

## PENGARUH KEKANGAN DENGAN WIRE ROPE

Abdul Kadir<sup>1</sup>, Iman Satyarno<sup>2</sup>, Bambang Suhendro<sup>3</sup>, Andreas Triwiyono<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Program Doktor UGM, Jurusan Teknik Sipil UHO

Kampus Hijau Bumi Tridharma Anduonohu, Kendari

Kadir12340@yahoo.com

<sup>2,3,4</sup>Jurusan Teknik Sipil UGM

### Abstrak

*Pengaruh dan efektifitas pengekangan terhadap kemampuan berdeformasi dan peningkatan kuat tekan elemen beton terus menjadi isu dan bahan kajian yang menarik terutama pada zona-zona yang sensitif dan rawan terhadap gempa. Tulisan ini mengevaluasi perilaku kurva tegangan-regangan melalui serangkain uji silinder yang dikekang wire rope dengan derajat pengekangan yang bervariasi. Delapan buah Silinder beton berukuran standar 150mm x 300mm dengan spasi spiral; 2, 4, 6 dan 8 cm diuji dengan pengujian tekan uniaksial. Hasil-hasil uji menunjukkan bahwa wire rope dapat meningkatkan kuat tekan silinder dan berdeformasi lebih besar sebelum runtuh.*

**Kata kunci:** deformasi; kuat tekan; kekangan; silinder beton; tegangan-regangan; wire rope

### Pendahuluan

Peran kekangan semakin disadari terutama setelah mengamati banyaknya kegagalan dan kerusakan elemen maupun struktur akibat gempa. Kekangan juga diketahui memainkan peran signifikan terhadap peningkatan kinerja elemen. Kekangan dapat meningkatkan kuat tekan, daktilitas dan disipasi energi. Sampai kini perilaku dan efektifitas kekangan terus menjadi objek penelitian banyak kalangan

Kekangan dari segi bentuknya dapat berupa sengkang persegi, cincin maupun spiral yang dapat bersifat kekangan pasif, aktif atau kombinasinya. Kekangan pasif adalah kekangan yang melawan atau menahan ekspansi/dilatasi lateral maupun radial akibat dari poisson rasio setelah beban bekerja, sedangkan kekangan aktif adalah kekangan sudah bekerja sebelum terbebani. Kekangan aktif dijumpai pada kekangan prategangan.

Kajian perihal efektifitas pengekangan diinisiasi oleh Richart dkk. (1929) yang meneliti pengaruh kekangan spiral dan tekanan hidrostatik terhadap peningkatan kuat tekan pada kolom bulat. Selama kurang lebih delapan puluh tahun penelitian tentang pengekangan pada komponen struktur beton bertulang mengalami perkembangan signifikan. Kini riset-riset tentang efektifitas pengekangan tidak hanya tertuju pada kekangan beton normal dan tulangan konvensional saja akan tetapi inovasi dan variasi-variasi pengekangan juga menjadi fokus para peneliti seperti kombinasi beton mutu tinggi dengan tulangan mutu tinggi; beton normal dengan dengan tulangan mutu tinggi; dan kombinasi beton normal dengan baja mutu sangat tinggi.

Pemakaian kekangan baja mutu tinggi dimaksudkan untuk menghindari kerapatan tulangan terutama pada daerah sendi plastis atau join balok-kolom, akan tetapi hasil-hasil riset belum memberikan satu kesimpulan mengenai efektifitasnya. Azizinamini dkk. (1994), Suzuki dkk. (2004), serta Hong dan Han (2006) melaporkan bahwa efektifitas kekangan baja mutu tidak signifikan. Riset yang dilakukan oleh Cusson dan Paultre (1994), Kato dkk.(1997), Saatcioglu dan Baingo (1999), Sun dkk. (1999), Paultre dkk. (2000), Li dkk. (2001), Paultre dkk. (2001), Saatcioglu dan Razvi (2002) serta Li dan Park (2004) menunjukkan bahwa baja mutu tinggi dimungkinkan untuk digunakan sebagai tulangan pengekangan. Sedangkan hasil-hasil riset Nakatsuka dkk. (1995), Xiao dan Yun (2002) Tan dan Nguyen (2005) menunjukkan bahwa kekangan baja mutu tinggi memberikan efek pengekangan yang signifikan.

*Wire rope* dikenal sebagai bahan baja yang fleksibel dan mempunyai kuat tarik tinggi bahkan sangat tinggi. Kajian-kajian mengenai efektifitas *wire rope* sebagai kekangan masih minim dan belum banyak terungkap. Riset-riset perihal kekangan dengan menggunakan *wire rope* baru sebatas pengekang atau perkuatan eksternal yang bersifat aktif Yelcin (1997), Saatcioglu dan Yelcin (2003), Yarandi (2004), Yang dkk. (2009) dan Saatcioglu (2010). Hasil-hasil uji menunjukkan bahwa kolom-kolom yang diperkuat dengan *wire rope* dapat meningkatkan kekuatan, kekakuan dan daktilitas

### Pentingnya penelitian

Untuk menjamin daktilitas dan disipasi energi melalui proses inelastisitas elemen atau struktur maka elemen harus diberi derajat pengekangan tertentu. Hal ini dimaksudkan agar tidak terjadi keruntuhan getas dan kinerja elemen sampai pada level yang dikehendaki. Penelitian dengan sengkang *wire rope*, selain karena sifatnya memiliki kuat tarik yang tinggi, mudah dalam penerapannya sehingga diharapkan sebagai peluang sebagai sengkang maupun perkuatan pasif elemen.

### Bahan dan metode penelitian

#### Bahan dan karakteristik benda uji

Bahan yang digunakan terdiri dari bahan dasar pembuat beton konvensional yakni kerikil, pasir, air dan semen serta wire rope sebagai pengekang. Benda uji dirancang dengan mutu 20 MPa dengan komposisi sebagaimana disajikan dalam Tabel 1.

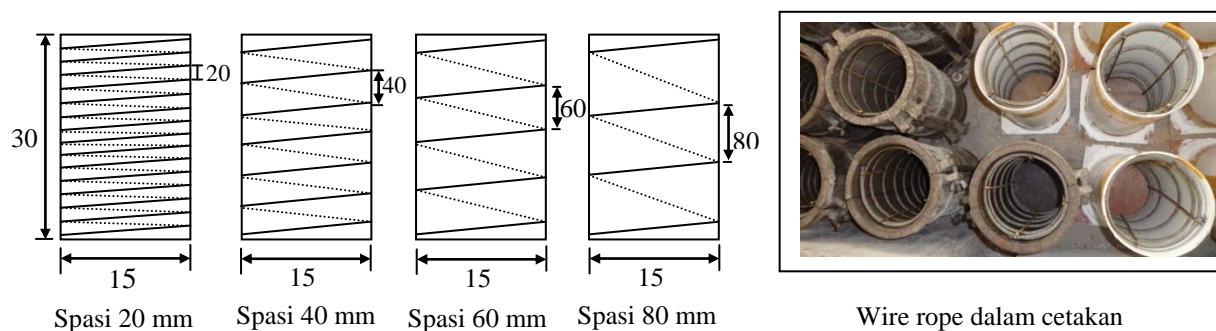
**Tabel 1:** Rancangan benda uji

Benda uji	Mutu Rencana (MPa)	Campuran ( /m <sup>3</sup> )				Slump (mm)	Fas
		Berat (kg)					
		Semen PPC	Pasir 0 – 4,8 (mm)	Kerikil 0 – 20 (mm)	Air		
PC/CSR	20	394,737	500,479	1167,784	225	100-180	0,57

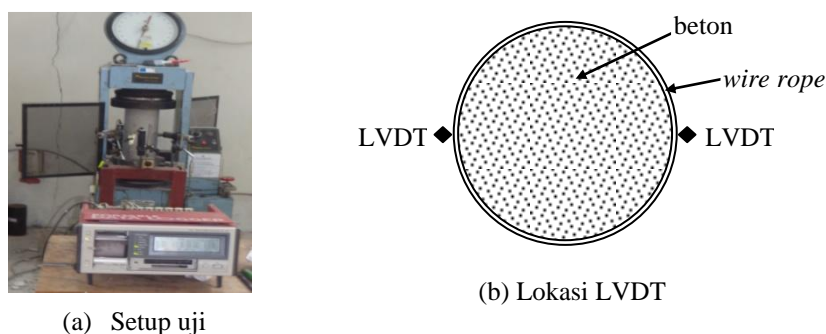
Wire rope yang digunakan adalah pilinan dari 6 buah kawat baja dengan satu kawat baja sebagai inti. Diameter wire rope adalah 5.6 mm dengan tegangan tarik ultimit sebesar 1175 MPa dan modulus elastisnya 200000MPa.

#### Benda uji dan pengujian

Benda uji berupa silinder dengan ukuran standar 150 x 300 mm<sup>2</sup> berjumlah 2 buah silinder kontrol dan 8 buah silinder terkekang (*confined concrete*). Rincian parameter benda uji disajikan dalam Tabel 2. Untuk mempertahankan spasi wire rope digunakan 4 buah batang bambu berdiameter kecil sebagai penyanggah (Gambar 1) dengan ujung atas terputus 20 mm dari muka atas dan bawah silinder. Jumlah penyanggah yang minimal dan ujung bambu yang berjarak masing-masing 2 cm dari permukaan atas dan bawah dimaksudkan agar kontribusinya terhadap peningkatan kuat tekan silinder dapat diminimalisir.



**Gambar 1.** Variasi spasi spiral wire rope dan posisi wire rope dalam cetakan



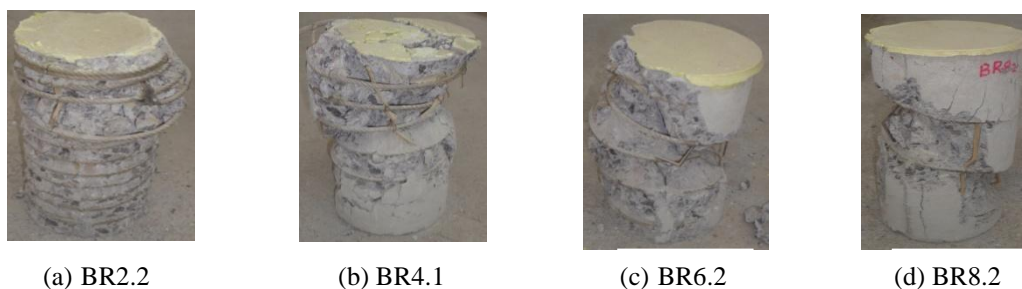
**Gambar 2.** Setup uji dan lokasi LVDT

Sebelum diuji permukaan silinder diratakan dengan menggunakan belerang agar beban terdistribusi merata pada permukaan silinder. 2 buah *linier variable differential transducer* (LVDT) berkapasitas 50 mm dipasang bersebelahan (180<sup>0</sup>) yang dihubungkan dengan *portable data logger* sebagai perekam perpindahan benda uji saat pengujian berlangsung. Benda uji diuji menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 2 ton dengan set up pengujian ditunjukkan dengan Gambar 2.

## Hasil uji dan diskusi

### Mode Keruntuhan

Tipikal keruntuhan benda uji dengan spasi wire rope 20, 40, 60, dan 80 mm ditunjukkan dengan Gambar 3. Dua benda uji dengan spasi 20 dan 40 mm runtuh setelah terjadinya spaling hampir seluruh permukaan vertikal silinder dan wire rope putus. Benda uji dengan spasi wire rope 60 dan 80 mm runtuh dengan spaling membentuk garis diagonal. Retak pada semua benda uji terjadi sebelum beban puncak dan spaling terjadi setelah beban puncak. Semua benda uji mencapai kuat ultimit sebelum terputusnya wire rope.



**Gambar 3.** Mode keruntuhan benda uji

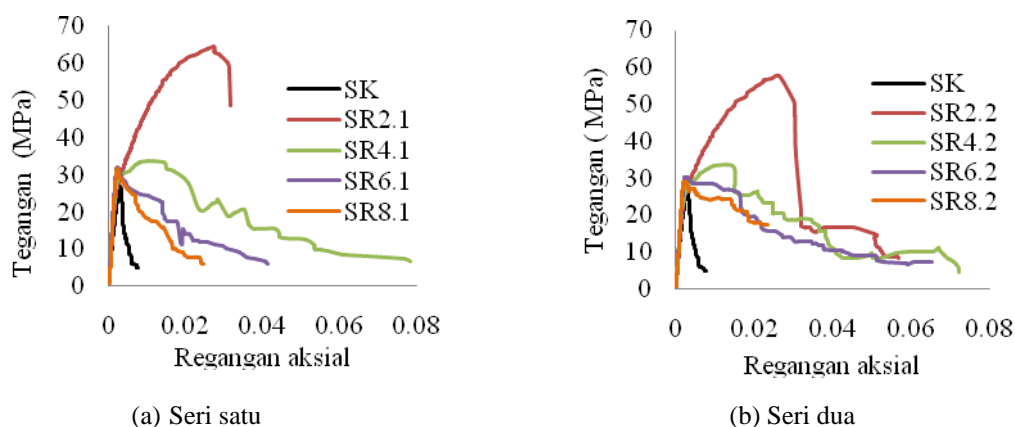
### Kurva tegangan-regangan

Kurva tegangan-regangan hasil uji semua benda uji disajikan pada Gambar 4. Regangan aksial diperoleh dari rata-rata pembacaan dua buah LVDT vertikal dibagi tinggi benda uji. Sebagaimana Gambar 4, kurva tegangan-regangan meningkat secara nonlinier sebelum puncak dan keruntuhan terjadi setelah mengalami peregangannya yang cukup besar. Kurva tegangan-regangan pasca puncak nampak bergelombang pada benda uji dengan spasi wire 40, 60 dan 80 mm. Kuat tekan puncak benda uji spasi 20 mm meningkat signifikan dibanding benda uji dengan spasi wire rope 40, 60 dan 80 mm akan tetapi laju degradasi kekuatannya setelah puncak menurun lebih tajam.

Hasil-hasil tegangan puncak  $f'_{cc}$ , regangan puncak  $\epsilon'_{cc}$ , regangan ultimit  $\epsilon'_{cu}$ , dan rasio tegangan-regangan silinder terkekang terhadap silinder kontrol/tidak terkekang dirangkum dan disajikan pada Tabel 2. Rata-rata tegangan puncak, regangan puncak dan tegangan ultimit masing-masing 25, 275 MPa, 0,0021 dan 0,0031. Regangan ultimit adalah regangan pada saat tegangan 80% dari tegangan puncak. Tegangan puncak silinder terkekang berkisar antara 29, 2892-64,4249 MPa atau sekitar 1,1386-2,5045 kali tegangan puncak silinder kontrol. Regangan puncak dan ultimit silinder terkekang masing-masing berkisar 1-13 dan 1,1613-10,1935 kali regangan silinder kontrol.

**Tabel 2:** Benda uji dan hasil-hasil uji

Benda uji	Spasi (mm)	Rasio Vol.	Tekanan keakang $f'_i$ (MPa)	Tegangan puncak $f'_{cc}$ dan $f'_{cc}$ (MPa)	Regangan Puncak $\epsilon'_{cc}$	Regangan utimit $\epsilon'_{cu}$	Rasio tegangan puncak $f'_{cc}/f'_{co}$	Rasio regangan puncak $\epsilon'_{cc}/\epsilon_{co}$	Rasio Regangan ultimit $\epsilon'_{cu}/\epsilon_{co}$
SK	-			25,275	0,0021	0,0031			
SR2.1	20	0,0682	13,0835	64,4249	0,0273	0,0316	2,5045	13,0000	10,1935
SR2.2	20	0,0682	13,0835	57,5783	0,0262	0,0304	2,2383	12,4762	9,8065
SR4.1	40	0,0341	6,0550	33,7942	0,0103	0,0207	1,3137	4,9048	6,6774
SR4.2	40	0,0341	6,0550	33,6701	0,0129	0,0227	1,3089	6,1429	7,3226
SR6.1	60	0,0227	3,7122	32,1054	0,0024	0,0068	1,2481	1,1429	2,1935
SR6.2	60	0,0227	3,7122	30,2946	0,0031	0,0161	1,1777	1,4762	5,1935
SR8.1	80	0,0171	2,5408	31,5843	0,0022	0,0059	1,2278	1,0476	1,9032
SR8.2	80	0,0171	2,5408	29,2892	0,0021	0,0036	1,1386	1,0000	1,1613



Gambar 4. Kurva tegangan-regangan hasil uji

### Pemodelan tegangan-regangan puncak dan kurva tegangan regangan

#### Pemodelan tegangan puncak

Karakteristik mendasar pada model beton terkekang yakni model konstitutif tegangan-regangan puncak dan kurva tegangan-regangan. Pemodelan tegangan puncak akibat pengaruh kekangan diinisiasi oleh Richart dkk (1929) yang memodelkan kekangan sebagai tekanan fluida atau tulangan spiral. Kini pemodelan kekangan, baik kekangan dalam maupun kekangan luar semakin berkembang dengan pendekatan pemodelan yang bervariasi. Basis pemodelan kekangan lateral dapat dikelompokkan dalam;

1. Basis empirik: kuat tekan maupun kurva tegangan regangan didasarkan pada hasil-hasil uji. Menurut Fattah dkk (2013) bahwa sekitar 50% pemodelan kekangan dalam didasarkan dengan basis empirik. Beberapa diantaranya dilakukan oleh; Fatitis dan Shah (1985), Hoshikusuma dkk. (1997)
2. Basis perilaku fisik: model didasarkan pada tekanan lateral yang menyebabkan perilaku terkekang pada inti beton. Model ini diawali oleh Richart dkk. (1929) dan dikembangkan oleh; Sheikh dan Uzumeri (1980), Mander dkk. (1988).
3. Model kombinasi empirik dan perilaku fisik; Saatcioglu dan Razvi (1992), Cusson dan Paultre (1995), Legeron dan Paultre (2003).
4. Model elastis; dilakukan oleh Madas dan Elnashai (1992).
5. Model plastis; dikenalkan oleh Karabinis dan Kioussis (1994, 1996).
6. Model elastoplastis dilakukan oleh Eid dkk. (2010).
7. Berbasis regangan; dilakukan oleh Braga dan Laterza (1998), Braga dkk. (2006).

#### Pemodelan kurva tegangan-regangan

Rumusan model kurva tegangan-regangan beton terkekang mencakup kurva naik dan kurva turun (*softening curve*). Karakteristik kurva naik dan turun dapat disimulasikan dalam satu set persamaan tunggal seperti usulan Saenz (1970), Sargin (1971) dan Popovics (1973) atau dirumuskan dua persamaan terpisah seperti usulan Kent dan Park (1971), Sheikh dan Uzumeri (1982) dan yang lainnya. Model kurva tegangan-regangan diturunkan dari hasil-hasil pengujian selinder ataupun kolom pada pembebanan uniaksial, biaksial maupun triaksial. Menurut Park dan Paulay (1975), Sakai dan Sheikh (1989) bentuk kurva tegangan-regangan dipengaruhi oleh:

1. Karakteristik beton, seperti: mutu beton
2. Karakteristik tulangan, seperti: konfigurasi, spasi, mutu, diameter, rasio volumetrik, bentuk dan tipe tulangan pengekangan.
3. Karakteristik tulangan longitudinal, seperti: jumlah, spasi, mutu, diameter, rasio volumetrik dan konfigurasi tulangan.
4. Karakteristik pembebanan, seperti: monotonik atau siklik, beban dinamik.

Meskipun model kurva tegangan-regangan beton terkekang telah mengalami perkembangan sangat pesat akan tetapi menurut Lekuge dkk. (2005) kurva tegangan-regangan didasari dari modifikasi tiga model berikut;

1. Sargin (1971), modifikasi dari model ini yakni; Eldash dan Ahmad (1995), Attard and Setunge (1996), Assa dkk. (2001).
2. Kent dan Park (1971), modifikasi dari model ini; Sheikh dan Uzumeri (1982), Saatcioglu dan Razvi (1992). Razvi and Saatcioglu (1999).
3. Popovics (1973), modifikasi dari model ini; Mander dkk. (1988), Cusson dan Paultre (1995), dan Hoshikusuma dkk. (1997).

Beberapa rumusan kurva tegangan-regangan serta tegangan regangan puncak beberapa peneliti disajikan dalam Tabel 3. Rumusan para peneliti tersebut akan dijadikan acuan dan bahan banding dengan rumusan yang akan diusulkan oleh penulis.

**Tabel 3:** Rumusan kurva tegangan-regangan beberapa peneliti

Peneliti	Kurva naik dan turun	Tegangan dan regangan puncak
Mander dkk. (1988)	$f_c = \frac{f_{cc} x^r}{r - 1 + x^r}$	$f'_{cc} = f'_{co} \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f'_i}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_i}{f'_{co}} \right)$ $\varepsilon'_{cc} = \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right]$
Saatcioglu dan Razvi (1992)	$f_c = f'_{cc} \left[ 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)^2 \right]^{1/1+2K}$ $f_c = f'_{cc} - \frac{(f'_{cc} - 0.85 f'_{cc})}{\varepsilon_{95} - \varepsilon'_{cc}} (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc})$	$f'_{cc} = f'_{co} + 6.7 (f'_i)^{-0.17} f'_i$ $\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c \left( 1 + 5 \frac{k_1 f'_i \varepsilon}{f'_{co}} \right)$
Legeron dan Paultre (2003)	$f_c = f'_{cc} \left[ \frac{k \varepsilon_c / \varepsilon'_{cc}}{k - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon'_{cc})^k} \right]$ $f_c = f'_{cc} \exp[k_1 (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc})^{k_2}]$	$f'_{cc} = f'_{co} [1 + 2.4 (I'_e)^{0.7}]$ $\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_{co} [1 + 35 (I'_e)^{1.2}]$
Hoshikusuma dkk. (1997)	$f_c = E_c \varepsilon_c \left[ 1 - \frac{1}{\beta} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)^{\beta-1} \right]$ $f_c = f'_{cc} - E_{dss} (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc})$	$f'_{cc} = f'_{co} \left[ 1 + 3.83 \rho_s \frac{f'_s}{f'_{co}} \right]$ $\varepsilon'_{cc} = 0.00218 + 0.0332 \rho_s \frac{f'_s}{f'_{co}}$
El-Dash dan Ahmad (1995)	$f_c = f'_{cc} \left( \frac{AX + (B - 1)X^2}{1 + (A - 2)X + BX^2} \right)$	$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f'_i$ $\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c + \left( 1 + k_2 \frac{f'_i}{f'_{co}} \right)$
Suzuki dkk. (2004)	$f_c = f'_{cc} \left( 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)^\alpha \right)$ $f_c = f'_{cc} - E_{dss} (\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc})$	$f'_{cc} = f'_c \left[ 1 + 4.1 \left( \frac{f'_i}{f'_{co}} \right)^{0.7} \right]$ $\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c \left[ 1 + 0.015 \left( \frac{f'_i}{f'_{co}} \right)^{0.56} \right]$
Assa dkk. (2001)	$f_c = f'_{cc} \left( \frac{\gamma X + (\delta - 1)X^2}{1 + (\gamma - 2)X + \delta X^2} \right)$	$f'_{cc} = f'_{co} \left[ 1 + 3.36 \left( \frac{f'_i}{f'_{co}} \right) \right]$ $\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c \left[ 1 + 21.5 \left( \frac{f'_i}{f'_{co}} \right) \right]$

### Pengembangan model

#### Tegangan puncak

Tegangan puncak diadopsi dari model Mander dkk. (1988) dengan sedikit modifikasi. Model Mander dkk. (1988) merupakan pengembangan dari model Sheikh dan Uzumeri (1982). Model ini didasarkan pada kriteria keruntuhan multiaksial lima parameter yang dikemukakan oleh William Warnke (1975) dimana tarik dan tekan meridian dinyatakan sebagai berikut;

Pada  $\theta = 0^\circ$  (tarik meridian)

$$\frac{\tau_{oct}}{f'_{co}} = a_0 + a_1 \frac{\tau_{oct}}{f'_{co}} + a_2 \left( \frac{\tau_{oct}}{f'_{co}} \right)^2 \quad (1)$$

Pada  $\theta = 60^\circ$  (tekan meridian)

$$\frac{\tau_{oct}}{f'_{co}} = b_0 + b_1 \frac{\tau_{oct}}{f'_{co}} + b_2 \left( \frac{\tau_{oct}}{f'_{co}} \right)^2 \quad (2)$$

Karena yang menjadi fokus adalah tekan meridian, maka persamaan tekan meridian dapat ditransformasi sebagai berikut;

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{f'_{co}} = \frac{f'_{cc}}{3f'_{co}} + \frac{2f'_i}{3f'_{co}} \quad (3)$$

kemudian

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}f'_i}{3f'_{co}} (f'_{cc} - f'_i) = -\sqrt{2} \left( \sigma_{oct} - \frac{f'_i}{f'_{co}} \right) \quad (4)$$

Untuk kasus triaksial,  $\sigma_2 = \sigma_1 = f'_i$ ; sehingga

$$\tau_{oct} = b_0 + b_1 \tau_{oct} + b_2 (\tau_{oct})^2 \quad (5)$$

Substitusi persamaan (4) ke persamaan (5)

$$f'_{cc} = f'_{co} \left( \frac{3(b_1 + \sqrt{2})}{2b_2} + \sqrt{\left( \frac{3(b_1 + \sqrt{2})}{2b_2} \right)^2 - \frac{9b_0}{b_2} - \frac{9\sqrt{2} f'_i}{b_2 f'_{co}} - 2 \frac{f'_i}{f'_{co}}} \right) \quad (6)$$

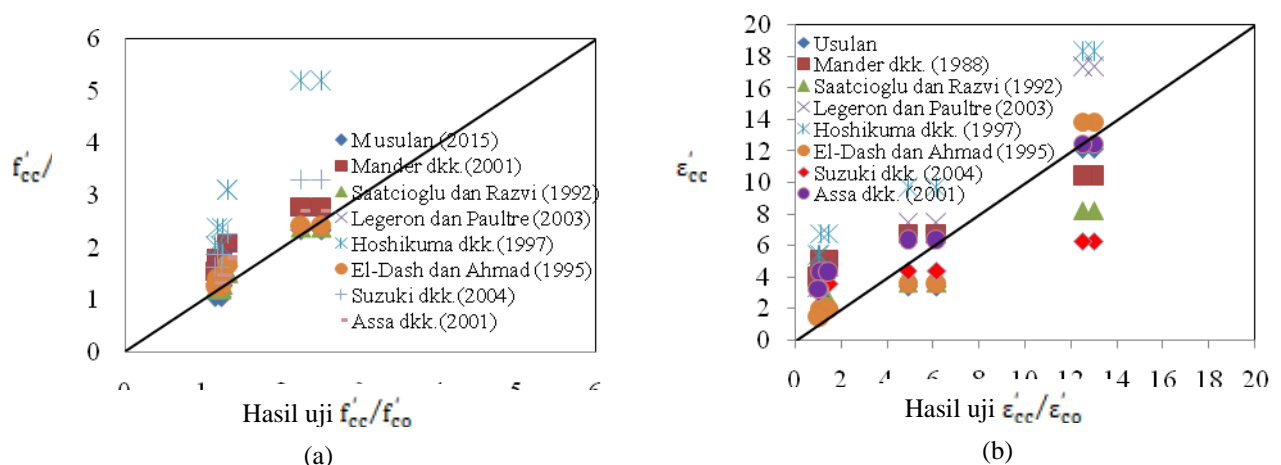
Dari analisis regresi untuk data-data hasil uji diperoleh  $b_0 = 0,039$ ,  $b_1 = -1,102$ , dan  $b_2 = -0,375$ . Dengan demikian tegangan puncak dinyatakan sebagai berikut;

$$f'_{cc} = f'_{co} \left( -1.249 + 1,579 \sqrt{1 + 13,6 \frac{f'_i}{f'_{co}} - 2 \frac{f'_i}{f'_{co}}} \right) \quad (7)$$

Dimana;

$$f'_i = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{s'}{2d_w} \right) \rho_s f_s \quad (8)$$

Gambar 5(a) menunjukkan performa perbandingan tegangan puncak ( $f'_{cc}/f'_{co}$ ) hasil uji terhadap perbandingan tegangan puncak prediksi dan versi beberapa peneliti. Tampak bahwa model-model Saatcioglu dan Razvi (1992) dan El-Dash dan Ahmad mendekati nilai hasil-hasil uji dan juga nilai prediksi. Nilai lebih besar dihasilkan oleh model Hoshikuma dkk. (1997) dan berturut-turut diikuti oleh model Suzuki dkk. (2004), Mander dkk. (1988), Assa dkk. (2001) dan Legeron dan Paultre (2003).



**Gambar 5.** (a) dan (b) Performa tegangan dan regangan puncak hasil uji versus beberapa model beberapa peneliti

### Regangan puncak

Rumusan regangan puncak untuk beton yang dikekang baja tulangan dinyatakan dalam bentuk yang bervariasi yang umumnya diperoleh dari hasil-hasil uji sebagaimana Tabel 3. Dalam riset ini regangan aksial puncak diformulasikan dalam bentuk yang sederhana yakni;

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 42,6 \left( \frac{f'_i}{f'_{co}} \right)^{1,998} \quad (9)$$

Model regangan puncak ini identik dengan model yang dikembangkan oleh Legeron dan Paultre (2003) dan Suzuki dkk. (2004). Gambar 5(b) menunjukkan perbandingan regangan puncak model kurva usulan terhadap model-model lainnya. Dua model yakni model Saatcioglu dan Razvi (1992) dan model Suzuki dkk. (2004) menunjukkan hasil-hasil regangan puncak yang berdekatan dengan regangan puncak prediksi dan nilai regangan puncak lebih rendah dari model-model lainnya.

### Regangan ultimit

Model-model regangan ultimit pada elemen tanpa tulangan memanjang relatif lebih sedikit dijumpai dibanding model-regangan ultimit dengan penyertaan tulangan memanjang. Formulasi regangan ultimit tanpa tulangan memanjang yang diturunkan dari hasil-hasil uji telah dilaporkan oleh Assa dkk. (2001) dan Li dkk. (2001). Model regangan ultimit yang dikembangkan berdasarkan pendekatan keseimbangan energi dikemukakan oleh Mander dkk. (1988) dan Priestley dkk. (1996). Model-model tersebut disajikan pada Tabel 4. Dari hasil analisis regresi regangan ultimit dinyatakan dengan model yang identik dengan model regangan puncak yakni;

$$\frac{\varepsilon'_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 17,1 \left( \frac{f'_i}{f'_{co}} \right)^{0,9} \quad (10)$$

**Tabel 4:** Regangan ultimit beberapa peneliti

Peneliti	Regangan ultimit ( $\varepsilon_u$ )
Assa dkk. (2001)	$\frac{\varepsilon_{90}}{\varepsilon'_{co}} = 2,74 + 32,84 \left( \frac{f'_i}{f'_{co}} \right)$
Li dkk.(2001)	$\frac{\varepsilon'_{cu}}{\varepsilon'_{co}} = 2,00 + (86,7 - 1,06 f'_{co}) \sqrt{\frac{f'_i}{f'_{co}}}$
Priestley dkk. (1996)	$\varepsilon_{cu} = 0,004 + 2,8 \varepsilon_{su} \frac{f'_i}{f'_{co}}$

### Kurva tegangan regangan

#### Kurva naik

Pada pembebanan monotonik, kurva naik adalah keadaan dimana efek kekangan berangsur termobilisasi sampai mencapai beban puncak. Selang regangan beton pada kondisi ini, relatif kecil dan dapat diasumsikan sebagai kekangan pasif. Kerena kondisi regangan yang terkerahkan relatif kecil maka hampir tidak ada perbedaan signifikan kekangan mutu tinggi atau rendah maupuan kekangan sipiral maupun persegi. Banyak model-model kurva naik telah dipublikasikan pada satu dekade terakhir. Salah satu model yang diterima banyak kalangan adalah model Mander dkk. (1988). Model ini diklaim sesuai baik untuk mutu tinggi maupun mutu rendah. Model ini merupakan pengembangan model Popovis (1973) yang dinyatakan dengan;

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \quad (11)$$

Dimana

$$x = \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{cc}}; r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}; E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon'_{cc}} \quad (12)$$

#### Kurva turun

Dibanding dengan kurva naik, kurva turun memiliki karakteristik yang kompleks dan umumnya kurva turun diformulasikan langsung dari hasil-hasil uji. Dari hasil analisis regresi hasil uji model Legeron dan Paultre (2003) diadopsi dengan sedikit modifikasi.

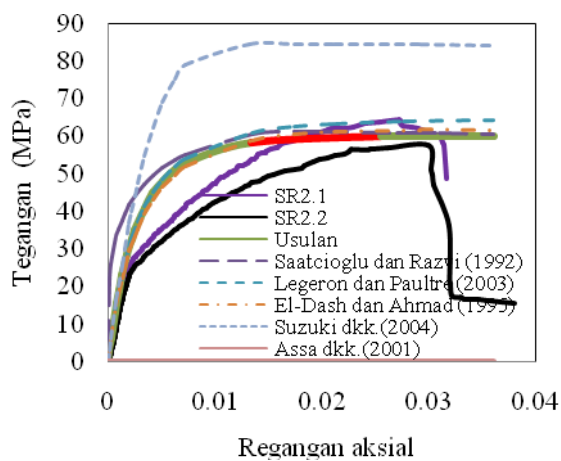
$$f_c = f'_{cc} \exp[k_1(\varepsilon_c - \varepsilon'_{cc})^{k_2}] \quad (13)$$

Dimana;

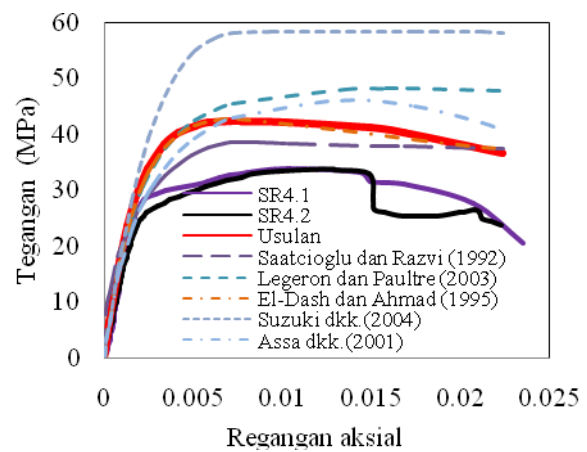
$$k_1 = \frac{\ln 0.5}{(\varepsilon'_{cc50} - \varepsilon'_{cc})^{k_2}}; \quad k_2 = 1 + 25 \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)^2 \quad \text{dan} \quad \varepsilon_{cc50} = 0.0035 \left( 1 + 40 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (14)$$

### Perbandingan kurva tegangan-regangan beberapa peneliti, prediksi, dan hasil uji

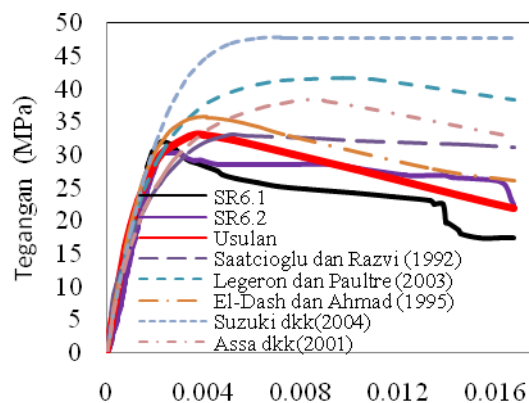
Akurasi kurva tegangan-regangan beberapa peneliti, kurva tegangan regangan prediksi dan hasil uji disajikan pada Gambar 6. Dari gambar tersebut puncak kurva tegangan-regangan usulan sedikit lebih rendah untuk tingkat kekangan yang rendah atau pada benda uji dengan spasi 80 mm. Punggung kurva setelah puncak (*strain softening*) memiliki tingkat kemiringan yang identik. Dari gambar tersebut juga menunjukkan bahwa puncak kurva tegangan-regangan Saatcioglu dan Razvi (1992) dan El-Dash dan Ahmad (1995) menunjukkan nilai yang berdekatan terhadap puncak kurva tegangan-regangan hasil uji. Sedangkan kurva tegangan-regangan lainnya memiliki tingkat prediksi sedikit lebih besar.



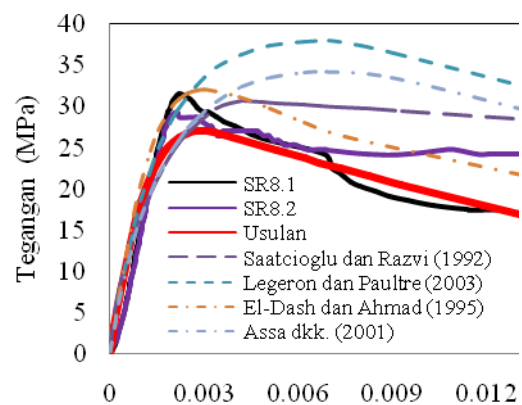
(b) Spasi wire rope: 20 mm



(a) Spasi wire rope: 40 mm



(c) Spasi wire rope: 60 mm



(d) Spasi wire rope: 80 mm

**Gambar 6.** Perbandingan kurva tegangan regangan hasil uji terhadap kurva tegangan regangan usulan dan beberapa model lainnya

### Kesimpulan

Dalam studi ini, kekangan dengan menggunakan wire rope dengan tingkat kekangan yang bervariasi diuji terhadap beban aksial monotonik. Dari hasil-hasil uji, model-model kurva tegangan-regangan yang menggunakan kekangan baja tulangan mutu biasa dikembangkan untuk memprediksi kurva tegangan-regangan menggunakan



kekangan *wire rope*. Berikut adalah beberapa kesimpulan yang dapat dipaparkan berdasarkan hasil-hasil uji dan analisis.

- 1). Kekangan dengan *wire rope* tidak memberikan peningkatan kekuatan yang signifikan pada tingkat pengekangan sedang dan rendah.
- 2). Walaupun menghasilkan daktilitas yang signifikan akan tetapi kontribusi kekakuan kurva tegangan-regangan hasil uji sebelum beban puncak lebih rendah dibanding model kurva tegangan-regangan kekangan tulangan biasa.
- 3). Model usulan kurva tegangan-regangan menggunakan kekangan *wire rope* menunjukkan tingkat korelasi yang baik terhadap kurva tegangan-regangan hasil uji.

### Daftar notasi

$d_w$	= diameter wire, (mm)
$E_c$	= modulus elastis beton, MPa
$E_{des}$	= kemiringan kurva tegangan-regangan pasca puncak, MPa
$E_{sec}$	= modulus sekan, MPa
$f_s$	= mutu baja tulangan lateral, MPa
$f'_{cc}$	= kuat tekan maksimum beton terkekang, MPa
$f'_{co}$	= kuat tekan maksimum beton tidak terkekang, MPa
$f_{le}$	= tekanan kekang lateral
$f'_l$	= tekanan kekang lateral efektif
$I_{e50}$	= indeks kekangan efektif pada $\epsilon_{cc50}$
$k_1, k_2$	= parameter pengontrol kurva tegangan-regangan pasca puncak
$s'$	= jarak antar muka <i>wire rope</i> (mm)
$\epsilon'_{cc}$	= regangan maksimum beton terkekang
$\epsilon'_{cc50}$	= regangan saat tegangan 50% dari tegangan puncak
$\epsilon'_{co}$	= regangan maksimum beton tidak terkekang
$\epsilon_{su}$	= regangan ultimit baja tulangan
$\rho_s$	= rasio volumetrik tulangan lateral terhadap inti beton
$\sigma_{oct}$	= tegangan oktahedral, (MPa)
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	= tegangan-tegangan utama masing-masing pada sumbu x, y dan z, (MPa)
$\tau_{oct}$	= tegangan geser oktahedral, (N)

### Daftar pustaka

- Ahmad, S.H., dan Shah, S.P., (1985), "Behavior of Hoop Confined Concrete under High Strain Rates" *ACI Journal*, September-October, 1985, pp.634-64.
- Assa, B., Nishiyama, M., dan Watanabe, F., (2001), "New Approach for Modelling Confined Concrete, I: Circular Concrete" *Journal of Structural Engineering*, V.127, No.7, July, pp.743-750
- Azizinamini, A., Corley, W.G., dan Johal, L.S.P., (1994), "Effects of Transverse Reinforcement on Seismic Performance of Columns" *ACI Structural Journal*, V.89, No.4, July-August 1994, pp.442-450.
- Braga, F., dan Laterza, M., (1998), "A New Approach to the Confinement of R/C Columns" *11th European Conference on Earthquake Engineering* © 1998 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 982 3.
- Braga, F., Gigliotti, R., dan Laterza, M., (2006), "Analytical Stress-Strain Relationship for Concrete Confined by Steel Stirrups and/or FRP Jackets" *Journal of Structural Engineering* © ASCE September 2006, Vol. 132, No. 9, pp.1402-1416.
- Cusson, D., dan Paultre, P., (1994), "High Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.120, No.3, March, pp.783-804
- Eid, R., Dancygler, A.N., dan Paultre, P., (2010), "Stress-Strain Curve for Concrete in Circular Columns Based on Elastoplastic Analysis" *Material Structures* (2010) Vol. 43 pp 63-79
- Fattah, A., Rasheed, H., dan Esmaeily, A., (2013), "LRFD Software for Design and Actual Ultimate Capacity of Confined Rectangular Columns" *Final Report*, Kansas Department of Transportation, pp 4-58
- El-Dash, K.M., dan Ahmad, S.H., (1995), "A Model for Stress-Strain Relationship of Spirally Confined Normal and High Strength Concrete Columns, *Magazine of Concrete Research*, V.47, No.171, June 1995, pp.177-184.
- Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., dan Taylor, A.W., (1997), "Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.123, No.5, May 1997, pp.624-633

- Karabinis, A.I., dan Kioussis, P.D., (1994), "Effects of Confinement on Concrete Columns: Plasticity Approach" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.120, No.9, September, pp.2747-2767
- Karabinis, A.I., dan Kioussis, P.D., (1996), "Strength and Ductility of Rectangular Concrete Columns: A Plasticity Approach" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.122, No.3, March, pp.267-274
- Legeron, F., dan Paultre, P., (2003), "Uniaxial Confinement Model for Normal and High-Strength Concrete Columns" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.129, No.2, February, pp.241-252
- Li, B., dan Park, R., (2004), "Confining Reinforcement for High Strength Concrete Columns" *ACI Structural Journal*, V.101, No.3, May-June 2004, pp.314-324.
- Li, B., Park, R., dan Tanaka, H., (2001), "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, pp.395-406.
- Lokuge, W.P., Sanjayan, J.G., dan Setunge, S., (2005), "Stress-Strain Model for Laterally Confined Concrete" *Journal of Material in Civil Engineering*, V.17, No.6, December, pp.607-616
- Madas, P., dan Elnashai, A.S., (1992), "A New Passive Confinement Model for the Analysis of Concrete Structures Subjected to Cyclic and Transient Dynamic Loading" *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol.-21, pp. 409-431
- Mander, J.B., Priestley, M.J., dan Park, R., (1983), "Seismic Design of Bridges Piers" ,PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, pp.164-180
- Mander, J.B., Priestley, M.J., dan Park, R., (1988), "Theoretical Stress – Strain Model for Confined Concrete" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.114, No.8, August 1988, pp.1804-1826.
- Nakatsuka, T., Nakagawa, H., dan Suzuki, K., (1995), "Strength – Deformation Characteristic of Confined Concrete and Spiral Reinforcement ; of High Strength" *Concrete 95 Toward Better Concrete Studies*, 1995, pp.427-469.
- Park, R., dan Paulay, T., (1975), "Reinforced Concrete Structures" John Wiley & Sons. Inc USA. pp. 11-47.
- Paultre, P., Legeron, L., dan Mongeau, D., (2001), "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
- Paultre, P., Legeron, F., dan Savard, C., (2000), "Use of High-Yield Strength Materials in Seismic Zone: A Strategic Approach" *Proceeding WCEE-12*, 0816.
- Priestley, M.J.N., Seible, F., dan Calvi, G.M., (1996), "Seismic Design and Retrofit of Bridges" John Wiley & Sons. Inc. USA.
- Razvi, S., dan Saatcioglu, M., (1999), "Confinement Model for High-Strength Concrete" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.125, No.3, March, pp.281-289.
- Richart, F.E., Brandtzaeg, A., dan Brown, R.L., (1929), "The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression" *University of Illionis Engineering Experimental Station*, Bulletin No. 190, 74 pp
- Saatcioglu, M., 2010, "Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Columns", University of Ottawa
- Saatcioglu, M., dan Yalcin, C., 2003, "External Prestressing of Concrete Columns for Improved Seismic Resintance", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, August, 1057-1070pp
- Saatcioglu, M., dan Razvi, S.R., (2002), "Displacement Based Design of Reinforced Concrete Columns for Confinement" *ACI Structural Journal*, V.99, No.1, January-February, pp.3-11
- Saatcioglu, M., dan Baingo, D., (1999), "Circular High-Strength Concrete Columns Under Simulated Seismic Loading" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.125, No.3, March, pp.272-280
- Saatcioglu, M., dan Razvi, S.R., (1992), "Strength and Ductility of Confined Concrete" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.118, No.6, June, pp.1590-1607.
- Sakai, K., dan Sheikh, S.A., (1989), "What Do We Know about Confinement in Reinforced Concrete Columns? (A Critical Review of Previous Work and Code Provisions)" *ACI Structural Journal*, V.86, No 2., Mar-Apr.1989, pp.192-207.
- Sargin, M., Ghosh, S.K., dan Handa, V.K., (1971)" Effects of Lateral Reinforcements upon the Strength and Deformation Properties of Concrete" *Magazine of Concrete Research*, Vol. 23, 99-110pp.
- Suzuki, M., Akiyama, M., Hong, K., Cameron, I.D., dan Wang, W.L., (2004), "Stress-Strain in Model of High-Strength Concrete Confined by Rectangular Ties" *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, Agust, Paper No. 3330
- Tan, T.H., dan Nguyen, N.B., (2005), "Flexural Behavior of Confined High Strength Concrete Column" *ACI Structural Journal*, V.102, No.2, March-April, pp.198-205.
- Xiao, Y., dan Yun, H.W., (2002), "Experimental Studies on Full-Scale High-Strength Concrete Columns" *ACI Structural Journal*, V.99, No.2, March-April 2002, pp.199-207
- Yalcin, C., 1997, "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Reinforced Concrete Bidge Columns", Dissertation Philosophy Doctor, University of Ottawa, Canada.
- Yang, K.H., Ashour, A.F., dan Lee, E.T., 2009, "Axial behavior of Reinforced Concrete Short Columns Stenghtened with Wire Rope and T-Shaped Steel Plate Unit", *Magazine of Concrete Research*, No 2. Mach, 143-154pp
- Yarandi, M.S., Saatcioglu, M., dan FOO, S., 2004, "Rectangular Concrete Columns Retrofitted bay External Prestressing for Seismic Shear Resistance", *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada.