diperhitungkan bila koefisien stabilitas θ seperti ditentukan oleh persamaan berikut sama dengan atau kurang dari 0.10 :

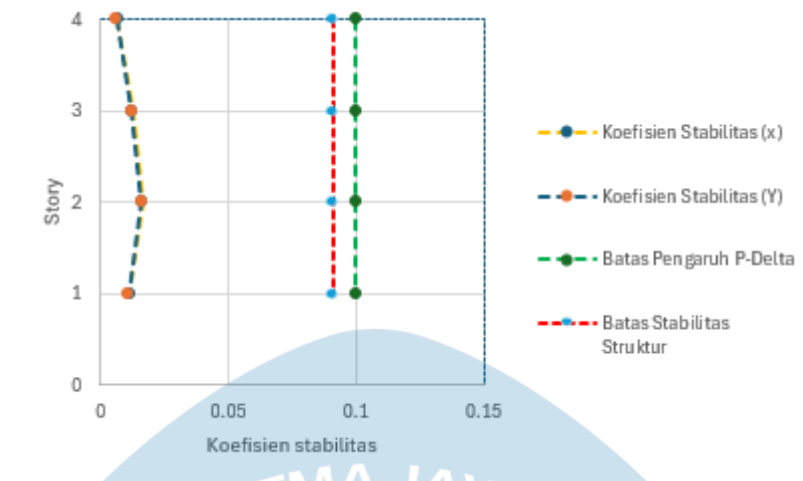
$$\theta = \frac{P_x \Delta I_e}{V_{xh} C_d}$$

Rasio Kebutuhan geser $\beta = 1$

Batas koefisien stabilitas $\theta_{max} = 0.5 / (\beta * C_d) \leq 0.25$
 $= 0.0909$

Tabel 2. 21 Rekap Pengaruh P-Delta

Story	<i>Inelastic Drift</i>		<i>Story Forces</i>			h	Koefisien Stabilitas		Batas Pengaruh P-Delta	Batas Stabilitas Struktur θ_{max}	Cek
	ΔX	ΔY	P	V_x	V_y						
	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(mm)	θX	θY			
4	32.516	30.877	7839.841	2450.560	2441.979	4200	0.0067	0.0064	0.1	0.0909	OK
3	44.641	42.383	22784.930	5196.414	5185.139	4200	0.0127	0.0120	0.1	0.0909	OK
2	46.929	45.217	37259.687	6858.621	6851.638	4200	0.0165	0.0159	0.1	0.0909	OK
1	25.674	24.706	52861.330	7660.896	7660.897	4200	0.0115	0.011069	0.1	0.0909	OK



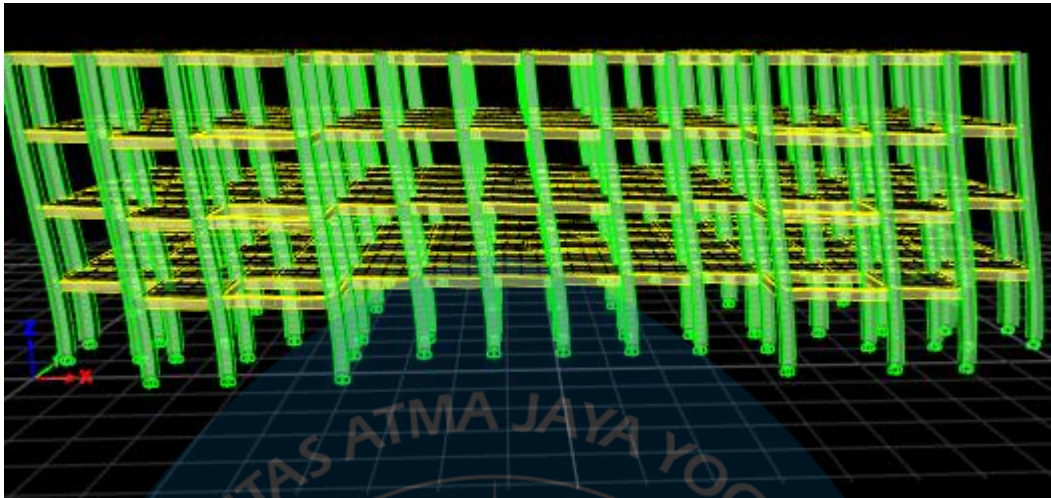
Gambar 2. 62 Grafik Pengaruh P-Delta

2.12 Jumlah Ragam

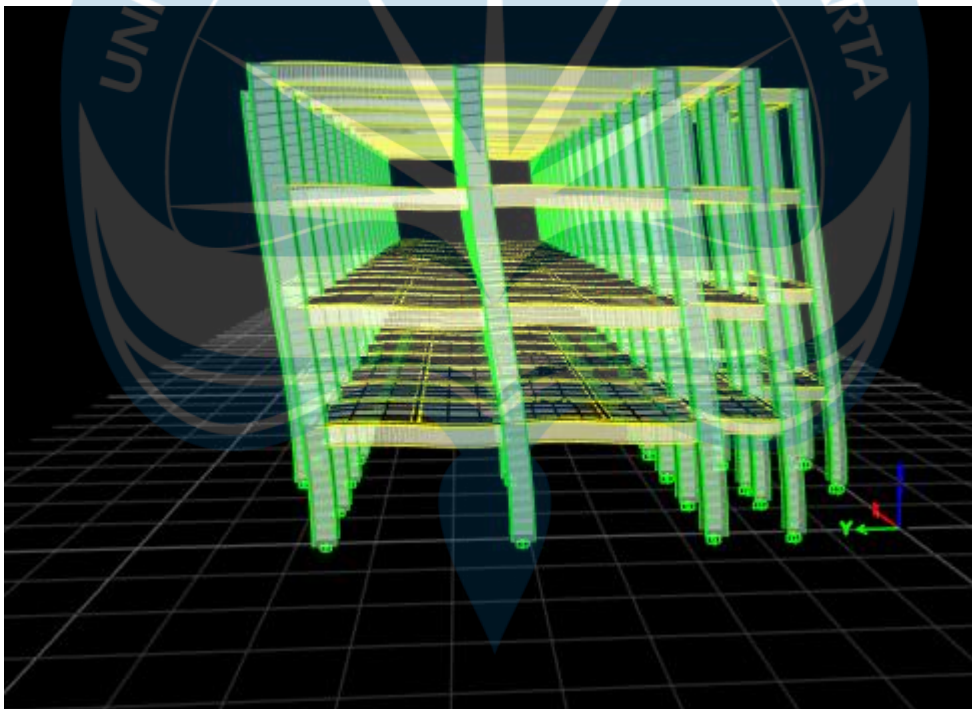
Menurut SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1, analisis ragam dinamis harus mencakup jumlah ragam yang menghasilkan partisipasi massa total minum sebesar 90%. Berdasarkan Gambar 2.62, hasil analisis menunjukkan bahwa partisipasi massa telah mencapai 90% dengan total 70 ragam yang dianalisis. Dari hasil pemeriksaan bentuk mode (mode shape), diketahui bahwa mode 1 menunjukkan translasi arah Y, mode 2 menunjukkan translasi arah X, dan mode 3 menggambarkan rotasi terhadap sumbu Z.

Modal Participating Mass Ratios										
File Edit Format-Filter-Sort Select Options										
Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None Modal Participating Mass Ratios										
Filter: None										
	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ
	0.818	0.7756	4.445E-05	0	0.7756	4.445E-05	0	1.614E-05	0.2783	0.0013
	0.801	0.0001	0.7782	0	0.7756	0.7782	0	0.2764	2.198E-05	0.0007
	0.751	0.0014	0.0008	0	0.7771	0.779	0	0.0003	0.0005	0.7779
	0.227	0.1435	0	0	0.9206	0.779	0	0	0.5236	0.0001
	0.224	0	0.1425	0	0.9206	0.9214	0	0.5276	0	0.0001
	0.212	0.0002	0.0001	0	0.9208	0.9215	0	0.0002	0.0004	0.1415
	0.187	0	0.0002	0	0.9208	0.9217	0	0.0003	0	0
	0.139	0	0.0002	0	0.9208	0.9218	0	0.0006	0	0
	0.113	0.0044	0	0	0.9252	0.9218	0	0	0.01	0.0004
	0.111	0.0553	0	0	0.9805	0.9218	0	0	0.1252	0.0002
	0.109	0	0.0589	0	0.9805	0.9807	0	0.1332	0	3.136E-06
	0.105	0.0005	1.787E-06	0	0.981	0.9807	0	3.697E-06	0.0013	0.0558

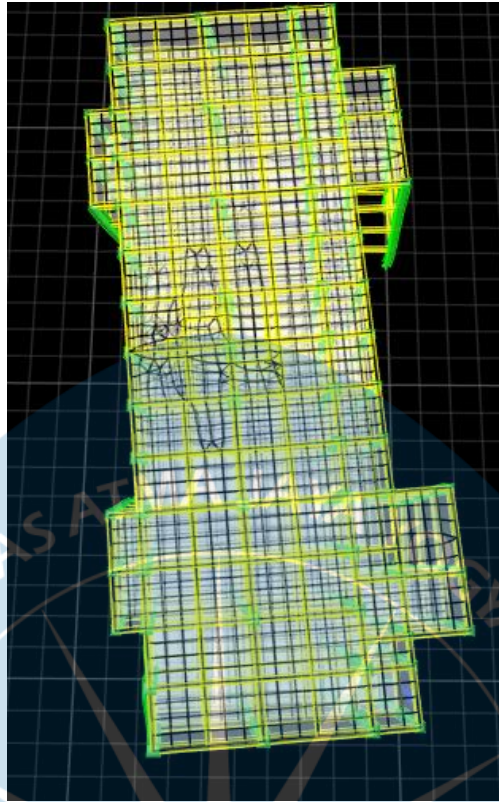
Gambar 2. 63 Gambar Partisipasi Massa pada Analisis Jumlah Ragam



Gambar 2. 64 Gambar Hasil Pengecekan Mode Shape untuk Mode 1 Translasi
Arah X



Gambar 2. 65 Gambar Hasil Pengecekan Mode Shape untuk Mode 2 Translasi
Arah Y



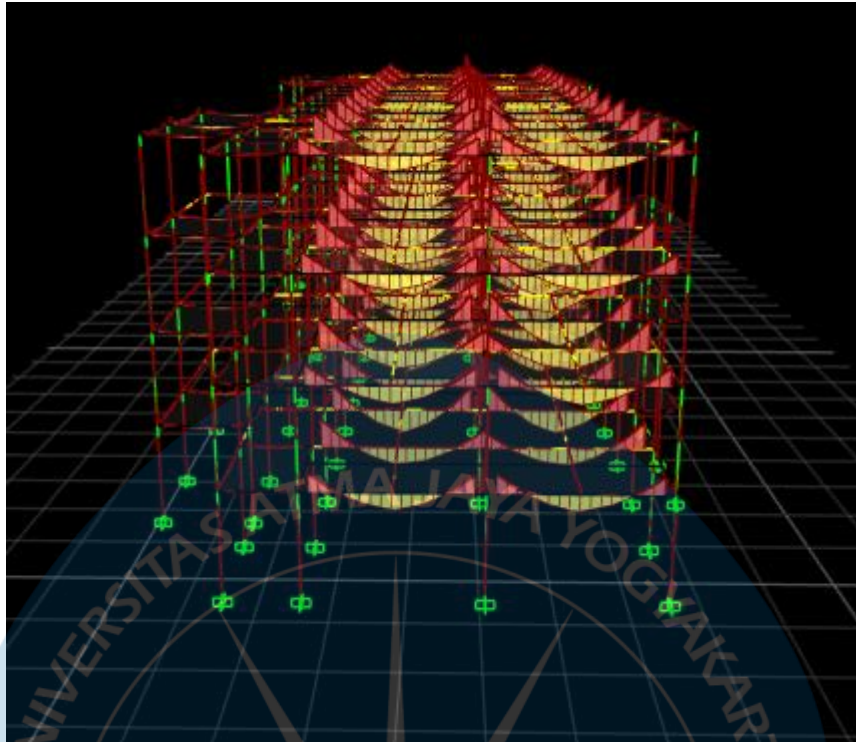
Gambar 2. 66 Gambar Hasil Pengecekan Mode Shape untuk Mode 3 Rotasi Sumbu Z

2.13 Interpretasi Output Pemodelan

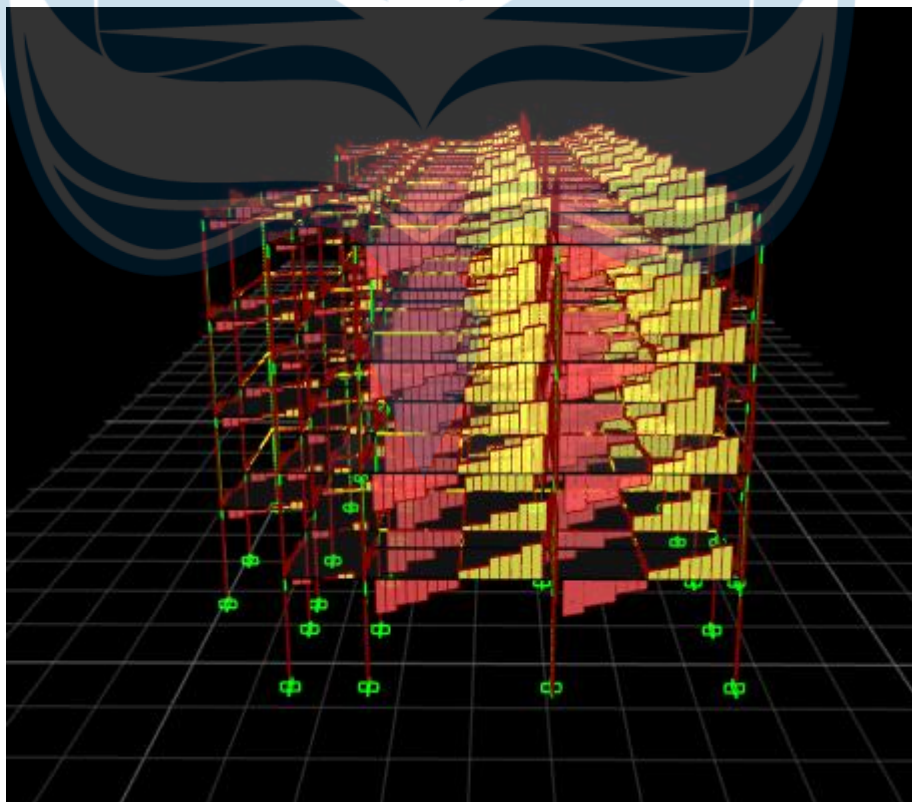
Setelah proses pemodelan struktur dilakukan dan perilaku struktur dinyatakan stabil serta memenuhi ketentuan standar yang berlaku, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis terhadap output hasil pemodelan struktur. Analisis ini meliputi pengambilan data gaya-gaya dalam pada elemen-elemen struktur seperti balok, kolom, dan pelat.

Hasil analisis tersebut kemudian dihubungkan dengan diagram momen lentur (BMD) dan diagram gaya geser (SFD) untuk memahami distribusi beban serta respons struktur secara lebih mendalam. Interpretasi terhadap hasil ini menjadi dasar penting dalam tahap detailing dan penentuan kebutuhan penulangan atau penguatan elemen struktur sesuai dengan standar perencanaan yang berlaku.

Berikut merupakan diagram BMD dan SFD dari proyek Gedung Fakultas Teknik Mesin Di Yogyakarta, yang ditampilkan pada Gambar 2.67 dan Gambar 2.68.



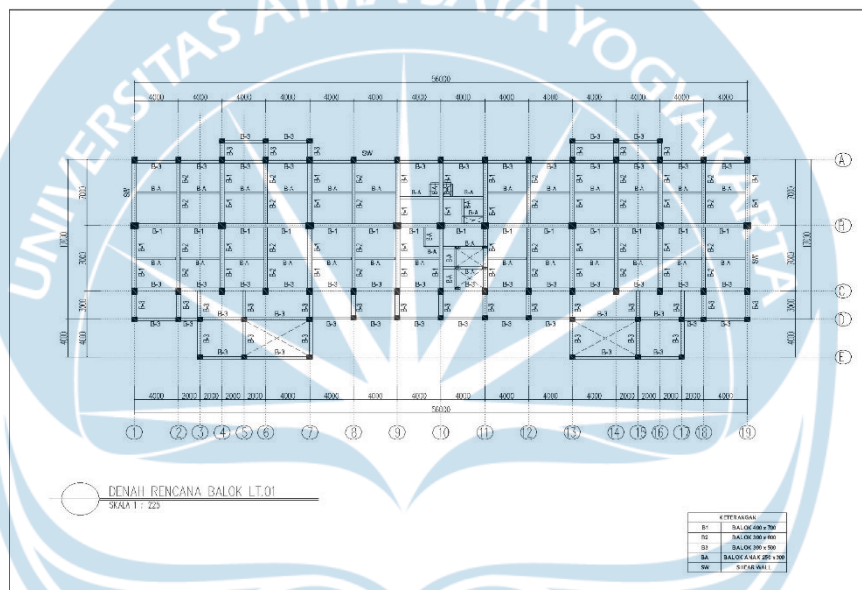
Gambar 2. 67 Diagram BMD Gedung Fakultas Teknik Mesin



Gambar 2. 68 Diagram SFD Gedung Fakultas Teknik Mesin

Berdasarkan hasil pengambilan gaya dalam dari analisis ETABS, diperoleh nilai gaya-gaya dalam pada balok anak, balok induk, dan kolom yang akan digunakan sebagai dasar dalam proses perancangan. Data lengkap hasil analisis tersebut disajikan pada Tabel 2.22, 2.23, dan 2.24.

Selanjutnya, rekapitulasi gaya dalam untuk masing-masing elemen struktur disusun sesuai dengan denah struktur bangunan, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.69.



Gambar 2. 69 Denah Balok Kolom Lantai 1-4

Tabel 2. 22 Gaya Dalam Balok Anak

Kondisi	BA 250x300
Vu Tumpuan – (kN)	39.6582
Vu Lapangan + (kN)	38.9177
Mu Tumpuan – (kNm)	-40.4085
Mu Lapangan + (kNm)	17.2013

Tabel 2. 23 Gaya Dalam Balok Induk

Posisi	Kondisi	B1	B2	B3
Tumpuan	Mu+ (kNm)	298.0068	121.3284	134.227
	Mu- (kNm)	-472.6628	-249.9865	-144.4581
	Vu (kN)	283.0299	159.7355	218.4871
	Vg (kN)	212.189	125.5079	51.987
Lapangan	Mu+ (kNm)	365.8478	120.1069	145.7201
	Mu- (kNm)	-442.1762	-90.265	-151.5646
	Vu (kN)	262.3515	117.4194	221.8272

Tabel 2. 24 Gaya Dalam Kolom

Kondisi	K1 800 x 800			K1 600 x 600		
	P	M2	M3	P	M2	M3
Pu max (kN)	100.6295	115.0116	55.857	588.6954	11.4685	17.8428
Pu min (kN)	-3136.8026	-278.0615	-726.4988	-1149.5057	-259.6719	-91.2437
M2 max (kNm)	-774.3684	839.742	250.4786	408.7776	266.5331	89.7062
M2 min (kNm)	-1887.573	-848.2025	-114.2741	-803.3937	-272.8938	-75.2947
M3 max (kNm)	-1995.5022	224.6769	821.7026	-257.4209	90.7681	271.7283
M3 min (kNm)	-2946.1601	-228.0854	-823.3853	-1006.4496	-94.4659	-277.079

2.14. Perancangan Balok

Perancangan elemen balok pada proyek ini terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu balok anak dan balok induk yang mencakup keseluruhan struktur bangunan. Proses perencanaan balok anak dilakukan berdasarkan acuan SNI 2847:2019, dengan perhitungan yang mempertimbangkan diagram tegangan dan regangan untuk memastikan kinerja struktur yang aman dan efisien.

2.14.1 Perhitungan Perancangan Balok

Properti Material dan Penampang (Balok Induk 1)

Panjang Bentang (L)	= 8000 mm
Lebar balok (b)	= 400 mm
Tinggi balok (h)	= 700 mm
F'c	= 30 Mpa
Fy longitudinal	= 420 Mpa
Fy _v transversal	= 420 Mpa
D tulangan longitudinal (d _b)	= 22 mm
D tulangan pinggang (d _{bt})	= 22 mm
D sengkang (d _s)	= 10 mm
Selimut bersih (c _c)	= 40 mm
Tinggi efektif balok (d)	= $h - c_c - d_s - d_b/2$
	= $700 - 40 - 10 - (22/2)$
	= 639 mm
β ₁	= 0,8357
Panjang kolom (c ₁)	= 800 mm
Lebar kolom (c ₂)	= 800 mm

$$\begin{aligned}
 L_n &= L - c_1 \\
 &= 7200 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Desain Lentur

Momen dari etabs

$$M_u (-) \text{ tumpuan} = 472,6628 \text{ kNm}$$

$$M_u (+) \text{ tumpuan} = 298,0068 \text{ kNm}$$

$$M_u (-) \text{ lapangan} = 442,1726 \text{ kNm}$$

$$M_u (+) \text{ lapangan} = 365,8478 \text{ kNm}$$

- Menghitung Momen Negatif Tumpuan $M (-)$

$$M_u (-) = 472,6628 \text{ kNm}$$

$$n = 6$$

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak bersih antar tulangan} &= (b - 2c_c - 2d_s - n \cdot d_b) / (n - 1) \\
 &= (400 - (2 \times 40) - (2 \times 10) - (6 \times 22)) / (6 - 1) \\
 &= 33,600 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Mencari nilai a_s :

$$\begin{aligned}
 a_s \text{ pasang} &= \frac{\pi}{4} \times n d_b^2 \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 6 \times 22^2 \\
 &= 2280,796 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_s \text{ min1} &= \frac{\sqrt{f_c'}}{4 \cdot f_y} \cdot b \cdot d \\
 &= \frac{\sqrt{30}}{4 \times 420} \times 400 \times 639 \\
 &= 833,321 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_s \text{ min2} &= \frac{1,4}{f_y} \cdot b \cdot d \\
 &= \frac{1,4}{420} \times 400 \times 639 \\
 &= 852 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$a_s \text{ pasang} \geq a_s \text{ min}$$

$$2280,796 \text{ mm}^2 \geq 833,321 \text{ mm}^2, 852 \text{ mm}^2 \quad (\text{OK})$$

Mencari nilai p :

$$\begin{aligned} p &= \frac{as}{b.d} \\ &= \frac{2280,796}{400 \times 639} \\ &= 0,89\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{\max 1} &= \frac{0,75 \cdot 0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_{c'}'}{f_y \cdot (600 / (600 - f_y))} \\ &= \frac{0,75 \times 0,85 \times 0,8357 \times 30}{420 \cdot \left(\frac{600}{600 - 420} \right)} \\ &= 2,24\% \end{aligned}$$

$$p_{\max 2} = 2,5\%$$

$$\begin{aligned} p &\leq p_{\max} \\ 0,89\% &\leq 2,24\%, 2,5\% \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{as \cdot f_y}{0,85 \cdot f_{c'}' \cdot b} \\ &= \frac{2280,796 \times 420}{0,85 \times 30 \times 400} \\ &= 93,915 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_n &= as \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \\ &= 2280,796 \times 420 \times \left(639 - \frac{93,915}{2} \right) \\ &= 567,138 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= \frac{a}{\beta_1} \\ &= \frac{93,915}{0,8357} \\ &= 112,377 \text{ mm} \end{aligned}$$

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

$$= \frac{(639-112,377)}{0,003 \times 112,377}$$

$$= 0,014$$

$$\phi M_n = 0,9 \times 567,138$$

$$= 510,424 \text{ kNm}$$

Cek kapasitas:

$$\phi M_n \geq M_u (-)$$

$$510,424 \text{ kNm} \geq 472,663 \text{ kNm (OK)}$$

$$\text{as perlu} = \frac{M_u}{f_y \cdot (d - \frac{a}{2})}$$

$$= \frac{472,663}{420 \cdot (639 - \frac{93,915}{2})}$$

$$= 1167,592 \text{ mm}^2$$

- Menghitung Momen Positif Tumpuan M (+)

$$M_u (-) = 298,0068 \text{ kNm}$$

$$n = 4$$

$$\text{Jarak bersih antar tulangan} = (b - 2c_c - 2d_s - n \cdot d_b) / (n - 1)$$

$$= (400 - (2 \times 40) - (2 \times 10) - (4 \times 22)) / (4 - 1)$$

$$= 70,667 \text{ mm}$$

Mencari nilai as :

$$\text{as pasang} = \frac{\pi}{4} \times n d_b^2$$

$$= \frac{\pi}{4} \times 4 \times 22^2$$

$$= 1520,531 \text{ mm}^2$$

$$\text{as min1} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 \cdot f_y} \cdot b \cdot d$$

$$= \frac{\sqrt{30}}{4 \times 420} \times 400 \times 639$$

$$= 833,321 \text{ mm}^2$$

$$\text{as min2} = \frac{1,4}{f_y} \cdot b \cdot d$$

$$= \frac{1,4}{420} 400 \times 639$$

$$= 852 \text{ mm}^2$$

$$\text{as min 3} = \frac{1}{2} \text{ as tumpuan negatif}$$

$$= \frac{1}{2} \times 298,0068$$

$$= 1140,398 \text{ mm}^2$$

$$\text{as pasang} \geq \text{as min}$$

$$1520,531 \text{ mm}^2 \geq 1140,398 \text{ mm}^2 \quad (\text{OK})$$

Mencari nilai p :

$$p = \frac{as}{b.d}$$

$$= \frac{1520,531}{400 \times 639}$$

$$= 0,59 \%$$

p_{max1}

$$= \frac{0,75 \cdot 0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c'}{f_y \cdot (600 / (600 - f_y))}$$

$$= \frac{0,75 \times 0,85 \times 0,8357 \times 30}{420 \cdot \left(\frac{600}{600 - 420} \right)}$$

$$= 2,24\%$$

p_{max2}

$$= 2,5\%$$

$$p \leq p_{\text{max}}$$

$$0,59 \% \leq 2,24 \% , 2,5 \% \quad (\text{OK})$$

$$a = \frac{as \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b}$$

$$= \frac{1520,531 \times 30}{0,85 \times 30 \times 400}$$

$$= 62,610 \text{ mm}$$

$$M_n = as \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 1520,531 \times 420 \times \left(639 - \frac{62,610}{2} \right)$$

$$= 388,088 \text{ kNm}$$

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

$$\begin{aligned}
 &= \frac{62,610}{0,8357} \\
 &= 74,918 \text{ mm} \\
 \epsilon_s &= \frac{(d-c)}{0,003c} \\
 &= \frac{(639-74,918)}{0,003 \times 74,918} \\
 &= 0,023 \\
 \phi M_n &= 0,9 \times 388,088 \\
 &= 349,279 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Cek kapasitas:

$$\begin{aligned}
 \phi M_n &\geq M_u (-) \\
 349,279 \text{ kNm} &\geq 298,0068 \text{ kNm} \quad (\text{OK})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{as perlu} &= \frac{M_u}{f_y \cdot (d - \frac{a}{2})} \\
 &= \frac{298,0068}{420 \cdot (639 - \frac{62,610}{2})} \\
 &= 1167,592 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Menghitung Momen Negatif Lapangan M (-)

$$M_u (-) = 442,1762 \text{ kNm}$$

$$n = 6$$

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak bersih antar tulangan} &= (b - 2c_c - 2d_s - n \cdot d_b) / (n - 1) \\
 &= (400 - (2 \times 40) - (2 \times 10) - (6 \times 22)) / (6 - 1) \\
 &= 33,6 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Mencari nilai as :

$$\begin{aligned}
 \text{as pasang} &= \frac{\pi}{4} \times n d_b^2 \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 6 \times 22^2 \\
 &= 2280,796 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{as min1} &= \frac{\sqrt{f_c'}}{4 \cdot f_y} \cdot b \cdot d \\
 &= \frac{\sqrt{30}}{4 \times 420} \times 400 \times 639 \\
 &= 833,321 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 as_{min2} &= \frac{1,4}{f_y} b \cdot d \\
 &= \frac{1,4}{420} 400 \times 639 \\
 &= 852 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 as_{min3} &= \frac{1}{4} as_{tumpuan \text{ negatif}} \\
 &= \frac{1}{4} \times 442,1762 \\
 &= 570,199 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 as_{pasang} &\geq as_{min} \\
 2280,796 \text{ mm}^2 &\geq 570,199 \text{ mm}^2, \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

Mencari nilai p :

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{as}{b \cdot d} \\
 &= \frac{2280,796}{400 \times 639} \\
 &= 0,89 \% \\
 p_{max1} &= \frac{0,75 \cdot 0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_{c'} }{f_y \cdot (600 / (600 - f_y))} \\
 &= \frac{0,75 \times 0,85 \times 0,8357 \times 30}{420 \cdot (\frac{600}{600 - 420})} \\
 &= 2,24 \%
 \end{aligned}$$

$$p_{max2} = 2,5 \%$$

$$\begin{aligned}
 p &\leq p_{max} \\
 0,89 \% &\leq 2,24 \% , 2,5 \% \quad \text{(OK)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{as \cdot f_y}{0,85 \cdot f_{c'} \cdot b} \\
 &= \frac{2280,796 \times 30}{0,85 \times 30 \times 400} \\
 &= 93,915 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Mn &= as \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \\
 &= 2280,796 \times 420 \times \left(639 - \frac{93,915}{2} \right) \\
 &= 567,138 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{93,915}{0,8357} \\
 &= 112,377 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \epsilon_s &= \frac{(d-c)}{0,003c} \\
 &= \frac{(639-112,377)}{0,003 \times 112,377} \\
 &= 0,014
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \phi M_n &= 0,9 \times 567,138 \\
 &= 510,424 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Cek kapasitas:

$$\begin{aligned}
 \phi M_n &\geq M_u (-) \\
 510,424 \text{ kNm} &\geq 442,1762 \text{ kNm} \quad (\text{OK})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{as perlu} &= \frac{M_u}{f_y \cdot (d - \frac{a}{2})} \\
 &= \frac{442,1762}{420 \cdot (639 - \frac{93,915}{2})} \\
 &= 1778,252 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Menghitung Momen Negatif Lapangan M (+)

$$M_u (-) = 365,8478 \text{ kNm}$$

$$n = 5$$

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak bersih antar tulangan} &= (b - 2c_c - 2d_s - n \cdot d_b) / (n - 1) \\
 &= (400 - (2 \times 40) - (2 \times 10) - (5 \times 22)) / (5 - 1) \\
 &= 47,500 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Mencari nilai as :

$$\begin{aligned}
 \text{as pasang} &= \frac{\pi}{4} \times n \times d_b^2 \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 5 \times 22^2 \\
 &= 1900,664 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{as min1} &= \frac{\sqrt{f'c}}{4 \cdot f_y} \cdot b \cdot d \\
 &= \frac{\sqrt{30}}{4 \times 420} \times 400 \times 639
 \end{aligned}$$

$$= 833,321 \text{ mm}^2$$

$$\text{as min 2} = \frac{1,4}{f_y} b \cdot d$$

$$= \frac{1,4}{420} 400 \times 639$$

$$= 852 \text{ mm}^2$$

$$\text{as min 3} = \frac{1}{4} \text{ as tumpuan negatif}$$

$$= \frac{1}{4} \times 365,8478$$

$$= 570,199 \text{ mm}^2$$

$$\text{as pasang} \geq \text{as min}$$

$$1900,664 \text{ mm}^2 \geq 570,199 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

Mencari nilai p :

$$p = \frac{as}{b \cdot d}$$

$$= \frac{1900,664}{400 \times 639}$$

$$= 0,74 \%$$

$$p_{\text{max1}} = \frac{0,75 \cdot 0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_{cr}}{f_y \cdot (600 / (600 - f_y))}$$

$$= \frac{0,75 \times 0,85 \times 0,8357 \times 30}{420 \cdot \left(\frac{600}{600 - 420} \right)}$$

$$= 2,24\%$$

$$p_{\text{max2}} = 2,5\%$$

$$p \leq p_{\text{max}}$$

$$0,74 \% \leq 2,24 \% , 2,5 \% \quad \text{(OK)}$$

$$a = \frac{as \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b}$$

$$= \frac{1900,664 \times 30}{0,85 \times 30 \times 400}$$

$$= 78,263 \text{ mm}$$

$$M_n = as \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 1900,664 \times 420 \times \left(639 - \frac{78,263}{2} \right)$$

$$= 478,862 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{78,263}{0,8357} \\
 &= 93,648 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \epsilon_s &= \frac{(d-c)}{0,003c} \\
 &= \frac{(639-93,648)}{0,003 \times 93,648} \\
 &= 0,017
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \phi M_n &= 0,9 \times 478,862 \\
 &= 430,976 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Cek kapasitas:

$$\begin{aligned}
 \phi M_n &\geq M_u (-) \\
 430,976 \text{ kNm} &\geq 365,848 \text{ kNm (OK)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{as perlu} &= \frac{M_u}{f_y \cdot (d - \frac{a}{2})} \\
 &= \frac{365,848}{420 \cdot (639 - \frac{78,263}{2})} \\
 &= 1452,095 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Desain Lentur

$$V_u \text{ tumpuan} = 283,0299 \text{ kN}$$

$$V_u \text{ lapangan} = 262,3515 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 V_g \text{ tumpuan} &= 1,2 D + L \\
 &= 212,189 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$A_s^+ \text{ tumpuan} = 1520,531 \text{ mm}^2$$

$$A_s^- \text{ tumpuan} = 2280,796 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned}
 A_{pr}^+ &= 1,25 a(\text{tumpuan positif}) \\
 &= 1,25 \times 62,610 \\
 &= 78,263 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{pr}^- &= 1,25 a(\text{tumpuan negatif}) \\
 &= 1,25 \times 93,915
 \end{aligned}$$

$$= 117,394 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{pr}^+ &= A_s^+ \cdot (1,25 \cdot f_y) \cdot \left(d - \frac{a_{pr}^+}{2}\right) \\ &= 1520,531 (1,25 \times 420) \times \left(639 - \frac{78,263}{2}\right) \\ &= 478862395 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{pr}^- &= A_s^- \cdot (1,25 \cdot f_y) \cdot \left(d - \frac{a_{pr}^-}{2}\right) \\ &= 2280,796 (1,25 \times 420) \times \left(639 - \frac{117,394}{2}\right) \\ &= 694865325 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{pr} &= \frac{M_{pr}^+ + M_{pr}^-}{L_n} \\ &= \frac{478862395 + 694865325}{7200} \end{aligned}$$

$$= 163018 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} V_e &= V_g + V_{pr} \\ &= 212,189 + \\ &= 375207 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_c &= \sqrt{30} \times 400 \times 639 \\ &= 237996 \end{aligned}$$

- Tumpuan

$$\Phi = 0,75$$

$$\text{Jumlah kaki (n)} = 4$$

$$\text{Spasi} = 100 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{n \cdot \pi}{4 d_s^2} \\ &= \frac{4 \pi}{4 \times 10^2} \\ &= 314,159 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{spasi max1} &= \frac{d}{4} \\ &= \frac{639}{4} \\ &= 159,75 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{spasi max2} &= 6 \cdot d_b \\ &= 6 \times 22 \end{aligned}$$

$$= 132 \text{ mm}$$

$$\text{spasi max3} = 150 \text{ mm}$$

Cek spasi :

$$\text{Spasi} \leq \text{Spasi max}$$

$$100 \text{ mm} \leq 159,75 \text{ mm} , 132 \text{ mm} , 150 \text{ mm} \quad (\text{OK})$$

$$V_s = A_v \cdot f_y \cdot \frac{d}{s}$$

$$= 314,159 \times 280 \times \frac{639}{100}$$

$$= 562094 \text{ N}$$

$$\text{Batas } V_s = 0,66 \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d$$

$$= 0,66 \times \sqrt{30} \times 400 \times 639$$

$$= 923986 \text{ N}$$

$$V_n = V_c + V_s$$

$$= 237996 + 562094$$

$$= 800090 \text{ N}$$

$$V_u = V_e$$

Cek kapasitas :

$$\phi V_n / V_u \geq 1$$

$$(0,75 \times 800090) / 375207 \geq 1$$

$$1,599 \geq 1 \quad (\text{OK})$$

- Lapangan

$$\Phi = 0,75$$

$$\text{Jumlah kaki (n)} = 3$$

$$\text{Spasi} = 100 \text{ mm}$$

$$A_v = \frac{n \cdot \pi}{4 d_s^2}$$

$$= \frac{3\pi}{4 \times 10^2}$$

$$= 235,619 \text{ mm}^2$$

$$\text{spasi max1} = \frac{d}{2}$$

$$= \frac{639}{2}$$

$$= 319,5 \text{ mm}$$

Cek spasi :

$$\begin{aligned} \text{Spasi} &\leq \text{Spasi max} \\ 100 \text{ mm} &\leq 319,5 \text{ mm} \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_s &= A_v \cdot f_{y_v} \cdot \frac{d}{s} \\ &= 157,08 \times 420 \times \frac{639}{100} \\ &= 421570 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Batas } V_s &= 0,66 \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d \\ &= 0,66 \times \sqrt{30} \times 400 \times 639 \\ &= 923986 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d \\ &= 0,17 \times \sqrt{30} \times 400 \times 639 \\ &= 237996 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_n &= V_c + V_s \\ &= 237996 + 421570 \\ &= 659567 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_u &= 262,3515 \times 1000 \\ &= 262351,5 \end{aligned}$$

Cek kapasitas :

$$\begin{aligned} \phi V_n / V_u &\geq 1 \\ (0,75 \times 659567) / 262351,5 &\geq 1 \\ 1,8 &\geq 1 \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

Desain Torsi

Parameter geometri penampang untuk perhitungan torsi

$$\begin{aligned} A_{cp} &= b \cdot h \\ &= 400 \times 700 \\ &= 280000 \text{ mm}^2 \\ P_{cp} &= 2 \cdot (b + h) \\ &= 2 \cdot (400 + 700) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2200 \text{ mm} \\
 X_o &= b - 2c_c - d_s \\
 &= 400 - (2 \times 40) - 10 \\
 &= 310 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_o &= h - 2c_c - d_s \\
 &= 700 - (2 \times 40) - 10 \\
 &= 610 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{oh} &= x_o \cdot y_o \\
 &= 189100 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_o &= 0,85 \cdot A_{oh} \\
 &= 160735 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Ph &= 2 \cdot (x_o + y_o) \\
 &= 1840 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Gaya dalam :

$$T_u = 71,4418 \text{ kNm}$$

Pengecekan kebutuhan tulangan torsi :

$$\begin{aligned}
 T_{cr} &= 0,33 \cdot \sqrt{f'c} \cdot \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \\
 &= 0,33 \times \sqrt{30} \times \frac{280000^2}{2200} \\
 &= 64412173 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\Phi = 0,75$$

$$\frac{\phi T_{cr}}{4} = 12077282 \text{ Nmm}$$

$$T_u > \frac{\phi T_{cr}}{4}$$

$$14944600 \text{ Nmm} > 12077282 \text{ Nmm} \quad (\text{perlu tulangan torsi})$$

Pengecekan kecukupan dimensi penampang:

Jenis Torsi = Kompatibilitas

$$\begin{aligned}
 T_u \text{ pakai} &= 48309130 \text{ Nmm} \\
 V_u \text{ pakai} &= 375207 \text{ N} \\
 V_c &= 0,17 \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b \cdot d \\
 &= 0,17 \times \sqrt{30} \times 400 \times 639 \\
 &= 237996 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Tegangan ultimate geser + torsi

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{V_u}{b \cdot d} \right) + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1,7 \cdot A_{oh}^2} \right) &= \\
 \left(\frac{375207}{400 \times 639} \right) + \left(\frac{48,3091 \times 1840}{1,7 \times 189100^2} \right) &= 2,072 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Kapasitas tegangan beton

$$\begin{aligned}
 \Phi \cdot \left(\left(\frac{V_c}{b \cdot d} \right) + (0,66 \cdot \sqrt{f'c'}) \right) &= \\
 0,75 \times \left(\left(\frac{237996}{400 \times 639} \right) + (0,66 \times \sqrt{30}) \right) &= 3,41 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Cek dimensi penampang :

$$\begin{aligned}
 \text{ruas kiri} &\leq \text{ruas kanan} \\
 2,072 \text{ MPa} &\leq 3,41 \text{ MPa} \quad (\text{OK})
 \end{aligned}$$

Penulangan Transversal Torsi :

$$\begin{aligned}
 s_{\text{max1}} &= \frac{p_h}{8} \\
 &= \frac{1840}{8} \\
 &= 230 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$s_{\text{max2}} = 300 \text{ mm}$$

Cek spasi tumpuan :

$$\begin{aligned}
 s_{\text{tumpuan}} &\leq s_{\text{max}} \\
 100 \text{ mm} &\leq 230 \text{ mm}, 300 \text{ mm} \quad (\text{OK}) \\
 s_{\text{lapangan}} &\leq s_{\text{max}}
 \end{aligned}$$

$$100 \text{ mm} \leq 230 \text{ mm}, 300 \text{ mm} \quad (\text{OK})$$

$$s \text{ pasang} = n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d_s^2}{s}$$

$$\begin{aligned} s \text{ tumpuan pasang} &= 4 \times \frac{\pi}{4} \times \frac{10^2}{100} \\ &= 3,142 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s \text{ lapangan pasang} &= 3 \times \frac{\pi}{4} \times \frac{10^2}{100} \\ &= 2,356 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_u}{2 \cdot \phi \cdot A_o \cdot f_y v} = 0,716$$

$$\frac{A_v}{s} \text{ perlu} = \frac{\frac{V_u}{\phi} - V_c}{f_y v \cdot d}$$

$$\frac{A_v}{s} \text{ tumpuan perlu} = \frac{\frac{375207}{0,75} - 237996}{280 \times 639} = 1,466 \text{ mm}$$

$$\frac{A_v}{s} \text{ lapangan perlu} = \frac{\frac{262351,5}{0,75} - 237996}{280 \times 639} = 0,625 \text{ mm}$$

$$s \text{ perlu} = 2 \cdot \left(\frac{A_t}{s} + \frac{A_v}{s} \right)$$

$$\begin{aligned} s \text{ tumpuan perlu} &= 2 \times 0,716 + 1,466 \\ &= 2,897 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s \text{ lapangan perlu} &= 2 \times 0,416 + 0,625 \\ &= 2,056 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s \text{ min 1} &= \frac{0,062 \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b}{f_y v} \\ &= \frac{0,062 \times \sqrt{30} \times 400}{280} \\ &= 0,485 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s \text{ min 2} &= \frac{0,35 \cdot b}{f_y v} \\ &= \frac{0,35 \times 400}{280} \\ &= 0,500 \text{ mm} \end{aligned}$$

Cek geser + torsi

$$s \text{ pasang} \geq s \text{ perlu dan min}$$

Tumpuan :

$$3,142 \text{ mm} \geq 2,897 \text{ mm}, 0,485 \text{ mm}, 0,500 \text{ mm} \quad (\text{OK})$$

Lapangan :

$$2,356 \text{ mm} \geq 2,056 \text{ mm}, 0,485 \text{ mm}, 0,500 \text{ mm} \quad (\text{OK})$$

Penulangan Longitudinal Torsi

$$d_b = 22 \text{ mm}$$

$$d_b \text{ min} = 0,042 s = 4,2 \text{ mm}$$

Cek d_b :

$$d_b \geq d_b \text{ min}$$

$$22 \text{ mm} \geq 4,2 \text{ mm} \quad (\text{OK})$$

$$\begin{aligned} A_l &= \frac{A_t}{s} \cdot p_h \\ &= 0,716 \times 1840 = 1316,701 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_l \text{ min} &= 0,42 \cdot \sqrt{f'c} \cdot \frac{A_{cp}}{f_y} - \frac{A_t}{s} \cdot p_h \\ &= 0,42 \times \sqrt{30} \times \frac{280000}{280} - 0,716 \times 1840 = 216,922 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s + A_l \text{ perlu tumpuan} &= 1316,701 + 1900,856 + 1167,592 \\ &= 4385,150 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s + A_l \text{ perlu lapangan} &= 1316,701 + 1778,252 + 1452,095 \\ &= 4547,048 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$n \text{ tumpuan atas} = 6$$

$$n \text{ tumpuan tengah} = 2$$

$$n \text{ tumpuan bawah} = 4$$

$$n \text{ tumpuan vertikal} = 3$$

$$n \text{ lapangan atas} = 6$$

$$n \text{ lapangan tengah} = 2$$

$$n \text{ lapangan bawah} = 5$$

$$n \text{ lapangan vertikal} = 3$$

$$\text{spasi horizontal} = (b - 2c_c - 2d_s - d_b) / ((n \text{ atas, bawah}) - 1)$$

$$\begin{aligned} \text{spasi horizontal tumpuan} &= (400 - 2(40) - 2(10) - 22) / (4 - 1) \\ &= 93 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{spasi horizontal lapangan} &= (400 - 2(40) - 2(10) - 22) / (5 - 1) \\ &= 70 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Spasi vertikal} = (h - 2c_c - 2d_s - d_b) / (n \text{ vertikal} - 1)$$

$$\begin{aligned} \text{spasi vertikal tumpuan} &= (700 - 2(40) - 2(10) - 22) / (3 - 1) \\ &= 289 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{spasi vertikal lapangan} &= (700 - 2(40) - 2(10) - 22) / (3 - 1) \\ &= 289 \text{ mm} \end{aligned}$$

Cek spasi:

$$\text{spasi} \leq 300 \text{ mm}$$

Tulangan longitudinal tumpuan

$$93 \text{ mm}, 289 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm} \quad (\text{OK})$$

Tulangan longitudinal lapangan

$$70 \text{ mm}, 289 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm} \quad (\text{OK})$$

$$A_s + A_l \text{ pasang tumpuan} = 4561,593 \text{ mm}^2$$

$$A_s + A_l \text{ pasang lapangan} = 4941,725 \text{ mm}^2$$

Cek lentur + torsi : $A_s + A_l \text{ pasang} \geq A_s + A_l \text{ perlu}$

Tumpuan

$$4561,593 \text{ mm}^2 \geq 4385,150 \text{ mm}^2 \quad (\text{OK})$$

Lapangan

$$4941,725 \text{ mm}^2 \geq 4547,048 \text{ mm}^2 \quad (\text{OK})$$

2.14.2 Rekapitulasi Perancangan Balok

Tabel 2. 25 Rekapitulasi Perancangan Balok

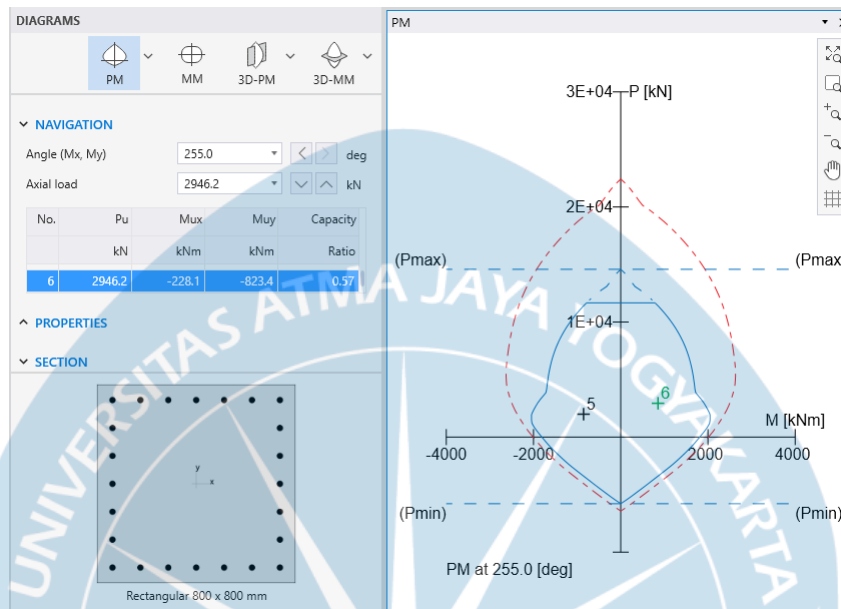
	Tulangan Longitudinal Tumpuan			Tulangan Longitudinal Lapangan			Tulangan Transversal/Sengkang	
	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Tumpuan	Lapangan
B1	6D22	2D22	4D22	6D22	2D22	5D22	4D10-100	3D10-100
B2	4D22	-	2D22	2D22	-	4D22	2D10-100	2D10-200
B3	4D22	-	3D22	3D22	-	3D22	2D10-100	2D10-150
BA	4D16	-	2D16	4D16	-	2D16	2D10-50	2D10-150

2.15 Perancangan Kolom SRPMK

Perancangan kolom pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) mencakup tiga aspek utama, yaitu perencanaan tulangan longitudinal, tulangan transversal, serta perhitungan panjang penyaluran tulangan. Tulangan longitudinal dirancang berdasarkan prinsip *Strong Column Weak Beam* (SCWB), yang berarti kolom harus lebih kuat dibandingkan balok agar mekanisme keruntuhan terjadi pada balok, bukan pada kolom. Proses perencanaan tulangan longitudinal umumnya dibantu dengan perangkat lunak seperti ETABS, spColumn, maupun Microsoft Excel. Secara umum, dimensi kolom ditentukan dengan ketentuan bahwa ukuran sisi terkecil kolom harus lebih besar atau sama dengan lebar balok yang menumpu padanya.

Beberapa syarat yang harus dipenuhi dalam perancangan kolom SRPMK yaitu dimensi penampang terkecil yang diukur pada garis lurus melalui pusat geometri tidak boleh kurang dari 300 mm, serta rasio antara dimensi penampang

terkecil terhadap dimensi tegak lurusnya tidak kurang dari 0,4. Berikut tahapan dalam perancangan kolom SRPMK.



Gambar 2. 70 Penulangan Kolom menggunakan SPColumn

Perancangan Kolom (K1 800 x 800)

- Desain Longitudinal

Direncanakan dengan KDS D dengan rekap gaya galam seperti yang tertera pada tabel dibawah.

Tabel 2. 26 Rekap Output Gaya Dalam

Loc	Pu	M2	M3
	kN	kNm	kNm
Pu Max	100.6295	115.0116	55.857
Pu Min	-3136.8026	-278.0615	-726.4988
M2 Max	-774.3684	839.742	250.4786
M2 Min	-1887.573	-848.2025	-114.2741

Loc	Pu	M2	M3
	kN	kNm	kNm
M3 Max	-1995.5022	224.6769	821.7026
M3 Min	-2247,384	-110,3701	-268,2745

Tinggi Kolom (L) = 4200 mm

b = 800 mm

h = 800 mm

Diameter Tul Longitudinal (db) = 25 mm

Diameter Tul Sengkang (ds) = 13 mm

Selimut Beton (Cc) = 40 mm

Kuat Tekan Beton (fc') = 30 MPa

Fy Tul Longitudinal (fy) = 420 MPa

Fy Tul Sengkang (fyv) = 420 MPa

Tinggi Balok (hb) = 700 mm

Ln (L - hb) = 3500 mm

$$d = b - Cc - ds - \frac{db}{2}$$

$$= 800 - 40 - 10 - \frac{25}{2}$$

$$= 737,5 \text{ mm}$$

Syarat Gaya dan Geometri:

Syarat Gaya Aksial

$$= P_u > 0.1 A_g f_c'$$

$$= 3136.8026 \times 10^3 > 0,1 \times 800 \times 800 \times 30$$

$$= \text{OK}$$

Syarat Sisi Terpendek

$$= b \geq 300 \text{ mm}$$

$$= 800 \geq 300 \quad (\text{OK})$$

Syarat Rasio Dimensi Penampang

$$= \frac{b}{h} \geq 0,4$$

$$= \frac{800}{800} \geq 0,4$$

$$= 1$$

$$= \text{OK}$$

Pengecekan terhadap Gaya Dalam Aksial – Lentur:

Jumlah Tulangan (n) = 24

$$\begin{aligned}
 \text{Luas Tulangan Longitudinal (A}_s\text{)} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \\
 &= 24 \times \frac{\pi}{4} \times 25^2 \\
 &= 11781,0 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rasio Tulangan } (\rho) &= \frac{A_s}{(b \times h)} \\
 &= \frac{11781,0}{(800 \times 800)} \\
 &= 1,84 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Cek } \rho_{\min} \text{ dan } \rho_{\max} &= 1 \% \leq \rho \leq 6 \% \\
 &= 1 \% \leq 1,84 \% \leq 6 \% \\
 &= \text{OK}
 \end{aligned}$$

No.	Demand			Capacity			Parameters at Capacity			Capacity Ratio
	P _u kN	M _{ux} kNm	M _{uy} kNm	φP _n kN	φM _{ux} kNm	φM _{uy} kNm	NA Depth mm	ε _t	φ	
1	100.63	115.01	55.86	3570.49	1468.29	713.09	527	0.00269	0.657	0.16
2	3136.80	-278.06	-726.50	3868.03	-589.76	-1540.89	523	0.00257	0.650	0.56
3	774.37	839.74	250.48	0.00	1728.06	515.45	280	0.00676	0.900	0.54
4	1887.57	-848.20	-114.27	4165.57	-1779.39	-239.73	458	0.00255	0.650	0.53
5	1995.50	224.68	821.70	3868.03	451.80	1652.35	494	0.00263	0.651	0.55
6	2946.16	-228.09	-823.39	4165.57	-452.62	-1633.96	511	0.00246	0.650	0.57

Gambar 2. 71 Tabel Hasil Analisis SpColumn

$$\begin{aligned}
 M_{nx} &= \frac{\phi (M_{nx})}{\phi} \\
 M_{ny} &= \frac{\phi (M_{ny})}{\phi}
 \end{aligned}$$

Berikut disajikan hasil perhitungan momen nominal kolom.

Tabel 2. 27 Momen Nominal Kolom

Mnx	Mny
2234.84	1085.373
907.3231	2370.6
1920.067	572.7222
2737.523	368.8154
694.0092	2538.172
696.3385	2513.785

- Pengecekan Strong Column – Weak Beam (SCWB):

$$\begin{aligned}
 \text{Momen Nominal Kolom } (M_{nc}) &= 740,5 \quad \text{kN m} \\
 M_n^- \text{ Tumpuan Balok} &= 567,138 \quad \text{kN m} \\
 M_n^+ \text{ Tumpuan Balok} &= 388,088 \quad \text{kN m} \\
 \text{Cek SCWB} &= 2 \times M_{nc} \geq 1,2 \times (M_n^- + M_n^+) \\
 &= 2 \times 740,5 \geq 1,2 \times (567,138 + 388,088) \\
 &= \text{OK}
 \end{aligned}$$

- Desain Transversal

Panjang Zona Sendi Plastis:

$$\begin{aligned}
 l_{o1} &= h = 800 \quad \text{mm} \\
 l_{o2} &= \frac{L_n}{6} = 583,3 \quad \text{mm} \\
 l_{o3} &= 450 \quad \text{mm} \\
 l_o &= \text{Max } (l_{o1}, l_{o2}, l_{o3}) = 800 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

Tulangan Transversal Zona Sendi Plastis/ Tumpuan:

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah Kaki Sisi Pendek } (n1) &= 6 \\
 \text{Jumlah Kaki Sisi Panjang } (n2) &= 6 \\
 \text{Spasi } (s) &= 100 \quad \text{mm} \\
 \text{Spasi Kaki Terbesar } (X_i \text{ max}) &= 300 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{sh1} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\
 &= 6 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 \\
 &= 796,394 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{sh2} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\
 &= 6 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 \\
 &= 796,394 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{sh1} / s &= \frac{796,394}{100} \\
 &= 7,964 \quad \text{mm}^2 / \text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{sh\ 2 / s} &= \frac{769,394}{100} \\
 &= 7,964 \quad \text{mm}^2 / \text{mm}
 \end{aligned}$$

Confinement / Kekangan Zona Sendi Plastis:

$$\begin{aligned}
 \text{Lebar Penampang Inti Beton } (b_c) &= b - 2C_c \\
 &= 800 - 2(40) \\
 &= 720 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Panjang Penampang Inti Beton } (h_c) &= h - 2C_c \\
 &= 800 - 2(40) \\
 &= 720 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Luas Penampang Kolom } (A_g) &= b \times h \\
 &= 800 \times 800 \\
 &= 640000 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Luas Penampang Inti Beton } (A_{ch}) &= b_c \times h_c \\
 &= 720 \times 720 \\
 &= 518400 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

Sisi Pendek / Sumbu Lemah:

$$\begin{aligned}
 A_{sh\ 1 / s\ \text{min}} &= 0,3 \left(b_c \times \frac{f_c'}{f_{yv}} \right) \times \left(\frac{A_g}{A_{ch} - 1} \right) \\
 &= 0,3 \left(720 \times \frac{30}{420} \right) \times \left(\frac{640000}{518400 - 1} \right) \\
 &= 3,619 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{sh\ 2 / s\ \text{min}} &= 0,09 \times b_c \times \left(\frac{f_c'}{f_{yv}} \right) \\
 &= 0,09 \times 720 \times \left(\frac{30}{420} \right) \\
 &= 4,629 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

Cek A_{sh} / s_1

$$= A_{sh} / s_1 \geq A_{sh} / s_{min}$$

$$= 7,964 \geq 3,619$$

= OK

Sisi Panjang / Sumbu Kuat:

A_{sh} / s_{min}

$$= 0,3 \left(b_c \times \frac{f_c'}{f_{yv}} \right) \times \left(\frac{A_g}{A_{ch} - 1} \right)$$

$$= 0,3 \left(720 \times \frac{30}{420} \right) \times \left(\frac{640000}{518400 - 1} \right)$$

$$= 3,619 \text{ mm}^2$$

A_{sh} / s_{min}

$$= 0,09 \times b_c \times \left(\frac{f_c'}{f_{yv}} \right)$$

$$= 0,09 \times 720 \times \left(\frac{30}{420} \right)$$

$$= 4,629 \text{ mm}^2$$

Cek A_{sh} / s_2

$$= A_{sh} / s \geq A_{sh} / s_{min}$$

$$= 7,964 \geq 4,629$$

= OK

Cek Spasi:

$S_{max} 1$

$$= \frac{b}{4}$$

$$= \frac{800}{4}$$

$$= 200 \text{ mm}$$

$S_{max} 2$

$$= 6 \times d_b$$

$$= 6 \times 25$$

$$= 150 \text{ mm}$$

$h_x = X_{i \max}$

$$= 300 \text{ mm}$$

$S_{max} 3 = S_o$

$$= 116,667 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\max} &= \text{Min} (S_{\max 1}, S_{\max 2}, S_{\max 3}) \\
 &= \text{Min} (300, 192, 116,667) \\
 &= 116,667 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Cek Spasi} &= \text{Spasi} < S_{\max} \\
 &= 100 < 116,667 \\
 &= \text{OK}
 \end{aligned}$$

Kuat Geser Zona Sendi Plastis:

$$\begin{aligned}
 M_{pr} \text{ Kolom} &= 2722,078 \text{ kN m} \\
 V_u 1 &= \frac{2 \times M_{pr} \text{ Kolom}}{L_n} \\
 &= \frac{2 \times 2722,078}{3500} \\
 &= 1555473 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Gaya Geser Hasil Analisis Struktur:

$$\begin{aligned}
 V_u 2 \text{ Sumbu Lemah} &= 248621 \text{ N} \\
 V_u 2 \text{ Sumbu Kuat} &= 226957 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Tahan Geser Beton Sumbu Lemah:

$$\begin{aligned}
 V_u &= \text{Max} (V_{u1}, V_{u2}) \\
 &= \text{Max} (V_{u1}, V_{u2}) \\
 &= \text{Max} (1555473, 248621) \\
 &= 1555473 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\phi = 0,75$$

$$\begin{aligned}
 V_c &= 0,17 (1 + N_u / (14 A_g)) (f_c')^{0,5} h d; d = b - c_c - d_s - d_b / 2 \\
 &= 0,17 (1 + 35,3 / (14 \times 640000)) \times (30')^{0,5} \times 800 \times (800 - 40 - 13 - 25 / 2)
 \end{aligned}$$

$$= 2156 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} V_s \text{ Perlu} &= \frac{V_u}{\phi - V_c} \\ &= \frac{1555473}{0,75 - 2156} \\ &= 2071808 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s / s \text{ Perlu} &= \frac{V_s}{(f_{yv} \times d)} \\ &= \frac{2071808}{(420 \times 631)} \\ &= 6,7160 \text{ mm}^2 / \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s / s \text{ Min 1} &= \frac{0,062(f_c')^{0,5} \times h}{(f_{yv})} \\ &= \frac{0,062(30)^{0,5} \times 800}{(420)} \\ &= 0,6468 \text{ mm}^2 / \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s / s \text{ Min 2} &= \frac{0,35 \times h}{(f_{yv})} \\ &= \frac{0,35 \times 800}{(420)} \\ &= 0,6667 \text{ mm}^2 / \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cek } A_s / s &= A_s / s \geq \text{Max } (A_s / s \text{ Perlu}, A_s / s \text{ Min}) \\ &= 7,964 \geq \text{Max } (6,7160, 0,6468, 0,6667) \\ &= \text{OK} \end{aligned}$$

Tahan Geser Beton Sumbu Kuat:

$$\begin{aligned} V_u &= \text{Max } (V_{u1}, V_{u2}) \\ &= \text{Max } (V_{u1}, V_{u2}) \\ &= \text{Max } (1555473, 226957) \\ &= 1555473 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\phi = 0,75$$

$$\begin{aligned} V_c &= 17 (1 + Nu/(14 A_g)) (f_c')^{0,5} h d; d = b - c_c - d_s - d_b / 2 \\ &= 0,17 (1 + 35,3/(14 \times 640000)) \times (30')^{0,5} \times 800 \times (800 - 40 - 13 - 25 / 2) \\ &= 2156 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_s \text{ Perlu} &= \frac{V_u}{\phi - V_c} \\ &= \frac{1555473}{0,75 - 2156} \\ &= 2071808 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s / s \text{ Perlu} &= \frac{V_s}{(f_{yv} \times d)} \\ &= \frac{2071808}{(420 \times 631)} \\ &= 6,7160 \text{ mm}^2 / \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s / s \text{ Min 1} &= \frac{0,062(f_c')^{0,5} \times h}{(f_{yv})} \\ &= \frac{0,062(30)^{0,5} \times 800}{(420)} \\ &= 0,6468 \text{ mm}^2 / \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s / s \text{ Min 2} &= \frac{0,35 \times h}{(f_{yv})} \\ &= \frac{0,35 \times 800}{(420)} \\ &= 0,6667 \text{ mm}^2 / \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cek } A_s / s &= A_s / s 1 \geq \text{Max } (A_s / s \text{ Perlu}, A_s / s \text{ Min}) \\ &= 7,964 \geq \text{Max } (6,7160, 0,6468, 0,6667) \\ &= \text{OK} \end{aligned}$$

Tulangan Transversal Luar Zona Sendi Plastis/ Tumpuan:

$$\text{Jumlah Kaki Sisi Pendek (n1)} = 2$$

$$\text{Jumlah Kaki Sisi Panjang (n2)} = 2$$

$$\text{Spasi (s)} = 150 \quad \text{mm}$$

$$\begin{aligned} A_v \text{ Sumbu Lemah} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\ &= 2 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 \\ &= 265,465 \quad \text{mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_v \text{ Sumbu Kuat} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\ &= 2 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 \\ &= 265,465 \quad \text{mm}^2 \end{aligned}$$

Confinement / Kekangan Luar Zona Sendi Plastis:

$$\begin{aligned} S_{\max 1} &= 6 \times d_b \\ &= 6 \times 25 \\ &= 150 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

$$S_{\max 2} = 150 \quad \text{mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Cek Spasi} &= \text{Spasi} \leq \text{Spasi Max} \\ &= 150 \leq 150 \\ &= \text{OK} \end{aligned}$$

Kuat Geser Luar Zona Sendi Plastis:

Tahan Geser Beton Sumbu Lemah:

$$V_u = 248621 \quad \text{N}$$

$$\phi = 0,75$$

$$V_c = 17 \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g} \right) (f_c')^{0,5} h d; d = b - c_c - d_s - d_b / 2$$

$$= 0,17 (1 + 35,3/(14 \times 640000)) \times (30')^{0,5} \times 800 \times (800 - 40 - 13 - 25 / 2)$$

$$= 2156 \text{ N}$$

$$V_s \text{ Perlu} = \frac{V_u}{\phi - V_c}$$

$$= \frac{248621}{0,75 - 2156}$$

$$= 329339 \text{ N}$$

$$A_v / s \text{ Perlu} = 1,0676 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

$$A_s / s \text{ Min 1} = 0,6468 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

$$A_s / s \text{ Min 2} = 0,6667 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

$$\text{Cek } A_s / s = A_s / s 1 \geq \text{Max} (A_s / s \text{ Perlu}, A_s / s \text{ Min})$$

$$= 265,465/150 \geq \text{Max} (0)$$

$$= \text{OK}$$

Tahan Geser Beton Sumbu Kuat:

$$V_u = 226957 \text{ N}$$

$$\phi = 0,75$$

$$V_c = 17 (1 + N_u/(14 A_g)) (f_c')^{0,5} h d; d = b - c_c - d_s - d_b / 2$$

$$= 0,17 (1 + 35,3/(14 \times 640000)) \times (30')^{0,5} \times 800 \times (800 - 40 - 13 - 25 / 2)$$

$$= 2156 \text{ N}$$

$$V_s \text{ Perlu} = \frac{V_u}{\phi - V_c}$$

$$= \frac{226957}{0,75 - 2156}$$

$$= 300453 \text{ N}$$

$$A_v / s \text{ Perlu} = 0,9739 \text{ mm}^2 / \text{mm}$$

$$A_s / s \text{ Min 1} = 0,6468 \quad \text{mm}^2 / \text{mm}$$

$$A_s / s \text{ Min 2} = 0,6667 \quad \text{mm}^2 / \text{mm}$$

$$\text{Cek } A_s / s = A_s / s 1 \geq \text{Max } (A_s / s \text{ Perlu}, A_s / s \text{ Min})$$

$$= 265,465/150 \geq \text{Max } (0)$$

$$= \text{OK}$$

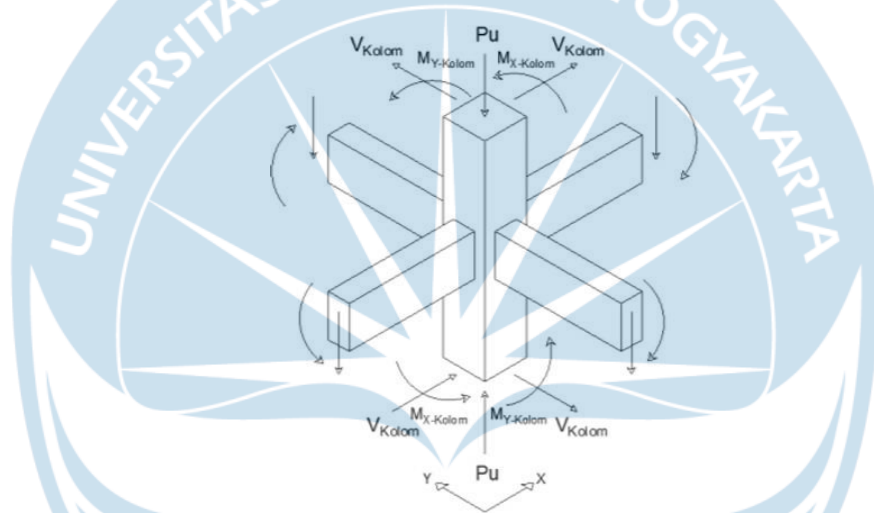
Berikut adalah rekapan dari penulangan kolom yang dapat dilihat pada Tabel 2.28.

Tabel 2. 28 Rekapan Tulangan Kolom

	K1 (800 x 800) 4,2 m	K2 (600 x 600) 4,2 m
Tulangan Longitudinal	24 D25	16 D22
Sengkang Tumpuan Sumbu Kuat	6D13-100	4D13-100
Sengkang Tumpuan Sumbu Lemah	6D13-100	4D13-100
Sengkang Lapangan Sumbu Kuat	2D13-150	3D13-150
Sengkang Lapangan Sumbu Lemah	2D13-150	3D13-150

2.16 Hubungan Balok Dan Kolom

Hubungan balok-kolom (HBK) merupakan zona pertemuan antara elemen balok dan kolom yang berfungsi sebagai bagian penting struktur dalam menahan beban gempa. Pada area ini terjadi perpindahan gaya dan momen antara kedua elemen tersebut, sehingga diperlukan perencanaan khusus untuk menjamin ketahanan struktur terhadap gempa. Berdasarkan SNI 2847:2019, perencanaan HBK dilakukan dengan mengacu pada konsep Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), di mana kedua elemen harus mampu menahan beban gempa yang signifikan. Interaksi gaya pada hubungan balok dan kolom dapat dilihat pada Gambar 2.72.



Gambar 2. 72 Interaksi Hubungan Balok dan Kolom

Diketahui data – data untuk pengecekan HBK pada balok B (400x700) dan B (400x700), sebagai berikut:

F'_c	= 30 Mpa
F_y	= 420 Mpa
λ	= 1
Panjang kolom	= 4200 mm
Dimensi kolom	= 800 x 800 mm

Arah x

Dimensi balok kiri

$$b = 400 \text{ mm}$$

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

Dimensi balok kanan

$$b = 400 \text{ mm}$$

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

$$L_n = 4200 - 700 = 3500 \text{ mm}$$

Tulangan atas balok kiri (6D22)

$$\begin{aligned} A_s - \text{kiri} &= 6 \times 0,25 \times \pi \times 22^2 \\ &= 2280,796267 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$M_{prb- \text{kiri}} = 694,8653 \text{ kNm}$$

Tulangan bawah balok kanan (4D22)

$$\begin{aligned} A_s + \text{kanan} &= 4 \times 0,25 \times \pi \times 22^2 \\ &= 1520,530844 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$M_{prb+ \text{kanan}} = 478,86239 \text{ kNm}$$

Luas efektif join (A_s)

$$\text{Lebar balok} = 400 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi joint} = 800 \text{ mm}$$

$$X = (800 - 400) / 2 = 200 \text{ mm}$$

$$b + h = 400 + 800 = 1200 \text{ mm}$$

$$b + 2x = 400 + 2(200) = 800 \text{ mm}$$

Syarat ($b + h > b + 2x$)

$$\text{Lebar efektif} = b + 2x = 800 \text{ mm}$$

$$\text{Luas joint efektif} = A_s = 800 \times 800 = 640000 \text{ mm}^2$$

Tulangan transversal

Berdasarkan SNI 2847 : 2019 pasal 18.8.3.2 kebutuhan tulangan dapat dikurangi setengah dan spasi bisa ditingkatkan hingga 150mm jika : Terdapat balok yang merangka pada keempat sisi

Lebar balok $\geq 3/4$ lebar kolom

$$\text{Lebar balok } b = 400 \text{ mm}$$

$$3/4 \text{ lebar kolom} = 3/4 \times 800 = 600 \text{ mm}$$

Lebar balok $< 3/4$ lebar kolom

maka kebutuhan tulangan transversal pada hubungan balok kolom tetap sama seperti yang digunakan pada daerah sendi plastis kolom

$$\frac{Ash}{s} = 7,963 \text{ mm}^2$$

$$\text{Jarak yang dipakai} = 100 \text{ mm}$$

$$\text{Jumlah tulangan} = 6 \text{ buah}$$

$$\text{Diameter tulangan} = 13 \text{ mm}$$

$$\text{Ash diperlukan} = 7,963 \times 100 = 796,39 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ash pakai} > \text{Ash diperlukan}$$

$$\text{Maka digunakan } 6D13 - 100$$

Kuat geser

$$M_{prb- \text{ kiri}} = 694,8653 \text{ kNm}$$

$$M_{prb+ \text{ kanan}} = 478,8623 \text{ kNm}$$

$$D_f \text{ atas} = \frac{\frac{1}{4,2}}{\frac{1}{5} + \frac{1}{4,2}} = 0,543$$

$$D_f \text{ bawah} = \frac{\frac{1}{5}}{\frac{1}{5} + \frac{1}{4,2}} = 0,456$$

$$V_{\text{sway}} = \frac{(0,543 \times 1173,7277) + (0,456 \times 1173,7277)}{\frac{3500}{1000}} = 335,3507 \text{ kN}$$

Gaya tarik tulangan atas kiri hubungan balok kolom

$$A_s - \text{ kiri} = 2280,7962 \text{ mm}^2$$

$$T1 = 1,25 A_s F_y = 1197418,04 \text{ N} = 1197,41804 \text{ kN}$$

$$C1 = T1 = 1197,41804 \text{ kN}$$

Gaya tarik tulangan bawah kanan hubungan balok kolom

$$A_s + \text{ kanan} = 1520,530844 \text{ mm}^2$$

$$T2 = 1,25 A_s F_y = 760265,4222 \text{ N} = 760,2654222 \text{ kN}$$

$$C2 = T2 = 760,2654222 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} V_j &= C1 + C2 - V_{\text{sway}} \\ &= 1622,332685 \text{ kN} \end{aligned}$$

Berdasarkan SNI 2847 : 2019 pasal 18.8.4.1 kuat geser hubungan balok dan kolom yang terkekang oleh balok pada 3 sisinya :

$$\begin{aligned}
 V_n &= 1,25 \lambda \sqrt{f_c} A_s \\
 &= 3525424,368 \text{ N} \\
 \phi V_n &= 0,85 \times V_n \\
 &= 2979610,71 \text{ N} = 2979,61071 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Karena $\phi V_n > V_j$ maka dinyatakan aman. Sehingga dimensi pada hubungan balok kolom mencukupi dan dipasang tulangan transversal D13 dengan jarak 100 mm.

Arah Y

$$b = 400 \text{ mm}$$

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

$$L_n = 4200 - 700 = 3500 \text{ mm}$$

Tulangan atas balok kiri (6D22)

$$\begin{aligned}
 A_s\text{- kiri} &= 6 \times 0,25 \times \pi \times 22^2 \\
 &= 2280,796267 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$M_{prb}\text{- kiri} = 694,8653 \text{ kNm}$$

Tulangan bawah balok kanan (4D22)

$$\begin{aligned}
 A_s\text{+ kanan} &= 4 \times 0,25 \times \pi \times 22^2 \\
 &= 1520,530844 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$M_{prb}\text{+ kanan} = 478,86239 \text{ kNm}$$

Luas efektif join (A_s)

$$\text{Lebar balok} = 400 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi joint} = 800 \text{ mm}$$

$$X = (800 - 400) / 2 = 200 \text{ mm}$$

$$B+h = 400 + 800 = 1200 \text{ mm}$$

$$B + 2x = 400 + 2(200) = 800 \text{ mm}$$

Syarat ($b + h > b + 2x$)

$$\text{Lebar efektif} = b + 2x = 800 \text{ mm}$$

$$\text{Luas joint efektif} = A_s = 800 \times 800 = 640000 \text{ mm}^2$$

Tulangan transversal

Berdasarkan SNI 2847 : 2019 pasal 18.8.3.2 kebutuhan tulangan dapat dikurangi setengah dan spasi bisa ditingkatkan hingga 150mm jika : Terdapat balok yang merangka pada keempat sisi

Lebar balok $\frac{3}{4}$ lebar kolom

Lebar balok $b = 400 \text{ mm}$

$\frac{3}{4}$ lebar kolom $= \frac{3}{4} \times 800 = 600 \text{ mm}$

Lebar balok $< \frac{3}{4}$ lebar kolom

maka kebutuhan tulangan transversal pada hubungan balok kolom tetap sama seperti yang digunakan pada daerah sendi plastis kolom

$$\frac{A_{sh}}{s} = 7,963 \text{ mm}^2$$

Jarak yang dipakai $= 100 \text{ mm s}$

Jumlah tulangan $= 6 \text{ buah}$

Diameter tulangan $= 13 \text{ mm}$

Ash diperlukan $= 7,963 \times 100 = 796,39 \text{ mm}^2$

Ash pakai $>$ Ash diperlukan

Maka digunakan 6D13 - 100

Kuat geser

$M_{prb- \text{ kiri}} = 694,8653 \text{ kNm}$

$M_{prb+ \text{ kanan}} = 478,8623 \text{ kNm}$

$$D_f \text{ atas} = \frac{\frac{1}{4,2}}{\frac{1}{5} + \frac{1}{4,2}} = 0,543$$

$$D_f \text{ bawah} = \frac{\frac{1}{5}}{\frac{1}{5} + \frac{1}{4,2}} = 0,456$$

$$V_{sway} = \frac{(0,543 \times 1173,7277) + (0,456 \times 1173,7277)}{\frac{3500}{1000}} = 335,3507 \text{ kN}$$

Gaya tarik tulangan atas kiri hubungan balok kolom

$A_s- \text{ kiri} = 2280,7962 \text{ mm}^2$

$T1 = 1,25 A_s F_y = 1197418,04 \text{ N} = 1197,41804 \text{ kN}$

$C1 = T1 = 1197,41804 \text{ kN}$

Gaya tarik tulangan bawah kanan hubungan balok kolom

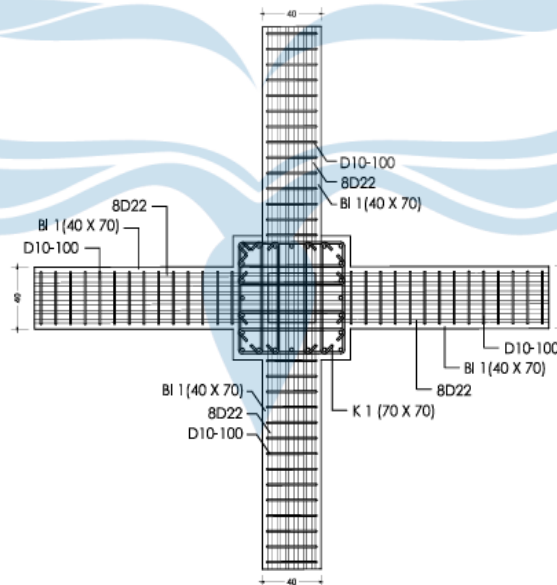
$A_s+ \text{ kanan} = 1520,530844 \text{ mm}^2$

$$\begin{aligned}
 T2 &= 1,25 A_s F_y = 760265,4222 \text{ N} = 760,2654222 \text{ kN} \\
 C2 &= T2 = 760,2654222 \text{ kN} \\
 V_j &= C1 + C2 - V_{\text{sway}} \\
 &= 1622,332685 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan SNI 2847 : 2019 pasal 18.8.4.1 kuat geser hubungan balok dan kolom yang terkekang oleh balok pada 3 sisinya :

$$\begin{aligned}
 V_n &= 1,25 \lambda \sqrt{f_c} A_s \\
 &= 3525424,368 \text{ N} \\
 \phi V_n &= 0,85 \times V_n \\
 &= 2979610,71 \text{ N} = 2979,61071 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Karena $\phi V_n > V_j$ maka dinyatakan aman. Sehingga dimensi pada hubungan balok kolom mencukupi dan dipasang tulangan transversal D13 dengan jarak 100 mm.



Gambar 2. 73 Interaksi Hubungan Balok dan Kolom

2.17 Daya Dukung Pondasi

Daya dukung fondasi merupakan kemampuan tanah untuk menahan beban dari struktur di atasnya tanpa mengalami keruntuhan geser maupun penurunan yang berlebihan. Perhitungan daya dukung ini sangat penting untuk memastikan kestabilan serta keamanan suatu bangunan. Pada perencanaan Gedung Perkuliahan, analisis daya dukung fondasi dilakukan dengan menggunakan metode Meyerhof, yang didasarkan pada hasil pengujian Standard Penetration Test (SPT) di lapangan. Adapun berikut ini merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung daya dukung ujung tiang berdasarkan metode Meyerhof.

Daya dukung fondasi pada tanah

$$Q_p = 40 \times N_b \times A_p$$

Daya dukung ujung fondasi pada tanah tak kohesif

$$Q_p = 9 \times C_u \times A_p$$

Daya dukung selimut untuk tanah kohesif

$$Q_s = 2 \times N\text{-SPT} \times P \times L_i$$

Daya dukung selimut tiang tak kohesif

$$Q_s = \alpha \times C_u \times P \times L_i$$

Daya dukung ultimit fondasi

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

$$Q_{all} = Q_u / SF$$

Keterangan :

Q_p = Daya dukung ujung tiang (kN)

N_b = $N_1 + N_2$

N_1 = N-SPT di kedalaman 10D diatas tiang

N_2 = N-SPT di kedalaman 4D diatas tiang

A_p = Luas penampang (m²)

C_u = Kohesi tanah (kN/ m²)

α = Adhesi Empiris

P = Keliling (m)

L_i = Tebal lapisan tanah (m)

SF = Safety Factor

Selanjutnya, akan dilakukan perhitungan daya dukung tanah menggunakan metode Meyerhof berdasarkan hasil pengujian Standard Penetration Test (SPT) di lapangan.

Data fondasi

$$\text{Diameter (D)} = 80 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{Keliling (P)} &= \pi \times D \\ &= 3,14 \times 0,80 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 2,5 \text{ m} \\ \text{Luas penampang (Ap)} &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 0,8^2 \\ &= 0,5 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Kedalaman tiang (Li)} = 18 \text{ m}$$

Menghitung nilai N-SPT

$$\begin{aligned} N_1 \rightarrow 10D &= 10 \times 0,8 \\ &= 8 \end{aligned}$$

(Kedalaman – 10D)

$$N_1 = 18 - 8 = 10$$

$$\rightarrow \text{N-SPT} = 10$$

$$\begin{aligned} N_2 \rightarrow 4D &= 4 \times 0,8 \\ &= 3,2 \end{aligned}$$

$$N_2 = 18 + 3,2 = 21,2$$

$$\rightarrow \text{N-SPT} = 32$$

$$\begin{aligned} N_b &= \frac{n_1 + n_2}{2} = \frac{32 + 10}{2} \\ &= 21 \end{aligned}$$

Menghitung daya dukung tiang

$$\begin{aligned} Q_p &= 40 \times N_b \times A_p \\ &= 40 \times 21 \times 0,5 \\ &= 422,23 \text{ kN} \end{aligned}$$

Menghitung daya dukung selimut

$$\begin{aligned} Q_s &= 2 \times N\text{-SPT} \times P \times L_i \\ &= 2 \times 21 \times 2,5 \times 18 \\ &= 1900,00 \text{ kN} \end{aligned}$$

Menghitung daya dukung ultimate fondasi

$$\begin{aligned} Q_{ult} &= Q_p + Q_s \\ &= 422,23 \text{ kN} + 1900,00 \text{ kN} \\ &= 2322,26 \text{ kN} \end{aligned}$$

Menghitung daya dukung fondasi

$$\begin{aligned} Q_{all} &= \frac{Q_{ult}}{SF} \\ &= \frac{2322,26}{3} = 774,088 \end{aligned}$$

2.18 Perhitungan Bore Pile

2.18.1 Penentuan Jumlah Tiang Pondasi Bored Pile

Dalam perencanaan pondasi bored pile, penentuan jumlah tiang, efisiensi, serta desain penulangan dilakukan dengan mempertimbangkan jenis pembebanan yang berbeda untuk tiap tahap analisis. Pada perhitungan efisiensi, digunakan pendekatan metode tegangan izin (LRFD) yang memperhitungkan faktor pengali akibat gempa kuat. Sementara itu, untuk desain penulangan, digunakan pembebanan berdasarkan metode ultimit (ASD). Berikut ini merupakan tahapan perhitungan dalam menentukan jumlah kebutuhan tiang:

$$N = \frac{P_{aksial}}{\text{Daya Dukung Izin Fondasi}}$$

$$\text{a. Paksial Kolom 1} = 3136,8026$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Tiang} &= \frac{P_{aksial}}{\text{Daya Dukung Izin Fondasi}} \\ &= \frac{3136,8026}{744,088} \\ &= 4,052 \end{aligned}$$

$$\text{b. Paksial Kolom 2} = 1871,4484$$

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah Tiang} &= \frac{P_{\text{aksial}}}{\text{Daya Dukung Izin Fondasi}} \\
 &= \frac{1292,4763}{744,088} \\
 &= 2,41
 \end{aligned}$$

Setelah menghitung kebutuhan jumlah tiang, diperlukan juga perhitungan terhadap efisiensi daya dukung tiang, sebagai berikut:

- a. Perhitungan efisiensi tiang dengan jumlah rencana 4 tiang

$$\text{Daya dukung} = 774,088$$

$$\text{Paksial} = \frac{3136,8026}{744,088} \approx 4,05 \text{ tiang}$$

$$\text{Jumlah tiang dipakai} = 4 \text{ tiang}$$

- b. Syarat perencanaan kelompok tiang

$$2,5D \leq S \leq 3,5D$$

$$2,5 \times 0,8 \leq S \leq 3,5 \times 0,8$$

$$2 \leq S \leq 2,8$$

$$\text{Jarak spasi antar tiang dipakai} = 2$$

- c. Efisiensi 4 tiang

$$\theta = \arctan \frac{d}{s} = \arctan \frac{0,8}{3} = 21,8$$

$$n = 2 \quad ; \quad m = 2$$

$$\begin{aligned}
 \eta &= 1 - \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \times m \times n} \right] \times \theta \\
 &= 1 - \left[\frac{(2-1)2 + (2-1)2}{90 \times 2 \times 2} \right] \times 21,8 \\
 &= 0,76 \%
 \end{aligned}$$

- d. Kapasitas daya dukung dalam kelompok tiang

$$\begin{aligned}
 Q_g &= \eta \times n' \times Q_{izin} \\
 &= 0,76 \times 4 \times 774,088 \\
 &= 2346,299 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Tabel 2. 29 Rekapitulasi Perhitungan Efisiensi Tiang

Tipe	n rencana	spasi	m	n	E (%)	n terpakai
PC A	6	2	2	2	76	4
PC B	5	1,25	2	2	82	4
PC C	5	1,25	2	1	92	2

2.18.2 Penulangan Bored Pile

Bored pile tipe D80

Tulangan Lentur:

D tiang = 800 mm

Luas penampang (A_g)
 $= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2$
 $= \frac{1}{4} \times \pi \times 800^2$

$= 502654,8246 \text{ mm}^2$

$F_c = 30 \text{ MPa}$

$F_y = 420 \text{ MPa}$

Selimut beton = 80 mm

D tul. utama = 22 mm

D tul. sengkang = 13 mm

$A_{s \text{ min}} = 0,01 \times A_g$

$= 0,01 \times 502654,8246$

$= 5026,5482 \text{ mm}^2$

$A_{s \text{ max}} = 0,06 \times A_g$

$= 0,06 \times 502654,8246$

$$= 30159,2895$$

As tul

$$= \frac{1}{4} \pi \times D \text{ tul. utama}$$

$$= \frac{1}{4} \pi \times 22$$

$$= 380,1327 \text{ mm}^2$$

n tul

$$= \frac{As \text{ min}}{As \text{ tul}}$$

$$= \frac{5026,54}{380,13}$$

$$= 13,2231 \approx 14$$

Spasi

$$= \frac{D}{n \text{ tul}}$$

$$= \frac{800}{14}$$

$$= 57,14285714$$

Tulangan Sengkang

1%A

$$= 5026,5482 \text{ mm}^2$$

20% x (1% tampang)

$$= 20\% \times (5026,5482)$$

$$= 1005,3096 \text{ mm}^2$$

D

$$= 13$$

As tul

$$= \frac{1}{4} \pi \times D^2$$

$$= \frac{1}{4} \pi \times 13^2$$

$$= 132,7323 \text{ mm}^2$$

n tul

$$= \frac{20\% \times (1\% \text{ tampang})}{As \text{ tul}}$$

$$= \frac{1005,3096}{132,7323}$$

$$= 7,57 \approx 8$$

$$\begin{aligned}
 \text{Spasi} &= \frac{D}{n \text{ tul}} \\
 &= \frac{800}{8} \\
 &= 100
 \end{aligned}$$

Tabel 2. 30 Rekapitulasi Penulangan Bored Pile

No	Tipe Bored Pile	Tulangan Utama	Tulangan Senggang
1	Bored Pile D80	Digunakan D22-50	Dipakai D13-100
2	Bored Pile D50	Digunakan D22-80	Dipakai D13-150
3	Bored Pile D50	Digunakan D22-80	Dipakai D13-150

2.19 Perhitungan Pile Cap

2.19.1 Perencanaan Dimensi Pile Cap

Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi sebelumnya, diperoleh jarak antar tiang sebesar 2 meter untuk tiang berdiameter 80 cm (D80) dan 1,25 meter untuk tiang berdiameter 50 cm (D50). Dengan mempertimbangkan tebal selimut beton sebesar 80 mm, maka ditetapkan dimensi pile cap yang digunakan untuk masing-masing tipe sebagai berikut.

Tabel 2. 31 Rekapitulasi Dimensi Pile Cap

Tipe	D (m)	Selimut (m)	Spasi (mm)	Lx (m)	Ly (m)
PC A	0,8	0,08	2	2,85	2,85
PC B	0,5	0,08	1,25	2,7	2,7
PC C	0,5	0,08	1,25	1,8	2,7

2.19.2 Kontrol Geser 1 Arah

Kontrol geser 1 arah, pile cap A dengan jumlah 4 tiang Data Pile Cap

$$P_{ultimit} = 3136,8026 \text{ kN}$$

$$B = 2,85 \text{ m}$$

$$L = 2,85 \text{ m}$$

$$D \text{ tiang} = 0,8 \text{ m}$$

$$\text{Tebal} = 1,2 \text{ m}$$

$$\text{Selimut Beton} = 80 \text{ mm}$$

$$F_c = 30 \text{ MPa}$$

$$b_k = 0,8 \text{ m}$$

$$h_k = 0,8 \text{ m}$$

a. Tegangan geser pada pondasi

$$Q_u = \frac{P_u}{B \times L}$$

$$= \frac{3136,8026}{2,85 \times 2,85}$$

$$= 386,1868 \text{ kN/m}^2$$

b. Tebal efektif pile cap

$$d' = B - \text{sel. beton} - \frac{D_{\text{tiang}}}{2}$$

$$= 2,85 - 0,08 - \frac{0,8}{2}$$

$$= 2,37 \text{ m}$$

$$d_{\text{efektif}} = d - \frac{b}{2} - \frac{b_k}{2}$$

$$= 2,37 - \frac{2,85}{2} - \frac{0,8}{2}$$

$$= 0,545 \text{ m}$$

c. Daerah kritis untuk geser 1 arah

$$X = 0,5(B - b_k) - d_{\text{efektif}}$$

$$= 0,5(2,85 - 0,8) - 0,545$$

$$= 0,48 \text{ m}$$

d. Gaya geser pada penampang kritis

$$V_u = Q_u \times L \times x$$

$$= 386,1868 \times 2,85 \times 0,48$$

$$= 528,3035 \text{ kN}$$

$$\phi = 0,75$$

$$V_c = \frac{1}{6} \times (\sqrt{F_c} \times L \times 1000 \times d_{\text{efektif}})$$

$$= \frac{1}{6} \times (\sqrt{30} \times 2,85 \times 1000 \times 0,545)$$

$$= 1417,9167 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 0,75 \times 1417,9167$$

$$\phi V_c = 1063,4375 \text{ kN} > V_u = 528,3035$$

Maka pondasi aman terhadap geser 1 arah.

2.19.3 Kontrol Geser 2 Arah

Kontrol geser 1 arah, pile cap A dengan jumlah 4 tiang Data pile cap

Data pile cap

$$B = 2,85 \text{ m}$$

$$L = 2,85 \text{ m}$$

$$b_k = 0,8 \text{ m}$$

$$h_k = 0,8 \text{ m}$$

$$Q_u = 386,1868 \text{ kN/m}^2$$

$$d_{\text{defektif}} = 0,545 \text{ m}$$

a. Panjang penampang kritis

$$\begin{aligned} B1' &= (b_k) - 2 - \frac{D_{\text{defektif}}}{2} \\ &= (0,8) - 2 - \frac{0,545}{2} \\ &= 1,345 \end{aligned}$$

b. Lebar penampang kritis

$$\begin{aligned} B2' &= (b_k) - 2 - \frac{D_{\text{defektif}}}{2} \\ &= (0,8) - 2 - \frac{0,545}{2} \\ &= 1,345 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_u &= Q_u \times L \times B \\ &= 386,1868 \times 2,85 \times 2,85 \\ &= 3136,8026 \text{ kN} \end{aligned}$$

c. Nilai V_c diambil nilai terkecil dari

$$\begin{aligned} \beta_c &= \frac{B}{L} \\ &= \frac{2,85}{2,85} = 1 \end{aligned}$$

d. Keliling penampang krisis pile cap

$$\begin{aligned} b_o &= 2 \times (B1' + B2') \\ &= 2 \times (1,345 + 1,345) \\ &= 5,38 \text{ m} \end{aligned}$$

$\alpha_s = 40 \rightarrow$ Kolom dalam

e. Nilai V_c diambil yang terkecil

$$\begin{aligned} V_{c1} &= \left(0,17 \times 1 + \frac{2}{\beta_c} \times 1 \times \sqrt{F_c} \times b_o \times d_{efektif} \right) \times 1000 \\ &= \left(0,17 \times 1 + \frac{2}{1} \times 1 \times \sqrt{30} \times 5,38 \times 0,545 \right) \times 1000 \\ &= 32289,5462 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{c2} &= \left(0,083 \times \alpha_s + \frac{d_{efektif}}{b_o} + 2 \times 1 \times \sqrt{F_c} \times b_o \times d_{efektif} \right) \times 1000 \\ &= \left(0,083 \times 35 + \frac{0,545}{5,38} + 2 \times 1 \times \sqrt{30} \times 5,38 \times 0,545 \right) \times 1000 \\ &= 32455,8659 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{c3} &= (0,33 \times 1 \times \sqrt{F_c} \times b_o \times d_{efektif}) \times 1000 \\ &= (0,33 \times 1 \times \sqrt{30} \times 5,38 \times 0,545) \times 1000 \\ &= 5299,7251 \text{ kN} \end{aligned}$$

Dipakai $V_{c3} = 5299,7251 \text{ kN}$

f. Kuat geser beton

$$\begin{aligned} \phi &= 0,75 \\ \phi V_c &= V_c \times \phi \\ &= 5299,7251 \times 0,75 \\ &= 3974,7938 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\phi V_c = 3974,7938 \text{ kN} > V_u = 3136,8026 \text{ kN} ,$$

Maka pondasi aman terhadap geser 2 arah.

Tabel 2. 32 Rekapitulasi Kontrol Geser 1 Arah

Tipe	Pu	B	L	bk	hk	d	x	Qu	Vu	Vc	$V_u < \phi V_c$
	kN	m	m	m	m	m		kN	kN	kN	
PC A	3136.802	2.85	2.85	0.8	0.8	2.37	0.48	386.1868	528.3036	1417.9168	OK
PC B	1871.448	2.75	2.75	0.8	0.8	2.42	0.33	247.4643	224.5738	1619.2048	OK
PC C	1149.505	1.8	2.7	0.6	0.6	1.47	0.33	236.5238	210.7427	665.48291	OK

Tabel 2. 33 Rekapitulasi Kontrol Geser 2 Arah

Tipe	Pu	B1'	B2'	bk	hk	Vu	β_c	bo	Vc	$V_u < \phi V_c$
	kN	m	m	m	m	kN		kN	kN	
PC A	3136.8026	1.345	1.345	0.8	0.8	3136.8026	1	5.38	5299.7251	OK
PC B	1871.4484	1.445	1.445	0.8	0.8	1871.4484	1	5.78	6738.4827	OK
PC C	1149.5057	0.87	0.87	0.6	0.6	1149.5057	0.6666	3.48	1698.3124	OK

2.19.4 Penulangan Pile Cap

Data pile cap A 4 tiang

$$P_u = 3136,8026 \text{ kN}$$

$$L_x = 2,85 \text{ m}$$

$$L_y = 2,85 \text{ m}$$

$$A \text{ (Luas)} = 8,12 \text{ m}^2$$

$$D = 0,8 \text{ m}$$

$$H \text{ Pile Cap} = 1,2 \text{ m}$$

$$\text{Selimut beton} = 0,08 \text{ m}$$

$$BJ \text{ Tanah} = 1,51 \text{ kg/m}^3$$

$$BJ \text{ Beton} = 2,4 \text{ kg/m}^3$$

$$F_c = 30 \text{ MPa}$$

$$F_y = 420 \text{ MPa}$$

$$D_{tul} = 25 \text{ mm}$$

$$l_x = 0,8 \text{ mm}$$

$$l_y = 0,8 \text{ mm}$$

a. Tulangan lentur arah x

Momen lentur pada muka kolom

$$\begin{aligned} M_{ux} &= 2 \times 3136,8026 \times 0,6 - (14,82 - (\frac{1,4}{2})) - (20,32 \times (\frac{1,4}{2})) \\ &= 3735,81912 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d &= H \times 1000 - \frac{\text{Selimut beton}}{1000} - \frac{D_{tul}}{2} \\ &= 1,2 \times 1000 - \frac{0,08}{1000} - \frac{25}{2} \\ &= 1187,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\phi = 0,9$$

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{M_{ux}}{\phi \times l_y \times d^2} \\ &= \frac{3735,81912}{0,9 \times 2,85 \times 1187,50^2} \\ &= 0,001032 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= 0,085 \times \frac{0,085 \times f_c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\ &= 0,085 \times \frac{0,085 \times 30}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\ &= 0,003 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{\min} &= \frac{1,4}{f_y} \\ &= \frac{1,4}{420} \\ &= 0,003 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{\max} &= 0,75 \times \rho \\ &= 0,75 \times 0,003 \\ &= 0,00225 \end{aligned}$$

$$\rho_{\text{perlu}} = 0,85 \times \frac{f_c}{f_y} \times \left(\frac{1 - 2 \times R_n}{0,85 \times f_c} \right)$$

$$= 0,85 \times \frac{30}{420} \times \left(\frac{1 - 2 \times 0,00183}{0,85 \times 30} \right)$$

$$= 0,002$$

Cek rasio, ρ perlu $< \rho$ min, maka digunakan ρ min

$$As \text{ perlu } (Asx) = \rho_{min} \times b \times d$$

$$= 0,003 \times 2850 \times 1187,50$$

$$= 11281,2424$$

Direncanakan menggunakan D25

$$As \text{ tul} = \frac{1}{4} \times \pi \times Dtul^2$$

$$= \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2$$

$$= 490,87 \text{ mm}^2$$

$$n \text{ tul} = \frac{As \text{ perlu}}{As \text{ tul}}$$

$$= \frac{11281,2424}{490,87}$$

$$= 22,96 \approx 23$$

$$Spasi = \frac{b - (2 \times \text{selimut})}{n - 1}$$

$$= \frac{2850 - (2 \times 0,08)}{23 - 1}$$

$$= 122$$

Digunakan 23 D25-120

b. Tulangan lentur arah y

Momen lentur pada muka kolom

$$Pu = 3136,8026 \text{ kN}$$

$$Muy = 2 \times 3136,8026 \times 0,6 - \left(14,8176 - \frac{1,4}{2} \right) - \left(\frac{20,32 \times 1,4}{2} \right)$$

$$= 3735,81912 \text{ kN/m}$$

$$d = H \times 1000 - \frac{\text{selimut beton}}{1000} - \frac{Dtul}{2}$$

$$= 1,2 \times 1000 - \frac{0,08}{1000} - \frac{25}{2}$$

$$= 1187,500 \text{ mm}$$

$$\phi = 0,9$$

$$\begin{aligned}
 R_n &= \frac{M_{uy}}{\phi \times L_y \times d^2} \\
 &= \frac{11591,9504}{0,9 \times 5 \times 1187,5^2} \\
 &= 0,001032
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho &= 0,085 \times \frac{0,085 \times f_c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \\
 &= 0,085 \times \frac{0,085 \times 30}{420} \times \frac{600}{600 + 420} \\
 &= 0,03
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\min} &= \frac{1,4}{f_y} \\
 &= \frac{1,4}{420} \\
 &= 0,003
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\max} &= 0,75 \times \rho \\
 &= 0,75 \times 0,030 \\
 &= 0,023
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{perlu}} &= 0,85 \times \frac{f_c}{f_y} \times \frac{1 - 2 \times R_n}{0,85 \times f_c} \\
 &= 0,85 \times \frac{30}{420} \times \frac{1 - 2 \times 0,001}{0,85 \times 30} \\
 &= 0,002
 \end{aligned}$$

Cek rasio, $\rho_{\text{perlu}} < \rho_{\min}$, maka digunakan $\rho_{\min}$

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ perlu}} (A_{sy}) &= \rho_{\min} \times b \times d \\
 &= 0,003 \times 2850 \times 1187,5 \\
 &= 11281,2424 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Direncanakan menggunakan D25

$$\begin{aligned}
 A_{s \text{ tul}} &= \frac{1}{4} \times \pi \times D_{\text{tul}}^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\
 &= 490,87 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 n_{\text{tul}} &= \frac{A_{s \text{ perlu}}}{A_{s \text{ tul}}} \\
 &= \frac{11281,2424}{490,87} \\
 &= 22,9 \approx 23
 \end{aligned}$$

$$\text{Spasi} = \frac{b - (2 \times \text{selimut})}{n - 1}$$

$$= \frac{2850 - (2 \times 0,08)}{23 - 1}$$

$$= 122$$

Digunakan 23D25-120

c. Tulangan susut

$$\rho_{\min} = 0,003$$

$$A_s \text{ perlu } A_{sx} = 11281,2424$$

$$A_s \text{ perlu } A_{sy} = 11281,2424$$

Direncanakan menggunakan D22

$$\begin{aligned} \text{Spasi (sx)} &= \frac{1}{4} \times \pi \times D_{tul}^2 \times \frac{b}{A_{sx}} \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 22^2 \times \frac{2,85}{11281,2424} \\ &= 96,0335 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Spasi (sy)} &= \frac{1}{4} \times \pi \times D_{tul}^2 \times \frac{b}{A_{sy}} \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 22^2 \times \frac{2,85}{11281,2424} \\ &= 96,0335 \text{ mm} \end{aligned}$$

d. Kontrol panjang penyaluran tulangan

$$\begin{aligned} l_d &= \left(\frac{12 \times f_y \times 1 \times \beta \times 1}{25 \times \sqrt{f_c}} \right) d_b \\ &= \left(\frac{12 \times 420 \times 1 \times 1 \times 1}{25 \times \sqrt{30}} \right) 25 \\ &= 920,1739 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{d1} &= \frac{2850}{2} - \frac{800}{2} - 80 \\ &= 945 \end{aligned}$$

$$l_d < l_{d1} = \text{OK}$$

e. Kontrol transfer beban kolom ke pondasi

$$\text{Momen} = 839,742$$

Kuat tumpu pada dasar kolom

$$\begin{aligned} N_1 &= \phi(0,85 \times f_c' \times A_1) \\ &= 0,85(0,85 \times 30 \times 800 \times 800) \\ &= 13872000 \end{aligned}$$

Dikarenakan $N_1 \geq R_{ultimit}$ maka dinyatakan aman. Kuat tumpu pada sisi atas pondasi,

$$\begin{aligned} A2 &= 285 \times 285 \\ &= 81225 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A1 &= 800 \times 800 \\ &= 640000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{A2}}{A1} &= \frac{\sqrt{81225}}{640000} \\ &= 3,56 \end{aligned}$$

Karena $\frac{\sqrt{A2}}{A1} \geq 2$, Dinyatakan tidak aman, maka digunakan N2

$$\begin{aligned} N2 &= 2 \times N1 \\ &= 2 \times 13872000 \\ &= 27744000 \end{aligned}$$

Karena $N2 \geq R_{ultimit}$ maka dinyatakan aman.

f. Panjang penyaluran tulangan stek

Panjang penyaluran tulangan tekan, diambil dari nilai terbesar antara:

$$\begin{aligned} ldc &= \frac{0,24 f_y}{\lambda \sqrt{f_c'}} \\ &= \frac{0,24 \times 420}{1 \sqrt{30}} \\ &= 460,0869 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ldc &= 0,043 \times f_y \times d_b \\ &= 0,043 \times 420 \times 25 \end{aligned}$$

$$ldc = 451,5 \text{ mm}$$

Tebal plat = 1200 mm

$ldc < \text{Tebal plat}$, maka tulangan dapat ditanam sepenuhnya tanpa melebihi batas tebal plat.

Hasil perhitungan rekapitulasi pada setiap tipe pile cap dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 2. 34 Rekapitulasi Penulangan Pile Cap

Tipe	Tulangan Lentur		Tulangan Susut	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
PC A	23D25-120	23D25-120	D22-90	D22-90
PC B	23D25-100	23D25-100	D22-90	D22-90
PC C	15D25-100	22D25-120	D22-90	D22-90