

PENGARUH PENGGUNAAN *CARBON FIBER REINFORCED PLATE* TERHADAP PERILAKU LENTUR STRUKTUR BALOK BETON BERTULANG¹

Endah Kanti Pangestuti², Nuroji³, Antonius⁴

ABSTRACT

Strengthening of reinforced concrete beam can be developed by using steel plate or carbon fiber reinforced plate (CFRP) on the tension concrete fiber as an external reinforcement. Experimental study on reinforced concrete strengthening with CFRP has been conducted to estimate the effectiveness of using CFRP on the concrete structure as flexural strengthening material and external reinforcement. In this research, three specimens were tested. The first specimen is the reinforced concrete beam with single steel reinforcement (BT), which is used as control beam. The second specimen is the reinforced concrete beam with single steel reinforcement and laminated CFRP (BTF). The last specimen is the concrete beam with laminated CFRP without steel bar (BF). The second and third 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 four-point loading to get pure bending in the middle span. The result of the experimental research showed that the ultimate load of the strengthened beams 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. In spite of using laminated CFRP on the concrete beam (BF) may increase the stiffness 33.3% and cracking moment 50%, but using laminated CFRP on the concrete beams as external reinforcement without reinforcing steel bar (BF) is not effective, because the strain of CFRP is only 41% of the maximum strain that may be reached. The failure phenomenon of the concrete beam with laminated CFRP (BTF and BF) is prior de-bonding CFRP that makes maximum performance of the CFRP not be reached.

Keywords : *CFRP, flexural strengthening, de-bonding failure*

PENDAHULUAN

Beton sebagai salah satu material yang banyak digunakan pada struktur bangunan sipil mempunyai perilaku yang spesifik yaitu memiliki kuat tarik yang jauh lebih kecil dari kuat tekannya. Oleh karena itu material beton umumnya digabungkan dengan material lain yang mempunyai kuat tarik besar, seperti baja tulangan atau baja profil sehingga merupakan

kesatuan struktur yang komposit beton bertulang.

Besar kapasitas momen yang dihasilkan oleh beton bertulang salah satunya ditentukan oleh penempatan tulangan baja di dalam beton (jarak Jd). Untuk mendapatkan kapasitas momen yang optimal maka tulangan harus diletakkan di serat tarik balok yang paling jauh, atau dengan kata lain nilai Jd diupayakan

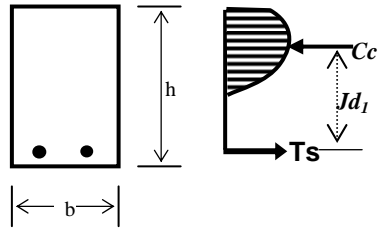
¹ PILAR Volume 15, Nomor 2, September 2006 : halaman 86 – 94

² Alumnus S2-Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro
Jl. Wayam Wuruk Semarang

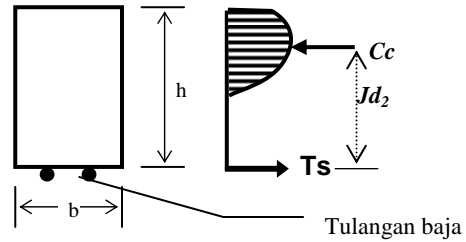
³ Magister Teknik Sipil Program Pascasarjana Universitas Diponegoro
Jl. Hayam Wuruk No.5-7 Semarang

⁴ Dosen Unissulla Semarang

maksimum. Namun demikian hal tersebut menjadikan tidak tersedianya lekatan yang cukup antara tulangan baja dan beton, sehingga aksi komposit yang diharapkan tidak dapat



terjadi. Lebih lagi baja tulangan merupakan material yang rentan terhadap korosi apabila tanpa perlindungan.



Keterangan :

Cc = gaya tekan beton (*compression concrete*)

Ts = gaya tarik tulangan baja (*tensile steel*)

Jd = jarak dari Cc sampai Ts

Gambar 1. Pengaruh penempatan tulangan baja terhadap jarak Jd pada diagram tegangan

Di lain pihak ada material jenis baru yaitu *Carbon Fiber Reinforced Plate* (CFRP) yang menawarkan beberapa keunggulan yang tidak dimiliki oleh baja tulangan antara lain : mempunyai kuat tariknya yang lebih tinggi dari baja tulangan yaitu 2800 MPa, tidak mengalami korosi karena terbuat dari bahan non logam, mempunyai penampang yang kecil dan ringan, serta mudah pemasangannya.

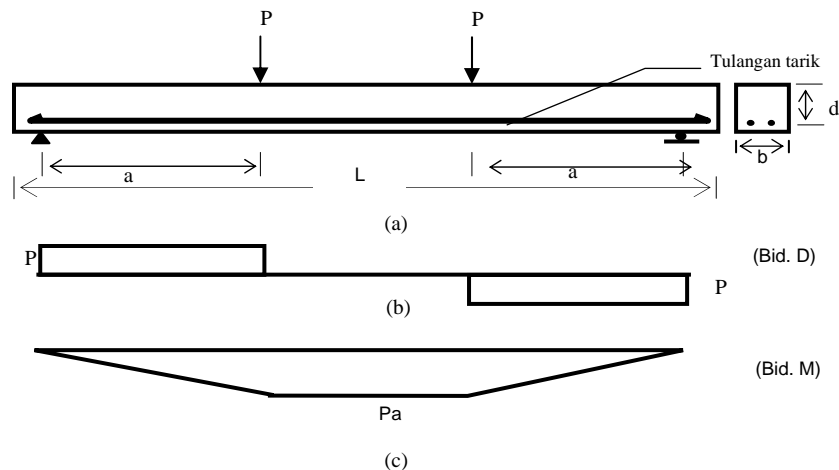
Penelitian yang dilakukan ini merupakan kajian eksperimental penambahan CFRP pada balok beton bertulang sebagai tulangan eksternal. Penempatannya di bagian luar balok tanpa perlindungan tidak akan menyebabkan korosi karena terbuat dari bahan non-logam. Selain itu jarak Jd dapat dioptimalkan sehingga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

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

Balok adalah batang struktural yang dirancang untuk menahan beban-beban yang bekerja dalam arah tegak lurus terhadap sumbunya. Beban tersebut akan menyebabkan balok melentur sehingga akan terbentuk sejumlah gaya-gaya dalam.



Gambar 2. Bentuk pembebanan balok dalam keadaan lentur murni

Untuk menghasilkan kondisi lentur murni maka dapat dilakukan dengan menempatkan beban P secara simetris pada jarak tertentu sejauh a dari tumpuan sehingga perbandingan antara bentang geser dan tinggi efektif balok (a/d) ≥ 3 , seperti pada Gambar 2. Sedangkan apabila perbandingan tersebut di atas kurang dari 3 maka yang terjadi adalah keruntuhan geser.

Kuat Lentur Balok Tampang Persegi

Kondisi tegangan – regangan penampang beton dengan CFRP yang mengalami lentur seperti yang diusulkan oleh Kuriger (2001), dapat dilihat pada Gambar 3.

Berdasarkan gambar 3 maka :

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

$$T_s = A_s . f_s \dots\dots\dots(2)$$

$$T_F = A_{sF} . f_{yF} \dots\dots\dots(3)$$

Syarat keseimbangan gaya-gaya dalam penampang balok dengan CFRP :

$$C_c = T_s + T_F \dots\dots\dots(4)$$

$$0.85 f'c . a . b = A_s . f_y + A_{sF} . f_{yF} \dots\dots\dots(5)$$

$$a = \frac{0.85 f'c . b}{A_s . f_y + A_{sF} . f_{yF}} \dots\dots\dots(6)$$

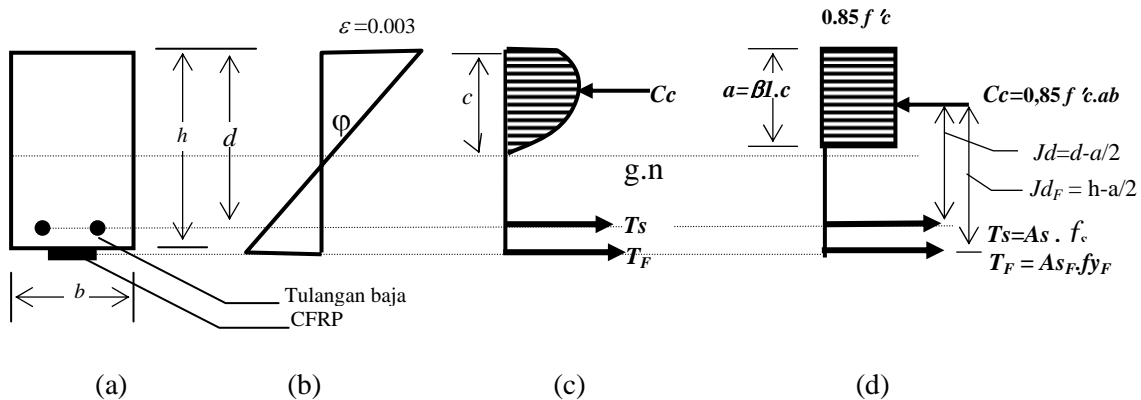
Sehingga akan menghasilkan Momen sebesar:

$$M_n = A_s . f_y . j_d + A_{sF} . f_{yF} . j_{dF} \dots\dots\dots(7)$$

REVIEW PENELITIAN TENTANG BALOK YANG DIPASANG 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.



Gambar 3. Distribusi tegangan - regangan beton
a) Balok; b) Regangan; c) Tegangan aktual; d) Tegangan persegi

Dimana :

T_F = gaya tarik CFRP

jd_F = jarak dari C_c sampai T_F

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. terjadi pola keruntuhan *debonding failure*.

METODE PENELITIAN

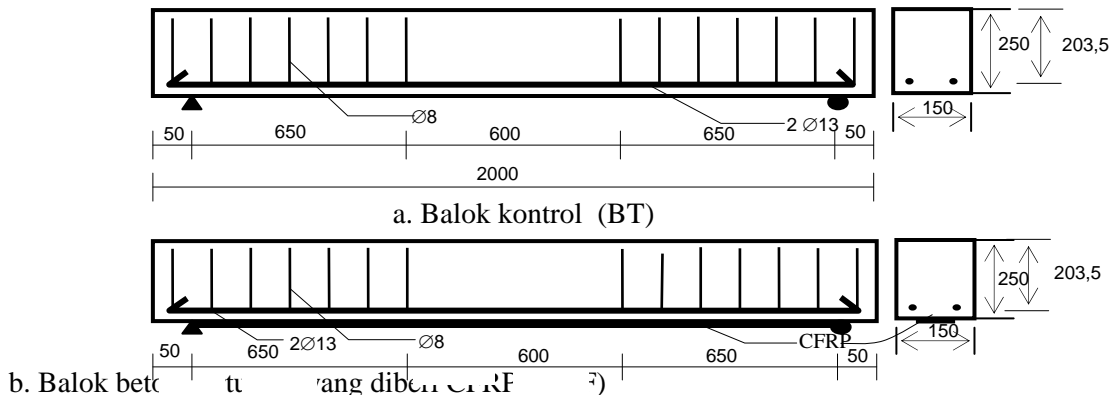
Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah balok beton bertulang dengan ukuran 150/250 mm dan bentang efektif 1900 mm. Benda uji terbuat dari beton dengan kuat tekan $f'_c=32,97$ MPa. Dua buah tulangan tarik diameter 13 mm ($2\varnothing 13$ mm) dengan tegangan leleh $f_y = 336$ MPa ditempatkan pada kedalaman 203,5 mm. Rasio tulangan (ρ) dibuat lebih kecil dari rasio penulangan maksimum ($\rho \leq 0,75 \rho_b$), supaya diperoleh fenomena *underreinforced*. Material komposit CFRP yang berukuran lebar 50 mm dan tebal 0,8 mm ditambahkan pada balok uji secara eksternal sebanyak satu lapis. Agar terjadi keruntuhan lentur maka di daerah geser balok diperkuat dengan tulangan geser yaitu dengan menempatkan begel-begel berdiameter 8 mm dan berinterval 110 mm. Sedangkan di daerah lentur hanya terdapat tulangan tarik saja, tanpa diberi tulangan geser, seperti terlihat pada Gambar 4. Benda uji dalam penelitian ini ada tiga buah seperti yang terlihat pada Gambar 4, yang terdiri dari :

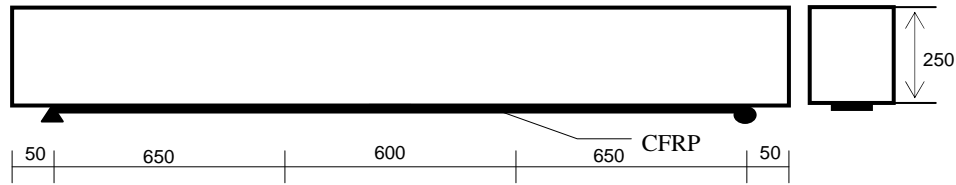
- BT adalah balok beton bertulang tanpa CFRP, yang berfungsi sebagai balok kontrol.

- BTF adalah balok beton bertulang yang dipasang CFRP secara eksternal sepanjang balok.
- BF adalah balok beton tanpa tulangan baja yang dipasang CFRP.

Set Up Pengujian

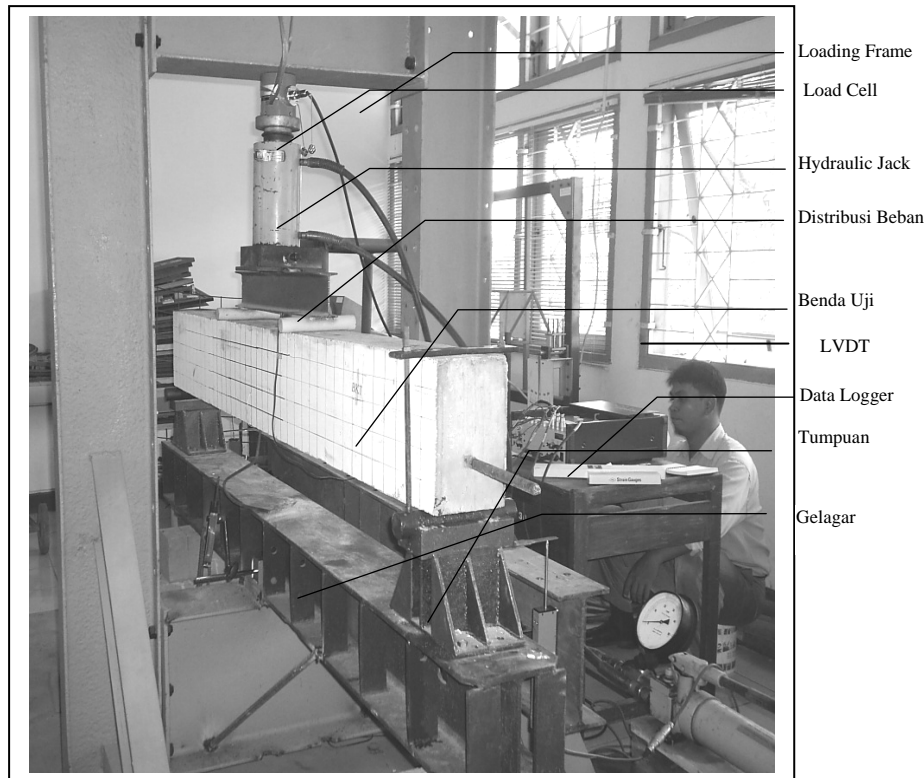
Set up pengujian seperti terlihat pada Gambar 5. Benda uji balok beton bertulang ditempatkan pada *loading frame* dan tumpuan dikondisikan sendi – roll pada kedua ujungnya. Pembebanan dilakukan di dua titik secara simetris dengan jarak 600 mm antar titik pembebanan, dan sejauh 650 mm dari masing-masing tumpuan. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan beban secara bertahap dengan interval kenaikan sebesar 200 kg. Pembebanan dilakukan dengan bantuan *hidraulick jack* dan *load cell*. Untuk mengetahui defleksi yang terjadi maka pada balok uji dipasang 3 buah LVDT, dimana 2 buah ditempatkan pada tumpuan dan 1 buah 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.





c. Balok beton yang diberi CFRP (BF)

Gambar 4. Balok Uji dan Pemasangan CFRP



Gambar 5. *Set Up* Pengujian

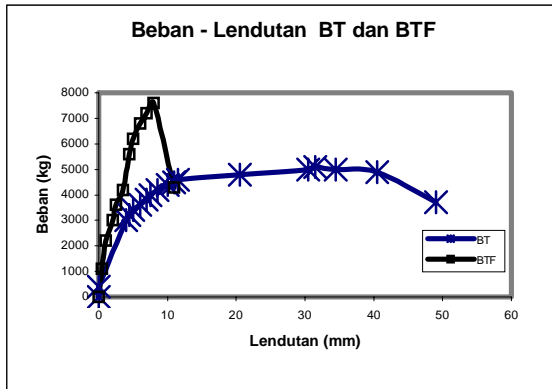
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

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.

Beban Ultimit

Dari Gambar 6 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 %. Besar beban ultimit yang dipikul oleh balok uji menurut hasil eksperimen dan perhitungan teoritis dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 6 Hubungan P- δ pada balok uji BT dan BTF

Tabel 1. Beban ultimit balok BT dan BTF

Kode Benda uji	P ultimit		
	Eksperimen	Teoritis	eksp/teo
BT	5,1	5,32	0,958
BTF	7,6	12,97	0,586

Dari Tabel 1 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 dari balok BT.

Daktilitas

Daktilitas pada balok diukur berdasarkan lendutan maksimum dibagi dengan lendutan pada saat leleh ($\delta u / \delta y$). Dari Gambar 6 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 selengkapnya dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. 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 leleh
 δu = lendutan maksimum

Kekakuan

Nilai kekakuan pada benda uji BT dan BTF dihitung dari beban pada saat leleh dibagi dengan lendutan pada saat leleh. Seperti yang terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai kekakuan benda uji BT dan BTF

Benda Uji	P_y (ton)	δy (mm)	Kekakuan (ton-mm)
BT	2,0	1,2	1,667
BTF	2,8	1	2,8

Dari Tabel 3 di atas terlihat bahwa kekakuan balok yang diberi CFRP dihitung dari momen dan lendutan saat leleh, meningkat sebesar 68 % dari balok tanpa CFRP. Pada Gambar 6 juga memperlihatkan bahwa kekakuan BTF lebih besar dari pada BT yang dibuktikan dari sudut kemiringan grafik BTF lebih besar dari BT.

Defleksi

Defleksi pada balok diukur berdasarkan lendutan maksimum yang terjadi. Dari Gambar 6 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 77,6 %. Besar lendutan selengkapnya dilihat pada Tabel 2.

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 4.

Tabel 4. Kuat lentur teoritis dan eksperimen BT dan BTF

Kode Benda Uji	M (ton-m)	
	Eksperimen	Teoritis
BT	1,6575	1,7287
BTF	2,47	4,215

Tabel 4 menunjukkan bahwa dari hasil eksperimen ada peningkatan kuat lentur sebesar 49% setelah balok diberi CFRP.

Perbandingan balok BT dan BF

Beban Ultimit

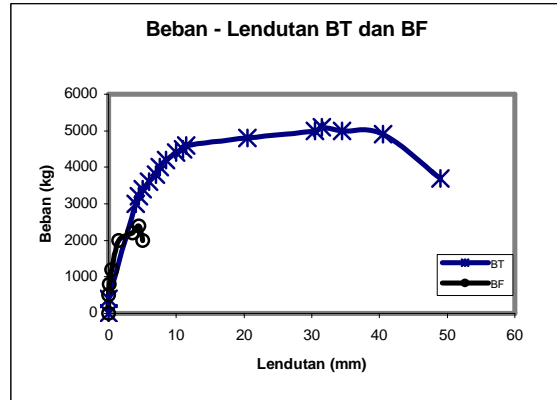
Dari Gambar 7 terlihat bahwa balok BT dapat mencapai beban ultimit sebesar 5,1 ton sedangkan BF hanya mampu mencapai 2,4 ton. Secara teori beban ultimit yang dapat dicapai oleh BF adalah 8,25 ton, akan tetapi perhitungan teoritis tersebut mengangap bahwa CFRP dan beton bekerja sempurna sebagai struktur komposit, tetapi pada eksperimen yang dilakukan terjadi *debonding* terlebih dulu sehingga CFRP sebelum bisa bekerja optimal.

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. Kuat lentur balok BF turun 52,9 % dari kuat lentur balok BT.

Defleksi

Defleksi balok diukur dari lendutan maksimum yang terjadi. Dari Gambar 7 terlihat bahwa lendutan maksimum yang terjadi pada BF yaitu 5 mm lebih kecil dibandingkan dengan lendutan maksimum pada balok BT yaitu 49 mm. Jadi dengan demikian penambahan CFRP dapat menurunkan defleksi sebesar 89 %.



Gambar 7. Hubungan P – δ pada BT dan BF

Kekakuan

Pada Gambar 7 memperlihatkan bahwa sudut kemiringan BF lebih besar dari pada BT yang membuktikan bahwa kekakuan BF lebih besar dari BT. Dari Tabel 5 di atas terlihat bahwa kekakuan balok BF dihitung pada momen yang sama, meningkat sebesar 33,3 % dari balok BT. Sehingga penambahan CFRP secara eksternal pada balok beton terbukti dapat meningkatkan kekakuan balok.

Tabel 5. Nilai kekakuan pada benda uji BT dan BF

Benda Uji	P (ton)	δ (mm)	Kekakuan (ton-mm)
BT	2,0	2	0,325
BF	2,0	1,5	0,433

Efektifitas CFRP

Berdasarkan dari hasil pengujian balok-balok yang diberi CFRP secara eksternal menunjukkan bahwa kinerja CFRP belum maksimal pada balok, karena terjadi *debonding* dahulu sebelum mencapai kinerja yang diharapkan, seperti terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Efektifitas CFRP pada balok uji

Kode Balok	Regangan maks	Tegangan maks (Mpa)	Efektifitas (%)
BTF	0,0092	1518	54,4
BF	0,0070	1155	41

Pola keruntuhan

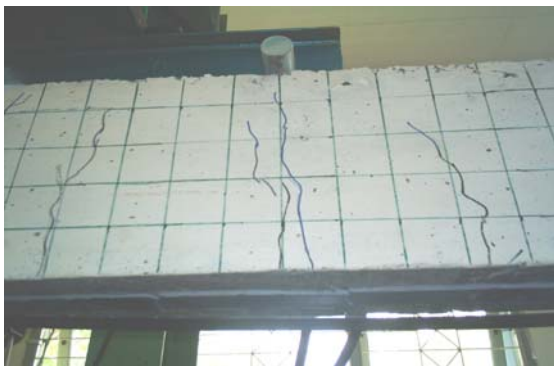
Pola keruntuhan yang terjadi pada balok yang diberi CFRP adalah *debonding failure* yaitu lepasnya ikatan antara pada permukaan pelat CFRP dengan beton. Pengamatan pola keruntuhan terhadap balok uji selama pengujian dapat dilihat pada Gambar 8, 9 dan 10 serta Tabel 7 di bawah ini.

Tabel 7. Beban ultimit dan pola keruntuhan balok uji

Balok	Beban ultimit (ton)	Pola keruntuhan
BT	5,1	lentur
BTF	7,6	CFRP debonding
BF	2,4	CFRP debonding



Gambar 8. Pola keruntuhan BT



Gambar 9. Pola keruntuhan BTF



Gambar 10. Pola keruntuhan BF

KESIMPULAN

1. Penambahan pelat CFRP secara eksternal pada balok (BTF) terhadap balok normal (BT) dapat meningkatkan kuat lentur sebesar sebesar 49 %, dan dapat meningkatkan kekakuan sebesar 68%, akan tetapi daktilitas turun sebesar 73% dan lendutannya turun 77,6 %.
2. Penambahan pelat CFRP secara eksternal pada balok tanpa tulangan (BF) kurang efektif, karena kuat lentur yang terjadi turun sebesar 52,9 % dan lendutannya turun 89 % terhadap balok normal (BT). Hal itu disebabkan *debonding failure* CFRP pada salah satu ujungnya terlebih dahulu sehingga balok beton tersebut runtuh (patah) secara *brittle*. Kekakuannya meningkat 33,3 %
3. Pola keruntuhan yang terjadi pada semua balok uji dengan penambahan CFRP adalah *debonding failure* yaitu lepasnya ikatan antara beton dengan CFRP, sehingga dapat dikatakan bahwa material komposit tersebut belum bisa bekerja secara optimal. Hal itu bisa diakibatkan karena epoxynya yang kurang kuat atau bidang kontak yang kurang luas.
4. CFRP yang digunakan pada balok tidak bekerja optimal, dimana pada BTF 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

1. 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, misalnya dengan mengganti material perekatnya dengan yang lebih kuat.
2. Mengingat dari hasil penelitian ini *debonding failure* yang terjadi selalu dari ujung balok, maka perlu dilakukan penelitian untuk memperkuat CFRP dengan menambah panjang penyaluran, atau dengan megkombinasi dengan bahan sejenis yang lebih tipis dan lebih lebar untuk memperluas bidang kontak dengan beton, atau dapat juga dengan menanamkan CFRP pada permukaan tarik

DAFTAR PUSTAKA

- Aprile, Alessandra; Spacone, Enrico; and 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; and 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 and Alam, Khairul, 2001, *Analysis of Composite Reinforced Concrete Beams*, Department of Mechanical Engineering, Ohio University
- Lorenzis, Laura and Nanni, Antonio, 2001, *Characterization of FRP Rods as Near Surface Mounted Reinforcement*, Journal of Composite for Construction, May 2001, page 114 – 121.
- Nawy, Edward, 1995, *Reinforced Concrete A Fundamental Approach*, Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers University, The State University of New Jersey, New Jersey.
- 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.
- Park and Paulay, 1974, *Reinforced Concrete Structures*, Department of Civil, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- 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.
- Timoshenko and Gere, 1997, *Mekanika Bahan*, Jilid 1 edisi IV, Erlangga, Jakarta