

Kapasitas Penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (Cfrp) Berlapis Banyak Terhadap Perkuatan Lentur Struktur Balok Beton Bertulang

Sumargo^a, Ujang Ruslan^b, Mirza Ghulam R.^c

^aJurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : sumargo@polban.ac.id

^bJurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
Email : ruslanjts@gmail.com

^cMahasiswa Magister Terapan Rekayasa Infrastruktur, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
Email : mirzaghulamrifqi99@gmail.com

Carbon Fiber Reinforced Polymer (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. Seiring dengan tingkat kerusakan struktur yang membutuhkan perkuatan lebih untuk meningkatkan kapasitas, maka dibutuhkan alternatif jumlah lapisan CFRP yang efektif. Riset ini secara intensif melakukan pengujian terhadap kapasitas penggunaan CFRP berlapis banyak terhadap balok beton bertulang. Pengujian dilakukan dengan pembebanan secara statis dan sub-scale terhadap 18 balok beton dengan ukuran 100 x 150 x 750 mm. Spesimen akan dibagi dalam 6 (enam) kategori yaitu balok normal tanpa lapisan CFRP dan balok dengan 1, 2, 3, 4 dan 5 lapis CFRP. Uji yang dilakukan adalah uji lentur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan jumlah lapis CFRP pada daerah lentur tidak mengakibatkan peningkatan daktilitas beton namun terdapat peningkatan kuat lentur dari beton normal yang dilapisi CFRP dari lapis ke-1 hingga lapis ke-3 dan penambahan kuat lentur tidak bersifat linier. Perkuatan lentur dengan CFRP mengakibatkan kerusakan bergeser ke wilayah geser sehingga perlu dipertimbangkan perkuatan pada wilayah geser. Pada penambahan jumlah lapis CFRP harus diperhatikan mengenai keseimbangan antara kekuatan beton dengan jumlah lapis CFRP karena pada jumlah lapis ke-4 dan ke-5 beton hancur terlebih dahulu sebelum CFRP mengalami kerusakan.

Kata kunci : Lapisan CFRP, balok, perkuatan lentur.

1. 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.

CFRP banyak diaplikasikan sebagai perkuatan lentur (*flexural strengthening*) dan geser (*shear strengthening*) pada struktur balok dengan menggunakan serat fiber dengan cara merekatkan bahan *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) pada balok beton dengan menggunakan *epoxy resin*. Penggunaan CFRP seperti disyaratkan oleh ACI 440.2R-02 (*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*) terdiri dari satu sampai tiga lapis.

Berikut ini disampaikan permasalahan yang akan mendukung riset yang diusulkan :

- Berapa besar kapasitas lentur yang dihasilkan oleh penggunaan lapisan sesuai syarat ACI 440.2R-02 yaitu satu, dua dan tiga lapis CRFP pada kekuatan lentur balok ?
- Berapa besar kapasitas lentur yang dihasilkan jika penggunaan lapisan melebihi syarat ACI 440.2R-02 yaitu empat dan lima lapis CRFP pada kekuatan lentur balok ?
- Berapa besar kapasitas lentur balok jika tanpa kekuatan CFRP ?
- Sejauh mana efektivitas jumlah lapisan CRFP pada kekuatan lentur balok ?

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur Balok

Perencanaan balok beton bertulang bertujuan agar suatu balok yang direncanakan mampu menahan momen lentur murni, gaya-gaya lintang dan momen puntir yang bekerja cukup kuat. Menentukan dimensi merupakan langkah awal dalam perencanaan balok, penentuan tinggi (h) minimum balok dengan dua tumpuan sederhana adalah $L/16$ dan lebar (b) balok menggunakan rumus $\frac{1}{2} h t \sim \frac{2}{3} h t$ [9].

Perancangan struktur beton bertulang berdasarkan Referensi [6] yaitu mengenai hubungan antara tegangan tekan beton dan regangan beton boleh diasumsikan persegi (*equivalen*) yang didefinisikan sebagai berikut:

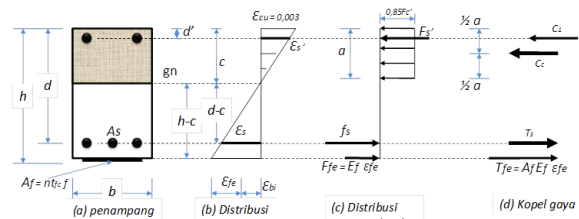
- Tegangan beton sebesar $0.85f'_c$ harus diasumsikan pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang dan garis lurus yang sejajar dengan sumbu netral berjarak $a = \beta_1 c$ dari serat yang mengalami regangan maksimum.
- Jarak c dari serat dengan regangan maksimum kesumbu netral harus diukur dalam arah tegak terhadap sumbu tertentu.
- Faktor β_1 harus diambil sebesar 0.85 untuk kuat tekan beton f'_c hingga sama dengan 30 MPa. Untuk kekuatan > 30 MPa, β_1 harus direduksi secara menerus sebesar 0.008 untuk setiap kelebihan tegangan 1 MPa, tetapi β_1 tidak boleh kurang dari 0.65.

2.7 Metode Perkuatan Balok dengan CFRP

1. 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)*.

Dalam analisis penampang sebagai dasar perhitungan untuk mendapatkan M_n pada kondisi lentur murni dapat diturunkan dari persamaan kesetimbangan gaya-gaya dalam sebagai berikut :



Gambar 1. Diagram regangan-tegangan balok dengan perkuatan CFRP

$$\sum H = 0$$

$$T_s + T_{fe} = C_c + C_s \quad (1.1)$$

Keterangan:

T_s = gaya tarik baja tulangan

T_{fe} = gaya tarik sumbangan 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 *Carbon Fiber Reinforced Polymer* masih perlu dikalikan faktor reduksi $\psi_f = 0.85$, sehingga momen nominal total M_n dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{a}{2} \right) \quad (1.2)$$

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 $\eta B = \frac{M_n}{M_{no}} \leq 2$.

2. Perkuatan Geser

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:

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi V_f) \quad (1.3)$$

Keterangan:

ϕ = faktor reduksi kekuatan

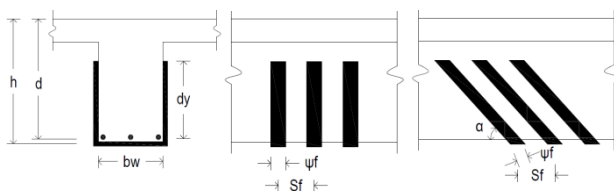
$\phi = 0.65$ ψ = faktor reduksi tambahan untuk CFRP

$\psi = 0.95$ 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 :

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fs} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{S_f} \quad (1.4)$$



Gambar 2. Perkuatan geser dengan CFRP

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 [1].

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.

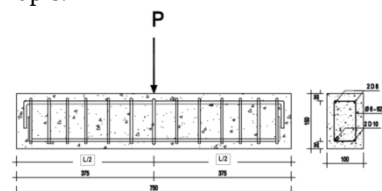
Perkuatan FRP berlapis banyak belum mampu mencapai kapasitas lentur ultimate dan perkuatan FRP pada balok di wilayah geser merubah karakteristik kegagalan beton, dari kegagalan lentur menjadi keruntuhan secara mendadak [2].

3. METODA PENGUJIAN

Perkuatan pada struktur balok dengan menggunakan CFRP sudah disyaratkan dalam [3], dengan tingginya tingkat kerusakan struktur gedung dan jembatan utamanya pada elemen balok membutuhkan peningkatan kapasitas dengan menggunakan CFRP hingga 5 (lima) lapis. Dengan adanya peningkatan jumlah lapisan CFRP melebihi yang disyaratkan maka perlu dilihat seberapa besar kontribusi peningkatan kapasitas lentur, geser dan torsi pada balok akibat beban statik dan dinamik yang bekerja pada struktur.

3.1 Properti Balok Uji

- Skala pengujian adalah Sub-scale dengan benda uji berupa balok berukuran dimensi 100 x 150 x 750 mm, dengan pembebanan statis.
 - Uji yang dilakukan adalah uji lentur terhadap spesimen A, B, C, D, E dan F.
 - Mutu beton yang digunakan adalah 20 MPa. Tulangan beton rangkap dengan diameter tulangan longitudinal D10 mm dan D8 mm serta tulangan transversal 6 mm dengan tegangan leleh 400 MPa. 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 3. Ilustrasi beban pada sampel balok

4. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Identifikasi Jenis CFRP

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) menawarkan beberapa keunggulan yang tidak dimiliki oleh baja tulangan yaitu : mempunyai kuat tarik yang jauh lebih tinggi dari kuat tarik baja tulangan, yaitu sebesar 3500 MPa, tidak mengalami korosi karena terbuat dari bahan non logam, mempunyai penampang yang kecil dan ringan dengan berat 1,5 g/cm³, serta mudah pemasangannya.

4.2 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 tes-tes yang harus dilakukan antara lain adalah :

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

4.3 Campuran Beton

Perencanaan campuran beton merupakan suatu hal yang kompleks 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.

Tabel 1. Resume Hasil Uji Material/Bahan

	Pasir	Kerikil	Semen
Berat Jenis	2.34	2.53	2.98
Kadar Air	6.16 %	1.46 %	-
Kadar Lumpur	5.80 %	1.41 %	-
Berat Isi	1.15 gr/l	1.15 gr/l	-
Analisa Ayakan (Fine Modulus)	2.70 (Zona 1)	7.11 (Zona 1)	-
Kadar Air Lapangan	8.47 %	3.30 %	-
Penyerapan air	6.89 %	2.74 %	-

Dari hasil pengujian material, didapatkan karakter/sifat material yang dibutuhkan dalam perhitungan proporsi campuran material (*mix design*). Dari hasil tersebut didapatkan proporsi campuran sebagai berikut :

Tabel 2. Hasil perhitungan Mix

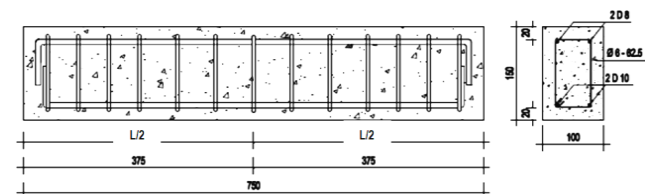
Design

Nama Bahan	Komposisi 1 m ³ Beton	
	Kebutuhan Bahan (Kg)	Perbandingan Volume
Semen	342	1
Agregat Halus	729	2.11
Agregat Kasar	1,088	3.17

4.4 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 400 MPa.

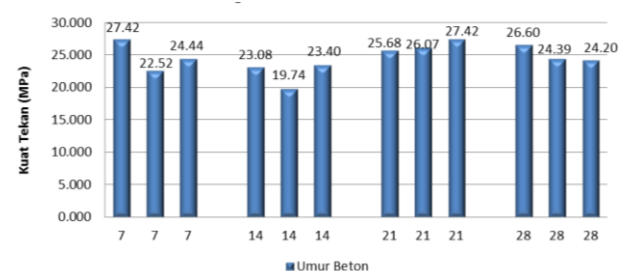
Tulangan transversal/senggang didesain dengan diameter 6 mm polos dengan kuat tarik (f_y) 240 MPa dengan jarak tulangan transversal adalah 62.50 mm. Selimut beton didesain dengan



ketebalan 20 mm. Desain balok lebih detail digambarkan sebagai berikut.

Gambar 4. Desain Sampel Balok Beton Bertulang

1.5 Uji Kekuatan Beton

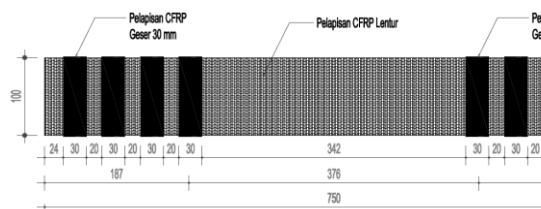


Gambar 5. Perbandingan Kuat Tekan Beton Berdasarkan Umur Beton

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/cm², kuat tekan beton pada umur 14 hari adalah 22,078 MPa atau 225,281 Kg/cm², kuat tekan beton pada umur 21 hari adalah 26,396 MPa atau 269,343 Kg/cm², sedangkan kuat tekan beton pada umur 28 hari adalah 25,066 MPa atau 255,780 Kg/cm². Dari keseluruhan benda uji, didapatkan rata-rata kekuatan beton adalah 24,584 MPa atau setara dengan 250,862 Kg/cm².

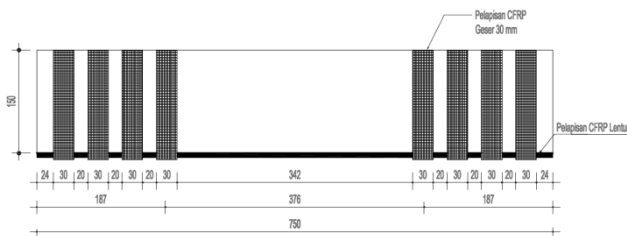
4.6 Pelapisan Sampel Balok Beton dengan CFRP

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.



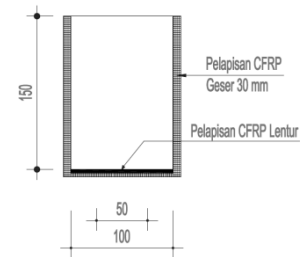
Gambar 6. Tampak Bawah Model

Balok yang Sudah dilapisi dengan CFR



Gambar 7. Tampak Samping

Model Balok yang Sudah dilapisi dengan CFRP



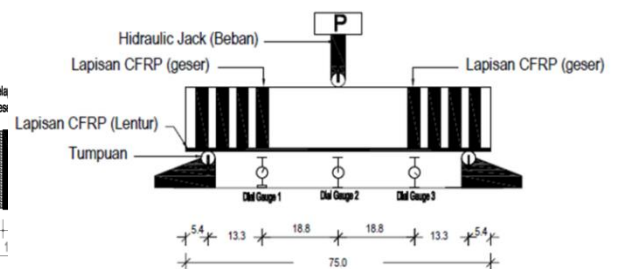
Gambar 8. Penampang Model

Balok yang Sudah dilapisi dengan CFRP

4.2 Penyiapan alat dan pengujian sampel terhadap lentur.

4.2.1 Penyiapan Alat

Untuk mencari besarnya momen di tengah bentang berdasarkan kesetimbangan gaya, $M = PL/4$ (Gambar 9), sedangkan untuk mengetahui besarnya lendutan, dipasang *dial gauge* di posisi tumpuan (*dial gauge* 1 dan *dial gauge* 3) dan lapangan (*dial gauge* 2). Untuk memperoleh daktilitas kurvatur, maka nilai kurvatur yang terjadi dibagi dengan nilai kurvatur leleh.



4.2.2 Pembahasan Uji Lentur

Metode pengujian ini dimaksudkan sebagai acuan dan pegangan dalam pengujian laboratorium kuat lentur benda uji balok beton memakai gelagar sederhana dengan system beban titik di tengah. Sedangkan tujuan dari metode ini adalah untuk mendapatkan parameter kuat lentur dari hasil pengujian di laboratorium.

Pengujian balok beton bertulang ini dilakukan dengan memberikan satu buah beban terpusat yang berada pada tengah bentang seperti pada Gambar 9. Beban ditingkatkan secara bertahap (*incremental*) dengan peningkatan 5 kN sampai balok mengalami keruntuhan. Data

yang diambil dalam penelitian ini adalah model keruntuhan balok dan nilai beban dan lendutannya. Untuk hasil perhitungan kuat lentur, dapat dilihat pada Tabel 3.

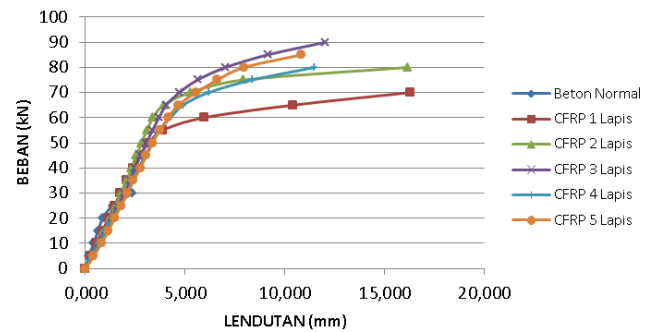
Tabel 3. Perhitungan Kuat Lentur Balok

Balok Uji	P (N)	L (mm)	b (mm)	d (mm)	σ_p (Mpa)
Beton Normal	10,000	642	100	150	0.021
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

Tabel 3 menunjukkan kuat lentur balok mengalami kenaikan dari beton normal, beton terlapisi CFRP 1 lapis, 2 lapis dan 3 lapis namun mengalami penurunan kuat lentur pada lapis keempat dan mengalami kenaikan kembali pada lapis kelima. Penambahan kuat lentur balok pada lapis kelima masih lebih rendah dibanding dengan CFRP lapis ketiga. Pengujian ini membuktikan bahwa pemakaian jumlah lapis CFRP yang efektif maksimal adalah CFRP 3 (tiga) lapis.

4.8 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 Gambar 10 dan disimpulkan dalam Tabel 4.



Gambar 10 Kurva Beban vs Lendutan rata-rata beton pada bentang tengah

Gambar 10 menunjukkan lendutan maksimum balok beton bertulang yang dialami oleh balok beton dengan 1 lapis CFRP yaitu 16.277 mm, diikuti oleh CFRP 2 lapis yaitu 16.150 mm, CFRP 3 lapis yaitu 12.034 mm, CFRP 4 lapis yaitu 11.486 mm, CFRP 5 yaitu 10.815 mm dan beton normal dengan nilai lendutan 2.360 mm. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan lapisan CFRP tidak linier dengan nilai lendutan pada balok beton bertulang. Sedangkan pada nilai pembebanan, balok beton dengan CFRP 3 lapis menunjukkan nilai yang tertinggi, yaitu 90 kN, selanjutnya disusul oleh CFRP 5 lapis (85 kN), CFRP 4 lapis dan 2 lapis (80 kN) serta CFRP 1 lapis (70 kN).

Dari hasil perhitungan daktilitas yang ditunjukkan oleh tabel 4, menunjukkan bahwa nilai daktilitas beton mengalami kenaikan seiring dengan penambahan jumlah lapisan CFRP pada 1 lapis CFRP namun mengalami penurunan secara bertahap hingga CFRP 5 lapis. Dari sisi daktilitas, CFRP dengan 1 lapis merupakan jumlah lapisan yang efektif.

Tabel 4. Pembacaan Daktilitas dari Grafik Beban (kN) vs Lendutan (mm)

Balok Uji	Δe	Δy	μ
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

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 CFRP sempat 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 cengkaman CFRP wilayah geser. Hal ini terjadi hingga beton hancur dan lapisan CFRP pada wilayah lentur terlepas dari bagian beton.

4.9 Pola Retak Benda Uji

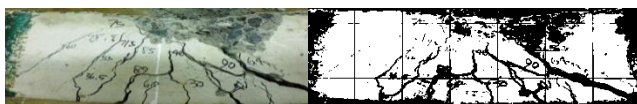
Pola retak digambarkan secara manual dan angka yang terdapat pada pola keretakan menunjukkan urutan beban dimana retak tersebut terjadi. Angka paling kecil menunjukkan retak yang pertama kali terjadi dan angka terbesar menunjukkan retak pada kondisi sesaat sebelum runtuh.



(a) Pola Keruntuhan Pada Beton Normal



(b) Pola Keruntuhan pada Beton yang dilapisi dengan CFRP 1 Lapis



(c) Pola Keruntuhan pada Beton yang dilapisi dengan CFRP 2 Lapis



(d) Pola Keruntuhan pada Beton yang dilapisi dengan CFRP 3 Lapis



(e) Pola Keruntuhan pada Beton yang dilapisi dengan CFRP 4 Lapis



(f) Pola Keruntuhan pada Beton yang dilapisi

dengan CFRP 5 Lapis

Gambar 11. 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.

5 KESIMPULAN

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

- Seiring penambahan lapis Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) pada daerah lentur, tidak mengakibatkan penambahan daktilitas beton.
- Penambahan lapis Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) pada wilayah lentur, berakibat pada kerusakan pada wilayah geser, sehingga perlu dipertimbangkan perkuatan pada wilayah geser.
- Penambahan Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) mempengaruhi pola keruntuhan, dari keruntuhan geser menjadi keruntuhan lentur.
- Dari hasil pengujian lentur, terdapat kenaikan kuat lentur balok beton dari beton normal dibandingkan dengan beton yang dilapisi Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP), dengan nilai kenaikan maksimal terjadi pada CFRP lapis 3.
- Hasil penambahan Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) tidak bersifat linier terhadap penambahan kuat lentur balok.
- Terdapat sumbangan cengkaman dari prime (resin) pada wilayah geser terhadap Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) lentur, padahal seharusnya geser dan lentur bekerja sendiri-sendiri.
- Mutu beton harus seimbang dengan jumlah

lapisan Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) yang diaplikasikan. Hasil eksperimen pada Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) lapis 4 (empat) dan 5 (lima) menunjukkan bahwa beton hancur terlebih dahulu sebelum Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) mengalami kerusakan.

- h. Peningkatan kemampuan beton dalam menerima beban bertambah secara linier hingga CFRP lapis 3 dan berkurang kembali pada lapis 4 dan 5. Perbandingan kekuatan terhadap beton normal adalah CFRP 1 lapis 133%, CFRP 2 lapis 166%, CFRP 3 lapis 200%, CFRP 4 lapis 166% dan CFRP 5 lapis 183%.
- i. Arah retakan pada lapis 3-5 adalah diagonal dari tumpuan yaitu serat CFRP geser menuju wilayah lapangan yang mengarah pada pusat beban.

UCAPAN TERIMA KASIH

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

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdel-Jaber MS, Shatanawi AS, Abdel-Jaber Mu'tasim.(2007). "Guidelines for Shear Strengthening of Beams Using Carbon Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Plates".Jordan Journal of Civil Engineering, vol.1 No.4.
- [2] Ahmed Ehsan, Sobuz HR, Sutan NM.(2011)."Flexural Performance of CFRP Strengthned RC Beams with Different Degrees of Strengthening Schemes". International Journal of the Physical Sciences, vol.6.
- [3] American Concrete Institue (ACI) Committee 440. "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures".ACI 440.2R-02.
- [4] American Concrete Institue (ACI). (1999). "Building Code Requirements for Structural Concrete". ACI 318-99.
- [5] Dat Duthin, Monica Starnes.(2001). "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Carbon FRP". Composites in Construction, ISBN 90 2651 858 7, page 493 – 498.