

# **PENGGUNAAN *CARBON FIBER REINFORCED PLATE* SEBAGAI BAHAN KOMPOSIT EKSTERNAL PADA STRUKTUR BALOK BETON BERTULANG**

---

**Agung Budiwirawan, Endah Kanti Pangestuti**

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang (UNNES)

## **ABSTRAK**

The flexural strengthening of reinforced concrete beam can be considered with applied externally bonded steel plate or carbon fiber composite. This external plate is bonded to the tension face of the concrete beam. Experimental study on reinforced concrete strengthening with Carbon Fiber Reinforced Plate (CFRP) has been conducted to estimate the effectiveness of using CFRP on the concrete structure as flexural strengthening material and external reinforcement. Two beams were provided in this study to test the flexural strengthening effect of externally bonded CFRP composite. One of them was used for normal condition (BKT). The other specimen is the reinforced concrete beam with single steel reinforcement and laminated CFRP (BKTC). On the second beam, CFRP laminated on the bottom of beam with epoxy. Dimension of the beams are 150/250 mm with effective length 1900 mm. All beams were tested using two-point loading to get pure bending in the middle span. The result of the experimental research showed that the ultimate load of the beam with externally bonded CFRP( BKTC) is 49% higher than BKT; stiffness of the strengthened beam BKTC is 68% higher than BKT; and cracking moment of the strengthened beam BKTC is 50% higher than BKT. However, the deformation and ductility of the strengthened beam BKTC is lower than BKT 77.6% and 73% respectively. The failure phenomenon of the concrete beam with laminated CFRP is prior debonding CFRP that makes maximum performance of the CFRP not be reached.

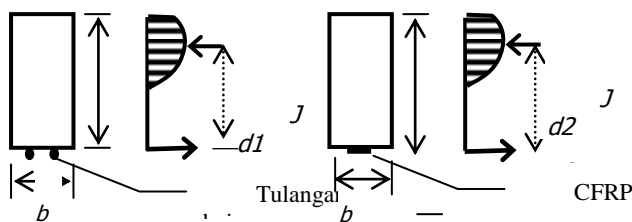
**Key words** : CFRP, flexural strengthening, debonding failure

## **PENDAHULUAN**

Beton merupakan material yang banyak digunakan pada bidang konstruksi bangunan sipil. Beberapa alasan yang mendasari penggunaan material ini karena bahan dasarnya mudah didapatkan, mempunyai kuat tekan yang besar, tahan air dan cuaca, serta mudah dibentuk. Akan tetapi beton mempunyai perilaku yang spesifik yaitu mempunyai kuat tarik yang lebih kecil dari kuat tekannya. Karena itu material beton umumnya digabungkan dengan material lain yang mempunyai kekuatan tarik besar, seperti baja tulangan atau baja profil, sehingga merupakan kesatuan struktur yang komposit.

Besarnya kapasitas momen yang dihasilkan oleh beton bertulang salah satunya ditentukan oleh penempatan tulangan baja di dalam beton (jarak  $jd$ ). Semakin besar jarak  $jd$  maka kapasitas momen ( $M$ ) yang terjadi makin besar pula. Agar kapasitas momen balok dapat bekerja optimal maka tulangan harus diletakkan di serat tarik balok yang paling jauh, dengan kata lain untuk mendapatkan  $jd$  yang maksimal maka tulangan baja ditempatkan pada serat tarik terluar beton seperti terlihat pada Gambar 1.

Namun demikian hal tersebut menyebabkan tidak tersedianya lekatan yang cukup antara tulangan baja dan beton, sehingga aksi komposit yang diharapkan tidak dapat terjadi. Terlebih lagi baja tulangan merupakan material yang rentan terhadap korosi apabila tanpa perlindungan, sehingga cara menjadi tidak efektif.



**Gambar 1. Penempatan baja dan CFRP pada balok.**

Di lain pihak ada *Carbon Fiber Reinforced Plate* (CFRP) yang menawarkan beberapa keunggulan yang tidak dimiliki oleh baja tulangan yaitu : mempunyai kuat tarik yang jauh lebih tinggi dari kuat tarik baja tulangan, yaitu sebesar 2800 MPa, mempunyai kekakuan yang cukup tinggi dimana modulus elastisitasnya ( $E$ ) 165.000 MPa, tidak mengalami korosi karena terbuat dari bahan non logam, mempunyai penampang yang kecil dan ringan dengan berat 1,5 g/cm<sup>3</sup>, serta mudah pemasangannya.

Penelitian yang dilakukan ini merupakan kajian eksperimental dengan penambahan CFRP pada balok beton bertulang sebagai tulangan eksternal. Penempatannya secara eksternal di bagian luar balok tanpa perlindungan tidak akan menyebabkan korosi karena terbuat dari bahan non-logam. Selain itu jarak  $jd$  dapat dioptimalkan sehingga dapat menghasilkan kapasitas momen lentur yang maksimal pula.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui manfaat penggunaan CFRP sebagai tulangan eksternal pada balok beton bertulang, sehingga dapat diketahui sejauh mana pengaruhnya terhadap kapasitas momen lentur yang dihasilkan.

## METODE PENELITIAN

### Pembuatan Benda Uji

Benda uji dalam penelitian ini adalah balok beton bertulang dengan ukuran lebar 150 mm, tinggi 250 mm dan bentang 2000 mm. Benda uji terbuat dari beton dengan kuat tekan rata-rata ( $f'_c$ ) = 32,97 MPa. Dua buah tulangan tarik diameter 13 mm ( $2\varnothing 13$  mm) dengan tegangan leleh  $f_y$  = 336 MPa ditempatkan pada kedalaman 203,5 mm (Gambar 5). Penulangan direncanakan dengan rasio luas tulangan ( $\rho$ ) yang memenuhi persyaratan sistem tulangan *underreinforced*.

### Parameter Pengujian

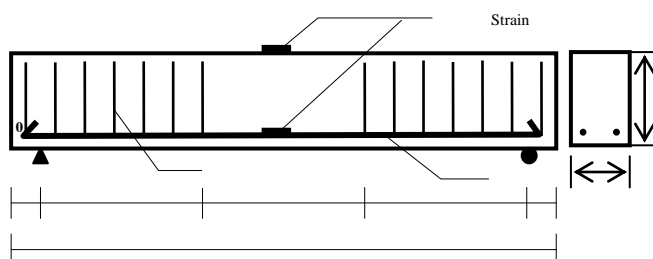
Dalam penelitian ini jumlah benda uji yang dibuat sebanyak dua buah, yaitu : 1 buah balok dengan tulangan tunggal tanpa CFRP (BKT) dipakai sebagai balok kontrol, dan 1 buah balok tulangan tunggal diberi CFRP pada serat tariknya (BKTC). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 8.

Data hasil pengujian lentur kedua benda uji tersebut dibandingkan untuk mengetahui perubahan respon struktur balok akibat penambahan CFRP.

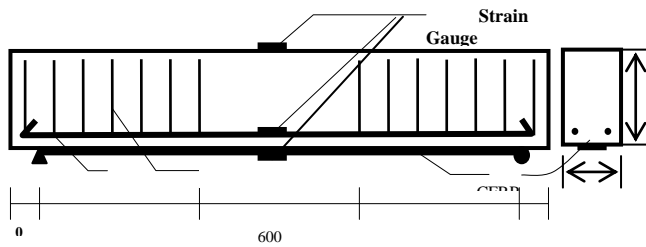
### Set Up Pengujian

*Set up* pengujian seperti terlihat pada Gambar 2. Benda uji balok beton bertulang ditempatkan pada *loading frame* dan tumpuan dikondisikan sendi – roll pada kedua ujungnya. Pembebanan dilakukan di dua titik secara simetris dengan jarak 600 mm antar titik pembebanan dan sejauh 650 mm dari masing-masing tumpuan. Pembebanan dilakukan dengan bantuan *hidraulick jack* dan *load cell*. Untuk mengetahui defleksi yang terjadi maka pada balok uji dipasang tiga buah LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*). Dua buah ditempatkan pada tumpuan dan sebuah di tengah bentang balok.

Untuk mengukur regangan pada beton dipasang *strain gauge* pada sisi tekan terluar balok, sedangkan untuk mengukur regangan tarik maka dipasang *strain gauge* pada tulangan dan CFRP. Data pertambahan beban, defleksi dan regangan tercatat melalui *data logger*. Pembebanan akan dihentikan jika benda uji sudah runtuh dan *data logger* yang membaca besarnya beban dari *load cell* tidak bertambah.



a. Balok tulangan tunggal (BKT)



b. Balok tulangan tunggal ditambah CFRP (BKTC)

**Gambar 2. Balok uji**

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Kuat Tekan Beton

Adukan beton pada penelitian ini dirancang Menurut Standar Departemen Pekerjaan Umum dengan kuat tekan beton rencana sebesar 30 MPa. Perbandingan campuran beton berdasarkan berat antara semen : pasir : kerikil adalah 1 : 2,03 : 3,01 dengan faktor air semen 0,61 dan nilai slump 7,5 cm. Berdasarkan hasil uji kuat tekan silinder ukuran 150 mm x 30 mm kuat tekan beton rata-rata yang didapat 32,97 MPa lebih besar dari kuat tekan beton rencana sebesar 30 MPa.

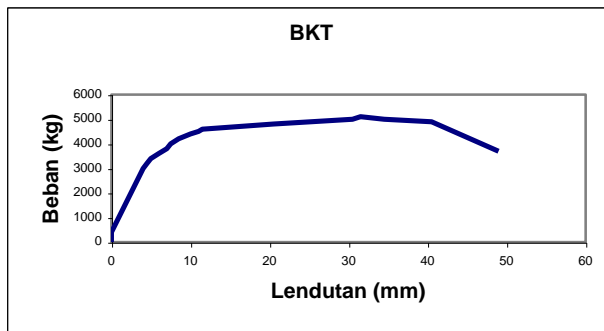
### Respon Balok Terhadap Pembebanan

#### Balok BKT

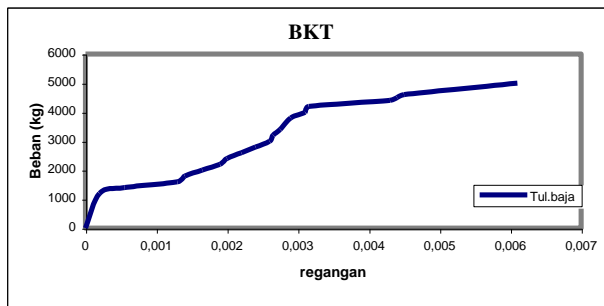
Retak awal (*first crack*) terlihat pada beban 1,2 ton yang menandakan beton memasuki *cracked stage* artinya beton sudah melampaui regangan tariknya, sehingga gaya tarik yang timbul dipikul oleh tulangan hal itu dengan munculnya retak rambut di daerah lentur balok.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa sampai pada beban 1,2 ton terjadi penambahan lendutan yang sangat kecil, artinya respon beban-lendutan pada balok BKT menunjukkan kekakuan yang besar.

Pada Gambar 4 terlihat penambahan regangan yang sangat kecil pada tulangan baja di awal pembebanan hingga beban 1,2 ton, yang membuktikan bahwa dalam kondisi *uncracked stage* beton masih mampu menahan gaya tarik, sehingga peran tulangan dalam memikul gaya tarik masih sangat kecil.



**Gambar 3. Hubungan antara P-δ balok BKT**



**Gambar 4. Hubungan antara P-ε balok BKT**

Ketika beban ditingkatkan hingga beban 5,1 ton regangan pada serat tekan beton sudah melampaui batas ultimit  $\epsilon_{cu} = 0,0030$  (Gambar 10), sehingga pada serat tekan beton mulai mengalami retak horisontal atau terjadi *crushing concrete*, seperti terlihat pada Gambar 5. Setelah itu pertambahan lendutan semakin bertambah sampai dengan balok runtuh hingga mencapai lendutan maksimum sebesar 49 mm.

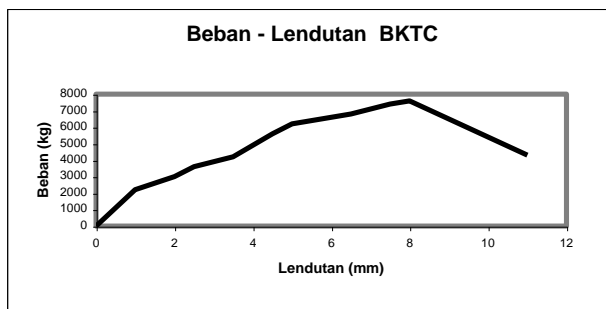


**Gambar 5. Pola keruntuhan BKT**

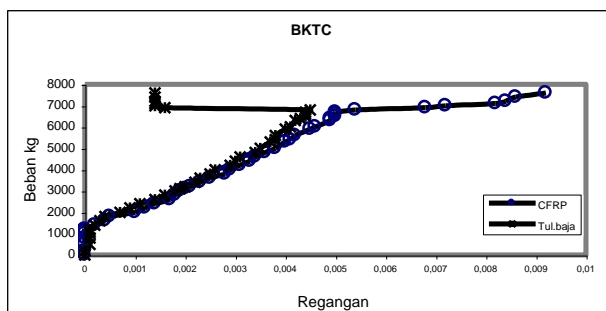
### Balok BKTC

*First crack* terlihat pada beban 1,8 ton yang menandakan beton sudah melewati batas regangan tariknya (*cracked stage*), sehingga peran tulangan dan CFRP mulai berarti dalam

memikul gaya tarik yang bekerja. Hal itu terlihat pada Gambar 7 grafik mulai terlihat agak landai setelah beban 1,8 ton yang artinya kekakuan balok mulai turun, sedangkan pada Gambar 7 membuktikan bahwa gaya tarik yang timbul sudah dipikul sepenuhnya oleh tulangan dan CFRP. Kedua grafik beriringan sampai pada beban 5,4 ton, artinya tulangan baja dan CFRP masih bekerja sama dalam memikul gaya tarik yang terjadi. Setelah beban melewati 5,4 ton perbedaan regangan tulangan dan CFRP semakin besar hal itu disebabkan karena terjadi slip antara tulangan dan beton sehingga transfer tegangan dari beton ke tulangan menjadi kecil. Kondisi tersebut berlangsung sampai mendekati beban 7,0 ton.

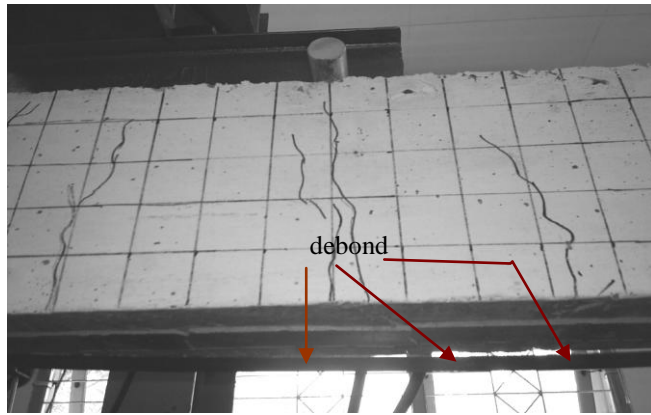


Gambar 6. Hubungan P- $\epsilon$  balok BKTC



Gambar 7. Hubungan antara P- $\epsilon$  balok BKTC

Pada beban 7,6 ton CFRP mengalami *debonding* atau terlepas dari beton, akibatnya gaya tarik yang bekerja tidak ada yang menahan sehingga balok mengalami keruntuhan, seperti terlihat pada Gambar 8. *Debonding* CFRP terjadi pada saat regangan CFRP mencapai 0,0092 atau 54,4 % dari regangan yang diharapkan bisa terjadi yaitu sebesar 0,0169, sedangkan tegangan tarik yang bekerja sebesar 1518 MPa atau 54,4 % dari tegangan tarik yang bisa dicapai yaitu sebesar 2800 MPa. Jadi dapat dikatakan bahwa CFRP belum bekerja optimal karena terjadi *debonding* pada material tersebut.



**Gambar 8. Pola keruntuhan BKTC**

### **Beban Ultimit**

Dari Gambar 8 terlihat bahwa balok BKT dapat mencapai beban ultimit sebesar 5,1 ton sedangkan BKTC mampu mencapai 7,6 ton. Jadi penambahan CFRP pada balok dapat meningkatkan beban ultimit sebesar 49 %.

Dari Tabel 1 terlihat bahwa balok BKT bekerja optimal 95,8 % dari hasil perhitungan teoritisnya. Sedangkan kemampuan balok BKTC hanya sebesar 58,6% dari hasil teoritisnya. Perhitungan teoritis yang dilakukan menganggap bahwa CFRP dan beton bekerja sempurna sebagai struktur komposit. Akan tetapi pada eksperimen yang dilakukan terjadi *debonding* dari CFRP terlebih dulu sebelum material tersebut bekerja optimal. Walaupun begitu kemampuan BKTC masih lebih tinggi 49 % dari pada BKT sebagai balok normal.

**Tabel 1. Beban ultimit balok**

Kode Benda uji	P (ton)		
	Ekspr.	Teoritis	eksp/teo
BKT	5,1	5,32	0,958
BKTC	7,6	12,97	0,586

### **Daktilitas**

Daktilitas pada balok diukur berdasarkan lendutan maksimum dibagi dengan lendutan pada saat leleh ( $\delta_u/\delta_y$ ). Lendutan maksimum yang terjadi pada BKTC yaitu 11 mm lebih kecil dibandingkan dengan lendutan maksimum pada balok BKT yaitu 49 mm. Jadi dengan demikian penambahan CFRP dapat menurunkan daktilitas sebesar 73 %. Besar lendutan selengkapnya dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2. Besar lendutan pada BKT dan BKTC**

Benda Uji	$\delta u$ (mm)	$\delta y$ (mm)	Daktilitas ( $\delta u/\delta y$ )
BKT	49	1,2	40,833
BKTC	11	1,0	11

Keterangan :  $\delta y$  = lendutan saat leleh  
 $\delta u$  = lendutan maksimum

### Kuat Lentur

Dari hasil pengujian diketahui besarnya beban maksimum yang mampu ditahan oleh balok beton, kemudian beban tersebut digunakan untuk menghitung kuat lentur ultimit yang terjadi. Nilai kuat lentur ultimit eksperimen dan teoritis selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3. Kuat lentur BKT dan BKTC**

Kode Benda uji	M (ton-m)	
	Eksperimen.	Teoritis
BKT	1,6575	1,7287
BKTC	2,47	4,215

Tabel 5 menunjukkan bahwa dari hasil eksperimen ada peningkatan kuat lentur sebesar 49% setelah balok diberi CFRP.

### Retak Awal

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa balok BKT retak awal terjadi pada beban 1,2 ton sedangkan pada balok BKTC retak awal terjadi pada beban 1,8 ton. Retak awal ini ditandai dengan retak rambut sebagai indikasi telah terlampauinya regangan tarik beton. Dengan demikian pemasangan CFRP pada balok dapat menghambat propagasi dan perkembangan retak, yang dibuktikan dengan meningkatnya beban pada saat terjadi *first crack* yaitu sebesar 50%.

### Pola keruntuhan

Pola keruntuhan yang terjadi pada balok tanpa CFRP (BKT) adalah keruntuhan lentur sedangkan yang diberi CFRP (BKTC) adalah *debonding failure* yaitu lepasnya ikatan antara pada permukaan pelat CFRP dengan beton. Pengamatan pola keruntuhan terhadap balok uji selama pengujian dapat dilihat pada Gambar 12 dan 15.



## **Efektifitas CFRP**

Berdasarkan dari hasil pengujian balok-balok yang diberi CFRP secara eksternal menunjukkan bahwa kinerja CFRP belum maksimal pada balok. Pada saat beban pada balok BKTC mencapai ultimit, regangan CFRP yang terjadi sebesar 0,0092, dengan demikian maka kuat lentur yang bekerja sebesar 1518 MPa atau hanya 54% dari yang kuat lentur yang bisa dicapai yaitu 2800 MPa. Hal itu terjadi karena terjadinya *debonding* pada CFRP terlebih dahulu sebelum CFRP bekerja secara optimal dalam meningkatkan kapasitas momennya.

## **SIMPULAN DAN SARAN**

### **Simpulan**

1. Penambahan pelat CFRP secara eksternal pada balok dapat menghambat munculnya *first crack*, dimana beban saat retak awal meningkat sebesar 50%.
2. Penambahan pelat CFRP secara eksternal pada balok dapat meningkatkan beban ultimit kuat lentur sebesar 49 %, dan dapat meningkatkan kekakuan sebesar 68%, akan tetapi daktilitas turun sebesar 73% dan lendutannya turun 77,6 %.
3. Pola keruntuhan yang terjadi adalah *debonding failure* yaitu lepasnya ikatan antara beton dengan CFRP, sehingga dapat dikatakan bahwa material komposit tersebut belum bisa bekerja secara optimal.
4. CFRP yang digunakan pada balok tidak bekerja optimal, dimana pada BKTC kuat tarik yang bekerja hanya sebesar 54 % dari kuat tarik yang bisa dicapai dan pada BF kuat tarik CFRP yang bekerja hanya sebesar 41 %.

### **Saran**

Mengingat dari hasil penelitian ini dan beberapa penelitian lain yang mempergunakan CFRP terdapat kesamaan pada pola keruntuhan yaitu terjadinya *debonding failure* yang mengawali keruntuhan pada balok, maka perlu diadakan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi keadaan tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aprile, Alessandra; Spacone, Enrico; Limkatanyu, Suchart, 2001, *Role of Bond in RC Beams Strengthened with Steel and FRP Plates*, Journal of Structural Engineering, December 2001, page 1445 – 1452.
- Harmon, Thomas; Kim, Yoo, John; Kardos; Johnson, Timothy; Stark, Andrew, 2003, *Bond of Surface-Mounted Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, ACI Structural Journal, V.100, No. 5, September – October 2003, page 557 – 564.
- Kuriger, Rex ; Sargand, Shad; Ball, Ryan dan Alam, Khairul, 2001, *Analysis of Composite Reinforced Concrete Beams*, Department of Mechanical Engineering, Ohio University.
- Lorenzis, Laura dan Nanni, Antonio, 2001, *Characterization of FRP Rods as Near Surface Mounted Reinforcement*, Journal of Composite for Construction, May 2001, page 114 – 121.
- Niu, Hedong and Wu, Zishen, *Analytical Modelling on Debonding Failure of FRP Strengthened RC Flexural Structures*.
- Purwanto, Edi , 2001, *Perkuatan Lentur dan Geser Balok Beton Bertulang Pascabakar dengan Carbon Fiber Strips dan Carbon Wrapping*, Tesis, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Park and Paulay, 1974, *Reinforced Concrete Structures*, Department of Civil, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.