

# **DELAMINASI LAPIS MAJEMUK CFRP PADA BALOK BETON BERTULANG SKALA TERBATAS (DELAMINATION OF CFRP MULTILAYERS CFRP ON REINFORCED CONCRETE SUB-SCALE BEAM)**

**Mirza Ghulam R.<sup>1)</sup>, Ujang Ruslan<sup>2)</sup>**

<sup>1), 2)</sup> Politeknik Negeri Bandung

<sup>1), 2)</sup> Jalan Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Kotak Pos 1234, Bandung 40012

e-mail: <sup>1)</sup> mirzaghulamrifqi99@gmail.com, <sup>2)</sup> ruslanjts@gmail.com

Diterima: 27 Februari 2015; direvisi: 10 Maret 2015; disetujui: 6 April 2015

## **ABSTRAK**

*Seiring dengan tingkat kerusakan struktur yang membutuhkan perkuatan lebih untuk meningkatkan kapasitas, maka dibutuhkan perkuatan. Salah satu perkuatan adalah dengan menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). CFRP adalah jenis material perkuatan struktur yang tahan korosi, mempunyai kuat tarik yang tinggi, superior dalam daktilitas, bobotnya ringan sehingga tidak memerlukan peralatan yang berat untuk membawanya ke lokasi. alternatif jumlah lapisan CFRP yang efektif. Riset ini meneliti tentang kegagalan lekatan (delaminasi) antara CFRP dengan permukaan balok beton bertulang. Pengujian dilakukan terhadap perlakuan perkuatan lentur balok beton bertulang dengan mekanisme monotonik (static load). Benda uji merupakan skala terbatas balok beton bertulang berjumlah 18 buah dan dibagi dalam 6 (enam) kategori yaitu balok normal tanpa lapisan CFRP dan balok dengan 1, 2, 3, 4 dan 5 lapis CFRP diuji dengan mengikuti ACI 440.2R-02 (Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures). Untuk mencegah terjadinya delaminasi hubungan antara balok dan CFRP akibat beban lentur maka perlu ditambah U-Jacket. Hasil penelitian menunjukkan pada tengah balok terjadi pemisahan atau delaminasi sehingga balok beton dan CFRP tidak bekerja sebagai komposit. Dengan demikian kedua komponen tersebut bekerja terpisah dan keruntuhan didahului dengan beton tertarik dan retak. Jadi kesimpulannya bahwa proses delaminasi akan menghilangkan sifat komposit dari balok dan CFRP. Selanjutnya, pada kondisi ultimate dipastikan keruntuhan terjadi karena delaminasi. Keruntuhan tidak diawali dengan keruntuhan material beton atau CFRP karena kuat tarik CFRP yang lebih tinggi dari beton sehingga yang akan terjadi adalah terganggunya interface antara balok beton dan CFRP, kemudian terjadi slip atau delaminasi kenaikan kuat lentur balok beton maksimal terjadi pada CFRP lapis 3. Penambahan angkur U-jacket pada wilayah geser mampu mencegah terjadinya efek delaminasi yang lebih parah, sehingga tipe keruntuhan CFRP mayoritas adalah delaminasi pada ujung CFRP.*

**Kata kunci:** balok beton bertulang, perkuatan lentur, monotonik, lapisan CFR, delaminasi, skala terbatas

## **ABSTRACT**

*Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) is a type of structural reinforcement material that corrosion resistant, has a high tensile strength, superior in ductility, light weight so it does not require heavy equipment to bring it to the location. Along with the degree of structural damage that requires more reinforcement to increase the capacity, then the required number of layers of CFRP alternative effective. This research examines the coherency failure (delamination) between the surface of the CFRP reinforced concrete beams. Tests conducted on reinforced concrete beams with flexural strengthening treatment with monothonic mechanism (static load). The specimen is a sub-scale specimens reinforced concrete beams with a size of 100 x 150 x 750 mm total 18 units and is divided into six (6) categories: normal beam without CFRP layers and beam with 1, 2, 3, 4 and 5 layers of CFRP. The results showed in the middle of beam there is a separation or delamination so that the concrete beam and CFRP does not work as a composite. Thus these two components separately and collapse begins with strained and cracked concrete. So the conclusion that the delamination process will eliminate the properties of composite beam and CFRP. Further, the ultimate conditions ensured the collapse occurred due to delamination. Collapse not begins with collapse concrete materials or CFRP collapse because tensile of CFRP higher than concrete so that will happen is the disruption of the interface between concrete beam and CFRP,*

then slip or delamination. Addition of U-jacket anchors in shear region can prevent delamination effects are more severe, so the the majority type of CFRP collapseis delamination at the end of the CFRP.

**Keywords:** reinforced concrete beam, flexural reinforcement, monothonic, CFRP layer, delamination, sub-scale

## PENDAHULUAN

Salah satu inovasi perkuatan struktur beton bertulang adalah dengan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*. Keuntungan yang diberikan bila menggunakan *CFRP* yaitu merupakan material yang tahan korosi, mempunyai kuat tarik yang tinggi, superior dalam daktilitas, beratnya ringan sehingga tidak memerlukan peralatan yang berat untuk membawanya ke lokasi, selain itu dalam pelaksanaan tidak mengganggu aktifitas yang ada pada daerah perbaikan struktur tersebut.

Perkuatan atau *strengthening* menggunakan *CFRP* ditujukan untuk menambah kapasitas struktur pada jembatan eksisting. Perkuatan pada jembatan dilakukan dikarenakan beberapa hal antara lain, pasca bencana, kesalahan desain dan perubahan fungsi atau kelas jembatan.

*CFRP* banyak diaplikasikan sebagai perkuatan lentur (*flexural strengthening*) dan geser (*shear strengthening*) pada struktur balok jembatan dengan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* pada balok beton yang direkatkan dengan menggunakan *epoxy resin*. Penggunaan *CFRP* seperti disyaratkan oleh ACI 440.2R-08 (*American Concrete*

*Institute Committee 440 2008*) terdiri dari satu sampai tiga lapis.

Penggunaan *CFRP* dengan multi layer dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan kapasitas struktur, namun kegagalan *debonding* antara *FRP* dengan beton tidak bisa dihindari. Pada saat *debonding* beton dan *CFRP* bekerja terpisah dan keruntuhan didahului dengan beton tertarik dan retak.

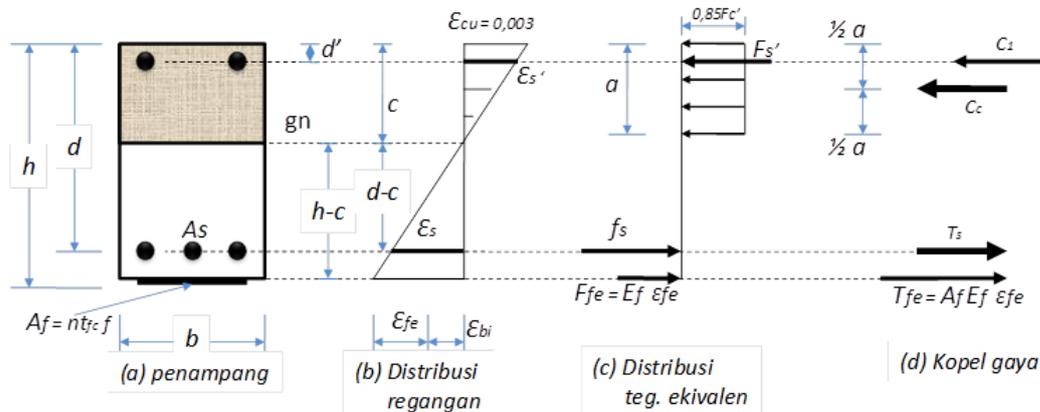
## KAJIAN PUSTAKA

### Metode perkuatan balok dengan *CFRP*

#### Perkuatan lentur

Kapasitas lentur balok didasarkan pada kekuatan batas *ultimit*, yang ditentukan oleh batasan kuat tekan beton dan tegangan leleh baja tulangan serta tegangan efektif *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*.

Menurut ACI.440.2R-08 (*American Concrete Institute Committee 440 2008*) dalam analisis penampang sebagai dasar perhitungan untuk mendapatkan  $M_n$  (*momen nominal*) pada kondisi lentur murni dapat diturunkan dari persamaan kesetimbangan gaya-gaya yang dijelaskan dalam Gambar 1.



**Gambar 1.** Diagram regangan-tegangan balok dengan perkuatan *CFRP* (ACI 440.2R-08)

$$\Sigma H = 0$$

$$T_s + T_{fe} = C_c + C_s \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- $T_s$  = gaya tarik baja tulangan
- $T_{fe}$  = gaya tarik sumbangan *Carbon Fiber Reinforced Polymer*
- $C_c$  = gaya tekan beton
- $C_s$  = gaya tekan tulangan baja

Dengan memperhatikan letak titik masing-masing resultan gaya serta ukuran penampang, akan didapat kuat lentur nominal  $M_n$ . Tetapi kontribusi *CFRP* masih perlu dikalikan faktor reduksi  $\psi_f = 0.85$ , sehingga momen nominal total  $M_n$  dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') + \psi_f A_f f_{fe} \left( h - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots(2)$$

Karena pertimbangan kompatibilitas regangan *CFRP* sebaiknya hanya digunakan untuk menahan gaya tarik. Selain itu disarankan bahwa kuat lentur nominal balok setelah diperkuat  $M_n$  tidak boleh melebihi dua kali kuat lentur sebelum diperkuat  $M_{no}$  atau  $\eta B = \frac{M_n}{M_{no}} \leq 2$ .

Duthinh Dat dan Starnes Monica (2001), menyatakan bahwa penggunaan *FRP* sebagai perkuatan lentur sangat efektif. Tambahan *clamping* atau *wrapping* dengan kombinasi perekat efektif untuk mengekang *FRP laminate*.

Menurut Rosenboom Owen dan Rizkalla Sami H. (2008), bahwa balok beton *prestressed* bentang panjang yang diperkuat dengan *CFRP* pada wilayah lentur namun tanpa perkuatan *U-wrap* mengakibatkan kegagalan mode *IC debonding*.

**Perkuatan geser**

Menurut ACI 440.2R-08 bahwa kuat geser nominal  $V_n$  merupakan gabungan kontribusi beton  $V_c$  dan tulangan geser  $V_s$  dan *CFRP*  $V_f$ . Ketahanan geser masih dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi V_f) \dots\dots\dots(3)$$

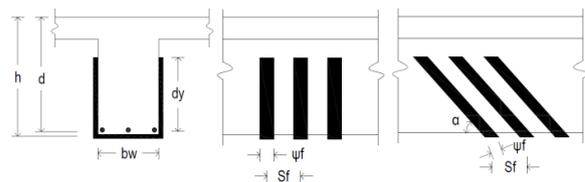
Keterangan:

- $\phi$  = faktor reduksi kekuatan
- $\phi = 0,65$   $\psi$  = faktor reduksi tambahan untuk *CFRP*
- $\psi = 0,95$  untuk komponen yang ditutup lembaran keliling penampang atau keempat sisinya.
- $\psi = 0,85$  untuk *U-wrap* tiga sisi atau bentuk pelat

Kekuatan geser  $V_f$  kontribusi *CFRP* adalah:

$$V_f = \frac{A_f v f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{S_f} \dots\dots\dots(4)$$

Metode pemasangan perkuatan geser ditunjukkan pada Gambar 2.



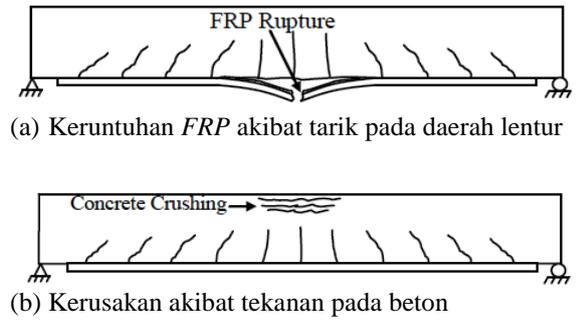
**Gambar 2.** Perkuatan geser dengan *CFRP* (ACI 440.2R-02)

Menurut Abdel Jaber MS., Shatanawi AS. dan Abdel Jaber M. (2007), menyampaikan bahwa kegagalan geser pada balok beton umumnya adalah kegagalan type getas, dimana hal ini merupakan kegagalan yang berbahaya dan sulit diprediksi. Pemasangan *FRP* pada wilayah geser mampu memberikan kontribusi untuk menambah kuat geser namun biasanya kegagalan terjadi secara mendadak.

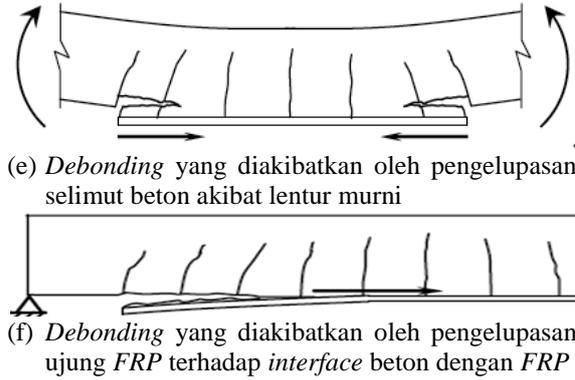
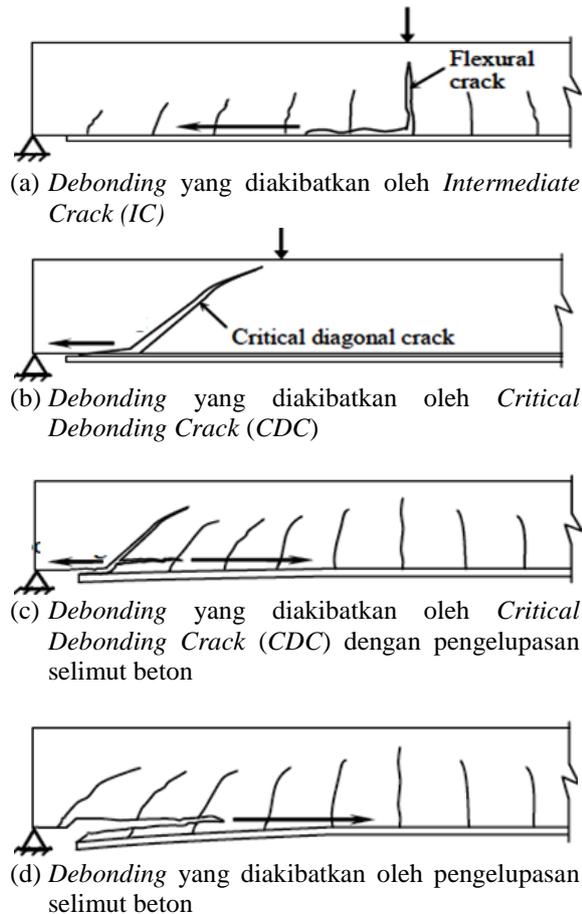
Ahmed E., Sobuz HR. dan Sutan NM. (2011) menyatakan bahwa pemasangan *FRP* secara diagonal pada wilayah geser meningkat seiring dengan jumlah lapisan *FRP* dan pemasangan secara diagonal mampu menghentikan penyebaran retak dibanding pemasangan dengan type U. Perkuatan *FRP* berlapis banyak belum mampu mencapai kapasitas lentur *ultimate* dan perkuatan *FRP* pada balok di wilayah geser merubah karakteristik kegagalan beton, dari kegagalan lentur menjadi keruntuhan secara mendadak.

**Mekasnisme keruntuhan balok dengan perkuatan CFRP (Teng, J.G. dan Chen, J.F. 2007)**

Kegagalan struktur pada balok dengan perkuatan FRP telah diketahui pada penelitian sebelumnya. Kegagalan/kerusakan FRP secara umum yang diaplikasikan pada balok ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



**Gambar 3.** Kegagalan lentur (a dan b) yang biasa terjadi pada balok dengan perkuatan FRP (Teng, J.G. dan Chen, J.F. 2007)



**Gambar 4.**Type Kegagalan *debonding* pada balok dengan perkuatan lentur FRP (Teng, J.G. dan Chen, J.F. 2007)

***Intermediate Crack (IC) debonding***

Teng, J.G. dan Chen, J.F. (2007) menjelaskan dalam penelitiannya bahwa ketika retak lentur atau retak lentur geser mulai terbentuk pada beton, beton mengakomodasi adanya konsentrasi regangan pada retak sehingga mengakibatkan *debonding FRP* secara lokal dan menghentikan penyebaran retak. Selanjutnya tegangan tarik di *release* dengan terbentuknya retak pada beton yang ditransfer oleh FRP dan besi tulangan sehingga tegangan pada *interface* antara beton dengan FRP terbentuk di sekitar retak.

**Pemisahan selimut beton**

Teng, J.G. dan Chen, J.F. (2007) menjelaskan bahwa terkelupasnya selimut beton mengakibatkan retak di sepanjang tulangan beton. Kegagalan beton dengan FRP ditunjukkan dengan munculnya penyebaran retak di ujung FRP. Retak merambat sepanjang tegangan yang terjadi pada tulangan beton hingga mengakibatkan terpisahnya selimut beton. Kegagalan tipe ini tidak termasuk dalam *debonding* meskipun hal ini terjadi karena adanya konsentrasi tegangan pada ujung FRP. Kerusakan tipe ini termasuk kedalam kegagalan getas.

***Debonding pada ujung FRP***

Dalam penelitiannya, Teng, J.G. dan Chen, J.F. (2007) menyimpulkan bahwa kegagalan tipe ini dimulai dengan terjadinya geser pada *interface* antara FRP dengan beton dan tegangan normal di sekitar ujung FRP yang melebihi kekuatan elemen beton. *Debonding* terjadi dimulai dari ujung FRP dan menyebar

hingga ke bagian tengah balok beton. Hal ini bisa terjadi jika lebar *FRP* jauh lebih kecil dibanding lebar balok. *Debonding* pada ujung *FRP* juga bisa berakibat pada terpisahnya selimut beton yaitu terlepasnya ikatan antara besi tulangan dengan beton.

### ***CDC debonding***

*CDC Debonding* menurut Teng, J.G. dan Chen, J.F. (2007) merupakan tipe kegagalan *debonding* yang terjadi pada balok yang diperkuat dengan *FRP* pada wilayah lentur sedangkan ujung *FRP* terletak di zona dengan gaya geser tinggi tapi dengan momen yang rendah (misalnya ujung *FRP* berada dekat dengan tumpuan balok) dan jumlah tulangan geser yang minim. Bentuk kerusakan merupakan retak geser diagonal utama (*critical diagonal crack* atau *CDC*) dan memotong *FRP*, dan biasanya terjadi didekat ujung *FRP*. Ketika retak melebar, tekanan *interface* yang tinggi antara *FRP* dan beton diinduksi, sehingga menyebabkan kegagalan *debonding* antara balok beton dengan *FRP*, retak di sekitar area *debonding* merambat dari celah retak hingga daerah sekitar ujung *FRP*.

Pada balok dengan jumlah tulangan geser yang banyak, beberapa retak geser dengan lebar yang lebih kecil menggantikan retak tunggal yang lebar mendominasi perilaku retak pada balok, sehingga kemungkinan terjadinya *CDC debonding* jauh lebih kecil. Sebaliknya, pemisahan selimut beton menjadi pengganti mode kerusakan dan mengontrol proses kerusakan *debonding*.

Dalam kasus lain, terutama ketika ujung *FRP* sangat dekat dengan lokasi momen nol, kerusakan tipe *CDC debonding* hanya mengarah ke ujung *FRP*, tapi balok mampu menahan beban yang lebih tinggi hingga terjadinya proses pemisahan selimut beton. *CDC debonding* bergerak dengan efektif dari ujung *FRP* ke lokasi baru dengan momen yang lebih besar dan akhirnya terjadi pemisahan selimut beton. Mode kegagalan *CDC* terkait dengan mode kegagalan pemisahan selimut beton. Jika perkuatan lentur pada balok diperkuat dan daerah geser juga diperkuat dengan *U-jacket* untuk memastikan bahwa kekuatan geser tetap lebih besar dari kekuatan lentur, mode kegagalan *CDC debonding* secara efektif dapat ditekan.

### **Kegagalan *debonding* dengan perkuatan geser pada balok beton bertulang.**

Teng, J.G. dan Chen, J.F. (2007) memaparkan bahwa proses keruntuhan perkuatan geser pada balok beton bertulang dengan *FRP* mengakibatkan terjadinya retak geser secara diagonal dalam jumlah sedikit atau terjadinya sejumlah retak geser diagonal, mirip dengan balok beton bertulang dalam kondisi normal tanpa perkuatan *FRP*. Perawatan ini konservatif karena kegagalan terjadi pada hampir semua balok uji, yaitu kegagalan tarik dari *FRP* dan *debonding* antara *FRP* dengan beton.

Mode kegagalan *FRP* telah diamati di hampir semua pengujian pada balok yang diangkur dengan *FRP* secara *U-jacket* menggunakan *FRP* tipe *wrap*, sedangkan mode kegagalan *debonding* telah diamati pada hampir semua tes pada balok dengan perkuatan *FRP strip* yang dipasang disisi balok. Hasil yang didapatkan pada kedua variabel tersebut didapatkan bahwa kegagalan dimulai dengan proses kegagalan *debonding* dari *critical shear crack*. Keruntuhan tarik dimulai dari daerah tegangan *FRP* yang paling besar, diikuti dengan runtuhnya *FRP* tipe *strip* secara cepat yang berpotongan dengan retak geser kritis.

Pada balok dengan perkuatan *FRP* tipe *wrap*, umumnya juga terjadi seperti perkuatan *FRP* tipe *strip* yaitu berpotongan dengan retak geser kritis yang mengalami *debonding* dari sisi teratas pada balok sebelum keruntuhan tarik terjadi. Pada balok yang mengalami keruntuhan *debonding* antara *FRP* dengan balok beton bertulang, kegagalan melibatkan proses *debonding* yang berurutan dimulai dari *FRP strip* yang paling rentan.

### **Faktor lain dari *debonding***

Teng, J.G. dan Chen, J.F. (2007) menyimpulkan bahwa kemungkinan terjadinya *debonding* bisa bertambah jika proses pelaksanaan di lapangan jelek. Kesempurnaan pemasangan *FRP* di lapangan bergantung kepada keahlian pekerja dalam mengaplikasikan *FRP* di lapangan. Untuk itu diperlukan adanya pelatihan bagi pekerja untuk meningkatkan keahlian pekerja. Hal lain yang bisa dilakukan untuk mencegah terjadinya *debonding* adalah dengan melakukan pemasangan angkur menggunakan *FRP* dengan pola pemasangan *U-jacket*. Selain itu,

pemasangan angkur juga bisa berfungsi untuk mengubah kegagalan *debonding* menjadi keruntuhan *FRP*.

Gunes Ogus, Buyukoztruk Oral dan Karaca Erdem (2009) menguji balok dengan perkuatan geser dan lentur menggunakan beban *monothonic* dan memprediksi mengenai kejadian *debonding* berhubungan dengan *disipasi* energi dan diperlukan tambahan lekatan pada area geser untuk mencegah terjadinya kegagalan *bonding*.

Menurut R. Kotynia (2005) menyatakan bahwa kegagalan yang umumnya muncul pada balok yang diperkuat dengan *FRP* tipe *strip* adalah *debonding* pada ujung *FRP* dengan pemisahan selimut beton dan *debonding* pada tengah bentang.

Hasil penelitian Taerwe L., Vasseur L., dan Matthys S. (2009) pada balok menerus yang diperkuat dengan *CFRP*, menyatakan bahwa untuk menghindari *debonding* pada balok menerus, area tekan diangkur menggunakan laminasi *CFRP*, sehingga mekanisme *debonding* dapat dihindari.

## HIPOTESIS

Penggunaan *CFRP* multi layer dapat meningkatkan kapasitas struktur, dan terjadinya *debonding/delaminasi CFRP* dengan beton tidak bisa dihindari. Pada saat *debonding* beton dan *CFRP* bekerja terpisah dan keruntuhan didahului dengan beton tertarik dan retak.

## METODOLOGI

### Pengujian balok beton

Balok beton merupakan beton bertulang dengan karakteristik beton 25 MPa. Material penyusun beton merupakan material alam yang terdapat di sekitar lokasi penelitian. Semen yang digunakan merupakan semen portland (PC) tipe I, pasir alam dan koral batu pecah gunung.

### *CFRP sheets*

*CFRP* menawarkan beberapa keunggulan yang tidak dimiliki oleh baja tulangan yaitu mempunyai kuat tarik yang jauh lebih tinggi dari kuat tarik baja tulangan (3.500 MPa), tidak mengalami korosi karena terbuat

dari bahan non logam, mempunyai penampang yang kecil dan ringan dengan berat 1,5 g/cm<sup>3</sup>, serta mudah pemasangannya.

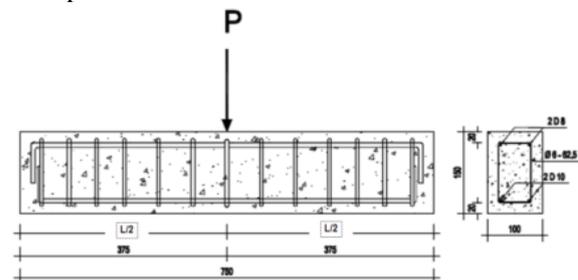
### Tulangan beton

Tulangan beton mempunyai tegangan leleh 320 Mpa dan 240 MPa. Pengujian ini menggunakan diameter D10 dan D8 untuk tulangan longitudinal dan diameter 6 untuk tulangan transversal. Tulangan transversal didesain dengan tipe sengkang tertutup (*closed stirrup*).

### Pembuatan balok uji

Balok beton dibuat di laboratorium beserta benda uji kubus 150 x 150 x 150 mm. Balok beton didesain skala terbatas dengan dimensi 100 x 150 x 750 mm dan diperkuat dengan *CFRP* pada bagian lentur dan diangkur (perkuatan geser *U-wrap*). Benda uji balok diuji dengan beban statis (*monothonic load*). Ilustrasi pembebanan benda uji balok ditunjukkan pada Gambar 5. Elemen dibedakan menjadi beberapa hal berikut:

1. Spesimen A tanpa menggunakan *CFRP*, digunakan sebagai spesimen kontrol.
2. Spesimen B menggunakan *CFRP* 1 (satu) lapis.
3. Spesimen C menggunakan *CFRP* 2 (dua) lapis.
4. Spesimen D menggunakan *CFRP* 3 (tiga) lapis.
5. Spesimen E menggunakan *CFRP* 4 (empat) lapis.
6. Spesimen F menggunakan *CFRP* 5 (lima) lapis.



Gambar 5. Ilustrasi beban pada sampel balok

### Persiapan permukaan balok terhadap lekatan

Permukaan balok beton yang akan dilapisi dengan *CFRP* sebelumnya harus dikasari dan dibersihkan. Ada dua metode yang biasa digunakan pada persiapan permukaan

sampel, yaitu dengan menggunakan sikat baja yang bergetar (*scaller*) dan menggunakan gerinda (*repair and strengthening of reinforced concrete beam using CFRP laminates*). Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah dengan menggunakan *scaller*. Setelah permukaan dikasari, sampel dibersihkan dan dicuci hingga bersih menggunakan sabun untuk membuang debu dan sisa-sisa busa beton yang telah mengering (*laitance*). Setelah dipastikan permukaan bersih dan kering, maka *primer* dan *encapsulation resin* bisa diaplikasikan sebagai perekat (*bonding*) antara permukaan beton dengan *CFRP*.

### Proses perekatan *CFRP* pada balok uji

Sebelum diaplikasikan, material perekat sebelumnya dicampur menggunakan *mixer* hingga campuran *primer* dan *encapsulation resin* benar-benar tercampur dengan baik. Setelah sampel beton bertulang dipastikan benar-benar bersih dan kering, maka material perekat tersebut diaplikasikan secara merata dan rapi. Material tersebut diaplikasikan pula pada tiap-tiap lapisan *CFRP*.

### Prosedur pengujian

Menurut ACI 440.2R-02 perkuatan pada struktur balok dengan menggunakan *CFRP* sudah disyaratkan. Dengan tingginya tingkat kerusakan struktur gedung dan jembatan utamanya pada elemen balok membutuhkan peningkatan kapasitas dengan menggunakan *CFRP* yang lebih dari 3 (tiga) lapis. Dengan adanya peningkatan jumlah lapisan *CFRP* yang dilaksanakan di lapangan maka perlu dilihat seberapa besar kontribusi peningkatan kapasitas lentur yang bekerja pada struktur.

## HASIL DAN ANALISIS

### Pengujian material penyusun beton

Sebelum melakukan *Mix Design*, terlebih dahulu dilakukan berbagai macam tes laboratorium untuk mengetahui apakah material yang akan digunakan dalam pencampuran beton bisa digunakan atau tidak. Adapun pengujian yang harus dilakukan antara lain:

1. Analisa ayakan pasir dan kerikil
2. Berat Jenis semen, pasir dan kerikil
3. Uji Organik Agregat Halus

4. Kadar Butir Lolos Ayakan No. 200 untuk Agregat Halus
5. Uji Berat Isi Agregat Halus dan agregat kasar
6. Uji Kadar Air Agregat Halus
7. Uji Kadar Lumpur
8. Berat Isi Beton Segar

### Campuran Beton

Perencanaan campuran beton merupakan suatu hal yang rumit jika dilihat dari perbedaan sifat dan karakteristik bahan penyusunnya. Karena bahan penyusun tadi menghasilkan variasi sesuai dari produk beton yang dihasilkan. Kriteria dasar perancangan beton adalah kekuatan tekan dan hubungannya dengan faktor air semen yang digunakan.

Dari hasil pengujian material, didapatkan karakter/sifat material yang dibutuhkan dalam perhitungan proporsi campuran material (*mix design*). Dari hasil tersebut didapatkan proporsi campuran yang ditunjukkan dalam Tabel 1.

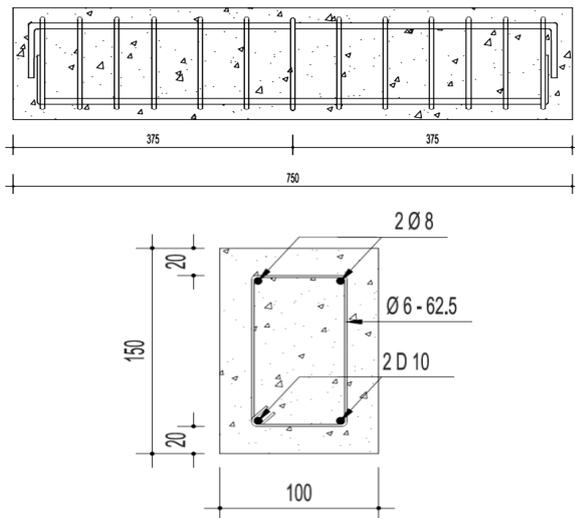
**Tabel 1.** Hasil perhitungan *Mix Design*

Nama Bahan	Komposisi 1 m <sup>3</sup> Beton	
	Kebutuhan Bahan (Kg)	Perbandingan Volume
Semen	342	1
Agregat Halus	729	2,11
Agregat Kasar	1,088	3,17

### Pembuatan benda uji

Sampel beton berupa balok dengan dimensi 100 x 150 x 750 mm merupakan beton dengan mutu rencana  $f'_c$  25 MPa dengan diameter tulangan diagonal atas adalah D8 mm dan tulangan diagonal bawah adalah D10 mm. Tulangan memiliki kuat tarik ( $f_y$ ) sebesar 320 MPa.

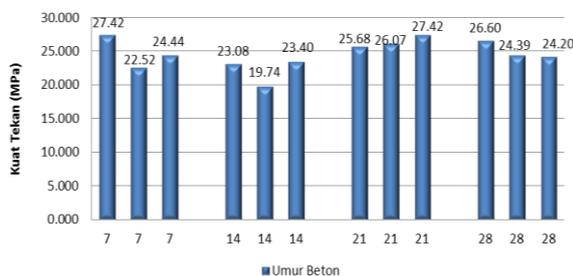
Tulangan *transversal* sengkang didesain dengan diameter 6 mm polos dengan kuat tarik ( $f_y$ ) 240 MPa dengan jarak tulangan *transversal* adalah 62,50 mm. Selimut beton didesain dengan ketebalan 20 mm. Desain balok lebih detail ditunjukkan dalam Gambar 6.



**Gambar 6.** Desain benda uji balok beton bertulang

### Uji kuat tekan beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan untuk mengetahui kekuatan beton yang sebenarnya, apakah sesuai dengan perencanaan atau tidak. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata kuat tekan beton pada umur 7 hari adalah 24,798 MPa atau 253,044 kg/cm<sup>2</sup>, kuat tekan beton pada umur 14 hari adalah 22,078 MPa atau 225,281 kg/cm<sup>2</sup>, kuat tekan beton pada umur 21 hari adalah 26,396 MPa atau 269,343 kg/cm<sup>2</sup>, sedangkan kuat tekan beton pada umur 28 hari adalah 25,066 MPa atau 255,780 kg/cm<sup>2</sup>. Dari keseluruhan benda uji, didapatkan rata-rata kekuatan beton adalah 24,584 MPa atau setara dengan 250,862 kg/cm<sup>2</sup>. Perbandingan kuat tekan beton ditunjukkan dalam Gambar 7.

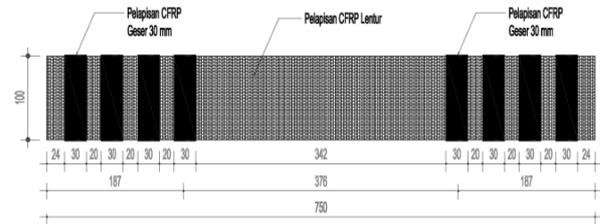


**Gambar 7.** Perbandingan kuat tekan beton berdasarkan umur beton

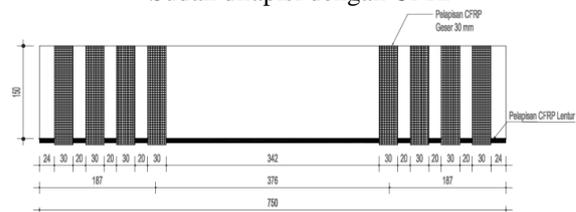
### Pelapisan sampel balok beton dengan CFRP

Sebagai perkuatan lentur, CFRP dipasang memanjang sepanjang permukaan sisi bawah (wilayah tarik) dari balok, sedangkan untuk perkuatan geser, CFRP dipasang melingkar

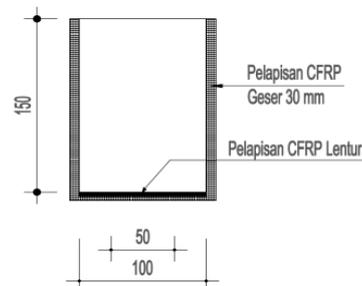
(bentuk U) pada wilayah tumpuan balok. Pelapisan CFRP dilakukan setelah beton berumur 28 hari. Desain benda uji balok yang sudah dilapisi CFRP ditunjukkan dalam Gambar 8, Gambar 9 dan Gambar 10.



**Gambar 8.** Tampak Bawah Model Balok yang Sudah dilapisi dengan CFRP



**Gambar 9.** Tampak samping model balok yang sudah dilapisi dengan CFRP

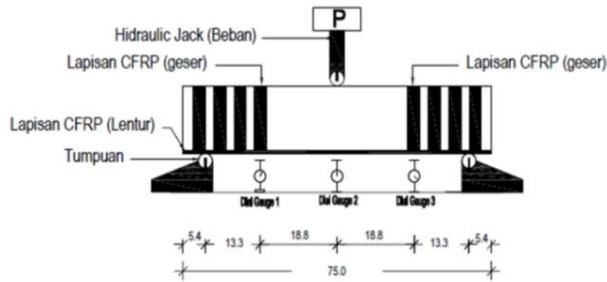


**Gambar 10.** Penampang model balok yang sudah dilapisi dengan CFRP

### Penyiapan alat dan pengujian sampel terhadap lentur

#### Penyiapan alat

Untuk mencari besarnya momen di tengah bentang berdasarkan kesetimbangan gaya,  $M = \frac{P.L}{4}$  (Gambar 11), sedangkan untuk mengetahui besarnya lendutan, dipasang dial gauge di posisi tumpuan (dial gauge 1 dan dial gauge 3) dan lapangan (dial gauge 2).



**Gambar 11.** Ilustrasi set up pengujian

### Uji lentur

Pengujian balok beton bertulang ini dilakukan dengan memberikan satu buah beban terpusat yang berada pada tengah bentang seperti pada Gambar 11. Beban ditingkatkan secara bertahap dengan peningkatan 5 kN hingga balok mengalami keruntuhan. Hasil uji lentur disajikan dalam Tabel 2.

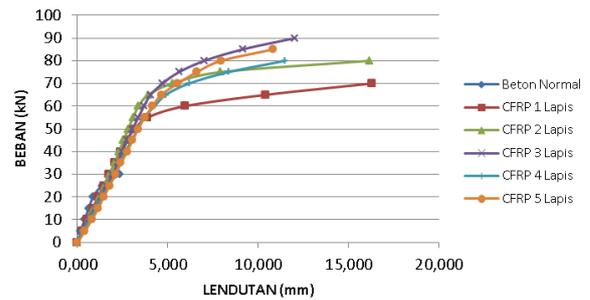
**Tabel 2.** Perhitungan kuat lentur balok

Balok Uji	P (N)	L (mm)	b (mm)	d (mm)	$\sigma_p$ (MPa)
Beton Normal	30.000	642	100	150	0,064
Beton CFRP 1 lapis	70.000	642	100	150	0,150
Beton CFRP 2 lapis	80.000	642	100	150	0,171
Beton CFRP 3 lapis	90.000	642	100	150	0,193
Beton CFRP 4 lapis	80.000	642	100	150	0,171
Beton CFRP 5 lapis	85.000	642	100	150	0,182

## PEMBAHASAN

### Daktilitas beton

Secara umum hasil pengujian balok beton bertulang normal dan balok beton bertulang yang dilapisi dengan *Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP)* mendukung asumsi awal. Hal ini ditunjukkan dengan variasi peningkatan nilai daktilitas dari beton normal, beton dengan CFRP 1 lapis hingga CFRP 5 lapis. Data dan grafik Variasi Beban (kN) vs Lendutan (mm) disajikan dalam Tabel 3 dan Gambar 12.

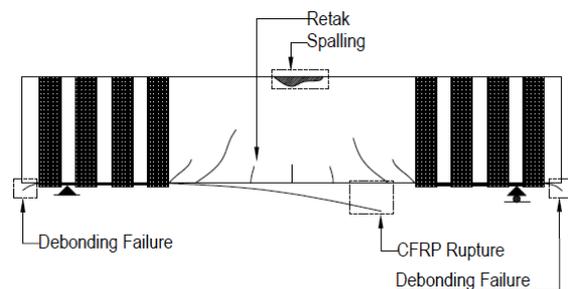


**Gambar 12.** Kurva Beban vs Lendutan rata-rata beton pada bentang tengah

**Tabel 3.** Pembacaan daktilitas dari grafik beban (kN) vs lendutan (mm)

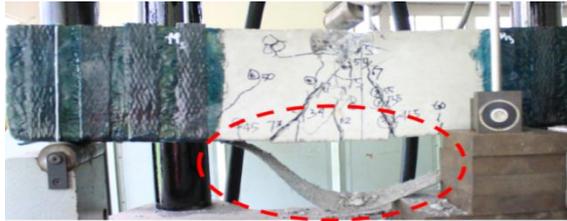
Balok Uji	$\Delta e$	$\Delta y$	$\mu$
Beton Normal	0,870	2,360	2,713
Beton CFRP 1 lapis	2,707	16,277	6,014
Beton CFRP 2 lapis	3,385	16,150	4,771
Beton CFRP 3 lapis	4,045	12,034	2,975
Beton CFRP 4 lapis	3,672	11,486	3,128
Beton CFRP 5 lapis	3,719	10,815	2,908

### Pola keruntuhan akibat delaminasi pada perkuatan lentur



**Gambar 13.** Mekanisme keruntuhan balok beton bertulang dengan perkuatan CFRP

Pada masing-masing benda uji dapat diamati tipe atau pola keruntuhan yang terjadi, terutama pada sampel yang dilapisi dengan CFRP. Pola keruntuhan secara umum diilustrasikan dalam Gambar 13 dan keruntuhan yang terjadi pada benda uji balok dengan perkuatan CFRP ditunjukkan pada Gambar 14.



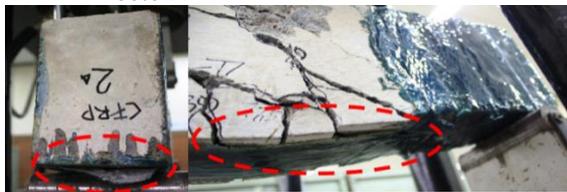
Lapis 1(a) Keruntuhan FRP, delaminasi pada wilayah lentur



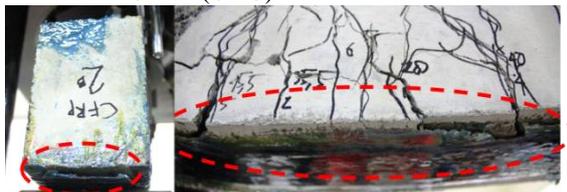
Lapis 1(b) Delaminasi yang diakibatkan oleh pemisahan selimut beton



Lapis 1(c) Kerusakan FRP akibat Critical Diagonal Crack (CDC) dengan pemisahan selimut beton



Lapis 2(a) Delaminasi FRP pada ujung FRP (Slip bonding) dengan Critical Diagonal Crack (CDC) akibat retak lentur



Lapis 2(b) Delaminasi FRP pada ujung FRP (Slip bonding) dengan Intermediate Crack (IC) akibat retak lentur



Lapis 2(c) Delaminasi FRP pada ujung FRP (Slip bonding) dengan Critical Diagonal Crack (CDC) akibat retak lentur



Lapis 3(a) Delaminasi FRP pada ujung FRP (Slip bonding) dengan Intermediate Crack (IC) akibat retak lentur



Lapis 3(b) Delaminasi FRP pada ujung FRP (Slip bonding) dengan Critical Diagonal Crack (CDC) akibat retak lentur



Lapis 4(a) Delaminasi FRP pada ujung FRP (Slip bonding) dengan Critical Diagonal Crack (CDC) akibat retak lentur



Lapis 4(b) Delaminasi FRP pada ujung FRP (Slip bonding) dengan Critical Diagonal Crack (CDC) akibat retak lentur



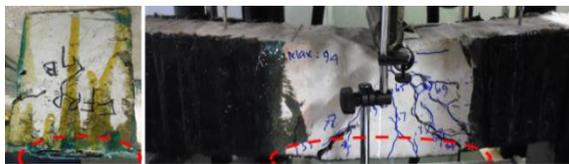
Lapis 4(b) Delaminasi FRP pada ujung FRP (Slip bonding) dengan Critical Diagonal Crack (CDC) akibat retak lentur



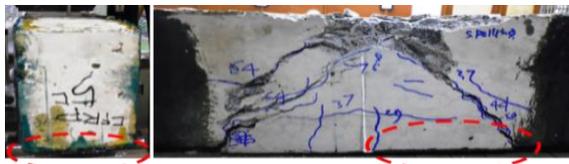
Lapis 4(c) Delaminasi FRP pada ujung FRP (*Slip bonding*) dengan *Critical Diagonal Crack (CDC)* akibat retak lentur



Lapis 5(a) Delaminasi FRP pada ujung FRP (*Slip bonding*) dengan *Critical Diagonal Crack (CDC)* akibat retak lentur



Lapis 5(b) Delaminasi FRP pada ujung FRP (*Slip bonding*) dengan *Intermediate Crack (CDC)* akibat retak lentur

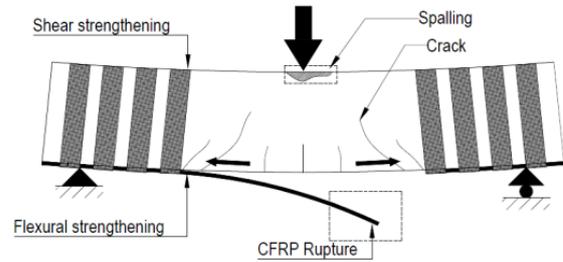


Lapis 5(c) Delaminasi FRP pada ujung FRP (*Slip bonding*) dengan *Critical Diagonal Crack (CDC)* akibat retak lentur

**Gambar 14.** Tipe keruntuhan CFRP pada balok beton bertulang

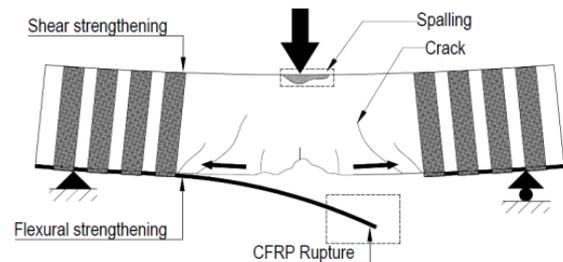
Pada saat pengujian, kegagalan yang terjadi pada beton normal, beton dengan 1 lapis CFRP mengalami keruntuhan pada tengah bentang. Bahkan pada beton dengan 1 lapis terjadi ledakan kecil yang diakibatkan oleh patahnya lapisan CFRP yang terjadi pada bentang tengah. Sementara pada CFRP 2 lapis hingga 5 lapis CFRP tidak terjadi hal tersebut. Pada 2 lapis CFRP hingga 5 lapis CFRP terjadi proses pelepasan CFRP wilayah lentur terhadap kekangan/angkur CFRP wilayah geser. Hal ini terjadi hingga beton hancur dan lapisan CFRP pada wilayah lentur terlepas dari bagian beton. Tipe kerusakan beton dengan perkuatan CFRP

dapat diilustrasikan pada Gambar 15.



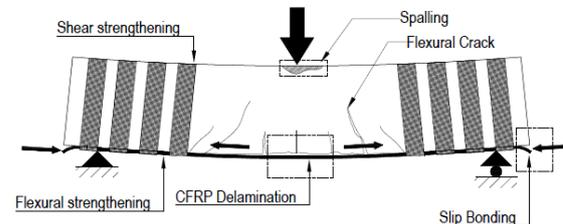
**Gambar 15.** Kerusakan akibat delaminasi CFRP pada daerah tengah bentang

Kerusakan yang ditunjukkan pada Gambar 15 merupakan kerusakan delaminasi yang umum terjadi, yaitu CFRP mengalami keruntuhan di tengah bentang akibat beban lentur yang terjadi. Kerusakan ini terjadi pada sampel 1A dan proses kerusakan disertai suara ledakan kecil.



**Gambar 16.** Kerusakan akibat delaminasi CFRP pada daerah tengah bentang disertai dengan terlepasnya selimut beton

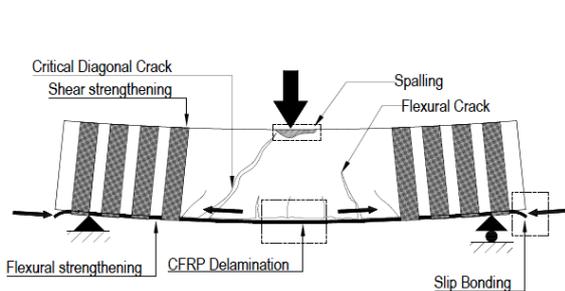
Kerusakan yang ditunjukkan pada Gambar 16 merupakan kerusakan delaminasi yang umum terjadi, yaitu CFRP mengalami keruntuhan di tengah bentang akibat beban lentur yang terjadi namun disertai dengan berpisahannya selimut beton. Kerusakan ini terjadi pada sampel 1B dan 1C dan proses kerusakan disertai suara ledakan kecil.



**Gambar 17.** Kerusakan akibat delaminasi pada wilayah lentur dan terjadinya slip bonding pada ujung CFRP yang diangkur

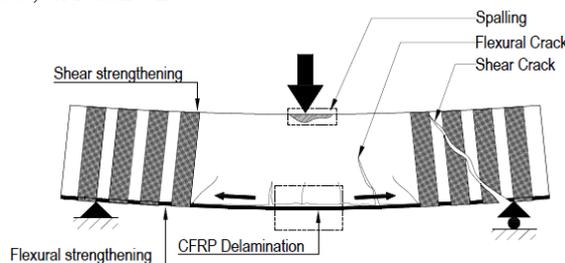
Kerusakan yang ditunjukkan pada Gambar 17 merupakan kerusakan delaminasi

yang diakibatkan oleh terjadinya geser pada *interface* antara *CFRP* dengan beton. Selain *delaminasi* pada tengah bentang, ujung *CFRP* yang diangkur juga mengalami *slip bonding* sebagai reaksi dari lendutan yang terjadi di tengah bentang. Kegagalan ini terlihat dengan munculnya retak pada ujung *CFRP* yang diangkur. Kerusakan ini terjadi pada sampel 2A dan 2B.



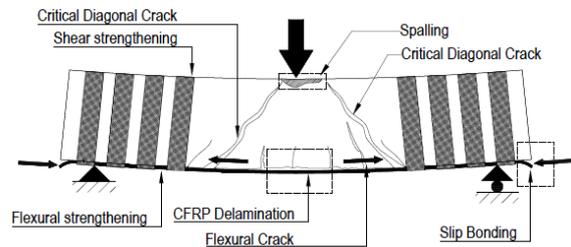
**Gambar 18.** Kerusakan akibat *delaminasi* pada wilayah lentur, terjadinya *slip bonding* pada ujung *CFRP* yang diangkur dan terbentuknya *CDC*

Kerusakan yang ditunjukkan pada Gambar 18 merupakan kerusakan *delaminasi* yang diakibatkan oleh terjadinya geser pada *interface* antara *CFRP* dengan beton. Selain *delaminasi* pada tengah bentang, ujung *CFRP* yang diangkur juga mengalami *slip bonding* sebagai reaksi dari lendutan yang terjadi di tengah bentang. Kegagalan ini terlihat dengan munculnya retak pada ujung *CFRP* yang diangkur. Munculnya *CDC* pada wilayah lentur yang mengarah ke wilayah geser secara diagonal menandakan terjadinya gaya geser yang tinggi pada daerah momen rendah. Kerusakan ini terjadi pada sampel 2C, 3A, 3B, 3C, 4A dan 5B.



**Gambar 19.** Kegagalan dengan retak yang membelah secara diagonal pada daerah geser dengan perkuatan angkur *FRP* model *U-jacket*

Kerusakan yang ditunjukkan Gambar 19 merupakan *Critical Diagonal Crack (CDC)* pada wilayah geser dengan perkuatan *U jacket* secara diagonal yang menandakan terjadinya gaya geser yang tinggi pada daerah momen rendah. Bentuk kerusakan merupakan retak geser diagonal utama (*critical diagonal crack* atau *CDC*) dan memotong *FRP* dan biasanya terjadi didekat ujung *FRP*. Kerusakan ini terjadi pada sampel 3 dengan perkuatan geser menggunakan *CFRP* 1 lapis.

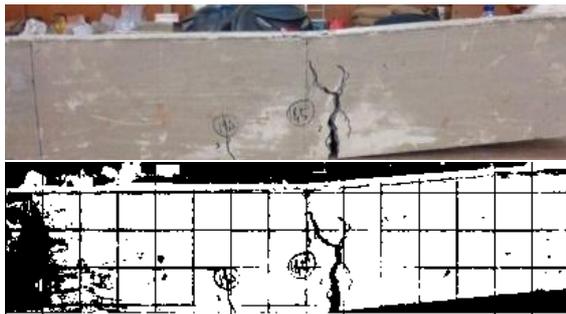


**Gambar 20.** Kerusakan akibat *delaminasi* pada wilayah lentur, terjadinya *slip bonding* pada ujung *CFRP* yang diangkur dan terbentuknya *CDC*

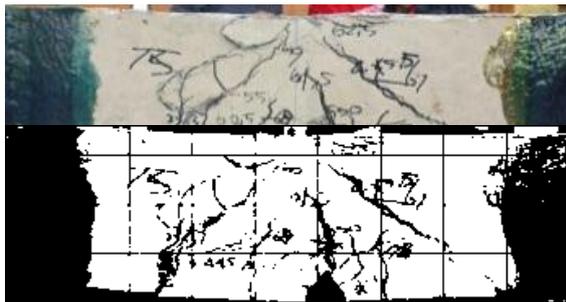
Kerusakan yang ditunjukkan pada Gambar 20 merupakan kerusakan *delaminasi* yang diakibatkan oleh terjadinya geser pada *interface* antara *CFRP* dengan beton. Selain *delaminasi* pada tengah bentang, ujung *CFRP* yang diangkur juga mengalami *slip bonding* sebagai reaksi dari lendutan yang terjadi di tengah bentang. Kegagalan ini terlihat dengan munculnya retak pada ujung *CFRP* yang diangkur. Munculnya *CDC* pada wilayah lentur di kedua sisinya mengarah ke wilayah geser secara diagonal menandakan terjadinya gaya geser yang tinggi pada daerah momen rendah. Kerusakan ini terjadi pada sampel 4B, 4C, 5A dan 5C.

### Pola retak benda uji

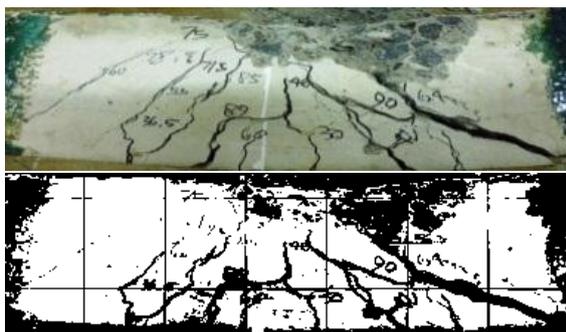
Pola retak digambarkan secara manual dan angka yang terdapat pada pola keretakan menunjukkan urutan beban retak yang terjadi. Angka paling kecil menunjukkan retak yang pertama kali terjadi dan angka terbesar menunjukkan retak pada kondisi sesaat sebelum runtuh. Pola retak yang terjadi pada benda uji ditunjukkan pada Gambar 21.



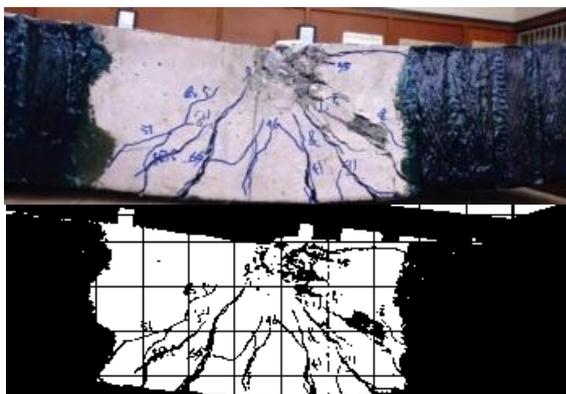
Pola Keruntuhan Pada Beton Normal



Pola Keruntuhan pada Beton yang dilapisi dengan CFRP 1 Lapis



Pola Keruntuhan pada Beton yang dilapisi dengan CFRP 2 Lapis



Pola Keruntuhan pada Beton yang dilapisi dengan CFRP 3 Lapis



Pola Keruntuhan pada Beton yang dilapisi dengan CFRP 4 Lapis



Pola keruntuhan pada beton yang dilapisi dengan CFRP 5 lapis

**Gambar 21.** Pola retak keruntuhan pada balok beton dengan variasi perlakuan sampel

Model terjadinya keruntuhan balok merupakan jenis keruntuhan lentur. Keruntuhan ini diawali dengan adanya retak lentur saat beban kecil. Saat beban terus ditingkatkan terbentuk retak miring (diagonal) yang merupakan kelanjutan dari retak lentur yang terjadi pada daerah sepertiga bentang dari lokasi beban terpusat sampai wilayah perkuatan CFRP pada tumpuan. Kemudian retak merambat lebih jauh kedalam daerah tekan seiring dengan naiknya beban. Hal inilah yang menyebabkan balok runtuh dan hancurnya beton di sekitar daerah tekan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari eksperimen yang dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

- a. Pada kondisi *ultimate* dipastikan keruntuhan terjadi karena *delaminasi*. Keruntuhan tidak diawali dengan keruntuhan material beton atau CFRP karena kemampuan terhadap tarik yang lebih tinggi sehingga yang akan

- terjadi adalah terganggunya *interface* antara balok beton dan *CFRP*, kemudian terjadi *slip* atau *delaminasi*.
- b. Lapis (*CFRP*) pada wilayah lentur, berakibat pada kerusakan pada wilayah geser, sehingga perlu dipertimbangkan perkuatan pada wilayah geser.
  - c. Penambahan terdapat sumbangan cengkeringan dari *prime (resin)* pada wilayah geser terhadap (*CFRP*) di wilayah lentur, padahal seharusnya geser dan lentur bekerja sendiri-sendiri.
  - d. Mutu beton harus seimbang dengan jumlah lapisan (*CFRP*) yang diaplikasikan. Hasil eksperimen pada (*CFRP*) lapis 4 (empat) dan 5 (lima) menunjukkan bahwa beton hancur terlebih dahulu sebelum (*CFRP*) mengalami kerusakan.
  - e. Arah retakan pada lapis 3-5 adalah diagonal dari tumpuan yaitu serat *CFRP* geser menuju wilayah lapangan yang mengarah pada pusat beban.
  - f. Penambahan angkur *U-jacket* pada wilayah geser mampu mencegah terjadinya efek *delaminasi* yang lebih parah, sehingga tipe keruntuhan *CFRP* mayoritas adalah *delaminasi* pada ujung *CFRP*.

### Saran

Perlu kajian aplikatif pada berbagai mutu balok beton bertulang eksisting dengan perkuatan *CFRP* untuk meningkatkan kapasitas kekuatan.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Laboratorium Uji Bahan Politeknik Negeri Bandung atas dukungan fasilitas pengujian pada penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Jaber MS, Shatanawi AS, Abdel-Jaber Mu'tasim. 2007. "Guidelines for Shear Strengthening of Beams Using CarbonFibre-Reinforced Polymer (*FRP*) Plates". *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol.1 No.4, pp. 327 - 335.
- Ahmed Ehsan, Sobuz HR, Sutan NM.(2011). "Flexural Performance of *CFRP* Strengthened RC Beams with Different Degrees of Strengthening Schemes".

- International Journal of the Physical Sciences*. vol.6. pp.2229-2238.
- American Concrete Institute Committee 440. 2008. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. ACI 440.2R-08. Farmington Hills: ACI.
- Badan Standardisasi Nasional. 2002. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*. SNI 03-2847-2002. Jakarta: BSN.
- Duthin Dat, Starnes Monica. 2001. "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Carbon *FRP*". In *Composites in Construction*, Figueiras et al (eds), Geithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- Gunes Oguuz, Buyukozturk Oral, Karaca Erdem. 2009. "A fracture based model for *FRP* debonding in strengthened beams". *Engineering Fracture Mechanics* 76: 1897–190.
- Kotynia, R. 2005. "Debonding Failures of RC Beams Strengthened with Externally Bonded Strips". *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*. Poland: International Institute for *FRP* in Construction
- Rosenboom Owen, Rizkalla Sami H. 2008. "Experimental Study of Intermediate Crack Debonding in Fiber Reinforced Polymer Strengthened Beams". *ACI Structural Journal*. January – February: 41-50
- Taerwe, L., Vasseur, L., Matthys, S. 2009. "External Strengthening of Continuous Beam with *CFRP*". In *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II-Alexander et al*. London: Taylor & Francis Group.
- Teng, J.G., Chen J.F. 2007. "Debonding Failures of RC Beams Strengthened with Externally Bonded *FRP* Reinforcement : Behaviour and Modelling". *Asia Pacific Conference on FRP in Structures*. Hongkong: Department of Engineering