

# USULAN KURVA TEGANGAN-REGANGAN BETON MUTU TINGGI TERKEKANG WELDED WIRE REINFORCEMENT

Benny Kusuma<sup>1</sup>, Tavio<sup>2</sup>

## 1. Pendahuluan

Kurva tegangan-regangan beton terkekang, serta perumusan empirisnya, telah lama dikembangkan dan diusulkan oleh para peneliti untuk mendekati kondisi yang sesungguhnya. Hingga saat ini, model-model pengekangan yang telah dikembangkan tersebut, diperoleh dari hasil eksperimen kolom beton yang dikekang secara konvensional oleh tulangan lateral. Model-model tersebut tidak lagi sesuai bilamana digunakan pada kolom beton yang dikekang oleh WWR.

Model analitis pengekangan beton mutu tinggi oleh WWR baru diusulkan oleh Tabsh.<sup>1</sup> Model tersebut mengadopsi model pengekangan beton mutu tinggi oleh sengkang konvensional yang dimodifikasi secara empiris berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang terbatas. Model analitis kekangan Tabsh<sup>1</sup> hanya meninjau pengaruh rasio volumetrik tulangan lateral sebagai parameter yang berperan dalam meningkatkan kekuatan dan regangan beton terkekang WWR. Model tersebut tidak memperhitungkan adanya pengaruh diameter, spasi, serta konfigurasi sel (grid) tulangan kekangan terhadap kekuatan dan daktilitas kolom beton terkekang WWR.

Makalah ini menyajikan evaluasi hasil pengujian Lambert dan Tabsh<sup>2</sup> pada kolom beton mutu tinggi terkekang WWR. Evaluasi yang dilakukan secara analisis regresi meninjau pengaruh diameter; spasi, rasio volumetrik, serta konfigurasi spasi sel. Data yang dianalisis berasal dari sepuluh benda uji kolom terbebani secara aksial monotonik. Kuat tekan beton yang dipakai sebesar 70 MPa, sedangkan mutu baja WWR sekitar 450 MPa. Rasio volumetrik WWR berkisar 3,5% sampai 5%.

Dalam makalah ini, kurva tegangan-regangan beton mutu tinggi yang baru diusulkan. Parameter-parameter yang berpengaruh, selain rasio volumetrik, ditinjau antara lain diameter, spasi, serta konfigurasi sel (grid) WWR. Evaluasi statistik terhadap peningkatan kekuatan (tegangan) dan daktilitas (regangan) kolom beton mutu tinggi terkekang WWR menunjukkan bahwa model kekangan usulan memberikan prediksi yang cukup akurat terhadap hasil eksperimen bila dibandingkan dengan model peneliti lainnya. Kurva tegangan-regangan usulan yang dihasilkan juga cukup akurat dalam memprediksi kurva hasil eksperimen dibandingkan dengan kurva dari peneliti yang lain.

## 2. Beton Terkekang WWR

Razvi dan Saatcioglu<sup>3</sup> mengawali penelitian memakai WWR sebagai tulangan pengekang pada kolom beton mutu normal. Mereka menyimpulkan bahwa WWR cukup signifikan dalam meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom. Akan tetapi, WWR dalam penelitian tersebut dipasang menyelimuti tulangan longitudinal dan transversal (keberadaan tulangan transversal tersebut masih dilengkapi dengan kait penuh), sehingga cenderung terjadi pemborosan. Hal yang bertolak belakang dihasilkan dalam

---

<sup>1</sup> Kandidat Doktor Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

<sup>2</sup> Dosen Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

penelitian yang diadakan oleh Furlong, Fenves, dan Marino dimana WWR tidak memperlihatkan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kekuatan dan daktilitas kolom.<sup>2</sup>

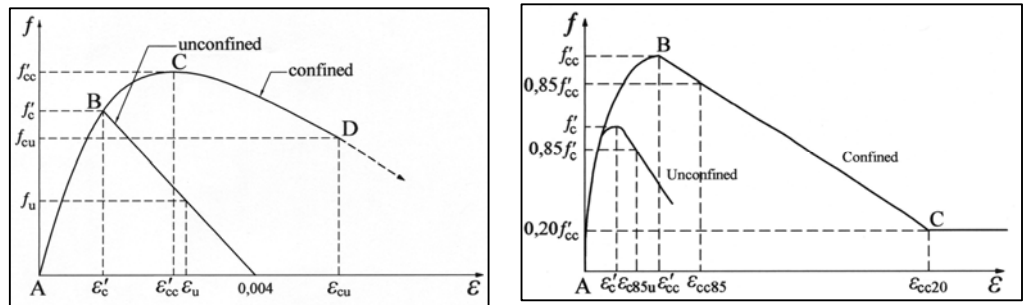
Namun, penelitian yang dilakukan oleh Mau, Holland, dan Hong<sup>4</sup> dimana WWR sebagai tulangan pengekang pengganti sengkang konvensional (tanpa tulangan longitudinal), menunjukkan bahwa kontribusi WWR sangat signifikan terhadap peningkatan kekuatan saja, sedangkan untuk daktilitasnya sulit teramati. Hal tersebut bertolak belakang dengan hasil pengujian yang telah dilakukan oleh Saatcioglu dan Grira<sup>5</sup> pada kolom beton mutu normal terbebani secara siklik; serta Lambert dan Tabsh<sup>2</sup> pada kolom beton mutu tinggi terbebani secara aksial konsentris, yang menunjukkan bahwa WWR memiliki peranan yang sangat signifikan dalam peningkatan daktilitas kolom beton.

Dari hasil pengujian Lambert dan Tabsh,<sup>2</sup> kolom terkekang WWR memperlihatkan retak longitudinal saat mendekati 90% beban puncaknya. Terkelupasnya selimut beton terjadi pada regangan sekitar 0,0023; proses ini terjadi secara perlahan-lahan. Sedangkan kolom terkekang sengkang biasa, retak longitudinal terjadi saat mendekati 40% beban puncak. Terkelupasnya selimut beton terjadi pada regangan sekitar 0,002; proses ini terjadi secara mendadak. Kolom terkekang WWR menunjukkan adanya fenomena puncak ganda, dimana kolom beton setelah mencapai tegangan puncak tidak langsung turun tapi turun sedikit atau bertahan dengan tegangan tersebut, kemudian kembali lagi ke tegangan puncak sebelumnya atau bertahan sebelum mengalami keruntuhan.

Lambert dan Tabsh<sup>2</sup> juga meneliti pengaruh WWR untuk pengekangan kolom beton mutu tinggi. Tulangan WWR dibandingkan perilakunya terhadap tulangan konvensional. Diagram aksial-deformasi inti beton terkekang WWR memperlihatkan adanya peningkatan kekuatan dan daktilitas. Kekuatannya meningkat sekitar 15% dan daktilitasnya meningkat sekitar 250% bila dibandingkan dengan kolom terkekang tulangan sengkang konvensional. Mereka menyimpulkan bahwa peningkatan kekuatan dan daktilitas kolom beton mutu tinggi terkekang WWR cukup signifikan pada kolom dengan rasio volumetrik lebih besar dari 3,5%.

### 3. Tinjauan Model–Model Pengekangan

Model-model pengekangan usulan beberapa peneliti yang ditinjau dalam makalah ini sebagai pembandingan model usulan penulis antara lain model Muguruma dkk. (MNW)<sup>6</sup>, model Razvi dan Saatcioglu (RS),<sup>7</sup> serta model Tabsh (T).<sup>1</sup> Model RS dan MNW pada dasarnya diturunkan dari model pengekangan beton mutu tinggi dengan sengkang konvensional. Model RS banyak dipakai karena telah mengakomodasi pengaruh konfigurasi tulangan pengekang dalam persamaan tegangan-regangannya untuk pengekang persegi empat. Sementara, model MNW dipakai sebagai perbandingan untuk menunjukkan kelemahan bilamana konfigurasi tulangan lateral tidak diperhitungkan. Sementara itu, model T mengadopsi kurva tegangan-regangan beton terkekang sengkang konvensional yang diusulkan oleh Hoshikuma dkk.<sup>8</sup> yang kemudian dimodifikasi secara empiris berdasarkan hasil pengujian laboratorium pada kolom beton mutu tinggi terkekang WWR. Model-model analitis kurva hubungan tegangan-regangan beton terkekang yang ditinjau ditunjukkan dalam Gambar 1, sedangkan persamaan konstitutif model tersebut diberikan dalam Tabel 1.



(a) Model Muguruma dkk. (1993)

(b) Model Razvi dan Saatcioglu (1999)

Gambar 1 Model kurva tegangan-regangan beton terkekang

Tabel 1 Persamaan model tegangan-regangan beton mutu tinggi terkekang

PENELITI	MODEL TEGANGAN-REGANGAN BETON TERKEKANG KONVENSIONAL		
	KURVA NAIK	KURVA TURUN	TEGANGAN SISA
Muguruma dkk. (1993)	$f_c = E_c \varepsilon_c + \left[ \frac{f'_c - E_c \varepsilon'_c}{(\varepsilon'_c)^2} \right] \varepsilon_c^2$ $f_c = \frac{(f'_c - f'_{cc})}{(\varepsilon'_c - \varepsilon'_{cc})^2} (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc})^2 + f'_{cc}$	$f_c = \frac{(f_{cu} - f'_{cc})}{(\varepsilon_{cu} - \varepsilon'_{cc})} (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc}) + f'_{cc}$	—
Razvi dan Saatcioglu (1999)	$f_c = f'_{cc} \left[ \frac{r \left( \varepsilon_c / \varepsilon'_{cc} \right)}{r - 1 + \left( \varepsilon_c / \varepsilon'_{cc} \right)^r} \right]$	$f_c = f'_{cc} \left[ \frac{0,15 f'_{cc}}{\varepsilon_{c85c} - \varepsilon'_{cc}} (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc}) \right]$	$0,2 f'_{cc}$
Tabsh (2007)	$f_c = \frac{r f'_{cc} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)}{r - 1 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)^r}$	$f_c = E_c \varepsilon_c \left[ 1 - \frac{1}{r} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)^{r-1} \right]$	—

Semua model persamaan konstitutif yang ditinjau memakai bentuk kurva parabolik untuk bagian kurva yang naik. Model-model tersebut memperlihatkan prediksi yang cukup baik pada perilaku tegangan-regangan beton terkekang, terutama peningkatan kekuatannya. Akan tetapi, pada bagian kurva yang turun menunjukkan ketidakpastian model-model tersebut yang sangat tinggi dalam memprediksi daktilitas penampang beton terkekang.<sup>9</sup>

Model analitis kekangan yang diusulkan oleh MNW<sup>6</sup> didasarkan pada hasil eksperimen kolom beton persegi, dengan kuat tekan berkisar antara 26 sampai 160 MPa, yang dkekang dengan sengkang bulat dan persegi dengan tegangan leleh antara 191 dan 1353 MPa. Oleh karena itu, model MNW dapat diaplikasikan baik pada beton mutu normal maupun tinggi dengan tulangan pengekuat yang mempunyai tegangan leleh baik normal maupun tinggi. Model kurva tegangan-regangan usulan MNW dapat dilihat dalam Gambar 1(a). Dalam model MNW, peningkatan kekuatan dan daktilitas beton terkekang dipengaruhi oleh spasi, rasio volumetrik dan tegangan leleh tulangan lateral

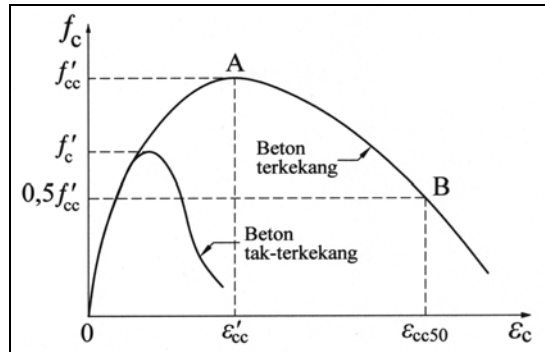
yang dikontrol dengan parameter kekangan,  $C_c$ . Model ini tidak memperhitungkan pengaruh konfigurasi tulangan pengekang. Juga, tidak ada batasan tegangan leleh tulangan pengekang, dimana tulangan lateral diasumsikan meleleh pada saat respons puncak.

RS<sup>7</sup> memodifikasi kurva tegangan-regangan untuk beton mutu normal yang diusulkan oleh Saatcioglu dan Razvi.<sup>10</sup> Mereka menambahkan pengaruh mutu beton dan tegangan leleh tulangan lateral. Model tersebut dapat diaplikasikan baik pada beton mutu normal maupun mutu tinggi, yaitu mulai dari 30 hingga 130 MPa. Dalam menentukan persamaan tegangan dan regangan beton terkekang, RS<sup>7</sup> melakukan analisis terhadap hasil pengujian 46 kolom skala besar dengan kuat tekan beton antara 60 dan 124 MPa, ditambah dengan data hasil eksperimen 124 buah kolom beton mutu tinggi dari berbagai peneliti. Model tersebut dapat diaplikasikan untuk beton terkekang *spiral*, *hoop*, *crossties*, *welded wire fabric* (WWF), maupun kombinasi dari ketiganya. Beberapa parameter pengekangan yang berpengaruh dalam meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom dalam pengujian ini antara lain rasio volumetrik, spasi, tegangan leleh, tipe dan konfigurasi tulangan transversal, kuat tekan beton, serta geometri penampang. Model pengekangan yang diusulkan oleh RS didasarkan pada penghitungan tekanan seragam ekuivalen yang memberi pengaruh yang sama dengan tekanan kekangan yang tak seragam. Model kurva tegangan-regangan yang diusulkan tersebut dapat dilihat dalam Gambar 1(b). Model ini telah dicocokkan dengan hasil pengujian pada kolom terbebani secara konsentris maupun eksentris dengan laju pembebanan cepat maupun lambat.

#### 4. Model Analitis Beton Terkekang WWR

Kurva tegangan-regangan yang diusulkan terdiri dari dua persamaan, yaitu bagian kurva yang naik dan bagian kurva yang turun. Koordinat-koordinat penting pada kurva tersebut diperoleh dengan cara analisis regresi dari data hasil eksperimen Lambert dan Tabsh<sup>2</sup> untuk mewakili parameter-parameter pengaruh pengekangan. Salah satu koordinat yang penting tersebut adalah titik puncak kurva disamping beberapa titik lainnya sebagai penentu daktilitas.

Dalam model yang diusulkan, bagian kurva yang naik menggunakan persamaan yang aslinya diusulkan oleh Popovics,<sup>11</sup> dengan mengganti parameter  $f'_c$  untuk beton polos dengan  $f'_{cc}$  untuk beton terkekang. Persamaan tersebut memberikan bagian kurva naik yang sangat mendekati kurva-kurva hasil eksperimental. Sedangkan pada bagian kurva yang turun menggunakan model kurva turun yang berbentuk lurus yang diusulkan oleh Muguruma dkk,<sup>6</sup> dengan melakukan modifikasi terlebih dahulu menjadi bentuk kurva parabola. Untuk beton mutu tinggi, bentuk kurva tegangan-regangan sangat dipengaruhi oleh titik puncak kurva. Titik acuan yang dipilih untuk regangan beton pasca regangan puncak adalah regangan 50% dari tegangan puncak,  $\varepsilon_{cc50}$ . Kurva tegangan-regangan beton terkekang WWR usulan disajikan dalam Gambar 2, sedangkan persamaan-persamaan bagian kurva naik dan turun masing-masing diberikan oleh Pers. (1) dan (2).



Gambar 2 Model usulan kurva tegangan-regangan beton terkekang WWR

Bagian kurva naik (OA):

$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon'_{cc}; \quad f_c = \frac{r f'_{cc} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)}{r - 1 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)^r} \quad (1)$$

Bagian kurva turun (AB):

$$\varepsilon'_{cc} < \varepsilon_c; \quad f_c = \frac{-0,5f'_{cc}}{(\varepsilon_{cc50} - \varepsilon'_{cc})^2} (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc})^2 + f'_{cc} \quad (2)$$

dimana variabel  $f_c$  dan  $\varepsilon_c$  adalah tegangan dan regangan dalam beton terkekang; parameter  $r$  merupakan fungsi dari modulus elastisitas dan koordinat puncak tegangan-regangan beton terkekang, yang dirumuskan:

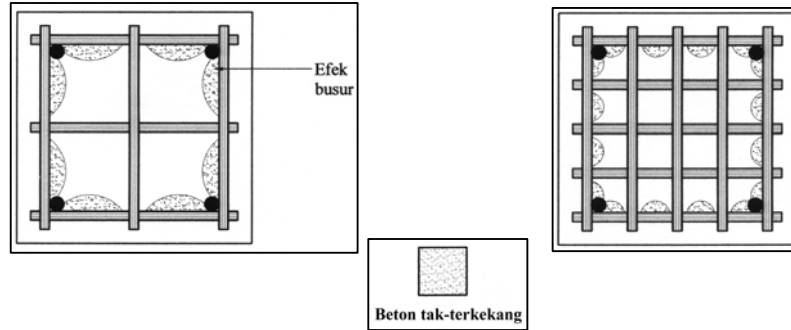
$$r = \frac{E_c \varepsilon'_{cc}}{E_c \varepsilon'_{cc} - f'_{cc}} \quad (3)$$

Parameter-parameter utama yang mempengaruhi kurva tegangan-regangan beton terkekang WWR antara lain diameter, spasi, rasio volumetrik, dan konfigurasi grid (jumlah sel). Semua parameter tersebut dipertimbangkan dalam model usulan.

#### 4.1. Tekanan Lateral

Konfigurasi tulangan transversal memegang peranan sangat penting terhadap perilaku tegangan-regangan beton terkekang. Untuk kasus kolom terkekang WWR, konfigurasi spasi sel (grid) sangat signifikan dalam meningkatkan daktilitas kolom beton mutu tinggi, yaitu terjadinya peningkatan regangan beton terkekang pada saat tegangan beton turun mencapai 50% tegangan maksimum dengan jumlah grid yang meningkat. Hal ini dikarenakan pengekan WWR akan menghasilkan luasan daerah inti beton terkekang lebih besar dan tegangan kekang lebih merata bila dibandingkan dengan pada sengkang konvensional. Gambar 3 menunjukkan pengekan inti beton yang lebih efektif dengan

WWR. Tegangan kekang lateral WWR,  $f_L$ , dapat dikerahkan terhadap inti beton bila tegangan kekang dapat dikembangkan penuh melalui aksi busur (*arching action*).



**Gambar 3** Penampang beton bujur sangkar yang dikekang dengan WWR

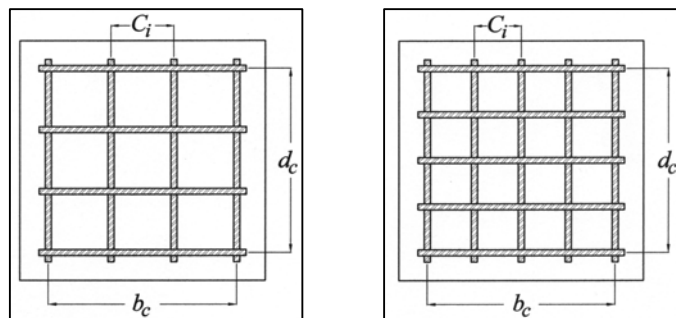
Tegangan lateral tulangan pengekuat dirumuskan sebagai berikut:

$$f_L = \frac{d_t}{C_i} \alpha \rho_s f_{yh} \quad (4)$$

dimana  $d_t$  dan  $C_i$  adalah diameter dan spasi sel tulangan WWR diukur dari pusat ke pusat antar tulangan grid sel;  $\rho_s$  adalah rasio volumetrik tulangan lateral terhadap inti beton terkekang;  $f_{yh}$  adalah tegangan leleh tulangan lateral; dan  $\alpha$  adalah faktor modifikasi efektifitas pengekuat, <sup>12</sup> yang diberikan oleh perumusan berikut:

$$\alpha = \left(1 - \frac{\sum C_i^2}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s}{2d_c}\right) \quad (5)$$

dimana  $s$  adalah spasi pusat ke pusat antar sengkang; serta  $b_c$  dan  $d_c$  masing-masing adalah lebar dan tinggi pusat ke pusat sengkang terluar (lihat Gambar 4).



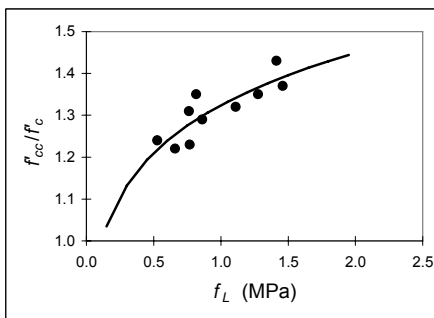
**Gambar 4** Parameter penampang grid 3x3 dan 4x4 yang digunakan dalam model

#### 4.2. Tegangan Puncak Beton Terkekang

Tegangan puncak kolom beton terkekang tergantung pada kekuatan beton tak terkekang, diameter, spasi, rasio volumetrik, dan tegangan leleh, serta jumlah dan konfigurasi tulangan grid WWR. Persamaan hubungan antara peningkatan kuat tekan beton terkekang,  $f'_{cc}/f'_c$  dan tegangan lateral tulangan pengekuat,  $f_L$  diperoleh dari analisis regresi dengan menggunakan hasil eksperimental Lambert dan Tabsh<sup>2</sup> sebagai berikut:

$$f'_{cc} = f'_c [1,324 f_L^{0,13}] \quad (6)$$

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara peningkatan kuat tekan beton terkekang dengan tegangan lateral tulangan pengekuat usulan [Pers. (6)]. Persamaan yang diperoleh dari analisis regresi tersebut mempunyai koefisien determinasi  $R^2 = 0,704$ .



Gambar 5 Peningkatan kuat tekan beton terkekang

#### 4.3. Regangan Puncak Beton Terkekang

Hasil regresi peningkatan regangan puncak beton mutu tinggi terkekang WWR merupakan fungsi kapasitas efektif tulangan pengekuat,  $\alpha \omega_L$ , dan regangan beton tanpa kekangan dan diberikan sebagai berikut (Gambar 6) :

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c [1 + 3273 \alpha \omega_L^{4,1}] \quad (7)$$

dimana  $\omega_L$  adalah rasio mekanis tulangan lateral dengan persamaan sebagai berikut:

$$\omega_L = \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c} \quad (8)$$

sedangkan regangan pada saat tegangan puncak beton tak terkekang untuk beton mutu tinggi dapat dihitung dengan Pers. (9) yang diusulkan oleh Thornfeldt dkk.<sup>13</sup>

$$\varepsilon'_c = \left( \frac{f'_c}{E_c} \right) \left( \frac{m}{m-1} \right) \quad (9)$$

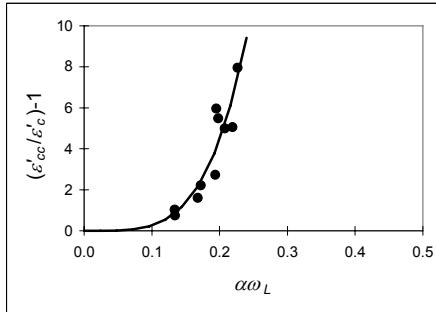
dimana:

$$m = \frac{f'_c}{17} + 0,8 \quad (10)$$

Nilai modulus elastisitas beton mutu tinggi ditentukan dari Pers. (11) mengikuti saran Collins dkk.<sup>14</sup> sebagai berikut:

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \text{ MPa} \quad (11)$$

Secara statistik, regangan puncak beton terkekang mempunyai nilai  $R^2 = 0,905$ .

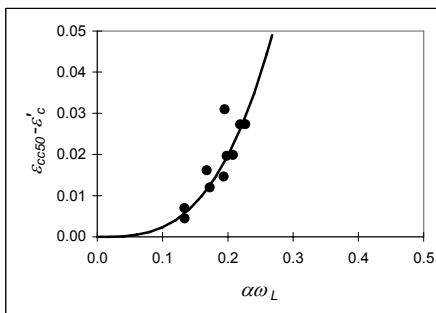


Gambar 6 Peningkatan regangan pada saat tegangan puncak

#### 4.4. Daktilitas Beton Terkekang

Daktilitas pada model kekangan ini dihitung dengan asumsi bahwa deformasi maksimum tercapai di saat tegangan beton terkekang turun sebesar 50% dari tegangan maksimum. Persamaan hubungan antara peningkatan regangan beton terkekang pada saat tegangan maksimum beton turun sampai 50%,  $\epsilon_{cc50} - \epsilon'_c$ , dan kapasitas efektif tulangan pengekang  $\alpha\omega_L$  yang diperoleh dari analisis regresi data eksperimen adalah sebagai berikut:

$$\epsilon_{cc50} = \epsilon'_c + 2,9\alpha\omega_L^{3,1} \quad (12)$$



Gambar 7 Pengaruh pengekangan pada daktilitas

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara peningkatan regangan beton terkekang pada saat tegangan maksimum beton turun sampai 50% ( $\epsilon_{cc50} - \epsilon'_c$ ) dan kapasitas efektif tulangan pengekang ( $\alpha\omega_L$ ). Hasil analisis regresi tersebut menunjukkan koefisien  $R^2 = 0,847$ .

## 5. Verifikasi Model

Hasil prediksi peningkatan tegangan puncak dan regangan pada saat tegangan puncak beton terkekang sesuai Pers. (6) dan (7) menunjukkan kesesuaian dengan hasil eksperimen benda uji dengan sel 3 x 3 dan 4 x 4 seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.

**Tabel 2 Peningkatan kekuatan dan daktilitas inti kolom beton terkekang**

Label Benda Uji	rasio volumetrik (%)	Konfigurasi Grid	Eksperimen			Model		
			$f'_{cc}/f'_c$	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_c$	$\varepsilon_{cc50}/\varepsilon'_c$	$f'_{cc}/f'_c$	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_c$	$\varepsilon_{cc50}/\varepsilon'_c$
W-1	3.50	3x3	1.24	1.75	3.22	1.22	1.87	3.26
W-2	3.50	4x4	1.29	2.03	4.49	1.30	1.85	3.23
W-3	4.00	3x3	1.22	2.60	9.07	1.25	3.18	5.54
W-4	4.00	4x4	1.32	3.21	6.99	1.34	3.42	5.91
W-5	4.50	3x3	1.31	3.73	8.32	1.28	4.91	8.06
W-6	4.50	4x4	1.35	6.48	10.82	1.37	5.29	8.57
W-7	4.75	3x3	1.23	6.96	16.49	1.28	5.03	8.23
W-8	4.75	4x4	1.43	6.06	14.64	1.38	7.48	11.34
W-9	5.00	3x3	1.35	6.00	10.94	1.29	6.20	9.76
W-10	5.00	4x4	1.37	8.96	14.67	1.39	8.43	12.47

Tabel 3 menunjukkan perbandingan antara model usulan untuk semua rasio volumetrik terhadap hasil eksperimen dan ketiga model pengekangan yang telah dikembangkan sebelumnya, yaitu model Muguruma dkk.,<sup>6</sup> model Razvi dan Saatcioglu,<sup>7</sup> dan model Tabsh.<sup>1</sup> Terlihat jelas bahwa ketiga model tersebut tidak mampu memprediksi tegangan dan regangan saat tegangan puncak dengan baik. Kedua model pengekangan, yaitu model Muguruma dkk.<sup>6</sup> dan Razvi dan Saatcioglu<sup>7</sup> *underestimate* dalam memprediksi peningkatan daktilitas pada bagian kurva tegangan-regangan beton terkekang yang turun. Hal ini dikarenakan beberapa model tersebut diturunkan dari model beton terkekang sengkang persegi dengan atau tanpa pengikat atau spiral, yang tentu saja berbeda sekali bilamana diterapkan dalam kasus pengekang WWR.

**Tabel 3 Perbandingan model usulan dengan model peneliti lain terhadap kekuatan dan daktilitas kolom beton terkekang WWR.**

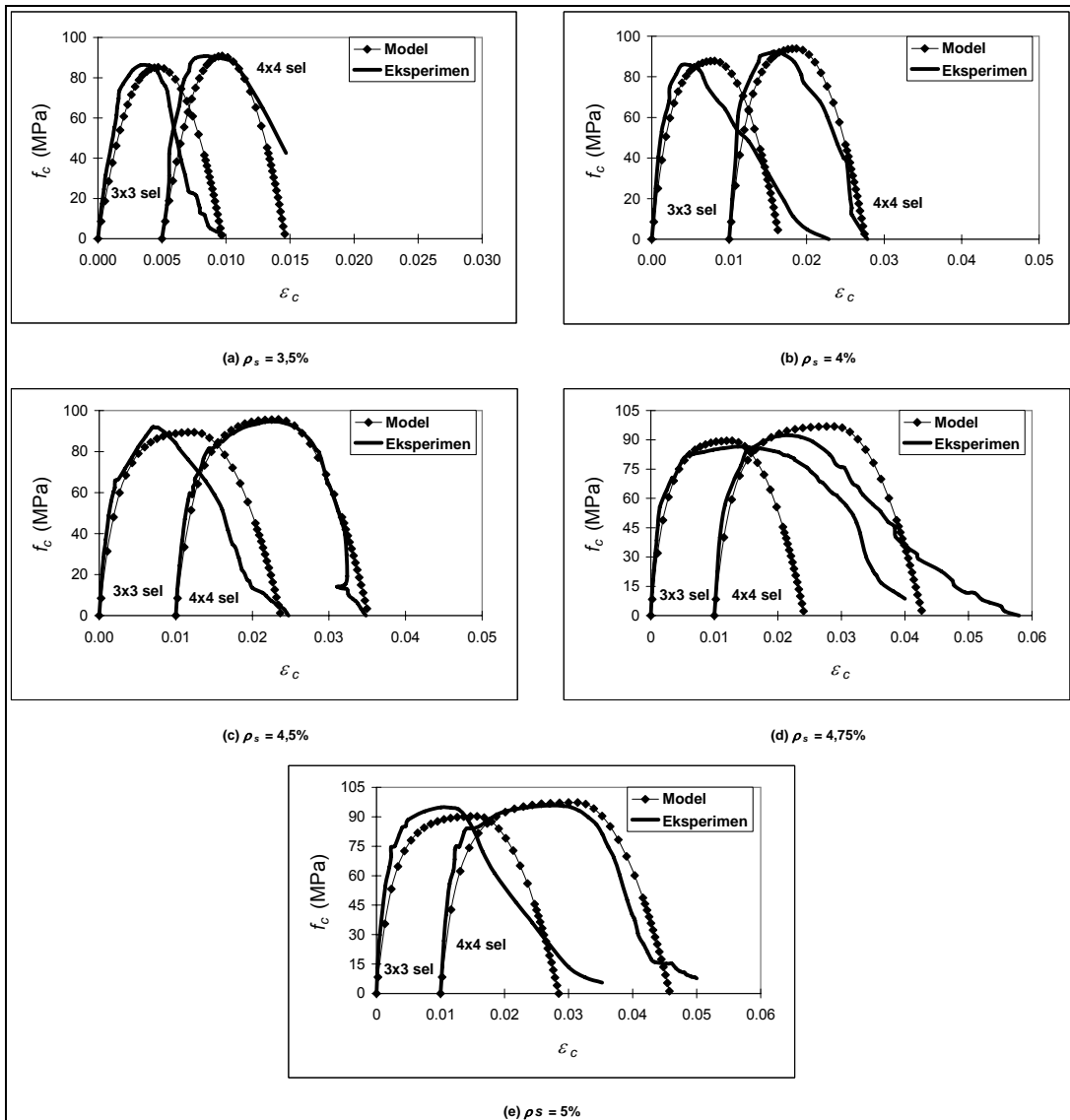
Nomor Benda Uji	$\rho_s$ (%)	Grid	Eksperimen			Muguruma dkk. (1993)			Razvi dan Saatcioglu (1999)			Tabsh (2007)			Model Usulan		
			$f'_{cc}/f'_c$	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_c$	$\varepsilon_{cc50}/\varepsilon'_c$	$f'_{cc}/f'_c$	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_c$	$\varepsilon_{cc50}/\varepsilon'_c$	$f'_{cc}/f'_c$	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_c$	$\varepsilon_{cc50}/\varepsilon'_c$	$f'_{cc}/f'_c$	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_c$	$\varepsilon_{cc50}/\varepsilon'_c$	$f'_{cc}/f'_c$	$\varepsilon'_{cc}/\varepsilon'_c$	$\varepsilon_{cc50}/\varepsilon'_c$
W-1	3.5	3x3	1.24	1.75	3.22	1.15	2.01	3.67	1.21	2.44	—	1.25	1.91	—	1.22	1.87	3.26
W-2	3.5	4x4	1.29	2.03	4.49	1.14	1.98	3.60	1.18	2.31	—	1.30	1.85	3.23	1.30	1.85	3.23
W-3	4.0	3x3	1.22	2.60	9.07	1.17	2.20	4.11	1.33	2.90	—	1.25	3.18	5.54	1.25	3.18	5.54
W-4	4.0	4x4	1.32	3.21	6.99	1.17	2.18	4.06	1.29	2.73	—	1.34	3.42	5.91	1.34	3.42	5.91
W-5	4.5	3x3	1.31	3.73	8.32	1.20	2.36	4.50	1.41	3.21	—	1.28	4.91	8.06	1.28	4.91	8.06
W-6	4.5	4x4	1.35	6.48	10.82	1.19	2.34	4.43	1.36	3.00	—	1.37	5.29	8.57	1.37	5.29	8.57
W-7	4.75	3x3	1.23	6.96	16.49	1.20	2.41	4.61	1.38	3.08	—	1.28	5.03	8.23	1.28	5.03	8.23
W-8	4.75	4x4	1.43	6.06	14.64	1.21	2.44	4.67	1.44	3.32	—	1.38	7.48	11.34	1.38	7.48	11.34
W-9	5.0	3x3	1.35	6.00	10.94	1.21	2.49	4.80	1.41	3.23	—	1.29	6.20	9.76	1.29	6.20	9.76
W-10	5.0	4x4	1.37	8.96	14.67	1.22	2.51	4.82	1.44	3.32	—	1.39	8.43	12.47	1.39	8.43	12.47

Selain itu, dari hasil perbandingan tersebut terlihat bahwa kedua model yang diusulkan oleh Muguruma dkk.<sup>6</sup> dan Razvi dan Saatcioglu<sup>7</sup> menunjukkan peningkatan tegangan puncak dan regangan pada saat tegangan puncak beton terkekang yang jauh lebih rendah (*underestimate*) bila dibandingkan dengan hasil eksperimen. Perbedaan yang

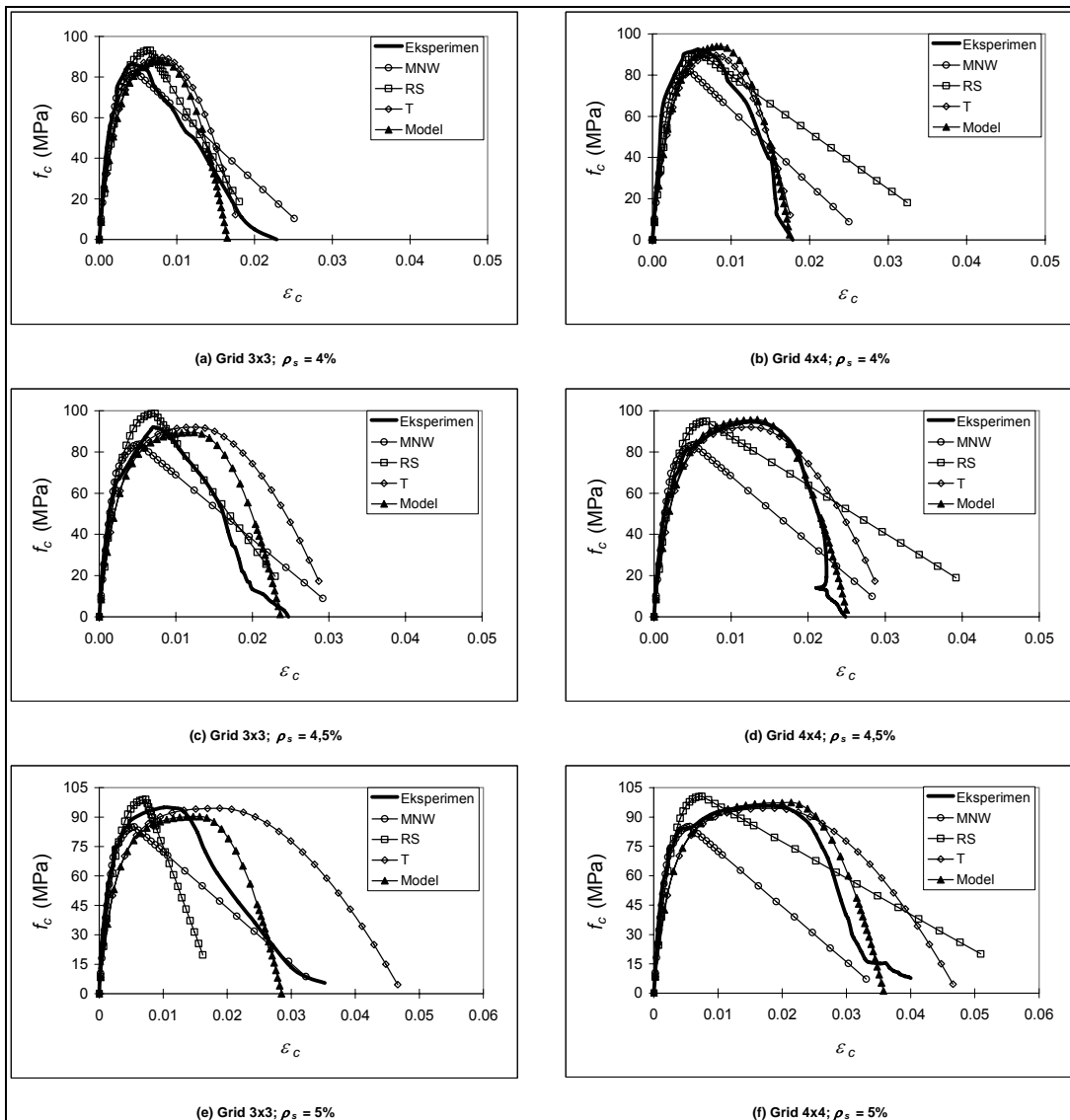
sangat menyolok tersebut dikarenakan model tersebut dikembangkan untuk beton terkekang tulangan lateral konvensional. Sementara itu, hasil prediksi model kekangan yang diusulkan oleh Tabsh<sup>1</sup> menunjukkan bahwa peningkatan tegangan puncak dan regangan pada saat tegangan puncak beton terkekang cukup baik bila dibandingkan dengan hasil eksperimen. Namun begitu, model usulan Tabsh tersebut tidak memperhitungkan pengaruh spasi dan jumlah atau konfigurasi grid WWR yang bisa berbeda-beda meskipun mempunyai rasio volumetrik yang sama. Semakin rapat spasi sel atau semakin banyak grid tulangan WWR yang dipasang, semakin efektif (besar) daerah yang terkekang (luas daerah tak terkekang semakin kecil), sehingga tegangan lateral yang bekerja pada inti beton semakin meningkat (efektif).

Gambar 8 menunjukkan perbandingan antara model usulan yang sesuai dengan Pers. (1) dan (2) dengan hasil eksperimen. Model usulan ini mampu mengakomodasi peningkatan tegangan dan regangan bila rasio volumetrik dan jumlah grid sel meningkat. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa model kurva tegangan-regangan beton mutu tinggi terkekang usulan dapat memprediksi hasil-hasil eksperimen dengan cukup akurat, terutama pada bagian kurva yang turun.

Gambar 9 menunjukkan perbandingan antara model usulan untuk rasio volumetrik 4%; 4,5% dan 5% terhadap ketiga model yang lain, yakni Muguruma dkk.<sup>6</sup>, Razvi dan Saatcioglu<sup>7</sup> dan Tabsh<sup>1</sup>. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa prediksi model usulan lebih akurat bila dibandingkan dengan model lainnya, khususnya pada bagian kurva yang turun. Pada umumnya, model RS dan MNW tidak mampu memberikan prediksi yang akurat (*underestimate*), sedangkan model yang diusulkan Tabsh<sup>1</sup> cukup baik dalam memperkirakan tegangan puncak dan regangan pada saat tegangan puncak beton terkekang (sedikit *conservative*), namun begitu gagal dalam memprediksi regangan pasca puncak untuk konfigurasi grid yang berbeda dengan rasio volumetrik yang sama. Pada model lainnya, bagian kurva yang turun berbentuk linier, sedangkan pada model usulan berbentuk cembung-menggunung (mendekati hasil eksperimen).



Gambar 8 Perbandingan model usulan dengan hasil eksperimen



**Gambar 9 Perbandingan kurva tegangan-regangan beton terkekang WWR antara model usulan dengan model peneliti lain**

## 6. Kesimpulan

Sepuluh model kolom beton terkekang WWR mutu tinggi telah dianalisis. Berdasarkan hasil analisis tersebut, sebuah model kurva tegangan-regangan beton terkekang WWR yang baru diusulkan. Model tersebut mampu memperhitungkan pengaruh diameter, spasi serta jumlah atau konfigurasi grid sel yang berbeda. Dari hasil pembahasan diatas dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Tegangan dan regangan saat puncak beton terkekang WWR meningkat seiring dengan peningkatan rasio volumetrik dan konfigurasi grid sel WWR.
2. Semua model pada bagian kurva yang naik memperlihatkan prediksi yang cukup baik, akan tetapi pada bagian kurva yang turun tidak konsisten.

3. Model yang diusulkan oleh Muguruma dkk tidak memperhitungkan konfigurasi tulangan lateral, oleh karena itu hasil prediksinya menunjukkan peningkatan tegangan dan regangan beton terkekang sangat jauh dari hasil eksperimen (*underestimate*).
4. Model Tabsh tidak mampu memperhitungkan pengaruh jumlah atau konfigurasi grid sel serta spasi yang berbeda-beda untuk rasio volumeterik yang sama.
5. Bagian kurva naik beton terkekang WWR mendekati kurva tegangan-regangan usulan (model Popovics).
6. Bagian kurva turun beton terkekang WWR, dari puncak ke regangan ultimat,  $\epsilon_{cu}$ , atau regangan pada saat tegangan puncak turun sampai 50%,  $\epsilon_{cc50}$ , dapat diprediksi dengan baik menggunakan model usulan.

## 7. Daftar Pustaka

1. Tabsh, S. W., 2007, "Stress-Strain Model for High-Strength Concrete Confined by Welded Wire Fabric," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, V. 19, No. 4, Apr., hal. 286-294.
2. Lambert-Aikhionbare, N.; dan Tabsh, S. W., 2001, "Confinement of High-Strength Concrete with Welded Wire Reinforcement," *ACI Structural Journal*, V. 98, No. 5, Sept.-Okt., hal. 677-685.
3. Razvi, S. R.; dan Saatcioglu, M., 1989, "Confinement of Reinforced Concrete Columns with Welded Wire Fabric," *ACI Structural Journal*, V.86, No.5, September-Oktober, hal. 615-623.
4. Mau, S. T.; Holland, J. M.; dan Hong, L., 1998, "Small Column Compression Test on Concrete Confined by WWF," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, V.124, No.3, Maret, hal. 252-261.
5. Saatcioglu, M.; dan Grira M., 1999, "Confinement of Reinforced Concrete Columns with Welded Reinforcement Grids," *ACI Structural Journal*, V.96, No. 1, Januari-Februari, hal. 29-39.
6. Muguruma, H.; Nishiyama, M.; dan Watanabe, F., 1993, "Stress-Strain Curve Model for Concrete with A Wide-Range of Compressive Strength", *Proceeding High Strength Concrete*, Lillehammer, Norway, hal. 314-321.
7. Razvi, S. R.; dan Saatcioglu, M., 1999, "Confinement Model for High-Strength Concrete," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, V.125, No.3, Maret, hal. 281-289.
8. Hoshikuma, J.; Kawashima, K.; Nagaya, K.; dan Taylor, A. W., 1997, "Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers," *Journal Structural Engineering*, V. 123, No. 5, Mei, hal. 624-633.
9. Kappos, A. J.; dan Konstantinidis, D., 1999, "Statistical Analysis of Confined High Strength Concrete," *Materials and Structures*, V.32, hal. 734-748.
10. Saatcioglu, M.; dan Razvi, S. R., 1992, "Strength and Ductility of Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, V. 118, No. 6, June, hal. 1590-1607.
11. Popovics, S., 1973, "A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete", *Cement Concrete Research*, 3(5), hal. 583-599.
12. Sheikh, S. A.; dan Uzumeri, S. M., 1982, "Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.108 (ST12), 2703-2722.
13. Thornfeldt, E.; Tomaszewics, A.; dan Jensen, J. J., 1987, "Mechanical Properties of High-Strength Concrete and Application in Design," *Proceedings, Symposium Utilization of High Strength Concrete*, Stavanger, Norway, hal. 149-159.
14. Collins, M. P.; Mitchell, D.; dan MacGregor, G., 1993, "Structural Design Considerations for High-Strength Concrete," *Concrete International*, May, hal. 27-34.