

STUDY ON THE EFFECT OF REINFORCEMENT RATIO ON THE *N-M* INTERACTION DIAGRAM OF CIRCULAR COLUMNS USING A NEW DEVELOP DIRECT COMPUTATIONAL PROCEDURE

Tavio^a and Indra Degree K.^b

ABSTRACT

The calculation of reinforcement ratio of concrete columns is very significant since the calculation will guarantee the columns ductility and reinforced efficiency. However, this calculation spent a lot of time and accuracy. Hence the manual calculation will not be efficient. On the other hand, a lot of computational programs are developed recently for civil engineering calculations. This study presents a useful computer-aided program that can be used to calculate the required longitudinal reinforcement ratio in a circular column. The code of this developed program adopts from SNI 30-2847-2002, which the reduction factors based on governed by the axial load in column capacity. As comparison the developed program also adopts ACI 318-2002, which the tensile strain that controls the reduction factor. The results from this program will be verified with PCA Column for output validity.

KEYWORDS: ACI 318-2002; Circular Column; Longitudinal Reinforcement Ratio; Reduction Factor; SNI 03-2847-2002.

PENDAHULUAN

Kolom merupakan elemen struktur tekan maka keruntuhan suatu kolom merupakan keruntuhan lantai tersebut beserta runtuhnya total elemen struktur tersebut. Pada kenyataannya kolom tidak hanya mengalami beban aksial saja. Dari beban aksial yang ada dan terjadinya eksentrisitas maka timbulah momen. Maka dapat disimpulkan suatu kolom mengalami beban aksial dan momen secara bersamaan, dan hampir tidak ada kolom yang mengalami beban aksial secara sempurna.

Diperlukan tulangan agar kolom mengalami daktilitas. Jika suatu kolom mempunyai sifat daktilitas maka keruntuhan yang terjadi pada kolom tersebut tidak terjadi secara tiba-tiba sehingga memberikan kesempatan untuk pengantisipasi. Untuk mendukung daktilitas maka rasio tulangan pada kolom tersebut harus dibatasi. Rasio tulangan minimum adalah 1% dan maksimum adalah 6%.¹

Faktor yang mempengaruhi rasio tulangan tersebut antara lain adalah luas penampang kolom, mutu beton, mutu tulangan, beban berfaktor yang diterima oleh kolom dan *code* yang digunakan dalam analisa. Oleh karena itu, sangat penting untuk perencana struktur dalam bidang teknik sipil untuk menciptakan suatu program bantu sederhana yang mudah diterapkan untuk menentukan rasio tulangan longitudinal pada kolom karena diperlukan banyak waktu dan ketelitian yang tinggi.

Maka dalam makalah ini akan dikembangkan program bantu teknik sipil serupa yang sederhana dan dikhususkan untuk mencari rasio tulangan longitudinal pada kolom. *Code* yang akan digunakan dalam program bantu ini

berdasarkan peraturan beton yang berlaku di Indonesia yaitu SNI 03-2847-2002¹ dimana faktor reduksi kolom berdasarkan akibat besarnya beban aksial yang diterima kolom. Sebagai perbandingan aplikasi program bantu ini juga akan berdasarkan *code* terbaru yaitu ACI 318-2002² dimana faktor reduksi kolom berdasarkan pada regangan tarik yang terjadi pada kolom.

Pada aplikasi program bantu yang akan dikembangkan kali ini akan menggunakan bahasa pemrograman Visual Basic 6.0. Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam makalah ini antara lain membuat suatu program bantu sederhana yang aplikabel (mudah diterapkan) untuk mengetahui kebutuhan tulangan (rasio tulangan) longitudinal pada kolom berpenampang bulat, mendapatkan titik koordinat kombinasi beban yang tepat pada diagram interaksi P-M. Sehingga nantinya kebutuhan tulangan longitudinal pada kolom berpenampang bulat dapat dipenuhi secara akurat dan mengetahui bahwa nilai *output* aplikasi program yang telah dibuat dapat dipertanggungjawabkan dengan membuat verifikasi dengan aplikasi program teknik sipil yang lain yaitu PCA Column.

METODOLOGI

Pada tahap ini dilakukan studi literatur mengenai konsep dasar kolom, perilakunya ketika menerima beban aksial dan momen lentur serta kapasitas kolom yang digambarkan dalam diagram interaksi P-M kolom. Selain itu, dilakukan juga studi literatur mengenai bahasa pemrograman Visual Basic 6.0.

Diagram Interaksi P-M

Untuk mendapatkan rasio tulangan longitudinal pada kolom digunakan analisa diagram interaksi P-M kolom. Dimana diagram interaksi ini didapat dengan menggambarkan plot titik-titik kombinasi beban aksial dan momen yang diterima oleh kolom [3-6]. Sifat diagram interaksi yang ada dengan mendapatkan minimal lima titik yaitu :

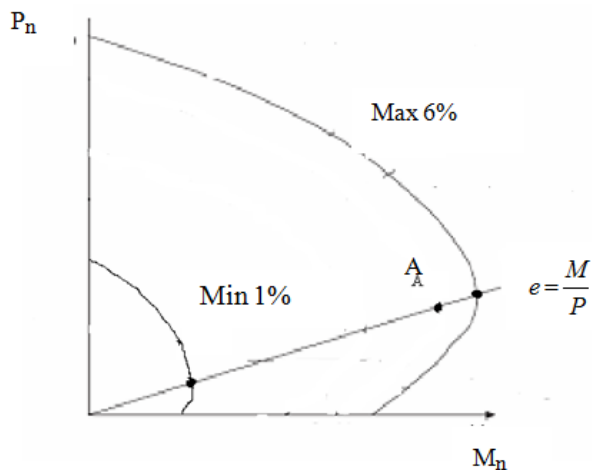
1. Beban aksial tekan maksimum

Kolom dalam keadaan beban konsentris dapat dituliskan sebagai rumus dibawah ini:

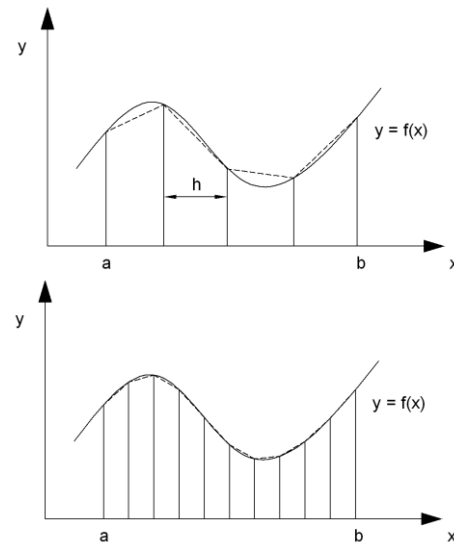
^aLecturer, Department of Civil Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), ITS Campus, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia.

^bStudent, Department of Civil Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), ITS Campus, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia

Note. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on January 06, 2010; approved on February 23, 2010. Discussion open until November 2010. This paper is part of the ITS Journal of Civil Engineering, Vol. 30, No.1, May 2010. © ITS Journal of Civil Engineering, ISSN 2086-1206/2010.



Gambar 1. Diagram Interaksi Aksial-Momen (P-M)



Gambar 2. Pendekatan cara trapezoidal

$$P_{no} = (0.85 f'_c)(A_g - A_{st}) + f_y(A_{st}) \quad (1)$$

dimana

f'_c = kuat tekan maksimum benda uji silinder beton

A_g = penampang bruto kolom

f_y = kuat leleh tulangan

A_{st} = luas tulangan pada penampang

2. Beban aksial tekan maksimum yang diijinkan

$$P_{n maks} = 0.8 P_{no} \quad (2)$$

$$M_n = P_{n maks} \cdot e_{min} \quad (3)$$

3. Beban lentur dan aksial pada kondisi seimbang atau *balance*, nilainya ditentukan dengan mengetahui kondisi regangan ultimate beton ϵ_{cu} ; dan regangan baja

$$\epsilon_s = \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (4)$$

4. Beban lentur pada kondisi beban aksial nol, kondisi seperti pada balok.

5. Beban aksial tarik maksimum

$$P_{n-T} = \sum_{i=1}^n -f_y A_{st} \quad (5)$$

Kelima titik di atas adalah titik-titik minimum yang harus ada pada diagram interaksi. Sebelumnya dengan input luas penampang kolom bulat yang ada ditetapkan rasio tulangan minimum (ρ_{min}) 1% dan rasio tulangan maksimum (ρ_{max}) 6%. Dimana luas tulangan dihitung sebagai berikut:

$$A_{st-min} = \rho_{min} \times \frac{1}{4} \times \pi \times h^2 \quad (6a)$$

$$A_{st-max} = \rho_{max} \times \frac{1}{4} \times \pi \times h^2 \quad (6b)$$

Dalam mencari beban aksial dan momen yang dialami suatu kolom maka diperlukan garis netral c dan regangan ϵ_s dengan perumusan berikut:

$$c = \left(\frac{0.003}{0.003 - \epsilon_y} \right) d_1 \quad (7)$$

$$\epsilon_{si} = \left(\frac{c - d_i}{c} \right) \epsilon_{cu} \quad (8)$$

Dimana ϵ_{si} dan d_i berturut-turut adalah regangan ke- i lapisan tulangan dan jarak lapisan tulangan ke serat tekan terluar. Setelah nilai c dan ϵ_{s1} , ϵ_{s2} , ϵ_{s3} dan seterusnya diketahui, maka gaya yang bekerja pada beton dan pada tiap lapisan tulangan dapat dihitung. Menentukan harga c diperlukan coba-coba, oleh karena itulah program bantu komputer sangat diperlukan agar tercapai ketelitian yang tinggi.

Setelah penggambaran plot diagram interaksi dengan rasio tulangan maksimum dan rasio tulangan minimum maka digambarkan plot juga input kombinasi beban aksial-momen yang terjadi pada kolom. Jika titik plot kombinasi beban dari input yang ada tidak berada diantara rasio tulangan maksimum dan minimum maka kolom tidak mampu menahan kombinasi beban yang terjadi maka diperlukan adanya perubahan penampang kolom atau diameter tulangan longitudinal. Sedangkan jika titik plot kombinasi beban dari input yang ada berada diantara rasio tulangan maksimum dan rasio tulangan minimum maka rasio tulangan yang dibutuhkan dapat dicari.

Metode Iterasi

Untuk mengetahui rasio tulangan didapatkan dengan eksentrisitas. Sebelumnya tetapkan dulu $Mn_{batas min}$ dan $Mn_{batas max}$ dengan eksentrisitas yang sama dengan eksentrisitas akibat kombinasi beban aksial dan momen input yang terjadi pada kolom. Seperti yang diperlihatkan titik A pada Gambar 1.

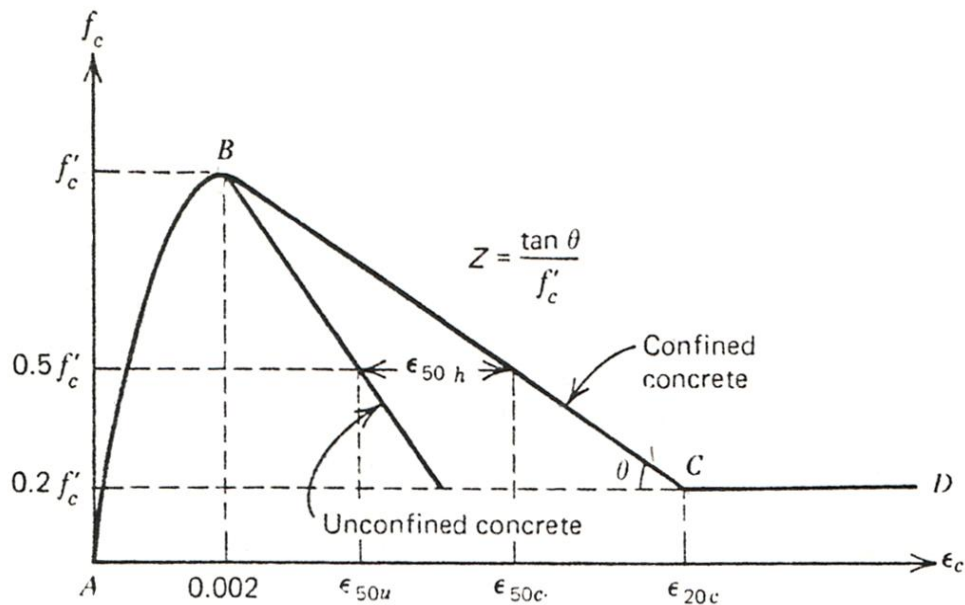
Maka untuk mengetahui berapa rasio tulangan akibat pembebanan tersebut memerlukan adanya metode pendekatan interpolasi. Interpolasi menggunakan metode numerik Bolzano.

Pada metode numerik Bolzano yang pertama dilakukan adalah mencari nilai tengah, ρ_i ,

$$\rho_i = \frac{\rho_{min(n)} + \rho_{max(n)}}{2} \quad (9)$$

Jika,

$$Mn_{batas min(n)} \times Mn_{(\rho_i)} < 0 \quad (10)$$



Gambar 3. Kurva tegangan-regangan beton, pemodelan oleh Kent-Park³

Maka dapat diketahui bahwa nilai $Mn_{batas\ min(n)}$ adalah $Mn_{(\rho_i)}$ dan nilai $Mn_{batas\ max}$ adalah tetap. Tetapi jika,

$$Mn_{batas\ min(n)} \times Mn_{(\rho_i)} > 0 \quad (11)$$

Maka dapat diketahui bahwa $Mn_{batas\ min(n)}$ adalah sama sedangkan nilai $Mn_{batas\ max}$ adalah $Mn_{(\rho_i)}$

Interpolasi ini diteruskan berulang-ulang hingga tercapai,

$$|Mn_{batas\ max(n)} - Mn_{(\rho_i)}| < \epsilon \quad (12)$$

dan

$$|Mn_{(\rho_i)} - Mn_{batas\ min(n)}| < \epsilon \quad (13)$$

Metode Numerik

Untuk pendekatan luasan tegangan tidak memakai metode *stress block*, melainkan berupa non linier yang langsung dihitung secara numerik. Yang perlu diperhatikan untuk kolom penampang bulat, dengan luas bidang tekan berupa kurva segmen lingkaran dengan tinggi a , luas kurvanya harus dihitung untuk mengetahui gaya dan momen nominal penampang.

Metode numerik yang digunakan untuk mendapatkan gaya desak beton (C_c) dan jarak titik berat stress-strain diagram diukur dari pusat penampang (a) adalah pendekatan cara trapezoidal. Yaitu mencari rata-rata tinggi kurva potongan awal dan potongan akhir. Gambar pendekatan cara trapezoidal dapat dilihat pada Gambar 2.

Dari ilustrasi di atas, terlihat bahwa pias-pias yang ada sebaiknya terdiri atas interval yang seragam (tertentu), sedangkan tingginya berbeda tergantung pada fungsi $y = f(x)$.

Luas total area di bawah kurva antara titik $x = a$ sampai $x = b$ adalah:

$$A_{total} = \frac{h}{2} ((f(x_0) + f(x_1)) + (f(x_1) + f(x_2)) + \dots + (f(x_{n-1}) + f(x_n))) \quad (14)$$

$$A_{total} = \frac{h}{2} (f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)) \quad (15)$$

Metode Pengekangan

Karena pilihan perhitungan dengan efek pengekangan juga diperhitungkan dalam program bantu ini maka metode pengekangan yang dipakai menggunakan metode Kent-Park.³

Berdasarkan hasil-hasil eksperimen yang dilakukan oleh Kent-Park³, mereka mengusulkan suatu bentuk kurva tegangan-regangan (perhatikan Gambar 3). Bentuk kurva usulan ini dibagi menjadi tiga bagian (*section*) berdasarkan nilai regangannya.

Nilai tegangan f_c dapat dihitung dengan rumus:

Daerah AB (*Ascending Branch*) : $\epsilon_c \leq 0,002$

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{0,002} - \left(\frac{\epsilon_c}{0,002} \right)^2 \right] \quad (16)$$

Daerah BC (*Descending Branch*) : $0,002 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{20c}$

$$f_c = f'_c [1 - Z (\epsilon_c - 0,002)] \quad (17)$$

$$Z = \frac{0,5}{\epsilon_{50u} + \epsilon_{50h} - 0,002} \quad (18)$$

$$\epsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002 f'_c}{f'_c - 1000} \quad (19)$$

$$\epsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b'}{s_h}} \quad (20)$$

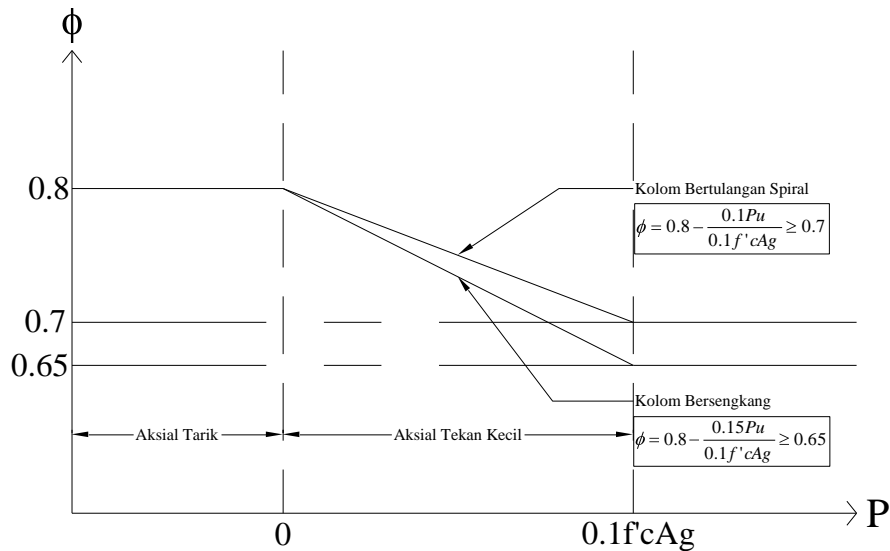
Daerah CD : $\epsilon_c \geq \epsilon_{20c}$

$$f_c = 0,2 f'_c \quad (21)$$

Dimana:

f'_c = kekuatan silinder beton dalam psi (1 psi = 0,00689 N/mm²)

ρ_s = rasio dari volume sengkang terhadap volume inti beton terkekang diukur dari sisi luar sengkang



Gambar 5. Faktor reduksi SNI 2002 untuk beban aksial dan lentur (*Limit State*).

b'' = lebar daerah inti beton terkekang diukur dari sisi luar sengkang
 s_h = spasi sengkang

Metode Perencanaan Elemen Struktur Beton Bertulang

a. *Limit State Method*

Pada peraturan Indonesia masih menggunakan metode *limit state*. Dinamakan *limit state* karena terjadi keadaan dimana struktur tidak layak digunakan. *Limit state* dihindari sampai umur elemen struktur yang diharapkan.

Dalam metode batas ultimat beton bertulang didesain bergantung pada kondisi regangan plastisnya. Dalam hal ini beton mencapai kekuatan tekan maksimumnya dan baja mencapai leleh. Kekuatan nominal penampang tersebut setelah dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan harus mampu menerima beban berfaktor.

Untuk menjamin keamanan struktur, metode ini menggunakan filosofi keamanan LRFD (*Load Resistance Factor Design*), yaitu :

$$\text{kuat rencana} > \text{kuat perlu}$$

$$\phi R \geq \lambda Q$$

Dimana :

- ϕ = faktor reduksi,
- R = resistance atau kekuatan nominal,
- λ = faktor beban, dan
- Q = beban kerja

Ketentuan mengenai faktor reduksi pada elemen struktur akibat tekan dan lentur yang ada pada SNI 2002 atau pada *Limit State* ini mengacu pada pasal 9.3.2.2 dimana:

- Aksial tekan dan aksial tekan dengan lentur :
- Komponen struktur tulangan spiral 0.7
- Komponen struktur lainnya 0.65

Namun bila beban aksial yang bekerja lebih kecil dari $0,1f'_c A_g$ maka faktor reduksi tersebut boleh ditingkatkan hingga $0,8^1$ atau $0,9^2$, hal ini untuk menunjukkan bahwa struktur mengalami beban aksial yang kecil dan mengalami beban lentur yang besar, atau pada saat itu kolom hampir berperilaku sama dengan balok.

b. *Unified Design Method*⁷

Pada metode ini faktor reduksi berdasarkan regangan yang terjadi pada elemen struktur, oleh karena itu faktor reduksi ini bisa diterapkan pada balok maupun kolom. Terdapat tiga batas kondisi regangan yang terjadi seperti pada Gambar 6. dan sebagai berikut:

1. Kasus batas terkontrol-tarik ($\epsilon_t > 0,005$);

$$\frac{c}{d_t} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_t} = \frac{0,003}{0,003 + 0,005} = 0,375 \quad (22)$$

$$a = \beta_1 c = 0,375 \beta_1 d_t \quad (23)$$

Dari segitiga-segitiga yang serupa

$$\epsilon'_s = 0,003 \left(1 - \frac{d'}{c} \right) = 0,003 \left(1 - 2,67 \frac{d'}{d_t} \right) \quad (24)$$

2. Kasus batas terkontrol-tekan ($\epsilon_t = 0,005$)

Batas regangan dalam tulangan tarik dalam kasus ini, yaitu, f_y / E_s , menggambarkan *keadaan regangan seimbang*, dimana tulangan tarik meleleh secara serentak dengan kehancuran beton pada serat-serat tekan terluar beton. Sebagaimana kedalaman sumbu netral c , meningkat melewati keadaan ini, harga regangan ϵ_t dalam tulangan tarik akan berkurang dibawah regangan lelehnya. Sebagai hasilnya, tegangan dalam tulangan tarik menjadi lebih kecil dari kekuatan leleh f_y .

Ini berhubungan dengan regangan disain ultimat $\epsilon_c = 0,003$ mm/mm dalam serat-serat tekan terluar beton, oleh Peraturan ACI-318. Peraturan-peraturan lainnya memperbolehkan regangan-regangan tekan disain yang lebih tinggi, seperti 0,0035 dan 0,0038

$$\frac{c}{d_t} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_t} = \frac{0,003}{0,003 + f_y / E_s}$$

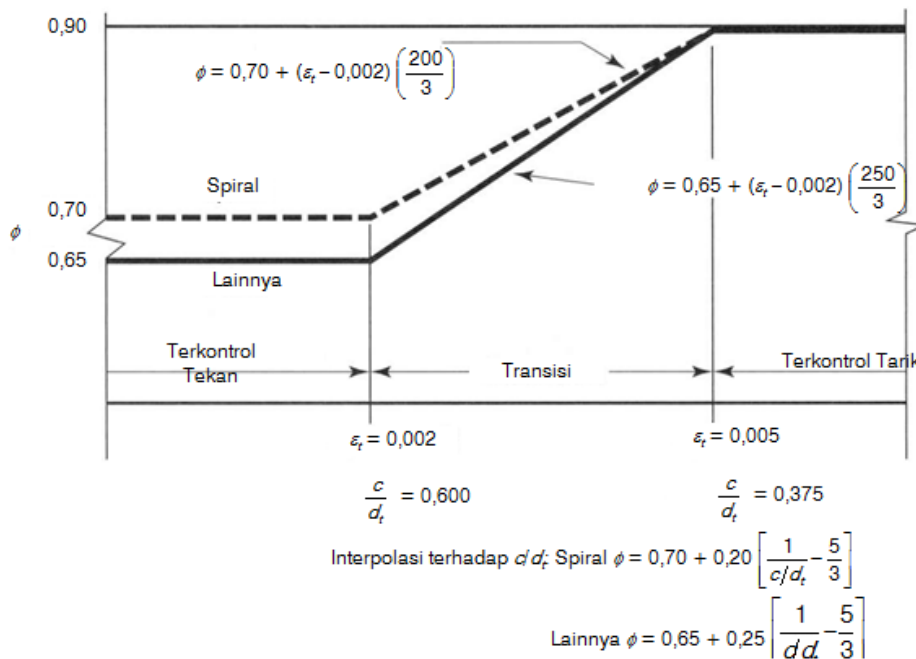
$$= \frac{0,003}{0,003 + 0,002} = 0,60 \quad (25)$$

$$a = \beta_1 c = 0,60 \beta_1 d_t \quad (26)$$

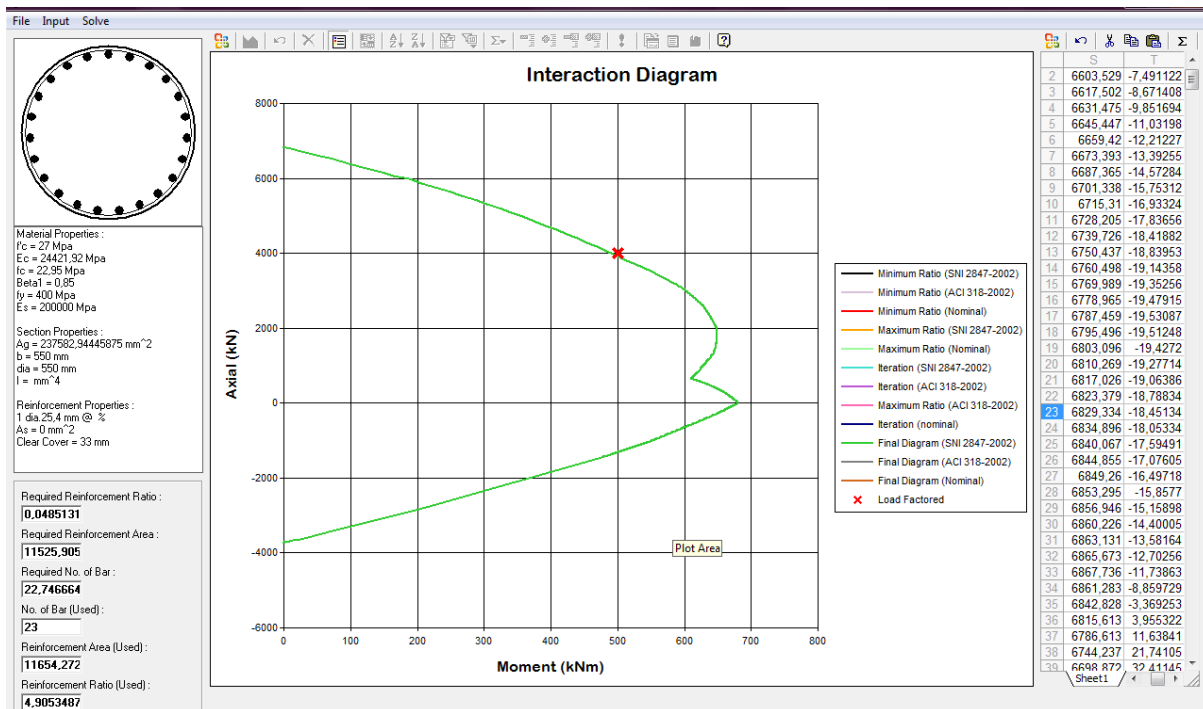
Dari segitiga-segitiga yang serupa,

$$\frac{c}{c - d'} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_s} = \frac{0,003}{\epsilon'_s} \quad (27)$$

memberikan



Gambar 6. Daerah-Daerah Batas Regangan dan Variasi Faktor Reduksi Kekuatan ϕ dengan Regangan Tarik Neto ε_t



Gambar 7. Output program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 1.1

$$\varepsilon'_s = 0,003 \left(1 - \frac{d'}{c} \right) \quad (28)$$

3. Daerah transisi untuk regangan batas dengan perilaku antara kondisi poin 1 dan 2 Ini mengkararakteristikan anggota-anggota tekan dimana tulangan tarik A_s telah meleleh tetapi tulangan tekan A'_s mempunyai sebuah tingkat tegangan $f'_s \leq f_y$ tergantung pada geometri penampangannya. Harga-harga ϕ antara berubah secara linier dengan ε_t dari $\phi = 0,90$ bila $\varepsilon_t > 0,005$ menjadi $\phi = 0,65$ untuk kolom-kolom terikat, atau $\phi = 0,70$ untuk kolom-kolom spiral bila $\varepsilon_t \leq 0,002$. Harus dicatat bahwa untuk anggota-anggota lentur non-prategang dan untuk

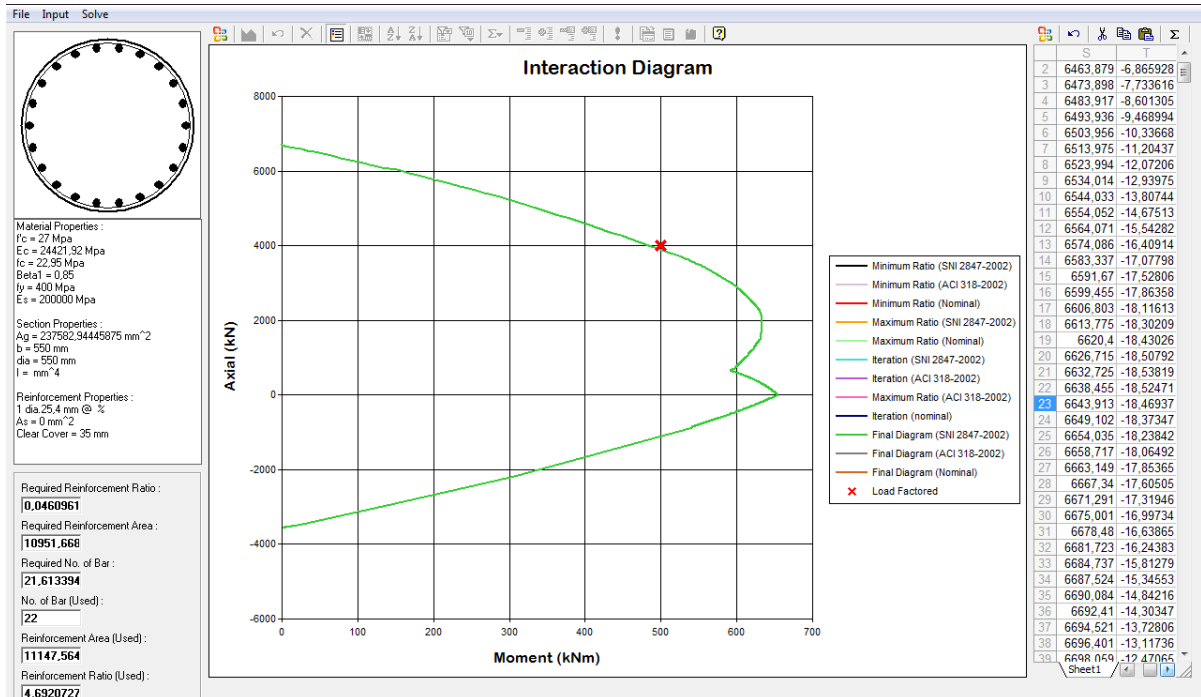
anggota-anggota non-prategang dengan beban aksial kurang dari $0,10f'_cA_g$, regangan tarik neto ε_t harus tidak kurang dari 0,004. Karenanya, dalam zona transisi dari Gambar 6, harga regangan minimum pada anggota-anggota lentur untuk penentuan harga ϕ adalah 0,004. Batasan ini dibutuhkan, sebagaimana harga ϕ jika tidak dapat menjadi sangat rendah sehingga tulangan tambahan akan diperlukan untuk memberikan kekuatan momen nominal perlu.

Merancang Program Memakai Visual Basic 6.0

Langkah awal yang dilakukan pada tahap ini adalah mempelajari dasar-dasar pemrograman Visual Basic 6.0.

Tabel 1. Perbandingan hasil diameter tulangan

No		Kasus 1.1	Kasus 1.2
1	Diameter sengkang (mm)	8	10
2	Rasio tulangan perlu (%)	4,85	4,6
3	Luas tulangan perlu (mm ²)	11525,9	10951,6
4	Jumlah tulangan perlu	22,746	21,6133
5	Jumlah tulangan pasang	23	22
6	Luas tulangan terpasang (mm ²)	11654,27	11147,56
7	Rasio tulangan terpasang (%)	4,905	4,692



Gambar 8. Output program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 1.2

Setelah mempelajari bahasa pemrograman ini, kemudian dilanjutkan dengan membuat program sederhana mengenai rasio tulangan pada kolom bulat. Langkah-langkah pembuatan program adalah sebagai berikut:

1. Membuat *script* program untuk mencari aksial, momen dan eksentrisitas pada kolom berpenampang bulat.
2. Membuat listing program untuk diagram interaksi aksial-momen.
3. Membuat rancangan tampilan program (*interface*).
4. Mengecek kelengkapan menu dan melengkapi tampilan.
5. Mengoperasikan program (*running program*) untuk mengecek apakah semua listing program bisa terbaca dan dapat berjalan dengan baik.
6. Melakukan verifikasi atau mengecek kebenaran hasil output dari program sederhana yang telah dibuat dengan PCA column.

STUDI KASUS

Untuk mengetahui kebenaran dan ketelitian program bantu perhitungan rasio tulangan longitudinal *ITS Column v.1.2* ini, maka diperlukan *verifikasi* hasil output program tersebut dengan program lain seperti *PCA Column*. Dengan adanya program ini juga dapat dimunculkan

kasus-kasus yang akan berhubungan dengan *Confinement's effect* dan *Unconfined* pada kolom bulat.

Pengaruh Diameter Tulangan Sengkang

Pengaruh diameter tulangan sengkang akan dibahas pada kasus 1.1 dan kasus 1.2. Pada kedua kasus tersebut akan dibedakan pada input diameter tulangan sengkang yang ada.

Kasus 1.1

Akan dihitung rasio tulangan dan jumlah tulangan longitudinal dengan data – data seperti di bawah ini :

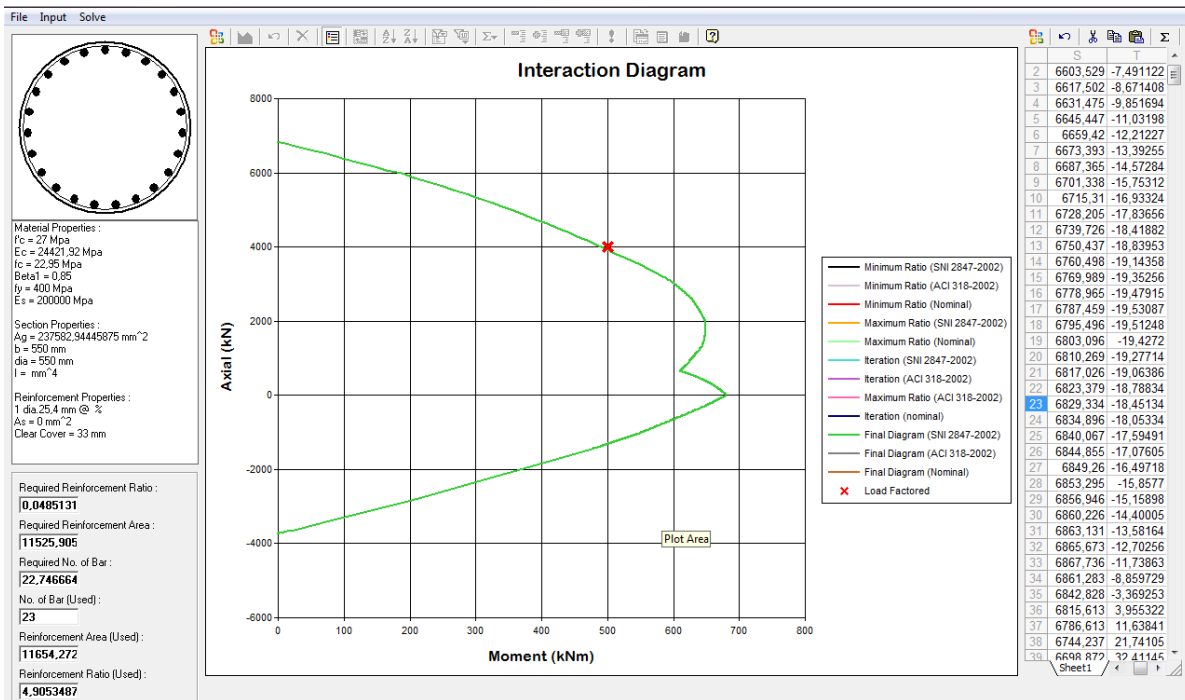
1. Dimensi kolom, *Diameter* = 550 mm
2. Mutu beton, f'_c = 27,5 MPa
3. Mutu tulangan, f_y = 400 MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, ϕ_l = 25,4 mm (#25)
5. Diameter tulangan transversal/sengkang, ϕ_s = 8 mm
6. Selimut beton (*decking*) = 25 mm
7. Beban aksial terfaktor, P_u = 4000 kN
8. Momen terfaktor, M_u = 500 kNm

Hasil luaran dari program *ITS Column v.1.2* untuk kasus 1.1 ini dapat dilihat dalam Gambar 7.

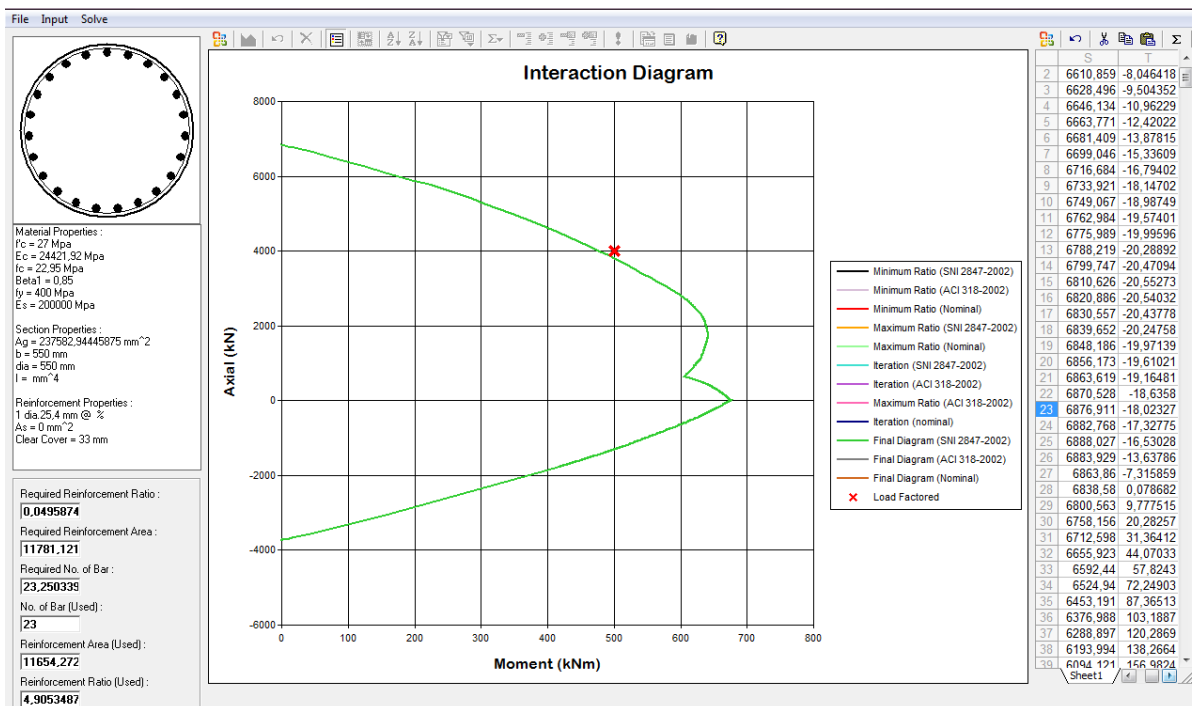
Kasus 1.2

Akan dihitung rasio tulangan dan jumlah tulangan longitudinal dengan data – data seperti di bawah ini :

1. Dimensi kolom, *Diameter* = 550 mm
2. Mutu beton, f'_c = 27,5 MPa



Gambar 9. Output program PCA Column untuk contoh kasus 2.1



Gambar 10. Output program PCA Column untuk contoh kasus 2.2

3. Mutu tulangan, $f_y = 400$ MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, $\phi_l = 25,4$ mm (#25)
5. Diameter tulangan transversal/sengkan, $\phi_s = 10$ mm
6. Selimut beton (*decking*) = 25 mm
7. Beban aksial terfaktor, $P_u = 4000$ kN
8. Momen terfaktor, $M_u = 500$ kNm

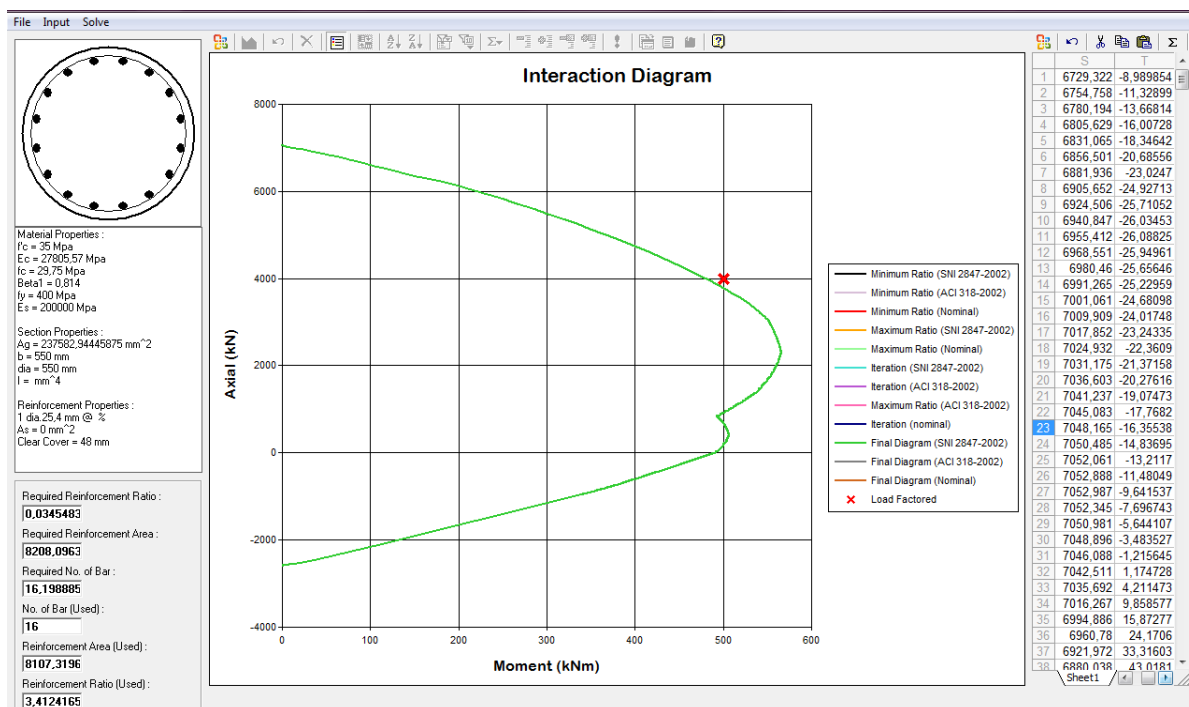
Hasil pada Tabel 1 adalah bahwa jika diameter sengkang diperbesar sedangkan dimensi beton, dimensi tulangan longitudinal, mutu beton dan mutu tulangan longitudinal tetap maka rasio tulangan longitudinal yang diperlukan lebih kecil. Diameter yang lebih besar

menghasilkan pengekanan yang lebih efektif. Bila diameter sengkang kecil, maka sengkang itu hanya akan berperilaku sebagai pengikat antar sudut dikarenakan kekakuan lenturnya kecil. Karena kekakuannya kecil, maka mungkin saja bagian tengahnya (daerah antara dua sudut) akan melendut sehingga keefektifan pengekanan di bagian tengah sengkang menjadi lebih kecil. Dengan diameter sengkang yang lebih besar, luas area yang terkekang efektif bisa bertambah karena kekakuan lenturnya besar.

Hasil luaran dari program ITS Column v.1.2 untuk kasus 1.2 ini dapat dilihat dalam Gambar 8.

Tabel 2. Perbandingan hasil jarak antar sengkang

No		Kasus 2.1	Kasus 2.2	Selisih
1	Jarak antar sengkang (cm)	8	10	2
2	Rasio tulangan perlu (%)	4,85	4,958	0,108
3	Luas tulangan perlu (mm ²)	11525,90	11781,12	255,22
4	Jumlah tulangan perlu	22,746	23,25	0,504
5	Jumlah tulangan pasang	23	23	0
6	Luas tulangan terpasang (mm ²)	11654,27	11654,27	0
7	Rasio tulangan terpasang (%)	4,905	4,905	0



Gambar 11. Output program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 3.1

Pengaruh Jarak Spasi Tulangan Sengkang

Pengaruh jarak tulangan sengkang pada kolom terkekang akan dibahas pada kasus 2.1 dan kasus 2.2. Pada kedua kasus tersebut akan dibedakan pada input jarak spasi tulangan sengkang yang ada.

Kasus 2.1

1. Dimensi kolom, $Diameter = 550$ mm
2. Mutu beton, $f'_c = 27,5$ MPa
3. Mutu tulangan, $f_y = 400$ MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, $\phi_l = 25,4$ mm (#25)
5. Diameter tulangan transversal/sengkang, $\phi_s = 8$ mm
6. Selimut beton (*decking*) = 25 mm
7. Beban aksial terfaktor, $P_u = 4000$ kN
8. Momen terfaktor, $M_u = 500$ kNm
9. Spasi sengkang = 8 cm

Hasil luaran dari program PCA Column untuk contoh kasus 2.1 dapat dilihat pada Gambar 9.

Kasus 2.2

1. Dimensi kolom, $Diameter = 550$ mm
2. Mutu beton, $f'_c = 27,5$ MPa
3. Mutu tulangan, $f_y = 400$ MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, $\phi_l = 25,4$ mm (#25)
5. Diameter tulangan transversal/sengkang, $\phi_s = 8$ mm
6. Selimut beton (*decking*) = 25 mm
7. Beban aksial terfaktor, $P_u = 4000$ kN
8. Momen terfaktor, $M_u = 500$ kNm

9. Spasi sengkang = 10 cm

Hasil luaran program PCA Column untuk contoh kasus 2.2 pada Gambar 10.

Pada Tabel 2 terlihat bahwa, walaupun rasio tulangan terpasang sama tetapi luas tulangan perlu pada kolom yang memiliki jarak antar tulangan sengkang yang lebih besar memerlukan tulangan longitudinal lebih rapat. Perbandingan jarak/spasi antar sengkang terhadap dimensi penampang inti, karena semakin rapat sengkang akan menambah keefektifan pengekangan. Semakin renggang jarak sengkang maka akan semakin banyak volume beton yang yang tidak terkekang dan mungkin akan rontok (*spalling*).

Pengaruh Mutu Beton

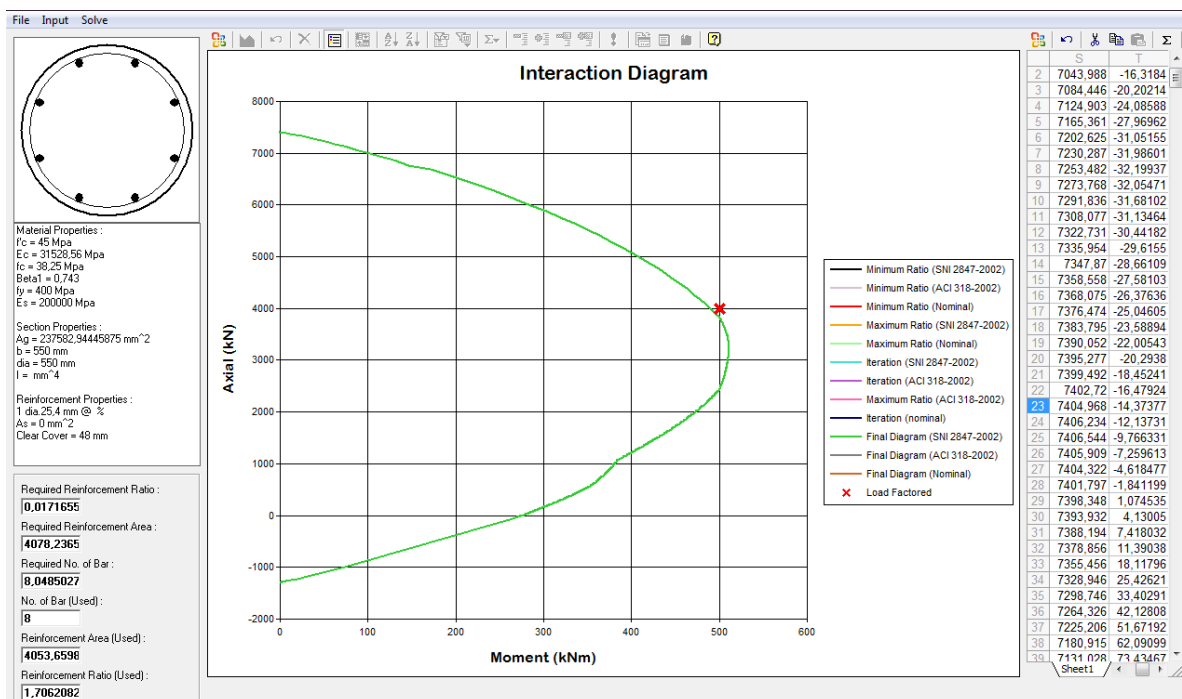
Pengaruh mutu beton pada kolom terkekang akan dibahas pada kasus 3.1 dan kasus 3.2. Pada ketiga kasus tersebut akan dibedakan pada input mutu beton yang ada.

Kasus 3.1

1. Dimensi kolom, $Diameter = 550$ mm
2. Mutu beton, $f'_c = 35$ MPa
3. Mutu tulangan, $f_y = 400$ MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, $\phi_l = 25,4$ mm (#25)
5. Diameter tulangan transversal/sengkang, $\phi_s = 8$ mm
6. Selimut beton (*decking*) = 40 mm
7. Beban aksial terfaktor, $P_u = 4000$ kN
8. Momen terfaktor, $M_u = 500$ kNm

Tabel 3. Perbandingan hasil mutu beton

No		Kasus 3.1	Kasus 3.2	Selisih
1	Mutu beton (Mpa)	35	45	10
2	Rasio tulangan perlu (%)	3,45	1,71	1,74
3	Luas tulangan perlu (mm ²)	8208,09	4078,23	4129,86
4	Jumlah tulangan perlu	16,198	8,048	8,15
5	Jumlah tulangan pasang	16	8	8
6	Luas tulangan terpasang (mm ²)	8107,319	4053,65	4053,669
7	Rasio tulangan terpasang (%)	3,41	1,706	1,704



Gambar 12. Output program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 3.2

Hasil luaran program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 3.1 Gambar 11.

Kasus 3.2

1. Dimensi kolom, *Diameter* = 550 mm
2. Mutu beton, f'_c = 45 MPa
3. Mutu tulangan, f_y = 400 MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, ϕ_l = 25,4 mm (#25)
5. Diameter tulangan transversal/senggang, ϕ_s = 8 mm
6. Selimut beton (*decking*) = 40 mm
7. Beban aksial terfaktor, P_u = 4000 kN
8. Momen terfaktor, M_u = 500 kNm

Hasil dari *output* program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 3.2 dapat dilihat pada Gambar 12.

Hasil pada Tabel 3 terlihat bahwa, dengan peningkatan mutu beton walaupun hanya 10 MPa tetapi dapat mereduksi kebutuhan tulangan longitudinal yang terpakai hingga 50%. Sehingga dapat dikatakan semakin besar mutu beton maka semakin kecil rasio tulangan terpasang pada kolom tersebut.

Pengaruh Dimensi Penampang

Pengaruh dimensi penampang pada kolom terkekang akan dibahas pada kasus 4.1 dan kasus 4.2. Pada kedua kasus tersebut akan dibedakan pada input diameter kolom yang ada.

Kasus 4.1

1. Dimensi kolom, *Diameter* = 550 mm
2. Mutu beton, f'_c = 30 MPa
3. Mutu tulangan, f_y = 400 MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, ϕ_l = 25,4 mm (#25)
5. Diameter tulangan transversal/senggang, ϕ_s = 8 mm
6. Selimut beton (*decking*) = 40 mm
7. Beban aksial terfaktor, P_u = 4000 kN
8. Momen terfaktor, M_u = 500 kNm

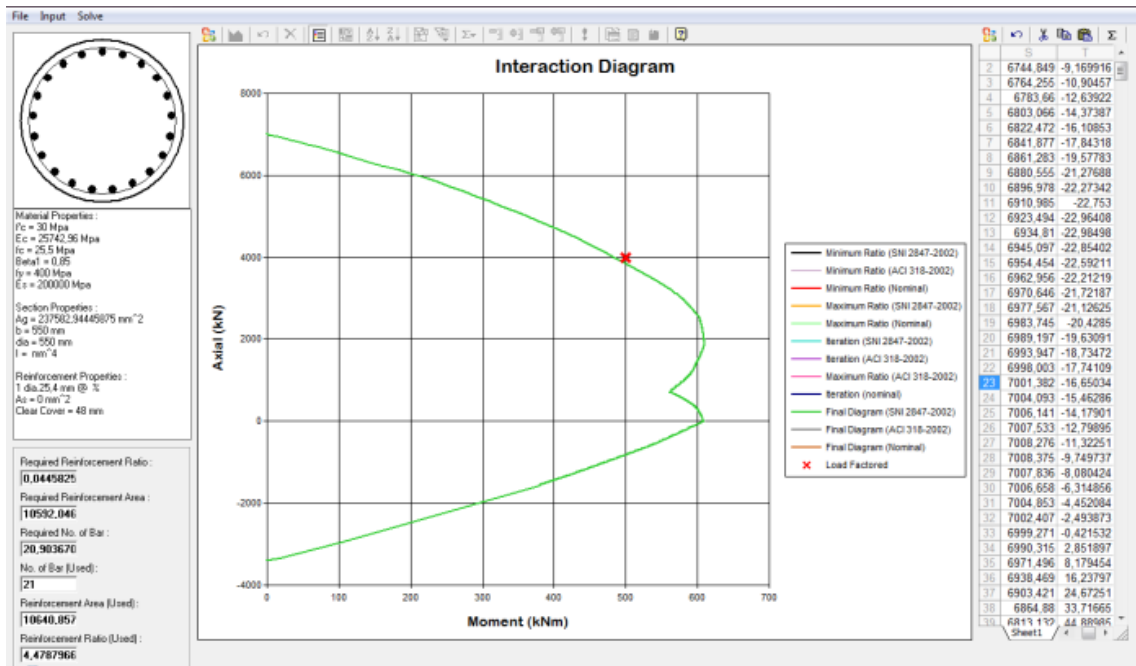
Hasil luaran dari program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 4.1 dapat dilihat pada Gambar 13.

Kasus 4.2

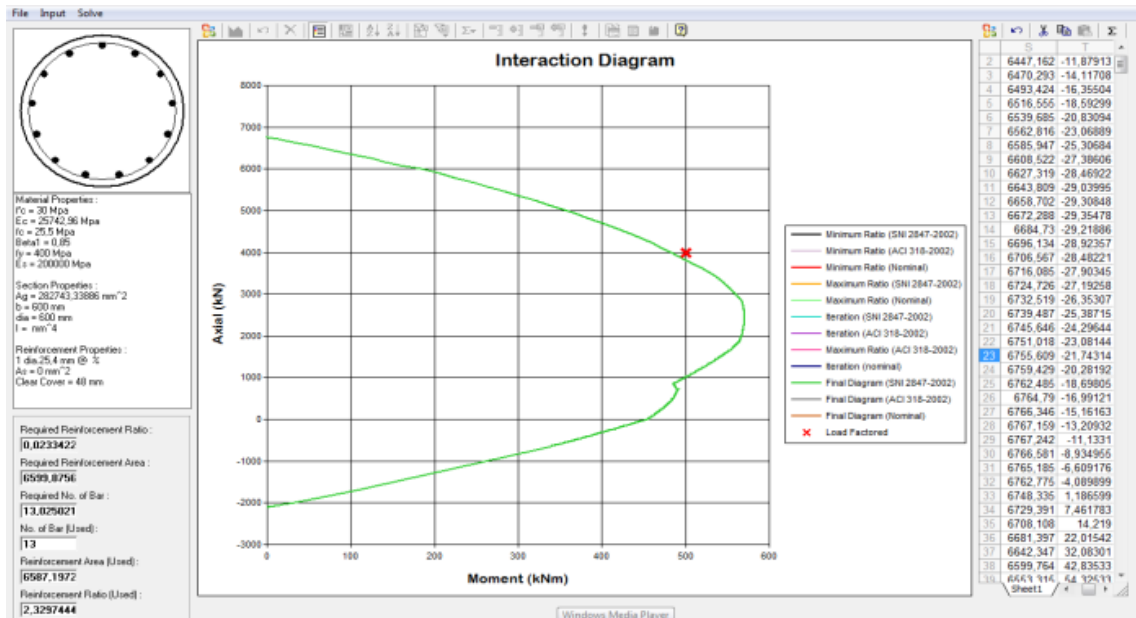
1. Dimensi kolom, *Diameter* = 600 mm
2. Mutu beton, f'_c = 30 MPa
3. Mutu tulangan, f_y = 400 MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, ϕ_l = 25,4 mm (#25)
5. Diameter tulangan transversal/senggang, ϕ_s = 8 mm
6. Selimut beton (*decking*) = 40 mm
7. Beban aksial terfaktor, P_u = 4000 kN
8. Momen terfaktor, M_u = 500 kNm

Hasil luaran dari program program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 4.2 dapat dilihat pada Gambar 14.

Hasil pada Tabel 4 terlihat bahwa, dengan peningkatan dimensi penampang menjadi lebih besar



Gambar 13. Output program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 4.1



Gambar 14. Output program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 4.2

Tabel 4. Perbandingan hasil diameter kolom

No		Kasus 4.1	Kasus 4.2	Selisih
1	Diameter kolom (mm)	550	600	50
2	Rasio tulangan perlu (%)	4,45	2,33	2,12
3	Luas tulangan perlu (mm ²)	10592,04	6599,875	3992,165
4	Jumlah tulangan perlu	20,903	13,025	7,878
5	Jumlah tulangan pasang	21	13	8
6	Luas tulangan terpasang (mm ²)	10640,85	6587,19	4053,66
7	Rasio tulangan terpasang (%)	4,478	2,3297	2,149

maka memberikan reduksi pada kebutuhan tulangan longitudinal yang diperlukan kolom untuk menahan beban aksial 500 kN dan momen 4000 kNm.

Pengaruh Mutu Tulangan Longitudinal

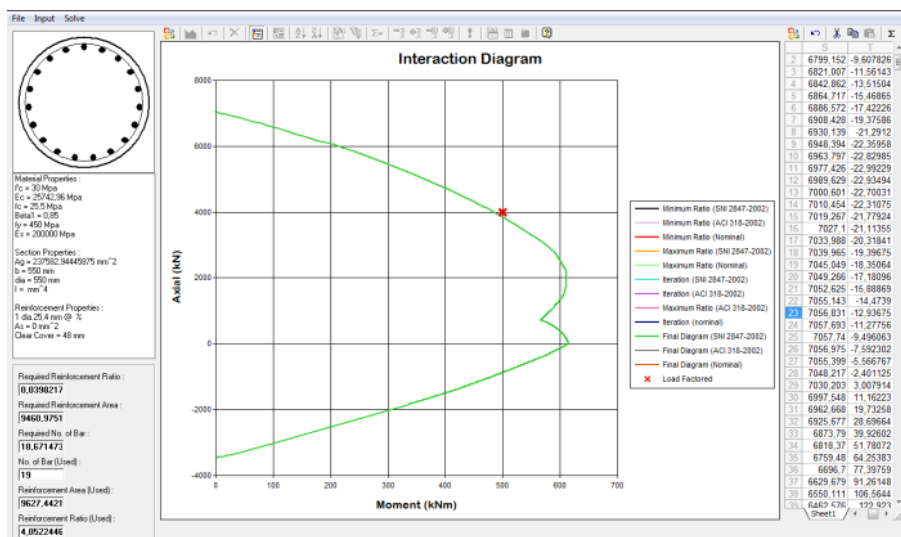
Penggunaan mutu tulangan longitudinal lebih besar, tentu menghasilkan gaya pada baja lebih besar, sehingga

berkontribusi ke kekuatan momen penampang yang lebih besar. Hal ini terverifikasi pada hasil program yang dikembangkan dengan menunjukkan hasil kebutuhan tulangan lebih sedikit.

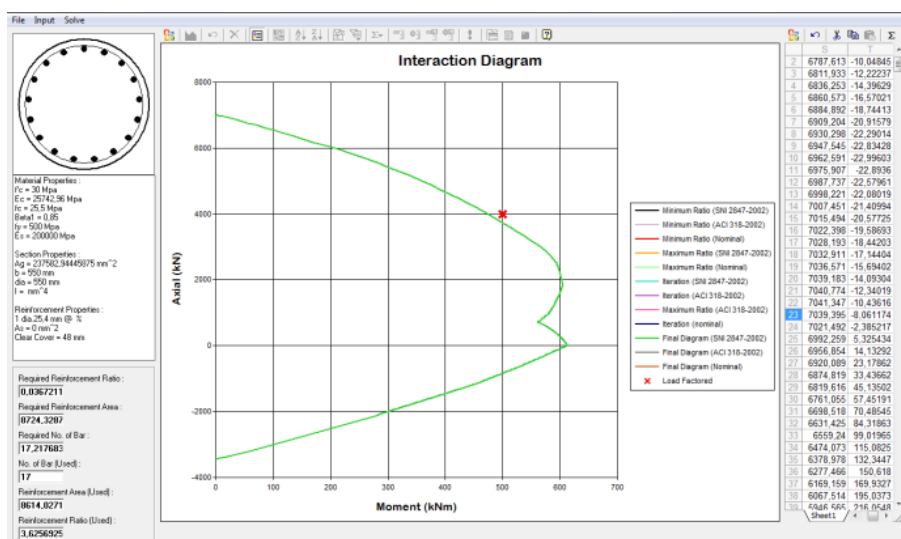
Pengaruh mutu tulangan longitudinal pada kolom terkekang akan dibahas pada kasus 5.1 dan kasus 5.2.

Tabel 5. Perbandingan hasil mutu tulangan longitudinal

No		Kasus 5.1	Kasus 5.2	Selisih
1	Mutu tulangan (MPa)	450	500	50
2	Rasio tulangan perlu %	3,98	3,67	0,31
3	Luas tulangan perlu (mm ²)	9460,975	8724,328	736,647
4	Jumlah tulangan perlu	18,671	17,217	1,454
5	Jumlah tulangan pasang	19	17	2
6	Luas tulangan terpasang (mm ²)	9627,44	8614,02	1013,42
7	Rasio tulangan terpasang (%)	4,052	3,625	0,427



Gambar 15. Output program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 5.1



Gambar 16. Output program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 5.2

Pada kedua kasus tersebut akan dibedakan pada input mutu tulangan longitudinal yang ada.

Kasus 5.1

1. Dimensi kolom, *Diameter* = 550 mm
2. Mutu beton, f'_c = 30 MPa
3. Mutu tulangan, f_y = 450 MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, ϕ_ℓ = 25,4 mm (#25)
5. Diameter tulangan transversal/senggang, ϕ_s = 8 mm
6. Selimut beton (*decking*) = 40 mm
7. Beban aksial terfaktor, P_u = 4000 kN
8. Momen terfaktor, M_u = 500 kNm

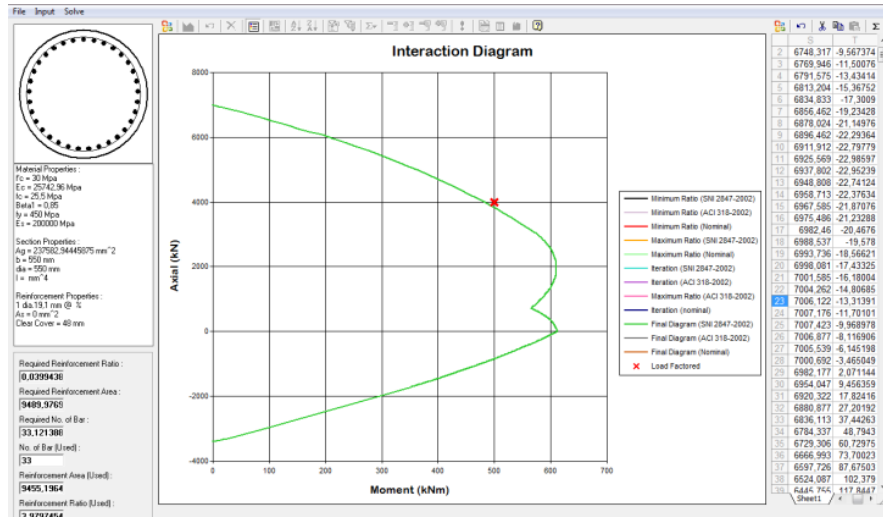
Hasil luaran program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 5.1 dapat dilihat pada Gambar 15.

Kasus 5.2

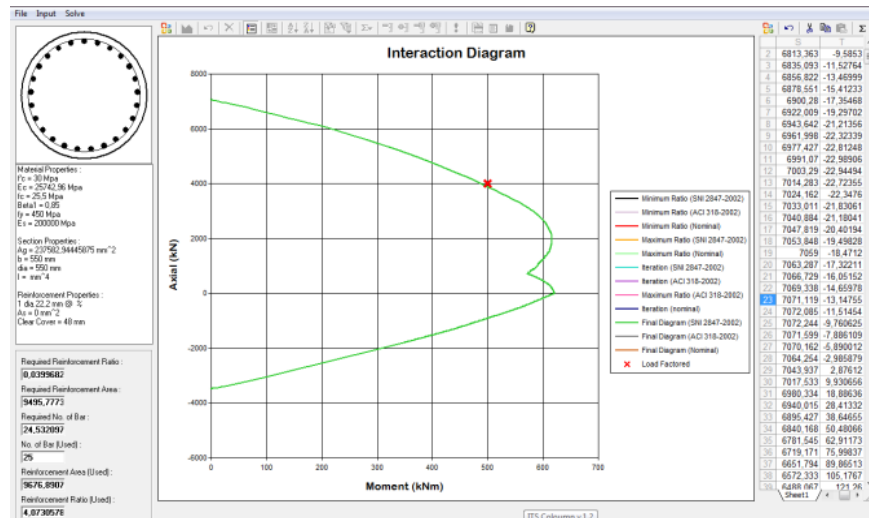
1. Dimensi kolom, *Diameter* = 550 mm
2. Mutu beton, f'_c = 30 MPa
3. Mutu tulangan, f_y = 500 MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, ϕ_ℓ = 25,4 mm (#25)
5. Diameter tulangan transversal/senggang, ϕ_s = 8 mm
6. Selimut beton (*decking*) = 40 mm
7. Beban aksial terfaktor, P_u = 4000 kN
8. Momen terfaktor, M_u = 500 kNm

Tabel 6. Perbandingan hasil diameter tulangan longitudinal

No		Kasus 6.1	Kasus 6.2	Selisih
1	Diameter tulangan (mm)	19,1	22,2	3,1
2	Rasio tulangan perlu	3,99	3,99	0
3	Luas tulangan perlu (mm ²)	9489,97	9495,77	5,8
4	Jumlah tulangan perlu	33,121	24,532	8,589
5	Jumlah tulangan pasang	33	25	8
6	Luas tulangan terpasang (mm ²)	9455,196	9676,89	221,694
7	Rasio tulangan terpasang	3,979	4,073	0,094



Gambar 17. Output program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 6.1



Gambar 18. Output program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 6.2

Hasil luaran dari program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 5.2 dapat dilihat pada Gambar 16.

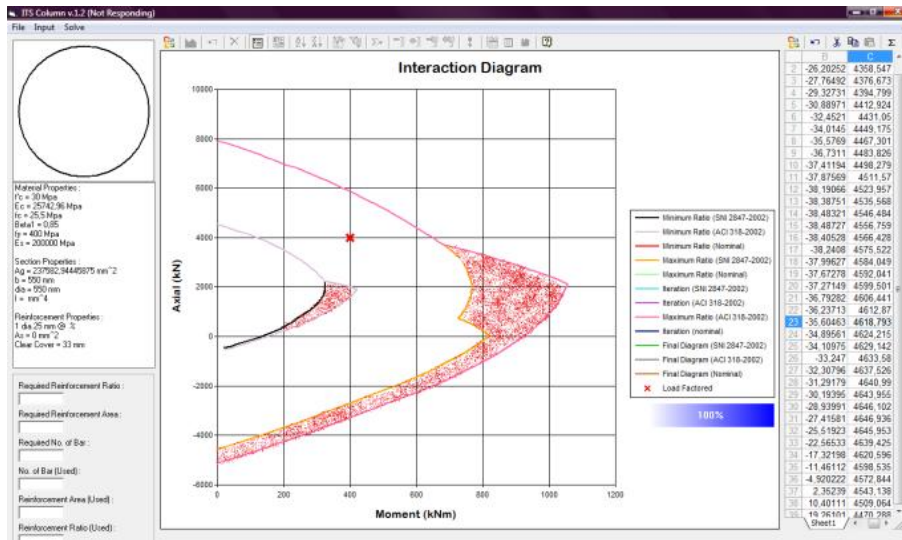
Hasil pada Tabel 5 terlihat bahwa, antara dua kolom yang memiliki dimensi, mutu beton, spasi sengkang, diameter tulangan longitudinal yang sama dan dibebani beban yang sama tetapi memiliki mutu tulangan longitudinal yang berbeda maka akan menghasilkan kebutuhan jumlah tulangan perlu yang berbeda pula. Dapat diketahui bahwa kolom yang memiliki mutu tulangan longitudinal lebih kecil memerlukan jumlah tulangan perlu lebih banyak.

Pengaruh Dimeter Tulangan Longitudinal

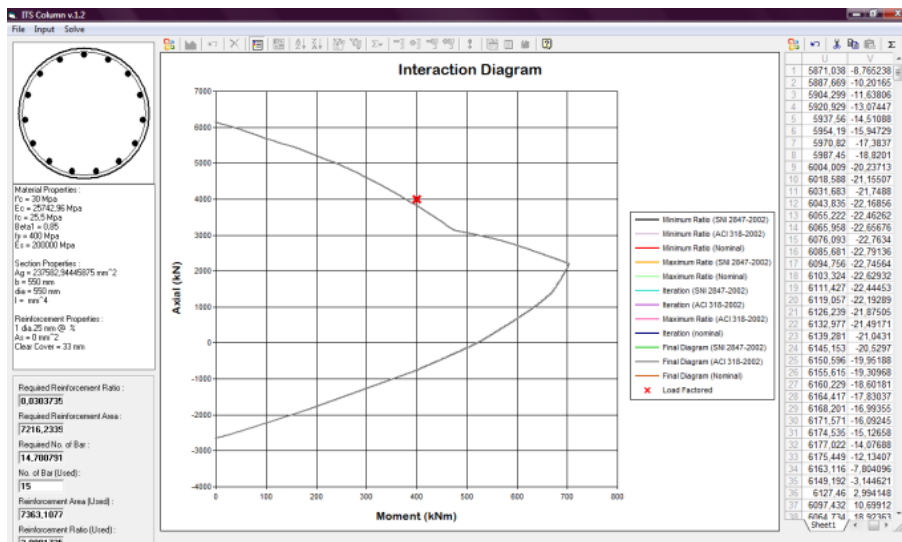
Pengaruh diameter tulangan longitudinal pada kolom terkekang akan dibahas pada kasus 6.1 dan kasus 6.2. Pada kedua kasus tersebut akan dibedakan pada input diameter tulangan longitudinal yang ada.

Kasus 6.1

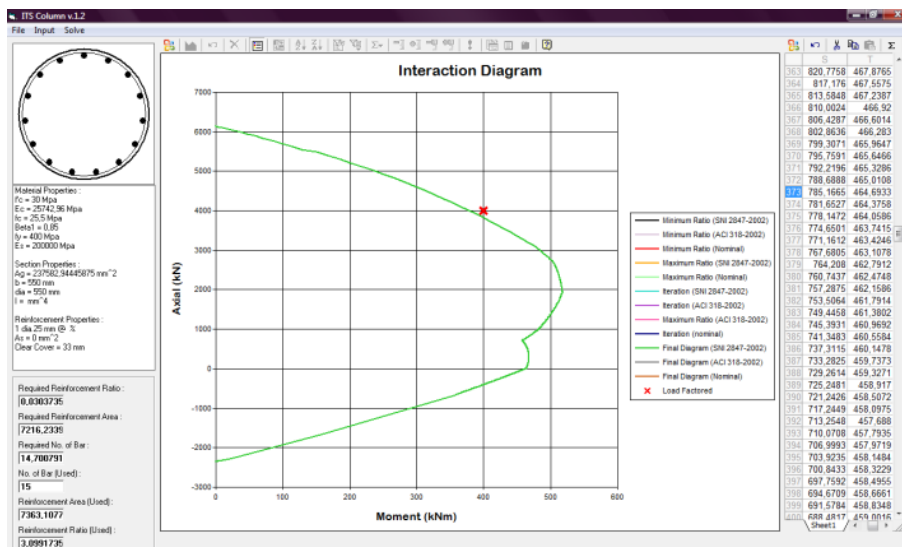
1. Dimensi kolom, $Diameter = 550 \text{ mm}$
2. Mutu beton, $f'_c = 30 \text{ MPa}$
3. Mutu tulangan, $f_y = 450 \text{ MPa}$
4. Diameter tulangan longitudinal, $\phi_l = 19,1 \text{ mm}$ (#19)
5. Diameter tulangan transversal/sengkang, $\phi_s = 8 \text{ mm}$
6. Selimut beton (*decking*) = 40 mm
7. Beban aksial terfaktor, $P_u = 4000 \text{ kN}$
8. Momen terfaktor, $M_u = 500 \text{ kNm}$



Gambar 19. Perbandingan SNI 2847-2002(Limit State Theory) dan ACI 318-2002 (Unified Design Theory) dengan confinement's effect



Gambar 20. Output program ITS Column v.1.2 untuk ACI 318-2002 (Unified Design Theory)



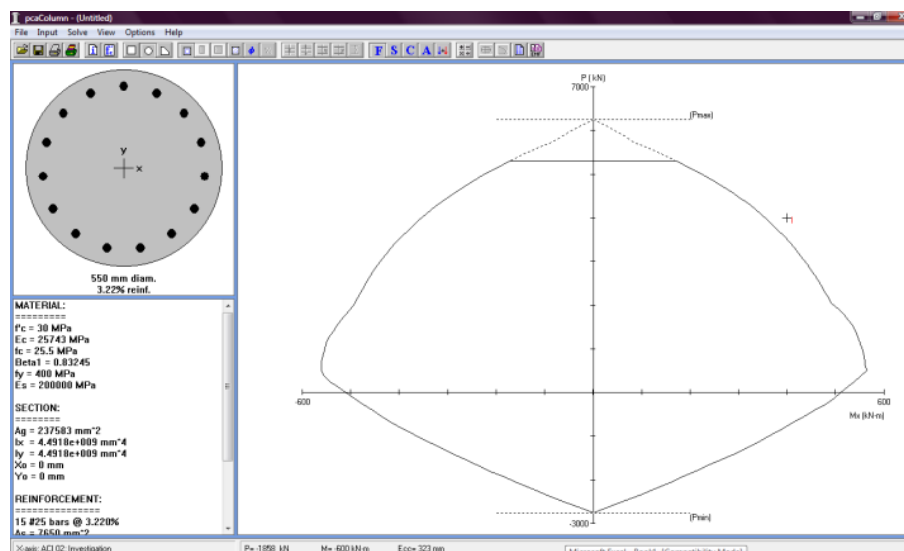
Gambar 21. Output program ITS Column v.1.2 untuk SNI 2847-2002(Limit State Theory)

Tabel 7. Hasil perbandingan diagram interaksi P-M rasio minimum pada perbedaan SNI dibanding ACI

e	SNI		ACI		Kenaikan(%)	
	P	M	P	M	P	M
0,15	2216,16	324,10	2223,36	325,15	0,33	0,33
0,20	1588,46	317,16	2003,02	398,96	26,10	25,79
0,24	1191,77	291,95	1650,15	404,24	38,46	38,46
0,29	925,05	265,62	1280,84	367,78	38,46	38,46
0,33	736,31	242,23	1019,51	335,40	38,46	38,46
0,37	619,54	230,67	826,89	307,87	33,47	33,47

Tabel 8. Hasil perbandingan diagram interaksi P-M rasio maksimum

e	SNI		ACI		kenaikan(%)	
	P	M	P	M	P	M
0,19	3670,98	686,24	3682,91	688,47	0,33	0,33
0,37	2058,81	767,28	2593,40	966,51	25,97	25,97
0,69	1075,52	746,07	1489,18	1033,02	38,46	38,46
1,73	446,87	774,16	562,93	975,23	25,97	25,97



Gambar 22. Output program PCA Column

Kasus 6.2

Hasil luaran dari program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 6.1 dapat dilihat pada Gambar 17.

1. Dimensi kolom, *Diameter* = 550 mm
2. Mutu beton, f'_c = 30 MPa
3. Mutu tulangan, f_y = 450 MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, ϕ_l = 22,2 mm (#22)
5. Diameter tulangan transversal/senggang, ϕ_s = 8 mm
6. Selimut beton (*decking*) = 40 mm
7. Beban aksial terfaktor, P_u = 4000 kN
8. Momen terfaktor, M_u = 500 kNm

Hasil luaran dari program ITS Column v.1.2 untuk contoh kasus 6.2 dapat dilihat pada Gambar 18.

Hasil pada Tabel 6 terlihat bahwa, antara dua kolom yang memiliki dimensi, mutu beton, spasi senggang, mutu tulangan longitudinal yang sama dan dibebani beban yang sama tetapi memiliki diameter tulangan longitudinal yang berbeda maka akan menghasilkan rasio tulangan perlu yang relatif sama. Akan tetapi karena adanya perbedaan diameter tulangan longitudinal maka luasan per tulangan juga berbeda sehingga didapat jumlah tulangan terpasang yang berbeda. Dapat diketahui bahwa kolom yang

memiliki diameter tulangan longitudinal lebih kecil memerlukan jumlah tulangan pasang lebih banyak.

Studi Kasus Faktor Reduksi

Berikut ini akan dijabarkan perbedaan pada konsep *Limit State Method* pada SNI 03-2847-2002 dengan konsep *Unified Design Provisions* pada ACI 318-2002. Oleh karena itu data kolom yang akan dianalisa adalah sama tetapi menggunakan konsep analisa menggunakan efek pengkekangan dengan perbandingan SNI 2847-2002 (*Limit State Theory*) dan ACI 318-2002 (*Unified Design Theory*). Sebagai perbandingan disertakan analisa *PCA Column*.

Data kolom :

1. Dimensi kolom, *Diameter* = 550 mm
2. Mutu beton, f'_c = 30 MPa
3. Mutu tulangan, f_y = 400 MPa
4. Diameter tulangan longitudinal, ϕ_l = 25 mm
5. Diameter tulangan transversal/senggang, ϕ_s = 8 mm
6. Selimut beton (*decking*) = 25 mm
7. Beban aksial terfaktor, P_u = 4000 kN
8. Momen terfaktor, M_u = 400 kNm

Tabel 9. Hasil perbandingan diagram interaksi P-M Output

e	SNI		ACI		Kenaikan(%)	
	P	M	P	M	P	M
0,15	3120,57	474,50	3130,71	476,04	0,33	0,33
0,27	1949,60	517,91	2455,83	652,39	25,97	25,97
0,40	1251,75	495,05	1733,19	685,45	38,46	38,46
0,59	785,17	464,69	1087,15	643,42	38,46	38,46
1,03	452,94	466,64	571,64	588,93	26,21	26,21
4,29	108,59	466,20	125,13	537,25	15,24	15,24

Tabel 10. Hasil perbandingan antara ITS Col v.1.2 dengan PCA Col

e	PCACOL		ITS COLUMNS		Kenaikan (%)	
	P	M	P	M	P	M
0,1	3770	377	4000	400	6,1	6,1

e	PCACOL		ACI		Kenaikan (%)	
	P	M	P	M	P	M
0,1	3770	377	4000	400	6,1	6,1

Hasil luaran dari perbandingan SNI 2847-2002(Limit State Theory) dan ACI 318-2002 (Unified Design Theory) dengan confinement's effect dapat dilihat pada Gambar 19.

Dari Gambar 19 dapat diketahui daerah yang terarsir adalah perbedaan faktor reduksi yang terjadi antara SNI 2847-2002(Limit State Theory) Gambar 20 dan ACI 318-2002 (Unified Design Theory) Gambar 21.

Dapat disimpulkan pada Tabel 7, Tabel 8 dan Tabel 9. bahwa selisih antara SNI 2847-2002(Limit State Theory) dan ACI 318-2002 (Unified Design Theory) berkisar dari 0,33% hingga 38,5%. Selisih ini terjadi pada saat kolom mengalami kontrol tarik dimana ACI 318-2002 (Unified Design Theory) memiliki kapasitas kolom yang lebih besar dibanding SNI 2847-2002(Limit State Theory). Sedangkan pada Tabel 10. terlihat bahwa ITS Column v.1.2 mempunyai kapasitas kolom lebih besar dibanding PCA Column dikarenakan ITS Column v.1.2 memiliki perhitungan yang aktual dan rasional karena analisisnya menggunakan code yang telah disempurnakan begitu pula adanya faktor pembulatan dimana ITS Column v.1.2 memiliki angka ketelitian lebih tinggi. Output program PCA Column dapat dilihat pada Gambar 22.

KESIMPULAN

Setelah membandingkan hasil perhitungan dari program ITS Column v.1.2 dengan PCA Column dalam beberapa kasus dan melakukan analisa-analisa kasus menggunakan program ITS Column v.1.2, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari beberapa contoh studi kasus yang telah dianalisa pada bab sebelumnya, maka untuk menentukan rasio tulangan longitudinal pada kolom dapat dilakukan dengan menggunakan aplikasi program bantu ITS Column v.1.2 karena lebih cepat dan mudah. Selain itu, hasil perhitungan telah divalidasi dengan program PCA Column dan ternyata menghasilkan perhitungan yang hampir sama (berselisih sedikit).

2. Menentukan titik koordinat yang tepat/paling mendekati pada diagram interaksi pada program ITS Column v.1.2 ini dilakukan dengan membulatkan jumlah tulangan perlu di atas jumlah tulangan perlu yang paling mendekati. Hal ini untuk menjamin bahwa kapasitas kolom mampu menahan beban kombinasi aksial dan momen.
3. Nilai output program aplikasi ITS Column v.1.2 dapat dipertanggungjawabkan karena setelah diverifikasi dengan aplikasi program lain yaitu PCA Column ternyata menghasilkan nilai perhitungan yang hampir sama/sama.

DAFTAR PUSTAKA

1. Purwono, R.; Tavio; Imran, I.; dan Raka, I G. P., *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002)* Dilengkapi Penjelasan (S-2002), ITS Press, Surabaya, 2007, 408 hal.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-02) and Commentary (ACI 318RM-02)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2002, 443 hal.
3. Park, R.; dan Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons, 1975, 769 hal.
4. MacGregor, J. G., *Reinforced Concrete Mechanics and Design, Edisi kedua*, Prentice Hall Inc., 1992, 848 hal.
5. Nawy, E. G., *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach*, Prentice Hall Inc., 1985, 763 hal.
6. McCormac, J. C., *Design of Reinforced Concrete, Edisi kelima*, John Wiley & Sons, 2001, 422 hal.
7. Wang, C. K.; dan Salmon, C. G., *Reinforced Concrete Design, Edisi keempat*, Harper & Row Inc., 1985, 484 hal.
8. Mast, R. F., Unified Design Provisions for Reinforced and Prestressed Concrete Flexural and Compression Members, *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 2, Maret-April 1992, hal. 188-191.