

STUDI PARAMETER KOLOM BETON MUTU TINGGI PENAMPANG PERSEGI TERHADAP BEBAN SEISMIK

Antonius¹, Aref Widhianto² dan Prabowo Setiyawan¹

¹Dosen Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung-Semarang
Email: antoni67a@yahoo.com ; antonius@unissula.ac.id

²Asisten Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung-Semarang

1 PENDAHULUAN

Sejak diberlakukannya peraturan gempa yang terbaru yaitu SNI 1726-2012, maka terjadi perubahan peta gempa yang signifikan dari SNI gempa yang sebelumnya. Perubahan tersebut membawa konsekuensi terhadap potensi kerawanan gempa di setiap zona, dan hampir di semua zona gempa berdasarkan SNI gempa terbaru mengalami peningkatan kerawanan gempa. Oleh karena itu di dalam prinsip desain struktur bangunan tahan gempa diperbolehkan bangunan direncanakan untuk menahan gempa dengan substitusi nilai faktor R (modifikasi respon struktur) agar struktur berperilaku duktail. Dengan konsep tersebut pada dasarnya beberapa elemen struktur gedung boleh mengalami kerusakan agar disipasi energi gempa dapat diterima struktur dengan baik. Untuk menjamin bahwa struktur gedung tidak akan runtuh saat terjadi gempa kuat, namun boleh rusak, pada beberapa komponen struktur harus didetailkan secara khusus agar struktur tetap stabil meskipun telah mengalami deformasi inelastik atau mempunyai daktilitas yang signifikan.

Di bidang material, perkembangan teknologi beton telah berkembang dengan pesat akhir-akhir ini, yaitu dapat dihasilkannya beton dengan kuat tekan hingga 100 MPa atau yang sering disebut beton mutu tinggi (BMT). Karakteristik BMT yang superior terhadap beton mutu normal (BMN) seperti ketegaran retak, kekakuan, sifat susut, rangkai dan permeabilitas maka menjadikan BMT sangat cocok diterapkan pada struktur beton prategang maupun struktur kolom (karena dominan dalam menahan beban aksial).

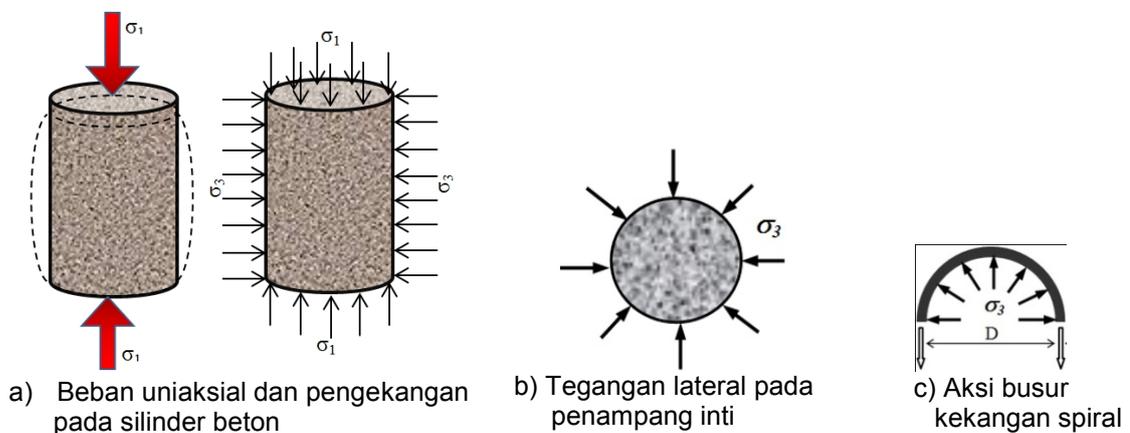
Namun demikian telah umum diketahui bahwa perilaku tegangan-regangan paska puncak pada BMT lebih curam dibandingkan BMN. Sifat keruntuhan BMT bersifat eksplosif sehingga material tersebut sering dikategorikan sebagai material yang getas [Matamoros & Sozen 2003]. Pada struktur kolom BMT diketahui bahwa spiral yang dipasang cenderung kurang efektif dalam mengekang penampang inti beton sehingga daktilitas kolom yang terbuat dari BMT lebih rendah dibandingkan daktilitas kolom BMN [Antonius & Imran 2012, Antonius 2014]. Oleh karena itu perilaku daktilitas pada kolom BMT terutama yang menerima beban gempa merupakan isu yang terus didiskusikan oleh para peneliti.

Penelitian kolom BMT terhadap beban seismik di Indonesia terutama pengujian secara eksperimental relatif masih sangat sedikit. Namun demikian beberapa model perilaku struktur kolom beton mutu normal maupun mutu tinggi di beberapa negara telah dikembangkan, sehingga berdasarkan model analitis tersebut dapat dilakukan studi mengenai perilaku kolom yang menerima beban seismik. Di dalam paper ini dilakukan studi parameter kolom BMT yang menerima beban gempa yang direpresentasikan ke dalam beban siklik. Pembahasan difokuskan pada perilaku daktilitas kolom beton

penampang persegi pada respon histeresis dengan variasi kuat tekan beton dan rasio tulangan pengekang. Model kekangan menggunakan model yang telah dikembangkan.

2 KEKANGAN PADA BETON

Gambar 1 menjelaskan beton yang menerima beban aksial tekan dan terjadi pengembangan lateral pada inti beton karena adanya efek rasio Poisson dan sifat dilatasi material. Pengembangan lateral tersebut dapat dihambat dengan memberikan efek tegangan lateral terhadap inti beton (σ_3) sehingga beton dalam kondisi terkekang. Dalam kondisi tersebut, beton akan memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dan berperilaku daktail. Untuk mengkekang inti kolom beton dapat digunakan spiral maupun hoop bulat, maupun hoop persegi yang dalam pengekangannya melakukan aksi busur untuk mengaplikasikan tegangan lateral.



Gambar 1 Mekanisme Kekangan pada Beton

Pada struktur beton bertulang yang menerima beban gempa, Imran & Hendrik (2010) menjelaskan bahwa perilaku plastifikasi yang daktail pada elemen struktur dapat terjadi bila dihasilkan bentuk plastifikasi yang didominasi oleh perilaku batas pada baja tulangan pada mekanisme lentur tarik. Agar plastifikasi lentur yang terjadi dapat menghasilkan perilaku histeresis yang stabil (tidak *pinched*) salah satunya adalah dengan cara memberi pengekangan yang memadai. SNI 2847-2013 maupun ACI-318-11 mensyaratkan rasio volumetrik minimal tulangan spiral bulat yang harus dipasang pada kolom sebagai berikut:

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

Persamaan di atas diturunkan dengan prinsip bahwa spiral yang dipasang harus mampu meningkatkan kekuatan inti beton kolom setelah terlepasnya selimut beton. Subramanian (2011) mengungkapkan bahwa efektifitas kekangan pada kolom penampang persegi adalah sekitar 75% dari efektifitas kekangan penampang bulat, dengan demikian substitusi nilai tersebut ke dalam persamaan (1) akan diperoleh luas tulangan pengekang minimum untuk kolom penampang persegi sebagai berikut:

$$A_{sh} = 0,30 \left(s \cdot d_c \cdot \frac{f_c'}{f_y} \right) \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (2)$$

Sheikh & Khoury (1997), Li & Park (2004) maupun Paultre & Legeron (2008) mengungkapkan agar daktilitas kolom yang memadai dapat tercapai terhadap beban seismik maka rasio antara luas penampang bruto kolom terhadap luas penampang inti (A_g/A_c) untuk penampang bulat adalah kurang dari nilai 1,27 dan untuk kolom penampang persegi mempunyai nilai kurang dari 1,3. Apabila nilai tersebut disubstitusikan pada persamaan di atas maka persamaan (1) berubah menjadi persamaan (3), dan persamaan (2) menjadi persamaan (4) di bawah ini.

$$\rho_s = 0,12 \frac{f'_c}{f_y} \quad (3)$$

$$A_{sh} = 0,09.s.d_c \frac{f'_c}{f_y} \quad (4)$$

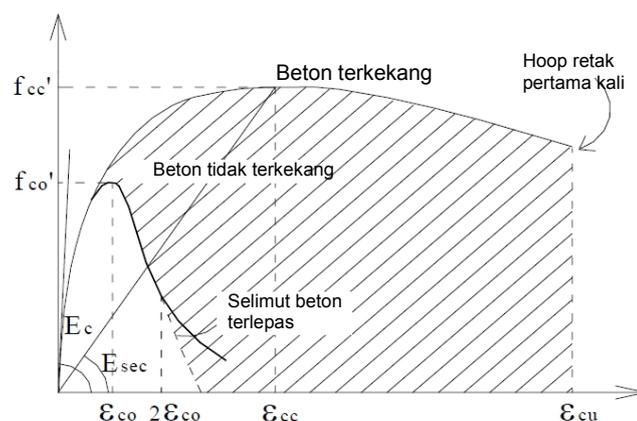
SNI 2847-2013 menggunakan persamaan (3) dan (4) tersebut untuk struktur kolom yang didesain terhadap beban seismik dan menentukan nilai tegangan leleh tulangan pengekang (f_y) tidak lebih dari 700 MPa.

Meskipun persamaan tulangan pengekang yang digunakan SNI di atas diturunkan dari hasil pengujian BMN, namun penggunaan tulangan pengekang dengan tegangan leleh hingga 700 MPa salah satunya adalah untukantisipasi penggunaan BMT agar lebih efektif dan praktis dalam pemasangannya [Bayrak & Sheikh 2004, Djauhari dkk. 2007].

3 MODEL KEKANGAN BETON

3.1 Model Mander, Priestley & Park

Mander dkk. (1988) mengembangkan model kekangan untuk beton yang merupakan penurunan dari hasil eksperimen terhadap kolom beton skala penuh dengan berbagai variasi tulangan pengekang. Dari berbagai penelitian diketahui bahwa model Mander mampu menganalisa perilaku kolom penampang bulat maupun persegi dengan baik. Namun demikian benda uji kolom yang dites oleh Mander masih menggunakan kuat tekan BMN yaitu sekitar 30 MPa. Selengkapnya model kekangan adalah sebagai berikut:



Gambar 2 Kurva Model Kekangan Berdasarkan Mander

Berdasarkan Gambar 2, persamaan tegangan-regangan beton terkekang adalah:

$$f'_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \quad (5)$$

Dimana

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (6)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (7)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_{co}} \text{ MPa} \quad (8)$$

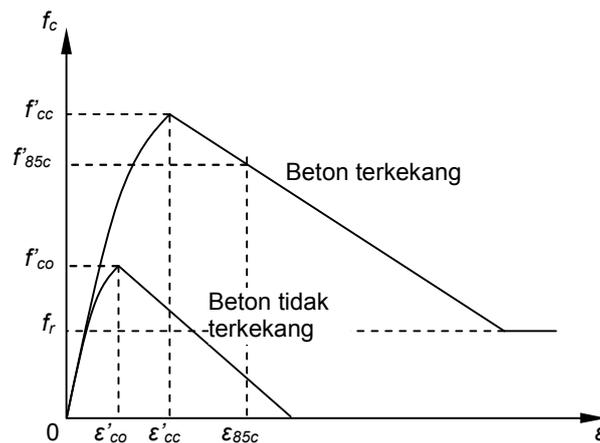
$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (9)$$

Tegangan puncak beton terkekang adalah:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_2}{f'_{co}}} - \frac{2 f_2}{f'_{co}} - 1.254 \right) \quad (10)$$

3.2 Model Kekangan Usulan

Pengarang (2000) pertama kali mengusulkan model kekangan untuk BMT ($50 < f'_c < 85$ MPa), yang merupakan penurunan dari hasil pengujian kolom terhadap beban konsentrik. Variasi tulangan pengekang adalah spasi, rasio dan tegangan leleh ($300 < f_y < 600$ MPa). Model tersebut telah dikembangkan dan divalidasi dengan hasil eksperimen kolom eksentrik dan hasil validasi menunjukkan bahwa model mampu memprediksi perilaku momen-kurvatur kolom dengan baik [Antonius, 2011]. Idealisasi hubungan tegangan-regangan terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Kurva Model Kekangan Usulan

Kurva sebelum dan paska puncak adalah sebagai berikut:

$$f_c = \frac{f'_{cc} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_{cc}} \right)^r}{r - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_{cc}} \right)^r} ; \epsilon_c \leq \epsilon'_{cc} \quad (11)$$

$$f_c = f'_{cc} - (\epsilon_c - \epsilon'_{cc}) \frac{0.15 \cdot f'_{cc}}{(\epsilon_{85c} - \epsilon'_{cc})} ; \epsilon_c > \epsilon'_{cc} \quad (12)$$

dimana:

$$r = \frac{E_c}{E_c - (f'_{cc} / \epsilon'_{cc})} \quad (13)$$

$$E_c = 3400 \sqrt{f'_{cc}} + 4800 \quad (14)$$

Peningkatan kekuatan beton terkekang (K) dihitung dengan persamaan berikut:

$$K = \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.7 \left(\frac{f_2}{f'_{co}} \right)^{0.9} \quad (15)$$

Selanjutnya:

$$\epsilon'_{cc} = \epsilon'_{co} [1.94(K - 1) + 1] \quad (16)$$

$$\epsilon_{co}' = 0,0004 \cdot (f'_{co})^{0.45} \quad (17)$$

Tegangan tulangan pengekang saat respon puncak untuk penampang persegi dihitung dengan persamaan berikut:

$$f_s = E_s \left\{ 0,0004 \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{s}{D_c} \right)}{\rho_s \sqrt{f'_c}} \right] + 0,002 \right\} \leq f_y \quad (18)$$

Parameter lainnya adalah:

$$\epsilon_{85c} = \epsilon_{cc}' + 10^{-5} \cdot e^{3.7K} \quad (19)$$

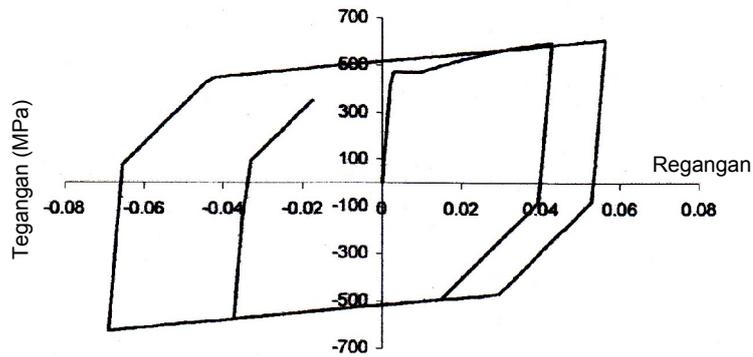
$$f_r = 0,25 f'_{cc} \quad (20)$$

4 PEMODELAN HISTERESIS

Hingga dekade terakhir telah banyak dikembangkan model histeresis beton oleh beberapa peneliti, diantaranya oleh Mander dkk. (1988), Li & Park (2004). Model histeresis beton terkekang yang diusulkan oleh Esmaeily & Xiao (2002) dikembangkan berdasarkan hasil eksperimen pada kolom BMT dan model tersebut telah dibandingkan hasil analisisnya dengan hasil eksperimen. Hasil perbandingan diperoleh korelasi yang sangat dekat dengan hasil eksperimen. Model tersebut dijelaskan secara ringkas di bawah ini.

4.1 Baja

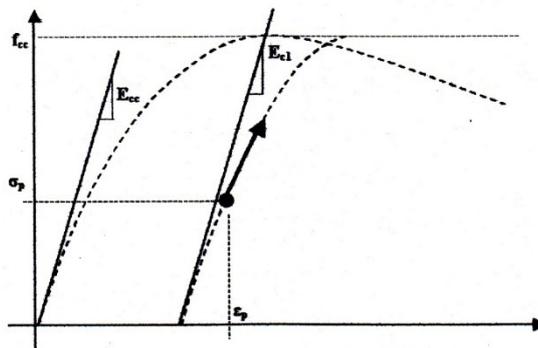
Model histeresis baja diidealisasikan sebagai kurva histeresis trilinear seperti terlihat pada Gambar 4.



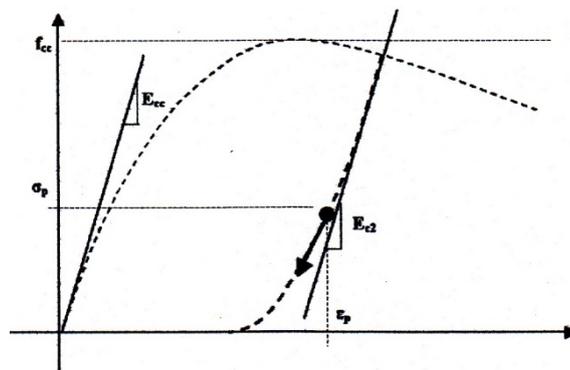
Gambar 4 Kurva Histeresis Baja

4.2 Beton

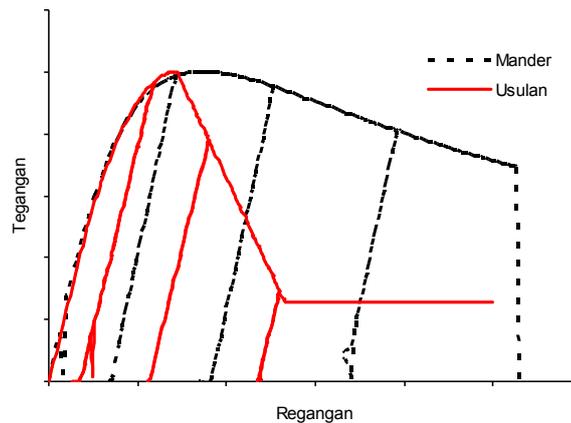
Secara umum model “envelope” beton mengadopsi model yang telah dikembangkan oleh Mander (1988) namun dengan memodifikasi parameter tertentu. Perilaku “loading” mengikuti bentuk parabola. Slope awal pada kurva pra-puncak beton terkekang diambil sama dengan kekakuan awal beton terkekang (Gambar 5). Selanjutnya pemodelan “unloading” paska puncak beton terkekang terlihat pada Gambar 6, dan pemodelan perilaku histeresis beton terkekang berdasarkan model Mander dan Usulan diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 5 Model Histeresis Beton Terkekang pada Kurva Pra-Puncak



Gambar 6 Model Histeresis Beton Terkekang pada Kurva Paska-Puncak



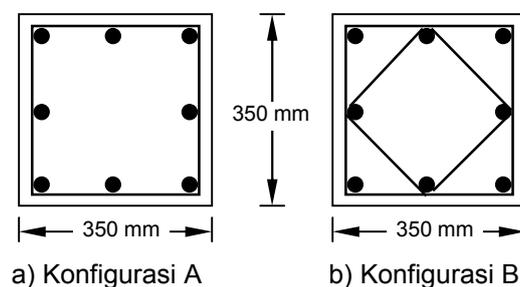
Gambar 7 Perilaku Kurva Histeresis Beton Terkekang Model Mandel dan Model Usulan

Berdasarkan Gambar 7 di atas terlihat bahwa perilaku beton terkekang model Usulan mempunyai perilaku paska puncak yang lebih getas dibandingkan dengan perilaku yang sama pada model Mander. Hal ini disebabkan oleh perbedaan kuat tekan beton yang signifikan dari masing-masing model dalam melakukan eksperimen.

5 PERILAKU KOLOM BETON TERHADAP BEBAN SIKLIK

5.1 Studi Parameter

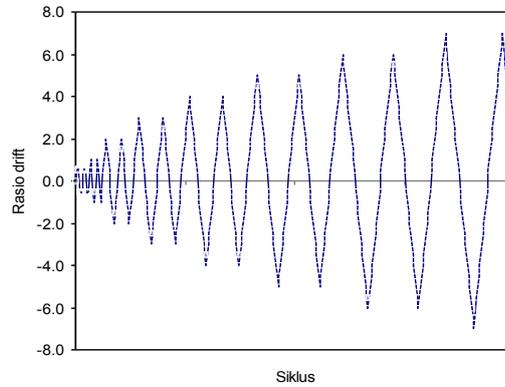
Pengaruh kuat tekan beton (f'_c) akan dievaluasi dengan melakukan simulasi perilaku kolom beton terhadap beban seismik, yaitu dengan menerapkan beban siklik terhadap kolom penampang persegi ukuran 350x350 mm. Kuat tekan beton divariasikan dari mutu normal hingga mutu tinggi yaitu 25, 55 dan 80 MPa. Tulangan longitudinal yang dipasang mempunyai rasio 1,3% (8D16), diameter tulangan pengekang 10 mm dengan tegangan leleh 400 MPa. Rasio luas bruto penampang terhadap penampang inti (A_g/A_c) adalah 1,2. Tulangan pengekang dikelompokkan menjadi konfigurasi A dan B (Gambar 8), dimana otomatis dari kedua konfigurasi tersebut akan terjadi variasi rasio tulangan pengekang (ρ_t). Tingkatan beban aksial yang diterapkan adalah 0,6.



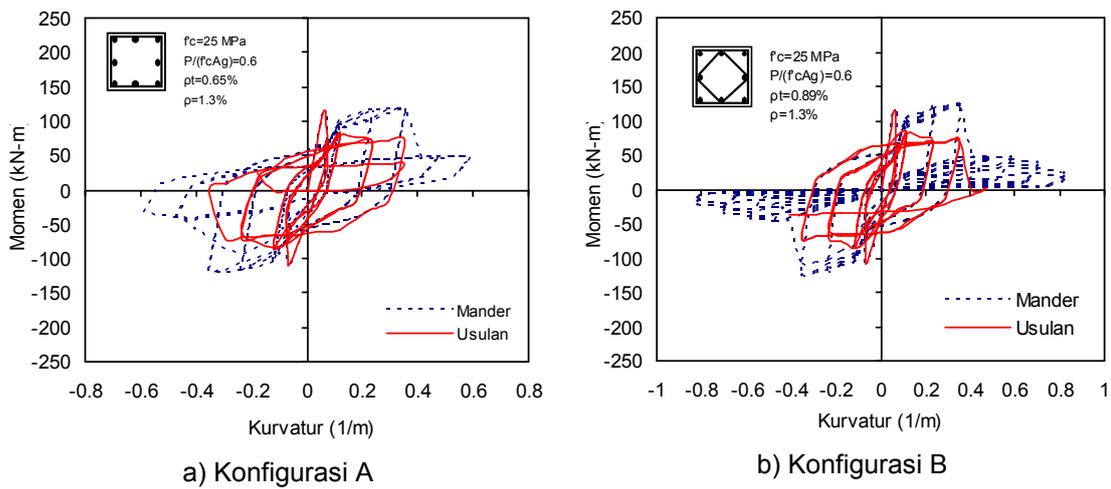
Gambar 8 Penampang Kolom

Beban siklik yang diaplikasikan terlihat pada Gambar 9. Model kekangan yang digunakan adalah model Mander dan model Usulan yang telah dijelaskan di atas, dimana masing-masing model merupakan representasi dari model kekangan beton mutu normal dan mutu tinggi. Model histeresis mengadopsi analisis yang dikembangkan oleh

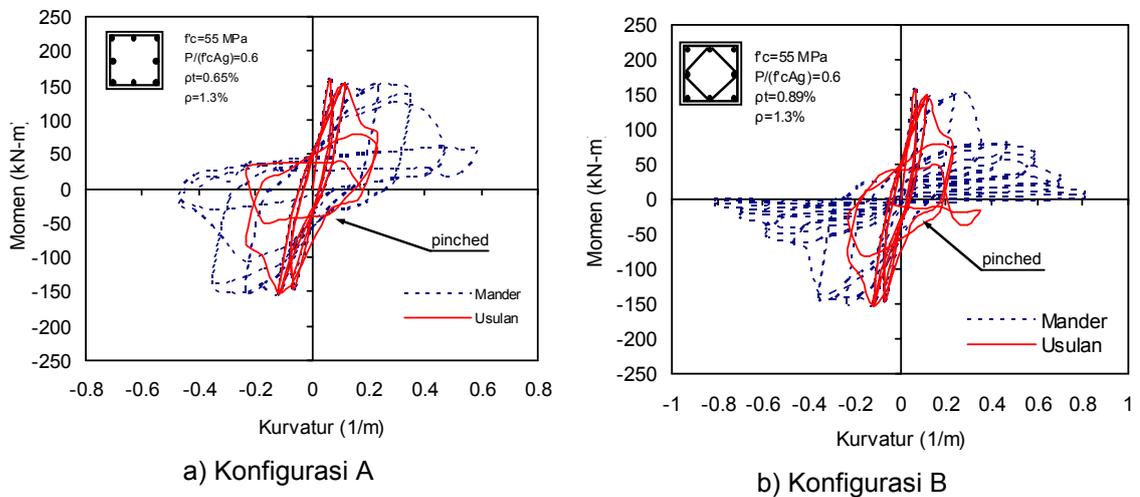
Esmaily & Xiao di atas. Hasil simulasi adalah berupa perilaku histeresis kolom yang diperlihatkan pada Gambar 10 s/d 12.



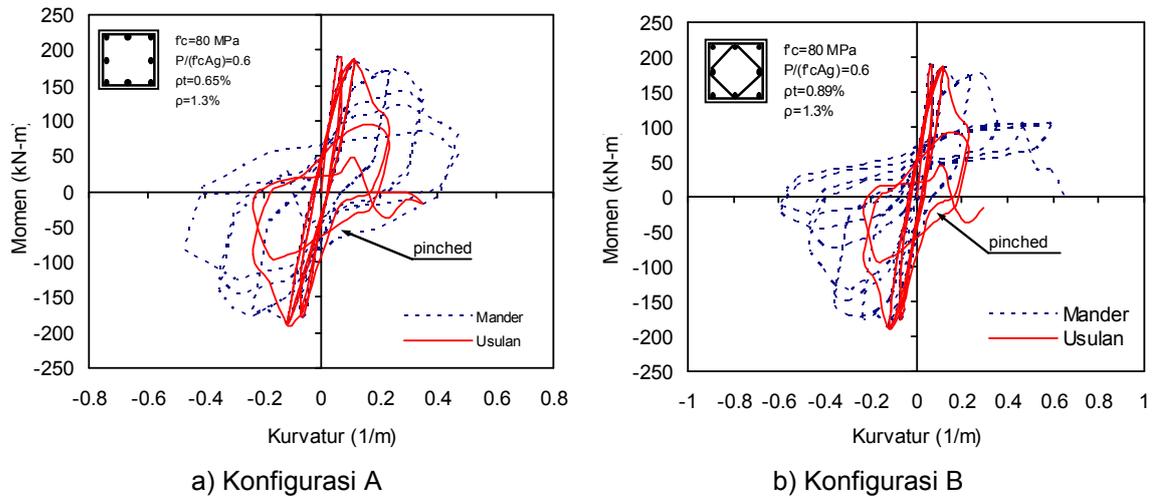
Gambar 9 Riwayat Pembebanan Siklik pada Kolom



a) Konfigurasi A
b) Konfigurasi B
Gambar 10 Perilaku Histeresis Kolom, $f'_c=25$ MPa



a) Konfigurasi A
b) Konfigurasi B
Gambar 11 Perilaku Histeresis Kolom, $f'_c=55$ MPa



Gambar 12 Perilaku Histeresis Kolom, $f'_c=80$ MPa

5.2 Hasil Analisis dan Pembahasan

Secara umum perilaku histeresis pada semua kolom, perilaku momen-kurvatur berdasarkan model Mander mempunyai nilai kurvatur yang lebih besar dibandingkan perilaku histeresis model usulan, meskipun momen maksimum yang terjadi tidak berbeda jauh diantara kedua model. Prediksi kurvatur berdasarkan model Mander lebih daktail dibandingkan dengan prediksi kurvatur dari model Usulan. Hal ini dapat dimengerti karena model Mander diturunkan dari pengujian kolom BMN dan bersifat daktail, yang berbeda dari model Usulan yang memang direkomendasikan untuk kolom BMT.

Pada kolom BMN ($f'_c=25$ MPa), perilaku histeresis berdasarkan model Mander dan usulan relatif stabil dalam hal *loading* maupun *unloading*, meskipun pada kolom konfigurasi tulangan B terlihat lebih baik dan menandakan perilaku yang lebih daktail yang ditunjukkan oleh kurvatur yang lebih panjang (Gambar 10). Perilaku histeresis pada struktur kolom yang mempunyai kuat tekan beton lebih tinggi ($f'_c=55$ MPa) mulai memperlihatkan terjadinya *pinched*, yang menandai penyerapan energi seismik oleh kolom berkurang dibandingkan pada kolom dengan mutu beton lebih rendah di atas (Gambar 11). *Pinched* lebih terlihat dengan jelas pada Gambar 12 dimana kolom beton mempunyai mutu beton yang lebih tinggi lagi yaitu 80 MPa. Kurva histeresis pada gambar tersebut juga terlihat lebih kurus dibandingkan kurva histeresis pada Gambar 11, dan hal ini sebagai indikasi relatif rendahnya daktailitas pada kolom BMT. Perilaku *pinched* tersebut salah satunya juga diakibatkan tegangan lekatan antara beton mutu tinggi dengan baja tulangan yang relatif tinggi pula, sehingga memicu terjadinya slip atau mekanisme lekatan antara BMT dengan baja tulangan berkurang lebih cepat akibat adanya pembebanan bolak-balik (siklik).

6 KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Di dalam paper ini telah dilakukan suatu studi mengenai perilaku kinerja kolom beton mutu tinggi terhadap beban seismik, dimana diterapkan tingkatan beban aksial yang

tinggi pula [$P/(f_c \cdot A_g)=0,6$]. Perbandingan perilaku kolom beton mutu normal hingga mutu tinggi dilakukan dengan menggunakan model kekangan yang telah dikembangkan yaitu model Mander dan model Usulan. Secara umum apabila analisis perilaku kolom terhadap beban seismik menggunakan model Mander lebih daktail dibandingkan perilaku kolom menggunakan model Usulan. Kinerja seismik kolom beton terhadap beban seismik melalui perilaku histeresis semakin berkurang stabilitasnya apabila kuat tekan beton semakin meningkat. Mekanisme lekatan yang terjadi antara beton mutu tinggi dengan baja tulangan terhadap beban seismik semakin berkurang yang ditandai dengan terjadinya *pinched* pada kurva histeresis. Berkurangnya daktilitas kolom beton mutu tinggi akan mempengaruhi ketentuan pemasangan tulangan pengekang persamaan (3) dan (4) di atas terhadap beban seismik, karena nilai A_g/A_c untuk kolom yang daktail juga akan berubah untuk beton mutu tinggi. Konfigurasi tulangan pengekang juga memegang peranan dalam menentukan perilaku histeresis maupun daktilitas kolom dengan berbagai rentang kuat tekan beton. Oleh karenanya variasi tulangan pengekang juga merupakan salah satu solusi agar kolom beton mutu tinggi bersifat daktail.

6.2 Saran

Beton mutu tinggi mempunyai prospek penggunaan yang sangat baik di masa mendatang dan Indonesia merupakan daerah yang sangat rawan terhadap beban gempa. Namun penelitian kolom beton mutu tinggi terhadap beban seismik di Indonesia relatif masih sangat kurang. Disarankan untuk dilakukan studi secara mendalam dan intensif, terutama secara eksperimental, untuk mengevaluasi kinerja kolom beton mutu tinggi terhadap beban seismik.

7 DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318 (2011), "*Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI-318-11) and Commentary (318R-11)*." American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Antonius (2014), "*Performance of High-Strength Concrete Columns Confined by Medium Strength of Spirals and Hoops*", *Asian Journal of Civil Engineering*, 15(2), April, 245-258.
- Antonius and Imran, I. (2012), "*Experimental Study of Confined Low, Medium and High-Strength Concrete Subjected to Concentric Compression*", *ITB Journal of Engineering Science*, 44(3), 252-269.
- Antonius (2011), "*Confinement Effects on High-Strength Concrete Columns Subjected Eccentric Loading*." Proc. of The 4th ASEAN Civil Eng. Conference, Yogyakarta, Indonesia, 22-23 Nov., 21-26.
- 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 2000.
- Badan Standardisasi Nasional (2013): SNI-2847-2013 - *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*.
- Badan Standardisasi Nasional (2012): SNI-1726-2012 - *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung*".
- Bayrak, O. and Sheikh, S.A. (2004), "*Seismic Performance of High Strength Concrete Columns Confined With High Strength Steel*." 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 1-6, Paper No.1181.

- Djauhari, Z., Imran, I. dan Setio, H.D. (2007), "*Perilaku Kekuatan dan Daktilitas Kolom Beton Mutu Tinggi yang Dikekang dengan Baja Mutu Tinggi*", Prosiding Seminar dan Pameran HAKI 2007.
- Esmaily-Gh., A. and Xiao, Y. (2002), "*Seismic Behavior of Bridge Columns Subjected to Various Loading Patterns*", PEER Report 2002/15, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Imran, I. dan Hendrik, F. (2010), "*Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa*", Penerbit ITB.
- Li, Bing and Park, R. (2004), "*Confining Reinforcement for High-Strength Concrete Columns*", ACI Structural Journal, 101(3), 314-324.
- Mander, J.B., M.J.N. Priestley, and R. Park (1988), "*Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*", Journal of Structural Eng. ASCE, 114(8), 1804-1824.
- Matamoros, A.B. and Sozen, M.A. (2003), "*Drift Limits of High-Strength Concrete Columns Subjected to Load Reversals*", Journal of Structural Engineering ASCE, 129(3), 297-313.
- Paultre, P. and Legeron, F. (2008), "*Confinement Reinforcement Design for Reinforced Concrete Columns*", Journal of Structural Eng. ASCE, 134(5), 738-749.
- Paultre, P. and Mitchell, D. (2003), "*Code Provisions for High-Strength Concrete-an International Perspective*", Concrete International, May, 76-90.
- Sheikh, S.A. and Khoury, S.S. (1997), "*A Performance-Based Approach for The Design of Confining Steel in Tied Columns*", ACI Structural Journal, 94(4), 421-431.
- Subramanian, N. (2011), "*Design of Confinement Reinforcement for RC Columns*", The Indian Concrete Journal, 1-9.