

BAB III

DISAIN KOLOM BIAKSIAL

3.1. Disain dengan metoda Eksak

Disain kolom biaksial dengan metoda eksak dapat disusun menjadi beberapa tahapan berikut:

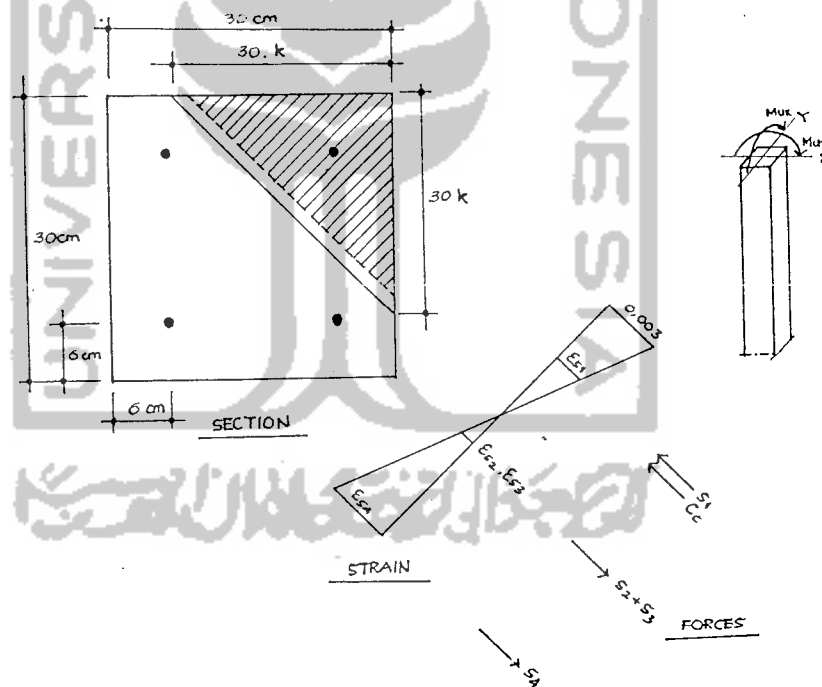
- (1). Menentukan momen lentur M_{uy} untuk yang sejajar dengan sumbu-x dan M_{ux} untuk yang sejajar sumbu-y.
- (2). Menentukan eksentrisitas e_x yang diperoleh dari M_{uy}/N , sedang untuk eksentrisitas e_y diperoleh dari M_{ux}/N .
- (3). Menentukan sudut θ , yang sejajar garis e ekuivalen yang diperoleh dari resultante e_x dan e_y .
- (4). Menaksir luas tulangan dan distribusi tulangan yang disebar pada keempat sudut penampang kolom. Bila lebih dari empat tulangan dapat diresultante menjadi empat kelompok tulangan. Untuk disain praktis dapat disederhanakan menjadi dua kelompok resultante tulangan, yaitu kelompok tulangan tarik dan kelompok tulangan tekan.
- (5). Trial angka konstanta k_x dan k_y , hingga diperoleh keadaan berimbang (*balanced*).
- (6). Menentukan kapasitas momen ultimit maksimum harus lebih dari atau sama dengan momen ultimit rencana, bila tidak memenuhi, trial tulangan atau dimensi.

$$M_{ux} < M_{ux \text{ perlu}} \text{ atau } M_{uy} < M_{uy \text{ perlu}}$$



Contoh 3.1

Suatu kolom bujur sangkar, dengan ukuran masing-masing sisi 30 cm, dengan tulangan baja $\emptyset = 32$ mm sebanyak empat buah yang menyebar pada keempat sudut kolom tersebut, tebal penutup beton 5 cm. Tegangan luluh baja (f_y) = 400 Mpa, dengan elastisitas baja (E_s) = $2,1 \cdot 10^6$ kg/cm² dan tegangan desak beton (f'_c) = 29 Mpa. Hitung kapasitas maksimum momen biaksial yang bekerja pada kolom tersebut (Lihat gambar 3.1).



Gambar 3.1. Penampang kolom dan gaya-gaya yang bekerja

Penyelesaian:

Selama tampang sisi dan letak tulangan simetris terhadap sumbu netral arah x dan y, maka momen maksimum arah sumbu x dan y sama besar, sehingga sudut θ membentuk 45° dari garis horisontal. Dengan demikian bentuk daerah penampang kolom yang menerima desak berupa segi tiga sama kaki. Untuk menentukan garis netral, maka diperlukan cara coba-coba untuk mendapatkan nilai k.

Anggapan pertama:

Untuk menentukan sumbu netral pada gambar 3.1, dicoba dengan mengambil $k = 0,7$, dari persamaan (2.7.abcd) maka diperoleh:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s_1} &= 0,003 \left(1 - \frac{6}{0,7 \cdot 30} - \frac{6}{0,7 \cdot 30} \right) = 1,285 \cdot 10^{-3} \\ \varepsilon_{s_2} = \varepsilon_{s_3} &= 0,003 \left(1 - \frac{30 - 6}{0,7 \cdot 30} - \frac{6}{0,7 \cdot 30} \right) = -1,285 \cdot 10^{-3} \\ \varepsilon_{s_4} &= 0,003 \left(1 - \frac{30 - 6}{0,7 \cdot 30} - \frac{30 - 6}{0,7 \cdot 30} \right) = -3,857 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Dalam hal ini, $f_y/E_s = 4000/(2.1 \cdot 10^6) = 1,905 \cdot 10^{-3}$

Karena itu persamaan (2.8.abc) memberikan:

$$\begin{aligned} f_{s_1} &= 1,285 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = 2\,698,5 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{s_2} = f_{s_3} &= -1,285 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = -2\,698,5 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{s_4} &= -1,905 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = -4\,000 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Dari persamaan (2.9.abcd) kita dapatkan

$$\begin{aligned} S_1 &= 21\,702,62 \text{ kg} & S_2 &= -21\,702,62 \text{ kg} \\ S_3 &= -21\,702,62 \text{ kg} & S_4 &= -32\,169,90 \text{ kg} \end{aligned}$$

Dan persamaan (2.10) memberikan

$$C_c = 0,425 \cdot 290 \cdot 0,85^2 \cdot 0,7^2 \cdot 30^2 = 39\,270,22 \text{ kg}$$

Jadi,

$$C_c + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = -14\,602,29 \text{ kg}$$

Karena tegangan tarik terlalu besar, maka harga k perlu dinaikan.

Anggapan kedua:

Diambil $k = 0,8$. Penggunaan persamaannya seperti sebelumnya, sehingga mendapatkan:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s_1} &= 0,00150 & \varepsilon_{s_2} &= -0,00075 \\ \varepsilon_{s_3} &= -0,00075 & \varepsilon_{s_4} &= -0,00300 \end{aligned}$$

maka akan diperoleh,

$$\begin{aligned} f_{s_1} &= 3150 \text{ kg/cm}^2 & f_{s_2} &= -1575 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{s_3} &= -1575 \text{ kg/cm}^2 & f_{s_4} &= -4000 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Dari persamaan (2.9.abcd) kita dapatkan

$$\begin{aligned} S_1 &= 25\,333,80 \text{ kg} & S_2 &= -12\,666,90 \text{ kg} \\ S_3 &= -12\,666,90 \text{ kg} & S_4 &= -32\,169,90 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$C_c = 51\,291,72 \text{ kg}$$

Jadi,

$$C_c + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = 19\,121,82 \text{ kg}$$

Tegangan desak terlalu besar, harga k perlu dikurangi.

Anggapan ketiga:

Sisa-sisa gaya dari persamaan keseimbangan sebelumnya, dapat diinterpolasi secara linier sebagai berikut:

$$k = 0,7 + \frac{14\,602,29}{14\,602,29 + 19\,121,82} \cdot 0,1 = 0,7423$$

Dengan menggunakan persamaan-persamaan kesetimbangan sebelumnya, kita masukkan nilai k, maka akan kita peroleh:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s_1} &= 1,383 \cdot 10^{-3} & \varepsilon_{s_2} &= -1,041 \cdot 10^{-3} \\ \varepsilon_{s_3} &= -1,041 \cdot 10^{-3} & \varepsilon_{s_4} &= -3,464 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

maka diperoleh nilai tegangan baja,

$$\begin{aligned} f_{s_1} &= 2\,904,3 \text{ kg/cm}^2 & f_{s_2} &= -2\,186,1 \text{ kg/cm}^2 \\ f_{s_3} &= -2\,186,1 \text{ kg/cm}^2 & f_{s_4} &= -4000 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

jadi,

$$\begin{aligned} S_1 &= 23\,357,76 \text{ kg} & S_2 &= -17\,581,65 \text{ kg} \\ S_3 &= -17\,581,65 \text{ kg} & S_4 &= -32\,169,90 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$C_c = 44\,159,70 \text{ kg}$$

Jadi,

$$C_c + S_1 + S_2 + S_3 + S_3 = 184,26 \text{ kg}$$

Perkiraan ketiga sudah dianggap memenuhi keseimbangan (balanced). Dari persamaan (2.11.ab) kita dapatkan,

$$\bar{x} = \bar{y} = 0,333.0,85.0,7423.30 = 6,308 \text{ cm}$$

Dari persamaan (2.13.ab) diperoleh,

$$\begin{aligned} M_{ux} = M_{uy} &= 44159,7(30-6,3) + (2904,3-2186,1)(30-6) \\ &\quad + (-2186,1-4000).6 \\ &= 786\,705 \text{ kg cm} = 7,86705 \text{ tm.} \end{aligned}$$

Reaksi momen lentur terfaktornya adalah:

$$\begin{aligned} M_u &= \sqrt{M_{ux}^2 + M_{uy}^2} = 1\,112\,569 \text{ kg cm} \\ &= 11,12569 \text{ tm} \end{aligned}$$

Contoh 3.2

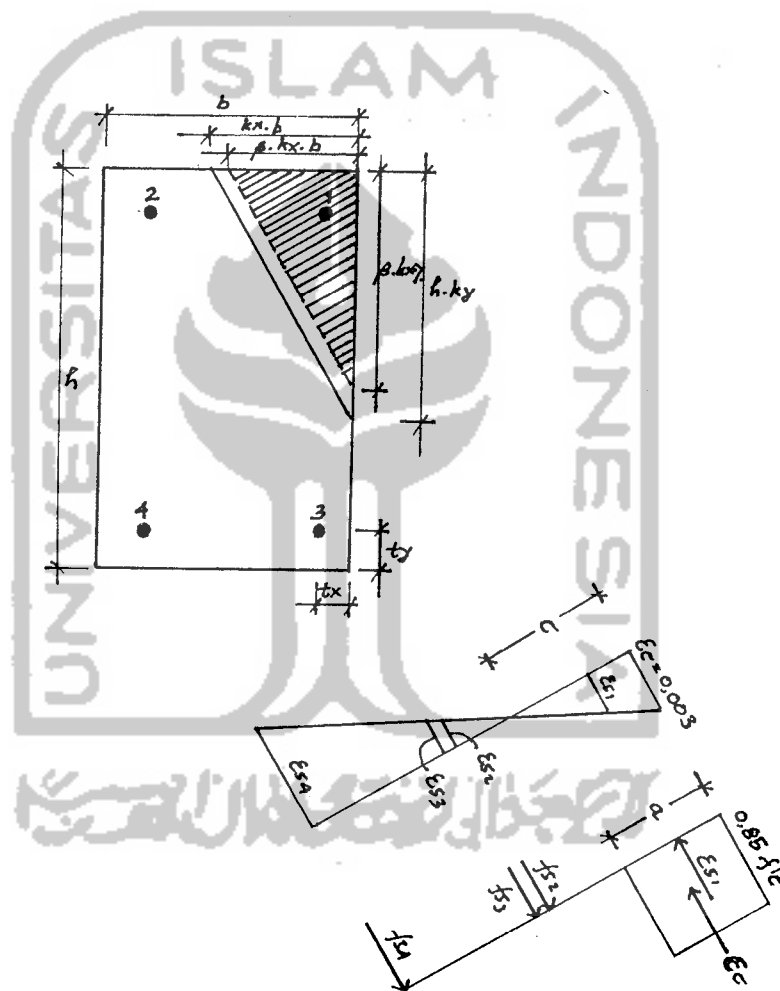
Suatu kolom dengan ketentuan seperti pada contoh 3.1, jika tinggi penampang kolom diperpanjang menjadi 50 cm. Berapa kapasitas momen arah sumbu x dan y (M_{ux} dan M_{uy}), juga kapasitas momen ultimit terfaktornya.

Penyelesaian:

Untuk menentukan kapasitas momen maksimum arah x dan y, sementara dianggap sama besar. Dengan demikian maka

sudut θ membentuk 45° , sedangkan untuk menentukan letak garis netral, maka perlu metoda coba-coba seperti contoh 3.1. Lihat gambar berikut, dengan ketentuan:

$$\begin{aligned} h &= 50 \text{ cm} & t_x &= 6 \text{ cm} & \theta &= 45^\circ \\ b &= 30 \text{ cm} & t_y &= 6 \text{ cm} & \emptyset \text{ tul pokok} &= 32 \text{ mm} \\ & & & & A_s = A'_s &= 16,08 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$



Gambar 3.2. Penampang kolom dan gaya-gaya yang bekerja

Anggapan pertama:

Untuk menentukan sumbu netral pada gambar 3.2, dicoba dengan mengambil nilai $k_x = 0,70$ dan $k_y = 0,70$, dari persamaan (2.7 abc) akan diperoleh:

$$\epsilon_{s_1} = 0,003 \left[1 - \frac{6}{0,7 \cdot 30} - \frac{6}{0,7 \cdot 50} \right] = 1,628 \cdot 10^{-3}$$

$$\epsilon_{s_2} = 0,003 \left[1 - \frac{30 - 5}{0,7 \cdot 30} - \frac{6}{0,7 \cdot 50} \right] = -0,943 \cdot 10^{-3}$$

$$\epsilon_{s_3} = 0,003 \left[1 - \frac{6}{0,7 \cdot 30} - \frac{50 - 6}{0,7 \cdot 50} \right] = -1,628 \cdot 10^{-3}$$

$$\epsilon_{s_4} = 0,003 \left[1 - \frac{30 - 6}{0,7 \cdot 30} - \frac{50 - 6}{0,7 \cdot 50} \right] = -4,200 \cdot 10^{-3}$$

Dalam hal ini $f_y/E_s = 4000/(2,1 \cdot 10^6) = 1,905 \cdot 10^{-3}$

Dari persamaan (2.8 abc) akan diperoleh:

$$f_{s_1} = 1,628 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = 3418,8 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{s_2} = -0,943 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = -1980,3 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{s_3} = -1,628 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = -3418,8 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{s_4} = -4000 \text{ kg/cm}^2$$

Dari persamaan (2.9 abcd) kita dapatkan:

$$S_1 = 16,08 \cdot 3418,8 = 27\,495,60 \text{ kg}$$

$$S_2 = 16,08 \cdot (-1980,3) = -15\,926,50 \text{ kg}$$

$$S_3 = 16,08 \cdot (-3418,8) = -27\,495,60 \text{ kg}$$

$$S_4 = 16,08 \cdot (-4000) = -32\,169,90 \text{ kg}$$

Dari persamaan (2.10) diperoleh:

$$\begin{aligned} C_c &= 0,425.290.0,85^2.0,7.30.0,70.50 \\ &= 65\,450,37 \text{ kg} \end{aligned}$$

Jadi,

$$C_c + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = 17353,97 \text{ kg}$$

Tegangan tarik terlalu besar, maka nilai k perlu dinaikan.

Anggapan kedua:

Dicoba nilai $k_x = 0,60$ dan $k_y = 0,60$. Dengan cara yang sama akan diperoleh:

$$\begin{aligned} \epsilon_{s_1} &= 1,40.10^{-3} & f_{s_1} &= 2940 \text{ kg/cm}^2 \\ \epsilon_{s_2} &= -1,60.10^{-3} & f_{s_2} &= -3360 \text{ kg/cm}^2 \\ \epsilon_{s_3} &= -2,40.10^{-3} & f_{s_3} &= -4000 \text{ kg/cm}^2 \\ \epsilon_{s_4} &= -5,40.10^{-3} & f_{s_4} &= -4000 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Dari persamaan (2.9.abcd) kita dapatkan

$$\begin{aligned} S_1 &= 23\,644,80 \text{ kg} & S_3 &= -32\,169,9 \text{ kg} \\ S_2 &= -27\,022,70 \text{ kg} & S_4 &= -32\,169,9 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$C_c = 48\,085,98 \text{ kg}$$

$$C_c + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = -19\,631,71 \text{ kg}$$

Tegangan desak terlalu besar, maka nilai k perlu diturunkan.

Anggapan ketiga:

Sisa-sisa gaya dari anggapan pertama dan kedua, dapat diinterpolasi, untuk menentukan nilai pendekatan k, maka:

$$k_x = 0,6 + \frac{19\ 631,71}{19\ 631,71 + 17\ 353,97} \cdot 0,1 = 0,661$$

$$k_y = k_x = 0,661$$

Dengan nilai k_x dan k_y tersebut, akan kita dapatkan:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s_1} &= 1,547 \cdot 10^{-9} & f_{s_1} &= 3248,70 \text{ kg/cm}^2 \\ \varepsilon_{s_2} &= -1,175 \cdot 10^{-9} & f_{s_2} &= -2467,50 \text{ kg/cm}^2 \\ \varepsilon_{s_3} &= -1,901 \cdot 10^{-9} & f_{s_3} &= -3992,10 \text{ kg/cm}^2 \\ \varepsilon_{s_4} &= -4,625 \cdot 10^{-9} & f_{s_4} &= -4000 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Dari persamaan (2.9.abcd) kita dapatkan

$$\begin{aligned} S_1 &= 26\ 127,59 \text{ kg} & S_3 &= -32\ 106,37 \text{ kg} \\ S_2 &= -19\ 844,81 \text{ kg} & S_4 &= -32\ 169,90 \text{ kg} \\ C_c &= 58\ 360,49 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$C_c + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = 367 \text{ kg}$$

Perkiraan ketiga sudah dapat dianggap memenuhi keseimbangan.

Dari persamaan (2.11 ab) kita dapatkan:

$$\bar{x} = \frac{1}{3} \cdot 0,85 \cdot 0,661 \cdot 30 = 5,618 \text{ cm}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{3} \cdot 0,85 \cdot 0,661 \cdot 50 = 9,364 \text{ cm}$$

Dari persamaan (2.13 ab) akan diperoleh:

$$\begin{aligned} M_{ux} &= C_c(h-\bar{y}) + (S_1+S_2)(h-t_y) + (S_3+S_4)t_y \\ &= 58360,49(50-9,36) + (26127,59-19844,81)(50-6) \\ &\quad + (-32106,37-32169,90) \cdot 6 \\ &= 2\,262\,555 \text{ kg cm} = 22,6255 \text{ Tm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{uy} &= C_c(b-\bar{x}) + (S_1+S_3)(b-t_x) + (S_2+S_4)t_x \\ &= 58360,49(30-5,62) + (26127,59-32106,37)(30-6) \\ &\quad + (-19844,81-32169,90) \cdot 6 \\ &= 967249,76 \text{ kg cm} = 9,67249 \text{ Tm} \end{aligned}$$

Reaksi momen terfaktornya adalah,

$$\begin{aligned} M_u &= \sqrt{M_{ux}^2 + M_{uy}^2} \\ &= \sqrt{(2262555)^2 + (967249)^2} \\ &= 246\,0630 \text{ kg cm} = 24,6063 \text{ Tm} \end{aligned}$$

3.2. Disain dengan metoda permukaan runtuh tipe S_a

Langkah-langkah berikut ini dapat dipakai sebagai petunjuk dalam desain kolom yang mengalami lentur pada arah x dan y. Prosedur ini beranggapan bahwa luas tulangan sama pada semua sisi.

- (1). Menghitung momen lentur uniaksial dengan menganggap banyaknya tulangan pada masing-masing sisi sama.



Asumsikan faktor konstanta interaksi $\beta = 0,50$ sampai 0.70. Kemudian asumsikan perbandingan b/h . Angka perbandingan ini dapat didekati dengan M_{nx}/M_{ny} . Dengan menggunakan persamaan (2.19a), kemudian tentukan momen uniaksial ekuivalen yang diperlukan M_{ox} atau M_{oy} . Apabila M_{nx} lebih besar dari pada M_{ny} , gunakan M_{ox} untuk disain, begitu pula sebaliknya.

- (2). Asumsikan ukuran penampang melintang kolom dan angka penulangan $p = p' = 0,01-0.02$ pada setiap dua sisi yang sejajar dengan sumbu lentur dari momen ekuivalen yang terbesar. Menentukan penulangan prarencana, kemudian hitung kapasitas P_n penampang yang telah diasumsikan. Dalam desai akhir, jumlah tulangan memanjang pada keempat sisi harus sama.
- (3). Menghitung kekuatan momen nominal aktual M_{oxn} untuk lentur uniaksial ekuivalen terhadap sumbu x untuk $M_{oy}=0$. Besarnya tidak boleh lebih kecil dari kekuatan momen yang diperlukan (M_{ox}).
- (4). Menghitung kekuatan momen nominal aktual M_{oyn} untuk momen lentur uniaksial ekuivalen terhadap sumbu y untuk $M_{ox} = 0$.
- (5). Mencari M_{ny} dengan memasukkan M_{nx}/M_{oxn} dan harga β coba-coba pada gambar 2.16.
- (6). Melakukan coba-coba dan penyesuaian berikutnya dengan memperbesar β apabila M_{ny} yang diperoleh dari diagram lebih kecil dari pada M_{ny} perlu. Ulangi langkah-langkah

tadi sampai harga kedua M_{ny} sama, baik dengan cara mengubah-ubah harga β maupun dengan mengubah-ubah penampangnya.

(7). Menentukan tulangan sengkangnya, dan membuat detailnya.

Contoh 3.3

Suatu kolom menerima beban aksial $P_u = 95$ ton dan momen arah x sebesar $M_x = 18,5$ tm, momen arah y sebesar $M_y = 10$ tm. Disain kolom biaksial tersebut jika digunakan beton dengan mutu (f'_c) = 29 Mpa, dan baja tulangan dengan mutu (f_y) = 400 Mpa.

Penyelesaian:

Langkah pertama

Menghitung momen lentur uniaksial ekuivalen dengan menganggap banyaknya tulangan pada semua sisi sama. Anggapan awal bahwa $\phi = 0,70$. (untuk kolom bersengkang).

$$P_n \text{ perlu} = \frac{P_u}{\phi} = \frac{95}{0,70} = 135,7143 \text{ ton}$$

$$M_{nx} \text{ perlu} = \frac{M_{ux}}{\phi} = \frac{18,5}{0,70} = 26,4286 \text{ tm}$$

$$M_{ny} \text{ perlu} = \frac{M_{uy}}{\phi} = \frac{10}{0,70} = 14,2857 \text{ tm}$$

Melakukan analisa momen ekuivalen dan eksentrisitas ekuivalen terhadap sumbu x, karena yang terbesar diantara kedua momen biaksial adalah $M_{nx} = 26,4286$ tm terhadap sumbu x.

$$\frac{M_{nx}}{M_{ny}} = \frac{26,4286}{14,2857} = 1,85$$

Dianggap dimensi kolom sebanding dengan momen-momen yang bekerja, maka $h/b = 1,85$. Jika diasumsikan $b = 30$ cm maka $h \approx 50$, sehingga $h/b = 1,67$. Faktor kontur interaksi untuk perencanaan awal diasumsikan $\beta = 0,65$. Dari persamaan (2.24b), maka:

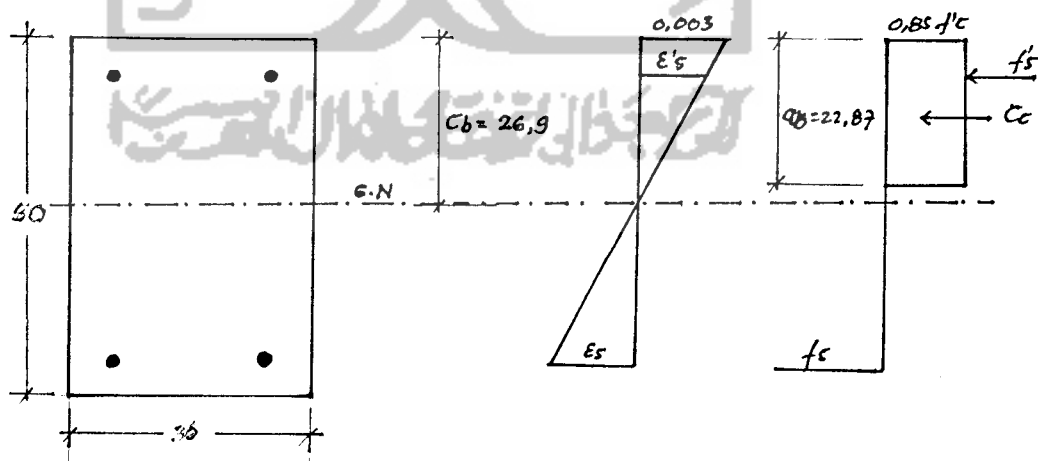
$$M_{ox} \text{ ekuivalen} = M_{nx} + M_{ny} \left[\frac{h}{b} \right] \left[\frac{1-\beta}{\beta} \right]$$

atau

$$\begin{aligned} M_{ox} &= 26,4286 + 14,2857 \cdot 1,67 \left[\frac{1-0,65}{0,65} \right] \\ &= 39,2747 \text{ tm} \end{aligned}$$

Langkah kedua:

Kontrol kapasitas penampang dari P_n yang telah diasumsikan.



Gambar 3.3. Penampang kolom dan diagram tegangan-regangan

$$b = 30 \text{ cm} \quad h = 50 \text{ cm} \quad d' = 6 \text{ cm}$$

$$d = h - d' = 50 - 6 = 44 \text{ cm}$$

$$A_s = A'_s = 1/4 \pi . 3,2^2 . 2 = 16,08 \text{ cm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{b.d} = \frac{16,08}{30.44} = 0,0122$$

Analisa pada kondisi balanced

$$c_b : (d - c_b) = \varepsilon'_{bc} : \varepsilon_s$$

$$\frac{c_b}{(d - c_b)} = \frac{\varepsilon'_{bc}}{\varepsilon_s} = \frac{0,003}{4000/2,1.10^6} = \frac{0,003.2,1.10^6}{4000}$$

$$\frac{c_b}{(44 - c_b)} = \frac{6300}{4000} \longrightarrow 40.c_b = 63.44 - 63.c_b$$

$$c_b = \frac{2772}{(40+63)} = 26,91 \text{ cm}$$

$$a_b = \beta . c_b = 0,85.26,91 = 22,87 \text{ cm}$$

$$f'_s = \varepsilon'_s . E_s = \frac{(c_b . d')}{c} . \varepsilon'_{bc} . E_s$$

$$= \frac{26,91 - 6}{26,91} . 0,003.2,1.10^6$$

$$= 4896,53 \text{ kg/cm}^2 > f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$$

Dengan demikian dipakai, $f'_s = 4000 \text{ kg/cm}^2$

$$\begin{aligned} P_{nb} &= 0,85.f'_c.a_b.b + A'_s.f_y - A_s.f_y \\ &= 0,85.0,29.22,87.30 + 16,08.4 - 16,08.4 \\ &= 169,1236 \text{ ton} > P_n = 135,7143 \text{ ton} \end{aligned}$$

Keruntuhan yang menentukan adalah lelehnya tulangan tarik.

Mencari kapasitas gaya aksial $\bar{P}_n$

$$p = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{16,08}{30 \cdot 44} = 0,0122$$

$$e = \frac{M_{ox}}{P_n} = \frac{39,2747 \cdot 10^5}{135,7143 \cdot 10^3} = 28,94 \text{ cm}$$

$$e' = e + \left[\frac{d-d'}{2} \right] = 28,94 + \left[\frac{44-6}{2} \right] = 47,94 \text{ cm}$$

$$\left(1 - \frac{e'}{d} \right) = \left(1 - \frac{47,94}{44} \right) = -0,0895$$

$$\left(1 - \frac{d'}{d} \right) = \left(1 - \frac{6}{44} \right) = 0,8636$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 f'_c} = \frac{4000}{0,85 \cdot 290} = 16,227$$

Dari persamaan Whitney diperoleh:

$$\bar{P}_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot d \left[\left(1 - \frac{d'}{d} \right) + \sqrt{\left[\left(1 - \frac{e'}{d} \right)^2 + 2 p m \left(1 - \frac{d'}{d} \right) \right]} \right]$$

Dengan mengabaikan adanya luas beton yang tergantikan oleh tulangan baja, maka:

$$\begin{aligned} \bar{P}_n &= 0,85 \cdot 0,29 \cdot 30 \cdot 44 \left[(-0,0895) \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{\left[(-0,0895)^2 + (2 \cdot 0,0122 \cdot 16,227 \cdot 0,8636)^2 \right]} \right] \end{aligned}$$

$$= 163,3602 \text{ ton} > P_n \text{ perlu} = 135,7143 \text{ ton}$$



Mencari ϕ dengan menggunakan $\bar{P}_n$ sebagai coba-coba pertama cek ϕ yang diasumsikan = 0,70. Menurut SK-SNI '91 maka:

$$\begin{aligned}\phi &= 0,8 - (0,8 - 0,65) \frac{\bar{P}_n}{0,1 f'_c \cdot A_g} \\ &= 0,8 - \frac{0,15 \cdot 163,3602}{0,10 \cdot 0,29 \cdot 30 \cdot 50} = 0,236 < 0,70\end{aligned}$$

diasumsikan bahwa $\phi = 0,70$.

Kontrol keserasian regangan

$$\begin{aligned}a &= \frac{\bar{P}_n}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{163,3602}{0,85 \cdot 0,29 \cdot 30} = 22,09 \text{ cm} \\ c &= \frac{a}{\beta} = \frac{22,09}{0,85} = 25,98 \text{ cm} \\ f'_s &= \left(\frac{c - d'}{c} \right) \cdot e'_c \cdot E_s = \left(\frac{25,98 - 6}{25,98} \right) \cdot 6300 \\ &= 4845,03 \text{ kg/cm}^2 > f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Dengan demikian A'_s telah leleh sehingga persyaratan keserasian yang digunakan dalam menghitung P_n telah terpenuhi.

Menghitung tahanan nominal aktual M_{oxn} untuk lentur uniaksial ekuivalen terhadap sumbu x bila $M_{oy} = 0$, yang diperlukan adalah $P_n = 135,7145$ ton. Dengan menganggap

bahwa tulangan tekan telah leleh, maka $f'_s = 4000 \text{ kg/cm}^2$
 dan $A'_s.f'_s - A_s.f_y = 0$. Jadi:

$$P_n = 0,85.f'_c.a.b$$

atau

$$a = \frac{135,7145}{0,85.f'_c.30} = 18,35 \text{ cm}$$

$$c = \frac{a}{\beta} = \frac{18,35}{0,85} = 21,59 \text{ cm}$$

$$f'_c = \left(\frac{21,59-6}{21,59} \right) \cdot 6300$$

$$= 4549,19 \text{ kg/cm}^2 > f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$$

A_s pada sisi yang tertarik telah leleh karena $a = 18,35$
 $\text{cm} < a_b = 22,87 \text{ cm}$, pada saat itu sumbu netralnya
 lebih kecil dari pada kondisi *balanced*.

$$M_{oxn} = P_n.e = 0,85.f'_c.a.b.\left(\bar{y} - \frac{a}{2}\right) + A'_s.f_y(\bar{y}-d') + A_s.f_y.(d-\bar{y})$$

atau

$$M_{oxn} = 0,85.290.18,35.30 \left[25 - \frac{18,35}{2} \right]$$

$$+ 16,08.4000 \left[25-6 + 16,08.4000(44-25) \right]$$

$$= 4\,591\,585 \text{ kgcm}$$

$$= 45,9158 \text{ tm} > M_{ox} = 39,2747 \text{ tm}$$

(memenuhi)

Langkah keempat

Menghitung momen tahanan nominal aktual M_{oyn} untuk momen lentur uniaksial ekuivalen terhadap sumbu y bila $M_{ox} = 0$.

Dalam kondisi ini:

$$b = 50 \text{ cm} \quad h = 30 \text{ cm} \quad d = 30 - 6 = 24 \text{ cm}$$

$$A_s = A'_s = 16,08 \text{ cm}^2$$

Dengan cara coba-coba dan penyesuaian, nilai a perlu ditentukan sedemikian rupa sehingga $\bar{P}_n$ yang dihitung mendekati P_n perlu.

$$\begin{aligned} \frac{C_b}{(d - C_b)} &= \frac{\epsilon'_c b}{\epsilon_s} \\ \rightarrow C_b &= \frac{63.24}{(63 + 40)} = 14,57 \text{ cm} \\ a_b &= 0,85.14,57 = 12,47 \text{ cm} \\ a &= \frac{P_n}{0,85.f'_c.b} \\ &= \frac{135,7143}{0,85.0,29.50} = 11,01 \text{ cm} \end{aligned}$$

Dicoba,

$$a = 11,5 \text{ cm} < a_b = 12,47 \text{ cm}$$

$$c = \frac{a}{0,85} = \frac{11,5}{0,85} = 13,5 \text{ cm}$$

$$f'_s = \epsilon'_s.E_s = \frac{(C_b - d')}{C_b} . \epsilon'_s.E_s$$

$$f'_s = \left[\frac{13,5 - 6}{13,5} \right] . 6300 = 3500 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_s = \left(\frac{d-c}{c} \right) \cdot \varepsilon'_s \cdot E_s$$

$$= \left(\frac{24-13,5}{13,5} \right) \cdot 6300 = 4900 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b + A'_s \cdot f'_s - A_s \cdot f_s$$

$$= 0,85 \cdot 0,29 \cdot 11,5 \cdot 50 + 16,08 \cdot 3,5 - 16,08 \cdot 4,9$$

$$= 119,225 \text{ ton} < P_n \text{ perlu} = 135,714 \text{ ton}$$

Dicoba,

$$a = 12 \text{ cm} \longrightarrow c = \frac{12}{0,85} = 14,1 \text{ cm}$$

$$f'_s = \left(\frac{14,1-6}{14,1} \right) \cdot 6300 = 3619,15 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_s = \left(\frac{24-14,1}{14,1} \right) \cdot 6300 = 4423,40 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_n = 0,85 \cdot 0,29 \cdot 12 \cdot 50 + 16,08 \cdot 3619,15$$

$$- 16,08 \cdot 4423,4$$

$$= 134,9676 \text{ ton} < P_n \text{ perlu} = 135,7143 \text{ ton}$$

Dicoba,

$$a = 12,1 \text{ cm} \longrightarrow c = 14,2 \text{ cm}$$

$$f'_s = \left(\frac{14,2-6}{14,2} \right) \cdot 6300 = 3638 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_s = \left(\frac{24-14,2}{14,2} \right) \cdot 6300 = 4347,8 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_n = 12,32 \cdot 12,1 + 16,08 \cdot 3,638 - 16,08 \cdot 4,348$$

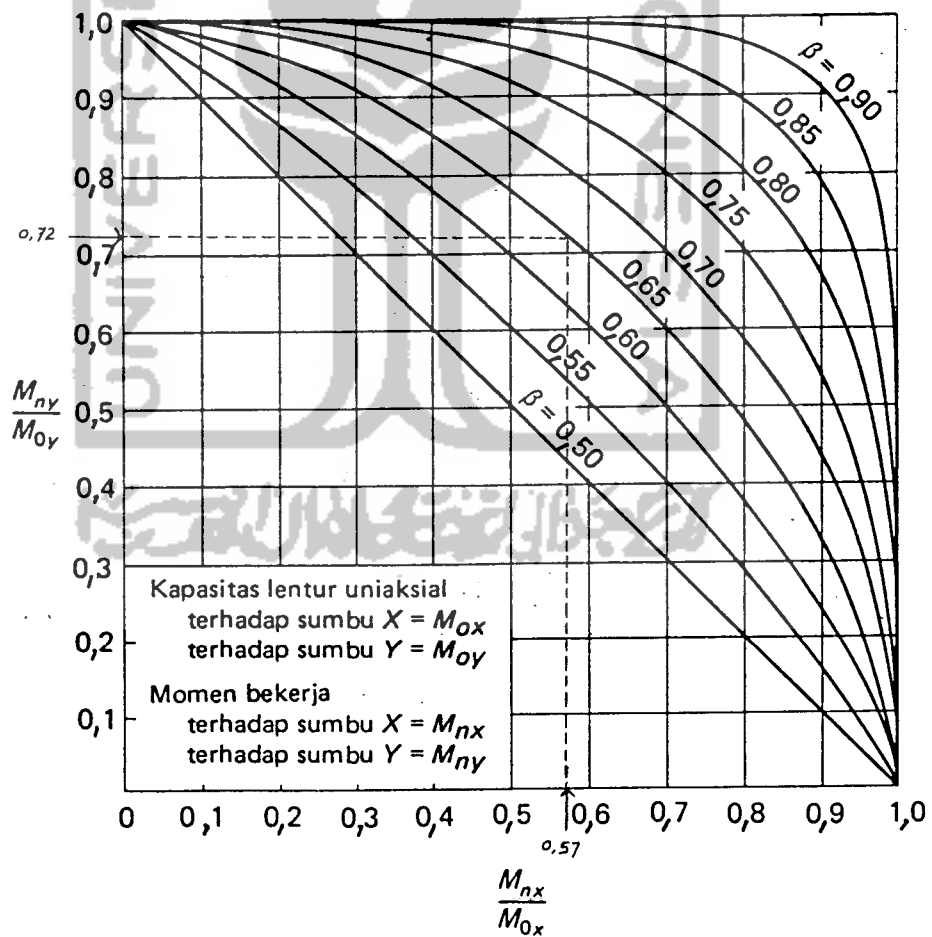
$$= 137,7157 \text{ ton} \approx P_n \text{ perlu} = 135,7143 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned}
 M_{oyn} &= 0,85 \cdot 290 \cdot 12,1 \cdot 50 \cdot \left(\frac{30}{2} - \frac{12,1}{2} \right) \\
 &\quad + 16,08 \cdot 3638 \cdot (15-6) + 16,08 \cdot 4348 \cdot (24-15) \\
 &= 2\,134\,458,59 \text{ kg cm} = 21,3446 \text{ tm}
 \end{aligned}$$

Langkah kelima

Mencari M_{ny} dengan memasukkan M_{ox}/M_{oxn} dan faktor β coba-coba kedalam gambar 2.16. Coba-coba pertama $\beta = 0,65$. Dari langkah 3, $M_{oxn} = 45,9158$

$$\frac{M_{nx}}{M_{oxn}} = \frac{26,4286}{45,9158} = 0,57$$



Gambar 3.4. Hubungan interaksi untuk lentur biaksial

Masukkan harga ini pada garis lentur $\beta = 0,65$, maka dari gambar 3.4 akan diperoleh:

$$\frac{M_{ny}}{M_{oxn}} \approx 0,72$$

Dalam langkah 4, diperoleh $M_{oxn} = 21,3446 \text{ tm}$, maka

$$\frac{M_{ny}}{21,3446} = 0,72$$

$$\rightarrow M_{ny} = 0,72 \cdot 21,3446 = 15,3681 \text{ tm}$$

$$M_{ny \text{ perlu}} = 14,2857 \text{ tm} < \bar{M}_{ny} = 15,3681 \text{ tm}$$

Jadi asumsi penampang kolom pada langkah pertama aman digunakan.

Contoh 3.4

Suatu kolom bujur sangkar menerima beban aksial $P_u = 50 \text{ ton}$ dan beban aksial $M_{ux} = M_{uy} = 7,6 \text{ tm}$. Disain kolom tersebut jika mutu beton dan baja sama dengan contoh 3.3, yaitu $f'_c = 29 \text{ Mpa}$.

Penyelesaian:

Langkah pertama:

Menghitung momen lentur uniaksial ekuivalen dengan menganggap banyaknya tulangan sama pada semua sisi, dan menganggap $\theta = 0,70$ (untuk kolom bersengkang).

$$P_n \text{ perlu} = \frac{P_u}{\phi} = \frac{50}{0,70} = 71,428 \text{ ton}$$

$$M_{nx} \text{ perlu} = \frac{M_{ux}}{\phi} = \frac{7,6}{0,70} = 10,857 \text{ tm}$$

$$M_{ny} \text{ perlu} = \frac{M_{uy}}{\phi} = M_{nx} \text{ perlu} = 11,143 \text{ tm}$$

Melakukan analisa momen ekuivalen dan eksentrisitas ekuivalen terhadap salah satu sumbu yang menentukan, karena dimensi dan momen simetris, maka cukup ditinjau terhadap salah satu sumbu, misal diambil terhadap sumbu x yaitu $M_{nx} = 11,143 \text{ tm}$.

$$M_{nx}/M_{ny} = 11,143/11,143 = 1$$

Kolom simetris, jika diasumsikan $b = 30 \text{ cm}$ dan $h = 30 \text{ cm}$, maka $h/b = 1$. Faktor interaksi untuk perencanaan awal diasumsikan $\beta = 0,65$. Dari persamaan maka (2.4) maka:

$$M_{ox} = 10,857 + 10,857 \cdot 1 \cdot \left(\frac{1-0,65}{0,65} \right) = 16,703 \text{ tm}$$

Langkah kedua:

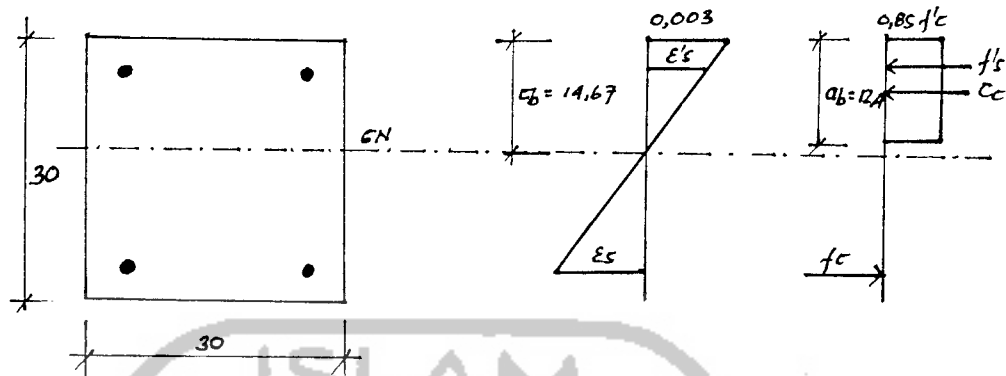
Kontrol kapasitas penampang dari P_n perlu yang telah diasumsikan, $b = 30 \text{ cm}$, $h = 30 \text{ cm}$, $d' = d_1 = 6 \text{ cm}$.

$$d = h - d' = 30 - 6 = 24 \text{ cm}$$

$$A_s = A'_s = (0,25 \cdot \pi \cdot 3,2^2) \cdot 2 = 16,08 \text{ cm}^2$$

$$\rho = A_s / (b \cdot d) = 16,08 / (30 \cdot 24) = 0,0223$$

Analisa kondisi balanced;



Gambar 3.5. Penampang kolom dan diagram tegangan-regangan

$$c_b : (d - c_b) = \epsilon'_c c_b : \epsilon_s$$

$$c_b = \frac{63.24}{(40+63)} = 14,67 \text{ cm}$$

$$a_b = 0,85.14,67 = 12,47 \text{ cm}$$

$$f'_s = \epsilon'_c . E_s = \left(\frac{c_b - d'}{c_b} \right) . 6300 = \left(\frac{14,67 - 6}{14,67} \right) . 6300$$

$$= 2864,417 \text{ kg/cm}^2 > f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$$

Dengan demikian baja desak belum luluh. Dari diagram cirian gambar 2.9, bisa ditentukan bahwa desak menentukan. Dari persamaan Whitney untuk patah desak adalah;

$$\bar{P}_n = \frac{A'_s . f_y}{\left(\frac{e}{d - d'} + 0,5 \right)} + \frac{b . h . f'_c}{\left(\frac{3 . h . e}{d^2} + 1,10 \right)}$$

$$e = \frac{M_{ox}}{P_n} = \frac{16,073.10^5}{71,428.10^3} = 22,5$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_n &= \frac{16,08.4}{\left[\frac{22,5}{24-6} + 0,5 \right]} + \frac{30.30.0,29}{\left[\frac{330.22,5}{24^2} + 1,18 \right]} \\ &= 92,3379 \text{ ton} > P_n \text{ perlu} = 71,428 \text{ ton} \end{aligned}$$

Mencari ϕ dengan menggunakan $\bar{P}_n$ sebagai coba-coba pertama, cek ϕ yang diasumsikan 0,70. Menurut ACI 318-89 maka,

$$\phi = 0,9 - \frac{0,2.92,3379}{0,1.0,29.(30.30)} = 0,192 < 0,70$$

Digunakan $\phi = 0,70$

Kontrol keserasian tegangan

$$a = \frac{\bar{P}_n}{0,85.f'_c.b} = \frac{92,3379}{0,85.0,29.30} = 12,48 \text{ cm}$$

$$c = \frac{12,48}{0,85} = 14,69 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} f'_c &= \left[\frac{c-d'}{c} \right] . 6300 = \left[\frac{14,69-6}{14,69} \right] . 6300 \\ &= 3726,82 \text{ kg/cm}^2 < f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_s &= \left[\frac{d-c}{d} \right] . 6300 = \left[\frac{24-14,69}{24} \right] . 6300 \\ &= 2443,87 \text{ kg/cm}^2 < f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Langkah ketiga:

Menghitung tahanan nominal aktual M_{oxn} untuk lentur

uniaksial ekuivalen terhadap sumbu x bila $M_{oy} = 0$. Yang diperlukan adalah $\bar{P}_n$

$$\begin{aligned}
 M_{oxn} &= P.e = 0,85.f'c.a.b.\left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}\right) \\
 &\quad + A's.f's.\left(\frac{h}{2} - d\right) + A_s.f_s.\left(d - \frac{h}{2}\right) \\
 &= 0,85.0,29.12,48.30.\left(15 - \frac{12,48}{2}\right) \\
 &\quad + 16,08.3726(15-6) + 16,08.2,44(24-15) \\
 &= 808,45 + 539,226 + 353,55 \\
 &= 1701,226 \text{ ton cm} \\
 &= 17,01226 \text{ tm} > M_{ox} = 16,703 \text{ tm} \\
 &\quad \text{(memenuhi)}
 \end{aligned}$$

Langkah keempat:

Mencari M_{ny} dengan memasukan M_{ox}/M_{oxn} dan faktor β coba-coba kedalam gambar 2.16. Coba-coba pertama $\beta = 0,65$. Dari langkah 3, $M_{oxn} = 17,0126 \text{ tm}$

$$\frac{M_{nx}}{M_{oxn}} = \frac{10,857}{17,0126} = 0,64$$

Masukan harga ini pada garis lentur $\beta = 0,65$, maka dari gambar 3.6 akan diperoleh:

$$\frac{M_{ny}}{M_{oy}} \approx 0,66$$

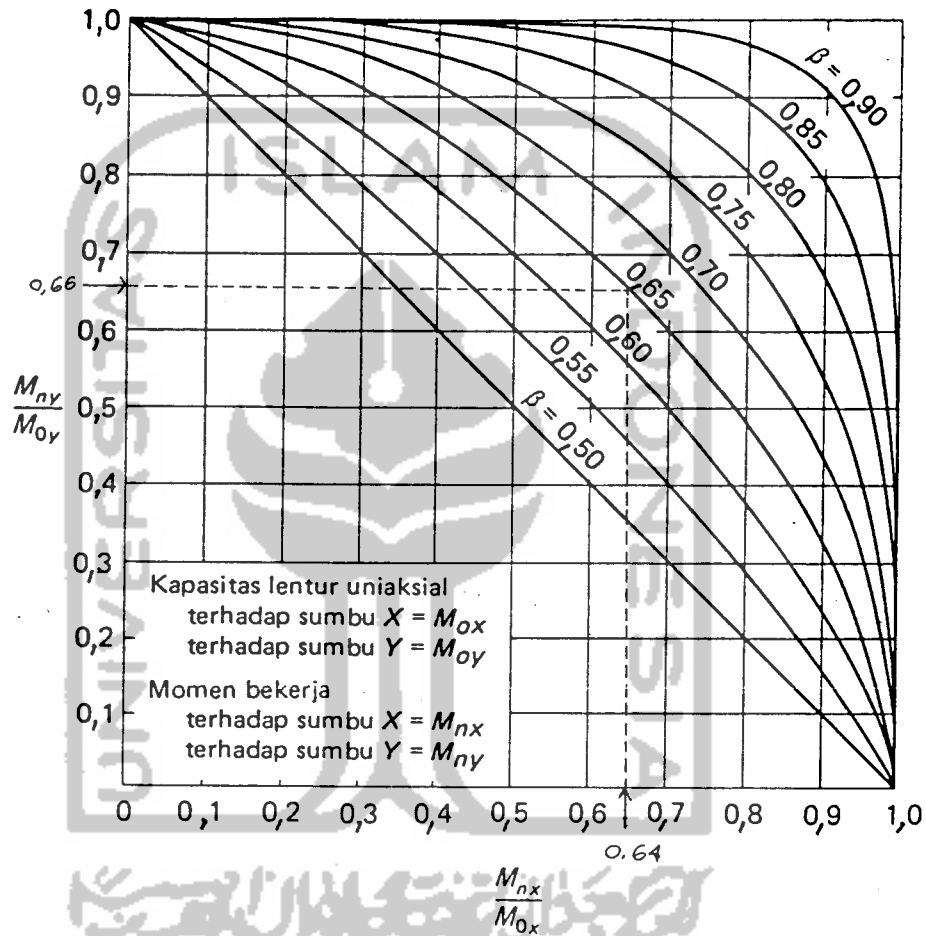
Diketahui bahwa $M_{nx} = M_{ny}$, maka $M_{oxn} = M_{oy}$

$$\frac{M_{ny}}{M_{oy}} = 0,66$$

$$M_{ny} = 0,66.17,0126$$

$$= 11,228 \text{ tm} > M_{ny \text{ perlu}} = 10,857 \text{ tm}$$

Jadi asumsi penampang kolom pada langkah pertama aman untuk digunakan.



Gambar 3.6. Hubungan interaksi untuk lentur biaksial

3.2. Disain dengan metoda permukaan runtuh tipe S2

Langkah-langkah berikut ini dapat dipakai sebagai petunjuk dalam desain kolom yang mengalami lentur pada arah x dan y . Prosedur ini beranggapan bahwa luas tulangan sama pada semua sisi.

- (1). Tentukan gaya-gaya yang bekerja pada kolom.
- (2). Tentukan mutu beton, mutu baja dan asumsikan dimensi kolom serta penulangannya, dengan ketentuan p sekitar 0,01-0,03.
- (3). Cari harga-harga P_o , P_n , P_b , M_b dan e_b , dari harga-harga ini buat diagram interaksi perbalikan $P-e$, dari titik pertemuan antara P dan e dihubungkan dengan garis lengkung.
- (4). Cari harga-harga e_x dan e_y yang diperoleh dari nilai perbandingan antara momen dengan beban terpusat, dengan memasukkan nilai e_x dan e_y kemudian ditarik garis tegak lurus hingga memotong garis interaksi $P-e$. Titik perpotongan tersebut kemudian ditarik garis horisontal, maka akan diperoleh nilai P_x dan P_y .
- (5). Dengan memasukkan nilai P_x dan P_y kedalam persamaan (2.16), maka akan diperoleh nilai P_n , nilai ini harus lebih dari atau mendekati P_n perlu, jika tidak perlu trial dimensi kolom atau tulangan.

Contoh 3.5

Suatu kolom dengan ketentuan seperti pada contoh 3.3. Hitung ulang dimensi kolom tersebut dengan ketentuan-ketentuan yang sama dengan metoda permukaan runtuh tipe S_2 .

Penyelesaian:

Dalam contoh 3.3 diketahui; $P_u = 95$ ton, $M_{ux} = 18,5$



ton, $M_{uy} = 10 \text{ ton}$

Dimensi kolom 30/50, $A_s = A'_s = 16,08 \text{ cm}^2$

*) . Tinjauan arah sumbu y

$$d = h - d' = 50 - 6 = 44 \text{ cm}$$

$$A_g = b \cdot h = 30 \cdot 50 = 1500 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} = A'_s + A_s = 16,08 + 16,08 = 32,16 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} P_o &= 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st} \\ &= 0,85 \cdot 0,29 (1500 - 32,16) + 4 \cdot 32,16 \\ &= 490,462 \text{ ton} \end{aligned}$$

*) . Tinjauan kondisi *balanced*

$$\begin{aligned} \frac{c_b}{(d - c_b)} &= \frac{\epsilon'_{bc}}{\epsilon_s} \\ \text{atau} \quad \frac{c_b}{(44 - c_b)} &= \frac{0,003}{4000/2,1 \cdot 10^6} \\ 40 \cdot c_b &= 63 \cdot 44 - 63 \cdot c_b \\ c_b &= \frac{63 \cdot 44}{(40 + 63)} = 26,91 \text{ cm} \\ a_b = \beta_1 \cdot c_b &= 0,85 \cdot 26,91 = 22,87 \text{ cm} \end{aligned}$$

*) . Tinjauan tegangan baja

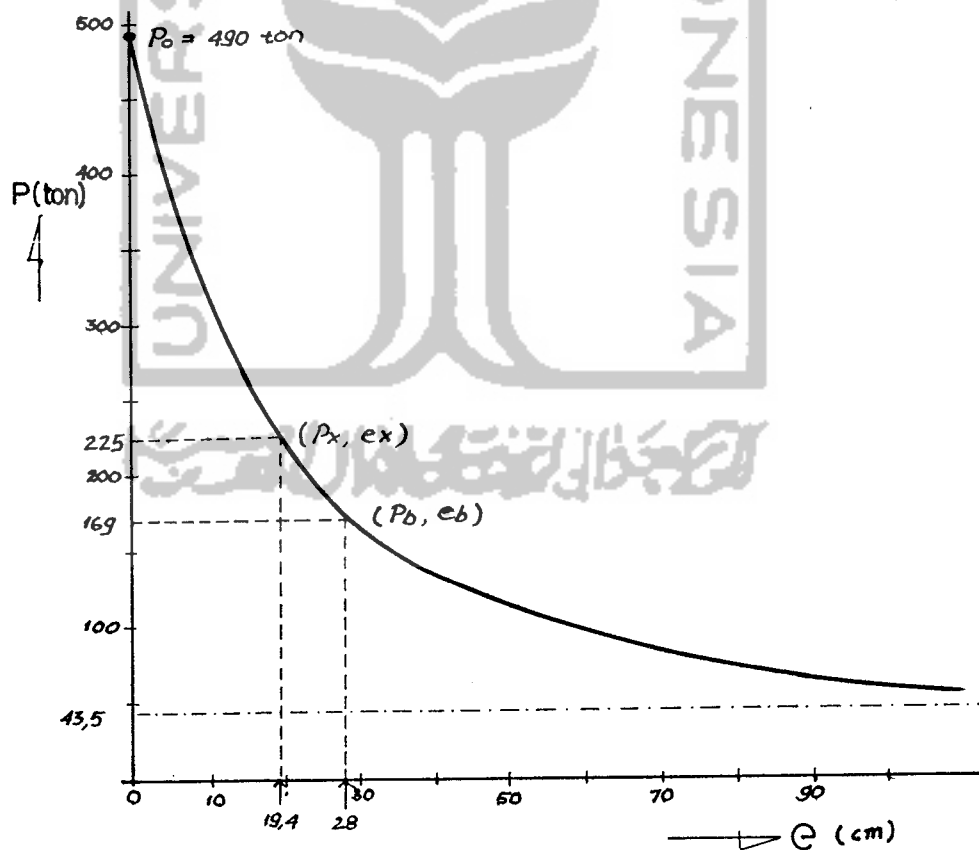
$$\begin{aligned} f'_s &= \epsilon'_s \cdot E_s = \frac{(c_b - d')}{c_b} \cdot \epsilon'_{cb} \cdot E_s \\ &= \left(\frac{26,91 - 6}{26,91} \right) \cdot 6300 \\ &= 4895 \text{ kg/cm}^2 > f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Dengan demikian, $f'_s = f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$

*) . Tinjauan kapasitas gaya

$$\begin{aligned} P_{bx} &= C_c + C_s - T_s \\ &= 0,85.f'_c.ab.b + A'_s.f_y - A_s.f_y \\ &= 0,85.0,29.22,87.30 + 16,08.4 - 16,08.4 \\ &= 169,124 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{bx} &= C_c \cdot \left[\frac{h}{2} - \frac{ab}{2} \right] + (C_s + T_s) \left[\frac{h}{2} - d' \right] \\ &= 169,12 \left[25 - \frac{22,87}{2} \right] + (34,32 + 64,32) (25 - 6) \\ &= 4738,322 \text{ ton cm} = 47,3832 \text{ tm} \end{aligned}$$



Gambar 3.7. Diagram interaksi P-ex untuk lentur uniaksial

$$e_{bx} = \frac{M_{bx}}{P_{bx}} = \frac{47,3832 \cdot 10^5}{169,124 \cdot 10^3} = 28 \text{ cm}$$

$$0,1 \cdot f'_c \cdot A_g = 0,1 \cdot 0,29 \cdot 1500 = 43,5$$

$$e_x = \frac{M_{ux}}{P_u} = \frac{18,5 \cdot 10^5}{95 \cdot 10^3} = 19,4 \text{ cm}$$

Dari diagram interaksi P-ex dalam gambar 3.7 diperoleh, $P_x = 225 \text{ ton}$

*) Tinjauan arah sumbu y

$$b = 50 \text{ cm} \quad h = 30 \text{ cm} \quad d' = 6 \text{ cm}$$

$$d = h - d' = 30 - 6 = 24 \text{ cm}$$

- Tinjauan kondisi *balanced*

$$\frac{c_b}{(d - c_b)} = \frac{\epsilon'_c c_b}{\epsilon_s}$$

$$\longrightarrow c_b = \frac{63 \cdot 24}{63 + 40} = 14,57 \text{ cm}$$

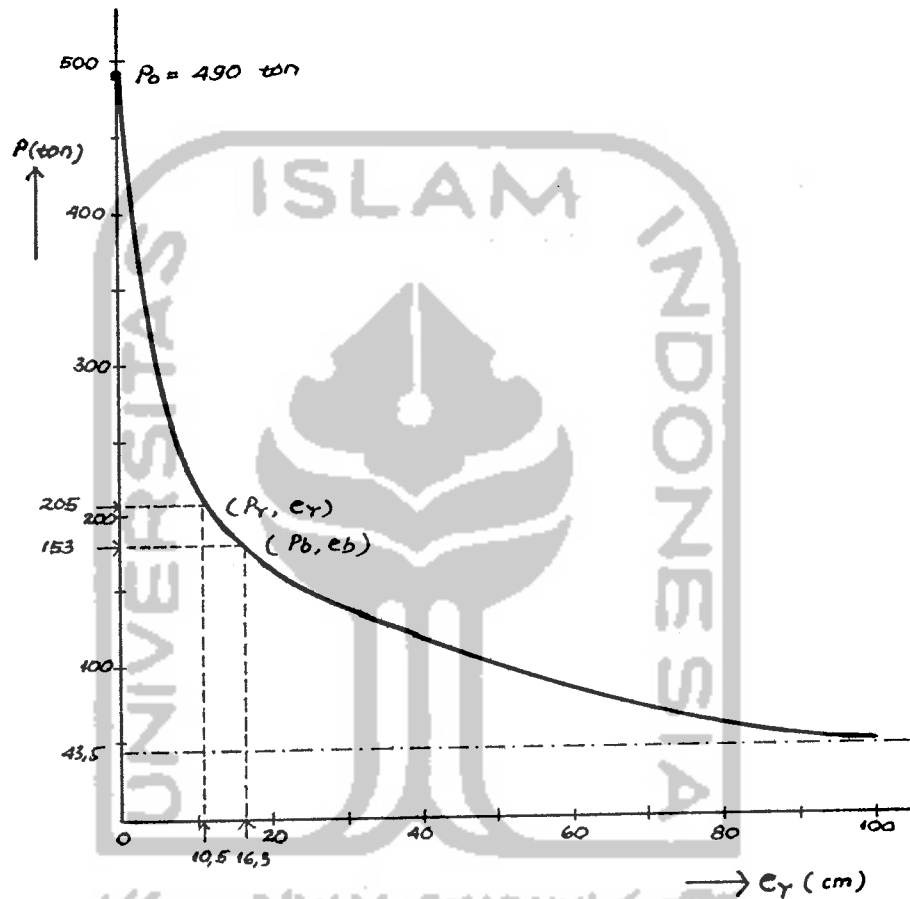
$$a_b = 0,85 \cdot 14,57 = 12,47 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} P_{by} &= 0,85 \cdot f'_c \cdot a_b \cdot b + A'_s \cdot f_y - A_s \cdot f_y \\ &= 0,85 \cdot 0,29 \cdot 12,47 \cdot 50 + 16,08 \cdot 4 - 16,08 \cdot 4 \\ &= 153,692 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{by} &= 0,85 \cdot 0,29 \cdot 12,47 \cdot 50 \left[\frac{30}{2} - \frac{12,47}{2} \right] \\ &\quad + 2 \cdot 16,08 \cdot 4 \left[\frac{30}{2} - 6 \right] \\ &= 2504,876 \text{ ton cm} = 25,0487 \text{ tm} \end{aligned}$$

$$e_{by} = \frac{M_{by}}{P_{by}} = \frac{25,0487 \cdot 10^5}{153,692 \cdot 10^3} = 16,29 \text{ cm}$$

$$e_y = \frac{M_{uy}}{P_u} = \frac{10 \cdot 10^5}{95 \cdot 10^3} = 10,52 \text{ cm}$$



Gambar 3.8. Diagram interaksi $P-e_y$ untuk lenturuniaksial

Dari diagram interaksi $P-e_x$ dalam gambar 3.8 diperoleh, $P_y = 205$ ton

Dari persamaan (2.16) diperoleh,

$$\frac{1}{P_n} \approx \frac{1}{P_i} = \frac{1}{P_x} + \frac{1}{P_y} - \frac{1}{P_0}$$

$$\frac{1000}{P_n} = \frac{1000}{225} + \frac{1}{205} - \frac{1}{490}$$

$$\frac{1000}{P_n} = 7,28 \rightarrow P_n = 137,36 \text{ ton} > P_n \text{ perlu}$$

Contoh 3.6

Suatu kolom bujur sangkar seperti pada contoh 3.5. Hitung ulang kolom kolom tersebut dengan metoda permukaan runtuh tipe S2.

Penyelesaian:

Dalam contoh 3.4 diketahui;

$$P_u = 50 \text{ ton} \quad P_n \text{ perlu} = 71,428 \text{ ton}$$

$$M_{ux} = M_{uy} = 7,6 \text{ tm} \quad M_{ux} \text{ perlu} = 10,857 \text{ tm}$$

Dimensi kolom = 30/30, $A'_s = A_s = 16,08 \text{ cm}^2$. Karena $M_{ux} = M_{uy}$ dan kolom bujur sangkar, maka cukup ditinjau satu arah sumbu saja. Disini diambil tinjauan arah x,

$$d = h - d' = 30 - 6 = 24 \text{ cm}$$

$$A_g = 30 \cdot 30 = 900 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} = 2 \cdot 16,08 = 32,16 \text{ cm}^2$$

$$P_o = 0,85 \cdot 0,29 (900 - 32,16) + 4 \cdot 32,16 = 342,56 \text{ ton}$$

Tinjauan kondisi *balanced*

$$c_b = \frac{63 \cdot 24}{(40 + 63)} = 14,67 \text{ cm}$$

$$a_b = 0,85 \cdot 14,67 = 12,47 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned}
 P_b &= C_c + C_s - T_s \\
 &= 0,85 \cdot 0,29 \cdot 12,47 \cdot 30 + 16,08 \cdot 4 - 16,08 \cdot 4 \\
 &= 92,215 + 64,32 - 64,32 \\
 &= 92,215 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_b &= C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a_b}{2} \right) + (C_s + T_s) \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right) \\
 &= 92,215 \left(\frac{30}{2} - \frac{12,47}{2} \right) + (64,32 + 64,32) \cdot \left(\frac{30}{2} - 6 \right) \\
 &= 1966,024 \text{ ton cm} = 19,66024 \text{ tm}
 \end{aligned}$$

$$e_b = \frac{M_b}{P_b} = \frac{19,66024 \cdot 10^5}{92,215 \cdot 10^3} = 21,32 \text{ cm}$$

$$0,1 \cdot f'_{c,Ag} = 0,1 \cdot 2,9 \cdot 900 = 26,1 \text{ ton}$$

$$e_y = \frac{M_{ux}}{P_u} = \frac{10,857 \cdot 10^5}{71,428 \cdot 10^3} = 15,19 \text{ cm}$$

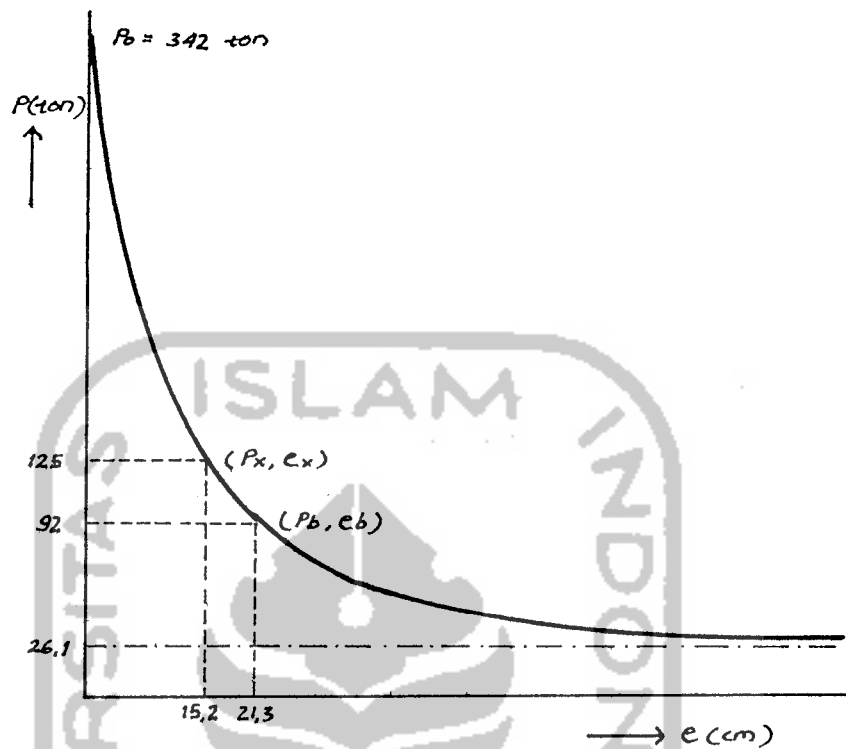
$$e_x = \frac{M_{uy}}{P_u} = \frac{10,857 \cdot 10^5}{71,428 \cdot 10^3} = 15,19 \text{ cm}$$

Dari diagram interaksi P-e dari gambar 3.9 diperoleh,

$$P_x = 125 \text{ ton} \quad P_y = 125 \text{ ton}$$

Dari persamaan (2.16) diperoleh

$$\frac{1}{P_n} \approx \frac{1}{P_i} = \frac{1}{P_x} + \frac{1}{P_y} - \frac{1}{P_o}$$



Gambar 3.9. Diagram interaksi P-ex untuk lentur uniaksial

$$\frac{1000}{P_n} = \frac{1000}{125} + \frac{1000}{125} - \frac{1000}{342}$$

$$\frac{1000}{P_n} = 13,076$$

$$P_n = \frac{1000}{13,076} = 76,475 \text{ tm} > P_n \text{ perlu} = 71,428 \text{ tm}$$

Jadi kolom bujur sangkar yang telah diasumsikan memenuhi.

Keterangan:

Persamaan yang tidak dijelaskan dalam analisa ini diambil dari referensi (1). Bab 9.