

# Kekuatan Lentur Balok Beton dengan Penambahan Serat Karbon (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*)

Samuel Layang<sup>1</sup> Eliatun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Universitas Palangka Raya

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Sipil, Universitas Lambung Mangkurat

✉ samuel.layang@ptb.upr.ac.id

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peningkatan kuat lentur, pola retak, dan pola keruntuhan pada balok beton bertulang dengan penambahan serat karbon (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*, CFRP). Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium menggunakan benda uji balok berukuran 60 cm × 15 cm × 15 cm, terdiri dari tiga tipe: (1) balok tanpa CFRP (BN) sebanyak 2 buah, (2) balok dengan tambahan CFRP di sepertiga bagian tengah (BCC) sebanyak 3 buah, dan (3) balok dengan CFRP sepanjang balok (BFC) sebanyak 3 buah. Semua balok menggunakan beton normal dengan mutu rencana 30 MPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola retak pada semua balok dimulai dari tumpuan dan bergerak diagonal ke arah beban, mengindikasikan keruntuhan akibat tekan geser. Momen tahanan rata-rata balok tanpa CFRP (BN) adalah 6,379 kNm, balok BCC 7,850 kNm, dan balok BFC 7,801 kNm. Penambahan CFRP pada balok, terutama pada tipe BCC, meningkatkan kapasitas momen tahanan dan menunjukkan efektivitas penguatan di area kritis balok.

**Kata kunci:** kekuatan lentur, CFRP, pola retak, jenis keruntuhan

*Diajukan:* 1 Maret 2024

*Direvisi:* 27 Mei 2024

*Diterima:* 29 Juli 2024

*Dipublikasikan online:* 1 Agustus 2024

## Pendahuluan

Beton merupakan salah satu material bangunan yang banyak digunakan dalam pekerjaan konstruksi karena memiliki kelebihan seperti mudah dibentuk, material penyusunnya relatif murah dan mudah diperoleh di tingkat lokal, memiliki kuat tekan yang tinggi. Selain memiliki kelebihan, beton juga memiliki kekurangan seperti kuat tarik yang rendah, mempunyai berat sendiri yang besar, kekuatan yang sangat tergantung pada proporsi campuran, proses pembuatan, perawatan.

Secara garis besar komponen struktur beton terdiri dari balok, kolom dan pelat. Pada perencanaan balok terdapat beberapa parameter seperti kuat lentur, kuat geser, torsi dan lendutan yang harus memenuhi persyaratan. Kuat lentur struktur beton penting diperhatikan karena biasanya pada perencanaan balok beton, kuat lentur yang pertama kali dianalisa. Kuat lentur suatu struktur akan bertambah jika struktur tersebut mengalami perkuatan atau perbaikan yang disebabkan karena adanya penambahan kekuatan sehingga beban yang dapat dipikul struktur tersebut lebih besar dan lendutannya semakin kecil.

*Fiber Reinforced Polymer* (FRP) telah terbukti memiliki keunggulan signifikan secara spesifik kasus penggunaan dalam infrastruktur sipil, dari kinerja intrinsik dan perspektif logistik (Karbhari 2011). Ada tiga jenis serat utama yang biasa digunakan untuk membuat

komposisi FRP yaitu aramid, karbon dan kaca. Selain jenis ini, meskipun penggunaannya belum biasa seperti yang lain, terdapat pula serat basalt dan hybrid (Belarbi and Dawood 2016).

Serat karbon memiliki kekuatan dan modulus elastisitas tertinggi dari semua jenis serat. Keuntungan bila menggunakan serat karbon (CFRP) adalah tahan korosi, mempunyai kuat tarik yang tinggi, superior dalam daktilitas, beratnya ringan. Selain itu dalam pelaksanaan tidak mengganggu aktifitas yang ada pada daerah perbaikan struktur tersebut (Sumargo, Ruslan 2014). Kuat tekan silinder beton yang menggunakan CFRP dapat meningkatkan kuat tekan 26,89% sedangkan beton dengan serat kaca (GFRP) meningkatkan kuat tekan 14,89% terhadap beton normal (Tarigan and Meka 2018). Balok yang diperkuat CFRP dapat meningkatkan kuat lentur hingga 65,934% sedangkan GFRP sebesar 43,956% (Ireneus Petrico G 2012). Arah serat dalam aplikasi CFRP mempengaruhi nilai kuat tekan beton yang mana peningkatan kuat tekan beton *fully jacketing* CFRP arah serat vertikal adalah 21,52% dan *fully jacketing* CFRP arah serat horisontal sebesar 41,43% (Respati and Achmad 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar peningkatan kuat lentur balok dengan penambahan serat karbon (*carbon fiber reinforced polymer*), pola keruntuhan dan pola retak yang terjadi pada balok.

Cara mensitasi artikel ini:

Layang, S., Eliatun (2024) Kekuatan Lentur Balok Beton dengan Penambahan Serat Karbon (*Fiber Reinforced Polymer*). *Buletin Profesi Insinyur* 7(2) 064-070



## Metode

Perencanaan campuran beton berdasarkan SNI 7656:2012 tentang tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa dengan mutu beton rencana 30 MPa. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder (diameter 150 cm; tinggi 30 cm) dan balok (panjang 60 cm; lebar 15 cm; 15 cm). Campuran beton dibuat dengan mesin pengaduk (*mixer*). Pengujian silinder beton dilakukan pada umur 28 hari dengan menggunakan alat uji tekan berdasarkan SNI 1974:2011 tentang cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder. Pembebanan pada benda uji silinder sampai beban maksimum hingga benda uji hancur. Pengujian silinder beton ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1** Pengujian Tekan Silinder

Nilai kuat tekan benda uji diperoleh dengan membagi beban maksimum yang diterima benda uji selama pengujian dengan luas penampang melintang benda uji.

Pengujian lentur benda uji balok berdasarkan SNI 4431:2011 (cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan). Pembebanan diberikan hingga benda uji balok patah. Pengujian lentur balok ditunjukkan pada Gambar 2.

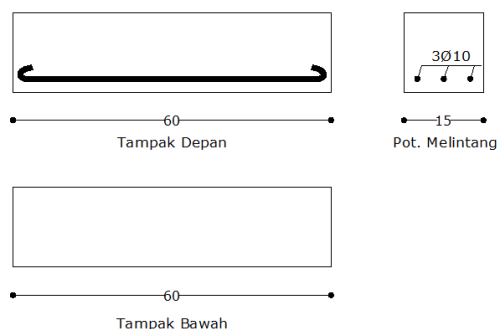
Terdapat 3 tipe balok yaitu:

1. Tipe 1, balok tanpa diperkuat serat karbon (BN). Model balok dapat dilihat pada Gambar 3.
2. Tipe 2, balok yang diperkuat serat karbon di sepertiga bagian tengah balok (BCC). Model balok dapat dilihat pada Gambar 4.

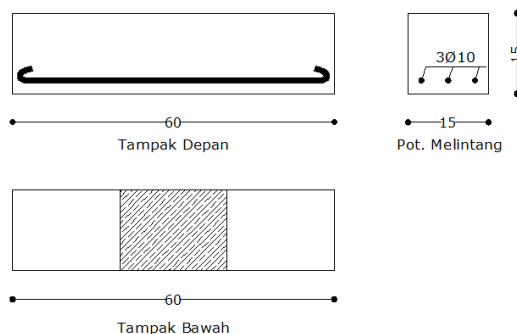
3. Tipe 3, balok yang diperkuat serat karbon di sepanjang balok (BCF). Model balok dapat dilihat pada Gambar 5.



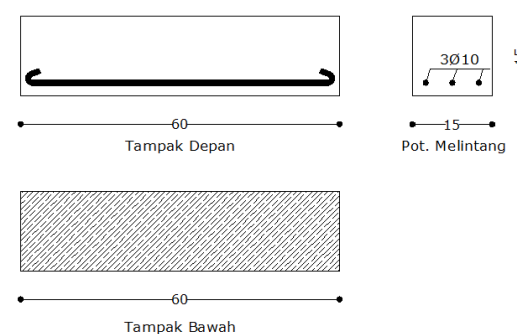
**Gambar 2** Pengujian Lentur Balok



**Gambar 3** Model Balok Uji Tipe 1 (BN)



**Gambar 4** Model Balok Uji Tipe 2 (BCC)



**Gambar 5** Model Balok Uji Tipe 3 (BCF)



Gambar 6 Visual Benda Uji Balok

## Hasil dan Pembahasan

### Proporsi Campuran

Perhitungan proporsi campuran beton menggunakan SNI 7656:2012 tentang tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa. Hasil perhitungan proporsi campuran dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Proporsi Material Penyusun Beton

| Parameter    | PC  | Agregat Halus | Agregat Kasar | Air  |
|--------------|-----|---------------|---------------|------|
| Berat (kg)   | 380 | 802           | 988           | 247  |
| Perbandingan | 1   | 2,11          | 2,60          | 0,65 |

### Tulangan Baja dan CFRP

Pengujian tarik baja dilakukan untuk mengetahui tegangan leleh ( $f_y$ ), tegangan ultimit ( $f_u$ ) dan modulus elastis ( $E$ ). Tulangan baja yang digunakan berdiameter 10 mm. Hasil Pengujian tarik baja ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Sifat Baja Tulangan

| Spesimen  | Teg. Leleh (N/mm <sup>2</sup> ) | Teg. Ultimit (N/mm <sup>2</sup> ) | Modoulus Elastis (N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1         | 375                             | 526,330                           | 11660,100                             |
| 2         | 385                             | 524,700                           | 15487,900                             |
| Rata-rata | 380                             | 525,515                           | 13574,000                             |

Serat karbon (CFRP) yang digunakan adalah Tyfo SCH41 CFRP yang mana sifatnya ditampilkan pada Tabel 3

Tabel 3 Karakteristik CFRP Tyfo SCH41

| Parameter           | Nilai                   |
|---------------------|-------------------------|
| Kuat tarik          | 3792,12 MPa             |
| Modulus Elastisitas | 230.284,95 MPa          |
| Densitas            | 1,74 gr/cm <sup>3</sup> |
| Berat               | 644 gr/m <sup>2</sup>   |

### Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan ditunjukkan pada Tabel 4. Berdasarkan hasil pengujian, kuat tekan rata-rata sebesar 10,379 MPa. Nilai kuat tekan yang dihasilkan tidak mencapai kuat tekan rencana sebesar 30 MPa. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti

kualitas semen, faktor air semen, kekuatan agregat (Amelia, dkk 2021), perawatan benda uji.

Tabel 4 Kuat Tekan Beton

| No Benda Uji | Umur Pengujian (hari) | Berat Benda Uji (kg) | Beban Maksimum (kN) | Tegangan Maksimum (MPa) |
|--------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|
| 1            | 38                    | 11,700               | 192,572             | 10,897                  |
| 2            | 35                    | 11,800               | 183,106             | 10,362                  |
| 3            | 34                    | 11,600               | 197,758             | 11,191                  |
| 4            | 33                    | 11,900               | 160,242             | 9,068                   |
| Rata-rata    |                       | 11,750               |                     | 10,379                  |

Semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *Portland Composite Cement* (PCC) karena jenis semen ini yang banyak tersedia di Kota Palangka Raya. Kuat tekan beton yang menggunakan Ordinary Portland Cement (OPC) tipe I menghasilkan kuat tekan yang lebih besar dibanding PCC (Firnanda, dkk 2015). Hal ini terjadi akibat perbedaan unsur penyusun. PCC menggunakan tambahan bahan anorganik (Intara 2014) sedangkan OPC tidak menggunakan bahan anorganik.

Faktor Air Semen (FAS) yang digunakan dalam penelitian didasarkan pada hasil perhitungan dengan metode SNI 7656:2012. Nilai FAS berdasarkan perhitungan relatif besar yaitu 0,65. Nilai FAS yang besar menghasilkan kuat tekan yang rendah sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Rosie dkk (Sari, dkk 2015). Nilai FAS yang tinggi menghasilkan campuran beton yang lebih encer. Semakin banyak air dalam campuran beton, maka semakin banyak pula air yang akan keluar pada proses pengeringan. Jika proses pengeringannya tidak merata, maka kan timbul retak-retak kecil (*micro crack*) yang sangat mempengaruhi kekuatan beton. Setelah proses pembuatan benda uji silinder sampai dengan pengujian, benda uji ditempatkan secara terbuka dalam ruangan dan tidak ada perlakuan khusus seperti direndam dalam air atau dilakukan pembasahan yang memungkinkan proses pengeringan tidak merata. Kekuatan agregat kasar dapat mempengaruhi kuat tekan. Kekuatan agregat dapat diuji menggunakan Mesin Abrasi Los Angeles untuk mengetahui tingkat keausan agregat. Semakin besar nilai keausan maka kuat tekan yang dihasilkan semakin kecil (Damayanti 2015).

### Pengujian Balok

Selanjutnya hasil pengujian balok dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5, beban maksimum yang dapat diterima oleh balok tanpa perkuatan CFRP (BN) lebih kecil dibanding balok dengan balok yang diperkuat CFRP. Beban maksimum yang dapat diterima oleh balok yang diperkuat CFRP pada seluruh bidang bawah (BFC) mencapai 109,017 kN lebih besar dibanding balok yang hanya diperkuat pada bagian sepertiga tengah bentang (BCC) dengan beban 108,687 kN. Berdasarkan beban maksimum rata-rata yang diterima, tidak terdapat

perbedaan yang signifikan antara balok BCC dan BCF. Hal ini disebabkan karena kuat tekan beton yang dihasilkan tidak mencapai syarat minimum kuat tekan untuk penggunaan serat karbon yaitu sebesar 17 MPa.

**Tabel 5** Hasil Pengujian Balok

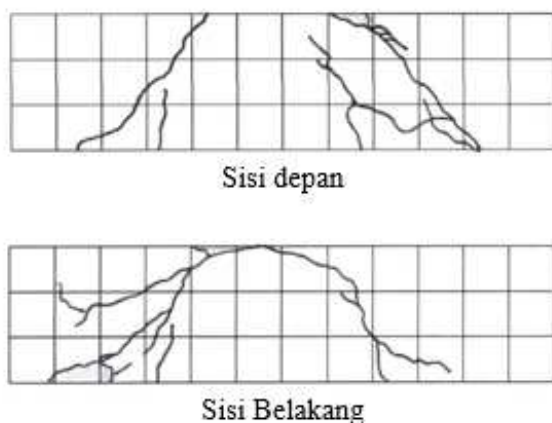
| Kode Balok | Umur Pengujian (hari) | Berat Balok (kg) | Beban Maksimum (kN) | Tegangan Maksimum (MPa) |
|------------|-----------------------|------------------|---------------------|-------------------------|
| BN-1       | 31                    | 32,0             | 80,893              | 1,183                   |
| BN-2       | 30                    | 32,3             | 88,880              | 1,308                   |
| BCC-1      | 35                    | 31,7             | 108,687             | 1,600                   |
| BCC-2      | 34                    | 31,7             | 101,101             | 1,488                   |
| BCC-3      | 33                    | 32,0             | 103,749             | 1,537                   |
| BCF-1      | 35                    | 31,7             | 106,131             | 1,583                   |
| BCF-2      | 34                    | 31,6             | 109,017             | 1,637                   |
| BCF-3      | 33                    | 32,4             | 96,433              | 1,410                   |

#### Pola Retak dan Jenis Keruntuhan

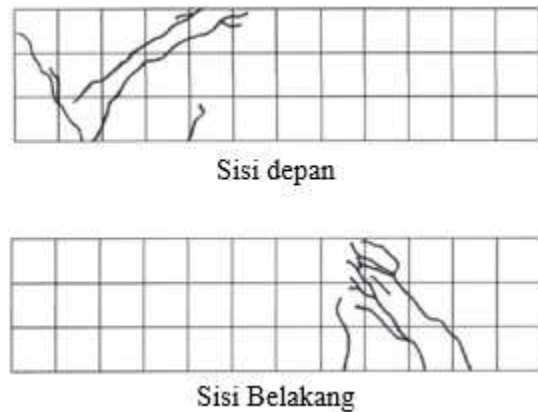
Pola retak dan jenis keruntuhan yang terjadi pada balok saling berkaitan. Pola retak yang terjadi pada balok dapat menjelaskan jenis keruntuhan balok tersebut.

Pola retak yang terjadi pada balok tanpa penambahan CFRP (BN) ditunjukkan pada Gambar 7 dan 8. Retak dimulai dari tumpuan kemudian bergerak diagonal ke arah beban sejalan dengan semakin meningkatnya beban. Dengan menggunakan alat uji lentur digital, pembebanan akan berhenti dengan sendirinya ketika balok tidak lagi memberikan perlawanan. Berdasarkan pola retak yang terjadi dapat disimpulkan bahwa balok BN-1 dan BN-2 mengalami keruntuhan tekan geser.

Berdasarkan hasil analisa manual dengan menggunakan nilai kuat tekan 10,379 MPa dan tegangan leleh baja 380 MPa, diperoleh nilai rasio penulangan aktual (0,01098) kurang dari rasio penulangan seimbang (0,01208). Hal ini menunjukkan bahwa balok BN dalam kondisi *under reinforced*.

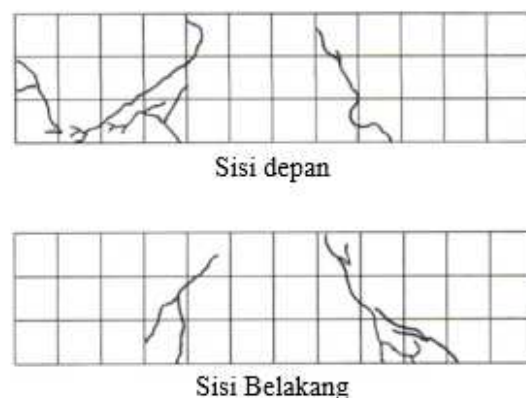


**Gambar 7** Pola Retak Balok BN-1

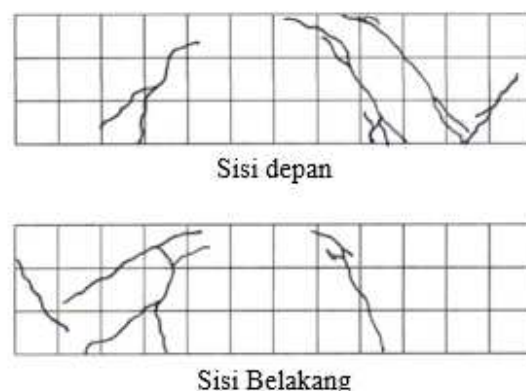


**Gambar 8** Pola Retak Balok BN-2

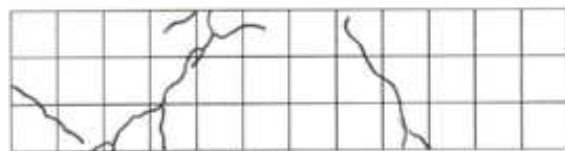
Pola retak pada balok dengan penambahan CFRP pada daerah sepertiga bentang (BCC) ditunjukkan pada Gambar 9, 10 dan 11. Pola retak yang terjadi sama dengan pada balok BN, dimulai dari tumpuan dan bergerak diagonal ke arah beban. Dengan demikian jenis keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan tekan geser.



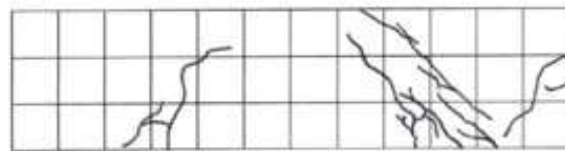
**Gambar 9** Pola Retak Balok BCC-1



**Gambar 10** Pola Retak Balok BCC-2



Sisi depan



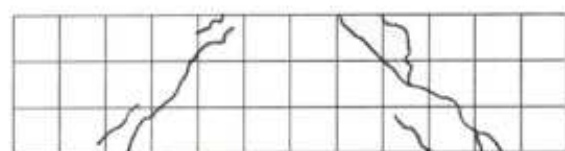
Sisi Belakang

**Gambar 11** Pola Retak Balok BCC-3

Pola retak balok dengan penambahan CFRP pada seluruh bagian bawah balok (BCF) ditunjukkan pada Gambar 12, 13 dan 14. Pola retak yang terjadi sama (tipikal) dengan dua tipe balok sebelumnya, yang dimulai dari tumpuan dan bergerak secara diagonal ke arah beban. Sehingga pada balok inipun mengalami keruntuhan tekan geser.



Sisi depan

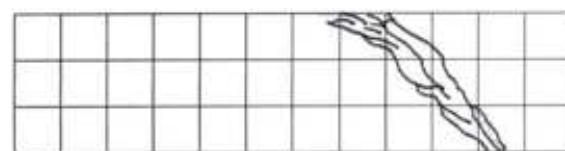


Sisi Belakang

**Gambar 12** Pola Retak Balok BCF-1



Sisi depan



Sisi Belakang

**Gambar 13** Pola Retak Balok BCF-2

Berdasarkan pola retak yang terjadi pada semua balok uji, dapat disimpulkan bahwa jenis keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan tekan geser (Layang and



Sisi depan



**Gambar 14** Pola Retak Balok BCF-3

Wiratno 2013). Tidak ada perbedaan jenis keruntuhan antara balok yang tidak diperkuat CFRP dan balok yang diperkuat CFRP. Hal ini disebabkan karena mutu beton tidak memenuhi persyaratan minimal untuk dapat diperkuat dengan serat karbon. ACI 440.2R-17 dan SNI 8971:2021 mensyaratkan kuat tekan minimal beton yang bisa diperkuat CFRP sebesar 17 MPa.

Pola retak balok dari hasil penelitian ini sama dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Saleem dkk, tentang perilaku retak balok beton bertulang yang diperkuat dengan CFRP pada sisi bawah balok. Retak yang terjadi merupakan gabungan dari retak lentur dan geser yang diakibatkan oleh interaksi lentur dan geser seperti ditunjukkan pada Gambar 15 (Saleem et al. 2019).



**Gambar 15** Pola Retak Geser pada Balok

Demikian pula penelitian yang dilakukan oleh Mukhtar and Shehadah tentang perilaku geser pada balok beton bertulang yang diperkuat CFRP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola retak pada balok beton dengan perkuatan CFRP menghasilkan retak geser (Mukhtar and Shehadah 2021). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan CFRP untuk perkuatan eksternal pada balok cenderung menghasilkan keruntuhan geser yang dibuktikan dengan terbentuknya pola retak geser pada balok.

Kondisi CFRP pada balok BCC dan BCF tidak terputus dan masih melekat dengan baik pada balok. Hal ini juga memberikan tambahan informasi bahwa kombinasi gaya tarik yang disumbangkan oleh besi tulangan dan

CFRP lebih besar dari gaya tekan yang disumbangkan oleh beton, sehingga beton yang pertama kali akan mengalami kegagalan (*failure*) yang dikenal dengan keruntuhan tekan (*over-reinforced*). Jenis keruntuhan tekan harus dihindari dan sangat berbahaya karena tidak memberikan peringatan terlebih dahulu (lendutan yang besar, retak yang lebar). Keruntuhan tekan dapat terjadi secara tiba-tiba. Urutan kegagalan material yang dikehendaki dimulai dari CFRP, baja tulangan dan beton. Dengan harapan akan terjadi keruntuhan yang bersifat daktail. Sifat material CFRP adalah elastis *brittle*. Hal ini berarti bahwa CFRP akan putus secara tiba-tiba. Namun dalam penelitian ini semua balok mengalami keruntuhan tekan yang bersifat getas (*brittle*).

#### Kuat Lentur Balok Berdasarkan Beban Maksimum

Perhitungan momen akibat beban maksimum pada balok tanpa perkuatan serat karbon (BN) diperlihatkan pada Tabel 6.

**Tabel 6** Perhitungan Momen Berdasarkan Beban Maksimum pada Balok BN

| Parameter       | Satuan            | BN-1   | BN-2   |
|-----------------|-------------------|--------|--------|
| Lebar balok     | m                 | 0,150  | 0,150  |
| Tinggi balok    | m                 | 0,150  | 0,150  |
| Panjang balok   | M                 | 0,600  | 0,600  |
| Berat isi balok | kN/m <sup>3</sup> | 23,704 | 23,926 |
| Beban terpusat  | kN                | 40,447 | 44,440 |
| Beban merata    | kN/m              | 0,533  | 0,538  |
| Reaksi tumpuan  | kN                | 40,607 | 44,602 |
| Momen maksimum  | kNm               | 6,079  | 6,678  |
| Momen rata-rata |                   | 6,379  |        |

Berdasarkan Tabel 6, momen maksimum balok BN-1 sebesar 6,079 kNm dan untuk balok BN-2 sebesar 6,678 kNm. Momen maksimum yang terjadi disebut juga momen ultimit ( $M_u$ ), yaitu momen yang dapat ditahan oleh balok sesaat sebelum balok tersebut mengalami keruntuhan (*failure*). Momen maksimum rata-rata pada balok BN sebesar 6,379 kNm.

Tabel 7 menunjukkan nilai momen pada balok yang diperkuat di area sepertiga tengah bentang berdasarkan beban maksimum. Parameter yang dianalisis mencakup dimensi balok (lebar, tinggi, dan panjang), berat isi balok, serta beban yang diterima, baik dalam bentuk beban terpusat maupun beban merata.

Beban maksimum yang diterima balok bervariasi, dengan nilai tertinggi sebesar 54,344 kN pada balok BCC-1 dan terendah 50,551 kN pada balok BCC-2. Beban merata yang bekerja pada balok memiliki nilai yang relatif seragam di kisaran 0,528 – 0,533 kN/m, yang menghasilkan reaksi tumpuan berkisar antara 50,709 – 54,502 kN.

Dari hasil perhitungan momen maksimum, balok BCC-1 memiliki momen tertinggi sebesar 8,163 kNm,

sedangkan balok BCC-2 memiliki momen terendah sebesar 7,594 kNm. Nilai momen rata-rata dari ketiga balok ini adalah 7,850 kNm, yang menggambarkan kapasitas beban lentur rata-rata yang dapat ditahan oleh balok sebelum mengalami kegagalan.

Tabel 8 memperlihatkan momen maksimum/ultimit Blok BCC-1 lebih besar dibanding BCC-2 dan BCC-3. Hal ini disebabkan karena balok BCC-1 mampu menerima beban yang paling besar dibanding kedua balok tersebut. Momen ultimit rata-rata pada balok yang diperkuat dengan CFRP pada daerah sepertiga bentang sebesar 7,850 kNm.

**Tabel 7** Perhitungan Momen Berdasarkan Beban Maksimum pada Balok BCC

| Parameter       | Satuan            | BCC-1  | BCC-2  | BCC-3  |
|-----------------|-------------------|--------|--------|--------|
| Lebar balok     | m                 | 0,150  | 0,150  | 0,150  |
| Tinggi balok    | m                 | 0,150  | 0,150  | 0,150  |
| Panjang balok   | M                 | 0,600  | 0,600  | 0,600  |
| Berat isi balok | kN/m <sup>3</sup> | 23,481 | 23,481 | 23,704 |
| Beban terpusat  | kN                | 54,344 | 50,551 | 51,875 |
| Beban merata    | kN/m              | 0,528  | 0,528  | 0,533  |
| Reaksi tumpuan  | kN                | 54,502 | 50,709 | 52,035 |
| Momen maksimum  | kNm               | 8,163  | 7,594  | 7,793  |
| Momen rata-rata |                   | 7,850  |        |        |

**Tabel 8** Perhitungan Momen Berdasarkan Beban Maksimum pada Balok BCF

| Parameter       | Satuan            | BCF-1  | BCF-2  | BCF-3  |
|-----------------|-------------------|--------|--------|--------|
| Lebar balok     | m                 | 0,150  | 0,150  | 0,150  |
| Tinggi balok    | m                 | 0,150  | 0,150  | 0,150  |
| Panjang balok   | M                 | 0,600  | 0,600  | 0,600  |
| Berat isi balok | kN/m <sup>3</sup> | 23,481 | 23,407 | 24,000 |
| Beban terpusat  | kN                | 53,066 | 54,509 | 48,217 |
| Beban merata    | kN/m              | 0,528  | 0,527  | 0,540  |
| Reaksi tumpuan  | kN                | 53,224 | 54,667 | 48,379 |
| Momen maksimum  | kNm               | 7,972  | 8,188  | 7,245  |
| Momen rata-rata |                   | 7,801  |        |        |

Kapasitas momen pada balok BCC dan BCF lebih besar dibanding dengan balok BN. Kapasitas momen balok BCC dan BCF masing-masing meningkat sebesar 23,1% dan 22,3% dari balok BN. Peningkatan kekuatan lentur balok dengan perkuatan CFRP tidak terlihat dengan jelas karena beton mengalami kegagalan terlebih dahulu dibanding CFRP dan baja tulangan. Perhitungan analitis kuat lentur balok dengan perkuatan CFRP tidak dihitung karena mutu beton tidak

memenuhi kuat tekan minimal 17 MPa (ACI 440.2R-17 2017).

## Kesimpulan

1. Retak yang terjadi pada semua balok uji berawal dari tumpuan kemudian bergerak secara diagonal ke arah beban.
2. Pola keruntuhan yang terjadi pada semua balok uji adalah keruntuhan tekan geser. Beton mengalami kegagalan terlebih dahulu sebelum CFRP dan tulangan baja mencapai kapasitas
3. Momen tahanan rata-rata balok tanpa CFRP (BN) sebesar 6,379 kNm, balok BCC sebesar 7,850 kNm dan balok BCF sebesar 7,801 kNm
4. Pengaruh perkuatan balok dengan CFRP terhadap kuat lentur tidak teramati dengan jelas, karena balok mengalami keruntuhan *over reinforced* dimana material beton mengalami kegagalan terlebih dahulu dibanding lelehnya baja tulangan.

## Referensi

- American Concrete Institute (ACI). (2017). *440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*.
- Amelia, R., Suhendra, S., & Amalia, K. R. (2021). Hubungan faktor-faktor yang mempengaruhi kuat tekan beton. *Jurnal Talenta Sipil*, 4(2), 225.
- Belarbi, A., & Dawood, M. (2016). Sustainability of construction materials: Sustainability of fiber reinforced polymers (FRPs) as a construction material (2nd ed.). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00020-2>
- Damayanti, Y. (2015). Hubungan nilai abrasi agregat kasar terhadap kuat tekan beton. *Senarigti*, 9–10.
- Firnanda, A., Kurniawandy, A., & Ermiyati. (2015). Kuat tekan beton dan waktu ikat semen Portland komposit (PCC). *Jurnal Sipil Statik*, 3, 103–111.
- Intara, I. W. (2014). Perbedaan umur pencapaian kuat tekan beton dari perekat semen OPC, PPC dan PCC. *Jurnal Logic*, 14(2), 82–86.
- Ireneus, P. G. (2012). Perbandingan kekuatan lentur balok beton bertulang dengan menggunakan perkuatan CFRP dan GFRP. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1–9.
- Layang, S., & Wiratno. (2013). A comparison of the flexure behavior of normal concrete beam compiled by gravel and crushed stone. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan BALANGA*, 1(1), 20–29.
- Karbhari, V. M. (2011). Databases and knowledge-based systems for service life estimation of fiber reinforced polymer (FRP) rehabilitated civil engineering structures. *Woodhead Publishing Limited*.
- Mukhtar, F. M., & Shehadah, M. E. (2021). Shear behavior of flexural CFRP-strengthened RC beams with crack-induced delamination: Experimental investigation and strength model. *Composite Structures*, 268, 113894. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113894>
- Respati, S. W., & Achmad, K. (2017). Pengaruh arah serat carbon fiber reinforced polymer terhadap kuat tekan beton normal menggunakan material lokal pasir Samboja di wilayah Kalimantan Timur. *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, 5(1), 19.
- Saleem, M. U., Khan, A., Yousaf, M., Ashraf, M., & Nawaz, M. A. (2019). Cracking behavior of RC beams strengthened with different amounts and layouts of CFRP. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(5), 1–19.
- Sari, R. A. I., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2015). Pengaruh jumlah semen dan fas terhadap kuat tekan beton dengan agregat yang berasal dari sungai. *Jurnal Sipil Statik*, 3(1), 68–76.
- Sumargo, R. G. (2014). Kapasitas penggunaan carbon fiber reinforced polymer (CFRP) berlapis banyak terhadap perkuatan lentur struktur balok beton bertulang. *IRWNS*, 2, 126–133.
- Tarigan, J., & Meka, R. (2018). The usage of carbon fiber reinforcement polymer and glass fiber reinforcement polymer for retrofit technology building. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 126, 1–9.