

STUDI EKSPERIMENTAL PERKUATAN GESER BALOK BETON BERTULANG DENGAN *GFRP* (*GLASS FIBER REINFORCED POLYMER*)

Fikri Alami¹,
Ratna Widyawati²

Abstrak

Fiber Reinforced Polymer (FRP) merupakan material yang sangat menjanjikan untuk digunakan dalam perkuatan struktur beton bertulang. Material ini merupakan pilihan yang sangat baik untuk digunakan sebagai perkuatan eksternal karena berat yang ringan, tahan korosi, dan kekuatan yang tinggi.

Penelitian ini menunjukkan bahwa Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) dapat memberikan kontribusi kekuatan geser pada balok. Peningkatan kekuatan Benda uji berupa lima buah balok beton bertulang. Benda uji pertama (BP) tidak diberi perkuatan geser, benda uji kedua (BP1) diberi perkuatan geser berupa penambahan sengkang pada salah satu sisi tumpuan saja. Benda uji ketiga (BP-FRPC) diberi perkuatan geser dengan *GFRP* yang dipasang menerus pada area dekat tumpuan yang diperlemah. Benda uji keempat (BP1-FRP3) diberi perkuatan geser dengan *GFRP* yang dipasang tidak menerus dengan 3 strips pada area dekat tumpuan yang diperlemah. Benda uji keempat (BP1-FRP5) diberi perkuatan geser dengan *GFRP* yang dipasang tidak menerus dengan 5 strips pada area dekat tumpuan yang diperlemah. Metode penelitian dan perhitungan berdasarkan ACI Comitte Report 440.

Berdasarkan penelitian, peningkatan beban maksimum dari balok BP1 sebesar 14,46% pada balok BP1-FRP3 dan 20,13% pada balok BP1-FRP5. Penurunan kapasitas geser terjadi pada balok BP yang diperkuat (BP-FRPC). Hal itu diakibatkan penurunan mutu beton pada BP-FRPC akibat kesalahan didalam prosedur pelaksanaan pencampuran mix design. Peningkatan kekakuan dan deformasi balok terjadi pada balok BP1-FRP3 dan BP1-FRP5 yang berbanding lurus dengan peningkatan kapasitas gesernya.

Kata Kunci: GFRP, Kekuatan Geser/Kapasitas Geser.

1. PENDAHULUAN

Fiber Reinforced Polymer (FRP) merupakan material yang sangat menjanjikan untuk digunakan dalam perkuatan struktur beton bertulang. Material ini merupakan pilihan yang sangat baik untuk digunakan sebagai perkuatan eksternal karena berat yang ringan, tahan korosi, dan kekuatan yang tinggi.

Peningkatan kekuatan struktur pada infrastruktur teknik sipil telah menjadi sebuah isu yang penting dalam kurun waktu 10 tahun terakhir ini. Kehancuran pelat jembatan, balok-

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No 1 Gedong Meneng, Bandar Lampung
E-mail : fikri@unila.ac.id

² Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No 1 Gedong Meneng, Bandar Lampung
E-mail : luh_ratnawidyawati@yahoo.co.id

balok, kolom, gedung dan lain-lain umumnya disebabkan karena umur, lingkungan yang mempengaruhi penurunan kekuatan struktur, desain awal yang lemah atau kurang, kelemahan perawatan, dan kejadian-kejadian alam seperti gempa. Oleh karena itu perkuatan struktur akan menjadi salah satu jawaban dari keinginan untuk menjadikan struktur lebih kuat dan memenuhi persyaratan keamanan serta kekuatan. Perkembangan-perkembangan material yang baru serta metode dan teknik perkuatan struktur telah banyak dilakukan penelitian.

Salah satu material untuk perkuatan struktur adalah penggunaan *FRP (Fiber Reinforced Polymer) composit*. *FRP composit* merupakan material yang menjanjikan dalam industri perbaikan konstruksi. Material ini bisa diperoleh dalam bentuk lembaran yang dalam penggunaannya diaplikasikan dengan resin atau *epoxy*. Material ini telah banyak dipergunakan dan telah diterapakan penggunaannya dalam ribuan atau jutaan aplikasi di dunia. Metode tradisional dengan menggunakan material pelat baja yang diikat dengan *epoxy* pada struktur balok beton bertulang pada daerah tarik masih sering dipergunakan. Namun lambat laun teknik atau metode ini mulai tergeser dengan hadirnya material baru yang disebut dengan *FRP*. Dengan material ini perkuatan struktur dapat menghasilkan peningkatan kekuatan yang cukup substansial (aksial, geser, lentur, dan torsi).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi pemasangan *GFRP* terhadap peningkatan kekuatan geser balok beton bertulang dan mempelajari perilaku retak balok beton bertulang tanpa perkuatan dengan balok beton bertulang yang diberi perkuatan menggunakan *GFRP*.

2. STUDI PUSTAKA

Berdasarkan persamaan yang diberikan ACI 440, kapasitas geser pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan *FRP composite* dapat dihitung dengan persamaan:

$$V_n = V_c + V_s + V_f \dots\dots\dots (1)$$

Khalifa, dkk (2000) menjelaskan faktor reduksi untuk kapasitas geser pada balok beton bertulang yang diberi perkuatan geser dengan *FRP* sebagai berikut:

$$V_n = 0,85 (V_c + V_s) + 0,7 V_f$$

Terdapat dua kemungkinan kegagalan atau kehancuran yang terjadi pada perkuatan geser yang disumbangkan *FRP* pada balok beton bertulang, yaitu kegagalan akibat retak atau patahnya *FRP* dan kegagalan akibat lepasnya rekatan *FRP* dengan balok beton bertulang. Untuk perencanaan perkuatan geser berdasarkan kegagalan akibat retaknya (*fracture mechanisme*) *FRP*, ACI Committee Report 440 memberikan persamaan:

$$V_f = \frac{A_f f_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_{fe} = kv \quad \epsilon_{fu} \leq 0.004 \dots\dots\dots (3)$$

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} E_f \dots\dots\dots (4)$$

$$A_f = 2 n_{tf} W_f \dots\dots\dots (5)$$

Dari persamaan regangan efektif $FRP(\epsilon_{fe})$, koefisien reduksi (K_v) dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$K_v = \left(\frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \epsilon_{fu}} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$k_1 = \left(\frac{f^* c}{27} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (7)$$

$$k_2 = \begin{cases} \left(\frac{df - 2Le}{df} \right) & \text{for two sides bonded} \dots\dots\dots (7. a) \\ \left(\frac{df - Le}{df} \right) & \text{for U wrap} \dots\dots\dots (7. b) \end{cases}$$

$$L_e = \frac{416}{(n x t_f x E_f)^{0.58}} \dots\dots\dots (8)$$

Menghitung design material properties akibat faktor reduksi lingkungan

$$f_{fu} = C f_{fu}^* \dots\dots\dots (9)$$

$$\epsilon_{fu} = C \epsilon_{fu}^* \dots\dots\dots (10)$$

Untuk perencanaan perkuatan geser berdasarkan kegagalan akibat lepasnya rekatan FRP dengan balok beton bertulang (*bond mekanisme*), Khalifa, dkk (1998) memberikan persamaan:

$$V_f = \frac{2L_e W_f \tau_{bu} W_{fe}}{s_f} \dots\dots\dots (11)$$

Kuat rekatan FRP dengan konstanta (k) adalah:

$$\tau_{bu} = k E_f t_f \dots\dots\dots (12)$$

Kuat rekatan FRP terhadap beton

$$\tau_{bu} = k (f^c/42)^{2/3} E_f t_f \dots\dots\dots (13)$$

Panjang daerah rekatan efektif yang merupakan fungsi dari tebal dan modulus elastisitas FRP dapat dihitung dengan persamaan:

$$L_e = e^{(6,134-0,58 \ln(t_f x E_f))} \dots\dots\dots (14)$$

Pengaruh dari tipe pemasangan FRP terhadap lebar efektif rekatan FRP
Untuk balok yang dibungkus dengan FRP :

$$W_{fe} = d_f \dots\dots\dots (15)$$

Untuk FRP yang dipasang tipe U:

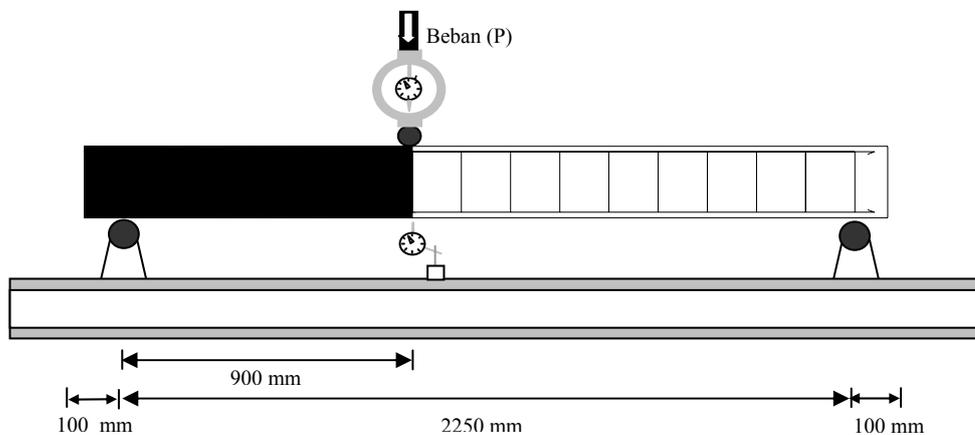
$$W_{fe} = d_f - L_e \dots\dots\dots (16)$$

Untuk FRP yang dipasang pada bagian samping:

$$W_{fe} = d_f - 2L_e \dots\dots\dots (17)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini dipergunakan 5 buah balok beton bertulang dengan konfigurasi penulangan dan pemasangan Glass Fiber Reinforced Polymer seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2 dibawah ini. Mutu beton, f'_c yang di gunakan pada penelitian ini adalah sebesar 28,97 MPa. Adapun pemasangan sampel balok pada loading frame dapat dilihat pada Gambar 1 dibawah ini.

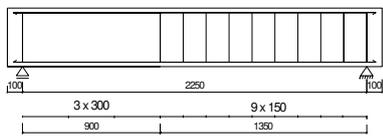
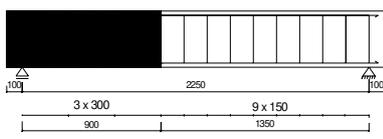
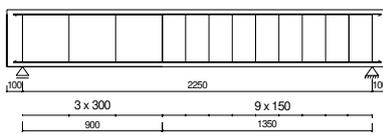
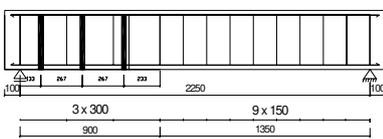
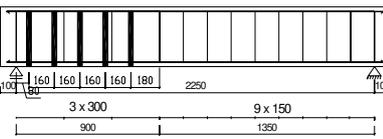


Gambar 1. Pemasangan Sampel Balok Pada Loading Frame

Balok BP dan BP1 adalah 2 buah balok yang tidak diperkuat dengan GFRP, perbedaanya pada balok BP tidak ada tulangan sengkang sepanjang bentang geser kiri balok, sedangkan balok BP1 ada 2 buah tulangan sengkang sepanjang bentang geser kiri balok. Balok BP-FRPC merupakan balok BP yang diperkuat dengan penulangan geser penuh (continuous) pada bagian bentang geser kiri balok. Untuk balok BP1-FRP3 dan BP1-FRP5 adalah balok BP1 yang diperi perkuatan geser GFRP sebanyak 3 strip dan 5 strip perkuatan geser.

Pada pengujian ini dipergunakan dial guage pada jarak 900 mm dari tumpuan kiri untuk merekam hasil defleksi balok selama pengujian berlangsung. Juga di pasang strain gauge sebanyak 7 channel dengan konfigurasi dapat dilihat pada Lampiran 1.

Tabel 1. Benda uji dan posisi pemasangan GFRP.

No	Benda Uji	Kode	Tul. Lentur	Tul. Geser	Dimensi (mm)
1	tanpa perkuatan 	BP	4Φ12	Φ10-900 mm	200/300
	dengan perkuatan 	BP-FRPC	4Φ12	Φ10-900mm	200/300
2	Tanpa perkuatan 	BP1	4Φ12	Φ10-300 mm	200/300
	Dengan perkuatan 	BP1-FRP3	4Φ12	Φ10-300 mm	200/300
	Dengan perkuatan 	BP1-FRP5	4Φ12	Φ10-300 mm	200/300

4. HASIL DAN PEMBAHASAN.

4.1 Hubungan Beban dengan Lendutan

Pengukuran besarnya nilai lendutan (defleksi) dilakukan pada setiap tahap pembebanan, dengan mencatat perubahan nilai yang terbaca pada *dial gauge*.

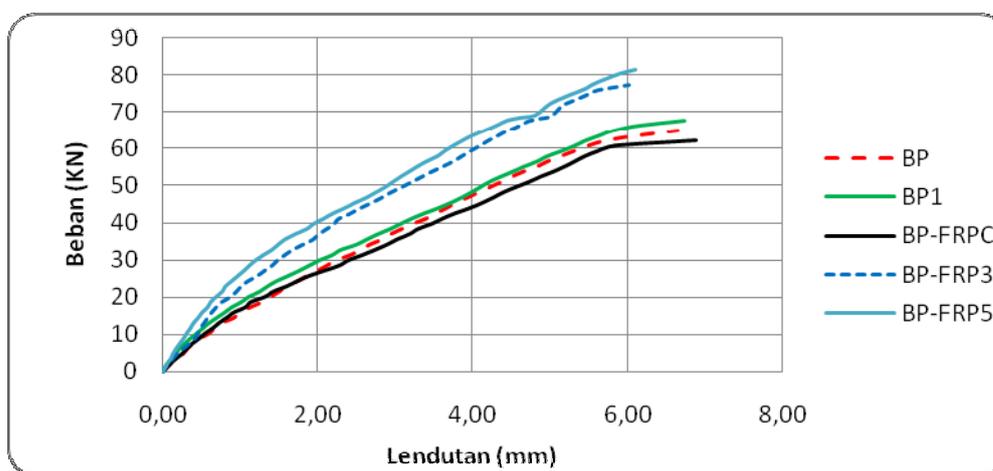
Dari hasil penelitian yang dilakukan didapat bahwa lendutan maksimum pada masing-masing balok uji yaitu, balok BP mampu menghasilkan lendutan sebesar 6,65 mm pada saat beban maksimum sebesar 64,86 KN, balok BP1 mampu menghasilkan lendutan sebesar 6,73 mm pada saat beban maksimum sebesar 67,66 KN; balok BP-FRPC mampu menghasilkan lendutan sebesar 6,89 mm pada saat beban maksimum sebesar 62,07 KN;

balok BP1-FRP3 mampu menghasilkan lendutan sebesar 6,02 mm pada saat beban maksimum sebesar 77,44 KN; balok BP1-FRP5 mampu menghasilkan lendutan sebesar 6,10 mm pada saat beban maksimum sebesar 81,25 KN.

Berikut merupakan tabel dan grafik hubungan beban maksimum dengan lendutan pada setiap balok dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 2 di bawah ini.

Tabel 2. Beban maksimum dan lendutannya pada setiap balok.

No	Kode Balok	Beban max (KN)	Lendutan Max (mm)
1.	BP	64,86	6,65
2.	BP1	67,66	6,73
3.	BP-FRPC	62,07	6,89
4.	BP1-FRP3	77,44	6,02
5.	BP1-FRP5	81,25	6,10



Gambar 2. Grafik hubungan beban dengan lendutan tengah bentang balok

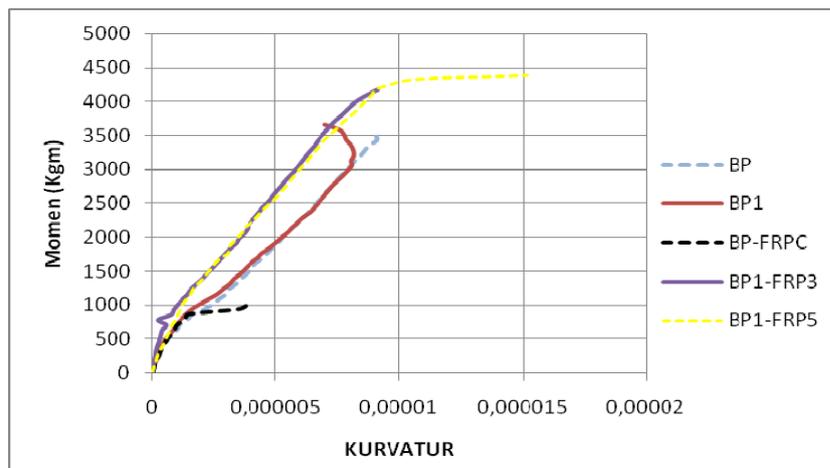
Dari grafik hubungan beban dengan lendutan tersebut (Gambar 2), perkuatan geser dengan *GFRP* mampu meningkatkan kekakuan pada balok uji. Perbedaan kekakuan ditunjukkan oleh kemiringan kurva pada grafik. Semakin landai garis kurva, maka balok beton tersebut semakin berkurang kekakuan/ketegaran lenturnya (EI balok). Sebagai perbandingan, dapat dilihat dari nilai lendutan yang diperoleh pada level beban yang sama. Pada saat beban mencapai 62 KN, lendutan pada balok BP dan BP1 masing-masing adalah 5,72 mm dan 5,45 mm. Pada level beban yang sama (62 KN) lendutan pada balok yang diberi perkuatan balok BP-FRPC, balok BP1-FRP3 dan balok BP1-FRP5 berturut-turut adalah 6,89 mm; 4,19 mm dan 3,87 mm. Nilai lendutan yang semakin kecil pada tingkat beban yang sama menunjukkan kekakuan balok yang semakin besar. Penurunan kekakuan terjadi pada balok BP-FRPC (lihat garis kurva BP dan BP-FRPC), garis kurva BP-FRPC semakin landai dari balok pembandingnya (BP). Penurunan kekakuan pada balok BP-FRPC terhadap balok BP disebabkan oleh pengaruh rendahnya kuat tekan beton balok BP-FRPC (f'_c rerata = 22,84 Mpa) terhadap kuat tekan pada balok BP (f'_c rerata = 34,35 Mpa). Hal tersebut diakibatkan oleh ketidakcermatan (kesalahan) dalam pelaksanaan pembuatan campuran beton pada balok uji.

Daktalitas adalah suatu sifat bahan yang mempunyai kemampuan untuk menyerap energi selama deformasi sebelum bahan tersebut patah/runtuh saat menerima beban statik/dinamik. Kemampuan/kapasitas penyerapan energi didefinisikan sebagai luasan dibawah kurva hubungan beban dengan lendutan atau luasan dibawah kurva hubungan beban/tegangan dengan regangan dari benda uji yang dibebani lentur. Nilai daktalitas berdasarkan luasan dibawah kurva dapat dilihat pada Lampiran 1. Semakin besar nilai luasan dibawah kurva semakin tinggi kedaktailannya.

4.2 Hubungan Momen dengan Kurvatur

Momen adalah gaya dikalikan dengan jarak tegak lurus terhadap gaya tersebut, momen maksimum balok beton bertulang pada penelitian ini yaitu $M = \frac{6}{25} \times P \times L$, sedangkan kurvatur (ϕ) adalah kelengkungan yang didapat dari hasil pembagian regangan pada serat atas beton dengan jarak serat tekan terluar ke garis netral yaitu $\phi = \frac{\epsilon_c}{\chi}$,

$\chi = d \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right)$. Hasil dari perhitungan momen maksimum dan kurvatur dapat dilihat pada Lampiran 2. Hubungan momen dan kurvatur disajikan dalam bentuk grafik (lihat Gambar 3).

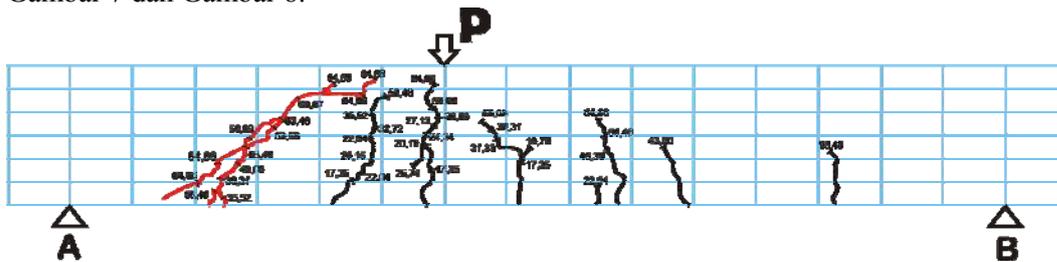


Gambar 3. Grafik hubungan momen maksimum dengan kurvatur.

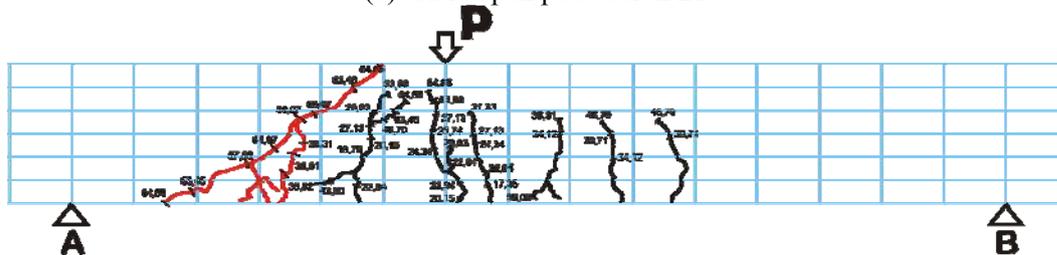
Grafik hubungan momen maksimum terhadap kurvatur juga menunjukkan peningkatan kekakuan dan kemampuan balok berdeformasi (daktalitas). Peningkatan kekakuan ditunjukkan oleh peningkatan momen maksimum balok BP1-FRP3 dan BP1-FRP5 pada kelengkungan yang sama terhadap balok BP1. Peningkatan daktalitas pada balok BP1-FRP5 terhadap balok BP1 ditunjukkan pada luasan-luasan dibawah kurva hubungan momen dan kurvatur yang lebih besar pada balok BP1-FRP5 apabila dibandingkan dengan balok pembandingnya (BP1) (Lampiran 2). Sebaliknya, penurunan daktalitas dan kekakuan terjadi pada balok BP-FRPC terhadap balok BP. Hal tersebut disebabkan oleh pengaruh rendahnya kuat tekan beton balok BP-FRPC (f'_c rerata = 22,84 Mpa) terhadap kuat tekan pada balok BP (f'_c rerata = 34,35 Mpa), yang dalam hal ini diakibatkan oleh ketidakcermatan (kesalahan) dalam pelaksanaan pembuatan campuran beton pada balok uji.

4.3 Pengamatan Retak Pada Balok Beton Bertulang

Pengamatan retak dilakukan selama pengujian berlangsung yang bertujuan untuk mengetahui pola retak dan perkembangannya pada setiap tahap pembebanan. Cara yang dilakukan dalam mengamati pola retak yaitu dengan mengukur lebarnya retak serta membuat gambar/sket pada benda uji tersebut. Retak lentur ditunjukkan oleh bentuk retak yang cenderung merambat hampir vertikal kedalam balok, sedangkan retak geser ditunjukkan oleh retak miring menuju beban maksimum di dalam badan balok beton bertulang. Pola retak pada balok dapat dilihat pada Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8.



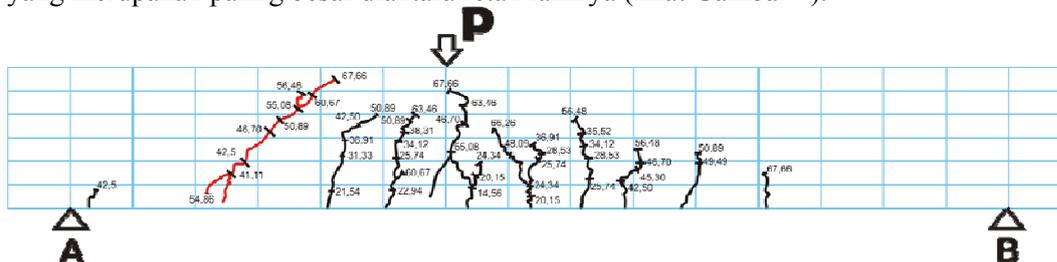
(a). Sisi depan pada balok BP



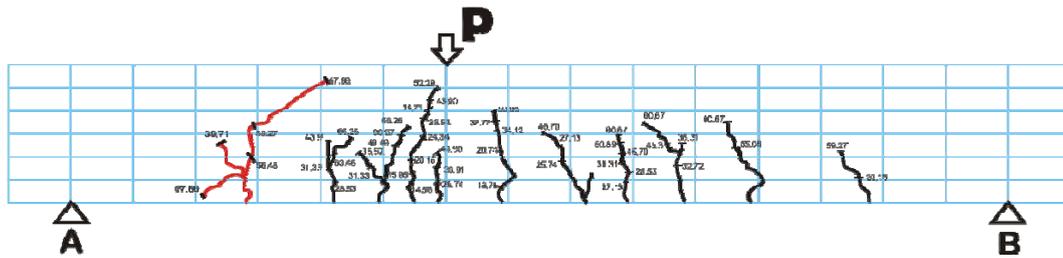
(b). Sisi belakang pada balok BP.

Gambar 4. Lebar dan pola retak pada balok BP.

Pada balok BP (Gambar 4), retak pertama terjadi pada daerah lentur yaitu pada saat beban mencapai 17,35 KN. Pada bentang geser (bentang yang memikul gaya lintang dan lentur secara bersamaan) retak geser mulai terjadi pada beban 35,52 KN. Retak ini merupakan kelanjutan dari retak lentur sebelumnya dan disebut sebagai retak geser-lentur (*flexure-shear crack*). Pada balok BP keruntuhan yang terjadi ialah keruntuhan geser. Hal tersebut dapat dilihat pada lebar retak diagonal pada sebelah kiri tumpuan sebesar 1,4 mm yang merupakan paling besar diantara retak lainnya (lihat Gambar 4).



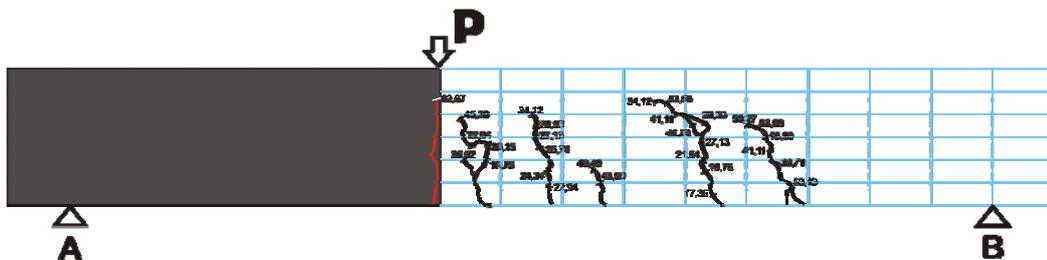
(a). Sisi depan pada balok BP1.



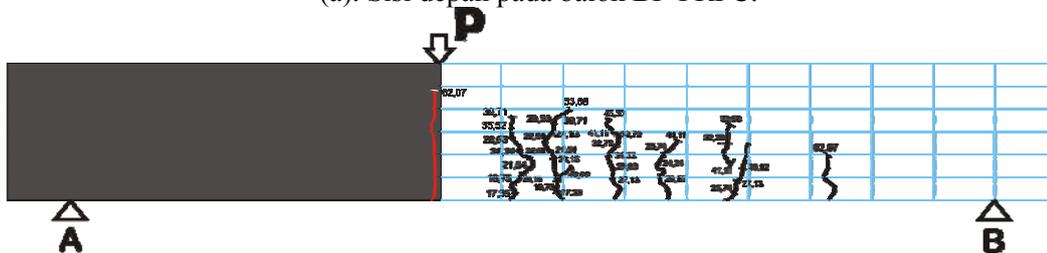
(b). Sisi belakang pada balok BP1.

Gambar 5. Lebar dan pola retak pada balok BP1.

Pada balok BP1 (Gambar 5), retak pertama terjadi pada daerah lentur yaitu pada saat beban mencapai 14,56 KN. Pada bentang geser (bentang yang memikul gaya lintang dan lentur secara bersamaan) retak geser mulai terjadi pada beban 35,52 KN. Retak ini merupakan kelanjutan dari retak lentur sebelumnya, dan disebut sebagai retak geser-lentur (*flexure-shear crack*). Pada balok BP1 dapat dilihat bahwa keruntuhan yang terjadi ialah keruntuhan geser-lentur. Hal tersebut dapat dilihat pada lebar retak diagonal pada sebelah kiri tumpuan sebesar 1,3 mm yang merupakan paling besar diantara retak lainnya (lihat Gambar 5).



(a). Sisi depan pada balok BP-FRPC.



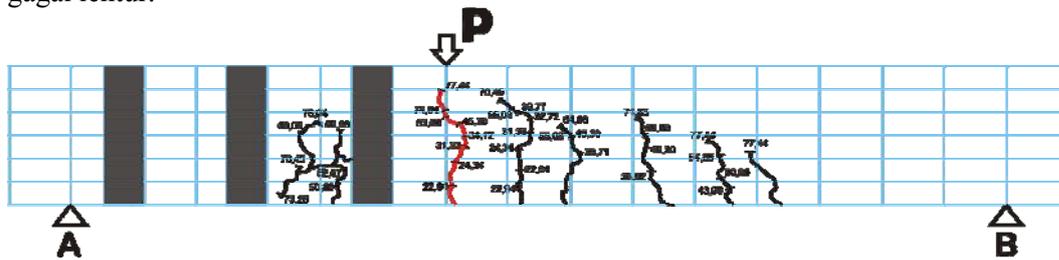
(b). Sisi belakang pada balok BP-FRPC.

Gambar 6. Lebar dan pola retak pada balok BP-FRPC.

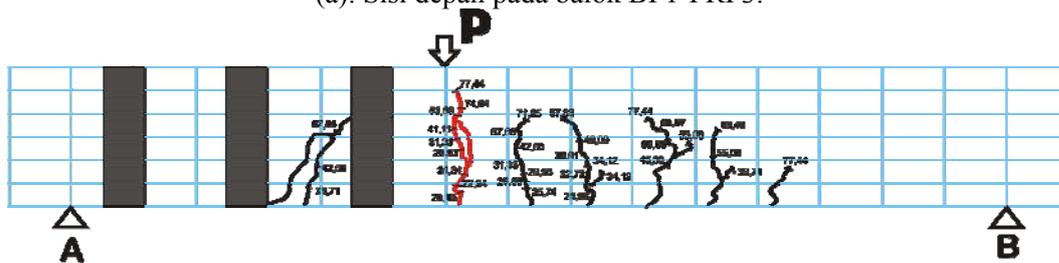
Pada balok BP-FRPC (Gambar 6), retak pertama terjadi pada daerah lentur yaitu pada saat beban mencapai 17,35 KN. Pada daerah tumpuan yang diberi perkuatan geser tidak tampak adanya retak geser. Hal tersebut membuktikan *GFRP* mencegah terjadinya retak geser seperti yang terlihat pada balok pembandingnya (BP), sehingga keruntuhan geser tidak terjadi pada balok ini. Lebar retak terbesar terdapat pada retak lentur yaitu sebesar 1,5 mm, sehingga keruntuhan yang terjadi yaitu keruntuhan akibat gagal lentur (lihat Gambar 6).

Pada balok BP1-FRP3 (Gambar 7), retak pertama terjadi pada daerah lentur yaitu pada saat beban mencapai 20,15 KN. Retak geser mulai tampak terjadi pada saat beban mencapai 39,71 KN tetapi tidak sampai mengakibatkan terjadinya keruntuhan akibat gagal geser. Hal tersebut membuktikan *GFRP* mencegah terjadinya gagal geser seperti yang terlihat pada balok pembandingnya (BP1). lebar retak terbesar terdapat pada daerah

lentur yaitu sebesar 0,8 mm, sehingga keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan akibat gagal lentur.

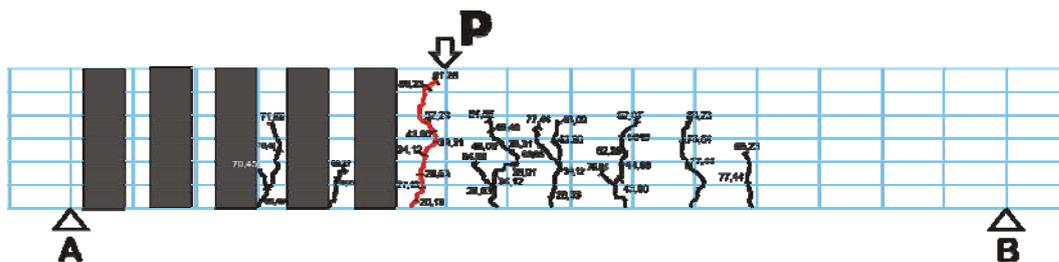


(a). Sisi depan pada balok BP1-FRP3.

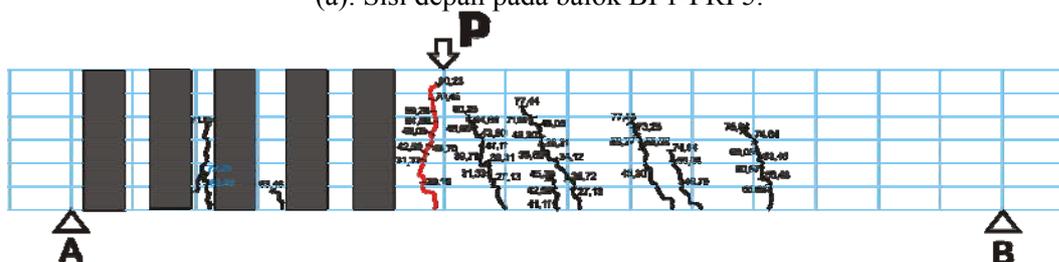


(b). Sisi belakang pada balok BP1-FRP3.

Gambar 7. Lebar dan pola retak pada balok BP1-FRP3.



(a). Sisi depan pada balok BP1-FRP5.



(b). Sisi belakang pada balok BP1-FRP5.

Gambar 8. Lebar dan pola retak pada balok BP1-FRP5.

Pada balok BP1-FRP5 (Gambar 8), retak pertama terjadi pada daerah lentur yaitu pada saat beban mencapai 20,15 KN. Retak pada daerah tumpuan mulai terjadi pada saat beban mencapai 63,46 KN, tetapi tidak sampai terjadi retak tarik diagonal (retak geser). Hal tersebut membuktikan kekuatan *GFRP* mencegah terjadinya gagal geser seperti yang terlihat pada balok pembandingnya (BP1). Lebar retak terbesar terdapat pada daerah yaitu sebesar 0,8 mm, sehingga keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan akibat gagal lentur.

4.4 Analisis Hasil Pengujian Laboratorium dan Teoritis

Hasil pengujian yang dilaksanakan di Laboratorium kemudian selanjutnya dianalisis dengan menggunakan metode ACI 440 untuk mendapatkan besarnya peningkatan beban geser setelah balok diperkuat. Pada analisis ini digunakan 2 metode analisis perhitungan

kekuatan geser yaitu kekuatan geser yang ditinjau dengan metode ACI 440 dan kekuatan geser yang ditinjau terhadap keruntuhan lentur.

Dalam hal ini dilakukan perhitungan gaya-gaya geser yang terjadi pada balok BP, BP1, BP-FRPC, BP1-FRP3, dan BP1-FRP5 dengan asumsi bahwa balok mengalami keruntuhan akibat beban geser (keruntuhan geser). Balok beton bertulang pada penelitian ini berdimensi (200/300) mm, dengan bentang bersih 225 cm. Berikut data spesifikasi beton bertulang dan spesifikasi *GFRP* sebagai perkuatan : (lihat Tabel 3 dan Tabel 4). Untuk kekuatan geser yang ditinjau terhadap keruntuhan lentur disajikan pada Tabel 5.

Tabel 3. Spesifikasi sampel uji beton bertulang

No	Kode	Ø tulangan		Dimensi		S (mm)	d _{eff} (mm)	F _y estimasi (MPa)	f' _c (Mpa)
		lentur (mm)	geser (mm)	b (mm)	h (mm)				
1	BP	12	10	200	300	0	244	400	34,35
2									
3									
4	BP1	12	10	200	300	300	244		30,01
5									
6									
7	BP-FRPC	12	10	200	300	0	244		22,84
8									
9									
10	BP1-FRP3	12	10	200	300	300	244		28,87
11									
12									
13	BP1-FRP5	12	10	200	300	300	244		28,78
14									
15									

Tabel 4. Spesifikasi perkuatan *GFRP*

No	Spesifikasi <i>GFRP</i>	Nilai	Satuan	keterangan
1	Ultimate tensile Strength (f^*_{fu})	575	Mpa	
2	Elongation at break (ϵ^*_{fu})	2,2	%	
3	tensile modulus (E_f)	26.1	KN/mm ²	
4	shear modulus (G)	10,038	GPa	
5	Thickness (tf)	1,33	mm	
6	K (konstanta)	$110,2 \times 10^{-6}$	/mm	
7	β	90°		
8	Φ	0,7		
9	Sf (jarak as ke as <i>GFRP</i>)	900	mm	BP-FRPC
		267	mm	BP1-FRP3
		160	mm	BP1-FRP5
10	Wf (lebar FRP)	900	mm	BP-FRPC
		100	mm	BP1-FRP3
		100	mm	BP1-FRP5
11	Df (tinggi efektif <i>GFRP</i>)	300	mm	

Tabel 5. Nilai-nilai gaya geser teoritis balok-balok BP,BP1,BP-FRPC, BP1-FRP3, dan BP1-FRP5

No	Balok	P _{geser} (KN)	P _{lentur} (KN)	Jika Terjadi Keruntuhan Geser				Jika Terjadi Keruntuhan Lentur			
				Vc (KN)	Vs (KN)	Vf (KN)	Vn (KN)	Vc' (KN)	Vs' (KN)	Vf' (KN)	Vn' (KN)
1	BP	79,62	76,683	47,754	0	0	47,754	45,992464	0	0	45,99
2	BP1	159,42	75,786	44,553	51,103	0	95,656	21,179862	24,294	0	45,47
3	BP-FRPC	154,292	73,921	38,87	0	53,705	92,575	18,622542	0	25,73	44,35
4	BP1-FRP3	197,267	75,553	43,709	51,103	23,548	118,36	16,740489	19,572	9,0189	45,33
5	BP1-FRP5	223,228	75,532	43,632	51,103	39,202	133,937	14,763436	17,291	13,264	45,32

Untuk perbandingan hasil analisis dengan menggunakan data hasil pengetesan di laboratorium dan dengan perhitungan secara teoritis dapat dilihat pada Tabel 6 di Lampiran 3.

Data hasil perhitungan analisis hasil pengujian laboratorium (eksperimen) dan analisis hasil berdasarkan teori (ACI format 440) disajikan dalam bentuk tabel (lihat Tabel 6).

Dari Tabel 6 dapat dilihat bahwa hasil eksperimen dan teoritis menunjukkan adanya perbedaan. Perbedaan tersebut dapat dilihat dari nilai P (beban) yang mampu dipikul balok. Berdasarkan eksperimen peningkatan beban hanya terjadi pada balok-balok BP1-FRP3 dan BP1-FRP5. Penurunan beban terjadi pada balok BP-FRPC, yang dalam hal ini disebabkan oleh ketidakcermatan (kesalahan) dalam pelaksanaan pembuatan campuran beton pada balok uji. Secara teoritis dengan asumsi terjadi keruntuhan geser, peningkatan beban terjadi pada setiap balok yang diperkuat *GFRP*. Akan tetapi, fakta menunjukkan terjadi keruntuhan lentur, hal tersebut dapat dibuktikan dengan hasil analisis secara teoritis. Berdasarkan perhitungan teoritis, gaya geser balok pada kondisi keruntuhan lentur, tidak terjadi peningkatan. Nilai-nilai beban geser cenderung sama untuk setiap balok, baik yang diperkuat maupun yang tidak diperkuat. Keruntuhan lentur yang terjadi pada balok mengakibatkan beban geser yang terjadi relatif sama pada setiap balok.

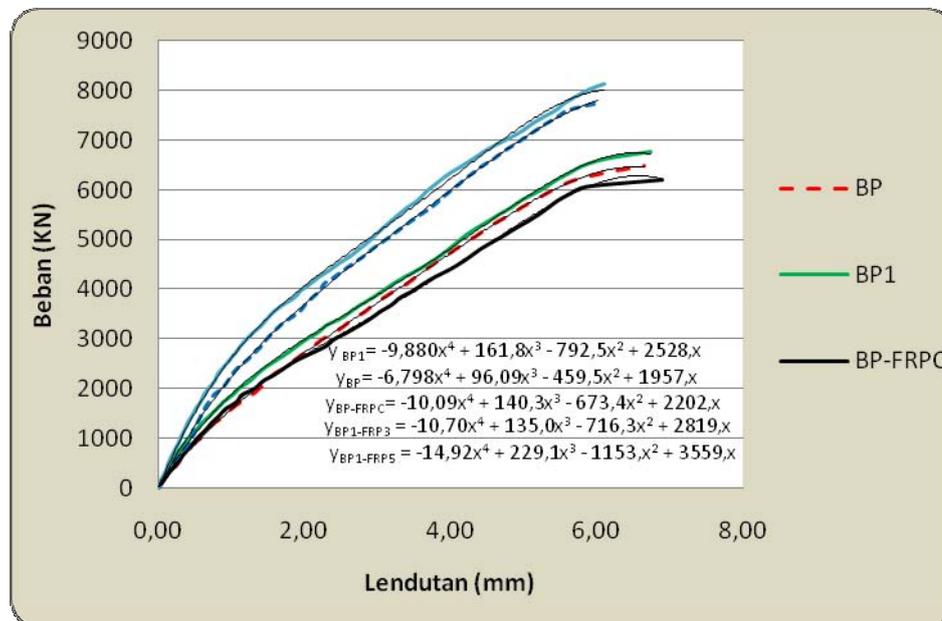
5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan perkuatan geser balok beton bertulang dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan dari hasil uji laboratorium variasi pemasangan *GFRP*, balok-balok BP1-FRP3 dan BP1-FRP5 mengalami peningkatan kekuatan, masing-masing sebesar 14.46 % dan 20.13 % terhadap balok BP1. Akan tetapi, secara teori balok tersebut tidak mengalami peningkatan kekuatan geser dikarenakan balok mengalami keruntuhan lentur terlebih dahulu (belum mencapai keruntuhan geser). Keruntuhan lentur yang terjadi secara teori mengakibatkan setiap balok mempunyai kemampuan beban maksimum yang sama pada saat balok runtuh karena jumlah dan dimensi tulangan serta dimensi penampang dan mutu beton sama pada setiap baloknya.
2. Penurunan kapasitas beban terjadi pada balok BP yang diperkuat yaitu balok BP-FRPC. Hal tersebut diakibatkan adanya penurunan mutu beton pada BP-FRPC karena terjadi kesalahan dalam pelaksanaan pembuatan campuran beton pada benda uji.
3. Peningkatan kekakuan terjadi pada balok BP1-FRP3 dan BP1-FRP5 terhadap balok pembandingnya (BP1). Peningkatan daktalitas hanya terjadi pada balok BP1-FRP5, sedangkan pada balok BP1-FRP3 menurun kedaktailannya. Pada balok BP yang diperkuat (BP-FRPC) terjadi penurunan kekakuan dan daktalitasnya. (lihat Gambar 6 dan Lampiran 2)

4. Secara teori, jika balok mengalami keruntuhan geser, maka perkuatan *GFRP* dapat memberikan sumbangan kekuatan masing-masing sebesar 48.42 % untuk BP-FRPC, 19.182 % untuk BP1-FRP3, dan 28.581% untuk BP1-FRP5.
5. Penambahan *GFRP* pada kedua sisi balok sepanjang bentang geser mempengaruhi pola retak yang terjadi. Retak pada beton beralih/terjadi ke posisi yang tidak ada perkuatan *GFRP*. Hal tersebut membuat beton bertambah kedaktailanya. Dilihat dari pola retaknya, keruntuhan geser-lentur hanya terjadi pada balok BP saja, selebihnya mengalami keruntuhan lentur.
6. Keruntuhan lentur yang terjadi disebabkan oleh beberapa hal, antara lain sebagai berikut : a) dimensi/jumlah tulangan lentur yang terlalu kecil seharusnya $\rho > \rho_{balance}$, b) bentang geser yang terlalu panjang seharusnya $2,5 < a/d \leq 5,5$, dan c) dimensi balok yang terlalu besar. Akibat hal tersebut, $P_{lentur\ max}$ yang dihasilkan lebih kecil dari pada $P_{geser\ max}$, sehingga keruntuhan lentur terjadi terlebih dahulu sebelum tercapainya keruntuhan geser.

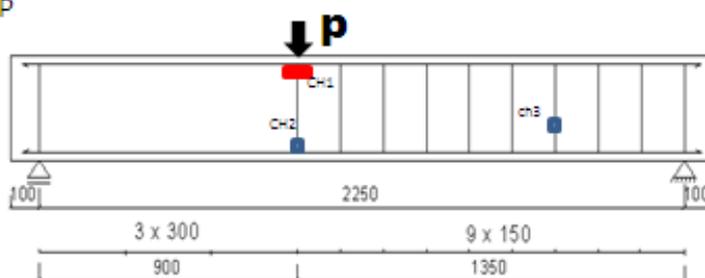
LAMPIRAN 1: Menghitung Luasan di bawah kurva.



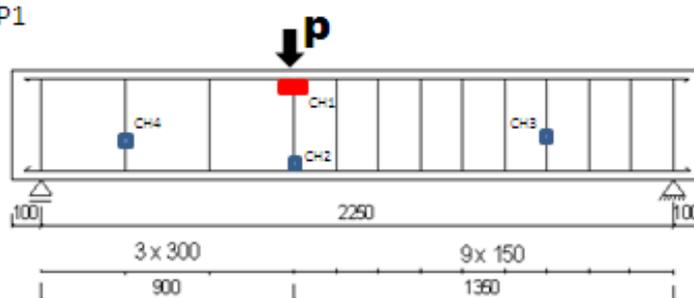
Gambar 9. Grafik hubungan beban dengan lendutan beserta persamaan garis dalam bentuk polinomial.

LAMPIRAN 2: Pemasangan Strain Gauge Pada Balok.

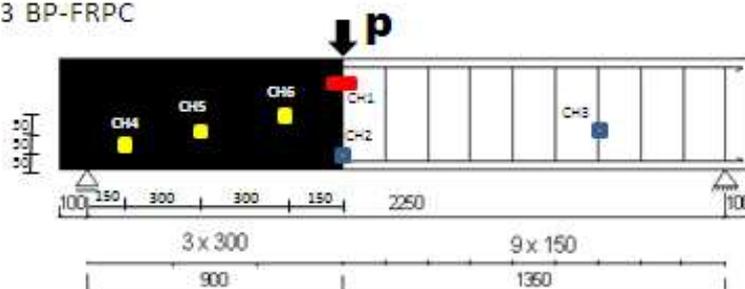
1 BP



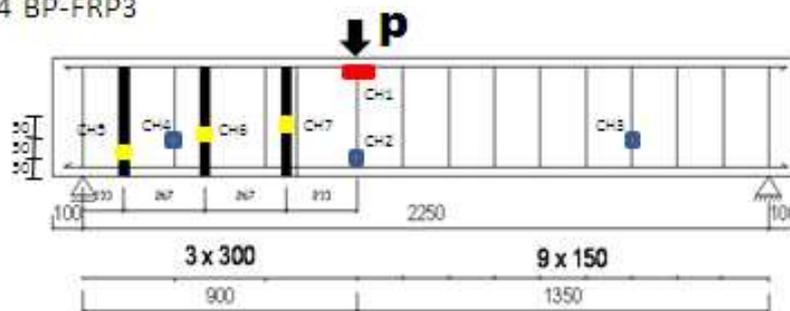
2 BP1



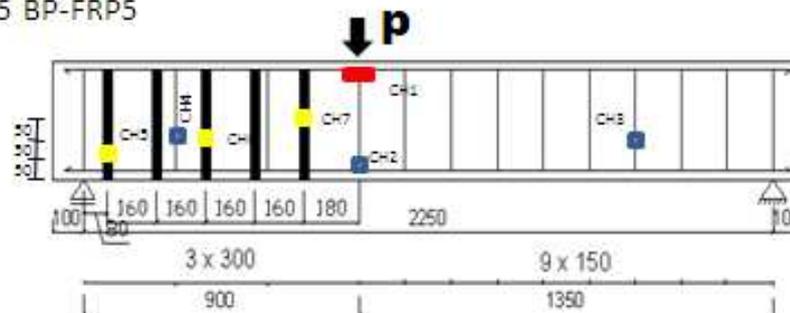
3 BP-FRPC



4 BP-FRP3



5 BP-FRP5



LAMPIRAN 4. Foto-Foto Pelaksanaan Penelitian



Gambar 10. Posisi pembebanan terpusat pada pengujian balok BP1-FRP5



Gambar 11. Pengukuran lebar retak dengan menggunakan *microcrack tester*

LAMPIRAN 3.

Tabel 14. Hasil analisis secara teoritis dan hasil pengujian laboratorium

No	Balok	Hasil Uji Laboratorium							Analisis Gaya Geser jika terjadi keruntuhan geser							Analisa gaya geser pada saat keruntuhan lentur					
		P max (KN)	V _{exp} (KN)	V _{C_{exp}} (KN)	V _{S_{exp}} (KN)	V _{f_{exp}} (KN)	% Kenaikan	jenis keruntuhan pada saat beban ultimit	P max (KN)	V _f (KN)	V _c (KN)	V _s (KN)	V _{teori} (KN)	% Kenaikan	Prediksi jenis Keruntuhan	P max (KN)	V _f ' (KN)	V _c ' (KN)	V _s ' (KN)	V _{teori} (KN)	% Kenaikan
1	BP	64,86	38,916	38,916	0	-	-	geser-lentur	79,59	0	47,75	0,00	47,75	-	geser	76,65	0	45,99	0,00	45,99	-
	BP-CFRP	62,07	37,242	30,328	0	6,914	-	lentur	154,29	53,71	38,87	0,00	92,58	48,42	lentur	73,91	25,73	18,62	0,00	44,35	0,00
2	BP1	67,66	40,596	36,374	4,222	-	-	lentur	159,427	0	44,55	51,10	95,66	-	lentur	75,72333	0	21,16	24,27	45,43	-
	BP1-FRP3	77,44	46,464	35,601	4,222	6,641	14,455	lentur	197,267	23,55	43,71	51,10	118,36	19,182	lentur	75,7015	9,11	16,74	19,57	45,42	0,00
	BP1-FRP5	81,28	48,000	35,535	4,222	8,243	20,130	lentur	223,23	39,20	43,63	51,10	133,94	28,581	lentur	75,46	13,25	14,75	17,27	45,27	0,00