

# FLEXURAL CAPACITY OF THE STRENGTHENED YIELDED REINFORCED CONCRETE BEAMS USING GFRP SHEET

## KAPASITAS LENTUR PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG YANG TELAH MELELEH DENGAN MENGGUNAKAN LEMBARAN GFRP

Rudy Djamaluddin<sup>1)</sup>, Shinichi Hino<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Sipil Universitas Hasanuddin-Makassar-Indonesia  
e-mail: rudy0011@hotmail.com

<sup>2)</sup>Professor Laboratorium Struktur dan Jembatan, Jurusan Sipil Universitas Kyushu-Jepang  
e-mail: hino@civil.doc.kyushu-u.ac.jp

### ABSTRACT

Due to the age of structure, overloaded or disasters, many damaged reinforced concrete structures were demolished without considering the strengthening for capacity restoring. Depend on the level of the damage, a concrete structure member may be restored by strengthening. The development of Fiber Reinforced Plastics (FRP) made from carbon (CFRP), glass (GFRP) or aramid (AFRP) has been opening a new challenging in application for strengthening of concrete structures. Many researches has been done to apply the FRP materials for strengthening. However, still very few studies who conducted researches on the strengthening of the yielded reinforced concrete members. In other to study the flexural capacity of a strengthened yielded reinforced concrete beams, a series of experimental programs was done. Specimens of reinforced concrete beams with dimension of 15 cm x 20 cm x 270 cm were casted. The specimens were the uncracked beams as control specimens and the cracked beams strengthened by GFRP sheet with parameter of GFRP layers and length, respectively. Before the application of GFRP sheet, beams were loaded up to the yielding point of tensile steel reinforcement. The results indicated that the flexural capacity of beams strengthened with one layer (type FH-1) and two layers (type FH-2) of GFRP on overall length of beam were 26 kN and 35 kN, respectively. On the FH-12 beams with one layer of full length added with two layer of GFRP with length of half of the beam length at span center indicated higher capacity which was 30 kN. Furthermore, on the FH-32 beams with three layers of full length added with two layer of GFRP with length of half of the beam length at span center indicated higher capacity which was 42 kN. For the comparison, it was noted that the ultimate flexural capacity of the control specimens was 16.5 kN. As the results, yielded reinforced concrete beams strengthened with GFRP sheet had flexure capacity more than its virgin beams

**Keywords:** Strengthening, GFRP sheet, Flexural Capacity, Crack, Yielding of Reinforcement

### ABSTRAK

Kerusakan struktur beton bertulang dapat saja terjadi akibat umur struktur dan atau akibat perubahan pembebanan ataupun akibat bencana alam. Kebanyakan struktur yang rusak akan langsung dibongkar tanpa mempertimbangkan kemungkinan perbaikan ataupun perkuatan. Pada tingkat kerusakan tertentu, pada prinsipnya suatu elemen struktur beton bertulang dapat diperkuat atau diperbaiki. Perkembangan Fiber Reinforced Plastics (FRP) dari bahan serat carbon (CFRP), serat gelas (GFRP) atau serat aramid (AFRP) telah membuka peluang baru untuk keperluan perbaikan dan perkuatan struktur beton bertulang. Telah banyak penelitian dilakukan menggunakan bahan serat tersebut dalam bidang perkuatan struktur untuk keperluan peningkatan kapasitas. Akan tetapi masih sangat sedikit yang melakukan penelitian pada bidang perkuatan struktur pada elemen struktur beton bertulang yang telah rusak akibat pelelehan tulangan tarik. Sebagai usaha untuk mempelajari kekuatan lentur hasil perkuatan balok beton bertulang yang telah meleleh, maka penulis telah melakukan serangkaian pengujian. Bahan uji berupa balok dengan dimensi 15 cm x 20 cm x 270 cm. Bahan uji terdiri dari bahan uji tanpa retak yang tidak diperkuat sebagai bahan uji kontrol dan bahan uji yang telah di perkuat dengan lembaran GFRP dengan variasi jumlah lapisan dan panjang lembaran. Sebelum dilakukan perkuatan, balok beton bertulang dibebani hingga mencapai batas leleh tulangan tarik. Hasil menunjukkan bahwa kapasitas bahan uji dengan 1 lapis penuh sepanjang bentang balok (type FH-1) dan bahan uji dengan 2 lapis penuh (FH-2) adalah masing-masing 26 kN dan 35 kN. Pada bahan uji FH-12 dengan 1 lapisan penuh sepanjang bentang ditambah dengan lapisan sepanjang setengah bentang yang di tempel pada titik tengah balok memiliki kapasitas lentur 30 kN. Kemudian, untuk bahan uji FH-32 dengan 3 lapis penuh sepanjang bentang ditambah dengan 2 lapis dengan panjang setengah bentang balok yang ditempel pada titik tengah balok memiliki kapasitas 42 kN. Sebagai pembandingan, hasil pengujian pada balok tanpa perkuatan memiliki kapasitas lentur sebesar 16.5 kN. Sehingga dapat di simpulkan bahwa perkuatan menggunakan lembaran GFRP pada balok beton bertulang yang telah terbebani hingga leleh tulangan memiliki kapasitas lentur yang lebih tinggi dari balok aslinya.

**Kata-kata kunci:** Perkuatan, lembaran GFRP, Kapasitas Lentur, Retak, Pelelehan tulangan.

### PENDAHULUAN

Akibat peningkatan frekuensi dan intensitas bencana alam seperti gempa bumi dan tanah longsor, banyak struktur beton bertulang yang mengalami kerusakan dan harus di bongkar. Beberapa alasan lain seperti perubahan pola pembebanan dan atau penurunan kemampuan struktur akibat umur, menyebabkan beberapa struktur beton bertulang juga harus dibongkar dan dibangun kembali. Gambar 1 memperlihatkan struktur beton bertulang yang telah rusak akibat beban berlebihan dan akibat umur bangunan. Pembongkaran dan pembangunan kembali akan



Gambar 1. Kerusakan elemen struktur beton bertulang

memerlukan biaya yang tinggi selain memerlukan waktu yang lama. Hal ini akan berdampak pada terganggunya kegiatan-kegiatan kemasyarakatan selain berdampak pada lingkungan. Kadangkala suatu struktur juga harus dibongkar karena adanya perubahan pada standar perencanaan khususnya terkait dengan kegempaan. Peningkatan frekuensi dan intensitas gempa bumi di Indonesia telah mengorbankan nyawa dan materil yang tinggi. Ratusan milyar rupiah harus dikeluarkan untuk memperbaiki bangunan-bangunan yang rusak yang di bongkar dan dibangun kembali. Hal ini melandasi perlunya dikembangkan teknologi perkuatan struktur sehingga pembongkaran dapat dikurangi atau dihindari.

Dalam suatu sistem struktur beton bertulang, elemen balok merupakan elemen struktur yang paling rawan mengalami kerusakan baik akibat beban layan maupun akibat bencana alam seperti gempa bumi atau tanah longsor. Hal ini didasari pada metode perencanaan struktur beton bertulang yang berbasis pada konsep kolom kuat balok lemah (Wai et.al. 2002). Dalam konsep perencanaan tersebut, elemen balok direncanakan lebih lemah dibanding elemen kolom, sehingga apabila terjadi pembebanan yang berlebihan, maka elemen balok akan mengalami proses pelepasan terlebih dahulu dibanding elemen kolom. Melelehnya tulangan pada suatu sistem balok beton bertulang merupakan suatu kerusakan atau kegagalan struktur. Suatu elemen struktur balok yang telah mengalami pelepasan tulangan umumnya harus dibongkar yang pada umumnya menyebabkan perlunya membongkar struktur secara keseluruhan.

Dewasa ini telah berkembang tuntutan akan perlunya teknik-teknik perkuatan baik untuk keperluan peningkatan kapasitas maupun untuk keperluan perbaikan struktur. Tuntutan ini telah mendorong peneliti-peneliti untuk mengembangkan teknologi dan ilmu pengetahuan terkait teknik perkuatan. Beberapa teknik perkuatan telah dikembangkan seperti perkuatan dengan metode selimut beton bertulang, metode membungkus dengan pelat baja, metode perkuatan dengan semen polimer. Juga telah di studi perkuatan kolom dengan menggunakan system kawat dan pelat baja oleh Jae et.al. (2009). Gambar 2 memperlihatkan salah satu metode perkuatan konvensional dengan membungkus menggunakan beton bertulang. Kesulitan dalam pengerjaan serta berat material merupakan kekurangan metode tersebut.

Kegiatan penelitian terus dilakukan untuk menghasilkan alternatif teknik perkuatan yang lebih baik. Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi juga telah mendorong dikembangkan material-material baru dengan sifat-sifat yang lebih baik seperti material komposit dengan bahan dasar serat dan plastic yang dikenal dengan nama Fiber Reinforced Plastics (FRP). Untuk keperluan tersebut telah berkembang berbagai bahan dasar serat seperti serat gelas (Glass Fiber Reinforced Plastics – GFRP), serat aramid (Aramid Fiber Reinforced Plastics – AFRP) atau serat carbon (Carbon Fiber Reinforced Plastics – CFRP). Gambar 3 memperlihatkan contoh lebaran serat gelas. Lembaran serat gelas yang di jenuhkan dengan bahan epoxy atau polymer akan membentuk glass fiber reinforced plastics (GFRP).



Gambar 2. Metode perkuatan elemen struktur

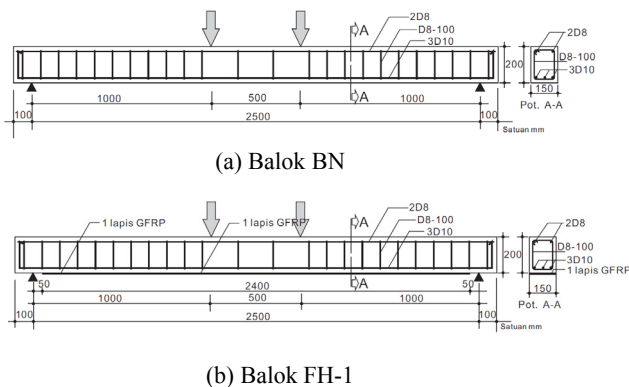


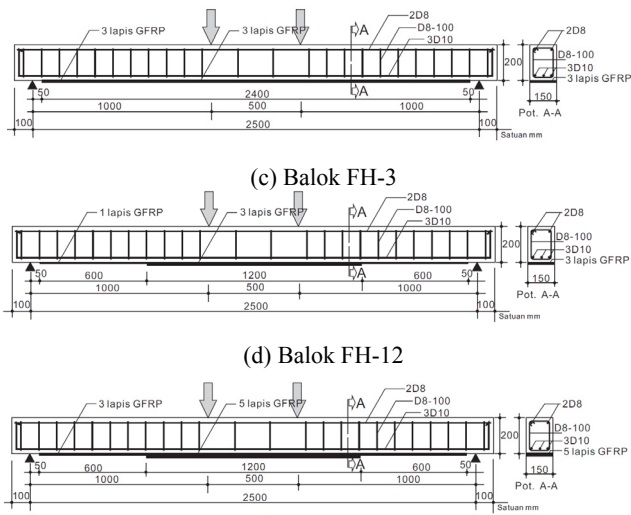
Gambar 3. Lebaran serat gelas

Kehadiran material-material tersebut merupakan peluang baru dalam mengembangkan teknik perkuatan struktur. Penggunaan untuk perbaikan dan peningkatan kapasitas suatu struktur beton bertulang dengan menggunakan material-material tersebut sudah memperlihatkan peningkatan dan semakin populer di dunia konstruksi. Penggunaan material FRP untuk keperluan tersebut memberikan beberapa kelebihan-kelebihan seperti tahan terhadap pengkaratan, memiliki tegangan tarik yang tinggi, ringan dan mudah dikerjakan (Yu-Fei et.al. 2010 dan Dong et al. 2011).

Studi untuk penggunaannya pada perkuatan balok telah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti Norris et. al (1997) yang menggunakan pelat FRP untuk perkuatan geser yang direkatkan pada sisi samping balok. Ross et.al (1999) telah menunjukkan bahwa balok yang direkatkan dengan pelat FRP pada sisi tarik dapat meningkatkan kapasitas lentur balok secara nyata. Christos et. al. (2009) telah melakukan pengujian respon balok yang diperkuat dengan FRP akibat pembebanan berulang yang mana balok secara umum mengalami kegagalan akibat terlepasnya rekatkan FRP pada balok. Yu et.al (2010) melakukan penelitian terkait penguatan balok dengan menggunakan FRP hybrid yang diperkuat dengan penjepit dari pelat FRP.

Secara umum penelitian terkait dengan pemanfaatan bahan FRP untuk perkuatan dilakukan untuk keperluan peningkatan kekuatan pada element struktur seperti kolom atau balok beton bertulang. Masih sangat jarang studi dilakukan untuk keperluan perkuatan pada elemen-elemen struktur yang telah mengalami kerusakan khususnya kerusakan akibat beban berlebihan sehingga terjadi pelepasan pada tulangan. Terkait dengan hal tersebut, adalah penting untuk memperluas penggunaan bahan FRP sebagai bahan perkuatan untuk mengembalikan atau meningkatkan kemampuan elemen struktur beton bertulang yang telah mengalami kegagalan akibat pelepasan tulangan. Untuk melakukan studi aplikasi bahan FRP untuk perkuatan elemen lentur seperti balok beton bertulang yang telah mengalami kerusakan akibat leleh tulangan, maka telah dilakukan serangkaian studi analitis dan pengujian experimental. Tulisan ini menyajikan hasil dari studi dimasad yang terkait dengan kapasitas lentur perkuatan balok beton bertulang yang telah mengalami leleh tulangan dengan menggunakan bahan GFRP.





Gambar 4. Detail bahan uji

Table 1. Sifat-sifat beton dan baja tulangan

Beton		Tulangan baja	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Tegangan tarik	2.7 Mpa	Tegangan leleh	290 Mpa
Tegangan tekan	22.8	Modulus tarik	200000 Mpa
Modulus young	22360 MPa	Regangan ultimit	5.00%
Kerapatan	2.1 t/m <sup>3</sup>	Kerapatan	7.8 t/m <sup>3</sup>
Nilai Poisson	0.2	Nilai Poisson	0.3

**BAHAN UJI DAN METODE PENGUJIAN**

Gambar 4 memperlihatkan detail bahan uji untuk masing-masing balok normal (BN), balok yang diperkuat dengan 1 lapis pada sepanjang bentang balok (FH-1), balok yang diperkuat dengan 3 lapis pada sepanjang bentang balok (FH-3), balok yang diperkuat dengan 1 lapis pada seluruh bentang ditambah dengan 2 lapis dengan panjang setengah bentang balok ditempel pada titik tengah bentang balok (FH-12) dan balok yang diperkuat dengan 3 lapis pada sepanjang bentang balok ditambah 2 lapis dengan panjang setengah bentang balok ditempel pada titik tengah bentang balok (FH-32). Bahan uji FH-12 dan FH-32 dimaksudkan untuk mengklarifikasi pengaruh panjang lembaran terhadap kapasitas lentur, sedangkan bahan uji FH-1 dan FH-3 disiapkan untuk mengklarifikasi pengaruh jumlah lapisan terhadap kapasitas lentur.

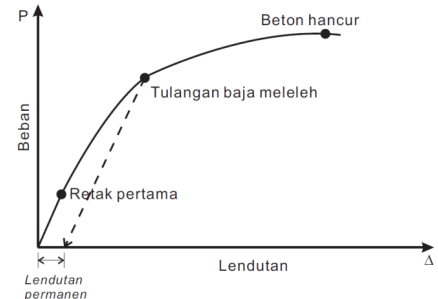
Semua bahan uji adalah balok dengan dimensi pampang 270 cm, lebar balok 15 cm dan tinggi balok 20 cm. Balok beton bertulang direncanakan memiliki tulangan tarik 3 batang tulangan

Table 2. Sifat-sifat bahan serat gelas dan GFRP

Lembaran Serat Gelas		GFRP	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Tegangan tarik	3.24 Gpa	Tegangan tarik	575 Mpa
Modulus tarik	72.4 Gpa	Modulus tarik	26.1 Gpa
Regangan ultimit	5%	Regangan ultimit	2.20%
Kerapatan	2.55 g/cm <sup>3</sup>	Tegangan tarik arah 90°	25.8 Gpa
Tebal lembaran	0.36 mm	Tebal (lapis)	1.3 mm



Gambar 5. Persiapan bahan uji balok



Gambar 6. Tipikal hubungan beban-lendutan untuk balok bertulangan lemah.

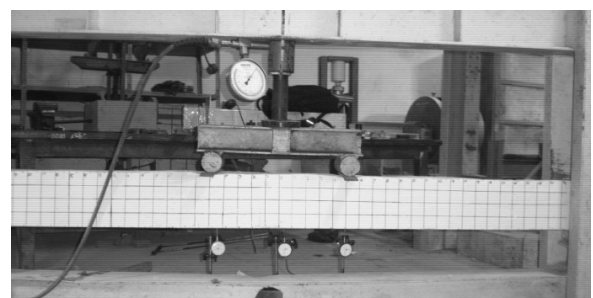


Gambar 7. Penempelan lembaran serat gelas

diameter 10 mm dengan tulangan geser berdiameter 8 mm. Untuk memudahkan perakitan tulangan, maka pada sisi tekan juga di beri tulangan dengan diameter 8 mm. Bahan beton direncanakan memiliki kuat tekan 25 MPa. Proses pengecoran dilakukan sesuai standar yang baku dan dilakukan proses perawatan beton selama 28 hari. Untuk memeriksa sifat-sifat beton, maka dilakukan pengujian tekan dan uji belah pada bahan uji silinder selain uji kuat tarik menggunakan bahan uji balok. Secara rinci sifat-sifat beton dan tulangan baja disajikan pada Table 1.

Pengujian dilakukan pada balok BN diatas suatu bentang sederhana dengan membebani balok secara sentris pada 2 titik pembebanan berjarak 500 mm. Pengujian ini dilakukan untuk kemudian digunakan dalam penentuan beban yang akan digunakan untuk pembebanan tahap awal bahan uji FH.

Sebelum dilakukan perkuatan, bahan uji FH di bebani hingga beban 15 kN atau beban dimana sesaat setelah terjadinya pelepasan pada tulangan tarik. Identifikasi beban ini dilakukan berdasarkan grafik hubungan antar beban dan lendutan.



Gambar 8. Metode pembebanan balok

Berdasarkan teori lentur beton bertulang (James et.al. 2005), titik leleh tulangan ditandai dengan terjadinya perubahan kekakuan balok secara nyata. Oleh karena balok direncanakan dalam kondisi bertulangan lemah (*under reinforcement*) maka perubahan kekakuan tersebut akan disebabkan oleh melelehnya tulangan seperti diilustrasikan pada Gambar 6.

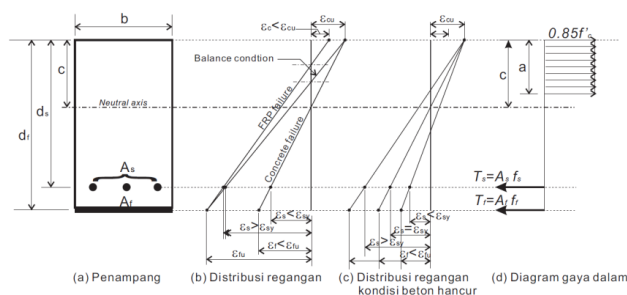
Setelah dilakukan pembebanan tahap awal hingga beban rencana pada bahan uji FH maka beban dikurangi kembali secara perlahan hingga kembali nol. Dampak dari pelepasan kembali beban pada balok yang telah mengalami leleh tulangan adalah timbulnya lendutan permanen. Berdasarkan pengukuran diperoleh lendutan permanen sekitar 2 sampai 3 mm. Selanjutnya dilakukan proses perkuatan dengan menempelkan lembaran serat gelas. Bahan serat gelas yang digunakan adalah lembaran serat gelas yang diproduksi oleh Tyfo type G. Sifat-sifat bahan dasar serat gelas dan GFRP disajikan pada Table 2. Sebelum penempelan, permukaan beton dibersihkan dengan menggunakan kertas gosok. Permukaan beton di gosok secara merata sehingga permukaan beton terlihat jelas tanpa adanya lapisan residu.

Proses pelapisan dimulai dengan pengolesan bahan epoxy. Lembaran serat gelas yang telah digunting sesuai ukuran kemudian ditempelkan secara merata kemudian di oles lagi untuk menjenuhkannya dengan bahan epoxy. Lapisan kedua dan seterusnya dilakukan setelah proses penjenjutan. Proses ini berdasarkan standar baku prosedur penempelan bahan serat gelas yang direkomendasikan oleh Tyfo. Selanjutnya bahan uji di simpan selama 4 hari untuk proses pengeringan bahan epoxy.

Pengujian dilakukan dengan metode pembebanan seperti pada beton bertulang normal (BN). Balok diuji diatas tumpuan sederhana dengan jarak antar tumpuan 2500 mm. Pembebanan diberikan dalam bentuk pembebanan 2 titik berjarak 500 mm secara sentris pada tengah bentang. Pembebanan dilakukan secara bertahap per 1 kN dengan menggunakan jack hidrolis secara manual. Pengukuran lendutan dilakukan dengan menempatkan 3 buah dial pada titik tengah bentang dan pada kedua titik pembebanan. Pembacaan beban dan dial dilakukan pada setiap kenaikan beban 1 kN. Selain itu juga dilakukan pengamatan terhadap retakan yang terjadi. Retak yang muncul selanjutnya di sketsa. Untuk mengamati penjalaran retakan, maka dipilih 3 retakan yang utama untuk dianalisis.

### ESTIMASI KAPASITAS LENTUR

Gambar 9 mengilustrasikan asumsi dasar regangan penampang, tegangan dan gaya-gaya dalam pada analisis kapasitas lentur. Asumsi tersebut berdasar pada kondisi penampang bertulangan lemah ( $\rho_s < \rho_{sb}$ ) dan diperkuat dengan FRP. Berdasarkan teori lentur beton bertulang (James et. al. 2005), maka diasumsikan juga pada analisis ini bahwa terjadi hubungan regangan yang bervariasi secara linear pada penampang, rekatan yang



Gambar 9. Model tegangan-regangan

sempurna antara tulangan baja dan GFRP dengan beton serta regangan beton pada kondisi hancur adalah 0.003. Selain itu juga diasumsikan bahwa tegangan pada penampang tekan beton saat kapasitas ultimit adalah segiempat serta tulangan baja berperilaku elasto-plastis. Dalam analisis dianggap bahwa pengaruh terlepasnya rekatan pada penempelan GFRP diabaikan (dianggap terjadi rekatan sempurna). Oleh karena  $d_f > d_s$  maka regangan  $\epsilon_f$  akan lebih besar dari regangan baja  $\epsilon_s$ .

Momen lentur ultimit teoritis  $M_u$  pada balok dengan kondisi bertulangan lemah dan diperkuat dengan lembaran GFRP adalah bergantung pada jumlah penampang GFRP yang diberikan ( $A_f$ ) terhadap penampang GFRP pada kondisi berimbang ( $A_{fb}$ ). Dalam hal ini, kondisi berimbang merepresentasikan kondisi terjadinya kegagalan tekan pada beton bersamaan dengan kegagalan tarik pada GFRP. Dengan menggunakan asumsi-asumsi tersebut, maka luas penampang GFRP pada kondisi berimbang dapat dinyatakan oleh :

$$A_{fb} = \frac{0.85 f'_c b \beta_1 u_f \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) - A_s f_y}{f_{fu}} \quad (1)$$

Dengan menggunakan Pers. (1) sebagai batas luas penampang teoritis dari GFRP pada kondisi berimbang, maka kegagalan akan terjadi dalam bentuk kegagalan putus dari GFRP jika  $A_f < A_{fb}$  atau kegagalan tekan pada beton apabila  $A_f > A_{fb}$ . Harus dicatat bahwa  $A_{fb}$  dapat bernilai positif dan dapat pula bernilai negatif, tergantung pada jumlah tulangan tarik baja  $A_s$  yang ada. Untuk nilai negatif dari Pers.(1), maka  $A_f$  yang ada akan selalu lebih besar dari nilai  $A_{fb}$  yang mana mengindikasikan kegagalan tekan pada beton. Distribusi regangan untuk masing-masing kondisi gagal putus GFRP, kondisi berimbang dan kegagalan tekan beton diilustrasikan pada Gambar 9(b). Untuk penampang pada kondisi kegagalan tarik GFRP, maka tinggi blok tegangan tekan  $a$  dan momen ultimit  $M_u$  dapat secara sederhana di estimasi dengan menggunakan persamaan berikut :

$$a = \frac{A_f f_{fu} + A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad \text{for } A_f < A_{fb} \quad (2a)$$

$$M_u = A_f f_{fu} \left( d_f - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left( d_s - \frac{a}{2} \right) \quad \text{for } A_f < A_{fb} \quad (2b)$$

Untuk penampang dengan kegagalan tekan pada beton, regangan yang terjadi pada tulangan baja perlu untuk diketahui apakah telah meleleh ( $\epsilon_s > \epsilon_y$ ) atau belum meleleh ( $\epsilon_s < \epsilon_y$ ). Ini dapat di ketahui dengan menghitung luas penampang tulangan baja yang diperlukan untuk mencapai kondisi leleh  $A_{sy}$  dengan mengasumsikan regangan baja berada pada kondisi leleh  $\epsilon_{sy}$  dan beton pada kondisi regangan hancur  $\epsilon_{cu}$ . Bandingkan nilai  $A_{sy}$  tersebut dengan luas penampang tulangan yang ada  $A_s$ .

Table 3. Estimasi momen retak awal dan momen ultimit

Kode Balok	Retak Awal		Momen ultimit		Ratio (FH/BN)
	Mcr (kN.m)	Pcr (kN)	Mu (kN.m)	Pu (kN)	
BN	2.70	5.40	8.30	16.60	1.00
FH-1	2.70	5.40	27.55	55.10	3.32
FH-12	2.70	5.40	64.10	128.20	7.72
FH-3	2.70	5.40	64.10	128.20	7.72
FH-32	2.70	5.40	99.05	198.10	11.93

Dengan menggunakan Gambar 5(b), maka nilai  $A_{sy}$  dapat dihitung dengan :



$$A_{sy} = \frac{0.85 f'_c b \beta_1 d_s \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{sy}} \right) - A_f E_f \epsilon_{sy} \left( \frac{d_f}{d_s} \right)}{f_y} \quad (3)$$

Apabila  $A_s \leq A_{sy}$ , maka tegangan baja sama dengan tegangan leleh baja  $f_y$ . Demikian pula halnya, jika  $A_s > A_{sy}$ , maka tegangan yang terjadi pada tulangan baja  $f_s$  masih lebih kecil dari tegangan leleh baja  $f_y$ . Dalam hal ini tegangan yang terjadi pada tulangan baja  $f_s$  harus dihitung dengan berdasarkan prinsip hubungan kesetimbangan dan kompatibilitas.

Untuk kondisi dimana penampang direncanakan mengalami kegagalan tekan pada beton setelah baja tulangan meleleh, maka tinggi blok tegangan tekan beton  $a$ , tegangan pada GFRP  $f_f$  dan momen ultimit  $M_u$  dapat di hitung berdasarkan kompatibilitas dan kesetimbangan penampang sebagai berikut :

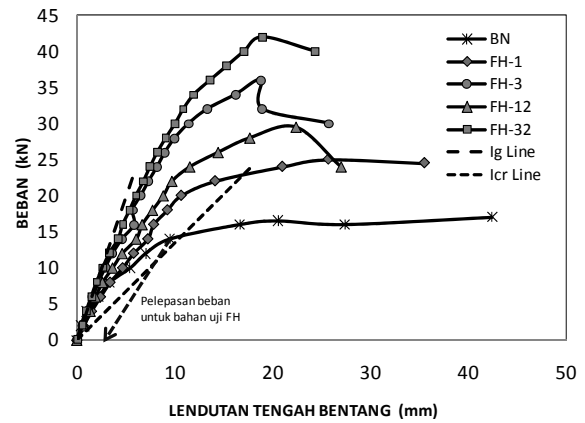
$$a = \frac{-(A_f E_f \epsilon_{cu} - A_s f_y) + \sqrt{(A_f E_f \epsilon_{cu} - A_s f_y)^2 + 4(0.85) f'_c b \beta_1 A_f E_f \epsilon_{cu} d_f}}{(2) 0.85 f'_c b} \quad (4)$$

$$f_f = E_f \epsilon_{cu} \left( \frac{d_f - a/\beta_1}{a/\beta_1} \right) \leq f_{fu} \quad (5)$$

$$M_u = A_f f_f \left( d_f - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left( d_s - \frac{a}{2} \right) \quad (6)$$

Table 3 menyajikan hasil estimasi momen ultimit untuk masing-masing bahan uji dengan menggunakan sifat-sifat material yang disajikan pada Table 2. Momen retak awal diestimasi menggunakan teori lentur elastis (James et.al. 2005). Untuk momen ultimit, estimasi dilakukan berdasarkan kondisi dimana terjadi kegagalan tekan pada beton setelah baja tulangan meleleh dengan menggunakan pers. (6). Diasumsikan bahwa terjadi rekatan sempurna antara GFRP dengan permukaan beton. Estimasi tersebut dilakukan tanpa memperhitungkan luas bidang rekatan yang ada sehingga estimasi momen untuk bahan uji FH-12 dan FH-3 yang memiliki luas penampang GFRP yang sama pada daerah momen konstan menunjukkan hasil momen ultimit yang sama pula. Perlu pula dicatat disini bahwa perhitungan dilakukan dengan asumsi faktor pengaruh penempelan setelah terjadinya retakan dan pelepasan tulangan pada balok diabaikan. Dengan demikian ada kemungkinan estimasi beban ultimit pada balok FH akan lebih tinggi dari beban ultimit hasil pengujian.

Dari Table 3 berdasarkan estimasi dapat diketahui bahwa untuk balok beton bertulang biasa (BN) memiliki beban ultimit sebesar 16.6 kN. Untuk balok dengan kekuatan GFRP akan terjadi peningkatan beban lentur ultimit balok. Untuk balok dengan 1 la-pis GFRP (FH-1), momen ultimit meningkat 3.32 kali dari balok BN, sedangkan untuk balok dengan 3 lapis (FH-12 dan FH-3), momen ultimit meningkat 7.72 kali dari balok BN. Untuk balok dengan kekuatan 5 lapis GFRP, momen ultimit meningkat se-banyak 11.93 kali dari balok BN. Sekali lagi perlu dicatat bahwa estimasi ini didasari pada asumsi tidak ada kegagalan rekatan antara GFRP dengan beton dan pengaruh penempelan GFRP setelah leleh tulangan diabaikan sebagaimana yang dilakukan pada studi ini.



Gambar 10. Hubungan Beban dan Lendutan

Table 4. Beban retak dan beban ultimit hasil pengujian

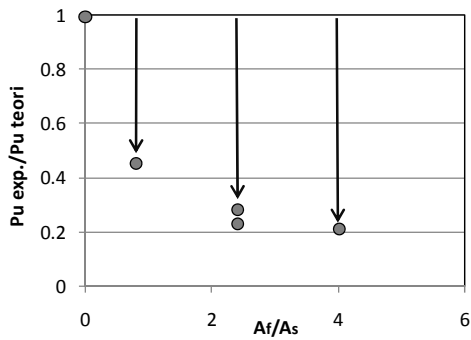
Kode Balok	Teoritis		Experiment		Ratio (FH/BN)exp.	Exp./Teoritis
	Pcr (kN)	Pu (kN)	Pcr (kN)	Pu (kN)		
BN #1	5.40	16.60	5.15	16.50	1.00	0.994
BN #2			5.15	16.50	1.00	0.994
FH-1 #1	5.40	55.10	5.15	25.00	1.52	0.454
FH-1 #2			5.15	27.50	1.67	0.499
FH-12 #1	5.40	128.20	5.28	29.50	1.79	0.230
FH-12 #2			5.28	30.00	1.82	0.234
FH-3 #1	5.40	128.20	5.28	36.00	2.18	0.281
FH-3 #2			5.28	34.00	2.06	0.265
FH-32 #1	5.40	198.10	5.41	42.00	2.55	0.212
FH-32 #2			5.41	42.00	2.55	0.212

## HASIL DAN PEMBAHASAN

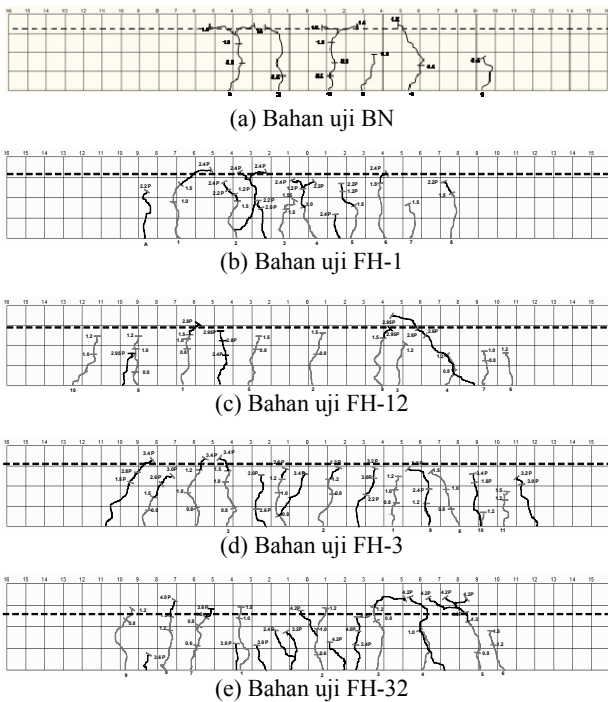
### Hubungan Beban dan Lendutan

Gambar 10 menunjukkan hubungan antara beban dan lendutan dari masing-masing bahan uji. Pada balok BN, awalnya balok pada kondisi tanpa retak dan kaku hingga batas tegangan tarik material beton. Saat beban dilanjutkan, retak lentur timbul akibat momen yang terjadi telah melampaui momen retak  $M_{cr}$  dari balok. Saat penampang telah retak, maka momen inersia penampang akan berkurang sehingga menyebabkan penurunan kekakuan dari balok. Hal di indikasikan oleh berkurangnya sudut kemiringan kurva beban-lendutan sebagaimana dapat diamati pada Gambar 10. Retakan ini akan terus berlanjut seiring dengan peningkatan beban yang diikuti oleh bertambahnya lendutan. Oleh karena balok BN didisain dalam kondisi bertulangan lemah (under-reinforcement), maka peningkatan beban akan menyebabkan tulangan tarik mencapai regangan leleh sebelum beton mencapai regangan hancur. Pelelehan tulangan akan mengakibatkan peningkatan lendutan yang besar dengan kenaikan beban yang kecil. Dari Gambar 10 dapat di perkirakan bahwa pelepasan tulangan mulai terjadi pada saat beban berada sekitar 14 kN. Untuk balok yang dipersiapkan untuk kekuatan (balok FH), beban dilepaskan kembali setelah mencapai titik leleh tulangan. Pelepasan beban menyebabkan timbulnya lendutan permanen sekitar 2 hingga 3 mm. Untuk balok BN, beban dilanjutkan terus yang menyebabkan tulangan akan terus meregang dan regangan beton akan mencapai regangan hancur tekan. Beban pada saat beton hancur terjadi saat beban mencapai 16.5 kN. Hancurnya beton merupakan penentu kapasitas ultimit penampang balok BN.

Pada balok FH, perkuatan dengan lembaran GFRP dilakukan setelah beban dilepaskan kembali. Pembebanan kembali pada balok FH yang telah diperkuat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10, menunjukkan bahwa secara umum kekakuan balok dapat dipertahankan hingga tingkat beban yang lebih tinggi dari beban leleh  $P_y$  balok BN. Kekakuan balok FH masih berada dalam batas antara garis  $I_g$  dan  $I_{cr}$ . Perlu di catat kembali bahwa, semua balok FH telah dibebani hingga mencapai beban 14 kN sebelum dilakukan penempelan lembaran GFRP. Pada masing-masing balok FH-1, FH-12, FH-3, FH-32, penurunan kekakuan balok mulai terjadi pada saat beban mencapai 20 kN, 22 kN, 32 kN, dan 34 kN. Berdasarkan pengamatan saat pengujian, penurunan ini disebabkan oleh retakan-retakan lentur pada sisi tarik yang terus melebar dan mulai menyebabkan timbulnya proses debonding atau kehilangan rekatan setempat antara lembaran GFRP dengan beton. Untuk bahan uji FH-1 dan FH-12, proses ini lebih awal terjadi khususnya pada daerah dimana perkuatan hanya 1 lapis. Beban yang terus ditingkatkan menyebabkan terjadinya debonding antara lembaran GFRP dengan permukaan beton sehingga balok mengalami penurunan kapasitas momennya. Beban ultimit pada masing-masing balok FH -1, FH-12, FH-3 dan FH-32 adalah 25 kN, 30 kN, 36 kN dan 42 kN.



Gambar 11. Tingkat deviasi antara hasil test dengan estimasi teoritis



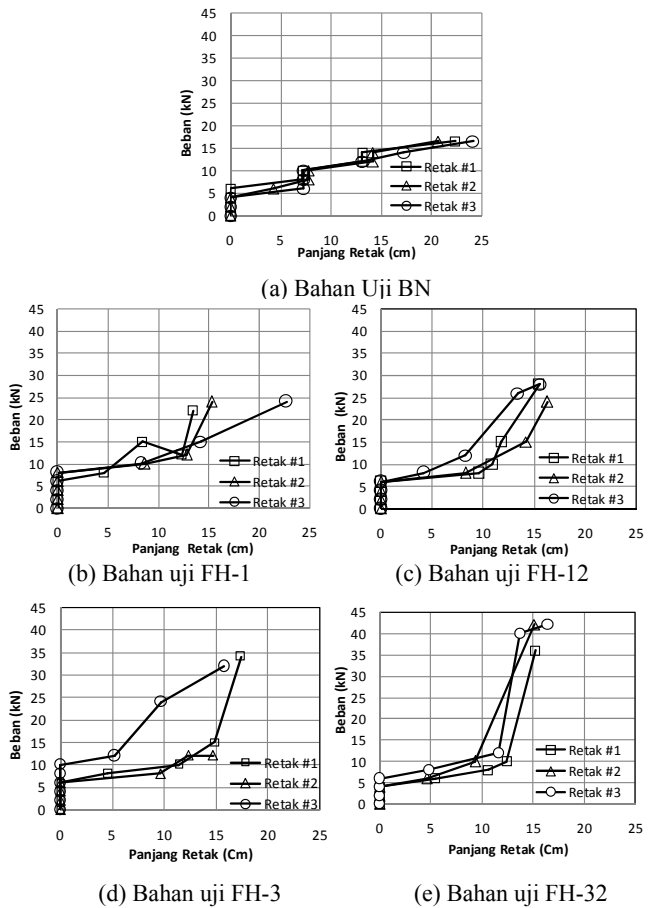
Gambar 12. Pola Retak

## Kapasitas Lentur

Table 4 menyajikan ringkasan beban pada saat retak awal dan saat beban ultimit dari masing-masing balok normal (bahan uji BN) dan balok yang diperkuat (bahan uji FH). Secara umum beban retak awal untuk semua bahan uji hasil pengujian memiliki rasio kesamaan yang cukup baik jika dibandingkan dengan estimasi teoritis.

Beban ultimit balok BN hasil pengujian dicapai pada tingkat beban 16.5 kN. Jika dibandingkan dengan estimasi teoritis dengan menggunakan asumsi regangan dan tegangan yang telah dipaparkan diatas, menunjukkan hasil yang cukup baik dengan rasio kesamaan 99.4%. Hal ini mengindikasikan bahwa bahan uji BN berperilaku sebagaimana diasumsikan pada estimasi teoritis.

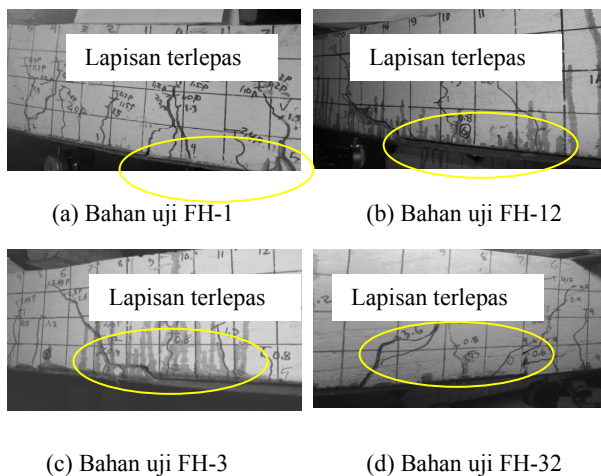
Untuk bahan uji balok yang di perkuat dengan GFRP setelah dibebani hingga kondisi tulangan meleleh, secara umum memperlihatkan momen ultimit yang lebih tinggi dari bahan uji BN. Untuk bahan uji FH-1, beban ultimit mengalami peningkatan menjadi rata-rata 26 kN atau naik sebesar 1.6 kali momen ultimit bahan uji BN. Dengan menambahkan 2 lapis GFRP dengan panjang setengah bentang balok seperti pada bahan uji FH-12, beban ultimit balok setelah di perkuat naik hingga mencapai 30 kN atau naik sebesar 1.8 kali momen ultimit bahan uji BN.



Gambar 13. Pola penjalaran retak

Apabila penambahan lapisan dilakukan secara penuh seperti pada bahan uji FH-3, maka beban ultimit naik hingga 35 kN atau naik sekitar 2.12 kali beban ultimit bahan uji BN. Dari perbandingan hasil pengujian bahan uji FH-12 dan FH-3 terindikasi bahwa panjang lembaran GFRP turut mempengaruhi beban ultimit balok hasil perkuatan. Hal ini dapat dipahami karena dengan lapisan yang lebih panjang berarti memiliki bidang rekatan yang lebih luas sehingga tegangan rekatan yang terjadi antara lembaran GFRP dengan permukaan beton menjadi lebih kecil sehingga dapat menunda terjadinya debonding (kehilangan rekatan). Pada bahan uji FH-32 yang diperkuat oleh 3 lembaran GFRP pada sepanjang bentang ditambah dengan 2 lembaran sepanjang setengah bentang yang ditempelkan secara sentris pada tengah bentang menunjukkan hasil bahwa beban ultimit naik hingga mencapai 42 kN atau 2.55 kali dari momen ultimit bahan uji BN.

Walaupun efek perkuatan lembaran GFRP pada balok yang telah dibebani hingga tulangan meleleh dapat terlihat dalam bentuk peningkatan beban ultimit dibanding dengan bahan uji BN, namun jika dibandingkan dengan beban ultimit teoritis, peningkatan beban hasil pengujian masih jauh dibawah beban teoritis. Ada kecenderungan bahwa semakin tinggi jumlah perkuatan yang diberikan maka akan semakin besar selisih antara beban ultimit hasil uji dengan beban ultimit teoritis. Pola kecenderungan tersebut disajikan secara non-dimensi seperti pada Gambar 11 dalam bentuk hubungan antara ratio beban ultimit hasil uji ( $Pu_{exp}$ ) dengan beban ultimit estimasi teoritis ( $Pu_{teori}$ ) terhadap ratio antara luas penampang lembaran GFRP ( $A_f$ ) dengan luas penampang tulangan baja ( $A_s$ ). Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa untuk bahan uji dengan 1 lapis perkuatan (FH-1) memiliki beban ultimit sekitar 45% dari beban ultimit teoritis. Untuk bahan uji dengan 3 lapis perkuatan (FH-3 dan FH-12) memiliki beban ultimit rata-rata 25% dari beban ultimit teoritis. Untuk bahan uji dengan 5 lapis perkuatan (FH-23) memiliki beban ultimit sekitar 21% dari beban ultimit teoritis. Phenomena ini sudah diprediksi sebelumnya akibat dampak dari telah melelehnya tulangan serta pengaruh keberadaan retakan-retakan yang sudah ada pada saat perkuatan diberikan. Selisih tersebut juga diakibatkan oleh proses hilangnya rekatan antara lembaran GFRP dengan permukaan beton sebelum beton mencapai tegangan hancurnya. Pada estimasi teoritis, perkuatan diberikan dengan asumsi lebaran GFRP bekerja penuh tanpa terjadinya kehilangan rekatan (debonding) hingga tegangan putus  $f_{fu}$ . Berdasarkan fenomena ini, maka perlu dilakukan studi lebih lanjut terkait dampak tulangan yang telah meleleh dan retakan terhadap kekuatan ultimit perkuatan serta studi untuk peningkatan kekuatan rekatan lembaran GFRP terhadap permukaan beton, yang merupakan bagian dari rangkaian penelitian yang sedang dilakukan oleh penulis.



Gambar 14. Kegagalan rekatan dari bahan uji

## Pola Retak dan Pola Kegagalan

Secara umum pola retak sebagaimana di tunjukkan pada Gambar 12 adalah merupakan retak lentur dan beberapa merupakan retak lentur-geser. Pada balok BN, retakan mulai terjadi saat tegangan yang terjadi melebihi tegangan tarik material beton pada saat beban berada pada level sekitar 6 kN. Penambahan beban akan menyebabkan menjalarnya retakan mengarah keatas menuju garis netral balok serta munculnya retakan baru. Pada balok FH, pembebanan balok setelah dilakukan perkuatan menyebabkan timbulnya retakan-retakan baru dan juga menjalarnya retakan yang sebelumnya sudah terjadi pada saat pembebanan tahap pertama. Secara umum jumlah bidang retakan lebih banyak pada balok dengan perkuatan dibanding retakan pada balok BN.

Monitoring terhadap penjalaran 3 retak pada masing-masing bahan uji disajikan pada Gambar 13. Nampak dapat diamati pada balok BN bahwa retak mulai menjalar saat beban berada pada level sekitar 6 kN. Retakan terus menjalar hingga tercapainya beban ultimit balok. Pada balok FH dapat diamati bahwa retakan mulai menjalar setelah beban berada pada level yang sedikit lebih tinggi dari beban retak awal balok BN. Secara umum retak terus menjalar hingga tercapainya beban ultimit. Walaupun ada beberapa retak yang cenderung berhenti menjalar seperti pada balok FH-1 saat beban mencapai sekitar 15 kN.

Berdasarkan pola retak serta fenomena penjalaran retak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13, dapat disimpulkan bahwa balok yang diperkuat setelah terjadinya pelepasan tulangan masih berperilaku serupa seperti balok dengan asumsi rekatan penuh. Rekatan yang baik antar tulangan dan lembaran GFRP dengan beton memungkinkan dapat berkembangnya mekanisme lentur balok beton bertulang.

Gambar 14 memperlihatkan photo-photo bahan uji yang telah mengalami kerusakan. Semua bahan uji gagal dalam bentuk kegagalan rekatan antara lembaran GFRP dengan permukaan beton. Lepasnya rekatan lembaran GFRP dari permukaan beton merupakan salah satu penyebab rendahnya beban ultimit dibandingkan dengan estimasi secara teori. Proses terlepasnya lembaran dimulai dari titik-titik terjadinya retak. Akibatnya terjadi konsentrasi tegangan rekatan (*bond stress*) pada titik yang lain. Hal ini memicu terjadinya proses kehilangan rekatan yang menjalar menuju ke ujung lembaran GFRP. Juga teramati pada saat pengujian bahwa retakan lentur-geser menyebabkan terdorongnya lembaran GFRP untuk terpisah dari permukaan beton. Dorongan ini akibat gaya geser yang timbul pada retakan diluar bentang lentur murni. Ini mengindikasikan bahwa terlepasnya rekatan antara lembaran GFRP dengan permukaan beton bukan saja disebabkan oleh tegangan rekatan longitudinal tetapi juga disebabkan oleh tegangan rekatan transversal.

## KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisis, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kekakuan balok yang diperkuat dengan lembaran GFRP tidak terlalu dipengaruhi oleh kondisi awal dimana tulangan baja telah meleleh dan adanya retakan akibat pembebanan awal sebelum perkuatan. Hubungan beban-lendutan balok yang diperkuat memperlihatkan perilaku cukup baik walaupun memiliki karakteristik yang lebih getas dibanding balok beton bertulang biasa.
2. Perkuatan menggunakan lembaran GFRP pada balok beton bertulang yang telah mengalami leleh tulangan memiliki beban ultimit yang lebih tinggi dari balok beton bertulang biasa. Namun jika dibandingkan dengan beban ultimit teoritis, beban ultimit hasil pengujian masih lebih rendah.
3. Pengaruh melelehnya tulangan dan adanya retakan pada saat perkuatan dengan lembaran GFRP memberi pengaruh pada turunnya beban ultimit balok dibandingkan dengan estimasi beban ultimit dengan menggunakan teori balok beton ber-

tulang. Sehingga perlu untuk dilakukan studi lebih lanjut terkait pengaruh leleh tulangan dan keberadaan retak terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan lembaran GFRP.

4. Penurunan beban ultimit dibanding dengan estimasi teoritis juga dipicu oleh terjadinya kehilangan rekatan lebih awal sebelum beton mencapai tegangan hancurnya.
5. Pola retak pada balok yang diperkuat dengan lembaran GFRP menggambarkan mekanisme lentur beton bertulang yang berperilaku seperti asumsi beton bertulang dengan rekatan penuh.
6. Rekatan antara lembaran GFRP dengan permukaan beton merupakan faktor penentu beban ultimit balok. Terlepasnya rekatan menyebabkan penampang kehilangan kapasitas momennya lebih awal sebelum beton mencapai tegangan hancurnya.
7. Ada potensi bahwa kehilangan daya rekatan bukan saja disebabkan oleh tegangan rekatan longitudinal tetapi juga di picu oleh tegangan rekatan transversal. Tegangan rekatan transversal timbul akibat gaya geser yang terjadi pada bidang-bidang retakan diluar bentang lentur murni.
8. Perlu untuk dikembangkan metode perkuatan kemampuan rekatan untuk meningkatkan efektivitas perkuatan yang menggunakan lembaran bahan FRP.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Universitas Hasanuddin atas dana hibah penelitian unggulan Universitas Hasanuddin TA 2012 serta kepada LPPM Universitas Hasanuddin atas dukungan dan bantuannya dalam merealisasikan dana penelitian dimaksud. Juga ucapan terima kasih diberikan kepada Tyfo Indonesia atas dukungan material lembaran GFRP dan asistensi teknis pemasangan. Secara khusus ucapan terima kasih diberikan kepada Laboratorium struktur dan jembatan Kyushu University atas kerjasama dan saran-saran teknis sehingga studi ini dapat terlaksana dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arduini, M., and Nanni, A. (1997). "Parametric study of beams with externally bonded FRP reinforcement." *ACI Structural Journal*, V.94, No.5, pp.493-501.
- Christos Zeris, John Anastasakis, and John Kyriakidis. (2009). "Investigation of monotonic and cyclic response of fiber reinforced polymer strengthened beams." *ACI Structural Journal*, V.106, No.1, pp.3-13.
- Dong-Uk Choi, Thomas H.K.Kang, Sang-Su Ha, Kil-Hee Kim and Asook Kim. (2011). "Flexural and bond behavior of concrete beams strengthened with hybrid carbon-glass fiber reinforced polymer sheet." *ACI Structural Journal* V.108, No.1, pp.90-98.
- Jae-Il Sim and Keun-Hyeok Yang. (2009). "Flexural behavior of reinforced concrete columns strengthened with wire rope and T-Plate units." *ACI Structural Journal*, V.106, No.5, pp.697-705.
- James K.Wight and James G MacGregor (2005). "Reinforced concrete mechanics and design." Sixth Edition, Pearson
- Joseph R.Y., Shawn P.G., David W.D., Jason J.M. (2007). "Flexural behavior of concrete beams strengthened with near-surface-mounted CFRP strips." *ACI Structural Journal* V.104, No.4, pp.430-437.

- Mahmoud T.E., and Joseph W.T. (2000). "Analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates." *Journal. Structure. Engineering, ASCE*, pp.684-691.
- Marco Arduini and Antonio Nanni. (1997). "Behaviour of precracked RC beams strengthened with carbon fiber sheets", *Journal of Composite for Construction, ASCE, V.1. No.2. pp.63-70.*
- Mehdi T.K., and Chris j.B. (2011). "Fiber-reinforce polymer bond test in presence of steel and cracks." *ACI Structural Journal. V.108. No.6. pp.735-744.*
- Nakamura, M., Skai, H., Yagi, K., and Tanaka, T. (1996). "Experimental studies on the flexural reinforcing effect of carbon fiber sheet bonded to reinforced concrete beam". *Proc. 1<sup>st</sup> Inst. Conf. on Compos. in Infrastructure, ICC 96*, pp.760-773.
- Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. (1991). "RC beams strengthening with GFRP plates: analytical and parametric studies." *Journal of Structural. Engineering., ASCE, V.117. No.11. pp.3417-3433.*
- Saadatmanesh, H., and Malek, A.M. (1998). "Design guidelines for flexural strengthening of RC beams and FRP plates." *Journal of Composite for Construction., ASCE, V.2. No.4. pp.158-164.*
- Sharif, A., Al-Sulaimani, G.J., Basunbul, I.A., Baluch, M.H., and Ghaleb, B.N. (1994). "Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates." *ACI Structural Journal. V.91. No.2. pp.160-168.*
- Wai-fah Chen and Charles Scawthorn. (2002). "Earthquake Engineering Handbook." CRC Press.
- Yu-Fei Wu, Jun-Hui Yan, Ying-Wu Zhou and Yan Xiao. (2010). "Ultimate strength of reinforced concrete beam retrofitted with hybrid bonded fiber reinforced polymer." *ACI Structural Journal. V.107.No.4. pp451-460.*

## NOTASI

- $a_c$  = Tinggi blok tegangan segiempat Whitney (mm)
- $A_F$  = Luas penampang FRP (mm<sup>2</sup>)
- $A_{FD}$  = Luas penampang FRP pada kondisi berimbang (mm<sup>2</sup>)
- $A_s$  = Luas penampang tulangan baja (mm<sup>2</sup>)
- $A_y$  = Luas penampang tulangan baja untuk mencapai kondisi leleh pada saat kondisi beban berimbang antara FRP dan beton (mm<sup>2</sup>)
- $b$  = Lebar balok (mm)
- $d$  =  $d_s$  = Tinggi efektif tulangan baja (mm)
- $d_f$  = Tinggi efektif FRP dari serat tekan terluar (mm)
- $E_F$  = Modulus elastisitas FRP (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_c$  = Kuat tekan karakteristik beton (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_{Fu}$  = Tegangan tarik ultimit FRP (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_y$  = Tegangan leleh tulangan baja (N/mm<sup>2</sup>)
- $I_{cr}$  = Momen inersia penampang retak beton bertulang (mm<sup>4</sup>)
- $I_g$  = Momen inersia penampang beton bertulang (mm<sup>4</sup>)
- $M_u$  = Momen ultimate penampang (N.mm)
- $\beta_1$  = Koefisien koreksi tinggi blok tegangan segiempat Whitney
- $\epsilon_{cu}$  = Regangan tekan ultimate beton
- $\epsilon_{Fu}$  = Regangan tarik ultimate FRP
- beban berimbang antara FRP dan beton (mm<sup>2</sup>)
- $\epsilon_{sy}$  = Regangan tarik tulangan baja pada saat leleh