

## PENGARUH RASIO KEKAKUAN BALOK DAN LAPISAN FRP TERHADAP PERILAKU BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT FRP

Kevin Elmerson Hidayat<sup>1</sup>, Sentosa Purnomo<sup>2</sup>, Daniel Tjandra<sup>3</sup> and Gunawan Budi Wijaya<sup>4</sup>

**ABSTRAK :** Beton mempunyai beberapa kekurangan seperti kuat tarik yang rendah, bersifat getas, kecilnya rasio kekuatan terhadap beratnya, dan rentan terhadap retak. Salah satu solusi untuk mengalami masalah tersebut adalah menambahkan perkuatan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP). Spesimen beton bertulang dibuat dengan mutu rencana  $f_c'20$  MPa dengan panjang 1200 mm dan lebar 150 mm dengan variasi ukuran tinggi 150 mm, 200 mm, dan 300 mm. Tulangan lentur memakai tulangan polos diameter 10 mm. FRP sepanjang 800 mm ditempelkan pada spesimen beton bertulang menggunakan epoxy. Dalam pelaksanaan, pembebanan dilakukan dengan metode *two point load* agar terjadi lentur murni pada spesimen, pengambilan data dilakukan menggunakan camera digital untuk pengambilan gambar dan load cell yang telah disambungkan pada data logger untuk pembacaan beban yang terjadi pada spesimen, dan analisa data dilakukan menggunakan metode analisa *Digital Image Correlation*. Variasi ukuran tinggi balok memiliki pengaruh signifikan terhadap *crack pattern* pada spesimen beton bertulang. Sedangkan pengaruh variasi ukuran tinggi balok memiliki pengaruh terhadap perilaku lentur dimana peningkatan kekuatan lentur paling signifikan terjadi pada balok yang memiliki ukuran tinggi 200 mm sebanyak 37%. Pada spesimen dengan ukuran tinggi 300 mm terjadi penurunan beban dan daktilitas yang cukup signifikan. Semua spesimen mengalami penurunan daktilitas setelah diperkuat dengan FRP.

**KATA KUNCI:** *fiber reinforced polymer*, tinggi, *two point load*, *digital image correlation*, *crack pattern*, perilaku lentur, daktilitas

### 1. PENDAHULUAN

Bangunan seperti gedung bertingkat, rumah, dan lain sebagainya banyak yang menggunakan struktur beton bertulang untuk menjadi komponen utamanya. Namun struktur bangunan juga semakin bervariasi dan memerlukan perbaikan struktur atau *maintenance*. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, banyak penelitian yang dilakukan dengan tujuan menemukan solusi untuk melakukan langkah pencegahan dengan memberi perkuatan sebelum terjadi kerusakan. Salah satu benda yang berguna untuk menguatkan struktur beton bertulang adalah dengan menggunakan lapisan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP).

*Fiber Reinforced Polymer* adalah produk yang terdiri dari resin, bahan penguat fiberglass dan additive yang digabung dan diproses agar dapat performance yang spesifik dan sesuai kebutuhan. FRP memiliki kelebihan tidak korosi, berat per volumenya yang lebih rendah dari baja, mudah pengaplikasiannya, dan biaya maintenance yang rendah. Dalam balok yang diperkuat secara internal dengan baja dan eksternal dengan FRP, biasanya ada kapasitas cadangan pada saat kondisi leleh baja. Setelah perkuatan baja pada kondisi leleh, balok masih dapat menerima tambahan beban, meskipun pada tingkat yang lebih rendah. Perilaku yang biasa terjadi adalah setelah perkuatan baja pada kondisi leleh, FRP bertahan pada perilaku elastis hingga akhirnya kegagalan terjadi secara mendadak. Hingga saat ini, FRP sebagai kekuatan

---

<sup>1</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416038@john.petra.ac.id

<sup>2</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416054@john.petra.ac.id

<sup>3</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, danieljtj@petra.ac.id

<sup>4</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, gunawanbw@petra.ac.id

struktur sudah dibuktikan dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan tekan dari struktur oleh berbagai penelitian (Shreshta, 2011). Informasi tentang efek dari perbedaan ukuran tinggi balok akan sangat berguna pada aplikasi secara teknis di lapangan. Bertambahnya perbedaan luas penampang dengan membedakan ukuran tinggi maka akan ada penambahan kekakuan dan perbedaan pada sifat spesimen. Dengan perbedaan ukuran tersebut perlu diteliti efektifitas dari perkuatan FRP terhadap spesimen dengan melihat efeknya pada daktilitas, *crack pattern*, juga kapasitas spesimen. Maka dari itu, penelitian ini berfokus pada variabel perbedaan tinggi dan membandingkan pengaruhnya pada balok beton bertulang yang diperkuat FRP.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Daktilitas

Daktilitas pada umumnya dinyatakan sebagai rasio deformasi *ultimate* dengan deformasi saat awal leleh (Karolina, 2008). Selain kekuatan dan kelenturan, daktilitas juga merupakan aspek yang perlu diperhatikan dalam merencanakan suatu struktur. Pada saat terjadi gempa bumi, struktur yang memiliki daktilitas tinggi akan menyerap energi lebih banyak jika dibandingkan dengan struktur yang memiliki daktilitas rendah. Daktilitas adalah kemampuan material mengembangkan regangannya dari pertama kali leleh hingga akhirnya putus. Daktilitas struktur dapat memberi peringatan awal dan pertahanan terhadap kerusakan total struktur. Struktur yang *ductile* juga lebih mampu menahan gempa karena dapat menyerap energi dengan deformasi pasca elastis.

### 2.2 Fiber Reinforced Polymer (FRP)

*Fiber Reinforced Polymer* (FRP) adalah material komposit sudah mulai digunakan di Indonesia sejak 1997 sebagai material perkuatan struktur beton bertulang. FRP memiliki kelebihan seperti massa jenis yang ringan, tidak mudah berkarat, memiliki modulus elastisitas yang mendekati baja tulangan, dan memiliki kekuatan tarik yang sangat tinggi. Kelebihan yang lain adalah bentuk FRP yang dapat disesuaikan dengan kondisi lapangan, berbeda dengan baja tulangan yang memerlukan area khusus untuk fabrikasi, ataupun joint untuk pengaplikasian FRP tersebut. Pengaplikasian FRP pada konstruksi bangunan juga mengurangi jumlah tenaga dan meningkatkan keamanan kerja. Proses pelaksanaan juga cenderung *sustainable* dan cukup menekan biaya.

### 2.3 Digital Image Correlation

Metode *Digital Image Correlation* (DIC) adalah sebuah metode analisa untuk mengamati deformasi luar benda dengan memfoto secara bertahap dalam kondisi beban yang berbeda. Dari gambar-gambar tersebut didapat analisa perubahan yang terjadi pada benda yang diteliti. Dari analisa tersebut muncul deformasi yang terjadi pada benda dari awal sampai akhir. *Software* yang digunakan untuk metode analisa DIC adalah Ncorr. Proses persiapan sistem ini relatif mudah dan menekan biaya cukup banyak, yaitu hanya membutuhkan satu kamera digital biasa dan *smartphone* (Suryanto et al, 2017).

### 2.4 Kuat Lentur Struktur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan FRP

Balok beton bertulang perlu dibuat dengan ukuran yang tepat untuk menghindari kegagalan shear dan hanya terjadi pada area momen konstan (Ritchie, 1988). Lenturan murni adalah lenturan yang terjadi pada balok dengan mengkondisikan gaya lintangnya sama dengan nol, yaitu dengan meletakkan balok beton pada tumpuan sederhana yang dibebani secara simetris sejauh dari tumpuan.

Berdasarkan penjelasan di atas maka dapat diperhitungan regangan, tegangan, maupun gaya-gaya yang timbul pada penampang balok dalam menahan momen akibat beban luar yang timbul tepat pada saat balok hancur. Momen ini menggambarkan kekuatan dan kerap kali disebut kuat lentur ultimit balok. Kuat lentur nominal adalah nilai maksimum yang diperoleh dari gaya-gaya dalam yang terjadi dan membentuk suatu kopel momen tahanan dalam. Dengan asumsi bahwa baja tulangan tarik serta material FRP mencapai leleh ( $f_s = f_y$  dan  $f_f = f_{yf}$ ), maka kuat lentur nominal balok beton bertulang dengan perkuatan FRP dapat dirumuskan sebagai berikut:

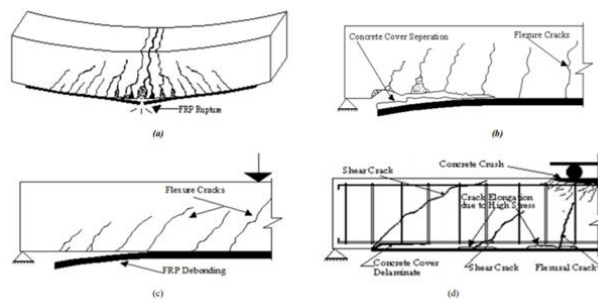
$$M_n = T_s \left( d - \frac{a}{2} \right) + \psi_f \cdot T_f \left( h - \frac{a}{2} \right) - C_s \left( d' - \frac{a}{2} \right) \quad (2.1)$$

dimana,

$C_s$  = gaya tekan pada tulangan tekan (N)  
 $T_s$  = gaya tarik pada tulangan tarik (N)  
 $M_n$  = kuat lentur nominal (N)  
 $\alpha$  = tinggi blok tegangan (mm)  
 $d$  = jarak serat tekan beton terluar ke titik berat tulangan tarik (mm)  
 $h$  = jarak bagian atas balok dengan material FRP (tinggi balok)  
 $\psi_f = 0,85$  = faktor reduksi untuk kontribusi FRP (ACI *Committee* 440)

## 2.5 Crack Pattern

Pola retak yang terbentuk pada suatu balok dapat berlanjut menjadi awal permulaan bagi kegagalan suatu balok, baik balok bertulang biasa maupun balok bertulang yang diperkuat oleh FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Pada balok yang hanya diberi perkuatan FRP pada bagian tarik, bisa memicu salah satu kegagalan yaitu *de-bonding*. Ada beberapa jenis kegagalan yang umum terjadi pada balok dengan perkuatan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) dari penelitian-penelitian yang sebelumnya, beberapa diantaranya adalah pecah atau putusnya FRP, lepasnya selimut beton bersama dengan FRP, *de-bonding*, hancurnya beton pada bagian tekan, *interfacial de-bonding* pada bagian tepi atau ujung plat, dan *de-bonding* akibat kombinasi retak lentur dan geser seperti pada **Gambar 1** (Jumaat et al, 2011). Kegagalan seperti lepasnya selimut beton dengan FRP maupun *interfacial de-bonding* pada tepi atau ujung plat dipengaruhi oleh penyebab yang sama yaitu tegangan geser dan normal yang tinggi di bagian dekat ujung dari plat karena dekat dengan tempat berhentinya plat (Smith, 2002).



**Gambar 1. Tipe Keretakan pada Balok Beton Bertulang Akibat Lentur dan Mode Kegagalan Balok dengan Perkuatan FRP: (A) Putusnya Plat FRP; (B) Lepasnya Selimut Beton Bersama dengan FRP; (C) De-Bonding FRP; (D) Hancurnya Beton pada Bagian Tekan, Retak Geser dan Interfacial De-Bonding Akibat Retak Lentur-Geser.**

Keretakan yang terjadi pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) sedikit berbeda dengan keretakan pada balok beton bertulang biasa. Pada kasus pembebanan lentur, balok yang diperkuat dengan FRP memiliki keretakan yang lebih kecil atau tipis dan memiliki jarak yang relatif kecil antar retak (Walraven, 2007). Keretakan yang kecil ini menyebabkan kemungkinan tulangan besi untuk mengalami korosi semakin kecil dan disaat yang sama juga meningkatkan daya tahan dari balok beton tersebut. Oleh karena itu, prakiraan pola keretakan yang dipengaruhi oleh lebar retak ( $w$ ) dan jarak antar retak ( $s$ ) menjadi dasar penentuan jumlah tulangan yang dibutuhkan. Melalui penelitian-penelitian yang sudah dilakukan (Borosnyoi, 2005) pada perilaku balok terhadap beban tekan dan lentur mengenai lebar retak dan jarak antar retak, perumusan masih belum sepenuhnya disetujui.

## 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Pengecoran Spesimen Beton Bertulang

Tiga spesimen balok beton bertulang, yaitu  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ ,  $150 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ , dan  $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$  dicor. Tulangan lentur menggunakan baja polos dengan diameter 10 mm sejumlah 2 tulangan atas dan bawah. Sengkang menggunakan tulangan baja dengan ukuran diameter 8 mm dengan jarak antar sengkang 50 mm untuk spesimen BF15 dan BF20, sedangkan untuk BF30 menggunakan jarak 100 mm. Selimut beton pada keliling sisi tulangan dijaga pada jarak 20

mm menggunakan tahu beton seperti pada Baja tulangan yang digunakan adalah baja tulangan polos dengan kapasitas leleh 240 MPa. Lapisan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) direkatkan pada bagian bawah balok dengan menggunakan epoxy.

### 3.2 Pelapisan Balok Beton Bertulang dengan FRP *Laminate*

Lapisan FRP menggunakan CFRP produksi dari Sika beserta dengan perekat Sikadur® - 30 (epoxy) untuk digunakan pada balok beton bertulang tersebut. Spesimen yang akan dipakai adalah FRP *Laminate* Sika CarboDur S tipe 512. Langkah pengaplikasian lapisan FRP *laminate* kepada struktur beton bertulang adalah melakukan *chipping* pada beton dengan tujuan untuk mengikis permukaan beton supaya ada permukaan kasar yang membantu epoxy merekat lebih baik pada beton. Kemudian permukaan beton dibersihkan dengan kuas atau dengan *vacuum* sehingga bebas dari debu dan kotoran. Sikadur® - 30 terdiri dari bahan A dan B yang harus dicampur dengan perbandingan volume 3:1. Setelah itu mengaplikasikan Sikadur® - 30 pada permukaan beton dan pada lapisan FRP, kemudian menempelkan FRP pada lapisan beton. Properti dari lapisan FRP yang digunakan adalah Sika CarboDur S tipe 512 dengan lebar 50 mm, ketebalan 1,2 mm, dan luas penampang 60 mm<sup>2</sup>.

### 3.3 Uji Lentur Balok Beton Bertulang Menggunakan *Two Point Load*

Pembebanan yang dilakukan pada spesimen adalah pembeban metode *two-way point load*. Pembebanan ini direalisasikan dengan membuat beberapa komponen yang terbuat dari baja seperti: *bracket*, *frame* pengangkat, *spreader beam*, *point load*, *support load*, dan *steel plate*. *Bracket* merupakan plat baja dengan tebal 10 mm dengan ukuran 1000 mm x 1000 mm yang di susun di atas dan di bawah kanal U sehingga menjadi plat baja dengan inersia yang tinggi dan dapat menahan gaya terpusat lebih besar. *Frame* pengangkat terbuat dari rangka baja *hollow* dengan ukuran 50.50.3 mm yang digunakan untuk mengangkat *bracket* pada ketinggian tertentu yang kemudian akan dikunci menggunakan *nut* pada keempat *post-tensioning bar* (PT bar) dengan diameter 40 mm, sehingga posisi dan pergerakan vertical *bracket* terkunci. Untuk menghasilkan gaya yang akan dibebankan ke balok, digunakan *manual hydraulic jack* dengan kapasitas 30 ton, yang dibaut pada sisi bawah *bracket*. Kubus beton dengan ukuran 150 mm x 150 mm disusun menjadi 2 buah kolom dengan jarak 1000 mm dari titik tengah *bracket* yang bermanfaat untuk mengatur ketinggian dan menjadi tempat tumpuan spesimen balok beton. Untuk menghindari permukaan tumpuan yang tidak rata maka diletakkan plat baja dengan ukuran 300 mm x 300 mm diatas permukaan kubus beton yang kemudian diperiksa kembali menggunakan *waterpass* sehingga dapat diketahui apakah tempat tumpuan sudah cukup presisi untuk digunakan. Perletakan sendi dan roll di realisasikan dengan pembuatan *support point* yang terbuat dari 2 buah plat besi dengan tebal 5 mm dengan ukuran 100 mm x 150 mm dan sebuah as besi dengan diameter 30 mm. *Support point* diletakkan pada tempat tumpuan dan diukur sejarak 1000 m antar *support point*. Balok yang telah ditempatkan pada *support point* kemudian akan diletakkan 2 buah *point load* yang terbuat dari bahan yang sama seperti *support point* yang dibaut pada *spreader beam* yang berfungsi untuk mengubah 1 titik pembebanan menjadi 2 titik pembebanan. Tepat di atas *spreader beam* diletakkan *load cell* yang akan menerima gaya yang di hasilkan dari *hydraulic jack*.

### 3.4 Pengambilan Data menggunakan Kamera

Pengambilan data menggunakan kamera digunakan untuk metode analisa *Digital Image Correlation* (DIC). Kamera diletakkan tegak lurus dengan frame pembebanan. Selama proses pembebanan kamera akan mengambil gambar pada spesimen setiap tiga detik sekali. Gambar-gambar yang telah diambil oleh kamera, kemudian akan diproses di dalam *open source 2D DIC package Ncorr* versi 1.2.1. Software ini berupa program yang akan dijalankan melalui matlab dengan *user interface* yang mudah dimengerti. Gambar-gambar tersebut akan dianalisis dan menghasilkan analisis penelitian terhadap defleksi, *crack pattern*, dan regangan pada spesimen balok beton bertulang.

## 4. HASIL DAN ANALISIS

### 4.1 Mutu Beton

Mutu beton yang direncanakan pada penelitian ini adalah 20 MPa. Mutu beton dari setiap spesimen dapat dilihat pada **Tabel 1** yang didapat dari hasil tekan beton kubus yang dibuat bersamaan dengan

pegecoran spesimen. Kode balok BN merupakan balok beton bertulang yang tidak diberi perkuatan dan kode balok BF merupakan balok beton bertulang yang diberi perkuatan FRP. Hasil  $f_c'$  rata-rata yang diperoleh melebihi  $f_c'$  target. **Tabel 1** menunjukkan hasil pengujian tes tekan beton kubus.

**Tabel 1. Hasil Pengujian Tes Tekan Beton Kubus**

Group	BN15			BF15			BN20			BF20			BN30			BF30		
Beam	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$f_c'$ (Mpa)	25,08	23,98	25,82	18,70	31,25	20,90	24,44	18,81	22,87	20,47	21,03	18,44	22,87	41,78	20,29	24,35	21,76	26,19

## 4.2 Analisa Perbandingan Spesimen Tanpa Perkuatan FRP dan dengan Perkuatan FRP

### 4.2.1 Analisa Balok Tipe 15 (h=150 mm)

Beban maksimum yang terjadi pada masing-masing spesimen adalah 40,67 kN untuk spesimen tanpa perkuatan dan 53,33 kN pada spesimen dengan perkuatan, sedangkan untuk defleksi maksimum yang terjadi pada spesimen tanpa perkuatan adalah 562,71 mm dan 237,15 mm untuk spesimen dengan perkuatan. Terjadi kenaikan sebesar 31,15% pada kekuatan spesimen yang diperkuat FRP, tetapi pada defleksi terjadi penurunan sebesar 57,86%. Pada spesimen tipe 15 terjadi pengurangan daktilitas setelah diberikan perkuatan FRP. Kenaikan kapasitas lentur pada percobaan ini lebih kecil dari pada penambahan pada umumnya disebabkan oleh adanya *concrete cover delamination* antara spesimen dan perkuatan FRP.

### 4.2.2 Analisa Balok Tipe 20 (h=200 mm)

Beban maksimum yang terjadi pada masing-masing spesimen adalah 50 kN untuk spesimen tanpa perkuatan dan 68,67 kN pada spesimen dengan perkuatan, sedangkan untuk defleksi maksimum yang terjadi pada spesimen tanpa perkuatan adalah 63.145 mm dan 44.189 mm untuk spesimen dengan perkuatan. Terjadi kenaikan sebesar 37,33% pada kekuatan spesimen yang diperkuat FRP, tetapi pada defleksi terjadi penurunan sebesar 30,01%. **Tabel 2** menunjukkan pada spesimen tipe 20 terjadi pengurangan daktilitas setelah diberikan perkuatan FRP.

### 4.2.3 Analisa Balok Tipe 30 (h=300 mm)

Pada **Gambar 2** dapat dilihat perbandingan grafik hubungan beban dan defleksi antara dua spesimen dengan mutu serupa. Grafik perbandingan tersebut menunjukkan hasil yang sangat berbeda dengan spesimen tipe 15 dan 20. Spesimen tipe 30 yang diperkuat FRP sama sekali tidak memberi tambahan pada beban maksimum apabila dibandingkan dengan spesimen tipe 30 tanpa perkuatan FRP. Defleksi yang terjadi juga tidak mengalami kenaikan apabila dibandingkan dengan spesimen tanpa perkuatan FRP grafik dari spesimen BF30-1 mengalami penurunan *load* yang sangat drastis setelah *ultimate load*. Penurunan setelah *ultimate load* sudah melebihi 30%. Penurunan *load* yang cukup drastis disebabkan karena adanya kegagalan prematur pada perkuatan FRP.

## 4.3 Analisa Spesimen Diperkuat FRP dengan Perbedaan Ukuran Tinggi

Pada pengujian balok beton bertulang pada semua spesimen, hasil kapasitas lentur maksimum yang didapatkan dibandingkan antara spesimen BN dan BF. Dapat dilihat dari **Tabel 2**, setiap tipe spesimen (tipe 15, tipe 20, dan tipe 30) dibandingkan kepada satu spesimen kontrol yaitu spesimen tanpa perkuatan FRP dan juga tipe kegagalan yang terjadi. Berdasarkan hasil eksperimen, dapat dilihat bahwa spesimen tipe 15 dan 20 mengalami penambahan kapasitas lentur sedangkan tipe 30 mengalami pengurangan kapasitas lentur. Untuk tipe kegagalan yang terjadi adalah *concrete cover delamination* (mode 2) pada semua spesimen BF. Pada spesimen BN terjadi *flexural failure*.

**Tabel 2. Hasil Analisa Perbandingan Beban Maksimum**

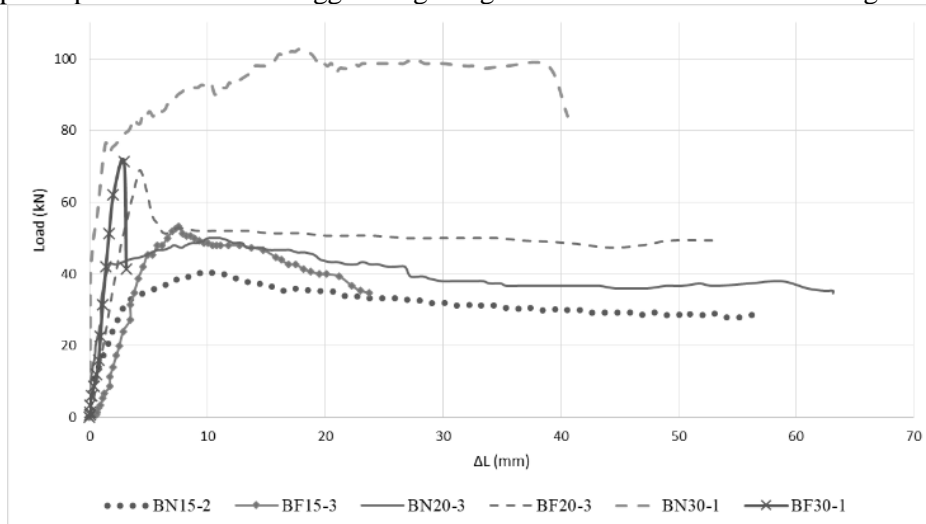
Group	Beam	fc' (Mpa)	As	Pe (kN)	Rasio Beda	Failure mode
BN15	2	23,98	157	40,67		1
BF15	3	20,90	157	53,33	1,31	2
BN20	3	22,87	157	50,00		1
BF20	3	18,44	157	68,67	1,37	2
BN30	1	22,87	157	102,67		1
BF30	1	24,35	157	71,33	0,69	2

Spesimen tipe 30 memunculkan efek yang lebih merugikan setelah diberi perkuatan FRP, sedangkan tipe 15 dan 20 masih menguntungkan karena mengalami penambahan kapasitas lentur. Spesimen tipe 30 mengalami perubahan perilaku yang cukup besar setelah adanya perkuatan FRP. Pengaplikasian FRP tanpa adanya *anchorage* memberikan efek yang lebih fatal dari pada tanpa perkuatan FRP. **Tabel 3** menunjukkan angka angka daktilitas yang diperoleh masing-masing spesimen.

**Tabel 3. Angka Daktilitas dan Perbandingan Defleksi**

Kode Balok	fc' (Mpa)	Defleksi saat First Yield (mm)	Defleksi saat Ultimate Load (mm)	Defleksi saat Failure (mm)	Angka Daktilitas	Perbandingan Daktilitas	Perbandingan Defleksi saat Ultimate Load
BN15-2	23,98	3,77	9,56	56,27	14,93	0,30	0,79
BF15-3	20,90	5,36	7,53	23,71	4,43		
BN20-3	22,87	2,30	10,05	63,14	27,42	0,60	0,43
BF20-3	18,44	2,69	4,35	44,19	16,41		
BN30-1	22,87	1,68	17,80	40,61	24,23	0,06	0,16
BF30-1	24,35	2,01	2,91	3,11	1,55		

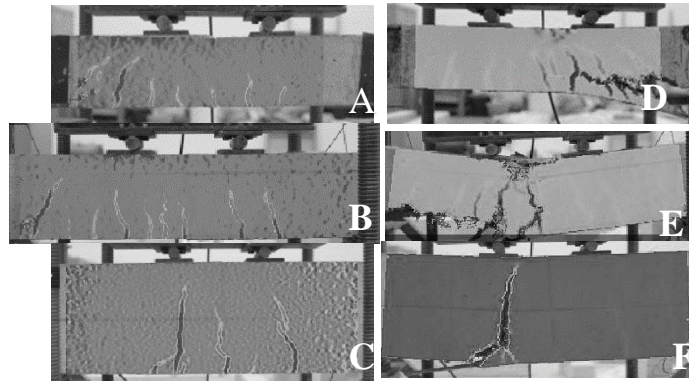
Pada **Tabel 3** dapat dilihat bahwa angka daktilitas yang didapat dari perbandingan defleksi yang terjadi saat balok runtuh dengan defleksi yang terjadi saat leleh pertama, pada balok yang diperkuat dengan FRP menunjukkan daktilitas yang lebih rendah dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan. Lendutan *ultimate load* yang terjadi pada semua spesimen dengan perkuatan rata-rata berkurang dari lendutan *ultimate load* spesimen tanpa perkuatan. Hal ini menunjukkan perkuatan FRP memberikan kekakuan yang lebih pada spesimen balok sehingga mengurangi sifat daktil dari balok bertulang itu sendiri.



**Gambar 2. Grafik Hubungan Load Deflection pada Semua Spesimen**

Semua spesimen yang diperkuat lapisan FRP mengalami kegagalan *concrete cover delamination*. Dapat disimpulkan bahwa kegagalan ini disebabkan oleh beban berlebihan yang tidak beraturan pada ujung lapisan FRP (Radfar et al, 2012). Pada spesimen tipe 30, FRP tidak memberikan perkuatan yang berarti bahkan merugikan, sedangkan pada tipe 15 dan 20 memberikan peningkatan kapasitas beban pada

spesimen balok beton bertulang. Spesimen tipe 30 mengalami kegagalan prematur lebih awal dibanding dengan spesimen tipe 15 dan 20 sehingga beban maksimum yang terjadi lebih rendah. Kegagalan prematur pada spesimen tipe 30 menyebabkan adanya penurunan *load* yang sangat signifikan. *Crack pattern* yang terjadi juga sangat berbeda, hanya terjadi satu retakan yang sangat lebar pada spesimen tipe 30 pada keadaan *failure*, sedangkan pada spesimen tipe 15 dan 20 mengalami *crack pattern* yang lebih tersebar meskipun selimut beton yang terlepas di ujung spesimen terlepas cukup banyak. **Gambar 3** menunjukkan *crack pattern* pada spesimen BF.



**Gambar 3.** *Crack Pattern* saat *Ultimate Load* (a) BF15 (b) BF20 (c) BF30 dan *Crack Pattern* saat *Failure* (d) BF15 (e) BF20 (f) BF30

## 5 KESIMPULAN

1. Terjadi pengurangan daktilitas pada semua spesimen dengan perkuatan FRP ketika dibandingkan dengan spesimen tanpa perkuatan FRP. Hal ini disebabkan karena sifat FRP yang tidak elastis. Angka daktilitas pada balok bertulang biasa dengan tinggi 150 mm, 200 mm, dan 300 mm sebesar 14,93, 27,42, dan 24,23. Balok yang diperkuat FRP memiliki angka daktilitas sebesar 4,43, 16,41, dan 1,55. Perilaku daktilitas pada spesimen dengan tinggi 150 mm dan 200 mm mengalami penurunan 70% dan 40%, sedangkan pada spesimen dengan tinggi 300 mm mengalami penurunan yang sangat signifikan hingga 94% dalam kondisi *premature failure*.
2. Pada spesimen dengan tinggi 150 mm dan 200 mm dengan perkuatan FRP, *crack pattern* yang muncul lebih terdistribusi sepanjang spesimen apabila dibandingkan dengan spesimen kontrol. Pada spesimen dengan tinggi 300 mm tidak terlihat adanya perbedaan yang signifikan pada *crack pattern* yang terjadi apabila dibandingkan dengan spesimen kontrol tinggi 300 mm. Lebar *crack* pada spesimen dengan perkuatan FRP tinggi 300 mm lebih besar dibanding spesimen dengan tinggi 150 mm dan 200 mm.
3. Beban eksperimental maksimal spesimen perkuatan FRP dengan ukuran tinggi 150 mm dan 200 mm cenderung melebihi target beban maksimal analitis, sedangkan spesimen dengan ukuran tinggi 300 mm selalu di bawah target beban maksimal analitis. Spesimen ukuran tinggi 150 mm dan 200 mm mengalami peningkatan kekuatan lentur terhadap spesimen kontrol yang dapat dipikul sebesar 31% dan 37%. Spesimen ukuran tinggi 300 mm mengalami penurunan kekuatan lentur terhadap spesimen kontrol yang dapat dipikul sebesar 31%. Pada spesimen dengan ukuran tinggi 150 mm, 200 mm, dan 300 mm dengan perkuatan FRP berurutan terjadi penurunan beban setelah *ultimate load* sebesar 2 kN, 12,7 kN, dan 30 kN. Semakin besar ukuran tinggi spesimen maka semakin besar selisih beban setelah *ultimate*.
4. Pada spesimen tipe 30, pengaplikasian FRP memberi efek yang merugikan karena terjadi pengurangan pada daktilitas dan *ultimate load*. Dapat disimpulkan bahwa pengaplikasian FRP bisa memberi efek yang lebih merugikan dibanding spesimen tanpa perkuatan FRP pada spesimen dengan ukuran 300 mm, sedangkan pada spesimen dengan tinggi 150 mm dan 200 mm perkuatan FRP masih memberi keuntungan dengan kenaikan *load*.

## 6 UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih atas kontribusi PT. Sika Indonesia dalam penelitian ini berupa CFRP *laminat* dan *epoxy*. CFRP *laminat* yang digunakan adalah Sika® Carbodur® S1012 dan *epoxy* yang digunakan adalah Sikadur®-30.

## 7 DAFTAR REFERENSI

- Borosnyoi, A. and Balazs, G.L. (2005). "Models for Flexural Cracking in Concrete: The State of the Art." *Structural Concrete*, Vol. 6, No. 2, 53-62.
- Jumaat, M.Z., Rahman, M.A., Alam, M.A., and Rahman, M.M. (2011). "Premature Failures In Plate Bonded Strengthened RC Beams with An Emphasis On Premature Shear: A Review." *International Journal of Physical Science*, Vol. 6, No. 2, 156-68.
- Karolina, R. (2008). *Analisa dan Kajian Eksperimental Hubungan Momen – Kurvatur pada Balok Beton Bertulang*. Skripsi, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Radfar, S., Foret, G., Saeedi, N., and Sab, K. (2012). "Simulation of Concrete Cover Separation Failure in FRP Plated RC Beams." *Construction and Building Materials*, Vol. 37, 791-800.
- Ritchie, P.A. (1988). *External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastic*. Thesis, Lehigh University, Bethlehem.
- Shreshta, R., Smith, S.T., and Samali, B. (2011). "The Effectiveness of FRP Strips in Repairing Moderately and Severely Damaged RC Beam-Coloumn Connections." *Magazine of Concrete Research*. Vol. 63, No. 9, 629-644.
- Smith, S.T. and Teng, J.G. (2002). "FRP-Strengthened RC Beams. I: review of Debonding Strength Models." *Engineering Structures*. Vol. 24, No. 4, 385-395.
- Suryanto, B., Tambusay, A., and Suprobo, P. (2017). "Crack Mapping on Shear-Critical Reinforced Concrete Beams Using an Open Source Digital Image Correlation Software." *Civil Engineering Dimension*. Vol. 19, No. 2, 93-98.
- Walraven, J.C. (2007). "Fracture Mechanics of Concrete and Its Role in Explaining Structural Behaviour." Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Delft, Netherlands, June 17 – June 22, 1265-1275