

PERILAKU RUNTUH BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT DENGAN LAPIS *GLASS FIBRE REINFORCED POLYMER* (GFRP)

I Ketut Sudarsana¹ dan Ida Bagus Rai Widiarsa¹

Abstrak: Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku runtuh dan kuat lentur dari balok beton bertulang yang diberi penambahan lapis GFRP pada daerah tarik balok.

Pengujian ini menggunakan benda uji balok dengan ukuran 100x150x1100 mm diatas tumpuan sederhana. Balok dibebani 2 beban terpusat dengan jarak 300 mm dari masing-masing tumpuan. Pada balok dikerjakan 3 perlakuan yaitu balok tanpa penambahan lapis GFRP, balok dengan penambahan 1 lapis GFRP dan balok dengan penambahan 2 lapis GFRP. Lapis GFRP yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari serat gelas (*fiberglass*) yang berbentuk *woven roving*, dilekatkan pada permukaan beton dengan resin epoxy. Data-data yang diamati berupa beban retak, beban ultimit, pola retak, lebar retak, lendutan dan model keruntuhan.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa dengan penambahan lapis GFRP dapat menahan terjadinya panjang retak dan lebar retak pada balok beton bertulang. Penambahan lapis GFRP juga dapat meningkatkan kuat lentur balok, dimana pada penambahan 1 lapis GFRP terjadi peningkatan sebesar 10,8 % dengan model keruntuhan yang terjadi yaitu keruntuhan lentur yang disertai dengan putusanya GFRP. Sedangkan pada penambahan 2 lapis GFRP terjadi peningkatan kuat lentur sebesar 13,4 % dengan model keruntuhan yang terjadi yaitu keruntuhan lentur yang disertai dengan pelepasan lekatan antara GFRP dengan beton (*debonding*). Hal ini menunjukkan GFRP belum bekerja secara maksimum.

Kata kunci: perilaku runtuh, kuat lentur, balok beton bertulang, lapis GFRP.

FAILURE BEHAVIOR OF R/C BEAMS STRENGTHENED WITH GLASS FIBRE REINFORCED POLYMER (GFRP) SHEETS

Abstract: This research was conducted to know the failure behavior and flexural strength of reinforced concrete (R/C) beam strengthened with GFRP sheet.

The research used simple supported beams with dimension of 100x150x1100 mm. The beam resisted two concentrated loads at a distance of 300 mm from each support. On the beams were applied 3 conditions that were beam without addition of GFRP sheet; beam with addition of 1 layer GFRP sheet and beam with addition of 2 layers GFRP sheet. The GFRP sheets used in this research were made of woven roving glass fibre mixed with epoxy resin. The data collected in this research were crack load, ultimate load, crack pattern, crack width, deflection and failure behavior.

Results of from this research indicated that addition of GFRP sheet decreased the length and width of the R/C beam crack. The addition of GFRP sheet improved flexural strength of R/C beam as well. The addition of 1 layer GFRP sheet increased the flexural strength by 10,8 %, with failure in flexure accompanied by breaking of the sheet. On the other hand, the addition of 2 layers GFRP sheet increased the flexural strength by 13,4 %, with failure in flexure accompanied by debonding of the sheet from concrete surface. This showed that the sheet did not work effectively.

Keywords: failure behavior, flexural strength, R/C beam, GFRP sheet.

¹ Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Denpasar.

PENDAHULUAN

Perkuatan pada struktur yang sudah ada disebabkan oleh beberapa hal seperti: perubahan fungsi bangunan yang mengakibatkan bertambahnya beban yang mesti dipikul, kemungkinan kesalahan perhitungan dalam perencanaan (design) maupun pelaksanaan serta adanya perubahan pedoman perencanaan (code) suatu negara. Tujuan dari perkuatan struktur ini yaitu untuk meningkatkan kapasitas dukung struktur ataupun untuk mengembalikan kekuatan struktur yang berkurang akibat rusaknya beton maupun baja tulangan.

Saat ini telah berkembang suatu metode perkuatan struktur dengan menggunakan material komposit berupa serat sebagai penguat dan polymer (resin) sebagai matrik/pengikat yang dikenal dengan Fibre Reinforced Polymer (FRP). Sistem perkuatan dilekatkan pada bagian luar permukaan struktur yaitu bagian bawah (daerah tarik) balok yang akan diperkuat dengan menggunakan perekat epoxy.

Keuntungan dan keunggulan dari sistem perkuatan FRP ini yaitu bahan lebih ringan sehingga penambahan beban mati lebih sedikit, kekuatan tarik tinggi, tidak terjadi korosi sehingga memiliki durabilitas (keawetan) yang tinggi, mudah dalam pemasangannya sehingga menghemat waktu serta bahannya mudah untuk dibentuk (fleksibel).

Bahan serat yang umum digunakan pada FRP ada 3 jenis serat (*fiber*) yaitu *carbon*, *aramid (kevlar)* dan *glass* yang masing-masing disebut dengan CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*), AFRP (*Aramid Fibre Reinforced Polymer*), GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*). Serat gelas (*fiber glass*) merupakan serat yang paling berkembang saat ini karena harganya lebih murah dan penggunaannya sudah sangat luas seperti untuk industri pesawat terbang (*aero-space*), *automotive*, kimia, pembuatan kapal serta untuk penggunaan yang lainnya.

Dengan adanya penambahan lapis *Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)* ini pada balok beton bertulang maka diduga mengubah perilaku lentur dari balok beton bertulang karena GFRP berfungsi sebagai tulangan tambahan pada balok.

Berdasarkan hal yang telah diuraikan diatas, maka perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui perilaku dari balok yang diberi penambahan lapis GFRP dan juga kuat lenturnya.

MATERI DAN METODE

Beton

Beton didapat dari pencampuran bahan-bahan agregat halus dan agregat kasar yaitu pasir, batu, batu pecah atau bahan semacam lainnya, dengan menambahkan bahan perekat semen dan air sebagai bahan pembantu guna keperluan reaksi kimia selama proses pengerasan dan perawatan beton berlangsung (Dipohusodo, 1996).

Beton Bertulang

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan jumlah dan luas tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang diisyaratkan dengan atau tanpa pretegang, dan direncanakan dengan asumsi bahwa kedua material bekerja sama dalam menahan gaya yang bekerja dimana tulangan baja menahan gaya tarik dan beton hanya menerima gaya tekan.

Glass Fibre Reinforced Polymer

GFRP merupakan material komposit, yaitu komposit dari serat gelas di dalam matrik polymer. Serat berfungsi sebagai pemerkuat, sedangkan matrik berfungsi sebagai pemegang serat agar tidak bergeser, pelindung filamen terhadap goresan dan zat kimia ganas serta pelintas tegangan ke serat (Feldman dan Hartomo, 1995).

GFRP yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari serat gelas (*fiberglass*) berbentuk *woven roving* serta *resin epoxy*. Dari hasil pengujian GFRP

didapat kuat tarik ultimit (f_{ju}) = 111,1 MPa dan modulus elastisitas sebesar 6206 MPa.

Pembuatan Benda Uji

Benda uji berupa balok beton bertulang dengan ukuran 100x150x1100 mm dengan tebal selimut beton 20 mm. Tulangan yang dipakai adalah tulangan tunggal 2 ϕ 10 mm dengan $f_y = 389,1$ MPa dan sengkang ϕ 6 dengan jarak 62,5 mm (Gambar 1). Campuran beton menggunakan metode DOE yang direncanakan dengan $f'_c = 20$ MPa dengan ukuran agregat kasar maksimum 20 mm. Percobaan dibuat dalam 3 perlakuan (penambahan lapis GFRP) yaitu balok tanpa penambahan lapis GFRP (sebagai balok kontrol), balok dengan penambahan 1 lapis GFRP dan balok dengan penambahan 2 lapis GFRP. Setiap perlakuan dibuat 3 benda uji.

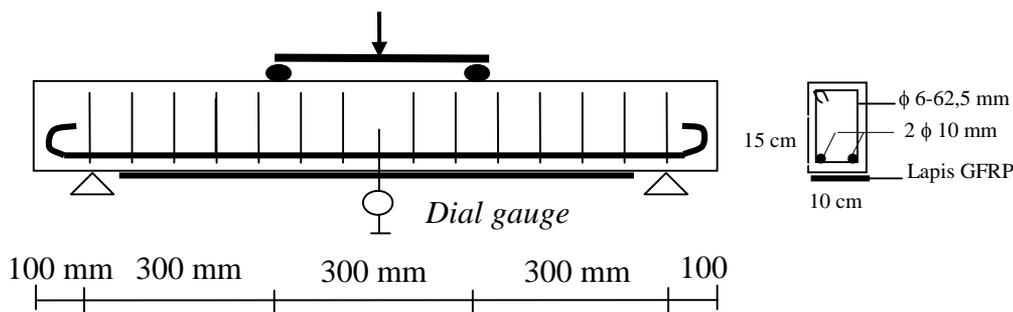
Penambahan Lapis GFRP

Penambahan lapis GFRP dilakukan setelah beton berumur 14 hari. Permukaan beton yang akan dilapisi diratakan dengan menggunakan gerinda dan dibersihkan dengan menggunakan amplas dan sikat kawat. Debu-debu yang terdapat di

permukaan beton kemudian dibersihkan dengan menggunakan *vacuum cleaner*. Pencampuran *resin* dengan *hardener* dengan perbandingan 1:1 dan dilanjutkan dengan melapisi *resin epoxy* pada permukaan beton yang akan dilapisi dengan menggunakan kuas. Kemudian serat gelas (*fiber glass*) dipasang dan dijenuhkan dengan menggunakan *roller*. Melapisi *resin epoxy* untuk melindungi serat gelas kemudian dikeringkan.

Uji Pembebanan

Pengujian balok dilakukan dengan meletakkan balok di atas 2 tumpuan sederhana dan dibebani 2 beban terpusat dengan jarak 300 mm dari masing-masing tumpuan. Pembebanan dilakukan secara bertahap sampai balok dianggap runtuh. Uji pembebanan dilakukan setelah beton berumur 28 hari. Pengukuran lendutan dilakukan pada tengah-tengah bentang balok dengan menggunakan alat ukur lendutan (*dial gauge*). Pengujian kuat tekan beton dalam penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm.



Gambar 1. Model Benda Uji Balok

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Material Beton

Material yang digunakan dalam pembuatan campuran beton telah memenuhi syarat pengujian bahan menurut ASTM.

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pada Tabel 2 ditampilkan kuat tekan dari masing-masing silinder dan didapat hasil kuat tekan rata-rata sebesar 31,99 MPa

Tabel 1. Hasil Pengujian Bahan Campuran Beton

No	Pengujian	Pasir Kr. asem	Batu Pecah Kr. asem
1.	Berat Satuan (kg/lt)	1,309	1,501
2.	Berat jenis bulk (gr/cm ³)	2,439	2,358
3.	Berat jenis SSD (gr/cm ³)	2,551	2,445
4.	Berat jenis semu (gr/cm ³)	2,747	2,583
5.	Penyerapan air (gr/cm ³)	4,603	1,680
6.	Kadar air (%)	3,950	1,420
7.	Modulus kehalusan	2,495	7,348

beban retak pertama, beban ultimit, lendutan, lebar retak serta jarak retak. Hasil pengujian tersebut ditampilkan dalam bentuk gambar pola retak, tabel serta grafik hubungan beban-lendutan.

Tabel 2. Kuat Tekan Beton

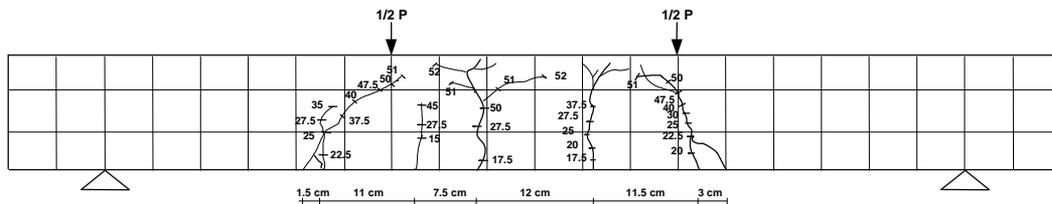
Kode Silinder	P (kN)	f _c =P/A (MPa)
A1	600	33,97
A2	650	36,80
A3	625	35,39
B1	485	27,46
B2	600	33,97
B3	550	31,14
C1	600	33,97
C2	500	28,31
C3	475	26,89
	Rata-rata	31,99

Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

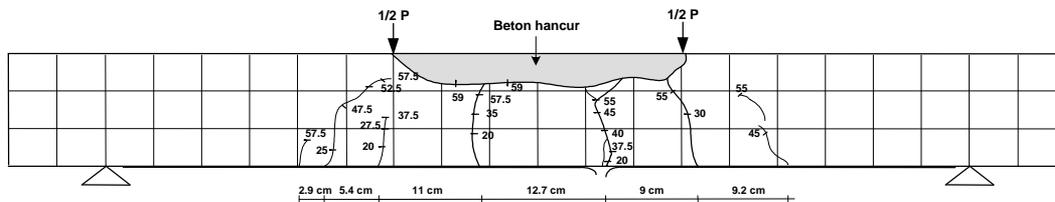
Pengujian kuat lentur balok beton bertulang dilakukan dengan memberi 2 buah beban terpusat dengan jarak sepertiga bentang dari tumpuan. Beban ditingkatkan secara bertahap dengan peningkatan beban 2,5 kN sampai balok mengalami keruntuhan. Adapun data-data yang diambil pada penelitian ini adalah

Pola Dan Jarak Retak

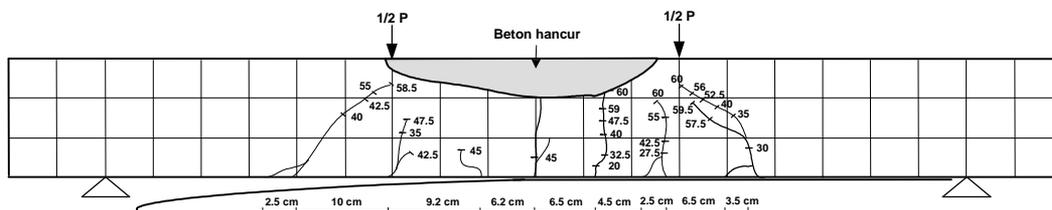
Pola dan jarak retak yang terjadi pada masing-masing benda uji balok dapat dilihat pada Gambar 2 sampai Gambar 4.



Gambar 2. Pola Retak Balok Tanpa Penambahan Lapis GFRP



Gambar 3. Pola Retak Balok Dengan Penambahan 1 Lapis GFRP



Gambar 4. Pola Retak Balok Dengan Penambahan 2 Lapis GFRP

Pola retak yang terjadi pada semua benda uji balok pada penelitian ini adalah pola retak lentur, hal ini dilihat dari adanya retak-retak yang arah rambatannya vertikal terhadap sumbu memanjang balok.

Retak-retak awal pada balok ini terjadi pada daerah yang memiliki nilai momen maksimum yaitu diantara jarak pembebanan. Apabila beban terus bertambah, retak-retak di tengah bentang terus bertambah dan retak-retak awal yang sudah terjadi akan semakin lebar dan semakin panjang menuju sumbu netral penampang sehingga mengurangi kekakuan dari balok. Ratak-retak miring (retak geser) berupa retak rambut yang merupakan kelanjutan dari retak-retak lentur diluar daerah pembebanan juga terjadi pada balok tetapi tidak sampai menyebabkan keruntuhan balok. Balok mengalami keruntuhan pada beban maksimum yang ditandai dengan melebarnya retak dan leleh baja tulangan yang ditandai

dengan lendutan yang besar sampai terjadi hancur beton pada serat tekan.

Pada balok dengan penambahan lapis GFRP, panjang retak yang terjadi lebih lambat dari pada panjang retak pada balok tanpa penambahan lapis GFRP. Dan lebar retak pada balok dengan penambahan lapis GFRP lebih kecil dari pada lebar retak pada balok tanpa penambahan lapis GFRP. Hal ini menunjukkan dengan adanya lapis GFRP dapat menahan terjadinya retak pada balok.

Lebar Retak

Lebar retak pada balok dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$w = 11.10^{-6} \cdot \beta \cdot f_s \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A}$$

$$w = 11.10^{-6} \cdot 1,2 \cdot (0,6 \times 389,1) \cdot \sqrt[3]{25 \cdot \left(\frac{2 \times 25 \times 100}{2}\right)}$$

$$= 0,12 \text{ mm}$$

Pada Tabel 3 ditampilkan lebar retak yang terjadi pada masing-masing benda uji balok.

Tabel 3. Lebar Retak Pada Balok

No	Kode balok	P _{ult} (kN)	P (kN)	% beban ultimate	Lebar retak eksperimen (mm)	Lebar retak teoritis (mm)
1	BN1	52,5	25,0	47,6	0,10	0,12
			51,5	98,1	0,60	
2	BN2	54,0	20,0	37,0	0,10	0,12
			50,0	92,6	0,20	
3	BN3	55,0	25,0	45,5	0,10	0,12
			50,0	90,9	0,20	
4	BS11	58,0	20,0	34,5	0,01	0,12
			55,0	94,8	0,20	
5	BS12	61,0	22,5	36,9	0,01	0,12
			50,0	82,0	0,15	
6	BS13	60,0	20,0	33,3	0,02	0,12
			55,0	91,7	0,20	
7	BS21	62,5	20,0	32,0	0,01	0,12
			50,0	80,0	0,15	
8	BS22	60,5	20,0	33,1	0,01	0,12
			40,0	66,1	0,08	
9	BS23	60,0	20,0	33,3	0,01	0,12
			50,0	83,3	0,15	

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa pada saat beban mencapai 20 kN (awal pembebanan), lebar retak pada penambahan lapis GFRP jauh lebih kecil dari pada lebar retak pada balok tanpa

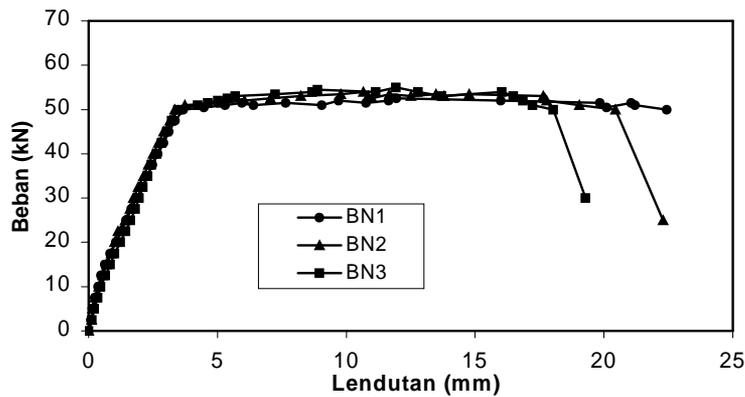
penambahan lapis GFRP yaitu sekitar 10 kali lebih kecil dari pada lebar retak pada balok tanpa penambahan lapis GFRP. Dengan peningkatan beban yaitu sampai beban 50 kN (dekat beban ultimit), lebar

retak pada penambahan lapis GFRP 33 % lebih kecil dari pada lebar retak pada balok tanpa penambahan lapis GFRP. Hal ini menunjukkan dengan adanya lapis GFRP dapat mengurangi lebar retak pada balok sehingga balok dengan lapis GFRP lebih aman terhadap bahaya korosi dibandingkan dengan balok tanpa penambahan lapis GFRP. Jika dibandingkan dengan lebar retak teori, untuk beban antara

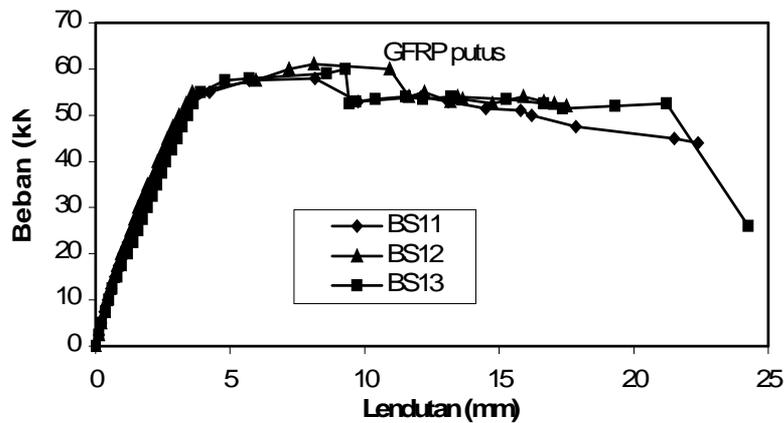
33,1%–47,6% beban ultimit, lebar retak yang didapat jauh lebih kecil

Hubungan Beban Dan Lentutan

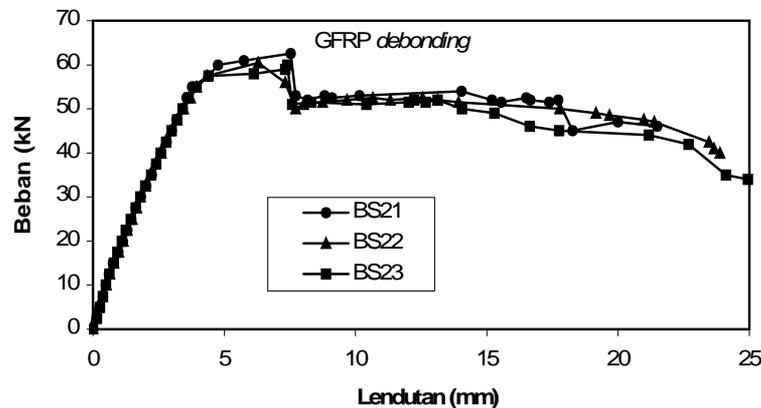
Lentutan vertikal pada balok dicatat pada tengah-tengah bentang balok untuk setiap peningkatan beban 2,5 kN sampai balok mengalami keruntuhan. Hubungan beban dengan lentutan yang terjadi selama hasil pengujian balok dapat dilihat pada Gambar 5 sampai Gambar 7.



Gambar 5. Hubungan Beban-Lentutan Pada Balok Tanpa Lapis GFRP



Gambar 6. Hubungan Beban-Lentutan Balok Dengan 1 Lapis GFRP



Gambar 7. Hubungan Beban-Lentutan Balok Dengan 2 Lapis GFRP

Hubungan antara beban dan lendutan yang terjadi pada masing-masing benda uji balok dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pada Balok Tanpa Penambahan Lapis GFRP

Hubungan beban-lendutan pada awal pembebanan masih berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Hal ini terjadi sampai beban rata-rata 16,7 kN. Sejalan dengan peningkatan beban, hubungan beban dan lendutan lebih landai dibandingkan dengan sebelumnya. Hal ini terjadi sampai beban rata-rata 50 kN. Pada saat baja tulangan mengalami leleh yang ditandai dengan peningkatan lendutan yang besar tanpa diikuti dengan peningkatan beban yang berarti, kurva hubungan beban-lendutan menjadi jauh lebih datar dibandingkan dengan sebelumnya. Hal ini terjadi sampai balok mencapai beban ultimit yaitu rata-rata pada beban 53,5 kN.

Pada Balok Dengan Panambahan 1 Lapis GFRP

Hubungan beban-lendutan pada awal pembebanan masih berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh sampai beban rata-rata 20 kN. Sejalan dengan peningkatan beban, hubungan beban dan lendutan lebih landai dibandingkan dengan sebelumnya. Hal ini terjadi sampai beban rata-rata 55 kN. Pada saat baja tulangan mengalami leleh, lapis GFRP masih kuat menahan gaya tarik sampai lapis GFRP ini putus. Hal ini ditandai dengan kurva hubungan beban-lendutan yang masih terjadi peningkatan dibandingkan pada kurva hubungan beban-lendutan pada balok tanpa penambahan lapis GFRP saat baja tulangan mengalami leleh. Lapis GFRP ini putus pada beban rata-rata 59,7 kN. Setelah lapis GFRP putus lalu terjadi penurunan beban sampai pada beban rata-rata 53 kN, dan dilanjutkan dengan leleh baja tulangan sampai terjadi hancurnya beton pada serat tekan.

Pada Balok Dengan Panambahan 2 Lapis GFRP

Hubungan beban-lendutan pada awal pembebanan masih berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh yang terjadi sampai beban rata-rata 20 kN. Sejalan dengan peningkatan beban, hubungan beban dan lendutan lebih landai dibandingkan dengan sebelumnya. Hal ini terjadi sampai beban rata-rata 57,5 kN. Pada saat baja tulangan mengalami leleh, lapis GFRP masih bekerja menahan gaya tarik sampai terjadi pelepasan lekatan (*debonding*) antara GFRP dengan beton pada beban maksimum yaitu pada beban rata-rata 61 kN. Hal ini ditandai dengan kurva hubungan beban-lendutan yang masih terjadi peningkatan dibandingkan pada kurva hubungan beban-lendutan pada balok tanpa penambahan lapis GFRP saat baja tulangan mengalami leleh. Setelah terjadi *debonding* pada GFRP dan beton, terjadi penurunan beban sampai pada beban rata-rata 51 kN, lalu dilanjutkan dengan pelepasan baja tulangan sampai akhirnya terjadi kehancuran beton pada daerah tekan.

Beban Retak Pertama

Retak pertama terjadi karena kemampuan tarik beton (f_{ct}) pada daerah tarik terlampaui, selanjutnya seluruh gaya tarik dipikul oleh baja tulangan. Pada Tabel 4 ditampilkan beban retak pertama berdasarkan hasil pengamatan pada masing-masing benda uji balok beton bertulang. Beban retak pertama terjadi rata-rata pada 33 % dari beban ultimit.

Dari Tabel 4 diatas dapat dilihat bahwa penambahan lapis GFRP dapat menahan terjadinya beban retak pertama (P_{cr}). Dibandingkan dengan balok tanpa penambahan lapis GFRP, peningkatan beban retak pertama pada balok dengan penambahan lapis GFRP yang terjadi sebesar 20 % baik untuk 1 lapis maupun 2 lapis. Beban retak pertama pada balok dengan penambahan 1 lapis GFRP dan 2 lapis GFRP tidak berbeda karena lapis GFRP

ini mempunyai modulus elastisitas yang sangat rendah.

Tabel 4. Beban Retak Pertama Balok

No	Kode Balok	Jumlah lapis	f'_c (MPa)	P_{cr} (kN)	P_{cr} Rata-rata (kN)	M_{cr} (kNm)	M_{cr} rata-rata (kNm)
1	BN1	0	33,97	15,0	16,7	2,250	2,500
2	BN2	0	36,80	17,5		2,625	
3	BN3	0	35,39	17,5		2,625	
4	BS11	1	27,46	20,0	20,0	3,000	3,000
5	BS12	1	33,97	20,0		3,000	
6	BS13	1	31,97	20,0		3,000	
7	BS21	2	33,97	20,0	20,0	3,000	3,000
8	BS22	2	28,32	20,0		3,000	
9	BS23	2	26,89	20,0		3,000	

Beban Ultimit Pada Balok

Pada Tabel 5 ditampilkan beban ultimit berdasarkan hasil pengamatan pada

masing-masing benda uji balok beton bertulang.

Tabel 5. Beban Ultimit Pada Balok

No	Kode Balok	Jumlah Lapis	f'_c (MPa)	P_{ult} (kN)	P_{ult} Rata-rata (kN)	M_{ult} (kNm)	M_{ult} Rata-rata (kNm)
1	BN1	0	33,97	52,5	53,8	7,875	8,075
2	BN2	0	36,80	54,0		8,100	
3	BN3	0	35,39	55,0		8,250	
4	BS11	1	27,46	58,0	59,7	8,700	8,950
5	BS12	1	33,97	61,0		9,150	
6	BS13	1	31,97	60,0		9,000	
7	BS21	2	33,97	62,5	61,0	9,375	9,150
8	BS22	2	28,32	60,5		9,075	
9	BS23	2	26,89	60,0		9,000	

Dari Tabel 5 diatas terlihat bahwa penambahan lapis GFRP dapat meningkatkan kuat lentur balok. Dibandingkan dengan balok tanpa penambahan lapis GFRP, peningkatan kuat lentur pada balok dengan penambahan 1 lapis GFRP adalah sebesar 10,8 %, sedangkan untuk 2 lapis GFRP peningkatan terjadi sebesar 13,4 %. Peningkatan kuat lentur pada balok dengan penambahan 2 lapis GFRP ini tidak terlalu jauh berbeda dibandingkan balok dengan penambahan 1 lapis GFRP, hal ini disebabkan karena terjadinya pelepasan lekatan antara beton dengan lapis GFRP (*debonding*) pada balok dengan 2 lapis GFRP sebelum kapasitas maksimum 2 lapis GFRP dimanfaatkan.

Model Keruntuhan Balok

Dari hasil pengujian terhadap balok beton bertulang yang berukuran 100 x 150

x 1100 mm, secara umum keruntuhan yang terjadi pada semua benda uji balok adalah keruntuhan lentur. Keruntuhan ini ditandai dengan terjadi pelelehan baja tulangan yang dilanjutkan dengan hancurnya beton pada serat tekan. Pada Tabel 6 disajikan model keruntuhan dari masing-masing benda uji balok.

Tabel 6. Model Keruntuhan Balok

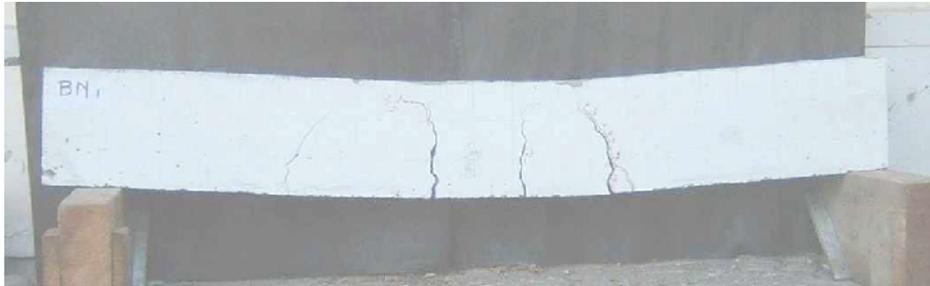
Kode Balok	P_{ult} (kN)	Model Keruntuhan
BN1	52,5	Lentur
BN2	54,0	Lentur
BN3	55,0	Lentur
BS11	58,0	Lentur, GFRP Putus
BS12	61,0	Lentur, GFRP Putus
BS13	60,0	Lentur, GFRP Putus
BS21	62,5	Lentur, GFRP debonding
BS22	60,5	Lentur, GFRP debonding
BS23	60,0	Lentur, GFRP debonding

Pada balok tanpa penambahan lapis GFRP, terjadi keruntuhan lentur yaitu terjadi leleh baja tulangan yang ditandai dengan peningkatan lendutan yang besar tanpa adanya peningkatan beban yang berarti sebelum terjadinya keruntuhan balok.

Pada balok dengan penambahan lapis 1 GFRP terjadi keruntuhan lentur, yang disertai dengan peningkatan kapasitas beban dibandingkan dengan balok tanpa penambahan lapis GFRP sampai dengan terjadi putusannya lapis GFRP secara tiba-tiba. Setelah lapis GFRP ini putus kemudian diikuti dengan melelehnya baja tulangan sampai balok mengalami keruntuhan.

Pada balok dengan penambahan 2 lapis GFRP terjadi keruntuhan lentur, yang disertai dengan peningkatan kapasitas beban dibandingkan dengan balok tanpa penambahan lapis GFRP sampai terjadi pelepasan lekatan antara lapis GFRP dengan beton (*debonding*) yang terjadi secara tiba-tiba. Setelah terjadi *debonding* pada balok dilanjutkan dengan pelelehan baja tulangan sampai balok mengalami kehancuran pada serat tekan balok.

Model keruntuhan dari hasil pengujian balok dapat dilihat pada Gambar 7 sampai Gambar 9.



Gambar 7. Model Keruntuhan Balok Tanpa Penambahan Lapis GFRP



Gambar 8. Model Keruntuhan Balok Dengan Penambahan 1 Lapis GFRP (GFRP Putus)



Gambar 9. Model Keruntuhan Balok Dengan Penambahan 2 lapis GFRP (GFRP Debonding)

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Dari analisa hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa simpulan sebagai berikut :

1. Pola retak yang terjadi pada semua benda uji balok masih merupakan pola retak lentur.
2. Penambahan lapis GFRP dapat menahan panjang retak serta lebar retak yang terjadi pada benda uji balok.
3. Keruntuhan yang terjadi pada semua benda uji balok adalah keruntuhan lentur dimana pada balok dengan penambahan 1 lapis GFRP disertai dengan putusya GFRP, sedangkan pada balok dengan penambahan 2 lapis GFRP disertai dengan pelepasan lekatan (*debonding*) antara lapis GFRP dengan beton.
4. Penambahan lapis GFRP dapat meningkatkan beban retak pertama yaitu sebesar 20 % baik untuk penambahan 1 lapis GFRP maupun penambahan 2 lapis GFRP.
5. Penambahan lapis GFRP dapat meningkatkan kuat lentur balok yaitu sebesar 10,8 % untuk penambahan 1 lapis GFRP dan 13,4 % pada penambahan 2 lapis GFRP.

Saran

Beberapa saran dapat diberikan dari hasil penelitian ini yaitu:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi lepasnya lekatan (*debonding*) lapis GFRP dari beton.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan jenis serat yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

Departemen Pekerjaan Umum. 1991. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung, SK SNI T-15-1991-03*, Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan, Bandung, 174 pp.

- Dipohusodo, I. 1996. *Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03*, PT.Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 527 pp.
- Feldman, D. dan Hartomo, A.J. 1995. *Bahan Polimer Konstruksi Bangunan*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 117 pp.
- McKenna, J.K. and Erki, M.A. 1993. *Strengthening Of Reinforced Concrete Flexural Members Using Externally Applied Steel Plate and Fibre Composite Sheets-A Survey*, Canadian Journal of Civil Engineering Vol 21, Canada, pp 16-24.
- Nawy, E.G. 1990. *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*, PT. Eresco, Bandung, 763 pp.
- Portland Cement Assosiation (PCA), 1991. *Fibre Reinforced Concrete*, United State of America, 48 pp.
- Saadathmanesh, H. 1994. *Fiber Composite For New and Existing Structures*, ACI Structural Journal, May-June, pp 346-354.
- Subakti, A. 1994. *Teknologi Beton Dalam Praktek*, Divisi Percetakan Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS, Surabaya.
- Sudiasa, IM.A. 2003, *Perilaku Runtuh Balok Beton Bertulang Dengan Penambahan Lapis Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)*, Tugas Akhir Strata-1, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Bali, 78 pp.
- Vis, W.C. dan Kusuma, G.H. 1993. *Dasar-dasar Perencanaan Beton Bertulang*, Erlangga, Jakarta, 267 pp.