

THE EFFECT OF ADDITION OF FIBER REINFORCED ON CONCRETE WITH PLAIN AND DEFORM REBAR

by Kurdian Suprpto^a

ABSTRACT

In reinforced concrete structures, the interaction between concrete and steel bar are depend on its bonding strength. This study presents the behavior of bond-slip on fiber reinforced concrete with 10 mm plain rebar and deforms rebar. The concrete specimen is using 1% fiber reinforced. Furthermore the specimen is also compared with concrete without fiber reinforcement. The behavior that observed in this study is the effect concrete compressive strength, type of rebar, amount of rebar, and concrete cover due to bonding strength. The analysis results also compared between pull out method and semi beam method with and without fiber reinforcement. The analysis results shows the compressive strength, tensile strength, bonding strength, and bond stress of fiber reinforced concrete increase around 13.255%, 48.70%, 10.43% and 10.53%, respectively. Moreover, the deform rebar has better bonding strength compared to the plain rebar, which increase around 175% - 185%. Furthermore, for the group reinforcement, which is the spacing between rebar is 2.5 cm, is also effected the bond stress. The more amount of rebar will reduce the bond stress around 46.82% - 64.71%. In addition, the more thickness of concrete cover will also increase the bond stress.

KEYWORDS: Group Reinforcement; Bond Strength; Pull Out Method; Semi-Beam Method; Fiber Reinforced.

PENDAHULUAN

Beton banyak dipakai sebagai salah satu jenis bahan bangunan yang populer, karena beton mempunyai kelebihan dibandingkan dengan bahan bangunan lainnya. Kelebihan tersebut antara lain dapat dibentuk sesuai keinginan, bahan bakunya relatif mudah didapat (pasir dan kerikil), mempunyai kuat tekan yang tinggi, tahan aus, rapat air, mudah dibentuk dan tidak memerlukan perawatan menerus setelah beton mengeras. Disamping kelebihan tersebut beton juga mempunyai kekurangan terutama karena sifatnya yang getas dan tidak mampu menahan tarik. Ketidakmampuan beton menerima tegangan tarik dapat diatasi dengan menambahkan baja tulangan, sehingga tersusun pembagian tugas, dimana batang tulangan menerima gaya tarik, sedangkan beton hanya diperhitungkan untuk menahan gaya tekan.

Sesuai dengan perkembangan teknologi, beberapa peneliti terus berusaha memperbaiki sifat-sifat beton, yang antara lain dengan menambahkan serat (*fiber*) ke dalam adukan beton. Penambahan serat baja pada adukan beton yang disebar merata dengan acak, akan membuat beton terhindar dari retak-retak yang terlalu dini.

Jenis serat yang dapat dipakai untuk memperbaiki sifat kurang baik dari beton menurut laporan ACI Committee 544¹ dan Sudarmoko² adalah baja (*steel*), plastik (*polypropylene*), kaca (*glass*), karbon (*carbon*) dan serat alamiah (*natural fibers*) seperti ijuk dan serat tumbuh-tumbuhan lainnya, juga bisa dipakai. Serat baja dan serat kaca lebih banyak dipakai untuk keperluan struktur disebabkan serat tersebut mempunyai faktor-faktor prinsip penguat beton, yaitu kekuatan leleh, daktilitas, dan lekatan yang cukup.

Dewasa ini jenis serat yang sering dipakai di luar negeri adalah serat baja (*steel fiber*) dengan bentuk

geometri beraneka ragam, yang bertujuan untuk meningkatkan *pull-out resistance*-nya. Berbagai studi telah dilakukan tentang penggunaan serat baja tersebut terutama sifat-sifat mekanika dan aplikasinya dalam praktek.

Di Indonesia konsep pemakaian serat baja pada adukan beton struktur bangunan teknik sipil belum banyak dikenal dan dipakai dalam praktek. Salah satu penyebab utamanya adalah harganya mahal maupun ketergantungan yang beresiko tinggi bila harus mendatangkan dari negara lain. Alternatif untuk mengatasi hal tersebut, Suhendro³ telah memanfaatkan bahan lokal yang mudah didapat di Indonesia dan harganya murah, sebagai pengganti serat baja asli dari luar negeri. Bahan pengganti tersebut adalah berupa kawat bendrat yang dipotong-potong.

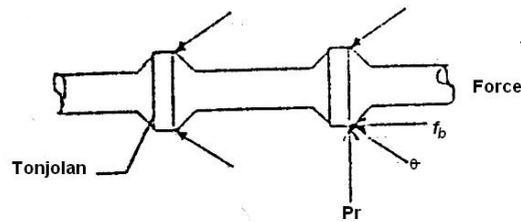
Suhendro⁴, menyimpulkan bahwa kawat bendrat sebagai pengganti serat tidak kalah bagus dari serat asli, sehingga membuka peluang untuk dikembangkan. Penambahan serat Sudarmoko² dengan menggunakan bahan lokal (kawat bendrat yang dipotong sepanjang ± 80 mm) dengan konsentrasi serat 1% volume adukan memberikan konsentrasi yang paling mendekati optimal dari sudut tinjauan terhadap kuat tekan dan kuat tarik dimana pada konsentrasi tersebut kuat tekan dan kuat tarik berturut-turut mencapai 42,85 Mpa dibandingkan 34,22 Mpa (125,2%) dan 4,93 Mpa dibandingkan 3,34 Mpa (147,6%) jika tanpa serat.

Penelitian tentang penggunaan serat bendrat pada sifat-sifat struktural sudah banyak dilakukan, namun pengkajian perilaku lekat beton serat belum pernah dilakukan. Dari kondisi tersebut timbul ide untuk meneliti kerjasama antara beton serat lokal dengan baja tulangan polos dan tulangan ulir/*deform* dengan serat bendrat sebagai penguat.

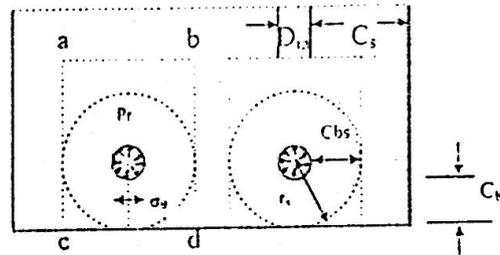
Kuat lekat antara lain dipengaruhi oleh kuat tekan, sedangkan terjadinya retak sebelum mencapai kondisi pembebanan optimum. Retak yang terlalu dini tersebut disebabkan oleh rendahnya kuat tarik. Kuat tarik dapat ditingkatkan dengan penambahan serat ke dalam adukan beton.

^aLecturer in Department of Civil Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), ITS Campus, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia.

Note. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 06, 2009; approved on August 23, 2009. Discussion open until January 2011. This paper is part of the ITS Journal of Civil Engineering, Vol. 29, No.2, November 2009. © ITS Journal of Civil Engineering ISSN 2086-1206/2009



Gambar 1. Tegangan radial pada batang *deform*⁷



Gambar 2. Mekanisme lekatan dalam potongan balok⁷

Permasalahan yang akan dibahas antara lain pada penelitian ini adalah pengaruh penambahan serat bendrat pada beton terhadap lekatan baja tulangan polos dan tulangan ulir yang berhubungan dengan beban maksimal. Efisiensi kelompok baja tulangan dalam mendukung beban dan pengaruh tebal selimut beton terhadap kuat lekat.

Untuk menghindari hasil penelitian yang kurang akurat yang disebabkan oleh luasnya ruang lingkup pembahasan data maupun teori pendukungnya, maka perlu diadakan pembatasan masalah.

Masalah yang akan dibahas dibatasi antara lain:

- Material serat bendrat yang digunakan yaitu panjang 8 mm, dengan konsentrasi 1% volume adukan.
- Benda uji yang digunakan adalah blok beton pull out dan semi beam.
- Adukan beton yang dihasilkan dianggap homogen dan penyebaran serat dianggap merata, sehingga kekuatan beton sama dan merata.
- Komposisi campuran beton menggunakan f'_c : 25 Mpa, (beton mutu normal).
- Baja tulangan yang digunakan dalam 2 variasi yaitu bentuk polos dan ulir.
- Membandingkan hasil test pull out dan dan semi beam beton dengan campuran serat dengan hasil tes tanpa campuran serat. Perilaku yang dibandingkan yaitu pengaruh bentuk tulangan, jumlah tulangan, dan selimut beton bawah terhadap kuat lekat.

Dari hasil penelitian tentang perilaku lekatan tulangan baja terhadap beton serat lokal diharapkan didapat informasi atau masukan tentang kuat lekat untuk kemungkinan aplikasi beton serat bendrat.

Penelitian ini bertujuan:

- Untuk mengetahui pengaruh penambahan serat bendrat pada beton terhadap lekatan baja tulangan polos dan tulangan ulir yang berhubungan dengan beban maksimal.
- Mengetahui efisiensi kelompok baja tulangan dalam mendukung beban.
- Mengetahui pengaruh tebal selimut beton terhadap kuat lekat.

TINJAUAN PUSTAKA

Pada struktur beton bertulang lekatan (*bond*) antara baja tulangan dan beton di sekelilingnya dianggap berlangsung sempurna, sehingga di bawah beban kerja dianggap tidak terjadi selip antara baja tulangan relatif terhadap beton sekelilingnya. Selip relatif tersebut tidak akan dapat mengakibatkan keruntuhan total dari balok. Pengangkeran mekanis pada ujung tulangan dapat digunakan untuk mendapatkan integritas sistem, sehingga memungkinkan baja tulangan diangkerkan dengan jala menanamnya melewati titik dimana beban menimbulkan tarik maksimum, dengan jarak yang cukup untuk mengembangkan kapasitas tarik penuh batang tulangan.

Baja dan serat gelas/kaca mempunyai faktor-faktor prinsip penguat beton, yaitu kuat leleh, daktilitas dan lekatan yang cukup Nawy⁵. Kekuatan lekatan merupakan hasil dari beberapa parameter, yang antara lain adhesi antara beton dengan permukaan tulangan baja. Tegangan tarik yang relatif rendah di dalam tulangan polos akan menimbulkan selip yang cukup untuk menghilangkan adhesi pada lokasi yang berdekatan langsung dengan retak di dalam beton, sehingga pergeseran relatif antara tulangan dan beton sekelilingnya hanya ditahan oleh gesekan sepanjang daerah selip. Batang tulangan *deformed* (ulir) direncanakan untuk merubah pola perilaku dari yang mengandalkan luas permukaan atas gesekan dan adhesi (sekali pun masih ada) dan lebih mengandalkan ketahanan dari tonjolannya terhadap beton. Apa yang dinamakan keruntuhan lekatan (*bond failure*) dengan tulangan *deform* dalam beton normal hampir selalu merupakan keruntuhan akibat terbelahnya beton. Peristiwa pembelahan adalah suatu tanda pertama dari hilangnya tegangan lekat dan dapat dianggap sebagai penyebab umum dari keruntuhan di dalam lekatan.

Beberapa masalah yang terkait tentang kuat lekat, Nawy⁵, secara ringkas menyatakan bahwa kuat lekat merupakan hasil dari berbagai parameter sebagai berikut :

- Adhesi antara elemen beton dan bahan penguatnya (tulangan baja).

- Efek memegang (*gripping*) sebagai akibat susut pengeringan beton di sekeliling tulangan, dan saling geser antara tulangan dengan beton di sekitarnya.
- Tahanan gesekan (*friksi*) terhadap gelincir dan saling mengunci pada saat elemen penguat atau tulangan mengalami tegangan tarik.
- Efek kualitas beton, kuat tarik dan tekan.
- Efek mekanis penjangkaran ujung tulangan, yaitu dengan panjang penyaluran (*development length*), panjang lewatan (*splicing*), bengkokan tulangan (*hooks*), dan persilangan tulangan.
- Diameter, bentuk dan jarak tulangan karena kesemuanya mempengaruhi pertumbuhan retak.

Kontribusi masing-masing faktor ini sangat sulit untuk dipisahkan satu dengan yang lain. Efek saling geser, susut, dan kualitas beton dapat dianggap sebagai faktor yang paling utama. Oleh karena hubungan yang rumit antar lekat, geser, dan momen, praktek perencanaan yang sekarang menggunakan sejumlah besar hasil penyelidikan. Umumnya untuk beton normal kuat lekat berbanding langsung dengan $\sqrt{f'_c}$ (yaitu berbanding langsung dengan kuat tarik beton) dan berbanding terbalik dengan diameter tulangan Wang dan Salmon⁶.

Untuk memperbaiki dan memperbesar daya lekat, dewasa ini telah dipakai tulangan yang memiliki tonjolan pada permukaannya (tulangan *deformed*). Pada batang ini tonjolan pada permukaan tulangan menekan beton di sekelilingnya dan memberikan kuat lekat yang sangat besar. Distribusi tegangan lekat sepanjang tulangan yang bertonjolan pada permukaannya lebih kompleks dan rumit. Kuat lekat antara batang tulangan dan beton akan terjadi antara 2 tonjolan (*rib*). Gaya tarik yang ditahan oleh tulangan akan dipindahkan ke beton melalui tonjolan. Interaksi mekanis antara perkuatan dan beton sekitarnya bisa dibuat ideal seperti pada Gambar 1.

Dengan menganggap bahwa tegangan ledak radial P_r terjadi di sekitar batang tulangan, sedangkan batang tulangan itu dalam keadaan tarik, maka sebanding dengan lekat fb dan juga dengan menganggap bahwa pecahnya beton itu disebabkan oleh tegangan ledak radial, maka hubungan antara tegangan lekat dan selimut beton (*clear cover*) dapat dilihat pada Gambar 2.

Luas "abcd" dalam gambar masing-masing ditentukan dengan menganggap bahwa tekanan internal P_r bekerja dalam lubang sirkuler dengan diameter D_{ia} dalam blok beton. Kemp⁷, menyatakan bahwa perilaku lekatan di sekitar batang tulangan bisa ditunjukkan sebagai suatu pipa beton yang berdinding tebal dengan ketebalan dinding C_{bs} dari jari-jari r_x , dan terkena tekanan internal p_r .

Untuk lebih memperbesar kemampuan lekatan serta untuk menghindari retak/pembelahan yang terlalu dini akibat gaya tarik yang dipikul oleh tulangan yang dipindahkan ke beton melalui tonjolan, maka di dalam adukan beton ditambahkan serat, yang dapat berupa serat bendrat.

Serat sebagai salah satu bahan tambah beton dimaksudkan untuk menambah kuat tarik, mengingat kuat tarik beton sangat rendah yang berakibat beton mudah retak, yang pada akhirnya mempercepat hilangnya

tegangan lekat. Dengan penambahan serat, ternyata beton menjadi tahan retak dan tahan benturan.

Studi tentang mekanika dan aplikasi dalam praktek beton serat baja pabrikan telah dilaporkan oleh Sharma⁸. Hasil penelitian Suhendro³ telah menunjukkan bahwa kawat bendrat dengan panjang 60 mm dan diameter 1 mm, dapat dipakai sebagai bahan serat dengan tingkat perbaikan tidak kalah bagusnya dengan serat baja pabrikan. Di samping itu penambahan serat bendrat juga dapat meningkatkan kuat ultimit dan kekakuan $\pm 50\%$ terhadap beton normal⁴.

Sudarmoko², membuktikan bahwa kawat bendrat dengan menambahkan 1% volume adukan dapat meningkatkan kuat tekan, kuat tarik dan modulus elastik. Nilai optimal yang di dapatkan dari panjang serat adalah 80 mm.

Soroushian, dkk⁹, memperlihatkan bahwa penambahan serat baja pabrikan, dengan beberapa volume fraksi serat yang dicoba, penambahan 1% volume fraksi serat yang dicoba, penambahan 1% volume beton akan memberikan kuat tekan dan kuat tarik optimal.

Hasil-hasil pengujian menunjukkan daya lekat mempunyai hubungan yang lebih baik dengan $\sqrt{f'_c}$ dari pada f'_c sesuai dengan konsep yang menyatakan bahwa daya tahan beton terhadap pembebanan terutama tergantung pada kuat tarik. Nilai kuat tekan dan tarik bahan beton tidak berbanding lurus. Setiap usaha perbaikan mutu kuat tekan hanya disertai peningkatan kecil nilai kuat tariknya. Suatu perkiraan kasar dapat dipakai bahwa, nilai kuat tarik bahan beton normal hanya berkisar antara 9% - 15% dari kuat tekan Dipohusodo¹⁰.

LANDASAN TEORI

Kuat tekan beton normal beton serat bendrat

Kuat tekan beton normal beton serat baja lokal ditentukan sebagai tegangan normal dan tekan maksimum. Kuat tekan maksimum dihitung dengan rumus:

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Kuat tarik beton normal beton serat bendrat

Kuat tarik bahan beton menurut SNI-03-2847-1992 adalah:

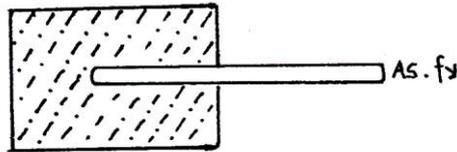
$$f_t = 0,50\sqrt{f'_c} - 0,60\sqrt{f'_c} \text{ Mpa} , \text{ untuk beton normal} \quad (2)$$

$$f_t = 0,40\sqrt{f'_c} - 0,50\sqrt{f'_c} \text{ Mpa} , \text{ untuk beton ringan} \quad (3)$$

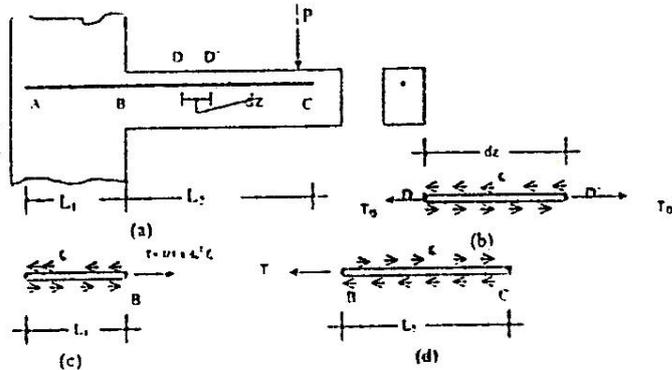
Untuk beton serat kuat dapat meningkat sekitar 10% dibandingkan beton normal, dan kuat tarik beton serat meningkat $\pm 50\%$, Suhendro¹¹. Peningkatan kuat tarik yang cukup besar pada beton serat maka diusulkan kuat tarik beton serat adalah, 150% beton normal:

$$f_t = 0,75\sqrt{f'_c} - 0,90\sqrt{f'_c} \text{ Mpa} , \text{ rumus beton serat} \quad (4)$$

Kuat tarik beton yang dihasilkan dengan uji belah beton silinder (*Split Cylinder Test*), menurut SK SNI M-60-1990-03¹⁴ pasal 3.8, disebutkan bahwa kuat tarik belah benda uji dihitung sampai dengan ketelitian 0,05 MPa dengan menggunakan rumus:



Gambar 3. Ikatan penganker dan lekatan lentur dalam tulangan tarik⁶



Gambar 4. Retak pembelahan dan model keruntuhan pembelahan batas

$$fct = \frac{2P}{\pi LD} \quad (5)$$

$$L_d = \frac{f_y d_b}{4 f_{b\text{ ult}}} \quad (10)$$

Panjang penyaluran dan tegangan lekat

Penjelasan prinsip kegagalan akibat tercabutnya tulangan dari beton diperlihatkan pada balok kantilever yang menahan beban, dimana balok telah direncanakan secukupnya untuk kekuatan lentur (Gambar 3). Jika batang tulangan dipandang sebagai suatu badan bebas (Gambar 3(c) dan (d)), maka pada kondisi seimbang tegangan lekat rata-rata adalah:

$$f_b \pi d_b L_1 = f_s \pi \frac{d_b^2}{4} \text{ atau } f_b = \frac{f_s d_b}{4 L_1} \quad (6)$$

$L_1 = L_d =$ panjang penyaluran

Dari berbagai eksperimen telah dibuktikan bahwa kekuatan lekat f_b yang terjadi merupakan fungsi kekuatan beton, yaitu:

$$f_b = k \sqrt{f'_c} \quad (7)$$

dimana k adalah konstanta. Apabila kuat lekat sama atau lebih besar daripada kuat leleh tulangan yang luas penampangnya $A_b = \frac{1}{4} \pi d_b^2$, maka :

$$\pi d_b L_d f_b \geq A_b f_y \text{ (untuk satu batang)} \quad (8)$$

Dari persamaan 7 dan 8 diperoleh:

$$L_{db} = k_t \frac{A_b f_y}{\sqrt{f'_c}} \quad (9)$$

dimana k_t merupakan fungsi ukuran geometri tulangan dan hubungan antara kuat lekat dan kuat tekan beton.

Panjang penyaluran didefinisikan sebagai panjang penanaman yang dibutuhkan untuk mengembangkan tegangan leleh dalam tulangan. Konsep dasar panjang penyaluran adalah memperhitungkan suatu batang yang ditanam dalam suatu massa beton. Persamaan 9 memberikan rumus untuk panjang penyaluran L_d sebagai fungsi dari tegangan leleh f_y , garis tengah tulangan d_b , dan kapasitas tulangan lekat ultimit $f_{b\text{ ult}}$ sebagai berikut :

Kemp⁷, memberikan panjang penyaluran beton normal untuk mengembangkan kekuatan yang dinyatakan sebagai berikut:

Untuk 1 tulangan,

$$L_d = \frac{A_s f_y}{\Phi D_{ia} f_{b\text{ ult}}} \quad (11)$$

untuk 2 atau lebih tulangan

$$L_d = \frac{D_{ia} f_y}{6,40 + 0,9052 \left(\frac{C_{bs}}{D_{ia}} \right) \sqrt{f'_c}} \quad (12)$$

Dalam SNI-03-2847-1992, untuk tujuan perencanaan memberikan rekomendasi mengenai panjang penyaluran dasar untuk batang tulangan baja tarik deformasian dan tulangan baja rangkai las yang dimuat dalam pasal 3.5.2 adalah :

$$L_d = L_{db} \times \text{faktor modifikasi}$$

Dengan : $L_d =$ panjang penyaluran, mm

$L_{db} =$ panjang penyaluran dasar, mm

Untuk D36 atau lebih kecil

$$L_{db} = 0,02 A_b f_y / \text{tidak boleh kurang dari Faktor modifikasi untuk } f_y > 400 \text{ Mpa adalah } (2 - (400/f_y))$$

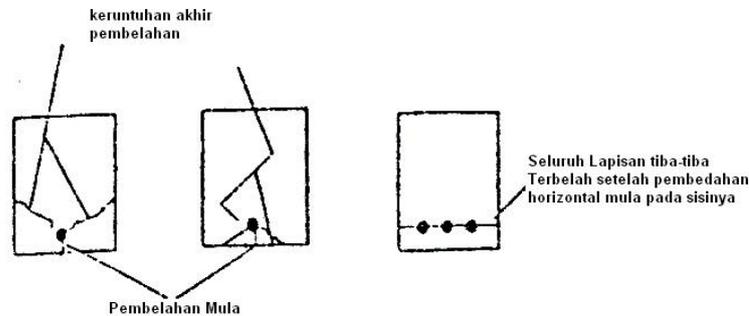
Penjelasan untuk tegangan lekat dengan memandang potongan d_z baja tulangan balok kantilever yang ditinjau, seperti pada Gambar 4 diperlihatkan oleh badan bebas DD' T_D sedikit lebih besar dari T_D^1 . Momen lentur M_D sama dengan gaya-gaya dalam C dan T dikalikan dengan lengan momen dalam, jadi

$$T_D = \frac{M_D}{\text{lengan}} \text{ dan } T_D = \frac{M_{D'}}{\text{lengan}} \quad (13)$$

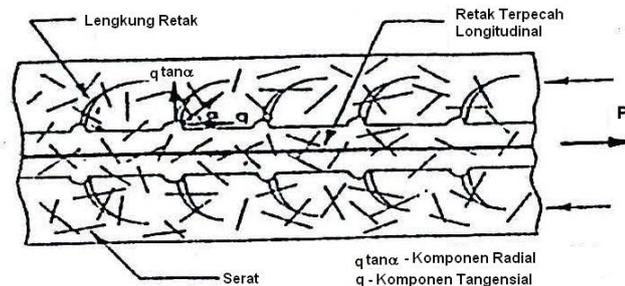
Keadaan batang harus dalam kondisi seimbang, perubahan gaya pada tulangan ini akan dipikul oleh gaya lekat yang terjadi antara beton dan tulangan yang sama besarnya dan berlawanan arah. Apabila besar gaya lekat persatuan panjang tulangan dinyatakan dengan f_b maka dapat ditulis,

Tabel 1. Variasi pengujian pada metode pull-out

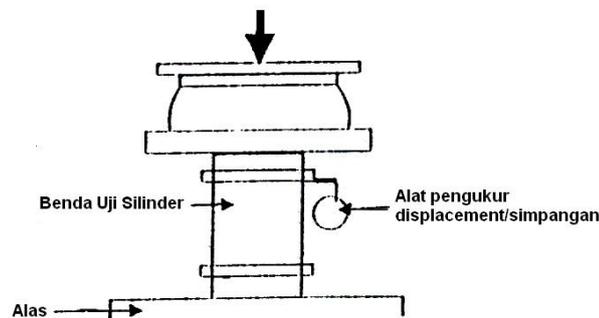
V_{sr} Serat	f'_c rencana (Mpa)	Bentuk Tulangan	Jumlah Benda Uji	Kode Benda Uji
0%	25	Polos	4	PNA 1,2,3
	25	Ulir	4	PNB 4,5,6
1%	>25	Polos	4	PSA 1,2,3
	>25	Ulir	4	PSB 4,5,6



Gambar 5. Retak pembelahan dan model keruntuhan pembelahan batas



Gambar 6. Mekanisme kerusakan pada alur tulangan ulir (Park and Paulay)¹³



Gambar 7. Alat test tekan silinder

$$f_b \pi d_b d_z = T_D - T_{D'} \quad (14)$$

dimana f_b adalah tegangan lekat lentur rata-rata yang disyaratkan untuk luas kontak nominal antara tulangan dan beton, dan d_b adalah diameter dari tulangan tunggal. Dengan memasukkan persamaan (13) ke dalam persamaan (14), maka dapat ditulis,

$$f_b = \frac{M_D - M_{D'}}{dz} \left(\frac{1}{\pi d_b \text{ lengan}} \right) = \frac{dM}{dz} \left(\frac{1}{\pi d_b \text{ lengan}} \right) \quad (15)$$

$$f_b = \frac{V}{\pi d \text{ lengan}}$$

Dari persamaan 15 terlihat bahwa jika gaya geser yang bekerja pada suatu struktur besar, maka lekatan lentur yang terjadi akan bisa menunjukkan intensitas yang tinggi. Pengujian pada penelitian ini merupakan tarik

murni tanpa adanya pengaruh gaya geser, maka rumus 15 di atas geser (V) merupakan gaya tarik yang menyebabkan terjadinya slip, adalah:

$$f_b = \frac{P}{\pi d \text{ lengan}} \quad (16)$$

Hubungan antara distribusi tegangan f_r dan beton di sekitarnya, Kemp⁷, Gambar 2. bisa dinyatakan sebagai,

$$\frac{f_r}{P_r} = \frac{D_{ia}^2}{2C_{bs} + D_{ia}^2 - D_{ia}^2} \left[1 + \frac{\left(C_{bs} + \frac{D_{ia}}{2} \right)^2}{r_x^2} \right] \quad (17)$$

dimana tegangan lekat f_b disekitar batang tulangan bisa dinyatakan sebagai,

Tabel 2. Variasi Pengujian pada metode semi beam

Perlakuan	V_{sr} Serat	f'_c rencana (Mpa)	Bentuk Tonjolan		Jml. Tul.	Jml. Uji	C_s	C_b	Notasi				
			A	B									
1	0	25	X	-	1	3	30	30	SNA1 (1,2,3)				
			X	-	2	3	30	30	SNA1 (4,5,6)				
			X	-	3	3	30	30	SNA1 (7,8,9)				
			-	X	1	3	30	30	SNB1 (1,2,3)				
			-	X	2	3	30	30	SNB1 (4,5,6)				
			-	X	3	3	30	30	SNB1 (7,8,9)				
	1	>25		X	-	1	3	30	30	SSA1 (1,2,3)			
				X	-	2	3	30	30	SSA1 (4,5,6)			
				X	-	3	3	30	30	SSA1 (7,8,9)			
				-	X	1	3	30	30	SSB1 (1,2,3)			
				-	X	2	3	30	30	SSB1 (4,5,6)			
				-	X	3	3	30	30	SSB1 (7,8,9)			
				2	0	25	X	-	1	3	40	40	SNA2 (1,2,3)
							X	-	2	3	40	40	SNA2 (4,5,6)
							X	-	3	3	40	40	SNA2 (7,8,9)
-	X	1	3				40	40	SNB2 (1,2,3)				
-	X	2	3				40	40	SNB2 (4,5,6)				
-	X	3	3				40	40	SNB2 (7,8,9)				
2	>25		X		-	1	3	40	40	SSA2 (1,2,3)			
			X		-	2	3	40	40	SSA2 (4,5,6)			
			X		-	3	3	40	40	SSA2 (7,8,9)			
			-		X	1	3	40	40	SSB2 (1,2,3)			
			-		X	2	3	40	40	SSB2 (4,5,6)			
			-		X	3	3	40	40	SSB2 (7,8,9)			
			3		0	25	X	-	1	3	50	50	SNA3 (1,2,3)
							X	-	2	3	50	50	SNA3 (4,5,6)
							X	-	3	3	50	50	SNA3 (7,8,9)
-	X	1		3			50	50	SNB3 (1,2,3)				
-	X	2		3			50	50	SNB3 (4,5,6)				
-	X	3		3			50	50	SNB3 (7,8,9)				
1	>25			X	-	1	3	50	50	SSA3 (1,2,3)			
				X	-	2	3	50	50	SSA3 (4,5,6)			
				X	-	3	3	50	50	SSA3 (7,8,9)			
				-	X	1	3	50	50	SSB3 (1,2,3)			
				-	X	2	3	50	50	SSB3 (4,5,6)			
				-	X	3	3	50	50	SSB3 (7,8,9)			

$$fb = P_r = \frac{\left(\frac{2C_{bs}}{D_{ia}} + 1\right)^2 - 1}{1 + \frac{\left(C_{bs} + \frac{D_{ia}}{2}\right)^2}{r_x^2}} \quad (18)$$

Dalam pengembangan desain sederhana dengan didasarkan pada pengetahuan kuat lekat yang sekarang, hubungan antara tegangan lekat batang penguat beton sekitarnya dengan diandaikan bahwa gaya ledakan total ditahan oleh tarik f_r beton sekitarnya. Dengan melihat hubungan antara kuat tarik beton f_t dan kuat tekan $f_c = \sqrt{f_c^1}$ (MPa), maka dapat dibuat hubungan,

$$D_{ia} P_r = 0,083 C_{bs} \sqrt{f_c^1} \quad (19)$$

sehingga,

$$f_b = P_r = 0,083 \left(\frac{C_{bs}}{D_{ia}}\right) \sqrt{f_c^1} \quad (20)$$

Kemp⁷, menunjukkan bahwa ada beberapa faktor lain yang penting yang akan mempengaruhi besarnya tegangan lekat batas. Faktor tersebut antara lain adalah tulangan geser (*stirrups*). Keberadaan tulangan geser akan menahan beton dari pecah, sehingga akan meningkatkan tegangan lekat batas. Dalam percobaan-percobaannya Kemp⁷ mengusulkan bahwa untuk maksud desain tegangan lekat ultimit adalah

Tabel 3. Hasil Pengujian tarik baja tulangan polos dan tulangan ulir (deform)

Bentuk Tulangan	No	Diameter rata-rata (mm)	Luas Penampang A (mm ²)	Pmak (x10 ³) P (N)	Teg. Leleh f _y (MPa)	Teg. Tarik f _y (MPa)	Regangan (%)
Tulangan ulir (tipe A)	1	100	7583,98	29,05	2400	3700	33
	2	100	7583,98	28,59	2400	3640	33
	3	100	7583,98	28,27	2460	3600	33
Tulangan polos (tipe B)	1	96	7238,23	31,56	3040	4360	27
	2	96	7238,23	31,85	3020	4400	27
	3	96	7238,23	30,55	3000	4220	26

f_y yang dipakai sebagai acuan yaitu f_y yang terkecil = 2400 MPa

Tabel 4. Pemeriksaan berat jenis kawat bendrat

Sampel	1	2	3	4	5
Panjang pot. kawat (cm)	15	20	25	30	35
Berat kawat, gram (W)	0,80	1,05	1,35	1,60	1,88
Berat air raksa yang tumpah (A)	1,602	2,136	2,671	3,204	3,739
Volume (V) A/13,6	0,118	0,157	0,196	0,236	0,275
Berat jenis kawat = W/V	6,780	6,685	6,888	6,780	6,836

Berat jenis rata-rata (gr/cm³) adalah: 6,794

Tabel 5. Hasil pengujian nilai slam, kuat desak, dan kuat tarik beton dengan Mutu Rencana 25 Mpa

Kode	Slam (cm)	Kuat Desak (MPa)	%	Kuat Tarik (MPa)	%
PNA,B	9,50	31,972	100	2,979	100
PSA,B	2,00	36,210	13,255	4,453	48,870

$$f_{bult} = 1,60 + 0,2258 \left[\frac{C_{bs}}{D_{ia}} \right] \sqrt{f'_c} \quad (21)$$

Batas untuk menentukan besar beban maupun tegangan lekat menurut ASTM C234-92¹² adalah saat selip menunjukkan angka 2,50 mm

Sifat dari keruntuhan lekatan

Salah satu aspek yang paling penting dari kuat lekat adalah efek terjadinya retakan, yang akhirnya dapat menimbulkan keruntuhan struktur beton bertulang. Penggunaan batang tulangan deform dimaksudkan untuk menambah tahanan tulangan terhadap gaya tarik yang bekerja terhadapnya, yaitu dengan mengandalkan tahanan tonjolan terhadap beton. Keandalan tahanan tonjolan tulangan deform ini, keruntuhan lekatan akibat terbelahnya beton (Wang dan Salmon., 1986). Di dalam pola keruntuhan pembelahan ini beton terbelah menjadi 2 atau 3 bagian karena aksi biji (*wedging*) dari alur terhadap beton.

Hubungan pembelahan lekatan (*bond slip*) bila terkena beban untuk batang ulir terutama dipengaruhi oleh perilaku beton yang berada di sekitar bagian depan tonjolan. Mekanisme kerusakan yang terjadi pada beton dan batang tulangan antara dua buah tonjolan yang berdekatan diperlihatkan dalam Gambar 6.

Berdasarkan persyaratan yang ditetapkan oleh ASTM A305¹³ maka keadaan yang paling mungkin terjadi adalah optimalnya komponen f_b pada kuat lekat arah longitudinal (lihat Gambar 5). Hal ini didasarkan bahwa nilai yang ditetapkan dalam ASTM A305 lebih kecil dibandingkan dengan hasil percobaan terdahulu yang menyatakan untuk

a/c < 0,10 maka komponen longitudinal f_b yang akan berpengaruh terhadap kuat lekat.

Park dan Paulay¹³ menjelaskan apabila jarak antara alur itu lebih besar dibandingkan dengan 10 kali ketinggian tonjolan (a/c < 0,10), maka beton yang sebagian hancur akan membentuk jepit di bagian depan tonjolan, dan kerusakan itu mungkin terjadi, namun berdasarkan persyaratan yang ada menunjukkan bahwa kerusakan pada tipe (a) tidak boleh terjadi.

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan-bahan yang dibutuhkan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut

Semen tipe I semen Gresik.

- Bahan batuan dan air
 - Pasir: diuji gradasi pasir dan kandungan lumpur.
 - Kerikil, dan batu.
- Baja tulangan: dua variasi polos dan ulir, dengan diameter pasaran yaitu 10 mm.
- Serat (*fiber*): kawat bendrat, diameter ± 1 mm panjang 8 cm, diperiksa berat jenisnya. Volume yang ditambahkan 1 % dari volume adukan.

Peralatan yang dibutuhkan untuk penelitian ini sebagai berikut

- Alat pemotong
- Mesin uji kuat tekan dan uji tarik belah UTM kapasitas 100 ton
- Cetakan benda uji
- Mesin Uji kuat lekat: UTM kapasitas 100 ton

Proses Penelitian

Bahan yang dipersiapkan yaitu pasir, kerikil, semen dan serat. Serat dipotong, diperiksa berat jenisnya. Agregat kasar (Batu pecah) disaring dengan ayakan maksimum 20 mm, dicuci. Agregat halus (pasir) diperiksa gradasinya. Kemudian dilakukan Perhitungan rencana campuran beton untuk Proses pembuatan benda uji. Berikut ini Penentuan dimensi benda uji:

- Metode *pull-out* dengan dimensi sesuai ASTM C234-92¹², untuk uji kuat lekat dimensi benda uji adalah (150 x 150 x 150 mm).
- Semi beam diambil nilai minimal lebar balok, maksimal digunakan jumlah tulangan 3, diameter 10 mm. Jarak antar tulangan yang dipakai menggunakan nilai minimum (persyaratan SNI- 03-2847-1992) yaitu 25 mm dan selimut beton sisi samping 40 mm.

Benda uji semi beam disini memakai 3 variasi lebar balok yaitu Lebar balok di bawah standar 140 mm, ukuran standar 160 mm, di atas standar 180 mm. Penelitian ini dipakai tinggi balok 100 mm, panjang balok 150 mm diharapkan model yang ada mendekati kondisi aktual yang umum dijumpai di lapangan. Jadi ukuran semi beam 140 x 150 x 100 mm, 160 x 150 x 100 dan 180 x 150 x 100 mm.

Penentuan jumlah benda uji

Metode *pull-out* dilakukan 2 macam pengujian yaitu:

- pengujian pengaruh bentuk tonjolan tulangan.
- pengujian pengaruh penambahan serat.

Pengujian dengan metode semi beam ditambahkan parameter pengujian:

- pengujian pengaruh pemakaian jumlah tulangan.
- pengujian pengaruh *cover bottom* (C_b).

Pada Tabel 2 dapat dilihat variasi yang digunakan dalam pengujian dengan metode semi beam

Pengecoran benda uji
Selama pengecoran: dijaga tidak terjadi rongga, Pada saat pengecoran, diambil beton untuk pengujian silinder, sehingga dapat diketahui f'_c aktual.

Tiap pengadukan diambil 2 sampel silinder beton: uji kuat tekan dan tarik belah beton. Pengujian kuat tekan, dilakukan terhadap kubus dan silinder beton. Pengujian kuat tarik, dilakukan dengan uji belah silinder (*tensile split cylinder*). Pengujian modulus elastisitas ASTM C 469. Pembebanan sampai 40% pembebanan hancur, dengan kecepatan beban rata-rata 241 kPa/detik (dengan toleransi 34 kPa), saat beton 28 hari.

Penelitian kuat lekat benda uji *pull out* dan semi beam dengan tulangan ulir. Teknik pengujian benda uji *pull out* maupun semi beam sama, yaitu digunakan alat uji tarik *Universal Testing Machine* kapasitas maksimum 100 ton, yang dilengkapi dengan *load cell* dan *transducer*. Selama pembebanan berlangsung dicatat nilai selip yang terbaca pada dial gauge, tiap kelipatan beban 200 kg.

ANALISIS HASIL

- Benda uji silinder

Pengujian silinder dilakukan pada umur 28 hari dan diperoleh kuat tekan beton berdasarkan rumus 1. Pengujian tarik belah yang dihitung berdasarkan rumus 5.

- Benda uji pull out

Data percobaan tarik tulangan dalam blok beton sampai tulangan tercabut di dapat:

- hubungan beban P (kg), dengan selip (mm),
- hubungan kuat lekat (f_b) - selip untuk setiap interval beban $\Delta P = 200$ kg.

Hubungan tersebut digambarkan dalam bentuk diagram beban-selip dan kuat lekat-slip. Kemudian hasilnya dibandingkan antara beton serat dengan beton tidak berserat.

- Benda uji semi beam

Data percobaan tarik tulangan dalam blok beton sampai tulangan tercabut didapat :

- hubungan antara beban P (kg), dengan selip (mm), diagram beban-selip
- hubungan antara tegangan lekat (f_b) - selip, diagram kuat lekat-selip
- pengaruh kuat lekat terhadap jumlah tulangan, jarak antar tulangan, dan selimut beton.

Kemudian hasilnya dibandingkan antara beton serat dengan beton tidak berserat.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Bahan

Pemeriksaan agregat dilakukan terhadap agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil).

- a) Kandungan lumpur pasir 1,07%, (kurang dari 5%)
- b) Berat jenis pasir 2,688 gr/cm³ dan berat jenuh kering muka (SSD) sebesar 2,710 gr/cm³
- c) Berat jenis kerikil 2,603 gr/cm³ dan berat jenis jenuh kering muka 2,650 gr/cm³
- d) Modulus halus butiran pasir dan kerikil dari pemeriksaan butiran adalah 2.726 dan 7.558

Berdasarkan persyaratan termasuk dalam darah gradasi II dan diklasifikasikan pasir agak kasar.

- Pengujian Tarik Baja

Hasil pengujian Tarik Baja dapat dilihat pada Tabel 3.

- Pengujian Kawat Bendrat

Bahan tambahan serat yaitu kawat bendrat, sebelum dipakai diperiksa berat jenisnya dengan air raksa. Hal ini dilakukan untuk mengetahui berat serat yang akan ditambahkan ke dalam adukan sesuai dengan prosentase volume beton. Pengujian Kawat Bendrat dapat dilihat pada Tabel 4.

- Pengujian Benda Uji

Pengkajian perilaku dan sifat struktural beton, dilakukan pada beton normal maupun beton yang diperbaiki dengan adanya penambahan serat berupa kawat bendrat, yaitu dengan menggunakan benda uji beton silinder. Pada dasarnya beton yang mempunyai sifat getas dapat ditingkatkan kekuatannya, dengan penambahan serat. Retak yang akan terjadi ditahan oleh serat dengan 2 cara yaitu lekatan antara serat dengan pasta semen (*bond strength*) atau oleh kekuatan seratnya sendiri.

Pada proses pengadukan, adanya penambahan serat ke dalam adukan akan mempersulit pengadukan beton dan menurunkan nilai slump. Penurunan nilai slump dapat disimpulkan bahwa penambahan serat akan menurunkan kelecakan adukan, sehingga mempersulit adukan, pengangkutan, dan pengecoran. Hal yang memungkinkan kandungan serat menyebabkan adukan mulai sulit dan tidak mungkin diaduk adalah sesuai dengan rumus dalam Sudarmoko¹², untuk mengetahui apakah adukan masih bisa dilaksanakan:

Tabel 6. Gaya lekat yang terjadi maksimum rata-rata (P_{maks}) dan Tegangan lekat maksimum rata-rata (fb_{maks}) untuk 3 benda uji Pull-out.

Campuran Rencana	Beton Normal				Beton Serat			
	P_{maks} (N)		fb_{maks} (MPa)		P_{maks} (N)		fb_{maks} (MPa)	
	Tipe A	Tipe B	Tipe A	Tipe B	Tipe A	Tipe B	Tipe A	Tipe B
$fc' 25$ Mpa	16300	28500	3,459	6,047	18000	31500	3,819	6,684
Kenaikan terhadap beton normal (%)								
$fc' 25$ Mpa	100	100	100	100	110,43	110,52	110,40	110,53

Tabel 7. Gaya lekat maksimum rata-rata (P_{maks}) yang terjadi dan tegangan lekat

Tipe Permukaan Tulang	Jml. Tulangan	P_{maks} (N)			fb_{maks} (MPa)		
		$C_b=C_s$ (3 cm)	$C_b=C_s$ (4 cm)	$C_b=C_s$ (5 cm)	$C_b=C_s$ (3 cm)	$C_b=C_s$ (4 cm)	$C_b=C_s$ (5 cm)
Beton Normal							
Tipe A	1	1240	1340	1450	3,94	4,26	4,61
	2	1315	1537	1537	2,09	2,21	2,44
	3	1335	1560	1560	1,41	1,53	1,65
Tipe B	1	2294	2680	2680	7,30	7,89	8,5
	2	2430	2830	2840	3,86	4,18	4,52
	3	2466	2670	2880	2,62	2,83	3,05
Beton Serat							
Tipe A	1	1350	1465	1615	4,29	4,66	5,14
	2	1435	1560	1700	2,28	2,48	2,70
	3	1455	1585	1725	1,54	1,68	1,83
Tipe B	1	2520	2750	2990	8,02	8,75	9,51
	2	2660	2890	3150	4,23	4,60	5,01
	3	2675	2935	3195	2,83	3,11	3,39

$$P_{wc_{crit}} = 75 \frac{\pi \gamma_f d}{\gamma_c l} k = 75 \frac{\pi \cdot 6,794}{2,319} \frac{1}{80} K \quad (22)$$

$$P_{wc_{crit}} = 8,629 K$$

dengan

$$K = \frac{W_m}{W_m + W_a} \quad (23)$$

$$K = \frac{30,60 + 12,76 + 7,40}{45,98 + 30,60 + 12,76 + 7,40} = 0,524$$

Sehingga $P_{wc_{crit}} = 8,269 \times 0,524 = 4,521$ % (terhadap berat adukan)

Berat adukan yang digunakan untuk konsentrasi serat 1 % yaitu:

$$W_c = 45,98 + 30,60 + 12,76 + 7,40 = 96,80 \text{ kg}$$

Berarti berat kandungan serat kritis adalah sebesar:

$$W_s = 4,521 \% \times 169,4 \text{ kg} = 4,382 \text{ kg}$$

Dapat disimpulkan bahwa berat serat yang ditambahkan yaitu 2,72 kg dalam volume adukan 0,04 m³ untuk pemakaian semen 12,76 kg semen dengan fc' rencana 25 MPa masih jauh dibawah serat kritis yang dapat menyebabkan adukan sulit dikerjakan.

Kuat tekan dan kuat tarik belah

Penambahan serat kawat bendrat dengan panjang 8 cm ke dalam adukan meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik belah, ditunjukkan dalam Tabel 5. Kuat desak dan kuat tarik yang diperoleh adalah rata-rata dari 3 benda uji yang dilakukan pada umur 28 hari. Pada beton serat kuat tekannya lebih besar dibanding beton normal, perbedaannya 13,255%, Peningkatan kuat tarik pada

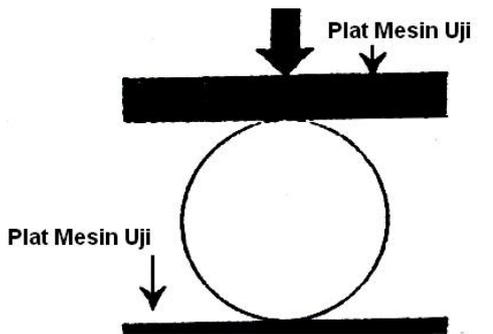
beton serat dibanding beton normal, lebih tinggi dibanding peningkatan kuat tekan yaitu sebesar 48,87 %.

Hasil pengujian gaya lekat

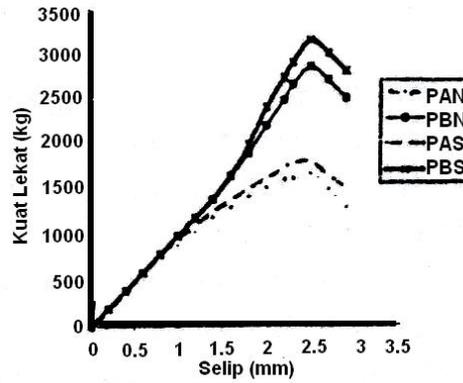
Benda uji pull out, data pada Tabel 6 adalah data pengujian benda uji pull-out yang diperoleh dari hasil pengujian tarik tulangan dalam blok beton ukuran 150x150x 150 mm. Gaya lekat maksimum yang terjadi adalah kemampuan maksimum beton menahan tulangan sampai tulangan tercabut (lepas dari beton). Tegangan lekat diperoleh dengan membagi gaya tarik (P) dengan luas permukaan tulangan yang tertanam dalam balok beton (keliling x panjang tertanam, rumus 2.18). Hasil yang didapat yang tertuang dalam Tabel 6 menunjukkan bahwa adanya perbedaan antara tulangan polos (tipe A) dan tulangan ulir (tipe B), dan beton serat terhadap beton normal. Perbedaan yang ditunjukkan masing-masing variasi tersebut dihitung dalam persentasi yaitu perbedaan tegangan lekat antara beton normal dan beton serat dengan tulangan polos sebesar 10,40 % dan beton normal dan beton serat dengan tulangan ulir sebesar 10,53 %. Perbedaan tegangan lekat antara beton normal tulangan polos dan beton normal tulangan ulir sebesar 74,85% dan perbedaan serat tulangan polos dan beton serat tulangan ulir sebesar 75,00%.

Benda uji semi beam

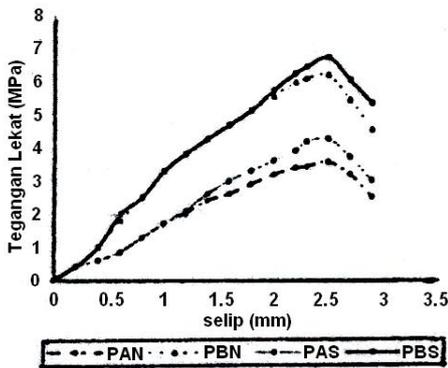
Data dari Tabel 7 adalah data pengujian benda semi beam yang diperoleh dari hasil pengujian tarik tulangan dalam blok beton dalam berbagai variasi jumlah tulangan, dan selimut beton. Hasil yang didapat yang tertuang dalam Tabel 7 seperti pada benda uji pull out



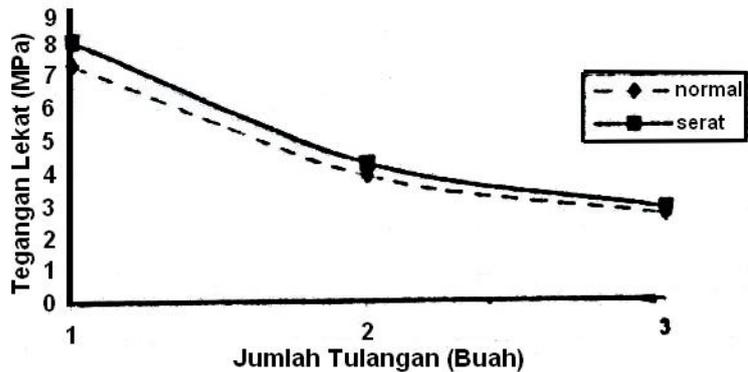
Gambar 8. Detail pengujian split silinder



Gambar 9. Hubungan Gaya lekat-selip pada pengujian pengaruh serat dan tipe tulangan benda uji pull out



Gambar 10. Hubungan Tegangan lekat-selip pada pengujian pengaruh serat dan tipe tulangan benda uji pull out



Gambar 11. Perbandingan tegangan lekat dengan jumlah tulangan

menunjukkan bahwa adanya perbedaan antara tulangan polos (tipe A) dan tulangan ulir (tipe B), beton serat terhadap beton normal, jumlah tulangan dan selimut beton.

Gaya lekat maksimum rata-rata dan tegangan lekat maksimum rata-rata pada Tabel 7 dapat dilihat bahwa pada kelompok tulangan yang memakai 3 tulangan mempunyai nilai lebih besar dibandingkan kelompok tulangan yang memakai 2 tulangan. Sebaliknya nilai tegangan lekat maksimum terjadi untuk satu tulangan bukan pada kelompok dengan dua maupun tiga tulangan. Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa pada kelompok tulangan dengan dua dan tiga tulangan, gaya lekat maksimum yang dicapai adalah gaya kelompoknya, sehingga gaya lekat masing-masing tulangannya menjadi lebih kecil.

Dari Tabel 7 dapat dilihat bahwa, pada benda uji semi beam terjadi perubahan gaya lekat beton serat terhadap beton normal pada masing-masing selimut beton dan jumlah tulangan.

Grafik hasil pengolahan data

Besarnya tegangan lekat pada benda uji diperoleh dari hasil pengujian tarik masing-masing benda uji dengan berbagai variasi. Pengerjaan beban tarik pada benda uji menyebabkan terjadinya slip antara pasta beton dengan batang tulangan. Hubungan antara besarnya gaya tarik ataupun tegangan lekat dengan slip dapat digambarkan dalam suatu diagram, tampak pada Gambar 9.

Gambar 9 adalah hubungan antara gaya lekat dan selip yang membandingkan beton normal dan beton serat. Gaya lekat maksimum yang terjadi berdasarkan persyaratan maksimum selip (2,50 mm) dari Gambar 9, sehingga Gambar 9 cenderung tepat, karena gaya lekat maksimum terjadi sebelum selip mencapai 2,50 mm.

Gambar 10 adalah hubungan antara gaya lekat dan slip, dari gambar tersebut terlihat adanya perbedaan gaya lekat maksimum antara beton tulangan polos dan tulangan ulir, ini terjadi karena adanya perbedaan tegangan leleh dan tegangan tarik yang diikuti perbedaan kuat lekat. Sebelum mencapai gaya lekat maksimum garis grafik cenderung berimpit.

Dari gambar dapat dilihat bahwa gaya lekat maksimum tercapai masih dalam batas persyaratan maksimum Standar ASTM C234-92. Melihat terjadinya gaya lekat yang masih dalam batas standar maksimum, maka pengaruh penambahan serat ke dalam adukan memberikan kontribusi yang berarti, sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan serat menambah kekuatan menahan gaya lekat, dan menaikkan tegangan lekat.

Mekanisme retak

Berdasarkan pengamatan, secara garis besar dapat dijelaskan mekanisme retak masing-masing tipe benda uji pada perlakuan yang berbeda. Keruntuhan benda uji dengan tulangan polos dan terlebih lagi pada tulangan ulir ini, untuk beton normal, hampir selalu merupakan keruntuhan akibat terbelahnya beton, sehingga kegagalan

Tabel 8. Nilai tegangan lekat hasil pengujian dan tegangan lekat hasil perhitungan rumus Kemp ⁷

Kode	Pengujian			Rumus Kemp					
	Cb=30mm	Cb=40mm	Cb=50mm	Cb=30mm	Cb=40mm	Cb=50mm	Cb=30mm	Cb=40mm	Cb=50mm
	$f_{b\ ulit}$ (MPa)			$f_{b\ ulit}$ (MPa)			f_b (MPa)		
SAN1	3,94	4,26	4,61	5,430	6,707	6,707	1,407	1,877	2,346
SAN2	2,090	2,210	2,440	3,195	3,195	3,195	0,586	0,586	0,586
SAN3	1,410	1,530	1,650	3,195	3,195	3,195	0,586	0,586	0,586
SBN1	7,300	7,890	8,500	5,430	6,707	6,707	1,407	1,877	2,346
SBN2	3,860	4,180	4,520	3,195	3,195	3,195	0,586	0,586	0,586
SBN3	2,620	2,830	3,050	3,195	3,195	3,195	0,586	0,586	0,586
SAS1	4,290	4,660	5,140	5,676	7,043	7,043	1,498	1,997	2,497
SAS2	2,280	2,480	2,700	3,290	3,290	3,290	0,624	0,624	0,624
SAS3	1,540	1,680	1,830	3,290	3,290	3,290	0,624	0,624	0,624
SBS1	8,020	8,750	9,510	5,676	5,676	8,393	1,498	1,997	2,497
SBS2	4,230	4,600	5,010	3,290	3,290	3,290	0,624	0,624	0,624
SBS3	2,830	3,110	3,390	3,290	3,290	3,290	0,624	0,624	0,624

yang terjadi cenderung untuk menjadi kegagalan getas. Pengamatan pola keruntuhan pembelahan, beton terbelah menjadi 2 atau 3 bagian yang besar, tergantung dari jumlah tulangan dan posisi tulangan. Slip yang terjadi terutama dipengaruhi oleh kualitas beton yang berada di sekitar bagian depan tonjolan. Keruntuhan yang ditunjukkan oleh beton serat, pembelahan hampir atau sama dengan beton normal akan tetapi tidak terjadi kegagalan getas, saat runtuh tidak mengeluarkan suara yang keras.

Mekanisme retak pada benda uji *pull out*

Benda uji *pull out* umumnya retak rambut pertama kali terjadi pada sisi sekeliling tulangan. Retak ini kemudian semakin memanjang dan melebar sampai mencapai sisi kanan dan kiri dari balok beton. Keruntuhan terjadi saat pembebanan terus dinaikkan diikuti dengan suara yang keras ketika retak pada sisi kanan dan kiri balok beton telah mencapai bagian belakang balok, langsung terbelah lepas. Keadaan untuk beton serat adalah sebaliknya, saat keruntuhan tidak mengeluarkan suara yang keras dan tulangan tercabut.

Mekanisme retak pada benda uji *semi beam*

Sesuai dengan yang diprediksikan pada benda uji *semi beam*, kerusakan diawali dengan retak di sekitar tulangan. Arah retak sampai terjadi pembelahan yaitu sesuai dengan garis terpendek terhadap selimut bawah (C_b) atau selimut samping (C_s) dan jarak antar tulangan. Pengujian benda uji *semi beam* ini sama dengan yang dilakukan seperti benda uji *pull out*, sehingga mekanisme retaknya hampir sama. Pada benda uji *semi beam* tulangan 2, dan 3 jarak antar tulangan 2,5 em lebih kecil dari selimut bawah (C_b) dan selimut samping (C_s), maka retak terjadi diantara tulangan dahulu baru disusul keretakan diselimut beton.

Bahan Penyusun Benda Uji

Kemampuan pasta beton akibat tertariknya tulangan sebagai obyek pengujian, tersusun dari beberapa material yang telah diketahui spesifikasinya. Material penyusun beton tersebut mempunyai karakteristik yang berbeda.

Pemeriksaan karakteristik agregat baik agregat halus (pasir), maupun agregat kasar (kerikil) menunjukkan tidak ada permasalahan. Agregat halus yang dipakai tidak perlu

dilakukan peneucian sebelum digunakan, disebabkan kandungan lumpur pada pasir sebesar 1,07%, lebih rendah dari 5% (PUBI 1982). Baja tulangan terdiri dari 2 jenis, yaitu baja tulangan polos dan baja tulangan ulir dengan kode produksi H (Hanil). Diameter tulangan yaitu 10 mm, dan mutu yang terendah $f_y = 240$ Mpa.

Pengaruh bentuk tulangan terhadap kuat lekat

Pemakaian tulangan sebagai struktur penguat beton bertulang, dikenal dua jenis tulangan, yaitu tulangan polos (BJTP) dan baja tulangan deformasian (BJTD).

Tulangan polos (BJTP) umumnya mempunyai titik leleh yang relatif rendah dan lekatan yang dihasilkan relatif kecil. BJTD atau dikenal dengan tulangan ulir/deform, berkaitan dengan kemampuan terhadap kuat lekat lebih besar dari batang tulangan polos (BJTP). Kenyataan diatas mendorong penulis untuk meninjau secara khusus dan detail penggunaan tulangan polos dan ulir/deform berhubungan dengan tahanan terhadap lekat.

Hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan pada kedua bentuk tulangan mempunyai kemampuan menahan gaya lekat yang jauh berbeda. Tulangan ulir mempunyai kecenderungan nilai lekatannya lebih besar dari tulangan polos, mencapai 175% - 185%. Perbedaan ini disebabkan oleh adanya tonjolan pada permukaan tulangan ulir, menekan beton disekelilingnya dan memperbesar kuat lekat. Karena perbedaan tegangan lekat yang terjadi cukup besar, menunjukkan bahwa pemakaian tulangan ulir lebih efisien dibanding pemakaian tulangan polos. Data penelitian ini mendukung ketentuan SNI-T-15-1991-03¹⁰ bahwa tulangan polos pemakaiannya dianjurkan untuk sengkang dan tulangan spiral, sedangkan tulangan ulir diutamakan penggunaannya untuk batang tulangan struktur, sehingga tercapai struktur beton bertulang yang memiliki keandalan terhadap efek gempa.

Pengaruh Jumlah tulangan terhadap kuat lekat

Pemakaian batang tulangan pada struktur beton adalah untuk menahan gaya tarik yang bekerja. Jumlah batang tulangan yang dipakai tergantung pada momen lentur yang bekerja. Semakin besar momen lentur maka semakin banyak jumlah tulangan yang harus dipasang, berarti semakin rapat jarak antar tulangan.

Jarak bersih antar tulangan memberikan pengaruh yang besar pada tegangan lekat. Semakin besar jarak bersih antar tulangan, maka semakin besar pula kuat lekat struktur tersebut. Wang dan Salmon⁶ menyebutkan bahwa nilai setengah dari jarak bersih tulangan ke tulangan lain tersebut, untuk harga selimut bawah (C_b) dan selimut samping (C_s) yang sama, sehingga secara tidak langsung akan mempengaruhi gaya tarik yang bisa ditahan.

Pada Gambar 11, dimana semakin banyak jumlah tulangan semakin kecil tegangan lekatnya. Kenaikan gaya lekat tidak sebanding dengan kenaikan tegangan lekat, dimana semakin banyak jumlah tulangan semakin kecil gaya lekat pertulangan untuk panjang penanaman yang tetap. Hal lain yang berpengaruh yaitu jarak antara tulangan yang pendek (25 mm), mempercepat pembelahan, dan tegangan lekatnya pun turun. Pada kelompok tulangan 3, tegangan lekatnya paling kecil dibanding dengan kelompok 1, dan 2 tulangan.

Pengaruh selimut beton bawah (C_b) terhadap kuat lekat

Variasi selimut samping (C_s) maupun selimut bawah (C_b) adalah 30 mm, 40 mm dan 50 mm. Pada pengujian tentang pengaruh selimut beton ini digunakan tiga buah benda uji untuk masing-masing perlakuan yaitu, satu tulangan dua tulangan dan tiga tulangan. Benda uji dengan 2 tulangan dan 3 tulangan mempunyai nilai jarak antara tepi tulangan yaitu 2,5 cm. Akibat penetapan C_b untuk dimensi benda uji yang sama pada masing-masing jumlah tulangan, maka pengaruh selimut beton dan jumlah tulangan terhadap hasil uji akan tampak sekali. Secara umum dapat disimpulkan bahwa selimut beton yang ditingkatkan ternyata bisa memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap menahan pecahnya beton. Pada benda uji dengan selimut beton terkecil yaitu dibawah standar sebesar 30 mm, retak sekunder yang terjadi di bawah tulangan menuju ke sisi luar tarik benda uji, sedangkan pada benda uji dengan selimut beton 40 mm dan 50 mm, retak sekunder terjadi disisi samping dari tulangan menuju ke bagian tepi kiri dan kanan benda uji.

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan:

- Penambahan serat dalam adukan beton diikuti dengan terjadinya peningkatan kuat lekat pada kondisi beban maksimum. Pada penelitian ini peningkatan kuat tekan, kuat tarik, gaya lekat dan tegangan lekat pull out dari beton normal ke beton serat berturut-turut adalah 13,255%; 48,70%; 10,43% dan 10,53%.
- Penggunaan tulangan polos dan ulir/deform, berpengaruh terhadap lekat. Tulangan deform mempunyai kekuatan yang lebih baik dari tulangan polos, mencapai 1,75% - 1,85%.
- Kelompok tulangan berpengaruh besar terhadap tegangan lekat maksimum, semakin banyak jumlah tulangan maka kuat lekat makin besar, tetapi tegangan lekat semakin kecil. Nilai tegangan lekat pada kelompok tulangan yang 1 tulangan paling besar, sedangkan yang memakai 3 buah dengan jarak antar tulangan 2,5 cm, C_s dan C_b yang sama, memberikan tegangan lekat yang paling rendah dibandingkan dengan dua buah dan satu buah tulangan. Kenaikan

kuat lekat pada kelompok 2 tulangan yaitu berkisar 5,26% - 6,48%, kelompok 3 tulangan 6,15% - 7,77%. Penurunan tegangan lekat 2 tulangan adalah berkisar antara 46,82% - 51,57%. Sedangkan pada tiga tulangan dibandingkan dengan satu tulangan adalah berkisar antara 63,940% - 64,71%.

- Benda uji semi beam baik gaya lekat maupun tegangan lekat maksimum yang terjadi antara beton normal dan beton serat, menunjukkan slip yang masih dalam persyaratan maksimum Standar ASTM C234-92 yaitu 2,50 mm, sehingga jika dipakai persyaratan ini penambahan serat memberikan kontribusi terhadap kuat lekat dan tegangan lekat. Kenaikan gaya lekat dan tegangan lekat yang diperlihatkan beton serat terhadap beton normal untuk satu, dua, dan tiga buah untuk tulangan polos berturut-turut adalah 8,87 %, 9,12%, 8,8 % dan 9,39 %, 12,21 %, 12,14 % sedangkan tulangan ulir berturut-turut adalah 9,85 %, 9,46 %, 8,83 % dan 10,89%, 10,04%, 8,82 %.
- Penggunaan selimut yang lebih besar akan memberikan tahanan yang lebih baik terhadap pecahnya beton. Kenaikan selimut beton sebesar 10 mm memberikan kenaikan kuat lekat dan tegangan lekat berkisar 7,98 % s/d 9,12%.

Beberapa saran untuk perkembangan penelitian ini yaitu perlu dilaksanakan penelitian dan studi lebih lanjut optimasi panjang lekatan tulangan, untuk kelompok tulangan yang mempunyai jarak bersih antar tulangan minimum 2,5 cm untuk meyakinkan apakah panjang lekatan tulangan minimum persyaratan SNI-03-2847-1992 dapat berlaku. Perlu diadakan penelitian untuk diameter-diameter lain sehingga hasil yang diperoleh dapat berlaku untuk semua diameter tulangan. Perlu pengkajian tentang distribusi gaya, tegangan dan regangan, memperhitungkan pengaruh tulangan sengkang pada pengujian masing-masing tulangan khususnya yang memakai dua atau lebih tulangan.

NOTASI

A_b, A_s	Luas tampang tulangan, mm ²
A	Luas penampang benda uji, mm ²
C_b	Selimut bawah, mm atau cm
C_s	Selimut samping, mm atau cm
C_{bs}	Nilai terkecil dari <i>clear bottom cover</i> , <i>clear side cover</i> atau setengah <i>clear spacing</i> , antara dua tulangan yang berdekatan, mm
D_{ias}, D_b	Diameter batang tulangan, mm
f_b	Tegangan lekat, Mpa
f_{bult}	Tegangan lekat ultimit, Mpa
f_c'	Kuat tekan beton, MPa
f_{ct}	Kuat tarik belah beton silinder, MPa
f_y	Tegangan leleh baja, MPa
L	Panjang benda uji baja, MPa
L_d	Panjang penyaluran, mm atau cm
I_{db}	Panjang penyaluran dasar, mm atau cm
P	Beban runtuh, N atau KN
PNA	Benda uji pull out beton normal tulangan polos (tipe A)
PSA	Benda uji pull out beton serat tulangan polos (tipe A)
PNB	Benda uji pull out beton normal tulangan ulir (tipe B)

PSB	Benda uji pull out beton serat tulangan ulir (tipe B)	7.	Kemp, E. L., 1986, <i>Bond in Reinforced Concrete: Behavior and Design Criteria</i> , ACI Journal / Jan Feb 1986, pp. 50-57
P_r	Tegangan ledak radial, MPa	8.	Sharma, A. K., <i>Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams</i> , ACI Journal / July-August, pp. 624 - 628.
SANI	Semi beam tulangan polos (tipe A), beton normal jumlah tulangan 1	9.	Soroshian, P, Mirza, F. dan Alhozaimi, A., 1994, <i>Bonding of Confined Steel Fiber Reinforced Concrete to Deformed Bars</i> , ACI Material Journal, March-April, pp. 141-149.
SAN2	Semi beam tulangan polos (tipe A), beton normal jumlah tulangan 2	10.	Dipohusudo, I., 1994, <i>Struktur Beton Bertulang (berdasarkan SNI-T-15-1991-03)</i> , Penerbit Gramedia, Jakarta
SAN3	Semi beam tulangan polos (tipe A), beton normal jumlah tulangan 3	11.	Suhendro, B., 1994, <i>Pengaruh Fiber Lokal pada Perilaku Sambungan Balok-Kolom Beton Bertulang Akibat Beban Siklik</i> , Laporan Penelitian, Lembaga Penelitian PAU Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
BNI	Semi beam tulangan ulir (tipe) B, beton normal jumlah tulangan 1	12.	Anonim, 1992, <i>Annual Book of ASTM Standards</i> , Volume 04.02, Concrete and Aggregates, pp. 55-59
SBN2	Semi beam tulangan ulir (tipe) B, beton normal jumlah tulangan 2	13.	Park, R. And Paulay, T., <i>Reinforced Concrete Structure</i> , John Wiley and Son Inc., New York
SBN3	Semi beam tulangan ulir (tipe B), beton normal jumlah tulangan 3	14.	Anonim, 1991, <i>Metode Kuat Tarik-Belah Beton (SK SNI M-60-1990-03)</i> , Yayasan LP~B, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung.
SAS1	Semi beam, tulangan polos (tipe A), beton serat jumlah tulangan 1	15.	Anonim, 1991, <i>Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal (SK SNI T -15- 1990-03)</i> , Yayasan LPMB, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung
SAS2	Semi beam, tulangan polos (tipe A), beton serat jumlah tulangan 2	16.	Giaccio, G, Giovambattista, A. And Zerbino, R., 1986, <i>Concrete Reinforced Collated Steel Fibers: Influence of Separation</i> , ACI Journal / March-April, pp. 232-235.
SAS3	Semi beam, tulangan polos (tipe A), beton serat jumlah tulangan 3	17.	Harajli, M. H., Hout, M., and Jalkh, W., 1995, <i>Local Bond Stress-Slip Behavior of Reinforcing Bars Embedded in Plain and Fiber Concrete</i> , ACI Material Journal/July August, pp. 343-354.
SBS1	Semi beam, tulangan ulir (tipe B) beton serat jumlah tulangan 1	18.	Kardiyono, TJ, 1996, <i>Teknologi Beton</i> , Penerbit Nafiri, Yogyakarta.
SBS2	Semi beam, tulangan ulir (tipe B) beton serat jumlah tulangan 2	19.	Sabnis, G. M., Harris, G. H., White, R. N., and Mirza, M. S., <i>Structural Modelling and Experimental Techniques</i> , Prentice Hall, Inc., Englewood Cliff, New York.
SBS3	Semi beam, tulangan ulir (tipe B) beton serat jumlah tulangan 3	20.	Suhendro, B., 1992, <i>Ketahanan Kejut (Impact Resistance) Beton Fiber Lokal dan Kemungkinan Aplikasinya pada Struktur-struktur Sabo untuk Penanggulangan Bahaya Gunung Berapi</i> , Laporan Penelitian, Lembaga Penelitian PAU Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
V	Gaya geser, N atau KN		

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim 1982, *State Of The Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, ACI Committee 544, Concrete International (May) pp. 09-25.
- Sudarmoko, 1991, *Kuat Lemur Beton Serat dengan Model Skala Penuh. Laporan Penelitian*, Lembaga Penelitian PAU Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Suhendro, B., 1991, *Pengaruh Fiber Secara Parsial pada Balok*, Laporan Penelitian, Lembaga Penelitian UGM.
- Suhendro, B, 1991, *Pengaruh Pemakaian Fiber Secara Parsial pada Balok Beton Bertulang*, Laporan Penelitian, Lembaga Penelitian PAU Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Nawy, E. G., 1985, (alih bahasa oleh Suryoatmono, B), *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*, Penerbit Eresco, Bandung.
- Wang, C.K. and Salmon, C.G., 1986, (alih bahasa oleh Harianja, B), *Desain Beton Bertulang*, Penerbit Erlangga Jakarta.