

# Kekuatan dan Deformabilitas Kolom Jembatan Beton Untuk Desain Gempa (Tinjauan Sinergi Antara Beton dan Baja Mutu Tinggi)

Zulfikar Djauhari \*) dan Iswandi Imran \*\*)

## ABSTRAK

Makalah ini bertujuan untuk memaparkan perilaku kekuatan dan daktilitas kolom atau pier jembatan yang terbuat dari beton mutu tinggi serta dikekang menggunakan baja tulangan mutu tinggi serta diberi beban konsentrik monotonik. Analisis dilakukan pada penampang pier yang memiliki ukuran 400 mm x 400 mm serta dikekang menggunakan baja tulangan berdiameter 10 mm. Variabel yang dikaji adalah mutu beton, mutu baja tulangan serta spasi tulangan pengekangan. Selanjutnya pengaruh parameter ini terhadap perilaku kekuatan dan daktilitas kolom/pier jembatan akan dikaji pada makalah ini.

Kata-kata kunci: beton mutu tinggi, baja tulangan mutu tinggi, tulangan pengekangan

## ABSTRACT

This paper presents results from analytical study carried out to investigate the strength and ductility behavior of high-strength concrete bridge columns confined by high-strength steel ties under monotonically concentric compression. The study involves short column specimens with 400 mm x 400 mm square cross section confined by 10 mm ties. The study variables include concrete strength, yield strength and spacing of confining steel. The effects of these variables on the strength and ductility behavior of high-strength concrete columns/piers confined by high-strength steel are presented and discussed.

Keywords: high-strength concrete, high-strength steel, confining steel

## 1 PENDAHULUAN

Perkembangan penggunaan material beton dan baja mutu tinggi sudah sedemikian pesat. Material beton dan baja mutu tinggi telah banyak digunakan pada struktur jembatan utamanya pada komponen tiang jembatan atau yang lazim dikenal dengan istilah pier.

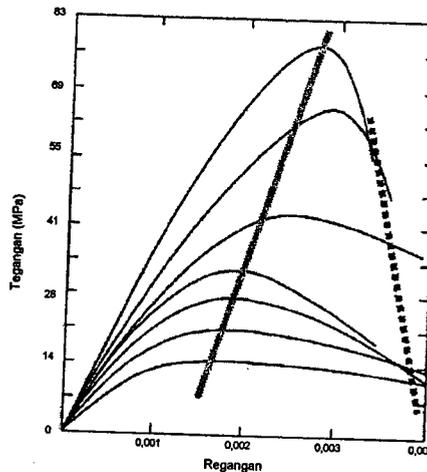
Kombinasi pemakaian bahan bermutu tinggi pada komponen pier merupakan hal yang wajar dan pada kondisi tertentu tidak dapat dielakkan lagi. Kondisi tersebut antara lain karena tuntutan kinerja mekanik, durabilitas, kemudahan pelaksanaan konstruksi, aspek lingkungan dan ekonomi.

Akan tetapi, pemanfaatan beton mutu tinggi berpotensi menimbulkan permasalahan. Masalah tersebut muncul diakibatkan oleh sifat getas beton mutu tinggi. Sifat tersebut amat riskan bila ditinjau dari aspek kegempaan. Berdasarkan kurva tegangan-regangan yang disajikan pada Gambar 1, terlihat bahwa semakin tinggi mutu beton, semakin getas perilaku pasca puncaknya.

---

\*) Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil FT UNRI

\*\*\*) Staf Pengajar, Ketua Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Teknik Sipil FTSL ITB



Gambar 1. Hubungan tegangan-regangan berbagai mutu beton.

Selanjutnya pada pemanfaatan beton mutu tinggi pada pier jembatan, maka untuk mencegah keruntuhan getas material tersebut, beton diberi tulangan pengekangan (*confinement*).

Terkait dengan pemberian tulangan pengekangan tersebut, Pasal 12.9 SNI 03-2847-2006 menyarankan bahwa rasio volumetrik minimum tulangan pengekangan untuk pengekangan bulat (spiral dan cincin) adalah

$$\rho_s = 0,45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yh}} \quad (1)$$

sedangkan yang terkait dengan ketentuan khusus untuk perencanaan gempa yang tercantum pada Pasal 23.4 adalah

$$\rho_s = 0,12 \frac{f'_c}{f_{yh}} \quad (2)$$

selain itu, untuk tulangan pengekangan persegi, Pasal 23.4 mensyaratkan rasio volumetrik minimum tersebut adalah

$$A_{sh} = \frac{0,3 (s h_c f'_c)}{f_{yh}} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (3)$$

$$A_{sh} = 0,09 \frac{s h_c f'_c}{f_{yh}} \quad (4)$$

Persamaan-persamaan tersebut mengindikasikan bahwa makin tinggi mutu beton, makin besar rasio volumetrik tulangan pengekangan yang dibutuhkan oleh penampang beton. Rasio volumetrik tulangan pengekangan yang besar mengakibatkan terjadinya kerapatan tulangan.

Kerapatan tulangan menyebabkan terjadinya bidang perlemahan di antara pertemuan selimut dan inti beton. Selain itu, rapatnya tulangan pengekangan menyulitkan pelaksanaan pengecoran.

Oleh karena itu, salah satu solusi terhadap masalah kerapatan tulangan tersebut adalah penggunaan baja mutu tinggi sebagai tulangan pengekangan. Walaupun demikian, peluang pemanfaatan material beton dan baja mutu tinggi masih memiliki kendala, yakni sebagai berikut.

1. Aspek peraturan, peraturan beton yang berlaku saat ini seperti SNI 03-2847-2006 ataupun ACI 318-2005 belum mengakomodasi penggunaan beton dan baja mutu tinggi.
2. Aspek penelitian, belum banyaknya penelitian-penelitian yang terkait dengan penggunaan beton dan baja mutu tinggi, kalau pun ada, hasil-hasil penelitian tersebut masih mengindikasikan adanya kontradiksi antara satu peneliti dengan peneliti yang lain.

Sehingga hal inilah yang mendasari kami untuk memaparkan pada makalah ini analisis kekuatan dan daktilitas pier jembatan yang menggunakan beton mutu tinggi serta pemakaian baja tulangan mutu tinggi sebagai tulangan pengekangannya.

## 2 TINJAUAN TERHADAP PERATURAN YANG BERLAKU

Pier jembatan umumnya dimodelkan mengikuti karakteristik kolom. Defenisi kolom menurut Pasal 3.25 SNI 03-2847-2006 adalah komponen struktur dengan rasio tinggi terhadap dimensi lateral terkecil melebihi 3 yang digunakan terutama untuk mendukung beban aksial.

Pasal 23.4 SNI 03-2847-2006 atau Pasal 21.4 ACI 318-2005 mengatur bahwa rasio penulangan longitudinal ( $\rho_g$ ) untuk komponen struktur yang menerima kombinasi beban lentur dan aksial tidak boleh kurang dari 0,01 dan tidak boleh lebih dari 0,06. Batas bawah rasio tulangan dipakai untuk menjaga deformasi yang tergantung pada waktu dan agar momen leleh lebih besar dari momen retak. Batas atas rasio penulangan berfungsi untuk menjaga tidak terjadi kongesti tulangan, transfer beban dari komponen lantai ke kolom terutama di bangunan bertingkat rendah, dan terjadinya tegangan geser yang tinggi. Pasal 9.6 SNI 03-2847-2006 atau Pasal 7.6 ACI 318-2005 mensyaratkan bahwa pada komponen struktur tekan yang diberi tulangan spiral atau sengkang pengikat, jarak bersih antar tulangan longitudinal tidak boleh kurang dari  $1,5d_b$  ataupun 40 mm.

Rasio volumetrik minimum yang tercantum pada *Canadian Highway Bridge Design Code* memiliki perbedaan dengan persamaan rasio volumetric yang tercantum dalam SNI maupun ACI. Formulasi rasio volumetric yang tercantum pada CHBD Code mengakomodasi pengaruh gaya aksial terhadap rasio volumetric tulangan pengekangan. Formulasi-formulasi CHBD adalah sebagai berikut.

Persamaan rasio volumetrik untuk pengekangan bulat adalah

$$\rho_s = 0,45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_{yh}} \left( 0,5 + \frac{1,25P_f}{\phi_c f_c' A_g} \right) \quad (5)$$

Atau

$$\rho_s = 0,12 \frac{f_c'}{f_{yh}} \left( 0,5 + \frac{1,25P_f}{\phi_c f_c' A_g} \right) \quad (6)$$

$$\text{dengan } \left( 0,5 + \frac{1,25P_f}{\phi_c f'_c A_g} \right) \geq 1,0$$

sedangkan untuk pengekanan persegi persamaan rasio volumetric minimumnya adalah

$$A_{sh} = \frac{0,3(sh_c f'_c)}{f_{yh}} \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \quad (7)$$

atau

$$A_{sh} = 0,12 \frac{f'_c}{f_{yh}} \left( 0,5 + \frac{1,25P_f}{\phi_c f'_c A_g} \right) \quad (8)$$

$$\text{dengan } \left( 0,5 + \frac{1,25P_f}{\phi_c f'_c A_g} \right) \geq 1,0$$

Sedangkan untuk spasi pengekanan, Pasal 23.4 SNI 03-2847-2006 maupun Pasal 21.4 ACI 318-2005 menyatakan bahwa tulangan transversal harus diletakkan dengan spasi tidak lebih daripada (a) 0,25 dari dimensi terkecil komponen struktur, (b) enam kali diameter tulangan longitudinal, (c)  $s_x$  atau (d) 150 mm.

### 3 PEMODELAN STRUKTUR PIER BETON BERTULANG

#### Simulasi Numerik

Analisis perilaku kekuatan dan daktilitas pier jembatan beton menggunakan asumsi-asumsi sebagai berikut.

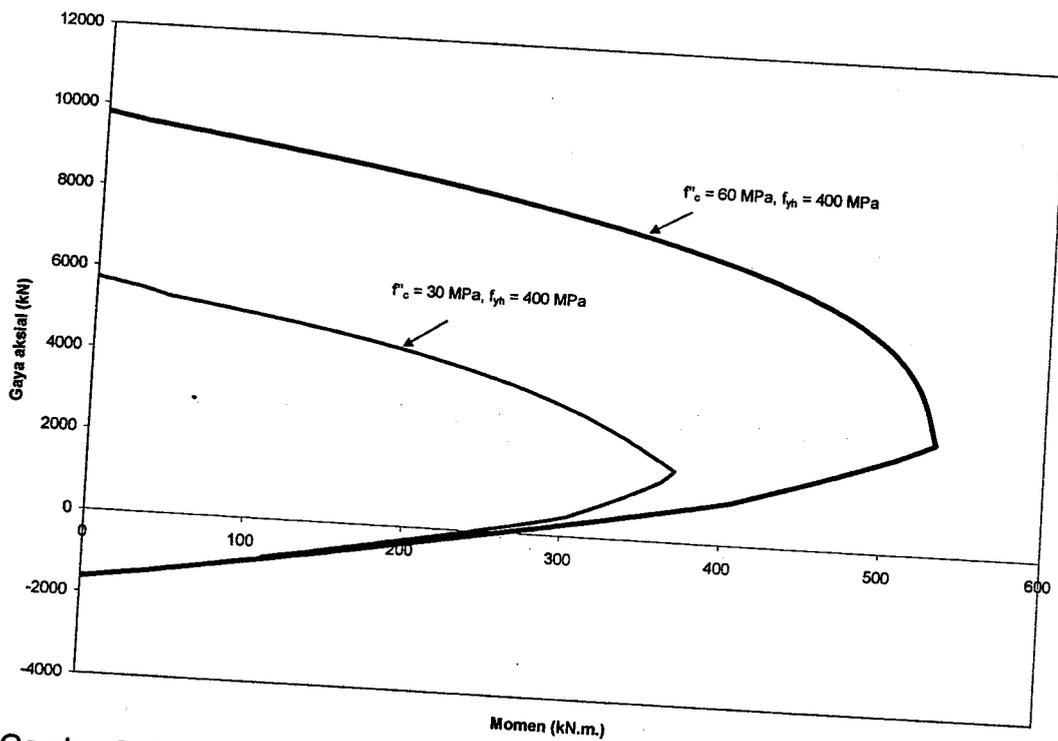
1. Analisis yang dilakukan menggunakan analisis penampang.
2. Analisis penampang kolom dilakukan berdasarkan prinsip penampang sebelum dan setelah lentur tetap berbentuk bidang datar tanpa distorsi.
3. Analisis beton terkekang menggunakan kurva tegangan-regangan monotonik.
4. Tulangan baja longitudinal memiliki kurva tegangan-regangan monotonik.
5. Tidak terjadi tekuk lokal.
6. Kuat tarik beton dianggap tidak memberikan kontribusi, sehingga diabaikan.
7. Tidak dilakukan *time dependent* atau *long term analysis*.

#### Karakteristik Material

Model beton terkekang menggunakan model Konstantinidis dkk. (1999, 2007), beton tanpa kekangan memakai model Popovics (1970), sedangkan karakteristik baja tulangan merujuk kepada model Park dkk. (1975).

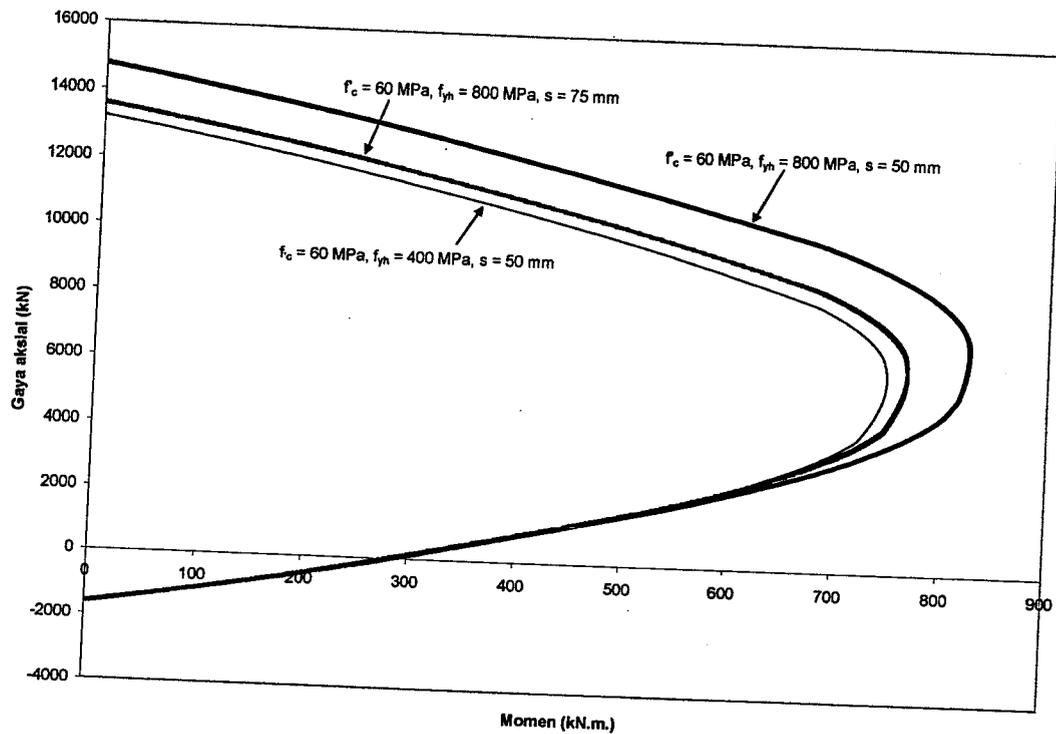
- Penampang yang dianalisis memiliki data-data sebagai berikut.
1. Dimensi penampang : 400 mm x 400 mm
  2. Mutu beton : 30 MPa dan 60 MPa
  3. Mutu tulangan longitudinal : 400 MPa
  4. Mutu tulangan pengekang : 400 MPa dan 800 MPa
  5. Diameter tulangan longitudinal : 25 mm
  6. Diameter tulangan pengekang : 10 mm
  7. Spasi tulangan pengekangan : 50 mm dan 75 mm
  8. Selimut beton : 25 mm

Analisis diagram interaksi gaya aksial dan momen tetap merujuk ke peraturan beton yang berlaku sesuai dengan pembahasan yang lalu.



Gambar 2. Perbandingan diagram interaksi gaya aksial-momen pada penampang tidak terkekang dengan mutu beton 30 MPa dan 60 MPa





Gambar 3. Perbandingan diagram interaksi gaya aksial-momen pada penampang terkekang dengan mutu beton 60 MPa tetapi mutu dan spasi tulangan pengekuatannya berbeda.

Gambar 2 menunjukkan bahwa kapasitas gaya aksial dan momen yang lebih besar dimiliki oleh penampang yang menggunakan beton mutu tinggi. Penampang yang menggunakan beton mutu tinggi memiliki kapasitas gaya aksial maksimal sebesar 9792 kN, sedangkan penampang yang menggunakan beton mutu normal sebesar 5712, atau terjadi penambahan kekuatan sebesar 71% bila menggunakan beton mutu tinggi.

Gambar 3 menyajikan penampang yang memakai mutu beton yang sama yakni sebesar 60 MPa tetapi menggunakan mutu dan spasi tulangan pengekatan yang berbeda.

Terkait dengan pemanfaatan baja tulangan mutu tinggi, Gambar 3 menunjukkan bahwa penampang yang memiliki mutu beton dan spasi pengekatan yang sama tetapi mutu tulangan pengekuatannya berbeda, ternyata penampang yang dikekang menggunakan baja tulangan mutu tinggi mempunyai perilaku gaya aksial dan momen yang lebih baik. Hal ini juga memberikan indikasi bahwa jika menggunakan baja tulangan mutu tinggi sebagai tulangan pengekatan, maka spasi tulangan pengekuatannya memiliki peluang untuk diperlebar. Hal ini ditunjukkan oleh diagram interaksi gaya aksial dan momen pada penampang yang spasinya diperlebar menjadi sebesar 75 mm (peningkatan sebesar 50% dari spasi sebelumnya). Ternyata setelah spasi bertambah menjadi 75 mm, maka berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa perilaku gaya aksial dan momen penampang tersebut masih lebih baik bila dibandingkan dengan penampang yang menggunakan baja tulangan mutu normal sebagai tulangan pengekuatannya. Hal ini memberikan indikasi bahwa baja tulangan mutu tinggi efektif

untuk memperlebar spasi tulangan pengekanan dan merupakan solusi untuk mengatasi masalah kerapatan tulangan.

#### 4 FORMULASI RASIO VOLUMETRIK UNTUK PIER JEMBATAN

Hingga saat ini formulasi rasio volumetrik minimum yang khusus dapat digunakan pada pier jembatan dan mengakomodasi penggunaan material beton dan baja mutu tinggi belum banyak tersedia. Legeron dan Paultre (2006) merupakan peneliti yang telah mengusulkan formulasi rasio volumetrik yang dapat digunakan pada pendesainan pier jembatan serta mengakomodasi penggunaan beton dan baja mutu tinggi.

Model Legeron dan Paultre (2003) menunjukkan adanya relasi antara peningkatan kekuatan dan daktilitas, yang dirumuskan dalam bentuk persamaan efektivitas pengekanan yaitu

$$I_e = \frac{f'_{le}}{f'_c} \quad (9)$$

tegangan pengekanan efektif saat respon puncak ( $f'_{le}$ ) untuk pengekanan adalah

$$f'_{le} = K_e \frac{A_{shy} f'_h}{c_y S} \quad (10)$$

sedangkan untuk pengekanan bulat

$$f'_{le} = K_e \rho_s f'_h \quad (11)$$

Selanjutnya Paultre dan Legeron (2006) mengusulkan persamaan yang menghubungkan antara kebutuhan daktilitas ( $\mu_\phi$ , ductility demand), indeks pengekanan efektif ( $I_e$ ) dan tingkat gaya aksial ( $n$ ). Persamaan tersebut adalah

$$I_e = 0,0115 n \mu_\phi \quad (12)$$

untuk daktilitas parsial dianggap memiliki nilai  $\mu_\phi = 10$  dan daktilitas penuh  $\mu_\phi = 16$ . Substitusi nilai-nilai daktilitas ini ke dalam persamaan (10) dan (11) sehingga diperoleh persamaan untuk daktilitas parsial adalah

$$I_e = 0,115 n \quad (13)$$

dan persamaan untuk daktilitas penuh

$$I_e = 0,184 n \quad (14)$$

Substitusi Persamaan (13) dan (14) ke dalam Persamaan (9), selanjutnya hasil substitusi tersebut dimasukkan ke dalam Persamaan (10) dan (11) sehingga

menghasilkan persamaan luas total penampang tulangan pengekan persegi untuk daktilitas parsial adalah

$$A_{sh} = \frac{0,115nc_y sf'_c}{K_e f'_h} \quad (15)$$

dan persamaan untuk daktilitas penuh adalah

$$A_{sh} = \frac{0,184nc_y sf'_c}{K_e f'_h} \quad (16)$$

Sedangkan untuk pengekan bulat untuk daktilitas parsial dirumuskan sebagai

$$\rho_s = \frac{0,23nf'_c}{K_e f'_c} \quad (17)$$

dan untuk persamaan rasio volumetrik untuk daktilitas penuh adalah

$$\rho_s = \frac{0,368nf'_c}{K_e f'_c} \quad (18)$$

Terkait dengan penggunaan persamaan-persamaan tersebut di atas yang dianggap tidak praktis, sebab harus menghitung terlebih dahulu nilai  $K_e$  dan  $f'_h$  maka Legeron dkk. (2006) mengusulkan persamaan-persamaan rasio volumetrik yang telah disederhanakan yakni:

- pengekan bulat untuk daktilitas parsial

$$\rho_s = 0,48 \frac{f'_c}{f'_y} \quad (19)$$

- pengekan bulat untuk daktilitas penuh

$$\rho_s = 0,54 \frac{f'_c}{f'_y} \quad (20)$$

- pengekan persegi untuk daktilitas parsial

$$A_{sh} = 0,23cs \frac{f'_c}{f'_y} n \quad (21)$$

- pengekan persegi untuk daktilitas penuh

$$A_{sh} = 0,30cs \frac{f'_c}{f'_y} n \quad (22)$$

## 5 KESIMPULAN

1. Baja tulangan mutu tinggi efektif untuk digunakan sebagai tulangan pengekangan pada komponen pier jembatan yang terbuat dari beton mutu tinggi.
2. Pengekangan dengan menggunakan baja tulangan mutu tinggi akan menghasilkan perilaku kekuatan dan daktilitas pada pier jembatan yang lebih baik dibandingkan bila menggunakan baja mutu normal,
3. Penggunaan baja tulangan mutu tinggi sebagai tulangan pengekangan menjadi salah satu solusi untuk menghindari terjadinya kongesti tulangan pada pier jembatan.

## 6 DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318 (2005): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- Cusson, D., dan Paultre, P. (2003): Uniaxial Confinement Model for Normal and High-Strength Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.129, No.2, February, pp.241-252.
- Djauhari, Z., Imran, I., dan Setio, H.D. (2007): Perilaku Kekuatan dan Daktilitas Kolom Beton Mutu Tinggi yang Dikekang dengan Baja Tulangan Mutu Tinggi (kasus kolom konsentrik), *Proceeding Seminar HAKI*.
- Djauhari, Z., dan Imran, I. (2008): Study of Confinement Models for High-Strength Concrete Columns Confined by High-Strength Steel, *International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation*, March.
- Konstantinidis, D.K., Kappos, A.J., Izzuddin, B.A. (2007): Analytical Stress-Strain Model for High-Strength Concrete Members under Cyclic Loading, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.133, No.4, April
- Kappos, A.J., dan Konstantinidis, D. (1999): *Statistical Analysis of Confined High Strength Concrete, Materials and Structures*, V.32, December 1999, pp.734-748.
- Legeron, F., dan Paultre, P. (2003): Uniaxial Confinement Model for Normal and High-Strength Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.129, No.2, February, pp.241-252.
- Legeron, F., dan Paultre, P. (2000): Behavior of High-Strength Concrete Columns under Cyclic Flexure and Constant Axial Load, *ACI Structural Journal*, V.97, No.4, July-August, pp.591-601.
- Paultre, P., dan Legeron, F. (2008): Confinement Reinforcement Design for Reinforced Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.134, No.5, May
- Paultre, P., dan Mitchell, D. (2003): Code Provisions for High-Strength Concrete – An International Perspective, *Concrete International*, pp.79-90.
- Paultre, P., Legeron, L., dan Mongeau, D. (2001): Influence of Concrete Strength and Transverse Reinforcement Yield Strength on Behavior of High Strength Concrete Column, *ACI Structural Journal*, V.98, No.4, July-August 2001, pp.490-501.



Paultre, P., Legeron, F., dan Savard, C. (2000): Use of High-Yield Strength Materials in Seismic Zone: A Strategic Approach, *Proceeding WCEE-12*, 0816.

Sharma, U.K., Bhargava, P., Singh, S.P., dan Kaushik, S.K. (2007): Confinement Reinforcement Design for Plain and Fiber Reinforced High-Strength Concrete Columns, *Journal of Advanced Concrete Technology*, V.5, No.1, pp.113-127.

Sharma, U.K., Bhargava, P., dan Kaushik, S.K. (2005): Behavior of Confined High-Strength Concrete Columns under Axial Compression, *Journal of Advanced Concrete Technology*, V.3, No.2, June, pp.267-281.

SNI 03-2847-2006, Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung, Standar Nasional Indonesia, Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah

## 7 NOTASI

- $A_{sh}$  = Total luas penampang tulangan pengekangan yang terpasang ( $\text{mm}^2$ )  
 $A_c$  = Luas penampang inti beton yang terkekang ( $\text{mm}^2$ )  
 $A_g$  = Luas penampang bruto ( $\text{mm}^2$ )  
 $f_c$  = mutu beton (MPa)  
 $f_{yh}$  = tegangan leleh tulangan pengekangan (MPa)  
 $P_f$  = beban aksial berfaktor  
 $s$  = spasi tulangan pengekangan (mm)  
 $h_c$  = lebar sisi penampang yang dikekang (mm)  
 $\phi_c$  = factor resistensi  
 $\rho_g$  = rasio volumetrik tulangan longitudinal  
 $\rho_s$  = rasio volumetrik tulangan pengekangan