

BAB IV

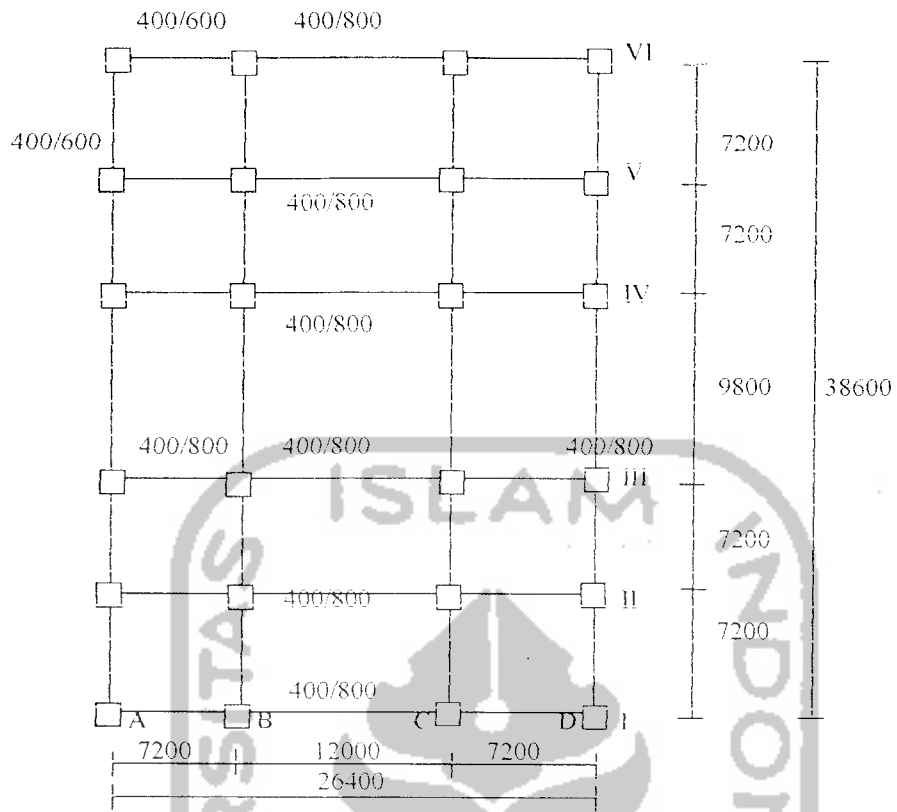
ANALISIS DAN DESAIN

4.1 Umum

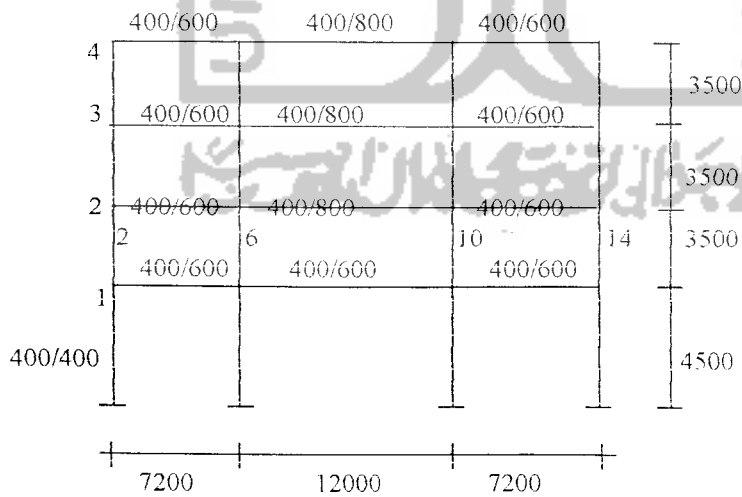
Persyaratan umum portal beton prategang yang akan dianalisis meliputi jenis dan lokasi bangunan, tipe pembebanan, mutu atau kualitas bahan struktur yang diperlukan serta denah dan dimensi elemen utama struktur portal. Jenis bangunan yang akan dianalisis adalah bangunan perkantoran (gedung registrasi terpadu UII) dengan luas $26,4 \times 38,6 \text{ m}^2$. Lokasi bangunan terletak di wilayah gempa 3 pada peta wilayah gempa untuk Indonesia dan terletak diatas tanah lunak. Dengan asumsi di atas, goyangan yang diperhitungkan adalah goyangan akibat beban lateral gempa.

Beban yang bekerja meliputi beban hidup, beban mati, dan beban gempa. Beban hidup dan beban mati struktur diambil menurut ketentuan Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983 sedangkan beban gempa yang bekerja diambil sesuai dengan Peraturan Tahan Gempa Untuk Gedung Indonesia dan dihitung dengan cara statis ekuivalen.

Struktur yang akan dianalisis adalah kolom beton prategang pada struktur 4 lantai dengan tinjauan pada potongan II tingkat 2 kolom 6 yang memikul momen uniaksial. Mutu bahan yang dipakai yaitu mutu beton $f'_c = 41 \text{ Mpa}$ dan mutu baja tulangan (tendon) $f_{ps} = 1655 \text{ Mpa}$. Tebal plat $0,12 \text{ m}$ dan dimensi kolom $400 \times 400 \text{ mm}$ dengan tinggi $l_u = 3500 \text{ mm}$. Untuk denah dan potongan melintang ditunjukkan gambar 4.1 dan gambar 4.2 berikut ini:



Gambar 4.1 Denah Lantai 1 sampai dengan 4 (tipikal)



Gambar 4.2 Portal arah II

Perencanaan struktur diarahkan pada dimensi kolom beton prategang untuk kondisi sebagai berikut:

1. Hanya meninjau gaya gravitasi, dengan menganggap goyangan lateral akibat angin diabaikan.
2. Andaikan ada goyangan akibat gaya gempa yang menyebabkan timbulnya gaya dan momen rencana.

Untuk prosedur analisis dapat dilihat pada lampiran 1. Perencanaan menggunakan tendon diameter 12,7 mm grade 270 K (lampiran 2) dengan spesifikasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}f'_c &= 41 \text{ Mpa} \\f_{pu} &= 1.862 \text{ Mpa} \\f_{ps} &= 1.655 \text{ Mpa} \\f_{pe} &= 1.034 \text{ Mpa} \\E_{ps} &= 200 \cdot 10^3 \text{ Mpa} \\d' &= 50 \text{ mm} \\f_y \text{ (sengkang)} &= 400 \text{ Mpa} \\f_{py} &= 1793 \text{ Mpa}\end{aligned}$$



4.2 Gaya-gaya yang Bekerja pada Struktur

4.2.1 Perhitungan gaya geser dasar akibat gempa.

1. Berat bangunan total (W_t)

a. Berat lantai 4 (atap)

1) Beban mati:

a) plat	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 0,12 \cdot 24$	$= 2934,835 \text{ kN}$
b) balok (400/600)	$= ((6 \cdot (7,2+7,2)) + (4 \cdot (7,2,4))) \cdot 0,4 \cdot 0,48 \cdot 24$	$= 928,973 \text{ kN}$
c) balok (400/800)	$= (6 \cdot 12 + 4 \cdot 9,8) \cdot 0,4 \cdot 0,68 \cdot 24$	$= 725,914 \text{ kN}$
d) kolom	$= 24 \cdot 1,75 \cdot 0,4 \cdot 0,4 \cdot 24$	$= 161,280 \text{ kN}$
e) dinding	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 1,75 \cdot 2,5$	$= 4458,300 \text{ kN}$
f) plafond	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 0,18$	$= 183,427 \text{ kN}$
		<hr/>
		$W_m = 9392,729 \text{ kN}$

2) Beban hidup

a) q sendiri atap = 1 kN/m^2

Menggunakan koefisien reduksi = $0,3$

$$W_{\text{atap}} = 0,3 \cdot (26,4 \cdot 38,6 \cdot 1) = 305,712 \text{ kN}$$

b) akibat air

$$q_{\text{air}} = 0,2 \text{ kN/m}^2$$

$$W_{\text{air}} = 0,3 \cdot 0,2 \cdot 26,4 \cdot 38,6 = 61,142 \text{ kN}$$

$$\text{Jadi beban hidup } W_h = 305,712 + 61,142 = 366,854 \text{ kN}$$

$$\text{Beban total } W_4 = W_m + W_h = 9392,729 + 366,854 = 9759,583 \text{ kN}$$

b. Berat lantai 3

1) Beban mati:

a) plat	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 0,12 \cdot 24$	$= 2934,835 \text{ kN}$
b) balok (400/600)	$= ((6 \cdot (7,2+7,2)) + (4 \cdot (7,2 \cdot 4))) \cdot 0,4 \cdot 0,48 \cdot 24$	$= 928,973 \text{ kN}$
c) balok (400/800)	$= (6 \cdot 12 + 4 \cdot 9,8) \cdot 0,4 \cdot 0,68 \cdot 24$	$= 725,914 \text{ kN}$
d) kolom	$= 24 \cdot 3,5 \cdot 0,4 \cdot 0,4 \cdot 24$	$= 322,560 \text{ kN}$
e) dinding	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 3,5 \cdot 2,5$	$= 8916,600 \text{ kN}$
f) plafond	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 0,18$	$= 183,427 \text{ kN}$
g) spasi	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 0,21 \cdot 0,02$	$= 4,280 \text{ kN}$
h) tegel	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 0,24 \cdot 0,02$	$= 4,891 \text{ kN}$
i) pasir	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 16 \cdot 0,05$	$= 815,232 \text{ kN}$

$$W_m = 14836,712 \text{ kN}$$

2) Beban hidup

$$q \text{ sendiri lantai} = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Menggunakan koefisien reduksi = 0,3

$$W \text{ lantai} = 0,3 \cdot (26,4 \cdot 38,6 \cdot 2,5) = 764,280 \text{ kN}$$

Jadi beban hidup $W_h = 764,280 \text{ kN}$

$$\text{Beban total } W_3 = W_m + W_h = 14836,712 + 764,280 = 15600,992 \text{ kN}$$

c. Berat lantai 1

1). Beban mati:

a) plat	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 0,12 \cdot 24$	$= 2934,835 \text{ kN}$
b) balok (400/600)	$= ((6 \cdot (7,2+7,2)) + (4 \cdot (7,2 \cdot 4))) \cdot 0,4 \cdot 0,48 \cdot 24$	$= 928,973 \text{ kN}$
c) balok (400/800)	$= (6 \cdot 12 + 4 \cdot 9,8) \cdot 0,4 \cdot 0,68 \cdot 24$	$= 725,914 \text{ kN}$
d) kolom	$= 24 \cdot 4 \cdot 0,4 \cdot 0,4 \cdot 24$	$= 368,640 \text{ kN}$
e) dinding	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 4 \cdot 2,5$	$= 10190,400 \text{ kN}$
f) plafond	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 0,18$	$= 183,427 \text{ kN}$
g) spasi	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 0,21 \cdot 0,02$	$= 4,280 \text{ kN}$
h) tegel	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 0,24 \cdot 0,02$	$= 4,891 \text{ kN}$
i) pasir	$= 26,4 \cdot 38,6 \cdot 16 \cdot 0,05$	$= 815,232 \text{ kN}$

$$W_m = 16156,592 \text{ kN}$$

3) Beban hidup

$$q \text{ sendiri lantai} = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Menggunakan koefisien reduksi = 0,3

$$W \text{ lantai} = 0,3 \cdot (26,4 \cdot 38,6 \cdot 2,5) = 764,280 \text{ kN}$$

Jadi beban hidup $W_h = 764,280 \text{ kN}$

$$\text{Beban total } W_l = W_m + W_h = 16156,592 + 764,280 = 16920,872 \text{ kN}$$

d. Berat lantai 2 sama dengan berat lantai 3

$$\begin{aligned} \text{Berat total} &= W_1 = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \\ &= 9759,583 + 2(15600,992) + 16920,872 = 57882,439 \text{ kN} \end{aligned}$$

2. Waktu getar bangunan (T)

Dengan rumus empiris:

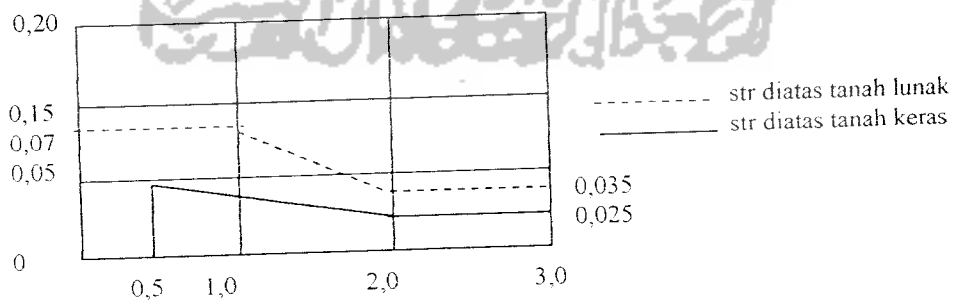
$$T = 0,06 H^{3/4}$$

$$H = \text{tinggi bangunan total} = (3,3,5) + 4,5 = 15 \text{ m}$$

$$T = 0,06 \cdot 15^{3/4} = 0,457 \text{ detik}$$

3. Koefisien gempa dasar (C)

Dari gambar 4.3 diperoleh koefisien gempa dasar $C = 0,07$ untuk $T = 0,457$ detik, wilayah 3 dan jenis tanah lunak.



Gambar 4.3 Koefisien gempa dasar C

4. Faktor keutamaan I dan faktor jenis struktur K

Berdasarkan Pedoman Peraturan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung 1987 diperoleh faktor keutamaan $I = 1,0$ dan faktor jenis struktur $K = 1,4$ untuk bangunan kantor yang menggunakan struktur beton prategang dengan daktilitas penuh.

5. Gaya geser horisontal akibat gempa

$$V = C \cdot I \cdot K \cdot W_t$$

$$= 0,07 \cdot 1,0 \cdot 1,4 \cdot 57882,439 = 5672,479 \text{ kN}$$

6. Distribusi gaya geser horisontal total akibat gempa sepanjang tinggi gedung

$$F_i = \frac{W_i \cdot h_i}{\sum W_i \cdot h_i} \cdot V = \frac{146393,745}{526757,013} \cdot 5672,479 = 1576,468 \text{ kN}$$

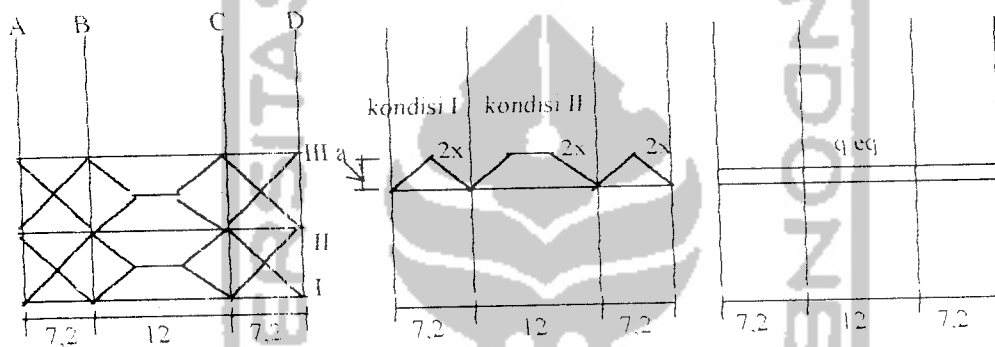
Tabel 4.1 menunjukkan gaya dasar horisontal total akibat gempa sepanjang tinggi gedung arah II tiap portal.

Tabel 4.1 Distribusi gaya geser akibat gempa dalam arah as 2

Tingkat	h_i (m)	W_i (kN)	$W_i \cdot h_i$ (kNm)	$F_{i,y}$ Total kN	$\frac{1}{6} F_i$
4	15	9759,583	146393,745	1576,468	262,745
3	11,5	15600,992	179411,408	1932,025	322,004
2	8	15600,992	124807,936	1344,017	244,003
1	4,5	16920,872	76143,924	819,970	136,662
			$\Sigma=526757,013$	$\Sigma=5672,480$	$\Sigma=965,414$

4.2.2 Perhitungan beban akibat gaya gravitasi

Gambar 4.4 dibawah ini menunjukkan perhitungan beban gravitasi merata ekuivalen untuk portal arah As II yang digolongkan menjadi 2 jenis pembebanan yaitu pembebanan segitiga dan trapesium. Untuk jenis pembebanan trapesium secara mendetail tercantum pada gambar 4.5



Gambar 4.4 Perhitungan beban merata ekuivalen portal II

1. Kondisi I

$$q_{eq} = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot a$$

$$a = \frac{1}{2} \cdot q \cdot l = \frac{1}{2} \cdot q \cdot 7,2 = 3,6q$$

$$q_{eq} = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot 3,6q = 4,8q \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

a. Beban gravitasi pada balok lantai lantai atap

1) Beban mati untuk tiap m²

a) plat = $1 \cdot 0,12 \cdot 24 \cdot 4,8 = 13,824 \text{ kN/m}^2$

b) balok(400/600) = $0,4 \cdot 0,48 \cdot 24 = 4,608 \text{ kN/m}^2$

c) plafond = $1 \cdot 0,18 \cdot 4,8 = 0,864 \text{ kN/m}^2$

$$W_m = 19,552 \text{ kN/m}^2$$



2) Beban hidup untuk tiap m²

a) $q_h \text{ atap} = 1 \text{ kN/m}^2$

koefisien reduksi = 0,6

Beban hidup akibat atap $q = 1 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 4,8 = 2.880 \text{ kN/m}^2$

b) akibat air

$q \text{ air} = 0,2 \text{ kN/m}^2$

$W \text{ air} = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 4,8 = 0,576 \text{ kN/m}^2$

Jadi beban hidup $W_h = 2,880 + 0,576 = 3,456 \text{ kN/m}^2$

b. Berat gravitasi pada balok lantai 2 s/d lantai 3

1) Beban mati untuk tiap m²

a) plat = $1 \cdot 0,12 \cdot 24 \cdot 4,8 = 13,824 \text{ kN/m}^2$

b) balok(400/600) = $0,4 \cdot 0,48 \cdot 24 = 4,608 \text{ kN/m}^2$

c) dinding = $3,5 \cdot 2,5 = 8,750 \text{ kN/m}^2$

d) plafond = $1 \cdot 0,18 \cdot 4,8 = 0,864 \text{ kN/m}^2$

e) spasi = $1 \cdot 0,21 \cdot 4,8 \cdot 0,02 = 0,020 \text{ kN/m}^2$

f) tegel = $1 \cdot 0,24 \cdot 4,8 \cdot 0,02 = 0,023 \text{ kN/m}^2$

g) pasir = $1 \cdot 16 \cdot 4,8 \cdot 0,05 = 3,840 \text{ kN/m}^2$

$W_m = 31,929 \text{ kN/m}^2$

2) Beban hidup untuk tiap m²

$q_h \text{ atap} = 2,5 \text{ kN/m}^2$

koefisien reduksi = 0,6

Beban hidup ekuivalen $q_{eq} = 2,5 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 4,8 = 7,20 \text{ kN/m}^2$

c. Berat gravitasi pada balok lantai I

1) Beban mati untuk tiap m'

- a) plat $= 1 \cdot 0,12 \cdot 24 \cdot 4,8 = 13,824 \text{ kN/m'}$
- b) balok(400/600) $= 0,4 \cdot 0,48 \cdot 24 = 4,608 \text{ kN/m'}$
- c) dinding $= (\frac{1}{2} \cdot 3,5 + \frac{1}{2} \cdot 4,5) \cdot 2,5 = 10,000 \text{ kN/m'}$
- d) plafond $= 1 \cdot 0,18 \cdot 4,8 = 0,864 \text{ kN/m'}$
- e) spasi $= 1 \cdot 0,21 \cdot 4,8 \cdot 0,02 = 0,020 \text{ kN/m'}$
- f) tegel $= 1 \cdot 0,24 \cdot 4,8 \cdot 0,02 = 0,024 \text{ kN/m'}$
- g) pasir $= 1 \cdot 16 \cdot 4,8 \cdot 0,05 = 3,840 \text{ kN/m'}$

$$W_m = 33,179 \text{ kN/m'}$$

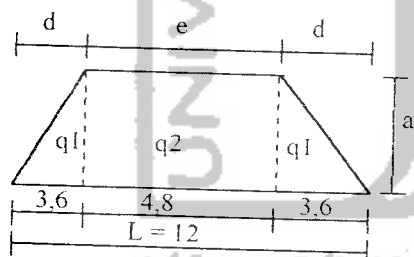
2) Beban hidup untuk tiap m'

$$q_h \text{ atap} = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{koefisien reduksi} = 0,6$$

$$\text{Beban hidup ekuivalen } q_{eq} = 2,5 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 4,8 = 7,20 \text{ kN/m'}$$

2. Kondisi II



Gambar 4.5 Jenis pembebanan trapesium

$$q_1 = \frac{1}{2} \cdot 3,6 \cdot 2 \cdot 3,6 \cdot q = 12,96 q$$

$$q_2 = 4,8 \cdot 2 \cdot 3,6 \cdot q = 34,56 q$$

$$R = 12,96q + \frac{1}{2} \cdot 34,56 q = 30,24 q$$

Mmax yang terjadi ditengah bentang

$$M = \frac{1}{2} \cdot L \cdot R - q_1 \left(\frac{1}{3} \cdot d + \frac{1}{2} \cdot e \right) - q_2 / 2 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot e \right)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \cdot 12 \cdot 30,24 \cdot q - 12,96 q (1,2 + 2,4) - 17,28 \cdot q \cdot 1,2 \\
&= 181,44 q - 46,656 q - 20,736 q = 114,048 q \\
q_{eq} &= \frac{8 \cdot M}{L^2} = \frac{8 \cdot 114,048}{12^2} = 6,336 q
\end{aligned}$$

a. Beban gravitasi pada balok lantai atap

1) Beban mati untuk tiap m²

a) plat = $1 \cdot 0,12 \cdot 24 \cdot 6,336 = 18,248 \text{ kN/m}^2$

a) balok(600/800) = $0,4 \cdot 0,68 \cdot 24 = 6,528 \text{ kN/m}^2$

b) plafond = $1 \cdot 0,18 \cdot 6,336 = 1,141 \text{ kN/m}^2$

$$W_m = 25,917 \text{ kN/m}^2$$

2) Beban hidup untuk tiap m²

a) qh atap = 1 kN/m^2

koefisien reduksi = 0,6

Beban hidup akibat atap q = $1 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 6,336 = 3,802 \text{ kN/m}^2$

b) akibat air

q air = $0,2 \text{ kN/m}^2$

W air = $0,2 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 6,336 = 0,760 \text{ kN/m}^2$

Jadi beban hidup $W_h = 3,802 + 0,760 = 4,562 \text{ kN/m}^2$

b. Beban gravitasi pada balok lantai 2 s/d lantai 3

1) Beban mati untuk tiap m²

a) plat = $1 \cdot 0,12 \cdot 24 \cdot 6,336 = 18,248 \text{ kN/m}^2$

b) balok(400/800) = $0,4 \cdot 0,68 \cdot 24 = 6,528 \text{ kN/m}^2$

c) dinding = $3,5 \cdot 2,5 = 8,750 \text{ kN/m}^2$

d) plafond = $1 \cdot 0,18 \cdot 6,336 = 1,141 \text{ kN/m}^2$

e) spasi = $1 \cdot 0,21 \cdot 6,336 \cdot 0,02 = 0,026 \text{ kN/m}^2$

f) tegel = $1 \cdot 0,24 \cdot 6,336 \cdot 0,02 = 0,030 \text{ kN/m}^2$

g) pasir = $1 \cdot 16 \cdot 6,336 \cdot 0,05 = 5,069 \text{ kN/m}^2$

$$W_m = 39,792 \text{ kN/m}^2$$

2) Beban hidup untuk tiap m²

$$q_h \text{ atap} = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{koefisien reduksi} = 0,6$$

$$\text{Beban hidup ekuivalen } q_{eq} = 2,5 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 6,336 = 9,504 \text{ kN/m}^2$$

c. Beban gravitasi pada balok lantai I

1) Beban mati untuk tiap m²

$$\text{a) plat} = 1 \cdot 0,12 \cdot 24 \cdot 6,336 = 18,248 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{b) balok}(400/800) = 0,4 \cdot 0,68 \cdot 24 = 6,528 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{c) dinding} = (\frac{1}{2} \cdot 3,5 + \frac{1}{2} \cdot 4,5) \cdot 2,5 = 10,000 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{d) plafond} = 1 \cdot 0,18 \cdot 6,336 = 1,141 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{e) spasi} = 1 \cdot 0,21 \cdot 6,336 \cdot 0,02 = 0,026 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{f) tegel} = 1 \cdot 0,24 \cdot 6,336 \cdot 0,02 = 0,030 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{g) pasir} = 1 \cdot 16 \cdot 6,336 \cdot 0,05 = 5,069 \text{ kN/m}^2$$

$$W_m = 41,042 \text{ kN/m}^2$$

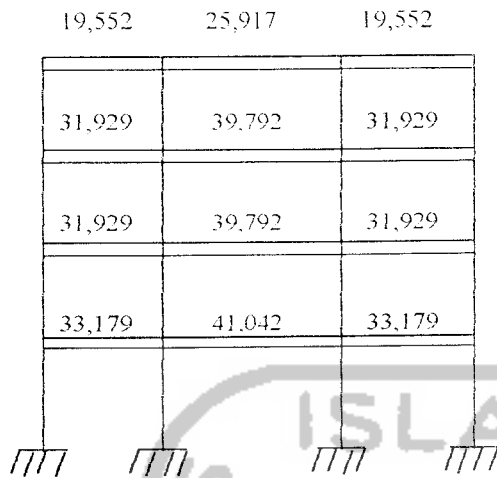
3) Beban hidup untuk tiap m²

$$q_h \text{ atap} = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

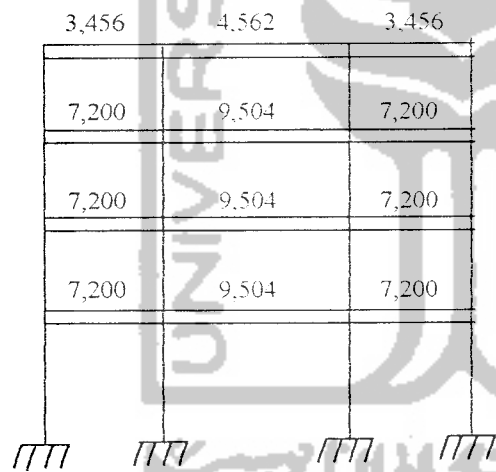
$$\text{koefisien reduksi} = 0,6$$

$$\text{Beban hidup ekuivalen } q_{eq} = 2,5 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 6,336 = 9,504 \text{ kN/m}^2$$

Setelah melalui proses hitungan diatas, maka didapatkan beban gravitasi berupa beban merata yang diakibatkan beban mati dan hidup ekuivalen yang terletak pada portal II dan ditunjukkan oleh Gambar 4.6 dan gambar 4.7 berikut ini:



Gambar 4.6 Beban mati ekuivalen portal II (kN/m²)



Gambar 4.7 Beban hidup ekuivalen portal II (kN/m²)

4.3 Gaya Aksial dan Momen pada Kolom

Dengan diketahuinya beban hidup, mati, dan gempa pada perhitungan sebelumnya, maka gaya aksial dan momen dapat dihitung dengan menggunakan Sap 2000 sesuai yang tertera pada lampiran 3 serta hasilnya disajikan pada tabel 4.2 sampai dengan tabel 4.5 berikut ini :

Tabel 4.2 Gaya aksial dan momen pada kolom 2

	Beban Gravitasi		Beban Gempa (E)
	Beban Mati (D)	Beban Hidup (L)	
Gaya Aksial (kN)	249,391	53,2042	201,688
Momen (kNm)			
- Ujung Atas Kolom	42,037	9,095	280,40
- Ujung Bawah Kolom	43,337	9,143	219,646

Tabel 4.3 Gaya aksial dan momen pada kolom 6

	Beban Gravitasi		Beban Gempa (E)	1,2D+1,6L	1,05 (D+L+E)
	Beban Mati (D)	Beban Hidup (L)			
Gaya Aksial (kN)	984,167	216,779	68,755	1527,85	1333,19
Momen (kNm)					
-Ujung Atas Kolom	101,006	24,435	486,39	160,302	379
-Ujung Bawah Kolom	107,14	25,707	467,716	169,70	351,610

Tabel 4.4 Gaya aksial dan momen pada kolom 10

	Beban Gravitasi		Beban Gempa (E)
	Beban Mati (D)	Beban Hidup (L)	
Gaya Aksial (kN)	984,167	216,779	68,250
Momen (kNm)			
- Ujung Atas Kolom	101,01	24,434	484,67
- Ujung Bawah Kolom	107,141	25,708	465,995

Tabel 4.5 Gaya aksial dan momen pada kolom 14

	Beban Gravitasi		Beban Gempa (E)
	Beban Mati (D)	Beban Hidup (L)	
Gaya Aksial (kN)	249,391	53,204	201,183
Momen (kNm)			
- Ujung Atas Kolom	42,037	9,095	278,17
- Ujung Bawah Kolom	43,337	9,143	217,646

4.4 Desain Kolom Prategang

Dari gambar 4.10 tegangan-regangan baja prategang diameter 12,7 mm strand

kawat prategang 270 K pada nilai $f_{py} = 1793$ MPa didapat $\epsilon_{py} = 0,0012$, $\epsilon_{pe} = \frac{f_{pe}}{E_{ps}} =$

$$\frac{1034}{200.000} = 0,0052.$$

4.4.1. Beban gravitasi

Langkah 1: Cek goyangan dan eksentrisitas minimum

Karena rangka tersebut dianggap tidak mempunyai goyangan, maka seluruh momen M_2 diambil sebagai M_{2ns} dan faktor pembesaran δ_s sama dengan nol. Dengan mengambil dimensi penampang kolom 400 mm x 400 mm

$$e = \frac{M_{2ns}}{P_u} = \frac{169,70}{1527,85} = 111 \text{ mm}$$

$$e \text{ min yang diizinkan} = 15 + 0,03 h = 15 + 0,03 \times 400 \\ = 27 \text{ mm} < 111 \text{ mm}$$

Digunakan $M_{2ns} = 169,70$ KN-m yang terbesar dari momen M_1 dan M_2 pada kolom.

Langkah 2: Nilai eksentrisitas yang digunakan untuk kolom pendek ekuivalen

Dihitung kekakuan kolom

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \cdot \sqrt{41} = 30095 \text{ MPa}$$

$$I_g = \frac{1}{12} bh^3 = \frac{400^4}{12} = 2.133.333.333 \text{ mm}^4$$

$$\beta_d = \frac{1,2 \cdot M_D}{1,2 \cdot M_D + 1,6 \cdot M_L} = \frac{1,2 \cdot 107,14}{1,2 \cdot 107,14 + 1,6 \cdot 25,707} = 0,758$$

$$EI = \frac{E_c I_g / 2,5}{1 + \beta_d} = \frac{30095 \cdot 2.133.333.333}{2,5} \cdot \frac{1}{1 + 0,758}$$

$$= 1,461 \cdot 10^{13} \text{ Nmm}^2 = 1,461 \cdot 10^{10} \text{ kNmm}^2$$

Dihitung momen inersia di kanan kiri kolom. Dengan menganggap momen inersia penampang retak balok sebesar setengah dari momen inersia penampang bruto, maka:

1. Momen inersia balok dikanan kiri ujung atas kolom yaitu:

$$I_{cr} \approx \frac{I_{gb}}{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left[\frac{400 \cdot 600^3}{12} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{400 \cdot 800^3}{12} \right] \right] = 6.066.666.667 \text{ mm}^4$$

2. Momen inersia balok dikanan kiri ujung bawah kolom yaitu:

$$I_{cr} \approx \frac{I_{gb}}{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left[\frac{400 \cdot 600^3}{12} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{400 \cdot 800^3}{12} \right] \right] = 6.066.666.667 \text{ mm}^4$$

Sehingga faktor faktor kekangan ujung ψ yang terjadi pada kolom adalah:

$$\begin{aligned} \psi_A \text{ (ujung atas kolom)} &= \frac{\sum EI / I_u \text{ kolom-kolom}}{\sum E_c I_{cr} / I_u \text{ balok-balok}} \\ &= \frac{2 (1,461 \cdot 10^{13} / 3500)}{(30.095 \cdot 6066666667 / 7200) + (30.095 \cdot 6066666667 / 12000)} \\ &= 0,2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_B \text{ (ujung bawah kolom)} &= \frac{\sum EI / I_u \text{ kolom-kolom}}{\sum E_c I_{cr} / I_u \text{ balok-balok}} \\ &= \frac{2 (1,461 \cdot 10^{13} / 3500)}{(30.095 \cdot 6066666667 / 7200) + (30.095 \cdot 6066666667 / 12000)} \\ &= 0,2 \end{aligned}$$

Dari grafik Jackson dan Moreland (gambar 3.8b) untuk $\psi_A = 0,2$ dan $\psi_B = 0,2$, maka diperoleh $k=1,05$ sehingga:

$$\text{Angka kelangsingan } \frac{kl_u}{r} = \frac{1,05 \cdot 3500}{0,3 \cdot 400} = 31 > 22.$$

Karena $22 < 31 < 100$, maka digunakan metode pembesaran momen

$$(kl_u)^2 = (1,05 \cdot 3500)^2 = 13.505.625 \text{ mm}^2$$

Dengan demikian,

$$P_c = \text{beban tekuk Euler} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{(k \cdot l_u)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 1,461 \cdot 10^{13} \text{ Nmm}}{13.505.625 \text{ mm}^2}$$
$$= 10677 \text{ kN}$$

$C_m = 1,0$ untuk kolom tanpa pengaku lateral

$$\text{Faktor pembesar momen } \delta_{ns} = \frac{C_m}{1 - P_u / 0,75 P_c} = \frac{1}{1 - \frac{1527,85608}{0,75 \cdot 10677}} = 1,24$$

$$\text{Momen desain } M_c = \delta_{ns} \cdot M_{2ns} = 1,24 \cdot 167,70$$
$$= 210,428 \text{ kN-m}$$

Karena struktur menahan aksial tekan dengan sengkang ikat maka faktor reduksi $\phi = 0,7$ sehingga

$$P_n \text{ yang diperlukan} = \frac{P_u}{\phi} = \frac{1527,85}{0,7} = 2182,643 \text{ kN}$$

$$M_n \text{ yang diperlukan} = \frac{210,428}{0,7} = 300,611 \text{ kN-m}$$

$$\text{Eksentrisitas} = \frac{300,611 \text{ kN} \cdot \text{m}}{2182,643 \text{ kN}} = 138 \text{ mm}$$

Langkah 3: Desain kolom pendek ekuivalen

Dengan demikian beban aksial nominal minimum dan momen uniaksial nominal minimum adalah $P_n = 2182,643 \text{ kN}$ dan $M_n = 300,611 \text{ kN-m}$.

Analisis kolom bujur sangkar 400mm x 400mm menggunakan lima strand tujuh kawat diameter 12,7 mm pada masing-masing sisi sejajar sumbu netral. Untuk pemilihan diameter tendon dan luasan yang terjadi dapat dilihat pada lampiran 2.

$$A_{ps} = A'_{ps} = 5 \cdot 98,7 = 493,5 \text{ mm}^2$$

Kondisi seimbang

$$d = h - 50 = 400 - 50 = 350 \text{ mm}$$

Untuk kondisi *balance*, nilai c diambil = 220 mm yang didapat pada perhitungan grafik P_n - M_n

$$\beta = 0,85 - 0,008(f'_c - 30)$$

$$= 0,85 - 0,008(41 - 30) = 0,762$$

$$a_b = \beta_1 \cdot c_b$$

$$= 0,762 \cdot 220 = 167,64 \text{ mm}$$

$$C_{en} = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a$$

$$= 0,85 \cdot 41 \cdot 400 \cdot 167,64$$

$$= 2335902 \text{ N} = 2336,902 \text{ kN}$$

$$T'_{sn} = A'_{ps} \cdot E_{ps} \cdot \left[\epsilon_{pe} - \epsilon_{cu} \left(\frac{c - d'}{c} \right) + \epsilon_{cc} \right]$$

$$= 493,5 \cdot 200.000 \cdot \left[0,0052 - 0,003 \left(\frac{220 - 2 \cdot 25}{220} \right) + 0,0002 \right]$$

$$= 304176 \text{ N} = 304,176 \text{ kN}$$

$$T_{sn} = A_{ps} \cdot E_{ps} \cdot \left[\epsilon_{pe} + \epsilon_{cu} \left(\frac{d - c}{c} \right) + \epsilon_{cc} \right]$$

$$= 493,5 \cdot 200.000 \cdot \left[0,0052 + 0,003 \left(\frac{350 - 220}{220} \right) + 0,0002 \right]$$

$$= 707948 \text{ N} = 707,948 \text{ kN}$$

$$P_{nb} = C_{en} - T'_{sn} - T_{sn}$$

$$= 2336,902 - 304,176 - 707,948$$

$$= 1324,778 \text{ kN} < P_n \text{ yang diperlukan} = 2182,643 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$M_{ub} = C_{cn} \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 2336902 \left(\frac{400}{2} - \frac{167,64}{2} \right)$$

$$= 271501274,4 \text{ N-mm} = 271,501 \text{ kN-m}$$

$$e_b = \frac{M_{ub}}{P_{ub}} = \frac{332,067 \text{ kN-m}}{1324,778 \text{ kN}} = 251 \text{ mm} > e_{nyata} = 138 \text{ mm}, \text{ tidak OK}$$

Beban kolom prategang mempunyai eksentrisitas kecil dan awal dari kegagalan harus ditekan.

Setelah melalui proses *trial and error* maka didapat kedalaman sumbu netral

$c = 291 \text{ mm}$.

$$a = \beta_1 \cdot c = 0,762 \cdot 291 = 221,742 \text{ mm}$$

$$C_{cn} = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a$$

$$= 0,85 \cdot 41 \cdot 400 \cdot 221,742$$

$$= 3091084 \text{ N} = 3091,084 \text{ kN}$$

$$T_{sn} = A_{ps} \cdot E_{ps} \left[\varepsilon_{pe} - \varepsilon_{cu} \left(\frac{c-d'}{c} \right) + \varepsilon_{ce} \right]$$

$$= 493,5 \cdot 200.000 \left[0,0052 - 0,003 \left(\frac{291-50}{291} \right) + 0,0002 \right]$$

$$= 287756 \text{ N} = 287,756 \text{ kN}$$

$$T_{sn} = A_{ps} \cdot E_{ps} \left[\varepsilon_{pe} + \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) + \varepsilon_{ce} \right]$$

$$= 493,5 \cdot 200.000 \left[0,0052 + 0,003 \left(\frac{350-291}{291} \right) + 0,0002 \right]$$

$$= 593014 \text{ N} = 593,014 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 P_n &= C_{cn} - T'_{sn} - T_{sn} \\
 &= 3091,084 - 287,756 - 593,014 \\
 &= 2210,314 \text{ kN} \approx P_n \text{ yang diperlukan} = 2182,643 \text{ KN} \quad \text{OK}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_n &= C_{cn} \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) - T'_{sn} \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T_{sn} \left(d - \frac{h}{2} \right) \\
 &= 3091084 \left(\frac{400}{2} - \frac{221,742}{2} \right) - 287756 \left(\frac{400}{2} - 50 \right) + 593014 \left(350 - \frac{400}{2} \right) \\
 &= 321293926 \text{ N-mm} = 321,294 \text{ kN-m} > 300,611 \text{ kN-m, O.K} \\
 e &= \frac{321,294 \text{ KN-m}}{2182,643 \text{ KN}} = 145 \text{ mm} \approx e \text{ nyata} = 138 \text{ mm OK}
 \end{aligned}$$

Jadi digunakan ukuran penampang 400 mm x 400 mm dengan lima strand tujuh kawat 270K diameter 12,7 mm pada masing-masing sisi sejajar sumbu netral.

4.4.2. Beban gravitasi dan gempa

$$U = 1,05 (D+L+E)$$

$$P_u = 1,05 (984,167 + 216,779 + 68,755) = 1333,186 \text{ KN}$$

$$M_{2ns} = 351,610 \text{ kN-m}$$

$$M_{2s} = 379 \text{ kN-m}$$

$$P_{u1} = 1,05 (PD+PL+PE)$$

$$P_{u2} = 1,05 (249,391 + 53,2042 + 201,688) = 529,497 \text{ kN}$$

$$P_{u6} = 1,05 (984,167 + 216,779 + 68,755) = 1333,186 \text{ kN}$$

$$P_{u10} = 1,05 (984,167 + 216,779 + 68,250) = 1332,656 \text{ kN}$$

$$P_{u14} = 1,05 (249,391 + 53,204 + 201,183) = 528,967 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \Sigma P_u &= P_{u2} + P_{u6} + P_{u10} + P_{u14} \\ &= 529,497 \text{ kN} + 1333,186 \text{ kN} - 1332,656 \text{ kN} + 528,967 \text{ kN} \\ &= 3724,306 \text{ kN} \end{aligned}$$

Dari bagian 1 diperoleh, $P_c = 10677 \text{ kN}$

Dengan demikian,

$$\delta_{ns} = \frac{1}{1 - \frac{P_u}{0,75 \cdot P_c}} = \frac{1}{1 - \frac{1333,186}{0,75 \cdot 10677}} = 1,20$$

Faktor-faktor kekangan ujung pada kolom luar 2 yaitu untuk mendapatkan nilai faktor pembesaran momen δ_{ns} . Apabila dianggap dimensi kolom luar 2 sama dengan kolom dalam 6 maka :

$$\begin{aligned} \psi_A \text{ (ujung atas kolom)} &= \frac{\Sigma EI / I_u \text{ kolom-kolom}}{\Sigma E_c J_{cr} / I_u \text{ balok-balok}} \\ &= \frac{2 (1,461 \cdot 10^{13} / 3500)}{(30,095 \cdot 6066,666,667 / 7200)} = 0,33 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_B \text{ (ujung bawah kolom)} &= \frac{\Sigma EI / I_u \text{ kolom-kolom}}{\Sigma E_c J_{cr} / I_u \text{ balok-balok}} \\ &= \frac{2 (1,461 \cdot 10^{13} / 3500)}{(30,095 \cdot 6,066666667 / 7200)} = 0,33 \end{aligned}$$

Berdasarkan gambar 3.8.b untuk $\psi_A = 0,33$ dan $\psi_B = 0,33$ diperoleh $k = 1,1$

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(k l_u)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 1,461 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}}{(1,1 \cdot 3500)^2 \text{ mm}^2}$$

$$= 9728 \text{ kN}$$

$$\Sigma P_c = 2 (10677 + 9728) = 40810 \text{ kN}$$

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma P_u}{\phi \Sigma P_c}} = \frac{1}{1 - \frac{3724,306}{0,75 \cdot 40810}} = 1,14$$

$$M_c = \delta_{ns} \cdot M_{2ns} + \delta_s \cdot M_{2s}$$

$$= (1,2 \cdot 351,61) + (1,14 \cdot 379) = 853,992 \text{ kN-m}$$

$$P_n \text{ yang diperlukan} = \frac{1333,186}{0,7} = 1904,551 \text{ kN}$$

$$M_n \text{ yang diperlukan} = \frac{853,992}{0,7} = 1219,989 \text{ kN-m}$$

$$\text{Eksentrisitas} = \frac{1219,989 \text{ kN-m}}{1904,551 \text{ kN}} = 640 \text{ mm} > e_n = 251 \text{ mm}$$

Dengan demikian untuk kondisi ini nilai $P_n = 1904,551 \text{ kN} < P_n = 2182,643 \text{ kN}$ pada kondisi pertama maka tetap digunakan ukuran penampang 400 mm x 400 mm dengan lima strand tujuh kawat 270 K diameter 12,7 mm.

4.5 Gaya dan Tulangan Geser Kolom

Menurut SK-SNI besarnya tulangan geser kolom harus dipasang pada seluruh tinggi kolom dengan jarak maksimum sebagai berikut:

1. 1/4 dimensi komponen struktur terkecil = $1/4 \cdot 400 = 100 \text{ mm}$

2. 8 kali diameter tulangan longitudinal, diambil ukuran tulangan terkecil

$$= 8 \cdot 12,7 = 101,6 \text{ mm}$$

3. $\leq 100 \text{ mm}$

Gaya aksial kolom:

Dari analisis perhitungan SAP 2000 diperoleh:

- gaya aksial akibat beban gravitasi $= N_{gk} = 984,167 + 216,779$

$$= 1200,946 \text{ kN}$$

- gaya aksial akibat beban gempa $= N_{Ek} = 68,7548 \text{ kN}$

$$N_{u,k} \text{ atas} = 1,05 (N_{gk} + 4/K \cdot N_{Ek})$$

$$= 1,05 (1200,946 + (4/1,4 \cdot 68,7548))$$

$$= 1467,2577 \text{ kN}$$

$$N_{u,k} \text{ bawah} = 1,05 (N_{gk} - 4/K \cdot N_{Ek})$$

$$= 1,05 (1200,946 - (4/1,4 \cdot 68,7548))$$

$$= 1054,729 \text{ kN}$$

Besarnya gaya geser yang mampu disumbangkan oleh beton dapat dihitung dengan persamaan di bawah yang menunjukkan bahwa kemampuan beton dalam menahan geser sangat dipengaruhi oleh dimensi tampang dari kolom dan mutu beton itu sendiri.

Gaya geser beton untuk komponen tekan aksial:

$$V_c = \left[1 + \left(\frac{N_u}{14 \cdot Ag} \right) \right] \cdot \left[\frac{\sqrt{f'_c}}{6} \right] \cdot b \cdot d$$

Gaya aksial (N_u) yang digunakan diambil nilai terkecil $N_u = 1054,729 \text{ kN}$

$$V_c = \left[1 + \left(\frac{1054729}{14 \cdot 400^2} \right) \right] \cdot \left[\frac{\sqrt{41}}{6} \right] \cdot 400 \cdot 350$$

$$= 149477 \text{ N} = 149,477 \text{ kN}$$

Gaya geser rencana:

Dari analisis perhitungan SAP 2000 diperoleh:

- gaya geser akibat beban mati = 59,4705 kN
- gaya geser akibat beban hidup = 14,3263 kN
- gaya geser akibat beban gempa = 272,6022 kN

$$V_{u,k} = 1,05 (V_{d,k} + V_{L,k} + 4/K \cdot V_{E,k})$$

$$= 1,05 (59,4705 + 14,3263 + 4/1,4 \cdot 272,6022)$$

$$= 895,293 \text{ kN}$$

Gaya geser yang digunakan dalam perhitungan adalah gaya geser yang didapat dari pengurangan gaya geser rencana ($V_{u,k}$) dengan gaya geser yang mampu disumbangkan oleh beton (V_c) sehingga:

$$V_{u,k,r} = (V_{u,k} / \phi) - V_c$$

$$= (895,293 / 0,6) - 149,477$$

$$= 1342,678 \text{ kN}$$

Digunakan sengkang *deform* D-10 dengan mutu baja $f_y = 400 \text{ Mpa}$ dengan luas 1 sengkang (A_v) menurut SK-SNI T-15-1991-03 adalah dua kali luas diameter tulangan sengkang yang digunakan;

$$A_v = 2 (0,25 \cdot \pi \cdot d^2)$$

$$= 2 (0,25 \cdot \pi \cdot 100)$$

$$= 157,10 \text{ mm}^2$$

maka jarak sengkang perlu:

$$\begin{aligned} s &= \left[\frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_{n,k,r}} \right] \\ &= \left[\frac{157,1 \cdot 400 \cdot 350}{1342,678 \cdot 10^3} \right] \\ &= 16,38 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jarak sengkang perlu yang diperoleh ternyata terlalu rapat untuk digunakan sehingga luas tulangan sengkang yang digunakan ditingkatkan dengan menggunakan 1 sengkang *cross tie* sehingga luas sengkang,

$$\begin{aligned} A_v &= 157,10 + (0,25 \cdot \pi \cdot 100) \\ &= 235,64 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Jarak sengkang menjadi

$$s = \left[\frac{235,64 \cdot 400 \cdot 350}{1342,678 \cdot 10^3} \right] = 24,57 \text{ mm} \approx 24 \text{ mm}$$

Digunakan jarak spasi antar sengkang $s = 24 \text{ mm}$ sehingga gaya geser yang mampu ditahan oleh 1 sengkang segi – 4 dan 1 sengkang pengikat tambahan adalah

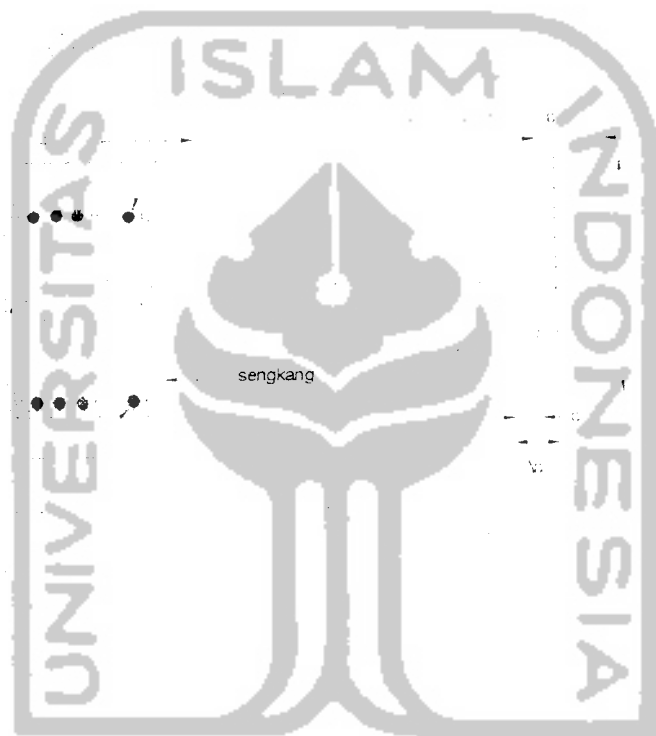
$$\begin{aligned} V_s &= \left[\frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \right] \\ &= \left[\frac{235,64 \cdot 400 \cdot 350}{24} \right] \\ &= 1374,567 \text{ kN} \end{aligned}$$

Gaya geser aktual yang mampu ditahan oleh sengkang dan beton adalah

$$V_{u,k}/\phi < V_c + V_s$$

$$895,293 / 0,6 < 149,477 + 1374,567$$

$$1492,155 \text{ kN} < 1524,044 \text{ kN} \dots\dots\dots\text{O.K}$$



Gambar 4.8 Penampang kolom, diagram regangan dan tegangan beton prategang

4.6 Diagram Interaksi Kolom Beton Prategang

Diagram interaksi beban-momen untuk sebuah elemen tekan beton prategang berukuran 400 x 400 mm dengan tulangan 10D ½” seven wire stress relieved 270 K strand. Pada masing-masing sisi terdapat setengah jumlah tulangan terhadap garis netral seperti gambar 4.9. Untuk diagram tegangan-regangan seperti gambar 4.10.

Gaya prategang efektif setelah kehilangan gaya prategang $f_{pe} = 1034$ Mpa. Sebagai tambahan, gambar diagram interaksi Pn-Mn dapat dilihat pada gambar 4.11 dengan nilai faktor reduksi yang tepat. Data-data lain sebagai berikut:

$$f'_c = 41 \text{ Mpa}$$

$$E_{ps} = 200\,000 \text{ Mpa}$$

$$E_c = 30095 \text{ Mpa}$$

$$f_{ps} = 1,655 \text{ Mpa}$$

$$\epsilon_{eu} = 0,003 \text{ diambil pada keadaan luluh}$$

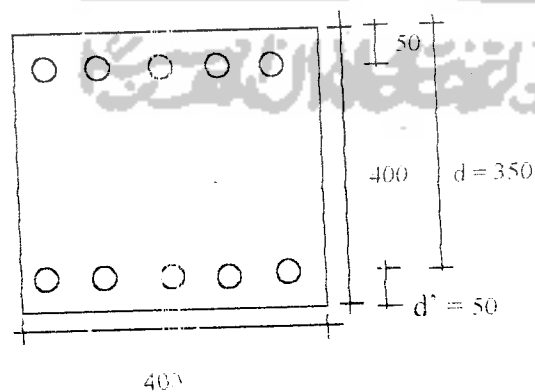
$$\epsilon_{ce} = 0,0002$$

$$\epsilon_{py} = 0,012$$

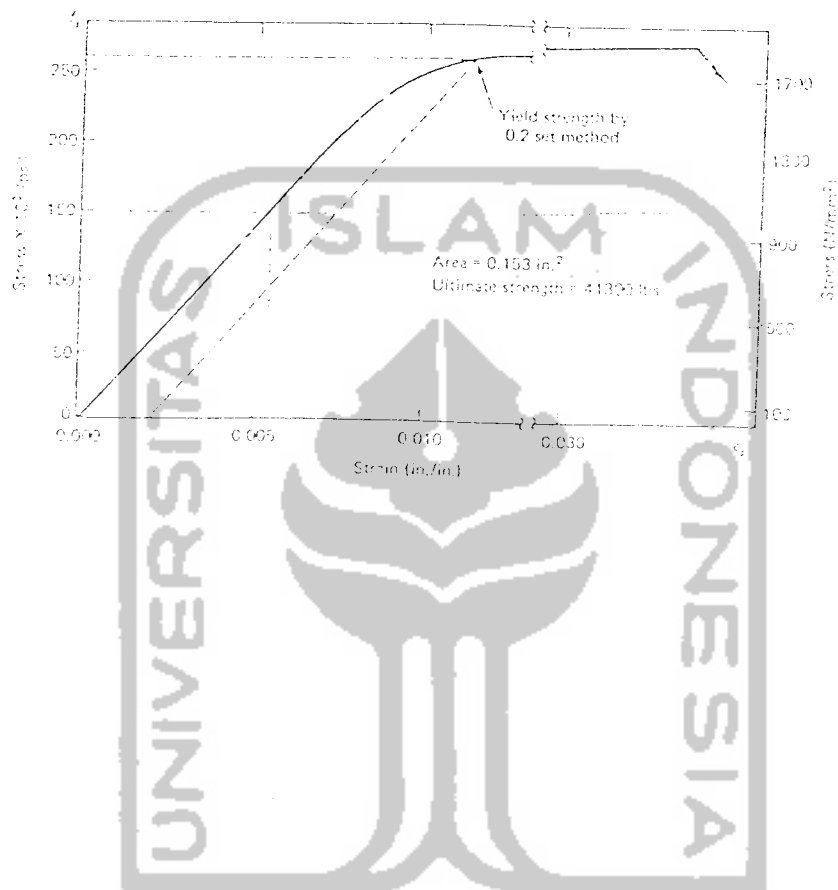
1. Tekan aksial murni (*pure compression*). $M_u = 0$, $C = \infty$

Kedalaman blok tekan beton $a = 400$ mm, $d' = 50$ mm

diameter tulangan $\phi = 12,7$ mm



Gambar 4.9. Penampang melintang kolom



Gambar 4.10. Diagram tegangan regangan untuk tendon D $\frac{1}{2}$ " grade 270 K

$$\text{Tinggi efektif} = 400 - 50 = 350 \text{ mm}$$

$$\text{Luas } D \frac{1}{2}'' = 98,7 \text{ mm}^2$$

$$A_{ps} = 5D \frac{1}{2}'' = 493,9 \text{ mm}^2$$

Dari gambar 4.9, untuk $f_{pe} = 1034$ didapat $\epsilon_{pe} = 0,0052$

Regangan merata pada beton akibat prategangan pada baja

$$\epsilon_{cc} = \frac{A_{st} \cdot f_{pe}}{A_n \cdot E_c} = \frac{987 \cdot 1034}{(400^2 - 987) \cdot 30654} = 0,0002$$

Gaya desak beton

$$\begin{aligned} C_{cn} &= 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a \\ &= 0,85 \cdot 41 \cdot 400 \cdot 400 = 5576000 \text{ N} \end{aligned}$$

Gaya pada kabel prategang sisi tekan

$$\begin{aligned} T'_{sn} &= A'_{ps} \cdot E_{ps} \left(\epsilon_{pe} - \epsilon_{cu} \cdot \left(\frac{c-d}{c} \right) + \epsilon_{cc} \right) \\ &= 493,5 \cdot 200000 \cdot \left(0,0052 - 0,003 \left(\frac{\infty - 50}{\infty} \right) + 0,0002 \right) \\ &= 493,5 \cdot 200000 \cdot (0,0052 - 0,003 + 0,0002) \\ &= 236880 \text{ N} \end{aligned}$$

Gaya pada kabel prategang sisi tarik

$$\begin{aligned} T_{sn} &= A'_{ps} \cdot E_{ps} \left(\epsilon_{pe} + \epsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d-c}{c} \right) + \epsilon_{cc} \right) \\ &= 493,5 \cdot 200000 \cdot \left(0,0052 + 0,0003 \left(\frac{350 - \infty}{\infty} \right) + 0,0002 \right) \\ &= 236880 \text{ N} \end{aligned}$$

Dengan demikian gaya pada kolom dapat dihitung dengan:

$$\begin{aligned} P_n &= C_{cn} - T'_{sr} - T_{sn} \\ &= 5576000 - 236880 - 236880 \\ &= 5102240 \text{ N} \end{aligned}$$

Harga momen berdasarkan persamaan

$$\begin{aligned}
 M_n &= C_{cn} \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) - T_{sn} \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T_{sn} \left(d - \frac{h}{2} \right) \\
 &= 5576000 \left(\frac{400}{2} - \frac{400}{2} \right) - 236800 \left(\frac{400}{2} - 50 \right) + 236880 \left(350 - \frac{400}{2} \right) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{M_n}{P_u} \\
 &= \frac{0}{5102240} = 0
 \end{aligned}$$

2. Tegangan tarik pada sisi tarik terluar = 0

$$\begin{aligned}
 \beta &= 0,85 - 0,008(f'_c - 30) \\
 &= 0,85 - 0,008(41 - 30) \\
 &= 0,762
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a &= \beta \cdot c \\
 &= 0,762 \cdot 400 = 304,8 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Gaya desak beton

$$\begin{aligned}
 C_{cn} &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \\
 &= 0,85 \cdot 41 \cdot 400 \cdot 304,8 = 4248912 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Gaya pada kabel prategang sisi tekan

$$\begin{aligned}
 T'_{sn} &= A'_{ps} \cdot E_{ps} \left(\epsilon_{pe} - \epsilon_{cu} \cdot \left(\frac{c-d}{c} \right) + \epsilon_{ce} \right) \\
 &= 493,5 \cdot 200000 \cdot \left(0,0052 - 0,003 \left(\frac{400-50}{400} \right) + 0,0002 \right) \\
 &= 273892 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Gaya pada kabel prategang sisi tarik

$$\begin{aligned}
 T_{sn} &= A_{ps} \cdot E_{ps} \left(\varepsilon_{pe} + \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d-c}{c} \right) + \varepsilon_{ce} \right) \\
 &= 493,5 \cdot 200000 \cdot \left(0,0052 + 0,003 \left(\frac{350-400}{400} \right) + 0,0002 \right) \\
 &= 495967 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian gaya pada kolom dapat dihitung dengan persamaan

$$\begin{aligned}
 P_n &= C_{cn} - T'_{sn} - T_{sn} \\
 &= 4248912 - 273892 - 495967 = 3479053 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Nilai momen:

$$\begin{aligned}
 M_n &= C_{cn} \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) - T'_{sn} \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T_{sn} \left(d - \frac{h}{2} \right) \\
 &= 4248912 \left(\frac{400}{2} - \frac{304,8}{2} \right) - 273892 \left(\frac{400}{2} - 50 \right) + 495967 \left(350 - \frac{400}{2} \right) \\
 &= 235559461 \text{ N-mm} \\
 e &= \frac{M_n}{P_n} = \frac{235559461}{3479053} = 68 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

3. Momen murni, $P_n = 0$

Abaikan pengaruh tulangan tekan A'_{ps} dalam perhitungan kekuatan momen lentur

karena untuk $P_n = 0$ luas tulangan ini tidak menentukan

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_{ps} \cdot f_{ps}}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \\
 &= \frac{493,5 \cdot 1655}{0,85 \cdot 41 \cdot 400} = 59 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$c = \frac{a}{\beta} = \frac{59}{0,762} = 77 \text{ mm}$$

$$M_{tt} = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

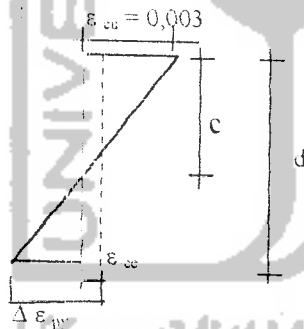
$$= 493,5 \cdot 1655 \cdot \left(350 - \frac{59}{2} \right)$$

$$= 261765971 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$e = \frac{M_n}{P_n} = \frac{261765971}{0} = \infty$$

4. Kondisi *balanced*, P_{nb} , M_{nb} , e_b

Sesuai gambar 4.11 dibawah, dengan melalui tahapan *trial and error* maka didapat $\Delta \epsilon_{py} = 0,00177$ untuk momen maksimal.



Gambar 4.11. Distribusi regangan

$$\frac{c}{(d-c)} = \frac{\epsilon_{cu}}{\Delta \epsilon_{py}} = \frac{0,003}{0,00177}$$

$$0,00177 c = 0,003d - 0,003 c$$

$$c = \frac{0,003 \cdot 350}{0,00177 + 0,003} = 220 \text{ mm}$$

$$\text{Maka } a_b = c_b \cdot B = 0,762 \cdot 220 = 167,64 \text{ mm}$$

Gaya-gaya yang terjadi

Gaya desak pada penampang beton

$$C_{cn} = 0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot a = 0,85 \cdot 41 \cdot 400 \cdot 167,64 = 2336902 \text{ N}$$

Gaya pada kabel prategang sisi tekan

$$\begin{aligned} T_{sn} &= A'_{ps} \cdot E_{ps} \left(\epsilon_{pe} - \epsilon_{cu} \cdot \left(\frac{c-d'}{c} \right) + \epsilon_{ce} \right) \\ &= 493,5 \cdot 200000 \cdot \left(0,0052 - 0,003 \cdot \left(\frac{220-50}{220} \right) + 0,0002 \right) \\ &= 304176 \text{ N} \end{aligned}$$

Gaya pada kabel prategang sisi tarik

$$\begin{aligned} T_{sn} &= A'_{ps} \cdot E_{ps} \left(\epsilon_{pe} + \epsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d-c}{c} \right) + \epsilon_{ce} \right) \\ &= 493,5 \cdot 200000 \cdot \left(0,0052 + 0,003 \cdot \left(\frac{350-220}{220} \right) + 0,0002 \right) \\ &= 707948 \text{ N} \end{aligned}$$

Dengan demikian gaya pada kolom dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} P_n &= C_{cn} - T'_{sn} - T_{sn} \\ &= 2336902 - 304176 - 707948 \\ &= 1324778 \text{ N} \end{aligned}$$

Harga momen berdasarkan persamaan

$$\begin{aligned} M_u &= C_{cn} \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) - T'_{sn} \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T_{sn} \left(d - \frac{h}{2} \right) \\ &= 2336902 \left(\frac{400}{2} - \frac{167,64}{2} \right) - 304176 \left(\frac{400}{2} - 50 \right) + 707948 \left(350 - \frac{400}{2} \right) \end{aligned}$$

$$= 332067074 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$e = \frac{M_n}{P_n} = \frac{332067074}{1324778} = 251 \text{ mm}$$

Koordinat dari keempat kasus diatas adalah titik kontrol dari diagram interaksi $P_n - M_n$. Titik-titik lain perlu dihitung untuk dapat menggambar diagram interaksi kolom secara akurat yang meliputi semua tingkat pembebanan. Sebagai contoh, titik-titik tambahan antara koordinat dari kasus 2-4 harus ditentukan. Diambil nilai tambahan dengan kedalaman garis netral e yang berbeda, dan menghitung nilai $P_u - M_u$ dan e dari pemisalan nilai e semula. Tabel 4.6 mencantumkan nilai-nilai dari koordinat yang digunakan untuk menggambar diagram interaksi $P_n - M_n$. Dari diagram terlihat bahwa ordinat momen maksimum adalah $M_n = 332,067 \text{ kN}\cdot\text{m}$ terletak pada kondisi balance maka asumsi dari $e_n = 220$ adalah benar.

Pada diagram desain beban-momen ($P_u - M_u$), daerah batas dimana nilai faktor reduksi kekuatan ϕ dapat ditingkatkan yaitu $0,1 \cdot f'_c \cdot A_g$. Pada soal diatas harga batas tersebut adalah $0,1 \cdot f'_c \cdot A_g = 0,1 \cdot 41 \cdot 400 \cdot 400 = 656000 \text{ N}$, dimana $P_{nb} = 332,067 \text{ kN} < 656 \text{ kN}$. Maka untuk daerah dibawah $0,1 \cdot f'_c \cdot A_g$, nilai faktor reduksi kekuatan dapat ditingkatkan antara 0,7 dan 0,9 untuk kolom bersengkang. Untuk mendapatkan nilai ϕ diambil dengan persamaan:

$$\phi = 0,9 - \frac{0,20 \cdot \phi \cdot P_n}{0,1 \cdot f'_c \cdot A_g} \geq 0,70$$

$$\text{Dimisalkan } \phi = 0,82$$

$$\phi = 0,9 - \frac{0,20 \cdot 0,82 \cdot 329980}{0,1 \cdot 41 \cdot 400 \cdot 400}$$

$$0,82 = 0,82$$

Sehingga harga $P_{u6} = \phi P_{n6} = 0,82 \cdot 329,98 = 270,58 \text{ kN}$

$$M_{u6} = \phi M_{n6} = 0,82 \cdot 316,44 = 259,48 \text{ kN-m}$$

Sedang harga ϕ untuk titik 3 dimana terjadi *pure bending*, harga ϕ ditingkatkan dari 0,7 menjadi 0,9 sesuai dengan persyaratan diatas sehingga:

$$M_{u3} = \phi M_n = 0,90 \cdot 261,77 = 235,59 \text{ kN-m}$$

Penggunaan kuat tekan rencana ϕP_n dengan eksentrisitas nol harus direduksi dengan faktor tertentu seperti tertulis dalam SK-SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.3 butir 5 yaitu:

Untuk komponen struktur pratekan, kuat tekan rencana ϕP_n tidak boleh diambil lebih besar 0,85 (untuk komponen struktur dengan tulangan spiral) atau 0,80 (untuk komponen struktur dengan sengkang pengikat) dari kuat tekan rencana dengan eksentrisitas nol ϕP_n , sehingga didapat:

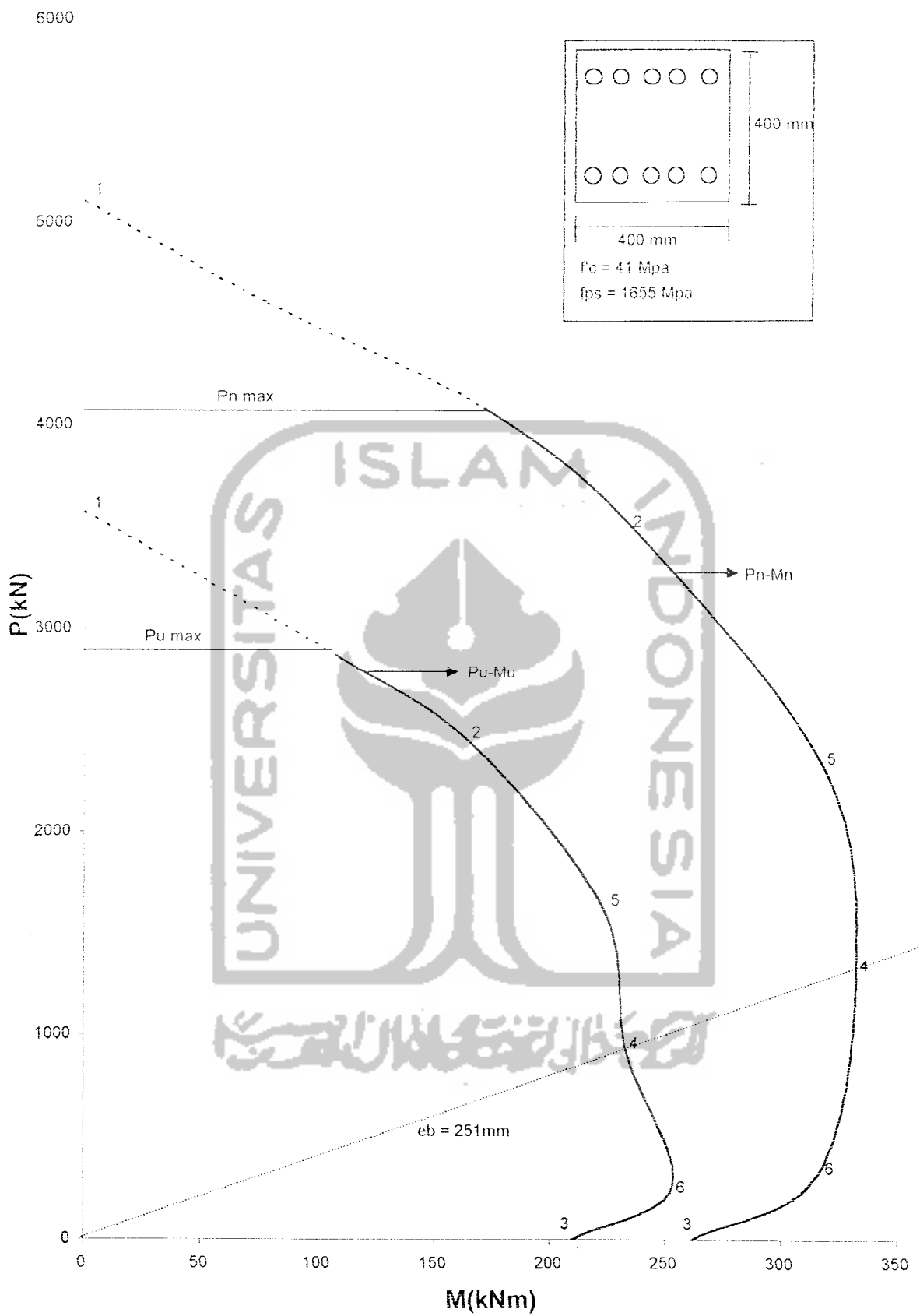
$$P_{u6} = \phi P_{n6} = 0,80 \cdot 329,98 = 263,98 \text{ kN}$$

$$M_{u6} = \phi M_{n6} = 0,8 \cdot 316,44 = 253,15 \text{ kN-m}$$

$$\text{Max } P_u = 0,8 \phi P_n = 0,8 \cdot 3571,55 = 2857,24 \text{ kN}$$

Tabel 4.6 Koordinat dari diagram interaksi P-M kolom prategang

Titik	e mm	a mm	P_n kN	M_n kN-m	ϕ	P_u kN	M_u kN-m	e mm
1	∞	400	5102,22	0	0,7	3571,55	0	0
2	400	304,80	3479,05	235,56	0,7	2435,34	164,89	68
5	300	228,60	2318,12	317,51	0,7	1622,68	222,26	137
4	220	167,64	1324,78	332,07	0,7	927,35	232,45	251
6	150	114,30	329,98	316,44	0,8	263,98	253,15	959
3	77	59	0	261,77	0,8	0	209,42	∞



Gambar 4.12 Diagram interaksi kolom beton prategang

4.7 Diagram Interaksi Kolom Beton Bertulang

Diagram interaksi beban-momen untuk sebuah elemen tekan beton bertulang biasa. Analisis kolom bujur sangkar 400mm x 400mm. Untuk pemilihan diameter baja diasumsikan sama dengan diameter tendon yaitu 5D12,7mm pada masing-masing sisi sejajar sumbu netral.

Data-data lain sebagai berikut:

$$f'_c = 41 \text{ Mpa}$$

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

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c} = 4700 \cdot \sqrt{41} = 30.095 \text{ Mpa}$$

$$E_s = 200000 \text{ Mpa}$$

$$\epsilon_y = 0,002$$

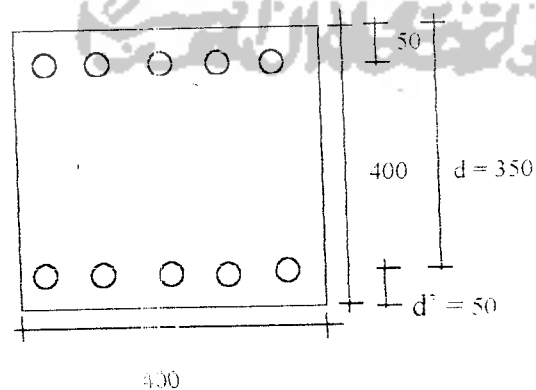
$$\epsilon_c = 0,003$$

$$A'_s = A_s = 493,5 \text{ mm}^2$$

1. Tekan aksial murni (*pure compression*). $M_u=0$, $C = \infty$

Kedalaman blok tekan beton $a = 400 \text{ mm}$, $d' = 50 \text{ mm}$

Tinggi efektif $= 400 - 50 = 350 \text{ mm}$

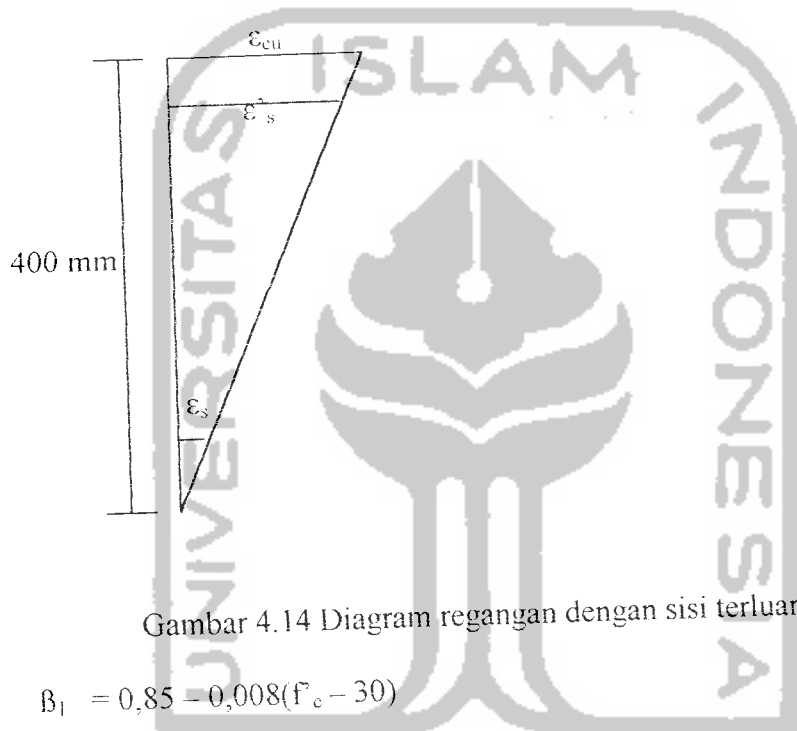


Gambar 4.13 Penampang melintang kolom

Gaya desak yang ditahan:

$$\begin{aligned}
 P_u &= 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} \\
 &= 0,85 \cdot 41 \cdot (400^2 - 987) + 400 \cdot 987 \\
 &= 5936403 \text{ N} = 5936,403 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

2. Tegangan tarik pada sisi tarik terluar = 0. $c = 400 \text{ mm}$



Gambar 4.14 Diagram regangan dengan sisi terluar = 0

$$\beta_1 = 0,85 - 0,008(f'_c - 30)$$

$$= 0,85 - 0,008(41 - 30) = 0,762$$

$$a = \beta_1 \cdot c$$

$$= 0,762 \cdot 400 = 304,8 \text{ mm}$$

- Cek regangan yang terjadi:

$$\varepsilon_s = \frac{0,003 \cdot d'}{c} = \frac{0,003 \cdot 50}{304,8}$$

$$= 0,0005 < \varepsilon_y = 0,002, \text{ baja tarik belum leleh}$$

$$\varepsilon'_s = \frac{0,003 \cdot d}{c} = \frac{0,003 \cdot 350}{304,8}$$

$$= 0,0034 > \varepsilon_y = 0,002, \text{ baja desak leleh}$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s$$

$$= 200000 \cdot 0,0005 = 100 \text{ Mpa}$$

A'_s telah leleh, sehingga $f'_s = f_y = 400 \text{ Mpa}$

Gaya-gaya yang terjadi:

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a$$

$$= 0,85 \cdot 41 \cdot 400 \cdot 304,8$$

$$= 4248912 \text{ N} = 4248,912 \text{ kN}$$

$$C_s = A'_s \cdot f'_s$$

$$= 493,5 \cdot 400 = 197400 \text{ N} = 197,400 \text{ kN}$$

$$T_s = A_s \cdot f_s$$

$$= 493,5 \cdot 100 = 49350 \text{ N} = 49,350 \text{ kN}$$

Dengan demikian gaya pada kolom dapat dihitung dengan persamaan

$$P_n = C_c + C_s + T_s$$

$$= 4248912 + 197400 + 49350$$

$$= 4495662 \text{ N} = 4495,662 \text{ kN}$$

Momen yang dapat ditahan:

$$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T_s \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

$$= 4248912 \left(\frac{400}{2} - \frac{304,8}{2} \right) + 197400 \left(\frac{400}{2} - 50 \right) - 49350 \left(350 - \frac{400}{2} \right)$$

$$= 224455711 \text{ N-mm} = 224,456 \text{ kNm}$$

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{224455711}{4495662} = 50 \text{ mm}$$

3. Kondisi momen murni, $P_n = 0$

Dimisalkan A'_s belum leleh, maka:

$$\epsilon'_s = \frac{0,003 \cdot (c - d')}{c} = \frac{0,003 \cdot (c - 50)}{c}$$

karena $f'_s = E_s \cdot \epsilon'_s$

$$f'_s = \frac{200000 \cdot 0,003 \cdot (c - 50)}{c} = \frac{600 \cdot (c - 50)}{c}$$

Gaya-gaya yang terjadi:

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \\ &= 0,85 \cdot 41 \cdot 0,762 \cdot c \cdot 400 = 10622,28 \cdot c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_s &= A'_s \cdot f'_s - 0,85 \cdot f'_c \cdot A_s \\ &= 493,5 \cdot \frac{600 \cdot (c - 50)}{c} - 0,85 \cdot 41 \cdot 493,5 \\ &= \frac{296100 \cdot (c - 50)}{c} - 17198475 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= A_s \cdot f_y \\ &= 493,5 \cdot 400 = 197400 \text{ N} \end{aligned}$$

Dengan persamaan keseimbangan:

$$T_s = C_c + C_s$$

$$197400 = 10622,28 \cdot c + \left(\left(\frac{296100 \cdot (c - 50)}{c} \right) - 1798475 \right)$$

Dengan persamaan kuadrat didapatkan nilai $c = 33,69$ mm. Berarti $c < d'$, sehingga A'_s yang dimisalkan semula sebagai tulangan desak ternyata mengalami tarik.

Dimisalkan $A'_s = A_s$ belum leleh, maka:

$$e'_s = \frac{0,003 \cdot (d - c)}{c} = \frac{0,003 \cdot (50 - c)}{c}$$

$$f'_s = \frac{600 \cdot (d - c)}{c} = \frac{600 \cdot (50 - c)}{c}$$

Gaya-gaya yang terjadi:

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \\ &= 0,85 \cdot 41 \cdot 0,762 \cdot c \cdot 400 = 10622,28 \cdot c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_s &= A'_s \cdot f'_s \\ &= 493,5 \cdot \frac{600 \cdot (50 - c)}{c} \\ &= \frac{14805000 - 296100 \cdot c}{c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= A_s \cdot f_y \\ &= 493,5 \cdot 400 = 197400 \text{ N} \end{aligned}$$

Dengan persamaan keseimbangan:

$$\begin{aligned} C_c &= C_s + T_s \\ 10622,28 \cdot c &= 197400 + \left(\frac{14805000 - 296100 \cdot c}{c} \right) \end{aligned}$$

Diperoleh, $c = 32,98$ mm

Maka:

$$f'_s = 309,64 \text{ MPa}$$

$$C_c = 350322 \text{ N}$$

$$T_s = 197400 \text{ N}$$

$$C_s = 152808 \text{ N}$$

Gaya yang dapat ditahan:

$$P_n = C_c - C_s - T_s$$

$$\approx 0$$

$$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) - C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T_s \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

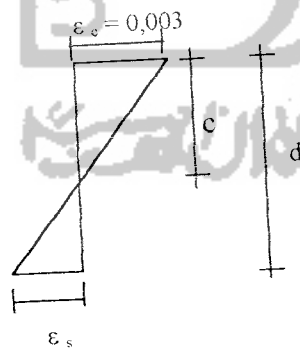
$$= 350322 \left(\frac{400}{2} - \frac{25}{2} \right) - 152808 \left(\frac{400}{2} - 50 \right) + 197400 \left(350 - \frac{400}{2} \right)$$

$$= 72.374175 \text{ N-mm} = 72,374 \text{ kNm}$$

$$e = \frac{M_n}{P_n} = \frac{72374175}{0} = \infty \text{ mm}$$

4. Kondisi *balance*, P_{nb} , M_{nb} , e_b

Dengan menggunakan persamaan keseimbangan regangan maka nilai e_b dapat dihitung sesuai gambar 4.15 di bawah ini, dengan penyelesaian persamaan segitiga.



Gambar 4.15 Distribusi regangan

$$\frac{c_b}{d} = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{cr} + \varepsilon_s} = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_s + \left(\frac{f_y}{E_s}\right)} = \frac{0,003}{0,003 + \left(\frac{f_y}{200.000}\right)}$$

$$\frac{c_b}{d} = \frac{600}{600 + f_y}, \text{ maka } c_b = d \cdot \frac{600}{600 + f_y} = 350 \cdot \frac{600}{600 + 400} = 210 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0,85 - 0,008(f'_c - 30) \\ &= 0,85 - 0,008(41 - 30) = 0,762 \end{aligned}$$

Maka $a_b = \beta_1 \cdot c_b = 0,762 \cdot 210 = 160 \text{ mm}$

Cek regangan yang terjadi:

$$\varepsilon_s = \frac{0,003 \cdot (d - c)}{c} = \frac{0,003 \cdot (350 - 210)}{210}$$

$$= 0,002 = \varepsilon_y = 0,002$$

$$\varepsilon'_s = \frac{0,003 \cdot (c - d')}{c} = \frac{0,003 \cdot (210 - 50)}{210}$$

$$= 0,0023 > \varepsilon_y = 0,002, \text{ baja desak leleh}$$

A'_s telah leleh, sehingga $f'_s = f_y = 400 \text{ Mpa}$

Gaya-gaya yang terjadi:

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b$$

$$= 0,85 \cdot 41 \cdot 160 \cdot 400 = 2230400 \text{ N}$$

$$C_s = A'_s \cdot f'_s - 0,85 \cdot f'_c \cdot A_s$$

$$= 493,5 \cdot 400 - 0,85 \cdot 41 \cdot 493,5$$

$$= 180201,525 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y$$

$$= 493,5 \cdot 400 = 197400 \text{ N}$$

Gaya yang dapat ditahan:

$$\begin{aligned}P_{nb} &= C_c + C_s - T_s \\&= 2230400 + 180201,525 - 197400 \\&= 2213201,525 \text{ N} = 2213,202 \text{ kN}\end{aligned}$$

Momen yang dapat ditahan:

$$\begin{aligned}M_{nb} &= C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(d - \frac{h}{2} \right) + T_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) \\&= 2230400 \left(\frac{400}{2} - \frac{160}{2} \right) + 180201,525 \left(350 - \frac{400}{2} \right) + 197400 \left(\frac{400}{2} - 50 \right) \\&= 324288228,8 \text{ N-mm} = 324,288 \text{ kNm} \\e_b &= \frac{M_{nb}}{P_{nb}} = \frac{324288228,8}{2213201,525} = 146 \text{ mm}\end{aligned}$$

5. Kondisi patah tarik (keruntuhan tarik)

Syarat keruntuhan tarik, $e > e_b$ atau $P_n < P_{nb}$

a. Diambil nilai $c = 150 \text{ mm} < c_b = 210 \text{ mm}$

$$\begin{aligned}a &= \beta_1 \cdot c \\&= 0,762 \cdot 150 = 114,3 \text{ mm}\end{aligned}$$

Cek regangan yang terjadi:

$$\varepsilon'_s = \frac{0,003 \cdot (c - d')}{c} = \frac{0,003 \cdot (150 - 50)}{150} = 0,002 = \varepsilon_y = 0,002$$

$$\varepsilon_s = \frac{0,003 \cdot (d - c)}{c} = \frac{0,003 \cdot (350 - 150)}{150} = 0,004 > \varepsilon_y = 0,002, \text{ baja tarik leleh}$$

Gaya-gaya yang terjadi

$$\begin{aligned}C_c &= 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \\ &= 0,85 \cdot 41 \cdot 114,3 \cdot 400 = 1593342 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_s &= A_s' \cdot f_y \\ &= 493,5 \cdot 400 = 197400 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_s &= A_s \cdot f_y \\ &= 493,5 \cdot 400 = 197400 \text{ N}\end{aligned}$$

Gaya yang dapat ditahan:

$$\begin{aligned}P_n &= C_c + C_s - T_s \\ &= 1593342 + 197400 - 197400 \\ &= 1593342 \text{ N} = 1593,342 \text{ kN} < P_{nb} = 2213,202 \text{ kN}\end{aligned}$$

Momen yang dapat ditahan:

$$\begin{aligned}M_n &= C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(d - \frac{h}{2} \right) + T_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) \\ &= 1593342 \left(\frac{400}{2} - \frac{114,3}{2} \right) + 197400 \left(350 - \frac{400}{2} \right) + 197400 \left(\frac{400}{2} - 50 \right) \\ &= 286828904,7 \text{ N-mm} = 286,829 \text{ kNm}\end{aligned}$$

$$c = \frac{M_n}{P_n} = \frac{286828904}{1593342} = 180 \text{ mm} > c_b = 146 \text{ mm}$$

b. Diambil nilai $c = 77 \text{ mm} < c_b = 210 \text{ mm}$

$$\begin{aligned}a &= \beta_1 \cdot c \\ &= 0,762 \cdot 77 = 58,674 \text{ mm}\end{aligned}$$

Cek regangan yang terjadi:

$$\varepsilon'_s = \frac{0,003 \cdot (c - d')}{c} = \frac{0,003 \cdot (77 - 50)}{77}$$

$$= 0,0011 < \varepsilon_y = 0,002, \text{ baja desak belum leleh}$$

$$\varepsilon_s = \frac{0,003 \cdot (d - c)}{c} = \frac{0,003 \cdot (350 - 77)}{77}$$

$$= 0,0106 > \varepsilon_y = 0,002, \text{ baja tarik leleh}$$

$$f'_s = E_s \cdot \varepsilon'_s$$

$$= 200000 \cdot 0,0011 = 220 \text{ Mpa}$$

Gaya-gaya yang terjadi

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b$$

$$= 0,85 \cdot 41 \cdot 58,674 \cdot 400 = 817915,56 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \cdot f'_s$$

$$= 493,5 \cdot 220 = 108570 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y$$

$$= 493,5 \cdot 400 = 197400 \text{ N}$$

Gaya yang dapat ditahan:

$$P_{11} = C_c + C_s - T_s$$

$$= 1593342 + 108570 - 197400$$

$$= 729085,56 \text{ N} = 729,085 \text{ kN} < P_{nb} = 2213,202 \text{ kN}$$

Momen yang dapat ditahan:

$$M_{11} = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(d - \frac{h}{2} \right) + T_s \left(\frac{h}{2} - d' \right)$$

$$= 817915,56 \left(\frac{400}{2} - \frac{58,674}{2} \right) + 108570 \left(350 - \frac{400}{2} \right) + 197400 \left(\frac{400}{2} - 50 \right)$$

$$= 185483423,2 \text{ N-mm} = 185,483 \text{ kNm}$$

$$e = \frac{M_n}{P_n} = \frac{185483423,2}{729085,56} = 254 \text{ mm} > e_b = 146 \text{ mm}$$

6. Kondisi patah tekan (keruntuhan tekan)

Syarat keruntuhan tekan $e < e_b$ atau $P_n > P_{nb}$

a. Diambil nilai $e = 300 \text{ mm} > e_b = 210 \text{ mm}$

$$a = \beta_1 \cdot c$$

$$= 0,762 \cdot 300 = 228,6 \text{ mm}$$

Cek regangan yang terjadi:

$$\epsilon'_s = \frac{0,003 \cdot (c - d')}{c} = \frac{0,003 \cdot (300 - 50)}{300}$$

$$= 0,0025 > \epsilon_y = 0,002, \text{ baja desak leleh}$$

$$\epsilon_s = \frac{0,003 \cdot (d - c)}{c} = \frac{0,003 \cdot (350 - 300)}{300}$$

$$= 0,0005 < \epsilon_y = 0,002, \text{ baja tarik belum leleh}$$

$$f_s = E_s \cdot \epsilon_s$$

$$= 200000 \cdot 0,0005 = 100 \text{ Mpa}$$

Gaya-gaya yang terjadi

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b$$

$$= 0,85 \cdot 41 \cdot 228,6 \cdot 400 = 3186684 \text{ N}$$

$$C_s = A_s \cdot f_y$$

$$= 493,5 \cdot 400 = 197400 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_s$$

$$= 493,5 \cdot 100 = 49350 \text{ N}$$

Gaya yang dapat ditahan:

$$P_n = C_c + C_s - T_s$$

$$= 3186684 + 197400 - 49350$$

$$= 3334734 \text{ N} = 3334,734 \text{ kN} > P_{nb} = 2213,202 \text{ kN}$$

Momen yang dapat ditahan:

$$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(d - \frac{h}{2} \right) + T_s \left(\frac{h}{2} - d' \right)$$

$$= 3186684 \left(\frac{400}{2} - \frac{228,6}{2} \right) + 197400 \left(350 - \frac{400}{2} \right) + 49350 \left(\frac{400}{2} - 50 \right)$$

$$= 310111318,8 \text{ N-mm} = 310,111 \text{ kNm}$$

$$e = \frac{M_n}{P_n} = \frac{310111318,8}{3334734} = 93 \text{ mm} < e_b = 146 \text{ mm}$$

b. Diambil nilai $c = 330 \text{ mm} > e_b = 210 \text{ mm}$

$$a = \beta_1 \cdot c$$

$$= 0,762 \cdot 330 = 251,46 \text{ mm}$$

Cek regangan yang terjadi:

$$\epsilon'_s = \frac{0,003 \cdot (c - d')}{c} = \frac{0,003 \cdot (330 - 50)}{330}$$

$$= 0,0025 > \epsilon_y = 0,002, \text{ baja desak leleh}$$

$$\epsilon_s = \frac{0,003 \cdot (d - c)}{c} = \frac{0,003 \cdot (350 - 330)}{330}$$

$$= 0,00018 < \epsilon_s = 0,002. \text{ baja tarik belum leleh}$$

$$f_s = E_s \cdot \epsilon_s$$

$$= 200000 \cdot 0,00018 = 35 \text{ Mpa}$$

Gaya-gaya yang terjadi

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b$$

$$= 0,85 \cdot 41 \cdot 251,46 \cdot 400 = 3505352,4 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \cdot f_s$$

$$= 493,5 \cdot 400 = 197400 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_s$$

$$= 493,5 \cdot 36 = 17766 \text{ N}$$

Gaya yang dapat ditahan:

$$P_n = C_c + C_s - T_s$$

$$= 3505352,4 + 197400 - 17766$$

$$= 3684986,4 \text{ N} = 3684,986 \text{ kN} > P_{nb} = 2213,202 \text{ kN}$$

Momen yang dapat ditahan:

$$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(d - \frac{h}{2} \right) + T_s \left(\frac{h}{2} - d' \right)$$

$$= 3505352,4 \left(\frac{400}{2} - \frac{251,46}{2} \right) + 197400 \left(350 - \frac{400}{2} \right) + 17766 \left(\frac{400}{2} - 50 \right)$$

$$= 292617422,7 \text{ N-mm} = 292,617 \text{ kNm}$$

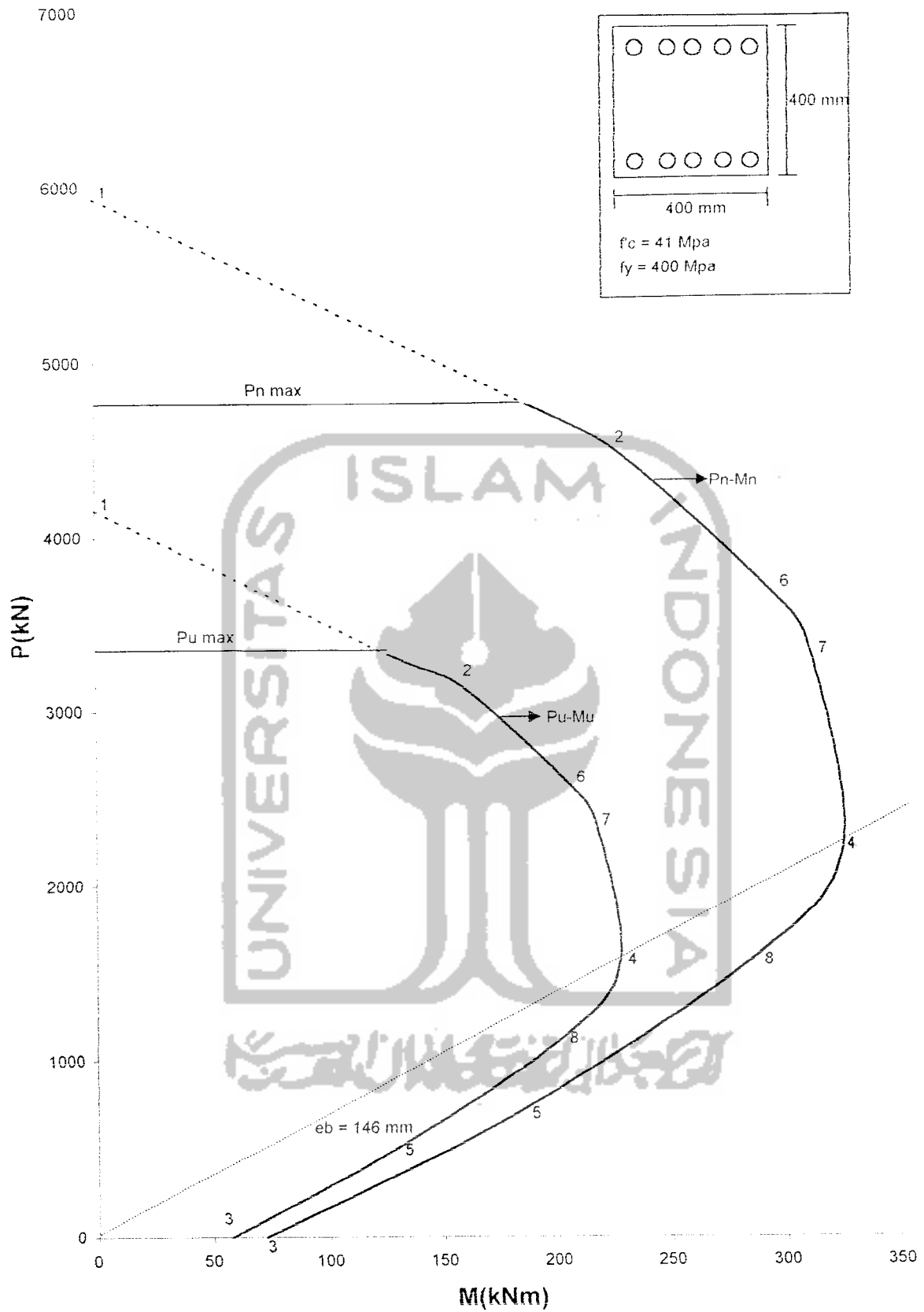
$$e = \frac{M_n}{P_n} = \frac{292617422,7}{3684986,4} = 79 \text{ mm} < e_b = 146 \text{ mm}$$

Tabel 4.7 mencantumkan nilai-nilai dari koordinat yang digunakan untuk menggambar diagram interaksi $P_n - M_n$ kolom beton bertulang biasa. Dari diagram terlihat bahwa ordinat momen maksimum adalah $M_n = 324,288 \text{ kN-m}$ terletak pada kondisi *balance*, maka asumsi dari $c_b = 210 \text{ mm}$ adalah benar.

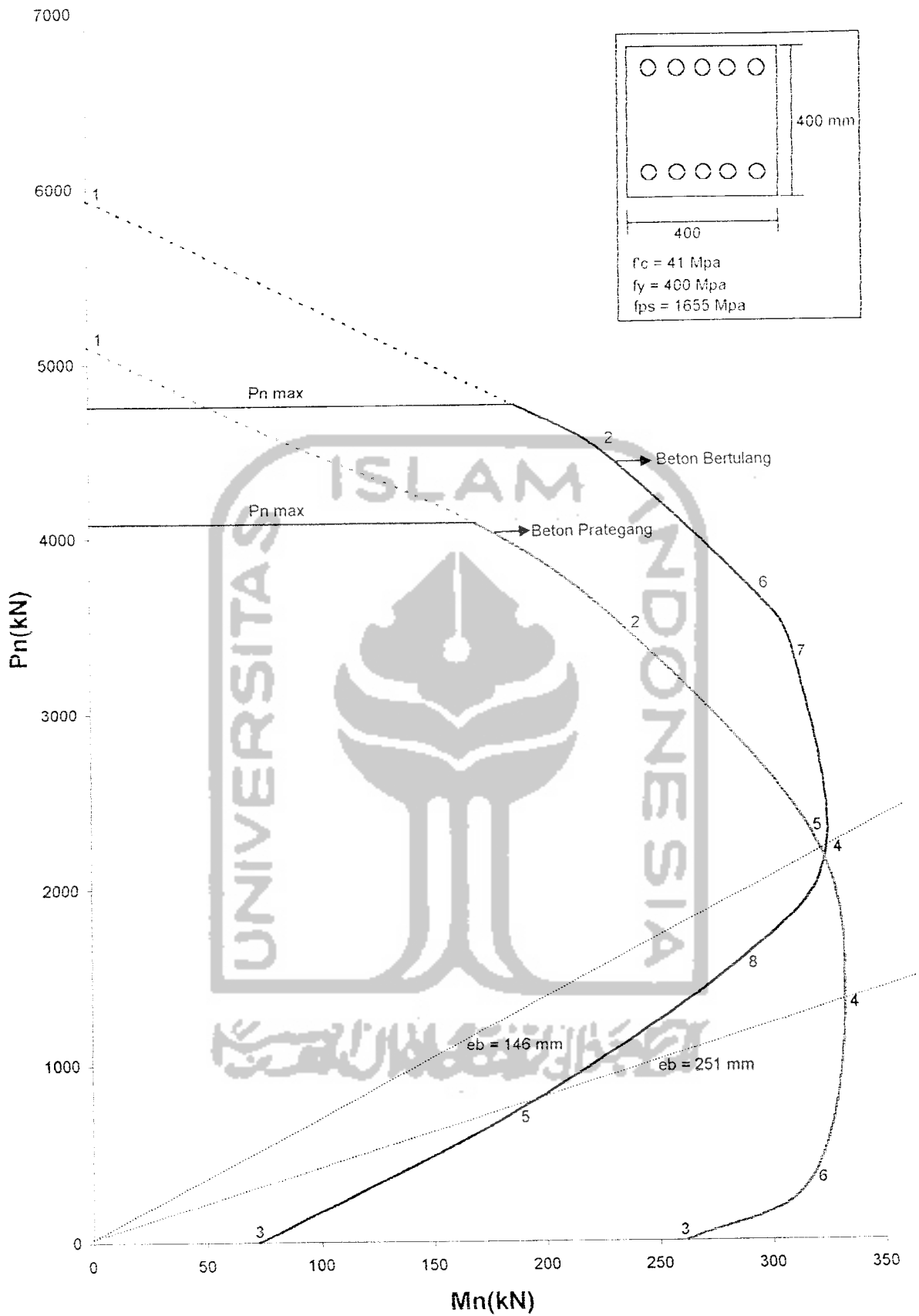
Tabel 4.7 Koordinat dari diagram interaksi P-M kolom beton bertulang biasa

Titik	c mm	a mm	P_n kN	M_n kN-m	ϕ	P_u kN	M_u kN-m	e mm
1	∞	400	5936,40	0	0,7	4155,48	0	0
2	400	304,8	4495,66	224,46	0,7	3146,96	157,12	50
6	330	251,46	3684,99	292,62	0,7	2579,49	204,83	79
7	300	228,6	3334,73	310,11	0,7	2334,31	217,08	93
4	210	160	2213,20	324,29	0,7	1549,24	227,0	146
8	150	114,3	1593,34	286,83	0,7	1115,34	200,78	180
5	77	58,67	729,08	185,48	0,7	510,36	129,84	254
3	32,9	25	0	72,37	0,8	0	57,90	∞

Gambar 4.16 Penampang kolom, diagram regangan dan tegangan beton bertulang



Gambar 4.16 Diagram interaksi kolom beton bertulang



Gambar 4.17 Perbandingan diagram interaksi kolom