

PERILAKU KERUNTUHAN BALOK BETON DENGAN PENGGUNAAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)* SEBAGAI PENGGANTI BAJA TULANGAN

Helmy Akbar Bale¹, Hariadi Yulianto¹ dan Yusnanda Luthfi Evin Ayumni²

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

Email: helmy.akbar@uii.ac.id, hariadi.yulianto@uii.ac.id

²Prodi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

Email: 17511226@students.uui.ac.id

ABSTRACT

Reinforced concrete beams are a logical combination of two types material, namely plain concrete and steel reinforcement. Plain Concrete is materials that have high compressive strength but have strength low tensile, while steel reinforcement will provide tensile strength required. The advantages of each of these elements, then configuration between concrete and steel reinforcement is expected to work together as a composite action, where the compression stress is held by the concrete, then the tensile stress by steel reinforcement. An alternative material that has high tensile strength capacity, light weight, and also corrosion resistance is carbon fiber reinforced polymer (CFRP). In this study, the authors replace tension steel to CFRP for concrete beam reinforcement and then compared its collapse behavior. The rectangular reinforced concrete beam consists of 3 different variation those are: singly steel reinforced concrete beam, singly CFRP reinforced concrete beam, mix doubly steel and CFRP reinforced concrete beam. Two-point load flexural bending test was performed to carried out: flexural strength, flexural stiffness and collapse behavior. The result of this experiment: the CFRP rectangular reinforced concrete beam has horizontal shear failure due to lack of bonding strength between CFRP and concrete. Then the flexural stiffness of CFRP Beam higher than ordinary steel reinforced concrete beam.

Keywords: CFRP, beam reinforced concrete, collapse behavior, flexural stiffnes

PENDAHULUAN

Elemen struktural adalah elemen bangunan yang berfungsi untuk mendistribusikan beban yang diterima dan bangunan itu sendiri sampai ke bagian tanah. Dengan demikian beban dapat ditahan dan tidak terjadi keruntuhan atau kerusakan bangunan. Salah satu contoh elemen struktural adalah balok beton bertulang.

Balok beton bertulang terdiri dari beton polos dan baja tulangan. Beton polos merupakan bahan yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi akan tetapi memiliki kekuatan tarik

yang rendah. Sedangkan tulangan baja akan memberikan kekuatan tarik yang diperlukan. Dari kelebihan masing-masing elemen tersebut, diharapkan beton dan tulangan baja dapat saling bekerja sama dalam menahan gaya-gaya yang bekerja, dimana gaya tekan ditahan oleh beton sedangkan gaya tarik oleh tulangan baja.

Salah satu alternatif material pengganti baja tulangan adalah *carbon fiber reinforced polymer (CFRP)*. CFRP memiliki beberapa keunggulan diantaranya: kuat tarik leleh tinggi (Made, et al., 2015), bahan yang ringan,

tahan terhadap korosi, tidak mudah aus (Djamaluddin, et al., 2013).

Djamaluddin, et al. (2013) dalam penelitiannya mengenai “Pengaruh lapisan *Hybrid carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) dan Serat Gelas (GFRP) Terhadap Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang” menyimpulkan bahwa balok yang diperkuat dengan lapisan *hybrid CFRP* dan GFRP dapat meningkatkan kapasitas sebesar 175.19 % untuk Variasi I *hybrid GFRP-CFRP* (BGC) dan 214.69 % untuk Variasi II *hybrid GFRP-CFRP-GFRP* (BGCG) terhadap balok normal. Dengan demikian, pemilihan tulangan dari *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) sebagai bahan pengganti tulangan baja pada elemen balok beton bertulang dapat dipertimbangkan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) sebagai pengganti baja tulangan terhadap pola keruntuhan dan kekuatan lentur balok beton bertulang.

LANDASAN TEORI

Beton Bertulang

Beton dibentuk oleh pengerasan campuran semen, air, agregat halus, agregat kasar (batu pecah atau kerikil), udara, dan kadang-kadang campuran tambahan lainnya. Campuran yang masih plastis ini dicor ke dalam cetakan dan dirawat untuk mempercepat reaksi hidrasi campuran semen dan air yang menyebabkan pengerasan beton. Bahan yang terbentuk ini mempunyai kekuatan tekan yang tinggi, dan ketahanan terhadap tarik rendah.

Baja tulangan terdiri dari batang, kawat, dan jaring kawat baja las yang seluruhnya dirakit dengan standar yang telah ditetapkan. Baja tulangan dapat menahan beban Tarik maupun beban tekan. Tulangan yang dapat digunakan dalam elemen beton bertulang hanya dibatasi pada baja tulangan dan kawat baja saja (BSN, 2019).

Terdapat 2 jenis baja tulangan yang ada di pasaran, yaitu baja tulangan polos (BJTP) dan baja tulangan ulir atau *deform* (BJTD).

Tulangan polos digunakan untuk tulangan sengkang dan mempunyai nilai tegangan leleh (f_y) minimal 240 MPa. Sedangkan tulangan ulir digunakan untuk tulangan memanjang, dan mempunyai nilai tegangan leleh (f_y) minimal 300 MPa.

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

CFRP merupakan salah satu jenis *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) yang terbuat dari karbon. CFRP merupakan sejenis plat baja tipis yang mengandung serat-serat karbon dan *fiber*. Kelebihan dari material ini adalah lebih baik dibandingkan GFRP dilihat dari kekuatan dan elastisitasnya yang jauh lebih baik. CFRP mempunyai kuat tarik yang lebih tinggi dari kuat tarik baja tulangan sebesar 2800 MPa, mempunyai modulus elastisitas (E) sebesar 165.000 Mpa, tidak mengalami korosi karena terbuat dari bahan non logam, mempunyai penampang yang kecil dan sangat ringan ($1,5 \text{ g/cm}^3$, mudah dalam pemasangannya. Namun kekurangan CFRP adalah masih sangat mahal (Sianipar, 2009).

Kekakuan dan Keruntuhan

Menurut Fajar, et al. (2016), kekakuan (*stiffness*) merupakan suatu ukuran tegangan yang diperlukan guna mengubah satuan bentuk suatu bahan. Besaran kekakuan suatu bahan adalah modulus elastisitasnya, yang didapat dengan membagi tegangan satuan yang diterima bahan dengan perubahan satuan bentuk bahan tersebut.

Faktor yang menyebabkan keruntuhan atau retak pada balok adalah tegangan yang terjadi terutama tegangan tarik. Menurut McCormac (2001), pola retak untuk balok dibedakan menjadi 5 macam yaitu retak lentur, retak geser, retak geser lentur, retak puntir, retak lekatan.

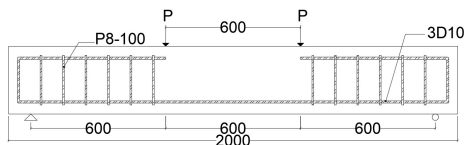
METODOLOGI PENELITIAN

Secara umum terdapat pengujian pendahuluan dan pengujian utama dalam penelitian ini. Pengujian pendahuluan terdiri dari: pengujian tarik baja tulangan dan CFRP serta pengujian mutu beton dengan uji

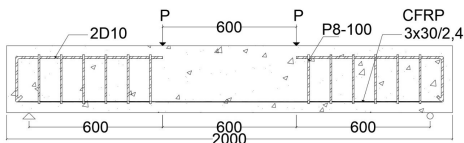
hammer balok beton dan uji desak sampel silinder.

Uji tarik CFRP mengacu pada ASTM D3039 untuk metode pengujianya serta dimensi sampelnya (ASTM International, 2002). Pengujian tarik baja mengacu pada SNI 07-2529-1991 (BSN, 1991). Pengujian desak silinder beton mengacu pada SNI 1974-2011 (BSN, 2011) dan uji hammer mengacu pada SNI 03-440-1997 (BSN, 1997).

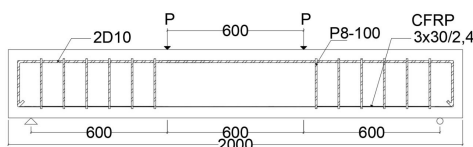
Adapun pengujian utama berupa uji lentur balok beton bertulang dengan metode uji lentur dengan beban 2 titik. Terdapat 11 buah sampel balok beton bertulang, yaitu 3 balok kontrol (dengan tunggal baja 3P10), 4 balok variasi 1 (dengan tulangan tunggal CFRP 3×30/2,4) dan 4 balok variasi 2 (dengan tulangan rangkap campuran baja-CFRP). Tulangan CFRP yang digunakan berdimensi lebar 30 mm, tebal 2,4 mm, panjang 1950 mm sebanyak 3 buah. Dimensi balok beton sampel dengan lebar 200 mm, tinggi 300 mm dan panjang 2000 mm. Detail penempatan tulangan ditunjukkan pada Gambar 1, Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 1. Detail balok kontrol



Gambar 2. Detail balok variasi 1



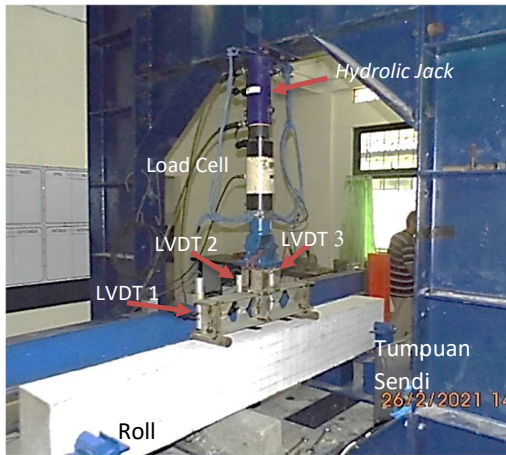
Gambar 3. Detail balok variasi 2

Pada penelitian ini, CFRP hanya ditujukan untuk mengganti tulangan tarik bukan tulangan tekan. Oleh karena itu, balok variasi 1 hanya menggunakan CFRP pada sisi tarik, tanpa ada tulangan tekan di sisi atas. Sampel ini (variasi 1) memberikan data mengenai perilaku lentur balok yang menggunakan CFRP tanpa ada pengaruh dari tulangan tekan. Hal ini yang menyebabkan balok kontrol didesain sebagai balok tulangan tunggal dalam kondisi *under reinforced* sesuai SNI 2847-2019 (BSN, 2019). Melalui perbandingan kedua sampel ini, dapat diketahui pengaruh penggunaan CFRP sebagai pengganti baja tulangan terhadap perilaku lentur balok.

Setelah diketahui pengaruh CFRP sebagai pengganti baja tulangan terhadap perilaku lentur balok, selanjutnya CFRP diaplikasikan pada struktur balok beton tulangan rangkap untuk mensimulasikan kondisi balok pada struktur yang sesungguhnya. Oleh karena itu, balok variasi 2 didesain menjadi balok tulangan rangkap. Sampel ini (variasi 2) memberikan data mengenai perilaku lentur balok tulangan rangkap yang menggunakan CFRP sebagai pengganti tulangan tarik.

Perbandingan antara balok variasi 2 dengan variasi 1, menggambarkan pengaruh tulangan tekan terhadap perilaku lentur dari balok tulangan rangkap yang menggunakan CFRP sebagai pengganti tulangan tarik.

Pengujian lentur yang dilakukan menggunakan metode uji lentur *2 point load* masing masing beban berjarak 600 mm dari tumpuan. Sampel balok beton bertulang memiliki tumpuan sendi dan roll pada *centre line* (1/2 tinggi balok) balok. Lendutan diukur menggunakan LVDT pada tengah bentang (LVDT 2), 600 mm dari tumpuan sendi (LVDT 1) dan 600 mm dari tumpuan roll (LVDT 3) yang dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Detail *setup* pengujian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Baja Tulangan

Hasil pengujian tarik baja polos P-8 (sengkang) memiliki $f_y = 428,2$ MPa dan $f_u = 617,1$ MPa. Sedangkan untuk baja polos P-10 (tulangan pokok) memiliki $f_y = 431,9$ MPa dan $f_u = 643,9$ MPa

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan hasil pengujian dan analisis kuat tarik CFRP sebagaimana dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji tarik CFRP

Sampel	Kuat tarik f_u (MPa)
CFRP 1	268,80
CFRP 2	628,64
CFRP 3	601,33
CFRP 4	433,47
Rerata	483,06

Uji Tekan Silinder Beton dan *Hammer test*

Hasil uji desak silinder yang berasal dari sampel balok pada Tabel 2 sebagaimana berikut.

Tabel 2. Hasil uji desak silinder

No	Kode balok	Kuat desak silinder (MPa)			
		1	2	3	rerata
1	BK1	31,94	31,91	39,15	34,34
2	BK2	24,80	29,80	32,02	28,87

3	BK3	26,32	27,77	32,90	28,99
4	BVI-1	34,09	31,57	-	32,83
5	BVI-2	25,40	25,86	32,39	27,88
6	BVI-3	20,34	32,52	32,95	28,60
7	BVI-4	34,94	30,60	-	32,77
8	BVII-1	20,74	30,27	-	25,51
9	BVII-2	30,07	31,08	21,68	27,61
10	BVII-3	27,25	35,37	33,86	32,16
11	BVII-4	31,61	29,56	31,56	30,91

Adapun *hammer test* dilakukan dengan posisi tegak lurus pada 20 titik yang berbeda. Hasil analisis prediksi kuat tekan beton berdasarkan uji *hammer* ditampilkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil *hammer test*

No	Nama Balok	Perkiraan kuat tekan beton (MPa)
1	BK1	37,55
2	BK2	37
3	BK3	38
4	BVI-1	34
5	BVI-2	34
6	BVI-3	30,65
7	BVI-4	39,25
8	BVII-1	36,8
9	BVII-2	35,2
10	BVII-3	40,5
11	BVII-4	37,15

Berdasarkan tabel Tabel 2 dan Tabel 3 maka dapat disimpulkan bahwa seluruh sampel balok beton memiliki kuat tekan beton di atas mutu rencana ($f_c' = 20$ MPa). Dalam penelitian ini kuat tekan beton yang menjadi acuan adalah kuat tekan beton silinder. Hal ini dikarenakan nilai prediksi dari *hammer test* jauh lebih tinggi dari nilai kuat tekan tertarget ($f_{cr} = 32$ MPa).

Pola keruntuhan Balok Beton Bertulang

Balok Kontrol

Pada pengujian lentur balok kontrol, semua balok mengalami retak lentur. Hal ini karena seluruh retakan dimulai dari bagian bawah lalu secara perlahan seiring bertambahnya beban retakan merambat lurus ke atas. Retakan merambat hingga ke daerah tekan dan semakin melebar disertai dengan munculnya retakan baru di daerah berdekatan dengan ciri yang sama. Seluruh balok kontrol mencapai beban *ultimite* saat beton pada daerah tekan pecah. Pecahnya beton pada sisi tekan terjadi baik pada salah satu sisi titik beban (Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7) maupun di sepanjang daerah tekan antara dua titik beban (Gambar 8). Lendutan akhir yang terjadi pada balok kontrol saat beban *ultimite* sangat besar, hal ini mengindikasikan baja tulangan telah leleh namun tidak putus.



Gambar 5. Keruntuhan BK-2



Gambar 6. Pola keruntuhan BK-1



Gambar 7. Tampak belakang BK-1



Gambar 8. Pola keruntuhan BK-3

Balok Variasi 1

Pada Balok Variasi 1, pembebanan meningkat hingga terjadi penurunan pertama yang diikuti dengan munculnya retak awal secara tiba-tiba sepanjang sepanjang 15 s.d 20 cm dari sisi bawah ke atas terkadang disertai bunyi ledakan putusnya salah satu tulangan CFRP (Gambar 9). Kemudian setelah terjadi penurunan, beban kembali meningkat hingga terjadi penurunan kedua yang disertai munculnya retak baru sepanjang 15 s.d 20 cm secara tiba-tiba. Hal ini berulang 3 atau 4 kali hingga terjadi beban *ultimite*. Selain retak lentur, juga terdapat retak geser horizontal pada beberapa sampel balok variasi I dengan tipikal pola keretakanya ditunjukkan pada Gambar 10. Selain retak geser horizontal, terdapat juga retak geser vertikal pada daerah tumpuan balok (Gambar 13).

Pada saat *ultimite* tercapai, hanya sampel BVI-3 yang tulangan CFRP putus semua (Gambar 12), adapun ketiga sampel lainnya

tidak semua tulangan CFRP putus yang secara tipikal ditunjukkan pada Gambar 11. Fenomena ini (tidak putusnya tulangan saat beban *ultimite*) mengindikasikan terjadinya slip antara tulangan CFRP dengan beton.

Setelah beban *ultimite* tercapai, balok beton bertulang CFRP mengalami keruntuhan lentur ditandai dengan menurunnya nilai beban secara mendadak dan signifikan. Kondisi beton tekan pada beban *ultimite* tidak mengalami kerusakan.



Gambar 9. Pengujian BVI



Gambar 10. Tipikal pola retak horizontal pada BVI



Gambar 11. Tipikal tulangan CFRP yang tidak putus



Gambar 12. Seluruh tulangan CFRP pada BVI-3 putus



Gambar 13. Retak geser vertikal pada tumpuan

Balok Variasi 2

Pada balok variasi 2 ini terjadi perilaku yang serupa dengan balok variasi 1, retak lentur terjadi secara tiba-tiba dan memanjang dari bawah ke atas, juga terdengar bunyi ledakan CFRP putus dan pembebanan langsung menurun. Hal ini berulang 3 atau 4 kali hingga terjadi beban *ultimite*. Pada balok variasi 2, selain mengalami retak lentur juga mengalami retak geser horizontal yang lebih lebar dari pada balok variasi I (Gambar 14). Namun tidak ada yang mengalami retak geser pada tumpuan.

Pada saat mengalami keruntuhan, tulangan CFRP secara kasat mata terlihat seperti tidak putus (Gambar 15). Namun ternyata setelah lapisan selimut beton di bongkar, terlihat bahwa tulangan CFRP telah putus semua namun pada lokasi yang berbeda-beda (Gambar 16).



Gambar 14. Tampak retakan BVII



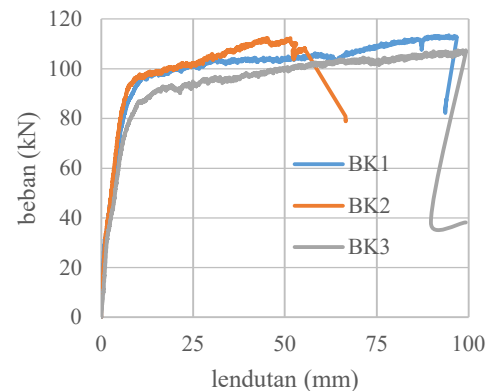
Gambar 15. Tampak CFRP dan rechan BVII



Gambar 16. Tampak CFRP BVII setelah dibongkar

Hubungan Beban-Lendutan Balok Beton

Hubungan beban-lendutan pada pengujian lentur balok kontrol, balok variasi I dan balok Variasi II ditampilkan pada Gambar 17 Gambar 18 dan Gambar 19.

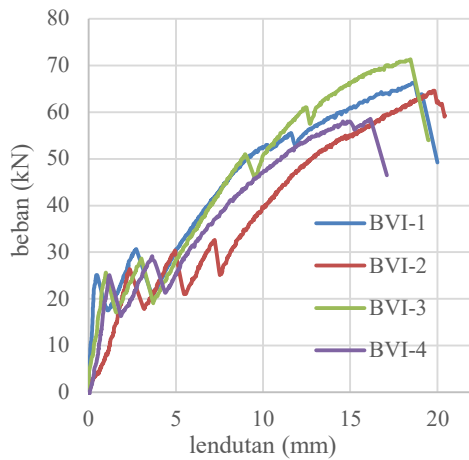


Gambar 17. Grafik beban (kN) vs lendutan (mm) balok kontrol

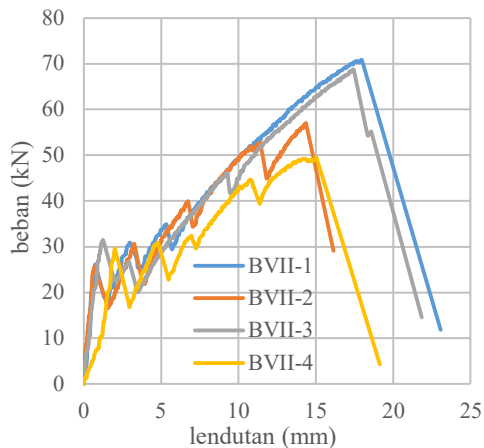
Berdasarkan Gambar 17, dapat disimpulkan bahwa balok kontrol memiliki kekakuan awal yang sama. Hal ini ditandai dengan kemiringan grafik pada fase linier, saling berhimpit. Gambar ini juga menunjukkan bahwa kondisi balok kontrol adalah *under reinforced* karena terdapat beban leleh (beban tidak mengalami peningkatan, namun lendutan bertambah).

Pada balok BVI-2 (Gambar 18) dan BVII-4 (Gambar 19) memiliki kekakuan paling rendah dibandingkan 3 sampel lainnya. Hal ini ditunjukkan dari kemiringan grafik sebelum beban puncak pertama yang lebih landai daripada ketiga sampel lainnya.

Fenomena zig zag pada Gambar 18 dan Gambar 19 terjadi karena CFRP yang putus tidak bersamaan dan terjadi slip antara CFRP dengan beton.

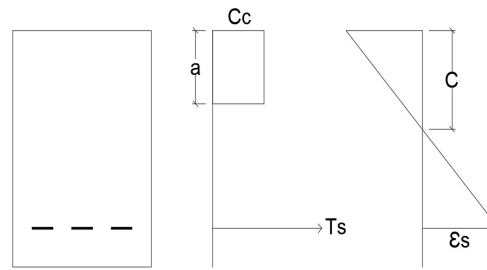


Gambar 18. Grafik beban (kN) vs lendutan (mm) balok variasi 1

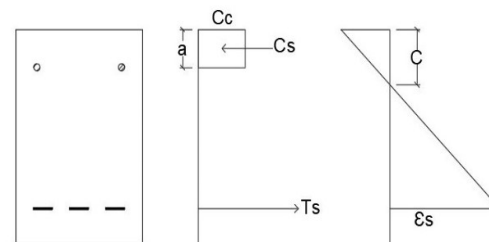


Gambar 19. Grafik beban (kN) vs lendutan (mm) balok variasi 2

Pada balok variasi 2 terjadi fenomena zig zag yang lebih banyak, mengindikasikan terjadi slip lebih besar daripada balok variasi 1. Hal ini terkonfirmasi pada Gambar 14 yang menunjukkan retak geser horizontal yang lebih lebar. Hal tersebut dikarenakan adanya tulangan rangkap pada balok variasi 2 menyebabkan regangan tariknya lebih besar daripada balok variasi 1 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20 dan Gambar 21.



Gambar 20. Diagram regangan tegangan balok variasi 1



Gambar 21. Diagram regangan tegangan balok variasi 2

Pada balok variasi 1 dan 2, setelah salah satu tulangan CFRP putus (grafik zig zag di awal), balok mengalami peningkatan beban lentur hingga mencapai puncak. Hal ini diakibatkan oleh tulangan CFRP yang terakhir bertahan mampu mencapai nilai $f_u = 600$ MPa, sedangkan kedua tulangan lainnya tidak. Seperti yang terjadi pada hasil pengujian tarik CFRP (Tabel 1) yang memiliki nilai f_u yang tidak konsisten.

Setelah mencapai beban puncak, terjadi penurunan beban secara drastis yang diikuti dengan defleksi balok yang tiba tiba bahkan hingga putus (pada balok variasi 1).

Kekakuan Balok Beton

Nilai kekakuan balok dihitung dengan cara beban dibagi dengan besarnya lendutan ketika balok mengalami retak pertama dan saat *ultimite*. Hasil rekapitulasi kekakuan balok retak pertama dan *ultimite* terdapat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Hasil rekapitulasi kekakuan retak pertama

Kode balok	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Kekakuan (kN/mm)
BK 1	33,65	1,31	25,69
BK 2	33,15	1,32	25,11
BK 3	30,39	1,52	19,99
Rerata			23,60
BVI-1	5,78	0,04	144,50
BVI-2	4,27	0,47	9,09
BVI-3	4,77	0,03	159,00
BVI-4	5,02	0,28	17,93
Rerata			82,63
BVII-1	2,26	0,06	37,67
BVII-2	4,02	0,02	201,00
BVII-3	5,02	0,12	41,83
BVII-4	2,01	0,22	9,14
Rerata			72,41

Tabel 5. Hasil Rekapitulasi Kekakuan *Ultimate*

Kode balok	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Kekakuan (kN/mm)
BK 1	113,51	94,62	1,20
BK 2	112,26	51,49	2,18
BK 3	110,25	99,25	1,11
Rerata			1,50
BVI-1	66,3	18,58	3,57
BVI-2	64,54	19,84	3,25
BVI-3	71,07	18,45	3,85
BVI-4	58,76	16,17	3,63
Rerata			3,58
BVII-1	70,82	17,91	3,95
BVII-2	57,01	14,36	3,97
BVII-3	68,81	17,43	3,95
BVII-4	49,47	15,05	3,29
Rerata			3,79

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai kekakuan balok tulangan baja memiliki nilai yang identik sama baik pada kondisi retak pertama maupun *ultimate*. Namun pada balok tulangan CFRP, nilai kekakuan saat retak pertama berbeda beda meskipun nilai kekakuan saat *ultimate* cenderung sama.

Berdasarkan dari hasil pengujian lentur balok diketahui bila penggunaan CFRP sebagai pengganti baja tulangan tidak menaikkan kekuatan balok, dan membuat beton bertulang tersebut menjadi getas sehingga membuat lendutan sangat kecil, retakan yang ditimbulkan sangat tiba tiba dan bersifat langsung menjalar 15-20 cm serta terkadang disertai bunyi putus dari CFRP. Selain itu lekatan yang terjadi antara CFRP dengan beton kurang sempurna, ditandai dengan retak lekatan horizontal pada beberapa titik, juga diketahui bahan tersebut tidak mampu sebagai kait untuk sengkang yang mengakibatkan retak geser. Kekakuan pada balok CFRP memiliki nilai yang berbeda, selain itu pada saat beton mengalami retak dan terdapat bunyi putus dari CFRP pembebanan yang diterima menurun setelah itu meningkat lagi dan ketika terjadi kembali retakan atau terdengar bunyi CFRP putus pembebanan yang diterima menurun kembali dan seterusnya hingga runtuh. Pola keruntuhan pada seluruh balok CFRP mengalami keruntuhan lentur dan terdapat beberapa yang disertai geser namun kondisi CFRP saat runtuh beraneka macam (ada yang putus semua, ada yang hanya sebagian yang putus).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilaksanakan diperoleh hasil dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat kami simpulkan bahwa.

1. Pada balok menggunakan CFRP terdapat retak geser menandakan bahwa CFRP tidak mampu sebagai material untuk mengaitkan sengkang, serta retak horizontal yang menandakan bahwa lekatan antara CFRP dengan beton tidak sempurna dan sebagian terjadi retak pada tumpuan. Namun pada balok menggunakan baja tulangan hanya terjadi retak lentur. Meski demikian, pada semua balok keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan lentur.

2. Kekakuan balok menggunakan CFRP berbeda beda pada kondisi retak pertama, namun relatif sama pada kondisi *ultimite*. Balok dengan tulangan CFRP memiliki kekakuan yang lebih tinggi daripada balok yang menggunakan baja tulangan.

Saran

Berdasarkan kesimpulan diatas, untuk memperoleh hasil penelitian yang lebih baik maka diperlukan beberapa saran. Adapun saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut.

1. Pemasangan tulangan CFRP yang berbeda sehingga diperoleh nilai inersia yang lebih tinggi.
2. Dalam pembuatan sebaiknya disiapkan cetakan yang lebih memadai agar ketebalan resin dan carbon fiber lebih terkontrol.
3. CFRP digunakan tidak sebagai pengganti baja tulangan namun sebagai perkuatan pada lentur dengan berbagai variasi bentuk atau model.
4. Balok yang diuji lentur diuji menggunakan tulangan dari serat karbon asli tanpa adanya tambahan resin. Karena belum tentu apabila serat karbon lemah jika diuji tarik bisa jadi ketika dikompositkan dengan balok dapat meningkatkan kekuatannya.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM International, 2002. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials ASTM D3039 / D3039M*. [Online] Available at: <https://www.astm.org/Standards/D3039> [Diakses 5 Februari 2021].

BSN, 1991. *Metode Pengujian Kuat Tarik Baja Beton SNI 07-2529-1991*. 1 penyunt. Jakarta: BSN.

BSN, 1997. *Pengujian Kuat Tekan Elemen Struktur Beton Dengan Alat Palu Beton Tipe N dan NR SNI 03-4430-1997*. 1 penyunt. Jakarta: BSN.

BSN, 2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder SNI 1974:2011*. 1 penyunt. Jakarta: BSN.

BSN, 2019. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung SNI 2847-2019*. Jakarta: BSN.

Djamaluddin, R., Irmawati, R. & Didipu, N. L., 2013. *Pengaruh Lapisan Hybrid Serat Karbon Dan Serat Gelas Pada Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang*, Makasar: Universitas Hasanudin.

MacCormac, J., 2001. *Desain Beton Bertulang*. 1 penyunt. Jakarta: Erlangga.

Made, D. A., Nyoman, D. P. P. & Eddy, P., 2015. *Uji Kuat Tarik Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sebagai Alternative Pengganti Tulangan Lentur Pada Struktur Beton*. Surabaya, UPN Veteran Jawa Timur, pp. 18-29.

Rizky Fajar Pratama, S. P. B. M. N. W., 2016. *Analisis Kekakuan Struktur Balok Beton Bertulang Dengan Lubang Hollow Core Pada Tengah Balok*, Malang: Universitas brawijaya.

Sianipar, M. T., 2009. *Analisa Kolom Beton Bertulang Yang Diperkuat Dengan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*, Medan: Universitas Sumatra Utara.