

PENGARUH LUAS BAJA TULANGAN TERHADAP PERILAKU BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT *FIBER REINFORCED POLYMER* (FRP)

William Putera Suryanto¹, Ricky Ivan Wiyanto², Daniel Tjandra³ and Gunawan Budi Wijaya⁴

ABSTRAK :. Beton memiliki kekurangan seperti kuat tarik yang lebih kecil dibandingkan struktur baja, daktilitas rendah, dan rentan terhadap retak. Salah satu solusi untuk masalah tersebut adalah menambahkan perkuatan FRP pada struktur karena FRP tidak dapat korosi, berat per volumenya lebih rendah dari baja, dan mudah pengaplikasiannya. Spesimen beton bertulang dibuat dengan mutu rencana $f_c'20$ MPa berdimensi 150 mm x 150 mm x 1200 mm dengan variasi tulangan 10 mm, 12 mm, dan 16 mm. Setelah itu FRP ditempelkan pada spesimen beton bertulang menggunakan *epoxy*. Dalam pelaksanaan, pembebanan dilakukan dengan metode *two point load* dan analisa data menggunakan metode *Digital Image Correlation* dan program MATLAB 2016 dilengkapi dengan Ncorr Version 1.2.2. Variasi tulangan mempunyai pengaruh pada daktilitas dimana semakin besar dimensi tulangan baja pada spesimen yang diperkuat oleh FRP sifat daktilitasnya semakin menyerupai spesimen yang tidak diperkuat, pada pola retak dimana spesimen dengan luas baja tulangan lentur terkecil yang diperkuat oleh FRP menghasilkan pola retak awal yang lebih besar dan lebih sedikit daripada spesimen dengan luas baja tulangan lentur yang lebih besar, dan pada perilaku lentur dimana peningkatan kekuatan lentur signifikan terjadi pada balok yang memiliki diameter tulangan 10 mm sebanyak 31%.

KATA KUNCI: FRP, tulangan, *two point load*, *digital image correlation*, daktilitas, pola retak, perilaku lentur

1. PENDAHULUAN

Sebagian besar bangunan merupakan struktur beton bertulang sebagai komponen utamanya. Struktur beton bertulang memiliki kekuatan untuk menahan gaya tekan dan tarik dengan baik serta memiliki ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang cukup baik. Beton juga memiliki beberapa kekurangan seperti kuat tarik yang lebih kecil dibandingkan struktur baja, kecilnya rasio kekuatan terhadap beratnya, daktilitas rendah, dan rentan terhadap retak.

Jika struktur beton bertulang memikul beban melebihi kapasitasnya, maka akan terjadi kegagalan struktur dan akan runtuh. Salah satu solusi adalah menambahkan perkuatan FRP pada struktur sehingga dapat mencegah kegagalan dengan meningkatkan kapasitas beban rencana. *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.

Selain itu, terdapat ancaman luar yang saat ini rawan terjadi yaitu gempa bumi. Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur gedung untuk mengalami simpangan pasca-elastik yang besar secara berulang kali. Jika sebuah bangunan memiliki struktur yang daktil, ketika gempa bumi terjadi dapat

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416045@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416120@john.petra.ac.id

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

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

mengurangi resiko kematian pada penghuni didalamnya karena dapat memberikan waktu lebih untuk evakuasi. Namun, masih banyak bangunan yang mengalami retak baik sesudah maupun sebelum gempa itu terjadi. Pola retak pada beton dapat memberikan banyak informasi mengenai kegagalan pada struktur beton. Namun perilaku beton yang telah diperkuat oleh FRP masih belum diketahui secara pasti. Hingga saat ini, FRP sebagai kekuatan struktur sudah dibuktikan dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan tekan dari struktur oleh berbagai penelitian (Shrestha & Smith, 2011). Oleh karena itu, peneliti ini mencari perilaku struktur balok yang telah diperkuat FRP baik dalam hal kapasitas lentur, daktilitas, maupun pola retak yang terjadi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Fiber Reinforced Polymer (FRP)

Carbon Fiber Reinforced Polymer merupakan salah satu jenis FRP. *Carbon FRP* didefinisikan sebagai serat yang mengandung setidaknya 90% berat karbon. Sistem perkuatan dilekatkan pada bagian luar permukaan struktur dengan perekat epoksi. Material CFRP banyak digunakan untuk sistem perkuatan karena memiliki kuat tarik yang sangat tinggi mencapai 4900 MPa, ringan, tidak mudah korosi, durabilitas (keawetan) yang tinggi, mudah dalam pemasangan sehingga dapat menghemat waktu, serta bahannya yang mudah dibentuk (fleksibel). Sebenarnya perkuatan struktur juga dapat dilakukan dengan menggunakan pelat baja yang dilekatkan pada bagian permukaan struktur yang hendak diperkuat misalnya pada bagian tengah bentang maupun tumpuan. Namun, penggunaan pelat baja memiliki kelemahan karena baja memiliki massa yang relatif berat dan sulit diaplikasikan karena sifatnya yang tidak fleksibel. Karena kelemahan ini, banyak penelitian dilakukan terhadap penggunaan FRP dimana FRP diharapkan dapat menggantikan perkuatan dengan pelat baja.

2.2. Daktilitas

Daktilitas merupakan salah satu aspek penting dalam perencanaan suatu elemen struktur selain dari aspek kekuatan dan kekakuan. Daktilitas dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk mengembangkan regangannya dari pertama kali leleh hingga akhirnya putus. Daktilitas juga merupakan kemampuan elemen untuk berdeformasi tanpa mengalami reduksi kapasitas lentur yang berarti (Park & Ruitong, 2018). Pada struktur balok beton bertulang, daktilitas didefinisikan sebagai perbandingan antara defleksi balok saat runtuh dengan defleksi saat tulangan tarik mengalami leleh.

2.3. Digital Image Correlation

Metode *Digital Image Correlation* (DIC) adalah sebuah metode non-kontak dan non-destruktif untuk mengukur deformasi permukaan dari sebuah obyek dengan mengambil gambar setiap beberapa waktu tertentu secara sekuensial dalam kondisi beban yang berbeda. Gambar dari area yang ditargetkan dibagi menjadi beberapa area-area kecil. Dari gambar-gambar tersebut dilakukan dianalisis perubahan yang terjadi pada spesimen di setiap gambar yang ada. Dari analisis tersebut kemudian muncul hasil dari deformasi yang terjadi pada spesimen secara keseluruhan. Keuntungan yang didapat dari metode ini untuk analisis proses retak adalah mendapatkan rekonstruksi lengkap dari geometri retak tanpa pengukuran yang rumit (Fayyad & Lees, 2014).

2.4. Kuat Lentur Struktur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan FRP

Untuk mendapatkan kuat lentur pada struktur balok, pada penelitian diatur sedemikian sehingga terjadi lenturan murni. 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. Penambahan FRP pada daerah tarik dari struktur balok beton bertulang dapat meningkatkan kuat lentur dari struktur karena adanya penambahan dari kekuatan tarik material FRP. Penambahan kekuatan tarik ini dapat dianalisis dengan mengembangkan metode analisis kuat lentur balok beton bertulang tanpa perkuatan, yaitu dengan penambahan FRP pada daerah tarik dari balok, didapat penambahan gaya tarik T_f yaitu gaya tarik FRP.

Berdasarkan penjelasan yang telah dikemukakan di atas maka dapat dilakukan perhitungan 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 *ultimate* 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:

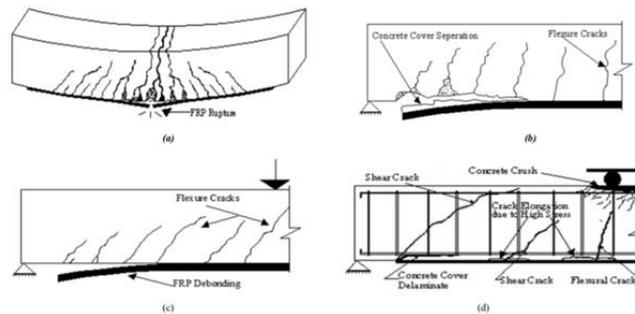
$$M_n = T_s \left(d - \frac{\alpha}{2} \right) + \psi_f \cdot T_f \left(h - \frac{\alpha}{2} \right) - C_s \left(d' - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (2.1)$$

dimana,

- Cs = gaya tekan pada tulangan tekan (N)
- Ts = gaya tarik pada tulangan tarik (N)
- Mn = kuat lentur nominal (N)
- α = tinggi blok tegangan (mm)
- d = jarak serat tekan terluar ke titik berat tulangan tarik (mm)
- d' = jarak serat tekan terluar ke titik berat tulangan tekan (mm)
- h = jarak bagian atas balok dengan material FRP (tinggi balok)
- ψ_f = 0,85 = faktor reduksi untuk kontribusi FRP (ACI Committee 440)

2.5. Pola Keretakan

Keretakan yang terjadi pada beton dapat disebabkan oleh berbagai hal seperti korosi, susut, pengerjaan yang kurang baik, komposisi material yang kurang baik, dan tegangan yang terjadi karena beban luar. 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 putusannya 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** (Gao, 2005 dan 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) putusannya 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.

Kegagalan yang terjadi pada balok beton bertulang yang diperkuat oleh FRP dapat terjadi karena hancurnya beton, putusannya FRP, pengelupasan, atau *concrete cover delamination*. Dalam kegagalan pada tipe hancurnya beton atau putusannya laminasi FRP, kekuatan *ultimate* dari struktur beton dapat diprediksi dengan menggunakan teori lentur konvensional. Namun, saat tipe kegagalan balok terjadi karena *peeling-off* atau *concrete cover delamination*, maka balok yang diperkuat tersebut tidak dapat mencapai kapasitas kekuatan maksimumnya (Tumialan et al., 1999). Kegagalan ini disebabkan karena adanya gaya geser dan *local failure* pada bagian beton yang mengalami gaya tarik.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Pembuatan Spesimen Beton Bertulang

Pada penelitian ini spesimen terbagi menjadi 3 jenis variabel dimana setiap spesimen beton balok memiliki dimensi 150 mm × 150 mm × 1200 mm dan panjang efektif 1000 mm dicor dan menggunakan baja tulangan longitudinal atas bawah yang bervariasi dari diameter 10 mm, 12 mm, 16 mm, dan tulangan geser dengan diameter tetap 8 mm. Selimut beton pada sisi samping tulangan sengkang dijaga pada jarak 20 mm. Spesimen beton yang digunakan direncanakan memiliki mutu f_c' 20 MPa. Baja tulangan yang digunakan adalah baja tulangan dengan kapasitas leleh 240 MPa. Jarak antar tulangan geser dijaga pada jarak minimum sebesar $d/2$, yaitu sebesar 50 mm. Setiap variabel disediakan 2 spesimen dimana 1 spesimen tidak terpasang perkuatan FRP dan 1 spesimen terpasang perkuatan FRP, sehingga total spesimen dalam penelitian ini berjumlah 6 buah balok.

3.2. Pemasangan FRP *Laminate* pada Spesimen Beton Bertulang

Setelah dilakukan curing selama 14 hari, pada spesimen yang akan diuji, akan dipasang FRP *Laminate* Sika® CarboDur® S tipe 512 menggunakan perekat *epoxy* Sikadur® - 30. Panjang FRP *Laminate* yang digunakan adalah sepanjang 800 mm. Pemasangan FRP pada struktur beton bertulang memiliki tahap sebagai berikut. Pertama-tama peneliti melakukan *chipping* pada permukaan beton yang akan diberi perkuatan dengan tujuan agar permukaan beton yang terkikis memiliki permukaan yang kasar sehingga dapat membantu *epoxy* untuk lebih melekatkan FRP pada permukaan beton. Kemudian pada tahap berikutnya, setelah memastikan bahwa permukaan beton telah memiliki permukaan yang cukup kasar sesuai yang diinginkan, permukaan beton dibersihkan dengan *vaccum cleaner* atau kuas agar tidak ada debu halus yang menempel. Setelah itu menyiapkan *epoxy* dan mengaplikasikan *epoxy* dipermukaan beton dan dipermukaan FRP yang akan ditempel, kemudian di tahap akhir menempelkan kedua elemen tersebut.

3.3. Pemasangan Kamera dan Pengaplikasian *Digital Image Correlation*

Sebelum pembebanan diberikan, pada laboratorium akan dipasang kamera tegak lurus dengan *frame* pembebanan, dan pada balok beton yang akan diuji akan ditambahkan titik-titik pengujian yang nantinya akan dianalisis melalui program Ncorr. Lalu selama pembebanan berlangsung akan dilakukan pemotretan setiap penambahan beban, melalui program standar *Canon EOS Utility* untuk mendapatkan potongan – potongan gambar yang kemudian akan dianalisa menggunakan program Ncorr. Jarak antara *frame* pembebanan dengan kamera adalah sepanjang 1 meter. *Tripod* kamera juga digunakan untuk menyamakan ketinggian antara spesimen dengan kamera sehingga tidak terjadi distorsi lensa secara vertikal, serta meningkatkan stabilitas gambar yang diambil. Pada bagian bawah *tripod* akan ditandai agar perletakan *tripod* kamera tidak berubah ubah. *Output* dari DIC ini sendiri berupa hasil plot defleksi dan pola keretakan Beberapa parameter yang harus diinput dalam program DIC adalah *Subset Radius* yaitu 20, *Subset Spacing* 10, dan *Strain Radius* 2.

3.4. Pemberian Pembebanan dengan *Two Point Load*

Spesimen yang sudah dipasang FRP, kemudian akan diberikan pembebanan dengan metode *two point load*, agar pada balok beton bertulang terjadi lentur murni. Spesimen beton bertulang diletakkan tepat dibawah mesin pengetesan pada perletakkan berjarak 1 meter, yang telah dipasang *hydraulic jack* dengan kapasitas sebesar 30 ton. *Hydraulic jack* tersebut terpasang pada sebuah *bracket* bertujuan agar dapat menahan gaya terpusat yang terjadi. *Bracket* ini terangkat pada ketinggian tertentu dan dikunci pada keempat *post-tensioning bar* (PT bar) agar pergerakan vertikal *bracket* terkunci. Setelah berada di atas perletakkan dilakukan pengukuran rata permukaan menggunakan *water pass*. Lalu, permukaan depan spesimen beton bertulang diberi titik-titik hitam menggunakan pilok untuk keperluan penggunaan *Digital Image Correlation*. Kemudian *jack* akan dipompa secara manual. Di bawah *hydraulic jack* diletakkan *load cell* yang dihubungkan ke *data logger* untuk membaca hasil tekanan dalam satuan kN. *Spreader beam* berada di bawah *load cell* untuk menyalurkan beban terpusat dari *hydraulic jack* menjadi *two-point load* yang kemudian akan disalurkan ke spesimen beton. Pembebanan dilakukan hingga spesimen mengalami kegagalan dan mendapatkan data yang

diinginkan. Sebelum dan sesudah dilakukan pembebanan, dilakukan pengukuran tinggi elevasi balok spesimen menggunakan *laser pointer* yang ditembakkan dari tanah ke tengah bentang balok yang akan dibebani. Hal ini dilakukan untuk mengkonfirmasi hasil defleksi yang terbaca oleh program DIC.

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 pengecoran spesimen. Kode balok BK merupakan balok beton bertulang yang tidak diberi perkuatan dan kode balok BC merupakan balok beton bertulang yang diberi perkuatan FRP. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton yang dilakukan di Laboratorium Beton Prodi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra maka diperoleh f_c' rata-rata 23,0035 MPa.

Tabel 1. Hasil Pengujian Tes Tekan Beton Kubus

| | Kode Balok | f_c' (MPa) | As (mm ²) |
|-----|------------|--------------|-----------------------|
| ø10 | BK10 | 23.98 | 157 |
| | BC10 | 20.90 | 157 |
| ø12 | BK12 | 23.06 | 226 |
| | BC12 | 23.24 | 226 |
| ø16 | BK16 | 21.39 | 402 |
| | BC16 | 25.45 | 402 |

4.2. Analisa Kapasitas Beban

Pada pengujian balok beton bertulang pada semua spesimen, hasil kuat tekan maksimum yang didapatkan cukup variatif dari hasil teoritis yang seharusnya. Dapat dilihat dari **Tabel 2**, kuat tekan maksimum teoritis balok beton normal dan yang diperkuat dibandingkan dengan kuat tekan maksimum sesungguhnya hasil pengujian di lapangan.

Tabel 2. Hasil Analisa Perbandingan Beban Maksimum

| Kode Balok | f_c' (MPa) | As (mm ²) | $PU_{analytic}$ | $PU_{eksperimen}$ | $\frac{PU_{eksperimen}}{PU_{analytic}}$ | Kapasitas BC dibanding BK | Peningkatan Kapasitas |
|------------|--------------|-----------------------|-----------------|-------------------|---|---------------------------|-----------------------|
| BK10 | 23.98 | 157 | 23.60 | 40.67 | 1.59 | - | - |
| BC10 | 20.90 | 157 | 40.59 | 53.33 | 1.10 | 1.31 | 31% |
| BK12 | 23.06 | 226 | 30.29 | 44.67 | 1.34 | - | - |
| BC12 | 23.24 | 226 | 48.86 | 51.33 | 0.89 | 1.15 | 15% |
| BK16 | 21.39 | 402 | 46.23 | 74.00 | 1.41 | - | - |
| BC16 | 25.45 | 402 | 65.63 | 78.00 | 0.97 | 1.05 | 5% |

Berdasarkan hasil eksperimen, seiring dengan bertambahnya luas baja tulangan, persentase peningkatan kapasitas balok BC dibandingkan dengan balok BK mengalami penurunan, dimana dapat diketahui bahwa pada balok BC dengan diameter baja tulangan paling kecil yaitu 10 mm, mengalami peningkatan kapasitas sebesar 31%, balok BC dengan diameter baja tulangan 12 mm sebesar 15%, dan balok BC dengan diameter baja tulangan paling besar 16 mm yaitu sebesar 5%. Dimana dengan hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas balok yang diperkuat semakin signifikan pada balok dengan kapasitas maksimum yang paling lemah.

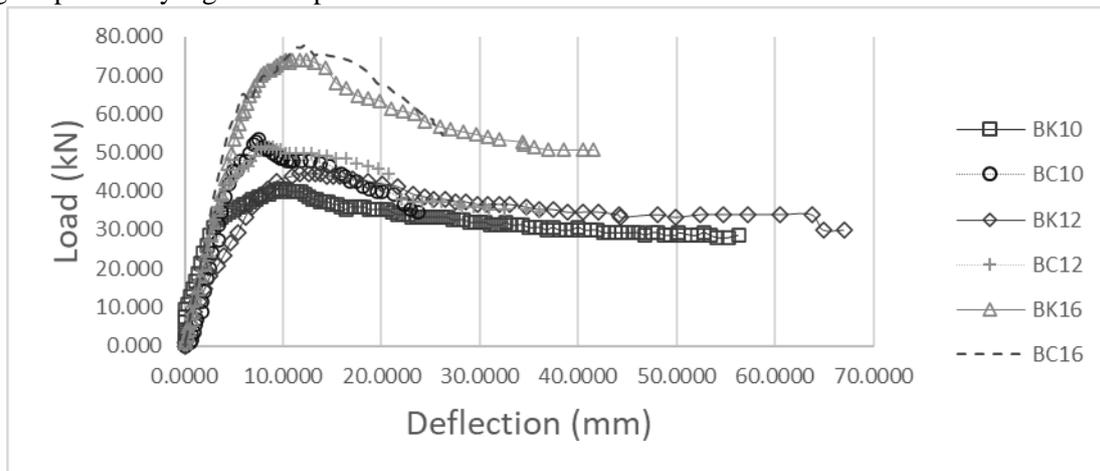
4.3. Analisa Daktilitas

Pada penelitian ini, pengukuran defleksi dilakukan menggunakan program Ncorr MATLAB sebagaimana telah disebutkan pada bab sebelumnya. Defleksi dicatat pada beberapa tahap pembebanan, agar dapat membandingkan antara balok kontrol dengan balok yang diperkuat pada kondisi beban yang sama, dan juga pada kondisi beban *ultimate*.

Tabel 3. Angka Daktilitas

| Kode Balok | fc' (MPa) | Defleksi saat titik leleh pertama (mm) | Defleksi saat runtuh (mm) | Angka Daktilitas ($\Delta_{\text{runtuh}}/\Delta_{\text{leleh}}$) | Penurunan Daktilitas |
|------------|-----------|--|---------------------------|---|----------------------|
| BK10 | 23.98 | 3.7686 | 56.2710 | 14.932 | |
| BC10 | 20.90 | 5.3590 | 23.7149 | 4.425 | 70.36% |
| BK12 | 23.06 | 8.4721 | 67.0281 | 7.912 | |
| BC12 | 23.24 | 6.7933 | 36.0459 | 5.306 | 32.93% |
| BK16 | 21.39 | 8.0865 | 41.5410 | 5.137 | |
| BC16 | 25.45 | 5.8421 | 26.1952 | 4.484 | 12.72% |

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 angka daktilitas yang lebih rendah dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan. defleksi saat runtuh yang terjadi pada semua spesimen dengan perkuatan rata-rata berkurang 50% dari defleksi saat runtuh spesimen tanpa perkuatan. Hal ini menunjukkan perkuatan FRP memberikan kekakuan yang lebih pada spesimen balok sehingga mengurangi sifat daktil dari balok bertulang itu sendiri. Dapat dilihat pada **Gambar 2**, ketika balok pada tahap fase awal (sebelum mengalami retak lentur), hubungan *load-deflection* pada tengah bentang antara balok BK dengan balok BC saling berdekatan satu sama lain. Seiring dengan bertambahnya beban, spesimen yang diperkuat menunjukkan perilaku yang lebih kaku daripada spesimen yang tidak diperkuat. Namun dapat dilihat pada fase setelah spesimen mencapai titik maksimum (mengalami kegagalan FRP), tren spesimen yang diperkuat perlahan mendekati tren spesimen yang diperkuat, bahkan pada beberapa spesimen ada yang bersinggungan. Hal ini menunjukkan bahwa ketika spesimen yang diperkuat mengalami kegagalan *concrete cover delamination*, perilaku spesimen yang diperkuat menjadi serupa dengan spesimen yang tidak diperkuat.



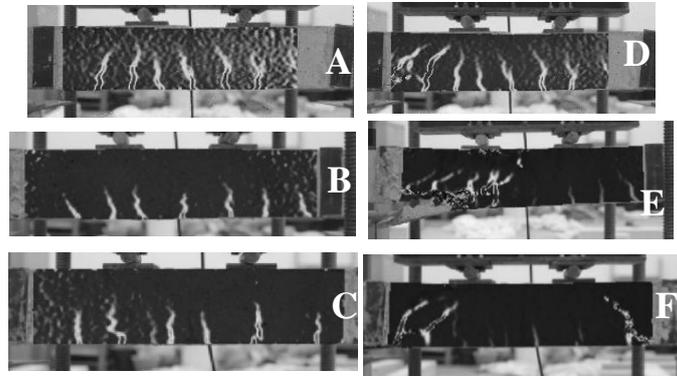
Gambar 2. Grafik Hubungan *Load- Deflection* pada Tengah Bentang Semua Spesimen

Hasil penelitian menunjukkan spesimen yang diperkuat oleh FRP mempunyai perilaku lebih tidak daktil dibandingkan dengan spesimen yang tidak diperkuat terlihat dari **Gambar 2**. Namun karena *premature failure*, spesimen tidak lagi mampu menahan beban yang terjadi sehingga menimbulkan *peak* pada grafik dan semakin menurun hingga tidak dapat bertahan akibat kerusakan hebat yang terjadi akibat *premature failure concrete cover delamination*. Variasi luas baja tulangan terlihat mempunyai pengaruh dimana semakin besar luas baja tulangan pada spesimen balok beton bertulang yang diperkuat oleh FRP perilaku daktilitas spesimen menyerupai spesimen balok beton bertulang yang tidak diperkuat oleh FRP.

4.4. Analisa Pola Keretakan

Secara umum, retak yang terjadi pada spesimen yang tidak diperkuat adalah retak lentur dan retak didaerah sekitar tengah bentang semakin membesar seiring dengan bertambahnya beban luar. Namun

pada spesimen yang diperkuat FRP, pada tahap awal pembebanan menunjukkan retak lentur halus secara menyeluruh di keseluruhan bentang, namun ketika mencapai beberapa level pembebanan tertentu, timbul retak geser halus di bagian dekat tumpuan balok, yang perlahan-lahan menjalar secara horisontal lalu menimbulkan *premature failure (concrete cover delamination)*.



Gambar 3. Pola Keretakan saat Retak Lentur Pertama (a) BC10 (b) BC12 (c) BC16 dan Pola Keretakan saat Kondisi *Ultimate* (d) BC10 (e) BC12 (f) BC16

Dari berbagai variasi luas baja tulangan, dapat dilihat bahwa pada spesimen dengan diameter tulangan lentur paling kecil yang diperkuat menghasilkan pola keretakan awal yang lebih besar dan lebih sedikit daripada spesimen dengan luas baja tulangan lentur yang lebih besar. Sedangkan pola keretakan pada saat kondisi *ultimate* baik pada spesimen dengan diameter tulangan lentur 10 mm, 12 mm, maupun 16 mm kurang lebih hampir sama dimana di bagian antara *point load* berupa retak lentur yang merata dan di bagian dekat tumpuan terdapat retak geser. Retak geser yang timbul di bagian kiri juga dapat disebabkan karena kurangnya kekakuan alat pembebanan yang digunakan sehingga *spreader beam* lebih condong ke kiri pada saat proses pembebanan.

5. KESIMPULAN

1. Pengaruh variasi luas baja tulangan terhadap daktilitas balok beton bertulang dengan perkuatan FRP :
 - a. Pada diameter tulangan 10 mm, terjadi penurunan angka daktilitas sebesar 70,36%; pada diameter tulangan 12 mm, terjadi penurunan angka daktilitas sebesar 32,93%; pada diameter tulangan 16 mm, terjadi penurunan angka daktilitas sebesar 12,72% antara balok yang diperkuat dengan FRP dan balok tanpa perkuatan
 - b. Secara umum, pada semua spesimen balok beton bertulang yang diperkuat FRP memiliki daktilitas yang lebih rendah daripada spesimen balok tanpa perkautan.
 - c. Variasi luas baja tulangan terlihat mempunyai pengaruh dimana semakin besar luas baja tulangan pada spesimen balok beton bertulang yang diperkuat oleh FRP sifat daktilitasnya semakin menyerupai balok beton bertulang yang tidak diperkuat.
2. Pengaruh variasi luas baja tulangan terhadap pola retak balok beton bertulang dengan perkuatan FRP :
 - a. Pola retak yang terjadi pada spesimen balok beton bertulang tanpa perkuatan adalah setelah mengalami retak pertama yang merupakan retak lentur, selanjutnya terjadi retak yang lebih besar ditengah balok dibandingkan yang terjadi di posisi kanan dan kiri balok akibat perbedaan momen yang terjadi, dan pada bagian akhir mengalami *concrete crushing* di bagian atas balok.
 - b. Pola retak yang terjadi pada spesimen balok beton bertulang dengan perkuatan FRP adalah pada bagian awal mengalami retak pertama berupa retak lentur namun berbeda dari balok tanpa perkuatan karena memiliki retak yang lebih kecil dan dengan jarak yang berdekatan, lalu terjadi retak geser pada salah satu sisi balok, kemudian pada bagian akhir akibat adanya retak geser dan tegangan lentur yang besar di sepanjang balok, maka terjadi kegagalan selimut beton yang arah retaknya horisontal.

- c. Variasi luas baja tulangan terlihat mempunyai pengaruh dimana spesimen dengan luas baja tulangan lentur paling kecil yang diperkuat oleh FRP menghasilkan pola retak awal yang lebih besar dan lebih sedikit daripada spesimen dengan luas baja tulangan lentur yang lebih besar.
3. Pengaruh variasi luas baja tulangan terhadap perilaku lentur balok beton bertulang dengan perkuatan FRP:
 - a. Pada diameter tulangan 10 mm, terjadi peningkatan kekuatan lentur sebesar 31%; pada diameter 12 mm, terjadi peningkatan kekuatan lentur sebesar 15%; pada diameter 16 mm, terjadi peningkatan kekuatan lentur sebesar 5% antara balok yang diberi perkuatan FRP dan balok tanpa perkuatan.
 - b. Secara umum, pada semua spesimen balok beton bertulang yang diperkuat FRP mengalami peningkatan kekuatan lentur.
 - c. Variasi luas baja tulangan terlihat mempunyai pengaruh dimana semakin besar luas baja tulangan pada spesimen balok beton bertulang maka semakin berkurangnya persentase peningkatan kapasitas lentur balok yang berarti semakin bertambahnya dimensi tulangan maka efektifitas perkuatan FRP semakin berkurang.
 - d. Diketahui terjadi penurunan defleksi yang terjadi antara balok beton bertulang yang diberi perkuatan FRP dan tidak berkisar antara 40%-60% yang berarti kekakuan balok meningkat.

Berdasarkan kesimpulan diatas, pada balok beton bertulang yang memiliki diameter tulangan 10 mm ($A_s=157 \text{ mm}^2$), 12 mm (226 mm^2), dan 16 mm (402 mm^2), semakin besar luas baja tulangan maka semakin berkurangnya persentase peningkatan kapasitas lentur balok yang berarti semakin bertambahnya luas baja tulangan maka efektifitas perkuatan FRP semakin berkurang, penggunaan perkuatan FRP dapat mengurangi defleksi yang terjadi pada spesimen serta menambahkan kekakuan pada spesimen, dan semakin besar luas baja tulangan pada spesimen beton bertulang maka sifat daktilitas pada spesimen dengan perkuatan FRP semakin serupa dengan spesimen tanpa perkuatan.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih atas kontribusi PT. Sika Indonesia dalam penelitian ini berupa FRP *laminat* dan *epoxy*. FRP *laminat* yang digunakan adalah Sika® Carbodur® S512 dan *epoxy* yang digunakan adalah Sikadur®-30.

7. DAFTAR REFERENSI

- Fayyad, T. M., & Lees, J. M. (2014). Application of Digital Image Correlation to Reinforced Concrete Fracture. *Procedia Materials Science*, 3, 1585–1590. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.256>
- Gao, B., Leung, C. K. Y., & Kim, J. K. (2005). Prediction of Concrete Cover Separation Failure for RC Beams Strengthened with CFRP Strips. *Engineering Structures*, 27(2), 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.09.007>
- Jumaat, M. Z., Rahman, M. A., Alam, M. A., & Rahman, M. M. (2011). Premature Failures in Plate Bonded Strengthened RC Beams with An Emphasis On Premature Shear: A Review. *International Journal of Physical Sciences*, 6(2), 156–168. <https://doi.org/10.5897/IJPS10.369>
- Park, R., & Ruitong, D. (1988). Ductility of Doubly Reinforced Concrete Beam Sections. *Structural Journal*, 85(2), 217–225.
- Shrestha, R., & Smith, S. T. (2011). *The Effectiveness of FRP Strips in Repairing Moderately and Severely Damaged RC Beam – Column Connections*. 63(9). <https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.9.629>
- Smith, S. T., & Teng, J. G. (2002). FRP-Strengthened RC Beams. II: Assessment of Debonding Strength Models. *Engineering Structures*, 24(4), 397–417. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00106-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00106-7)
- Tumialan, G., Serra, P., Nanni, A., & Belarbi, A. (1999). Concrete Cover Delamination in Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets. *4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, (ACI SP-188)*, 188, 725–732