

ANALISIS KUAT LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN CARBON FIBER WRAP

Endah Kanti Pangestuti¹⁾ dan Januar Prihanantio²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang (UNNES)
Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229, email: endahkp@gmail.com

²⁾ PT Adhi Karya (Persero) Tbk. Jl. Pemuda No.82 Semarang

Abstract : *The increase of capacity of reinforced concrete structure flexibility can be conducted by strengthening that structure. This day, new type of materials have been introduced, that is carbon fiber wrap (CFW). This material usually used as shift strength on beam either column. However in this research, CFW is tested as flexibility strength on beam. This research using 4 test objects, one of test object as control beam (BK) and the other three objects with different installation variation pattern of CFW, that is the test object is given by a strength as wide as $1/2b$ along the beam reach (BCFW- $1/2b$), and than as wide as b (BCFW – b) and “U” model (BCFW – U). The test result shows that on BCFW – $1/2b$, the moment capacity ancrease at 72.22%, ductility increase at 119.3% to the control beam. While to the BCFW – b the momen capacity is 91.67%, ductility increase at 233.33%. While on BCFW – U the moment capacity increase only 8.33% and the ductility increase at 7.72%. From this test result, shows that strengthening using CFW that most effective is on the BCFW – $1/2b$. Because with the installation of CFW as wide as $1/2b$ able to increase the moment capacity significantly than the other test object. For BCFW – U, this strength pattern is not suggested because the moment capacity increase insignificantly.*

Keyword : *flexural strengthening, carbon fiber wrap*

Abstrak : Peningkatan kapasitas lentur struktur beton bertulang dapat dilakukan dengan melakukan perkuatan terhadap struktur. Saat ini material jenis baru telah diperkenalkan yaitu *carbon fiber wrap* (CFW). Material ini biasanya digunakan sebagai perkuatan geser baik pada balok maupun kolom. Namun dalam penelitian ini CFW diujicobakan sebagai perkuatan lentur pada balok. Penelitian ini menggunakan empat buah benda uji, satu benda uji sebagai balok kontrol (BK) dan tiga lainnya sebagai benda uji dengan pola variasi pemasangan CFW yang berbeda, yaitu benda uji diberi perkuatan selebar $\frac{1}{2} b$ sepanjang bentang balok (BCFW- $1/2b$), kemudian selebar b (BCFW- b) dan model U (BCFW-U). Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada BCFW- $\frac{1}{2} b$ kapasitas momen naik sebesar 72,22%, daktilitas naik 119,3% terhadap balok kontrol. Sedangkan pada BCFW – b kapasitas momen 91,71%, daktilitas naik 233,33%. Sementara untuk BCFW-U kapasitas momen hanya mengalami kenaikan sebesar 8,33% dan daktilitasnya naik 7,72%. Dari hasil pengujian ini ternyata perkuatan dengan CFW yang paling efektif adalah pada BCFW – $1/2b$. Karena dengan pemasangan CFW selebar $1/2b$ mampu meningkatkan kapasitas momen yang cukup signifikan dibandingkan benda uji lainnya. Untuk BCFW-U, pola perkuatan ini tidak disarankan karena peningkatan kapasitas momennya relatif kecil.

Kata kunci : kuat lentur, *carbon fiber wrap*.

PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan gabungan dua jenis bahan, yaitu beton yang mempunyai kuat tekan yang tinggi tetapi kuat tarik yang rendah dan baja tulangan yang mempunyai kuat tarik yang tinggi. Kedua jenis bahan ini dapat bekerja sama dengan baik sebagai bahan komposit, yang banyak dipakai dalam berbagai konstruksi.

Struktur bangunan yang terbuat dari

beton bertulang dapat menimbulkan masalah tersendiri apabila terjadi hal-hal yang di luar perencanaan awal, misalnya adanya perubahan fungsi bangunan, peningkatan beban kerja, kerusakan-kerusakan konstruksi akibat gempa bumi maupun kebakaran yang menyebabkan terjadinya degradasi mutu beton.

Struktur beton bertulang yang mengalami kerusakan, dapat diperbaiki dengan berbagai cara, diantaranya mengelupas selimut

betonnya kemudian dilakukan pengecoran kembali, memperluas penampang balok beton bertulang, atau melapisi bagian luarnya dengan baja maupun bahan komposit lain.

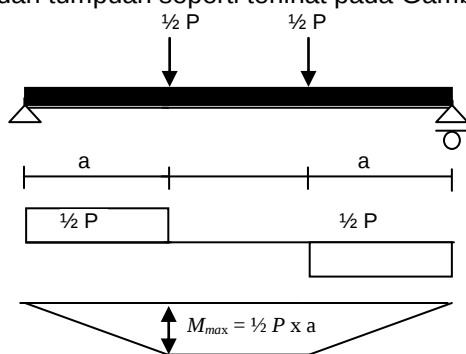
Carbon fiber wrap (CFW) adalah salah satu bahan komposit non-logam dari serat karbon yang biasa digunakan sebagai bahan perkuatan geser. Selain mempunyai kuat tarik yang tinggi yaitu 3500 MPa dengan modulus elastisitasnya 230.000 MPa, pemasangannya juga relatif mudah, sehingga bila CFW bisa digunakan sebagai perkuatan lentur, maka akan ada alternatif baru untuk perkuatan balok. Apalagi pemakaian CFW dapat disesuaikan ukurannya karena berbentuk lembaran seperti kain.

Dari latar belakang permasalahan di atas maka perlu dilakukan penelitian tentang pemakaian *carbon fiber wrap* sebagai perkuatan lentur dengan tujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang

TINJAUAN PUSTAKA

Kapasitas Lentur Murni

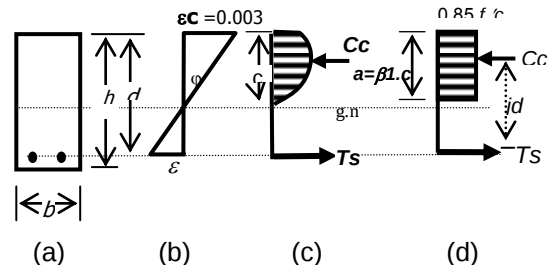
Lenturan murni adalah lenturan yang terjadi pada balok dengan mengkondisikan gaya lintangnya sama dengan nol, yaitu dengan meletakkan balok beton pada tumpuan sederhana yang dibebani secara simetris sejauh a dari tumpuan seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pola Pembebanan

Kuat Lentur Balok Tampang Persegi

Menurut SK SNI T-15-1991-03 kuat lentur nominal untuk balok penampang persegi dapat diturunkan dengan menggunakan tegangan persegi ekuivalen seperti Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi tegangan – regangan beton dimana :

- a = tinggi distribusi tegangan persegi ($a = \beta_1 \cdot c$)
- b = lebar balok
- c = jarak garis netral dari serat tekan terluar
- d = tinggi bersih balok (jarak serat tekan terluar terhadap tulangan tarik)
- β_1 = faktor koreksi
- C_c = gaya tekan dalam beton
- C_s = gaya tekan dalam tulangan tekan
- f_c = kuat tekan beton
- f_y = kuat leleh baja
- T_s = gaya dalam akibat tulangan tarik

Berdasarkan Gambar 2 maka :

$$C_c = 0.85 f_c \cdot a \cdot b \quad (1)$$

$$T_s = A_s \cdot f_y \quad (2)$$

Syarat kesetimbangan gaya-gaya dalam adalah

$$C_c + T_s = 0 \quad (3)$$

$$C_c = T_s \quad (4)$$

$$0.85 f_c \cdot a \cdot b = A_s \cdot f_y \quad (5)$$

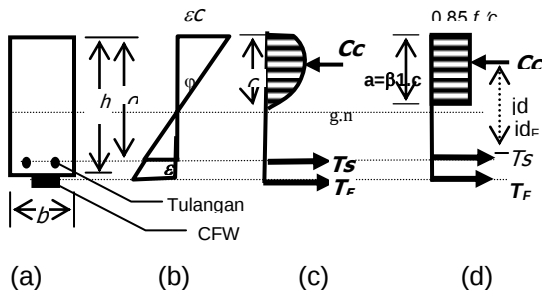
$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 f_c \cdot b} \quad (6)$$

Berdasarkan gaya-gaya yang bekerja di atas, momen nominal penampang adalah :

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot jd \quad (7)$$

Distribusi tegangan balok setelah diberi perkuatan adalah seperti Gambar 3, dimana T_F

adalah gaya tarik CFW dan jd_F adalah jarak dari Cc sampai T_F .



Gambar 3. Distribusi tegangan regangan beton dengan penambahan CFW

Berdasarkan Gambar 3 :

$$T_F = A_{SF} \cdot f_{yF} \quad \dots\dots\dots (8)$$

Syarat kesetimbangan gaya-gaya dalam penampang balok dengan perkuatan CFW :

$$C_c = T_s + T_F \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$0.85 f'_c a \cdot b = A_s \cdot f_y + A_{SF} \cdot f_{yF} \quad \dots\dots (10)$$

$$a = \frac{0.85 f'_c \cdot b}{A_s \cdot f_y + A_{SF} \cdot f_{yF}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

sehingga akan menghasilkan :

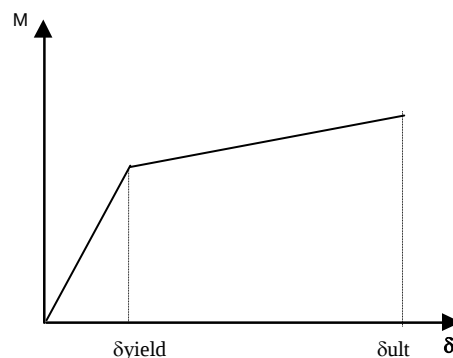
$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot jd + A_{SF} \cdot f_{yF} \cdot jd_F \quad \dots\dots\dots (12)$$

Berdasarkan kedua bentuk persamaan (7) dan (12), maka terlihat adanya penambahan pada kapasitas lenturnya sebesar $(A_{SF} \cdot f_{yF} \cdot jd_F)$. Sehingga dapat dikatakan bahwa dengan penambahan CFW kapasitas lenturnya akan meningkat.

Daktilitas

Daktilitas menyatakan suatu kemampuan dari struktur untuk mengalami lendutan yang besar tanpa mengalami penurunan kekuatan yang berarti. Dalam penelitian ini besarnya nilai daktilitas berdasarkan perbandingan antara defleksi

maksimum dengan defleksi ketika leleh ($\delta_{ult}/\delta_{yield}$) dimana daktilitas berdasarkan displacement, seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Hubungan Momen - Defleksi

REVIEW PENELITIAN TENTANG BALOK YANG DIPASANG CFW

Gang Rao dan Vijay (1998) meneliti balok beton bertulang dengan luas tulangan tarik sebesar 1,38 % dilapis dengan *Carbon fiber wrap* 0,122 % pada bagian bawah balok (ekivalen dengan penulangan seluas 2,29 %). Hasil penelitiannya didapat bahwa penambahan *Carbon fiber wrap* akan meningkatkan tegangan ultimit balok sebesar 57%, defleksi akan berkurang sebesar 79 % selama tahap *pre-cracking* dan 48 % selama tahap *post-cracking*, dibanding balok tanpa perkuatan.

Januar dan Triwiyono (2000) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa kolom dengan perkuatan *carbon fiber jacket* yang dipasang dengan arah serat radial (mengelilingi kolom) memiliki beban lateral lebih besar 75,566 % dibanding kolom asli.

Purwanto dkk (2001) mengungkapkan bahwa dalam perkuatan lentur dengan *carbon fiber strips* dan geser dengan *carbon fiber wrap* maka kekakuannya naik 5,49 % terhadap balok pasca bakar dengan perkuatan lentur saja, naik 8,04 % terhadap balok pasca bakar tanpa perkuatan dan turun sebesar 18,77 % terhadap

balok normal. Kuat geser Ultimit berturut – turut akan naik sebesar 65,64 % terhadap balok pasca bakar dengan perkuatan lentur, 75,68 % terhadap balok pasca bakar tanpa perkuatan dan 52,63 % terhadap balok normal.

Sementara menurut PT.SIKA Indonesia selaku produsen CFW, penelitian mengenai penggunaan CFW masih sebatas perkuatan geser belum sampai pada perkuatan lenturnya. Namun perkuatan geser akan menyebabkan *debonding* yaitu lepasnya ikatan antara beton dengan CFW sehingga dapat dikatakan bahwa material belum bisa bekerja secara optimal.

METODE PENELITIAN

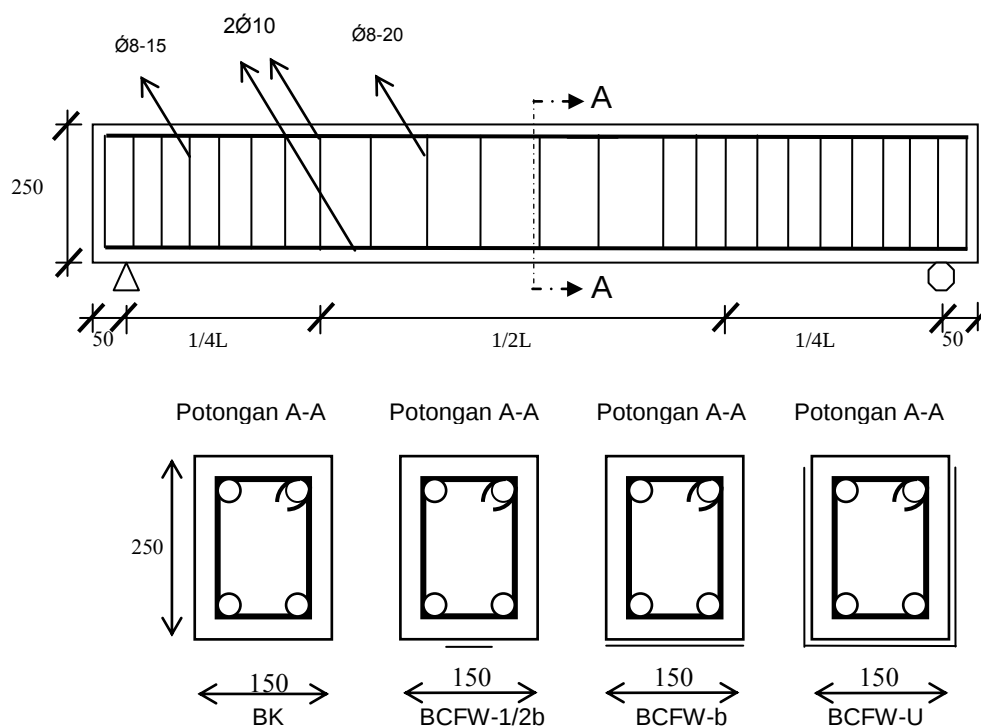
Benda uji dalam penelitian ini adalah balok beton bertulang bentang 2000 mm dengan lebar 150 mm dan tinggi 250 mm. Benda uji terbuat dari beton dengan kuat tekan $f'_c = 34,4$ MPa. Dua buah tulangan tarik diameter 10 mm ($2\phi 10$ mm) dengan tegangan leleh $f_y = 340$ MPa ditempatkan pada kedalaman 203,5 mm.

Agar terjadi keruntuhan lentur maka di daerah geser balok diperkuat dengan tulangan geser yaitu dengan menempatkan begel-begel berdiameter 8 mm, seperti pada Gambar 5.

Carbon fiber wrap dipasang pada permukaan bawah balok. Bahan yang dipakai adalah type *Sika Wrap® Hex-230 C* dengan lebar 610 mm dan tebal 0,13 mm. Pemasangan CFW seperti terlihat pada Gambar 6.

Balok uji dibuat sebanyak 4 buah, yaitu 1 buah balok uji sebagai balok kontrol tanpa perkuatan (BK) dan 3 balok yang lain diberi CFW dengan variasi yang berbeda yaitu BCFW-1/2b, BCFW-b dan BCFW-U (Gambar 5).

Pembebanan dilakukan dengan bantuan *hidraulick jack* dan *load cell*. Untuk mengetahui defleksi yang terjadi maka pada balok uji dipasang tiga buah LVDT (*Linear Variable*



Gambar 5. Penulangan Benda Uji

Displacement Transducer). Dua buah ditempatkan pada tumpuan dan sebuah di tengah bentang balok.

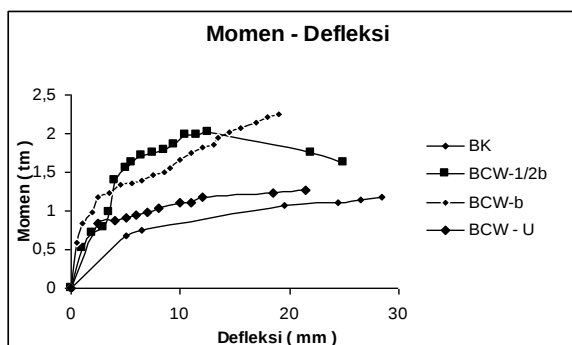
Untuk mengukur regangan pada beton digunakan *strain gauge* yang dipasang pada sisi tekan terluar balok, sedangkan untuk mengukur regangan tarik *strain gauge* dipasang pada tulangan dan CFW. Data pertambahan beban, defleksi dan regangan tercatat melalui *data logger*.



Gambar 6. Pemasangan CFW pada benda uji

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Dari pengujian 4 balok akan dibahas perilaku masing – masing dan perbandingannya dapat dilihat dalam Gambar 7 dan Tabel 1.



Gambar 7. Diagram Momen – Defleksi

Berdasarkan data uji Balok Kontrol tulangan tarik mulai leleh pada lendutan sebesar 5 mm dengan nilai regangan 0,0016 dan beban 2,1 ton. Sementara itu balok masih dapat menahan beban hingga pada akhirnya runtuh pada beban sebesar 3,6 ton. Besarnya nilai daktilitas dapat diketahui dari diagram hubungan momen – defleksi. Untuk balok kontrol besarnya nilai daktilitas adalah perbandingan nilai defleksi maksimum terhadap defleksi leleh, yaitu 28,5 dibagi 5 sama dengan 5,7.

Pada BCFW-1/2b tulangan tarik mulai leleh pada beban 2,8 ton dengan nilai regangan sebesar 0,0017. Pembebanan terus diberikan, tulangan tarik dan CFW saling bekerja sama menahan gaya tarik yang bekerja pada balok, sampai pada beban 5 ton tulangan tarik sudah leleh ditandai dengan pertambahan regangan CFW yang cukup besar dari 0,0017 meningkat tajam menjadi 0,0026. Pada saat tulangan tarik mulai leleh, CFW mulai berperan sehingga kapasitas lentur balok meningkat. Hal ini dibuktikan dengan bertambahnya beban (P) yang bekerja pada balok hingga regangan CFW menurun, yaitu pada beban 5,9 ton. Besarnya nilai daktilitas dapat diketahui dari diagram hubungan momen – defleksi. Untuk BCFW – 1/2b besarnya nilai daktilitas adalah 12,5. Besarnya beban maksimum pada BCFW – 1/2b ini adalah 6,2 ton.

Pada BCFW-b tulangan tarik mulai leleh pada beban 3 ton dengan nilai regangan sebesar 0,0017. Pada saat tulangan tarik mulai leleh, CFW mulai berperan sehingga kapasitas lentur balok meningkat. Hal ini dibuktikan dengan bertambahnya beban yang bekerja pada balok hingga regangan CFW menurun, yaitu pada beban 6,8 ton. Besarnya nilai daktilitas dapat diketahui dari diagram hubungan

momen – defleksi. Untuk BCFW – b besarnya nilai daktilitas sebesar 19. Besarnya beban maksimum pada BCFW – b ini adalah 6,9 ton.

Pada BCFW – U bahwa tulangan tarik mulai leleh pada beban 1,6 ton dengan nilai regangan sebesar 0,0019. Pada BCFW – U ini CFW rusak karena dengan pola pemasangan model – U ini serat CFW searah dengan pola retak balok sehingga tidak berperan sama sekali. Untuk BCFW – U besarnya nilai daktilitas adalah 6,14. Besarnya beban maksimum pada BCFW – U ini adalah 3,9 ton.

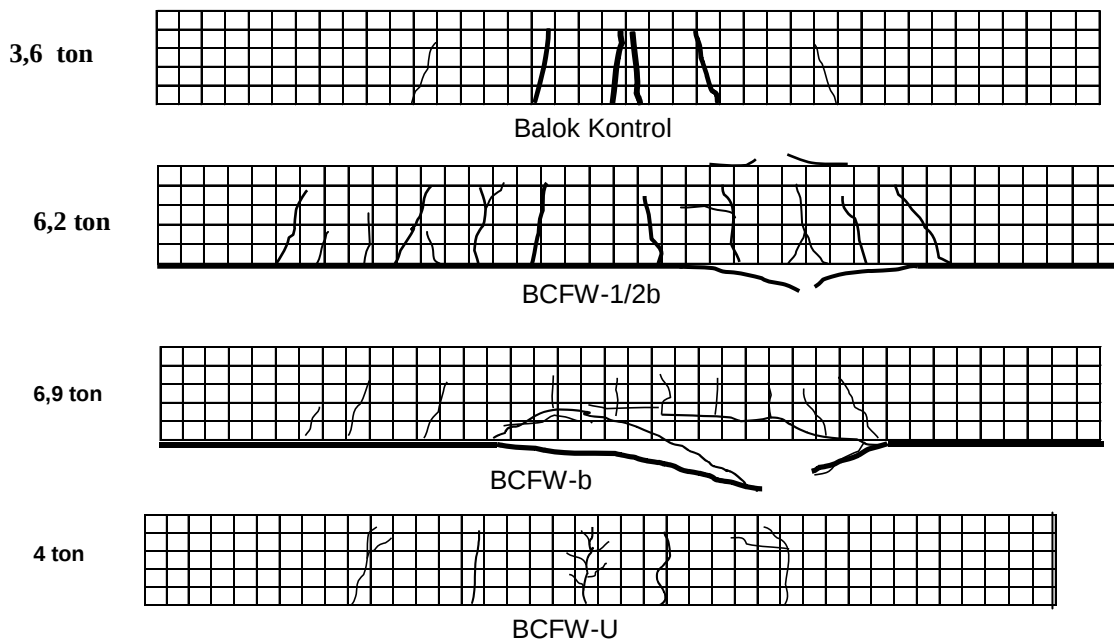
Walaupun mengalami regangan namun nilainya relatif kecil bahkan pada beban 2,7 ton *Carbon fiber wrap* ini rusak. Perbandingan daktilitas benda uji dapat dilihat pada Gambar 9.

Pola Retak dan Kapasitas Lentur

Dari Tabel 1 dapat diketahui bahwa pada BCFW-1/2b dan BCFW-b beban maksimum dan momen maksimum meningkat masing – masing 72,22 % dan 91,67 % dari balok kontrol. Sementara untuk BCFW-U naik 8,33 %.

Tabel 1. Hasil Pengujian

Hasil pengujian	



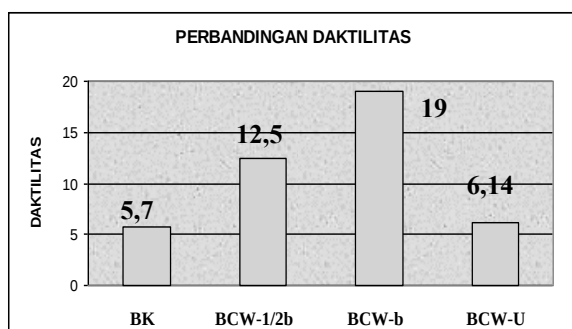
Gambar 8. Pola retak

Berdasarkan hasil pengamatan secara visual diketahui bahwa retak awal yang ditandai dengan munculnya retak rambut di bagian tarik balok pada BK terjadi pada beban 1,6 ton, BCFW-1/2b terjadi pada beban 2 ton, BCFW-b terjadi pada beban 2,4 ton, BCFW – U terjadi pada beban 1,2 ton.

Berdasarkan Gambar 8 pola retak yang terjadi pada benda uji dapat menggambarkan model keruntuhan dari benda uji yang bersangkutan. Dari pola retak benda uji dapat diketahui bahwa balok BK dan balok BCFW-U mengalami keruntuhan lentur. Hal ini bisa dilihat bahwa pola retaknya cenderung bergerak dari sisi tarik lurus ke atas.

Pada BCFW-1/2b dan BCFW-b disamping mengalami keruntuhan geser, dengan perkuatan lentur ini juga mengalami kehancuran pada bagian bawah tepat di titik pembebanan.

Model balok kontrol pola keruntuhannya adalah lentur sedangkan BCFW-1/2b keruntuhan geser dengan arah retakan miring yang bergerak dari sisi bawah menuju titik pembebanan. Pola keruntuhan pada BCFW-b adalah keruntuhan geser sama seperti dengan BCFW-1/2b, sedangkan BCFW-U model keruntuhannya adalah pola keruntuhan lentur.



Gambar 9. Perbandingan Daktilitas Balok Uji

Perbandingan Hasil Eksperimen - Teoritis

Secara keseluruhan hasil eksperimen terdapat perbedaan nilai dengan hasil analisis tampang. Besarnya perbedaan nilai tersebut secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan hasil eksperimen dan teoritis

Benda Uji	Momen Ultimit (Tm)		P.Ult (Ton)		Rasio
	Eksp.	Teoritis	Eksp.	Teoritis	
BK	1,17	1,02	3,6	3,15	1,15
BCW-1/2b	2,015	1,82	6,2	5,6	1,11
BCW-b	2,243	2,6	6,9	8,01	0,86
BCW-U	1,2675	-	3,9	-	

Kekakuan Benda Uji

Kekakuan benda uji dapat diketahui dari besarnya sudut kemiringan garis linear pada gambar diagram perbandingan momen – defleksi seperti yang terlihat pada gambar 7. Semakin besar sudut kemiringannya, semakin besar pula kekakuan benda uji tersebut. BCFW-b paling besar kekakuannya dibandingkan benda uji lainnya karena sudut kemiringannya paling besar. Disusul berturut-turut BCFW-1/2 b, BCFW-U dan BK.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari hasil pengujian dan pembahasan adalah sebagai berikut:

1. Perkuatan lentur dengan CFW selebar 1/2b (BCFW- 1/2b) pada bagian sisi tariknya menyebabkan kenaikan kapasitas momen sebesar 72,22 %, daktilitas naik sebesar 119,3 % terhadap balok kontrol. Efektifitas CFW sebesar 36 %.
2. Perkuatan lentur dengan CFW selebar b (BCFW-b) pada bagian sisi tariknya menyebabkan kenaikan kapasitas momen

- sebesar 91,71 %, daktiliitas balok naik sebesar 233,33 % terhadap BK. Efektifitas CFW sebesar 48,67 %.
3. Perkuatan lentur dengan CFW model U (BCFW-U) dapat meningkatkan kapasitas momen sebesar 8,33 %, daktiliitas balok naik sebesar 7,72 % terhadap BK. Efektifitas *Carbon fiber wrap* sebesar 1,33 %.
 4. Perkuatan lentur menggunakan CFW dapat meningkatkan kapasitas lentur balok. Namun BCFW-b yang paling signifikan jika dibandingkan terhadap BK. Pada BCFW – U pemasangan CFW model tersebut sangat tidak efektif, karena seratnya searah dengan pola retak yang terjadi pada balok.
 6. Pada BCFW–1/2b walaupun kapasitas momennya meningkat cukup signifikan terhadap balok kontrol namun peningkatan daktilitasnya masih lebih kecil daripada BCFW-b. Tetapi jika dilihat dari lebar penampang terhadap peningkatan kapasitas momen BCFW – 1/2b ini relatif lebih efisien dibandingkan dengan BCFW- b.
 7. Pada BCFW–b walaupun lebar perkuatannya penuh namun ternyata tidak diikuti dengan peningkatan kapasitas momennya bila dibandingkan dengan BCFW – 1/2b. Hal ini disebabkan struktur beton tidak dapat menahan geser yang terjadi akibat pembebanan sehingga yang terjadi justru betonnya pecah. Seandainya beton masih mampu menahan geser diharapkan CFW juga dapat memberikan kontribusi lebih pada eksperimen BCFW – b.
 8. Pemakaian bahan CFW untuk perkuatan lentur akan lebih efektif jika diikuti oleh perkuatan gesernya. Hal ini diketahui dari keruntuhan yang terjadi pada BCFW –1/2b dan BCFW–b adalah keruntuhan geser.

9. Pada eksperimen ini CFW mengalami putus pada daerah geser baik pada BCFW 1/2b maupun BCFW-b. Hal ini dikarenakan ketika beton runtuh CFW mendapatkan hentakan secara tiba–tiba sehingga mengakibatkan putus. Dalam hal ini dikatakan bahwa Epoxy cukup kuat menahan beban sehingga tidak terjadi debonding antara beton dengan CFW.

Saran

Perlu diadakannya penelitian pola pemasangan CFW yang lebih variatif, misalnya perkuatan lentur dibarengi dengan perkuatan gesernya, dengan lebar yang lebih variatif., dan dilaksanakan pada struktur lain misalnya plat.

DAFTAR PUSTAKA

- Johanes Januar Sudjati, A. Triwiyono, April 2003, *Perkuatan Kolom Beton Bertulang Dengan Carbon Fiber Jacket*, Jurnal Teknik Sipil Vol. 3 No.2, Universitas Atma Jaya Yogyakarta
- Ngudiyono, 2001, *Perilaku Lentur dan Geser Balok Beton Bertulang Pascabakar dengan Carbon Fiber Strips*, Tesis FT UGM Yogyakarta
- Purwanto, Edi, 2001, *Perkuatan Lentur dan Geser Balok Beton Bertulang Pascabakar dengan Carbon Fiber Strips dan Carbon fiber wrap*, Tesis, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gajah Mada Yogyakarta
- Purwanto, Suhendro, Triwiyono, Januar 2002, *Perkuatan Lentur Dan Geser Balok Beton Bertulang Pasca Bakar Dengan Carbon Fiber Strips Dan Carbon fiber wrap*, Forum Teknik Sipil No.XI / 1, FT. Sipil UGM Yogyakarta
- Santosa H M, 2000, *Sika Strengthening System*, PT. Sika Nusa Pratama, , Semarang
- Paterson James and Denis Mitchell, May 2003, *Seismic Retrofit of Shear Walls with Headed Bars and Carbon Fiber Wrap*, Journal of Structural Engineering,