

## Analisis Kolom Langsing Beton Mutu Tinggi Terkekang terhadap Beban Aksial Tekan Eksentris

Bambang Budiono<sup>1)</sup>

### Abstrak

*Studi ini bertujuan untuk mengetahui perilaku mekanik dari kolom langsing beton mutu tinggi terkekang yaitu beban kritis, lendutan di tengah kolom, daktilitas perpindahan, serta faktor pembesaran momen. Untuk menentukan faktor-faktor di atas maka dilakukan proses analisis yang dikenal dengan analisis  $P-\Delta$  atau analisis orde kedua dengan memperhitungkan efek stabilitas kolom. Analisis menggunakan penampang kolom langsing beton bertulang mutu tinggi terkekang dengan metoda numerik. Kolom langsing dibebani oleh kombinasi beban aksial tekan dan momen lentur. Variabel yang digunakan adalah nilai kelangsingan kolom, nilai kekangan tulangan transversal, nilai eksentrisitas beban dan luas tulangan longitudinal. Mekanisme keruntuhan kolom dibatasi pada nilai kelangsingan yang menghasilkan keruntuhan pada material bukan pada keruntuhan geometri. Nilai faktor pembesaran momen dari hasil studi ini dibandingkan dengan perhitungan menurut standar Indonesia SKSNI – 91. Hasil analisis pada studi ini menunjukkan bahwa variabel yang digunakan, kecuali kekangan, berpengaruh terhadap perilaku kolom langsing, sedangkan peraturan SKSNI – 91 pada umumnya menghasilkan nilai faktor pembesaran momen yang konservatif untuk kolom langsing beton mutu tinggi.*

**Kata-kata kunci:** *Kolom langsing, nilai kelangsingan, beton mutu tinggi terkekang, beban kritis, mekanisme keruntuhan, lendutan, daktilitas perpindahan, faktor pembesaran momen.*

### Abstract

*The objective of the study is to investigate the mechanical behavior of slender columns of reinforced confined high strength concrete namely critical load, middle column deflection, displacement ductility and the moment magnification factor. To determine the factors mentioned above the analysis of the slender columns are carried out using  $P-\Delta$  analysis known as second order analysis where the stability effect of the column is taken into account. Sectional analysis of the reinforced confined high strength concrete column is implemented using numerical method. The slender column is subjected to the combination of axial and flexural loads. Variables used are slenderness ratio, confinement factor of transverse reinforcement, load eccentricity, and area of the longitudinal reinforcement. Failure mechanism of the slender column is constraint only at the material failure not the failure due to geometry. The value of the moment magnification factor analyzed in the study is compared to the formula complying with the Indonesian Building Code of SKSNI-91. The results of the analysis shows that the variables used except the confinement factor influence the behavior of the slender column while values of the moment magnification factor of the Indonesian Building Code of SKSNI-91 in general result in conservative figures for the slender column of the reinforced confined high strength concrete.*

**Keywords:** *Slender column, slenderness ratio, confined high strength concrete, critical load, failure mechanism, deflection, displacement ductility, moment magnification factor.*

### 1. Pendahuluan

Seiring perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi pada saat ini, beton mutu tinggi untuk pembangunan konstruksi beton lebih mudah didapat.

Teknologi beton dalam prakteknya telah menjangkau pada era beton mutu tinggi. Dengan berkembangnya teknologi beton mutu tinggi dengan sendirinya akan semakin membuka peluang untuk mendapatkan komponen struktur yang dapat berfungsi lebih efisien

---

1) Staf Pengajar Departemen Teknik Sipil, FTSP, ITB

**Catatan :** Usulan makalah dikirimkan pada 29 Desember 2003 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 7 Januari 2004 – 28 Januari 2004. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 28 Januari 2004 hingga 30 Januari 2004.

dan optimal khususnya komponen beton. Peningkatan mutu beton untuk struktur beton mutu tinggi akan bernilai ekonomis karena dimensi penampang beton terutama kolom sebagai komponen struktur tekan, menjadi lebih kecil yang berakibat kolom menjadi langsing Efek yang ditimbulkan adalah pengaruh tekuk pada kolom langsing yang harus diperhatikan dalam perencanaan. Hal ini menjadi masalah karena peraturan dan studi tentang beton mutu tinggi khususnya mengenai kolom langsing masih sangat kurang [Santoso, 2002; Hadi,2000].

Penggunaan beton mutu tinggi dapat mengakibatkan biaya yang dikeluarkan lebih rendah daripada menggunakan beton mutu normal berhubung dimensi penampang dapat diperkecil. Peningkatan kebutuhan dan penggunaan material beton mutu tinggi, harus diimbangi dengan peningkatan pengetahuan mengenai perilaku struktural dan mekanik material tersebut. Persoalan ini membawa beton mutu tinggi pada akhirnya ini menjadi perhatian dan penelitian dari para rekayasawan teknik sipil.

Definisi beton mutu tinggi mengacu pada ACI 363R-92, yang menetapkan kuat tekan beton di atas 41 MPa sebagai beton mutu tinggi.

**2. Tujuan Penelitian**

Tujuan yang ingin dicapai dari tulisan ini adalah memprediksi secara teoritis perilaku struktural dari kolom langsing beton mutu tinggi terkekang terhadap beban aksial tekan dengan eksentrisitas tertentu. Variabel yang ditinjau adalah rasio tulangan longitudinal, kelangsingan, besar eksentrisitas beban luar, lendutan, daktilitas, dan pembesaran momen yang terjadi pada kolom langsing akibat beban aksial tekan eksentris. Hubungan antara beban dan daktilitas didapatkan dari hubungan  $P-\Delta$  dari kolom langsing yang dibebani beban aksial eksentris. Sedangkan faktor pembesaran momen didapatkan dari perbandingan besar momen pada kolom langsing terhadap momen pada kolom pendek pada keadaan beban aksial batas kolom langsing. Nilai ini dibandingkan dengan faktor pembesaran momen dari perhitungan orde satu, seperti yang disyaratkan oleh peraturan Indonesia SKSNI-91.

**3. Metode Penelitian**

Penelitian di atas dilakukan dengan analisis dengan menggunakan bantuan program komputer. Dengan memasukkan variabel-variabel kolom langsing dan rumus-rumus beton mutu tinggi terkekang maupun tidak terkekang maka akan didapatkan hasil hubungan  $P-\Delta$ . Hasil program sebelum digunakan untuk analisis, ter-

lebih dahulu diverifikasi dengan hasil studi Llyod dan Rangan, tahun 1996. Perilaku kolom langsing dianalisis berdasarkan hubungan antar variabel termasuk faktor pembesaran momen. Faktor pembesaran momen ini dari hasil analisis dibandingkan dengan perhitungan berdasarkan SKSNI-91 yang digunakan untuk beton normal.

**4. Kolom Langsing**

Kolom langsing adalah kolom dengan tipe kelangsingan yang relatif tinggi yang mengakibatkan penambahan momen sekunder dan berakhir pada salah satu bentuk keruntuhan kolom yaitu keruntuhan material atau keruntuhan akibat tekuk yang disebut keruntuhan geometri.

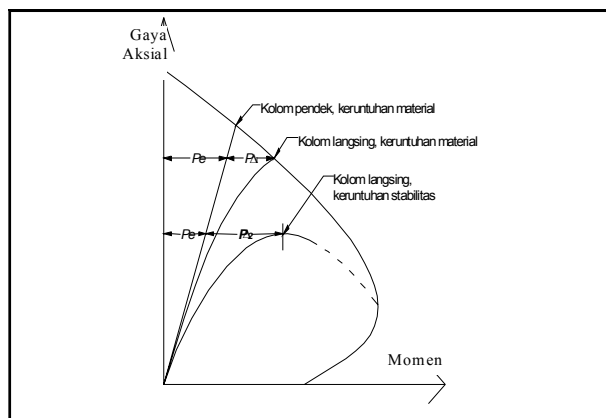
**Gambar 1** menunjukkan 3 tipe keruntuhan kolom yaitu keruntuhan material baik untuk kolom pendek maupun kolom langsing dan keruntuhan geometri untuk kolom langsing [Park and Paulay,1975].

Kolom langsing yang menahan kombinasi beban aksial dengan lentur atau beban aksial eksentris, akan mendapat momen lentur tambahan (momen sekunder) akibat efek  $P-\Delta$  dan mengakibatkan kolom mengalami deformasi ke arah lateral (Lihat **Gambar 2**). Momen sekunder mengakibatkan kapasitas gaya normal mengecil dibanding dengan kolom pendek dengan penampang yang sama. Perbedaan kolom pendek dan kolom langsing ditentukan oleh nilai rasio kelangsingannya ( $\lambda$ ) yang didefinisikan sbb:

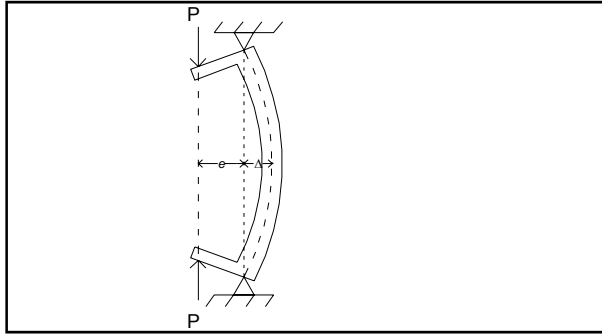
$$\lambda = \frac{kl_u}{r} \tag{1}$$

dimana:

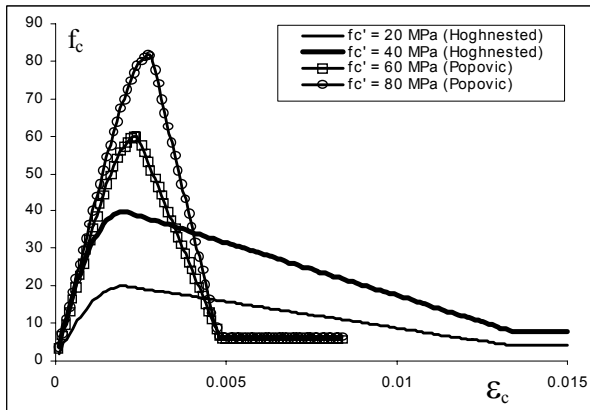
- $k$  = faktor panjang efektif kolom
- $l_u$  = panjang komponen kolom yang tidak ditopang
- $r$  = jari-jari girasi,  $0.3h$  untuk penampang persegi.



**Gambar 1. Diagram interaksi kekuatan kolom dengan tipe keruntuhan yang berbeda**



Gambar 2. Kolom langsing dengan beban aksial eksentris



Gambar 3. Kurva tegangan-regangan beton untuk berbagai nilai  $f_c'$

Untuk kolom dengan pengaku lateral  $\lambda$  kolom langsing diperhitungkan [SKSNI, 1991]:

$$\lambda > 34 - 12 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \quad (2)$$

dimana :

- $M_1$  dan  $M_2$  = momen-momen ujung terfaktor pada kolom yang posisinya berlawanan dan  $M_2 > M_1$ .

Untuk kolom langsing tanpa pengaku lateral:

$$\lambda > 22 \quad (3)$$

Dalam tulisan ini elemen kolom dianggap tanpa pengaku lateral.

Hubungan konstitutif antara beton mutu tinggi dan beton mutu normal dapat dilihat pada Gambar 3. Beton mutu tinggi dibawah beban tekan murni mempunyai kelebihan pada kekuatan dan kekakuan tetapi lebih getas dibandingkan dengan beton mutu normal.

### 5. Persamaan Konstitutif Beton Mutu Tinggi

Persamaan konstitutif beton mutu tinggi tanpa kekangan (digunakan untuk menghitung tegangan pada selimut beton) menggunakan persamaan Thorenfeldt [ Santoso, 2002] sebagai berikut:

$$\frac{f_{co}}{f'_{co}} = k_3 \cdot \frac{\epsilon_{co}}{\epsilon'_{co}} \frac{n}{n - 1 + \left( \frac{\epsilon_{co}}{\epsilon'_{co}} \right)^{nk}} \quad (4)$$

dimana:

- $k_3 = 0.6 + 10/f'_{co} \leq 0.85$
- $n = \left( 1 + \frac{f'_{co}}{17} \right)$
- $k = 1$  untuk  $\frac{\epsilon_{co}}{\epsilon'_{co}} \leq 1$
- $k = 0,67 + \frac{f'_{co}}{62}$  untuk  $\frac{\epsilon_{co}}{\epsilon'_{co}} \geq 1$
- $\epsilon'_{co} = \frac{f'_{co} n}{E_c n - 1}$
- $f'_{co}$  = tegangan maksimum beton tidak terkekang.

Sedangkan pada beton mutu tinggi terkekang (untuk menghitung tegangan pada inti beton) kurva tegangan regangan sebelum respon puncak adalah menggunakan model Popovics [Antonius, 2000] yaitu:

$$f_c = \frac{f'_{cc} \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_{cc}} \right)^r}{r - 1 + \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_{cc}} \right)^r} \quad \text{dimana} \quad r = \frac{E_c}{E_c - \left( \frac{f'_{cc}}{\epsilon'_{cc}} \right)} \quad (5)$$

tegangan maksimum beton terkekang

Modulus elastisitas beton mutu tinggi:

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_{co}} + 6900 \text{ (Mpa)} \quad (6)$$

Sedangkan hubungan konstitutif setelah respon puncak diasumsikan linier:

$$f_c = f'_{cc} - (\epsilon_c - \epsilon'_{cc}) \frac{0,15 f'_{cc}}{(\epsilon_{85c} - \epsilon'_{cc})} \quad (7)$$

Peningkatan kekuatan beton mutu tinggi terkekang:

$$K = \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3,7 \left( \frac{f_2}{f'_{co}} \right)^{0,9} \quad (8)$$

Hasil regresi untuk peningkatan beton mutu tinggi terkekang yang merupakan fungsi dari  $K$  dan regangan beton tanpa kekangan adalah sebagai berikut:

$$\epsilon'_{cc} = \epsilon'_{co} \{ 1,94(K - 1) + 1 \} \quad (9)$$

terkekang yang merupakan fungsi dari  $K$  dan regangan beton tanpa kekangan adalah sebagai berikut:

$$\epsilon_{85c} = \epsilon_{co} + 10^{-5} e^{3,7K} \quad (10)$$

pada kurva pasca puncak (*descending branch*). Daktilitas beton terkekang dipengaruhi oleh besarnya ke-

$$f_{ss} = E_c \left\{ 0,0004 \ln \left[ \frac{\left( \frac{s}{d_c} \right)}{\rho_s \sqrt{f'_{co}}} \right] + 0,002 \right\} \leq f_y \quad (11)$$

Tegangan lateral efektif menurut Mender [Antonius, 2000] adalah:

$$f_2 = \frac{2 f_{ss} A_{sp}}{s d_c} \quad (12)$$

dimana:

- $s$  = spasi tulangan lateral
- $d_c$  = lebar penampang inti kolom
- $A_{sp}$  = luas penampang tulangan kekangan lateral
- $P_s$  = rasio volume kekangan lateral

Untuk rasio volume (*volumetric ratio*) minimum (kurang dari 1,2%) pada tulangan transversal, kekangan pada beton mutu tinggi tidak banyak berpengaruh pada hubungan konstitutifnya. Hal ini disebabkan oleh nilai Poisson's rasio beton mutu tinggi lebih rendah dibandingkan beton normal.

### 6. Baja Tulangan

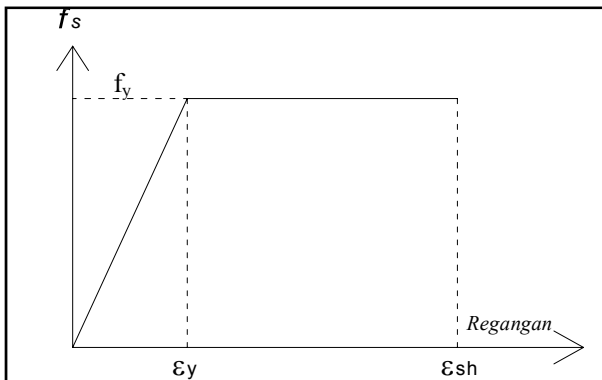
Untuk keperluan studi ini hubungan tegangan regangan baja tulangan sesuai dengan **Gambar 4** di bawah.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \text{ untuk } 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad (13)$$

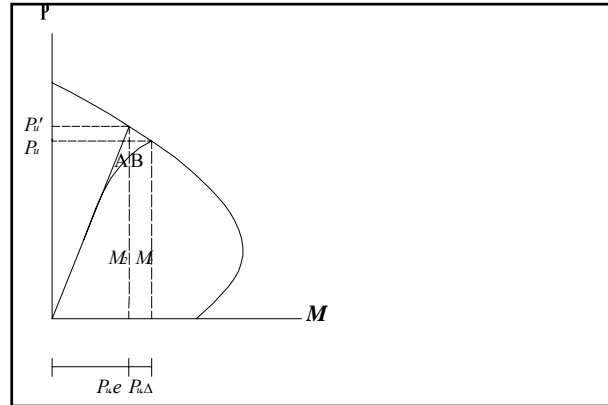
$$f_s = f_y \text{ untuk } \varepsilon_s \geq \varepsilon_y \quad (14)$$

### 7. Analisis P-Δ

Analisis *P-Δ* dapat diilustrasikan seperti **Gambar 5** di samping. Pada kolom langsing, sumbu vertikal kolom pada kondisi awal memiliki eksentrisitas yang menimbulkan momen ujung awal  $M=Pe$ . Karena kolom langsing maka gaya normal tekan  $P$  mengakibatkan perubahan geometri arah lateral  $\Delta$ , yang menghasilkan momen sekunder sebesar  $P\Delta$ . Momen lentur total pada kolom langsing adalah  $M_e=P(e+\Delta)$ .



Gambar 4. Kurva hubungan  $f$  vs.  $\varepsilon$  baja tulangan



Gambar 5. Lintasan gaya kolom langsing pada diagram interaksi

Lintasan (path) antara  $M$  dan  $P$  pada **Gambar 5** didapat dari analisis penampang dengan prinsip keseimbangan gaya luar dengan memperhitungkan pengaruh momen sekunder akibat tekuk dan gaya dalam. Proses keseimbangan ini dilakukan dengan analisis numerik sampai konvergen pada batas toleransi tertentu [Santoso et.al, 2002, Hadi, 2001]. Dalam analisis ini toleransi diambil sebesar 0,02 %.

Proses analisis orde kedua (*P-Δ*) terdiri dari:

- a. Menghitung gaya dalam penampang.

Pada regangan beton tertentu dan letak garis netral tertentu pada penampang kolom beton, maka dapat ditentukan besarnya momen dan gaya normal tekan dalam penampang yaitu momen  $M_{int}$  dan gaya normal tekan  $P_{int}$ .

- b. Menentukan bentuk persamaan lendutan kolom.

Untuk penyerdehanaan perhitungan diasumsikan dahulu bentuk tipe lendutan dari kolom langsing. Pada penelitian ini pembahasan dibatasi untuk kolom dengan kondisi perletakan ujung-ujung berupa sendi, sehingga bentuk awal lendutan dapat dianggap mengikuti bentuk garis sinusoidal. Dari hasil perhitungan  $M_{int}$  pada langkah pertama selanjutnya dapat dihitung besaran  $M/EI$  untuk setiap bagian kolom sepanjang tinggi.

Kelengkungan ( $\varphi$ ) dan lendutan ( $y$ ) kolom dapat diperoleh dari hubungan sebagai berikut:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \varphi = \frac{M}{EI} \text{ dan } y = \iint \frac{M}{EI} dx^2 \quad (15)$$

sehingga jika bentuk awal lendutan dinyatakan dalam bentuk hubungan:

$$y(x) = y_{max} \sin \left\{ \frac{\pi x}{l_e} \right\} \quad (16)$$

diferensial dua kali menghasilkan :

$$\varphi = \frac{\pi^2}{l_e^2} y_{\max} \sin\left\{\frac{\pi x}{l_e}\right\} \quad (17)$$

dari kelengkungan yang telah dihitung selanjutnya dapat dihitung besarnya lendutan maksimum kolom  $y_{\max}$  mengikuti hubungan:

$$\Delta = y_{\max} = \varphi \frac{l_e^2}{\pi^2} \quad (18)$$

### c. Keseimbangan Gaya Luar dan Gaya Dalam

Keseimbangan vertikal menghasilkan  $P_{int}$  sama dengan gaya luar tekan  $N$ . Keseimbangan momen dalam dan momen luar termasuk pengaruh tekuk dapat dihitung:

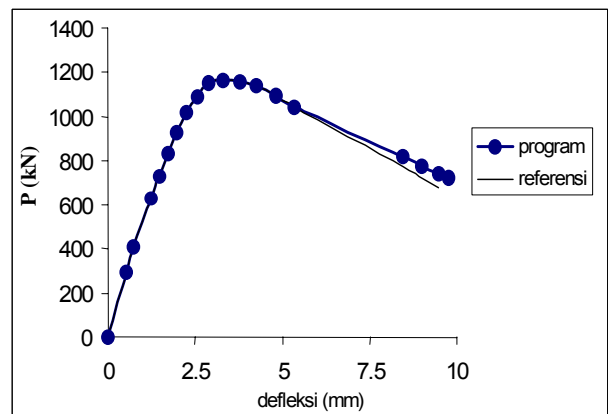
$$M_e = N(e + \Delta) = M_{int} \quad (19)$$

Nilai  $\Delta$  ditentukan dari persamaan pada butir b tersebut diatas. Persamaan keseimbangan momen diatas diselesaikan melalui proses iterasi sampai dengan konvergen. Setelah konvergen dapat diplot grafik hubungan  $P-\Delta$  kolom. Nilai maksimum gaya normal  $P_u = P_{kritis}$  dapat diperoleh dari grafik  $P-\Delta$  ini.

## 8. Verifikasi Program

Verifikasi dalam tulisan ini dibandingkan dengan hasil output program komputer dari Llyod dan Rangan, 1996, dengan  $f'_c = 58$  MPa, dimensi  $B = 175$  mm dan  $L = 175$  mm, dengan tulangan longitudinal 2@3  $\phi 12$  mm,  $f_y = 432$  MPa dan tulangan sengkang  $\phi 4$  mm, jarak sengkang 60 mm dan mutu baja  $f'_y = 450$  MPa, tebal selimut beton 15 mm, eksentrisitas awal 65 mm dalam arah  $L$  dengan panjang efektif kolom  $l_u = 1680$  mm atau  $\lambda = 1.680/(0.289.120) = 33$ .

Dari hasil analisis pada **Gambar 6**, terlihat bahwa secara umum pada saat kurva naik hubungan antara beban dengan lendutan bersifat elastis dan cenderung berimpit. Setelah terjadi beban kritis, hubungan  $P-\Delta$  menjadi ada sedikit perbedaan antara hasil analisis dengan program yang dikembangkan oleh Llyod & Rangan. Hal ini dimungkinkan karena pada analisis ini menggunakan pendekatan rumus beton terkekang sedangkan pada program referensi menggunakan rumus beton tidak terkekang. Di samping itu hasil verifikasi program juga menunjukkan terdapat selisih kecil nilai beban aksial antara kondisi terkekang dan tidak terkekang setelah pasca puncak,  $P_u$ . Meskipun demikian program yang dikembangkan pada analisis ini memberikan hasil verifikasi yang memuaskan.



Gambar 6. Grafik  $P-\Delta$  dengan  $e = 15$  mm

## 9. Analisis Hasil Program Komputer

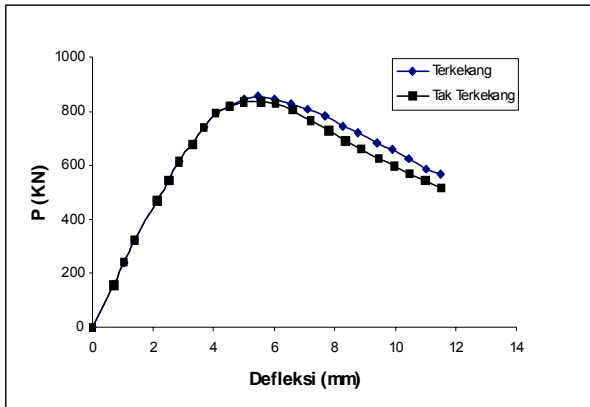
Penampang kolom langsing yang akan dianalisis mempunyai data-data sebagai berikut:

- a. Data penampang
  - lebar  $B = 175$  mm
  - tinggi  $L = 175$  mm
  - kelangsingan  $\lambda = 12,33,50$ , dan 66
  - cover  $c = 15$  mm
  - sengkang  $s = 60$  mm, dengan rasio volume 1,2% (peryaratan minimum SKSNI-91).
- b. Data beton
  - $f'_c = 60$  MPa
- c. Data baja tulangan
  - $f_y = 400$  MPa (tulangan longitudinal)
  - $f_y = 450$  MPa (tulangan sengkang)
  - $E_s = 200000$  MPa

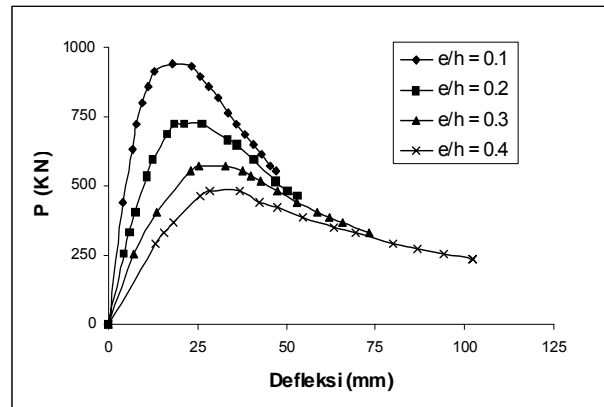
## 10. Analisis

### 10.1 Perbedaan perilaku terkekang dan tak terkekang

Dari **Gambar 7** terlihat bahwa kekangan berpengaruh kecil pada peningkatan kapasitas kolom tersebut baik dalam hal kapasitas beban aksial maupun lendutan yang terjadi sebelum mengalami keruntuhan. Hal ini disebabkan oleh rasio volume dan nilai rasio Poisson yang kecil.



Gambar 7. Perbandingan  $P-\Delta$  terkekang dan tak terkekang untuk  $\lambda=33$ ,  $\rho_g=1\%$ ,  $e/h=0.2$



Gambar 9. Perbandingan  $P-\Delta$  dengan  $e$  yang berbeda untuk  $\rho_g=3\%$  dan  $\lambda=33$

### 10.1 Analisis $P-\Delta$

#### a. Pengaruh kelangsingan ( $\lambda$ )

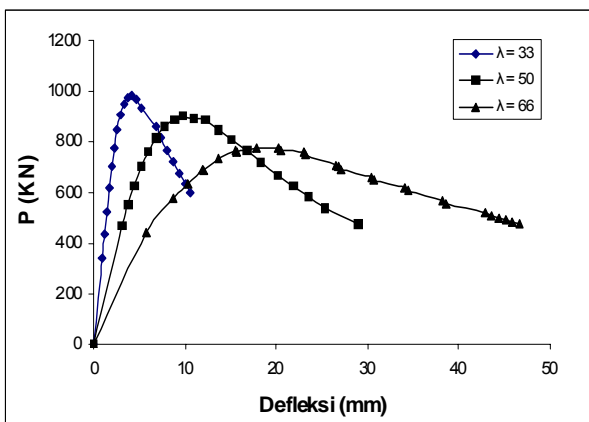
Variabel kelangsingan dibuat dengan memberikan nilai tinggi efektif kolom ( $l_e$ ) yang berbeda.

Dari Gambar 8 atas terlihat bahwa semakin besar panjang efektif kolom langsing maka kapasitas kekuatan aksial kolom semakin menurun sedangkan lendutan menjadi lebih besar untuk nilai  $P_{luar}$  yang sama.

#### b. Pengaruh eksentrisitas ( $e$ )

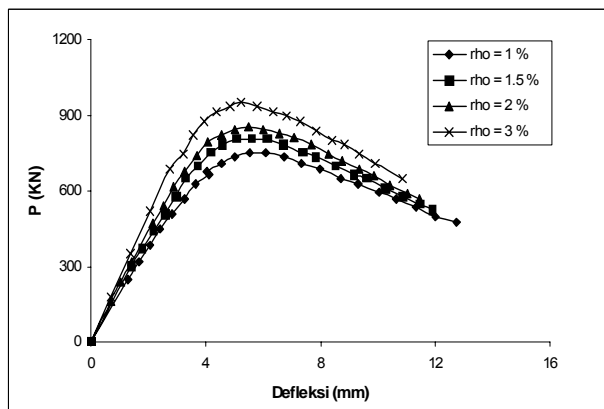
Eksentrisitas merupakan parameter yang penting dalam menganalisis perilaku struktural suatu kolom karena eksentrisitas akan menentukan besarnya momen ujung awal yang dipikul kolom tersebut yang berkaitan erat dengan kapasitas lentur kolom tersebut.

Dari Gambar 9 terlihat bahwa semakin besar nilai eksentrisitas maka kapasitas beban aksial semakin kecil, namun lendutan akan bertambah besar.



Gambar 8. Hubungan  $P-\Delta$  dengan nilai  $\lambda$  yang bervariasi untuk  $\rho_g=1\%$  dan  $e/h=0.1$

#### c. Pengaruh rasio Tul. Longitudinal ( $\rho_g$ )



Gambar 10. Perbandingan  $P-\Delta$  dengan nilai  $\rho$  yang bervariasi untuk  $\lambda=33$  dan  $e/h=0.2$

Dari Gambar 10 terlihat bahwa dengan menambah rasio tulangan longitudinal akan memperbesar kapasitas beban aksial dan akan mengurangi lendutan.

### 10.3 Analisis diagram interaksi

#### a. Pengaruh kelangsingan ( $\lambda$ )

Untuk mengetahui pengaruh dari kelangsingan kolom ( $\lambda$ ) terhadap kemampuan kolom pada diagram interaksi yaitu memvariasikan nilai kelangsingan kolom.

Dari Gambar 11 terlihat bahwa pada eksentrisitas tertentu, kapasitas momen lentur dan beban aksial pada kolom pendek ( $\lambda=12$ ) paling besar. Peningkatan nilai kelangsingan akan menurunkan kapasitas momen lentur dan beban aksial tekan dari kolom tersebut. Hal itu menandakan bahwa adanya pengaruh  $P-\Delta$  yang mengakibatkan penambahan momen. Pada kondisi momen murni yaitu pada saat nilai  $P=0$  kapasitas lentur adalah sama untuk semua ting-

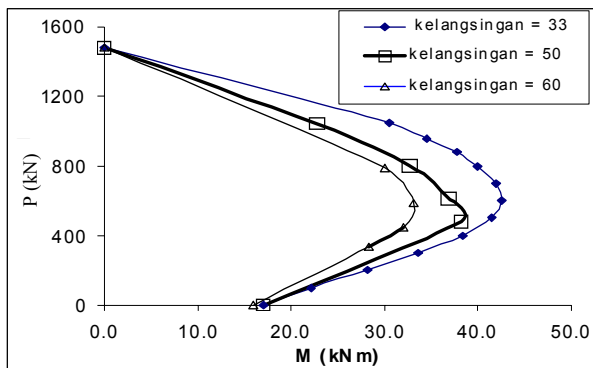
kat kelangsingan. Begitu juga dengan kondisi aksial murni yaitu pada saat momen sama dengan nol kapasitas beban aksial relatif sama untuk semua nilai kelangsingan.

**b. Pengaruh eksentrisitas (e)**

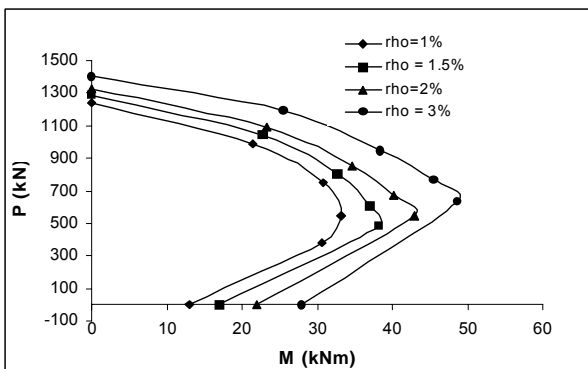
Dari diagram interaksi bisa dilihat bahwa eksentrisitas pada kolom langsing berpengaruh terhadap kapasitas aksial tekan yaitu semakin besar eksentrisitas maka kapasitas kolom terhadap beban aksial tekan mengecil sampai mencapai keadaan momen murni. Sedangkan momen yang dipikul kolom semakin besar dengan semakin meningkatnya eksentrisitas sampai mencapai maksimum pada titik keseimbangan, dan setelah itu nilai momen turun. Tipe keruntuhan diatas titik keruntuhan seimbang (*balance failure*) adalah keruntuhan tekan pada beton dan di bawahnya terjadi keruntuhan tarik pada baja.

**c. Pengaruh rasio tul. longitudinal ( $\rho_g$ )**

Untuk mengetahui pengaruh rasio tulangan longitudinal ( $\rho_g$ ) terhadap perilaku kekuatan penampang yang berkaitan dengan kapasitas lentur dari kolom langsing, maka dapat dilakukan perbandingan karakteristik diagram interaksi dari penampang yang mempunyai harga  $\rho_g$  yang berbeda dengan kelangsingan konstan, seperti yang terlihat pada **Gambar 12**.



**Gambar 11.** Diagram interaksi kolom dengan nilai  $\lambda$  bervariasi dengan  $\rho_g = 2\%$



**Gambar 12.** Diagram interaksi dengan nilai  $\rho_g$  yang bervariasi pada  $\lambda=33$

Peningkatan rasio tulangan longitudinal akan memberikan pengaruh berupa peningkatan kapasitas momen lentur dan juga beban aksial tekan.

**10.4 Analisis faktor pembesaran momen (FPM)**

**a. Pengaruh kelangsingan ( $\lambda$ )**

**Gambar 13** menunjukkan bahwa nilai FPM akan naik seiring dengan peningkatan nilai kelangsingan, tetapi FPM akan turun dengan kenaikan nilai eksentrisitas

**b. Pengaruh rasio tulangan longitudinal ( $\rho_g$ )**

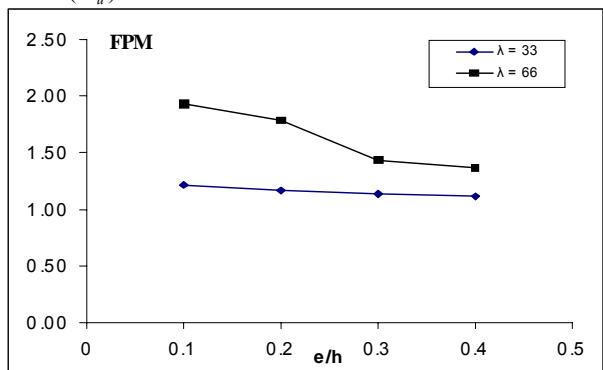
Dari **Gambar 14** dapat dilihat secara umum bahwa dengan naiknya nilai rasio tulangan mengakibatkan menurunnya FPM.

**10.5 Perbandingan hasil analisis dengan perhitungan SKSNI-91 (analisis daktilitas penampang)**

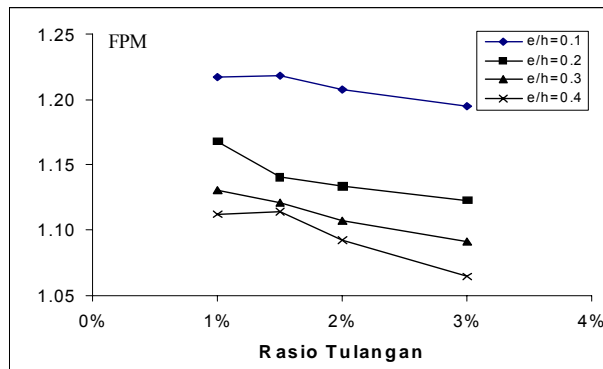
Pada SKSNI-91 faktor pembesaran momen untuk kolom:

$$\delta = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{\phi P_c}} \geq 1$$

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(k l_u)^2}$$



**Gambar 13.** Perbandingan nilai FPM dengan nilai  $\lambda$  yang berbeda untuk  $\rho_g=1\%$



**Gambar 14.** Perbandingan nilai FPM dengan  $\rho_g$  yang berbeda pada,  $\lambda=33$

dimana  $P_u$  adalah beban aksial tekan terfaktor dan  $P_c$  adalah beban tekuk Euler,  $C_m$  adalah faktor koreksi dan diambil satu(konservatif). EI dihitung sbb:

$$EI = \frac{E_c I_g}{2.5(1 + \beta_d)}$$

dimana,  $E_c$  = modulus elastisitas beton,  $I_g$  = momen inersia kotor terhadap garis berat penampang,  $\beta_d$  = nilai banding momen beban mati terfaktor terhadap momen total terfaktor maksimum.

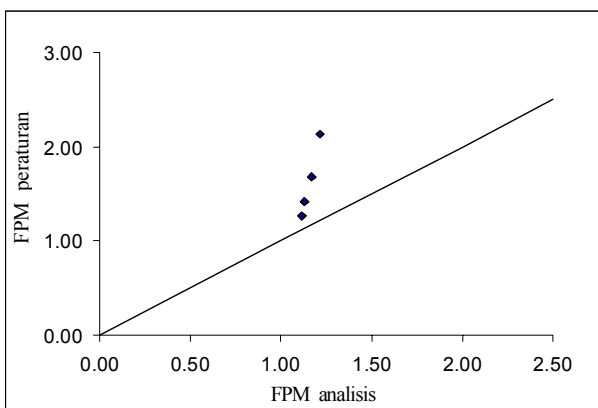
Perhitungan faktor pembesaran momen berdasarkan SKSNI-91 untuk kolom yang sedang dianalisis dengan data berikut :

$l_u = 1680$  mm,  $k = 1$  (kedua ujung kolom dianggap sendi),  $f'_c = 60$  MPa,  $b = 175$  mm,  $h = 175$  mm,  $\beta_d = 0.25$

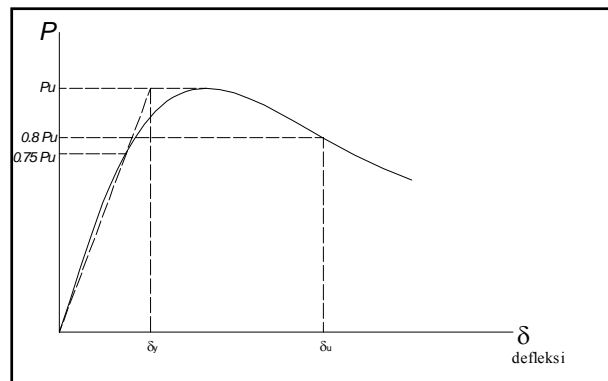
Apabila dibandingkan dengan hasil analisis, maka FPM dari perhitungan SKSNI-91 lebih besar, yang berarti standar perencanaan yang diberikan SKSNI-91 konservatif untuk perencanaan struktur beton mutu tinggi.

**Gambar 15** memberikan ilustrasi perbandingan antara hasil perhitungan SKSNI-91 dan hasil analisis studi dengan beton mutu tinggi.

Daktilitas yang dianalisis adalah daktilitas perpindahan (*displacement ductility*) yaitu perbandingan antara perpindahan maksimum ( $\delta_u$ ) dan perpindahan pada saat leleh ( $\delta_y$ ). Penentuan nilai  $\delta_u$  ditentukan pada saat beban mencapai  $0,8 P_u$  pasca puncak  $P_u$ , sedangkan nilai  $\delta_y$  dihitung pada saat beban  $P_u$  berpotongan dengan garis lurus yang melalui titik koordinat (0,0) dengan koordinat dengan beban  $0,75 P_u$  (Park and Paulay, 1975). **Gambar 16** menunjukkan definisi dari daktilitas tersebut di atas.



**Gambar 15.** Perbandingan FPM hasil analisis dengan perhitungan SKSNI-91  $\lambda=33$ ,  $\rho_g = 1\%$



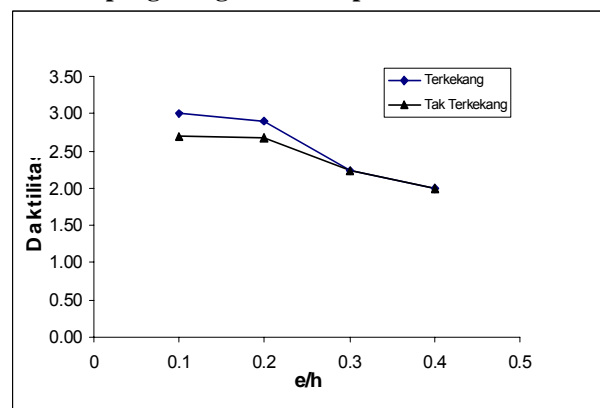
**Gambar 16.** Penentuan daktilitas perpindahan kondisi leleh dan kondisi batas

Dari **Gambar 17** dan **Tabel 1** terlihat bahwa daktilitas kondisi terkekang sedikit lebih besar dibandingkan dengan kondisi tidak terkekang. Hal ini sesuai dengan fungsi pengekangan bahwa kekangan pada kolom akan membuat kolom tersebut lebih daktail, meskipun hasil pengekangan tidak signifikan untuk beton mutu tinggi, dengan rasio volume kecil (1,2%).

**Tabel 1.** Perhitungan daktilitas kolom langsing  $\lambda = 66$  kondisi terkekang dan tak terkekang

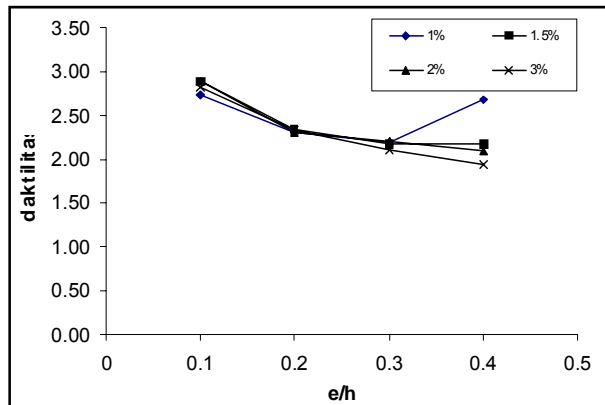
$\rho_g$	e/h	Daktilitas		$P_u$
		Terkekang	Tak Terkekang	
1.0%	0.1	3.09	3.00	770
	0.2	2.80	2.80	508
	0.3	2.10	2.10	352
	0.4	2.00	2.00	233
1.5%	0.1	3.09	2.90	840
	0.2	2.90	2.80	590
	0.3	2.10	2.10	450
	0.4	2.00	2.00	337
2.0%	0.1	3.00	2.70	881
	0.2	2.90	2.68	641
	0.3	2.23	2.23	500
	0.4	2.00	2.00	400
3.0%	0.1	3.00	2.90	960
	0.2	2.70	3.55	745
	0.3	2.00	1.90	630
	0.4	2.20	2.10	480

**a. Efek pengekangan terhadap daktilitas**



**Gambar 17.** Perbandingan daktilitas untuk  $\rho_g = 2\%$  dan  $\lambda=66$





Gambar 18. Daktilitas kolom untuk  $\lambda=33$  dengan  $\rho_g$  yang bervariasi

#### b. Pengaruh rasio tulangan longitudinal dan eksentrisitas

Dari Gambar 18 terlihat bahwa baik pada kolom terkekang maupun tidak terkekang untuk rasio tulangan yang berbeda, daktilitas yang terjadi cenderung tidak berubah pada eksentrisitas yang sama.

Untuk kondisi eksentrisitas yang berbeda dengan rasio tulangan dan kelangsingan yang sama akan menghasilkan tingkat daktilitas yang berbeda. Dengan semakin besar nilai eksentrisitas maka nilai daktilitas semakin besar.

### 11. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari analisis kolom beton bertulang mutu tinggi dengan pengaruh tekuk (momen sekunder) di atas adalah :

1. Semakin besar nilai kelangsingan kolom maka kapasitas kekuatan aksial tekannya berkurang tetapi deformasi lateral pada saat runtuh bertambah.
2. Semakin besar nilai eksentrisitas maka momen lentur dan momen sekundernya bertambah besar sehingga daktilitas kolom bertambah.
3. Penambahan rasio tulangan longitudinal akan mengurangi lendutan lateral dan menambah kekuatan tekannya.
4. Faktor pembesaran momen akan naik dengan pertambahan nilai kelangsingan kolom.
5. Faktor pembesaran momen pada standar perencanaan SKSNI-91 memberikan nilai konservatif untuk kolom beton mutu tinggi.
6. Kekangan pada kolom dengan nilai rasio volume minimum akan menaikkan nilai daktilitas struktur meskipun tidak signifikan.

### Daftar Pustaka

- Antonius, 2000, "Perilaku Kolom Beton Mutu Tinggi Terhadap Beban Konsentris dan Eksentris", Disertasi Doktor di Institut Teknologi Bandung.
- ACI Manual on Concrete Practice Part I, 1995, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete", ACI363R-92.
- Hadi, R.T., 2001, "Perhitungan Perencanaan Kolom Langsing Beton Bertulang", Seminar HAKI Preparing for The Future, Jakarta, April.
- Lloyd, N.A., dan Rangan, B.V., 1996, "Study on High-Strength Concrete Columns Under Eccentric Compression", Vol. 93, No. 6, Nov.-Dec, pp. 631-638.
- M. Santoso, Y. Kusdiman, 2002, "Analisis Kolom Langsing Beton Mutu Tinggi Akibat Beban Aksial Eksentris", Tugas Akhir, Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- R. Park and T. Paulay, 1975, "Reinforced Concrete Structures", John Wiley and Sons.
- SKSNI T-15-1991-03, 1991, "Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung", Departemen Pekerjaan Umum.

