

MEKANISME KERUNTUHAN BALOK BETON YANG DIPASANG *CARBON FIBER REINFORCED PLATE*

Antonius¹, Endah K. Pangestuti²

¹Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA),
Jl. Raya Kaligawe Km.4 Semarang; antoni67a@yahoo.com

²Dosen Jurusan Teknik Sipil, Universitas Negeri Semarang (UNNES)

ABSTRAK

Material Carbon Fiber Reinforced Plate (CFRP) merupakan bahan non-logam yang terbuat dari serat karbon, dan mempunyai kekuatan tarik 2800 MPa sehingga apabila digunakan secara komposit pada struktur beton maka CFRP tersebut akan berperan dalam memberikan kekuatan tarik yang besar. Di dalam paper ini akan diuraikan peranan CFRP dalam memperkuat balok beton dalam hal peningkatan kekuatan lentur dan daktilitasnya. Balok beton yang dikaji terdiri dari balok beton bertulang biasa dengan penulangan lentur yang berfungsi sebagai balok kontrol, balok beton polos (tanpa tulangan) yang dipasang CFRP pada daerah tarik, dan balok beton bertulang yang juga dipasang CFRP pada daerah tariknya. Kuat tekan beton yang digunakan berkisar 30 MPa. Sedangkan pengujian pembebanan lentur dilakukan dengan sistim monotonik. Hasil pengujian tersebut juga diverifikasi dengan hasil perhitungan secara teoritis sesuai dengan SNI. Hasil penelitian ini diantaranya menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kekuatan secara signifikan pada balok yang dipasang CFRP dibandingkan dengan balok tanpa CFRP.

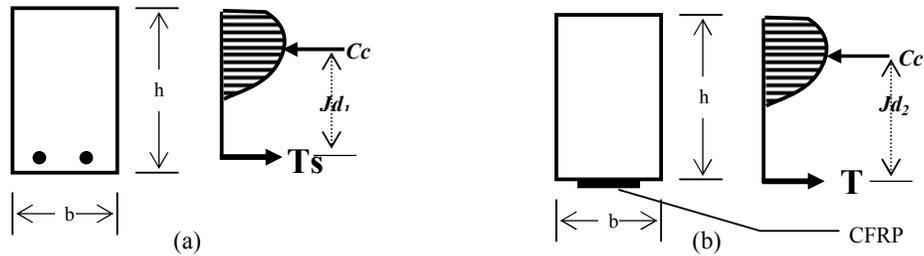
Kata-kata kunci: CFRP, retak, mekanisme runtuh

1. PENDAHULUAN

Besarnya kapasitas momen yang dihasilkan oleh beton bertulang salah satunya ditentukan oleh penempatan tulangan baja tarik 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 nilai Jd diupayakan maksimum, dimana $Jd_2 > Jd_1$ sehingga $M_2 > M_1$ seperti terlihat pada Gambar 1. Namun demikian hal tersebut menjadikan tidak tersedianya lekatan yang cukup antara tulangan baja dan beton, sehingga aksi komposit yang diharapkan tidak dapat terjadi secara sempurna.

Dewasa ini telah mulai banyak digunakan material jenis baru yaitu *Carbon Fiber Reinforced Plate* (CFRP) yang merupakan bahan non logam dari serat karbon. CFRP adalah material ringan dengan berat 1,5 g/cm³ yang mempunyai kekuatan tarik jauh lebih tinggi dibanding kekuatan baja yaitu sebesar 2800 MPa, sehingga apabila digabungkan secara komposit pada struktur beton, CFRP akan berperan dalam menyumbangkan kekuatan tarik yang besar.

Di dalam penelitian ini dilakukan pengujian balok beton dimana **CFRP** yang ditempatkan secara eksternal pada balok beton bertulang, dengan tujuan untuk mengetahui sejauh mana pengaruhnya terhadap kapasitas momen lentur yang dihasilkan dan pengaruhnya terhadap retak yang terjadi.



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

2. BAHAN EKSTERNAL

2.1. Carbon Fiber Reinforced Plate (CFRP)

CFRP merupakan bahan type *Sika Carbodur S508* dengan lebar 50 mm, tebal 0.8 mm dan mempunyai luas tampang 40 mm². Data teknis tentang *Sika Carbodur* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik CFRP (PT.Sika Indonesia)

PROPERTIES	CFRP (CARBODUR S508)
Kuat tarik	2800 MPa
Modulus-Elastisitas	165.000 MPa
ϵ_{cu}	> 1,7 %
Tebal / lebar	0,8 mm / 50 mm
Berat isi	1,50 g/cm ³

2.2. 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. Spesifikasi data teknis epoxy yang dipakai dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Epoxy (PT. Sika Indonesia)

Properties	Epoxy jenis Sikadur 30
Modulus – Elastisitas	12.800 MPa
Kuat lekat pada beton	> 4 MPa

3. PERILAKU BALOK PENAMPANG PERSEGI

3.1. Kuat Lentur

Apabila balok beton dipasang CFRP maka kuat lentur balok yang terjadi adalah seperti yang diusulkan oleh Kuriger dkk (2001), (lihat gambar 2)

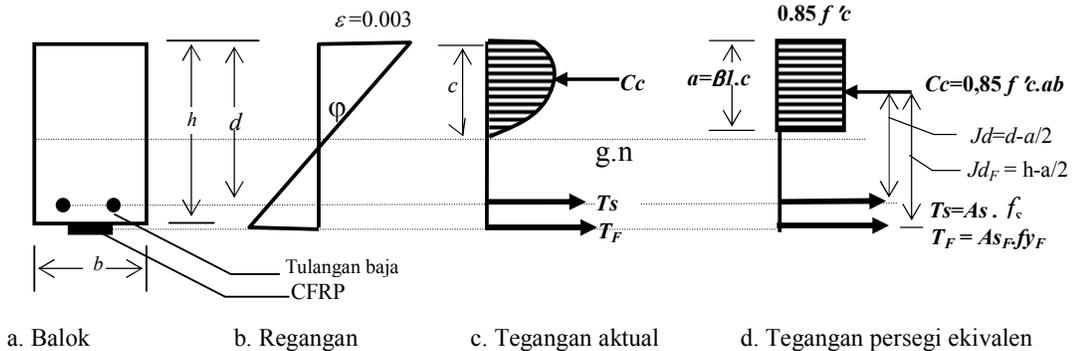
Berdasarkan gambar 2, T_f adalah gaya tarik CFRP; Jd adalah jarak dari gaya tekan beton sampai gaya tarik baja dan Jd_f = jarak dari gaya tekan beton sampai gaya tarik CFRP.

Selanjutnya,

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

$$Ts = As . f_s \dots\dots\dots (2)$$

$$T_F = A_{S_F} \cdot f_{y_F} \dots\dots\dots (3)$$



a. Balok b. Regangan c. Tegangan aktual d. Tegangan persegi ekuivalen

Gambar 2. Distribusi tegangan dan regangan beton dengan CFRP

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

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

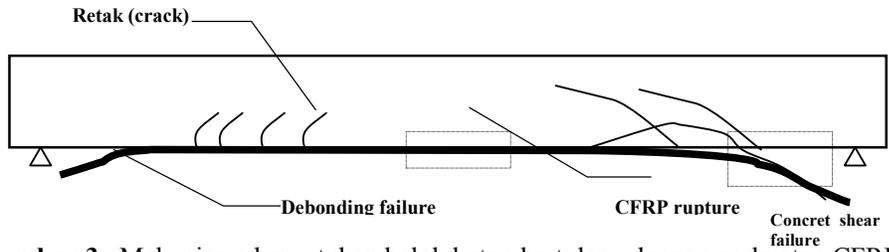
Diperoleh momen:

$$M = A_S \cdot f_s \cdot jd + A_{S_F} \cdot f_{y_F} \cdot jd_F \dots\dots\dots (5)$$

Penambahan suku yang berasal dari komponen CFRP pada persamaan (5) di atas menunjukkan adanya peningkatan kapasitas lentur penampang.

3.2. Pola Keruntuhan Balok yang Diberi CFRP

Kuriger et al (2001) menjelaskan pola keruntuhan pada struktur balok yang diberi CFRP yang dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu : keruntuhan geser, *debonding failure*, dan keruntuhan pada CFRP seperti yang terlihat pada Gambar 3. 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 3. Mekanisme keruntuhan balok beton bertulang dengan perkuatan CFRP (Kuriger, 2001)

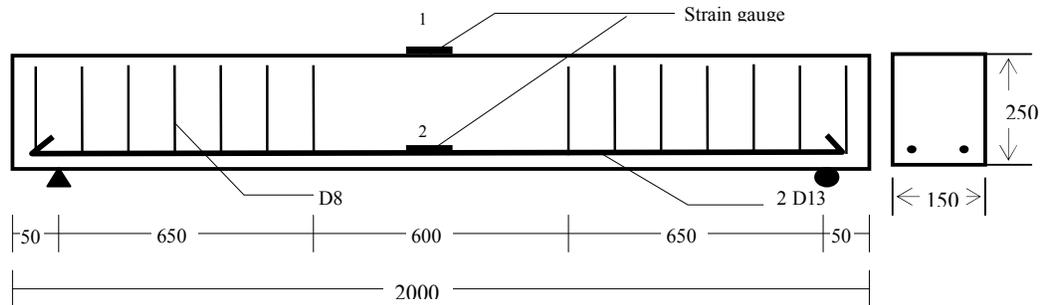
4. PROGRAM PENGUJIAN

4.1. Pembuatan Benda Uji

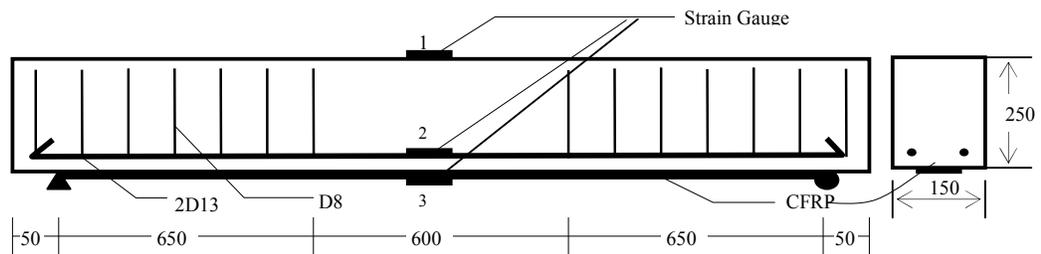
Balok uji terbuat dari beton dengan kuat tekan beton rata-rata 32,97 MPa. Lebar balok 150 mm, tinggi 250 mm dan bentang 2000 mm. Tulangan tarik diameter 13 mm dan mempunyai tegangan leleh (f_y) sebesar 336 MPa. Penulangan direncanakan dengan rasio luas tulangan (ρ) yang memenuhi persyaratan sistem tulangan *underreinforced*. Material komposit CFRP yang ditambahkan pada balok uji secara eksternal sebanyak satu lapis dengan ukuran lebar 50 mm dan tebal 0,8 mm.

4.2. Parameter Pengujian

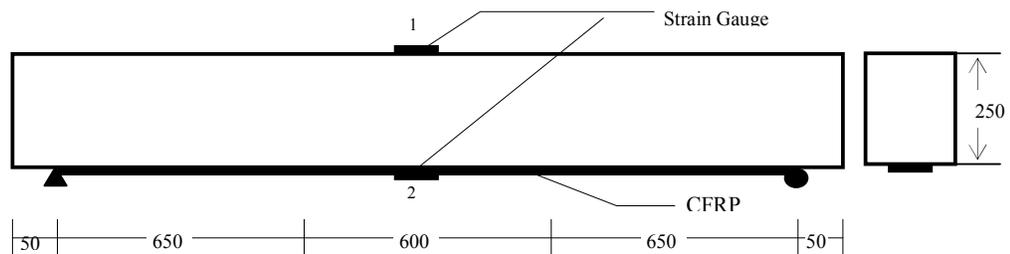
Dalam pengujian ini spesimen yang dibuat sebanyak 3 buah, yaitu : 1 buah balok dengan tulangan tunggal tanpa CFRP, 1 buah balok tulangan tunggal diberi CFRP, dan 1 buah balok beton tanpa tulangan diberi CFRP. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.



a. Balok dengan tulangan tunggal tanpa CFRP (BT)



b. Balok tulangan tunggal diberi CFRP (BTF)



c. Balok tanpa tulangan diberi CFRP (BF)

Gambar 4. Spesimen

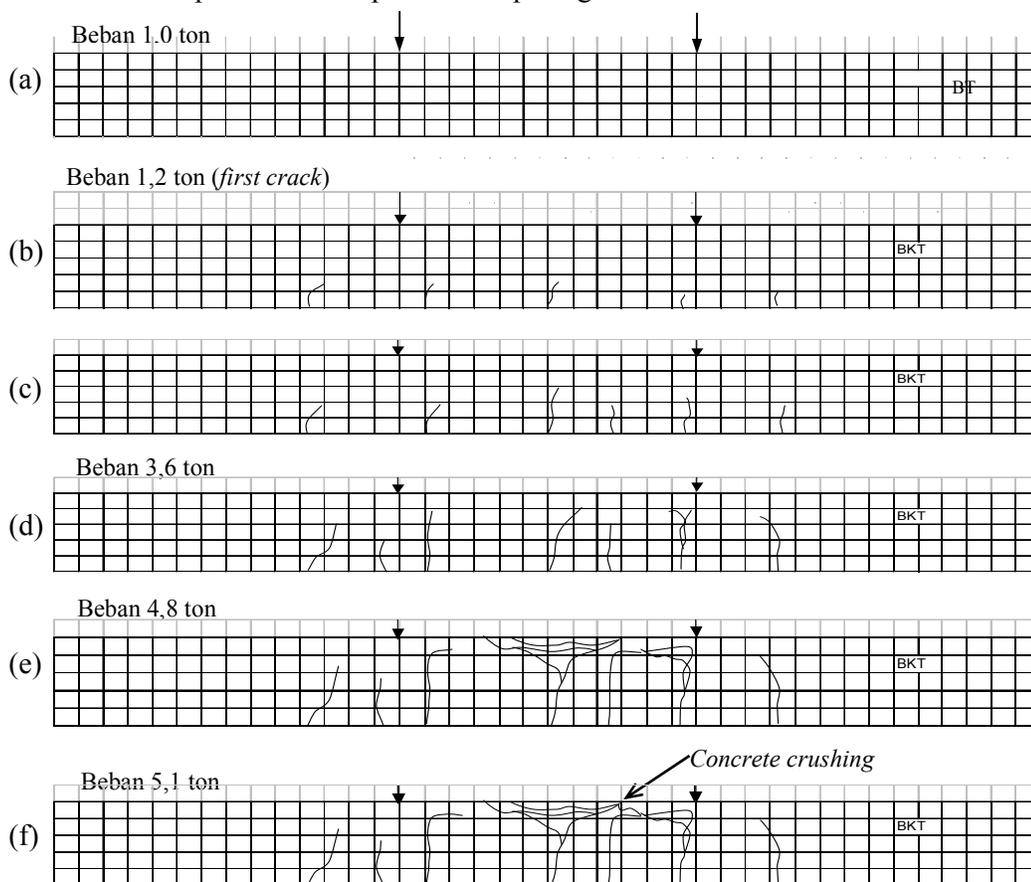
4.3. Pembebanan dan Akuisisi Data

Pembebanan dilakukan dengan bantuan *hydraulic jack* yang mempunyai kapasitas 50 ton dan *load cell* yang mempunyai kapasitas sebesar 60 ton. Sistem pembebanan adalah ‘two point load’ dan dilakukan secara bertahap dengan interval kenaikan sebesar 200 kg. Pembebanan akan dihentikan jika benda uji sudah runtuh dan *data logger* yang membaca besarnya beban dari *load cell* tidak bertambah. Data yang diperoleh dari pengujian meliputi beban, regangan tulangan, regangan beton dan lendutan.

5. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Perilaku Retak Benda Uji BT

Perilaku retak spesimen BT diperlihatkan pada gambar 5.



Gambar 5. Pola retak BT pada beberapa kondisi pembebanan

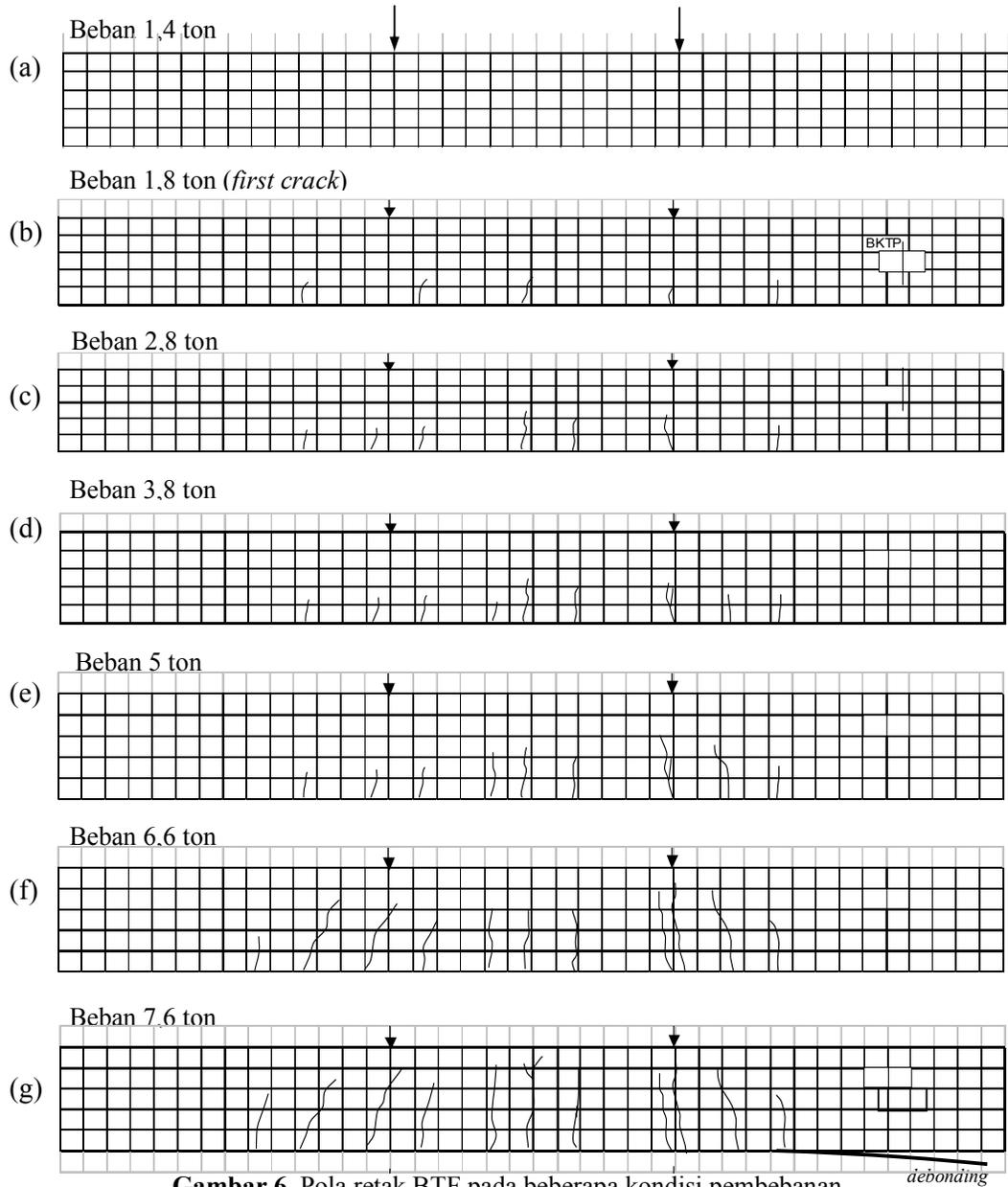
Hingga pembebanan mencapai 1 ton terjadi penambahan lendutan yang sangat kecil, dan beton dalam kondisi belum terjadi retak (*uncracked stage*).

Retak awal (*first crack*) baru terjadi pada beban 1,2 ton (gambar 5b). Kondisi *cracked stage* tersebut ditunjukkan dengan munculnya retak rambut di daerah lentur balok. Perambatan retak bertambah besar setelah beban melebihi 3,6 ton.

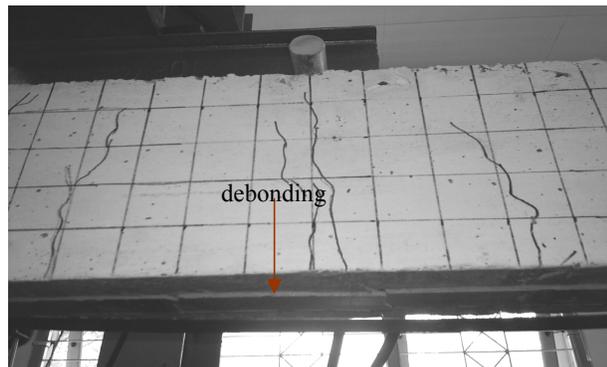
Gambar 5e memperlihatkan bahwa pada beban 4,8 ton retak vertikal dari serat tarik balok bertemu dengan retak horisontal serat tekan balok. Pada saat itu regangan beton mencapai 0,0043. Retak semakin berkembang dan akhirnya mencapai keadaan ultimit pada beban 5,1 ton, seperti terlihat pada Gambar 5f. Retak pada balok didominasi oleh retak di daerah lentur, sedangkan di daerah geser balok masih kuat dibuktikan dengan hanya ada beberapa retak saja yang terletak dekat dengan titik pembebanan. Keruntuhan terjadi karena balok mengalami *concrete crushing*.

5.2. Perilaku Retak BTF

Perilaku retak spesimen BTF diperlihatkan pada gambar 6.



Gambar 6. Pola retak BTF pada beberapa kondisi pembebanan



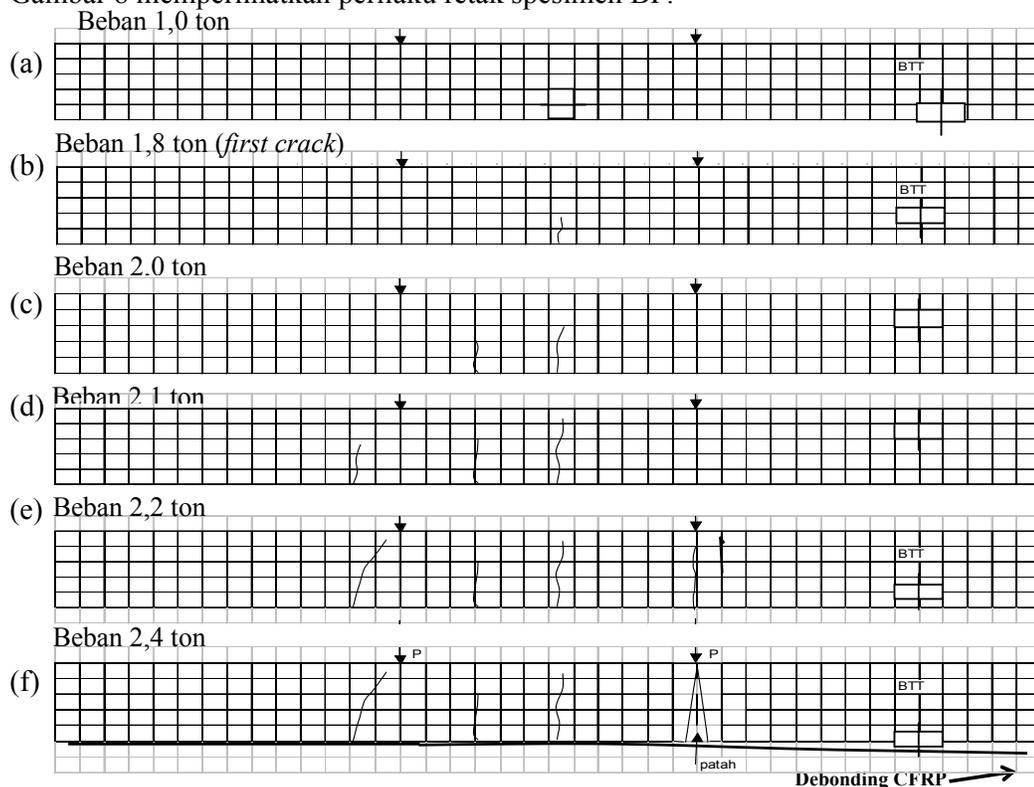
Gambar 7. Pola keruntuhan BTF

Kondisi *uncracked stages* terjadi sampai beban mencapai 1,4 ton. Kemudian perkembangan retak diawali dengan munculnya retak rambut di daerah lentur (bagian serat tarik balok) dengan pola yang simetris, terjadi pada beban 1,8 ton. Pada beban 2,8 ton garis retak bertambah dan mulai berkembang merambat ke atas, terutama retak yang ada di bawah beban P dan di tengah bentang (daerah lentur). Propagasi retak terus berjalan dan mulai berkembang terutama di daerah lentur murni.

Hingga pada beban 5,0 ton retak terus berkembang ke atas, dan saat itu jumlah retak di daerah sebelah kanan bidang lentur terlihat lebih banyak dari daerah kirinya. Pada Gambar 6g terlihat bahwa pada beban 7,6 ton CFRP mengalami *debonding* pada ujung sebelah kanan balok yang terdapat retak lebih banyak, sehingga berakibat keruntuhan pada balok. Pola keruntuhan pada balok BTF dapat dilihat pada Gambar 7.

5.3. Perilaku Retak BF

Gambar 8 memperlihatkan perilaku retak spesimen BF.



Gambar 8. Pola retak BF pada beberapa kondisi pembebanan

Kondisi *uncracked stages* terjadi sampai beban 1 ton (gambar 8a). *First crack* terlihat pada beban 1,8 ton, sehingga CFRP mulai berperan dalam memikul gaya tarik yang bekerja (gambar 8b) pada balok diawali dengan munculnya retak rambut pada beban 1,8 ton di daerah lentur balok.

Setelah beban 1,8 ton regangan CFRP semakin bertambah besar yang membuktikan bahwa gaya tarik yang timbul sudah dipikul sepenuhnya oleh CFRP. Setelah melewati beban 1,4 ton CFRP mulai slip dari beton. Keadaan itu berlangsung hingga beban hampir mencapai 2,4 ton, seperti terlihat pada Gambar 8f.

Pada beban 2,4 ton CFRP mengalami *debonding* di salah satu ujung daerah tumpuan, yang diikuti dengan keruntuhan balok. Hal ini menunjukkan bahwa saat CFRP terlepas dari beton balok tidak mempunyai kemampuan yang cukup untuk menahan gaya tarik sehingga balok mengalami keruntuhan.

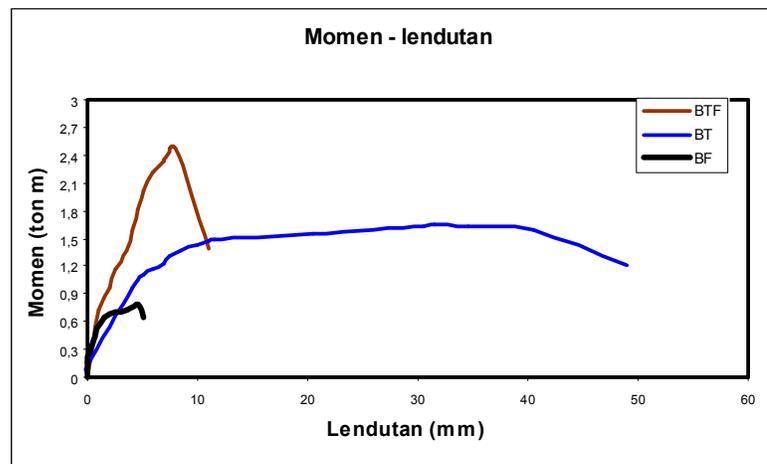
Pada saat beban mencapai ultimit, regangan CFRP yang bekerja sebesar 0,007 dan tegangan tarik yang bekerja sebesar 1155 MPa atau 41% dari tegangan tarik yang bisa dicapai yaitu sebesar 2800 MPa. Hal itu menunjukkan bahwa CFRP belum bekerja optimal, karena terjadi *debonding* sebelum terjadi keruntuhan pada material tersebut seperti yang diharapkan.

5.4. Beban Ultimit dan Pola Keruntuhan

Besar beban ultimit yang dipikul oleh balok uji dan pola keruntuhan yang terjadi diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Momen ultimit benda uji

Spesimen	Penulangan	Beban ultimit (ton)		Momen ultimit (ton)		Keruntuhan
		Eksp.	Analisis	Eksp.	Analisis	
BT		5,1	5,32	1,657	1,728	Lentur
BTF		7,6	12,97	2,47	4,215	Debonding CFRP
BF		2,4	8,25	0,78	2,611	Debonding CFRP



Gambar 10. Momen – lendutan dari benda uji

Dari Tabel 3 terlihat bahwa balok BT hasil eksperimen lebih kecil sebesar 4,2 % dari analisa perhitungan, disebabkan karena beton sendiri bukan material yang homogen yang kekuatannya tergantung dari material pembentuknya, kemungkinan mutu bahan yang dipakai ada yang tidak sesuai dengan hasil uji laboratorium, maupun pelaksanaan penelitian yang kurang cermat. Sedangkan hasil eksperimen pada BTF lebih kecil 41,4 % dari hasil analisa perhitungan karena selain alasan di atas

debonding pada CFRP sangat mendominasi keruntuhannya, walaupun begitu kemampuannya masih lebih besar 49 % dari pada BT sebagai balok normal. Hasil eksperimen pada balok BF menunjukkan kuat lenturnya turun sebesar 52,9% dari balok BT, hal itu disebabkan karena *debonding* pada CFRP bersifat *brittle* yang diikuti dengan keruntuhan balok BF.

Berdasarkan gambar 10, dari sudut kemiringan grafik terlihat bahwa penambahan CFRP dapat meningkatkan kekakuan pada balok, dimana kekakuan balok BTF adalah yang paling besar, sedangkan kekakuan balok BT yang paling kecil. Akan tetapi penambahan CFRP dapat menurunkan daktilitas, yang terbukti dari lendutan ultimit balok BTF sebesar 11 mm lebih kecil dari lendutan ultimit BT yaitu sebesar 49 mm, sedangkan yang paling kecil adalah balok BF hanya sebesar 5 mm, karena tanpa tulangan.

5.5. 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 4.

Tabel 4. Efektifitas CFRP pada balok uji

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

6. KESIMPULAN

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

1. Penambahan pelat CFRP secara eksternal pada serat tarik balok dapat menghambat munculnya *first crack*. Retak awal tersebut ditandai dengan adanya retak-retak rambut pada serat tarik balok sebagai indikasi telah terlampauinya regangan tarik beton.
2. Penambahan pelat CFRP secara eksternal pada balok (BTF) dibandingkan dengan balok normal (BT) dapat meningkatkan kuat lentur sebesar sebesar 49 %.
3. 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 tidak mampu menahan gaya tarik yang terjadi, akibatnya balok runtuh (patah) secara *brittle*.
4. Pola keruntuhan yang terjadi pada semua balok uji dengan penambahan CFRP adalah terjadinya *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 epoxy yang kurang kuat atau bidang kontak yang kurang luas.

7. DAFTAR PUSTAKA

1. Aprile, A., Spacone, E., Limkatanyu, Suchart (2001), *Role of Bond in RC Beams Strengthened with Steel and FRP Plates*, Journal of Structural Eng. December 2001, 1445-1452.
2. Harmon, T., Kim, Y., John, Kardos, Johnson, T, Stark, A. (2003), *Bonds of Surface Mounted Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, ACI Strutural Journal, V.100, No.5, 557-564.
3. Kuriger, R., Sargand, S., Ball, R., dan Alam, K. (2001), *Analysis of Composite Reinforced Concrete Beams*; Dept. Of Mechanical Engineering, Ohio University.
4. Lorenzis, L. dan Nanni, Antonio (2001), *Characterization of FRP Rods as near Surface Mounted Reinforcement*, Journal of Composite for Construction, May 2001, 114-121.
5. Pangestuti, Endah K. (2006), *Pengaruh Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Plate terhadap Perilaku Lentur Struktur Balok Beton Bertulang*; Tesis Magister, Universitas Diponegoro.