

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

The Use of Carbon Fiber Reinforced Plate as Externally Bonded Composite Material of Reinforced Concrete Beam Structure

Endah Kanti Pangestuti

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang (UNNES)
Gedung E4, Kampus Sekaran Gunungpati, Semarang 50229, email : endahkp@gmail.com

ABSTRACT

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 (BT). The other specimen is the reinforced concrete beam with single steel reinforcement and laminated CFRP (BTF). 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 (BTF) is 49% higher than BT; stiffness of the strengthened beam BTF is 68% higher than BT; and cracking moment of the strengthened beam BTF is 50% higher than BT. However, the deformation and ductility of the strengthened beam BTF is lower than BT 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.

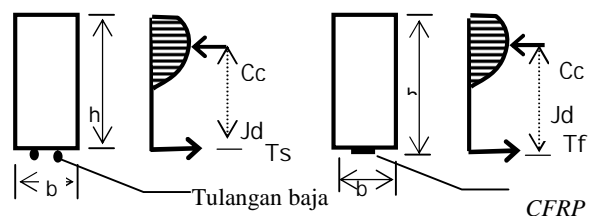
Key words : Carbon Fiber Reinforced Plate (CFRP), flexural strengthening, reinforced concrete beam, debonding failure

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.

Dimana :

- b : lebar balok
- h : tinggi balok
- Cc : gaya tekan beton
- Ts : gaya tarik tulangan baja
- Tf : gaya tarik CFRP
- Jd : jarak Cc terhadap Ts atau Cc terhadap Tf

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/cm³, serta mudah pemasangannya.

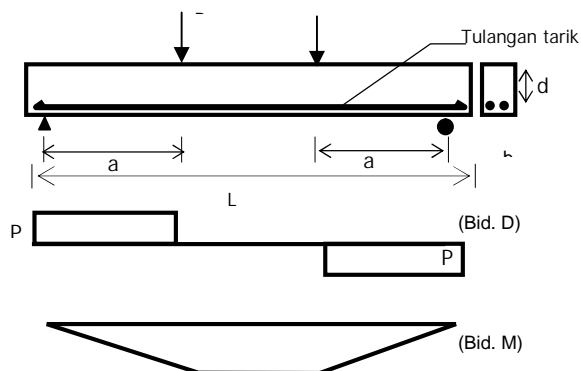
Penelitian yang dilakukan ini merupakan kajian eksperimental dengan penambahan *CFRP* pada balok beton bertulang sebagai tulangan eksternal. Penempatannya secara eksternal di bagian luar balok tanpa perlindungan tidak akan menyebabkan korosi karena terbuat dari bahan non-logam. Selain itu jarak jd dapat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

LANDASAN TEORI

Balok Lentur

Struktur balok beton bertulang dengan tumpuan sederhana (*simple beam*) yang dibebani secara simetris dengan dua buah gaya P sejauh a dari tumpuan, maka akan terjadi keadaan lentur murni yaitu dimana momen konstan sebesar $P.a$ di daerah antara kedua beban P (Gambar 2). Untuk mendapatkan uji lentur struktur balok dapat dilakukan dengan membuat perbandingan antara bentang geser dan tinggi efektif balok ($a/d \geq 3$), serta mendesain agar keruntuhan yang akan terjadi adalah keruntuhan tarik (*Tension Failure*).



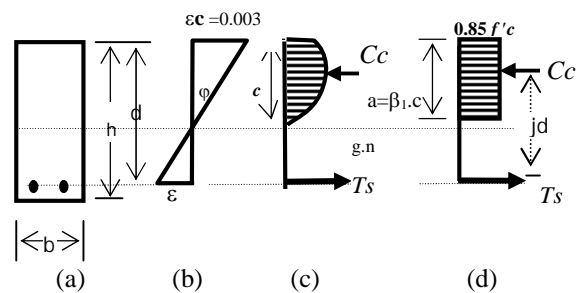
Gambar 2. Bentuk pembebanan balok dalam keadaan lentur murni

Dimana :

- P : beban
- L : bentang balok
- d : jarak serat tekan terluar terhadap tulangan
- a : jarak beban P terhadap tumpuan
- Bid.D: bidang/diagram gaya geser
- Bid.M: bidang/diagram momen lentur

Kuat Lentur Balok Berpenampang Persegi

Kondisi tegangan – regangan penampang beton yang mengalami lentur dapat dilihat pada Gambar 3, dimana a) penampang balok, b) diagram regangan, c) diagram tegangan aktual, dan d) diagram tegangan persegi, sedangkan C_c adalah gaya tekan beton, T_s adalah gaya tarik tulangan baja dan jd adalah jarak dari C_c sampai T_s



Gambar 3. Distribusi tegangan - regangan beton

dimana :

- b : lebar balok
- h : tinggi balok
- a : tinggi distribusi tegangan persegi ($= \beta_1.c$)
- gn : garis netral
- β_1 : faktor koreksi
- c : jarak garis netral dari serat tekan terluar
- d : jarak serat tekan terluar terhadap tulangan
- C_c : gaya tekan beton
- T_s : gaya tarik tulangan
- Jd : jarak C_c terhadap T_s
- $f'c$: kuat tekan beton
- f_y : kuat leleh baja
- A_s : luas penampang tulangan

Berdasarkan Gambar 3 maka :

$$C_c = 0.85 f'c . a . b \quad (1)$$

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

Syarat kesetimbangan gaya-gaya dalam adalah

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

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

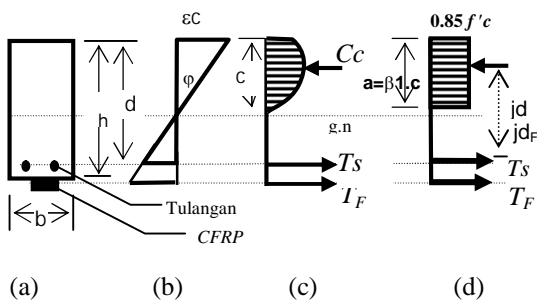
$$0.85 f'c . a . b = A_s . f_y \quad (5)$$

$$a = \frac{A_s . f_y}{0.85 f'c . b} \quad (6)$$

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

$$Mn = As \cdot fy \cdot jd \quad (7)$$

Apabila balok beton dipasang *CFRP* maka kuat lentur balok yang terjadi adalah seperti yang diusulkan oleh Kuriger et al (2001), seperti pada Gambar 4, dimana T_F adalah gaya tarik *CFRP* dan jd_F adalah jarak dari Cc sampai T_F .



Gambar 4. Distribusi tegangan regangan beton dengan penambahan *CFRP*

dimana :

- T_F : gaya tarik tulangan
- jd_F : jarak Cc terhadap T_F
- fy_F : kuat leleh baja
- As_F : luas penampang tulangan

Berdasarkan Gambar 4 :

$$T_F = As_F \cdot fy_F \quad (8)$$

Syarat kesetimbangan gaya-gaya dalam penampang balok dengan perkuatan *CFRP* :

$$Cc = Ts + T_F \quad (9)$$

$$0.85 f'c \cdot a \cdot b = As \cdot fy + As_F \cdot fy_F \quad (10)$$

$$a = \frac{0.85 f'c \cdot b}{As \cdot fy + As_F \cdot fy_F} \quad (11)$$

sehingga akan menghasilkan :

$$Mn = As \cdot fy \cdot jd + As_F \cdot fy_F \cdot jd_F \quad (12)$$

Berdasarkan kedua bentuk persamaan (7) dan (12), maka terlihat adanya penambahan pada kapasitas lenturnya sebesar $(As_F \cdot fy_F \cdot jd_F)$. Sehingga dapat dikatakan bahwa dengan penambahan *CFRP* kapasitas lenturnya akan meningkat.

Carbon Fiber Reinforced Plate (CFRP)

CFRP merupakan bahan perkuatan lentur dan dipasang pada permukaan bawah balok. Bahan yang dipakai adalah type *Sika Carbodur S508* dengan data teknis diambil dari brosur dan merupakan data sekunder dari PT. Sika Nusa Pratama selaku

produsen. Tegangan tariknya sebesar > 2800 MPa dengan modulus elastisitas (E) sebesar 165000 MPa sedang tegangan tarik saat putus sebesar 3100 MPa. Spesifikasi data teknis *CFRP* yang dipakai dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik *CFRP* (PT.Sika Indonesia)

Properties	CFRP
Kuat tarik	2800 MPa
Modulus- E	165.000 MPa
ϵ_{cu}	$> 1,7$ %
Tebal / lebar	0,8 mm / 50 mm
Berat isi	1,50 g/cm ³

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa bila dibandingkan dengan tulangan baja maka *CFRP* mempunyai kuat tarik yang cukup tinggi dan berat yang lebih ringan, akan tetapi lebih lunak dari baja karena modulus elastisitasnya lebih kecil dibanding modulus elastisitas baja ($Es = 200.000$ MPa).

Epoxy (PEREKAT)

Penggunaan *CFRP* sebagai tulangan eksternal pada struktur beton memerlukan bahan pengikat agar diperoleh aksi komposit antara beton dan *CFRP*. Data teknis tentang *epoxy adhesives* merupakan data sekunder dari PT. Sika Nusa Pratama selaku produsen. Perekat yang dipakai adalah *epoxy adhesives* jenis Sikadur 30 yang terdiri dari dua komponen, yaitu komponen A yang berwarna putih dan komponen B yang berwarna abu-abu tua. Perbandingan antara campuran komponen A : komponen B adalah 3 : 1 dan warna setelah tercampur adalah abu-abu terang, Konsumsi perekat (bahan A + bahan B) sebesar $0,34$ kg/m yang dioleskan pada permukaan beton dan permukaan *CFRP* secara merata dengan ketebalannya kurang lebih 2 mm setiap sisi. Spesifikasi data teknis epoxy yang dipakai dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik *Epoxy* (PT. Sika Indonesia)

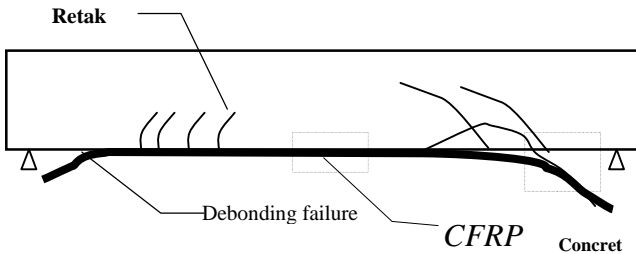
Properties	Epoxy
Modulus - E	12.800 MPa
Kuat lekat pada beton	> 4 MPa

Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa perekat yang digunakan mempunyai modulus elastisitas E yang lebih kecil dari modulus elastisitas beton ($Ec = 20.000$ MPa), sehingga dapat dikatakan *epoxy* lebih lunak dari beton.

Mekanisme Keruntuhan Balok yang diberi *CFRP*

Menurut Kuriger et al (2001) pola keruntuhan pada struktur balok yang diberi *CFRP* dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu : keruntuhan geser, *debonding failure*, dan keruntuhan pada

CFRP. seperti yang terlihat pada Gambar 5. Dari ketiga jenis keruntuhan tersebut maka yang dikehendaki adalah keruntuhan pada *CFRP* terlebih dahulu (*CFRP rupture*), karena dengan demikian seluruh kekuatan *CFRP* dapat bekerja secara optimal.



Gambar 5. Mekanisme keruntuhan balok beton bertulang dengan perkuatan *CFRP*

Kuriger et. al. (2001) menunjukkan bahwa pengujian lentur terhadap balok-balok yang diberi *CFRP* akan mengakibatkan pengurangan regangan 11,5% sampai 58,6% pada tulangan tarik, dan pengurangan regangan tekan beton 3% sampai 33,5% serta mengurangi defleksi pada balok 8% sampai 53,1%. Sedangkan tipe keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan geser pada beton, keruntuhan pada *CFRP* dan *debonding* pada *CFRP* yang mana didominasi oleh *debonding* *CFRP*.

Aprile et. al. (2001) menyatakan bahwa pelat *CFRP* yang dilekatkan pada bagian bawah balok diperhitungkan sebagai satu kesatuan struktur yang menerima beban bersama-sama. Aksi komposit tersebut hanya dapat terjadi karena adanya lekatan yang baik antara kedua bahan tersebut. Peran *bond* sangat penting dalam menyalurkan tegangan dari beton ke *CFRP* atau sebaliknya. Kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan pelat *CFRP* selalu diawali dengan *debonding* pada pelatnya.

Purwanto (2001) menunjukkan bahwa penambahan *CFRP* pada balok beton bertulang pascabakar dapat meningkatkan kekakuan sebesar 2,41%, daktilitas turun sebesar 18,01% dan kuat lentur ultimit naik sebesar 6,06% terhadap beton pasca bakar.

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 ($2\phi 13$ mm) dengan tegangan leleh $f_y = 336$ MPa ditempatkan pada kedalaman 203,5 mm (Gambar 8).

Penulangan direncanakan dengan rasio luas tulangan (ρ) yang memenuhi persyaratan sistem tulangan *underreinforced*. Material komposit *CFRP* ditambahkan pada balok uji secara eksternal sebanyak satu lapis dengan ukuran lebar 50 mm dan tebal 0,8 mm, seperti terlihat pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. *CFRP*



Gambar 7. Pemasangan *CFRP* pada balok

Parameter Pengujian

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

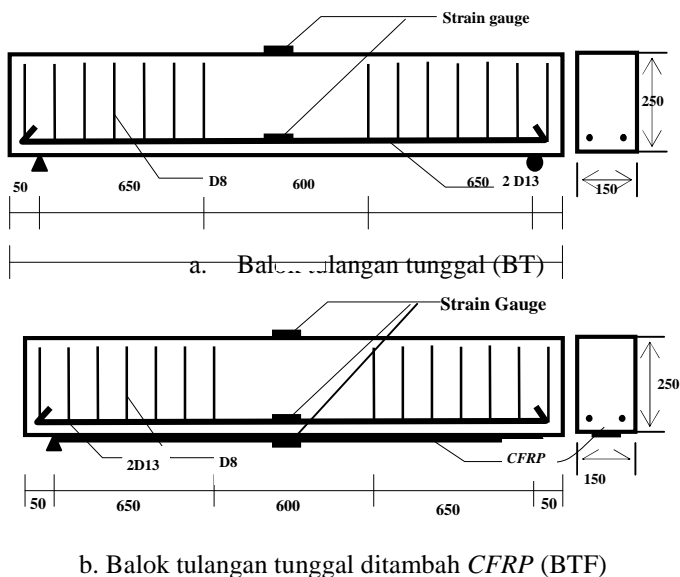
Data hasil pengujian lentur kedua benda uji tersebut dibandingkan untuk mengetahui perubahan respon struktur balok akibat penambahan *CFRP*.

Set Up Pengujian

Set up pengujian seperti terlihat pada Gambar 9. 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 cara memberikan beban statik secara bertahap dengan interval kenaikan sebesar 200 kg, 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.



Gambar 8. Balok uji

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Baja tulangan

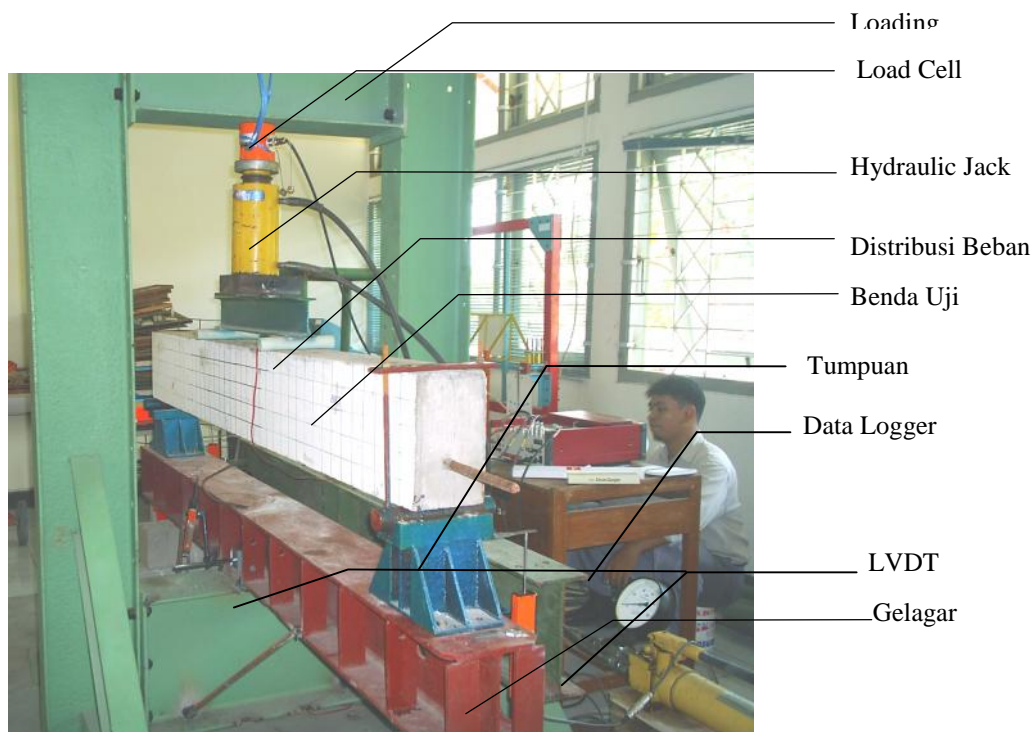
Baja tulangan yang dipakai pada penelitian ini adalah tulangan ulir dengan diameter 13 mm. Hasil uji kuat tarik baja diperoleh nilai tegangan leleh rata-rata sebesar 336,13 MPa dan tegangan maksimum rata-rata sebesar 439,435 MPa.

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 BT

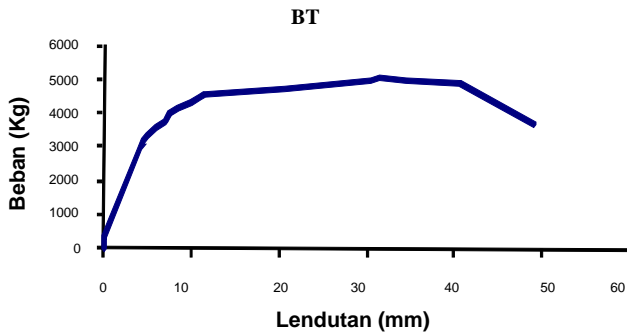
Retak awal (*first crack*) terlihat pada beban 1,2 ton yang menandakan beton memasuki *cracked stage* artinya beton sudah melampaui regangan tariknya, sehingga gaya tarik yang timbul dipikul oleh tulangan hal itu dengan munculnya retak rambut di daerah lentur balok.



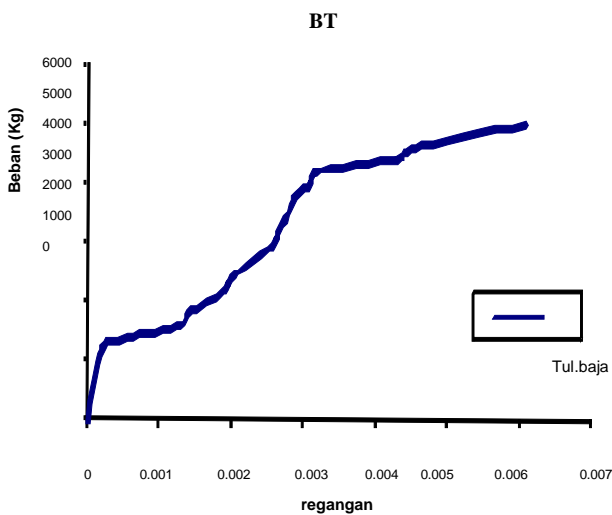
Gambar 9. Set Up Pengujian

Pada Gambar 10 terlihat bahwa sampai pada beban 1,2 ton terjadi pertambahan lendutan yang sangat kecil, artinya respon beban-lendutan pada balok BT menunjukkan kekakuan yang besar.

Pada Gambar 11 terlihat pertambahan 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 10. Hubungan antara P-δ balok BT



Gambar 11. Hubungan antara P-ε balok BT

Pada Gambar 10 terlihat bahwa setelah beban melewati 4,5 ton lendutan mulai bertambah besar, artinya kekakuan balok mulai turun akibat kinerja tulangan dalam mentransfer tegangan tarik melemah. Bersamaan itu regangan pada serat tekan beton sudah melampaui batas ultimit $\epsilon_{cu} = 0,0030$, sehingga pada serat tekan beton mulai mengalami retak horisontal atau terjadi *crushing concrete*, seperti terlihat pada Gambar 12. Setelah itu pertambahan lendutan semakin besar sampai dengan balok runtuh pada beban ultimit 5,1 ton, lendutan mencapai 31,5 mm.

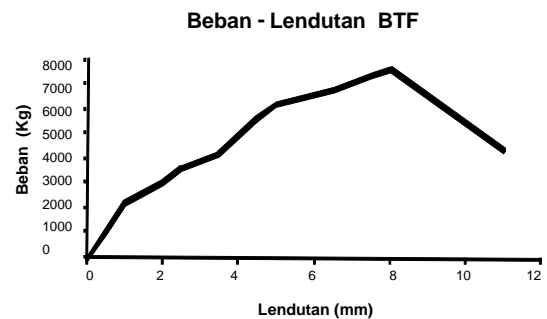
Kemudian beban berangsur turun dan berhenti pada 3,7 ton dengan lendutan maksimum yang terjadi sebesar 49 mm.



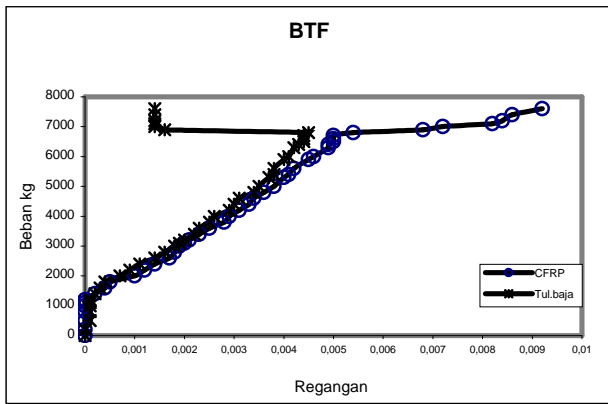
Gambar 12. Pola keruntuhan BT

Balok BTF

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 13 grafik mulai terlihat agak landai setelah beban 1,8 ton yang artinya kekakuan balok mulai turun, sedangkan pada Gambar 14 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.

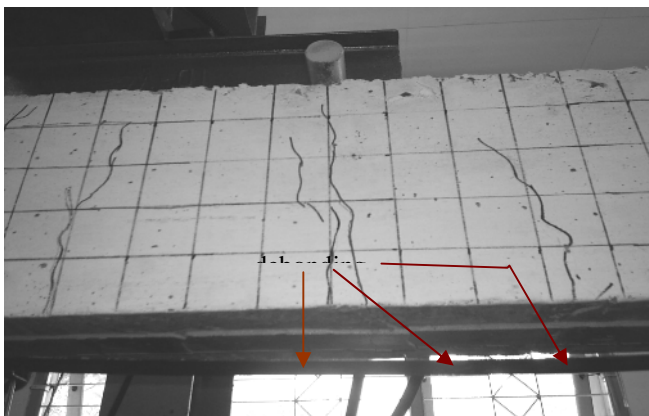


Gambar 13. Hubungan P-ε balok BTF



Gambar 14. Hubungan antara P-ε balok BTF

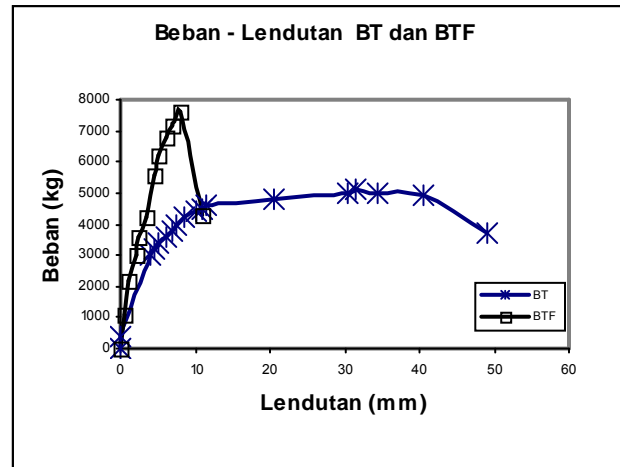
Pada beban 7,6 ton *CFRP* mengalami *debonding* atau terlepas dari beton, akibatnya gaya tarik yang bekerja tidak ada yang menahan sehingga balok mengalami keruntuhan, seperti terlihat pada Gambar 15. *Debonding CFRP* terjadi pada saat regangan *CFRP* mencapai 0,0092 atau 54,4 % dari regangan yang diharapkan 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 15. Pola keruntuhan BTF

Perbandingan Balok BT dan BTF

Setelah dilakukan pengujian lentur maka dapat diketahui respon balok uji terhadap pembebanan. Dengan penambahan *CFRP* secara eksternal pada serat tarik ternyata benda uji menunjukkan pengaruh yang baik, hal itu dapat dilihat pada benda uji BT yang tidak diberi *CFRP* dengan BTF balok yang diberi *CFRP*.



Gambar 16. Hubungan P-δ pada BT dan BTF

Beban Ultimit

Dari Gambar 16 terlihat bahwa balok BT dapat mencapai beban ultimit sebesar 5,1 ton sedangkan BTF mampu mencapai 7,6 ton. Jadi penambahan *CFRP* pada balok dapat meningkatkan beban ultimit sebesar 49 %.

Dari Tabel 3 terlihat bahwa balok BT bekerja optimal 95,8 % dari hasil perhitungan teoritisnya. Sedangkan kemampuan balok BTF 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 BTF masih lebih tinggi 49 % dari pada BT sebagai balok normal.

Tabel 3. Beban ultimit balok

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

Daktilitas

Daktilitas pada balok diukur berdasarkan lendutan maksimum dibagi dengan lendutan pada saat leleh (δ_u/δ_y). Dari Gambar 16 terlihat bahwa lendutan maksimum yang terjadi pada BTF yaitu 11 mm, lebih kecil dibandingkan dengan lendutan maksimum pada balok BT yaitu 49 mm. Jadi dengan demikian penambahan *CFRP* dapat menurunkan daktilitas sebesar 73 %. Besar lendutan selengkapny dilihat pada Tabel 4.

Defleksi (lendutan)

Defleksi pada balok balok diukur berdasarkan lendutan maksimum yang terjadi. Dari Gambar 16 terlihat bahwa lendutan maksimum yang terjadi pada balok BT yaitu 49 mm, sedangkan lendutan

maksimum pada BTF yaitu 11 mm. Jadi dengan demikian penambahan *CFRP* dapat menurunkan defleksi sebesar 77,6 %. Besar lendutan selengkapnya dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Besar lendutan pada BT dan BTF

Benda Uji	δu (mm)	δy (mm)	Daktilitas ($\delta u/\delta y$)
BT	49	1,2	40,833
BTF	11	1,0	11

Keterangan : δy = lendutan saat lele
 δu = 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 5.

Tabel 5. Kuat lentur BT dan BTF

Kode Benda uji	M (ton-m)	
	Eksperimen.	Teoritis
BT	1,6575	1,7287
BTF	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 BT retak awal terjadi pada beban 1,2 ton sedangkan pada balok BTF retak awal terjadi pada beban 1,8 ton. Retak awal ini ditandai dengan retak rambut sebagai indikasi telah terlampaunya 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* (BT) adalah keruntuhan lentur sedangkan yang diberi *CFRP* (BTF) 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 BTF 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.

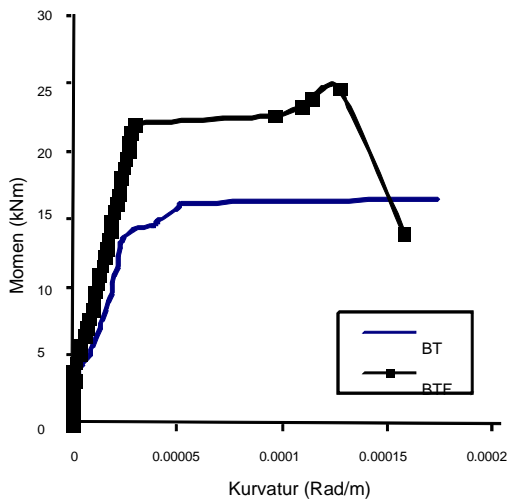
Pembahasan

Setelah dilakukan pengujian lentur balok BT mengalami keruntuhan sesuai dengan perencanaannya yaitu keruntuhan lentur, yang ditandai dengan retak dari sisi tarik yang menjalar vertikal ke atas Akan tetapi pada benda uji yang lain yaitu BTF keruntuhan balok selalu diakibatkan terjadinya *debonding* atau terlepasnya *CFRP* dari beton pada salah satu ujung balok terlebih dahulu, sebelum *CFRP* bekerja optimal. *Debonding* pada *CFRP* bersifat *brittle* dibandingkan dengan *debonding* pada tulangan yang berlangsung sedikit demi sedikit. *Debonding* terjadi karena beberapa faktor antara lain :

- Kelemahan epoxy
 Peranan *bond* (lekatan) sangat penting dalam membentuk aksi komposit antara beton dan *CFRP*. *Bond* antara beton dan *CFRP* dipengaruhi oleh epoxy yang digunakan, sehingga tanpa adanya epoxy yang kuat maka struktur komposit yang diharapkan tidak terjadi. Epoxy yang kurang kuat dapat diketahui dari modulus elastisitas epoxy yang dipakai sebesar $E = 12000$ MPa yang lebih kecil dari E beton yaitu sebesar 20000 MPa, sehingga terlihat bahwa epoxy lebih lemah dari beton.
- Bidang kontak yang kecil
 Bidang kontak yang terjadi antara beton dan *CFRP* kurang luas karena terjadi hanya pada satu sisi permukaan saja, tidak sebagaimana antara tulangan baja dan beton yang mempunyai bidang kontak pada seluruh luas permukaan tulangan. Sehingga ikatan yang dibutuhkan *CFRP* untuk menjadi satu kesatuan komposit dengan beton menjadi kurang sempurna.
- Permukaan *CFRP* licin.
 Permukaan *CFRP* yang licin mengakibatkan lekatan antara beton dan *CFRP* yang dibentuk oleh friksi akibat kekasaran permukaan menjadi lemah, sehingga akibatnya terjadi slip pada *CFRP* yang memicu terjadinya *debonding*.

Kekakuan

Dari grafik momen-kurvatur pada Gambar 17 terlihat sudut kemiringan kedua benda uji, dimana BTF mempunyai sudut kemiringan yang lebih besar dari pada BT yang membuktikan bahwa penambahan CFRP dapat meningkatkan kekakuan pada balok, dimana kekakuan balok BTF yang paling besar, sedangkan kekakuan balok BT yang paling kecil.



Gambar 17. Momen – kurvatur balok uji

KESIMPULAN

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 lendutan (defleksi) 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. Kinerja CFRP yang digunakan pada balok belum optimal, yang ditunjukkan dari kuat tarik CFRP pada BTF hanya sebesar 1518 MPa atau hanya 54 % dari kuat tarik yang bisa dicapai.

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 @ASCE, December 2001, hal 1445 – 1452.
- Harmon, Thomas; Kim, Yoo; Kardos, John; 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, hal 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@ASCE, May 2001, hal 114 – 121.
- Niu, Hedong and Wu, Zishen, *Analytical Modelling on Debonding Failure of FRP Strengthened RC Flexural Structures*.
- Ozel, Bank, Arora, and Gonenc, 2003, *Comparison Between FRP Rebar, FRP Grid, and Steel Rebar Reinforced Concrete Beams*, Department of Civil Engineering, University of Wisconsin-Madison, USA.
- 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.