

# PERILAKU KEKUATAN DAN DAKTILITAS KOLOM BETON MUTU TINGGI YANG DIKEKANG DENGAN BAJA MUTU TINGGI

Zulfikar Djauhari<sup>1</sup>, Iswandi Imran<sup>2</sup>, Herlien D.Setio<sup>3</sup>

## 1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara yang berada di daerah pertemuan tiga pelat/lempeng tektonik bumi, yaitu lempeng Samudra Hindia (Indo Australia), Eurasia dan Philipine. Selain itu, di sebelah timur Indonesia juga diapit oleh lempeng Pacific. Oleh karena itu, daerah-daerah di Indonesia pada umumnya rawan terhadap gempa. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) Gempa yang berlaku saat ini, struktur bangunan tahan gempa pada umumnya direncanakan dengan mengaplikasikan konsep daktilitas. Dengan penerapan konsep ini, pada saat gempa kuat terjadi, elemen-elemen struktur bangunan tertentu yang dipilih, diperbolehkan mengalami plastifikasi (kerusakan) sebagai sarana untuk pendisipasian energi gempa yang diterima oleh struktur. Namun demikian, struktur diharapkan tidak runtuh (*collapse*). Agar struktur bangunan tidak runtuh, elemen-elemen struktur bangunan, khususnya yang memiliki potensi untuk membentuk sendi plastis harus diberi detailing penulangan yang cukup agar menjadi daktil. SNI Beton yang berlaku saat ini mensyaratkan detailing penulangan yang ketat, khususnya untuk bangunan yang berada di zona dengan resiko kegempaan menengah dan tinggi. Aturan detailing yang ketat tersebut terkadang mengakibatkan padatnya penulangan pada elemen struktur pemikul beban gempa, khususnya di lokasi yang berpotensi membentuk sendi plastis.

Salah satu detail penulangan yang penting untuk menghasilkan respon struktur yang daktil terhadap beban gempa adalah tulangan pengekangan (*confinement*) pada komponen kolom atau pier. Dalam situasi tertentu, kebutuhan tulangan pengekangan ini terkadang sangat tinggi dan pemasangannya menjadi sangat rapat. Karena rapatnya tulangan pengekangan yang harus dipasang, terkadang pada pelaksanaannya menjadi tidak praktis dan sukar untuk dilaksanakan; terlebih bila elemen struktur yang akan ditulangi mempunyai dimensi yang besar, seperti pier jembatan. Sehingga dalam kebanyakan kasus, penulangan pengekang yang terpasang menjadi tidak efektif berfungsi dalam meningkatkan daktilitas penampang. Akibatnya elemen struktur menjadi rawan roboh bila terkena kondisi kegempaan yang tinggi. Dalam riset yang diusulkan ini akan dikembangkan suatu pendekatan yang diharapkan dapat menyederhanakan detail penulangan pengekang, yaitu melalui penggunaan baja mutu tinggi sebagai alternatif untuk tulangan pengekangan.

Namun demikian, terdapat kendala yang terkait dengan batasan-batasan yang ada dalam acuan atau pedoman yang mengatur tentang penggunaan baja mutu tinggi sebagai tulangan pengekangan pada kolom; baik dalam SNI 2847-2002 maupun ACI 318-05 mutu baja tulangan yang digunakan dibatasi maksimum 400 MPa. Batasan ini lebih disebabkan oleh karena belum banyaknya riset yang terkait dengan penggunaan baja mutu tinggi sebagai tulangan pengekang pada kolom.

---

<sup>1</sup> Mahasiswa Program Doktor Rekayasa Struktur Program Studi Teknik Sipil FTSL ITB

<sup>2</sup> Pengajar Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur Program Studi Teknik Sipil FTSL ITB

<sup>3</sup> Pengajar Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur Program Studi Teknik Sipil FTSL ITB

Parameter-parameter kajian yang diteliti mencakup aspek yang mempengaruhi perilaku kolom terkekang, yakni : bentuk, rasio, spasi dan tegangan leleh dari tulangan pengekangan. Dampak dari hasil kajian diharapkan dapat menjadi bahan masukan untuk penyempurnaan peraturan yang selama ini membatasi penggunaan mutu baja yang dinilai prematur dalam kondisi tertentu serta permasalahan kerapatan tulangan pada komponen kolom dapat diatasi sehingga kualitas bangunan yang dihasilkan menjadi lebih baik.

## **2. Riset Beton Mutu Tinggi yang Dikekang Baja Mutu Tinggi**

Ide dasar penggunaan baja mutu tinggi sebagai tulangan pengekang adalah masalah kongesti tulangan yang selama ini menjadi kendala dalam pelaksanaan. Kondisi ini umumnya terjadi pada daerah sendi plastis yang menuntut jumlah tulangan relatif banyak. Berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa atas penggunaan baja mutu tinggi sebagai tulangan pengekang, selain dapat mengatasi kongesti tulangan, juga mengindikasikan adanya kontribusi positif terhadap kinerja komponen struktur.

Nakatsuka et al.(1995) yang menggunakan benda uji silinder beton  $150 \times 300 \text{ mm}^2$  yang intinya dikekang dengan baja spiral mutu tinggi, melaporkan bahwa baja mutu tinggi efektif digunakan untuk pengekangan inti beton mutu tinggi. Selain itu direkomendasikan pula rumusan rasio peningkatan kekuatan dan regangan.

Secara eksplisit, Nakatsuka et al.(1995) mengemukakan bahwa apabila rasio tulangan transversal kecil, inti beton cenderung mencapai tegangan maksimum sebelum tulangan pengekangnya leleh. Demikian pula sebaliknya.

Muguruma (1993) melaporkan bahwa dengan benda uji yang sama dengan Nakatsuka et al., pengekangan dengan baja spiral mutu tinggi memperlihatkan perilaku yang lebih daktail dibandingkan dengan pengekangan dari baja mutu normal.

Paultre et al.(2001) merekomendasikan bahwa rasio tulangan pengekang dapat dikurangi dengan cara meningkatkan mutu tulangnya. Bila pengurangan ini dilakukan sampai di bawah batas minimal yang disyaratkan, pemakaian baja mutu tinggi tersebut tidak bermanfaat. Lebih lanjut Paultre et al. menyarankan untuk dilakukan penelitian lebih lanjut karena secara implisit rumusan yang telah ada belum menggambarkan batas-batas penggunaan baja tulangan mutu tinggi. Akhirnya Paultre berpendapat bahwa rumus ACI tidak dapat digunakan untuk perencanaan tulangan pengekangan dengan baja mutu tinggi.

Pessiki et al.(2001) merekomendasikan prosedur perencanaan penampang kolom terkekang dengan mutu baja spiral sampai dengan 758 MPa. Rekomendasi ini mengindikasikan kontroversi persyaratan maksimal mutu tulangan transversal yang diatur dalam ACI 318.

Xiao dan Yun (2002) menunjukkan bahwa kinerja pengekangan dan daktailitas kolom akan meningkat dengan menggunakan tulangan transversal mutu tinggi. Lebih lanjut dikemukakan bahwa peningkatan tersebut masih dimungkinkan meskipun jarak pengekangan diperlebar dalam batas-batas tertentu.

Sun et al. (1995) melaporkan bahwa kolom yang dikekang baja mutu tinggi dengan beban aksial sebesar  $0,33.P_0$  kombinasi geser siklik, memperlihatkan perilaku yang daktail. Perilaku daktail masih terlihat meskipun beban aksialnya digandakan dua kali atau sebesar  $0,67.P_0$ .

Tan dan Nguyen (2005) mengemukakan bahwa efektifitas pengekanan akan diperoleh apabila menggunakan baja mutu tinggi. Selanjutnya direkomendasikan bahwa untuk perencanaan penampang kolom terkekang dengan baja mutu tinggi kombinasi beton mutu tinggi, dapat digunakan parameter *stress block* yang mereka usulkan.

Aziznamini et al. (1994) serta Hong dan Han (2005) menyimpulkan bahwa meningkatkan mutu baja tulangan pengekan, tidak memberikan efek pengekanan secara signifikan. Lebih lanjut direkomendasikan bahwa untuk mendapatkan efek pengekanan yang signifikan, lebih baik meningkatkan rasio volumetrik tulangan transversal daripada meningkatkan mutu baja tulangan pengekannya.

Secara ringkas beberapa penelitian-penelitian yang menggunakan baja mutu tinggi sebagai tulangan pengekanan dapat dilihat pada Tabel 1. berikut ini.

**Tabel 1 Beberapa penelitian yang menggunakan baja mutu tinggi sebagai tulangan pengekanan**

Peneliti	Benda uji	Sistem pengujian	Parameter penelitian	Kesimpulan
Nakatsuka et al.	Silinder 150x300 mm <sup>2</sup>	Aksial monotonik	1.Mutu beton 2.Mutu baja kekang 3.Rasio volumetrik tul.kekang	Baja mutu tinggi efektif untuk pengekanan
Muguruma et al.(1993)	Kolom persegi 214x214 mm <sup>2</sup> Silinder 150x300 mm <sup>2</sup>	Aksial monotonik	1.Mutu beton 2.Mutu baja kekang 3.Rasio volumetrik tul.kekang 4.Spasi tulangan kekang	Baja mutu tinggi efektif untuk pengekanan
Aziznamini et al.(1994)	Kolom persegi 360x360 mm <sup>2</sup>	Aksial dan Lentur siklik	1.Mutu beton 2.Mutu baja kekang 3.Spasi tulangan kekang 4.Tingkat gaya aksial	Baja mutu tinggi tidak meningkatkan daktilitas
Saatcioglu et al.(1999)	Kolom bulat D = 250 mm	Aksial dan Lentur siklik	1.Mutu beton 2.Mutu baja kekang 3.Rasio volumetrik tul.kekang 4.Spasi tulangan kekang 5.Tingkat gaya aksial 6.Bentuk tulangan kekang	Baja mutu tinggi efektif untuk pengekanan
Paultre et al.(2001)	Kolom persegi 305x305 mm <sup>2</sup>	Aksial dan Lentur siklik	1.Mutu beton 2.Mutu baja kekang 3.Tingkat gaya aksial	Baja mutu tinggi efektif untuk pengekanan
Hong et al.(2005)	Kolom persegi 250x250 mm <sup>2</sup> tanpa selimut	Aksial monotonik	1.Mutu beton 2.Mutu baja kekang 3.Rasio volumetrik tul.kekang 4.Spasi tulangan kekang	Baja mutu tinggi tidak berpengaruh signifikan terhadap efek pengekanan

### 3. Program Pengujian

Benda uji yang diteliti berupa kolom berpenampang bulat dengan kategori kolom pendek. Kolom dengan penampang bulat dipilih atas pertimbangan efektifitas dalam pengekanan. Sedangkan pemilihan tipe kolom pendek lebih didasarkan pada pertimbangan stabilitas dan aplikatif. Bentuk pengekanan yang digunakan terdiri atas bentuk spiral dan cincin. Bentuk pengekanan ini dipilih untuk mengetahui sejauhmana pengaruhnya terhadap efektifitas pengekanan secara struktural.

Material benda uji yang digunakan adalah beton mutu tinggi ( $f'_c > 40$  MPa) dengan target kuat tekan karakteristik sebesar 75 MPa, sengkang spiral dan cincin baja mutu tinggi ( $f_y > 400$  MPa) dan normal, dalam hal ini digunakan tulangan *wire rod* mutu 800 MPa dan 900 MPa, sedangkan tulangan longitudinal memakai baja mutu normal ( $f_y \leq 400$  MPa).

Dimensi benda uji direncanakan berdiameter 110 mm. Penentuan dimensi benda uji serta target mutu beton yang direncanakan harus memperhatikan kemampuan pembebanan alat uji yang tersedia. Rincian benda uji disajikan pada Tabel 4.

Tabel 2.

**Tabel 2 Hubungan tegangan-regangan beton terkekang yang menggunakan baja mutu tinggi**

No	Peneliti	Model Tegangan Regangan Beton Terkekang		Keterangan
		Kurva sebelum respon puncak	Kurva setelah respon puncak	
1	Hong dan Han (2005)	$f_c = f'_{cc} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)^{\alpha} \right\}$	$f_c = f'_{cc} - E_{des} (\epsilon_c - \epsilon_{cc})$	$\alpha = E_c \frac{\epsilon_{cc}}{f'_{cc}}$ $E_c = 3320 \sqrt{f'_{cc}} + 6900$
2	Legeron dan Paultre (2003)	$f_c = f'_{cc} \left[ \frac{k \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)}{k - 1 + \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}} \right]$	$f_c = f'_{cc} e^{[k_1 (\epsilon_c - \epsilon_{cc})^{k_2}]}$	$k = \frac{E_{ct}}{E_c - \left( \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \right)}$ $k_1 = \frac{\ln 0.5}{(\epsilon_{cc50} - \epsilon_{cc})^{k_2}}$ $k_2 = 1 + 25(I_{e50})$
3	Li, Park dan Tanaka (2001)	$f_c = E_c \epsilon_c + \frac{(f'_c - E_c \epsilon_{co})}{\epsilon_{co}} \epsilon_c^2$	$f_c = f'_{cc} - \frac{(f'_{cc} - f'_c)}{(\epsilon_{cc} - \epsilon_{co})^2} (\epsilon_c - \epsilon_{cc})^2$ $f_c = f'_{cc} - \beta \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} (\epsilon_c - \epsilon_{cc})$	
4	Razvi dan Saatcioglu (1999)	$f_c = \frac{f'_{cc} \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)^r}{r - 1 + \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)^r}$	$\epsilon_{ss} = 260 k_3 \rho_s \epsilon_{cc} [1 + 0.5 k_2 (k_4 - 1)] + \epsilon_{085}$ <b>saat</b> $f_c = 0.85 x f'_{cc}$	$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$ $E = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}}$ $E_c = 3320 \sqrt{f'_{cc}} + 6900$
5	Azizinamini (1994)	$f = \left( \frac{f_o}{\epsilon_o} \right) \cdot \epsilon$	$f = f_o [1 - A(\epsilon - \epsilon_o)] \geq 0.3 \cdot f_o$	

Hubungan tegangan-regangan yang ditampilkan pada Tabel 2 hanya yang mengakomodasikan pemakaian baja tulangan mutu tinggi.

**Tabel 3 Tegangan dan regangan saat respon puncak**

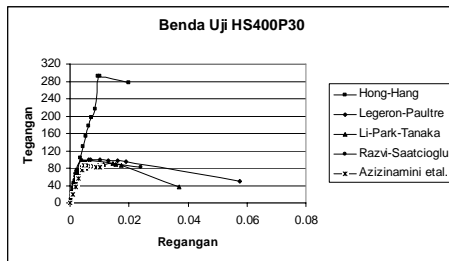
No	Peneliti	Tegangan dan Regangan Saat Respon Puncak		Keterangan
		Tegangan puncak	Regangan saat Tegangan Puncak	
1	Hong dan Han (2005)	$f_{cc} = f_{co} \left\{ 1 + 4.1 \left( \frac{\rho_e}{f_{co}} \right)^{0.70} \right\}$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0.015 \left( \frac{\rho_e}{f_{co}} \right)^{0.56}$	$f_{co} = 0.85 f_c'$ $\varepsilon_{co} = 0.002 - 0.0008 k_3$ $k_3 = 40 / f_c'$
2	Legeron dan Paultre (2003)	$f_{cc} = f_c' \left\{ 1 + 2.4 (I_e')^{0.70} \right\}$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} (1 + 35 (I_e')^{1.2})$	$I_e' = \frac{f_{le}}{f_c}$ $\rho_{se} = K_e \rho_s$ $f_{le} = 0.5 \rho_{se} f_h$
3	Li, Park dan Tanaka (2001)	$f_{cc} = f_c' \left[ -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \alpha_s \frac{f_l}{f_c} - 2 \alpha_s \frac{f_l}{f_c}} \right]$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 2 + (53.4 - 0.42 f_c') \sqrt{\frac{f_l}{f_c}} \right]$	
4	Razvi dan Saatcioglu (1999)	$f_{cc} = f_c' + k_1 f_{le}$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} (1 + 5 k_3 K)$	$k_1 = 6.7 (f_{le})^{-0.17}$ $f_{le} = k_2 f_l$ $K = \frac{k_1 f_{le}}{f_c}$
5	Azizinamini (1994)	$f_{cc} = K \cdot f_c$	$\varepsilon_{cc} = 0.00265 + \frac{0.0035 \left( 1 - \frac{0.734 s}{h''} \right) (\rho' \cdot f_c')^2}{\sqrt{f_c}}$	

**Tabel 4 Benda uji yang digunakan dalam penelitian**

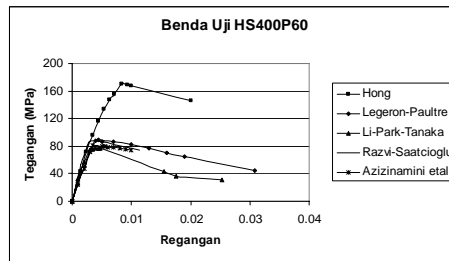
No	Nama	Bentuk pengekanan	Mutu (MPa)		Spasi (mm)	ρ	ρ.fy	
			Beton	Tulangan transversal				
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	HS400P30	Spiral	75	400	30	0.0419	16.8	
2	HS400P60				60	0.0209	8.4	
3	HS800P30				30	0.0419	33.5	
4	HS800P60			60	0.0209	16.7		
5	HS800P120			120	0.0105	8.4		
6	HS960P30			960	30	0.0419	40.2	
7	HS960P60				60	0.0209	20.1	
8	HS960P70				70	0.0180	17.3	
9	HS960P120			120	0.0090	8.6		
10	HH400P30	Cincin		75	400	30	0.0419	16.8
11	HH400P60					60	0.0209	8.4
12	HH800P30					30	0.0419	33.5
13	HH800P60				60	0.0209	16.7	
14	HH800P120				120	0.0105	8.4	
15	HH960P30				960	30	0.0419	40.2
16	HH960P60					60	0.0209	20.1
17	HH960P70					70	0.0180	17.3
18	HH960P120				120	0.0090	8.6	

#### 4. Perbandingan Model-model Kekangan

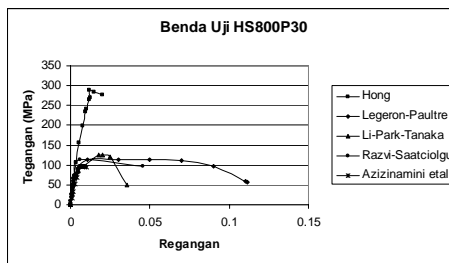
Untuk memprediksi perilaku kekuatan dan daktilitas 18 benda uji, digunakan lima rumusan tegangan-regangan yang disajikan pada Tabel 2. Gambar 1 sampai 9 menyajikan hasil analisis prediksi perilaku tersebut dalam bentuk kurva tegangan-regangan beton terkekang.



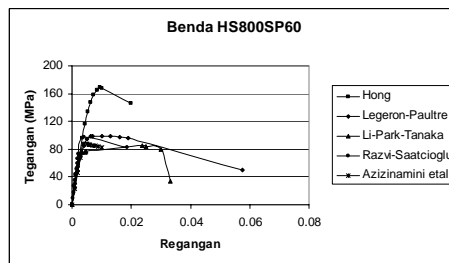
**Gambar 2 Perbandingan model kekangan benda uji HS400P30**



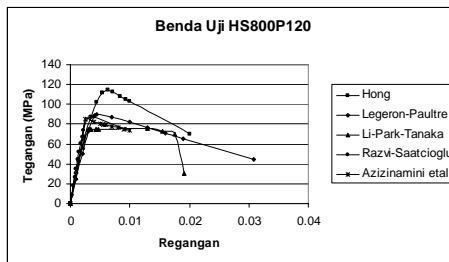
**Gambar 1 Perbandingan model kekangan benda uji HS400P60**



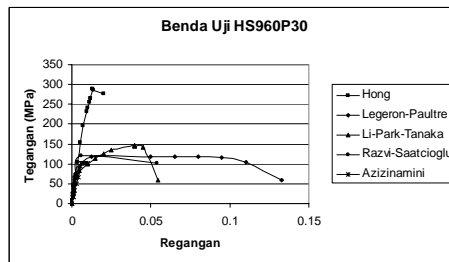
**Gambar 3 Perbandingan model kekangan benda uji HS800P60**



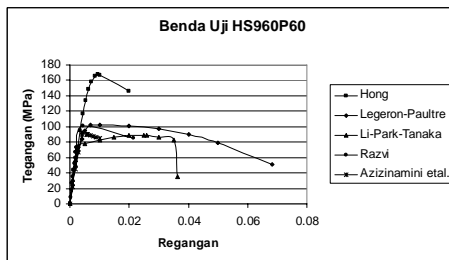
**Gambar 4 Perbandingan model kekangan benda uji HS800P30**



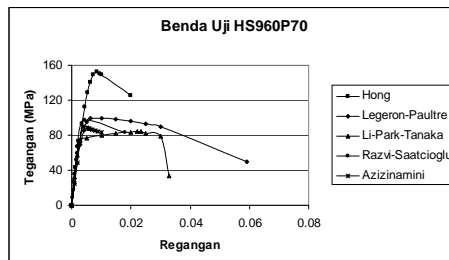
**Gambar 5 Perbandingan model kekangan benda uji HS960P30**



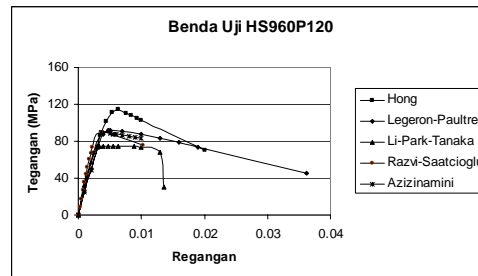
**Gambar 6 Perbandingan model kekangan benda uji HS800P120**



**Gambar 8 Perbandingan model kekangan benda uji HS960P30**



**Gambar 7 Perbandingan model kekangan benda uji HS800P120**



**Gambar 9 Perbandingan model kekangan Benda uji HS960P120**

Prediksi tersebut pada bagian kurva naik (ascending) semua rumusan memperlihatkan perilaku yang mirip pada kemiringan kurva maupun nilai tegangan puncaknya, hanya saja terdapat perbedaan pada rumusan Hong dan Hang (2005) yakni tegangan puncaknya cenderung lebih tinggi daripada rumusan yang lain.

#### **4.1. Efek mutu tulangan pengekangan**

Berdasarkan Gambar 1 sampai 9 serta Tabel 5, terlihat bahwa selain rumusan Hong dan Hang (2005), semua rumusan memperlihatkan bahwa makin tinggi mutu baja tulangannya, makin tinggi pula tegangan dan regangan saat puncak demikian juga regangan ultimet serta tegangan kekangnya.

Semua rumusan konsisten memperlihatkan bahwa penggunaan baja tulangan mutu tinggi dapat memperbesar jarak spasi pengekangan, misalnya benda uji HS400P30 memiliki perilaku yang sama dengan HS800P60, artinya jika pengekangan yang menggunakan baja tulangan mutu normal berjarak 30 mm, maka jarak tersebut dapat diperlebar menjadi 60 mm. Perilaku seperti ini konsisten diperlihatkan oleh semua rumusan.

#### **4.2. Efek bentuk tulangan kekang**

Selain Li et al.(2001), semua rumusan tidak mengakomodasi adanya perbedaan bentuk tulangan pengekangan pada penampang bulat. Akibatnya respon-respon kritis pada semua rumusan (kecuali Li et al.) akan memperlihatkan hasil yang sama baik penampang tersebut dikekang dengan tulangan spiral maupun cincin. Sedangkan Li et al.(2005) membedakan rumusan antara pengekangan menggunakan tulangan berbentuk spiral dengan cincin.

Hasil analisis yang menggunakan rumusan Li et al. (2005) yang disajikan pada Tabel 5, memperlihatkan bahwa tulangan pengekangan berbentuk spiral lebih baik bila dibandingkan dengan menggunakan tulangan berbentuk cincin.

#### **4.3. Efek Spasi**

Secara umum dari Gambar 1 sampai 9 dan Tabel 5 terlihat bahwa makin pendek spasi pengekungannya, makin tinggi tegangan dan regangan saat respon puncak, regangan ultimet serta tegangan lateral akibat pengekangan.

#### **4.4. Efek rasio tulangan pengekangan**

Efek rasio volumetrik tulangan pengekangan mirip dengan efek spasi. Secara umum terlihat dari Gambar 1 sampai 9 dan Tabel 5, makin besar rasio volumetrik tulangan pengekangan, makin tinggi tegangan dan regangan saat respon puncak, regangan ultimat serta tegangan lateral akibat pengekangan.

#### **5. Tegangan pada Sengkang**

Selama ini dalam peraturan ACI dan SNI, perhitungan rasio volumetrik tulangan pengekangan selalu menggunakan kuat leleh baja tulangan pengekangan, karena berdasarkan asumsi yang digunakan bahwa saat respon puncak tercapai, saat itu pula tulangan pengekangan akan leleh. Akan tetapi dalam berbagai riset, asumsi ini tidak terbukti.

Telah diutarakan pada pasal sebelumnya, bahwa salah satu ide dasar penggunaan baja mutu tinggi sebagai tulangan pengekangan adalah masalah kongesti tulangan yang selama ini menjadi kendala dalam pelaksanaan. Oleh karena itu, bila digunakan baja tulangan mutu tinggi, kekuatan baja yang digunakan dalam menghitung rasio volumetrik tidak perlu kuat lelehnya sehingga rasio volumetrik akan dapat lebih kecil nilainya, dengan penampang tetap memiliki perilaku kekuatan dan daktilitas yang memuaskan.

Beberapa periset telah mengusulkan rumusan tegangan tulangan pada saat respon maksimum, yang dapat digunakan untuk menghitung rasio volumetrik apabila menggunakan baja tulangan mutu tinggi. Rumusan tersebut disajikan pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 5 Tegangan dan regangan saat respon puncak, regangan ultimet dan gaya pengekangan dari berbagai model

No	Benda Uji	Hong dan Hang (2005)				Legeron dan Paultre (2003)				Li, Park dan Tanaka (2001)				Razvi dan Saatcioglu (1999)				Azizinamini (1994)			
		f <sub>cc</sub>	ε <sub>cc</sub>	ε <sub>ultimet</sub>	f <sub>l</sub>	f <sub>cc</sub>	ε <sub>cc</sub>	ε <sub>ultimet</sub>	f <sub>l</sub>	f <sub>cc</sub>	ε <sub>cc</sub>	ε <sub>ultimet</sub>	f <sub>l</sub>	f <sub>cc</sub>	ε <sub>cc</sub>	ε <sub>ultimet</sub>	f <sub>l</sub>	f <sub>cc</sub>	ε <sub>cc</sub>	ε <sub>ultimet</sub>	f <sub>l</sub>
		MPa			MPa	MPa			MPa	MPa			MPa	MPa			MPa	MPa			MPa
1	HS400P30	284.23	0.0154	0.1163	53.77	98.89	0.0063	0.0576	4.19	90.04	0.0145	0.0368	7.51	97.00	0.0042	0.0241	4.19	86.64	0.0046	0.0308	
2	HS400P60	168.10	0.0095	0.0484	25.45	89.71	0.0044	0.0308	2.09	77.45	0.0048	0.0253	2.94	87.38	0.0034	0.0114	2.09	81.78	0.0034	0.0099	
3	HS800P30	284.23	0.0154	0.1163	53.77	113.81	0.0106	0.1112	8.38	125.58	0.0178	0.0355	15.01	114.11	0.0057	0.0455	8.38	98.29	0.0057	0.1142	
4	HS800P60	168.10	0.0095	0.0484	25.45	98.89	0.0063	0.0576	4.19	84.46	0.0237	0.0333	5.88	97.00	0.0042	0.0188	4.19	88.56	0.0039	0.0308	
5	HS800P120	114.76	0.0064	0.0240	12.44	89.71	0.0044	0.0308	2.09	75.52	0.0129	0.0191	1.35	87.38	0.0034	0.0093	2.09	84.12	0.0026	0.0099	
6	HS960P30	284.23	0.0154	0.1163	53.77	119.09	0.0124	0.1327	10.05	145.49	0.0399	0.0546	18.62	120.50	0.0062	0.0537	10.05	102.94	0.0061	0.1631	
7	HS960P60	168.10	0.0095	0.0484	25.45	102.14	0.0071	0.0683	5.03	89.22	0.0261	0.0364	7.29	100.59	0.0045	0.0214	5.03	91.27	0.0041	0.0430	
8	HS960P70	152.47	0.0086	0.0408	21.64	99.36	0.0064	0.0591	4.31	83.83	0.0233	0.0328	5.67	97.52	0.0043	0.0179	4.31	89.92	0.0037	0.0324	
9	HS960P120	114.76	0.0064	0.0240	12.44	91.71	0.0048	0.0362	2.51	75.75	0.0139	0.0203	1.62	89.40	0.0036	0.0102	2.51	85.94	0.0026	0.0130	
10	HH400P30									85.38	0.0108	0.0340	6.17								
11	HH400P60									76.02	0.0037	0.0215	1.89								
12	HH800P30									111.55	0.0152	0.0328	12.33								
13	HH800P60									79.02	0.0196	0.0279	3.78								
14	HH800P120									75.04	0.0083	0.0130	0.39								
15	HH960P30									127.09	0.0364	0.0500	15.29								
16	HH960P60									81.11	0.0215	0.0304	4.68								
17	HH960P70									78.09	0.0185	0.0265	3.31								
18	HH960P120									75.06	0.0088	0.0137	0.46								

**Tabel 6 Rumusan tegangan tulangan saat respon puncak**

No	Peneliti	Tegangan tulangan kekang saat respon puncak
1	Hong dan Han (2005)	$f_s = E_s \left\{ 0.45 \varepsilon_{co} + 0.73 \left( \frac{k_e \rho_c}{f_{co}} \right) \right\}$
2	Legeron dan Paultre (2003)	$f_s = f_y \quad \text{bila } \kappa \leq 10$ $f_s = \frac{0.25 f_c'}{\rho_{se} (\kappa - 10)} \quad \text{bila } \kappa > 10$
3	Li, Park dan Tanaka (2001)	$f_s = f_y$
4	Razvi dan Saatcioglu (1999)	$f_s = E_s \left( 0.0025 + 0.04 \sqrt[3]{\frac{k_2 \rho_s}{f_c'}} \right)$
5	Azizinamini (1994)	$f_s = f_y$

## 6. Daktilitas Beton Terkekang

Nilai daktilitas penampang beton yang dikekang dengan baja tulangan mutu tinggi memperlihatkan nilai yang lebih baik bila dibandingkan penampang yang dikekang baja mutu normal. Hal ini berarti bahwa baja tulangan mutu tinggi efektif meningkatkan daktilitas penampang.

Berikut ini disajikan rumusan dari beberapa peneliti, untuk menghitung daktilitas berdasarkan nilai regangannya. Hal penting yang perlu diperhatikan adalah masing-masing peneliti memiliki pendapat yang berbeda mengenai regangan ultimet, sehingga dari Tabel 7 terlihat perbedaan letak regangan ultimet tersebut pada kurva tegangan regangannya.

**Tabel 7 Regangan ultimet**

No	Peneliti	Regangan ultimet
1	Hong dan Han (2005)	$\varepsilon_{c50} = \left( \frac{0.5 f_c'}{tg E_{des}} \right) + \varepsilon_{cc}$
2	Legeron dan Paultre (2003)	$\varepsilon_{cc50} = \varepsilon_{c50} (1 + 60 I_{e50})$
3	Li, Park dan Tanaka (2001)	$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[ 2 + (53.5 - 0.42 f_c') \sqrt{\frac{f_l}{f_c'}} \right]$
4	Razvi dan Saatcioglu (1999)	$\varepsilon_{85} = 260 k_3 \rho_s \varepsilon_{cc} [1 + 0.5 k_2 (k_4 - 1)] + \varepsilon_{085}$
5	Azizinamini (1994)	$\varepsilon_{cu} = 0.003 + \left( \frac{\rho_s f_s}{100} \right)^2$

## 7. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis di atas, disimpulkan bahwa :

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

## 8. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini berlangsung berkat bantuan dan kerjasama antara LPPM ITB dengan P.T.Indocement Tunggul Prakarsa Tbk.

## 9. Daftar Pustaka

1. Azizinamini, A.; Corley, W.G.; Johal, L.S.P., *Effects of Transverse Reinforcement on Seismic Performance of Columns*, ACI Structural Journal, V.89, No.4, July-August 1992, pp.442-450.
2. Azizinamini, A.; Baum Kuska,S.S.; Brungardt, P.; Hatfield, E., *Seismic Behavior of Square High-Strength Concrete Columns*, ACI Structural Journal, V.91, No.3, May-June 1994, pp.336-345.
3. Bing, L.; Park, R., *Confining Reinforcement for High Strength Concrete Columns*, ACI Structural Journal, V.101, No.3, May-June 2004, pp.314-324.
4. Bing, L.; Park, R.; Tanaka, H.; *Stress-Strain Behavior of High Strength Concrete Confined by Ultra High and Normal Strength Transverse Reinforcements*, ACI Structural Journal, V.98, No.3, May-June 2001, pp.395-406
5. Hong, K.N; Han, S.H.; *Stress-Strain Model of High Strength Concrete Confined by Rectangular Ties*, Korean Society of Civil Engineering Journal of Civil Engineering, V.9, No.3, May 2005, pp.225-232
6. Konstantinidis, D.; *Properties and Analytical Modelling of Unconfined and Confined High Performance Concrete*, Tech.Chron.Sci.J., No.1, 2005, pp.37-52
7. Legeron, F.; Paultre, P.; *Uniaxial Confinement Model for Normal and High Strength Concrete Columns*, Journal of Structural Engineering, V.129, No.2, February 2003, pp.241-252
8. Li, Y.F.; Chen, S.H.; Chang, K.C.; Liu, K.Y.; *A Constitutive Model of Concrete Confined by Steel Reinforcements and Steel Jackets*, Canadian Journal Civil Engineering, 32, March 2005, pp.279-288
9. Mugurama, H.; Nishiyama, M.; Watanabe, F., *Stress-Strain Curve Model for Concrete with A Wide-Range of Compressive Strength*, Proceeding High Strength Concrete, Lillehammer, Norway, 1993, pp.314-321.

10. Nakatsuka, T.; Nakagawa, H.; Suzuki, K., *Strength – Deformation Characteristic of Confined Concrete and Spiral Reinforcement : of High Strength*, Concrete 95 Toward Better Concrete Studies, 1995, pp.427-469.
11. Paultre, P.; Legeron, L.; Mongeau, D., *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.
12. Paultre, P.; Legeron, F.; Savard, C.; *Use of High Yield Strength Materials in Seismic Zones : A Strategic Approach*, World Conference Earthquake Engineering 12, Paper No.0816, 2000
13. Pessiki, S.; Graybeal, B.; Mudlock, M.; *Proposed Design of High Strength Spiral Reinforcement in Compression Members*, ACI Structural Journal, V.98, No.6, November-December 2001, pp.799-810
14. Razvi, S.; Saatcioglu, M.; *Confinement Model for High Strength Concrete*, Journal of Structural Engineering, V.125, No.3, March 1999, pp.281-289
15. Saatcioglu, M.; *ACI Code Development Process*, 2005, pp.38-40
16. Sun, Y.; Sakino, K.; Tian, F., *Limit Deformation Capacity of Confined RC Columns : Theoretical Consideration and Experimental Program*, The Seventh East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, August 1999, pp.1199-1204.
17. Sun, Y.; Sakino, K.; Tian, F., *Limit Deformation Capacity of Confined RC Columns : Theoretical Consideration and Experimental Program*, The Seventh East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, August 1999, pp.1199-1204.
18. Sun, Y.; Sakino, K.; Tian, F., *Limit Deformation Capacity of Confined RC Columns : Experimental Result and Comparison with Theoretical Results*, The Seventh East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, August 1999, pp.1205-1216.
19. Tan, T.H.; Nguyen, N.B., *Flexural Behavior of Confined High Strength Concrete Column*, ACI Structural Journal, V.102, No.2, March-April 2005, pp.198-205.
20. Xiao, Y.; Yun, H.W., *Experimental Studies on Full-Scale High-Strength Concrete Columns*, ACI Structural Journal, V.99, No.2, March-April 2002, pp.199-207.