

DIAGRAM INTERAKSI PERANCANGAN KOLOM DENGAN TULANGAN PADA EMPAT SISI BERDASARKAN SNI 2847:2013 DAN ACI 318M-11

Yoyong Arfiadi

Program Studi Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta
Jln Babarsari 43 Yogyakarta
Email: yoyong@mail.uaaj.ac.id

Abstract: This paper discusses column design according to SNI 2847: 2013 and ACI 318M-11. For practical purpose, charts are developed as a design tool. The columns to be considered are rectangular columns with bars at four faces, where the area of reinforcements in each face is the same. In the derivation of equations and charts, reinforcements are assumed as a thin layer of steel, where the thickness of the layer is adjusted so that it has the same area as the area of reinforcement. Forces and moments equilibriums are then developed for various possible stress and strain diagrams. As the approximation, displaced concrete is not considered in this paper. Charts for various concrete compressive strength and steel yield stress are developed for practical applications. In this case, non-dimensional interaction diagrams of columns are presented, so that the diagrams are independent of the column dimension. In each diagram several reinforcement ratios are provided. The interaction diagram are created for required, nominal, and probable strength of columns. Therefore, the diagrams can be used for designing columns of ordinary, intermediate, and special moment frames as stipulated in the building codes. At the end of the paper, the use of interaction diagram are presented as a tool for designing reinforced concrete columns.

Keywords: column design, SNI 2847:2013, ACI 318M-11, interaction diagram, special moment frames, concrete codes 2013

Abstrak: Dalam tulisan ini dibahas perancangan kolom yang disesuaikan dengan SNI 2847:2013 dan ACI 318M-11. Untuk keperluan praktis, dikembangkan diagram-diagram sebagai alat bantu perancangan. Kolom yang ditinjau adalah kolom empat persegi panjang dengan tulangan pada keempat sisinya, di mana masing-masing sisi mempunyai luas tulangan yang sama. Dalam penurunan rumus-rumus dan grafik-grafik, tulangan dianggap sebagai pias baja dengan tebal tertentu yang sesuai dengan luas tulangan masing-masing sisi. Persamaan-persamaan keseimbangan gaya dan momen kemudian diturunkan untuk berbagai diagram regangan dan tegangan yang mungkin terjadi. Sebagai pendekatan, dalam penurunan persamaan, luas tulangan yang ditempati oleh baja desak tidak ditinjau. Diagram-diagram untuk berbagai mutu beton dan baja selanjutnya dibuat untuk memudahkan perancangan kolom. Diagram interaksi dibuat tak-berdimensi, sehingga dapat digunakan untuk berbagai ukuran kolom. Dalam setiap diagram, disediakan beberapa rasio tulangan yang dapat digunakan untuk perencanaan. Diagram interaksi dibuat untuk kuat perlu, kuat nominal dan kapasitas maksimum. Dengan demikian diagram interaksi yang dikembangkan dapat digunakan untuk perencanaan kolom-kolom struktur sebagai kolom pada struktur rangka momen biasa, rangka momen menengah, dan rangka momen khusus menurut peraturan gempa yang berlaku. Pada bagian akhir disajikan beberapa aplikasi penggunaan diagram interaksi yang dibuat sebagai alat bantu perancangan.

Kata kunci: perencanaan kolom, SNI 2847:2013, ACI 318M-11, diagram interaksi, rangka momen khusus, SNI Beton 2013

PENDAHULUAN

Perencanaan kolom merupakan suatu hal yang penting, mengingat kolom merupakan elemen struktur utama yang mendukung beban-beban yang bekerja pada suatu gedung. Berbeda

dengan balok, gaya-gaya yang bekerja pada kolom merupakan kombinasi momen lentur dan gaya aksial. Dengan adanya gaya aksial, penyelesaian persamaan keseimbangan menjadi lebih sulit untuk diselesaikan. Seperti diketahui pada balok dengan tulangan rangkap pun masih

sulit untuk menyelesaikan persamaan secara langsung. Untuk memudahkan perencanaan kolom, umumnya digunakan diagram interaksi momen dan gaya aksial untuk rasio tulangan tertentu.

Walaupun saat ini banyak perangkat lunak yang tersedia, diagram-diagram yang dikembangkan dalam tulisan ini dapat dikatakan sebagai cara praktis untuk perencanaan kolom. Diagram yang dikembangkan, didasarkan pada lentur satu arah. Untuk tinjauan lentur dua arah dapat mengacu misalnya pada Ludovico dkk. (2010). Tinjauan yang cukup lengkap tentang perencanaan kolom dapat dilihat dalam Fattah (2012).

Penurunan persamaan yang digunakan dalam tulisan ini mengikuti Wangsadinata (1977), yang terkait dengan peraturan beton Indonesia tahun 1971; dan mengikuti Everard dan Cohen (1964), yang sesuai dengan ACI yang berlaku saat itu. Arfiadi (2004) mengembangkan grafik yang sesuai dengan SNI 2847-2002. Selain itu Wight dan MacGregor (2012) juga menyajikan grafik-grafik yang sejenis. Diagram interaksi juga dikembangkan oleh Rocca dkk. (2009) tetapi untuk kolom dengan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) sebagai pengekang.

Dalam tulisan ini, selain persamaan-persamaan dalam keadaan nominal, persamaan dalam keadaan ultimit dengan memperhitungkan faktor reduksi kekuatan juga disajikan. Faktor reduksi kekuatan disesuaikan dengan SNI 2847:2013 (Badan Standardisasi Nasional, 2013) dan ACI 318M-11 (ACI, 2011), yang pada awalnya diusulkan oleh Mast (1992). Berdasarkan konsep ini, faktor reduksi kekuatan ditentukan berdasarkan apakah suatu tampang masuk ke dalam kondisi terkendali tarik, transisi, atau terkendali tekan. Untuk struktur dengan regangan pada serat tulangan tarik terluar mencapai nilai 0,005 maka faktor reduksi kekuatan diambil sebesar 0,9. Jika struktur ada dalam kondisi terkendali tekan, yaitu regangan pada serat tulangan tarik terluar lebih kecil atau sama dengan regangan luluh, maka faktor reduksi kekuatan diambil sebesar 0,65. Untuk nilai regangan pada serat tulangan tarik terluar yang terletak di antaranya, nilai faktor reduksi kekuatan dapat diinterpolasi.

METODE DAN ANGGAHAN

Untuk pembuatan diagram interaksi, dilakukan pendekatan di mana tulangan yang tersebar pada keempat sisi kolom diekivalenkan dengan plat baja tipis, di mana pada setiap sisi luas plat baja dibuat sama dengan luas tulangan yang terpasang seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Anggapan lain adalah pengurangan luas beton yang ditempati oleh baja desak tidak diperhitungkan, sehingga dalam hitungan digunakan luas beton desak secara utuh.

Selanjutnya dapat dibuat diagram-diagram interaksi untuk berbagai mutu beton dan baja serta untuk berbagai level kuat bahan. Agar dapat digunakan untuk berbagai ukuran tampang, diagram-diagram dibuat tak berdimensi.

Diagram-diagram tersebut dibuat untuk kuat nominal, kuat perlu, dan kapasitas maksimum tampang. Pada kapasitas maksimum tampang, kuat luluh baja tulangan dinaikkan sebesar 1,25 kalinya, sehingga kapasitas momen maksimum dapat diperoleh. Hal ini berguna untuk perencanaan geser kolom pada sistem rangka momen khusus.

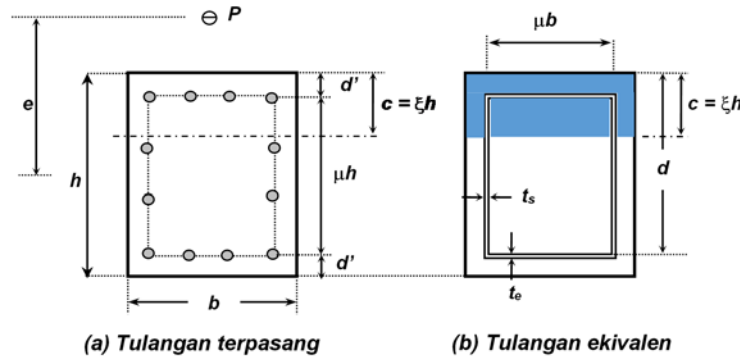
Diagram-diagram yang dibuat dapat digunakan untuk perencanaan kolom, baik pada rangka momen biasa, rangka momen menengah, dan rangka momen khusus yang diatur dalam SNI 1726-2012 (Badan Standardisasi Nasional, 2012) atau ASCE/SEI 7-10 (ASCE, 2010). Selanjutnya program komputer dikembangkan dan ditulis dalam Matlab.

FORMULASI PERSAMAAN

Mengacu pada Gambar 1, tulangan yang tersebar pada keempat sisi dibuat menjadi plat baja tipis ekuivalen (Everard dan Cohen, 1964, Wangsadinata, 1977). Tebal plat baja ekuivalen pada tiap sisi kolom dapat dihitung menurut persamaan:

$$t_s = \frac{\frac{1}{4} A_{tot}}{\mu h} \quad (1a)$$

$$t_e = \frac{\frac{1}{4} A_{tot}}{\mu b} \quad (1b)$$



Gambar 1. Tulangan ekuivalen sebagai plat baja tipis berdasarkan tulangan terpasang

dengan t_s = tebal plat baja ekuivalen pada sisi samping kiri dan kanan, t_e = tebal plat baja ekuivalen pada sisi atas dan bawah, A_{tot} = luas tulangan longitudinal kolom total, h = tinggi kolom, b = lebar kolom, $\mu = \frac{h-2d'}{h}$, dan d' = jarak dari sisi terluar kolom ke pusat berat tulangan terluar.

Tegangan-tegangan yang terjadi

Misal tegangan pada baja tulangan yang letaknya terdekat dan terjauh dari sisi desak beton dinyatakan dengan notasi:

$$f'_s = \psi' f_y \quad (2)$$

$$f_s = \psi f_y \quad (3)$$

dengan f'_s = tegangan pada baja sisi luar yang letaknya terdekat dari sisi desak beton, f_s = tegangan pada baja sisi luar yang letaknya terjauh dari sisi desak, f_y = tegangan luluh baja tulangan, $\psi' = \text{rasio } f'_s/f_y$, dan $\psi = \text{rasio } f_s/f_y$.

Regangan pada baja desak terluar dapat dihitung dengan:

$$\epsilon'_s = \frac{c-d'}{c} \epsilon'_{cu} \quad (4)$$

ϵ'_s = regangan pada baja desak terluar, and ϵ'_{cu} = tegangan ultimit beton = 0.003, dan c = tinggi garis netral.

Dengan cara yang sama, regangan pada baja tarik terluar dapat dihitung dengan:

$$\epsilon_s = -\left(\frac{h-d'-c}{c}\right) \epsilon'_{cu} \quad (5a)$$

atau:

$$\epsilon_s = \left(\frac{c-d}{c}\right) \epsilon'_{cu} \quad (5b)$$

Tanda negatif pada persamaan (5a) menunjukkan regangan tarik.

Dengan memperhatikan persamaan (4) dan mengingat $f'_s = E_s \epsilon'_s$, dengan $E_s = 200000$ MPa, rasio tegangan pada tulangan desak yang terluar dapat dinyatakan dengan

$$\psi' = \frac{600}{f_y} \left(1 - \frac{1-\mu}{2\xi}\right) \leq 1 \quad (6)$$

dengan

$$\xi = \frac{c}{h} \quad (7)$$

Dengan cara yang sama, dengan memperhatikan persamaan (3) dan (5) dan mengingat $f_s = E_s \epsilon_s$, kita dapat memperoleh:

$$-1 \leq \psi = \frac{600}{f_y} \left(1 - \frac{1+\mu}{2\xi}\right) \leq 1 \quad (8)$$

Gaya-gaya yang terjadi

Gaya-gaya yang terjadi pada tampang kolom terdiri dari gaya-gaya aksial pada baja yang letaknya terjauh dan terdekat dari sisi desak beton terluar (atas dan bawah), gaya-gaya aksial pada setiap sisi kolom (kiri dan kanan), dan gaya aksial pada beton desak.

Keseimbangan gaya-gaya dalam keadaan nominal menghasilkan:

$$P_n = N_{se1} + N_{se2} + 2 \sum_{i=1}^n N_{ssi} + C_c \quad (9)$$

dengan:

N_{se1} = gaya aksial pada baja terluar (atas) yang letaknya terdekat dari sisi desak,

N_{se2} = gaya aksial pada baja terluar (bawah) yang letaknya terjauh dari sisi desak,

N_{ssi} = gaya aksial pada setengah sisi tulangan (satu sisi) kiri atau kanan untuk segmen- i ,

C_c = gaya desak pada beton.

N_{ssi} pada persamaan (9) tergantung kondisi bentuk-bentuk geometri dari tegangan pada baja tulangan.

Gaya desak pada beton dapat ditulis sebagai:

$$C_c = 0,85 f'_c ab \quad (10a)$$

Atau dengan mengingat persamaan (7):

$$C_c = 0,85 f'_c \beta_1 \xi hb \quad (10b)$$

dengan $a = \beta_1 c = \beta_1 \xi h$ = tinggi blok desak beton ekivalen, dan β_1 = rasio tinggi blok desak beton ekivalen terhadap tinggi garis netral. Dalam persamaan (10) pengurangan luas beton yang ditempati baja desak tidak diperhitungkan.

Momen nominal yang terjadi

Dengan mengambil momen terhadap pusat berat tampang kolom diperoleh momen nominal sebagai berikut:

$$M_n = N_{se1} y_{se1} + N_{se2} y_{se2} + 2 \sum_{i=1}^n N_{ssi} y_{ssi} + C_c y_c \quad (11)$$

dengan:

y_{se1} = jarak dari pusat berat kolom terhadap pusat berat gaya desak terluar,

y_{se2} = jarak dari pusat berat kolom terhadap pusat berat gaya desak terjauh dari sisi desak,

y_{ssi} = jarak dari pusat berat kolom terhadap pusat berat gaya desak di sisi kiri dan kanan,

y_c = jarak dari pusat berat kolom terhadap pusat berat gaya desak beton.

Dalam hal ini:

$$y_{se1} = \frac{1}{2} \mu h \quad (12a)$$

$$y_{se2} = -\frac{1}{2} \mu h \quad (12b)$$

$$y_c = \frac{1}{2} h (1 - \beta_1 \xi) \quad (12c)$$

Sedangkan y_{ssi} tergantung dari bentuk geometri diagram tegangan sepanjang tinggi tampang kolom. Kemungkinan bentuk diagram tegangan yang terjadi sepanjang tinggi tampang kolom dapat diuraikan sebagai berikut ini.

Kasus 1

Kasus 1 terjadi jika baja terluar yang terdekat ke sisi desak masih elastik ($\epsilon_s' \leq \epsilon_y$), tetapi baja terluar yang terjauh dari sisi desak sudah luluh

($\epsilon_s > \epsilon_y$). Dalam hal ini $\psi' \leq 1$ dan $\psi = -1$ seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Komponen gaya yang ada dalam persamaan (9) untuk Kasus 1 ini dapat ditulis sebagai:

$$N_{se1} = \frac{1}{4} A_{tot} \psi' f_y \quad (13a)$$

$$N_{se2} = -\frac{1}{4} A_{tot} f_y \quad (13b)$$

$$N_{ss1} = -\frac{\frac{1}{4} A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \mu - \xi - \beta + \frac{1}{2} \right) \quad (13c)$$

$$N_{ss2} = -\frac{\frac{1}{4} A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \beta \right) \quad (13d)$$

$$N_{ss3} = -\frac{\frac{1}{4} A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \psi' \right) \left(\frac{1}{2} \mu + \xi - \frac{1}{2} \right) \quad (13e)$$

dengan:

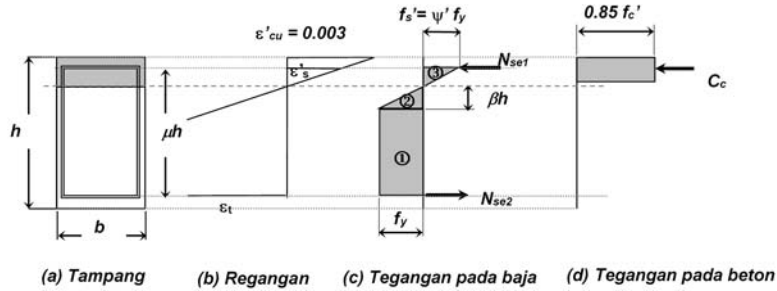
$$\beta = \frac{f_y}{600} \xi \quad (13f)$$

Lengan momen untuk setiap komponen gaya aksial dari baja di sisi kiri dan kanan tampang pada Gambar 2(c) terhadap pusat berat tampang kolom dalam persamaan (10) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$y_{ss1} = h \left(-\frac{1}{4} \mu - \frac{1}{2} \xi - \frac{1}{2} \beta + \frac{1}{4} \right) \quad (14c)$$

$$y_{ss2} = h \left(-\xi - \frac{2}{3} \beta + \frac{1}{2} \right) \quad (14d)$$

$$y_{ss3} = h \left(\frac{1}{3} \mu - \frac{1}{3} \xi + \frac{1}{6} \right) \quad (14e)$$



Gambar 2. Kasus 1

Untuk lengan momen dari komponen gaya aksial baja di sisi atas dan bawah, dan lengan momen gaya aksial dari beton desak mengikuti persamaan (12a) sampai dengan (12c).

Kasus 2

Keadaan ini terjadi jika regangan pada baja sisi terluar (desak dan tarik) melebihi regangan luluhnya seperti ditunjukkan pada Gambar 3, yaitu $\epsilon'_s > \epsilon_y$ dan $\epsilon_s > \epsilon_y$. Pada kondisi ini $\psi' = 1$ dan $\psi = -1$ seperti terlihat pada Gambar 3. Komponen gaya-gaya pada persamaan (9) untuk Kasus 2 adalah:

$$N_{se1} = \frac{1}{4} A_{tot} f_y \quad (15a)$$

$$N_{se2} = -\frac{1}{4} A_{tot} f_y \quad (15b)$$

$$N_{ss1} = -\frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \mu - \xi - \beta + \frac{1}{2} \right) \quad (15c)$$

$$N_{ss2} = -\frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \beta \right) \quad (15d)$$

$$N_{ss3} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \beta \right) \quad (15e)$$

$$N_{ss4} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \mu + \xi - \beta - \frac{1}{2} \right) \quad (15f)$$

Kasus 3

Pada kasus 3 baja tulangan terluar yang letaknya terdekat ke sisi desak telah mengalami keluluhan ($\epsilon'_s > \epsilon_y$), tetapi baja tulangan terluar yang letaknya terjauh dari sisi desak masih elastik ($\epsilon_s < \epsilon_y$) seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Gaya-gaya dapat diperoleh sebagai berikut:

$$N_{se1} = \frac{1}{4} A_{tot} f_y \quad (17a)$$

$$N_{se2} = \frac{1}{4} A_{tot} \psi f_y \quad (17b)$$

$$N_{ss1} = -\frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \psi \right) \left(\frac{1}{2} \mu - \xi + \frac{1}{2} \right) \quad (17c)$$

$$N_{ss2} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \beta \right) \quad (17d)$$

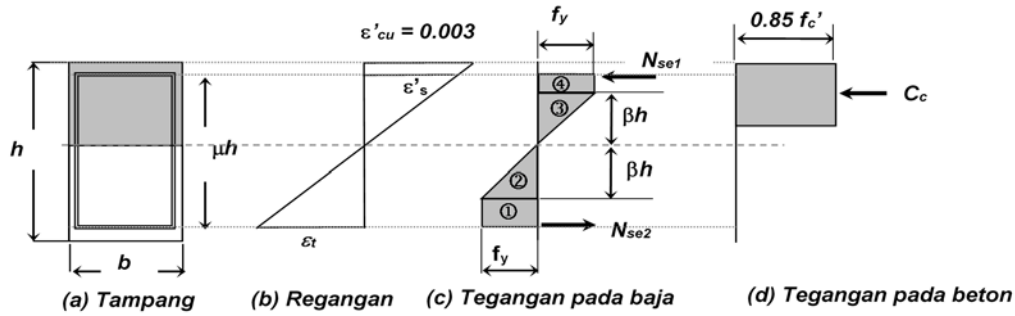
$$N_{ss3} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \mu + \xi - \beta - \frac{1}{2} \right) \quad (17e)$$

Lengan momen untuk segmen gaya pada Gambar 4 dapat diperoleh sebagai berikut:

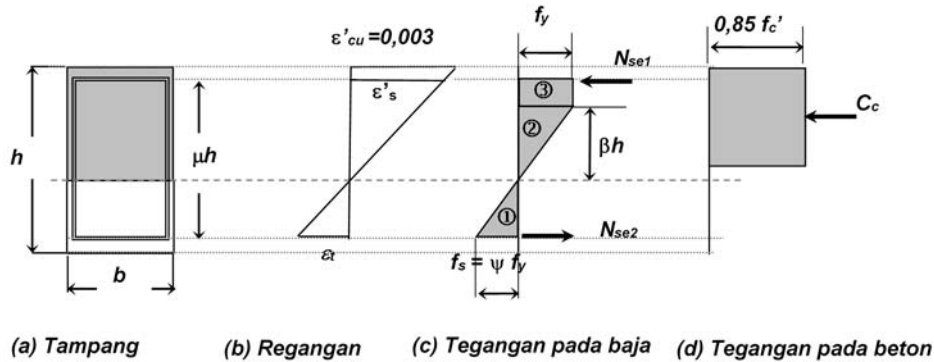
$$y_{ss1} = h \left(-\frac{1}{3} \mu - \frac{1}{3} \xi + \frac{1}{6} \right) \quad (18a)$$

$$y_{ss2} = h \left(-\xi + \frac{2}{3} \beta + \frac{1}{2} \right) \quad (18b)$$

$$y_{ss3} = h \left(\frac{1}{4} \mu - \frac{1}{2} \xi + \frac{1}{2} \beta + \frac{1}{4} \right) \quad (18c)$$



Gambar 3. Kasus 2



Gambar 4. Kasus 3

Kasus 4

Kasus 4 terjadi jika seluruh tampang kolom dalam keadaan desak, tetapi tidak seluruh baja telah mencapai tegangan luluhnya. Garis netral dalam hal ini terletak di luar tampang kolom, dan satu sisi baja tulangan terluar yang mengalami tegangan desak telah luluh ($\epsilon'_s > \epsilon_y$), sedangkan baja tulangan terluar yang lain juga telah mengalami tegangan desak tetapi belum luluh ($\epsilon_s < \epsilon_y$) seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Komponen gaya untuk Kasus 4 seperti ditunjukkan pada Gambar 5 dapat diperoleh sebagai berikut ini:

$$N_{se1} = \frac{1}{4} A_{tot} f_y \quad (19a)$$

$$N_{se2} = \frac{1}{4} A_{tot} \psi f_y \quad (19b)$$

$$N_{ss1} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \psi (1 - \psi) \beta \quad (19c)$$

$$N_{ss2} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left\{ \frac{1}{2} (1 - \psi^2) \beta \right\} \quad (19d)$$

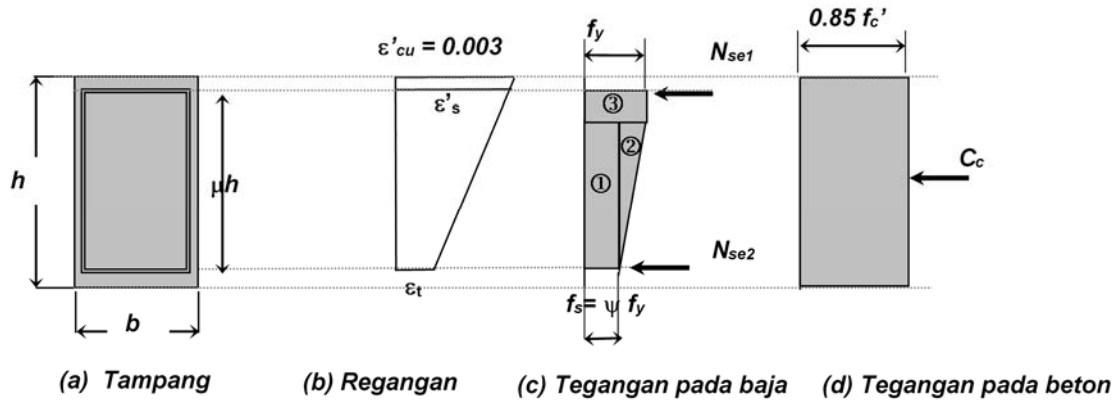
$$N_{ss3} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \{ \mu - (1 - \psi) \beta \} \quad (19e)$$

Lengan momen untuk gaya-gaya pada Kasus 4 dapat diperoleh sebagai berikut:

$$y_{ss1} = h \left\{ -\frac{1}{2} \mu + \frac{1}{2} (1 - \psi) \beta \right\} \quad (20a)$$

$$y_{ss3} = h \left\{ \frac{1}{2} (1 - \psi) \beta \right\} \quad (20c)$$

Dalam hal ini nilai $\beta_1 \xi$ pada persamaan (10) dan (12) sama dengan 1.



Gambar 5. Kasus 4

Kasus 5

Dalam keadaan ini, semua tampang kolom mengalami desak dan semua baja tulangan telah luluh seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Gaya-gaya yang terjadi dapat dihitung menurut:

$$N_{se1} = \frac{1}{4} A_{tot} f_y \quad (21a)$$

$$N_{se2} = \frac{1}{4} A_{tot} f_y \quad (21b)$$

$$N_{ss1} = \frac{1}{4} A_{tot} f_y \quad (21c)$$

Karena $\beta_1 \xi = 1$, lengan momen gaya pada baja di sisi kiri dan kanan, serta lengan momen beton desak terhadap pusat tampang kolom = 0, yaitu

$$y_{ss1} = 0 \quad (22a)$$

$$y_c = 0 \quad (22b)$$

Kasus 6

Kasus 6 terjadi jika digunakan baja kuat tarik tinggi, di mana garis netral jatuh pada tampang beton tetapi baja yang terletak paling jauh dan

paling dekat dari sisi desak masih elastik. ($\epsilon_s' < \epsilon_y$ dan $\epsilon_s < \epsilon_y$), seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

Gaya-gaya yang terjadi dapat diitung dengan persamaan:

$$N_{se1} = \frac{1}{4} A_{tot} \psi' f_y \quad (23a)$$

$$N_{se2} = \frac{1}{4} A_{tot} \psi f_y \quad (23b)$$

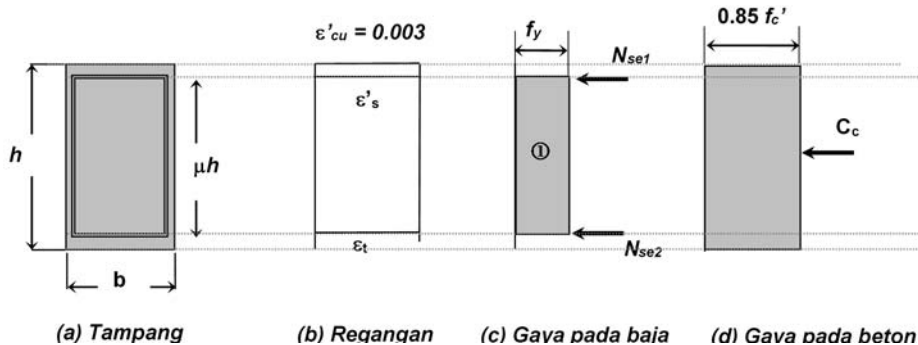
$$N_{ss1} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \psi \right) \left(\frac{1}{2} \mu - \xi + \frac{1}{2} \right) \quad (23c)$$

$$N_{ss2} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left(\frac{1}{2} \psi' \right) \left(\frac{1}{2} \mu + \xi - \frac{1}{2} \right) \quad (23d)$$

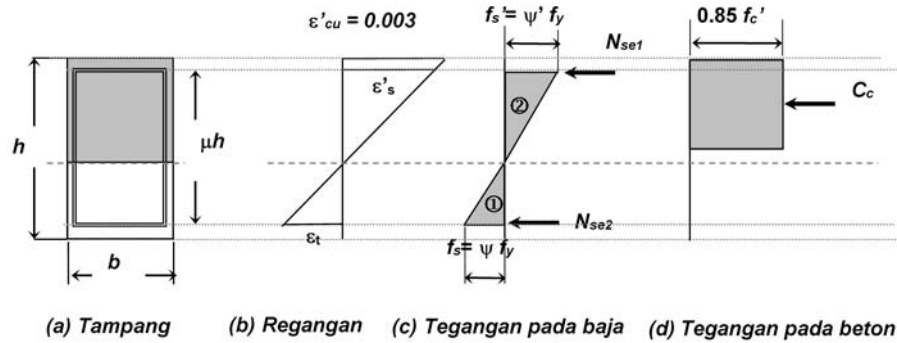
Sedangkan lengan momen pada kasus ini adalah:

$$y_{ss1} = h \left(-\frac{1}{3} \mu - \frac{1}{3} \xi + \frac{1}{6} \right) \quad (24a)$$

$$y_{ss2} = h \left(\frac{1}{3} \mu - \frac{1}{3} \xi + \frac{1}{6} \right) \quad (24b)$$



Gambar 6. Kasus 5



Gambar 7. Kasus 6

Kasus 7

Pada Kasus 7 semua tampang telah mengalami desak dan regangan baja yang paling mengalami desak belum mencapai regangan luluh ($\epsilon'_s < \epsilon_y$), seperti ditunjukkan ada Gambar 8. Dalam keadaan ini seluruh baja tulangan masih dalam keadaan elastik. Hal ini dapat terjadi untuk kolom yang diberi tulangan baja kuat tarik tinggi. Gaya-gaya yang terajadi pada Kasus 7 seperti ditunjukkan pada Gambar 8 dapat dihitung dengan:

$$N_{se1} = \frac{1}{4} A_{tot} \psi' f_y \quad (25a)$$

$$N_{se2} = \frac{1}{4} A_{tot} \psi f_y \quad (25b)$$

$$N_{ss1} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y \left\{ \frac{1}{2} (\psi' - \psi) \right\} \quad (25c)$$

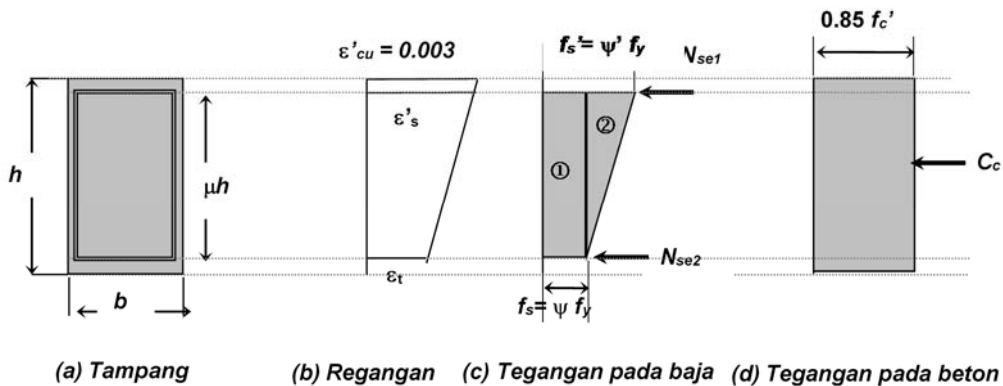
$$N_{ss2} = \frac{1}{4} \frac{A_{tot}}{\mu} f_y (\psi - \psi') \quad (25d)$$

Sedangkan lengan momen pada Gambar 8 dapat dihitung dengan:

$$y_{ss1} = 0 \quad (26a)$$

$$y_{ss2} = h \left(\frac{1}{6} \mu \right) \quad (26b)$$

Perlu dicatat pula bahwa untuk tampang yang seluruhnya mengalami desak nilai $\beta_1 \xi$ pada persamaan (10) dan (12) sama dengan 1.



Gambar 8. Kasus 7

DIAGRAM INTERAKSI

Berdasarkan persamaan-persamaan yang telah diturunkan, dapat dibuat diagram interaksi untuk berbagai mutu baja tulangan. Diagram interaksi dapat dibuat untuk hubungan $\phi M_n - \phi P_n$, $M_n - P_n$, dan $M_{pr} - P_{pr}$, dengan ϕ = faktor reduksi kekuatan.

Faktor reduksi kekuatan diambil sesuai dengan SNI 2847: 2013, yaitu $\phi = 0,90$ untuk tampang terkendali tarik, dan $\phi = 0,65$ untuk tampang terkendali tekan, sesuai dengan pasal 9.3.2.1 dan pasal 9.3.2.2 SNI 2847:2013. Sedangkan untuk kondisi transisi nilai faktor reduksi kekuatan dapat diinterpolasi dengan persamaan:

$$\phi = 0,65 + (\epsilon_t - \epsilon_y) \left(\frac{250}{3} \right) \quad (27a)$$

$$\phi = 0,65 + 0,25 \left\{ \left(\frac{1}{c/d_t} \right) - \left(\frac{5}{3} \right) \right\} \quad (27b)$$

Suatu tampang dikatakan terkendali tekan menurut pasal 10.3.3 SNI 2847:2013 atau ACI 318M-11 adalah jika regangan tarik netto dalam baja tarik terjauh, ϵ_t , sama dengan atau kurang dari batas regangan terkendali **tekan**, bila beton tekan mencapai batas regangan asumsi sebesar 0,003.

Kata tekan pada kalimat sebelumnya ditulis dengan huruf tebal, karena ada kesalahan penulisan dalam SNI 2847:2013 yaitu tertulis "tarik", seharusnya "tekan" sesuai dengan ACI 318M-11. Batas regangan terkendali tekan adalah regangan tarik netto dalam tulangan pada kondisi regangan seimbang. Selanjutnya definisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 9.

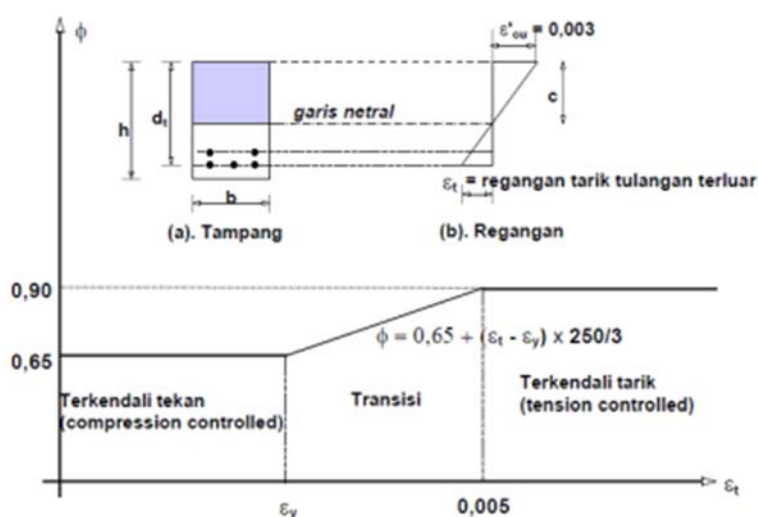
Untuk berbagai mutu beton tinggi blok desak beton ekuivalen tergantung dari nilai β_1 yang menurut SNI 2847:2013 pasal 10.2.7.3 diambil sebagai berikut ini.

$$\beta_1 = 0,85 \text{ untuk } f'_c \leq 28 \text{ MPa} \quad (28a)$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05}{7} (f'_c - 28) \text{ tetapi } \beta_1 \geq 0,65 \quad (28b)$$

untuk $f'_c \geq 28 \text{ MPa}$

Diagram interaksi yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar A1-A6 untuk $\phi M_n - \phi P_n$, B1-B6 untuk $M_n - P_n$, dan C1-C6 untuk $M_{pr} - P_{pr}$. Dalam diagram interaksi yang dihasilkan, diambil nilai $\mu = 0,70$. Dalam diagram-diagram yang dihasilkan, gaya normal maksimum yang disyaratkan dalam SNI 2847:2013 dan ACI 318M-11 juga telah diperhitungkan.



Gambar 9. Faktor reduksi kekuatan

APLIKASI

Aplikasi 1:

Suatu kolom dengan ukuran $b = 450$ mm, dan $h = 500$ mm, dengan $f'_c = 30$ MPa dan $f_y = 400$ MPa.

Dari analisis struktur diketahui $P_u = 2025$ kN dan $M_u = 319$ kNm. Rencanakan tulangan longitudinal kolom tersebut.

Penyelesaian:

Selanjutnya dihitung:

$$\frac{P_u}{f'_c b h} = 0,30$$

$$\frac{M_u}{f'_c b h^2} = 0,095$$

Dari diagram interaksi $P_u - M_u$ untuk $f'_c = 30$ MPa dan $f_y = 400$ MPa diperoleh $\rho = 1,6\%$

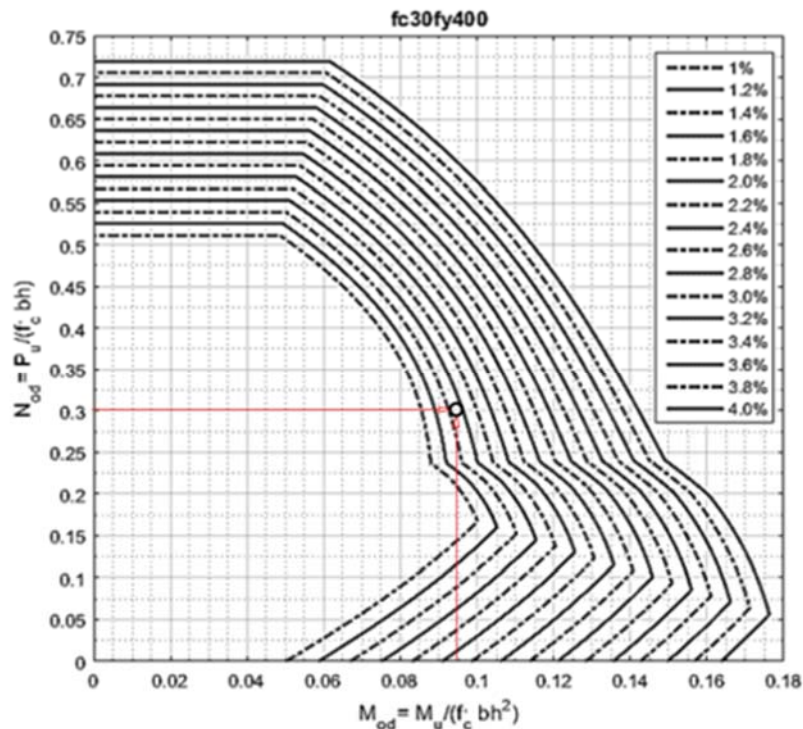
(Gambar 10), sehingga $A_s = \rho b h = 3600$ mm². Selanjutnya digunakan tulangan 8 D25.

Aplikasi 2:

Suatu kolom dengan ukuran $b = 550$ mm, $h = 550$ mm, dengan $f'_c = 25$ MPa dan $f_y = 400$ MPa

(a) Rencanakan tulangan jika $P_{u \min} = 1087.13$ kN, dan $P_{u \max} = 2412.55$ kN, $M_u = 466.68$ kNm.

(b) Jika kolom merupakan kolom Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan momen nominal balok di sisi kiri dan kanan balok adalah sama, yaitu $M_{nb}(+) = 162.112$ kNm, $M_{nb}(-) = 304.232$ kNm, periksa apakah desain kolom pada (a) memenuhi syarat, jika ukuran dan tinggi kolom di bawah dan di atas pertemuan balok kolom adalah sama.



Gambar 10. Hitungan tulangan kolom aplikasi 1

Penyelesaian:

(a) Untuk $\frac{P_u}{f'_c b h} \min = 0,14$ dan $\frac{M_u}{f'_c b h^2} = 0,112$,

dari diagram interaksi $M_u - P_u$ untuk $f'_c = 25$ MPa dan $f_y = 400$ MPa diperoleh $\rho = 0,014$ (Gambar 11).

Untuk $\frac{P_u}{f'_c b h} \max = 0,32$ dan $\frac{M_u}{f'_c b h^2} = 0,112$,

dari diagram interaksi $M_u - P_u$ untuk $f'_c = 25$ MPa dan $f_y = 400$ MPa diperoleh $\rho = 0,022$ (Gambar 11).

Dengan demikian yang menentukan adalah $\rho = 0,022$, diperoleh $A_s = \rho b h = 6655 \text{ mm}^2$. Digunakan 16 D25. A_s terpasang $= 7853,982 \text{ mm}^2$, dengan $\rho \approx 2,6\%$.

(b) Berdasarkan persyaratan kolom kuat balok lemah harus dipenuhi $\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb}$,

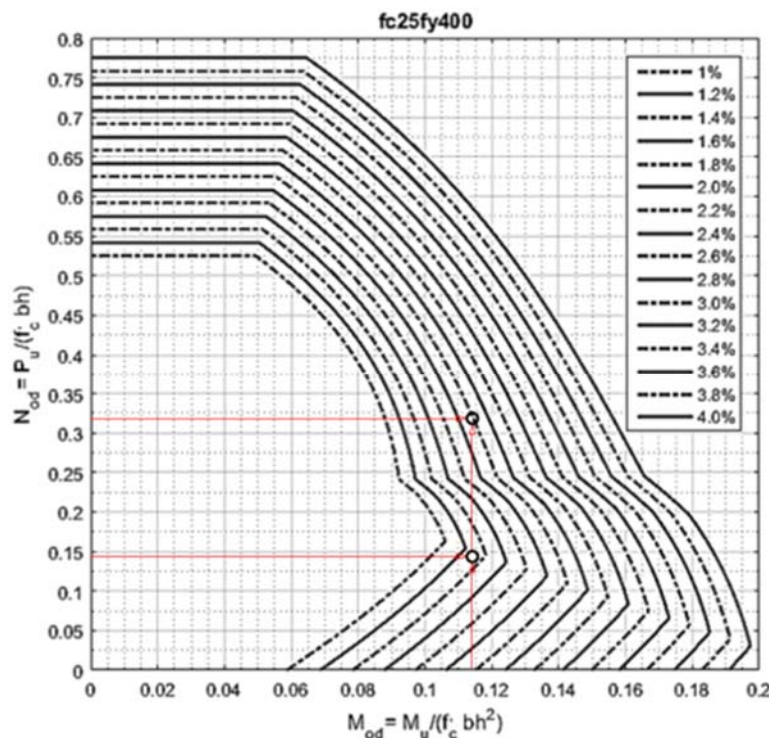
dengan $\sum M_{nc}$ = jumlah momen kolom pada pertemuan balok-kolom, $\sum M_{nb}$ = jumlah momen balok yang bertemu pada sambungan balok-kolom.

Dari hasil hitungan $1,2 \sum M_{nb} = 559,613 \text{ kNm}$. Karena ukuran dan tinggi kolom atas dan bawah pada pertemuan balok-kolom adalah sama, maka momen balok yang harus didukung oleh kolom atas dan bawah juga sama. Dengan demikian $M_{nc} = 559,613/2 = 279,806 \text{ kNm}$ (Gambar 12).

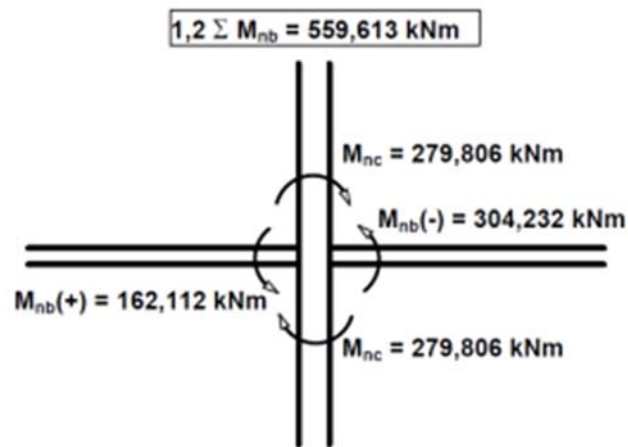
Untuk $\frac{P_u}{f'_c b h} \min = 0,14$ dan $\frac{M_n}{f'_c b h^2} = 0,067$,

serta $\frac{P_u}{f'_c b h} \max = 0,32$ dan $\frac{M_n}{f'_c b h^2} = 0,067$,

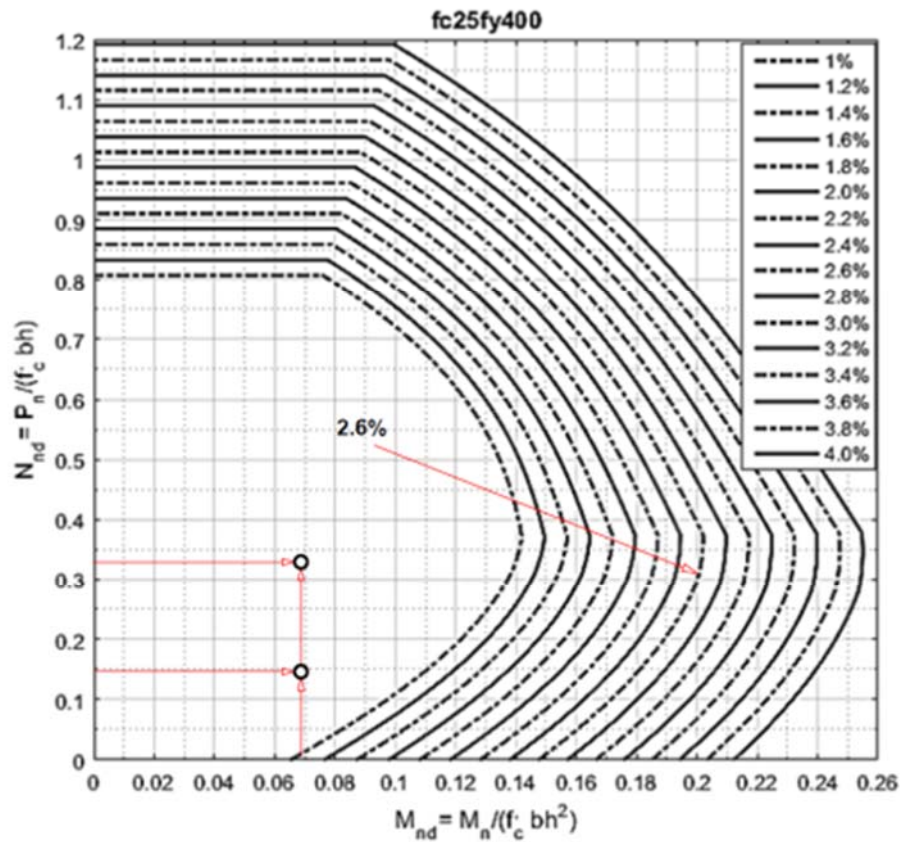
lalu diletakkan pada diagram $M_n - P_n$ seperti terlihat pada Gambar 13 sesuai dengan FEMA P-751 (Building Seismic Safety Council, 2012). Dari Gambar 13 tampak bahwa titik-titik yang digambarkan berada di dalam diagram untuk $\rho \approx 2,6\%$. Dengan demikian kolom dapat dinyatakan aman.



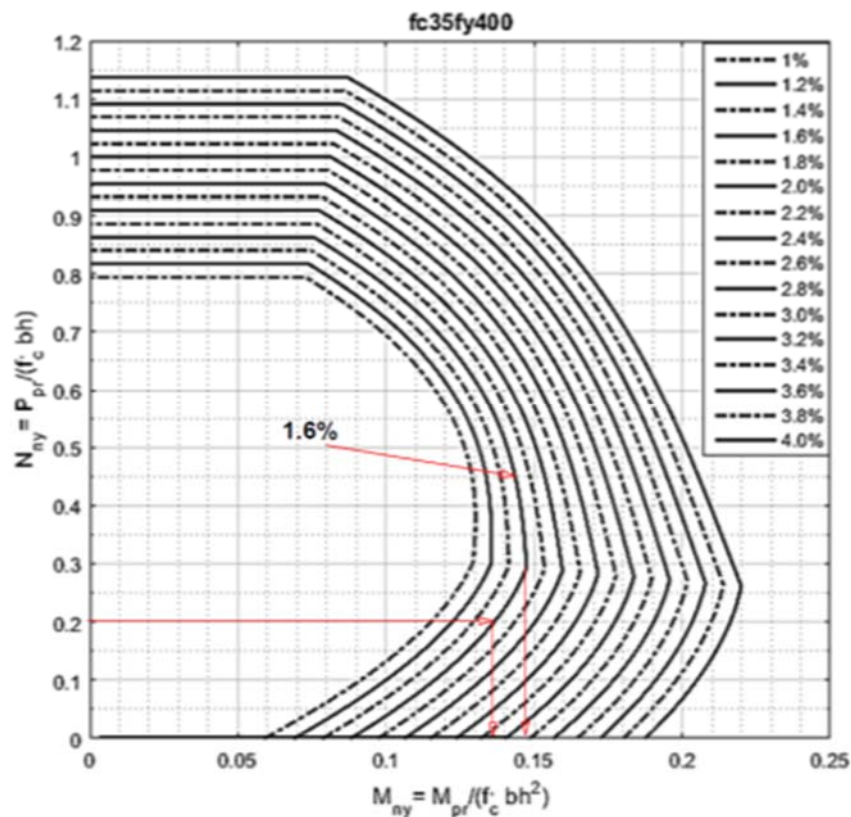
Gambar 11. Hitungan tulangan kolom aplikasi 2



Gambar 12. Momen pada pertemuan balok-kolom



Gambar 13. Pemeriksaan kolom kuat balok lemah pada pertemuan balok-kolom



Gambar 14. Hitungan momen kapasitas maksimum

Aplikasi 3:

Suatu kolom dengan ukuran $b = 500$ mm, $h = 500$ mm, dengan $f'_c = 25$ MPa dan $f_y = 400$ MPa, dengan tulangan 12 D 25, $P_u = 1750$ kN. Perkirakan nilai M_{pr} kolom tersebut.

Penyelesaian:

Dengan $P_u = 1750$ kN, $\frac{P_u}{f'_c b h} = 0,2$. Tulangan 12 D25, $\rho = 0,156 \approx 0,16$. Dari diagram $M_{pr} - P_{pr}$ untuk $f'_c = 35$ MPa diperoleh $\frac{M_{pr}}{f'_c b h^2} = 0,136$ (lihat Gambar 14), sehingga $M_{pr} = 595$ kNm.

Untuk tulangan dengan $\rho \approx 0,16$, nilai maksimum $\frac{M_{pr}}{f'_c b h^2} = 0,1475$, yang diambil kemungkinan nilai yang terbesar dari variasi gaya normal, sehingga $M_{pr} = 645,31$ kNm

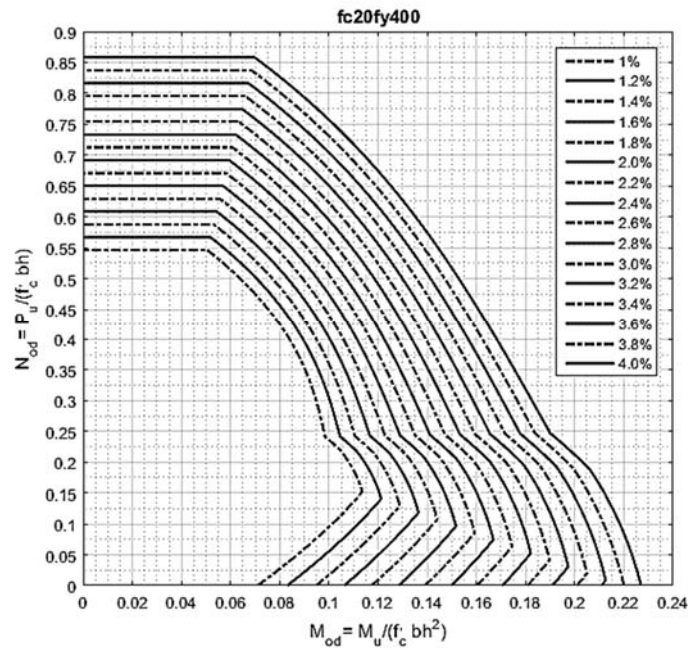
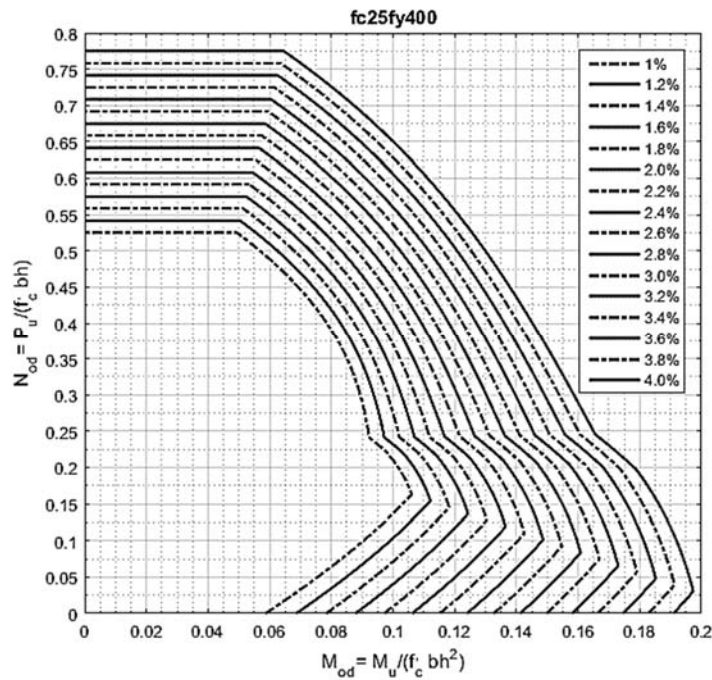
KESIMPULAN

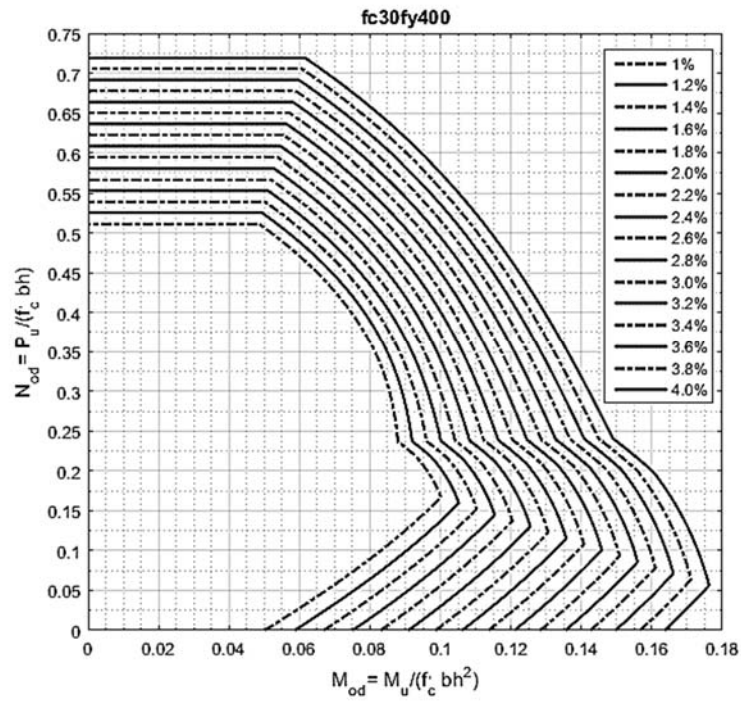
Dalam tulisan ini telah dikembangkan diagram-diagram untuk perencanaan kolom beton bertulang sesuai dengan SNI 284:2013 dan AC 318M-11. Kolom dengan tulangan pada keempat sisi didekati sebagai baja dengan ketebalan yang merata pada tiap sisinya. Karena grafik-grafik diturunkan dengan anggapan tersebut, maka hasilnya merupakan pendekatan dari cara yang sesungguhnya. Namun demikian, hasil yang diperoleh akan mendekati hasil dari keadaan sesungguhnya.

DAFTAR PUSTAKA

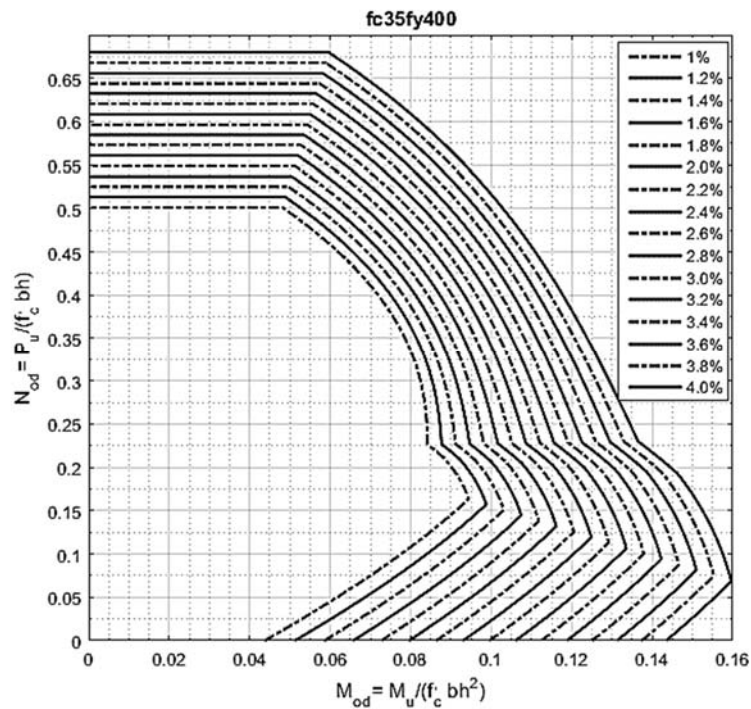
- ACI, 2011, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11), Farmington Hills, MI
- Arfiadi, Y., 2004, Alat Bantu Perancangan Kolom dengan Tulangan pada Keempat Sisinya, Seminar HAKI , Jakarta , Agustus.
- ASCE, 2010, ASCE/SEI 7-10: *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Badan Standardisasi Nasional, 2012, *SNI 1726:2012: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional, 2012, *SNI 2847:2013: Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Jakarta.
- Building Seismic Safety Council, (2012) *NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples: FEMA P-751*, Washington, D.C.
- Everard, N. J dan Cohen, E., 1964, Ultimate Strength Design of Reinforced Concrete Columns. American Concrete Institute, Detroit.
- Fattah, AMA, 2012, Behavior of Concrete Columns Under Various Confinement Effects, Ph.D. Dissertation, Kansas State University.
- Ludovico, MD, Lignla, GP., Prota, A, dan Cosenza, E., 2010). Nonlinear Analysis of Cross Sections under Axial Load and Biaxial Bending, *ACI Structural Journal*, July-August, 390-399.
- Mast, RF., 1992, Unified Design Provision for Reinforced and Prestressed Concrete Flexural and Compression Members. *ACI Structural Journal*, V89, 185-199.
- Rocca, S., Galati, N., Nanni, A., 2009, Interaction diagram Methodology for Design of FRP-confined reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*, 23, 1508-1520.
- Wangsadinata, W., 1977, Analysis of Reinforced Concrete Column Sections. Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik, Direktorat Jenderal Ciptakarya, Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan.
- Wight, J dan MacGregor, JG., 2012, Reinforced Concrete Mechanics and Design. Prentice-Hall International, Inc. NJ.

LAMPIRAN

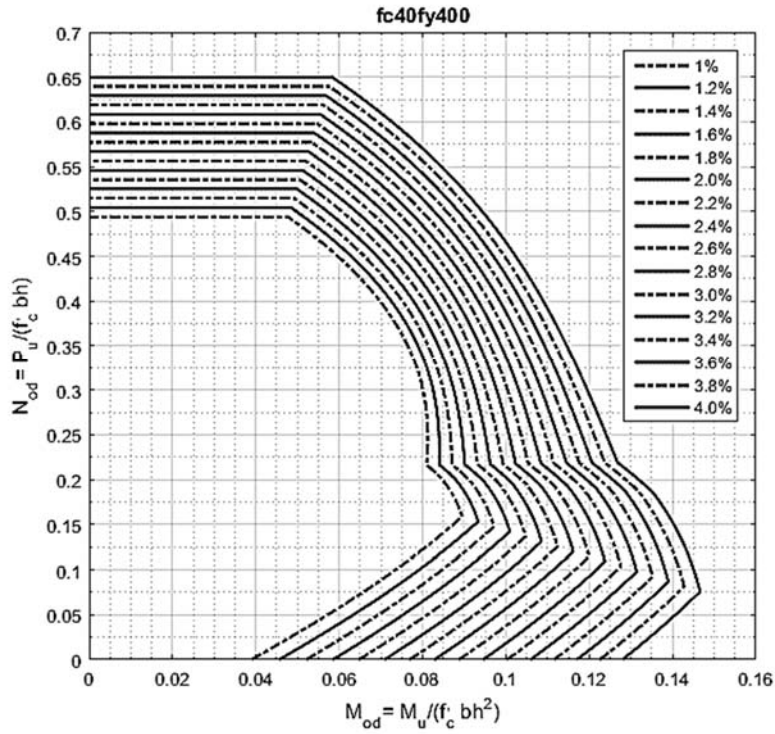
Gambar A-1. $\phi M_n - \phi P_n$, $f'_c = 20$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$.Gambar A-2. $\phi M_n - \phi P_n$, $f'_c = 25$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$.



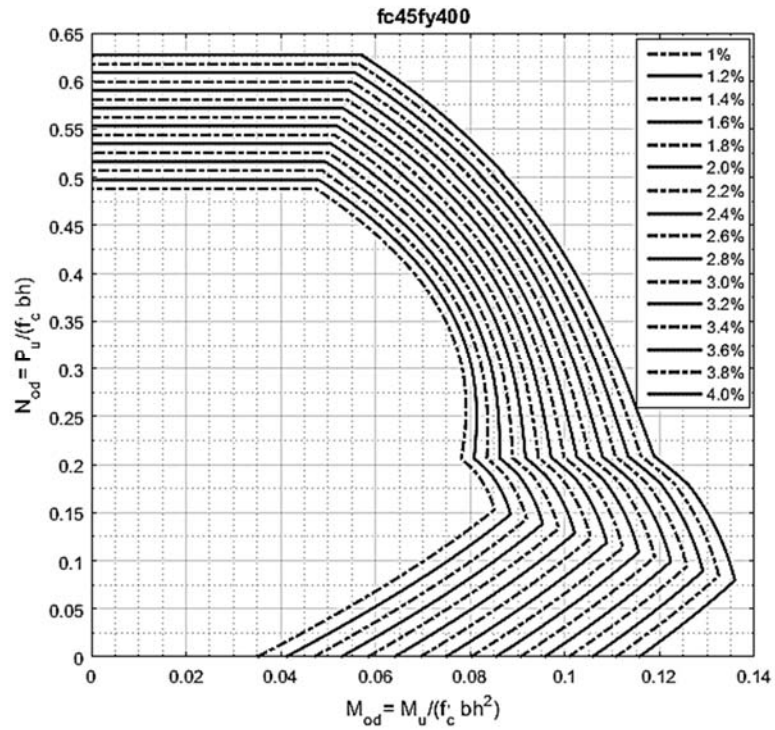
Gambar A-3. $\phi M_n - \phi P_n$, $f'_c = 30$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$.



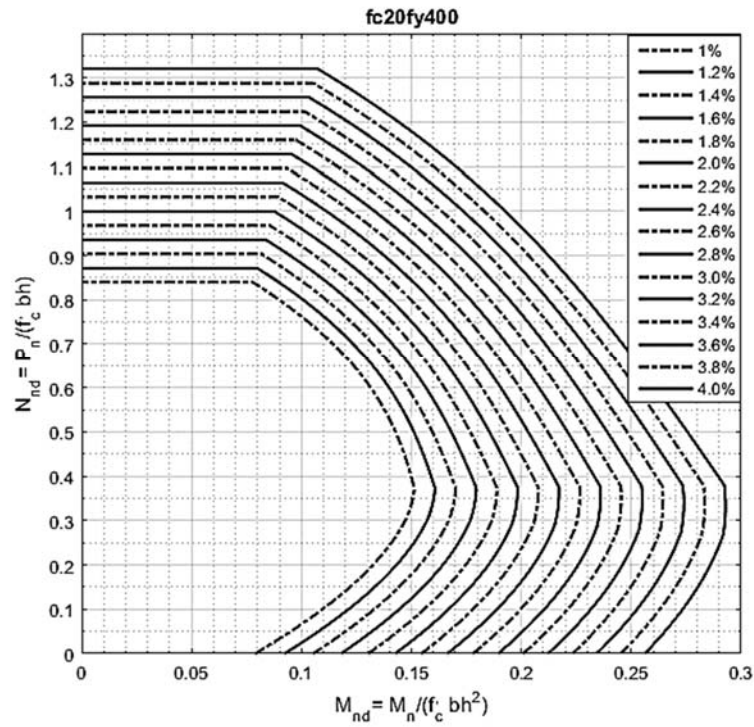
Gambar A-4. $\phi M_n - \phi P_n$, $f'_c = 35$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$.



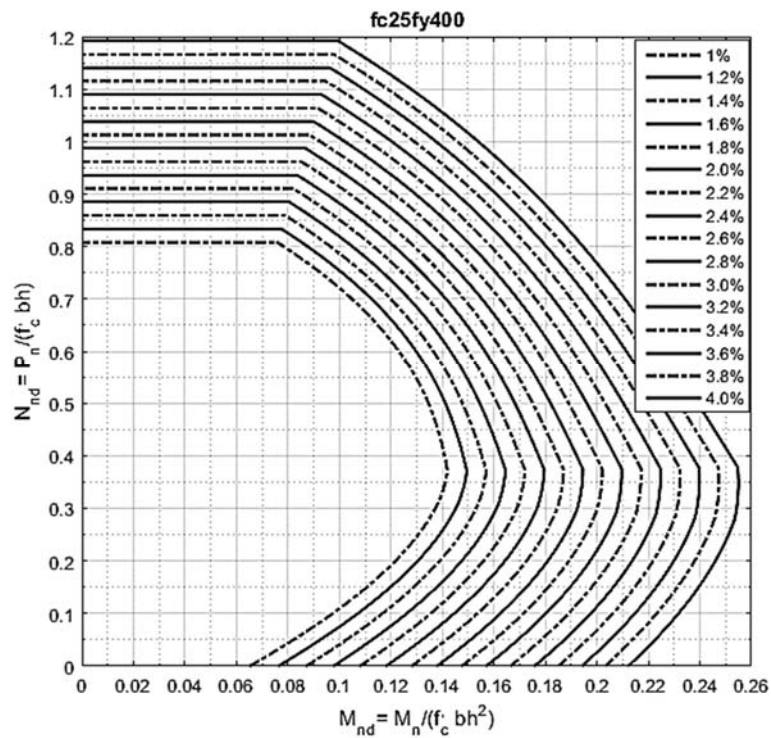
Gambar A-5. $\phi M_n - \phi P_n$, $f'_c = 40$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$.



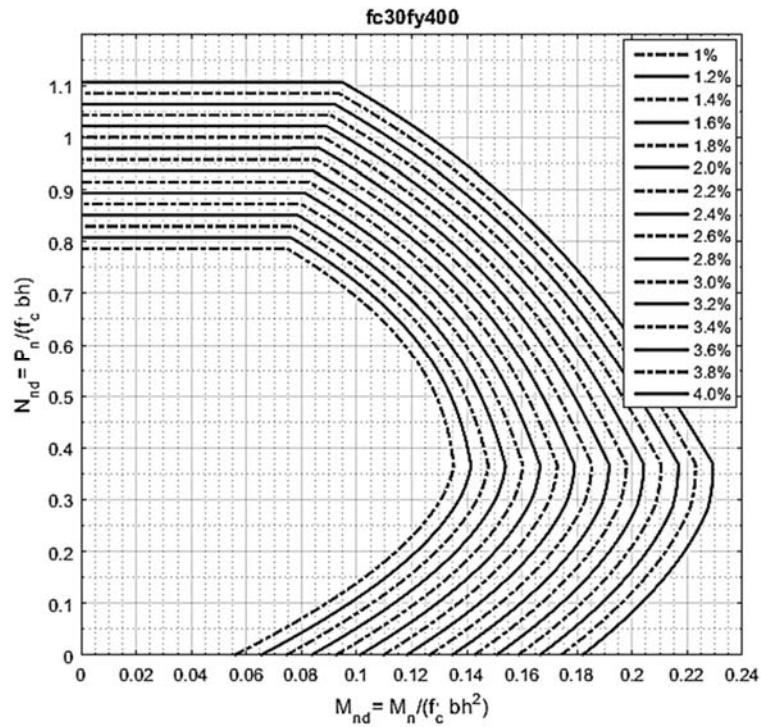
Gambar A-6. $\phi M_n - \phi P_n$, $f'_c = 45$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$.



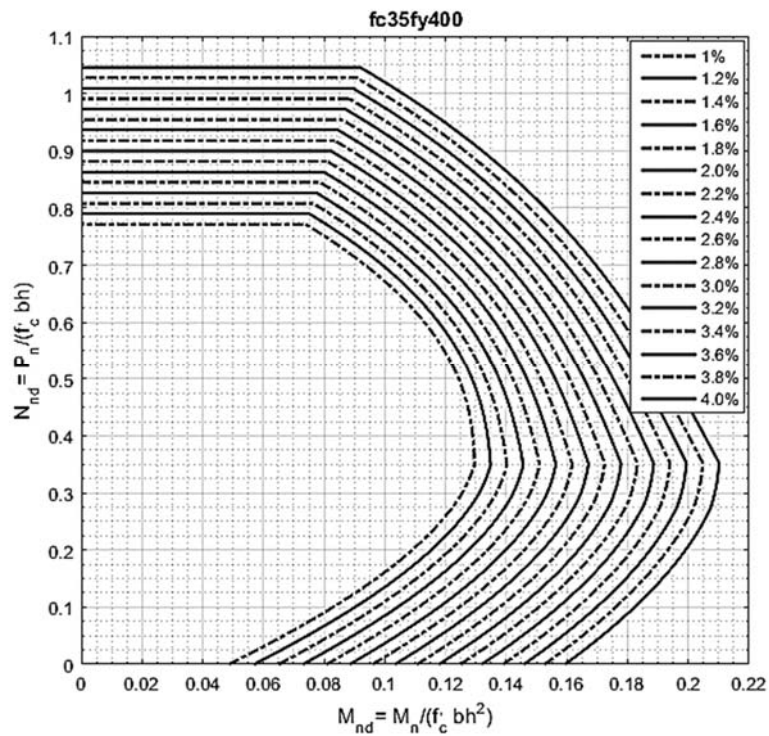
Gambar B-1. $M_n - P_n$, $f'_c = 20$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



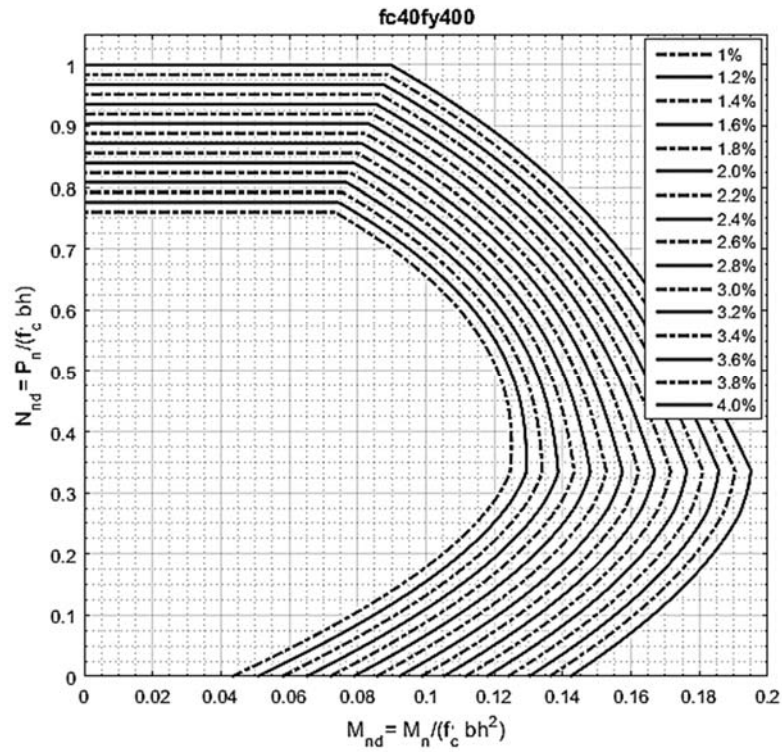
Gambar B-2. $M_n - P_n$, $f'_c = 25$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



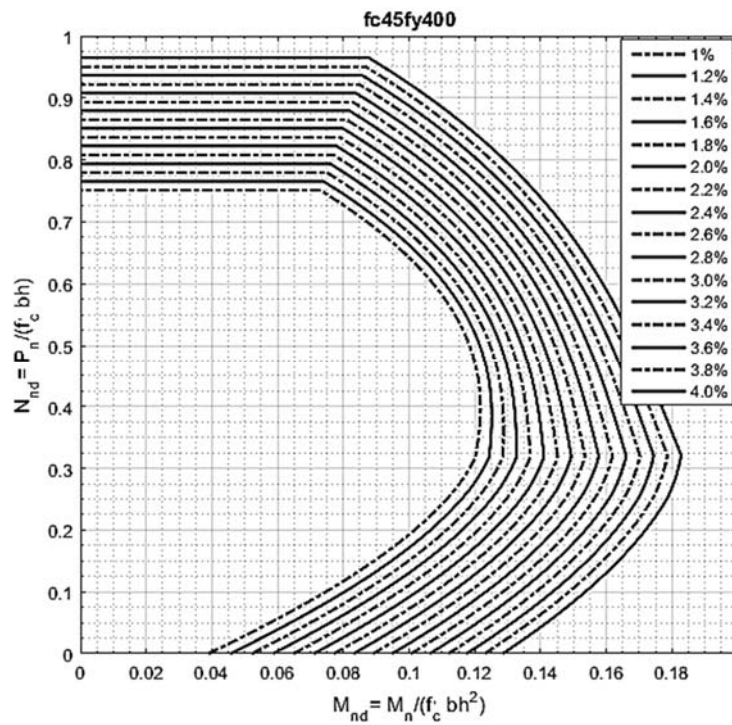
Gambar B-3. $M_n - P_n$, $f'_c = 30$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



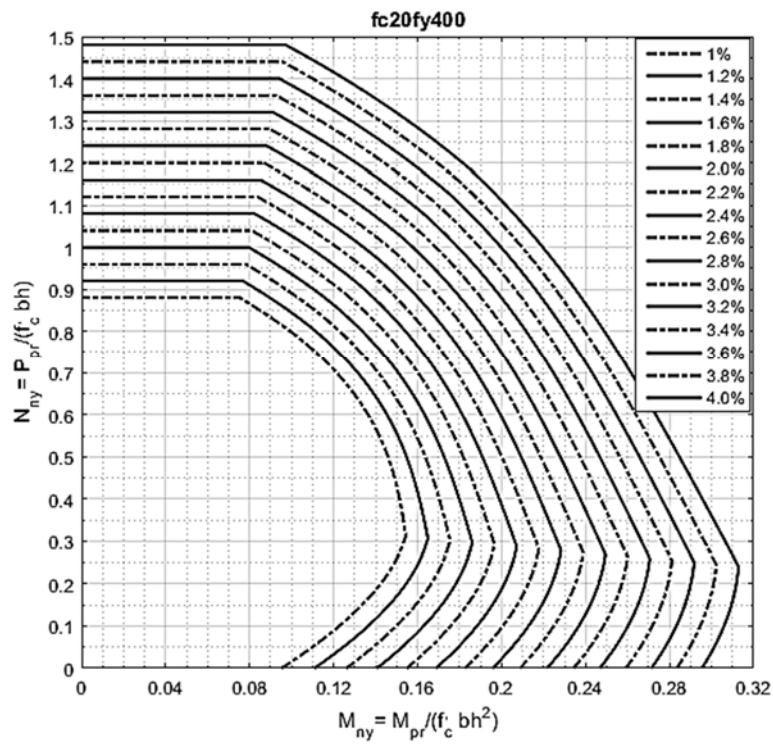
Gambar B-4. $M_n - P_n$, $f'_c = 35$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



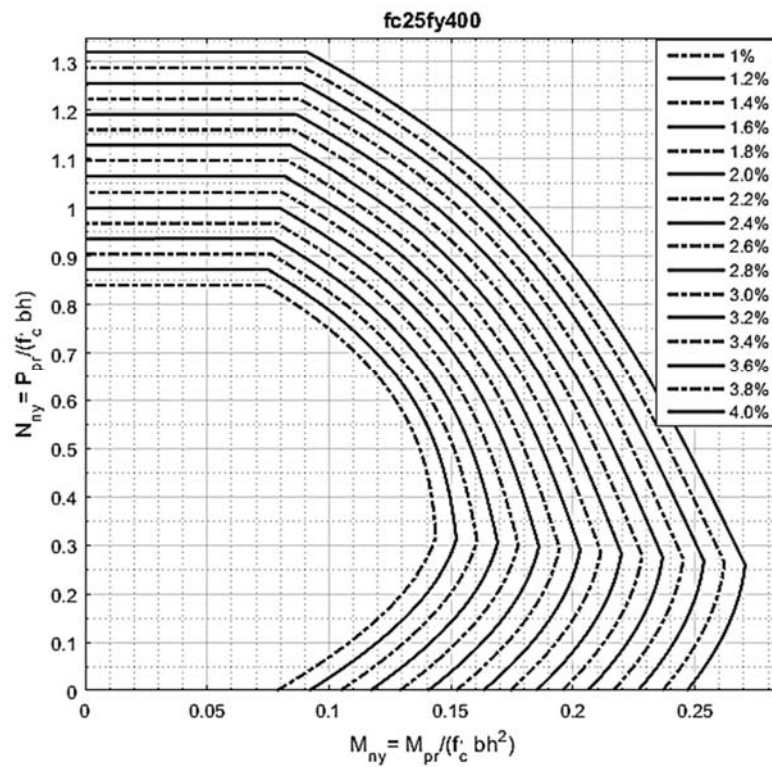
Gambar B-5. $M_n - P_n$, $f'_c = 40$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



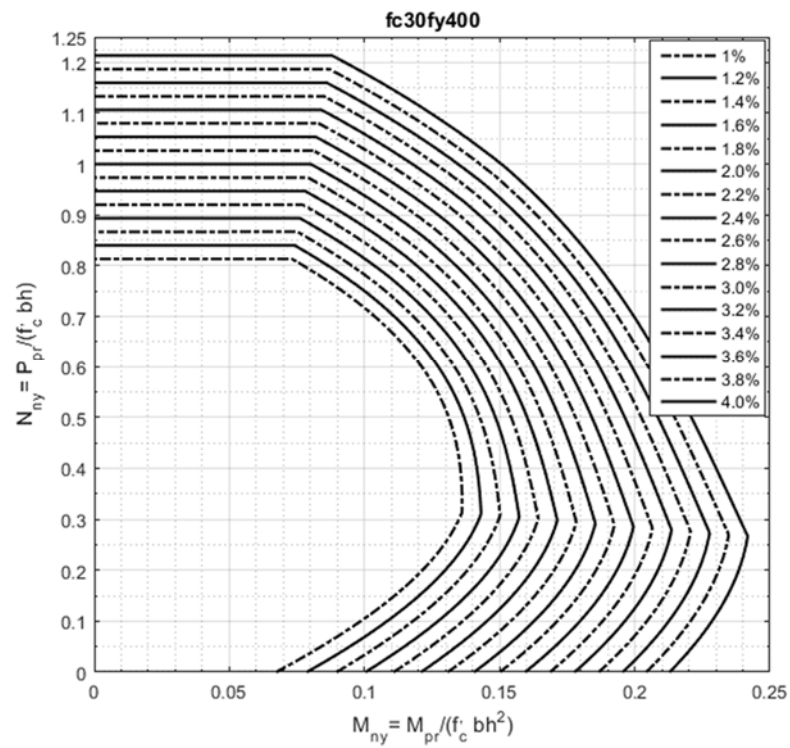
Gambar B-6. $M_n - P_n$, $f'_c = 45$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



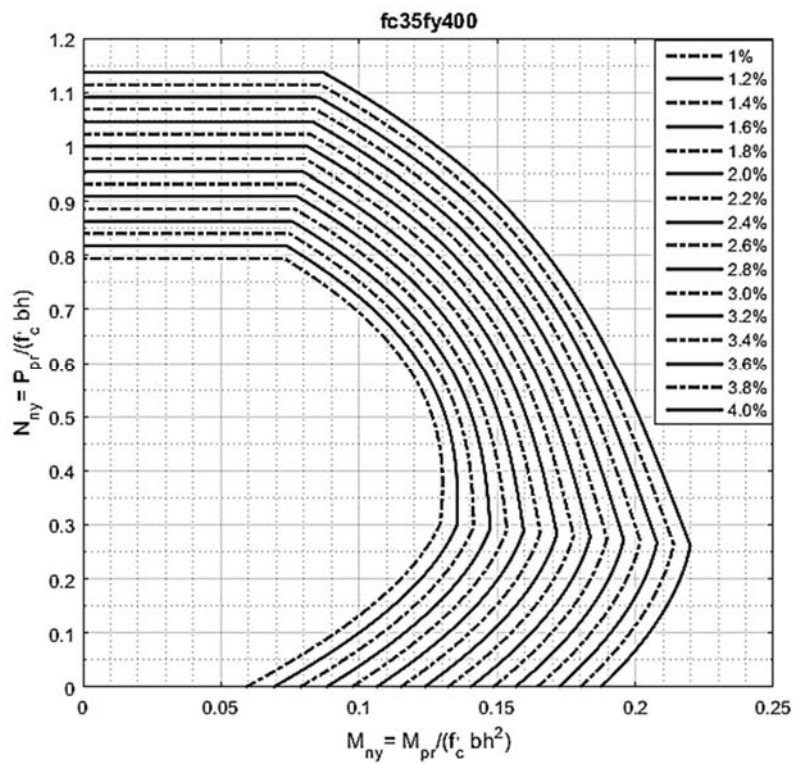
Gambar C-1. $M_{pr}-P_{pr}$, $f'_c = 20$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



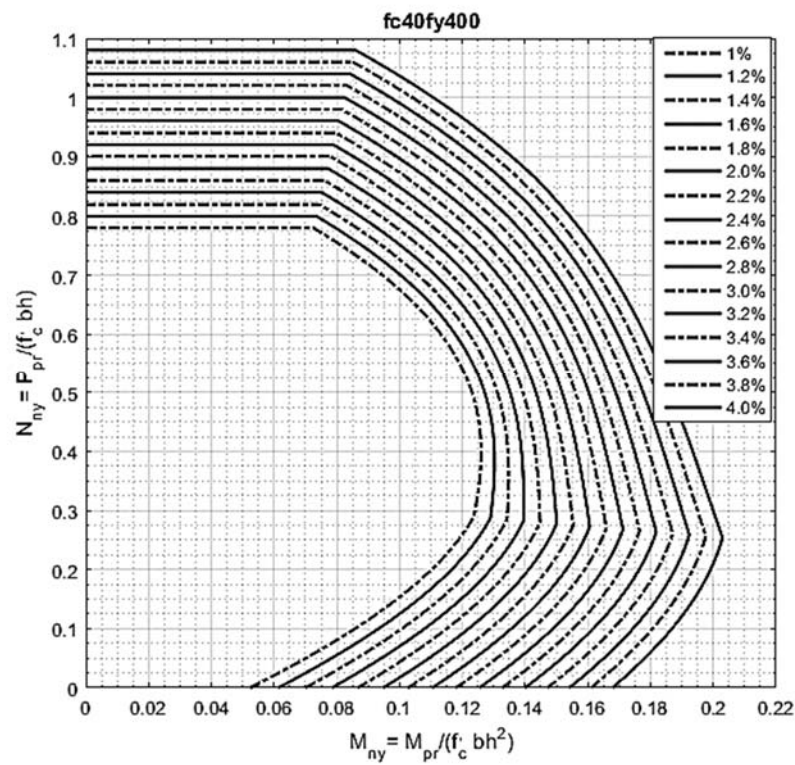
Gambar C-2. $M_{pr}-P_{pr}$, $f'_c = 25$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



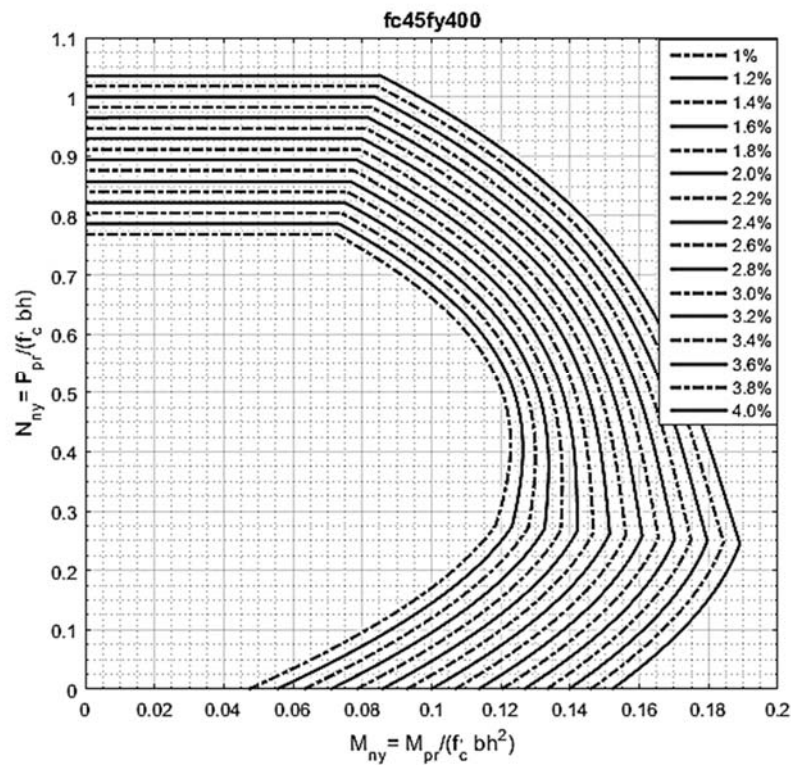
Gambar C-3. $M_{pr}-P_{pr}$, $f'_c = 30$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



Gambar C-4. $M_{pr}-P_{pr}$, $f'_c = 35$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



Gambar C-5. $M_{pr} - P_{pr}$, $f'_c = 40$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$



Gambar C-6. $M_{pr} - P_{pr}$, $f'_c = 45$ MPa, $f_y = 400$ MPa, $\mu = 0,7$