STUDI EKPERIMENTAL KUAT LENTUR BALOK DENGAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER* SEBAGAI PENGGANTI BAJA TULANGAN

Hariadi Yulianto[1], Helmy Akbar Bale[1], Amartya Rizki Ananda[2]

[1] Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta
Email: hariadi.yulianto@uii.ac.id, helmy.akbar@uii.ac.id
[2] Alumni Prodi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta
Email: 16511088@students.uii.ac.id

ABSTRACT

Reinforced concrete structure such as reinforce conreted (RC) beam has a weakness namely it self weight is too high, so innovation is needed to overcome this problem without losing its strength. One of them is using a composite Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) as replacement of concrete rebar. The value of the specific gravity of CFRP which is quite small is expected to reduce the self-weight of concrete with the same strength capability. An experimental study was carried out with 3 variants of reinforced concrete beams using a concrete compressive strength of 20 MPa and hand lay-up CFRP bars. The first variant is a standard reinforced concrete beam using steel reinforcement, the second variant is a single reinforced concrete beam CFRP, and the third variant is a double reinforced concrete beam with CFRP and steel reinforcement. Before a two-point load flexure test of RC beam was carried out, the tensile test of CFRP was conducted with guidelines from ASTM D 3039/D 3039M-00. The results showed that flexural strength of CFRP RC beam was decrease on both of varian 2 and varian 3 with average of 41,0746% and 44,4145% respectively compared to the average flexural strength varian 1 (standard steel reinforced concrete). Furthermore, the use of CFRP as reinforcement also resulted in a decrease in the volume weight of reinforced concrete beams up to 4.8516%.

Keywords**:** *RC beam, CFRP, Flexural Strength*

PENDAHULUAN

Beton bertulang adalah suatu kombinasi antara beton dan baja yang dipadukan menjadi satu kesatuan secara komposit. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi beban tarik yang tidak dapat ditahan oleh beton sehingga kombinasi komposit dari beton bertulang memiliki kekuatan dan ketahanan yang lebih baik daripada beton tanpa tulangan (Asroni, 2010). Namun beton bertulang memiliki kelemahan yang paling utama, yaitu rendahnya kekuatan per satuan berat dari beton mengakibatkan beton bertulang menjadi berat yang sangat berpengaruh pada struktur (Pramudhita & Buwono, 2019). Maka dari itu saat ini banyak yang melakukan inovasi untuk membuat beton yang lebih ringan tanpa menghilangkan kekuatan dengan penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) (Onal, 2009).

CFRP memiliki karakteristik yang hampir menyerupai tulangan baja, yaitu dapat menahan beban tarik yang sangat besar (Suryanto, *et al*., 2020). Selain itu, CFRP juga memiliki berat jenis yang jauh lebih kecil daripada tulangan baja sehingga penggunaan CFRP sebagai bahan pengganti tulangan baja dapat memperkecil berat dari struktur beton itu sendiri (Christiawan, 2009).

Salah satu penelitian mengenai aplikasi CFRP sebagai perkuatan di sisi luar balok beton bertulang, menujukkan hasil yang

positif yaitu dapat terjadi peningkatan kekuatan balok beton bertulang sebesar 23,589% dari balok tanpa perkuatan CFRP (Ginardi, 2014).

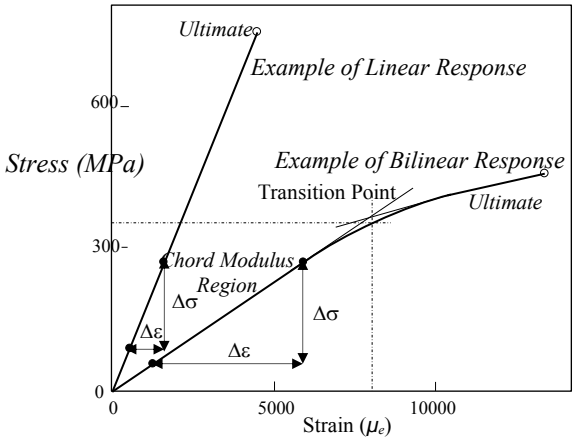
Selain diaplikasikan sebagai perkuatan luar struktur balok beton bertulang, CFRP juga telah diteliti sebagai pengganti tulangan baja pada sampel balok beton berukuran 600 × 150 × 150 mm dengan tulangan CFRP berbentuk pelat berukuran 450 × 60 × 4,5 mm. Variasi tulangan CFRP berupa posisi perletakkan CFRP dalam balok beton yaitu dengan selimut beton dan tanpa selimut beton. Hasilnya, balok beton dengan tulangan CFRP tanpa selimut beton mengalami gagal *slip* dan *split* yang menyebabkan CFRP dan balok beton tejadi *snap*. Namun pada balok dengan selimut beton, hal tersebut (*slip* dan *split*) tidak terjadi, sehingga dapat disimpulkan penggunaan CFRP sebagai tulangan pengganti baja dengan selimut beton dapat menguatkan beton pada area tarik dan dan dapat meningkatkan kekuatan lentur *(*Nor*, et al.*, 2013).

Berdasarkan penelitian sebelumnya, menujukkan CFRP memiliki potensi sebagai material pengganti baja tulangan dan menurunkan berat volume struktur beton bertulang. Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai perilaku komposit CFRP yang dibentuk menyerupai tulangan baja pada struktur balok beton bertulang dengan ukuran struktural. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan CFRP sebagai pengganti baja tulangan terhadap kuat lentur serta berat volume balok beton bertulang struktural.

CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)

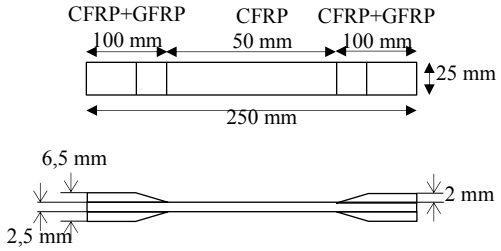
CFRP adalah sebuah material komposit yang menggabungkan keunggulan kekuatan dari serat dengan kekakuan dan massa jenis yang rendah dari matriks. Serat bekerja sebagai unsur yang menentukan karakteristik bahan komposit dan menahan gaya yang bekerja pada bahan komposit sedangkan matriks bertugas melindungi dan mengikat serat, serta meneruskan beban dari luar ke serat (Putra, 2016).

Parameter kekuatan CFRP dalam menerima beban adalah nilai tegangan tarik yang diperoleh dengan pengujian kuat tarik berdasarkan ASTM D 3039/D 3039 (ASTM International, 2002). Dalam standar tersebut terdapat dua kemungkinan perilaku tarik CFRP, yaitu perilaku tarik dengan *transition point* dan perilaku tarik tanpa *transition point* yang dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. grafik tipikal pengujian tarik CFRP
Sumber: (ASTM International, 2002)

Pengujian tarik CFRP dilakukan dengan ukuran benda uji (spesimen) CFRP dengan pedoman dari ASTM D 3039. Gambar 2 di bawah ini menunjukkan ketentuan ukuran spesimen pengujian tarik CFRP.



Gambar 2. Ketentuan ukuran spesimen
sumber: (ASTM International, 2002)

Setelah dilakukan pengujian tarik, nilai tegangan tarik spesimen CFRP dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$F_{tu} = P_{max} / A$ (1)

dengan:

$A = w \times h$ (2)

Keterangan:

F_{tu} = tegangan tarik *ultimate* (MPa)
P_{max} = beban maksimum (N)
A = luas permukaan rerata (mm^2)
w =lebar spesimen (mm)
h = tebal spesimen (mm)

TEGANGAN LEKATAN

Tegangan lekatan merupakan peristiwa saling geser (*shear interlock*) antara elemen tulangan dan beton di sekitarnya. Efek ini dapat dinyatakan sebagai tegangan geser per satuan luas permukaan tulangan. Tegangan ini langsung ditransformasikan dari beton ke permukaan tulangan, sehingga mengubah tegangan tarik di seluruh panjangnya (Nawy, 1985).

Salah satu cara untuk menentukan kualitas lekatan elemen tulangan ialah pengujian *pull out*. Tegangan lekatan diperoleh dengan cara membagi gaya cabut dengan luas permukaan lekatan CFRP terhadap beton sehingga rumus untuk memperoleh tegangan lekatan ialah sebagai berikut.

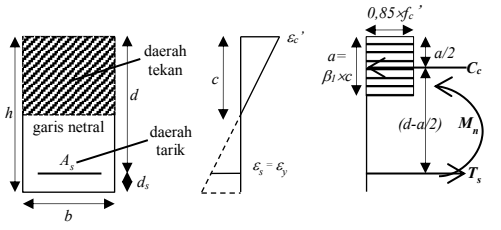
$$\mu = \frac{P_u}{(2 \times l_d \times b_t)} \quad (3)$$

Keterangan:

μ = tegangan lekat CFRP (MPa)
P_u = gaya tarik (N)
l_d = panjang penanaman (mm)
b_t = lebar tulangan (mm)

KUAT LENTUR BETON BERTULANG

Lentur pada balok merupakan akibat dari adanya regangan yang timbul karena adanya tegangan luar (Nawy, 1985). Tegangan luar ini berasal dari kombinasi beban *ultimate* luar struktur balok. Distribusi regangan dan tegangan internal pada balok tulangan tunggal dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Distribusi regangan dan tegangan pada balok tulangan tunggal
Sumber: (Asroni, 2010)

Dari diagram distribusi tersebut, dapat diturunkan persamaan untuk perencanaan balok beton bertulang tunggal.

$\phi M_n = \phi A_s \times f_y \times (d - a/2)$ (4)

dengan:

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0{,}85 \times f_c' \times b} \quad (5)$$

$\phi = 0{,}9$

Keterangan:

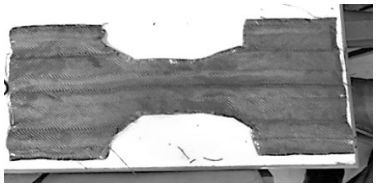
M_n = momen nominal aktual (kNm)
A_s = luas tulangan tarik (mm^2)
f_y = tegangan tarik baja (MPa)
d = tinggi efektif balok (mm)
a = tinggi blok tegangan tekan (mm)
f_c' = tegangan tekan beton (MPa)
b = lebar penampang balok (mm)
ϕ = faktor reduksi kuat lentur

METODOLOGI PENELITIAN

Secara umum terdapat pengujian material dan pengujian utama. Pengujian material terdiri dari: kuat tarik baja, kuat tarik serat karbon, kuat tarik resin, kuat tarik CFRP, dan kuat tekan silinder beton.

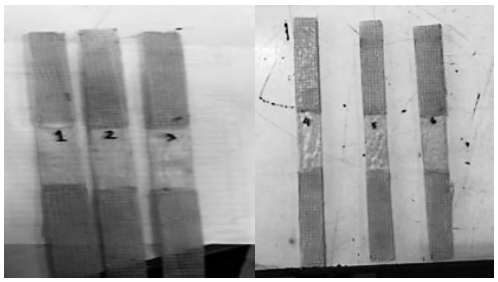
Uji tarik baja mengacu pada SNI 07-2529-1991 (BSN, 1991). Pengujian tarik CFRP dilakukan dengan metode berdasarkan ASTM D3039 (ASTM International, 2002).

Pengujian tarik *carbon fiber* dilakukan pada benda uji dengan ukuran di bagian *grip* dengan lebar 37,5 cm dan panjang 15 cm, sedangkan pada bagian bidang tariknya, memiliki ukuran lebar 17 cm dan panjang 20 cm yang dapat dilihat pada Gambar 4. Kemudian benda uji digulung dan bagian ujungnya diikat.



Gambar 4. Benda uji *carbon fiber*

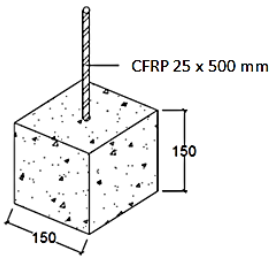
Benda uji tarik resin memiliki ukuran lebar 25 mm, panjang bidang tarik 50 mm, dan panjang pada masing-masing bidang *grip* 100 mm yang ditampilkan pada Gambar 5.



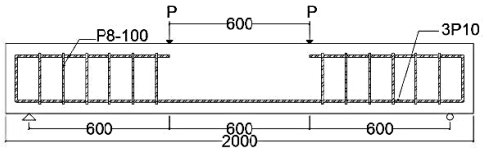
Gambar 5. Benda uji resin

Adapun pengujian utama berupa pengujian *pull out*, uji berat volume balok, dan uji kuat lentur balok.

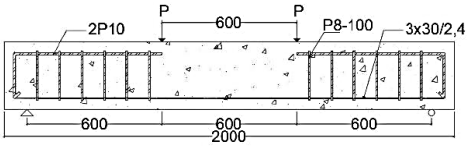
Benda uji *pull out* mengacu pada ASTM C234-91a berbentuk kubus beton dengan sisi sebesar 15 × 15 × 15 cm (ASTM International, 1991). Kemudian CFRP dengan ukuran lebar 25 mm dan panjang 500 mm ditanam pada bagian tengah kubus. Selain itu, dilakukan juga uji berat volume balok dan kuat lentur balok dengan menggunakan sampel balok berukuran 200 × 300 × 2000 mm. Variasi sampel balok berupa penulangan baja (Varian1), penulangan CFRP (Varian 2), dan penulangan CFRP dengan tulangan rangkap baja (Varian 3). Detail penempatan tulangan dalam balok ditunjukkan pada Gambar 7, Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10



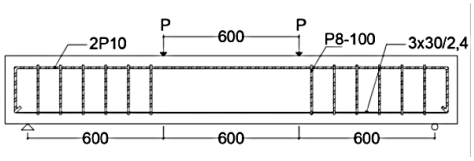
Gambar 6. Benda uji *pull out*



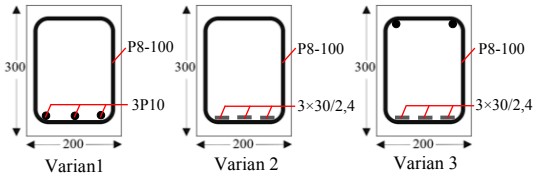
Gambar 7. Detail penulangan varian1



Gambar 8. Detail penulangan varian 2



Gambar 9. Detail Penulangan varian 3



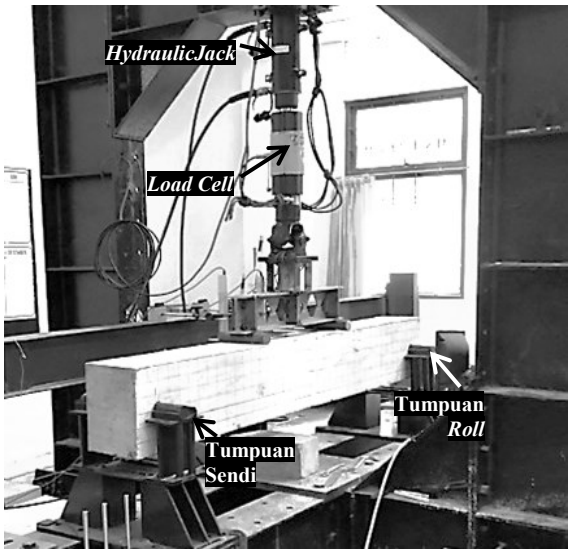
Gambar 10. Detail potongan melintang tengah bentang

Tulangan CFRP yang digunakan berupa 3 buah dengan ukuran masing-masing 30 × 2,4 mm^2. Pada varian 2 CFRP hanya ditujukan untuk mengganti tulangan baja tarik bukan tulangan tekan, sehingga CFRP hanya diletakkan pada sisi tarik beton bertulang (tulangan tunggal). Sampel ini diharapkan dapat memberikan data mengenai pengaruh penggantian baja tulangan tarik dengan CFRP kuat lentur balok tanpa dipengaruhi oleh tulangan tekan.

Adapun pada varian 3, CFRP juga ditujukan untuk menggantikan tulangan baja tarik saja pada struktur balok yang ada di lapangan sehingga digunakan konfigurasi tulangan rangkap dengan tulangan tekan dari baja. Varian 3 ini dapat memberikan data pengaruh adanya tulangan tekan pada balok

beton bertulang CFRP-baja terhadap kuat lenturnya.

Pengujian lentur dilakukan dengan metode uji lentur *2-point load* masing masing beban berjarak 600 mm dari tumpuan (1/3 jarak antar tumpuan). Sampel balok beton bertulang memiliki tumpuan sendi dan roll pada *center line* (1/2 tinggi balok) balok yang dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. *Setting up* benda uji balok beton

Nilai Momen Maksimum (M_{max}) diperoleh dari nilai momen akibat berat sendiri (M_d) yang dijumlah dengan nilai momen akibat pengujian (M_l), sehingga diperoleh rumus seperti berikut.

$$M_{max} = M_d + M_l$$

dengan:

$$M_d = \frac{1}{8} \times q_u \times L^2 \quad (6)$$

$$q_u = \frac{W}{L_{balok}} \quad (7)$$

$$M_l = \frac{P}{2} \times 600 \quad (8)$$

Keterangan:

M_{max} = Momen maksimum (kNm)
M_d = Momen berat sendiri (kNm)
M_l = Momen pengujian (kNm)
q_u = Beban merata (kN/m)
L = Jarak antar tumpuan (m)
W = Berat balok (kN)
L_{balok} = Panjang sampel balok (m)
P = Beban pengujian (kN)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Tekan Silinder Beton

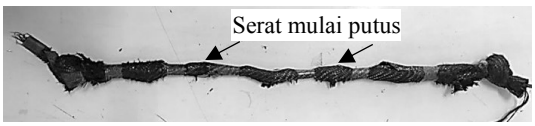
Kuat tekan rencana (f_c') dari *mix design* adalah sebesar 20 MPa, sedangkan kuat tekan yang diperoleh dari hasil pengujian teka silinder didapatkan rata-rata sebesar 24,140 MPa seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Kuat tekan silinder

Sampel	P (kN)	f'_c (MPa)
Sampel 1	420,4	23,585
Sampel 2	431,2	24,763
Sampel 3	431,4	24,074
Rata-rata	427,67	24,104

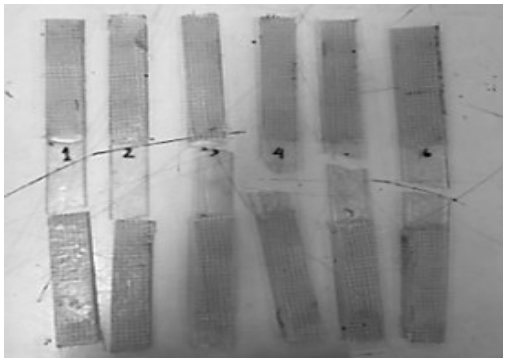
Pengujian Kuat Tarik Material

Pengujian tarik baja P6 diperoleh nilai f_y = 428,22 MPa dan f_u = 617,12 MPa. Pada pengujian tarik baja P10 dihasilkan nilai f_y = 431,90 MPa dan f_u = 643,97 MPa. Grafik tegangan regangan uji kuat tarik baja dapat dilihat pada Gambar 15. Adapun pada pengujian tarik *carbon fiber* diperoleh nilai f_u = 130,22 MPa. Benda uji *carbon fiber* dapat dilihat pada Gambar 12 berikut. Hasil pengujian dalam bentuk grafik tegangan regangan ditunjukkan pada Gambar 16



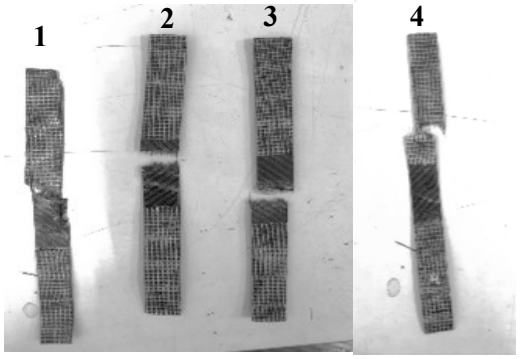
Gambar 12. Benda uji *carbon fiber* setelah diuji

setelah dilakukan pengujian dapat dilihat pada Gambar 13. Hasil uji tarik resin dalam bentuk grafik tegangan regangan ditunjukkan pada Gambar 17. Hasil pengujian tarik resin menghasilkan nilai f_u rerata = 34,79 MPa.



Gambar 13. Benda uji resin setelah diuji

Kondisi benda uji CFRP setelah uji tarik dapat dilihat pada Gambar 14.



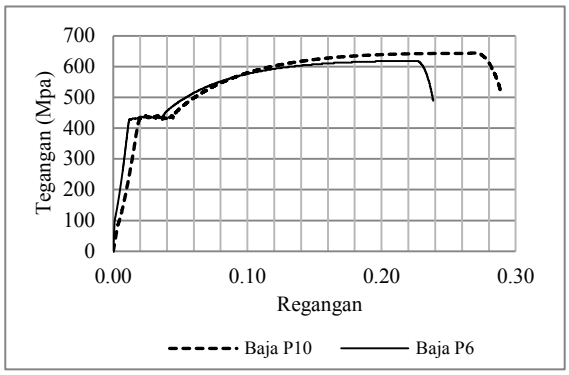
Gambar 14. Benda uji CFRP setelah diuji

Dari hasil kuat tarik CFRP didapatkan nilai f_u rerata 614,99 MPa dari rerata nilai f_u Sampel 2 dan Sampel 3. Hal ini karena sampel 2 dan 3 memiliki mode kegagalan putus yang sempurna (putus sepajang lebar sampel), berbeda dengan sampel 1 dan 4 yang masih menyisakan serat yang belum putus pada salah satu ujung, sehingga nilai kuat tarik sampel 1 dan 4 menjadi sangat rendah sebagai akibat dari ke-tidaksempurnaan mode kegagalan sampel. Oleh karena itu, kuat tarik sampel 1 dan sampel 4 tidak valid. Adapun grafik tegangan regangan uji tarik CFRP ditunjukkan pada Gambar 18.

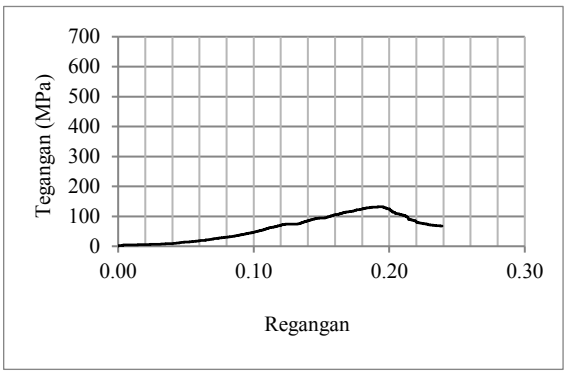
Dari grafik tegangan-regangan baja pada Gambar 15 dapat dilihat bahwa baja memiliki kuat tarik yang tinggi (hingga 600 MPa) dengan sifat daktil terlihat dari nilai regangan tarik yang panjang hingga mencapai 0,3. Begitu pula dengan *carbon fiber*, dapat dilihat pada Gambar 16 bahwa material ini juga daktil dengan regangan maksimum 0,24 namun memiliki kuat tarik hanya 130 MPa.

Dari fenomena yang diamati selama pengujian tarik serat karbon, orientasi anyaman serat karbon berubah selama uji tarik. Tidak semua serat terlihat meregang secara bersama, namun ada bagian yang meregang lebih sedikit dari bagian yang lain, sehingga tidak semua beban tarik bekerja secara merata pada seluruh serat karbon. Hal inilah yang menyebabkan nilai kuat tarik serat karbon cukup rendah (130 MPa). Fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 12 yang menunjukkan hana bagian luar saja serat karbon mulai putus, sedangkan bagian dalam tidak.

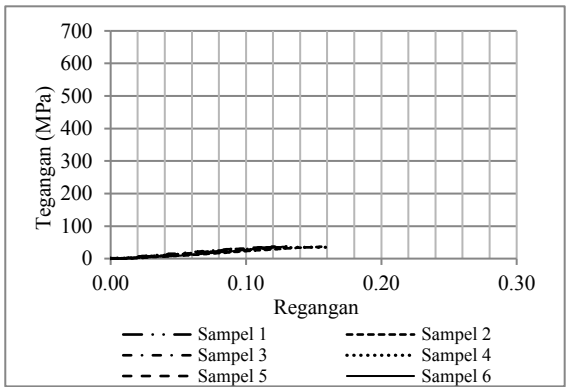
Hasil uji tarik resin (Gambar 17) menunjukkan kuat tarik yang kecil yaitu f_u rerata = 34,79 MPa dengan sifat yang getas. Kapasitas regangan tarik resin hanya sebesar 0,16 paling rendah jika dibandingkan dengan serat karbon dan baja. Berdasarkan nlai kuat tarik resin, maka dapat disimpulkan bahwa resin relatif tidak memberikan kontribusi langsung terhadap kuat tarik CFRP karena kuat tariknya yang hanya 34,79 Mpa dibandingkan CFRP (600 MPa).



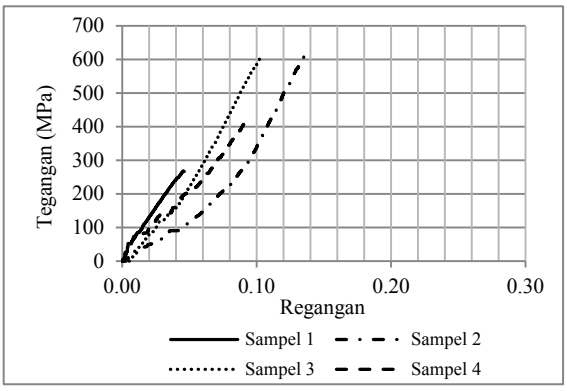
Gambar 15 Grafik uji tarik baja



Gambar 16 Grafik uji tarik *carbon fiber*



Gambar 17 Grafik uji tarik resin

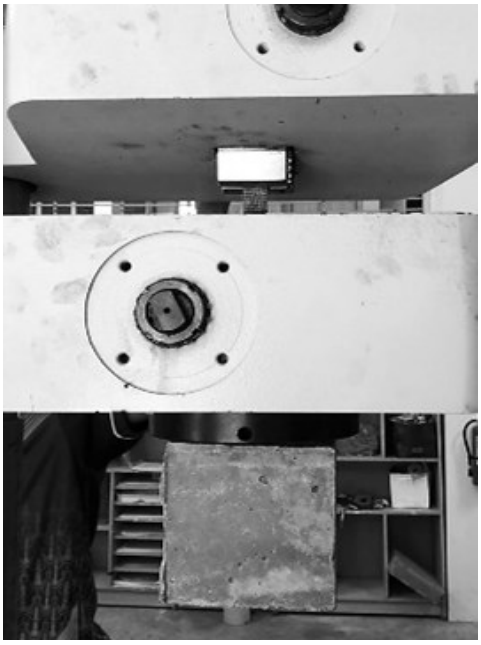


Gambar 18 Grafik uji tarik CFRP

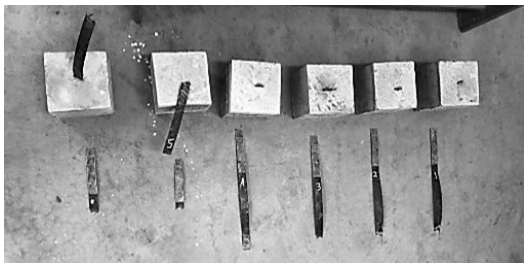
Berdasarkan hasil uji tarik material penyusun CFRP (*carbon fiber* dan resin) serta CFRP itu sendiri maka dapat disimpulkan bahwa *carbon fiber* tidak dapat bekerja sendiri sebagai sebuah material pengganti baja, namun membutuhkan resin sebgai material kompositnya. Material komposit memiliki hubungan yang kuat dengan *interface* yaitu interaksi atau ikatan antara *matrix* (resin) dengan serat penguat (serat karbon) yang berperan dalam menyalurkan beban dari *matrix* menuju serat. Orientasi dan bentuk serat karbon dan matriks resin mempengaruhi interaksi serat-matriks pada daerah *interface* (Hussain, *et al*., 2007). Resin bekerja sebagai pengikat dan matriks pengisi dari *carbon fiber* sehingga seluruh serat pada *carbon fiber* menjadi kaku dapat secara efektif menahan gaya tarik secara bersama setiap helai seratnya. Inilah yang menyebabkan *carbon fiber* yang telah dikompositkan menjadi CFRP dapat memiliki kuat tarik yang sangat tinggi (600 MPa). Selain sebagai pengikat, resin juga mengubah *carbon fiber* yang awalnya bersifat daktail berubah menjadi getas.

Pengujian Pull Out

Pengujian *pull out* dapat dilihat pada dilihat pada Gambar 19. Adapun kondisi sampel setelah uji dapat dilihat pada Gambar 20 Kondisi benda uji pada setelah uji *pull out* seluruhnya putus pada tulangan CFRP dan tidak ada yang tercabut, kubus beton sendiri tidak mengalami keretakan sedikitpun. Hal ini berarti kekuatan lekatan antara CFRP dan beton cukup tinggi hingga melebihi dari kuat tarik CFRP, sehingga ada potensi untuk menggantikan tulangan baja dengan CFRP karena lekatan yang mampu bertahan hingga CFRP putus.



Gambar 19. Benda uji *pull out* saat diuji



Gambar 20. Benda uji *pull out* setelah diuji

Pengujian Berat Volume Balok

Hasil pengujian berat volume beton berupa data berat (W), volume (V), berat volume (γ), dan perbedaan berat (Δ) dapat dilihat pada Tabel 2.

Balok varian 3 tidak dilakukan uji berat volume karena balok varian 3 memiliki tulangan rangkap, sehingga tidak bisa dibandingkan dengan varian 1 dan varian 2 yang hanya memiliki tulangan tunggal.

Berdasarkan hasil pengujian berat volume balok, terlihat nilai berat bolume balok variasi 2 mengalami penurunan tertinggi sebesar 4,85% dibanding balok variasi 1. Balok beton bertulang CFRP menjadi lebih ringan karena tulangan CFRP memiliki berat jenis yang ringan yaitu 1,5 gr/cm^3 (Christiawan, 2009).

Tabel 2. Pengujian Berat Volume Balok

Kode	W (kN)	V (m^3)	γ (kg/m^3)	Δ (%)
V1-1	2,89	0,118	2427,6	-
V1-2	2,89	0,121	2441,1	-
V1-3	2,89	0,125	2350,1	-
V2-1	2,89	0,123	2383,8	-1,82
V2-2	2,89	0,124	2380,3	-1,96
V2-3	2,76	0,123	2310,1	-4,85
V2-4	2,89	0,123	2399,4	-1,17

Pengujian Kuat Lentur Balok

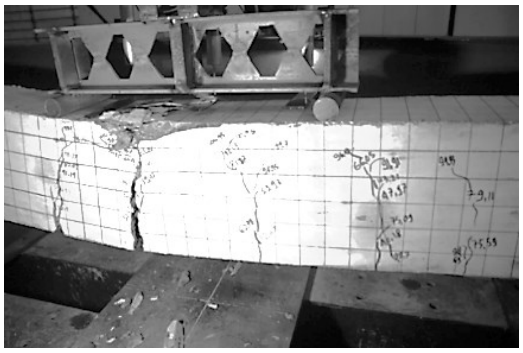
Hasil pengujian lentur balok berupa beban maksimum (P_{max}), momen maksimum (M_{max}) dan perbedaan momen (Δ) dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian Kuat Lentur Balok

Balok	W (kN)	P_{max} (kN)	M_{max} (kNm)	Δ (%)
V1-1	2,89	113,51	68,24	-
V1-2	2,89	112,26	67,50	-
V1-3	2,89	110,25	66,42	-
Rerata			67,39	-
V2-1	2,89	66,3	40,61	-39,75
V2-2	2,89	64,54	39,10	-41,99
V2-3	2,76	71,32	43,34	-35,64
V2-4	2,89	58,51	35,78	-46,92
Rerata			39,71	41,07
V3-1	2,64	70,82	43,02	-36,17
V3-2	2,64	57,01	34,52	-48,78
V3-3	3,01	68,81	41,97	-37,73
V3-4	3,01	49,47	30,35	-54,97
Rerata			37,46	-44,41

Kondisi balok setelah pengujian kuat lentur ditunjukkan pada Gambar 21, Gambar 22, dan Gambar 23. Pada gambar tersebut terlihat balok variasi 2 (tulangan tunggal CFRP) terpotong menjadi 2 dikarenakan tulangan CFRP yang dipasang telah putus seluruhnya. Hal ini berbeda dengan balok variasi 1 walaupun sama-sama memiliki tulangan tunggal, tulangan baja pada variasi 1 tidak putus tetapi beton tekan yang hancur

sehingga balok tidak terpotong menjadi 2. Adapun balok variasi 3, tulangan CFRP juga putus seluruhnya namun balok tidak terpotong menjadi 2 karena memiliki tulangan tekan yang menahan balok.



Gambar 21. Tipikal kerusakan lentur balok V1



Gambar 22. Tipikal kerusakan lentur balok V2



Gambar 23. Tipikal kerusakan lentur Balok V3

Dari pengamatan selama pengujian, balok variasi 2 dan 3 mengalami fenomena CFRP putus secara satu persatu. Hal ini ditandai dengan suara ledakan putusnya CFRP yang terjadi beberapa kali selama pengujian lentur. Fenomena ini menunjukkan kuat tarik diantara 3 buah tulangan CFRP yang ditanam dalam balok memiliki nilai yang berbeda-beda. Hal ini sama seperti hasil pengujian tarik CFRP yang ditunjukkan pada Gambar 18 dan mode kerusakan CFRP pada Gambar 14. Terlihat dari 4 sampel CFRP yang disiapkan, 2 sampel mengalami kerusakan secara sempurna dan 2 sampel mengalami kerusakan putus tidak sempurna sehingga menghasilkan kuat tarik yang bervariasi. Hal ini jugalah yang terjadi pada balok beton bertulang CFRP.

Penyebab dari kekuatan CFRP yang tidak seragam adalah karena proses pembuatannya menggunakan metode *manual hand lay-up* yang sangat memungkinkan untuk terjadinya *human error* saat proses pembuatan.

Berdasarkan seluruh pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan CFRP sebagai bahan pengganti baja tulangan dapat menurunkan kuat lentur pada balok bertulang akibat kekuatan CFRP yang tidak seragam.

Hal ini berbanding terbalik dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Nor, (2013). Pada penelitian tersebut sampel balok yang diuji berupa balok ukuran 150 mm × 150 mm × 500 mm dengan bentuk tulangan CFRP berupa sebuah pelat dengan ukuran 450 × 60 × 4,5 mm yang ditempelkan langsung pada sisi balok. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa CFRP dapat meningkatkan kuat lentur sampel balok.

Berdasarkan kedua penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa ternyata penggunaan CFRP sebagai pengganti baja tulangan pada sampel balok kecil tidak dapat mewakili kekuatan lentur pada balok beton dengan ukuran struktural. Hal ini membuktikan teori *size effect law* yang menyebutkan bahwa semakin bertambahnya ukuran benda uji menyebabkan terjadinya penurunan kekuatannya karena meningkatkan peluang terjadinya kerusakan pada bagian terlemah (Talinusa, et al., 2014).

Selain itu, bentuk tulangan CFRP pada penelitian ini yang menyerupai baja tulangan dengan ukuran 1920 × 30 × 2,4 mm yang berjumlah 3 buah tulangan per balok

juga turut memberi pengaruh terhadap penurunan kuat lentur balo. Jika pada penelitian Nor, (2013) CFRP dipasang berupa 1 buah pelat selebar balok sehingga tidak ada risiko ketidakseragaman kuat tarik CFRP sedangkan pada penelitian ini 3 tulangan CFRP yang dipasang terbukti memiliki kuat tarik yang berbeda-beda.

KESIMPULAN

1. Pada penelitian ini CFRP memiliki potensi menjadi pengganti baja karena memiliki lekatan terhadap beton yang lebih tinggi dari kuat tarik material CFRP,
2. Penggunaan CFRP sebagai penganti tulangan baja pada penelitian ini dapat mengurangi berat balok beton bertulang hingga 4,85% dibandingkan balok beton bertulang konvensional,
3. Penggunaan CFRP sebagai penganti baja tulangan balok beton bertulang pada peneltian ini dapat menurunkan kekuatan lentur balok sebesar 41,07% (variasi 2) dan 44,41% (variasi 3) dikarenakan kuat tarik tulangan CFRP berbeda-beda sehingga putus satu per satu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia atas dukungan pendanaan penelitian ini melalui program hibah penelitian jurusan 2020.

DAFTAR PUSTAKA

Asroni, A., (2010). "Balok dan Pelat Beton Bertulang". 1 ed. Yogyakarta: Graha Ilmu.

ASTM International, (1991). "Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel (Withdrawn 2000)".American Society for Testing and Materials. Pennysylvania

ASTM International, (2002). "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials". American Society for Testing and Materials. Pennsylvania

BSN, (1991). "Metode Pengujian Kuat Tarik Baja Beton SNI 07-2529-1991". Badan Standarisasi Nasional. Jakarta

Christiawan, I., (2009). "Perkuatan (Strengthening) Struktur Beton dengan Fiber Reinforced Polymer (FRP)", Skripsi Universitas Diponegoro. Semarang

Ginardi, I. P., (2014). Perbandingan Kekuatan lentur Balok Beton Bertulang dengan Menggunakan Perkuatan CFRP dan GFRP, Skripsi, Universitas Brawijaya. Malang

Hussain, F., Chen, J. & Hojjati, M., (2007). "Microdielectric Analysis and Curing Kinetics of an Epoxy Resin System". Polymer Engineering and Science. 4. Issue 2. pp. 150-158.

Nawy, E. G., (1985). "Reinforced Concrete : A Fundamental Approach". Prentice Hall. California.

Nor, N. M., Boestamam, M. H. A. & Yusof, M. A., (2013). "Carbon Fiber Reinforced polymer (CFRP) as reinforcement for Concrete Beam". *I*nternational Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 3. Issue 2. pp. 6-10.

Onal, M. M., (2009). "Reinforcement of Beams by Using Carbon Fiber Reinforced Polymer in Concrete Buildings". Scientific Research and Essay. 4. Issue10, pp. 1136-1145.

Pramudhita, G. & Buwono, H. K., (2019). "Analisis Nonlinier Static Pushover Struktur Gedung Bertingkat Soft Story dengan Menggunakan Material Beton Bertulang dan Beton Prategang Pada Balok Bentang Panjang". Jurnal Konstruksia. 10. Issue 2. pp. 95-106.

Putra, G. S., (2016). "Analisa Kekuatan Rangka Road Bike dengan Variasi Arah Serat, Jumlah Lapisan, dan Jenis Material Carbon Fiber". Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Suryanto, W. P., Wiyanto, R. I., Tjandra, D. & Wijaya, G. B., (2020). "Pengaruh Luas Baja Tulangan Terhadap Perilaku Balok Beton Bertulang yang Diperkuat Fiber Reinforced Polymer (FRP)". Dimensi Pratama Teknik Sipil. 9. Issue 9. pp. 202-209.

Talinusa, O. G., Tenda, R. & Tamboto, W. J., (2014). "Pengaruh Dimensi Benda Uji Terhadap Kuat Tekan beton". Sipil Statik. 2. Issue 7. pp. 344-351.