

Pengaruh Pemodelan Zona Terkekang Terhadap Prediksi Hubungan Momen-Kurvatur Kolom Persegi Beton Mutu Tinggi

Iswandi Imran¹⁾
Remigildus Cornelis²⁾

Abstrak

Paper ini mengkaji salah satu aspek yang berkaitan dengan pemodelan daerah terkekang pada kolom persegi beton mutu tinggi yang diberi beban aksial tekan eksentrik. Cakupan daerah terkekang pada penampang kolom adalah parameter yang dikaji untuk melihat pengaruhnya terhadap prediksi analitis kekuatan dan daktilitas kolom. Beberapa pemodelan daerah terkekang yang sering digunakan dalam berbagai literatur dievaluasi untuk mengetahui karakteristik dan sensitivitasnya. Selanjutnya dalam paper ini dikembangkan program komputer MOKUR2D untuk menganalisis hubungan momen-kurvatur kolom persegi beton mutu tinggi. Dalam program, cakupan daerah terkekang pada penampang kolom dapat dimodelkan dengan tiga pendekatan, yaitu pendekatan model konvensional yang menggunakan koefisien kekangan efektif, model dengan daerah arching action yang tak terkekang dan model penampang dengan tiga variasi derajat kekangan yang berbeda.

Studi perbandingan dengan menggunakan program tersebut kemudian dilakukan terhadap 4 buah kolom yang diuji oleh Sheikh dan Bayrak [1998]. Semua kolom tersebut berdimensi 305 x 305 mm, dengan delapan tulangan longitudinal berdiameter 19.5 mm yang terdistribusi merata pada penampang. Tegangan leleh tulangan baja yang digunakan adalah 454 MPa. Dua tipe konfigurasi sengkang yang dikaji masing-masing adalah sengkang diamond dan konvensional dengan volumetric ratio berkisar antara 1.68 hingga 5.24 persen. Spasi tulangan sengkang yang terpasang berkisar antara 90 mm hingga 108 mm.

Hasil analisis menunjukkan bahwa pemodelan daerah terkekang dengan model konvensional masih cukup akurat walaupun sedikit overestimate terhadap hasil eksperimen sedangkan model dengan tiga variasi derajat kekangan terlihat memiliki akurasi respon teoritis momen kurvatur yang lebih baik dan sangat mendekati hasil eksperimen jika kekangan pada daerah arching action ditetapkan sebesar 50% dari kekangan pada inti kolom.

Kata-kata Kunci : Kolom persegi beton mutu tinggi, model daerah terkekang, hubungan momen-kurvatur, kekuatan, daktilitas.

Abstract

This paper studies one aspect of confinement modeling of high strength concrete square columns subjected to axially eccentric compression. Confined zone models were studied to evaluate their effect on the analytical prediction of strength and ductility of high strength concrete square columns. Several models of confined zones found in literatures were discussed to observe their characteristics and sensitivity. Based on the findings, a computer program MOKUR2D was developed. In the program, confined zone in reinforced concrete columns can be modeled with three different approaches, i.e. conventional models (using a coefficient of effective confinement), models with unconfined arching zone, or models with three zones of confinement.

A comparative study using the program was later carried out on 4 high-strength concrete square columns tested by Sheikh and Bayrak [1998]. The cross-section size of all columns was 305 x 305 mm. All columns were reinforced with 8 bars of 19.5 mm diameter, uniformly distributed around the core perimeter. Yield strength of the rebars was 454 MPa. Two types of ties configuration ties were used with volumetric ratio varying from 1.68 percent to 5.12 percent. The spacing of the ties was from 90 mm to 108 mm.

1. Staf Pengajar Departemen Teknik Sipil, FTSP-ITB.
2. Mahasiswa Program Magister Teknik Sipil, FTSP-ITB.

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada 14 Maret 2005 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 04 April 2004 - 28 April 2005. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 2 Mei 2005 hingga 18 Juni 2005.

From the study, it was found that the conventional model is able to produce a fairly good estimate of test results. The best estimate of test results is given by the model with three zones of confinement in which the arching zone is assigned with 50% of full confinement.

Keywords : *High strength concrete square column, confinement zone, moment-curvature, relationship, strength, ductility.*

1. Pendahuluan

Dalam mendesain struktur kolom persegi beton mutu tinggi dengan tingkat daktilitas dan keamanan tertentu, diperlukan estimasi yang akurat terhadap daktilitas dan kekuatan kolom tersebut. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan dan daktilitas kolom persegi beton mutu tinggi berkaitan erat dengan kekangan lateral yang diberikan oleh tulangan sengkang terhadap inti beton yang besarnya bergantung pada konfigurasi, ukuran dan spasi tulangan lateral dan longitudinal [Razvi & Saatcioglu, 1994].

Konsep kekangan pada kolom persegi dikembangkan secara analitis oleh Sheikh & Uzumeri [1982] yang pada studinya menyimpulkan bahwa untuk penampang persegi, kekangan yang ditimbulkan oleh sengkang bersifat tidak merata sehingga luasan daerah inti yang terkekang secara efektif pada dasarnya lebih kecil dari pada luas total daerah inti aktual. Dengan demikian terdapat suatu daerah yang terkekang secara tidak efektif pada daerah inti penampang kolom. Untuk memudahkan analisis, daerah tersebut, yang terbentuk oleh aksi busur (*arching action*) antara dua tulangan longitudinal yang membentuk parabola berderajat dua dengan sudut kemiringan awal sebesar 45° , dapat diasumsikan tidak terkekang. Dalam analisis, adanya daerah *arching action* ini dapat diperhitungkan dengan mengadopsi suatu faktor efektifitas kekangan yang merepresentasikan tingkat kekangan rata-rata yang dapat diberikan oleh suatu konfigurasi sengkang persegi.

Dengan menggunakan konsep di atas, analisis momen-kurvatur penampang masih dapat dilakukan dengan metoda diskritisasi serat (*strip*) satu dimensi yang relatif sederhana. Menurut Karibinis & Kiousis [1996] konfigurasi daerah kekangan pada penampang sebenarnya sangat kompleks sehingga penyederhanaan tersebut sangat tidak realistis dan menyebabkan tingkat akurasi hasil prediksi momen-kurvatur menjadi kurang baik. Hal ini juga didukung oleh hasil analisis Nober & Syarif [1998] yang menyatakan bahwa perilaku kekangan di daerah *arching action* pada dasarnya tidak dapat diasumsikan sama sekali tidak terkekang.

Sejauh ini beberapa model analitis yang lebih kompleks telah dikembangkan namun belum ada analisis rinci yang dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh pemodelan daerah terkekang yang digunakan terhadap akurasi hasil perhitungan sehingga masih terdapat kesulitan untuk menentukan model daerah terkekang yang paling realistis dan yang menghasilkan tingkat akurasi yang baik.

Paper ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh pemodelan daerah terkekang terhadap akurasi prediksi momen-kurvatur yang dihasilkan melalui perbandingan *performance* tiga model kekangan yang berbeda terhadap hasil eksperimen yang terdapat di literatur. Tiga model kekangan tersebut adalah model konvensional (yang menggunakan koefisien kekangan efektif), model dengan daerah *arching action* yang tidak terkekang dan model penampang dengan tiga variasi derajat kekangan yang berbeda.

2. Model Analitis Kekangan pada Kolom Persegi

Model analitis kekangan pada prinsipnya menyatakan hubungan antara kuat tekan aksial beton yang terkekang dengan tegangan lateral yang timbul pada beton akibat kekangan yang diberikan tulangan sengkang tertutup. Persamaan dasar yang menggambarkan hubungan tersebut dirumuskan sebagai berikut:

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad (1)$$

Dimana:

- f'_{cc} = kuat tekan aksial beton terkekang
- f'_{co} = kuat tekan uniaksial beton tak terkekang
- f_l = tegangan lateral pengekang
- k_1 = koefisien kekangan.

Richart et al. 1928 mengusulkan nilai k_1 sebesar 4.1 untuk beton mutu normal setelah melakukan eksperimen terhadap beberapa kolom berpenampang bulat dengan kekangan aktif berupa fluida yang memberi efek tegangan lateral seragam.

Nilai k_1 untuk beton mutu tinggi biasanya berkisar antara 4 hingga 4.5 [Imran, et al., 1999].

Hasil penelitian terhadap kolom persegi menunjukkan bahwa tegangan lateral yang dialami perimeter inti kolom bersifat tidak merata sehingga model analitis kekangan pada **Persamaan (1)** perlu dimodifikasi dengan memperhatikan antara lain model distribusi tegangan lateral [Sheikh & Uzumeri, 1982].

3. Daerah Terkekang pada Kolom

3.1 Model distribusi tegangan kekangan

Penentuan tegangan lateral akibat kekangan pada penampang persegi dan bujur sangkar adalah tidak semudah penentuan tegangan lateral pada penampang bulat, yang biasanya dapat dihitung melalui *hoop tension*. Untuk penyederhanaan, beberapa peneliti menggunakan pendekatan tegangan lateral ekuivalen dengan konsep tegangan kekangan pasif yang sangat bergantung pada tahanan (*restraining force*) tulangan sengkang [Mander et al., 1988].

Restraining force tersebut nilainya tinggi pada sudut sengkang yang berfungsi sebagai daerah tumpuan dan menurun pada lokasi yang menjauhi sudut-sudut sengkang (tumpuan-tumpuannya) sesuai dengan kekakuan lentur sengkang dan spasi antara tumpuan serta luasan penampang dan kekuatan sengkang. Jadi penurunan nilai *restraining force* ini sebanding dengan jaraknya terhadap titik-titik tumpuan sengkang (**Gambar 1 – 3**).

Berdasarkan konsep *restraining force* tersebut distribusi tegangan kekangan yang timbul pada kolom yang diberi sengkang persegi dan sengkang bujur sangkar dapat dimodelkan sebagai tegangan yang tidak merata dengan distribusi tegangan merupakan fungsi dari konfigurasi tulangan sengkang, seperti diilustrasikan pada **Gambar 1 dan 2**. Pada arah

longitudinal kolom, distribusi tegangan kekanganpun diasumsikan berperilaku sama sedemikian hingga pada level tulangan sengkang, gaya kekangan yang timbul lebih besar dari pada gaya kekangan yang timbul pada daerah yang letaknya jauh dari level tulangan sengkang seperti terlihat pada **Gambar 3**.

3.2 Faktor kekangan efektif

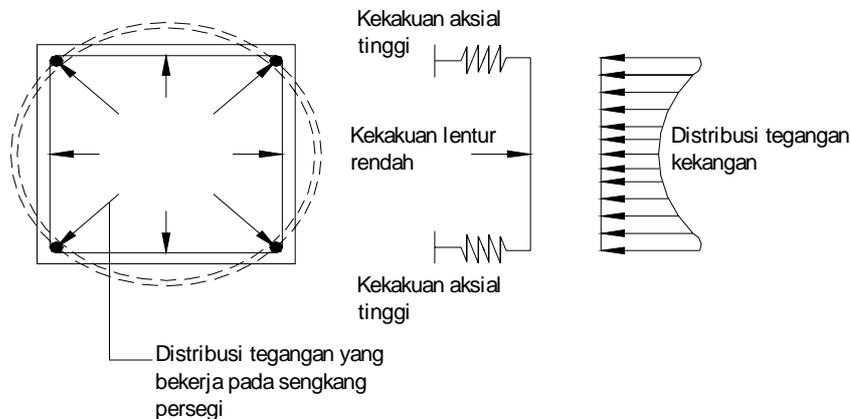
Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada level penampang kolom persegi, tegangan yang dialami perimeter inti kolom bersifat tidak merata [Mander, et al., 1988]. Sheikh dan Uzumeri [1982], mengasumsikan adanya daerah *arching action* yang tidak terkekang berbentuk parabola dengan sudut kemiringan awal sebesar 45° yang terjadi secara vertikal antara level sengkang dan secara horizontal antara lokasi tulangan longitudinal sudut atau yang diberi kait (**Gambar 4**). Mander et al. [1988] mengakomodasikan adanya daerah tidak terkekang pada inti kolom tersebut dengan menghitung koefisien kekangan efektif, K_e , yang merepresentasikan rasio perbandingan luas efektif daerah terkekang pada inti (A_e) dengan luas bersih penampang inti (A_{cc}).

Faktor kekangan efektif tersebut dirumuskan sebagai berikut:

$$K_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \tag{2}$$

$$A_{cc} = A_c (1 - \rho_{cc}) \tag{3}$$

Pada level sengkang, luas daerah terkekang efektif adalah luas inti kolom dikurangi dengan luas daerah *arching action* berbentuk parabola. Untuk satu parabola, luasnya ditentukan sebesar dimana W_i adalah jarak bersih antara tulangan $\frac{W_i^2}{6}$ longitudinal. Luas total daerah terkekang tidak efektif pada level sengkang, A_i , dapat dinyatakan sebagai berikut:



Gambar 1. Bentuk distribusi tegangan kekangan pada sengkang persegi

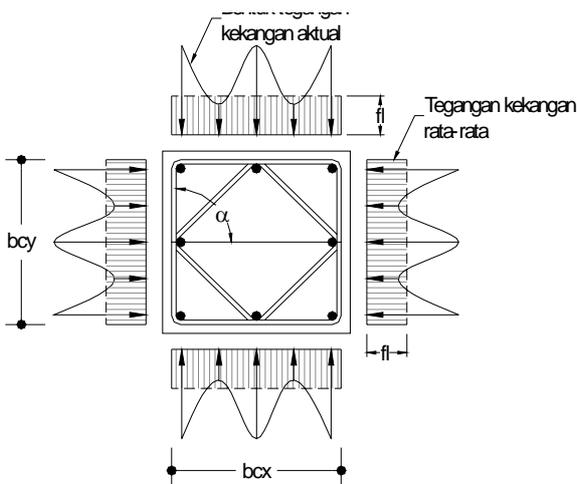
$$A_i = \sum_{i=1}^n \frac{W_i'^2}{6} \text{ dimana } n = \text{jumlah tulangan longitudinal sudut atau yang diberi kait} \quad (4)$$

Dengan memperhitungkan luas daerah *arching action* dalam arah longitudinal, luas daerah terkekang efektif pada level antara sengkang, A_e , dapat ditulis sebagai berikut [Mander *et al.*, 1988]:

$$A_e = \left[b_{cx} \cdot b_{cy} - \sum_{i=1}^n \frac{W_i'^2}{6} \right] \left(1 - \frac{s'}{2b_{cx}} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_{cy}} \right) \quad (5)$$

Sehingga faktor kekangan efektif, K_e , dirumuskan sebagai berikut:

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



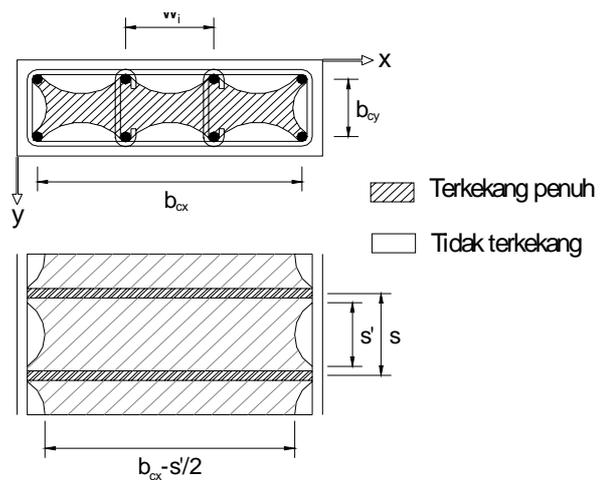
Gambar 2. Distribusi tegangan kekangan sebagai fungsi konfigurasi tulangan

3.3 Tegangan kekangan ekuivalen

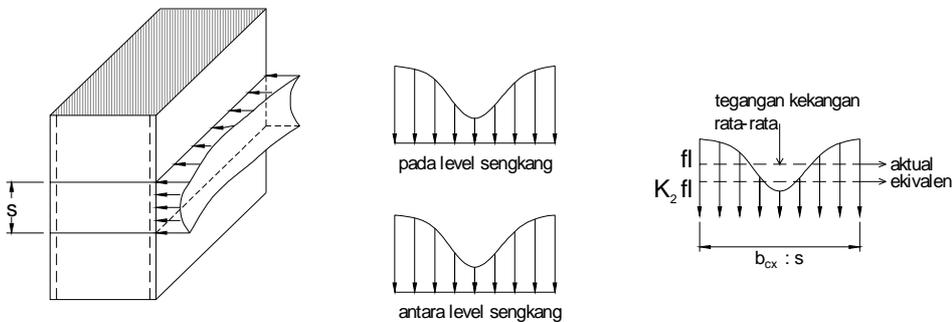
Pada kondisi ekstrim dimana kolom persegi atau bujur sangkar memiliki tulangan longitudinal yang tersebar dengan spasi yang besar maka distribusi teganganpun akan berkurang bila menjauhi dalam arah lateral (sebidang dengan bidang tulangan sengkang) maupun dalam arah longitudinal (antara spasi tulangan sengkang) (**Gambar 1 - 3**). Pada kondisi ini, bila tidak dilakukan penyesuaian maka perhitungan tegangan lateral rata-rata f_l akan menghasilkan nilai yang *over-estimate* dan tidak memberikan gambaran yang tepat karena belum memperhitungkan daerah terkekang tidak efektif pada inti kolom persegi.

Untuk menghasilkan suatu tegangan *uniform* ekuivalen dengan efek yang sama seperti tegangan *non uniform* aktual, maka digunakan konsep tegangan kekangan merata ekuivalen yang dihitung dengan mengalikan nilai tegangan lateral f_l dengan suatu faktor reduksi K_e , yaitu:

$$f_{le} = K_e \cdot f_l \quad (7)$$



Gambar 4. Model *arching action* dengan sudut 45°



Gambar 3. Distribusi tegangan kekangan dalam arah lateral dan longitudinal

Untuk nilai kekangan yang berbeda dalam arah x dan arah y , nilai tegangan efektif adalah rata-rata dari nilai tegangan masing-masing arah dan dirumuskan sebagai berikut, Razvi & Saatcioglu [1994]:

$$\text{Tegangan efektif arah } x = f_{lx} = K_e \cdot f_{lx} \quad (8)$$

$$\text{Tegangan efektif arah } y = f_{ly} = K_e \cdot f_{ly} \quad (9)$$

$$\text{Tegangan efektif rata-rata} = f_{le} = \frac{f_{lx} \cdot b_{cy} + f_{ly} \cdot b_{cx}}{b_{cx} + b_{cy}} \quad (10)$$

4. Model Analitis

4.1 Perilaku tegangan-regangan beton tidak terkekang

Dalam studi ini, model hubungan tegangan-regangan beton mutu tinggi tidak terkekang digambarkan dengan menggunakan persamaan Thorenfeldt, yang pada dasarnya merupakan modifikasi dari persamaan popovic [Imran *et al.*, 1999], yaitu:

$$\frac{f_c'}{f_c} = \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_c} \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\epsilon_c'}{\epsilon_c}\right)^{nk}} \quad (11)$$

Dimana:

$$k = 1 \text{ untuk } \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_c} \leq 1$$

$$k = 0.67 + \frac{f_c'}{62} \text{ MPa untuk } \frac{\epsilon_c'}{\epsilon_c} > 1$$

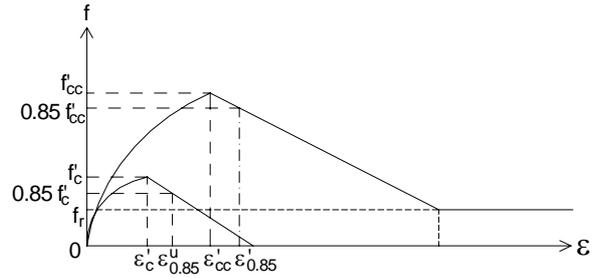
$$E_c = 3320\sqrt{f_c'} + 6900 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_c' = \frac{f_c'}{E_c} \frac{n}{n-1}$$

4.2 Perilaku tegangan-regangan beton terkekang

Dalam penelitian ini model hubungan tegangan-regangan beton mutu tinggi terkekang yang digunakan adalah model analitis kekangan yang memperhitungkan pengaruh konfigurasi tulangan sengkang, spasi tulangan sengkang, dan spasi tulangan longitudinal. Model yang digunakan adalah model Imran-Suharwanto [Imran *et al.*, 1999] (**Gambar 5**).

Persamaan tegangan-regangan yang dikembangkan tersebut adalah berdasarkan hasil penelitian triaksial (kekangan aktif) dengan mutu beton antara 60 hingga 90 MPa. Tingkat beban lateral yang diterapkan bervariasi antara 0 hingga 0.4 f_c'



Gambar 5. Kurva tegangan – regangan model

Pada model Imran – Suharwanto peningkatan kekuatan material akibat kekangan (K) diturunkan dari kriteria leleh Mohr-Coulomb yang didasarkan pada pendekatan Mander *et al.*, [1988]. Kurva tegangan-regangan sebelum respon puncak mengadopsi model Hognestad. Persamaan lengkapnya adalah sebagai berikut [Imran *et al.*, 1999]:

$$f = K \cdot f_c' \left[\frac{2 \cdot \epsilon}{\epsilon_{cc}'} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}'} \right)^2 \right] \text{ untuk } \epsilon \leq \epsilon_{cc}' \quad (12)$$

$$f = f_{cc}' - Z(\epsilon - \epsilon_{cc}') \geq f_r \text{ untuk } \epsilon > \epsilon_{cc}' \quad (13)$$

Dimana:

$$K = \frac{f_{cc}'}{f_c'} = 1 + 4.4 \frac{f_l'}{f_c'}$$

$$f_r = 1.45 \cdot f_c' \cdot (K - 1)$$

$$\epsilon_{cc}' = K \epsilon_c'$$

$$\epsilon_c' = 0.003$$

$$\frac{\epsilon_{0.85}^c}{\epsilon_{0.85}^u} = e^{\frac{K-1}{3.2-K}} + 3.5(K-1)$$

$$Z = \frac{0.15 \cdot f_{cc}'}{\epsilon_{0.85}^c - \epsilon_{cc}'}$$

4.3 Perilaku tegangan-regangan baja

Kurva tegangan regangan tulangan baja yang digunakan terdiri atas dua kurva linier dan satu kurva non linier untuk strain hardening [Park & Paulay, 1975]. Model tegangan-regangannya adalah sebagai berikut:

$$f_s = E_s \cdot \epsilon_s \text{ untuk } \epsilon_s < \epsilon_y \quad (14)$$

$$f_s = f_y \text{ untuk } \epsilon_y < \epsilon_s < \epsilon_{sh} \quad (15)$$

$$f_s = f_y \left[\frac{m(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2}{60(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right]$$

$$\text{untuk } \epsilon_{sh} < \epsilon_s < \epsilon_{su} \quad (16)$$

Dimana:

$$m = \frac{\left(\frac{f_{su}}{f_y}\right) (30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2} \quad \text{dan } r = \varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}$$

4.4 K o n s e p

pemodelan daerah kekangan

Dalam paper ini, pemodelan daerah kekangan dilakukan dengan menggunakan pendekatan dua dimensi dimana penampang didiskritisasi menjadi sel-sel berbentuk bujursangkar.

Masing-masing sel tersebut merepresentasikan posisi dan jenis material tertentu. Tiga tipe pemodelan daerah terkekang akan ditinjau dalam studi ini. Ketiga tipe tersebut adalah;

1. Pemodelan tipe 1 (Konvensional) (**Gambar 6**)

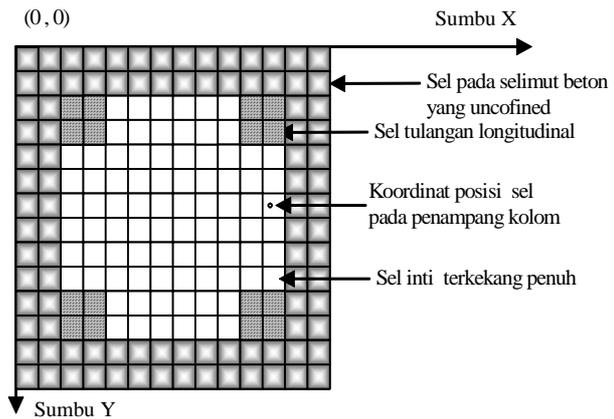
Pada pemodelan ini, daerah inti kolom yang tidak terkekang secara efektif diperhitungkan dengan mereduksi nilai tegangan kekangan yang bekerja. Untuk mereduksi nilai tegangan kekangan tersebut digunakan koefisien efektifitas kekangan, K_e (**Persamaan (6)**).

2. Pemodelan tipe 2 (**Gambar 7**)

Pada pemodelan ini, geometri daerah *arching action* dimodelkan dengan persamaan parabola. Material beton yang berada di dalam daerah *arching action* tersebut diasumsikan tidak terkekang, sehingga tidak ada perbedaan dengan material beton yang berada pada selimut beton.

3. Pemodelan tipe 3 (**Gambar 8**)

Pada pemodelan ini, geometri daerah *arching action* dimodelkan dengan persamaan parabola. Material beton yang berada didalam daerah *arching action* diasumsikan terkekang secara



Gambar 6. Diskritisasi penampang pada pemodelan tipe 1

parsial, yaitu 50% kekangan yang terjadi pada zona inti kolom. Dengan pemodelan ini, penampang kolom menjadi terbagi atas tiga zona dengan tingkat kekangan yang berbeda-beda, yaitu zona selimut beton yang tidak terkekang, zona *arching action* yang terkekang parsial dan zona inti kolom yang terkekang penuh.

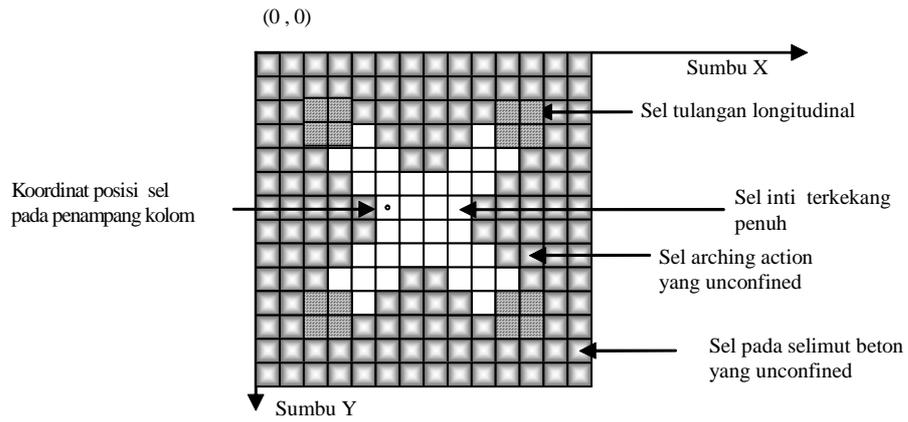
5. Aplikasi Model

Untuk menguji akurasi masing-masing tipe pemodelan daerah terkekang dalam memprediksi hubungan momen-kurvatur, pada paper ini dilakukan analisis terhadap 4 buah kolom yang diuji oleh Bayrak dan Sheikh [1998] dan hasilnya kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen tersebut. Semua kolom yang diuji berdimensi 305 mm x 305 mm, dengan data lainnya dapat dilihat pada **Tabel 1**.

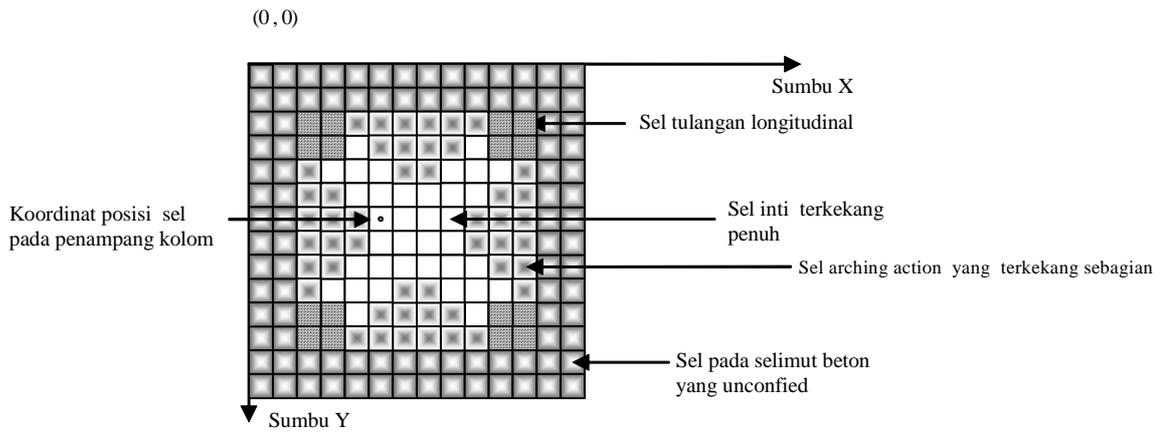
Untuk menentukan pengaruh pemodelan daerah kekangan terhadap akurasi prediksi respon momen-kurvatur, ketiga tipe pemodelan daerah terkekang yang disampaikan sebelumnya divariasikan dalam kajian ini. Agar bisa dibandingkan, pemodelan dilakukan secara dua dimensi dengan bantuan program MOKUR2D yang dikembangkan oleh Cornelis, 2004.

Tabel 1. Data benda uji kolom beton mutu tinggi [Bayrak, Sheikh, 1998]

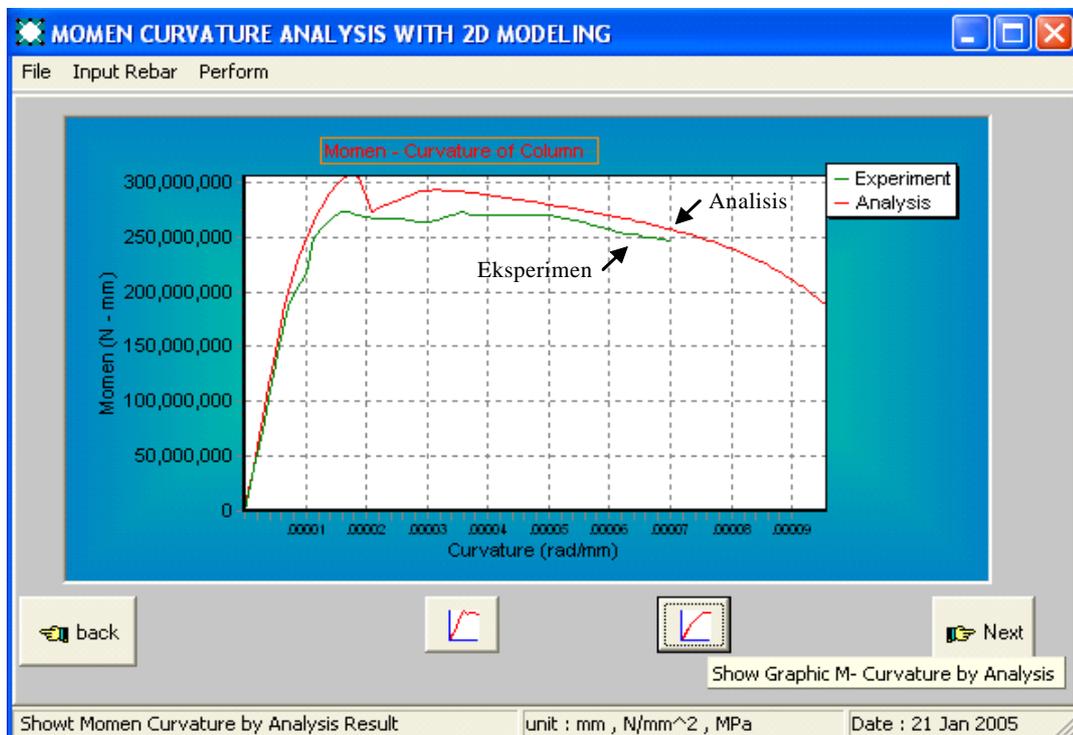
Tipe Kolom	Rasio Volumetric %	Diameter Senggang (mm)	$f_{y\ell}$ (MPa)	f_{yh} (MPa)	Spasi Senggang (mm)	f'_c (MPa)	Gaya Aksial (P/P ₀)
ES-1HT	3.15	16	454	463	95	72.1	0.5
AS-2HT	2.84	11.3	454	542	90	71.7	0.36
AS-3HT	2.84	11.3	454	542	90	71.8	0.5
AS-4HT	5.12	16	454	463	100	71.9	0.5



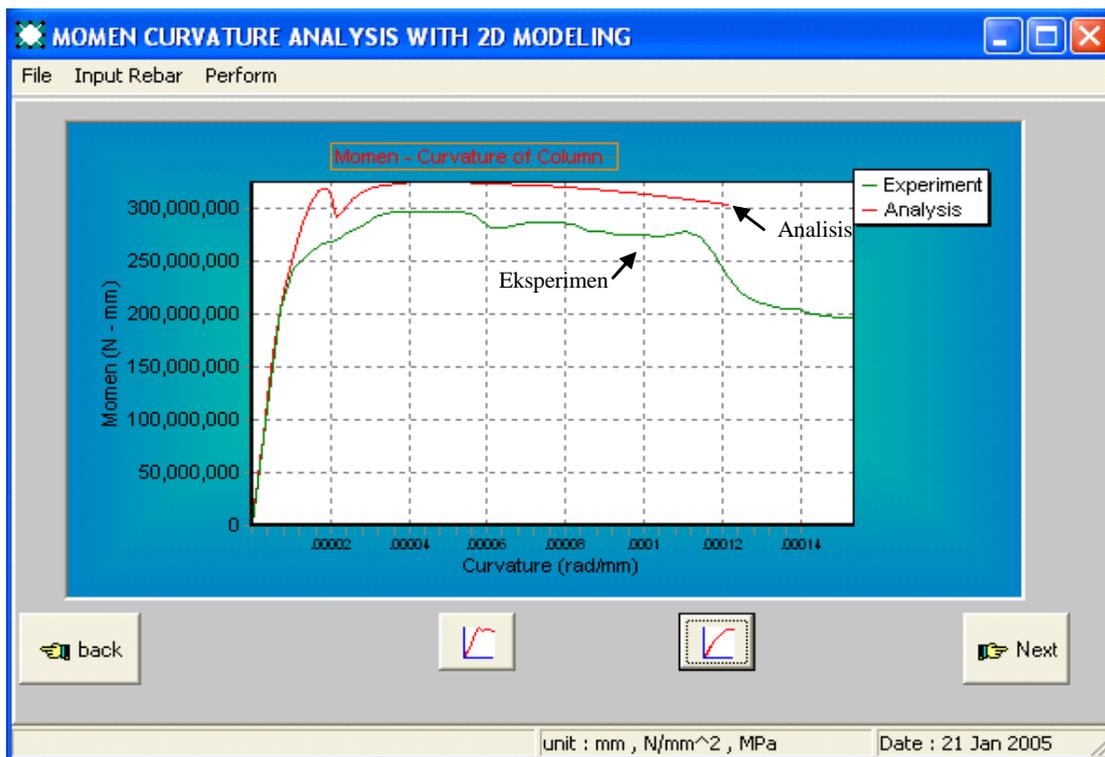
Gambar 7. Diskritisasi penampang pada pemodelan tipe 2



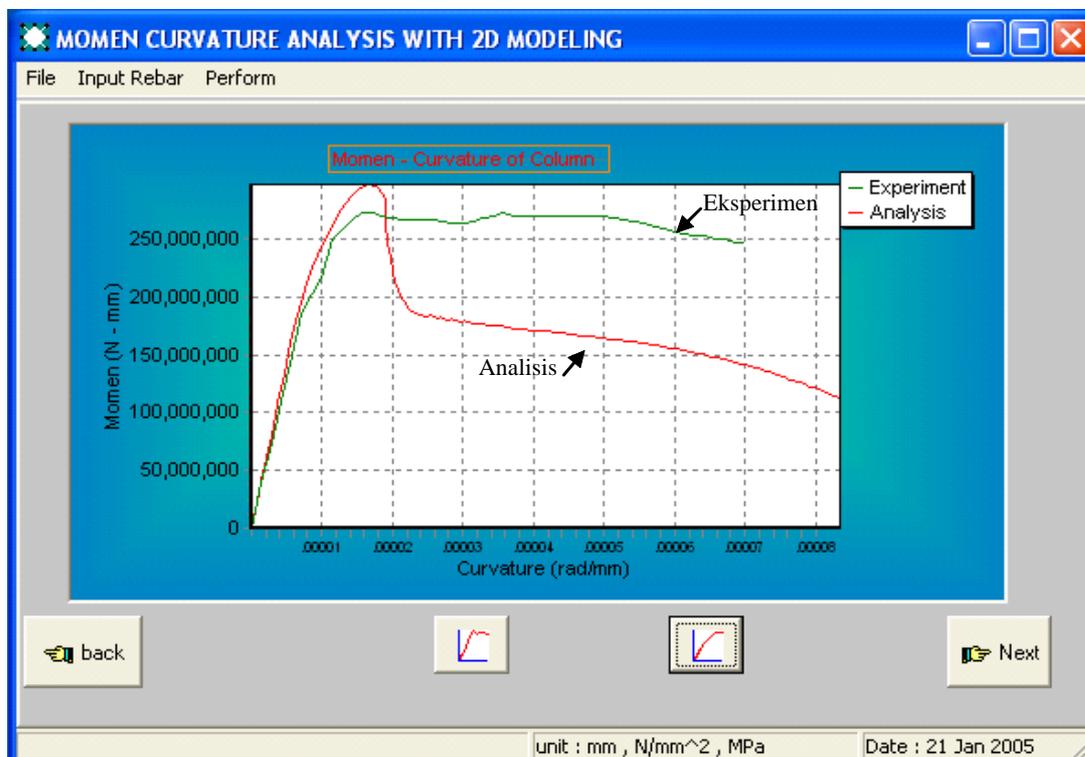
Gambar 8. Diskritisasi penampang pada pemodelan tipe 3



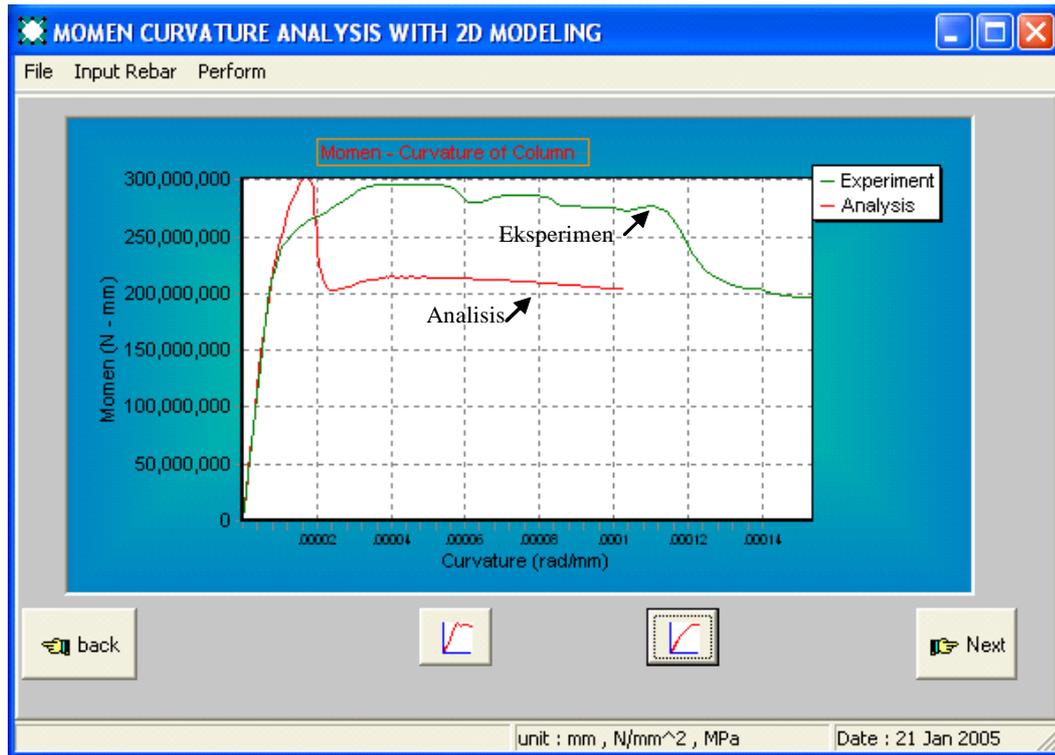
Gambar 9a. Pemodelan tipe 1 vs eksperimen; spesimen ES-1HT



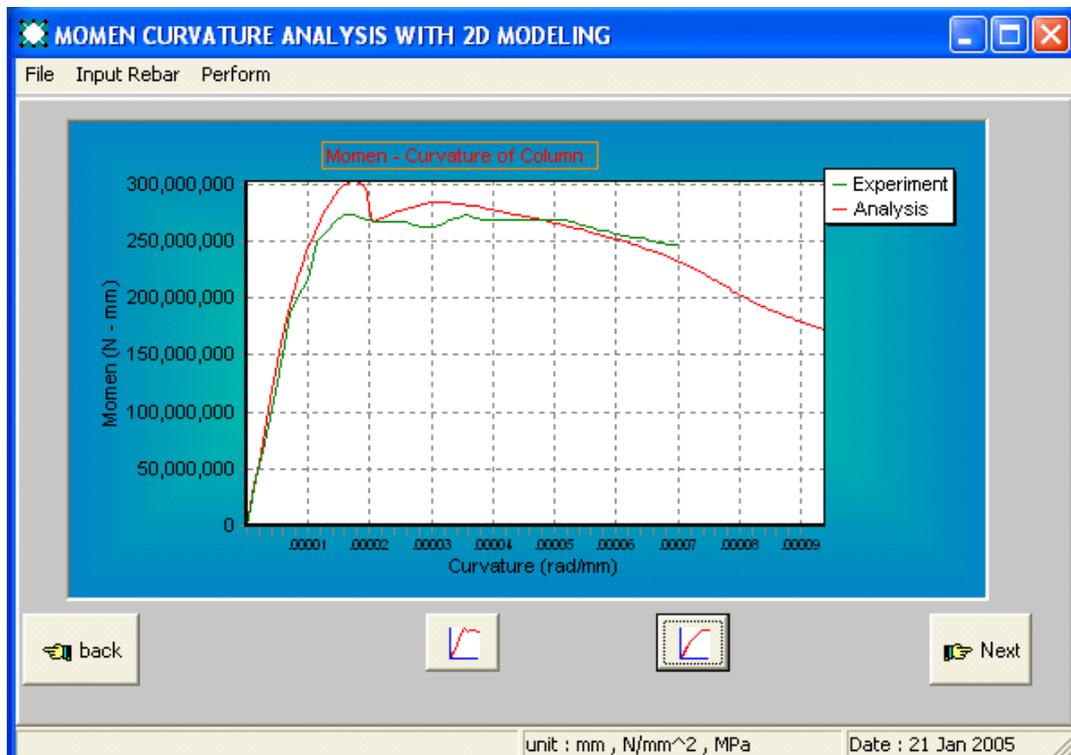
Gambar 9b. Pemodelan tipe 1 vs eksperimen; spesimen AS-4HT



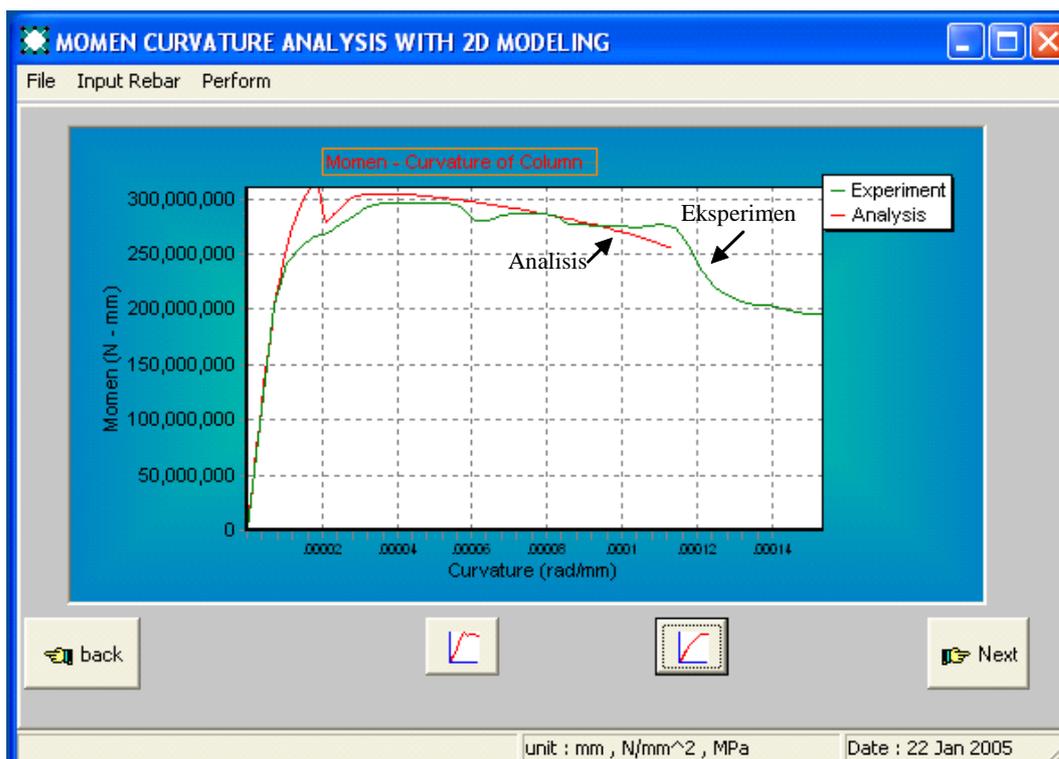
Gambar 10a. Pemodelan tipe 2 vs eksperimen; spesimen ES-1HT



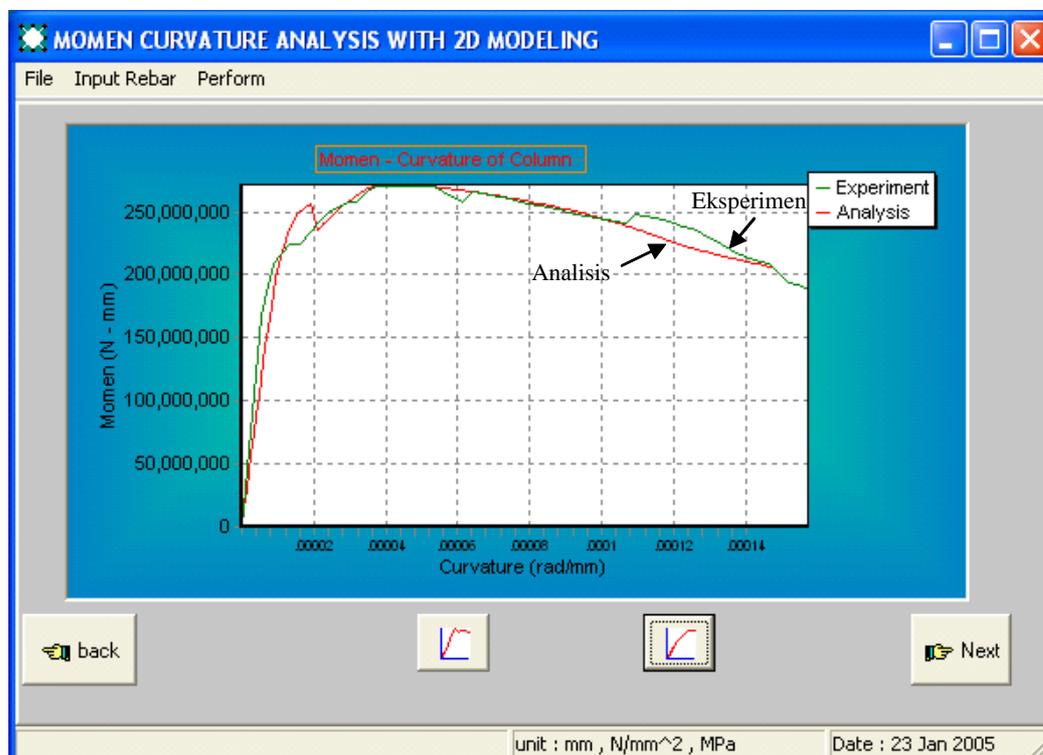
Gambar 10b. Pemodelan tipe 2 vs eksperimen; spesimen AS-4HT



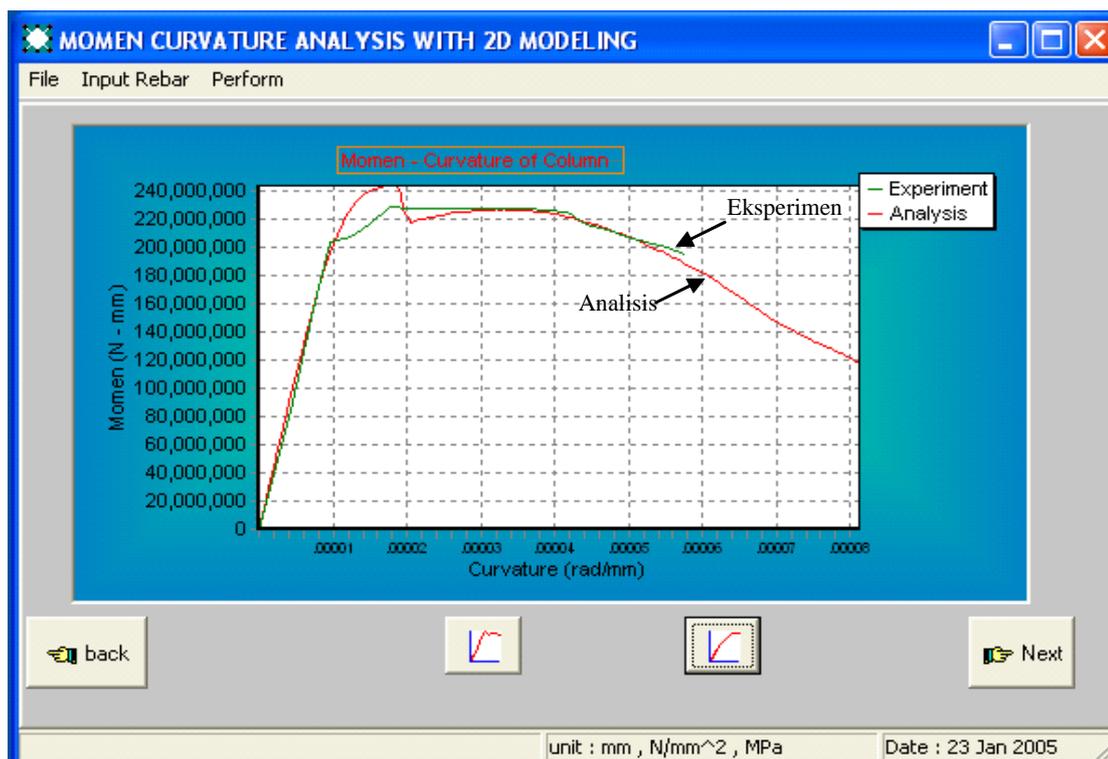
Gambar 11a. Pemodelan tipe 3 vs eksperimen; spesimen ES-1HT



Gambar 11b. Pemodelan tipe 3 vs eksperimen; spesimen AS-4HT



Gambar 12. Pemodelan tipe 3 vs eksperimen; spesimen AS-20H



Gambar 13. Pemodelan tipe 3 vs eksperimen; spesimen AS-3H

Tabel 2. Data spesimen Sheikh dan Khoury [1994]

Tipe Kolom (305x305) (mm)	Rasio Volumetric %	Diameter Senggang (mm)	f_{yl} (MPa)	f_{yh} (MPa)	Spasi Senggang (mm)	f'_c (MPa)	Gaya Aksial (P/P _o)
AS-20H	4.3	13	507.5	464	95	76.2	0.61
AS-3H	1.68	9.5	507.5	507.5	90	108	0.59

Gambar 9 – 11 memperlihatkan perbandingan hasil analisis untuk ketiga tipe pemodelan daerah terkekang dengan hasil eksperimen untuk spesimen ES-1HT dan spesimen AS-4HT. Dapat dilihat pada Gambar 9 bahwa pemodelan tipe 1 memberikan hasil yang sedikit *over-estimate* dibandingkan dengan hasil eksperimen. Sebaliknya, pemodelan tipe 2 menghasilkan prediksi yang sangat *under-estimate*, khususnya pada daerah pasca puncak (Gambar 10). Pemodelan tipe 3 dengan tiga variasi derajat kekangan, dimana kekangan pada daerah *arching action* diasumsikan sebesar 50% dari kekangan inti, memberikan akurasi prediksi respon momen-kurvatur yang paling baik.

Dalam paper ini, hasil prediksi dengan menggunakan pemodelan tipe 3 juga dibandingkan terhadap hasil eksperimen yang dilakukan oleh Sheikh dan Khoury [1994]. Data spesimen yang diuji dapat dilihat pada Tabel 2.

Hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 12 dan 13. Berdasarkan Gambar 12 dan 13 tersebut dapat disimpulkan bahwa pemodelan tipe 3 memberikan prediksi respon momen-kurvatur yang cukup akurat.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan melalui perbandingan hasil analisis dan eksperimen untuk ketiga tipe pemodelan daerah kekangan dapat disimpulkan:

1. Dalam analisis momen-kurvatur kolom beton persegi mutu tinggi, tipe pemodelan daerah terkekang yang digunakan dapat mempengaruhi akurasi prediksi hubungan momen-kurvatur yang dihasilkan.
2. Pemodelan daerah terkekang yang mengasumsikan bahwa zona *arching action* tidak terkekang sama sekali dan dalam perhitungannya faktor efektivitas

kekangan tidak diterapkan akan menghasilkan respon momen-kurvatur yang *under-estimate* dibandingkan dengan hasil eksperimen sehingga tidak dianjurkan dalam analisis momen-kurvatur.

3. Model daerah terkekang konvensional yang menerapkan faktor efektifitas kekangan pada dasarnya cukup akurat dalam memprediksi respon momen-kurvatur. Namun, respon yang diperoleh ternyata masih kurang akurat jika dibandingkan dengan hasil prediksi menggunakan model daerah terkekang dengan tiga variasi derajat kekangan dimana kekangan pada daerah *arching action* diasumsikan sebesar 50% kekangan pada daerah inti kolom.

Daftar Pustaka

Bayrak, O., Sheikh S.A., 1997, "High Strength Concrete Columns Under Simulated Earthquake Loading", ACI Struct. Journal, V. 94, No. 6, 708 – 722.

Cornelis, R., 2004, "Pemodelan Dua Dimensi Zona Terkekang dan Pengaruhnya Terhadap Prediksi Peningkatan Kekuatan dan Daktilitas Kolom Persegi Beton Mutu Tinggi", Tesis Magister ITB.

Imran, I., Moestopo, M., dan Suharwanto, 1999, "Strength and Deformation of Confined High Strength Concrete", First International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Seoul, Korea, pp. 373 – 378.

Karabinis, A.I., Kiouisis, P.D., 1994, "Effects of Confinement on Concrete Columns: a Plasticity Approach", J. Struct. Eng., ASCE 120(9), 2747 - 2767.

Karabinis, A.I., Kiouisis, P.D., 1996, "Strength and Ductility of Rectangular Concrete Columns: a Plasticity Approach", J. Struct. Eng., ASCE 122 (3), 0267 - 0274.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., 1988, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", J. Struct. Eng. Div., ASCE, 114(8), 1804 – 1826.

Park, R., Paulay, T., 1975, "Reinforced Concrete Structures", Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 767 pp.

Razvi, S.R., Saatcioglu, M., 1994, "Strength and Deformability of Confined High-Strength Concrete Columns", ACI Struct. Journal, V. 91, No. 6, 678 – 686.

Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R.L., 1928, "A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses", Eng. Exp. Station Bulletin, 185, Univ. of Illinois, Urbana.

Sandra, N., Syarif, A., 1998, "Studi Perbandingan Model-model Analitis Kekangan untuk Beton Mutu Tinggi", Laporan Tugas Akhir Program Sarjana Jurusan Teknik Sipil FTSP Institut Teknologi Bandung.

Sheikh, S.A., Houry, S.S., 1994, "A Performance-Based Approach for the Design of Confining Steel in Tied Columns", ACI Struct Journal, V. 94, No. 4, 421 – 431.

Sheikh, S.A., Uzumeri, M.S., 1980, "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns", J. Struct. Div. ASCE, 106(5), 1079 – 1102.

Daftar Notasi

$\epsilon_{0.85}^u$	=	Regangan saat $f_c = 0.85 f'_c$, diasumsikan sebesar 0.0035
f_{vl}	=	Kuat leleh tulangan longitudinal
f_{vh}	=	Kuat leleh tulangan sengkang
f'_{cc}	=	Kuat tekan aksial beton terkekang
f'_c	=	Kuat tekan beton uniaksial
ρ_{cc}	=	Rasio luas total tulangan longitudinal dengan luas inti kolom
ϵ_c	=	Regangan pada beton
ϵ'_c	=	Regangan pada saat beton mencapai f'_c
f_c	=	Tegangan pada beton
α	=	Sudut antara penampang longitudinal inti dengan sumbu longitudinal sengkang
A_c	=	Luas inti beton yang terlindungi sengkang
E_c	=	Modulus sekan untuk beton mutu tinggi
f_1	=	Tegangan kekangan
P	=	Gaya aksial tekan yang bekerja pada penampang
P_o	=	Kapasitas penampang terhadap beban aksial tekan konsentrik
s	=	Spasi sengkang