

## PERILAKU LENTUR PERBAIKAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN VARIASI LEBAR *CARBON FIBRE REINFORCED POLYMER*

Atika Ulfah Jamal<sup>1</sup>, Helmy Akbar Bale<sup>2</sup> and Iqbal Haqiqi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Indonesia

Email: atika.ulfah@uii.ac.id

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Indonesia

Email: helmy\_abe@yahoo.com

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Indonesia

Email: iqbalhqq@yahoo.com

### ABSTRACT

*The retrofitting of reinforced concrete structural elements required in case of material degradation which results in decreased strength, stiffness, stability and resistance to environmental conditions. One material that can be used to retrofit concrete structures is the Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP). Experimental research must be done toward the influence of CFRP width variations to retrofit reinforced concrete beam flexural capacity after damage. The specimen used for this research is a beam with 15x20x120 cm<sup>3</sup> dimension. There were three beams used and divided into two groups, Control Beam (BK) and Carbon Beam (BC). These three beams were given a load until the first crack then had to retrofit with CFRP, and was given a load again upon the beams finally fallout and the result of maximal load that able to be supported by the beam is obtained. The research result shows that there is the significant increase in the beam flexural strength. The wider CFRP used for retrofitting, the greater beam flexural capacity increases. CFRP uses as retrofitting material in the beam bending area also able to prevent a new crack in the bending area.*

**Keywords:** carbon fibre reinforced polymer, CFRP width variation, retrofitting, the flexural capacity, reinforced concrete beams

### PENDAHULUAN

Struktur beton bertulang banyak digunakan pada konstruksi bangunan gedung di Indonesia, yaitu pada elemen balok, kolom, pelat maupun pondasi. Struktur bangunan yang telah direncanakan dengan baik dan dibangun, terkadang setelah difungsikan mempunyai beberapa permasalahan. Permasalahan tersebut dapat berkaitan dengan kegagalan dan kerusakan bangunan akibat masalah *durability*, kesalahan perencanaan dan pelaksanaan, *overloading* akibat kenaikan beban karena perubahan fungsi bangunan, dan penyebab khusus (gempa, banjir dan kebakaran).

Kerusakan yang terjadi pada struktur beton bertulang dapat berupa retak pada balok dan kolom, kolom patah atau miring dan balok yang melengkung. Retak pada struktur beton bertulang akan mengakibatkan tulangan baja mengalami korosi karena pengaruh lingkungan seperti garam, bahan kimia dan kelembaban, sehingga struktur mengalami penurunan kekuatan, kekakuan, *service life* serta kegagalan beton yang pada akhirnya dapat mengakibatkan kegagalan struktural (Gangarao dkk, 2007).

Perbaikan atau perkuatan elemen-elemen struktur diperlukan apabila terjadi degradasi bahan yang berakibat tidak terpenuhi lagi persyaratan-persyaratan yang bersifat teknik yaitu : kekuatan (*strength*), kekakuan

(*stiffnes*), stabilitas (*stability*) dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan (*durability*) (Triwiyono, 2006).

Salah satu metode perbaikan dan perkuatan struktur beton adalah dengan menggunakan *Fibre Reinforced Polymer* (FRP). FRP mempunyai banyak jenis, antara lain adalah CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*).

FRP adalah inovasi perkuatan komposit yang saat ini banyak digunakan sebagai perkuatan eksternal tambahan pada struktur karena sifatnya setelah dipasang pada struktur beton mampu menghilangkan kekurangan beton yang getas menjadi struktur yang *ductile* (Parmo dan Taufikurrahman, 2014).

Menurut Hartomo (2003), FRP memberikan keuntungan antara lain memberikan kuat tarik yang tinggi, sangat ringan, pelaksanaan lebih cepat, tidak memerlukan area kerja yang luas, dan tidak mengalami korosi. Kuat tarik FRP dapat mencapai 7-10 kali lebih tinggi dari baja.

Penelitian Pangestuti dkk (2006) menyimpulkan bahwa penambahan pelat CFRP dengan lebar 50 mm dan tebal 0,8 mm secara eksternal pada sepanjang balok beton bertulang terhadap balok normal dapat meningkatkan kuat lentur sebesar sebesar 49 %, dan dapat meningkatkan kekakuan sebesar 68%, akan tetapi daktilitas turun sebesar 73% dan lendutannya turun 77,6 %.

Penelitian terkait lebar CFRP perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap peningkatan kekuatan lentur dari balok beton bertulang. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan kajian eksperimental dengan menambahkan variasi lebar CFRP yang diletakkan di bagian tarik balok beton bertulang sebagai bahan *retrofitting* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap perbaikan kekuatan lentur balok beton bertulang paska kerusakan.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

Tegangan lentur pada balok diakibatkan oleh regangan yang timbul karena adanya beban luar. Apabila beban bertambah maka pada balok akan terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan retak lentur di sepanjang bentang balok. Bila beban semakin bertambah, pada akhirnya terjadi keruntuhan elemen struktur. Taraf pembebanan yang demikian disebut keadaan limit dari keruntuhan pada lentur (Nawy, 2008).

Apabila kekuatan tarik beton telah terlampaui, maka beton mengalami retak rambut. Oleh karena itu beton tidak dapat meneruskan gaya tarik pada daerah retak, sehingga seluruh gaya tarik yang timbul ditahan oleh baja tulangan. Pada kondisi tersebut, distribusi tegangan beton tekan masih dianggap sebanding dengan nilai regangannya (Nawy, 2008).

Balok yang diperkuat dengan CFRP akan berbeda dalam proses analisisnya. Pada umumnya, CFRP diletakkan di bagian tarik balok beton bertulang yaitu di bagian bawah balok tersebut. Penambahan CFRP pada akan menyebabkan bertambahnya gaya tarik pada balok (Gambar 1). Bertambahnya resultan gaya tarik akan berpengaruh terhadap kuat lentur dari beton bertulang tersebut. Penambahan perkuatan FRP pada bagian tarik di sepanjang balok akan meningkatkan kuat lentur balok tersebut. (ACI-440.2R-08,2008)

$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b$$

$$T_s = A_s \cdot f_{ys}$$

$$T_f = A_f \cdot f_{yf}$$

Syarat keseimbangan gaya-gaya dalam penampang balok dengan CFRP :

$$C = T$$

$$C = T_s + T_f$$

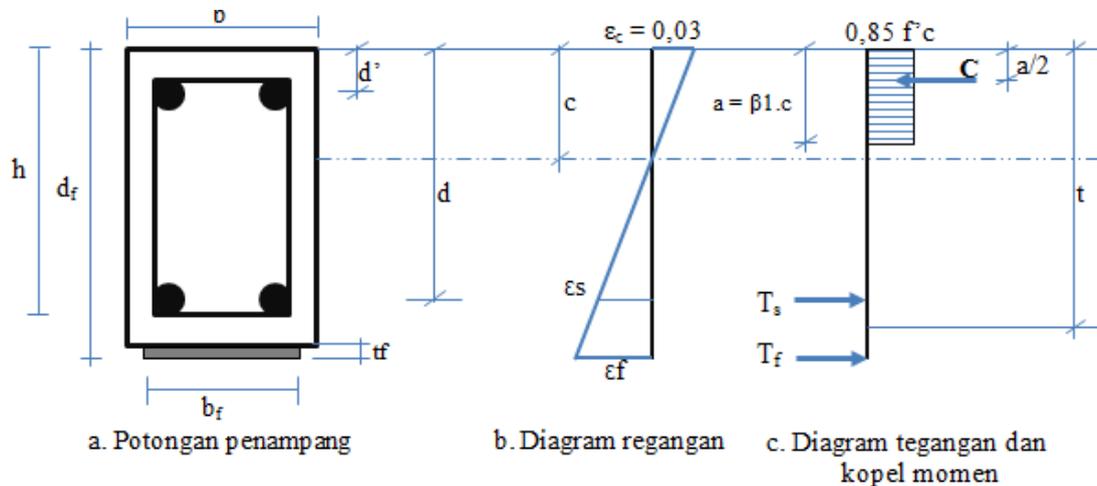
$$0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b = A_s \cdot f_{ys} + A_f \cdot f_{yf}$$

$$a = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b}{A_s \cdot f_{ys} + A_f \cdot f_{yf}}$$

Sehingga akan menghasilkan Momen sebesar:

$$M_n = A_s \cdot f_{ys} \cdot j_d + A_f \cdot f_{yf} \cdot j_{df}$$

dengan  $T_s$  adalah resultan gaya tarik dari baja dan  $T_f$  adalah resultan gaya tarik dari CFRP.



Gambar 1 Diagram regangan tegangan untuk perkuatan FRP (ACI-440.2R-08,2008)

**Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP)**

Carbon fibre reinforced polymer (CFRP) merupakan bahan perkuatan lentur dan dipasang pada permukaan bawah balok. Bahan yang dipakai adalah tipe 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

Properties	CFRP
Kuat Tarik	2800 MPa
Modulus – E	165.000 Mpa
Ecu	>1,7%
Tebal / lebar	0,8 mm / 50 mm
Berat isi	1,50 g/cm <sup>3</sup>

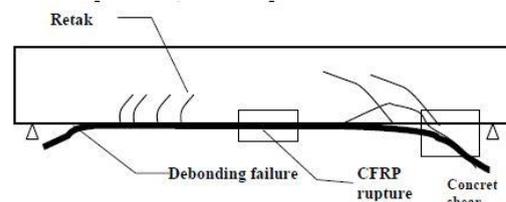
Sumber: Sika Technical Data Sheet 2005

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa bila dibandingkan dengan tulangan baja, maka CFRP mempunyai kuat tarik yang cukup tinggi dan berat yang lebih ringan dari baja, akan tetapi lebih lunak dari baja karena

modulus elastisitasnya lebih kecil dibanding modulus elastisitas baja ( $E_s = 200.000$  MPa).

**Mekanisme Keruntuhan Balok Yang Diperkuat 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 2. 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 2 Mekanisme Keruntuhan balok beton bertulang dengan CFRP (Kuringer et al, 2001)

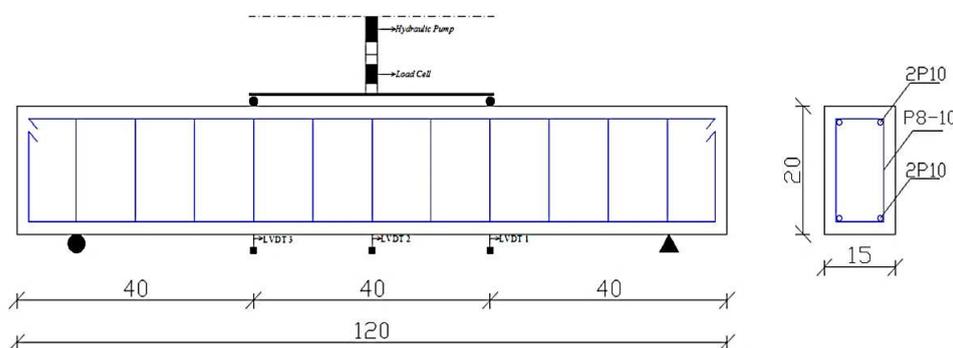
**METODE PENELITIAN**

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Program Studi Teknik Sipil, FTSP, UII. Pada penelitian ini dipergunakan 3 buah balok beton bertulang dengan ukuran 15cm x 20cm x 120cm dan dibagi menjadi 2 kelompok yaitu Balok Kontrol (BK) dan Balok Carbon (BC). Konfigurasi penulangan dan posisi pembebanan dapat dilihat pada Gambar 3.

Pembebanan yang diberikan pada balok adalah beban titik yang distribusikan

menjadi 2 beban terpusat dengan jarak sepertiga bentang seperti yang terlihat pada Gambar 3 dan *setting-up* pengujian dapat dilihat pada Gambar 4. Pembebanan dilakukan dalam dua tahap yaitu:

1. tahap I : balok BK dibebani hingga mencapai retak pertama (*first crack*) kemudian pembebanan dihentikan, dan
2. tahap II: setelah balok *retrofitting* dengan CFRP, balok BC kembali diberi beban hingga runtuh.



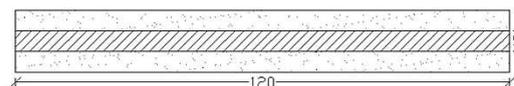
Gambar 3 Konfigurasi penulangan dan penempatan beban pada benda uji



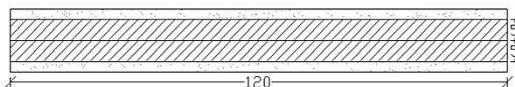
Gambar 4 Setting-up pengujian

Bahan CFRP yang digunakan adalah type Sika Carbodur S512/80 dan perekat yang digunakan adalah epoxy Sikadur 30. Berdasarkan hasil uji kuat tekan silinder ukuran 150 mm x 30 mm, mutu beton ( $f'c$ ) yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 27,77 MPa. Tulangan tarik dan tekan menggunakan baja polos berdiameter 10 mm dengan  $f_y = 315$  MPa, sedangkan tulangan sengkang menggunakan baja polos berdiameter 8 mm dengan  $f_{ys} = 376$  MPa.

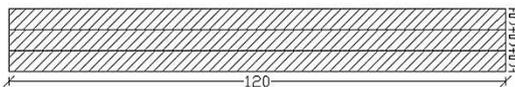
Posisi pemasangan *Carbon Fibre Reinforced Polymer* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5-7 berikut.



Gambar 5 Posisi pemasangan CFRP dengan lebar 5 cm pada BC1



Gambar 6 Posisi pemasangan CFRP dengan lebar 10 cm pada BC2



Gambar 7 Posisi pemasangan CFRP dengan lebar 15 cm pada BC3

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### Beban dan Lentutan

Pada penelitian ini, pengujian awal dilakukan dengan memberikan beban pada benda uji sampai terjadi retak pertama (*first crack*). Nilai lentutan dan beban pada saat *first crack* hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2. Dari Tabel 2 dapat dilihat besar beban dan lentutan saat *first crack* pada BK1 pada adalah sebesar 72,2416 kN dan lentutan sebesar 8,07 mm, BK2 pada beban 79,8396 kN terjadi lentutan sebesar 10,18 mm dan BK3 pada beban 78,5468 kN terjadi lentutan sebesar 10,85 mm.

Tabel 2 Lentutan dan beban pada saat first crack

Benda Uji	No LVDT	Lentutan (mm)	Beban (kN)
BK1	1	7,07	75,2416
	2	8,07	
	3	7,76	
BK2	1	9,70	79,8395
	2	10,18	
	3	8,20	
BK3	1	10,34	78,5468
	2	10,85	
	3	10,68	

Nilai lentutan dan beban hasil pengujian pada balok yang telah *diretrofitting* menggunakan CFRP dengan variasi lebar CFRP dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

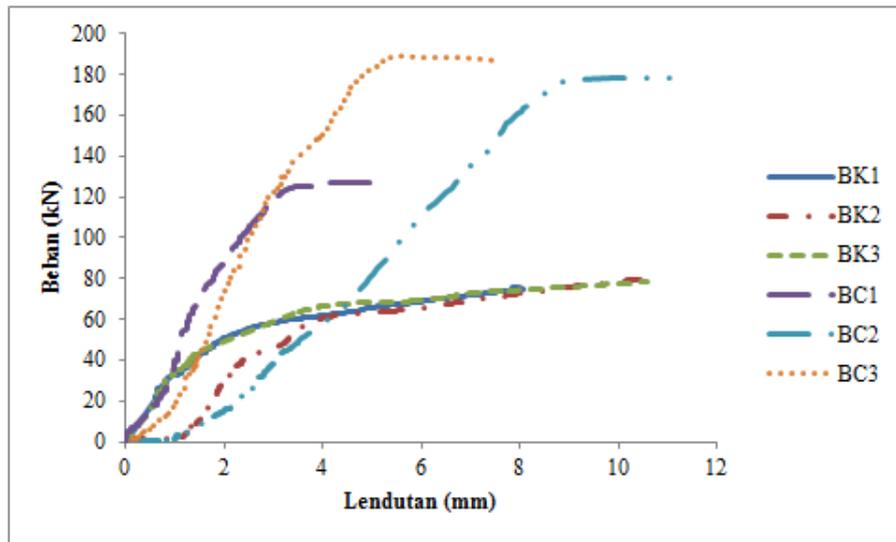
Tabel 3 Lentutan dan beban maksimum balok setelah *diretrofitting*

Benda Uji	No LVDT	Lentutan (mm)	Beban (kN)
BC1	1	6,65	127,2542
	2	8,10	
	3	6,06	
BC2	1	12,68	178,3521
	2	16,31	
	3	13,92	
BC3	1	9,53	188,7094
	2	11,64	
	3	8,62	

Dari Tabel 3 dapat dilihat pada BC1 terjadi lentutan sebesar 8,10 mm pada beban maksimum 127,2542 kN, pada BC2 terjadi lentutan sebesar 16,31 mm pada beban maksimum 178,3521 kN, dan pada BC3 terjadi lentutan sebesar 11,64mm pada beban maksimum 188,7094 kN.

Berdasarkan Tabel 2 dan 3 terlihat bahwa balok yang *diretrofitting* menggunakan CFRP dapat menerima beban yang lebih besar dengan lentutan yang terjadi lebih kecil.

Gambar 8 menunjukkan hubungan beban dan lentutan hasil pengujian 6 benda uji. Berdasarkan gambar 8 terlihat bahwa terjadi peningkatan kapasitas beban pada benda uji yang telah diperbaiki menggunakan CFRP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas beban yang dapat ditahan oleh balok cukup signifikan. BK1 yang sebelumnya hanya dapat menahan beban sebesar 78,5486 kN setelah di *retrofitting* dengan CFRP BC1 dapat menahan beban sebesar 127,2542 kN meningkat 62,00%. BK2 yang sebelumnya hanya dapat menahan beban sebesar 79,8395 kN setelah di *retrofitting* dengan CFRP BC2 dapat menahan beban sebesar 178,3521 kN meningkat 123,38%. BK3 yang sebelumnya hanya dapat menahan beban sebesar 78,5468 kN setelah di *retrofitting* dengan CFRP BC3 dapat menahan beban sebesar 188,7094 kN meningkat 140,25%.



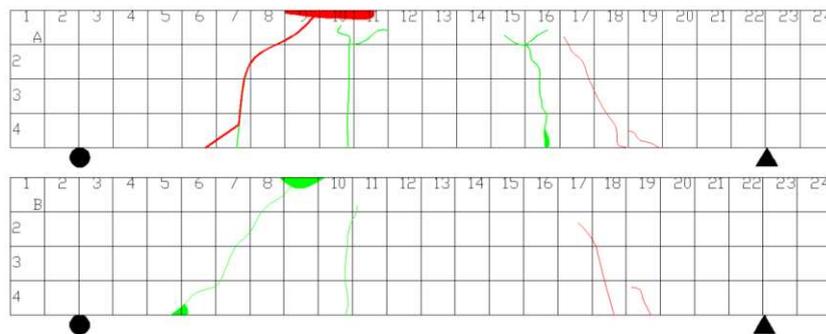
Gambar 8 Kurva hubungan beban dan lendutan hasil pengujian

**Pola Keretakan Balok Uji**

Pola retak yang terjadi pada balok adalah berupa retak lentur dan retak geser. Pada pengujian yang telah dilakukan, retak-retak yang terjadi pada benda uji umumnya diawali dengan retak halus pada sisi bawah benda uji yaitu sisi tarik dari penampang lalu diikuti dengan retak lentur pada sisi yang

telah terjadi retak halus sebelumnya. Retak lentur terjadi pada daerah momen terbesar, yaitu sekitar tengah bentang tepatnya berada pada daerah dua beban titik diberikan.

Pola retak hasil pengujian pada BK1, BK 2 dan BK 3 dapat dilihat pada Gambar 9, 10 dan 11.



Keterangan:

- : Pola retak pada balok sebelum *diretrofitting* dengan CFRP
- : Pola retak pada balok setelah *diretrofitting* dengan CFRP

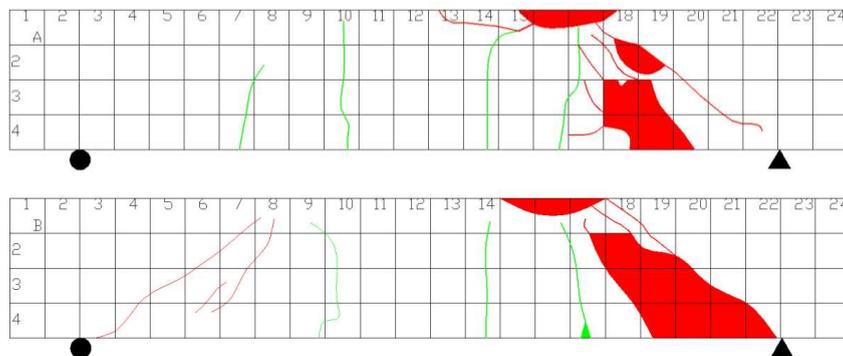
Gambar 9 Pola retak BK1 dan BC1



Keterangan:

- : Pola retak pada balok sebelum *diretrofitting* dengan CFRP
- : Pola retak pada balok setelah *diretrofitting* dengan CFRP

Gambar 10 Pola retak BK2 dan BC2



Keterangan:

- : Pola retak pada balok sebelum *diretrofitting* dengan CFRP
- : Pola retak pada balok setelah *diretrofitting* dengan CFRP

Gambar 11 Pola retak BK3 dan BC3

Gambar 9 menunjukkan bahwa keretakan yang terjadi pada BK1 dan BC2. Pola keretakan BK1 adalah keretakan lentur dengan panjang retakan  $\pm 20$ cm dan lebar retakan sebesar  $\pm 8$ mm. Pada BK1 hanya terdapat 1 retak geser pada bagian sisi B balok dengan lebar retakan  $\pm 5$ mm. Untuk pola retak yang terjadi pada BC1, terlihat banyak muncul retakan geser baru di daerah tumpuan balok namun hanya retak rambut. Peningkatan retak awal dengan lebar retakan sebelumnya  $\pm 8$ mm menjadi  $\pm 15$ mm dengan panjang retakan  $\pm 20$ cm. Pelepasan mortar terjadi pada bagian pembebanan balok. Pada balok BC1 yang terjadi adalah kerusakan geser.

Gambar 10 menunjukkan pola keretakan yang terjadi pada pada BK2 dan BC2.

kerusakan yang banyak terjadi pada BK2 adalah kerusakan lentur dengan panjang retakan  $\pm 18$ cm dengan lebar retakan  $\pm 1$ cm dan tidak terdapat retak geser. Untuk pola retak yang terjadi pada BC2, terlihat banyak muncul retakan geser baru di daerah tumpuan dengan lebar retakan  $\pm 8$ mm. Peningkatan retak geser awal dengan lebar retakan sebelumnya  $\pm 8$ mm menjadi  $\pm 15$ mm dengan panjang retakan  $\pm 20$ cm. Pelepasan mortar terjadi pada bagian tumpuan. Pada balok BC1 yang terjadi adalah kerusakan geser.

Gambar 11 menunjukkan pola keretakan BK3 dan BC3. Untuk pola retak yang terjadi pada BK3, kerusakan yang banyak terjadi adalah kerusakan lentur dengan panjang retakan  $\pm 20$ cm dan tidak terdapat retak geser. Sedangkan pola retak yang terjadi

pada BC3 terlihat bahwa banyak muncul retakan geser baru didaerah tumpuan dengan lebar retakan  $\pm 2$ cm yang membuat pelepasan mortar didaerah tumpuan hingga tulangan baja di dalamnya terlihat. Pada balok BC3 yang terjadi adalah kerusakan geser.

Berdasarkan pola keretakan balok uji pada Gambar 8,9, dan 10 menunjukkan bahwa pola keretakan yang terjadi setelah balok diperbaiki dengan menggunakan CFRP adalah retak geser. Hal ini dikarenakan CFRP hanya diletakkan di bagian tarik balok, tidak menutupi seluruh bagian balok termasuk di bagian geser balok. Penggunaan CFRP yang diletakkan di bagian tarik balok hanya dapat meningkatkan kapasitas lentur dari balok tersebut, sehingga balok mengalami retak geser.

### Pola Keruntuhan Balok

Pola keruntuhan yang terjadi pada balok BC1, BC2, dan BC3 adalah *debonding failure* yaitu lepasnya ikatan antara permukaan balok beton dengan permukaan pelat CFRP sebelum CFRP bekerja optimal. *Debonding* diawali dengan munculnya banyak retak-retak geser didaerah geser balok dekat dengan tumpuan. *Debonding* pada CFRP bersifat *brittle* dibandingkan dengan *debonding* pada tulangan yang berlangsung sedikit demi sedikit. *Debonding* terjadi karena beberapa faktor sebagai berikut.

#### 1. 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. Selain itu, lekatan CFRP dan beton sangat dipengaruhi oleh kekasaran bidang

permukaan balok yang diberi *epoxy*. Permukaan balok yang licin mengakibatkan *epoxy* tidak dapat bekerja secara maksimal.

#### 2. 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. Sebagai contoh BC1 yang di-*retrofitting* dengan CFRP dengan lebar 5 cm hanya dapat menahan beban maksimal sebesar  $127,2542$  kN sedangkan BC3 yang di-*retrofitting* dengan CFRP dengan lebar 15 cm dapat menahan beban maksimal sebesar  $188,7094$  kN sebelum terjadi *debonding*.

#### 3. 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*.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat diberikan beberapakesimpulan sebagai berikut.

1. Balok yang diperbaiki dengan CFRP dapat menahan beban yang lebih besar dengan lendutan yang lebih kecil.
2. Semakin lebar CFRP yang digunakan pada *retrofitting*, semakin besar pula peningkatan kekuatan lentur balok. Lebar CFRP 5 cm dapat meningkatkan kapasitas beban sebesar 60%, lebar 10 cm sebesar 123,38% dan lebar 15 cm sebesar 140,25%.
3. Penggunaan CFRP sebagai bahan *retrofitting* di bagian lentur balok juga dapat menghambat munculnya retakan baru di daerah lentur akan tetapi karena kuat tarik CFRP sebesar  $2800$  MPa membuat kondisi balok tidak seimbang. Hal tersebut mengakibatkan balok menjadi *over reinforced*.

4. Pola keruntuhan yang terjadi pada balok yang *diretrofitting* adalah terjadinya *debonding failure*.

#### REFERENCES

- American Concrete Institute., (2008), *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08)*: Reported by ACI Committee 440, ACI Committee 440.
- Gangarao, H, Taly, N and Gangarao, H., (2007), *Reinforced Concrete Design with FRP Composite*, CRC Press, Prancis.
- Kuringer, Rex., Sargand, Shad., Ball, Ryan., Alam, Khairul., (2001), *Analysis of Composite Reinforced Concrete Beams*, Departement of Mechanical Engineering, Ohio University.
- Hartono, (2003), Perkuatan Struktur Beton dengan FRP, *Proceeding Advances on Concrete Technology and Structures*. Universitas Andalas Padang 8 Mei 2003.
- Pangestuti,E.K., Nuroji., Antonius., (2006), Pengaruh Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Plate Terhadap Perilaku Lentur Struktur Balok Beton Bertulang, *PILAR* Volume 15, Nomor 2, September 2006: halaman 86-94.
- Parmo dan Taufikurrahman., (2014), Perbaikan Kekuatan dan Daktilitas Balok Beton Bertulang Menggunakan *Glass Fibre Reinforced Polymer Strips*, *Jurnal Ilmu Ilmu Teknik*, Vol.X No.3, Universitas Wisnuwardhana, Malang.
- Nawy, Edward., (2008), *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*, PT. Refika Aditama, Bandung.
- Triwiyono,A., (2006), *Perbaikan dan Perkuatan Struktur Beton Pasca Gempa dengan FRP*, *Makalah Seminar Perkembangan Standard dan Methodologi Konstruksi Tahan Gempa*, Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia, Medan.