

EVALUATION OF THE CONSTITUTIVE EQUATIONS OF CONFINED NORMAL AND HIGH-STRENGTH CONCRETE BASED ON YIELD CRITERION APPROACH

EVALUASI PERSAMAAN KONSTITUTIF BETON MUTU NORMAL DAN MUTU TINGGI TERKEKANG YANG DITURUNKAN BERDASARKAN KRITERIA LELEH

Antonius

Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA)-Semarang

Email: antoni67a@yahoo.com

ABSTRACT

This paper presents the study of the constitutive equations of confined normal and high-strength concrete based on yield criterion approach. Five of yield criterions and their application were analyzed here. The application of yield criterion was especially its formulation in respect to constitutive equations of strength enhancement of confined concrete (K). Then, the developed equations were then adjusted with the experimental results of the confined concrete columns. From this study, while both the Ansari & Li and Imran & Pantazopoulou model indicated good prediction of K value for confined high-strength concrete of circular section, it was a bit far from the experiment regarding prediction that of square sections. Moreover, the Muguruma proposed-model from column test result was considerably accurate in predicting K-value for confined of normal to high-strength concrete of square sections.

Keywords: Yield criterion, confined concrete, constitutive equations

ABSTRAK

Makalah ini menyajikan studi tentang persamaan konstitutif beton mutu normal dan mutu tinggi yang terkekang berdasarkan pendekatan kriteria leleh. Lima kriteria leleh dan penerapannya dianalisis di sini. Penerapan kriteria leleh terutama perumusannya dalam hal persamaan konstitutif dari peningkatan kekuatan beton yang terkekang (K). Kemudian, persamaan yang dikembangkan disesuaikan dengan hasil eksperimen kolom beton yang terkekang. Dari studi ini, maka model Ansari-Li dan model Imran-Pantazopoulou, menunjukkan prediksi yang baik dari nilai K untuk beton mutu tinggi yang terkekang pada penampang yang berbentuk melingkar, hal itu agak jauh berbeda dari percobaan mengenai prediksi untuk penampang persegi. Selain itu, model Muguruma yang diusulkan dari hasil uji kolom, jauh lebih akurat dalam memprediksi nilai K untuk beton normal hingga beton mutu tinggi yang terkekang pada penampang berbentuk persegi.

Kata-kata kunci: Kriteria leleh, beton terkekang, persamaan konstitutif

PENDAHULUAN

Konsep kolom kuat-balok lemah mensyaratkan bahwa setelah struktur bangunan mengalami gempa rencana, sendi plastis boleh terjadi pada balok dan tidak pada kolom. Konsep tersebut dimaksudkan agar struktur masih tetap berdiri dan orang yang berada di dalam bangunan sempat menyelamatkan diri. Pada prakteknya, saat gempa rencana terjadi, daerah yang memikul momen maksimum pada kolom tetap mengalami sendi plastis. Pada kondisi tersebut, misalnya pada kolom daerah dekat perletakan akan mengalami penurunan kekuatan yang getas akibat lepasnya selimut beton serta penurunan tegangan beton setelah puncak secara tiba-tiba.

Pemasangan tulangan lateral sebagai pengekang (confinement) pada penampang inti kolom dimaksudkan untuk meningkatkan tegangan lateral sehingga menambah kekuatan dan memperlambat proses keruntuhan kolom beton terkekang sehingga menjadi lebih daktail. Terlebih untuk beton mutu tinggi ($f'_c > 50$ MPa) yang mempunyai sifat sangat getas dibanding sifatnya beton mutu normal, pemasangan tulangan pengekang menjadi syarat mutlak untuk mengontrol keruntuhan kolom.

Dewasa ini telah banyak dikembangkan model-model beton terkekang yang dapat digunakan untuk memprediksi perilaku keruntuhan kolom. Namun demikian, dalam upaya untuk mendapatkan model konstitutif beton terkekang yang bersifat umum masih banyak hambatan yang ditemui, diantaranya belum cukupnya data base hasil-hasil pengujian sifat mekanik material beton, terutama pada beton mutu tinggi, yang mencakup pembebanan yang

bersifat multiaksial. Padahal, pada kenyataannya kondisi batas yang bekerja pada struktur beton sering menyebabkan timbulnya pengaruh tegangan biaksial atau triaksial pada elemen struktur, yang mana hal ini tentunya akan mempengaruhi perilaku struktur dalam memikul beban. Perilaku ini sebagai contoh dapat diamati pada elemen pertemuan balok-kolom (*beam-column joint*), struktur kolom ataupun struktur lepas pantai yang pembebanan utamanya adalah beban hidrostatik.

Hingga saat ini, telah banyak dilakukan penelitian mengenai beton terkekang mutu normal maupun mutu tinggi secara eksperimental, sebagai misal dalam dasawarsa terakhir diantaranya oleh Legeron & Paultre (2000), Mei et al. (2001).

Berdasarkan eksperimen yang pernah dilakukan, telah banyak dikembangkan persamaan konstitutif beton terkekang. Persamaan yang diusulkan pada umumnya berdasarkan data hasil pengujian oleh masing-masing peneliti yang berupa data hasil pengujian triaksial maupun pengujian terhadap struktur kolom beton terkekang. Kuat tekan beton yang digunakan pun bervariasi dari beton mutu normal hingga beton mutu tinggi. Pada beton mutu normal, persamaan konstitutif beton terkekang yang diusulkan diantaranya oleh Mander et al. (1988), Saatcioglu & Razvi (1992) dan Imran & Pantazopoulou (2001). Persamaan konstitutif berdasarkan pengembangan kriteria leleh pada beton mutu tinggi diantaranya oleh Xie et al. (1995), Ansari & Li (1998), Bing et al. (2001) dan Imran et al. (2001). Persamaan konstitutif beton terkekang yang telah dikembangkan berdasarkan hasil regresi pengujian struktur kolom diantaranya oleh Muguruma et al. (1993), Antonius et al. (2000) dan Legeron & Paultre (2003). Model

Muguruma dan Legeron bahkan dalam publikasinya dapat digunakan untuk beton mutu normal hingga mutu tinggi.

Selain penelitian tersebut di atas, saat ini juga telah dikembangkan riset untuk mengetahui perilaku beton terkekang, termasuk persamaan konstitutifnya, berdasarkan teori modifikasi medan tekan (*Modified Compression Field Theory*, MCFT) yang telah dilakukan oleh Montoya et al. (2006). Model kekangan elastoplastik juga telah diusulkan oleh Eid et al. (2007) berdasarkan analisis kriteria Drucker Prager. Kedua hasil penelitian tersebut memperlihatkan kesesuaian dengan hasil penelitian yang telah dikembangkan di atas.

Filosofi desain tulangan lateral berdasarkan SNI 03-2847-2002 pasal 10.3 mengutamakan pemeliharaan kapasitas kekuatan batas kolom setelah selimut beton terlepas dan tidak secara langsung menyatakan daktilitas penampang kolom beton bertulang terhadap kombinasi beban aksial dan lentur. Berdasarkan filosofi tersebut, besarnya peningkatan kekuatan beton terkekang ($K=f_{cc}'/f_c'$) memegang peranan penting dalam menentukan persamaan rasio tulangan pengekang minimum yang harus dipasang pada struktur kolom.

Ketentuan SNI 03-2847-2002 pasal 10.3 mengenai rasio tulangan spiral minimum pada kolom pada dasarnya diturunkan dari persamaan peningkatan kekuatan beton terkekang berdasarkan kriteria leleh Mohr-Coulomb yang bersifat linier yaitu:

$$f'_{cc} = f'_c + 4,1 f_2 \quad (1)$$

Secara praktis persamaan tersebut cukup andal diplikasikan untuk beton mutu normal, namun demikian persamaan (1) tersebut diturunkan dari hasil pengujian triaksial pada beton mutu normal, sehingga persamaan tersebut perlu dievaluasi akurasi untuk beton mutu tinggi yang mempunyai perilaku mekanik yang sangat berbeda dengan sifat beton mutu normal.

PERILAKU PLASTISITAS BETON TERKEKANG

Beton Terkekang (Confined Concrete)

Kekangan pada beton dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu kekangan yang bersifat pasif, berupa kekangan oleh tulangan lateral baik berbentuk spiral maupun persegi, dan kekangan yang bersifat aktif dimana kekangannya diberikan oleh fluida.

Pada kekangan pasif, tekanan lateral yang diberikan tidak konstan seperti kekangan aktif, tetapi tergantung pada deformasi aksial dari inti beton dan perilaku tegangan-regangan tulangan lateral. Selain itu kekangan yang diberikan oleh tulangan lateral akan menghasilkan gaya lateral yang tidak merata, yang bekerja pada inti beton, yang besarnya ditentukan oleh rasio tulangan lateral terhadap inti beton, tegangan leleh tulangan lateral, spasi dan konfigurasi tulangan lateral tersebut. Dengan adanya tegangan lateral (f_2) yang dikenakan pada beton, maka beton berada dalam kondisi terkekang (*confined*), dan tegangan aksial beton (f_c) mulai meningkat. Seiring dengan meningkatnya tegangan lateral yang semakin tinggi, kekuatan beton pada arah aksial (f_c) juga akan meningkat secara signifikan. Peningkatan aplikasi tegangan lateral akan menyebabkan daktilitas material beton juga akan meningkat, yang ditandai dengan semakin landainya kurva respon beton setelah respon puncak. Respon beton dengan berbagai sistim pengekangan diperlihatkan pada gambar 1.

Kondisi beton yang terkekang secara pasif dapat dijumpai pada elemen struktur kolom, dimana kekangan diberikan oleh tulangan lateral ataupun pipa baja dan juga Interior joint dimana kekangan diberikan oleh balok.

Kriteria Leleh

Kriteria leleh merupakan batas analitis dari respon elastik pada material. Dengan kriteria ini bisa didapat kondisi tegangan yang mengakibatkan kelelahan pada elemen struktur. Kriteria leleh beton secara umum dapat ditulis:

$$f(\sigma_{ij}, n_{ij}, k_i) = 0 \quad (2)$$

Untuk material yang bersifat anisotropik, orientasi tegangan utama diperlukan karena sifat kelelehannya tidak sama pada semua arah sehingga fungsinya adalah:

$$f(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, n_{11}, n_{22}, n_{33}, k_1, k_2, \dots) = 0 \quad (3)$$

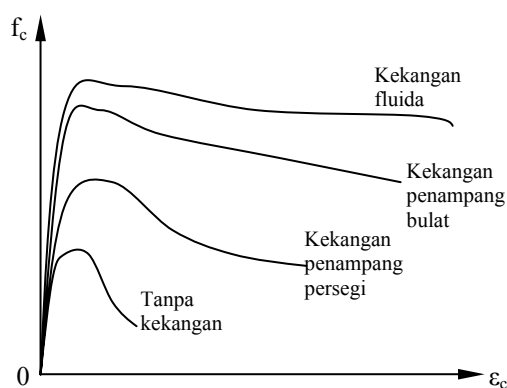
dimana:

σ_{ij} = tegangan utama

$$= [\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

n_{ij} = arah tegangan utama

k_i = konstanta material



Gambar 1. Respon beton terhadap berbagai sistim pengekangan (Antonius, 2005)

Chen (1982) menjabarkan fungsi kelelahan dalam bentuk bidang meridian dan bidang deviatorik (π -plane), lihat gambar 2. Kelelahan material beton yang merupakan porous bersifat sensitif terhadap tegangan hidrostatik. Oleh karena itu kriteria leleh untuk material beton harus memperhitungkan tegangan hidrostatik. Kurva kelelahan pada beton tergantung pada tegangan hidrostatik (I_1), mempunyai bentuk lengkung, smooth dan cembung (convex) dan apabila diberi beban hidrostatik murni tidak dapat menyebabkan kelelahan.

Kriteria Mohr-Coulomb

Kriteria ini digunakan sebagai filosofi dasar dalam SNI Beton untuk menentukan persamaan tulangan pengekang pada kolom. Kriteria Mohr-Coulomb dinyatakan dalam persamaan :

$$|\tau| = c - \sigma \tan \phi \quad (4)$$

Berdasarkan gambar 3, persamaan (4) dapat diubah menjadi :

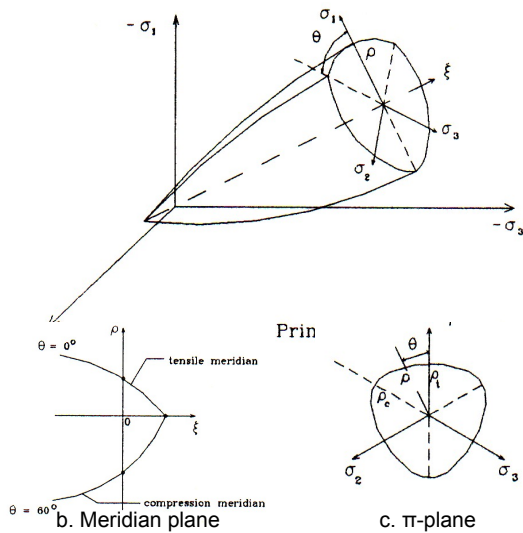
$$\sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2c \cdot \cos \phi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2c \cdot \cos \phi} = 1 \quad (5)$$

Untuk kekangan (*confinement*) berlaku $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$:

$$\text{atau} \quad \frac{\sigma_1}{f'_t} - \frac{\sigma_3}{f'_c} = 1 \quad (6)$$

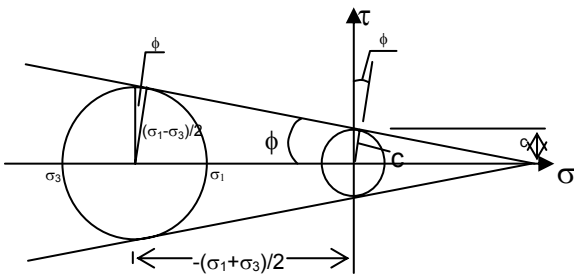
Persamaan (4) dapat dikembangkan menjadi

$$K = \frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + m \frac{f_2}{f'_c} \quad (7)$$



Gambar 2. Bentuk kriteria leleh beton secara umum

dimana f_{cc} identik dengan tegangan tekan beton yang terkekang ($= -\sigma_3 = -\sigma_c$), f_2 adalah tegangan kekangan/lateral ($= -\sigma_1$), dan f_c adalah kuat tekan beton terhadap beban uniaksial. Koefisien m pada persamaan (7) diperoleh dari hasil uji eksperimental. Persamaan (7) tersebut identik dengan persamaan (1).



Gambar 3. Hubungan antara tegangan geser utama kriteria Mohr-Coulomb

Kriteria Mohr-Coulomb mempunyai kelebihan antara lain fungsi kelebihannya sederhana oleh karena hanya mengandung dua parameter, sehingga sangat populer. Namun demikian kriteria ini mempunyai kekurangan diantaranya yaitu garis batas permukaan kelelahan pada bidang meridian adalah linier, dimana hal ini tidak sesuai dengan permukaan kelelahan bidang meridian yang berlaku pada beton.

Kriteria Parabolik Leon

Kriteria ini mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$f(I_1, J_2, \theta) = \left[\sqrt{1,5} \frac{\sqrt{2J_2}}{f_c} \right]^2 + m \left[\frac{2I_1}{\sqrt{3}f_c} \right] - c = 0 \quad (8)$$

Berdasarkan Chen (1982), salah satu kelebihan kriteria Parabolik Leon adalah cukup sederhana karena hanya mengandung 3 parameter, namun kriteria ini tidak terlalu cocok untuk beton karena derajat friksi interlocking. Kriteria ini digunakan oleh Xie et al. (1995) untuk mengembangkan persamaan konstitutif beton terkekang.

Kriteria Ottosen

Kriteria ini melibatkan invarian tegangan yaitu I_1 , J_2 dan θ yang dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$f(I_1, J_2, \theta) = a \frac{J_2}{f_c^2} + \frac{\lambda \sqrt{J_2}}{f_c} + b \frac{I_1}{f_c} - 1 = 0 \quad (9)$$

Fungsi kriteria Ottosen merupakan fungsi yang cembung, mulus dan tidak ada diskontinuitas. Fungsi ini cocok untuk tegangan uniaksial, biaksial dan multiaksial. Namun kriteria ini mempunyai kekurangan yaitu lebih rumit karena mengandung 4 parameter sehingga membutuhkan data yang banyak untuk kalibrasi. Kriteria ini digunakan oleh Ansari & Li (1998) dan Imran et al. (2001) untuk menurunkan persamaan konstitutif beton mutu tinggi terkekang.

Kriteria Hsieh-Ting-Chen (H-T-C)

Kriteria ini hampir sama dengan kriteria Ottosen. Perbedaannya hanya terdapat pada penyederhanaan bentuk fungsi λ yaitu $\lambda(\theta) = b \cos \theta + c$ untuk $|\theta| \leq 60^\circ$, dimana b dan c adalah konstanta material. Bentuk fungsi lelehnya adalah:

$$f(I_1, J_2, \sigma_1) = a \frac{J_2}{f_c^2} + b \frac{\lambda \sqrt{J_2}}{f_c} + c \frac{\sigma_1}{f_c} + d \frac{I_1}{f_c} - 1 = 0 \quad (10)$$

Fungsi ini cocok untuk tegangan uniaksial, biaksial dan multiaksial. Namun kriteria ini mempunyai kekurangan yaitu lebih rumit karena mengandung 4 parameter. Kriteria ini digunakan oleh Imran & Pantazopoulou (2001) untuk menurunkan persamaan konstitutif beton mutu normal terkekang.

Kriteria Willam-Warnke

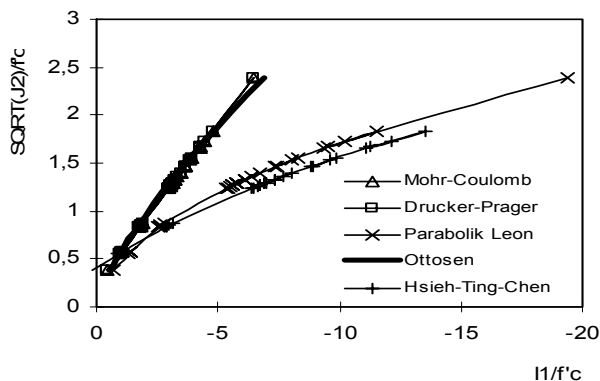
Fungsi leleh kriteria ini adalah:

$$\rho(\theta) = \frac{2\rho_c(\rho_c^2 - \rho_t^2)\cos\theta}{4(\rho_c^2 - \rho_t^2)\cos^2\theta + (\rho_c - 2\rho_t)^2} + \frac{\rho_c(2\rho_t - \rho_c)[4(\rho_c^2 - \rho_t^2)\cos^2\theta + 5\rho_t^2 - 4\rho_t\rho_c]}{4(\rho_c^2 - \rho_t^2)\cos^2\theta + (\rho_c - 2\rho_t)^2} \quad (11)$$

Kriteria Willam-Warnke lebih teliti dan akurat dan cocok untuk tegangan uniaksial, biaksial dan multiaksial. Namun kekurangan kriteria ini adalah lebih rumit karena mengandung 5 parameter. Kriteria ini digunakan oleh Mander et al. (1988) dan Bing et al. (2001) untuk menurunkan persamaan konstitutif beton terkekang.

Gambar 4 memperlihatkan permukaan leleh (*yield surface*) triaksial (*failure surface*), dalam besaran Haigh-Westergaard, yang berbeda-beda dari setiap kriteria leleh dalam hubungan antara tekanan lateral (I_1/f_c) terhadap peningkatan kekuatan beton terkekang ($\sqrt{J_2}/f_c$). Perbedaan kurva dari masing-masing kriteria disebabkan perbedaan dan jumlah parameter yang digunakan. Pola permukaan leleh Drucker-Prager dan Ottosen hampir berimpit dengan pola permukaan leleh Mohr-Coulomb namun setelah mencapai tegangan lateral yang tinggi pola permukaan lelehnya menyimpang karena kriteria Mohr-Coulomb bersifat linier terhadap bidang meridian.

Kriteria Parabolik Leon dan Hsieh-Ting-Chen mempunyai kecenderungan penyimpangan perilaku yang berbeda dari ketiga kriteria di atas, yang dimulai dari tekanan lateral rendah hingga tekanan lateral tinggi. Berdasarkan perilaku permukaan leleh dari kelima kriteria di atas, dapat dikatakan bahwa penurunan persamaan peningkatan kekuatan beton terkekang akan berlainan tergantung dari kriteria yang digunakan dan jenis material hasil pengujian triaksial yang akan menentukan konstanta material.



Gambar 4. Kurva permukaan keruntuhan masing-masing kriteria leleh akibat tekanan

PERSAMAAN KONSTITUTIF BETON TERKEKANG

Tabel 1 adalah persamaan konstitutif peningkatan kekuatan beton terkekang yang telah dikembangkan berdasarkan penurunan kriteria leleh yang menggunakan hasil pengujian triaksial. Persamaan dalam tabel 1 selanjutnya diolah untuk mengetahui grafik kriteria keruntuhan permukaan (*failure strength envelope*) beton terkekang dari masing-masing persamaan yang dapat dilihat pada gambar 5. Di dalam kurva tersebut tegangan lateral (f_2) dan tegangan beton terkekang dinormalisasi terhadap tegangan beton tanpa kekangan (f'_{co}). Aplikasi tegangan lateral yang diterapkan adalah dari nol (tanpa kekangan) hingga kondisi kekangan penuh ($f_2/f'_{co}=1$).

Terlihat pada gambar 5 bahwa untuk tingkat kekangan rendah ($f_2/f'_{co} < 0,2$), nilai K berdasarkan SNI relatif berimpit dengan model Imran (H-T-C). Model Xie et al. terlihat mempunyai prediksi yang paling tinggi dibandingkan prediksi model lainnya. Pada tingkat kekangan moderat ($0,2 < f_2/f'_{co} < 0,4$), prediksi nilai K masing-masing model mulai menyimpang signifikan satu sama lain, dimana terlihat model Imran (Ottosen) mempunyai prediksi nilai K yang tertinggi, dan prediksi berdasarkan model Bing et al. adalah yang terendah. Pada tingkat kekangan tinggi ($f_2/f'_{co} > 0,4$), perbedaan prediksi nilai K dari masing-masing model menyimpang lebih jauh lagi.

Dari delapan model dalam tabel 1 di atas, hanya model /persamaan yang digunakan dalam SNI yang bersifat linier, sedangkan model lainnya bersifat non-linier. Sifat linier dalam hal aplikasi desain akan lebih mudah dan praktis, namun sifat non-linier sebenarnya lebih realistis dalam menggambarkan perilaku material beton yang sebenarnya.

Kurva keruntuhan permukaan beton terkekang pada gambar 5 tersebut juga menunjukkan bahwa masing-masing model mempunyai ciri khas, dan dipengaruhi oleh parameter yang ditinjau, serta tergantung pula dari jenis material yang digunakan dalam eksperimen.

Selain keenam model persamaan di atas, di dalam tabel 1 juga ditampilkan model persamaan Muguruma et al. (1993) dan model Legeron & Paultre (2003), dimana model tersebut diturunkan dari hasil pengujian kolom beton mutu normal hingga beton mutu tinggi ($20 < f'_c < 160$ MPa).

EVALUASI MODEL KONSTITUTIF VS HASIL EKSPERIMEN

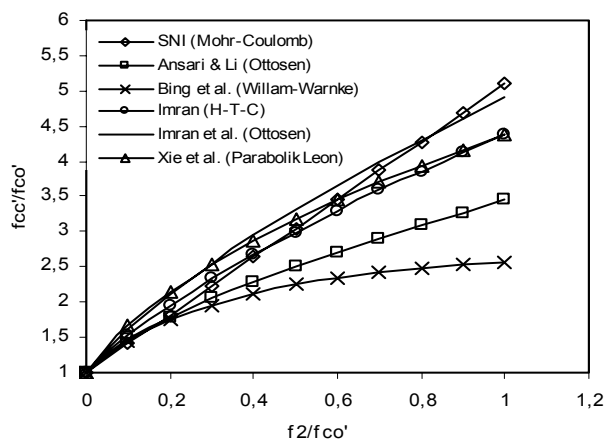
Kalkulasi Beton Terkekang

Persamaan konstitutif beton terkekang pada tabel 1 kemudian akan divalidasi dengan hasil pengujian kolom pendek (*short column*) beton terkekang yang diberi beban konsentrik. Validasi

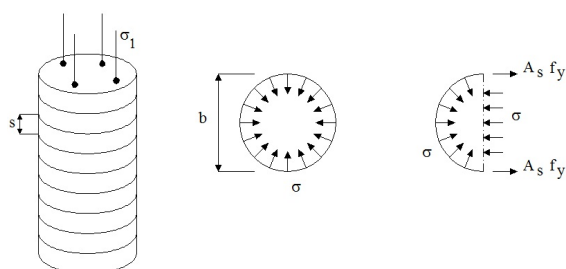
dilakukan untuk mengetahui akurasi masing-masing persamaan dalam memprediksi peningkatan kekuatan beton terkekang (K) berdasarkan hasil eksperimen. Kolom hasil pengujian sebagai data validasi adalah 26 buah kolom beton mutu tinggi ($50 < f'_c < 85$ MPa) penampang bulat yang diuji oleh Antonius (2004) pada tabel 2, dan 20 buah kolom penampang persegi dengan kuat tekan beton mutu normal hingga mutu tinggi yaitu antara 30 hingga 70 MPa pada tabel 3 (Antonius, 2005).

Tegangan lateral kolom penampang bulat dihitung berdasarkan keseimbangan antara gaya lateral dengan reaksi tulangan lateral yang diperoleh berikut (lihat gambar 6).

$$f_2 = k_e \cdot \frac{2 \cdot A_s \cdot f_s}{s \cdot d_c} \quad (12)$$



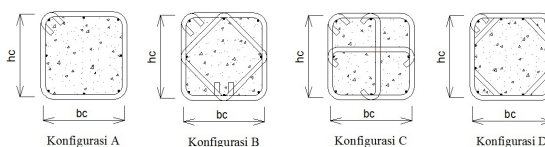
Gambar 5. Failure Strength Envelope persamaan konstitutif beton terkekang



Gambar 6. Keseimbangan gaya kekangan pada beton penampang bulat

Kolom penampang persegi hasil eksperimen yang divalidasi mempunyai empat buah konfigurasi tulangan lateral (pengekang), yang mempunyai penampang inti seperti terlihat pada gambar 7. Karena bentuk penampang adalah bujursangkar, maka tegangan lateral arah x dan arah y adalah sama, sehingga tegangan lateral f_2 :

$$f_2 = k_e \cdot \rho_s \cdot f_{yh} \quad (13)$$



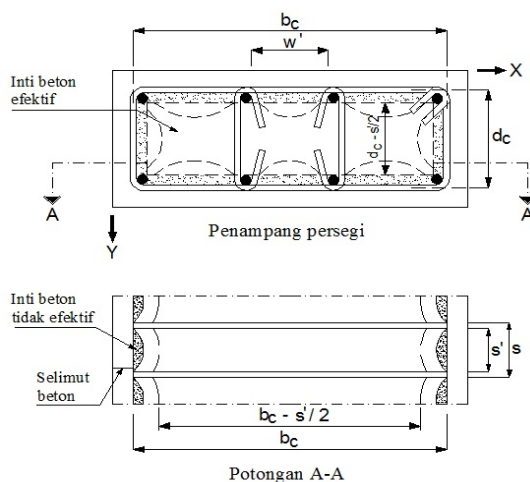
Gambar 7. Konfigurasi tulangan penampang persegi

Tabel 1. Persamaan konstitutif peningkatan kekuatan beton terkekang

Model	Persamaan Konstitutif Peningkatan Kekuatan Beton Terkekang ($K = \frac{f'_{cc}}{f'_c}$)	Keterangan
SNI 03-2847-2002	$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + 4,1 \left(\frac{\sigma_3}{f'_c} \right)$	Persamaan filosofi dasar (dari kriteria Mohr-Coulomb) untuk menentukan rasio tulangan pengekang pada kolom; SNI pasal 10.3.
Xie, Elwi & MacGregor (1994)	$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = \sqrt{1 + k \left(\frac{f_2}{f'_c} \right)}$ k=18,2 untuk $f'_c=60,2$ MPa k=17,9 untuk $f'_c=92,2$ MPa k=7,44 untuk $f'_c=119$ MPa	Persamaan diturunkan berdasarkan kriteria Parabolik Leon berdasarkan data triaksial beton mutu 60,2 hingga 119 MPa.
Ansari & Li (1998)	$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + 2,45 \left(\frac{\sigma_3}{f'_c} \right)^{0,703}$	Persamaan diturunkan berdasarkan regresi non-linier data triaksial beton mutu tinggi ($47 < f'_c < 108$ MPa) dengan menggunakan kriteria Ottosen.
Bing, Park & Tanaka (2000)	$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = -0,413 + 1,413 \sqrt{1 + 11,4 \frac{f_2}{f'_c}} - 2 \frac{f_2}{f'_c}$	Persamaan diturunkan berdasarkan kriteria Willam-Warnke. Data kuat tekan beton yang digunakan mempunyai kuat tekan diantara 50-85 MPa. Persamaan tersebut berlaku untuk tulangan pengekang mutu normal ($f_y < 400$ MPa).
Imran & Pantazopoulou (2001)	$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = \left(\frac{f_2}{f'_c} - 0,021 \right) + \sqrt{1,043 + 10,571 \frac{f_2}{f'_c}}$	Persamaan diturunkan berdasarkan kriteria Hsieh-Ting-Chen dengan menggunakan data triaksial beton mutu normal.
Imran, Moestopo, Suharwanto & Brahmantyo (2001)	$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = \left(\frac{f_2}{f'_c} - 0,327 \right) + \sqrt{1,7606 + 16,1714 \frac{f_2}{f'_c}}$	Persamaan diturunkan berdasarkan kriteria Ottosen dengan menggunakan data triaksial beton mutu tinggi ($60 < f'_c < 90$ MPa).
Muguruma, Nishiyama & Watanabe (1993)	$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + 49, f_2$ $f_2 = 0,313 \cdot \rho_w \frac{\sqrt{f_{yw}}}{f'_c} \left(1 - \frac{s}{d_{so}} \right)$	Persamaan diturunkan berdasarkan regresi data hasil pengujian kolom beton mutu nor-mal dan mutu tinggi terkekang dengan kuat tekan beton $20 < f'_c < 160$ Mpa.
Legeron & Paultre (2003)	$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + 2,4 (l_e')^{0,7}$	Persamaan diturunkan berdasarkan regresi data hasil pengujian kolom beton mutu nor-mal dan mutu tinggi terkekang.

Apabila tidak ditentukan dari masing-masing model persamaan, nilai k_e (efektifitas kekangan) dihitung berdasarkan persamaan usulan Mander et al. (1988) yaitu persamaan 14, (lihat gambar 8):

$$k_e = \frac{\left[1 - \sum_{i=1}^n \frac{w_i^2}{6b_{cx}b_{cy}} \right] \left(1 - \frac{s'}{2b_{cx}} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_{cy}} \right)}{1 - \rho_{cc}} \quad (14)$$



Gambar 8. Konsep daerah efektif terkekang penampang

HASIL VALIDASI DAN PEMBAHASAN

Hasil evaluasi nilai K antara prediksi berdasarkan model terhadap hasil eksperimen ditampilkan pada tabel 4.

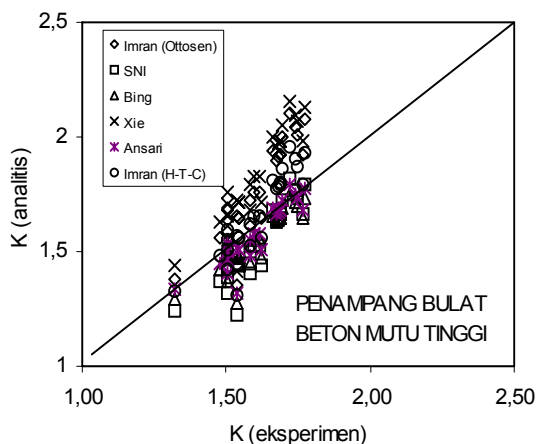
Validasi kolom penampang bulat

Terdapat empat model yang mempunyai nilai COV (*Coefficient of Variation*) di bawah 10% untuk validasi hasil eksperimen kolom penampang bulat yaitu model usulan SNI, model Ansari & Li (1998), model Bing et al. (2001) dan model Imran & Pantazopoulou (2001). Diantara keempat model tersebut model Ansari & Li mempunyai nilai COV yang paling rendah, yang berarti mendekati terhadap hasil eksperimen. Model Ansari & Li dan juga model Bing et al diturunkan berdasarkan hasil pengujian triaksial pada beton mutu tinggi, sehingga pada dasarnya aplikasi konstanta material hasil pengujian mempunyai kemiripan dengan material yang digunakan pada kolom eksperimen.

Yang menarik dalam hal ini adalah bahwa meskipun model yang digunakan dalam SNI dan model Imran & Pantazopoulou diturunkan berdasarkan hasil pengujian triaksial beton mutu nor-

mal, namun nilai COV yang diperoleh berada di bawah 8,5%. Hasil ini mengindikasikan bahwa prediksi peningkatan kekuatan beton terkekang dari kedua model tersebut terhadap hasil eksperimen kolom penampang bulat masih cukup baik.

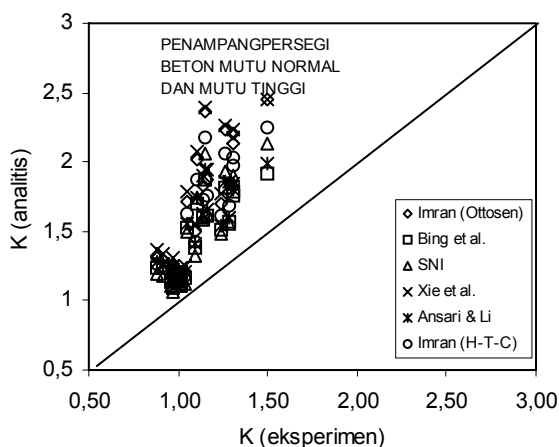
Korelasi nilai K antara model usulan terhadap hasil eksperimen penampang bulat ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. K hasil analitis vs K Hasil eksperimen penampang bulat

Validasi kolom penampang persegi

Hasil validasi nilai K antara semua model berdasarkan kriteria leleh terhadap hasil eksperimen kolom penampang persegi memperlihatkan nilai COV di atas 20%. Dari keenam model tersebut, validasi berdasarkan model Imran & Pantazopoulou mempunyai nilai COV paling rendah (22,7%), dan validasi kelima model lainnya mempunyai nilai COV di atas 30%. Besarnya nilai COV ini, yang juga terjadi perbedaan yang sangat besar dengan validasi terhadap kolom penampang bulat, mengindikasikan bahwa efektifitas kekangan pada beton terkekang penampang persegi memegang peranan yang dominan dalam menentukan besarnya tegangan lateral efektif. Dengan demikian konsep efektifitas kekangan pada penampang persegi, termasuk konsep efektifitas kekangan berdasarkan Mander et al. (1988) perlu dievaluasi atau dimodifikasi agar pemodelan tegangan lateral efektif menjadi lebih akurat. Korelasi nilai K antara model usulan terhadap hasil eksperimen penampang persegi terlihat pada gambar 10.



Gambar 10. K hasil analitis vs K Hasil eksperimen penampang persegi

Evaluasi nilai K juga dilakukan antara model yang diturunkan dari hasil pengujian kolom. Model yang ditinjau adalah model Muguruma et al (1993) dan model Legeron & Paultre (2003). Pemilihan kedua model tersebut karena berdasarkan publikasi dari penelitiannya disebutkan bahwa kedua model dapat diaplikasikan untuk beton mutu normal hingga beton mutu tinggi.

Validasi model Muguruma adalah terhadap hasil eksperimen kolom penampang persegi, karena model tersebut dibatasi hanya untuk penampang persegi. Hasil validasi diperoleh nilai COV sebesar 2,6% (tabel 4). Hasil ini sangat akurat dan sangat baik, yang mengindikasikan hampir semua nilai K kolom antara model usulan dengan hasil eksperimen sangat dekat. Perlu diketahui bahwa kalkulasi efektifitas kekangan model Muguruma agak sedikit berbeda dari konsep efektifitas kekangan oleh Mander. Dengan demikian aplikasi tegangan lateral (f_2) yang timbul juga mengalami perbedaan.

Validasi nilai K berdasarkan model Legeron & Paultre terhadap hasil eksperimen kolom penampang bulat menghasilkan nilai COV yang cukup baik yaitu sebesar 7,3% (tabel 4). Namun dalam validasinya terhadap hasil eksperimen kolom penampang persegi, nilai COV membesar menjadi 16,5%. Meskipun nilai COV pada penampang persegi tidak sebesar nilai COV berdasarkan validasi antara model berdasarkan kriteria leleh, namun konsep efektifitas kekangan tetap harus menjadi fokus dalam penelitian selanjutnya.

Validasi model Muguruma adalah terhadap hasil eksperimen kolom penampang persegi, karena model tersebut dibatasi hanya untuk penampang persegi. Hasil validasi diperoleh nilai COV sebesar 2,6% (tabel 4). Hasil ini sangat akurat dan sangat baik, yang mengindikasikan hampir semua nilai K kolom antara model usulan dengan hasil eksperimen sangat dekat. Perlu diketahui bahwa kalkulasi efektifitas kekangan model Muguruma agak sedikit berbeda dari konsep efektifitas kekangan oleh Mander. Dengan demikian aplikasi tegangan lateral (f_2) yang timbul juga mengalami perbedaan.

Validasi nilai K berdasarkan model Legeron & Paultre terhadap hasil eksperimen kolom penampang bulat menghasilkan nilai COV yang cukup baik yaitu sebesar 7,3% (tabel 4). Namun dalam validasinya terhadap hasil eksperimen kolom penampang persegi, nilai COV membesar menjadi 16,5%. Meskipun nilai COV pada penampang persegi tidak sebesar nilai COV berdasarkan validasi antara model berdasarkan kriteria leleh, namun konsep efektifitas kekangan tetap harus menjadi fokus dalam penelitian selanjutnya.

Implikasi desain tulangan pengekang

Sebagaimana diketahui persamaan desain tulangan pengekang yang dianut dalam SNI adalah berdasarkan penurunan kriteria Mohr-Coulomb dari hasil pengujian triaksial beton mutu normal terhadap beban statis. Persamaan desain tersebut diimplementasikan dalam rasio tulangan pengekang (ρ_s) sebagai berikut:

$$\rho_s = 0,45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_y} \quad (15)$$

$$\rho_s = 0,3 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_y} \quad (16)$$

Persamaan (15) direkomendasikan untuk kolom penampang bulat, dan persamaan (16) untuk penampang persegi.

Berdasarkan hasil validasi yang diperlihatkan pada tabel 4 di atas, model SNI sebenarnya masih cukup akurat (applicable) untuk digunakan dalam desain tulangan pengekang beton mutu normal hingga mutu tinggi. Namun model SNI hanya baik digunakan untuk penampang bulat (COV < 10%), dan untuk aplikasinya pada penampang persegi masih jauh dari hasil eksperimen.

Dengan demikian persamaan (15) masih cukup akurat untuk digunakan, dan persamaan (16) masih perlu dievaluasi lebih lanjut.

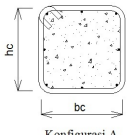
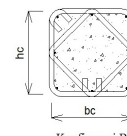
Hasil validasi pada kolom penampang persegi menunjukkan bahwa model Muguruma adalah yang paling baik dalam memprediksi nilai K untuk beton mutu normal hingga mutu tinggi (COV<5%).

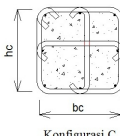
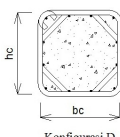
Apabila persamaan nilai K berdasarkan model Muguruma digunakan, maka akan terdapat modifikasi yang cukup signifikan terhadap persamaan (16), yang disebabkan oleh perbedaan karakteristik persamaan, dimana persamaan Muguruma mempunyai sifat non-linieritas sedangkan persamaan dasar yang digunakan dalam SNI bersifat linier.

Tabel 2. Kolom eksperimen penampang bulat [Antonius, 2004].

No	Kode spesimen	Diameter kolom (mm)	f_c' (MPa)	Tulangan Lateral			Tulangan Longitudinal			K			
				Sengkang	f_y (MPa)	ϕ -spasi (mm)	ρ_s (%)	f_y (MPa)	Tulangan (mm)		ρ (%)		
1	KS1	110	51,8	Spiral	488	6,25-35	4,38	325	5 ϕ 9,3	3,6	1,77		
2	KH1			Hoop	466	6,25-35	4,38				1,77		
3	KS2					488	6,25-35	4,38				1,67	
4	KS3		63,2	Spiral	315	5,5-35	3,19	325	5 ϕ 9,3	3,6	1,53		
5	KS4					315	5,5-55	2,03				1,32	
6	KS5					488	6,25-35	4,38				1,62	
7	KS6				Spiral	587	6,25-35	4,38				1,60	
8	KS7					587	6,25-55	2,79	325	5 ϕ 9,3	3,6	1,55	
9	KH2		75,3			466	6,25-35	4,38				2,54	
10	KH3				Hoop	567	6,25-35	4,38				2,66	
11	KH4					567	6,25-55	2,78				1,60	
12	KS8	250	51,2	Spiral	402	10-35	4,72	400	8 ϕ 12,1	1,87	1,72		
13	KS9						365				10-35	3,01	1,50
14	KH5			Hoop	400	10-35	4,72				1,74		
15	KH6					359	10-55	2,01				1,58	
16	KS10					320	11,7-35	6,14				1,70	
17	KS11		64	Spiral	320	11,7-55	3,91	400	8 ϕ 12,1	1,87	1,54		
18	KS12					400	10,3-35	4,76				1,66	
19	KS13					320	11,7-35	6,14		12 ϕ 12,1	2,81	1,71	
20	KH7					320	11,7-35	6,14				1,68	
21	KH8		67,1	Hoop	320	11,7-55	3,91	400	8 ϕ 12,1	1,87	1,48		
22	KH9					305	10,3-35	4,76				1,58	
23	KH10				320	11,7-35	6,14		12 ϕ 12,1	2,81	1,69		
24	KS14				390	12-35	6,52				1,69		
25	KS15	81,6	Spiral	380	12-55	4,11	400	8 ϕ 12,1	1,87	1,51			
26	KH11			Hoop	388	12-55	4,11				1,50		

Tabel 3. Kolom eksperimen penampang persegi [Antonius, 2005]

No	Kode spesimen	f_c' (MPa)	Tulangan lateral			K	
			Konfigurasi	Φ -spasi (mm)	ρ_s (%)		f_y (MPa)
1	AL5	30	 Konfigurasi A	5,5 - 50	1,9	500	1,16
2	AM5	50		5,5 - 50	1,9		1,05
3	AM10			5,5 - 100	0,95		0,96
4	AH5	70		5,5 - 50	1,9		1,09
5	AH10			5,5 - 100	0,95		0,97
6	BL5	30	 Konfigurasi B	5,5 - 50	3,24	500	1,16
7	BM5	50		5,5 - 50	3,24		1,31
8	BM10			5,5 - 100	1,62		0,92
9	BH5	70		5,5 - 50	3,24		1,29
10	BH10			5,5 - 100	1,62		1,02

11	CL5	30	 Konfigurasi C	5,5 - 50	2,85	500	1.27
12	CM5	50		5,5 - 50	2,85		1.1
13	CM10			5,5 - 100	1,43		0.97
14	CH5			5,5 - 50	2,85		1.24
15	CH10			5,5 - 100	1,43		1.02
16	DL5	30	 Konfigurasi D	5,5 - 50	3,47	500	1.50
17	DM5	50		5,5 - 50	3,47		1.30
18	DM10			5,5 - 100	1,73		0.88
19	DH5			5,5 - 50	3,47		1.14
20	DH10			5,5 - 100	1,73		1.04

Tabel 4. Nilai COV hasil analitis vs eksperimen

Model	COV (%) untuk : $K = \frac{f_{cc}}{f_c}$	
	Penampang bulat	Penampang persegi
SNI 03-2847-2002	8,4	32,7
Xie, Elwi & MacGregor (1994)	13,6	41,6
Ansari & Li (1998)	7,1	32,5
Bing, Park & Tanaka (2000)	8	30,3
Imran & Pantazopoulou (2001)	7,3	22,7
Imran, Moestopo, Suhawanto & Brahmantyo (2001)	12,7	40,4
Muguruma, Nishiyama & Watanabe (1993)	-	2,6
Legeron & Paultre (2003)	7,3	16,5

KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang diperoleh dari pembahasan dalam paper ini adalah sebagai berikut:

1. Perbedaan permukaan keruntuhan setiap kriteria leleh disebabkan oleh jumlah parameter yang diperhitungkan dan juga jenis material yang cocok digunakan. Kondisi tersebut akan mengakibatkan penurunan persamaan konstitutif beton terkekang menjadi bervariasi satu sama lain.
2. Aplikasi tegangan lateral memegang peranan signifikan dalam menentukan permukaan keruntuhan kriteria leleh. Pada tegangan lateral yang rendah cenderung menyebabkan permukaan keruntuhan relatif berbeda jauh, dan apabila tegangan lateral ditingkatkan maka permukaan keruntuhan masing-masing kriteria leleh akan berdeviasi secara signifikan.
3. Prediksi nilai peningkatan kekuatan beton terkekang (K) berdasarkan model Ansari & Li adalah yang paling baik dalam memodelkan nilai K beton mutu tinggi terkekang penampang bulat. Namun dalam prediksi beton terkekang penampang persegi hasil prediksi berbeda jauh.
4. Karena hasil validasi antara model dengan hasil eksperimen beton terkekang penampang persegi kurang baik (berbeda jauh) maka konsep efektifitas kekangan pada beton terkekang penampang persegi yang ada perlu ditinjau atau dimodifikasi.
5. Model Muguruma et al sangat akurat dalam memprediksi nilai K beton terkekang mutu normal dan mutu tinggi penampang persegi.
6. Persamaan rasio tulangan pengekan yang digunakan dalam SNI 2002 masih cukup akurat digunakan dalam desain tulangan pengekan untuk beton mutu normal hingga mutu tinggi, namun terbatas pada penampang bulat.

7. Perlu modifikasi dalam persamaan desain tulangan pengekan beton mutu normal hingga mutu tinggi pada penampang persegi yang digunakan dalam SNI 2002 agar diperoleh persamaan yang umum (general).

UCAPAN TERIMA KASIH

Kolom validasi dalam paper ini dilakukan berdasarkan Penelitian Hibah Bersaing IX (TA 2001) dan Hibah Bersaing XII (TA 2004). Ucapan terima kasih disampaikan kepada DP2M Dikti atas dukungan finansial sehingga terlaksananya program eksperimen tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Ansari, F. and Li, Q. (1998). "High-Strength Concrete Subjected to Triaxial Compression." *ACI Materials Journal*, V.95 No.6, Nov.-Dec., pp.747-755.
- Antonius, Imran, I. dan Setiyawan, P. (2005). "Efek Konfigurasi Tulangan Lateral terhadap Perilaku Kekuatan dan Daktilitas Kolom Beton Mutu Normal dan Mutu Tinggi." *Pros. Seminar Nas. Eksp. Lab. Komp. dan Aplikasi dalam bidang Teknik Sipil*, UII Yogyakarta, 28 Mei.
- Antonius. (2004). "Pengaruh Tulangan Lateral terhadap Mekanisme Cover Spalling pada Struktur Kolom Beton Mutu Tinggi." *Pros. Konferensi Nasional Rekayasa Kegempan II*, UGM Yogyakarta, Jan., pp.168-176.
- Antonius, Imran, I. dan Suhud, R. (2000). "Studi Perilaku Tegangan-Regangan Beton Mutu Tinggi Terkekang." *Prosiding Seminar Teknologi HAKI 2000 "Menjelang bangkitnya dunia konstruksi Indonesia"*, Jakarta 31 Agustus.

- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Gedung*. SNI 03-2847-2002.
- Bing, Li; Park, R. and Tanaka, H. (2001). "Stress-Strain Behavior of High-Strength Concrete Confined by Ultrahigh and Normal-Strength Transverse Reinforcement." *ACI Structural Journal*, Vol.98, No.3, pp.395-406.
- Chen, W.F. (1982). *Plasticity in Reinforced Concrete*. McGraw-Hill, New York.
- Eid, R.; Dancygier, A.N. and Paultre, P. (2007). "Elastoplastic Confinement Model for Circular Concrete Columns." *Journal of Structure Engrg.* ASCE, Vol.133, No.12, December, pp.1821-1831.
- Imran, I. and Pantazopoulou, S.J. (2001). "Plasticity Model for Concrete under Triaxial Compression." *Journal of Engrg. Mechanics ASCE*; Vol.127, No.3, pp.281-290.
- Imran, I., Suharwanto, Moestopo, M. and Brahmantyo, D. (2001). "Stress-Strain Response of Confined High Strength Concrete." *Jurnal Teknik Sipil ITB*, Vol.8, No.3, July, pp.135-144.
- Legeron, F. dan Paultre, P. (2003). "Uniaxial Confinement Model for Normal and High-Strength Concrete Columns." *Journal of Struc. Eng.* ASCE, V.129, No.2, 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.
- Mander, J.B.; Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988). "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete." *Journal of Struc. Engrg.* ASCE, V.114, No.8, August, pp.1804-1824.
- Mei, H., Kioussis, P.D., Ehsani, M.R. and Saadatmanesh, H. (2001). "Confinement Effects on High-Strength Concrete." *ACI Structural Journal*, July-August, pp.548-553.
- Montoya, E.; Vecchio, F.J. and Sheikh, S.A. (2006). "Compression Field Modeling of Confined Concrete: Constitutive Models." *Journal of Mat. in Civil Eng.* ASCE, Vol.18, No.4, August, pp.510-517.
- Muguruma, H.; Nishiyama, M. and Watanabe, F. (1993). "Stress-strain Curve Model for Concrete with a Wide-Range of Compressive Strength." *Proc. of High-Strength Concrete Conf.*, Norway, pp.314-321.
- Saatcioglu, M. and Razvi, S.R. (1992). "Strength and Ductility of Confined Concrete." *Journal of Structural Engrg.* ASCE, V.118, No.6, June 1992, 1590-1607.
- Xie, J.; Elwi, E. and Mac Gregor, J.G. (1995). "Mechanical Properties of Three High-Strength Concretes Containing Silica Fume." *ACI Materials Journal*, V.92, No.2, March-April, pp.135-145.

NOTASI

- A_g = luas penampang kolom
 A_c = luas penampang inti kolom
 c = tegangan kohesif
 d_o = jarak pusat ke pusat sengkang ukuran penampang inti kolom
 $f(\sigma_{ij})$ = fungsi kriteria leleh
 f'_c = tegangan tekan puncak silinder beton
 f'_{co} = tegangan puncak beton tak terkekang
 f'_{cc} = tegangan puncak beton terkekang
 f'_t = tegangan tarik puncak beton
 f'_{bc} = kuat tekan hancur beton kondisi biaksial
 f_2 = tegangan lateral
 $I_1, I_2, I_3, J_1, J_2, J_3$ = invarian tegangan deviatorik
 m = konstanta friksi material
 s_{ij} = tensor tegangan deviatorik
 α = konstanta material yang merupakan fungsi dari ϕ dan c
 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ = regangan arah sumbu 1 (x), 2 (y) dan 3 (z)
 ϵ'_{cc} = regangan puncak beton uniaksial
 ϵ'_{cc} = regangan puncak beton triaksial (terkekang)
 ϵ'_v = regangan volume beton
 ϕ = sudut geser dalam material
 λ = konstanta material yang merupakan fungsi dari k_1 dan k_2
 ξ = tegangan hidrostatis arah sumbu Haigh- Wastergaard
 ρ = tegangan deviatorik arah sumbu Haigh- Wastergaard
 ρ_s = rasio tulangan lateral
 σ_1 = tegangan mayor
 σ_2 = tegangan intermediate
 σ_3 = tegangan minor
 f_y = tegangan leleh baja
 f_s = tegangan baja
 ζ_{xy} = tegangan geser bidang xy
 θ = sudut putar deviatorik
 ν = Poisson's ratio