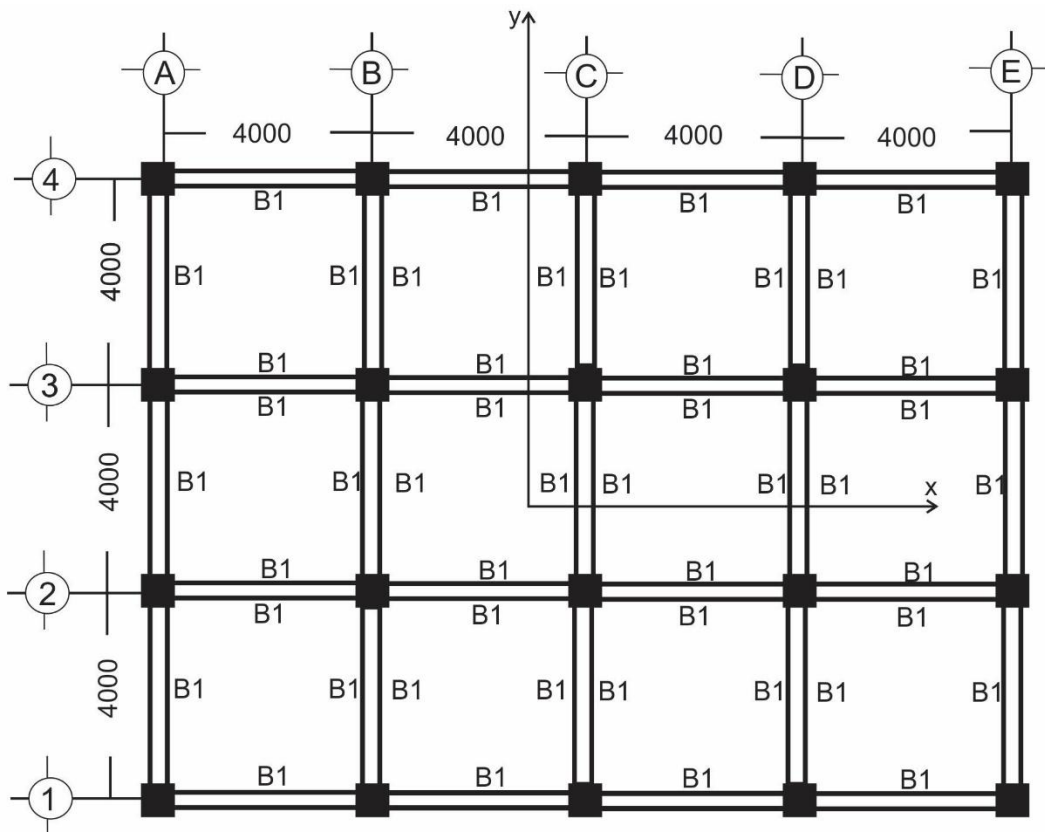


BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN

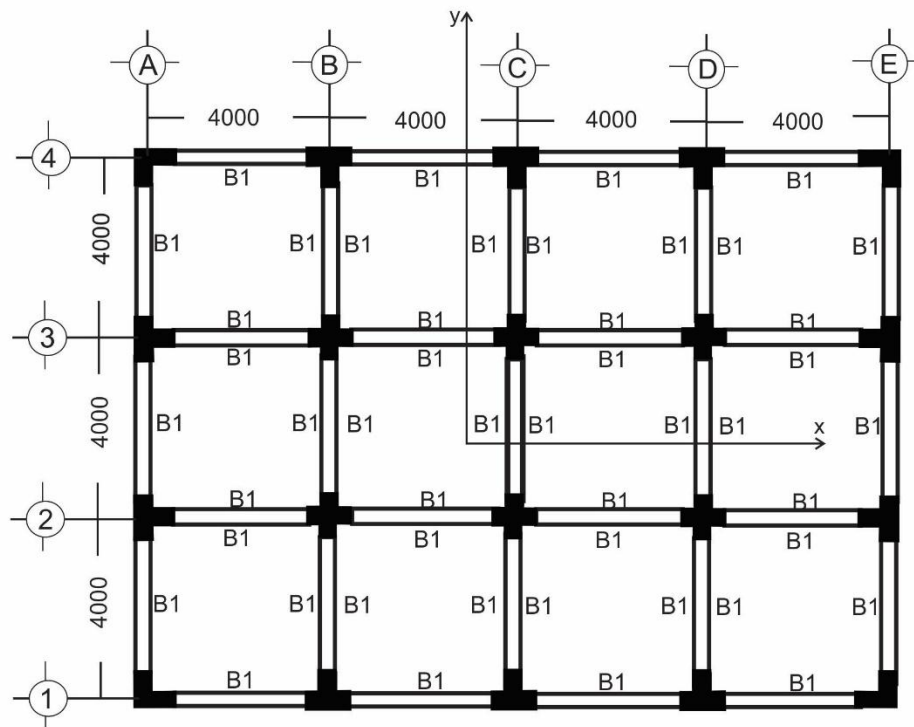
5.1 Preliminary Design

5.1.1 Balok

Balok merupakan komponen struktur rangka momen khusus yang membentuk bagian sistem penahan gaya gempa dan diproporsikan terutama untuk menahan lentur. Balok digunakan untuk menalurkan beban ke kolom. Di bawah ini dicontohkan perhitungan estimasi dimensi balok induk B1 yang dibuat sama untuk balok pada dua tipe gedung yang ditinjau dari lantai 1-4.



Gambar 1.1 Denah Model Bangunan Dengan Kolom Bujur Sangkar



Gambar 1.2 Denah Model Bangunan Dengan Kolom Pipih

1. Balok 1 (B1)

Panjang bentang (L) = 4 m

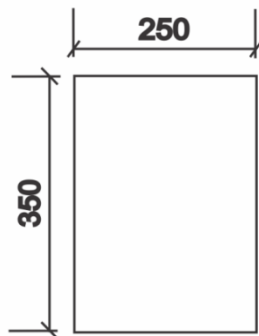
$$h = (1/10 - 1/12) \times L$$

$$h = (1/12) \times 4 \times 1000 = 333,33 \text{ mm}$$

dipakai $h = 350 \text{ mm}$

$$b = \frac{h}{2} = \frac{350}{2} = 175 \text{ mm} \rightarrow 250 \text{ mm}$$

$b/h = 0,72 > 0,3$ dan $b \geq 250 \text{ mm} \rightarrow$ memenuhi syarat SRMPK

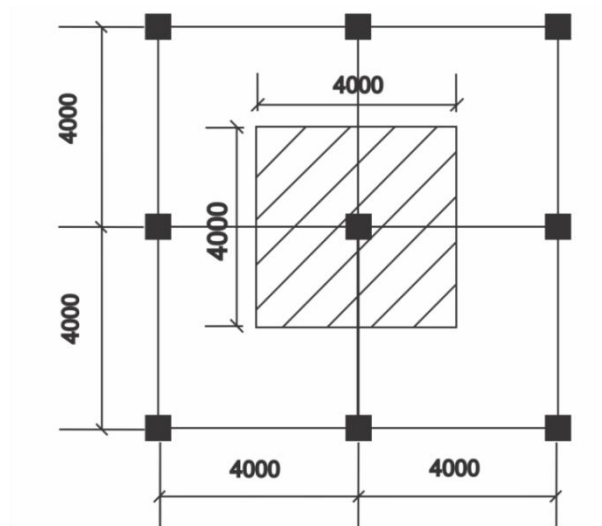


Gambar 1.3 Tampang Balok B1

Untuk perhitungan estimasi ukuran balok yang lain karena memiliki tipe yang sama maka didapatkan estimasi ukuran $b = 250 \text{ mm}$ dan $h = 350 \text{ mm}$

5.1.2 Kolom

Kolom adalah komponen struktur bangunan yang utamanya adalah meneruskan beban dari sistem lantai ke fondasi. Kolom berfungsi untuk menahan beban aksial dan momen lentur yang diakibatkan oleh beban gravitasi dan beban gempa yang terjadi pada struktur. Untuk memudahkan dalam menentukan dimensi kolom, maka dalam analisis ini estimasi dimensi kolom dari lantai 1 sampai lantai 4, disamakan. Berikut ini dicontohkan perhitungan kolom lantai 1 K1.



Gambar 1.4 Luasan Kolom K1

$$\begin{aligned}
 P_u &= \text{Luas Pelat} \times \text{Berat gravitasi ekuivalen setiap } m^2 \times n \text{ Lantai} \\
 &= 4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 0,944 \text{ t/m}^2 \times 4 \\
 &= 60,436 \text{ Ton} \rightarrow 592881,869 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_g &= \frac{P_u}{0,4 \times f'c} \\
 &= \frac{592881,869}{0,4 \times 27,5} \\
 &= 53898,35 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$h = \sqrt{A_g}$$

$$= \sqrt{53898,35}$$

$$= 232,1602 \text{ mm} \rightarrow 300 \text{ mm}$$

Dipakai $h = 450 \text{ mm}$

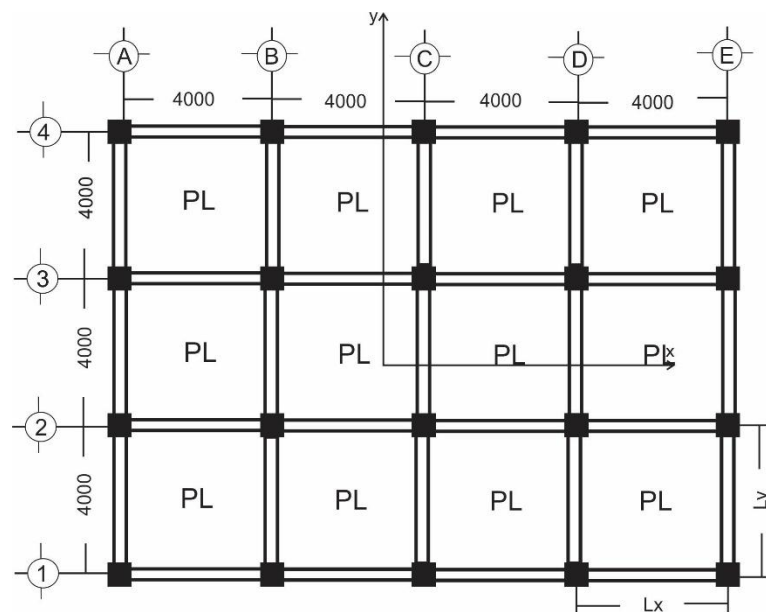
$b = 450 \text{ mm}$

Untuk perhitungan estimasi ukuran kolom pada model bangunan dengan kolom bujur sangkar yang lain, memiliki tipe yang sama maka dipakai estimasi ukuran kolom pada kolom bujur sangkar dengan dimensi $b = 450 \text{ mm}$ dan $h = 450 \text{ mm}$ untuk membedakan jenis kolom bujur sangkar dengan kolom pipih dilihat dari bentuk penampang kolomnya.

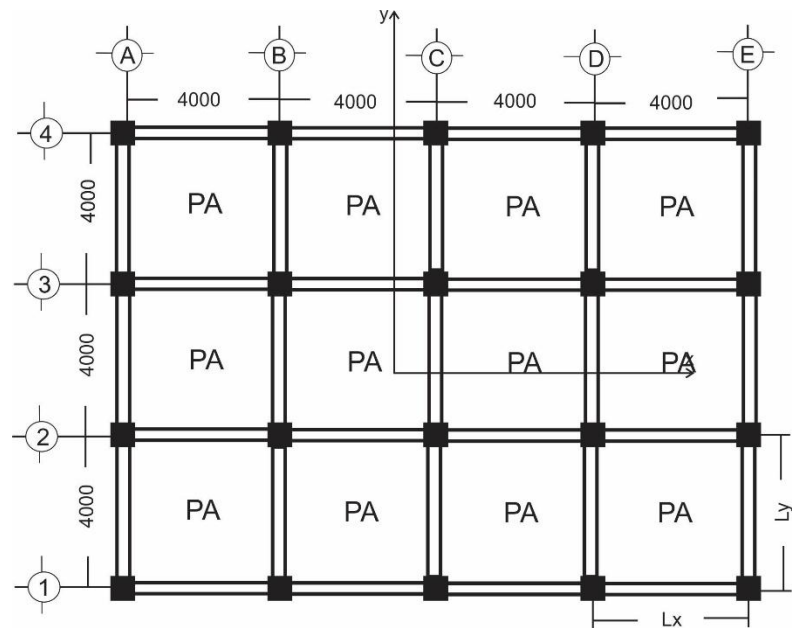
Untuk perhitungan estimasi ukuran kolom pipih diasumsikan dengan melanjutkan dari penelitian Limbongan (2016) mengenai kolom pipih, yang menghasilkan kolom dengan ukuran 20 cm merupakan paling efektif dan ekonomis.

5.1.3 Pelat

Pelat untuk struktur bangunan yang digunakan sebagai model penelitian, adalah pelat lantai dan pelat atap. Nilai f'_c untuk pelat dan balok sebesar 27,5 MPa. Berikut contoh perhitungan pelat lantai tipe 1 :



Gambar 1.5 Denah Pelat Lantai



Gambar 1.6 Denah Pelat Atap

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

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

$$b_{\text{balok}} = 250 \text{ mm}$$

$$h_{\text{balok}} = 350 \text{ mm}$$

$$\frac{L_y}{L_x} = \frac{4000}{4000} = 1 \rightarrow \text{Pelat 2 arah}$$

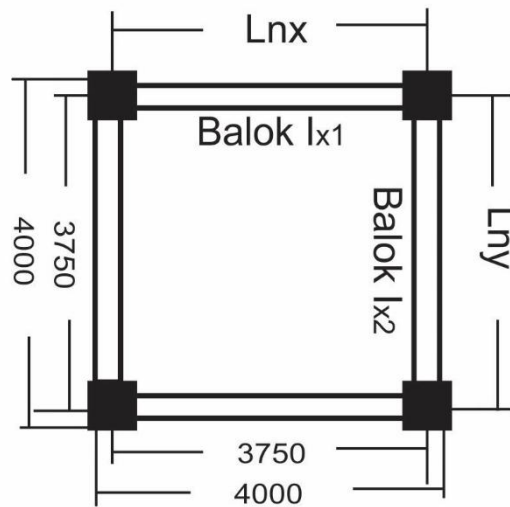
$$\begin{aligned} Ln_y &= L_y - \left(\frac{b}{2}\right) - \left(\frac{b}{2}\right) \\ &= 4000 - \left(\frac{250}{2}\right) - \left(\frac{250}{2}\right) = 3750 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ln_x &= L_x - \left(\frac{b}{2}\right) - \left(\frac{b}{2}\right) \\ &= 4000 - \left(\frac{250}{2}\right) - \left(\frac{250}{2}\right) = 3750 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\beta = \frac{Ln_y}{Ln_x} = \frac{3750}{3750} = 1$$

$$E_{cb} = 4700 \cdot \sqrt{f'c} = 4700 \cdot \sqrt{27,5} = 24647,01 \text{ MPa}$$

$$E_{cp} = 4700 \cdot \sqrt{f'c} = 4700 \cdot \sqrt{27,5} = 24647,01 \text{ MPa}$$



Gambar 1.7 Denah Pelat Atap

Momen inersia terhadap sumbu x:

$$\begin{aligned}
 I_{x1} &= \frac{1}{12} \cdot b_{\text{balok}} \cdot h_{\text{balok}}^3 \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 250 \cdot 350^3 = 893229166,7 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{x2} &= \frac{1}{12} \cdot b_{\text{balok}} \cdot h_{\text{balok}}^3 \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 250 \cdot 350^3 = 893229166,7 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Momen inersia pelat :

$$\begin{aligned}
 \text{Arah x} \rightarrow I_{p1} &= \frac{1}{12} \cdot L_{ny} \cdot h_{\text{pelat}}^2 \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 3750 \cdot 125^2 = 4882812,5 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Arah x} \rightarrow I_{p2} &= \frac{1}{12} \cdot L_{nx} \cdot h_{\text{pelat}}^2 \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 3750 \cdot 125^2 = 4882812,5 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Dari momen inersia diatas, maka didapat nilai α sebagai berikut:

$$\alpha_1 = \frac{E_{cb} \cdot I_{x1}}{E_{cp} \cdot I_{p1}} = \frac{24647,01 \cdot 893229166,7}{24647,01 \cdot 4882812,5} = 1,463$$

$$\alpha_2 = \frac{E_{cb} \cdot I_{x2}}{E_{cp} \cdot I_{p2}} = \frac{24647,01 \cdot 893229166,7}{24647,01 \cdot 4882812,5} = 1,463$$

$$\alpha_m = \frac{2 \cdot (\alpha_1 + \alpha_2)}{4} = \frac{2 \cdot (1,654 + 1,654)}{4} = 1,463 < 2$$

Dari perhitungan diatas didapat nilai $\alpha_m < 2$, maka tebal pelat dicari dengan menggunakan Persamaan 9-12 dalam SNI 2847- 2013.

$$h = \frac{\ln \cdot (0,8 + \frac{fy}{1400})}{36 + 5 \beta (\alpha_m - 0,2)} = \frac{3,2 \cdot (0,8 + \frac{320}{1400})}{36 + (5 \cdot 1)(1,654 - 0,2)} = 91,148 \text{ mm}$$

Dipakai tebal pelat = 125 mm > $h_{\min} = 91,148 \text{ mm} \rightarrow \text{OKE}$

Untuk perhitungan tebal pelat yang lain dilakukan dengan cara yang sama, sehingga hasil yang didapatkan dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Rekap Tebal Pelat

Pelat	h_{\min} (mm)	h_{\max} (mm)	h_{pakai} (mm)
PL	91,148	107,143	125,000
PA	85,714	107,143	100,000

5.2 Pembebanan Struktur

Beban-beban yang digunakan dalam perencanaan adalah kombinasi dari 3 beban yaitu beban mati, beban hidup dan beban gempa.

5.2.1 Beban Mati

Beban mati adalah beban dari semua bagian gedung yang bersifat tetap, termasuk segala unsur tambahan, penyelesaian-penyelesaian, mesin-mesin serta peralatan tetap yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung itu.

1. Pelat Lantai

a. Pelat	= 0,125 m x 2,4 t/m ³	= 0,3 t/m ²
b. Pasir	= 0,04 m x 1,8 t/m ³	= 0,072 t/m ²
c. Spesi	= 0,03 m x 2,1 t/m ³	= 0,063 t/m ²
d. Keramik	= 0,015 m x 2,4 t/m ³	= 0,036 t/m ²
e. Penggantung	= 0,01 m x 0,7 t/m ³	= 0,007 t/m ²
f. Plafon	= 0,005 m x 1,1 t/m ³	= 0,0055 t/m ²
	Q_d Lantai	= 0,4835 t/m²

2. Pelat Atap

a. Pelat	= 0,100 m x 2,4 t/m ³	= 0,2400 t/m ²
b. Lapisan kedap air	= 0,02 m x 1,8 t/m ³	= 0,0360 t/m ²
g. Penggantung	= 0,01 m x 0,7 t/m ³	= 0,007 t/m ²
c. Plafon	= 0,01 m x 2,4 t/m ³	= 0,0055t/m ² +
	Q_d Atap	= 0,2885 t/m²

5.2.2 Beban hidup

Beban hidup adalah semua beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu gedung, dan di dalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat pindah, sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap tersebut.

1. Pelat Lantai

$$Q_1 \text{ Lantai} = 0,25 \text{ t/m}^2$$

2. Pelat Atap

$$Q_1 \text{ Atap} = 0,100 \text{ t/m}^2$$

5.2.3 Beban Dinding

Pada penelitian ini, digunakan dinding yang diletakan diatas balok induk lantai 1 sampai 4. Dinding tersebut dibagi menjadi 2 bagian, yaitu :

1. Dinding Full

$$\begin{aligned} \text{Tinggi Dinding} &= \text{Tinggi lantai} - h_{\text{balok}} \\ &= 3,2 - 0,35 = 2,85 \text{ m} \end{aligned}$$

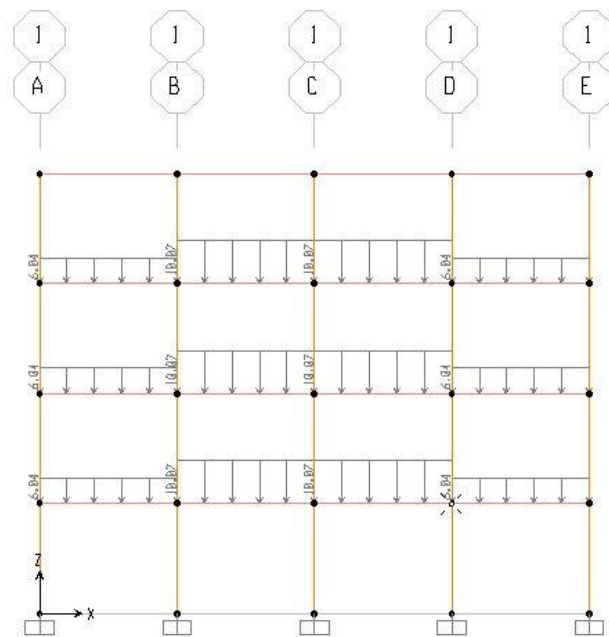
$$\begin{aligned} \text{Berat Dinding} &= \text{Tebal dinding} \times \text{tinggi dinding} \times B_j \text{ dinding} \\ &= 0,2 \text{ m} \times 2,85 \text{ m} \times 1,8 \text{ t/m}^3 \\ &= 1,026 \text{ t/m} = 10,065 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

2. Dinding menggunakan Jendela

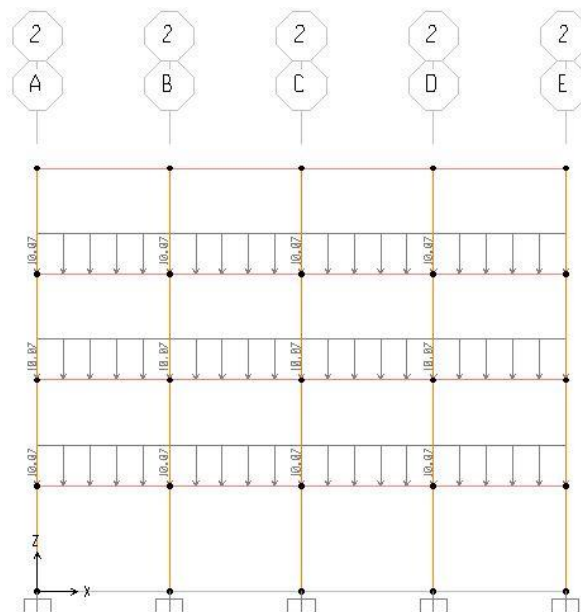
$$\begin{aligned} \text{Tinggi Dinding} &= \text{Tinggi lantai} - h_{\text{balok}} \\ &= 3,2 - 0,35 \\ &= 2,85 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Dinding} &= \text{Tebal dinding} \times \text{tinggi dinding} \times \text{Bj dinding} \times 60\% \\
 &= 0,2 \text{ m} \times 2,85 \text{ m} \times 1,8 \text{ t/m}^3 \times 0,6 \\
 &= 0,616 \text{ t/m} = 6,0390 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

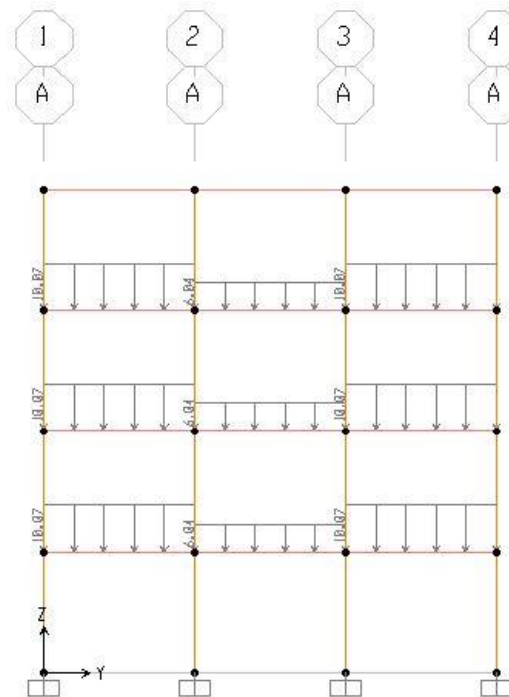
Berikut pendistribusian yang dapat dilihat pada Gambar 1.8 dan Gambar 1.9.



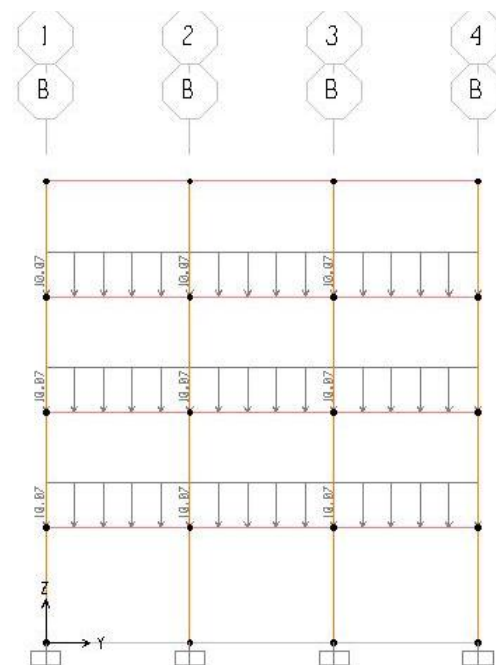
Gambar 1.8 Pendistribusian Beban Mati Arah X Pada Portal 1 Dan 4



Gambar 1.9 Pendistribusian Beban Mati Arah X Pada Portal 2 Dan 3



Gambar 1.10 Pendistribusian Beban Mati Arah Y Pada Portal A Dan E



Gambar 1.11 Pendistribusian Beban Mati Arah Y Pada Portal B Sampai D

5.2.4 Beban Gempa Ekuivalen Statik

5.2.4.1 Desain Respon Spektrum (SNI 1726 – 2012)

Dalam mendesain respons spektrum, maka data bangunan diperlukan sebagai acuan dalam mendesai, adapun data-data tersebut adalah sebagai berikut.

1. Daerah bangunan yang akan dibangun : Yogyakarta
2. Peruntukan bangunan gedung yang akan didesain adalah : Gedung Hunian
3. Jenis tanah dimana bangunan termasuk jenis : Tanah Sedang
4. Berdasarkan katagori resiko bangunan, maka gedung hunian termasuk katagori resiko II, dengan faktor keutamaan gempa I_0 sebesar 1.0.
5. Nilai R yang digunakan sesuai dengan sistem rangka pemikul momen khusus untuk gedung beton bertulang dengan sistem rangka sebesar 8.
6. Nilai S_s dan S_1 , didapat dari SNI 1726 - 2012, yang dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2.

$$S_s = 1$$

$$S_1 = 0,5$$

7. Nilai F_a dan F_v , didapatkan dari table faktor amplikasi percepatan getaran periode pendek dan tebal faktor amplikasi percepatan pada getaran periode 1 detik, yang dapat dilihat pada Tabel 3.5 dan Tabel 3.6.

$$F_a = 1,0$$

$$F_v = 1,5$$

8. Nilai C_{rs} dan C_{r1} , didapat dari SNI 1726 - 2012, yang dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4.

$$C_{rs} = 0,95$$

$$C_{r1} = 1$$

9. Mencari nilai S_{MS} .

$$\begin{aligned} S_{MS} &= F_a \times S_s \\ &= 1,0 \times 1,0 \end{aligned}$$

$$= 1,0$$

10. Mencari nilai S_{MS1} .

$$\begin{aligned} S_{MS1} &= F_v \times S_1 \\ &= 1,5 \times 0,5 \\ &= 0,75 \end{aligned}$$

11. Mencari nilai S_{DS} .

$$\begin{aligned} S_{DS} &= \frac{2}{3} \times S_{MS} \\ &= \frac{2}{3} \times 1 \\ &= 0,67 \end{aligned}$$

12. Mencari nilai S_{D1} .

$$\begin{aligned} S_{D1} &= \frac{2}{3} \times S_{M1} \\ &= \frac{2}{3} \times 0,75 \\ &= 0,5 \end{aligned}$$

13. Mencari nilai $S_{DS,y}$.

$$\begin{aligned} S_{DS,y} &= S_{DS} \times C_{RS} \\ &= 0,67 \times 0,95 \\ &= 0,6333 \end{aligned}$$

14. Mencari nilai $S_{DS,r}$.

$$\begin{aligned} S_{DS,r} &= S_{D1} \times C_{R1} \\ &= 0,5 \times 1 \\ &= 0,5 \end{aligned}$$

15. Mencari nilai T_o .

$$\begin{aligned} T_o &= 0,2 \times \frac{SD1,r}{SDS,y} \\ &= 0,2 \times \frac{0,5}{0,6333} \\ &= 0,158 \end{aligned}$$

16. Mencari nilai T_s .

$$T_s = \frac{SD1,r}{SDS,y}$$

$$= \frac{0,5}{0,6333}$$

$$= 0,732$$

17. Mencari nilai $S_{a,0}$.

$$S_{a,0} = S_{DS,y} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right)$$

$$= 0,6333 \left(0,4 + 0,6 \frac{0}{0,158} \right)$$

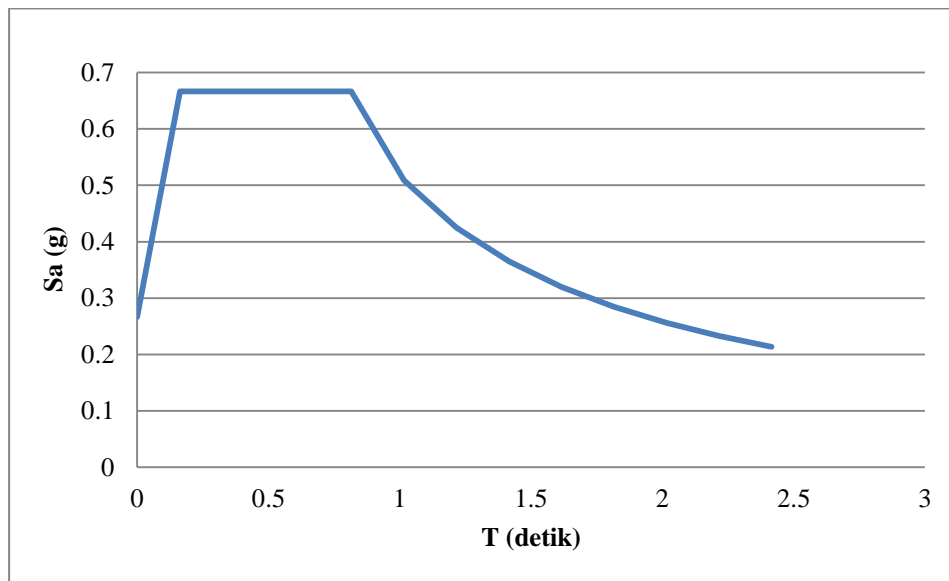
$$= 0,2533$$

Desain respon spektrum gedung 4 tingkat yang dibangun di daerah Yogyakarta dapat dilihat pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2 Respon Spektrum Pada Gedung 4 Tingkat

T (detik)	S_a (g)
0	0,2667
0,1579	0,6667
0,7895	0,6667
0,9895	0,5053
1,1895	0,4204
1,3895	0,3598
1,5895	0,3146
1,7895	0,2794
1,9895	0,2513
2,1895	0,2284
2,3895	0,2093

Grafik response spektrum desain gedung 4 tingkat yang dibangun di daerah Yogyakarta dapat dilihat pada Gambar 1.12.



Gambar 1.12 Grafik Respons Spektrum Sesain Gedung 4 Tingkat

5.2.4.2 Perhitungan Periode Getar (T)

1. Struktur Sistem Rangka Kolom Bujur sangkar

Dalam menghitung periode getar dapat menggunakan analisis SAP dan dapat menggunakan rumus:

$$T = 0,0466 \times H^{0,9}$$

$$T = 0,0466 \times 12,8^{0,9}$$

$$T = 0,462 \text{ detik}$$

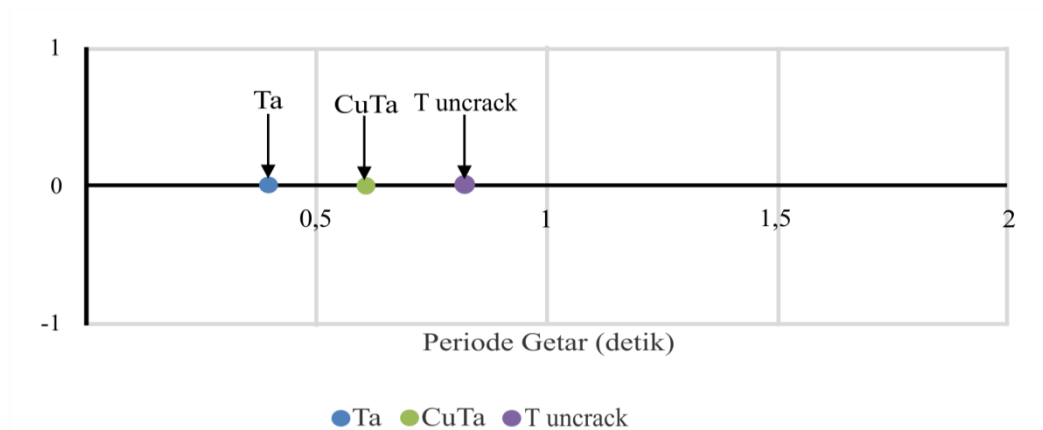
$$T_a = 0,462 \text{ detik}$$

Apabila periode getar dihitung menggunakan analisis SAP, maka harus digunakan batasan periode struktur, dimana batasan ini hanya berlaku jika T dihitung dari analisis komputer yang “*substantiated*”. Koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung dapat dilihat pada hal 56 (SNI 1726-2012) dan didapat C_u sebesar 1,4 maka:

$$T_a = 0,462 \text{ detik}$$

$$C_u \times T_a = 1,4 \times 0,462 = 0,6468 \text{ detik}$$

$$T_{\text{uncrack computer}} = 0,78349 \text{ detik}$$



Gambar 1.13 Perbandingan Periode Getar Struktur Kolom Bujur Sangkar

Hasil diatas dapat digunakan untuk menentukan periode getar yang akan dipakai, dimana ada tiga syarat untuk menentukan periode getar yaitu:

- jika $T_c > C_u T_a \rightarrow$ gunakan $T = C_u T_a$,
- jika $T_a < T_c < C_u T_a \rightarrow$ gunakan $T = T_c$, dan
- jika $T_c < T_a \rightarrow$ gunakan $T = T_a$.

Dari syarat diatas, dapat disimpulkan T yang dipakai sebesar 0.6468 detik.

Dalam menghitung koefisien respon seismik, digunakan 3 persamaan, yaitu :

$$a. C_{S_{\max}} = \frac{S_{DS,R}}{T \left(\frac{R}{I}\right)} = \frac{0,5}{0,6468 \left(\frac{8}{I}\right)} = 0,09663$$

$$b. C_s = \frac{S_{DS,R}}{\left(\frac{R}{I}\right)} = \frac{0,6333}{\left(\frac{8}{I}\right)} = 0,0792$$

$$c. C_{S_{\min}} = 0,044 \cdot S_{DS,R} \cdot I = 0,044 \cdot 0,5 \cdot 1 = 0,022$$

Dari perhitungan diatas, maka C_s yang digunakan adalah sebesar 0,0792

2. Struktur Sistem Rangka Kolom Pipih

Dalam menghitung periode getar dapat menggunakan analisis SAP dan dapat menggunakan rumus:

$$T = 0,0466 \times H^{0,9}$$

$$T = 0,0466 \times 12,8^{0,9}$$

$$T = 0,462 \text{ detik}$$

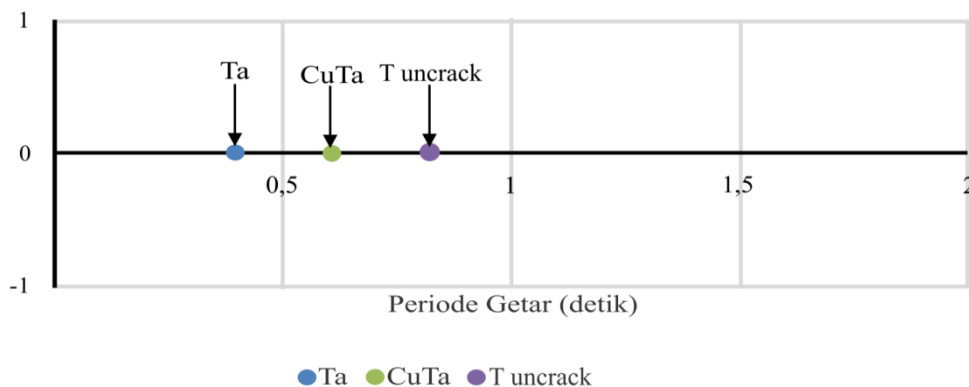
$$T_a = 0,462 \text{ detik}$$

Apabila periode getar dihitung menggunakan analisis SAP, maka harus digunakan batasan periode struktur, dimana batasan ini hanya berlaku jika T dihitung dari analisis komputer yang “*substantiated*”. Koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung dapat dilihat pada hal 56 (SNI 1726-2012) dan didapat C_u sebesar 1,4 maka:

$$T_a = 0,462 \text{ detik}$$

$$C_u \times T_a = 1,4 \times 0,462 = 0,6468 \text{ detik}$$

$$T_{\text{uncrack computer}} = 0,78349 \text{ detik}$$



Gambar 1.14 Perbandingan Periode Getar Struktur Kolom Pipih

Hasil diatas dapat digunakan untuk menentukan periode getar yang akan dipakai, dimana ada tiga syarat untuk menentukan periode getar yaitu:

- a. jika $T_c > C_u T_a \rightarrow$ gunakan $T = C_u T_a$,
- b. jika $T_a < T_c < C_u T_a \rightarrow$ gunakan $T = T_c$, dan
- c. jika $T_c < T_a \rightarrow$ gunakan $T = T_a$.

Dari syarat diatas, dapat disimpulkan T yang dipakai sebesar 0,6468 detik.

Dalam menghitung koefisien respon seismik, digunakan 3 persamaan, yaitu :

$$d. C_{S_{\max}} = \frac{S_{DS,R}}{T \left(\frac{R}{I}\right)} = \frac{0,5}{0,6468 \left(\frac{8}{1}\right)} = 0,09663$$

$$e. C_s = \frac{S_{DS,R}}{\left(\frac{R}{I}\right)} = \frac{0,6333}{\left(\frac{8}{1}\right)} = 0,0792$$

$$f. C_{S_{\min}} = 0,044 \cdot S_{DS,R} \cdot I = 0,044 \cdot 0,5 \cdot 1 = 0,022$$

Dari perhitungan diatas, maka C_s yang digunakan adalah sebesar 0,0792

5.2.4.3 Berat Total Struktur (Wt)

Berat total struktur merupakan akumulasi dari beban mati dan beban hidup yang terjadi pada struktur. Beban mati akibat berat sendiri dari struktur harus selalu diperhitungkan, sedangkan beban hidup besarnya selalu berubah-ubah tergantung dari penggunaan dan kombinasi beban hidup. Pada suatu bangunan gedung bertingkat banyak, adalah kecil kemungkinannya semua lantai tingkat akan dibebani secara penuh oleh beban hidup. Beban-beban hidup yang bekerja pada struktur bangunan pada umumnya dapat direduksikan pada saat dilakukan analisis beban gempa pada struktur tersebut, sehubungan dengan kecilnya kemungkinan bekerjanya beban hidup penuh dan pengaruh beban gempa penuh secara bersamaan pada struktur secara keseluruhan. Tujuan mereduksi beban hidup ini adalah untuk mendapatkan desain struktur yang cukup ekonomis.

- a. Berat Struktur Dengan Kolom Bujur sangkar

Tabel 1.3 Berat Struktur Dengan Kolom Bujur sangkar

Lantai	Beban Mati (kN)	Beban Hidup (kN)	Beban Total (kN)
4	648,51926	57,6	706,11926
3	2392,419211	144	2536,419211
2	2392,419211	144	2536,419211
1	2955,238711	144	3099,238711
Σ			8878,196394

- b. Berat Struktur Dengan Kolom Pipih

Tabel 1.4 Berat Struktur Dengan Kolom Pipih

Lantai	Beban Mati (kN)	Beban Hidup (kN)	Beban Total (kN)
4	648,51926	57,6	706,11926
3	2392,419211	144	2536,419211
2	2392,419211	144	2536,419211
1	2955,238711	144	3099,238711
Σ			8878,196394

5.2.4.3 Gaya Geser Dasar Seismik (V)

1. Perhitungan Gaya Geser Dasar Seismik

a. Struktur Sistem Rangka Kolom Bujur Sangkar

Perhitungan geser dasar seismi adalah sebagai berikut.

- 1) Berat Total Bangunan = 8878,196 kN
- 2) C_s = 0,0792
- 3) V = $C_s \cdot$ Berat total bangunan
= 0,0792. 8878,196 kN
= 703,153 kN

Dari data diatas, maka gaya geser dasar seismik sebesar 703,153 kN

b. Struktur Sistem Rangka Kolom Pipih

Perhitungan geser dasar seismi adalah sebagai berikut.

- 1) Berat Total Bangunan = 8878,196 kN
- 2) C_s = 0,0792
- 3) V = $C_s \cdot$ Berat total bangunan
= 0,0792. 8878,196 kN
= 703,153 kN

Dari data diatas, maka gaya geser dasar seismik sebesar 703,153 kN

2. Perhitungan nilai k

Dalam memperhitungkan nilai k, maka ada beberapa syarat yaitu :

- a. Untuk struktur yang mempunyai periode sebesar 0,5 detik atau kurang, maka $K=1$
- b. Untuk struktur yang mempunyai periode sebesar 2,5 detik, maka $k = 2$, dan
- c. Untuk struktur yang mempunyai periode sstruktur anatar 0,5 dan 2,5 detik, maka k harus sebesar 2 atau harus ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2.

Dari syarat-syarat diatas, maka dalam menentukan nilai k harus menggunakan interpolasi linier, adapun perhitungan sebagai berikut :

$$T_a \text{ sistem rangka kolom bujur sangkar} = 0,462 \text{ detik}$$

$$T_a \text{ sistem rangka kolom pipih} = 0,462 \text{ detik}$$

$$K \text{ sistem rangka kolom bujur sangkar} = 1 + \left(\frac{(2-1) \cdot (0,462 - 0,5)}{2,5 - 0,5} \right) = 0,981$$

$$K \text{ rangka kolom pipih} = 1 + \left(\frac{(2-1) \cdot (0,462 - 0,5)}{2,5 - 0,5} \right) = 0,981$$

Dari perhitungan diatas, maka didapatkan nilai k untuk sistem rangka sebesar 0,981

5.2.4.5 Gaya Horizontal Gempa (F)

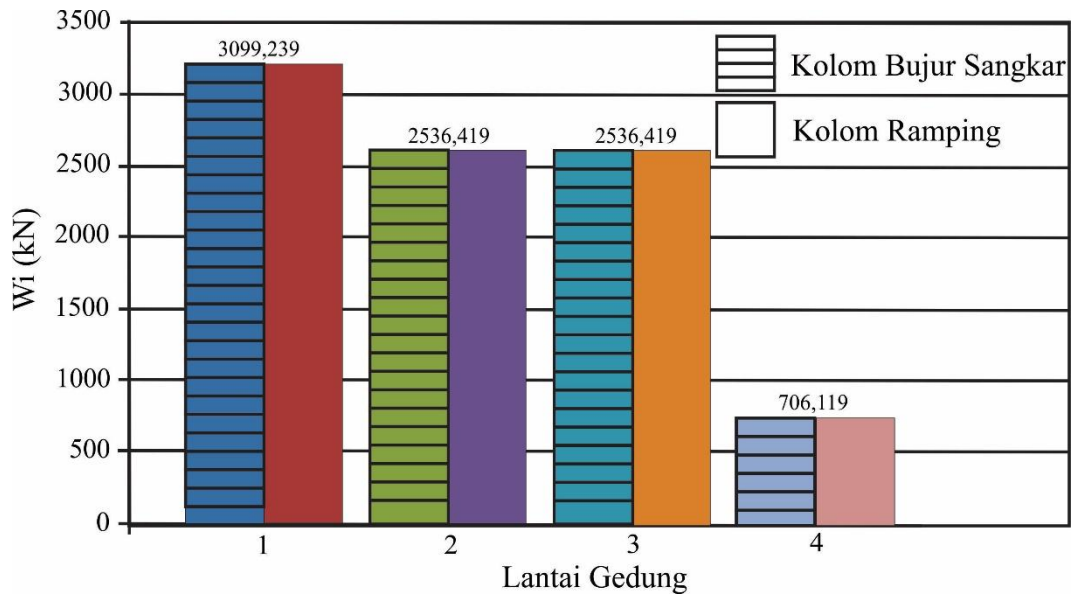
Gaya horizontal gempa dapat dilihat pada Tabel 1.5 dan Tabel 1.6.

Tabel 1.5 Distribusi Horizontal Gaya Gempa Struktur Rangka Dengan Kolom Bujur Sangkar

Tingkat ke i	W_i	H	H^k	$W \cdot H^k$	C_{vx}	F_i
	kN	(m)	(m)	(kN.w)	(persen)	kN
1	3099,239	3,2	3,130	9702,189	16,93 %	118,964
2	2536,419	6,4	6,179	15674,131	27,34 %	192,189
3	2536,419	9,6	9,198	23331,939	40,70 %	286,086
4	706,119	12,8	12,198	8613,670	15,03 %	105,617
Jumlah	8878,196			57321,930	100 %	702,857

Tabel 1.6 Distribusi Horizontal Gaya Gempa Struktur Rangka Dengan Kolom Pipih

Tingkat ke i	W_i	H	H^k	$W \cdot H^k$	C_{vx}	F_i
	kN	(m)	(m)	(kN.w)	(persen)	kN
1	3099,239	3,2	3,130	9702,189	16,93 %	118,964
2	2536,419	6,4	6,179	15674,131	27,34 %	192,189
3	2536,419	9,6	9,198	23331,939	40,70 %	286,086
4	706,119	12,8	12,198	8613,670	15,03 %	105,617
Jumlah	8878,196			57321,930	100 %	702,857



Gambar 1.15 Perbandingan Berat Antar Lantai Struktur Dengan Kolom Bujur Sangkar Dan Kolom Pipih

Gambar 5.15 di atas merupakan grafik perbandingan berat struktur yang diperoleh dari analisis struktur dengan kolom pipih dan kolom bujur sangkar. Berat struktur dengan kolom bujur sangkar sama besar dengan berat antar lantai struktur dengan kolom pipih, dikarenakan penampang kolom pipih dan kolom bujur sangkar memiliki luasan yang sama.

5.3 Analisis Beban Gempa

5.3.1 Analisis Beban Gempa Statik (Gaya geser dasar)

1. Analisis Beban Gempa Statik Pada Struktur Kolom Bujur sangkar

Gaya geser dasar (*base reaction*) akibat pembebanan gempa statik, ditunjukkan pada Gambar 1.16 dapat dilihat melalui menu *Display - Show Tables*, pada kotak dialog *Choose Tables for Display* pilih *Analysis Result – Struktur Output – Base Reactions*.

OutputCase Text	CaseType Text	GlobalFX KN	GlobalFY KN	GlobalFZ KN	GlobalMX KN-m	GlobalMY KN-m	GlobalMZ KN-m	GlobalX m
GEMPA X	LinStatic	-702.857	000000003167	5.684E-14	-1.137E-13	-5709.0246	4638.8549	0
GEMPA Y	LinStatic	000000003678	-702.857	9.948E-14	5709.0253	000000001364	-6185.1416	0

Gambar 1.16 Base Reaction Akibat Beban Gempa Statik Ekuivalen Pada Kolom Bujur Sangkar

Berdasarkan Gambar 5.12, gaya geser dasar (V) akibat beban gempa untuk arah x (V_x) dan arah y (V_y) adalah sebesar $V_x = V_y = 702,857$ kN.

2. Analisis Beban Gempa Statik Pada Struktur Kolom Pipih

Gaya geser dasar (*base reaction*) akibat pembebanan gempa statik, ditunjukkan pada Gambar 1.17 dapat dilihat melalui menu *Display - Show Tables*, pada kotak dialog *Choose Tables for Display* pilih *Analysis Result – Structure Output – Base Reactions*.

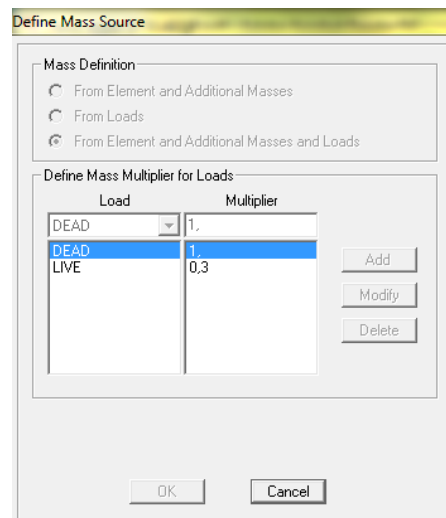
OutputCase Text	CaseType Text	GlobalFX KN	GlobalFY KN	GlobalFZ KN	GlobalMX KN-m	GlobalMY KN-m	GlobalMZ KN-m	GlobalX m
GEMPA X	LinStatic	-702.857	000000003167	5.684E-14	-1.137E-13	-5709.0246	4638.8549	0
GEMPA Y	LinStatic	000000003678	-702.857	9.948E-14	5709.0253	000000001364	-6185.1416	0

Gambar 1.17 Base Reaction Akibat Beban Gempa Statik Ekuivalen Pada Kolom Pipih

Berdasarkan Gambar 1.17, gaya geser dasar (V) akibat beban gempa untuk arah x (V_x) dan arah y (V_y) adalah sebesar $V_x = V_y = 702,857$ kN.

5.3.2 Pendefinisian Massa (*Mass Source*)

Pendefinisian massa struktur pada SAP2000 dilakukan melalui menu *Define-Mass Source*, dapat dilihat pada Gambar 5.14.



Gambar 1.18 Mass Source

Pada penelitian ini *mass source* dipilih opsi *From Element and Additional Masses and Load*, dimaksudkan elemen struktur ditambah massa tambahan dan massa dari pembebanan yang diberikan.

5.3.3 Analisis Beban Gempa Dinamik (Gaya Geser Dasar)

1. Analisis Dinamik Pada Struktur Kolom Bujur sangkar

Gaya geser dasar (*base reaction*) akibat pembebanan gempa respon spektrum (RSP) dapat dilihat pada Gambar 5.19.

OutputCase Text	Case Type Text	Step Type Text	GlobalFX KN	GlobalFY KN	GlobalFZ KN	GlobalMX KN-m	GlobalMY KN-m	GlobalMZ KN-m
RSPX	LinRespSpec	Max	863.363	253.341	4.794E-14	2221.7424	7569.7004	5562.5427
RSPY	LinRespSpec	Max	259.016	844.448	2.407E-14	7405.6068	2270.9718	6932.0341

Gambar 1.19 Base Reaction Akibat Beban Gempa Dinamik Pada Kolom Bujur Sangkar

Dari Gambar 5.19 didapat nilai gaya respon spektrum arah X (RSPX) = 863,363 kN dan respon spektrum arah Y (RSPY) = 844,449 kN

Evaluasi gempa arah x

$$F_x \text{ statik} = 703,153 \text{ kN}$$

$$F_x \text{ RSP} = 863,363 \text{ kN} > 85\% F_x \text{ statik} = 597,680 \text{ kN}$$

Cek :

V dinamik $>$ 85% V statik \rightarrow OKE

2. Analisis Dinamik Pada Struktur Kolom Pipih

Gaya geser dasar (*base reaction*) akibat pembebanan gempa respon spektrum (RSP) dapat dilihat pada Gambar 5.20.

OutputCase Text	Case Type Text	Step Type Text	GlobalFX KN	GlobalFY KN	GlobalFZ KN	GlobalMX KN-m	GlobalMY KN-m	GlobalMZ KN-m
RSPX	LinRespSpec	Max	863.363	253.341	4.794E-14	2221.7424	7569.7004	5562.5427
RSPY	LinRespSpec	Max	259.016	844.448	2.407E-14	7405.6068	2270.9718	6932.0341

Gambar 1.20 Base Reaction Akibat Beban Gempa Dinamik Pada Kolom Pipih

Dari Gambar 5.20 didapat nilai gaya respon spektrum arah X (RSPX) = 863,363 kN dan respon spektrum arah Y (RSPY) = 844,449 kN

Evaluasi gempa arah x

$$F_x \text{ statik} = 703,153 \text{ kN}$$

$$F_x \text{ RSP} = 863,363 \text{ kN} > 85\% F_x \text{ statik} = 597,680 \text{ kN}$$

Cek :

V dinamik $>$ 85% V statik \rightarrow OKE

OutputCase Text	ItemType Text	Item Text	Static Percent	Dynamic Percent
MODAL	Acceleration	UX	100	100
MODAL	Acceleration	UY	100	100
MODAL	Acceleration	UZ	0	0

Gambar 1.21 Modal Load Participation Untuk Kolom Bujur Sangkar

	OutputCase Text	ItemType Text	Item Text	Static Percent	Dynamic Percent
▶	MODAL	Acceleration	UX	100	100
	MODAL	Acceleration	UY	100	100
	MODAL	Acceleration	UZ	0	0

Record: 1 of 3

Gambar 1.22 Modal Load Participation Untuk Kolom Pipih

Dari hasil *Modal Load Participation* untuk arah X diperoleh sebesar 100% dan arah Y sebesar 100% hal ini menunjukkan bahwa nilai faktor partisipasi massa ragam efektif memenuhi dengan sesuai ketentuan SNI 1726-2012 dimana waktu partisipasi massa ragam efektif minimum sebesar 90%. LinStatic adalah analisis elastic linier statik dan LinRespSpec adalah analisis spektrum respons rencana dengan konsisi tanah sedang. Gaya gempa dari spektrum respons dinamik yang telah dikoreksi tersebut selanjutnya digunakan sebagai beban gempa desain struktur beton.

5.3.4 Simpangan Antar Lantai

Penentuan simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau. Simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat ijin (Δ_a). Pada penelitian ini, bangunan perkantoran berada pada kategori desain seismik D, sehingga simpangan antar lantai maksimum yang diijinkan sebesar Δ_a/ρ , dengan ρ adalah faktor redundansi dimana untuk struktur pada kategori desain seismik D sebesar 1,0. Contoh perhitungan simpangan antar lantai yang terjadi terhadap simpangan antar lantai maksimum yang diijinkan sebagai berikut:

Arah x

$$C_d = 5,5$$

$$I_e = 1$$

$$H_{sx} = 3200 \text{ mm}$$

$$\Delta_a = 0,02 H_{sx}$$

$$\delta_{e2} = 10,36 \text{ mm}$$

$$\delta_{e1} = 5,79 \text{ mm}$$

Simpangan antar lantai tingkat desain :

$$\Delta_2 = \frac{(\delta_{e2} - \delta_{e1}) \cdot C_d}{I_e} = \frac{(10,36 - 5,79) \cdot 5,5}{1} = 31,845 \text{ mm}$$

Simpangan antar lantai tingkat ijin :

$$\Delta_a = 0,02 \cdot H_{sx} = 0,02 \cdot 3200 = 64 \text{ mm}$$

$$\frac{\Delta_a}{\rho} = \frac{64}{1} = 64 \text{ mm}$$

Dari perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa simpangan antar lantai tingkat desain $\Delta_2 = 31,845 \text{ mm}$ lebih kecil dari simpangan antar lantai tingkat ijin

$\frac{\Delta_a}{\rho} = 64 \text{ mm}$,maka telah memenuhi persyaratan.

Arah y :

$$C_d = 5,5$$

$$I_e = 1$$

$$H_{sx} = 3200 \text{ mm}$$

$$\Delta_a = 0,02 H_{sx}$$

$$\delta_{e3} = 13,4 \text{ mm}$$

$$\delta_{e2} = 10,36 \text{ mm}$$

Simpangan antar lantai tingkat desain :

$$\Delta_3 = \frac{(\delta_{e3} - \delta_{e2}) \cdot C_d}{I_e} = \frac{(13,4 - 10,36) \cdot 5,5}{1} = 25,135 \text{ mm}$$

Simpangan antar lantai tingkat ijin :

$$\Delta_a = 0,02 \cdot H_{sx} = 0,02 \cdot 3200 = 64 \text{ mm}$$

$$\frac{\Delta_a}{\rho} = \frac{64}{1} = 64 \text{ mm}$$

Dari perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa simpangan antar lantai tingkat desain $\Delta_3 = 25,135 \text{ mm}$ lebih kecil dari simpangan antar lantai tingkat ijin

$\frac{\Delta_a}{\rho} = 64 \text{ mm}$ maka telah memenuhi persyaratan. Untuk perhitungan simpangan antar

lantai yang lain dilakukan dengan cara yang sama seperti pada Tabel 5.7 sampai Tabel 5.8.

Tabel 1.7 Simpangan Antar Lantai Desain Yang Terjadi Terhadap Simpangan Antar Lantai Ijin Arah x Pada Kolom Bujur Sangkar

Lantai	H	Defleksi Elastis Δ_e	Simpangan antar lantai tingkat desain Δ	Simpangan antar lantai tingkat ijin Δ_a/ρ	$\Delta /(\Delta_a/\rho)$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
4	3200	15,02	8,91	64	Memenuhi
3	3200	13,4	16,72	64	Memenuhi
2	3200	10,36	25,135	64	Memenuhi
1	3200	5,79	31,845	64	Memenuhi
0	3200	0	0	64	Memenuhi

Tabel 1.8 Simpangan Antar Lantai Desain Yang Terjadi Terhadap Simpangan Antar Lantai Ijin Arah Y Pada Kolom Bujur Sangkar

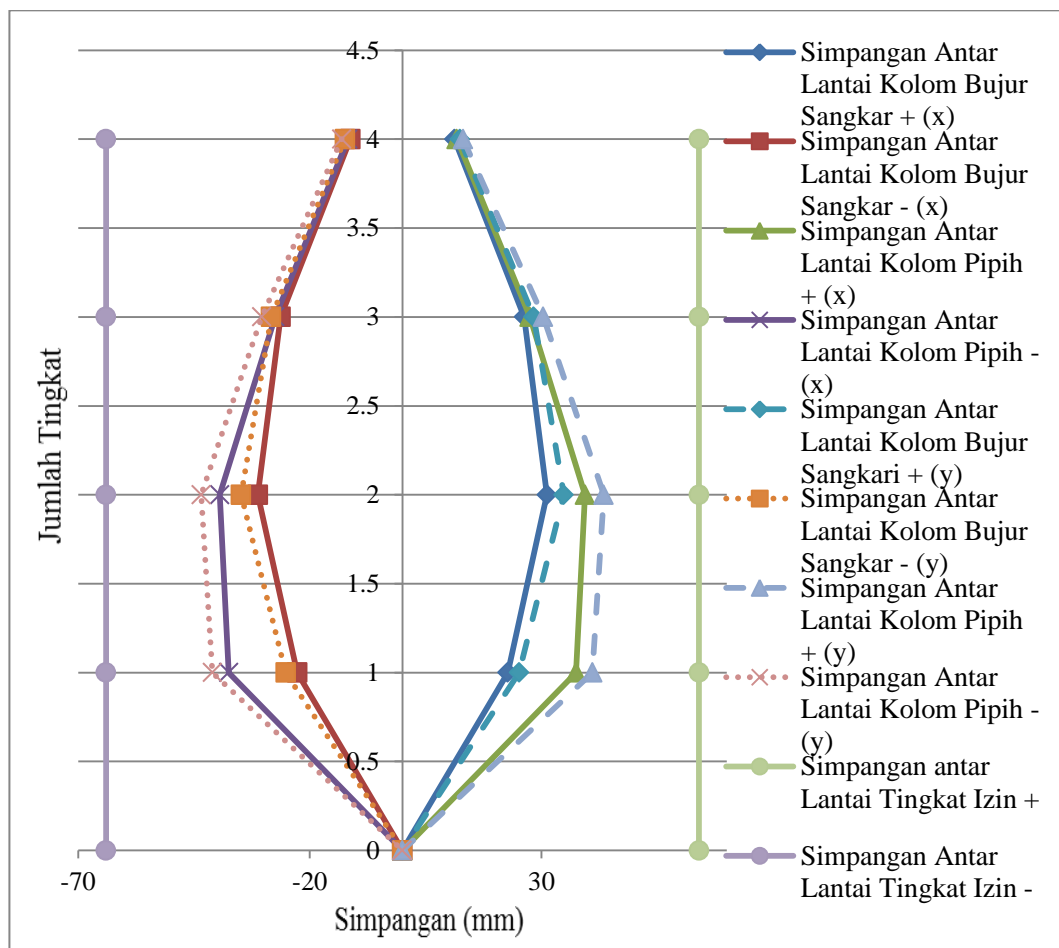
Lantai	h	Defleksi Elastis Δ_e	Simpangan antar lantai tingkat desain Δ	Simpangan antar lantai tingkat ijin Δ_a/ρ	$\Delta /(\Delta_a/\rho)$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
4	3200	19,94	18,7	64	Memenuhi
3	3200	16,54	30,745	64	Memenuhi
2	3200	10,95	37,015	64	Memenuhi
1	3200	4,22	23,21	64	Memenuhi
0	3200	0	0	64	Memenuhi

Tabel 1.9 Simpangan Antar Lantai Desain Yang Terjadi Terhadap Simpangan Antar Lantai Ijin Arah X Pada Kolom Pipih

Lantai	H	Defleksi Elastis Δ_e	Simpangan antar lantai tingkat desain Δ	Simpangan antar lantai tingkat ijin Δ_a/ρ	$\Delta /(\Delta_a/\rho)$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
4	3200	21,655	12,2925	64	Memenuhi
3	3200	19,42	28,8145	64	Memenuhi
2	3200	14,181	41,0465	64	Memenuhi
1	3200	6,718	36,949	64	Memenuhi
0	0	0	0	64	Memenuhi

Tabel 1.10 Simpangan Antar Lantai Desain Yang Terjadi Terhadap Simpangan Antar Lantai Ijin Arah Y Pada Kolom Pipih

Lantai	H	Defleksi Elastis Δ_e	Simpangan antar lantai tingkat desain Δ	Simpangan antar lantai tingkat ijin Δ_a/ρ	$\Delta /(\Delta_a/\rho)$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
4	3200	26,0844	14,93635	64	Memenuhi
3	3200	23,3687	34,81225	64	Memenuhi
2	3200	17,0392	49,4791	64	Memenuhi
1	3200	8,043	44,2365	64	Memenuhi
0	0	0	0	64	Memenuhi



Gambar 1.23 Simpangan Antar Lantai Desain Yang Terjadi Terhadap Simpangan Antar Lantai Ijin Arah X Dan Y Untuk Struktur Sistem Bujur sangkar Dan Kolom Pipih

Tabel 1.11 Perbandingan Simpangan Yang Terjadi Pada Kolom Bujur Sangkar Dan Kolom Pipih

Jenis Struktur	Simpangan Arah x (mm)	Simpangan Arah y (mm)
Kolom Bujur sangkar	31,845	34,793
Kolom Pipih	41,046	49,479

Gambar 5.23 di atas merupakan simpangan struktur yang diperoleh dari analisis struktur dengan kolom pipih dan kolom bujur sangkar pada arah x dan arah y. Simpangan pada gambar tersebut diperoleh dari data simpangan yang berada di kolom-kolom pojok atau terluar dari struktur tiap lantai yang ditinjau pada arah x dan y. Simpangan maksimal yang terjadi pada stuktur dengan kolom bujur sangkar untuk sumbu x sebesar 31,536 mm, dan pada sumbu y sebesar 34,793 mm Sedangkan pada struktur dengan kolom pipih memiliki Simpangan maksimal struktur pada sumbu x sebesar 41,046 mm, dan pada sumbu y sebesar 49,479 mm. Sehingga dapat dilihat simpangan terbesar terjadi pada struktur dengan menggunakan kolom pipih. Simpangan yang terjadi pada struktur dengan kolom pipih lebih besar 23,17% (untuk arah x) dan 30,32% (untuk arah y) dari struktur dengan kolom bujur sangkar.

5.4 Perencanaan Pelat

Pelat merupakan suatu struktur yang berfungsi sebagai penahan beban gravitasi yang nantinya akan disalurkan ke balok, kolom, dan fondasi. Pada penelitian ini, perencanaan pelat menggunakan $f'_c = 27,5$ MPa dan $f_y = 320$ MPa . Berikut adalah contoh analisis perencanaan pelat lantai tipe 1.

1. Perhitungan pembebanan pelat

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

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

$$\frac{l_y}{l_x} = \frac{4000}{4000} = 1 \leq 2 \text{ (Pelat dua arah)}$$

$$q_d = 0,4536 \text{ t/m}^2$$

$$q_l = 0,25 \text{ t/m}^2$$

perhitungan beban ultimate (q_u) :

$$\begin{aligned} q_u &= 1,2 \cdot q_d + 1,6 \cdot q_t \\ &= 1,2 (0,4536) + 1,6 (0,25) = 0,9443 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Besar momen lentur tumpuan dan lapangan dalam arah x dan y didapat dengan persamaan :

$$M = 0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$$

Dengan X adalah koefisien momen yang bergantung pada $\frac{l_y}{l_x}$ dan jenis tumpuan tepi. Pada penelitian ini digunakan jenis tumpuan tepi terjepit penuh, dimana pelat didukung oleh balok-balok yang sangat kaku pada tepi-tepinya.

Nilai X_{ly} , X_{lx} , X_{ty} , X_{tx} , untuk pelat dengan jenis tumpuan tepi jepit penuh pada keempat sisi berturut-turut sebesar 36, 36, 36, 36

$$Ml_x = 0,001 \cdot 0,9443 \cdot 3,75^2 \cdot 36 = 0,4780 \text{ tm}$$

$$Ml_y = 0,001 \cdot 0,9443 \cdot 3,75^2 \cdot 36 = 0,4780 \text{ tm}$$

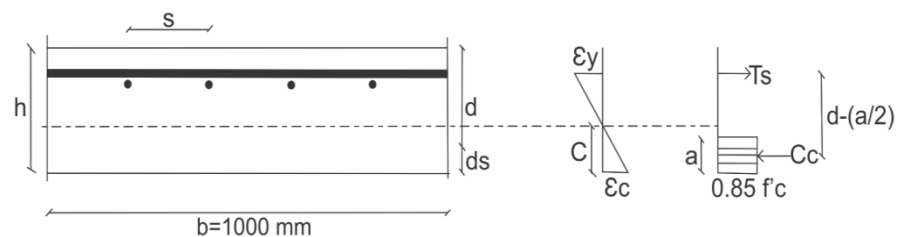
$$Mt_x = 0,001 \cdot 0,9443 \cdot 3,75^2 \cdot 36 = 0,4780 \text{ tm}$$

$$Mt_y = 0,001 \cdot 0,9443 \cdot 3,75^2 \cdot 36 = 0,4780 \text{ tm}$$

2. Desain penulangan pelat tumpuan arah x

a. Perencanaan penulangan

Digunakan diameter tulangan pokok (ϕ pokok) sebesar 10 mm, tebal selimut beton sebesar 20 mm dan tebal pelat lantai tipe 1 sebesar 125 mm.



Gambar 1.24 Diagram Tegangan Regangan Daerah Tumpuan Arah X

$$f_c = 27,5 \text{ MPa} \rightarrow \beta_1 = 0,85$$

$$\epsilon_y = \frac{fy}{Es} = \frac{320}{200000} = 0,0016$$

Untuk menentukan nilai ϕ berdasarkan pada nilai ϵ_t yang dapat dilihat pada grafik variasi ϕ pada SNI 2847-2013.

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{fy} = \frac{1,4}{320} = 0,0043$$

$$\rho_{\min} = \frac{\sqrt{f'c}}{4fy} = \frac{\sqrt{27,5}}{4 \cdot 320} = 0,00409$$

$$d_s = sb + (0,5 \cdot \phi_{\text{pokok}}) = 20 + (0,5 \cdot 10) = 25 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s = 120 - 25 = 95 \text{ mm}$$

$$M_u = 0,4780 \text{ tm} = 4.689 \text{ kNm}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{0,4780}{0,9} = 0,5311 \text{ tm} = 5,2108 \text{ kNm}$$

Gaya Desak

$$C_c = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 1000 = 23375a$$

$$M_n = C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Dari persamaan diatas dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua atau persamaan ABC, maka didapat nilai a sebesar 2,6697 mm.

$$\text{Letak garis netral, } c = \frac{a}{\beta} = \frac{2,6697}{0,85} = 2,795 \text{ mm}$$

Periksa regangan tulangan tarik

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{d-c}{c} \cdot \epsilon_c \\ &= \frac{95-3,1408}{3,1408} \cdot 0,003 = 0,09894 > \epsilon_y \text{ (baja tarik sudah leleh)} \end{aligned}$$

Keseimbangan gaya dalam,

$$C_c = T_s$$

$$C_c = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b = 0,85 \cdot 27,5 \cdot 2,6697 \cdot 1000 = 55546,029 \text{ N}$$

$$A_s = \frac{T_s}{fy} = \frac{55546,029}{320} = 173,581 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{173,581}{1000 \cdot 95} = 0,00182 < \rho_{\min} = 0,0043$$

Apabila nilai $\rho > \rho_{\min}$, maka digunakan nilai ρ , tapi jika nilai $\rho < \rho_{\min}$ maka digunakan nilai ρ_{\min} , sehingga A_s pakai dapat dicari dengan persamaan :

$$A_s \text{ pakai} = \rho \cdot b \cdot d = 0,0043 \cdot 1000 \cdot 95 = 415,625 \text{ mm}^2$$

Perencanaan tulangan pokok,

$$A_{1d} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 10^2 = 78,5 \text{ mm}^2$$

$$s = \frac{A_{1d} \cdot b}{A_s} = \frac{78,5 \cdot 1000}{415,625} = 188,96 \text{ mm}$$

dipakai jarak tulangan (s) = 180 mm

b. Kontrol Kapasitas

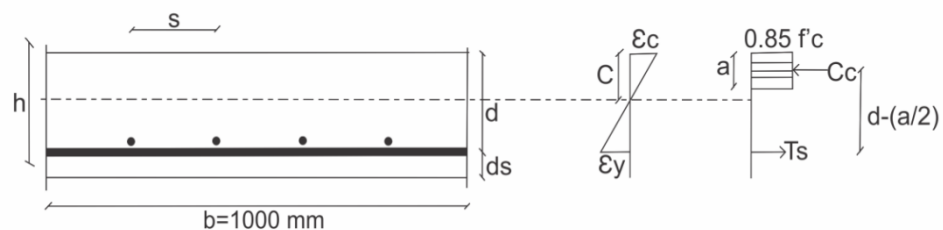
$$A_s \text{ terpasang} = \frac{A_{1d} \cdot b}{s} = \frac{78,5 \cdot 1000}{180} = 436,332 \text{ mm}^2$$

$$a_{\text{terpasang}} = \frac{A_s \text{ terpasang} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{436,32 \cdot 320}{0,85 \cdot 27,5 \cdot 1000} = 5,97 \text{ mm}$$

3. Desain penulangan pelat tumpuan arah x

a. Perencanaan penulangan

Digunakan diameter tulangan pokok (\emptyset pokok) sebesar 10 mm, tebal selimut beton sebesar 20 mm dan tebal pelat lantai tipe 1 sebesar 125 mm.



Gambar 1.25 Diagram Tegangan Regangan Daerah Lapangan Arah X

$$f'_c = 27,5 \text{ MPa} \rightarrow \beta_1 = 0,85$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{320}{200000} = 0,0016$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{320} = 0,0043$$

$$\rho_{\min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4 f_y} = \frac{\sqrt{27,5}}{4 \cdot 320} = 0,00409$$

$$d_s = sb + (0,5 \cdot \phi_{\text{pokok}}) = 20 + (0,5 \cdot 10) = 25 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s = 120 - 25 = 95 \text{ mm}$$

$$M_u = 0,4780 \text{ tm} = 4.689 \text{ kNm}$$

$$M_n = \frac{Mu}{\phi} = \frac{0,4780}{0,9} = 0,5311 \text{ tm} = 5,2108 \text{ kNm}$$

Gaya Desak

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 1000 = 23375a$$

$$M_n = C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Dari persamaan diatas dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua atau persamaan ABC, maka didapat nilai a sebesar 2,6697 mm

$$\text{Letak garis netral, } c = \frac{a}{\beta} = \frac{2,6697}{0,85} = 2,795 \text{ mm}$$

Periksa regangan tulangan tarik

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{d-c}{c} \cdot \epsilon_c \\ &= \frac{95-2,795}{2,795} \cdot 0,003 = 0,09894 > \epsilon_y \text{ (baja tarik sudah leleh)} \end{aligned}$$

Keseimbangan gaya dalam,

$$C_c = T_s$$

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b = 0,85 \cdot 27,5 \cdot 2,6697 \cdot 1000 = 55546,029 \text{ N}$$

$$A_s = \frac{T_s}{f_y} = \frac{55546,029}{320} = 173,581 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{173,581}{1000 \cdot 95} = 0,00182 < \rho_{\min} = 0,0043$$

Apabila nilai $\rho > \rho_{\min}$, maka digunakan nilai ρ , tapi jika nilai $\rho < \rho_{\min}$ maka digunakan nilai ρ_{\min} , sehingga A_s pakai dapat dicari dengan persamaan :

$$A_s \text{ pakai} = \rho \cdot b \cdot d = 0,0043 \cdot 1000 \cdot 95 = 415,625 \text{ mm}^2$$

Perencanaan tulangan pokok,

$$A_{1d} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 10^2 = 78,5 \text{ mm}^2$$

$$s = \frac{A_{1d} \cdot b}{A_s} = \frac{78,5 \cdot 1000}{415,625} = 188,96 \text{ mm}$$

dipakai jarak tulangan (s) = 180 mm

b. Kontrol Kapasitas

Berdasarkan Pasal 9.3. 2. 2 didapatkan ϵ_s sebesar $0,09894 > 0,005$ maka dipakai nilai faktor reduksi kekuatan sebesar 0,9

$$A_s \text{ terpasang} = \frac{A_{1d} \cdot b}{s} = \frac{78,5 \cdot 1000}{180} = 436,332 \text{ mm}^2$$

$$a_{\text{terpasang}} = \frac{A_s \text{ terpasang} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{436,32 \cdot 320}{0,85 \cdot 27,5 \cdot 1000} = 5,97 \text{ mm}$$

$$M_n = A_s \text{ terpasang} \cdot f_y \left(d - \frac{a_{\text{terpasang}}}{2} \right)$$

$$= 436,332 \cdot 320 \left(95 - \frac{5,97}{2} \right) = 12847486 \text{ Nmm} = 12,847486 \text{ kNm}$$

$$M_u = \phi \cdot M_n = 0,9 \cdot 12,841201 = 11,5627 \text{ kNm} > M_u = 4,6897 \rightarrow \text{oke}$$

c. Perencanaan penulangan susut

Digunakan diameter tulangan susut (ϕ susut) sebesar 8 mm

$$A_{s_{st}} = 0,0018 \cdot b \cdot h = 0,0018 \cdot 1000 \cdot 120 = 216 \text{ mm}^2$$

$$A_{1d} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 8^2 = 50,2655 \text{ mm}^2$$

$$s = \frac{A_{1d} \cdot b}{A_s} = \frac{50,2655 \cdot 1000}{216} = 232,7105 \text{ mm}$$

dipakai jarak tulangan (s) = 230 mm, jadi dipakai P8-230.

Untuk perencanaan penulangan pelat yang lain, daerah tumpuan dan lapangan dilakukan dengan cara yang sama. Berikut hasil rekaman perencanaan penulangan pelat lantai dan pelat atap yang dapat dilihat pada Table 5.12.

Tabel 1.12 Rekapan Hasil Perencanaan Penulangan Pelat Lantai Dan Pelat Atap

Nama	Jenis	Tulangan	M_{lx}	M_{tx}	M_{ly}	M_{ty}
Pl	2 arah	Tul Pokok	P10-180	P10-180	P10-180	P10-180
		Tul Susut		P8-230		P8-230
Pa	2 arah	Tul Pokok	P10-210	P10-210	P10-210	P10-210
		Tul Susut		P8-250		P8-250

5.5 Perencanaan Balok

Perencanaan balok pada penelitian ini meliputi, perencanaan tulangan lentur, perencanaan momen tersedia balok dan perencanaan momen kapasitas balok. Berikut contoh perhitungan perencanaan balok B1 25/35 daerah tumpuan pada bangunan struktur gedung beton bertulang sistem rangka.

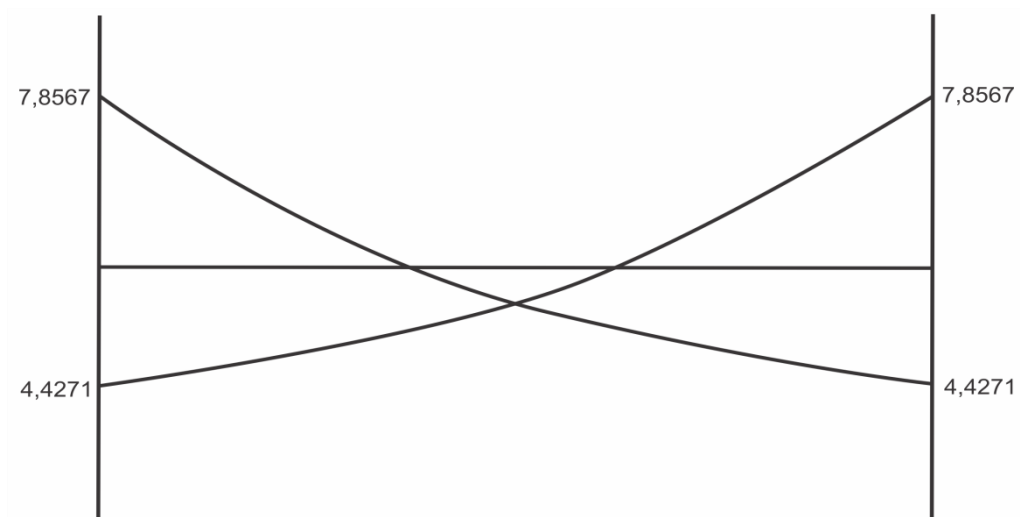
5.5.1 Hasil Analisis Struktur

Dalam mendesain balok, maka perlu dilakukan perencanaan momen ultimit pada balok yang akan didesain, hal itu dilakukan agar diketahui redistribusi momen atau tidak. Redistribusi momen dilakukan untuk meningkatkan efisiensi desain elemen dengan mengurangi momen negatif dan menaikkan momen positif. Dari hasil analisis struktur menggunakan program SAP2000. didapatkan momen ultimit pada balok B1 sebesar :

$$M_u^- = 7,546 \text{ tm}$$

$$M_u^+ = 2,245 \text{ tm}$$

Untuk nilai momen negatif dan momen positif pada daerah tumpuan kiri dan kanan diambil sama.



Gambar 1.26 Momen Pada Balok 1

$$\sum M = 2 \cdot (M_u^- + M_u^+) = 2 \cdot (7,546 + 2,245) = 24,567 \text{ tm}$$

$$M_u^- \text{ pakai} = 6,591 \text{ tm}$$

$$Mu^+ = \frac{\Sigma M - (2 \cdot Mu^- \text{ pakai})}{2} = \frac{24,567 - (2 \cdot 6,591)}{2} = 3,301 \text{ tm}$$

Cek syarat : $Mu^+ = 3,301 > 50 \% Mu^- = 3,244 \text{ tm} \rightarrow \text{oke}$

$$\% \text{ Redistribusi} = \left(1 - \frac{6,591}{7,546}\right) \cdot 100 = 14,003 \%$$

Dari perhitungan diatas, didapat bahwa % redistribusi masih memenuhi persyaratan SNI 2847-2013 (Pasal 8.4.1) bahwa % redistribusi $< 20\%$

5.5.2 Perencanaan tulangan lentur balok

Hasil perhitungan redistribusi momen dipakai untuk mendesain tulangan lentur balok, dimana besarnya Mu^- dan Mu^+ berturut-turut adalah 6,591 tm dan 3,301 tm. Pada perencanaan balok digunakan mutu beton f'_c 27,5 MPa. Baja beton yang dipakai mempunyai tegangan leleh f_y 400 MPa, dengan modulus elastik 200000 MPa. Dipakai diameter baja tulangan 13 mm, diameter baja tulangan sengkang 10 mm, selimut beton sebesar 40 mm, dan jarak antara tulangan sebesar 25 mm, dan nilai regangan desak ultimit beton ϵ_c sebesar 0,003.

1. Perhitungan balok

$$M_n = \frac{Mu^-}{\phi} = \frac{6,591}{0,9} = 7,2109 \text{ kN}$$

$$f'_c = 27,5 \text{ MPa} \rightarrow \beta_1 = 0,85$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{\epsilon_s} = \frac{400}{200000} = 0,002$$

$$m = \frac{400}{0,85 \cdot f'_c} = \frac{400}{0,85 \cdot 27,5} = 17,1123$$

$$\begin{aligned} \rho_b &= \frac{(0,85 \cdot f'_c)}{f_y} \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{(600 + f_y)}\right) \\ &= \frac{(0,85 \cdot 27,5)}{400} \cdot 0,85 \cdot \left(\frac{600}{(600 + 400)}\right) = 0,029803 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_m &= \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1}{\left(\frac{0,005}{0,008} + 1\right) \cdot 400} = \frac{0,85 \cdot 27,5 \cdot 0,85}{\left(\frac{0,005}{0,008} + 1\right) \cdot 400} \\ &= 0,0306 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_b &= \rho \cdot f_y \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \rho_m \cdot m\right) \\ &= 0,0298 \cdot 400 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot 0,0298 \cdot 17,1123\right) \\ &= 8,881 \text{ N / mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_m &= \rho \cdot f_y \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \rho_m \cdot m\right) \\
 &= 0,0306 \cdot 400 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot 0,0306 \cdot 17,1123\right) \\
 &= 9,029 \text{ N / mm}^2
 \end{aligned}$$

$$M_n = R_m \cdot b \cdot h^2$$

$$7,2109 \text{ tm} = 9,0329 \cdot b \cdot (2b)^2$$

$$7,2109 \text{ tm} = 9,029 \cdot b \cdot 4b^2$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{M_n}{4 \cdot R_m}} = \sqrt[3]{\frac{7,2109 \cdot 10^7}{4 \cdot 9,029}} = 125,92 \text{ mm}$$

Dipakai $b = 250 \text{ mm}$

$$h_t = 350 \text{ mm}$$

kontrol struktur rangka pemikul momen khusus :

$$1. P_u < \frac{A_g \cdot f'_c}{10} \rightarrow 0 < \frac{250 \cdot 350 \cdot 27,5}{10} = 240625 \text{ N} = 24,0625 \text{ t} \rightarrow \text{Oke}$$

$$2. \text{Bentang bersih komponen struktur } (l_n) = 3750 \text{ mm} > 4 h_{\text{efektif}} \\ 350 = 1400 \text{ mm} \rightarrow \text{Oke}$$

$$3. b > 0,3 h \rightarrow 250 \text{ mm} > 0,3 \cdot 350 = 105 \text{ mm} \rightarrow \text{Oke}$$

$$b \geq 250 \text{ mm} \rightarrow 250 \text{ mm} \geq 250 \text{ mm} \rightarrow \text{Oke}$$

Tulangan yang dibutuhkan untuk momen negaif terdiri dari 2 lapis momen positif terdiri dari satu lapis.

$$\begin{aligned}
 d_s &= sb + \phi_{\text{sengkang}} + \phi_{\text{pokok}} + 0,5 \cdot \text{jarak tulangan} \\
 &= 40 + 10 + 13 + 0,5 \cdot 25 = 75,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_{s1} &= sb + \phi_{\text{sengkang}} + 0,5 \phi_{\text{pokok}} \\
 &= 40 + 10 + 0,5 \cdot 13 = 56,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$d = h_t - d = 350 - 75,5 = 274,5 \text{ mm}$$

$$d_t = h_t - d' = 350 - 56,5 = 293,5 \text{ mm}$$

2. Komponen tulangan rangkap

Dipakai nilai $R_1 = 0,2 R_b$

$$R_1 = 0,2 \cdot 8,8807 = 1,77614$$

$$M_1 = R_1 \cdot b \cdot h^2 = 1,77614 \cdot 250 \cdot 274,5^2 = 33460527,50 \text{ Nmm}$$

$$M_1 = C_c \cdot \left(h - \frac{a}{2} \right)$$

$$33460527,50 = 0,85 \cdot f_c \cdot a \cdot b \cdot \left(274,5 - \frac{a}{2} \right)$$

$$33460527,50 = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 250 \cdot \left(274,5 - \frac{a}{2} \right)$$

$$33460527,50 = 5843,750 a \cdot \left(271,5 - \frac{a}{2} \right)$$

$$33460527,50 = 1604109 a - 2921,875 a^2$$

Dari persamaan diatas, dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua dan persamaan ABC, maka didapatkan nilai a sebesar 21,718 mm.

$$\text{Letak garis netral, } c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{21,718}{0,85} = 25,551 \text{ mm}$$

Kontrol regangan baja desak,

$$\varepsilon_s = \frac{ds_1 - c}{c} \cdot \varepsilon_c = \frac{58 - 25,551}{25,551} \cdot 0,003 = 0,003633$$

Sehingga regangan baja = 0,00389 > ε_y (baja desak belum leleh)

Maka gunakan $f_y = 400 \text{ MPa}$

Keseimbangan gaya dalam,

$$C_c = T_s$$

$$0,85 \cdot f_c \cdot a \cdot b = A_s \cdot f_y$$

$$A_s = \frac{0,85 \cdot 27,5 \cdot 21,718 \cdot 250}{400} = 317,292 \text{ mm}^2$$

Menentukan jumlah tulangan sebelah.

$$A_{1d} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2 = 132,7322 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{A_s}{A_{1d}} = \frac{317,292}{132,7322} = 2,390 \text{ buah}$$

Dipakai jumlah tulangan sebelah = 3 buah tulangan D13

$$A_{s \text{ terpasang}} = n \cdot A_{1d} = 3 \cdot 132,7322 = 398,196 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c \cdot b} = \frac{398,196 \cdot 400}{0,85 \cdot 27,5 \cdot 250} = 27,2562 \text{ mm}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{27,2562}{0,85} = 32,066 \text{ mm}$$

Kontrol regangan baja desak.

$$\varepsilon_s = \frac{ds1-c}{c} \cdot \varepsilon_c = \frac{58 - 32,066}{32,066} \cdot 0,003 = 0,002285$$

Sehingga regangan baja = $0,002285 < \varepsilon_y$ (baja desak sudah leleh)

$$\begin{aligned} M_{1p} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \\ &= 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 27,2562 \cdot 250 \cdot \left(274,5 - \frac{27,2562}{2} \right) \\ &= 41551345,019 \text{ Nmm} = 4,1551345 \text{ tm} \end{aligned}$$

$$M_2 = M_n - M_{1p} = 8,7297 - 4,1551345 = 4,5745 \text{ tm}$$

$$T_{s2} = \frac{M_2}{h - d'} = \frac{4,5745 \cdot 10^3}{274,5 - 58} = 20,9840 \text{ t}$$

$$T_{s2} = C_s$$

$$20,9840 = A_{s2} \cdot f_y$$

$$A_{s2} = \frac{20,9840 \cdot 10^4}{400} = 524,6023 \text{ mm}^2$$

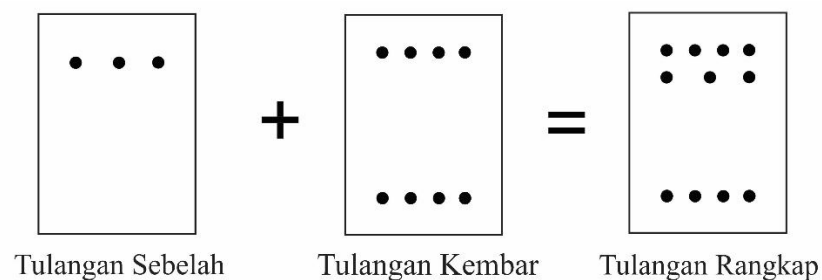
Menentukan jumlah tulangan rangkap,

$$A_{1d} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2 = 132,7322 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{A_s}{A_{1d}} = \frac{524,6023}{132,7322} = 3,95233 \text{ buah}$$

Dipakai jumlah tulangan sebelah = 4 buah tulangan D13

Dari perhitungan diatas, dapat disimpulkan bahwa :



Gambar 1.27 Tulangan Rangkap

$$\begin{aligned} A_{s \max} &= 0,3643 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot (b \cdot d) \\ &= 0,3643 \cdot 0,85 \cdot \frac{27,5}{400} \cdot (250 \cdot 274,5) \end{aligned}$$

$$= 1444,976 \text{ mm}^2$$

$$A_{a, \text{tps}} = 7D13 = 7 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2 = 929,126 \text{ mm}^2$$

$$A_{a \text{ min}} = 4D13 = 4 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2 = 530,929 \text{ mm}^2$$

$$A_{a \text{ min}} < A_{a, \text{tps}} < A_{s \text{ max}} \text{ (ok)}$$

Kontrol jarak antar tulangan

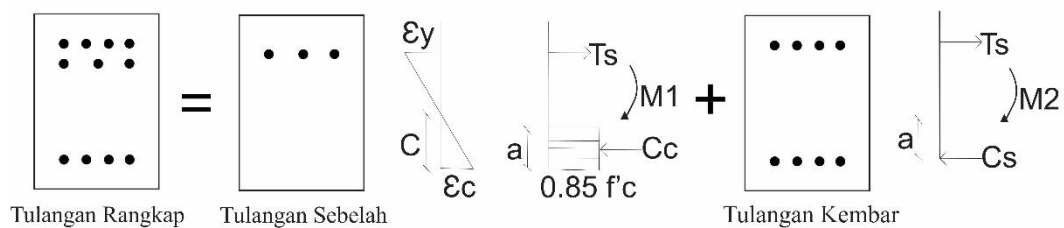
$$s = \frac{b - 2(\text{sb} + \text{ø sengkang}) - n \text{ tulangan} \cdot \text{ø pokok}}{n \text{ tulangan} - 1}$$

$$= \frac{250 - 2(40 + 10) - 4 \cdot 13}{4 - 1} = 32,667 \text{ mm} > 25 \text{ mm} \rightarrow \text{Oke}$$

5.5.3 Perencanaan momen tersedia balok

1. Kontrol momen tersedia negative balok

Pemeriksaan kuat lentur momen negatif, umumnya diasumsikan baja tulangan desak belum leleh.



Gambar 1.28 Distribusi Tegangan Regangan Momen Tersedia Negatif

$$A_s = 7 \cdot 132,7322 = 928,1260 \text{ mm}^2$$

$$A_{s'} = 4 \cdot 132,7322 = 530,9291 \text{ mm}^2$$

Keseimbangan gaya-gaya horizontal

$$T_{s2} + T_{s2} = C_c + C_s$$

$$A_s \cdot f_y = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b + A_{s'} \cdot \frac{a - \beta_1 \cdot d'}{a} \cdot \epsilon_c \cdot \epsilon_s$$

$$928,1260 \cdot 400 = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 250 + 928,1260 \cdot \frac{a - 0,85 \cdot 56,5}{a} \cdot 0,003 \cdot 200000$$

$$371650,4109 a = 5843,75 a^2 + 318557,4951 a - 35775997,68$$

$$5843,75 a^2 + 53092,915 a - 35775997,68$$

Dari persamaan diatas, dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua dan persamaan ABC, maka didapatkan nilai a sebesar 82,9182 mm.

$$\text{Letak garis netral, } c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{82,9182}{0,85} = 97,5509 \text{ mm}$$

Kontrol regangan baja desak,

$$\varepsilon_s = \frac{d_{s1}-c}{c} \cdot \varepsilon_c = \frac{56,5 - 97,5509}{97,5509} \cdot 0,003 = 0,0001262 < \varepsilon_y \text{ (baja desak belum leleh)}$$

Kontrol Tension Failur / Transition Failur

$$\varepsilon_t = \frac{d-c}{c} \cdot \varepsilon_c = \frac{274,5 - 97,5509}{97,5509} \cdot 0,003 = 0,005441$$

Jika , $\varepsilon_t \geq 0.005$ maka $\phi = 0.9$

Jika , $0.002 \leq \varepsilon_t < 0.005$ maka $\phi = 0.65 + (250/3(\varepsilon_t - 0.002))$

Jika , $0.002 \leq \varepsilon_t < 0.005$ maka $\phi = 0.75 + + 50 (\varepsilon_t - 0.002)$

Momen yang mampu dikerjakan :

$$\begin{aligned} M_1 &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \\ &= 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 82,9182 \cdot 250 \cdot \left(274,5 - \frac{82,9182}{2} \right) \\ &= 85824341,66 \text{ Nmm} = 8,5824 \text{ tm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= A_s \cdot f_y \cdot (d - d_{s1}) \\ &= 1005,309 \cdot 400 (271,5 - 58) \\ &= 34341377,6149 \text{ Nmm} = 3,4341 \text{ tm} \end{aligned}$$

$$M_n = M_1 + M_2 = 8,5824 + 3,4341 = 12,0165 \text{ tm}$$

$$M_t^- = \phi \cdot M_n = 0,9 \cdot 12,0165 = 10,8149 \text{ tm}$$

$$M_t^- = 10,8149 \text{ tm} > M_u^- = 7,8567 \text{ tm} \rightarrow \text{Oke}$$

2. Kontrol Momen Tersedia Positif Balok

Pemeriksaan kuat lentur momen positif dapat dihitung dengan cara yang sama seperti kuat lentur momen negatif, hanya saja penempatan tulangan dibalik. Hal ini terjadi karena tulangan tarik (negatif) berganti fungsi sebagai tulangan desak dan sebaliknya. Kondisinya akan sama dengan kuat lentur momen negative umumnya diasumsikan baja tulangan desak belum leleh.

$$A_s = 7.132,7322 = 928,1260 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 4.132,7322 = 530,9291 \text{ mm}^2$$

Keseimbangan gaya-gaya horizontal

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s' \cdot f_y = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b + A_s' + \frac{a - \beta_1 \cdot d_s}{a} \cdot \epsilon_c \cdot \epsilon_s$$

$$530,9291 \cdot 400 = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 250 + 928,1260 \cdot \frac{a - 0,85 \cdot 57,5}{a} \cdot 0,003 \cdot 200000$$

$$212371,6634 a = 5843,75 a^2 + 557475,6164 a - 26772766,48$$

$$5843,75 a^2 + 345103,953 a - 26772766,48$$

Dari persamaan diatas, dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua dan persamaan ABC, maka didapatkan nilai a sebesar 103.374 mm.

$$\text{Letak garis netral, } c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{103.374}{0,85} = 121,6166 \text{ mm}$$

Kontrol regangan baja desak,

$$\epsilon_s = \frac{c - d'}{c} \cdot \epsilon_c = \frac{121,6166 - 57,5}{121,6166} \cdot 0,003 = 0,00113 < \epsilon_y \text{ (baja desak belum leleh)}$$

$$f_s = \epsilon_s \cdot E_s = 0,00113 \cdot 200000 = 227,5182 \text{ N/mm}^2$$

Kontrol *Tension Failur / Transition Failur*

$$\epsilon_t = \frac{d - c}{c} \cdot \epsilon_c = \frac{274,5 - 121,6166}{121,6166} \cdot 0,003 = 0,0037712$$

Jika , $\epsilon_t \geq 0.005$ maka $\phi = 0.9$

Jika , $0.002 \leq \epsilon_t < 0.005$ maka $\phi = 0.65 + (250/3(\epsilon_t - 0.002))$

Jika , $0.002 \leq \epsilon_t < 0.005$ maka $\phi = 0.75 + 50(\epsilon_t - 0.002)$

Momen yang mampu dikerjakan :

$$M_1 = C_c \cdot (d_t - \frac{a}{2})$$

$$= 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \cdot (d_t - \frac{a}{2})$$

$$= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 103.374 \cdot (293,5 - \frac{103.374}{2})$$

$$= 131692244,6 \text{ Nmm} = 13,169 \text{ tm}$$

$$M_2 = A_s \cdot f_s \cdot (h^+ - d')$$

$$= 928,1260 \cdot 227,5182 \cdot (293,5 - 75,5)$$

$$= 46083693,09 \text{ Nmm} = 4,6083 \text{ tm}$$

$$M_n = M_1 + M_2 = 13,169 + 4,6083 = 17,778 \text{ tm}$$

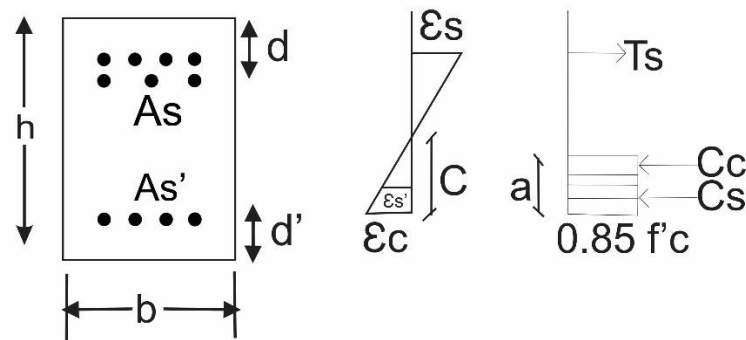
$$M_t^+ = \phi \cdot M_n = 0,797 \cdot 17,778 = 14,179 \text{ tm}$$

$$M_t^+ = 14,179 \text{ tm} > M_u^- = 7,8567 \text{ tm} \rightarrow \text{Oke}$$

5.5.4 Perencanaan momen kapasitas balok

1. Kontrol momen kapasitas negatif balok

Pada perencanaan momen kapasitas negatif balok, tulangan desak diasumsikan sudah leleh dan digunakan nilai overstreng factor sebesar 1.25.



Gambar 1.29 Distribusi Tegangan Regangan Momen Tersedia Negatif

$$A_s = 7 \cdot 132,7322 = 928,1260 \text{ mm}^2$$

$$A_{s'} = 4 \cdot 132,7322 = 530,9291 \text{ mm}^2$$

Keseimbangan gaya-gaya horizontal

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_{s'} \cdot f_y \cdot \phi_o = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b + A_s \cdot f_y$$

$$928,1260 \cdot 400 \cdot 1,25 = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 250 + 530,9291 \cdot 400$$

$$a = \frac{212371,6634 - 212371,6634}{5843,75} = 43,155 \text{ mm}$$

$$\text{Letak garis netral, } c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{43,155}{0,85} = 50,7714 \text{ mm}$$

Kontrol regangan baja desak,

$$\epsilon_s = \frac{c - d_{s1}}{c} \cdot \epsilon_c = \frac{50,7714 - 56,5}{50,7714} \cdot 0,003 = 0,000338 < \epsilon_y \text{ (baja desak belum leleh)}$$

Dari perhitungan regangan baja desak, didapatkan $\epsilon_s < \epsilon_y$, maka tulangan baja desak belum leleh, sehingga harus kembali lagi pada keseimbangan gaya-gaya.

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s' \cdot f_y \cdot \phi_o = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b + A_s' + \frac{a - \beta_1 \cdot ds1}{a} \cdot \epsilon_c \cdot \epsilon_s$$

$$928,1260 \cdot 400 \cdot 1,25 = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 250 + 530,9291 \cdot \frac{a - 0,85 \cdot 56,5}{a} \cdot 0,003 \cdot 200000$$

$$464563,0136 a = 5843,75 a^2 + 318557,4951 a - 15298723,7$$

$$5843,75 a^2 - 146005,518 a - 15298723,7$$

Dari persamaan diatas, dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua dan persamaan ABC, maka didapatkan nilai a sebesar 65,1614 mm.

$$\text{Letak garis netral, } c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{65,1614}{0,85} = 76,660 \text{ mm}$$

Kontrol regangan baja desak,

$$\epsilon_s = \frac{c - ds1}{c} \cdot \epsilon_c = \frac{76,660 - 56,5}{76,660} \cdot 0,003 = 0,0007889$$

$$0,0007889 < \epsilon_y \text{ (baja desak belum leleh)}$$

$$f_s = \epsilon_s \cdot E_s = 0,0007889 \cdot 200000 = 157,7907 \text{ N/mm}^2$$

Momen yang mampu dikerjakan :

$$M_1 = C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 65,1614 \cdot 250 \cdot \left(274,5 - \frac{65,1614}{2} \right)$$

$$= 92119783,69 \text{ Nmm} = 9,2197 \text{ tm}$$

$$M_2 = A_s \cdot f_s \cdot (d - ds1)$$

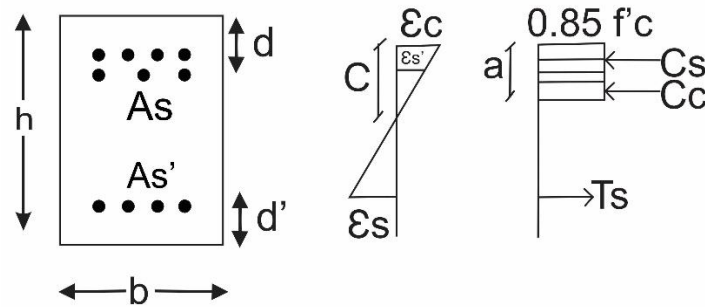
$$= 530,9291 \cdot 193,229 \cdot (274,5 - 56,5)$$

$$= 18263,107 \text{ Nmm} = 1,826 \text{ tm}$$

$$M_{\text{kap}} = M_1 + M_2 = 9,2197 + 1,826 = 11,038 \text{ tm}$$

2. Kontrol momen kapasitas negatif balok

Momen kapasitas positif dapat dihitung dengan cara yang sama dengan momen kapasitas negatif, hanya saja posisi penulangan nya dibalik . hal ini terjadi karena tulangan tarik berganti fungsi menjadi tulangan desak dan sebaliknya.



Gambar 1.30 Tegangan Regangan Momen Tersedia Positif

$$A_s = 7.132,7322 = 928,1260 \text{ mm}^2$$

$$A_{s'} = 4.132,7322 = 530,9291 \text{ mm}^2$$

Keseimbangan gaya-gaya horizontal

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s \cdot f_y \cdot \phi_o = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b + A_{s'} \cdot \left(\frac{a - \beta_1 \cdot d_s}{a} \right) \cdot \epsilon_c \cdot E_s$$

$$530,9291 \cdot 400 \cdot 1,25 = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 250 + 928,1260 \cdot \frac{a - 0,85 \cdot 76,5}{a} \cdot 0,003 \cdot 200000$$

$$265464,5792 a = 5843,75 a^2 + 557475,6164 a - 26772766,48$$

Dari persamaan diatas, dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua dan persamaan ABC, maka didapatkan nilai a sebesar 47,1655 mm.

$$\text{Letak garis netral, } c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{47,1655}{0,85} = 55,4888 \text{ mm}$$

Kontrol regangan baja desak,

$$\epsilon_s = \frac{c - d_s}{c} \cdot \epsilon_c = \frac{55,4888 - 56,5}{55,4888} \cdot 0,003 = 0,0000545 < \epsilon_y \text{ (baja desak belum leleh)}$$

$$f_s = \epsilon_s \cdot E_s = 0,0000545 \cdot 200000 = 10,9337 \text{ N/mm}^2$$

Momen yang mampu dikerjakan :

$$M_1 = C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$\begin{aligned}
&= 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \\
&= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 47,1655 \cdot 250 \cdot \left(274,5 - \frac{47,1655}{2} \right) \\
&= 69158670,89 \text{ Nmm} = 6,9158 \text{ tm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_2 &= A_s \cdot f_s \cdot (d - ds1) \\
&= 530,9291 \cdot 10,933 \cdot (274,5 - 56,5) \\
&= 1265501,855 \text{ Nmm} = 0,126 \text{ tm}
\end{aligned}$$

$$M_{\text{kap}} = M_1 + M_2 = 6,9158 + 0,126 = 7,04241 \text{ tm}$$

Untuk perhitungan perencanaan balok yang lain menggunakan tipe balok yang sama yaitu B1 , sehingga hasil dapat untuk tipe balok B1 dapat dilihat pada Tabel 5.13 dibawah ini.

Tabel 1.13 Rekap Hasil Perencanaan Penulangan Balok B1

Balok	B	H	Teknis Momen	Jumlah Tulangan Tumpuan			Jumlah Tulangan Lapangan			Momen Ultimit (tm)	Momen Nominal (tm)	Momen Tersedia (tm)	Momen Kapasitas (tm)
				7	D	13	3	D	13				
B1	25	35	Negatif	7	D	13	3	D	13	6,489	12,6849	11,4164	11,0383
	25	35	Positif	4	D	13	4	D	13	3,301	17,776	14,180	7,0424

5.6 Perencanaan Kolom

1. Menentukan Jenis Kolom

Data Umum

$$\text{Kuat tekan (} f'_c \text{)} = 27,5 \text{ MPa}$$

$$F_y \text{ tulangan} = 400 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0,85$$

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

Data kolom

$$\text{Lebar Kolom (} b \text{)} = 450 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi Kolom (} h \text{)} = 450 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang kolom Antar as (} l_c \text{)} = 3200 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang kolom bersih (} l_n \text{)} = 2850 \text{ mm}$$

Diameter Tulangan Utama = 16 mm

Diameter Tulangan Sengkang = 10 mm

Tebal selimut beton = 40 mm

Dari analisis SAP2000, didapat gaya terfaktor yang terjadi pada kolom K1 lantai dasar adalah sebagai berikut :

- a. Gaya aksial maksimal $\sum P_u = 2309,183$ kN (Kolom Bujur Sangkar)
- b. Gaya aksial maksimal $\sum P_u = 1153,7975$ kN (Kolom Pipih)
- c. Gaya geser $V_u = 136,681$ kN (Kolom Bujur Sangkar)
- d. Gaya geser $V_u = 176,681$ kN (Kolom Pipih)
- e. Lendutan Horizontal (Δ_{0b}) = 0,00579 m
- f. Lendutan Horizontal (Δ_{0r}) = 0,00671 m

2. Menentukan Indeks Stabilitas (Q)

Berdasarkan Pasal 10.10.5 SNI 2847:2013, kolom dan tingkat pada struktur harus ditetapkan sebagai kolom atau tingkat tidak bergoyang atau bergoyang. Suatu tingkat struktur boleh dianggap tidak bergoyang bila :

$$Q_x = \frac{\sum P_u \cdot \Delta_0}{V_u \cdot l_c} < 0,05$$

Berikut ini perhitungan untuk lantai 1 struktur gedung untuk kolom bujur sangkar dan kolom pipih.

- a. Indeks stabilitas kolom bujur sangkar

$$Q_x = \frac{\sum P_u \cdot \Delta_0}{V_u \cdot l_c} = \frac{2107,992 \cdot 0,00413}{136,681 \cdot 3,2} = 0,0199 < 0,05$$

Karena nilai Q_x lebih kecil dari 0,005 maka termasuk portal tidak bergoyang

- b. Indeks stabilitas kolom pipih

$$Q_x = \frac{\sum P_u \cdot \Delta_0}{V_u \cdot l_c} = \frac{1153,7975 \cdot 0,00671}{176,681 \cdot 3,2} = 0,00917 < 0,05$$

Karena nilai Q_x lebih kecil dari 0,005 maka termasuk portal tidak bergoyang

3. Menentukan faktor panjang efektif

Berikut adalah langkah-langkah dalam menentukan faktor panjang efektif, kondisi ujung-ujung kolom baik pada join atas dan bawah kolom lantai 1 untuk mendapatkan faktor panjang efektif kolom (k) dapat dilihat pada Tabel 5.14 berikut:

Tabel 1.14 Kondisi Kekuatan Kolom K2 Pada Join Atas Sumbu X

Elemen	E(MPa)	I_x (mm ⁴)	I_y (mm ⁴)	L(mm)	EI/L
Kolom Bujur Sangkar	24647,01	3417187500	3417187500	2850	29552086813
Kolom Pipih (L)	24647,01	4501359049	3339389377	2850	38928081473
Kolom Pipih (T)	24647,01	4501359049	3328592183	2850	38928081473
Kolom Pipih (plus)	24647,01	3318310547	3318310547	2850	28696991709
Balok (KB)	24647,01	893229166,7	455729167	3750	5870780362
Balok (KR)	24647,01	893229166,7	455729167	3750	5870780362

a. Faktor panjang efektif kolom bujur sangkar

$$\psi = \frac{\sum \frac{EI}{Lk} \text{kolom}}{\sum \frac{EI}{Lb} \text{Balok}} = \frac{29552086813}{5870780362} = 5,033$$

$$k = 0,7 + 0,005 (\psi) = 0,7 + 0,005 (5,033) = 0,725$$

$$k = 0,85 + 0,005 \psi = 0,85 + 0,005 \cdot 5,033 = 0,875$$

dari hasil diatas dipilih nilai k terkeci yaitu = 0,725

b. Faktor panjang efektif kolom pipih

$$\psi = \frac{\sum \frac{EI}{Lk} \text{kolom}}{\sum \frac{EI}{Lb} \text{Balok}} = \frac{28696991709}{5870780362} = 4.88$$

$$k = 0,7 + 0,005 (\psi) = 0,7 + 0,005 (0.761) = 0,724$$

$$k = 0,85 + 0,005 \psi = 0,85 + 0,005 \cdot 0,761 = 0,874$$

dari hasil diatas dipilih nilai k terkecil yaitu = 0,724

4. Menentukan faktor kelangsingan kolom

Menurut pasal 10.10.1 SNI 2847:2013 pengaruh kelangsingan untuk komponen Struktur tekan yang tidak dibreising dapat dapat diabaikan jika nilai $\frac{k l_u}{r} \leq 22$. r untuk bentuk penampang persegi boleh diambil sebesar 0.3 kali dimensi keseluruhan dalam arah stabilitas yang ditinjau (10.10.6.2 SNI 2847:2013) maka dapat dihitung kelangsingan kolom sebagai berikut

a. Faktor kelangsingan pada kolom bujur sangkar

$$r = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} = \sqrt{\frac{3417187500}{202500}} = 129,9 \text{ mm}$$

$$\frac{k l_u}{r} = \frac{0,725 \times 2850}{129,9} = 15,91 < 22 \text{ (Kolom pendek)}$$

b. Faktor kelangsingan pada kolom pipih

$$r = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}} = \sqrt{\frac{3318310547}{202500}} = 128,01 \text{ mm}$$

$$\frac{k l_u}{r} = \frac{0,724 \times 2850}{128,01} = 16,13 < 22 \text{ (Kolom pendek)}$$

5. Perbandingan Kekuatan kolom dengan balok

Sesuai dengan Pasal 21.6.2.2 SNI 2847:2013 jumlah kekuatan kolom $\sum M_{nc}$ tidak boleh kurang dari $1,2 \sum M_{nb}$. Dimana $\sum M_{nc}$ adalah jumlah kekuatan lentur nominal kolom yang merangka kedalam joint yang diambil berdasarkan gaya aksial terfaktor yang menghasilkan kuat lentur terendah dan $\sum M_{nb}$ adalah kuat lentur nominal balok. Karena kolom lantai 1 dan lantai 2 memiliki dimensi dan susunan tulangan yang sama maka M_{nc} diambil berdasarkan nilai P_u terkecil (yang mengakibatkan M_n terkecil). Sedangkan M_{nb} diambil dari M_n balok 250/350 dengan kapasitas tumpuan negatife dan kapasitas tumpuan positif.

a. Perbandingan Kekuatan kolom bujur sangkar

$$\sum M_{nc} = M_{nc,top} + M_{nc,bottom}$$

$$\sum M_{nc} = 52,674 + 48,523 = 101,197 \text{ kNm}$$

$$1,2 \sum M_{nb} = 1,2 (28,372+22,379) = 60,86 \text{ kNm}$$

$\sum M_{nc} > 1,2 \sum M_{nb}$ maka ketentuan *strong column weak beam* terpenuhi

b. Perbandingan Kekuatan kolom pipih

$$\sum M_{nc} = M_{nc,top} + M_{nc,bottom}$$

$$\sum M_{nc} = 38,643 + 32,575 = 71,218 \text{ kNm}$$

$$1,2 \sum M_{nb} = 1,2 (28,372+22,379) = 60,86 \text{ kNm}$$

$\sum M_{nc} > 1,2 \sum M_{nb}$ maka ketentuan *strong column weak beam* terpenuhi

5.6.1 Diagram Interaksi Mn-Pn Kolom Bujur Sangkar

1. Beban Aksial dan Momen Lentur

Pada perencanaan kolom, gaya aksial dan momen lentur arah x dan arah y didapat dari analisis SAP2000. Dari hasil analisa struktur untuk kolom K1 50/50 pada struktur gedung beton bertulang sistem rangka, didapat gaya aksial dan momen lentur sebesar :

Arah X :

$$P_u = 2309,183 \text{ kN}$$

$$M_u = 82,469 \text{ kNm}$$

Arah Y :

$$P_u = 2309,183 \text{ kN}$$

$$M_u = 82,469 \text{ kNm}$$

2. Diagram Interaksi Mn-Pn Kolom Bujur Sangkar

Diagram interaksi M_n - P_n menunjukkan hubungan antara beban aksial dan momen lentur pada kondisi batas. Setiap titik kurva menunjukkan kombinasi Mn-Pn sebagai kapasitas penampang terhadap suatu garis netral tertentu berikut contoh perhitungan kolom K1 50/50 arah x untuk nilai ρ sebesar 1% dengan mutu material:

$$f'_c = 27,5 \text{ MPa} \rightarrow \beta_1 = 0,85$$

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

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

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{cu} &= 0,003 \\
\phi_{\text{pokok}} &= 16 \text{ mm} \\
\phi_{\text{sengkang}} &= 10 \text{ mm} \\
sb &= 40 \text{ mm} \\
b &= 450 \text{ mm} \\
h_t &= 450 \text{ mm} \\
\varepsilon_y &= \frac{fy}{\varepsilon_s} = \frac{400}{200000} = 0,002 \\
d_s &= d' = sb + \phi_{\text{sengkang}} + 0,5 \phi_{\text{pokok}} \\
&= 40 + 10 + 0,5 \cdot 16 = 58 \text{ mm} \\
d &= h - d' = 450 - 58 = 392 \text{ mm} \\
d'' &= \frac{ht-d}{2} = \frac{450-392}{2} = 29 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Apabila nilai $\rho = (0,25-2) \%$ maka untuk A_s gunakan rumus :

$$A_s = A_s' = \rho \cdot b \cdot h_t = 1\% \cdot 450 \cdot 450 = 2025 \text{ mm}^2$$

Konfigurasi Tulangan

Luas Penampang Kolom A_g :

$$A_g = b \cdot h = 450 \cdot 450 = 202500 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan A_{du} :

$$A_{Du} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_u^2 = \frac{1}{4} \pi 16^2 = 201,0613 \text{ mm}^2$$

Jumlah tulangan yang digunakan

$$\begin{aligned}
n &= \rho \cdot \frac{A_g}{A_{Du}} \\
&= 1\% \cdot \frac{202500}{201,0613} \\
&= 10,072 \text{ buah digunakan } 12 \text{ buah tulangan}
\end{aligned}$$

Luas tulangan Total A_{st} :

$$\begin{aligned}
A_{st} &= n \cdot A_{du} \\
&= 12 \cdot 201,0613 \\
&= 2412,743 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

Jumlah tulangan maksimum dalam lebar penampang mb :

$$M_b = \frac{b-2 ds}{du+Sn} + 1 = \frac{450-2 \cdot 58}{16+40} + 1$$

= 6,942 buah digunakan 4 buah tulangan

Jumlah tulangan maksimum dalam panjang penampang mht :

$$M_h = \frac{ht-2 ds}{D+Sn} + 1 = \frac{450-2 \cdot 58}{16+40} + 1$$

= 6,942 buah digunakan 4 buah tulangan

a. Penampang Kolom Pada Kondisi Batas Sentris

$$\begin{aligned} P_0 &= 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot (202500 - 2025) + 2025 \cdot 400 \\ &= 5496,10 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{n, \text{Maks}} &= 0,8 \cdot (0,85 \cdot f'_c \cdot (A_d - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y) \\ &= 0,8 (0,85 \cdot 27,5 (202500 - 2025) + 2025 \cdot 400) \\ &= 4396,88 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$P_{u, \text{maks}} = 0,65 \cdot 4396,88 = 2857,97 \text{ kN}$$

b. Penampang Kolom Kondisi Seimbang

$$C_b = \frac{600}{600 + f_y} \cdot d = \frac{600}{600 + 400} \cdot 392 = 235,2 \text{ mm}$$

$$a_b = \beta_1 \cdot C_b = 0,85 \cdot 235,2 = 199,92 \text{ mm}$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\epsilon_s' = \frac{C-d'}{C} \cdot \epsilon_{cu} = \frac{235,2-58}{235,2} \cdot 0,003 = 0,00260 > \epsilon_y \text{ (leleh)}$$

$$f_s = f_y = 400 \text{ N/mm}^2$$

Kontrol regangan tulangan tarik

$$\epsilon_s' = \frac{d-C}{C} \cdot \epsilon_{cu} = \frac{392-235,2}{235,2} \cdot 0,003 = 0,002 < \epsilon_y \text{ (sudah leleh)}$$

$$f_s = f_y = 400 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{nb} = C_c + C_s - T$$

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

$$= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 199,92 \cdot 450 = 2102908,5 \text{ N} = 2102,909 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_s &= A_s' \cdot (f_y - 0,85 \cdot f'_c) \\ &= 2025 \cdot (400 - 0,85 \cdot 27,5) = 762665,625 \text{ N} = 762,665 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= A_s' \cdot f_y \\ &= 2025 \cdot 400 = 810000 \text{ N} = 810 \text{ kN} \end{aligned}$$

Menurut keseimbangan gaya-gaya vertikal, maka diperoleh:

$$\begin{aligned} P_{n0} &= C_c + C_s + T_s \\ &= 2102,909 + 762,665 - 810 = 2055,574 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{nb} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\ &= 2102,909 \cdot \left(392 - \frac{199,92}{2} - 92 \right) + 762,665 \cdot (392 - 58 - 29) + \\ &\quad 810 \cdot 29 \\ &= 344026,0362 \text{ kN} \end{aligned}$$

c. Penampang Dengan Kondisi Patah Tarik

$$\begin{aligned} c &= 0,9 c_b \\ &= 0,9 \cdot 255,2 = 211,68 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= \beta_1 \cdot c \\ &= 0,85 \cdot 255,2 = 179,928 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\begin{aligned} \varepsilon_s' &= \frac{c-d'}{c} \cdot \varepsilon_c \\ &= \frac{211,68 - 58}{211,68} \cdot 0,003 = 0,00217 < \varepsilon_y \text{ (sudah leleh)} \end{aligned}$$

$$f_s = f_y = 400 \text{ N/mm}^2$$

Kontrol regangan tulangan Tarik

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &= \frac{d-c}{c} \cdot \varepsilon_c \\ &= \frac{442-238,68}{238,68} \cdot 0,003 = 0,00255 > \varepsilon_y \rightarrow \text{(sudah leleh)} \end{aligned}$$

$$f_s = f_y = 400 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot a_b \cdot b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 179,928 \cdot 450 = 1892617,65 \text{ N} = 1892,6176 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$C_s = A_s' \cdot (f_y - 0,85 \cdot f'_c)$$

$$= 2025 \cdot (400 - 0,85 \cdot 27,5) = 762665,625 \text{ N} = 762,665 \text{ kN}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y$$

$$= 2025 \cdot 400 = 810000 \text{ N} = 810 \text{ kN}$$

Menurut keseimbangan gaya-gaya vertikal, maka diperoleh:

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

$$= 1892,6176 + 762,665 - 810 = 1845,2832 \text{ kN}$$

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

$$= 1892,6176 \cdot \left(392 - \frac{179,928}{2} - 29 \right) + 762,665 \cdot (392 - 58 - 29) +$$

$$810 \cdot 29$$

$$= 772855,768 \text{ kN}$$

$$P_{ub} = \phi \cdot P_{nb} = 0,65 \cdot 1845,2832 = 66,1461 < (0,1 \cdot A_g \cdot f'_c)$$

Jika $\phi = 0,65$ $P_{nb} > (0,1 \cdot A_g \cdot f'_c)$ maka $\phi = 0,65$

Jika $\phi = 0,65$ $P_{nb} < (0,1 \cdot A_g \cdot f'_c)$ maka $\phi = 0,9 - \left(\frac{0,2 \cdot 0,65 P_{nb}}{0,1 \cdot A_g \cdot f'_c} \right)$

$$P_{ub} = \phi \cdot P_{nb} = 0,868 \cdot 1845,2832 = 670838,8069 \text{ kN}$$

$$M_{ub} = \phi \cdot M_{nb} = 0,868 \cdot 772855,768 = 1596,1703 \text{ kN}$$

d. Penampang Dengan Kondisi Desak

Pada kondisi patah desak $c > cb$, maka pada perhitungan ini diambil tebal beton desak

$$c = 1,5 \cdot c_b$$

$$= 1,5 \cdot 235,2 = 352,8 \text{ mm}$$

$$a = \beta_1 \cdot c$$

$$= 0,85 \cdot 352,8 = 299,88 \text{ mm}$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\varepsilon_s' = \frac{c-d'}{c} \cdot \varepsilon_c$$

$$= \frac{352,8 - 58}{352,8} \cdot 0,003 = 0,002506 < \varepsilon_y \text{ (sudah leleh)}$$

$$f_s = f_y = 400 \text{ N/mm}^2$$

Kontrol regangan tulangan Tarik

$$\varepsilon_s = \frac{d-c}{c} \cdot \varepsilon_c$$

$$= \frac{392-352,8}{352,8} \cdot 0,003 = 0,000333 > \varepsilon_y \rightarrow (\text{sudah leleh})$$

$$f_s = \varepsilon_s \cdot E_s \\ = 0,000335 \cdot 200000 = 66,67 \text{ N/mm}^2$$

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \\ = 0,85 \cdot 27,5 \cdot 299,88 \cdot 450 = 3154362,75 \text{ N} = 3154,363 \text{ kN}$$

$$C_s = A_s' \cdot (f_y - 0,85 \cdot f'_c) \\ = 2025 \cdot (400 - 0,85 \cdot 27,5) = 762665,625 \text{ N} = 762,665 \text{ kN}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y \\ = 2025 \cdot 66,67 = 160849,54 \text{ N} = 160,849 \text{ kN}$$

Menurut keseimbangan gaya-gaya vertikal, maka diperoleh:

$$P_n = C_c + C_s - T_s \\ = 3154,363 + 762,665 - 1000 = 3893,4565 \text{ kN}$$

$$M_{nb} = C_c \cdot (d - \frac{a}{2} - d'') + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\ = 3154,363 \cdot (392 - \frac{299,88}{2} - 192) + 762,665 \cdot (392 - 58 - 29) + \\ 160,849 \cdot 192 \\ = 909346,1799 \text{ tm}$$

$$P_{ub} = \phi \cdot P_{nb} = 0,65 \cdot 3893,4565 = 591075,0169 < (0,1 \cdot A_g \cdot f'_c)$$

Jika $\phi = 0,65$ $P_{nb} > (0,1 \cdot A_g \cdot f'_c)$ maka $\phi = 0,65$

Jika $\phi = 0,65$ $P_{nb} < (0,1 \cdot A_g \cdot f'_c)$ maka $\phi = 0,9 - (\frac{0,2 \cdot 0,65 P_{nb}}{0,1 \cdot A_g \cdot f'_c})$

$$P_{ub} = \phi \cdot P_{nb} = 0,852 \cdot 3893,4565 = 774762,9453 \text{ kN}$$

$$M_{ub} = \phi \cdot M_{nb} = 0,852 \cdot 909346,1799 = 3200,2643 \text{ kN}$$

e. Penampang Kolom Kondisi Lentur Murni

Keseimbangan gaya-gaya horizontal:

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s \cdot f_y = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b + A_s' \cdot \frac{a - \beta_1 \cdot d}{a} \cdot \varepsilon_c \cdot E_s$$

$$2025 \cdot 400 = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 450 + 2025 \cdot \frac{a - 0,85 \cdot 58}{a} \cdot 0,003 \cdot 200000$$

$$810000 a = 10518,75 a^2 + 405000 a - 5862779655$$

$$10518,75 a^2 + 405000 a - 5862779655$$

Dari persamaan diatas, dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua atau persamaan ABC, maka didapatkan nilai a sebesar 58,62 mm letak garis netral,

$$\begin{aligned} c &= a \cdot \beta_1 \\ &= 58,62 \cdot 0,85 = 49,833 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kontrol regangan baja desak,

$$\begin{aligned} \varepsilon_s' &= \frac{c - d'}{c} \cdot \varepsilon_c \\ &= \frac{49,833 - 58}{49,833} \cdot 0,003 = - 0,00266 \end{aligned}$$

$$f_s = f_y = 400 \text{ N/mm}^2$$

Momen yang mampu dikerahkan,

$$\begin{aligned} M_1 &= C_c \cdot (d - \frac{a}{2}) \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 58,62 \cdot 450 \cdot (392 - \frac{58,62}{2}) \\ &= 223637,963 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= A_s' \cdot f_s \cdot (h - d') \\ &= 2025 \cdot 400 \cdot (450 - 58) \\ &= 317520 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Mn &= M_1 + M_2 \\ &= 223637,963 + 317520 = 541157,963 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$P_{ub} = \phi \cdot P_{nb} = 0,65 \cdot 0 = 0 < (0,1 \cdot A_g \cdot f'_c)$$

$$\text{Jika } \phi = 0,65 \text{ } P_{nb} > (0,1 \cdot A_g \cdot f'_c) \text{ maka } \phi = 0,65$$

$$\text{Jika } \phi = 0,65 \text{ } P_{nb} < (0,1 \cdot A_g \cdot f'_c) \text{ maka } \phi = 0,9 - (\frac{0,2 \cdot 0,65 P_{nb}}{0,1 \cdot A_g \cdot f'_c})$$

$$P_{ub} = \phi \cdot P_{nb} = 0,855 \cdot 0 = 0 \text{ T}$$

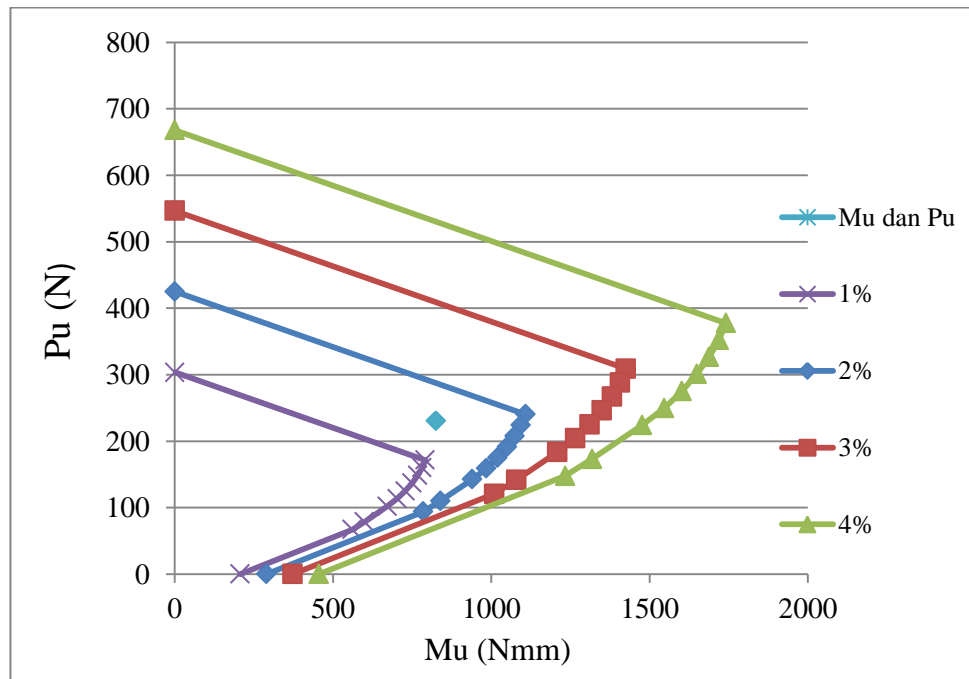
$$M_{ub} = \phi \cdot M_{nb} = 0,855 \cdot 541157,963 = 462690,058 \text{ kN}$$

f. Penampang Kolom Kondisi Tarik Murni

$$\begin{aligned} P_n - T &= -(A_s + A_s') \cdot f_y \\ &= -(2025 + 2025) \cdot 400 \\ &= -1620000 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$M_n = 0$$

Apabila kondisi-kondisi kerusakan yang terjadi pada kolom K1 45/45 arah x tersebut digambar, maka akan terbentuk diagram interaksi seperti yang tampak pada Gambar 5.31.



Gambar 1.31 Diagram M_u - P_u K1 45/45 Arah x

Dari diagram M_u - P_u pada Gambar 5.31, maka didapat nilai rasio tulangan (ρ) untuk kolom K1 45/45 arah x sebesar 1.19 %, sehingga dapat dihitung jumlah tulangan yang dipakai sebesar :

$$\rho = 1,19\%$$

$$n \text{ tulangan} = \frac{\rho \cdot b \cdot h}{A_{1d}} = \frac{1,19 \cdot 450 \cdot 450}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2} = 12 \text{ buah}$$

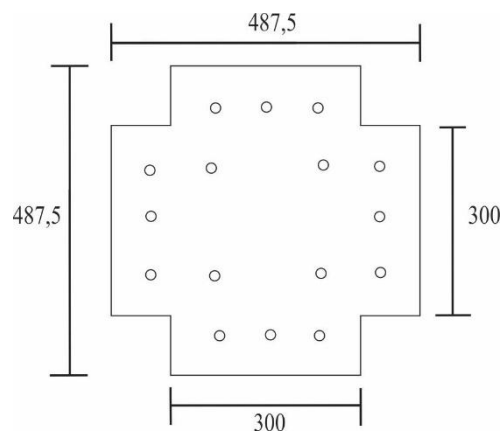
Dipakai jumlah tulangan K1 45/45 arah x sebanyak 12 buah

Untuk perhitungan perencanaan kolom yang lain dilakukan dengan cara yang sama, sehingga hasil yang didapatkan dapat tulangan K1 45/45 sebanyak 12 buah.

5.6.2 Diagram Interaksi Mn-Pn Kolom Pipih

Pada perencanaan diagram interaksi kolom pipih dimensi yang digunakan meneruskan penelitian sebelumnya dengan menggunakan tebal kolom 30 cm , yang di modelkan pada kolom L , T dan Plus. Pada penulangan kolom pipih mengikuti tulangan yang dapat dimodelkan pada program SAP2000, Sehingga diagram interaksi kolom pipih dapat dibuat sebagai berikut :

a. Kolom Plus arah x dan y



Gambar 1.32 Konfigurasi Tulangan Kolom Plus

Diketahui kolom sebagai berikut:

$$M_{ux} = 73,599 \text{ kNm}$$

$$M_{uy} = 73,599 \text{ kNm}$$

$$P_u = 2153,79 \text{ kN}$$

$$f'_c = 27,5 \text{ MPa}$$

$$\beta = 0,85$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \sqrt{27,5} = 24647,008 \text{ MPa}$$

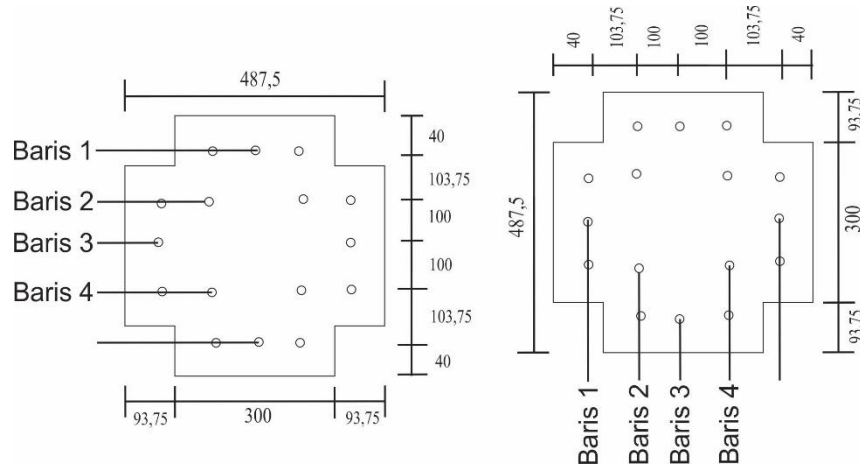
$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

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

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200000} = 0,002$$

$$D = 16 \text{ mm}$$

Konfigurasi tulangan pada arah H dapat dilihat pada gambar dan tabel dibawah berikut :



Gambar 1.33 Propertis Kolom Plus Pada Arah x Dan y

Tabel 1.15 Data Section Propertis Kolom Plus Pada Arah x Dan y

No Baris	1	2	3	4	5
Jumlah Tulangan	3	4	2	4	3
D_i (Jarak tulangan)	40	93,75	247,5	34,5	447,5
A_i (mm ²)	603,186	804,2477	402,1239	804,2477	603,186

Kekuatan kolom pada beban sentris

Konfigurasi Tulangan

$$A_g = B \cdot H = (300 \cdot 487,5) + (300 \cdot 93,75) + (300 \cdot 93,75) = 202500 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan A_{du} :

$$A_{Du} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_u^2 = \frac{1}{4} \pi 16^2 = 201,0619 \text{ mm}^2$$

Luas Tulangan Total A_{st} :

$$\begin{aligned} A_{st} &= n \cdot A_{du} \\ &= 16 \cdot 201,0619 \\ &= 3216,991 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Penampang Kolom Pada Kondisi Batas Sentris

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \\
 &= 0,85 \cdot 27,5 (202500 - 3216,991) + 3216,991 \cdot 400 \\
 &= 5945037 \text{ N} \\
 &= 5945,037 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\max} &= 0,8 \cdot (0,85 f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y) \\
 &= 0,8 \cdot (0,85 \cdot 27,5 (202500 - 3216,991) + 3216,991 \cdot 400) \\
 &= 4756029 \text{ N} \\
 &= 4756,029 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{u,\max} &= 0,65 \cdot P_{n,\max} \\
 &= 0,65 \cdot 4756,029 \\
 &= 3091,419 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Kekuatan kolom pada kondisi seimbang

$$C_b = \frac{600 d}{600 + f_y} = \frac{600 (487,5 - 40)}{600 + 400} = 268,5 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 a &= \beta_1 \cdot C_b \\
 &= 0,85 \cdot 268,5 \\
 &= 228,225 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Kontrol Regangan Tulangan Tarik

$$\epsilon_{s1} = \frac{cb-d1}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{268,5 - 40}{268,5} 0,003 = 0,00255$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{cb-d2}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{268,5 - 93,75}{268,5} 0,003 = 0,00195$$

$$\epsilon_{s3} = \frac{cb-d2}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{268,5 - 247,5}{237,5} 0,003 = 0,000346$$

Kontrol Regangan Tulangan Desak

$$\epsilon_{s4} = \frac{d3-cb}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{347,5 - 268,5}{268,5} 0,003 = 0,00077$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d4 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{447,5 - 268,5}{268,5} 0,003 = 0,002$$

Tegangan Baja dan beton

Nilai tegangan baja tergantung nilai regangan baja yang terjadi jika nilai regangan yang terjadi lebih kecil dari nilai regangan lelehnya maka digunakan persamaan :

$$F_s = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A$$

Apabila nilai regangan yang terjadi lebih besar dari nilai regangan lelehnya maka digunakan persamaan :

$$F_s = \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A$$

$$C_s = F_{s1} + F_{s2}$$

$$F_{s1} = \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A_1 = \frac{0,00255}{0,00255} 400 \cdot 603,186 = 241,274 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A_2 = 0,00195 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 314,06 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s3} + F_{s4} + F_{s5}$$

$$F_{s3} = \varepsilon_{s3} \cdot E_s \cdot A_3 = 0,000346 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 18,870 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \varepsilon_{s4} \cdot E_s \cdot A_4 = 0,00077 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 141,978 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \frac{\varepsilon_{s5}}{\varepsilon_{s5}} \cdot f_y \cdot A_5 = \frac{0,002}{0,002} \cdot 400 \cdot 603,186 = 241,274 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 228,225 \\ &= 2600695,2 \text{ N} = 2600,695 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_n &= C_c + C_s + T_s \\ &= 2600,695 + (241,274 + 314,06) + (18,870 + 141,978 + 241,274) \\ &= 3558,154 \text{ kN} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
&= 2600,695 \cdot \left(429,5 - \frac{132,6}{2} - 92 \right) + 555,335 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) + \\
&\quad 402,123 \cdot 185,75 \\
&= 514,996 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

Karena $\{\varepsilon_s\} \leq \varepsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0,65 \cdot 3558,154 = 2312,800 \text{ kN}$$

$$M_u = 0,65 \cdot 514,996 = 334,747 \text{ kN/m}$$

Penampang Dengan Kondisi Desak

Pada kondisi patah desak $c > cb$, maka pada perhitungan ini diambil tebal beton desak

$$\begin{aligned}
c &= 1,5 \cdot c_b \\
&= 1,5 \cdot 268,5 = 402,75 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a &= \beta_1 \cdot c \\
&= 0,85 \cdot 402,75 = 342,3375 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Regangan Baja

Kontrol Regangan Tulangan Tarik

$$\varepsilon_{s1} = \frac{cb-d1}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{402,75-40}{402,75} 0,003 = 0,002702$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{cb-d2}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{402,75-93,75}{402,75} 0,003 = 0,002301$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{cb-d3}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{402,75-247,5}{402,75} 0,003 = 0,00115$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{cb-d4}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{402,75-347,5}{402,75} 0,003 = 0,000411$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d5-cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{447,5-402,75}{402,75} 0,003 = 0,000333$$

Tegangan Baja dan Beton

$$C_s = F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4}$$

$$F_{s1} = \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A_1 = \frac{0,002702}{0,002702} \cdot 400 \cdot 402,124 = 241,2743 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s} \cdot f_y \cdot A_2 = \frac{0,002301}{0,002301} \cdot 400 \cdot 804,2477 = 321,699 \text{ kN}$$

$$F_{s3} = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_3 = 0,000115 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 93,005 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_4 = 0,000411 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 66,192 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s5}$$

$$F_{s5} = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_5 = 0,000333 \cdot 200000 \cdot 603,186 = 40,212 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 342,337 \\ &= 3901,0428 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_n &= C_c + C_s + T_s \\ &= 3901,0428 + (241,2743 + 321,699 + 93,005 + 66,192) + 40,212 \\ &= 4663,430 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{nb} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\ &= 3901,0428 \cdot \left(429,5 - \frac{342,337}{2} - 185,75 \right) + 722,175 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) \\ &\quad + 40,212 \cdot 185,75 \\ &= 424,756 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Karena $\{\varepsilon_s\} \leq \varepsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0,65 \cdot 4663,430 = 3031,2299 \text{ kN}$$

$$M_u = 0,65 \cdot 424,756 = 276,091 \text{ kN/m}$$

Penampang Dengan Kondisi Patah Tarik

$$\begin{aligned} c &= 0,9 c_b \\ &= 0,9 \cdot 268,5 = 241,65 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$a = \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 241,65 = 205,402 \text{ mm}$$

Regangan Baja

Kontrol regangan tulangan tarik

$$\varepsilon_{s1} = \frac{cb-d1}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{241,65 - 40}{241,65} 0,003 = 0,00250$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{cb-d2}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{241,65 - 93,75}{241,65} 0,003 = 0,00183$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\varepsilon_{s3} = \frac{d3-cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{247,5 - 241,65}{241,65} 0,003 = 0,00072$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{d4 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{337,5 - 241,65}{241,65} 0,003 = 0,00131$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d5 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{447,5 - 241,65}{241,65} 0,003 = 0,00255$$

Tegangan baja dan beton

$$C_s = F_{s1} + F_{s2}$$

$$F_{s1} = \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A_1 = \frac{0,00250}{0,00250} 400 \cdot 603,186 = 241,274 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A_2 = 0,00183 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 295,340 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s3} + F_{s4} + F_{s5}$$

$$F_{s3} = \varepsilon_{s3} \cdot E_s \cdot A_3 = 0,00072 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 11,681 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \varepsilon_{s4} \cdot E_s \cdot A_4 = 0,00131 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 211,370 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \varepsilon_{s5} \cdot E_s \cdot A_5 = 0,00255 \cdot 200000 \cdot 603,186 = 241,275 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 205,403 \\ &= 2340,6257 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_n &= C_c + C_s + T_s \\ &= 2340,6257 + (241,274 + 295,340) + (11,681 + 211,370 + 241,275) \\ &= 3341,567 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{nb} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\ &= 2340,6257 \cdot \left(429,5 - \frac{205,403}{2} - 185,75 \right) + 544,9015 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) + 432,6763 \cdot 185,75 \end{aligned}$$

$$= 516,067 \text{ kN/m}$$

Karena $\{\varepsilon_s\} \leq \varepsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0,65 \cdot 3341,567 = 2172,018 \text{ kN}$$

$$M_u = 0,65 \cdot 516,067 = 335,443 \text{ kN/m}$$

Penampang Kolom Kondisi Lentur Murni

Keseimbangan gaya-gaya horizontal:

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s \cdot f_y = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b + A_s' \cdot \frac{a - \beta_1 \cdot d}{a} \cdot \varepsilon_c \cdot E_s$$

$$3216,991 \cdot 400 = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 487,5 + 3216,991 \cdot \frac{a - 0,85 \cdot 58}{a} \cdot 0,003 \cdot 200000$$

$$1286796,4 a = 11395,313 a^2 + 1930194,5 a - 95158590$$

$$11395,313 a^2 + 643398,18 a - 95158590$$

Dari persamaan diatas, dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua atau persamaan ABC, maka didapatkan nilai a sebesar 123,874 mm letak garis netral,

$$c = a \cdot \beta_1$$

$$= 123,874 \cdot 0,85 = 105,293 \text{ mm}$$

Tegangan baja dan beton

Kontrol regangan tulangan tarik

$$\varepsilon_{s1} = \frac{cb - d1}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{105,293 - 40}{105,293} 0,003 = 0,00186$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{cb - d2}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{105,293 - 93,75}{105,293} 0,003 = 0,000328$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\varepsilon_{s3} = \frac{d3 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{247,5 - 105,293}{105,293} 0,003 = 0,00405$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{d4 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{347,5 - 105,293}{105,293} 0,003 = 0,00690$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d5 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{447,5 - 105,293}{105,293} 0,003 = 0,00975$$

Tegangan baja dan beton

$$C_s = F_{s1} + F_{s2}$$

$$F_{s1} = \varepsilon_{s1} \cdot E_s \cdot A_1 = 0,00186 \cdot 20000 \cdot 603,183 = 224,414 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A_2 = 0,000328 \cdot 20000 \cdot 804,2477 = 52,900 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s3} + F_{s4} + F_{s5}$$

$$F_{s3} = \frac{\varepsilon_{s3}}{\varepsilon_{s3}} f_y A_3 = \frac{0,00405}{0,00405} \cdot 400 \cdot 402,124 = 160,849 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \frac{\varepsilon_{s4}}{\varepsilon_{s4}} f_y A_4 = \frac{0,00690}{0,00690} \cdot 400 \cdot 804,2477 = 321,699 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \frac{\varepsilon_{s5}}{\varepsilon_{s5}} f_y A_5 = \frac{0,00975}{0,00975} \cdot 400 \cdot 603,183 = 241,274 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 123,874 \\ &= 1411,5854 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$P_n = 0$$

$$\begin{aligned} M_{nb} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\ &= 1411,5854 \cdot \left(429,5 - \frac{123,874}{2} - 185,75 \right) + 277,3251 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) + 723,822 \cdot 185,75 \\ &= 455,722 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Karena $\{\varepsilon_s\} \leq \varepsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0$$

$$M_u = 0,65 \cdot 455,722 = 296,219 \text{ kN/m}$$

Penampang Kolom Kondisi Tarik Murni

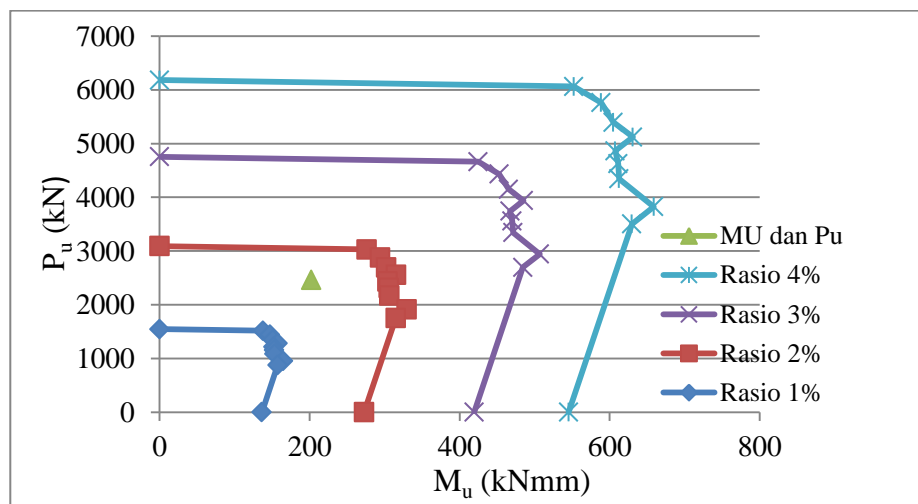
$$\begin{aligned} P_n - T &= -(A_s + A_s') \cdot f_y \\ &= -(2025 + 2025) \cdot 400 \\ &= -165200 \text{ N} = -165,24 \text{ t} \end{aligned}$$

$$M_n = 0$$

Dengan mengubah nilai C sedemikian sehingga diperoleh banyak persamaan P_u dan M_u , kemudian Jika nilai diplot dalam satu diagram , dimana P_u di plot kedalam sumbu y dan M_u diplot dalam sumbu x maka akan terbentuklah suatu diagram interaksi kolom bujur sangkar uniaksial. Karena $B = H$ maka Untuk hitungan B sama dengan arah H di atas.

Tabel 1.16 Rekap P_u dan M_u Dalam Arah B Maupun H Pada Kolom Plus

P_n dan M_n		P_u dan M_u	
P_n (kN)	M_n (kN)	P_u (kN)	M_u (kN)
2222,96	0	1444,92	0
1928,89	119,644	1253,78	77,768547
1848,87	124,767	1201,76	81,098519
1776,55	129,366	1154,76	84,087794
1750,98	137,033	1138,14	89,071286
1737,67	144,594	1129,48	93,986341
1622,75	141,575	1054,79	92,02374
1615,69	147,246	1050,2	95,709598
1912,07	183,454	1242,84	119,24515
2069,49	200,558	1345,17	130,36275
0	141,017	0	91,660733



Gambar 1.34 Diagram Interaksi M_u - P_u Kolom Plus

Dari diagram M_u - P_u pada Gambar 5.34, maka didapat nilai rasio tulangan (ρ) untuk kolom plus arah x sebesar 3 %, sehingga dapat dihitung jumlah tulangan yang dipakai sebesar :

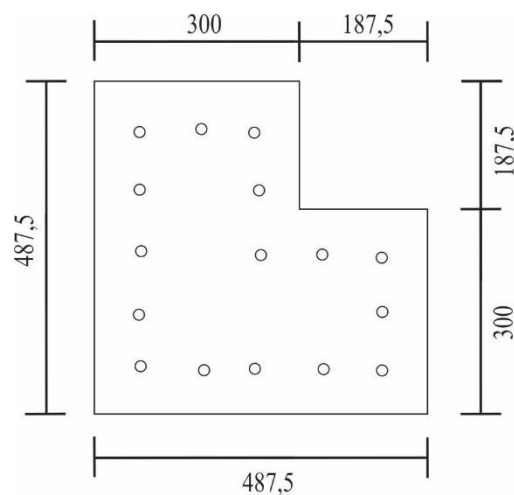
$$\rho = 1,6 \%$$

$$n \text{ tulangan} = \frac{\rho \cdot b \cdot h}{A_{1d}} = \frac{1,6 \cdot 202500}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2} = 16 \text{ buah}$$

Dipakai jumlah tulangan plus arah x sebanyak 16 buah

Untuk perhitungan perencanaan kolom yang lain dilakukan dengan cara yang sama, sehingga hasil yang didapatkan dapat tulanga plus sebanyak 16 buah.

b. Kolom L



Gambar 1.35 Konfigurasi Tulangan Kolom L

Diketahui kolom sebagai berikut:

$$M_{ux} = 69,964 \text{ kNm}$$

$$M_{uy} = 69,964 \text{ kNm}$$

$$P_u = 1996,876 \text{ kN}$$

$$f'_c = 27,5 \text{ MPa}$$

$$\beta = 0,85$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \sqrt{27,5} = 24647,008 \text{ MPa}$$

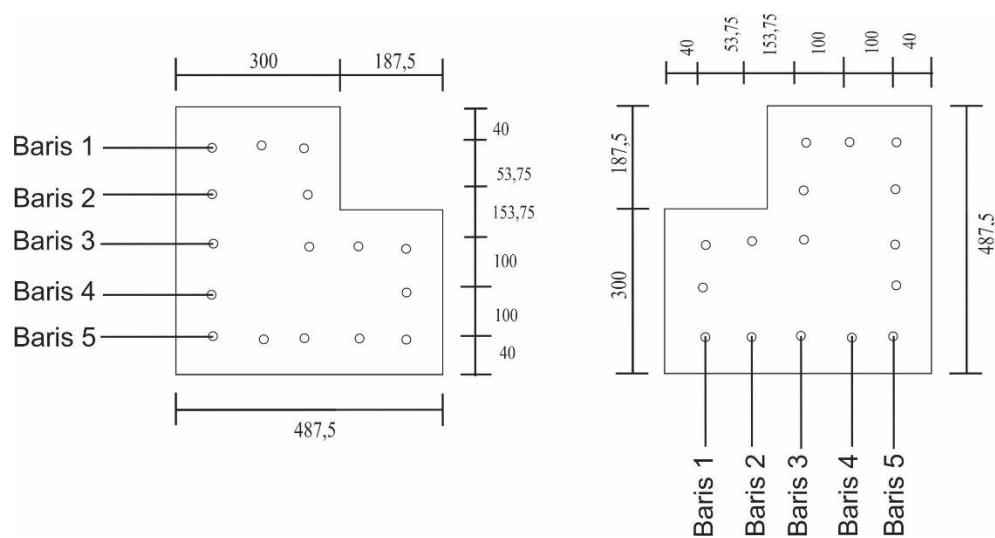
$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

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

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200000} = 0,002$$

$$D = 16 \text{ mm}$$

Konfigurasi tulangan pada arah H dapat dilihat pada gambar dan tabel dibawah berikut :



Gambar 1.36 Propertis Kolom L Pada Arah x Dan y

Tabel 1.17 Data Section Propertis Kolom L Pada Arah x Dan y

No Baris	1	2	3	4	5
Jumlah Tulangan	3	2	4	2	5
D_i (Jarak tulangan)	40	93,75	247,5	347,5	447,5
D_i (mm ²)	603,186	402,1239	804,2477	402,1239	1005,31

Kekuatan kolom pada beban sentris

Konfigurasi Tulangan

$$A_g = B \cdot H = (300 \cdot 487,5) + (300 \cdot 93,75) + (300 \cdot 93,75) = 202500 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan A_{du} :

$$A_{Du} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_u^2 = \frac{1}{4} \pi 16^2 = 201,0619 \text{ mm}^2$$

Luas Tulangan Total Ast :

$$\begin{aligned} A_{st} &= n \cdot A_{du} \\ &= 16 \cdot 201,0619 \\ &= 3216,991 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Penampang Kolom Pada Kondisi Batas Sentris

$$\begin{aligned} P_0 &= 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \\ &= 0,85 \cdot 27,5 (202500 - 3216,991) + 3216,991 \cdot 400 \\ &= 5945037 \text{ N} \\ &= 5945,037 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\max} &= 0,8 \cdot (0,85 f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y) \\ &= 0,8 \cdot (0,85 \cdot 27,5 (202500 - 3216,991) + 3216,991 \cdot 400) \\ &= 4756029 \text{ N} \\ &= 4756,029 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{u,\max} &= 0,65 \cdot P_{n,\max} \\ &= 0,65 \cdot 4756,029 \\ &= 3091,419 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kekuatan kolom pada kondisi seimbang

$$C_b = \frac{600 d}{600 + f_y} = \frac{600 (487,5 - 40)}{600 + 400} = 268,5 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} a &= \beta_1 \cdot C_b \\ &= 0,85 \cdot 268,5 \\ &= 228,225 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kontrol Regangan Tulangan Tarik

$$\epsilon_{s1} = \frac{cb-d1}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{268,5 - 40}{268,5} 0,003 = 0,00255$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{cb-d2}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{268,5 - 93,75}{268,5} 0,003 = 0,00195$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{cb-d2}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{268,5-247,5}{237,5} 0,003 = 0,000235$$

Kontrol Regangan Tulangan Desak

$$\varepsilon_{s4} = \frac{d3-cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{347,5-268,5}{268,5} 0,003 = 0,00088$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d4-cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{447,5-268,5}{268,5} 0,003 = 0,002$$

Tegangan Baja dan beton

Nilai tegangan baja tergantung nilai regangan baja yang terjadi jika nilai regangan yang terjadi lebih kecil dari nilai regangan lelehnya maka digunakan persamaan :

$$F_s = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A$$

Apabila nilai regangan yang terjadi lebih besar dari nilai regangan lelehnya maka digunakan persamaan :

$$F_s = \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A$$

$$C_s = F_{s1} + F_{s2}$$

$$F_{s1} = \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A_1 = \frac{0,00255}{0,00255} 400 \cdot 603,186 = 241,274 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A_2 = 0,00195 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 157,03 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s3} + F_{s4} + F_{s5}$$

$$F_{s3} = \varepsilon_{s3} \cdot E_s \cdot A_3 = 0,000235 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 37,741 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \varepsilon_{s4} \cdot E_s \cdot A_4 = 0,00088 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 70,898 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \frac{\varepsilon_{s5}}{\varepsilon_{s5}} \cdot f_y \cdot A_5 = \frac{0,002}{0,002} \cdot 400 \cdot 1005,3 = 402,123 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 228,225 \\ &= 2600695,2 \text{ N} = 2600,695 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_n &= C_c + C_s + T_s \\ &= 2600,695 + (241,274 + 157,03) + (37,741 + 70,898 + 402,123) \end{aligned}$$

$$= 3509,855 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} M_{nb} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\ &= 2600,695 \cdot \left(429,5 - \frac{132,6}{2} - 92 \right) + 398,304 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) + \\ &\quad 510,854 \cdot 185,75 \\ &= 506,024 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Karena $\{\epsilon_s\} \leq \epsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0,65 \cdot 3509,855 = 2281,405 \text{ kN}$$

$$M_u = 0,65 \cdot 506,024 = 328,916 \text{ kN/m}$$

Penampang Dengan Kondisi Desak

Pada kondisi patah desak $c > cb$, maka pada perhitungan ini diambil tebal beton desak

$$\begin{aligned} c &= 1,5 \cdot c_b \\ &= 1,5 \cdot 268,5 = 402,75 \text{ mm} \\ a &= \beta_1 \cdot c \\ &= 0,85 \cdot 402,75 = 342,3375 \text{ mm} \end{aligned}$$

Regangan Baja

Kontrol Regangan Tulangan Tarik

$$\begin{aligned} \epsilon_{s1} &= \frac{cb-d1}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{402,75-40}{402,75} 0,003 = 0,002702 \\ \epsilon_{s2} &= \frac{cb-d2}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{402,75-93,75}{402,75} 0,003 = 0,002301 \\ \epsilon_{s3} &= \frac{cb-d3}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{402,75-247,5}{402,75} 0,003 = 0,00115 \\ \epsilon_{s4} &= \frac{cb-d4}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{402,75-347,5}{402,75} 0,003 = 0,000412 \end{aligned}$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\epsilon_{s5} = \frac{d5-cb}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{447,5-402,75}{402,75} 0,003 = 0,000333$$

Tegangan Baja dan Beton

$$C_s = F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4}$$

$$F_{s1} = \frac{\epsilon_{s1}}{\epsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A_1 = \frac{0,002702}{0,002702} \cdot 400 \cdot 603,186 = 241,2743 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \frac{\epsilon_{s2}}{\epsilon_{s2}} \cdot f_y \cdot A_2 = \frac{0,002301}{0,002301} \cdot 400 \cdot 402,124 = 160,849 \text{ kN}$$

$$F_{s3} = \epsilon_{s3} \cdot E_s \cdot A_3 = 0,000115 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 186,010 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \epsilon_{s4} \cdot E_s \cdot A_4 = 0,000412 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 33,098 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s5}$$

$$F_{s5} = \epsilon_{s5} \cdot E_s \cdot A_5 = 0,000333 \cdot 200000 \cdot 1005,3 = 67,02 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 342,337 \\ &= 3901,0428 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_n &= C_c + C_s + T_s \\ &= 3901,0428 + (241,2743 + 160,849 + 186,010 + 33,098) + 67,02 \\ &= 4589,296 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{nb} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\ &= 3901,0428 \cdot \left(429,5 - \frac{342,337}{2} - 185,75 \right) + 621,232 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) \\ &\quad + 67,02 \cdot 185,75 \\ &= 410,986 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Karena $\{\epsilon_s\} \leq \epsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0,65 \cdot 4589,296 = 2983,042 \text{ kN}$$

$$M_u = 0,65 \cdot 410,986 = 267,14 \text{ kN/m}$$

Penampang Dengan Kondisi Patah Tarik

$$\begin{aligned} c &= 0,9 c_b \\ &= 0,9 \cdot 268,5 = 241,65 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$a = \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 241,65 = 205,402 \text{ mm}$$

Regangan Baja

Kontrol regangan tulangan tarik

$$\varepsilon_{s1} = \frac{cb-d1}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{241,65 - 40}{241,65} 0,003 = 0,00250$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{cb-d2}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{241,65 - 93,75}{241,65} 0,003 = 0,00183$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\varepsilon_{s3} = \frac{d3-cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{247,5 - 241,65}{241,65} 0,003 = 0,00072$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{d4 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{337,5 - 241,65}{241,65} 0,003 = 0,00131$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d5 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{447,5 - 241,65}{241,65} 0,003 = 0,00255$$

Tegangan baja dan beton

$$C_s = F_{s1} + F_{s2}$$

$$F_{s1} = \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A_1 = \frac{0,00250}{0,00250} 400 \cdot 603,186 = 241,274 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A_2 = 0,00183 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 147,67 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s3} + F_{s4} + F_{s5}$$

$$F_{s3} = \varepsilon_{s3} \cdot E_s \cdot A_3 = 0,00072 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 11,681 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \varepsilon_{s4} \cdot E_s \cdot A_4 = 0,00131 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 105,685 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \varepsilon_{s5} \cdot E_s \cdot A_5 = 0,00255 \cdot 200000 \cdot 1005,3 = 241,275 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 205,403 \\ &= 2340,6257 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_n &= C_c + C_s + T_s \\ &= 2340,6257 + (241,274 + 147,67) + (11,681 + 105,685 + 241,275) \\ &= 3360,762 \text{ kN} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
&= 2340,6257 \cdot \left(429,5 - \frac{205,403}{2} - 185,75 \right) + 388,944 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) \\
&\quad + 631,192 \cdot 185,75 \\
&= 519,633 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

Karena $\{\varepsilon_s\} \leq \varepsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0,65 \cdot 3360,762 = 2184,495 \text{ kN}$$

$$M_u = 0,65 \cdot 519,633 = 337,761 \text{ kN/m}$$

Penampang Kolom Kondisi Lentur Murni

Keseimbangan gaya-gaya horizontal:

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s \cdot f_y = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b + A_s' \cdot \frac{a - \beta_1 \cdot d}{a} \cdot \varepsilon_c \cdot E_s$$

$$3216,991 \cdot 400 = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 487,5 + 3216,991 \cdot \frac{a - 0,85 \cdot 58}{a} \cdot 0,003 \cdot 200000$$

$$1286796,4 a = 11395,313 a^2 + 1930194,5 a - 95158590$$

$$11395,313 a^2 + 643398,18 a - 95158590$$

Dari persamaan diatas, dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua atau persamaan ABC, maka didapatkan nilai a sebesar 123,874 mm letak garis netral,

$$\begin{aligned}
c &= a \cdot \beta_1 \\
&= 123,874 \cdot 0,85 = 105,293 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Tegangan baja dan beton

Kontrol regangan tulangan tarik

$$\varepsilon_{s1} = \frac{cb - d1}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{105,293 - 40}{105,293} \cdot 0,003 = 0,00186$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{cb - d2}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{105,293 - 93,75}{105,293} \cdot 0,003 = 0,000329$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\varepsilon_{s3} = \frac{d3 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{247,5 - 105,293}{105,293} \cdot 0,003 = 0,00405$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{d4 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{347,5 - 105,293}{105,293} \cdot 0,003 = 0,00690$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d5-cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{447,5 - 105,293}{105,293} \cdot 0,003 = 0,00975$$

Tegangan baja dan beton

$$C_s = F_{s1} + F_{s2}$$

$$F_{s1} = \varepsilon_{s1} \cdot E_s \cdot A_1 = 0,00186 \cdot 20000 \cdot 603,183 = 224,424 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A_2 = 0,000328 \cdot 20000 \cdot 402,124 = 26,450 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s3} + F_{s4} + F_{s5}$$

$$F_{s3} = \frac{\varepsilon_{s3}}{\varepsilon_{s3}} f_y A_3 = \frac{0,00405}{0,00405} \cdot 400 \cdot 804,2477 = 321,699 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \frac{\varepsilon_{s4}}{\varepsilon_{s4}} f_y A_4 = \frac{0,00690}{0,00690} \cdot 400 \cdot 402,124 = 160,849 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \frac{\varepsilon_{s5}}{\varepsilon_{s5}} f_y A_5 = \frac{0,00975}{0,00975} \cdot 400 \cdot 1005,3 = 402,123 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 123,874 \\ &= 1411,5854 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$P_n = 0$$

$$\begin{aligned} M_{nb} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\ &= 1411,5854 \cdot \left(429,5 - \frac{123,874}{2} - 185,75 \right) + 250,874 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) \\ &\quad + 884,672 \cdot 185,75 \\ &= 480,687 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Karena $\{\varepsilon_s\} \leq \varepsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0$$

$$M_u = 0,65 \cdot 480,687 = 312,446 \text{ kN/m}$$

Penampang Kolom Kondisi Tarik Murni

$$\begin{aligned} P_n - T &= -(A_s + A_s') \cdot f_y \\ &= -(2025 + 2025) \cdot 400 \\ &= -165200 \text{ N} = -165,24 \text{ t} \end{aligned}$$

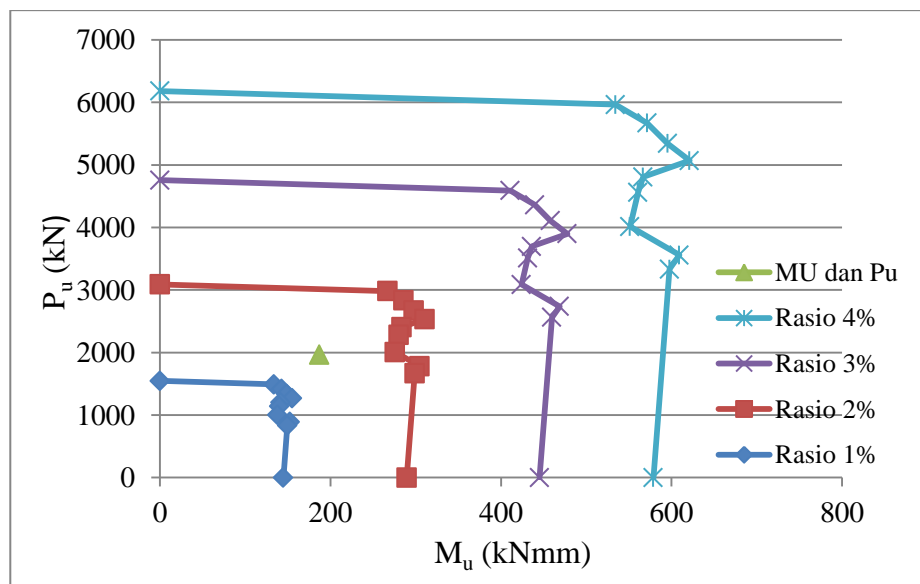
$$M_n = 0$$

Dengan mengubah nilai C sedemikian sehingga diperoleh banyak persamaan P_u dan M_u , kemudain Jika nilai diplot dalam satu diagram, dimana P_u

di plot kedalam sumbu y dan M_u diplot dalam sumbu x maka akan terbentuklah suatu diagram interaksi kolom bujur sangkar uniaksial. Karena $B=H$ maka Untuk hitungan B sama dengan arah H di atas.

Tabel 1.18 Rekap P_u dan M_u Dalam Arah B maupun H Pada Kolom L

P_n dan M_n		P_u dan M_u	
P_n (kN)	M_n (kN)	P_u (kN)	M_u (kN)
2222,96	0	1444,92	0
1928,89	119,644	1253,78	77,768547
1848,87	124,767	1201,76	81,098519
1776,55	129,366	1154,76	84,087794
1750,98	137,033	1138,14	89,071286
1737,67	144,594	1129,48	93,986341
1622,75	141,575	1054,79	92,02374
1615,69	147,246	1050,2	95,709598
1912,07	183,454	1242,84	119,24515
2069,49	200,558	1345,17	130,36275
0	141,017	0	91,660733



Gambar 1.37 Diagram Interaksi M_u - P_u Kolom L

Dari diagram M_u - P_u pada Gambar 5.37, maka didapat nilai rasio tulangan (ρ) untuk kolom plus arah x sebesar 1,6 %, sehingga dapat dihitung jumlah tulangan yang dipakai sebesar :

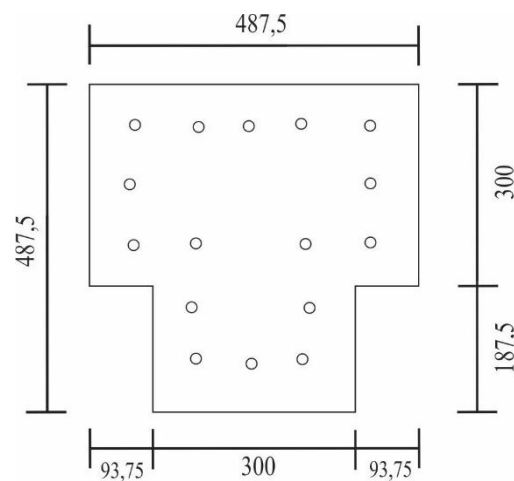
$$\rho = 1,6 \%$$

$$n \text{ tulangan} = \frac{\rho \cdot b \cdot h}{A_{1d}} = \frac{1,6 \cdot 202500}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2} = 16 \text{ buah}$$

Dipakai jumlah tulangan plus arah x sebanyak 16 buah

Untuk perhitungan perencanaan kolom yang lain dilakukan dengan cara yang sama, sehingga hasil yang didapatkan dapat tulanga plus sebanyak 16 buah.

c. Kolom T



Gambar 1.38 Konfigurasi Tulangan Kolom T

Diketahui kolom sebagai berikut:

$$M_{ux} = 76,335 \text{ kNm}$$

$$M_{uy} = 76,335 \text{ kNm}$$

$$P_u = 2084,87 \text{ kN}$$

$$f'_c = 27,5 \text{ MPa}$$

$$\beta = 0,85$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \sqrt{27,5} = 24647,008 \text{ MPa}$$

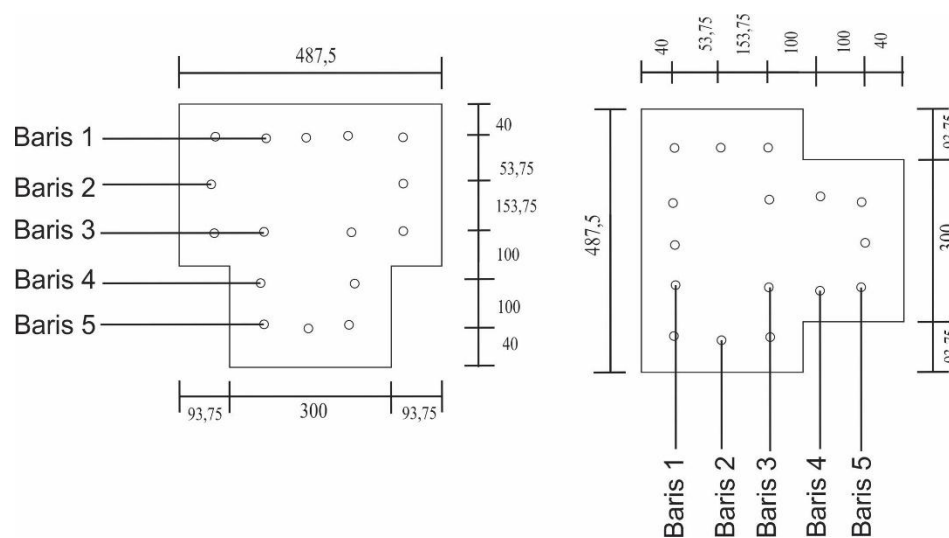
$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

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

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200000} = 0,002$$

$$D = 16 \text{ mm}$$

Konfigurasi tulangan pada arah H dapat dilihat pada gambar dan tabel dibawah berikut :



Gambar 1.39 Propertis Kolom T Pada Arah x Dan y

Tabel 1.19 Data Section Propertis Kolom T Pada Arah x Dan y

No Baris	1	2	3	4	5
Jumlah Tulangan	5	2	4	2	3
D_i (Jarak tulangan)	40	93,75	247,5	347,5	447,5
A_i (mm ²)	1005,31	402,1239	804,2477	402,1239	603,186

Kekuatan kolom pada beban sentris

Konfigurasi Tulangan

$$A_g = B \cdot H = (300 \cdot 487,5) + (300 \cdot 93,75) + (300 \cdot 93,75) = 202500 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan A_{du} :

$$A_{Du} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_u^2 = \frac{1}{4} \pi 16^2 = 201,0619 \text{ mm}^2$$

Luas Tulangan Total Ast :

$$\begin{aligned} A_{st} &= n \cdot A_{du} \\ &= 16 \cdot 201,0619 \\ &= 3216,991 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Penampang Kolom Pada Kondisi Batas Sentris

$$\begin{aligned} P_0 &= 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \\ &= 0,85 \cdot 27,5 (202500 - 3216,991) + 3216,991 \cdot 400 \\ &= 5945037 \text{ N} \\ &= 5945,037 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\max} &= 0,8 \cdot (0,85 f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y) \\ &= 0,8 \cdot (0,85 \cdot 27,5 (202500 - 3216,991) + 3216,991 \cdot 400) \\ &= 4756029 \text{ N} \\ &= 4756,029 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{u,\max} &= 0,65 \cdot P_{n,\max} \\ &= 0,65 \cdot 4756,029 \\ &= 3091,419 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kekuatan kolom pada kondisi seimbang

$$C_b = \frac{600 d}{600 + f_y} = \frac{600 (487,5 - 40)}{600 + 400} = 268,5 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} a &= \beta_1 \cdot C_b \\ &= 0,85 \cdot 268,5 \\ &= 228,225 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kontrol Regangan Tulangan Tarik

$$\epsilon_{s1} = \frac{cb - d1}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{268,5 - 40}{268,5} 0,003 = 0,00255$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{cb-d2}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{268,5 - 93,75}{268,5} 0,003 = 0,00195$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{cb-d2}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{268,5 - 247,5}{237,5} 0,003 = 0,000235$$

Kontrol Regangan Tulangan Desak

$$\varepsilon_{s4} = \frac{d3-cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{347,5 - 268,5}{268,5} 0,003 = 0,00088$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d4 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{447,5 - 268,5}{268,5} 0,003 = 0,002$$

Tegangan Baja dan beton

Nilai tegangan baja tergantung nilai regangan baja yang terjadi jika nilai regangan yang terjadi lebih kecil dari nilai regangan lelehnya maka digunakan persamaan :

$$F_s = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A$$

Apabila nilai regangan yang terjadi lebih besar dari nilai regangan lelehnya maka digunakan persamaan :

$$F_s = \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A$$

$$C_s = F_{s1} + F_{s2}$$

$$F_{s1} = \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A_1 = \frac{0,00255}{0,00255} 400 \cdot 1005,3 = 402,123 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A_2 = 0,00195 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 157,03 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s3} + F_{s4} + F_{s5}$$

$$F_{s3} = \varepsilon_{s3} \cdot E_s \cdot A_3 = 0,000235 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 37,741 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \varepsilon_{s4} \cdot E_s \cdot A_4 = 0,00088 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 70,989 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \frac{\varepsilon_{s5}}{\varepsilon_{s5}} \cdot f_y \cdot A_5 = \frac{0,002}{0,002} \cdot 400 \cdot 603,186 = 241,274 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 228,225 \\ &= 2600695,2 \text{ N} = 2600,695 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_n &= C_c + C_s + T_s \\
 &= 2600,695 + (402,123 + 157,03) + (37,741 + 70,989 + 241,274) \\
 &= 3509,855 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{nb} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\
 &= 2600,695 \cdot \left(429,5 - \frac{132,6}{2} - 92 \right) + 559,154 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) + \\
 &\quad 350,005 \cdot 185,75 \\
 &= 506,024 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Karena $\{\varepsilon_s\} \leq \varepsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0,65 \cdot 3509,855 = 2281,405 \text{ kN}$$

$$M_u = 0,65 \cdot 506,024 = 328,916 \text{ kN/m}$$

Penampang Dengan Kondisi Desak

Pada kondisi patah desak $c > cb$, maka pada perhitungan ini diambil tebal beton desak

$$\begin{aligned}
 c &= 1,5 \cdot c_b \\
 &= 1,5 \cdot 268,5 = 402,75 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a &= \beta_1 \cdot c \\
 &= 0,85 \cdot 402,75 = 342,3375 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Regangan Baja

Kontrol Regangan Tulangan Tarik

$$\varepsilon_{s1} = \frac{cb-d1}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{402,75-40}{402,75} 0,003 = 0,002702$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{cb-d2}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{402,75-93,75}{402,75} 0,003 = 0,002301$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{cb-d3}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{402,75-247,5}{402,75} 0,003 = 0,00115$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{cb-d4}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{402,75-347,5}{402,75} 0,003 = 0,000412$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d5-cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{447,5-402,75}{402,75} 0,003 = 0,000333$$

Tegangan Baja dan Beton

$$C_s = F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4}$$

$$F_{s1} = \frac{\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A_1 = \frac{0,002702}{0,002702} \cdot 400 \cdot 1005,3 = 402,123 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \frac{\varepsilon_{s2}}{\varepsilon_{s2}} \cdot f_y \cdot A_2 = \frac{0,002301}{0,002301} \cdot 400 \cdot 402,124 = 160,849 \text{ kN}$$

$$F_{s3} = \varepsilon_{s3} \cdot E_s \cdot A_3 = 0,000115 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 186,01 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \varepsilon_{s4} \cdot E_s \cdot A_4 = 0,000411 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 33,098 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s5}$$

$$F_{s5} = \varepsilon_{s5} \cdot E_s \cdot A_5 = 0,000333 \cdot 200000 \cdot 603,186 = 40,212 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 342,337 \\ &= 3901,0428 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_n &= C_c + C_s + T_s \\ &= 3901,0428 + (402,123 + 160,849 + 186,01 + 33,098) + 40,212 \\ &= 4723,337 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{nb} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\ &= 3901,0428 \cdot \left(429,5 - \frac{342,337}{2} - 185,75 \right) + 782,082 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) \\ &\quad + 40,212 \cdot 185,75 \\ &= 435,884 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Karena $\{\varepsilon_s\} \leq \varepsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0,65 \cdot 4723,337 = 3070,169 \text{ kN}$$

$$M_u = 0,65 \cdot 435,884 = 283,324 \text{ kN/m}$$

Penampang Dengan Kondisi Patah Tarik

$$\begin{aligned} c &= 0,9 c_b \\ &= 0,9 \cdot 268,5 = 241,65 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$a = \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 241,65 = 205,402 \text{ mm}$$

Regangan Baja

Kontrol regangan tulangan tarik

$$\epsilon_{s1} = \frac{cb-d1}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{241,65 - 40}{241,65} 0,003 = 0,00250$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{cb-d2}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{241,65 - 93,75}{241,65} 0,003 = 0,00183$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\epsilon_{s3} = \frac{d3-cb}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{247,5 - 241,65}{241,65} 0,003 = 0,00072$$

$$\epsilon_{s4} = \frac{d4 - cb}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{337,5 - 241,65}{241,65} 0,003 = 0,00131$$

$$\epsilon_{s5} = \frac{d5 - cb}{cb} \epsilon_{cu} = \frac{447,5 - 241,65}{241,65} 0,003 = 0,00255$$

Tegangan baja dan beton

$$C_s = F_{s1} + F_{s2}$$

$$F_{s1} = \frac{\epsilon_{s1}}{\epsilon_{s1}} \cdot f_y \cdot A_1 = \frac{0,00250}{0,00250} 400 \cdot 1005,3 = 402,123 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \epsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A_2 = 0,00183 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 147,67 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s3} + F_{s4} + F_{s5}$$

$$F_{s3} = \epsilon_{s3} \cdot E_s \cdot A_3 = 0,00072 \cdot 200000 \cdot 804,2477 = 11,681 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \epsilon_{s4} \cdot E_s \cdot A_4 = 0,00131 \cdot 200000 \cdot 402,124 = 105,68 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \epsilon_{s5} \cdot E_s \cdot A_5 = 0,00255 \cdot 200000 \cdot 603,186 = 241,275 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \\ &= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 205,403 \\ &= 2340,6257 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_n &= C_c + C_s + T_s \\ &= 2340,6257 + (402,123 + 147,67) + (11,681 + 105,68 + 241,275) \\ &= 3249,061 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{nb} &= C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s \cdot (d - d' - d'') + T_s \cdot d'' \\
&= 2340,6257 \cdot \left(429,5 - \frac{205,403}{2} - 185,75 \right) + 549,793 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) \\
&\quad + 358,641 \cdot 185,75 \\
&= 498,884 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

Karena $\{\varepsilon_s\} \leq \varepsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0,65 \cdot 3249,061 = 2111,89 \text{ kN}$$

$$M_u = 0,65 \cdot 498,884 = 324,274 \text{ kN/m}$$

Penampang Kolom Kondisi Lentur Murni

Keseimbangan gaya-gaya horizontal:

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s \cdot f_y = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b + A_s' \cdot \frac{a - \beta_1 \cdot d}{a} \cdot \varepsilon_c \cdot E_s$$

$$3216,991 \cdot 400 = 0,85 \cdot 27,5 \cdot a \cdot 487,5 + 3216,991 \cdot \frac{a - 0,85 \cdot 58}{a} \cdot 0,003 \cdot 200000$$

$$1286796,4 a = 11395,313 a^2 + 1930194,5 a - 95158590$$

$$11395,313 a^2 + 643398,18 a - 95158590$$

Dari persamaan diatas, dengan menggunakan persamaan polinomial tingkat dua atau persamaan ABC, maka didapatkan nilai a sebesar 123,874 mm letak garis netral,

$$c = a \cdot \beta_1$$

$$= 123,874 \cdot 0,85 = 105,293 \text{ mm}$$

Tegangan baja dan beton

Kontrol regangan tulangan tarik

$$\varepsilon_{s1} = \frac{cb - d1}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{105,293 - 40}{105,293} \cdot 0,003 = 0,00186$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{cb - d2}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{105,293 - 93,75}{105,293} \cdot 0,003 = 0,000329$$

Kontrol regangan tulangan desak

$$\varepsilon_{s3} = \frac{d3 - cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{247,5 - 105,293}{105,293} \cdot 0,003 = 0,00405$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{d4-cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{347,5 - 105,293}{105,293} 0,003 = 0,00690$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{d5-cb}{cb} \varepsilon_{cu} = \frac{447,5 - 105,293}{105,293} 0,003 = 0,00975$$

Tegangan baja dan beton

$$C_s = F_{s1} + F_{s2}$$

$$F_{s1} = \varepsilon_{s1} \cdot E_s \cdot A_1 = 0,00186 \cdot 20000 \cdot 1005,3 = 374,04 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \varepsilon_{s2} \cdot E_s \cdot A_2 = 0,000328 \cdot 20000 \cdot 402,124 = 26,45 \text{ kN}$$

$$T_s = F_{s3} + F_{s4} + F_{s5}$$

$$F_{s3} = \frac{\varepsilon_{s3}}{\varepsilon_{s3}} f_y A_3 = \frac{0,00405}{0,00405} \cdot 400 \cdot 804,2477 = 321,699 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \frac{\varepsilon_{s4}}{\varepsilon_{s4}} f_y A_4 = \frac{0,00690}{0,00690} \cdot 400 \cdot 402,124 = 160,849 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \frac{\varepsilon_{s5}}{\varepsilon_{s5}} f_y A_5 = \frac{0,00975}{0,00975} \cdot 400 \cdot 603,183 = 241,274 \text{ kN}$$

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

$$= 0,85 \cdot 27,5 \cdot 487,5 \cdot 123,874$$

$$= 1411,5854 \text{ kN}$$

$$P_n = 0$$

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

$$= 1411,5854 \cdot \left(429,5 - \frac{123,874}{2} - 185,75 \right) + 400,49 \cdot (429,5 - 58 - 185,75) \\ + 723,822 \cdot 185,75$$

$$= 478,6 \text{ kN/m}$$

Karena $\{\varepsilon_s\} \leq \varepsilon_y$, maka digunakan $\phi = 0,65$

$$P_u = 0$$

$$M_u = 0,65 \cdot 478,6 = 311,09 \text{ kN/m}$$

Penampang Kolom Kondisi Tarik Murni

$$P_n - T = -(A_s + A_s') \cdot f_y$$

$$= -(2025 + 2025) \cdot 400$$

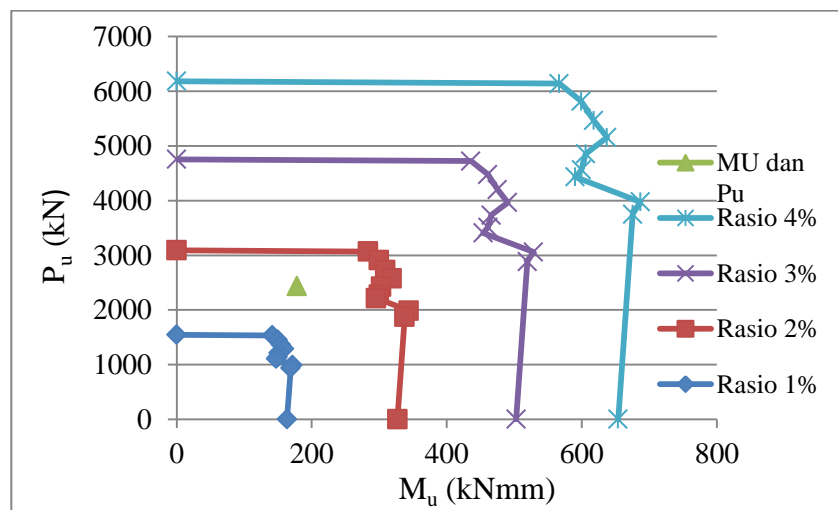
$$= -165200 \text{ N} = -165,24 \text{ t}$$

$$M_n = 0$$

Dengan mengubah nilai C sedemikian sehingga diperoleh banyak persamaan P_u dan M_u , kemudian Jika nilai diplot dalam satu diagram, dimana P_u di plot kedalam sumbu y dan M_u diplot dalam sumbu x maka akan terbentuklah suatu diagram interaksi kolom bujur sangkar uniaksial. Karena $B=H$ maka Untuk hitungan B sama dengan arah H di atas.

Tabel 1.20 Rekap P_u dan M_u Dalam Arah B Maupun H Pada Kolom T

P_n dan M_n		P_u dan M_u	
P_n (kN)	M_n (kN)	P_u (kN)	M_u (kN)
2222,96	0	1444,92	0
1928,89	119,644	1253,78	77,768547
1848,87	124,767	1201,76	81,098519
1776,55	129,366	1154,76	84,087794
1750,98	137,033	1138,14	89,071286
1737,67	144,594	1129,48	93,986341
1622,75	141,575	1054,79	92,02374
1615,69	147,246	1050,2	95,709598
1912,07	183,454	1242,84	119,24515
2069,49	200,558	1345,17	130,36275
0	141,017	0	91,660733



Gambar 1.40 Diagram Interaksi M_u - P_u Kolom T

Dari diagram M_u - P_u pada Gambar 5.40, maka didapat nilai rasio tulangan (ρ) untuk kolom plus arah x sebesar 1,6 %, sehingga dapat dihitung jumlah tulangan yang dipakai sebesar :

$$\rho = 1,6 \%$$

$$n \text{ tulangan} = \frac{\rho \cdot b \cdot h}{A_{1d}} = \frac{1,6 \cdot 202500}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2} = 16 \text{ buah}$$

Dipakai jumlah tulangan plus arah x sebanyak 16 buah

Untuk perhitungan perencanaan kolom yang lain dilakukan dengan cara yang sama, sehingga hasil yang didapatkan dapat tulanga plus sebanyak 16 buah.

5.7 Analisis Struktur Dengan Pushover

5.7.1 Perhitungan Momen Kurvatur Dengan Response 2000 Sebagai Input Sendi Plastis pada Analisis *Pushover*

1. Input Material

Dalam progam *Response 2000* diperlukan data-data material penampang balok dan kolom yang dianalisis. Data tersebut adalah f'_c (*Cylinder Strength*), f_r kuat taraiik beton (*Tension Strength*), nilai regangan yang terjadi disat mencapai nilai f'_c (*Peak Strain*), dan ukuran agregat pada balok yang di input pada menu material *page*. Data – data balok dan kolom yang diperlukan adalah sebagai berikut :

a. $f'_c = 27,5 \text{ MPa}$ (*Cylinder Strength*),

b. $f_r = 0.62 \times \sqrt{f'_c} = 0.62 \times \sqrt{27,5} = 3,26 \text{ MPa}$ (*Tension Strength*),

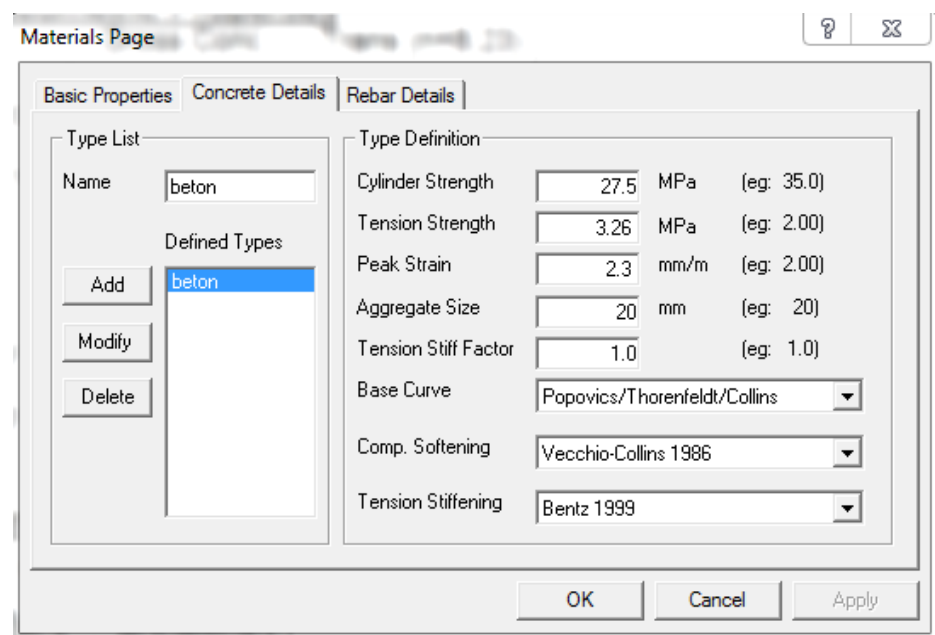
c. Untuk Peak Strain didapat dengan membuat kurva tegangan regangan dengan rumus seperti berikut :

1) $\epsilon_c = \frac{2f'_c}{E_c}$ dimana $E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c} = 4700 \times \sqrt{27,5} = 24647,01 \text{ MPa}$

,sehingga $\epsilon_c = \frac{2 \times 27,5}{24647,01} = 0,002232$

2) $\epsilon_u = 1,9 \cdot \epsilon_c = 1,9 \cdot 0,002232 = 0,004241$

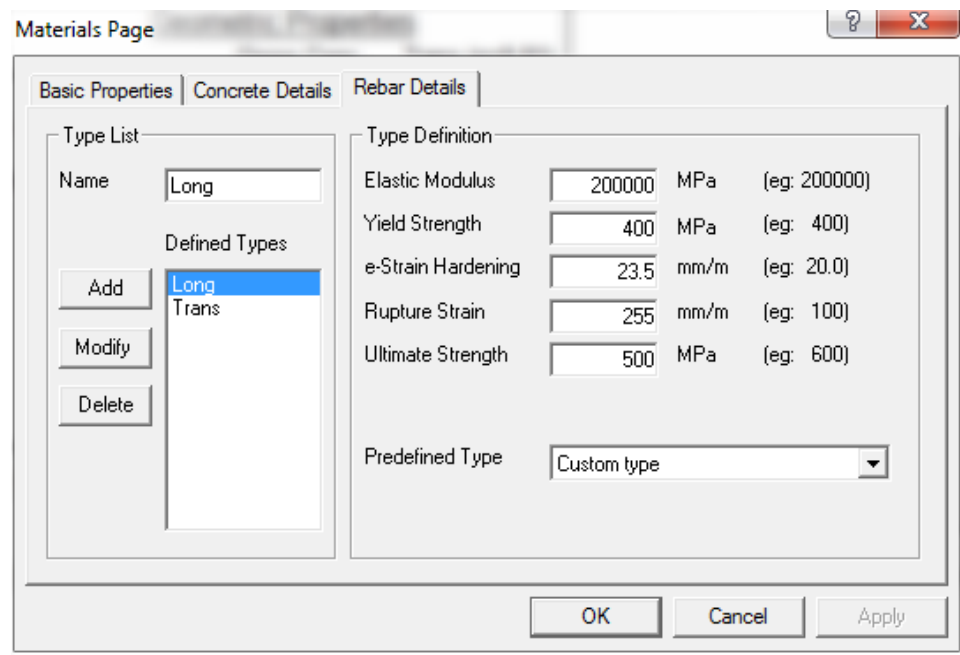
- 3) Nilai *Peak Strain* = 2,3 , dalam mm/m dengan ukuran agegat 20 mm (*Aggregate Size*)
- 4) *Tension Stiff factor* = 1,0
- 5) *Base curve* = *Popovics/Thorenfeldt /Colins*
- 6) *Comp.softening* = *Vacchio-Colins 1986*
- 7) *Tension Stiffening* = *Bentz 1999*, seperti Gambar 5.41 berikut :



Gambar 1.41 Data-Data Material Untuk Beton

- 8) Sedangkan untuk material baja tulangan logitudinal $f_y = 400$ MPa dalam input pada Response 2000 diperlukan data-deta E (*Elastic Modulus*), f_y (*Yield Strength*), nilai regangan pada saat terjadi *Strain Hardening*, Regangan pada saat terjadi tegangan *ultimit* (*Rupture Strain*), dan nilai tegangan ultimit yang terjadi (*Ultimate Strength*). Sebagai berikut:
 - a. E (*Elastic Modulus*) = 200000 MPa
 - b. $F_y = 400$ MPa, maka dari modulus *response 2000* diperoleh nilai regangan pada saat teradi tegangan *Ultimit* (*Rupture Strain*), dan nilai tegangan *Ultimit* yang teradi (*Utimate Strength*)

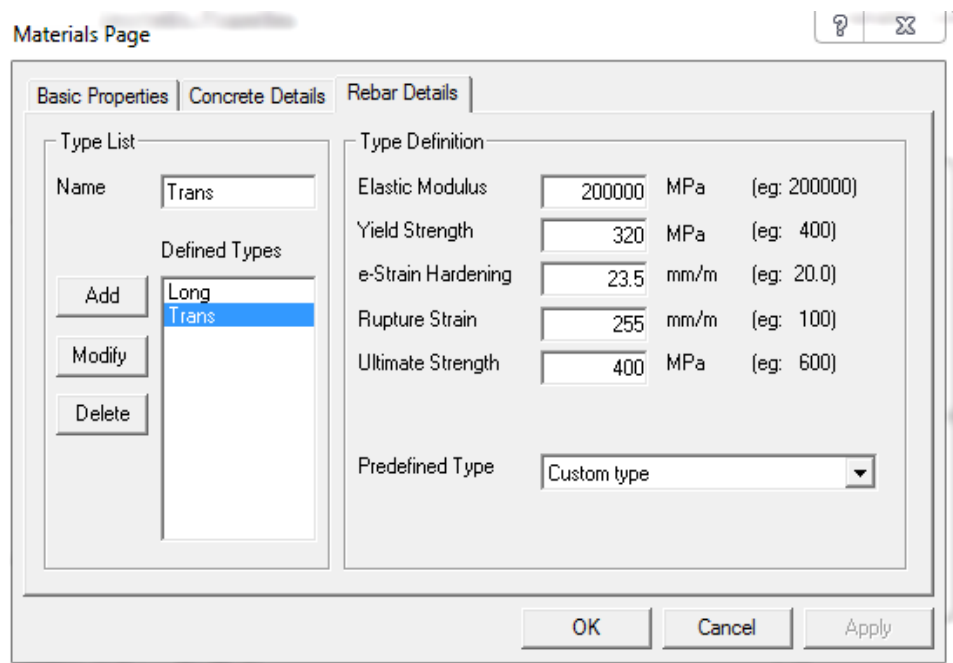
- c. Nilai regangan pada saat terjadi *strain hardening* = 23,5 mm/m
- d. Regangan terjadi pada saat terjadi tegangan ultimit (*rupture strain*) = 110 akan tetapi diambil maksimal 255
- e. Tegangan *ultimit* yang terjadi (*Ultimate Strength*) sesuai SNI 03-2847-2013, $1,25 \times f = 1,25 \times 400 = 500$ MPa, seperti pada Gambar 5.42 berikut:



**Gambar 1.42 Data-Data Material Untuk Baja tulangan logintudinal
 $f_y = 400$**

- 9) Material baja tulangan logintudinal $f_y = 320$ Mpa dalam input pada *response 2000* diperlukan data-deta E (*Elastic Modulus*), f_y (*Yield Strength*), nilai regangan pada saat terjadi Strain Hardening, Regangan pada saat terjadi tegangan ultimit (*Rupture Strain*), dan nilai tegangan ultimit yang terjadi (*Ultimate Strength*). Sebagai berikut:
- a. E (*Elastic Modulus*) = 200000 MPa
 - b. $F_y = 320$ MPa , maka dari modulus *Response 2000* diperoleh nilai regangan pada saat teradi tegangan *Ultimit* (*Rupture*

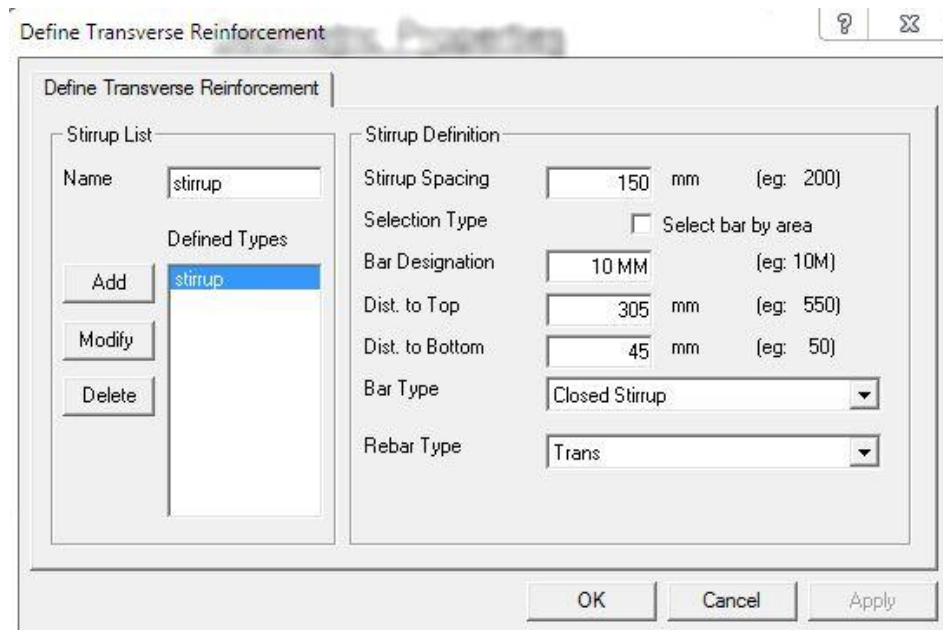
- Strain*), dan nilai tegangan *Ultimit* yang terjadi (*Ultimate Strength*)
- Nilai regangan pada saat terjadi *Strain Hardening* = 23,5 mm/m
 - Regangan terjadi pada saat terjadi tegangan ultimit (*Rupture Strain*) = 110 akan tetapi diambil maksimal 255
 - Tegangan ultimit yang terjadi (*Ultimate Strength*) sesuai SNI, $1,25 \times f = 1,25 \times 320 = 400 \text{ MPa}$, seperti pada Gambar 5.43 berikut:



Gambar 1.43 Data-Data Material Untuk Baja tulangan logintudinal $f_y = 320$

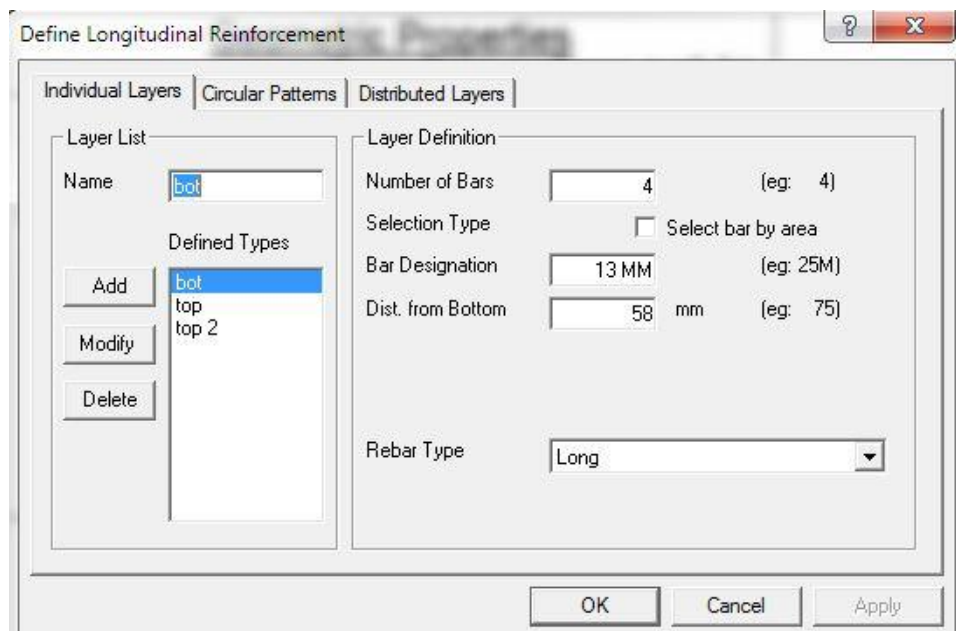
2. Input Tulangan Lentur dan Geser

Input pada program *Response2000* untuk tulangan lentur pada balok dan kolom dengan menu *Define Transverse Reinforcement* seperti Gambar 5.44 berikut :



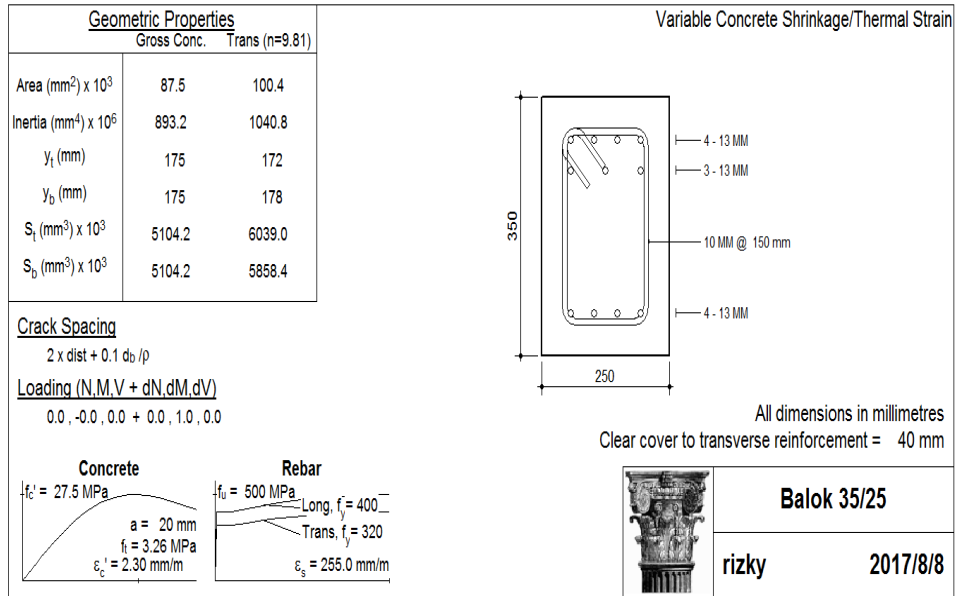
Gambar 1.44 Input Tulangan Geser Pada Balok

Input pada program *Response-2000* untuk tulangan geser pada balok dan kolom dengan menu *Define Logintudinal Reinforcement* seperti Gambar 5.45 berikut :

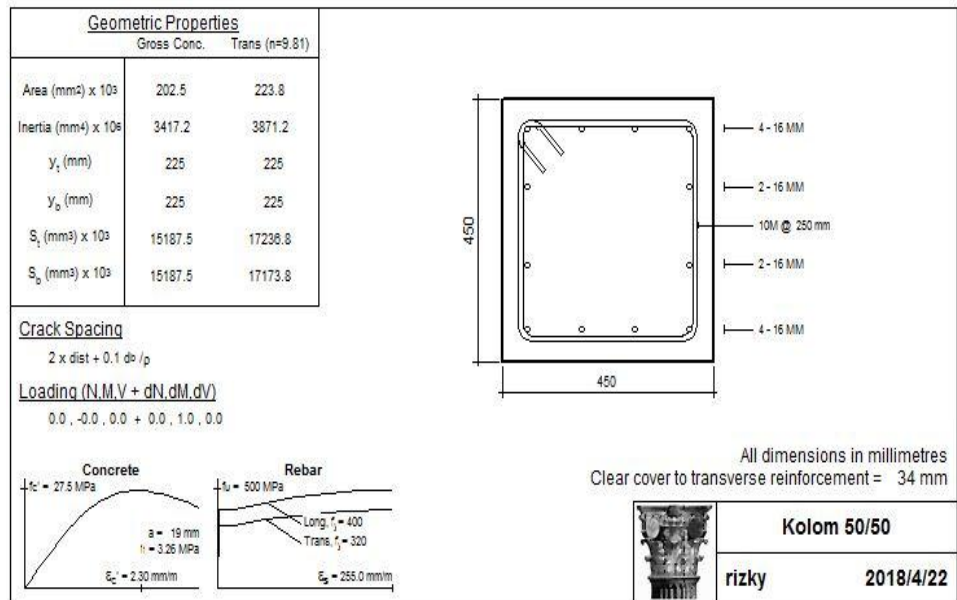


Gambar 1.45 Input Tulangan Lentur Pada Balok

Berikut merupakan hasil desain balok dan Kolom dengan *Response 2000* yang dapat dilihat pada Gambar 5.46 dan Gambar 5.47.



Gambar 1.46 Momen Balok (M3)



Gambar 1.47 Momen Kolom (P-M2-M3)

3. Pendefinisian Sendi Plastis pada Program SAP 2000

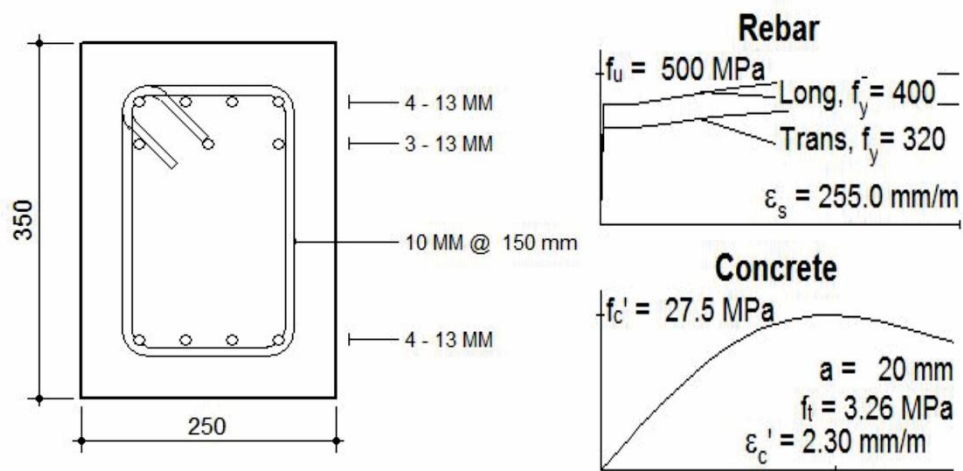
Pendefinisian sendi plastis elemen struktur menggunakan nilai dari *moment-curvature* yang menggambarkan kemampuan *deformasi* dari elemen struktur *moment-curvature* pada elemen struktur dimasukan secara manual pada program SAP2000 V14 berdasarkan ketentuan ATC 40 (1996) .

a. Perhitungan *Moment-curvature* Dengan Respons-2000 pada Balok

Salah satu Parameter penting dalam mendefinisikan propertis sendi plastis dari elemen stuktur yang telah dimodelkan pada SAP2000 V14 adalah kemampuan *deformasi* dari struktur yang dapat dinyatakan melalui nilai *moment-curvature* Oleh karena itu, sebelum mendefinisikan propertis sendi plastis dari elemen struktur, maka terlebih dahulu dihitung *momen* dan *curvature* dari dari elemen struktur tersebut. Dalam penelitian ini perhitungan *moment-curvature* untuk elemen balok dan kolom dilakukan dengan menggunakan bantuan Program *Response-2000*. Kurva *moment-curvature* untuk setiap balok dan kolom dapat langsung di peroleh melalui menu *Solve-Sectional Response*. Nilai *moment-curvature* akan muncul dari sisi sebelah kiri dari tampilan *Response-2000*.

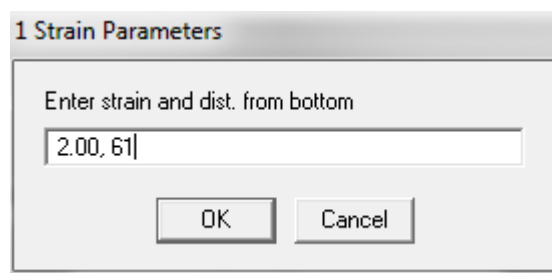
Berikut akan dielaskan tahapan analisis penampam untuk salah satu balok induk, yaitu untuk balok 25/35. Ukuran penampang balok dan propertis material pada *Response-2000* ditunjukkan pada Gambar 5.48. sesuai dengan balok pada *As Built Drawing* Struktur, diperoleh bahwa jumlah ukuran tulangan sama baik di ujung bentang maupun di tengah bentang balok.

Sendi Plastis untuk balok SAP2000 didefinisikan melalui kontak dialog *Frame Hinge Propertis Data*. Tipe sendi adalah *Deformation Controlled (Ductile)-Momen M3*. Tipe Parameter *Displacement Control* adalah *momen-curvature*. Panjang sendi plastis (*Hinge Length*)

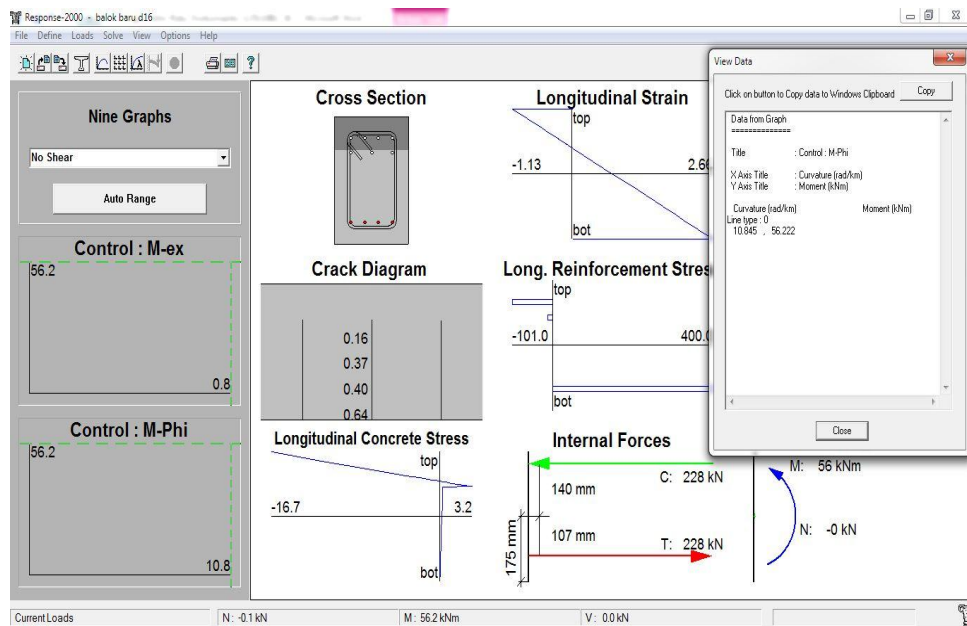


Gambar 1.48 Ukuran Penampang Dan Properti Material Balok Pada *Respon-2000*

Moment-curvature pada saat tulangan sebelah bawah leleh diperoleh dari response2000 dari menu *Solve-One Strain*. Pada *One-strain Parameter* diisi nilai regangan leleh baja (ϵ_y) sebesar 2 (dari $\epsilon_y = f_y/E_s = 400/200000 = 0,002$) dan jarak as tulangan bawah dari serat bawah balok , yaitu sebesar 61 mm. Kemudian dari Response2000 diperoleh hasil untuk *Moment-Curvature* sebesar : $M = 56,222$ kN dan $\phi = 10,845$ rad/km. Nilai ini merupakan Titik B⁺ pada Kurva *Moment-Curvature* pada SAP2000 atau seperti pada Gambar 5.50.

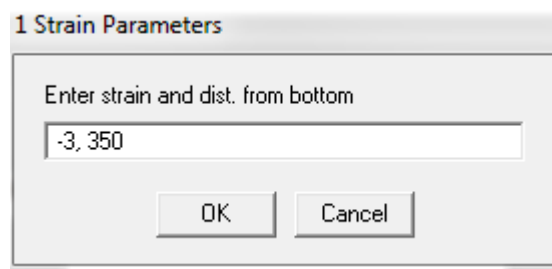


Gambar 1.49 Menu *Solve-One Strain* Pada Balok 25/35 Pada Titik B⁺

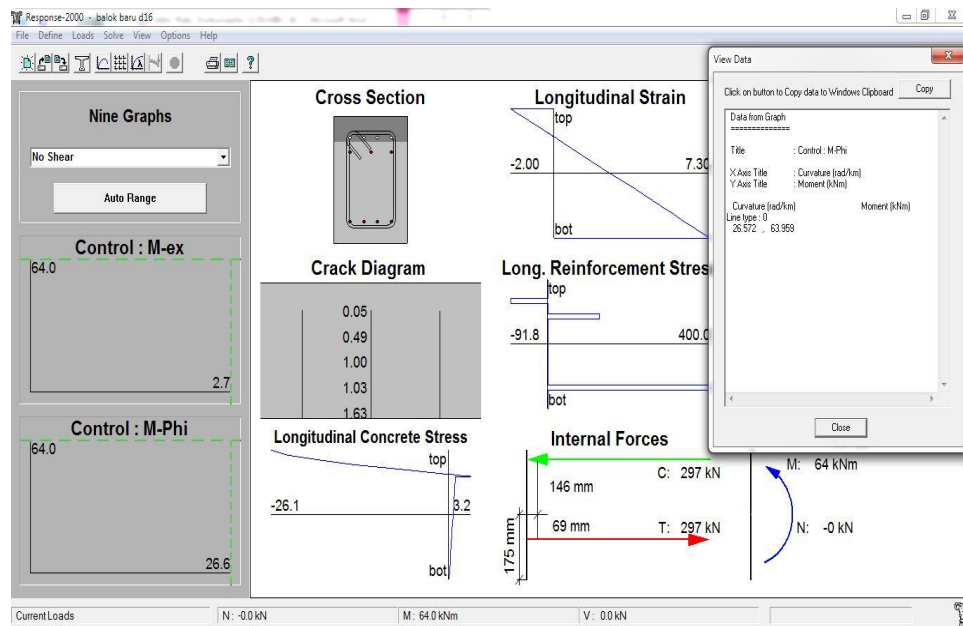


Gambar 1.50 Output Solve-One Strain Pada Balok 25/35 Pada Titik B+

Moment-curvature pada saat beton sebelah atas hancur diperoleh dengan mengisikan pada opsi *One-Strain Parameter* nilai regangan hancur beton sebesar -3 (dari $\epsilon_c = -0,003$) dan Jarak serat atas balok terhadap serat bawah balok yaitu sebesar 350 mm. Hasil *moment-curvature* sebesar : $M = 63,959$ kN dan $\phi = 26,572$ rad/km. Nilai M dan ϕ ini merupakan Titik C^+ Pada kurva *moment-curvature* pada SAP2000 atau seperti pada Gambar 5.52.



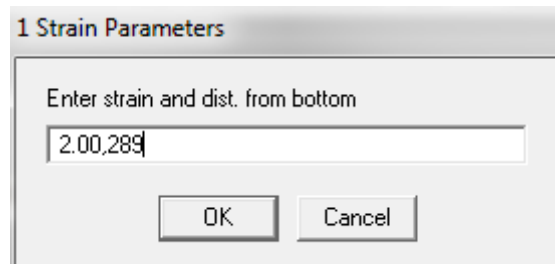
Gambar 1.51 Menu Solve-One Strain Pada Balok 25/35 Pada Titik C+



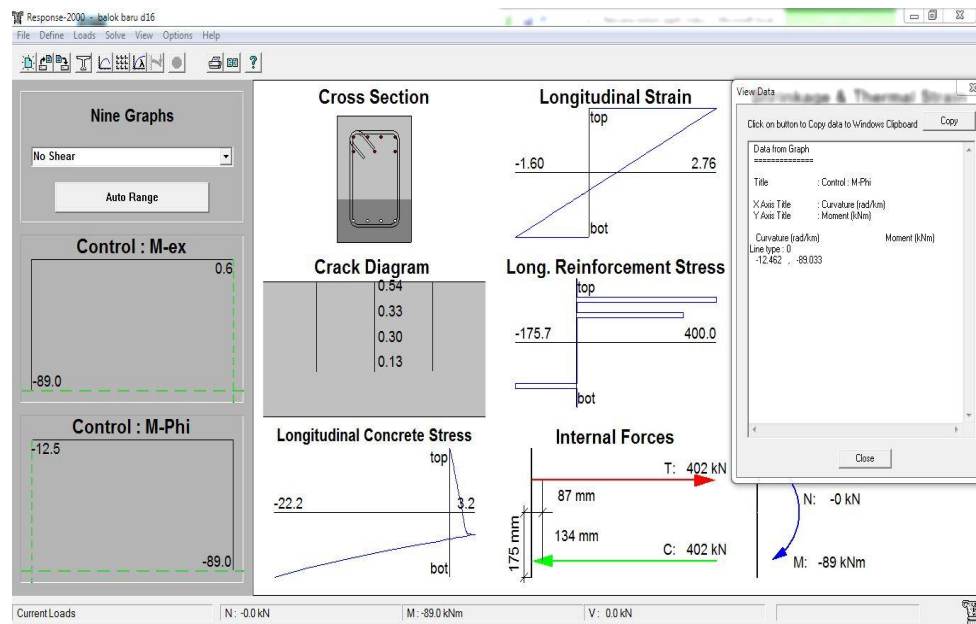
Gambar 1.52 Output Solve-One Strain Pada Balok 25/35 Pada Titik

C+

Untuk memperoleh *moment-curvature* pada saat tulangan atas leleh maka pada One-Strain Parameter diisikan nilai regangan leleh baja (ϵ_y) sebesar 0,002 (dari $\epsilon_y = f_y/E_s = 400/200000 = 0,002$) dan jarak as tulangan atas dari serat bawah balok, yaitu sebesar 289 mm. diperoleh hasil untuk *moment-curvature* sebesar $M = -89,033$ kNm dan $\phi = -12,462$ rad/km. Nilai ini merupakan Titik B⁻ pada Kurva *moment-curvature* pada SAP2000 atau seperti pada Gambar 5.54.

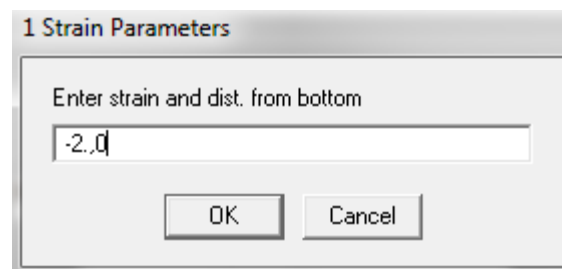


Gambar 1.53 Menu Solve-One Strain Pada Balok 25/35 Pada Titik B-

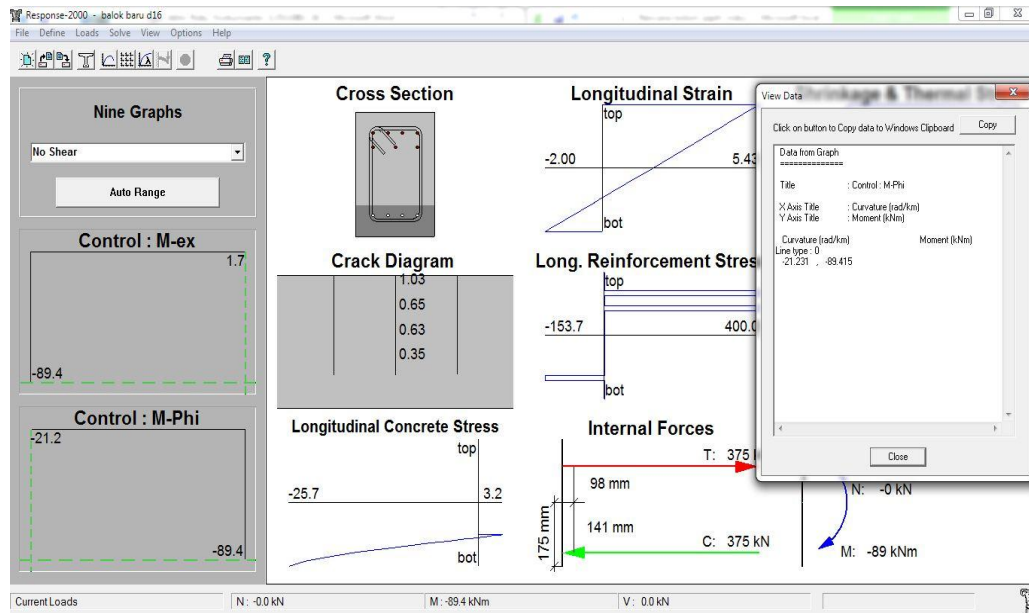


Gambar 1.54 Output Solve-One Strain Pada Balok 25/35 Pada Titik B-

Selanjutnya untuk *moment-curvature* pada saat beton sebelah bawah hancur diperoleh dengan mengisikan pada opsi *One-Strain Parameter* nilai regangan hancur beton dan jarak serat bawah balok sebesar 0 mm. Nilai regangan balok pada saat hancur dapat diperoleh dengan coba-coba. diperoleh hasil untuk *moment-curvature* sebesar $M = -89,415 \text{ kN}$ dan $\phi = -21,231 \text{ rad/km}$. Nilai ini merupakan Titik C' pada Kurva *moment-curvature* pada SAP2000 atau seperti pada Gambar 5.56.



Gambar 1.55 Menu Solve-One Strain Pada Balok 25/35 Pada Titik C-



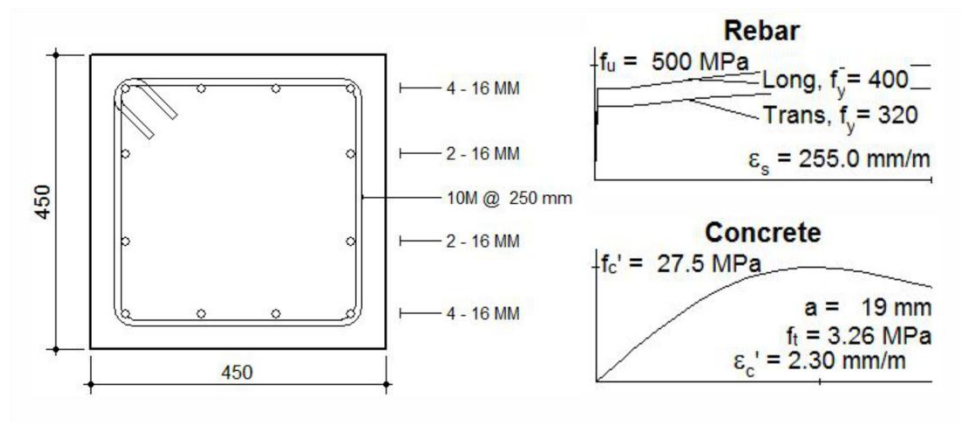
Gambar 1.56 Output Solve-One Strain pada balok 25/35 Pada Titik C-

Nilai *moment-curvature* untuk titik D^+ dan D^- ditentukan dari nilai *moment-curvature* terbesar dari elemen tersebut. Nilai ini dapat langsung diperoleh dari *Response-2000* melalui menu *Solve-Sectional Response* dimana $\phi = 58,92$ rad/km. adapun nilai momen ditentukan sama dengan besarnya momen yang dipikul oleh balok tersebut akibat beban gravitasi (diperoleh dari output SAP2000). Nilai curvature untuk titik E^+ dan E^- ditentukan sebesar dua kali nilai curvature dari titik D^+ dan D^- , Sedangkan nilai momen untuk titik E^+ dan E^- ditentukan sebesar setengah kali nilai curvature dari titik D^+ dan D^- .

b. Perhitungan *moment-curvature* Dengan Respons-2000 pada Kolom

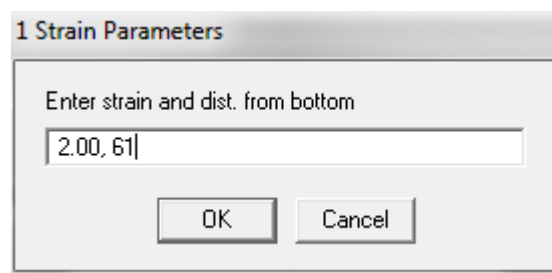
Berikut akan dijelaskan tahap pendefinisian sendi plastis untuk salah satu kolom, yaitu kolom K1 ukuran penampang kolom dapat dilihat pada *Property Material* pada *Response-2000* ditunjukkan pada Gambar 5.57.

Sendi Plastis kolom pada SAP2000 didefinisikan melalui kotak dialog *Frame Hinge Properties* dengan pilihan tipe *Deformation Controlled (ductile)-Interaction P-M2-M3*. Tipe parameter *Displacement control* adalah *load deformasi*. Panjang sendi Plastis (*Hinge Length*) ditentukan sebesar $0.5 \times 450 = 225 \text{ mm} \approx 0,225 \text{ m}$ ($450/450$)

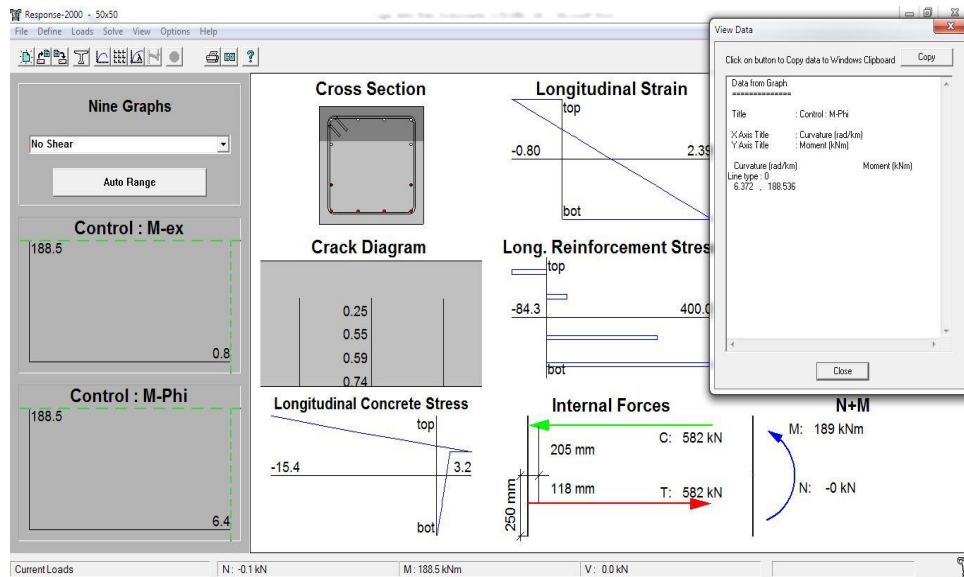


Gambar 1.57 Ukuran Penampang dan Propertis Matrial Kolom K1 Pada Respons-2000

Untuk kondisi lentur murni ($Load N = 0 \text{ kN}$), *moment-curvature* pada saat tulangan sebelah bawah leleh diperoleh dengan mengisi nilai regangan leleh baja (ϵ_y) sebesar 2 (dari $\epsilon_y = f_y/E_s = 400/200000 = 0,002$) dan jarak as tulangan bawah dari serat bawah kolom , yaitu sebesar 61 mm. Kemudian dari *Response-2000* diperoleh hasil untuk *moment-curvature* sebesar : $M = 188,536 \text{ kN}$ dan $\phi = 6,375 \text{ rad/km}$. Nilai ini merupakan Titik B pada Kurva *moment-curvature* pada SAP2000 atau seperti pada Gambar 5.59.



Gambar 1.58 Menu *Solve-One Strain* Pada Kolom 45/45 Pada Titik B



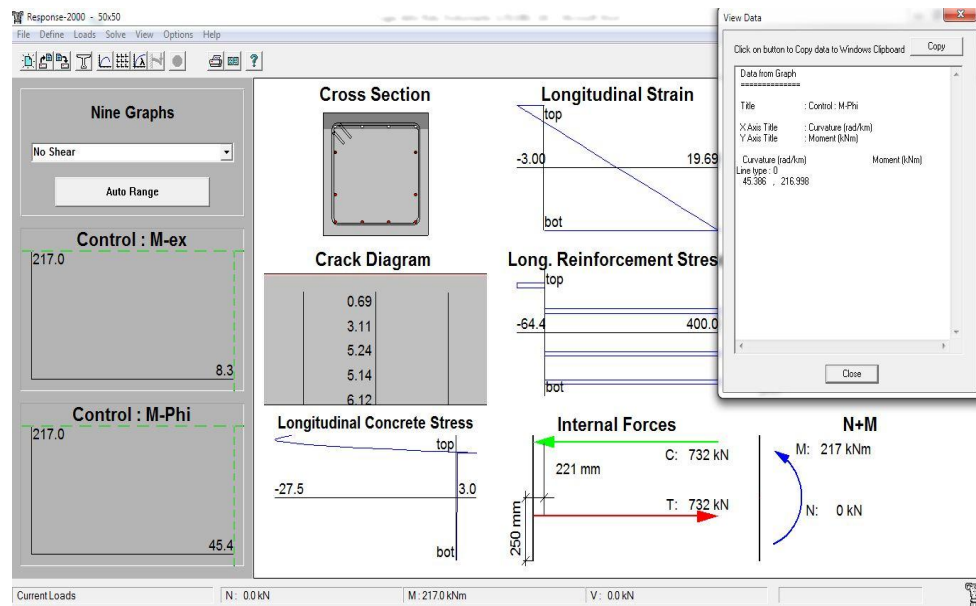
Gambar 1.59 Output Solve-One Strain Pada Kolom 45/45 Pada Titik B

Moment-curvature pada saat beton sebelah atas hancur diperoleh dengan mengisikan pada opsi *One-Strain Parameter* nilai regangan hancur beton sebesar -3 (dari $\epsilon_c = -0,003$) dan Jarak serat atas balok terhadap serat bawah kolom yaitu sebesar 500 mm. Hasil *moment-curvature* sebesar : $M = 216,998$ kN dan $\phi = 45,386$ rad/km. Nilai Q dan Δ ini merupakan Titik C Pada kurva *moment-curvature* pada SAP2000 atau seperti pada Gambar 5.61.

f.



Gambar 1.60 Menu Solve-One Strain Pada Kolom 45/45 Pada Titik C



Gambar 1.61 Output Solve-One Strain pada balok 45/45 Pada Titik C

Untuk *moment-curvature* pada titik D dan titik E dapat ditentukan langsung dari nilai *moment-curvature* yang diperoleh dari *Solve-Saction Response* pada *resposnse-2000*. Selanjutnya propertis sendi plastis untuk kolom K1 yang didefinisikan pada SAP2000 sesuai dengan Tabel 5.22.

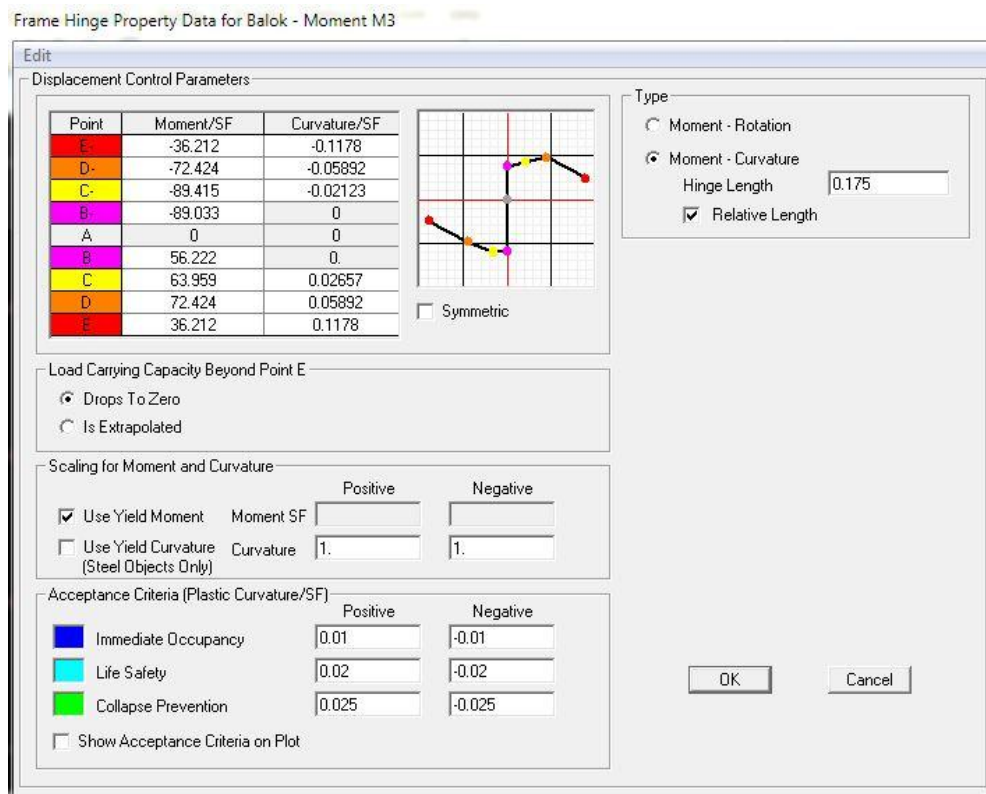
Selain pendefinisian *moment-curvature* Data tersebut, dalam mendefinisikan sendi plastis pada kolom juga dibentuk kurva interaksi P-M2-M3 secara manual melalui Modify P-M2-M3 Interaction Surface Data - User Defenition. Dalam hal ini hubungan antar gaya aksial dan perpindahan (*Displacement*) ditentukan *Elastic - Perfectly Plastic*. Adapun jumlah kurva , jumlah titik pada kurva dan *Scale Factors* yang digunakan dibuat menyesuaikan dengan setiap kurva yang akan dibentuk.

5.7.2 Pendefinisia *Hinges Properties* pada Balok

Penempatan dan pendefinisian properties sendi plastis pada balok dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Memilih balok pada bangunan yang sudah dimodelkan.
2. Melakukan pendefisian dengan melalui menu *Assign-Frame-Hinges*.

- Membuat 2 sendi plastis yaitu *Relative Distance 0* dan *Relative Distance 1* pada kotak dialog *Frame Hinges Assignment*, yang berarti sendi plastis pada balok diletakkan pada ujung elemen struktur.
- Properti sendi plastis dapat dilihat dan diedit melalui menu *Define – Sections Properties – Hinge Properties – Show Hinges Detail*. Pilih sendi plastis yang akan dilihat propertinya, klik *Modify/Show Property – Modify/Show Hinge Property*, Kemudian isi *input moment-curvature* dengan *hinge length 0.5 h* penampang balok ($0.5 \times 35 = 0.175$), masukan nilai Displacement Control Parameter yang telah di dapat dari program *Response-2000* dan mengisi kriteria plastis untuk penampang balok pada *Acceptance Criteria (Plastic Curvature /SF)* ditunjukkan pada Gambar 5.62.



Gambar 1.62 Input Moment-Curvature Balok

Propertis sendi untuk balok B1 dengan penampang yang ditinjau terletak pada ujung batang, didefinisikan pada SAP 2000 dijabarkan pada Tabel 5.21 berikut.

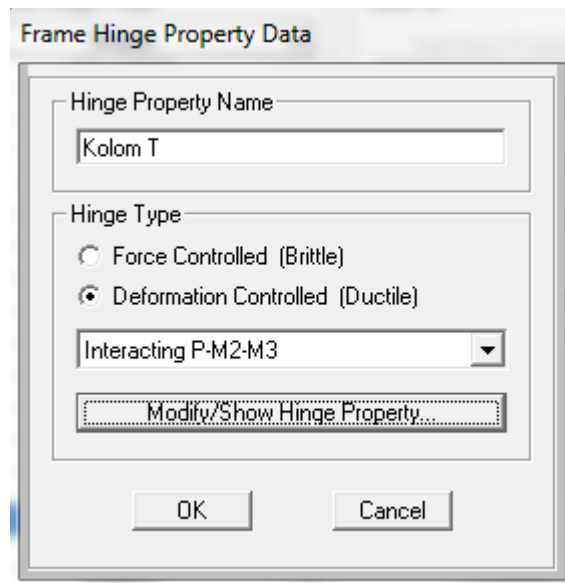
Tabel 1.21 Properti Sendi Plastis Untuk Balok B1

Poin	Momen / SF (M) (kN m)	Curvature (ϕ)	
		(rad/km)	(rad/m)
E-	-36,212	-117,84	-0,11784
D-	-72,424	-58,92	-0,05892
C-	-89,415	-21,231	-0,021231
B-	-89,033	-12,462	-0,012462
A	0	0	0
B+	56,222	10,845	0,010845
C+	63,959	26,573	0,026573
D+	72,424	58,92	0,05892
E+	36,212	117,84	0,11784

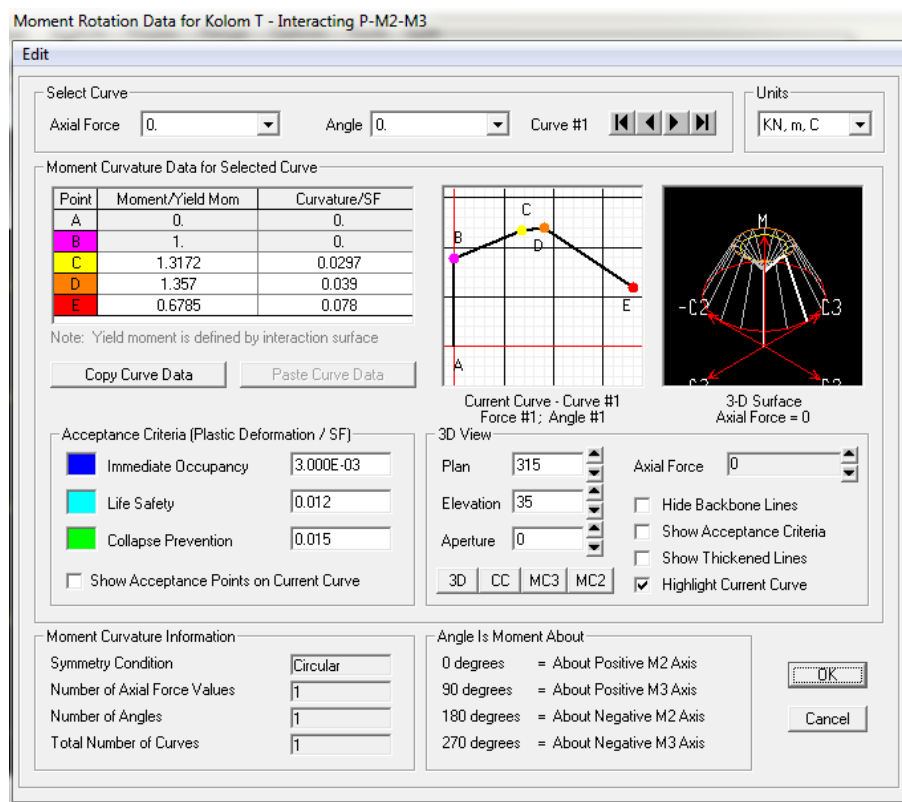
5.7.2.1 Pendefinisian *Hinges Properties* pada Kolom

Penempatan dan pendefinisian properties sendi plastis pada kolom sama dengan cara pada balok sebagai berikut.

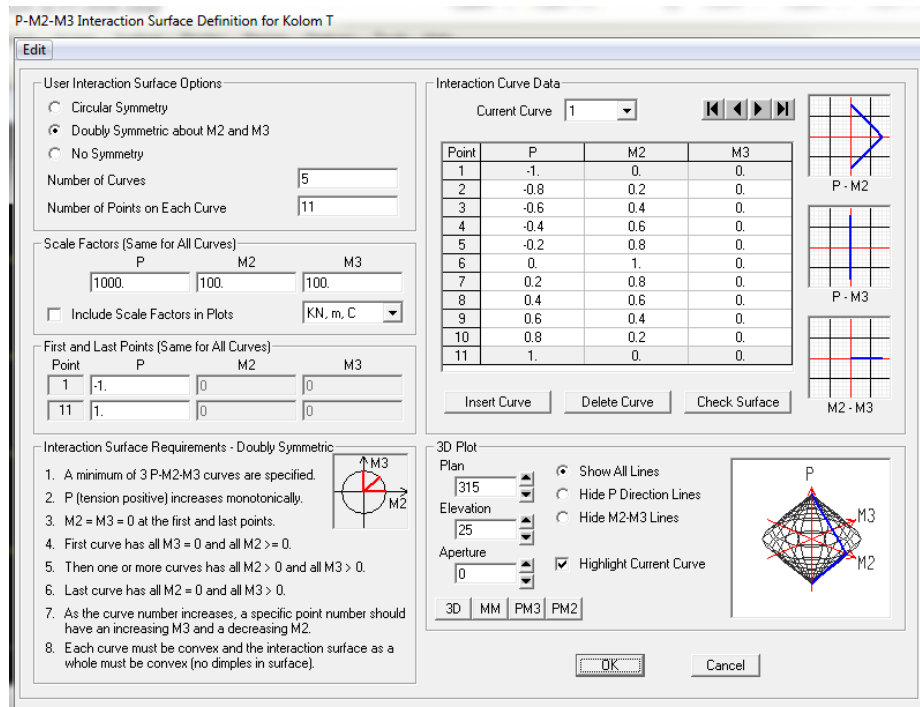
1. Melakukan pendefinisian melalui menu *Assign-Frame-Hinges, Degree of Freedom* dipilih P-M2-M3 yang artinya kolom menerima gaya aksial (P) dan momen (M) sumbu lokal 2 dan sumbu lokal 3. Lihat Gambar 5.63 .
2. Properti sendi plastis dapat dilihat melalui menu *Define – Section Properties – Hinge Properties*. Pilih sendi plastis yang akan dilihat propertinya, klik *Modify/Show Property – Modify/Show Hinge Property*. Klik opsi *Modify/Show Moment Rotation Curve Data* untuk melihat data momen rotasi, ditunjukkan pada Gambar 5.63.
3. Melihat kurva interaksi pada kolom melalui menu *Define – Section Properties – Hinge Properties* dan klik opsi *Modify/Show P-M2-M3 Interaction Surface Data* klik *default from section-hinge length* diisikan 0.5 x h kolom.



Gambar 1.63 Input Hinges Properties Kolom



Gambar 1.64 Input Data Hinges Properties Kolom



Gambar 1.65 Interaction Pada Kolom

Hasil nilai *Hinges Properties* kolom yang diperoleh dari *response-2000* dapat dilihat pada Tabel 5.22 sampai Tabel 5.25 berikut.

Tabel 1.22 Propertis Sendi Plastis Untuk Kolom Bujur sangkar

Poin	Momen (m) (kN.m)	Curvature (θ)		M/M _y
		(rad/km)	(rad/m)	
A	0	0	0	0
B	188,536	6,375	0,006375	1
C	216,998	45,386	0,045386	1,150963
D	221,012	55,568	0,055568	1,172254
E	110,506	111,136	0,111136	0,586127

Tabel 1.23 Propertis Sendi Plastis Untuk Kolom T

Poin	Momen (M) (kN.m)	Curvature (ϕ)		M/M _y
		(rad/km)	(rad/km)	
A	0	0	0	0
B	88,752	14,908	0,014908	1
C	116,903	29,662	0,029662	1,317187
D	120,44	38,989	0,038989	1,35704
E	60,22	77,978	0,077978	0,67852

Tabel 1.24 Propertis Sendi Plastis Untuk Kolom Plus

Poin	Momen (M) (kN.m)	Curvature (ϕ)		M/M _y
		(rad/km)	(rad/km)	
A	0	0	0	0
B	92,66	16,499	0,016499	1
C	105,649	27,331	0,027331	1,140179
D	86,1	32,219	0,032219	0,929204
E	43,05	64,438	0,064438	0,464602

Tabel 1.25 Propertis Sendi Plastis Untuk Kolom L

Poin	Momen (M) (kN.m)	Curvature (ϕ)		M/M _y
		(rad/km)	(rad/km)	
A	0	0	0	0
B	81,528	14,167	0,014167	1
C	105,369	31,394	0,031394	1,292427
D	106,139	35,927	0,035927	1,301872
E	53,0695	71,854	0,071854	0,650936

5.7.3 Analisis *Pushover* Menggunakan Prosedur ATC-40 (Metode Spektrum Kapasitas)

Pembebanan analisis *pushover* dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama analisis belum mempertimbangkan kondisi nonlinier dimana struktur diberi beban mati dan beban hidup (gravitasi). Tahap kedua analisis dilanjutkan dengan memberikan pola beban lateral diberikan secara bertahap.

1. Input Parameter Spektrum Kapasitas (Prosedur ATC-40)

Kurva kapasitas (Kurva *Pushover*). yang masih dalam hubungan gaya geser dasar dan perpindahan atap, Selanjutnya oleh program SAP2000 dikonversi ke bentuk Spektrum Kapasitas, yaitu dalam format *Acceleration-Displacement Response Spectra* (ADRS), yaitu dalam hubungan S_a dan S_d . Demikian juga dengan parameter spektrum respon yang telah dinyatakan dalam satuan percepatan, S_a (m/det²) dan periode struktur, T (detik), oleh program SAP2000 dirubah dalam format ADRS menjadi *spektrum demand*.

Spektrum Kapasitas dan Spektrum denand yaitu dihasilkan oleh program SAP2000 dapat dilihat melalui menu *Display>Show Static Pushover Curve* dan pilih ATC-40 Capacit Spectrum. Parameter-parameter spektrum kapasitas ATC-40 keudian dimodifikasi sesuai kondisi di lapangan . Untuk *Damand Spectrum Defenition* dipilih Gempa (*Spektrum Respons*) . Faktor skala (SF) ditentukan sebesar : $SF = 1/8 \cdot 9,81 = 1,226$. Tipe prilaku struktur ditentukan tipe B merupakan struktur dengan kondisi eksisting sedang (*average*) dan duarasi goyangan struktur (*Shaking duration*) yang pendek (*short*). Hasil modifikasi parameter ATC-40 dapat dilihat dalam Gambar 5.66 berikut.

Parameters For ATC-40 Capacity Spectrum

Pushover Parameters Name
Name A40P02 Units KN, m, C

Plot Axes
 Sa - Sd Sa - T Sd - T Axis Labels and Range
 Set Axis Data...

Demand Spectrum Definition
 Function gempa SF 1.226
 User Coeffs Ca Cv

Damping Parameters Definition
 Inherent + Additional Damping 0.05
 Structural Behavior Type
 A B C User Modify/Show...

Items Visible On Plot
 Show Capacity Curve Color ■
 Show Family of Demand Spectra Color ■
 Damping Ratios

 Show Single Demand Spectrum (ADRS) Color ■
 (Variable Damping)
 Show Constant Period Lines at Color ■

 Reset Default Colors

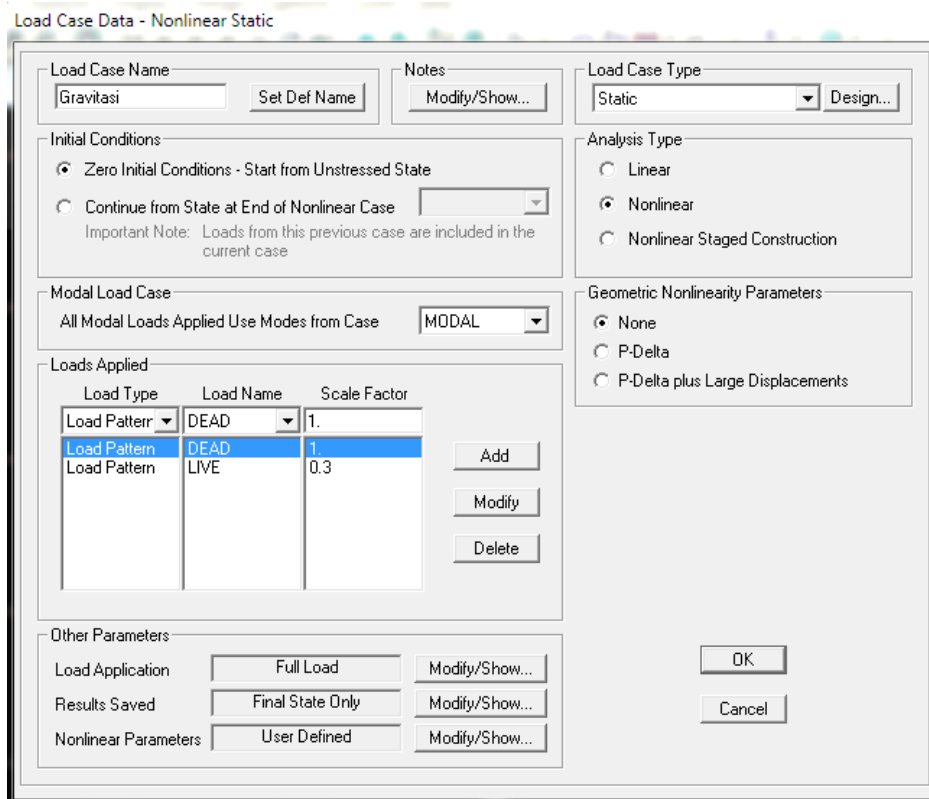
Update Plot
 OK Cancel

Gambar 1.66 Modifikasi Parameter Spektrum Kapasitas ATC-40

2. Pembebanan Pada Analisis Pushover

a. Pembebanan Gravitasi

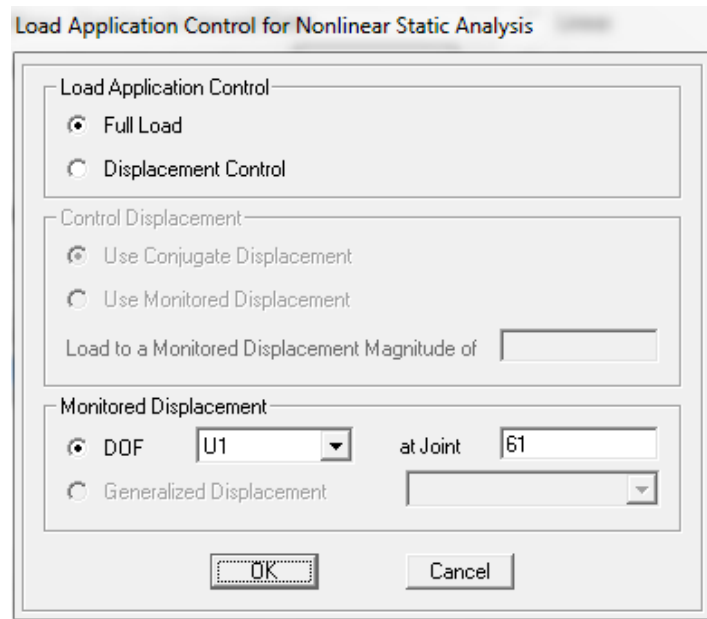
Pembebanan gravitasi dilakukan melalui menu *Define – Load Case – Add New*, ditampilkan dalam Gambar 5.67 .



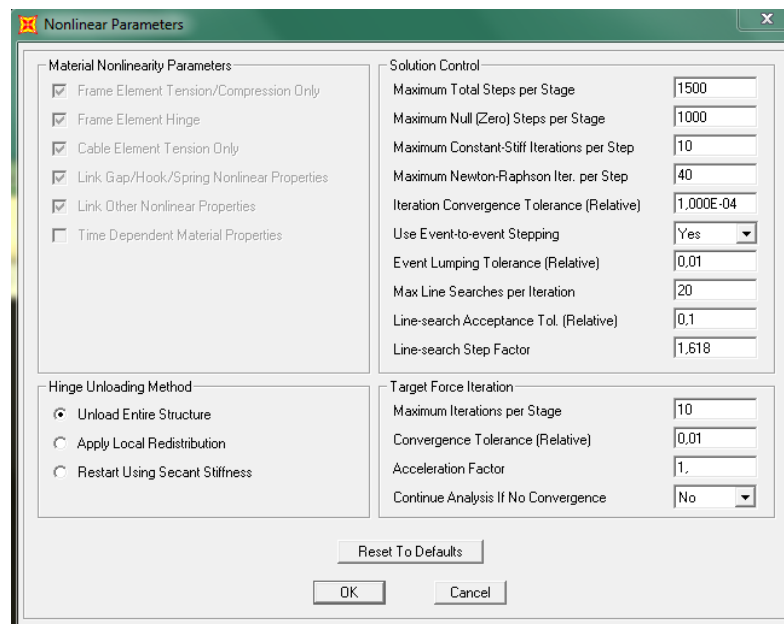
Gambar 1.67 Pengaturan Analysis Case Beban Gravitasi

Berdasarkan Gambar 5.67 modifikasi pada *Load case data* sebagai berikut.

- Initial conditions* dipilih *Zero initial conditional*, yang dimaksudkan pembebanan dilakukan pada kondisi awal sebelum menerima beban.
- Beban yang bekerja pada *Load applied* yaitu beban mati (*dead*) dengan faktor pengali 1, dan beban hidup (*live*) dengan faktor pengali 0,3.
- Analysis type* dipilih *nonlinier*
- Pada kotak dialog *Other parameter*, *Load application – Modify/Show*, nilai $DOF = U3$, ditampilkan dalam Gambar 5.68.
- Pada kotak dialog *Other parameter*, *Result saved* dibiarkan *default*
- Pada kontak dialog *Other parameter*, *Nonlinier parameters – Modify/Show* ditampilkan dalam Gambar 5.69 .



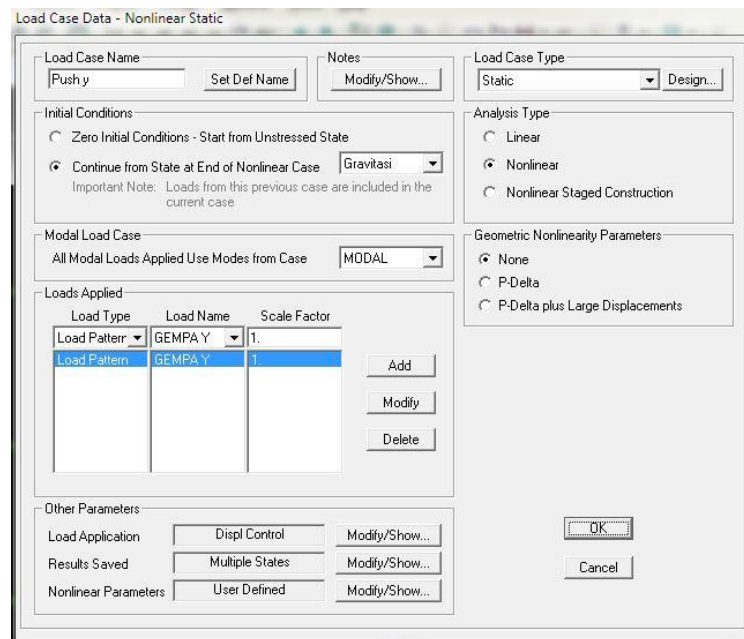
Gambar 1.68 Load application Control For Nonlinear Static Analysis



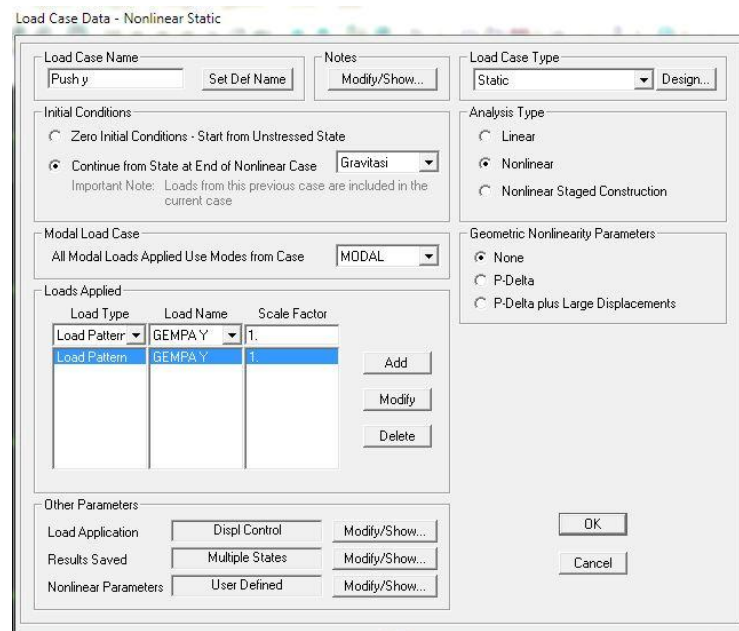
Gambar 1.69 Load Case Data – Nonlinier Static Gravitasi

b. Pembebanan Lateral

Pada analisis ini dibuat 2 pembebanan arah lateral yaitu arah x dan arah y. Pembebanan dilakukan melalui menu *Define - Load Case - Add New Case*.



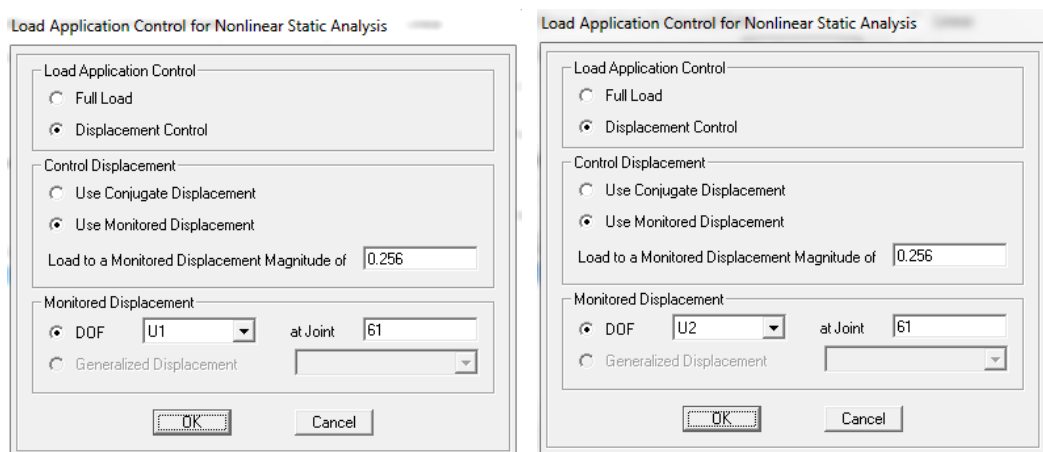
Gambar 1.70 Pengaturan *Analysis Case* Beban Lateral *Pushover* Arah x



Gambar 1.71 Pengaturan *Analysis Case* Beban Lateral *Pushover* Arah y

Berdasarkan Gambar 5.70 dan Gambar 5.71 modifikasi pada *Load case data* sebagai berikut.

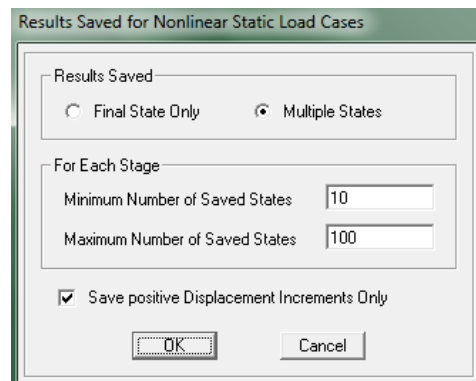
- Initial conditions* dipilih *Continue from state at end of nonlinear case* = GRAVITASI.
- Beban yang bekerja pada *Load applied* adalah beban gempa statik dengan faktor pengali 1, untuk arah x beban gempa statik x dan arah y beban gempa statik y.
- Analysis type* dipilih *nonlinier*.
- Pada kotak dialog *Other parameter, Load application–Modify/Show*. Pada *Control displacement* pilih *Use Monitored Displacement* (0,256) yang berarti 2% dari tinggi bangunan (12,8 m). *Monitored Displacement* dipilih U1 arah x dan U2 pada arah y pada joint 61 yaitu pada joint atap, lihat Gambar 5.72.
- Pada kotak dialog *Other parameter, Result Saved – Modify/Show* - klik *Multi States* untuk lebih jelasnya dapat lihat Gambar 5.73.
- Pada dialog *Other Parameters, Nonlinear parameters* – klik *Modify/Show*. Nilai parameter pada *Solution control* diubah seperti pada Gambar 5.74.



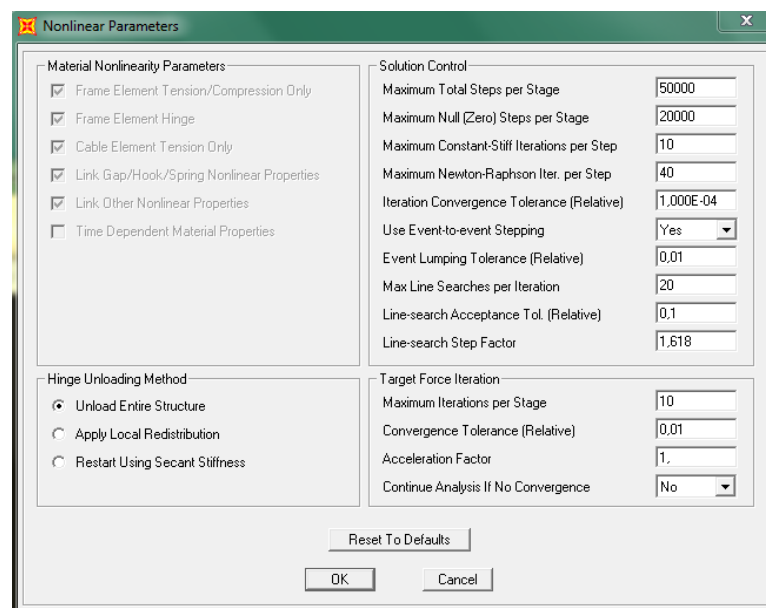
(a) Arah x

(b) Arah y

Gambar 1.72 Load Application Control



Gambar 1.73 Result Saved Pada Arah x Dan Arah y



Gambar 1.74 Nonlinier parameters Pada Arah x Dan Arah y

3. Hasil Analisis *Pushover*

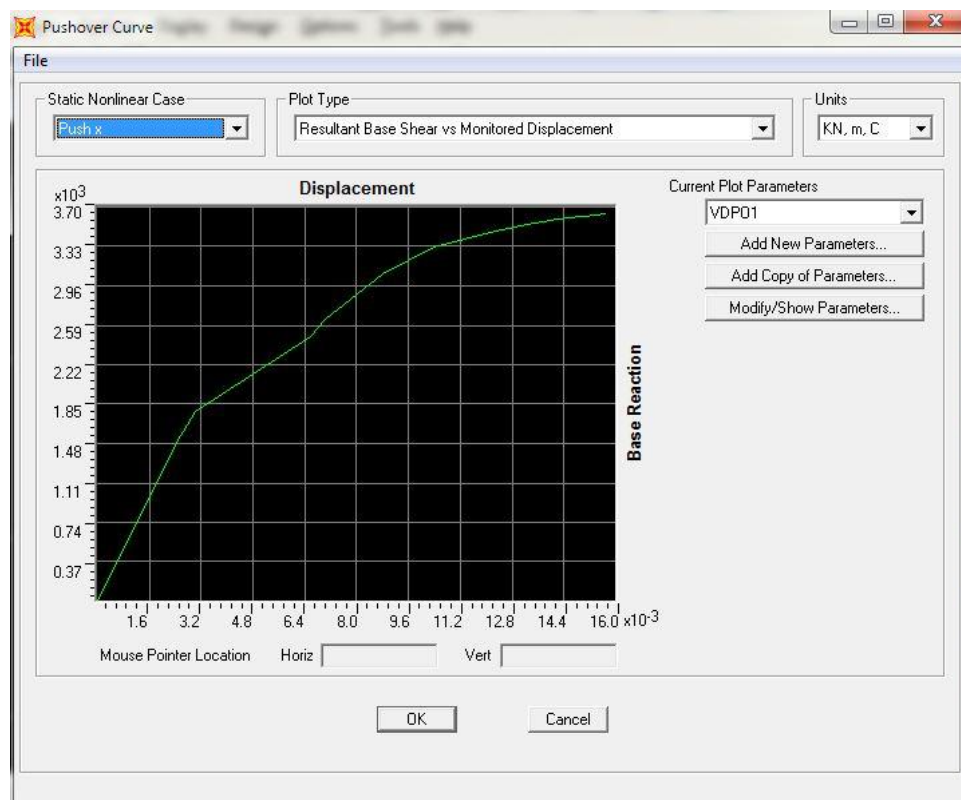
a. Kurva Kapasitas

Salah satu produk utama dari analisis *pushover* adalah kurva kapasitas (*Capacity curve*), atau disebut juga sebagai kurva *pushover*. Kurva ini menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan pada titik kontrol serta menggambarkan response perilaku *nonlinier* dari struktur gedung yang ditinjau. Kurva ini dapat diperoleh dari pilihan menu *Display>Show Static Pushover Cuve*.

Kurva *pushover* yang dihasilkan untuk model gedung tanpa dinding (MTD). Kurva *pushover* untuk arah-X dan arah Y dapat dilihat pada penelitian dengan kolom bujur sangkar dan pipih berikut:

1) Struktur dengan kolom bujur sangkar

Pada pola pembebanan arah x, besarnya deformasi lateral (*displacement*) dan gaya geser dasar terhadap Struktur sistem rangka adalah pada Gambar 5.75 dan Tabel 5.26. Pada step ke-0 merupakan keadaan ketika struktur belum diberikan beban lateral. Pada step ke-1 merupakan keadaan ketika struktur mengalami perubahan dari kondisi elastik menjadi kondisi inelastik, yang disebut kondisi leleh pertama. Pada step-step selanjutnya merupakan peningkatan kondisi struktur sampai mencapai kondisi ultimit yaitu kondisi keruntuhan.

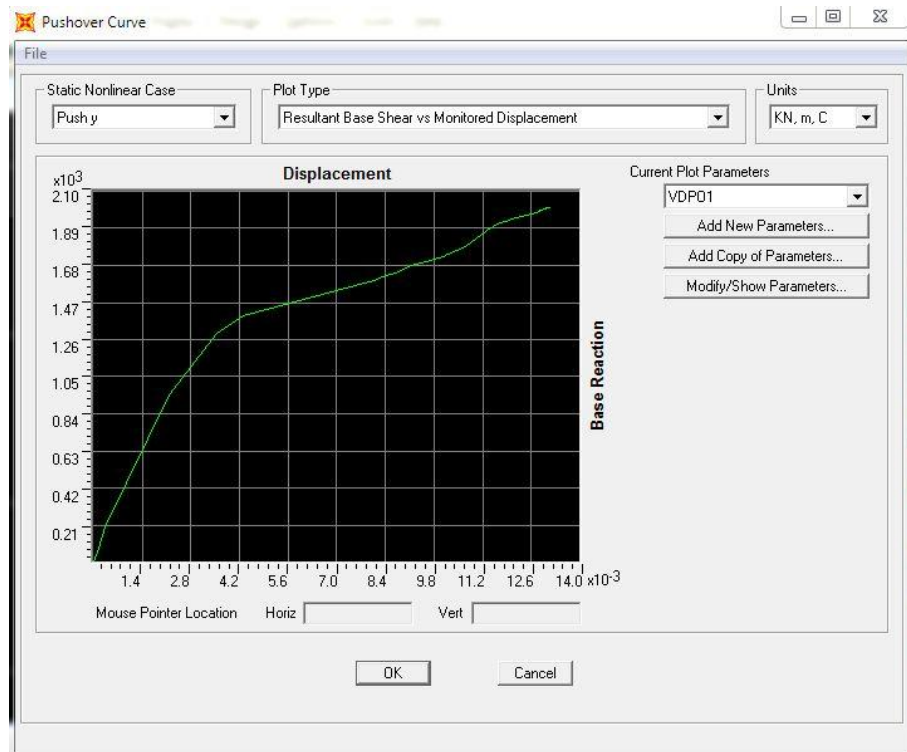


Gambar 1.75 Kurva Pushover Arah-x Untuk Struktur Kolom Bujur Sangkar

Tabel 1.26 Nilai Gaya Geser Dasar Dan Perpindahan Arah x Pada Kolom Bujur Sangkar

<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (T)</i>
0	0	0
1	0,00256	1553,449
2	0,002632	1597,393
3	0,003008	1785,805
4	0,006576	2480,044
5	0,00702	2646,307
6	0,008807	3073,784
7	0,010392	3321,954
8	0,012266	3480,292
9	0,013486	3550,752
10	0,01379	3562,418
11	0,013953	3572,062
12	0,014914	3607
13	0,015049	3616,782
14	0,015387	3623,813
15	0,01572	3634,827
16	0,01572	3634,841

Pada pola pembebanan arah y, besarnya deformasi lateral (*displacement*) dan gaya geser dasar terhadap Struktur sistem rangka adalah pada Gambar 5.76 dan Tabel 5.27. Pada step ke-0 merupakan keadaan ketika struktur belum diberikan beban lateral. Pada step ke-1 merupakan keadaan ketika struktur mengalami perubahan dari kondisi elastik menjadi kondisi inelastik, yang disebut kondisi leleh pertama. Pada step-step selanjutnya merupakan peningkatan kondisi struktur sampai mencapai kondisi ultimit yaitu kondisi keruntuhan.

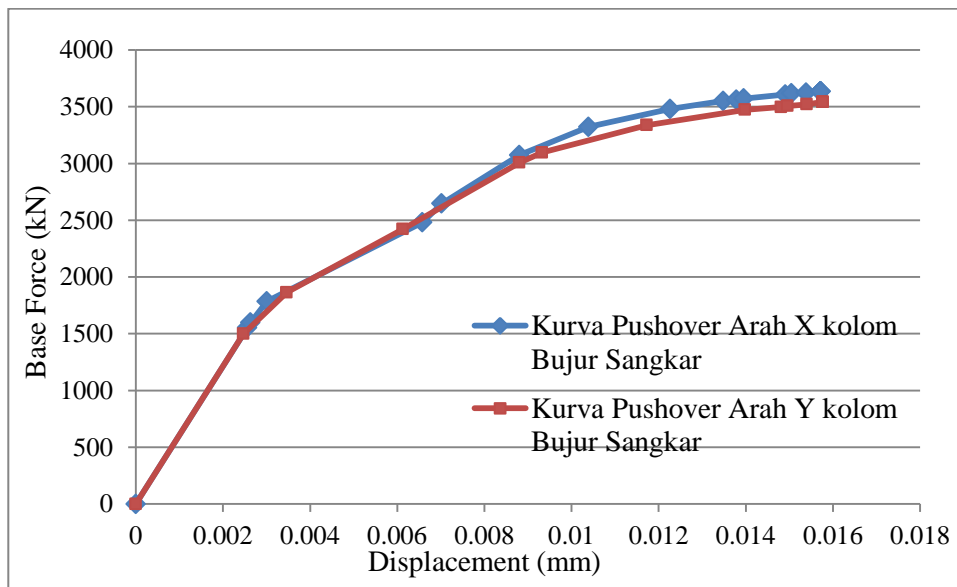


Gambar 1.76 Kurva *Pushover* Arah-y untuk Struktur Kolom Bujur Sangkar

Tabel 1.27 Nilai Gaya Geser Dasar dan Perpindahan Arah y pada Kolom Bujur Sangkar

<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (T)</i>
0	0	0
1	0,00247	1498,741
2	0,003464	1864,139
3	0,006128	2421,268
4	0,008808	3008,481
5	0,009327	3096,431
6	0,011731	3337,465
7	0,013986	3473,406
8	0,014817	3497,689
9	0,014965	3507,273
10	0,015404	3521,525
11	0,015772	3541,929
12	0,015772	3541,93
13	0,015772	3541,936

Perbandingan kedua kurva pushover dengan kolom bujur sangkar yang dihasilkan oleh SAP2000 dapat dilihat pada Gambar 5.77.



Gambar 1.77 Perbandingan Kedua Kurva *Pushover* Yang Dihasilkan Oleh SAP2000 Pada Kolom Bujur Sangkar

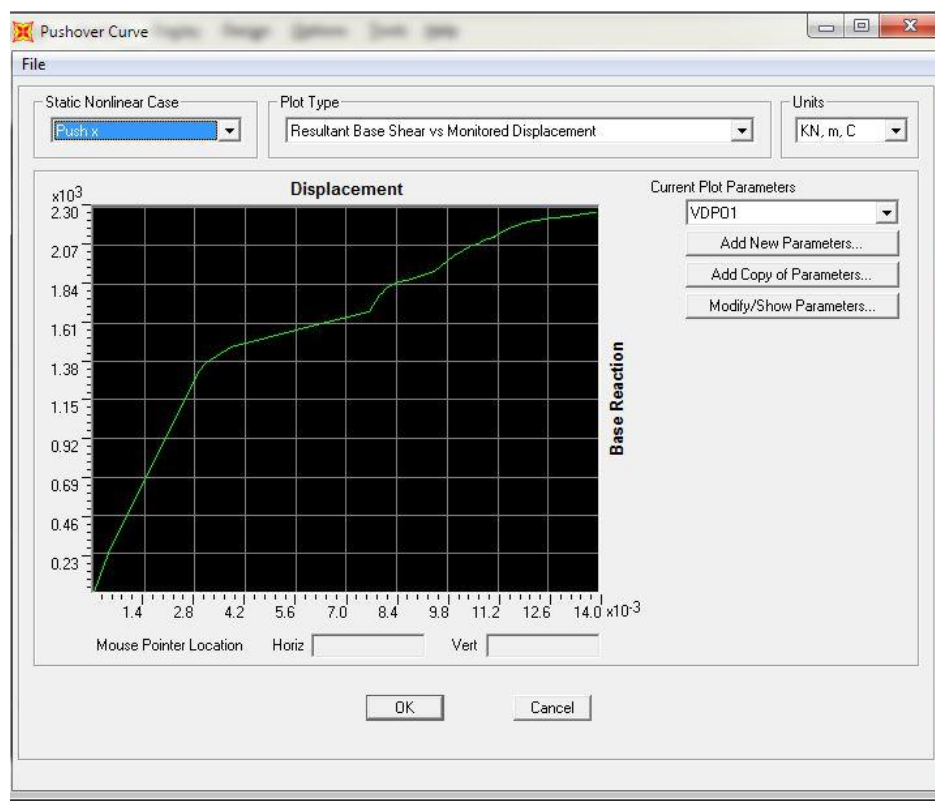
Berdasarkan kurva pushover pada kolom bujur sangkar terlihat bahwa kemiringan kurva kapasitas arah y lebih condong ke bawah membentuk sudut kemiringan yang lebih kecil dibandingkan kurva kapasitas arah x dikarenakan bentang arah x lebih panjang dari pada arah y sehingga arah x merupakan arah kuat dan arah y merupakan arah lemah berdasarkan inersia bangunan yang ditinjau. Menurut FEMA 356 (2000) kemiringan kurva dapat memberikan gambaran terhadap kekakuan bangunan. Kurva kapasitas yang memiliki kemiringan cenderung tegak menunjukkan bahwa bangunan memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan kurva kapasitas condong kebawah.

Dari kurva *pushover* yang dihasilkan untuk arah-x diperoleh bahwa analisis *pushover* berhenti di langkah (*step*) 16, yaitu pada saat perpindahan titik kontrol mencapai 0,01572 m dan gaya geser dasar sebesar 3634,841 kN. Untuk analisis pushover pada arah-y berhenti di

langkah (step) 13, yaitu pada saat perpindahan titik kontrol mencapai 0,015772 m dan gaya geser dasar sebesar 3541,936 kN.

2) Struktur dengan kolom Pipih

Pada pola pembebanan arah x, besarnya deformasi lateral (*displacement*) dan gaya geser dasar terhadap Struktur sistem rangka adalah pada Gambar 5.78 dan Tabel 5.28. Pada step ke-0 merupakan keadaan ketika struktur belum diberikan beban lateral. Pada step ke-1 merupakan keadaan ketika struktur mengalami perubahan dari kondisi elastik menjadi kondisi inelastik, yang disebut kondisi leleh pertama. Pada step-step selanjutnya merupakan peningkatan kondisi struktur sampai mencapai kondisi ultimit yaitu kondisi keruntuhan.

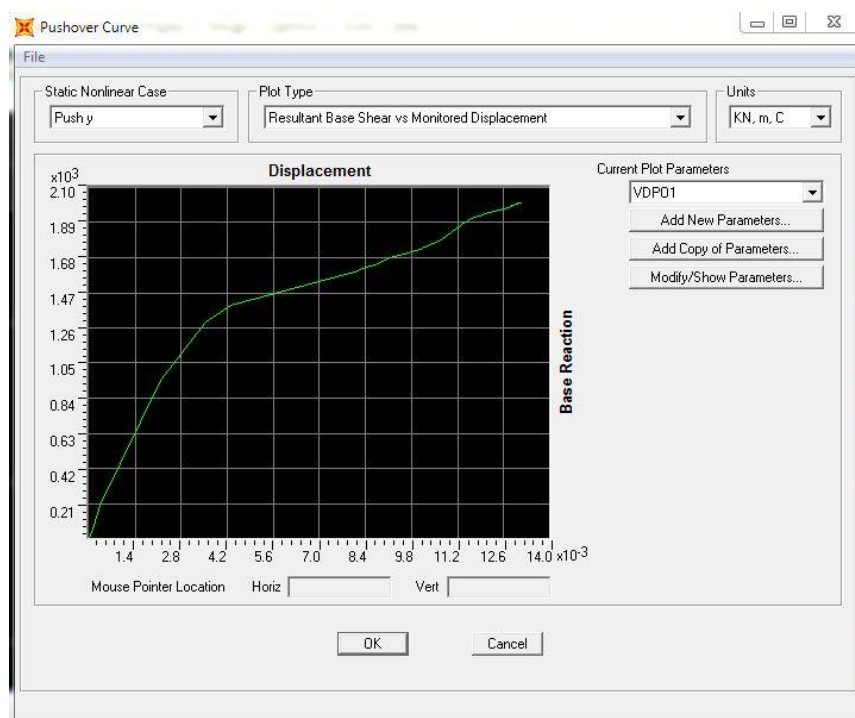


Gambar 1.78 Kurva *Pushover* Arah-x Untuk Struktur Kolom Pipih

Tabel 1.28 Nilai Gaya Geser Dasar dan Perpindahan Arah x pada Kolom Pipih

<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (T)</i>	<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (T)</i>
0	0	0	37	0,01111	2126,484
1	0,000145	87,974	38	0,011112	2126,823
2	0,000394	232,325	39	0,011115	2126,971
3	0,002905	1318,53	40	0,011118	2127,31
4	0,003101	1370,237	41	0,01112	2127,459
5	0,003815	1466,83	42	0,011123	2127,798
6	0,006567	1624,17	43	0,011126	2127,948
7	0,00765	1673,053	44	0,011128	2128,442
8	0,007914	1779,283	45	0,01113	2128,601
9	0,008016	1794,589	46	0,011132	2128,848
10	0,008045	1804,534	47	0,011133	2128,927
11	0,008099	1815,386	48	0,011134	2129,174
12	0,008446	1855,787	49	0,011135	2129,254
13	0,00868	1865,275	50	0,011136	2129,377
14	0,009434	1916,354	51	0,011136	2129,417
15	0,009983	2010,958	52	0,011137	2129,537
16	0,010197	2033,211	53	0,011169	2133,361
17	0,010244	2042,496	54	0,011169	2133,44
18	0,010302	2048,072	55	0,011192	2136,223
19	0,01036	2058,655	56	0,011216	2141,025
20	0,010374	2059,922	57	0,011546	2177,678
21	0,010423	2066,825	58	0,011601	2181,511
22	0,010478	2071,269	59	0,011624	2184,214
23	0,01067	2084,201	60	0,011743	2191,158
24	0,010699	2088,942	61	0,011766	2193,775
25	0,010797	2096,267	62	0,011801	2195,781
26	0,0109	2110,405	63	0,011825	2198,376
27	0,010982	2116,706	64	0,011912	2202,876
28	0,011029	2118,926	65	0,011935	2205,168
29	0,011054	2120,967	66	0,012077	2213,523
30	0,011065	2122,485	67	0,012242	2220,021
31	0,011074	2123,048	68	0,012284	2223,085
32	0,011085	2124,293	69	0,012736	2237,296
33	0,011089	2124,556	70	0,012771	2238,874
34	0,011095	2125,24	71	0,013433	2253,62
35	0,011099	2125,505	72	0,013518	2258,245
36	0,011105	2126,182	73	0,013961	2269,028

Pada pola pembebanan arah y, besarnya deformasi lateral (*displacement*) dan gaya geser dasar terhadap Struktur sistem rangka adalah pada Gambar 5.79 dan Tabel 5.29. Pada step ke-0 merupakan keadaan ketika struktur belum diberikan beban lateral. Pada step ke-1 merupakan keadaan ketika struktur mengalami perubahan dari kondisi elastik menjadi kondisi inelastik, yang disebut kondisi leleh pertama. Pada step-step selanjutnya merupakan peningkatan kondisi struktur sampai mencapai kondisi ultimit yaitu kondisi keruntuhan.

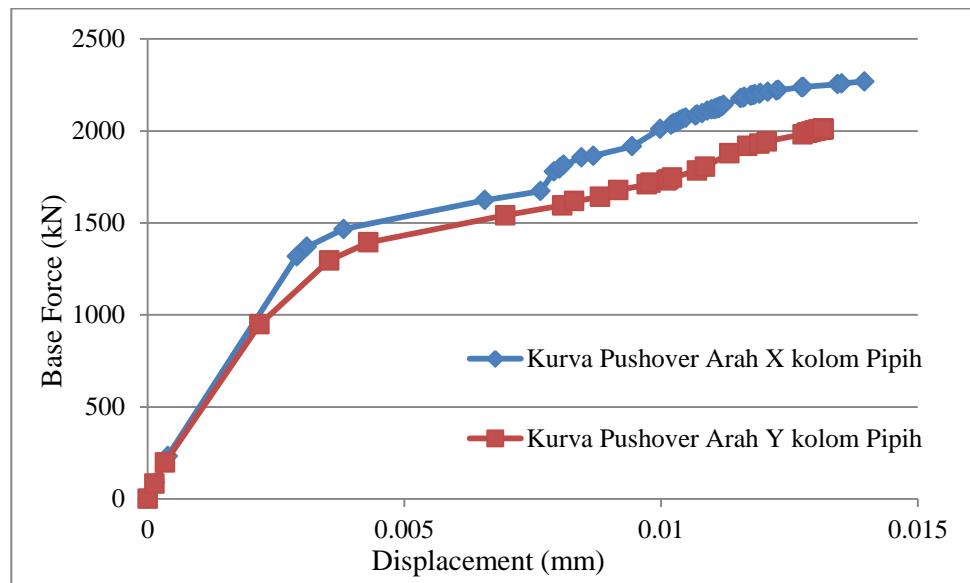


Gambar 1.79 Kurva *Pushover* Arah-y Untuk Struktur Kolom Pipih

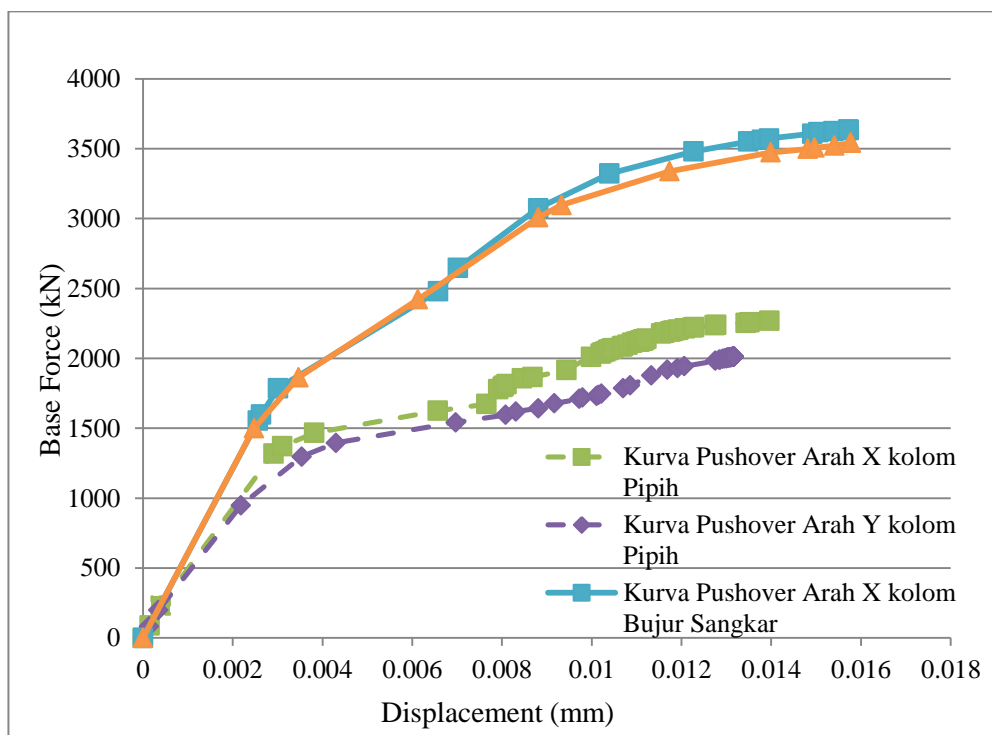
Tabel 1.29 Nilai Gaya Geser Dasar dan Perpindahan Arah y pada Kolom Pipih

<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (T)</i>	<i>Step</i>	<i>Displacement (m)</i>	<i>Base Force (T)</i>
0	0	0	23	0,012839	1989,644
1	0,000134	81,565	24	0,012856	1990,179
2	0,000341	197,374	25	0,012915	1995,538
3	0,00218	948,436	26	0,012962	1998,118
4	0,003535	1296,33	27	0,013	2001,755
5	0,004298	1393,965	28	0,013001	2001,786
6	0,006964	1541,159	29	0,013002	2001,938
7	0,008076	1595,046	30	0,013018	2002,699
8	0,008308	1618,679	31	0,013037	2004,492
9	0,008808	1641,545	32	0,013047	2004,945
10	0,009165	1677,889	33	0,013069	2005,496
11	0,009722	1709,004	34	0,013083	2006,575
12	0,009792	1718,256	35	0,013105	2007,324
13	0,010104	1730,692	36	0,013118	2008,029
14	0,010145	1737,085	37	0,013131	2009,264
15	0,010213	1745,716	38	0,013155	2010,704
16	0,0107	1785,25	39	0,013155	2010,705
17	0,010856	1805,343	40	0,013156	2010,719
18	0,011327	1877,981	41	0,013156	2010,719
19	0,01168	1919,018	42	0,013156	2010,723
20	0,011912	1930,468	43	0,013156	2010,723
21	0,012058	1943,038	44	0,013156	2010,724
22	0,012754	1981,94	45	0,013156	2010,724

Dari kurva pushover yang dihasilkan untuk arah-x diperoleh bahwa analisis *pushover* berhenti di langkah (*step*) 73, yaitu pada saat perpindahan titik kontrol mencapai 0,013961 m dan gaya geser dasar sebesar 2269,028 kN. Untuk analisis pushover pada arah-y berhenti di langkah (*step*) 45, yaitu pada saat perpindahan titik kontrol mencapai 0,013156 m dan gaya geser dasar sebesar 2010,724 kN.



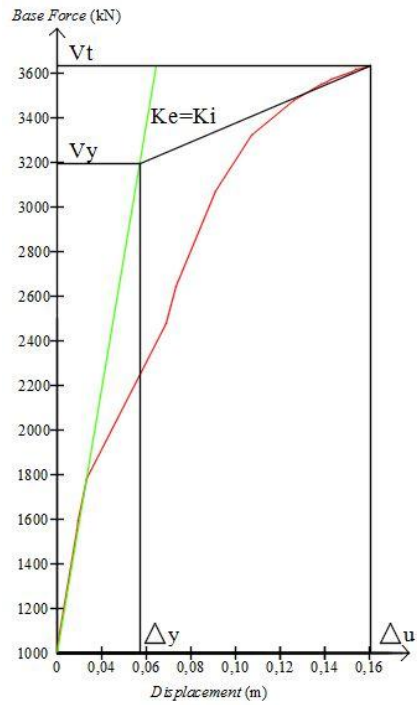
Gambar 1.80 Perbandingan Kurva *Pushover* Arah x Dan y Yang Dihasilkan Oleh SAP2000 pada Kolom Pipih



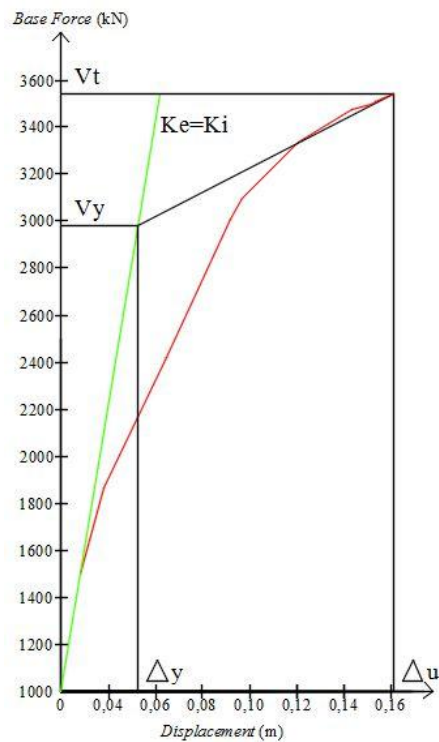
Gambar 1.81 Perbandingan Kurva *Pushover* Arah x Dan y yang Dihasilkan Oleh SAP2000 Pada Kolom Pipih Dan Kolom Bujur Sangkar

Berdasarkan kurva pushover pada kolom pipih dan bujur sangkar terlihat bahwa kemiringan kurva kapasitas arah x lebih condong ke bawah membentuk sudut kemiringan yang lebih kecil dibandingkan kurva kapasitas arah y dikarenakan bentang arah x lebih panjang dari pada arah y. Kurva x dan y pada kolom bujur sangkar pada pembebanan awal memiliki kekakuan yang hampir sama dibanding kurva x dan y kolom pipih, dikarenakan dimensi kolom bujur sangkar memiliki bentuk yang seragam dibandingkan kolom pipih yang terdiri dari kolom berbentuk T, L, dan Plus. Menurut FEMA 356 (2000), kemiringan kurva dapat memberikan gambaran terhadap kekakuan bangunan.

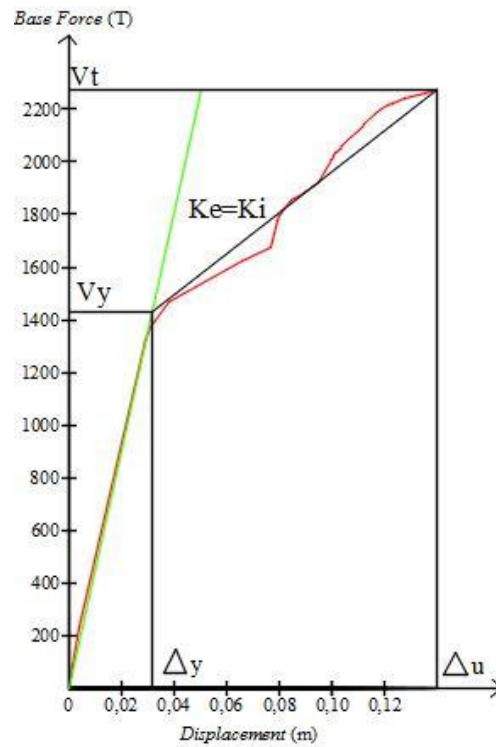
Kurva kapasitas yang memiliki kemiringan cenderung tegak menunjukkan bahwa bangunan memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan kurva kapasitas condong kebawah. Pada Gambar 5.78 sampai Gambar 5.81 merupakan perbandingan kolom pipih dan kolom bujur sangkar, dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa struktur dengan kolom bujur sangkar memiliki kekakuan lebih besar dibanding kolom pipih. Perbedaan kekakuan kolom tersebut dapat dipengaruhi oleh bentuk penampang kolom. Perhitungan kekakuan struktur berdasarkan kurva analisis *pushover* dapat dilihat pada Gambar 5.82 -5.85.



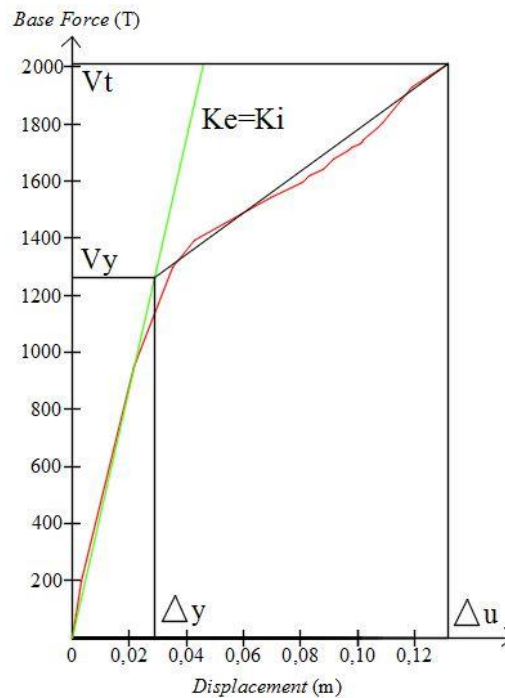
Gambar 1.82 Kurva *Pushover* Arah-x Untuk Struktur Kolom Bujur Sangkar



Gambar 1.83 Kurva *Pushover* Arah-y Untuk Struktur Kolom Bujur Sangkar



Gambar 1.84 Kurva Pushover Arah-x Untuk Struktur Kolom Pipih



Gambar 1.85 Kurva Pushover Arah-y Untuk Struktur Kolom Pipih

Dari kuva pada Gambar 5.82 diatas maka didapat nilai-nilai sebagai berikut:

$$\text{Perpindahan leleh, } \Delta_y = 0,049 \text{ m}$$

$$\text{Gaya geser saat leleh, } V_y = 2977,62 \text{ kN}$$

Diasumsikan nilai kekakuan efektif, k_i = nilai kekakuan awal

$$k_e = \frac{0,6 \times V_y}{0,6 \times \Delta_y} = \frac{0,6 \times 2977,62}{0,6 \times 0,049} = 60767,76 \text{ kN/m}$$

$$k_i = k_e = 60767,76 \text{ kN/m}$$

Untuk perhitungan kekakuan struktur jenis lainnya dapat dilihat pada Tabel 5.30 dibawah ini.

Tabel 1.30 Rekap Hasil Perhitungan Kekakuan Struktur

	Kolom Bujur Sangkar Arah X	Kolom Bujur Sangkar Arah Y	Kolom Pipih Arah X	Kolom Pipih Arah Y
Δ_y (m)	0,049	0,0537	0,03147	0,029
V_y (kN)	2977,62	3193,81	1428,64	1262,02
k_i (kN/m)	60767,7551	59475,04655	45396,88592	43517,93103

Berdasarkan Tabel 5.30 terlihat bahwa kurva *pushover* pada kolom bujur sangkar memiliki nilai kekakuan lebih besar dari pada kolom pipih, dilihat dari nilai k_i yang dihasilkan pada kurva *pushover* untuk kolom bujur sangkar sebesar 60767,75 kN/m (arah x), 59475,046 kN/m (arah y) dan nilai kekakuan pada kolom pipih sebesar 45396,88 kN/m (arah x), 43517,93 kN/m (arah y).

Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan kolom pipih pada bangunan bertingkat akan meningkatkan rasio tulangan yang dibutuhkan oleh kolom. Pada tulangan bujur sangkar diperoleh rasio tulangan sebesar 1,19 % dan pada kolom pipih bentuk T, L serta plus diperoleh rasio tulangan sebesar 1,6 %. Namun, hasil dari kurva kapasitas analisis *pushover* menunjukkan bangunan yang digunakan dengan kolom pipih kurang kaku dibanding dengan bangunan dengan kolom bujur sangkar. Berdasarkan hal tersebut,








maka penggunaan kolom pipih tidak dianjurkan untuk digunakan pada bangunan bertingkat banyak.

b. Mekanisme Sendi Plastis

Elemen struktur yang dibebani beban statik tersebut secara bertahap akan mengalami pelelehan (sendi plastis) hingga dapat menyebabkan ketidakmampuan elemen menerima gaya dalam tersebut sehingga struktur dapat mengalami keruntuhan. Perilaku struktur saat beban yang bekerja relatif kecil maka momen yang bekerja disetiap penampangnya masih dalam keadaan elastis, namun setelah beban ditingkatkan secara bertahap akan mengakibatkan besar momen pada salah satu penampang mencapai keadaan plastis.

Perilaku pelelehan pada elemen ditunjukkan dengan warna pada sendi plastis, berikut ini penjelasan mengenai warna sendi plastis pada Tabel 5.31.

Tabel 1.31 Penjelasan Warna Sendi Plastis

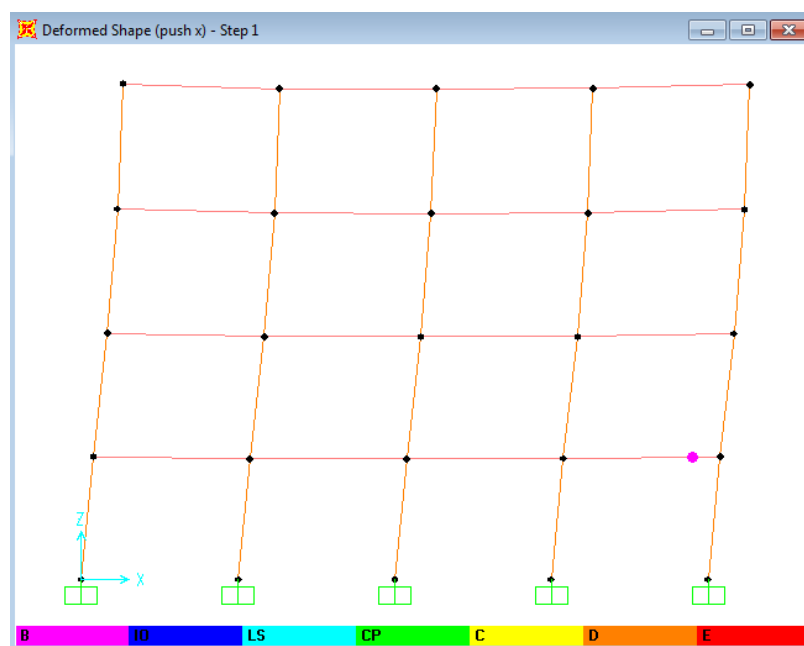
Keterangan	Simbol	Penjelasan
B		Menunjukkan batas linier yang kemudian diikuti terjadi pelelehan pertama pada struktur
IO		Kerusakan kecil pada struktur (tidak berarti), kekakuan struktur hampir sama saat sebelum terjadi gempa
LS		Kerusakan mulai dari kecil hingga sedang. Kekakuan struktur berkurang tapi masih mempunyai ambang yang cukup besar terhadap keruntuhan
CP		Kerusakan parah pada struktur, kekuatan dan kekakuan berkurang banyak
C		Batas maksimum gaya geser masih mampu ditahan gedung
D		Degradasi kekuatan struktur besar, kondisi struktur tidak stabil hampir runtuh
E		Struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser dan runtuh.

1) Sendi Plastis Arah x dan y pada bujur sangkar

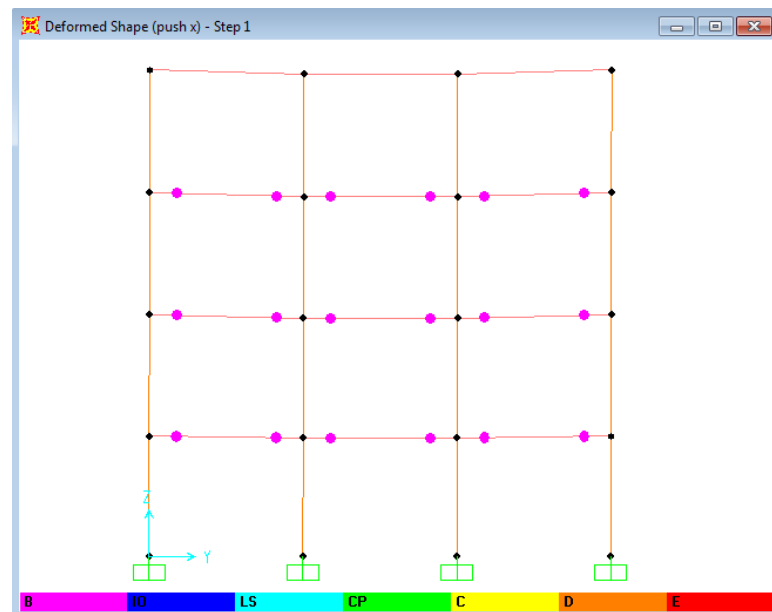
a) Kolom bujur sangkar arah x

Sendi plastis dapat dilihat melalui *Display>Show Deformed Shape*. Pilih pembebanan push x. Warna sendi plastis menunjukkan tingkat kekuatan elemen.

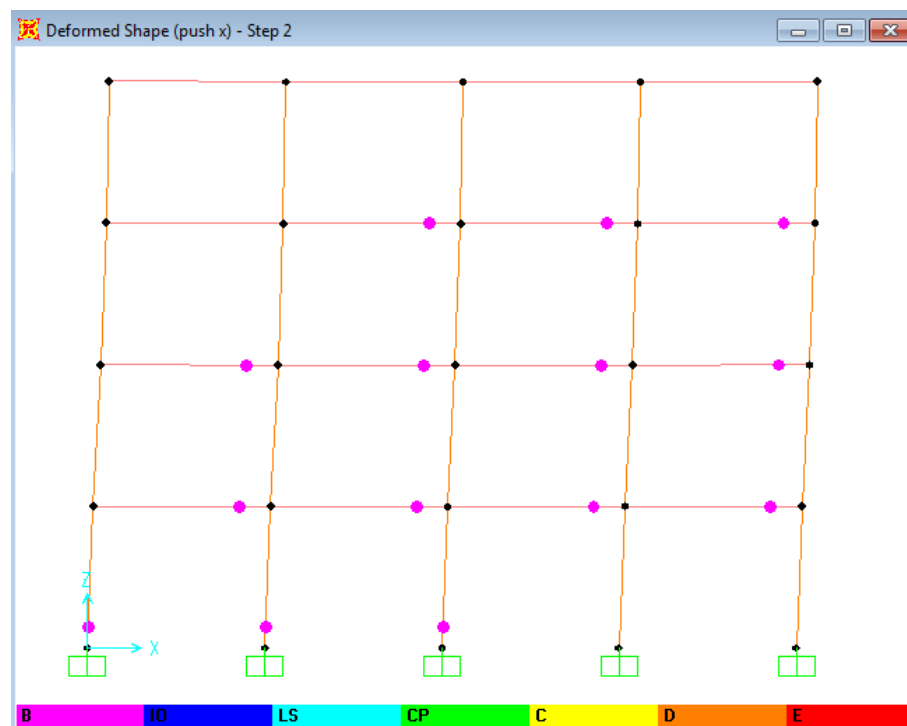
Pada step 1 sendi plastis terjadi diportal 3 pada balok 19, step 2 sendi plastis pada kolom bujur sangkar dimulai di beberapa daerah kolom lantai 1 sampai kolom lantai 3 dengan sendi plastis warna merah muda. Pada step 16 ujung bawah kolom lantai 1 sebagian warna biru (LS) dan terdapat satu sisi sendi plastis warna kuning (C) di kolom portal 1 lantai dasar, ditunjukkan pada Gambar 5.86 sampai Gambar 5.91.



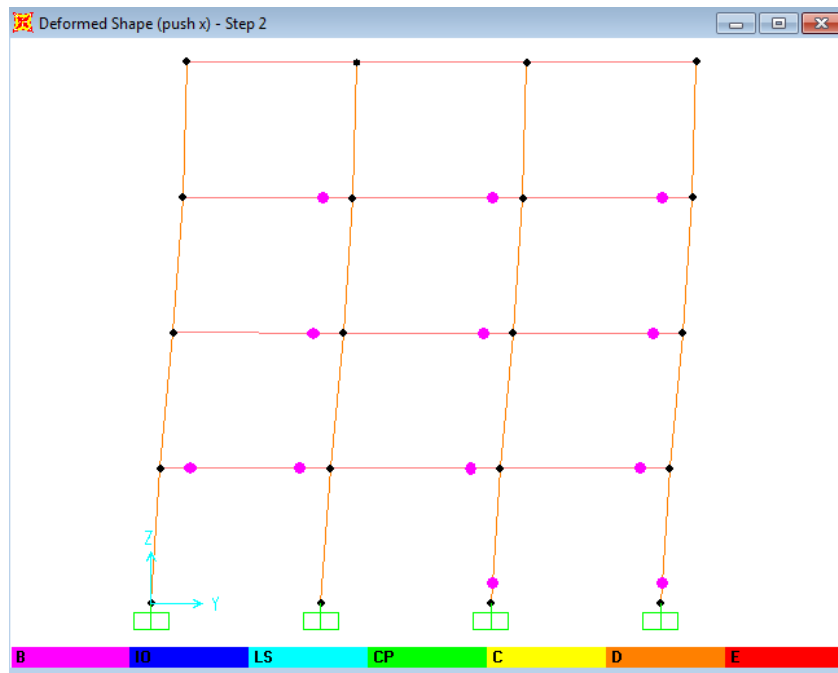
Gambar 1.86 Posisi Sendi Plastis Pada Portal 3 Untuk Step 1 Kolom Bujur Sangkar



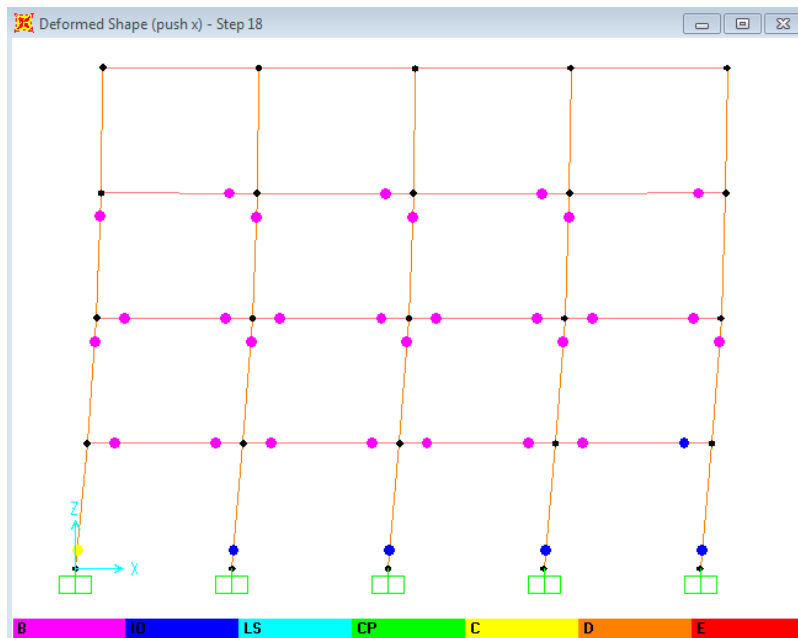
Gambar 1.87 Posisi Sendi Plastis Pada Portal C Untuk Step 1 Kolom Bujur Sangkar



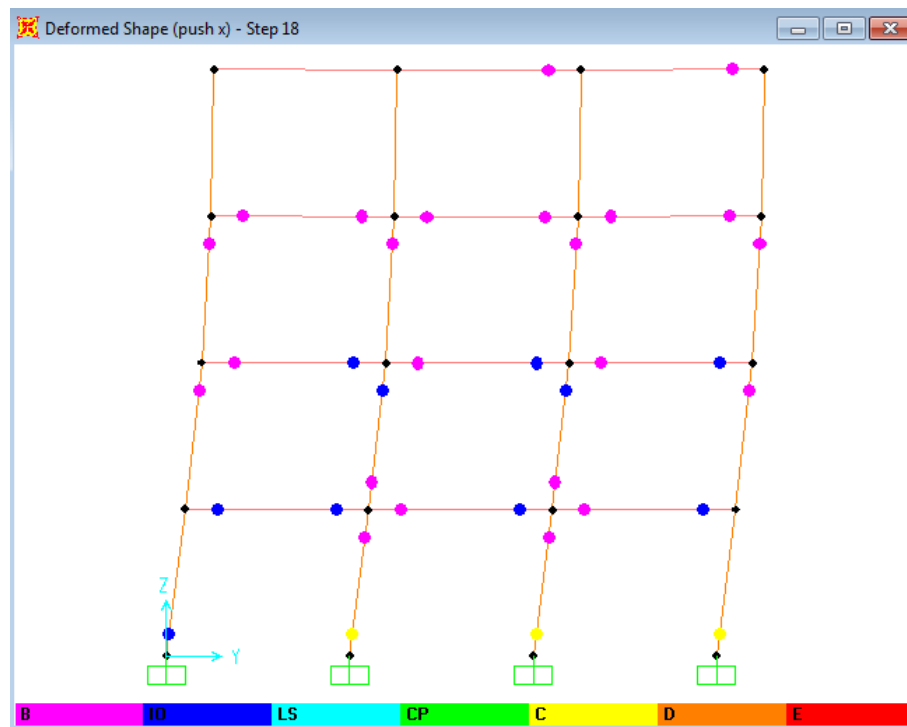
Gambar 1.88 Posisi Sendi Plastis Pada Portal 3 Untuk Step 2 Kolom Bujur Sangkar



Gambar 1.89 Posisi Sendi Plastis Pada Portal E Untuk Step 2 Kolom Bujur Sangkar



Gambar 1.90 Posisi Sendi Plastis Pada Portal 1 Untuk Step 16 Kolom Bujur Sangkar

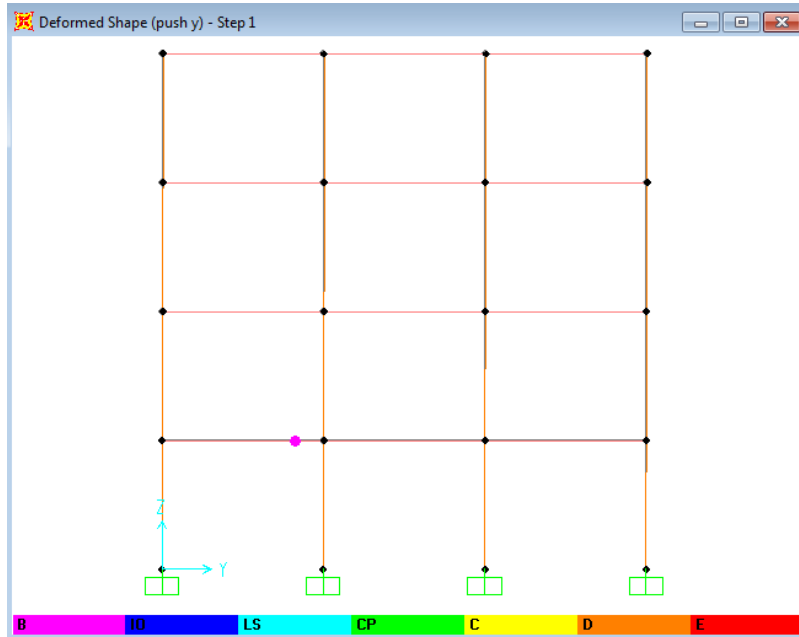


Gambar 1.91 Posisi Sendi Plastis Pada Portal B Untuk Step 16 Kolom Bujur Sangkar

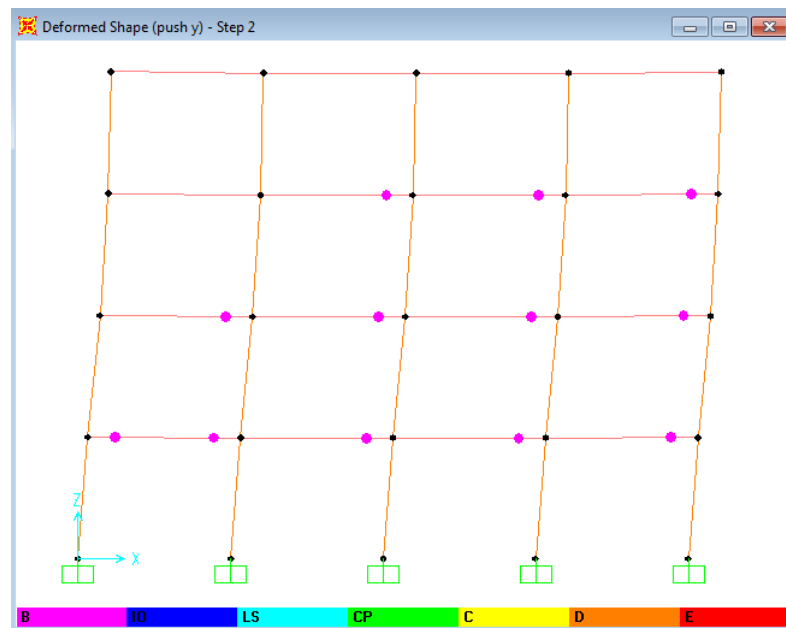
b) Kolom Bujur sangkar arah y

Sendi plastis dapat dilihat melalui *Display-Show Deformed Shape*. Pilih pembebanan push y. Warna sendi plastis menunjukkan tingkat kekuatan elemen. Posisi sendi plastis pada step 2, dan 5 arah y pada kolom bujur sangkar dapat dilihat sebagai berikut.

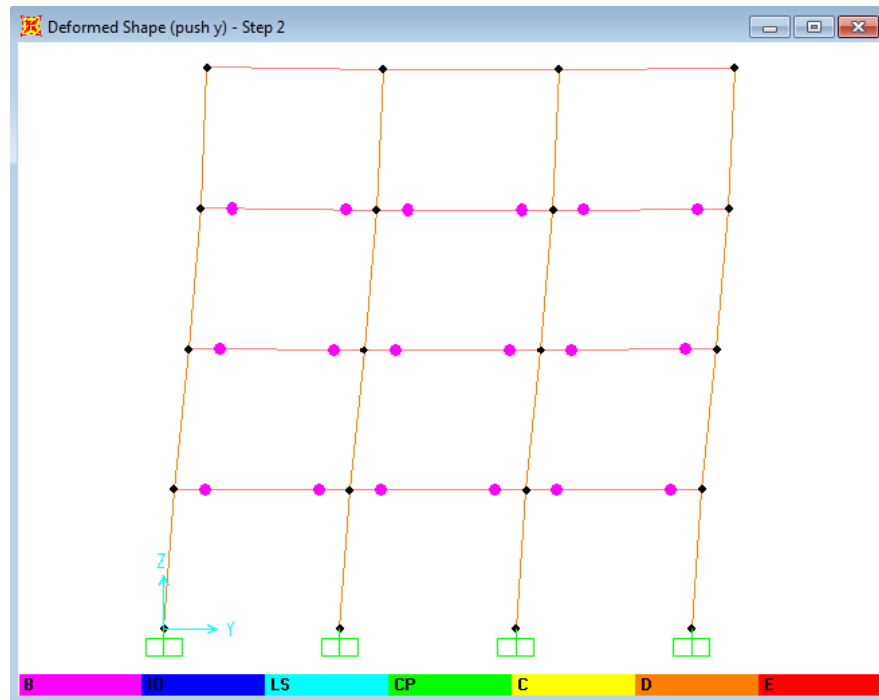
Pada step 1 sendi plastis pada kolom bujur arah y sangkar dimulai pada balok 9 lantai 1. Step 2 sendi plastis pada kolom bujur sangkar dimulai di beberapa daerah kolom lantai 1 sampai kolom lantai 3 dengan sendi plastis warna merah muda. Pada step 13 ujung bawah balok lantai 1 sebagian warna biru (LS) dan terdapat satu sisi sendi plastis warna kuning (C) di kolom portal 4 lantai dasar, ditunjukkan pada Gambar 5.92 sampai Gambar 5.96.



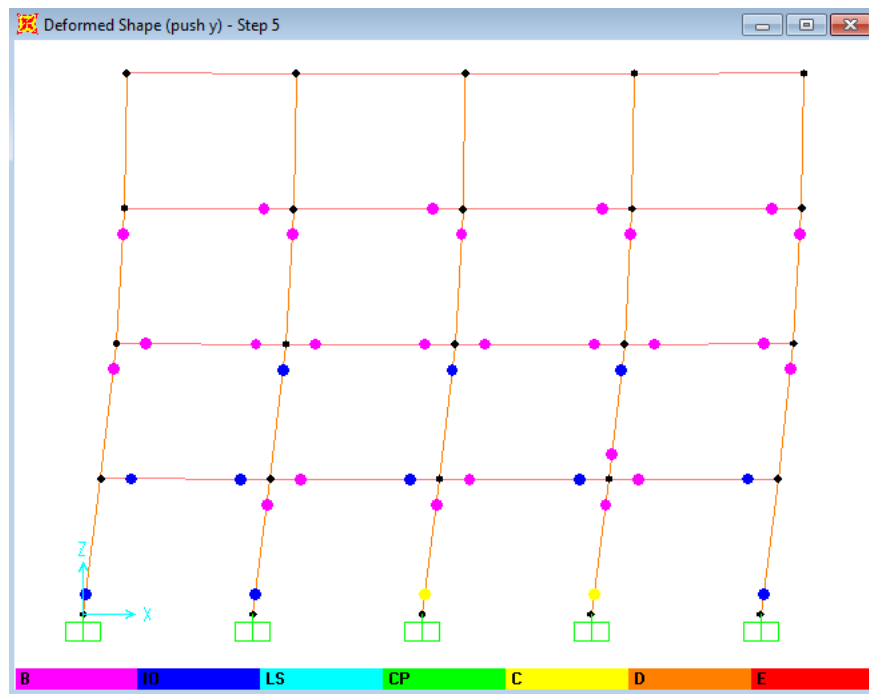
Gambar 1.92 Posisi Sendi Plastis Pada Portal E Untuk Step 1 Kolom Bujur Sangkar



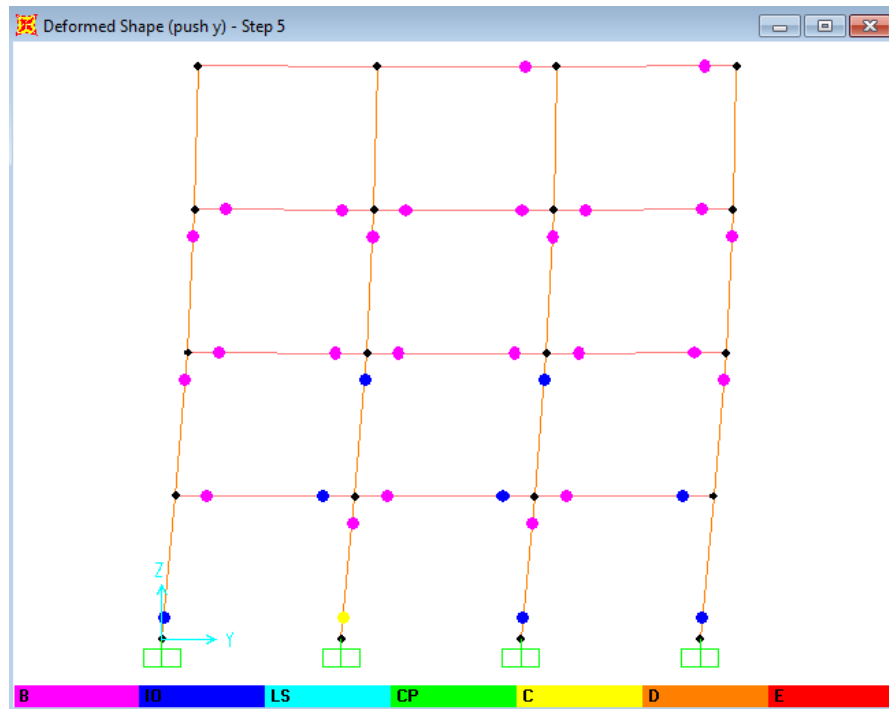
Gambar 1.93 Posisi Sendi Plastis Pada Portal 3 Untuk Step 2 Kolom Bujur Sangkar



Gambar 1.94 Posisi Sendi Plastis Pada Portal B Untuk Step 2 Kolom Bujur Sangkar



Gambar 1.95 Posisi Sendi Plastis Pada Portal 4 Untuk Step 13 Kolom Bujur Sangkar

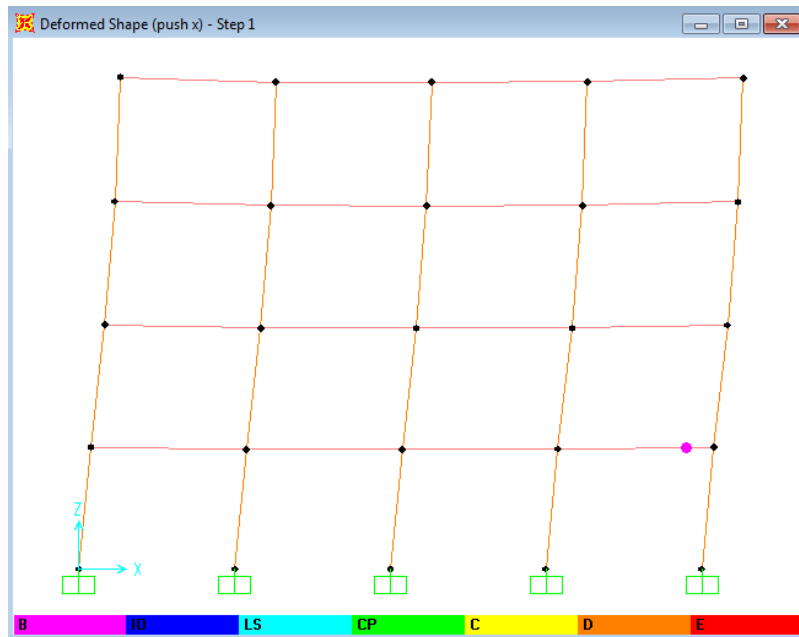


Gambar 1.96 Posisi Sendi Plastis Pada Portal B Untuk Step 13 Kolom Bujur Sangkar

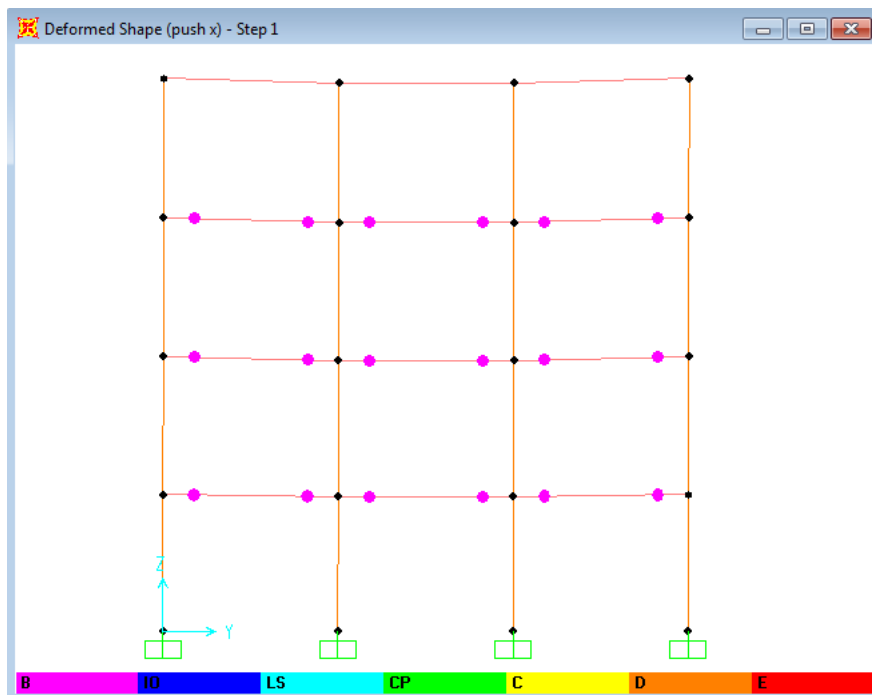
- 2) Sendi Plastis Arah x dan y pada kolom pipih
 - a) Kolom pipih arah x

Sendi plastis dapat dilihat melalui *Display-Show Deformed Shape*. Pilih pembebanan push y. Warna sendi plastis menunjukkan tingkat kekuatan elemen. Posisi sendi plastis pada step 2 dan 4 arah y pada kolom pipih dapat dilihat sebagai berikut.

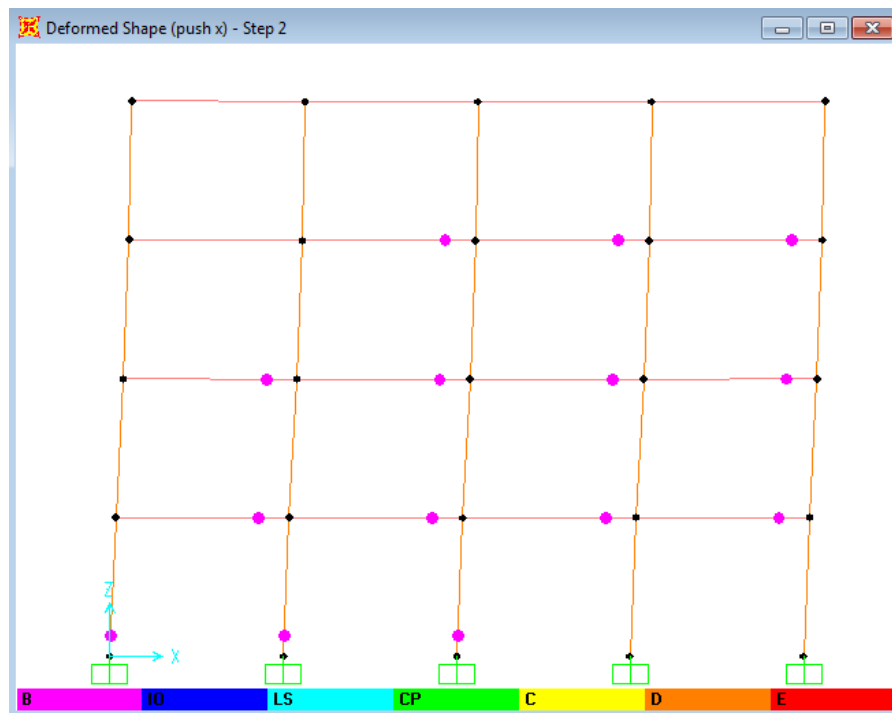
Pada step 1 diportal 3 terjadi sendi plastis yang sama di balok 25 seperti pada kolom bujur sangkar namun lebih dahulu terjadi sendi plastis pada kolom pipih dari pada pada kolom bujur sangkar, step 2 sendi plastis pada kolom pipih dimulai di beberapa daerah kolom lantai 1 sampai kolom lantai 3 dengan sendi plastis warna merah muda. Pada step 73 ujung bawah kolom lantai 1 sebagian warna biru (LS) dan terdapat satu sisi sendi plastis warna kuning (C) di kolom portal 2 lantai dasar, ditunjukkan pada Gambar 5.97 sampai Gambar 5.102.



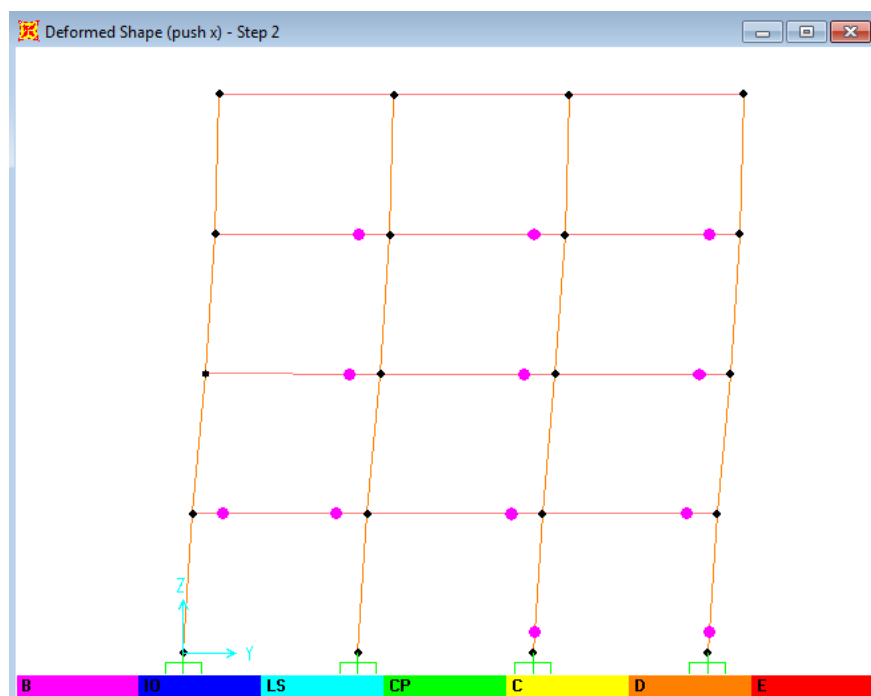
Gambar 1.97 Posisi Sendi Plastis Pada Portal 3 Untuk Step 1 Kolom Pipih



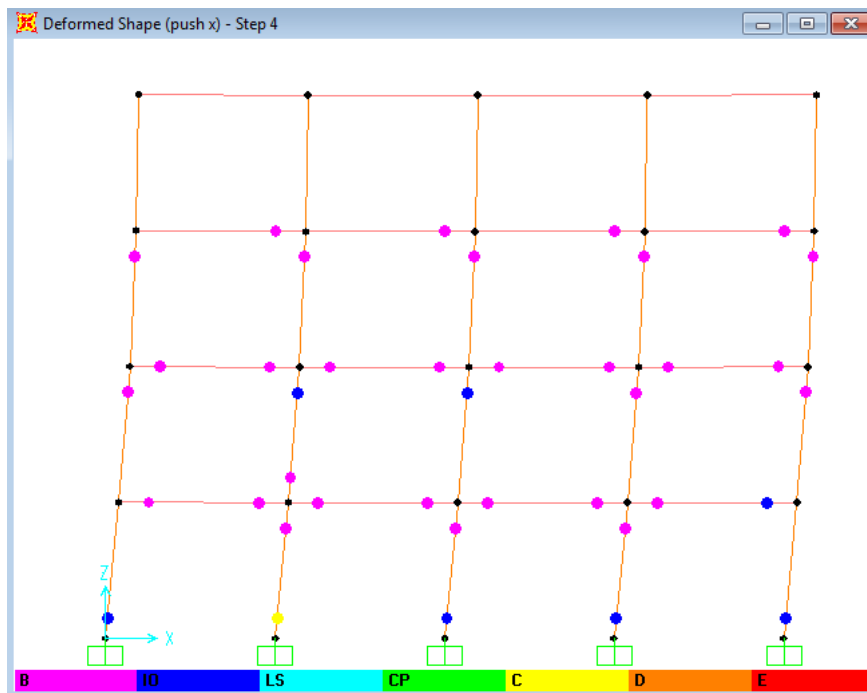
Gambar 1.98 Posisi Sendi Plastis Pada Portal C Untuk Step 1 Kolom Pipih



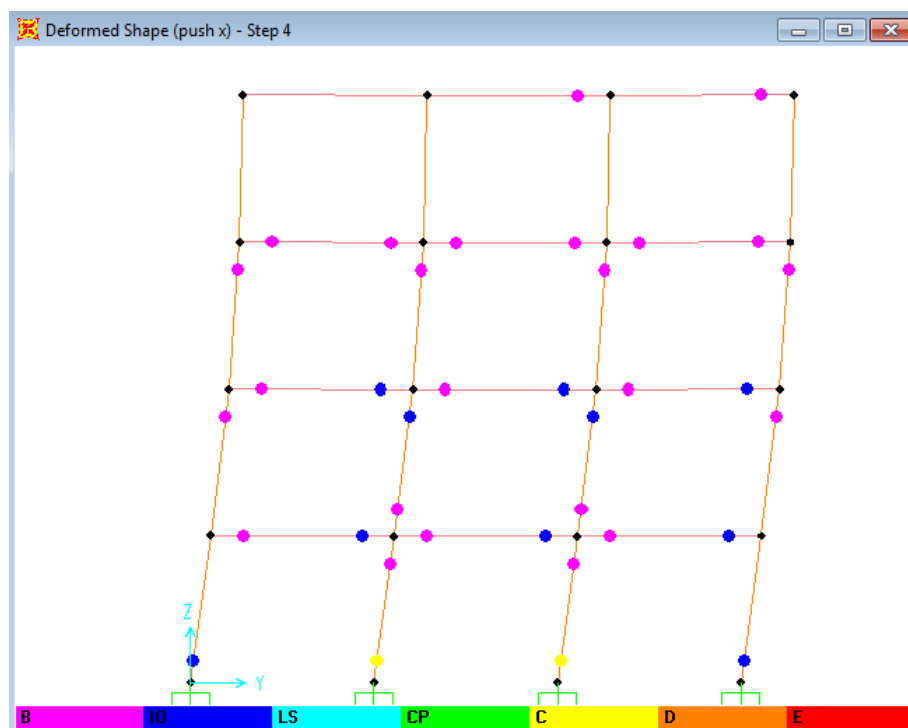
Gambar 1.99 Posisi Sendi Plastis Pada Portal 3 Untuk Step 2 Kolom pipih



Gambar 1.100 Posisi Sendi Plastis Pada Portal E Untuk Step 2 Kolom Pipih



Gambar 1.101 Posisi Sendi Plastis Pada Portal 2 Untuk Step 73 Kolom Pipih

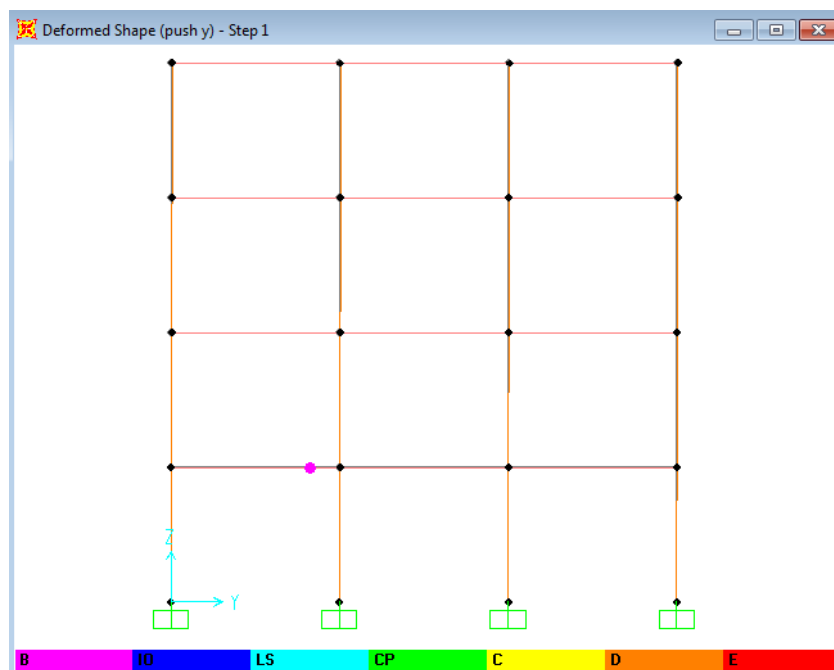


Gambar 1.102 Posisi Sendi Plastis Pada Portal B Untuk Step 73 Kolom Pipih

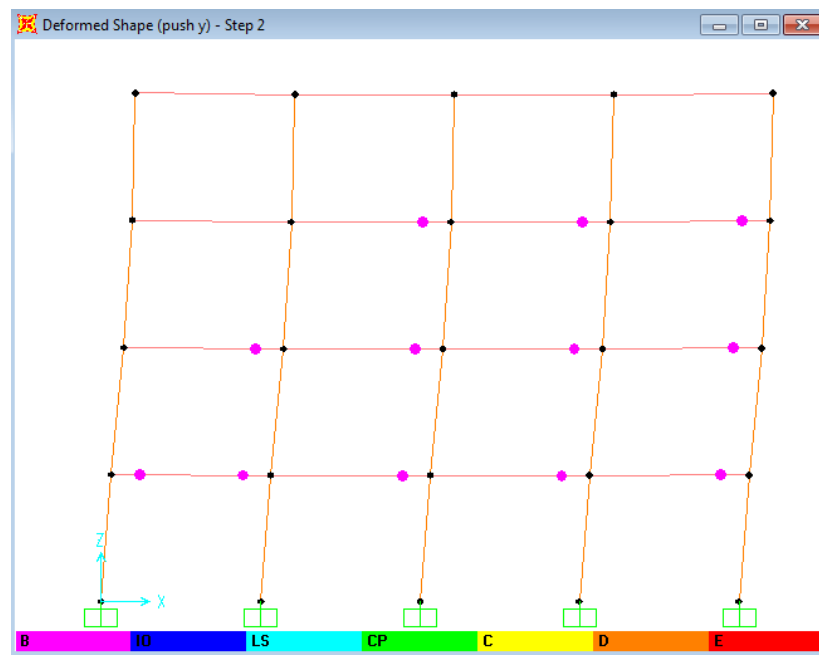
b) Kolom Pipih arah y

Sendi plastis dapat dilihat melalui *Display-Show Deformed Shape*. Pilih pembebanan push y. Warna sendi plastis menunjukkan tingkat kekuatan elemen. Posisi sendi plastis pada step 2, dan 9 arah y pada kolom pipih dapat dilihat sebagai berikut.

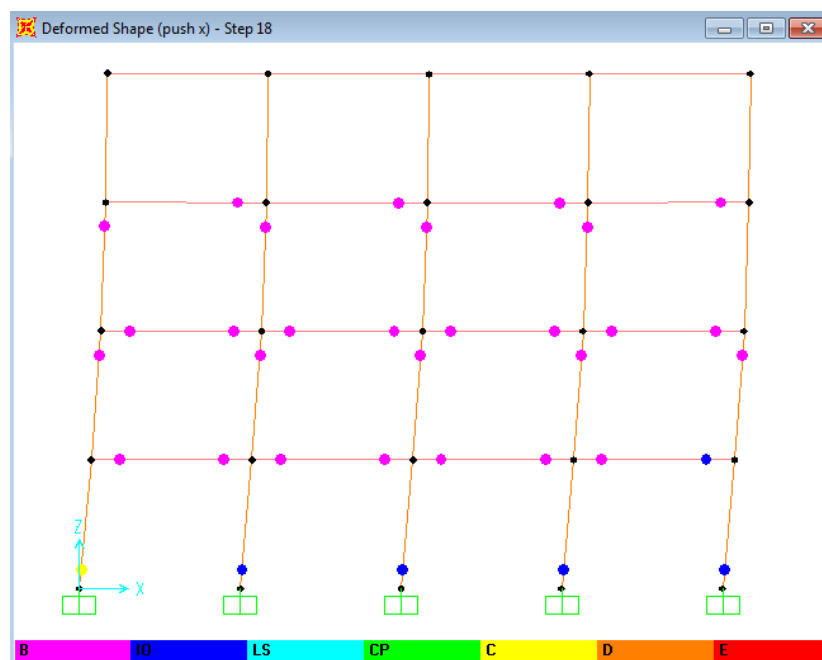
Pada step 1 sendi plastis pada kolom bujur arah y sangkar dimulai pada balok 28 lantai 1. Step 2 sendi plastis pada kolom bujur sangkar dimulai di beberapa daerah kolom lantai 1 sampai kolom lantai 3 dengan sendi plastis warna merah muda. Pada step 45 ujung bawah balok lantai 1 sebagian warna biru (LS) dan terdapat satu sisi sendi plastis warna kuning (C) di kolom portal 4 lantai dasar, ditunjukkan pada Gambar 5.103 sampai Gambar 5.107.



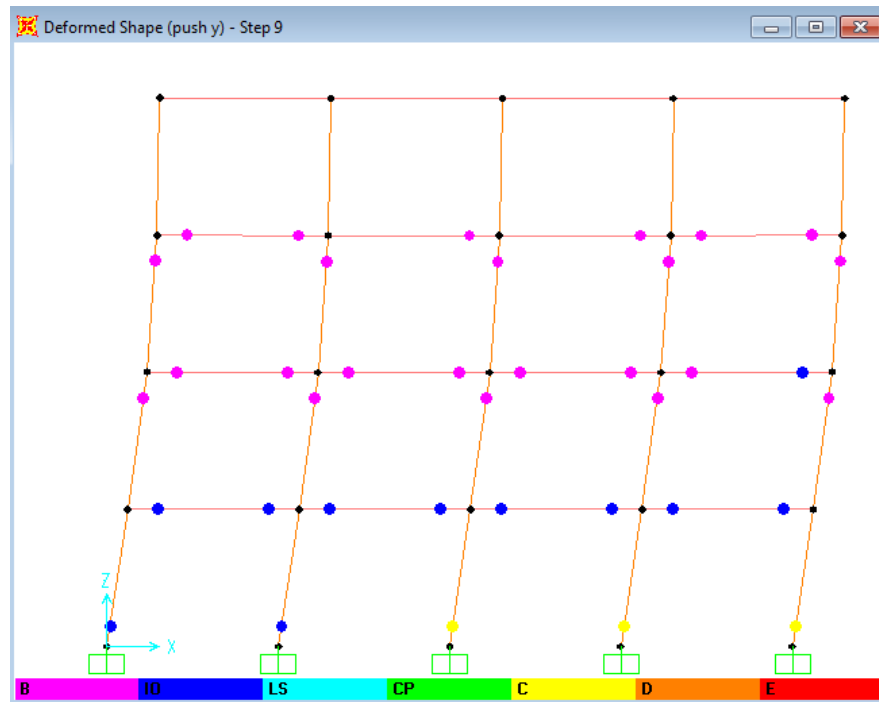
Gambar 1.103 Posisi Sendi Plastis Pada Portal E untuk Step 1 Kolom Pipih



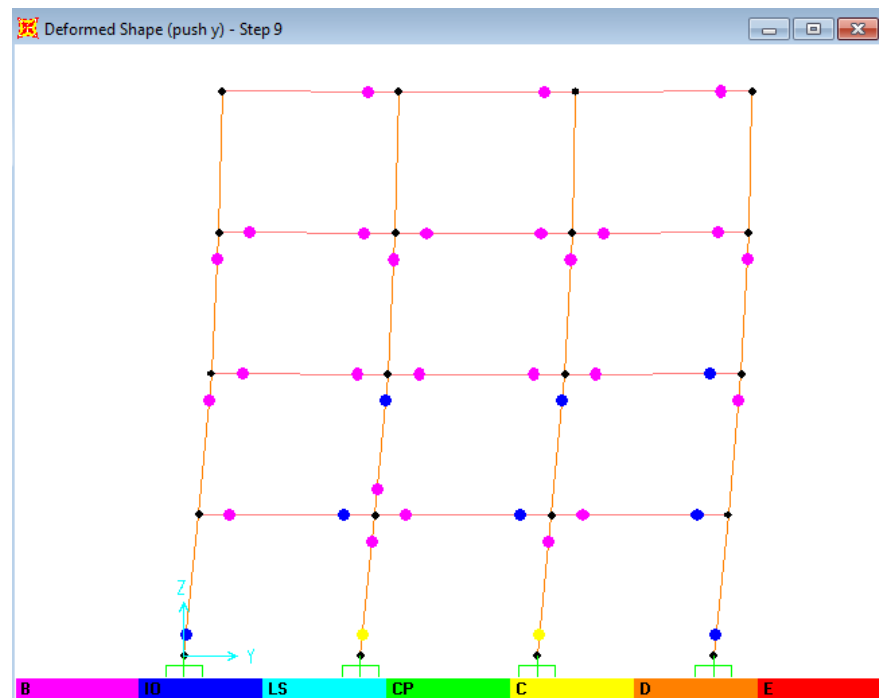
Gambar 1.104 Posisi Sendi Plastis Pada Portal 3 Untuk Step 2 Kolom Pipih



Gambar 1.105 Posisi Sendi Plastis Pada Portal E Untuk Step 2 Kolom Pipih



Gambar 1.106 Posisi Sendi lastis Pada Portal 1 Untuk Step 45 Kolom Pipih



Gambar 1.107 Posisi Sendi Plastis Pada Portal D Untuk Step 45 Kolom Pipih

