



Pengaruh Penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* Tipe Wrap Terhadap Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang

Nabila Ayu Syarifa*, Endah Kanti Pangestuti

Program Studi Teknik Sipil
Universitas Negeri Semarang
Sekaran, Gunungpati, Semarang,
50299
nabilanaasya17@students.unnes.a
c.id
endahkp@mail.unnes.ac.id

ABSTRAK

Material perkuatan struktur beton adalah *Carbon Fiber Reinforced Polymer*. Penelitian ini dilakukan untuk meninjau pengaruh variasi pemasangan CFRP sebagai perkuatan eksternal terhadap kapasitas momen lentur maksimum. Sampel berupa balok beton bertulang berdimensi 10x13x100 cm³ berjumlah 5 dengan variasi berbeda yaitu balok kontrol dan empat lainnya merupakan balok variasi CFRP. Variasi dibedakan dari segi lebar dan jumlah lapisan CFRP, terdiri dari BV1 selebar 10 cm 1 lapis, BV2 selebar 10 cm 2 lapis, BV3 selebar 5 cm 1 lapis, dan BV4 selebar 5 cm 2 lapis. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa semakin luas CFRP yang dipasang, semakin besar peningkatan kapasitas beban ultimitnya. Peningkatan beban ultimit pada balok variasi terhadap balok kontrol yaitu BV1 meningkat sebesar 69,66%, BV2 sebesar 106,16%, BV3 sebesar 43,70%, dan BV4 sebesar 54,88%. Pola keruntuhan pada balok variasi perkuatan CFRP adalah terjadinya *debonding failure* sebagai akibat dari adanya perbedaan nilai modulus elastisitas beton dan CFRP.

Kata kunci: Balok Beton Bertulang; CFRP; Perkuatan Lentur

ABSTRACT

Concrete structure reinforcement material is *Carbon Fiber Reinforced Polymer*. This study was conducted to review the effect of variations in CFRP installation as external reinforcement on the maximum bending moment capacity. The samples were reinforced concrete beams with dimensions of 10x13x100 cm³ totaling 5 with different variations, namely the control beam and the other four CFRP variation beams. The variations were differentiated in terms of width and number of CFRP layers, consisting of BV1 with 10 cm wide 1 layer, BV2 with 10 cm wide 2 layers, BV3 with 5 cm wide 1 layer, and BV4 with 5 cm wide 2 layers. The test results showed that the wider the CFRP installed, the greater the increase in ultimate load capacity. The increase in ultimate load of the variation beams with respect to the control beams was 69.66% for BV1, 106.16% for BV2, 43.70% for BV3, and 54.88% for BV4. The collapse pattern of the CFRP reinforced variation beams was *debonding failure* as a result of the difference in the modulus of elasticity values of concrete and CFRP.

Keywords: CFRP; Flexural Reinforcement; Reinforced Concrete Beam

1. PENDAHULUAN

Beton memiliki kekurangan yang harus dipertimbangkan. Kuat tekan beton tidak sebanding dengan kuat tariknya, di mana nilai kuat tarik hanya berkisar antara 9% hingga 15% dari kuat tekannya [1]. Balok beton bertulang dikenal sebagai elemen rangka penguat horizontal yang biasanya terletak di antara kolom atau dinding. Momen pada balok terjadi karena gaya lentur yang muncul akibat beban yang bekerja, menghasilkan tekanan di bagian atas dan tarik di bagian bawah balok. Maka dari itu, tulangan baja diperlukan untuk

Corresponding Author:
✉ Nabila Ayu Syarifa
Accepted on: 2025-06-16

meningkatkan kapasitas momen balok dalam menahan gaya tarik sehingga mencegah terjadinya kegagalan struktural.



Gambar 1.1 Pengaruh penempatan tulangan baja terhadap jarak J_d pada diagram tegangan [3]

Kapasitas momen maksimum (M) didapatkan dari hasil perhitungan antara T_s , *tensile steel* dan J_d , lengan momen. Semakin panjang J_d maka semakin besar kapasitas momennya. Dari perhitungan tersebut, faktor penempatan tulangan baja sangat mempengaruhi nilai kapasitas momen lentur maksimum. Terlihat pada Gambar 1. kapasitas momen dapat tercapai ketika tulangan diletakkan pada serat tarik balok yang paling jauh, sehingga nilai $J_{d2} > J_{d1}$ dan $M_2 > M_1$. Namun, baja memiliki beberapa kekurangan sehingga tidak memungkinkan untuk diletakkan secara eksternal, kekurangan tersebut diantaranya baja mudah berkarat, daya lekat (*bonding*) antara baja dan beton kecil, dan perawatannya tidak mudah sehingga memerlukan biaya yang lebih mahal.

Salah satu inovasi yang banyak digunakan untuk menambah kuat lentur balok adalah perkuatan *Carbon Fiber Reinforced Polymer*. Material *Fiber Reinforced Polymer*, khususnya *Carbon Fiber Reinforced Polymer* memiliki keunggulan untuk dipilih sebagai material perkuatan (*retrofit*), yaitu ringan, kekuatan tarik yang sangat tinggi, bebas dari korosi, dan relatif mudah dipasang sehingga membantu menghemat waktu [2]. Meskipun harga CFRP relatif mahal, tetapi jika ditinjau secara makro dan jangka panjang maka bisa jadi pilihan CFRP lebih ekonomis dibanding jenis perkuatan lain.

Penelitian terdahulu [3] oleh Pangestuti, E. K et al. (2006), kuat tarik CFRP tipe *plate* yang dipakai adalah sebesar 2800 MPa mampu meningkatkan kuat lentur sebesar 49%. Penelitian yang lain [4] oleh Ruslan et al. (2014), menggunakan CFRP tipe *wrap* dengan kuat tarik sebesar 3500 MPa dengan merk *SikaWrap 230 C* mampu meningkatkan kuat lentur balok yang dilapisi CFRP dari lapis 1 sampai 3, namun penambahan tidak bersifat linier. Penelitian [5] oleh Jamal et al., (2015) menggunakan CFRP tipe *plate* sebesar 2800 MPa mampu meningkatkan kapasitas beban pada ketiga balok secara berurutan adalah, balok dengan lebar CFRP 5 cm sebesar 60%, 10 cm sebesar 123,8%, dan 15 cm sebesar 140,25%. Sedangkan pada penelitian ini, penulis menggunakan CFRP dengan kuat tarik sebesar 4900 MPa. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh dari pemakaian CFRP sebagai perkuatan eksternal pada balok beton bertulang agar dapat menghasilkan nilai kapasitas momen lentur maksimum tanpa takut adanya korosi pada baja tulangan.

1.1 Momen Lentur Balok Tampang Persegi

SNI 03-2847-2002 [6] mengatur mengenai besarnya momen lentur *ultimate* yang merupakan hasil kombinasi terfaktor dari momen lentur yang diakibatkan oleh beban-beban yang bekerja pada struktur balok. Apabila nilai

momen nominal sudah dihitung, maka dapat direncanakan mengenai besarnya pembesian yang dinyatakan dalam A_s yang merupakan luas penampang tulangan yang diperlukan. Setelah itu, baru mulai untuk menghitung keseimbangan gaya horizontal ($\Sigma H = 0$) dan keseimbangan momen ($\Sigma M = 0$) pada penampang seperti pada rumus di bawah ini.

Dari gambar 2.3, kompresi beton atau C_c dihitung dengan rumus di bawah ini.

$$C_c = 0.85 f'c . a . b \quad \text{Dimana, } a = \beta 1 . c \quad (1)$$

Perhitungan nilai tegangan baja didapat dengan rumus :

$$T_s = A_s . f_y \quad (2)$$

Kesetimbangan gaya antara tegangan baja dan kompresi beton dihitung dengan rumus :

$$C_c = T_s \quad (3)$$

$$0.85 f'c . a . b = A_s . f_y \quad (4)$$

$$a = \frac{A_s . f_y}{0.85 f'c . b} \quad (5)$$

Kapasitas momen nominal balok beton bertulang normal dihitung dengan rumus :

$$M_n = A_s . f_y . j d \quad \text{Dimana, } j d = d - \frac{1}{2} a \quad (6)$$

Perhitungan rasio tulangan, ρ :

$$\rho b = \frac{0.85 . f'c' . \beta}{f_y} . \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (7)$$

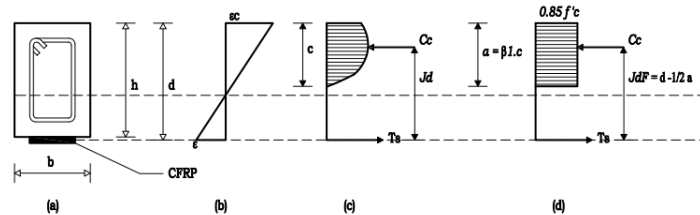
$$\rho = \frac{1}{m} . \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m . R_n}{f_y}} \right) \quad (8)$$

$$m = \frac{f_y}{0.86 . f'c'} \quad (9)$$

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} \quad (10)$$

$$\rho_{max} = 0.75 . \rho \quad (11)$$

Apabila balok beton bertulang dipasang perkuatan CFRP secara eksternal, kekuatan lentur balok seperti terlihat pada gambar 1.2. Dimana T_F adalah gaya tarik CFRP dan $j d_F$ adalah jarak dari C_c ke T_F .



Gambar 1.2 Distribusi Tegangan Regangan Balok dengan Perkuatan CFRP

a) Balok; b) Regangan; c) Tegangan aktual; d) Tegangan persegi

Sumber : (Pangestuti et al., 2020) [7]

Dari gambar 1.2 Momen nominal penampang dihitung dengan rumus :

$$M_n = A_s . f_y . j d_F \quad \text{Dimana } j d_F = h - \frac{1}{2} a \quad (16)$$

Dari persamaan rumus yang telah dijabarkan di atas, terlihat bahwa kapasitas momen balok dengan perkuatan CFRP memiliki nilai lebih besar dari balok normal tanpa adanya perkuatan. Hal ini disebabkan akibat adanya lengan momen ($j d_F > j d$) dan tingginya kuat tarik CFRP dibanding dengan kuat tarik tulangan.

2. MATERIAL DAN METODE

2.1 Material Penelitian

CFRP merupakan salah satu jenis Fiber Reinforced Polymer (FRP) yang terdiri dari serat karbon dan fiber yang diaplikasikan dengan lem epoxy, yang umumnya berupa primer dan resin sebagai bahan perekat. Material penyusun sistem CFRP terdiri dari 2 material diantaranya serat dan resin

Adapun spesifikasi dari produk CFRP yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 2.1 Spesifikasi Material CFRP EstoWrap 300

EstoWrap 300	
Tipe	Carbon Fiber
Kuat Tarik (MPa)	4900
Kekakuan (GPa)	230
Kepadatan (g/cm ³)	1,8-2,0
Perpanjangan Putus (%)	> 2,1
E-Modulus (GPa)	230
Tegangan (%)	Min. 2,5

Matriks ini berfungsi sebagai pengikat serat karbon (CFRP) dalam hal memberikan kekakuan serta perlinfungan terhadap serat karbon. Jenis epoksi yang digunakan adalah Estowrap primer dan Estowrap resin. Adapun spesifikasi lem epoxy dari EstoWrap primer dan resin adalah sebagai berikut.

Tabel 2.2 Spesifikasi epoxy EstoWrap

Tipe	Epoxy
E-Modulus (MPa)	66000
Kekuatan Ikatan (MPa)	> 3

2.2 Metode Penelitian

Jenis penelitian yang dipakai adalah penelitian percobaan (ekperimen). Penelitian dilaksanakan selama 110 hari di Laboratorium Struktur dan Bahan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang. Penelitian dimulai dari tanggal 26 Juli 2024 sampai 13 November 2024 dari mulai studi kepustakaan, pengujian bahan yang dipakai, pembuatan sampel benda uji, perawatan benda uji, pengujian kuat tekan, dan pengujian kuat lentur pada sampel atau benda uji.

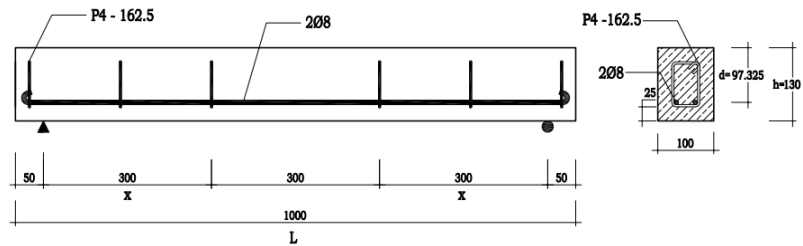
Sampel yang dipakai yaitu balok beton bertulang berdimensi 100 × 130 × 1000 mm dengan jumlah total 5 balok dengan 5 variasi yang berbeda. CFRP dipasang secara eksternal pada bagian bawah permukaan balok (daerah tarik).

Tabel 2.3 Sampel Penelitian

Kode Sampel	Dimensi (cm)	Pemasangan CFRP			Jumlah Sampel
		Lebar (cm)	Panjang (cm)	Jumlah lapis	
Kontrol	10 × 13 × 100	-	-	-	1
BV1	10 × 13 × 100	10	100	1	1
BV2	10 × 13 × 100	10	100	2	1
BV3	10 × 13 × 100	5	100	1	1
BV4	10 × 13 × 100	5	100	2	1

Sampel dalam penelitian ini menggunakan benda uji berupa balok beton bertulang dengan dimensi 100 × 130 × 1000 mm untuk pengujian kuat lentur, silinder beton dengan ukuran 150 × 300 mm untuk pengujian kuat tekan, dan kubus 150 × 150 × 150 mm untuk pengujian kuat tekan (*trial mix*). Adapun

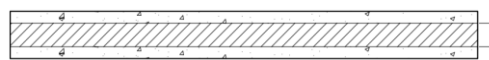
tulangan baja yang digunakan dalam balok adalah berdiameter $\varnothing 8$ berjumlah 2 tulangan yang dipasang di daerah tarik sebagai tulangan utama dan sengkang berdiameter $\varnothing 4$ dengan interval jarak sebesar 162,5 mm.



Gambar 2.1 Detail Penulangan balok kontrol (BK)



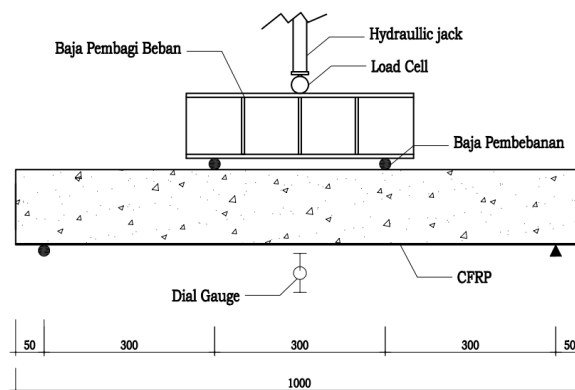
Gambar 2.2 Tampak Bawah Posisi Pemasangan CFRP dengan lebar 10 cm pada BV1 dan BV2



Gambar 2.3 Tampak Bawah Posisi Pemasangan CFRP dengan lebar 5 cm pada BV3 dan BV4

2.3 Set Up Pengujian

Pengujian kuat lentur menggunakan metode uji kuat lentur dengan pembebanan 2 titik (*two point loads*) dengan masing-masing beban berjarak 300 mm dari tumpuan. Jarak tumpuan dari tiap sisi luar balok adalah 50 mm. Tumpuan yang dipakai dalam pengujian lentur dalam penelitian ini adalah tumpuan sendi dan roll. Alat *dial gauge* diletakkan pada tengah bentang untuk mengetahui besar lendutan balok ketika diberi beban. Pembacaan *dial gauge* dan pola retak dilakukan setiap penambahan beban 100 kg. Ketika beban sudah mencapai nilai maksimal dan sudah terlihat menurun dalam layar komputer, maka pembebanan yang dilakukan dihentikan.



Gambar 2.4 Sketsa Tampak Depan Pengujian Beban Terpusat Ganda

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pemeriksaan Material

1. Agregat

Pengujian bahan berupa pengujian agregat halus, agregat kasar, dan semen. Data yang diambil merupakan hasil dari pengujian yang telah dilakukan sebelumnya. Agregat halus yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan pasir dari Muntilan. Pengujian yang dilakukan diantaranya, pengujian gradasi,

berat jenis, berat isi, dan kadar lumpur. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa pasir memenuhi syarat. Namun, menurut ASTM C33-03, nilai kadar lumpur yang terkandung dalam agregat halus tidak boleh melebihi 5%. Nilai kadar lumpur dari pasir yang digunakan adalah sebesar 8,47%, sehingga dapat disimpulkan bahwa pasir tidak memenuhi standar yang berlaku. Maka dari itu, diperlukan suatu *treatment* pada agregat halus yang digunakan, salah satunya dengan mencuci pasir sebelum dilakukan pengecoran. Agregat kasar yang digunakan berukuran dengan ukuran butiran maksimal 40 mm. Pengujian kerikil mendapatkan hasil bahwa semua pengujian memenuhi syarat yang ditentukan.

Tabel 3.1 Hasil Pengujian Agregat

No.	Jenis Pengujian	Agregat Halus		Agregat Kasar		Keterangan
		Spesifikasi	Hasil Pengujian	Spesifikasi	Hasil Pengujian	
1.	Kadar Lumpur	<3%	8,47%	<1%	1%	NOT OK
2.	Berat Isi	1,4-1,9	1,53-1,83	1,4-1,9	1,46	OK
3.	Berat Jenis	2,5-2,7	2,63	2,5-2,7	2,62-2,66	OK
4.	Absorpsi	<3%	1,06%	<3%	1,68%	OK
5.	Modulus Kehalusan	1,5-3,8	3,205	6,0-7,1	6,90	OK
6.	Keausan	-	-	<50%	20,30%	OK

(Sumber : SNI 03-2834-2000 [10], SK SNI S-04-1989-F [11], SNI 1970-2008 [12], SNI 1971-2011 [13], ASTM C33-03 2003 [14], SNI 1969-1990 [15], PBI 1971 [16], PUBI 1982 [17])

2. Baja Tulangan

Tulangan menggunakan baja tulangan polos diameter 8 mm dan 4 mm dengan masing-masing diuji sebanyak 2 sampel.

Tabel 3.2 Rekap Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan

Ø (mm)	Sampel	Luas (mm ²)	Rm (MPa)	ReL (MPa)	ReH (MPa)	Fy (MPa)	Rata-rata (MPa)
4	1	12,57	452	264	298	281	270
	2		423	232	287	260	
7,35	1	42,43	519	377	383	380	375
	2		516	370	371	370	

3. Mix Design

Tabel 3.3 Komposisi Unsur Campuran Beton

No.	Unsur Beton	Berat / m ³ Beton (kg)
1	Semen	341,67
2	Air	205
3	Agregat kasar	1139,58
4	Agregat halus	683,75
Jumlah		2370

4. Pengujian Kuat Tekan

Tabel 3.4 Hasil Rekapitulasi Pengujian Utama Kuat Tekan Sampel Silinder

No.	Sampel ke-	Berat beton (kg)	Rata-rata (kg)	Kuat Tekan MPa	Rata-rata MPa
-----	------------	------------------	----------------	----------------	---------------

1	1	12,78		20,92	
2	2	12,69	12,74	20,21	20,57

Setelah dilakukan pengujian kuat tekan beton, didapatkan nilai kuat tekan rata-rata beton umur 28 hari sebesar 20,57 MPa, sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai kuat tekan telah memenuhi persyaratan dan perencanaan *mix design* yaitu beton mutu f_c' 18,68 MPa. Dari hasil di atas, maka kuat tekan yang digunakan untuk perhitungan selanjutnya menggunakan f_c' 20,57 MPa.

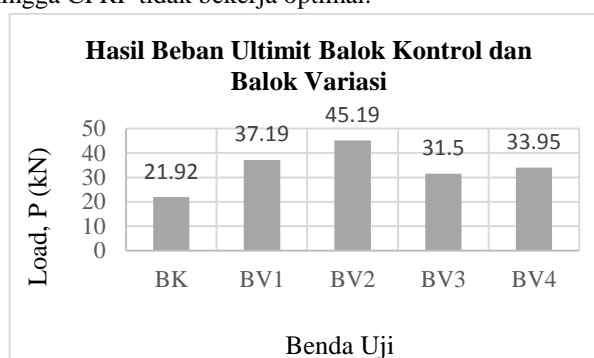
4. HASIL PENELITIAN

4.1 Beban Ultimit

Tabel 3.5 Persentase tercapainya beban ultimit benda uji eksperimen berdasarkan hasil teoritis

Kode Sampel	P ultimit (kN)		Persentase Tercapai (%)
	Eksperimen	Teoritis	
BK	21,92	18,73	117,06
BV1	37,19	58,51	63,56
BV2	45,19	93,06	48,56
BV3	31,5	32,41	97,19
BV4	33,95	59,14	57,40

Dari Tabel 3.5 terlihat bahwa balok kontrol (BK) bekerja secara maksimal sebesar 117,06% dari perhitungan teoritisnya. Sedangkan pada balok variasi mempunyai nilai persentase yang berbeda-beda sebagai pengaruh dari lebar pemasangan CFRP. Tidak tercapainya hasil sesuai perhitungan teoritis diakibatkan karena secara teori menganggap lekatan serat karbon (CFRP) dan beton bekerja membentuk struktur komposit sempurna, namun, pada saat eksperimen, terjadi *debonding* sehingga CFRP tidak bekerja optimal.



Gambar 3.2 Grafik Hasil Beban Ultimit Balok Kontrol dan Balok Variasi

Tabel 3.6 Pengaruh variasi pemasangan CFRP terhadap peningkatan beban ultimit

Kode Sampel	Pemasangan		P ultimit (kN)	Peningkatan beban ultimit (%)
	Lebar (cm)	Jumlah layer		
BK	-	-	21,92	-
BV1	10	1	37,19	69,66
BV2	10	2	45,19	106,16
BV3	5	1	31,5	43,70
BV4	5	2	33,95	54,88

Berdasarkan Tabel 3.6 BV1 mengalami peningkatan kapasitas beban sebesar 69,66% dari kapasitas beban balok kontrol. Persentase peningkatan beban ultimit yang mampu ditahan oleh BV2 lebih besar dibanding BV1 dan nilainya cukup jauh, yaitu sebesar 106,16% atau 2 kali lipat dari beban BK. Pada BV4 terjadi peningkatan beban sebesar 54,88% dari persentase beban BK. Namun, nilai ini cukup rendah dibanding BV1, BV1 dengan lebar pemasangan 10 cm berjumlah 1 lapis mengalami peningkatan beban sebesar 15,27 kN, sedangkan BV4 dengan lebar yang sama yaitu 10 cm, namun konfigurasi pemasangan berbeda yaitu lebar 5 cm berjumlah 2 lapis yang dipasang di tengah memberikan peningkatan sebesar 12,03 kN. Pemasangan CFRP akan lebih efektif jika dipasang sebesar lebar balok.

4.2 Daktilitas

Tabel 3.7 Hasil Perhitungan Daktilitas Benda Uji

Kode Sampel	δu (mm)	δy (mm)	Daktilitas ($\delta u/\delta y$)	Peningkatan daktilitas (%)
BK	5,47	0,52	10,52	-
BV1	7,42	0,81	9,05	-12,92
BV2	7,73	0,74	10,45	-0,70
BV3	9,88	0,74	13,35	26,92
BV4	6,7	0,50	13,40	27,39

Dari Tabel 3.7 terlihat bahwa daktilitas pada balok kontrol (BK) adalah sebesar 10,52. Terjadi peningkatan daktilitas pada BV3 sebesar 26,92% dan BV4 sebesar 27,39%. Sedangkan pada BV1 dan BV2 terjadi penurunan daktilitas, yaitu sebesar 12,92% pada BV1 dan 0,7% pada BV2 dari nilai daktilitas balok kontrol. Walaupun dari kapasitas beban BV1 lebih besar, namun dari segi daktilitas opsi pemasangan seperti BV4 mempunyai nilai lebih besar dibanding BV1..

4.3 Kekakuan

Tabel 3.8 Presentase Peningkatan Nilai Kekakuan Balok Kontrol dan Balok Variasi

Kode Sampel	P_y (kN)	δy (mm)	Kekakuan (kN/mm)	Peningkatan kekakuan (%)
BK	7	0,52	13,46	-
BV1	11	0,81	13,41	0,88
BV2	11	0,74	14,86	10,42
BV3	9	0,74	12,16	-9,65
BV4	8	0,50	16,00	18,86

Berdasarkan Tabel 3.8 terlihat bahwa nilai kekakuan pada balok kontrol (BK) adalah sebesar 21,74 kNmm. Sedangkan pada BV1 dan BV2 secara berurutan meningkat sebesar 0,88% dan 10,42%. Begitu juga dengan BV4, terjadi peningkatan nilai kekakuan sebesar 18,86% dari balok kontrol. Namun, pada BV3, terjadi penurunan nilai kekakuan dari BK, yaitu menurun sebesar 9,65%. Kekakuan pada balok variasi lebih kecil dibanding dengan balok kontrol, hal ini bisa terjadi karena beberapa faktor, salah satunya karena perkuatan

CFRP tidak bekerja secara optimal karena adanya delaminasi atau *debonding* pada CFRP.

4.4 Lendutan Maksimum

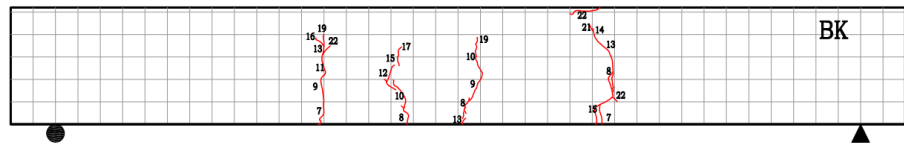
Tabel 3.9 Hasil beban dan lendutan maksimum benda uji setelah dilakukan pengujian

Kode Sampel	Beban Maksimum (kN)	Lendutan (mm)
BK	21,92	5,47
BV1	37,19	7,42
BV2	45,19	7,73
BV3	31,5	9,88
BV4	33,95	6,7

Dari Tabel 3.9 didapatkan hasil bahwa kapasitas lendutan maksimum balok variasi jauh lebih besar dibanding dengan balok kontrol bersamaan dengan bertambahnya beban. Besarnya nilai defleksi bisa diakibatkan adanya pengaruh beban yang lebih besar.

4.5 Pola Retak Benda Uji

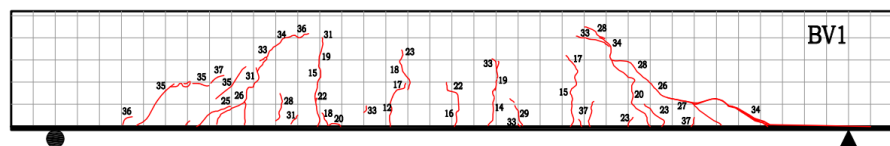
BK



Gambar 3.3 Pola Retak BK

Pengujian kuat lentur pada balok kontrol (BK) mengindikasikan bahwa BK terjadi retak lentur. Retak pertama terjadi di daerah 1/3 panjang bentang atau berjarak 300 mm dari tumpuan sendi (tepat di bawah titik beban) pada saat balok diberi pembebanan sebesar 7 kN dengan lendutan sebesar 0,52 mm.

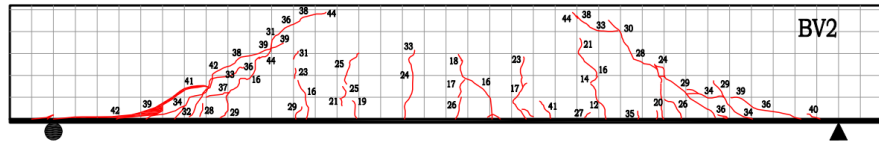
BV1



Gambar 3.4 Pola Retak BV1

BV1 terjadi retak lentur dan retak geser setelah dilakukan pembebanan. Retak pertama (*first crack*) terjadi pada saat pemberian beban sebesar 12 kN dengan lendutan sebesar 0,96 mm di daerah tengah bentang atau daerah lentur diawali dari sisi tarik penampang. Retak terus merambat menuju daerah tekan diikuti dengan timbulnya retakan-retakan baru yang bergerak miring mendekati daerah tumpuan. Retak ini disebut dengan retak geser lentur (*flexural-shear crack*).

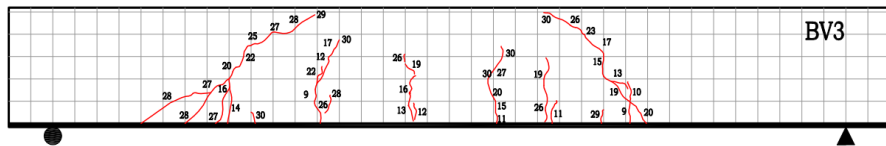
BV2



Gambar 3.5 Pola Retak BV2

BV2 terjadi retak lentur dan retak geser setelah dilakukan pembebanan. *First crack* terjadi pada saat pembebanan mencapai nilai 12 kN di daerah titik beban yang diawali dari daerah tarik dan terus merambat lurus menuju daerah tekan. Pola retak yang terjadi pada balok BV2 adalah retak geser lentur (*flexural-shear crack*). Retak geser memiliki lebar retakan sebesar ± 2 mm. Pada daerah tumpuan sendi tidak terjadi *debonding* pada serat karbon CFRP.

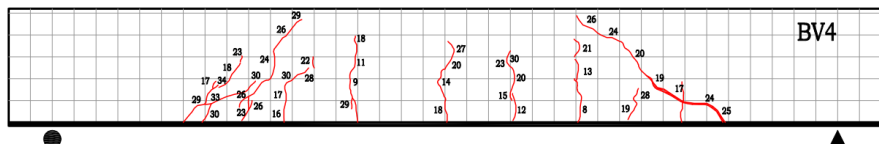
BV3



Gambar 3.6 Pola Retak BV3

BV3 terjadi retak lentur dan retak geser setelah dilakukan pembebanan. Retak pertama terjadi ketika beban mencapai nilai 9 kN berjarak ± 5 cm menjauhi titik pembebanan. Ketika pengujian kuat lentur selesai, terlihat adanya *debonding* atau lepasnya ikatan dari serat karbon CFRP.

BV4



Gambar 3.7 Pola Retak BV4

BV4 terjadi retak lentur dan retak geser setelah dilakukan pembebanan. Retak pertama terjadi ketika benda uji diberi beban sebesar 8 kN dengan lendutan sebesar 0,5 mm. Pola retak yang terjadi pada BV4 adalah retak geser lentur (*flexural-shear crack*).

4.6 Pola Keruntuhan

Pola keruntuhan yang terjadi pada balok variasi (BV1, BV2, BV3, dan BV4) adalah *debonding failure*, yaitu lepasnya ikatan antara permukaan balok dengan serat karbon pada saat mencapai beban maksimum sebelum CFRP bekerja secara optimal. *Debonding* diawali dengan munculnya retak-retak geser di daerah dekat tumpuan. Faktor yang mempengaruhi terjadinya *debonding* adalah adanya perbedaan nilai modulus elastisitas antara beton, epoxy, dan CFRP. Ikatan (*bond*) antara beton dan CFRP memiliki peran krusial dalam membentuk aksi komposit pada struktur. Kekuatan ikatan ini sangat bergantung pada jenis epoxy yang digunakan, di mana epoxy yang tidak cukup kuat dapat menghambat terbentuknya struktur komposit yang optimal. *Epoxy* memiliki nilai modulus elastisitas sebesar 66.000 MPa dan nilai modulus elastisitas CFRP sebesar 230.000 MPa, yang lebih tinggi dibandingkan dengan modulus

elastisitas beton sebesar 20.000 MPa, hal ini yang membuat transfer tegangan tidak sempurna, sehingga sulit mencapai kondisi struktur komposit ideal.

5. KESIMPULAN

Mengacu pada hasil penelitian beton dengan perkuatan CFRP yang telah dilaksanakan, beberapa hal dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Variasi pemasangan CFRP sangat mempengaruhi kekuatan balok beton bertulang. Semakin luas CFRP yang dipasang, semakin besar peningkatan kapasitas beban ultimitnya. Balok dengan perkuatan CFRP dapat menahan beban ultimit lebih besar dibanding balok tanpa perkuatan CFRP, yaitu meningkat sebesar 69,66% untuk BV1, 106,16% untuk BV2, 43,70% untuk BV3, dan 54,88% untuk BV4.
2. Daktilitas pada balok kontrol (BK) adalah sebesar 10,52. Terjadi peningkatan daktilitas pada BV3 sebesar 26,92% dan BV4 sebesar 27,39%. Sedangkan pada BV1 dan BV2 terjadi penurunan daktilitas, yaitu sebesar 12,92% pada BV1 dan 0,7% pada BV2 dari nilai daktilitas balok kontrol. Meskipun demikian, secara keseluruhan balok dengan perkuatan CFRP berpengaruh terhadap peningkatan daktilitas.
3. Kekakuan pada balok kontrol (BK) adalah sebesar 21,74 kNmm. Nilai kekakuan meningkat pada balok variasi, yaitu meningkat sebesar 0,88% pada BV1, 10,42% pada BV2, dan 18,86% pada BV4. Namun, pada BV3, terjadi penurunan nilai kekakuan dari BK, yaitu menurun sebesar 9,65%. Lebar CFRP mempengaruhi efisiensi perkuatan dalam meningkatkan kekakuan balok. Semakin besar lebar CFRP, maka semakin besar nilai luas efektif material CFRP yang bekerja untuk menahan regangan di serat tarik sehingga nilai kekakuan balok juga bertambah dengan nilai deformasi lebih kecil.
4. Perkuatan CFRP meningkatkan kapasitas lendutan maksimum sebesar 35,65% pada BV1, 41,32% pada BV2, 80,62% pada BV3, dan 22,49% pada BV4. Besarnya nilai lendutan maksimum bisa diakibatkan adanya pengaruh beban yang lebih besar. Maka dari itu, lendutan maksimum dapat dipengaruhi oleh kapasitas beban pada balok.
5. Pola keruntuhan pada balok variasi dengan perkuatan CFRP adalah terjadinya *debonding failure*. Hal ini diakibatkan karena kurang optimalnya lem epoksi dalam merekatkan serat karbon dan beton.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan artikel ini

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mulyono, T. (2018). *TEKNOLOGI BETON: Dari Teori Ke Praktek. October.*
- [2] Yoresta, F. S., Maruta, R., Mieda, G., & Matsumoto, Y. (2020). Unbonded CFRP strengthening method for buckling control of steel members. *Construction and Building Materials*, 241, 118050. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118050>
- [3] Pangestuti, E. K., & Nuroji, A. (2006). Pengaruh Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Plate Terhadap Perilaku Lentur Struktur Balok Beton Bertulang. (*Doctoral Dissertation, Tesis Magister, Universitas*

- Diponegoro*), 15(5), 86–94.
- [4] Ruslan, U., Sumargo, & Ghulam, M. (2014). Kapasitas Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Polymer (Cfrp) Berlapis Banyak Terhadap Perkuatan Lentur Struktur Balok Beton Bertulang. *Irwns*, vol 5, 126–133. <https://jurnal.polban.ac.id/proceeding/article/view/417>
- [5] Jamal, A. U., Bale, Akbar, H., & Haqiqi, I. (2015). Perilaku Lentur Perbaikan Balok Beton Bertulang Dengan Variasi Lebar Carbon Fibre Reinforced Polymer. *Jurnal Teknisia*, 20(2), 154–162.
- [6] Badan Standarisasi Nasional. (2002). *Perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung SNI 03-2847-2002*.
- [7] Pangestuti, E. K., Prihanantio, J., Nuroji, & Antonius. (2020). Flexural Strength of Reinforced Concrete Beam with CFRP. *Malaysian Construction Research Journal*, 30(1).
- [8] Badan Standarisasi Nasional. (2004). *Semen Portland Pozolan SNI 15-0302-2004*.
- [9] Badan Standarisasi Nasional. (14 C.E.). *Metode uji densitas semen hidraulis SNI 2531:2015*.
- [10] Badan Standarisasi Nasional. (2000). *Tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal SNI 03-2834-2000*. 3.
- [11] Dumyati, A., & Manalu, D. F. (2015). Analisis Penggunaan Pasir Pantai Sampur Sebagai Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton. *FROPIL (Forum Profesional Teknik Sipil)*, 3(1), 1–13. <https://doi.org/10.52166/dearsip.v2i1.3352>
- [12] Badan Standarisasi Nasional. (2008a). *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus SNI 03-1970-2008*. 7–18.
- [13] Badan Standarisasi Nasional. (2011a). *Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan SNI 1971:2011*. 1–11.
- [14] ASTM C33-03. (2008). *Standard Specification for Coarse Aggregate*. 04.02, 11.
- [15] Aminullah, A. (2024). METODE PELAKSANAAN PEMBANGUNAN ATAP BETON MENARA BABUS SALAM MASJID AS'SUADA WAINGIN. *Repository Online Perpustakaan Universitas NU Kalsel*, 1–23.
- [16] PBI 1971. (1971). Peraturan Beton Bertulang Indonesia. *Jakarta: Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan*, 7, 130.
- [17] PUBI-1982. (1982). Persyaratan Umum Bahan Bangunan Di Indonesia. *Jakarta: Pusat Penelitian Dan Pengembangan Pemukiman, Badan Penelitian Dan Pengembangan Pekerjaan Umum*. DPU Balitbang, 2(1), 1–344.