

PENGARUH PEMASANGAN ANGKER UJUNG TERHADAP PERILAKU RUNTUH BALOK BETON BERTULANG DENGAN PENAMBAHAN LAPIS GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*)

I K. Sudarsana¹, I B. Rai Widiarsa¹

¹Dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana, Denpasar
E-mail : iks@yahoo.com

Abstrak: Beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa fenomena kritis dalam penggunaan lembar FRP sebagai tulangan luar adalah debonding antara lembar FRP dan beton. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh angker ujung terhadap perilaku runtuh dan kuat lentur balok beton bertulang dengan penambahan lapis GFRP tipe *woven roving*.

Pengujian kuat lentur dilakukan terhadap benda uji balok beton bertulang dengan ukuran 100×150×1100 mm, di atas 2 tumpuan sederhana dan dibebani 2 beban terpusat pada jarak 300 mm dari masing-masing tumpuan. Benda uji dibuat dalam 5 perlakuan yaitu, balok tanpa penambahan lapis GFRP, balok dengan penambahan 2 lapis GFRP tanpa angker ujung dan balok dengan penambahan 2 lapis GFRP dengan angker ujung *U-shape straps, bolt dan fasteners*. Masing-masing perlakuan dibuat 3 buah benda uji. Adapun data yang diamati selama pengujian meliputi beban retak, pola retak, lebar retak, beban ultimit, lendutan dan model keruntuhan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan pemasangan angker ujung dapat mengubah titik awal terjadinya debonding lembar GFRP dari daerah cut-off point pada balok tanpa angker ujung menjadi dibawah beban atau tengah bentang untuk balok dengan angker ujung. Penggunaan angker ujung juga dapat meningkatkan kuat lentur pada balok beton bertulang dengan penambahan 2 lapis GFRP tanpa angker, penambahan angker ujung ini mampu meningkatkan beban ultimate masing-masing sebesar 18.628%, 5.555% dan 10.131% untuk angker jenis fastener, U-shape straps dan baut. Bila dibandingkan dengan balok kontrol (tanpa penambahan lembar GFRP) peningkatan kapasitas lenturnya sebesar 31.373% untuk angker ujung jenis pengancing (*fasteners*), sedangkan untuk angker ujung jenis sabuk (*U-shape straps*) dan baut (*baut*) masing-masing sebesar 18.3% dan 22.876%.

Kata kunci : Angker ujung, Perkuatan GFRP, balok beton bertulang, kuat lentur.

THE EFFECTS OF END ANCHORAGE ON FAILURE BEHAVIOR OF RC BEAM WITH GFRP SHEET

Abstract: Some researches have shown that critical phenomena on the use of FRP sheets as external reinforcement is de-bonding between the FRP sheet and concrete. This research was done to investigate the effect of end anchorage on failure behavior and flexural strength of reinforced concrete beam with additional GFRP sheet.

The test was done on reinforced concrete beam specimens with dimension of 100 x 150 x 1100 mm on a simple support having a span length of 900 mm. The specimens were loaded using 2 point concentrated loads at 300 mm from the supports. Three group specimens were made namely control beam without additional GFRP sheets, beam with 2 layer GFRP sheets without end anchorage,

beam with 2 layer GFRP sheets with end anchorage type U-shape straps, fasteners and steel bolts. Each group consists of 3 specimens. The data observed during the test are cracking loads, crack patterns, crack widths, ultimate load capacities, deflections and failure modes.

Test results show that end anchorage changes starting point of de-bonding mode failure of the GFRP sheets which is from the point of cut-off to the middle span of the beams. The addition of end anchorages can increase the ultimate flexural capacity of the beam with 2 layer GFRP sheet about 18.628%, 5.555% and 10.131% respectively for end anchorage of fastener, U-shape straps and steel bolts. When it is compared to the capacity of control beam, the ultimate flexural capacity of the beams with end anchorage is higher about 31.373%, 18.3% and 22.876% for end anchorage of fastener, U-shape straps and steel bolts, respectively.

Key Words: end anchorage, GFRP strengthening, reinforced concrete beam, flexural strength.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Sistem perkuatan dengan melekatkan lapis FRP telah terbukti efektif dan efisien sebagai salah satu cara mengatasi terjadi degradasi kekuatan struktur akibat dari menurunnya kekuatan material penyusunnya. (Meier et al., 1992). Sejumlah keuntungan dari penggunaan lembar FRP sebagai material perbaikan struktur meliputi kemudahan dalam aplikasi, ketahanan terhadap lingkungan agresif (korosi), materialnya ringan dan pertimbangan rasio antara kekuatan tinggi terhadap beratnya. Namun, kelebihan ini baru dapat bermanfaat bila perilaku komposit antara lapis FRP dengan media struktur dapat berperilaku memuaskan.

Beberapa penelitian yang dilakukan oleh Bonacci dan Maalej (2001) menunjukkan perkuatan balok beton bertulang dengan penambahan lapis GFRP dapat meningkatkan kapasitas lentur dan kekakuan balok beton bertulang. Namun, model keruntuhan yang dominan dari benda uji berupa kegagalan lekatan (*debonding*) yang mencapai hingga 50%. Kondisi ini juga terjadi pada penelitian awal penggunaan lapis GFRP tipe *woven roving* untuk perkuatan lentur balok beton bertulang (Sudarsana, 2007) dimana model keruntuhan yang terjadi pada semua benda uji balok adalah keruntuhan lentur dengan putusannya lapis GFRP untuk penambahan 1

lapis GFRP, sedangkan pada penambahan 2 lapis GFRP disertai dengan pelepasan lekatan (*debonding*) antara lapis GFRP dengan permukaan beton. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dalam perkuatan struktur dengan komposit lapis GFRP yang berfungsi sebagai external reinforcement, kekuatan lekatan menjadi hal yang penting dan sangat perlu diperhitungkan dalam perencanaannya sehingga fungsi yang optimal dari lapis GFRP sebagai external reinforcement dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan kapasitas penuh dari lembar GFRP tersebut. Analisa tegangan pada interface lapis GFRP dengan beton menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan yang paling besar terjadi pada daerah cut-off atau ujung lapis GFRP tersebut.

Untuk mengatasi terjadinya *debonding* lapis GFRP dari permukaan beton, maka perlu dikembangkan suatu cara untuk mencegahnya. Salah satu alternatifnya adalah memasang angker pada ujung lapis GFRP. Penelitian penggunaan angker ujung jenis *U-shape* dan *baut* sudah pernah dilakukan untuk lapis CFRP, namun aplikasi metode ini bila menggunakan lembar GFRP dengan perekat epoxy masih perlu diteliti. Disamping dua tipe angker ujung yang telah disebutkan di atas, diteliti juga tipe angker ujung berupa *fastener* (pengancing) dari material yang sama dengan GFRP. Dari ketiga tipe angker ujung yang diteliti ini diharapkan dapat memberikan gambaran dari tipe ang-

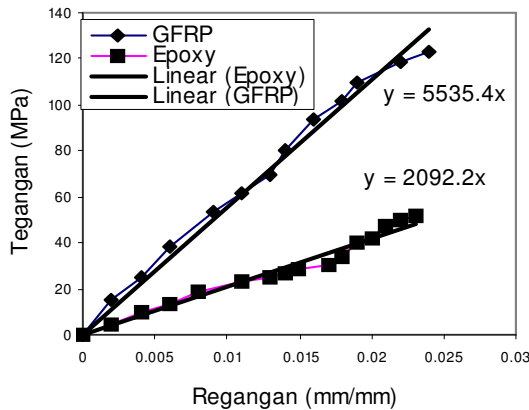
ker ujung yang mampu memberikan perilaku yang paling baik dalam respon struktur yang diperkuat dengan GFRP.

MATERI DAN METODE

GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*)

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) adalah material komposit yang terdiri dari *fibre* (serat) *glass* yang disatukan zat matrik, seperti *epoxy* atau *polyester*. Matrik itu sendiri berfungsi sebagai media penyalur tegangan ke serat dan melindungi serat dari pengaruh lingkungan yang agresif (Feldman dan Hartono, 1995)

GFRP yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari serat gelas (*fibre glass*) berbentuk *woven roving* serta resin *epoxy*. Dari hasil pengujian GFRP didapat kuat tarik ultimit (f_{tu}) = 123.33 MPa, sedangkan *epoxy* mempunyai kuat tarik ultimit (f_{au}) = 51.43 MPa. Modulus elastisitas GFRP (E_f) dan Epoxy (E_a) didapat dengan menarik garis regresi linear terhadap data dan didapat $E_f = 5535.4$ MPa ; $E_a = 2092.2$ MPa.



Gambar 1. Diagram tegangan-regangan 2 lapis GFRP dan Epoxy Material Beton

Material yang digunakan dalam pembuatan campuran beton telah memenuhi syarat pengujian bahan menurut ASTM. Hasil pengujian Laboratorium terhadap agregat halus (pasir) dan agregat kasar

(batu pecah) selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 1. Untuk mengetahui mutu beton dilakukan pengujian kuat tekan silinder diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Dari hasil pengujian kuat tekan silinder didapat kuat tekan beton rata-rata sebesar 21.13 MPa

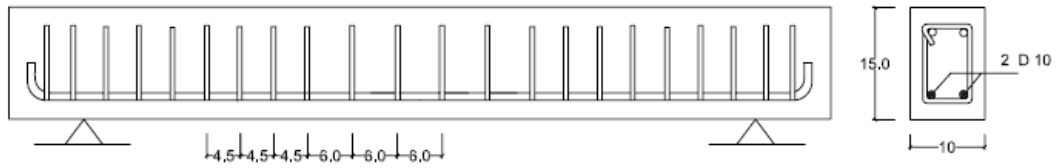
Tabel 1. Hasil pengujian bahan campuran beton

No	Pengujian	Agregat Halus (Pasir)	Agregat Kasar (Batu Pecah)
1	Berat Satuan (kg/lt)	1.504	1.503
2	Berat Jenis Bulk (gr/cm ³)	2.564	3.120
3	Berat Jenis SSD (gr/cm ³)	2.616	3.140
4	Berat Jenis Semu (gr/cm ³)	2.706	3.190
5	Penyerapan Air (gr/cm ³)	2.041	0.760
6	Kadar Air (%)	2.940	0.770
7	Modulus Kehalusan	2.400	7.180

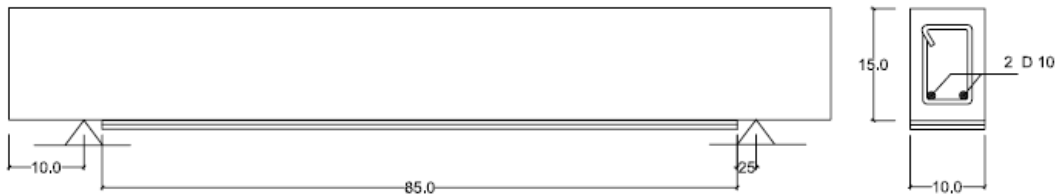
Pengujian kuat tekan didapat kuat tekan silinder rata-rata sebesar 21.13 MPa

Pembuatan Benda Uji

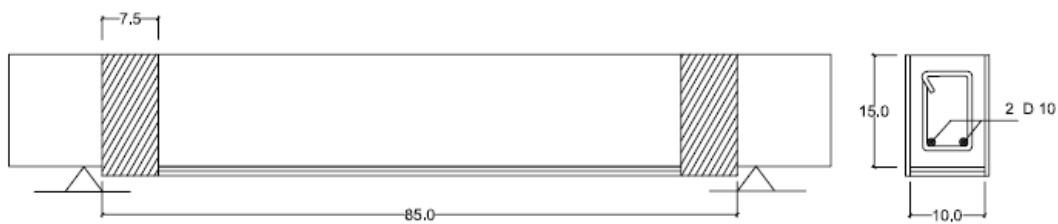
Benda uji berupa balok dengan ukuran 100×150×1100 mm dengan tebal selimut beton 25 mm. Tulangan yang dipakai adalah tulangan tunggal 2 ϕ 10 mm dengan $f'_y = 406.729$ MPa dan sengkang ϕ 6 dengan jarak 45 mm. Benda uji dibuat dalam 5 perlakuan yaitu balok normal tanpa penambahan lapis GFRP, balok dengan penambahan 2 lapis GFRP tanpa anker ujung dan balok dengan penambahan 2 lapis GFRP dengan anker ujung *U-shape straps, bolt dan fastener*. Setiap perlakuan dibuat 3 buah benda uji. Model benda uji dapat dilihat pada Gambar 2, sedangkan jenis dan pemasangan anker ujung pada penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3(a) dan (b).



Model penulangan benda uji balok beton bertulang



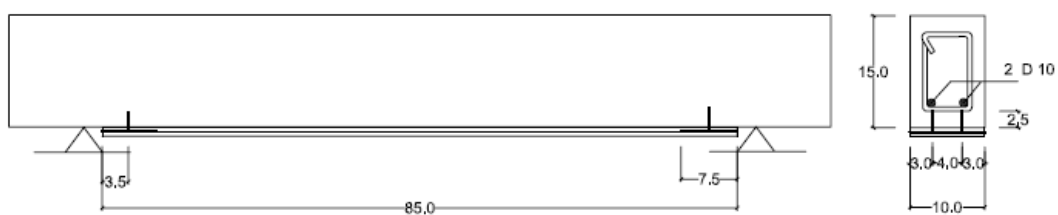
Balok dengan penambahan 2 lapis GFRP tanpa anker ujung



Balok dengan anker ujung jenis sabuk (*U-shape straps*)



Balok dengan anker ujung jenis baut (*bolt*)



Balok dengan anker ujung jenis pengancing (*fasteners*)

Gambar 2. Model benda uji balok

Penambahan lapis GFRP dilakukan setelah beton berumur 28 hari. Permukaan beton yang akan dilapisi diratakan dengan menggunakan gerinda. Setelah permukaan beton rata lalu debu pada permukaan beton dibersihkan dengan menggunakan ampas dan sikat kawat dan kemudian di-*vacuum*. Permukaan beton dilubangi dengan kedalaman 2.5 cm pada tempat di-

mana akan dipasang anker ujung (jenis pengancing dan baut) dengan menggunakan mesin bor beton. Adapun langkah-langkah pemasangan anker ujung sebagai berikut:

1. Jenis sabuk (*U-shape straps*)

- Permukaan beton dilapisi dengan *resin epoxy*, selanjutnya Lapis pertama GF-

RP dipasang dan dijenuhkan dengan menggunakan *roller*.

- Dilanjutkan dengan pemasangan lapis GFRP yang kedua bersamaan dengan pemasangan angker dan dijenuhkan dengan menggunakan *roller* secara bersama-sama.

2. Jenis pengancing (*fastener*)

- Angker dipasang pada lubang yang telah dibuat pada permukaan beton dan direkatkan dengan *resin epoxy*.
- Ujung angker dan lapis pertama serat gelas dilapisi dengan *resin epoxy* dan dijenuhkan dengan menggunakan *roller*

roller secara bersama-sama sehingga ujung angker dan lapis serat gelas menjadi satu.

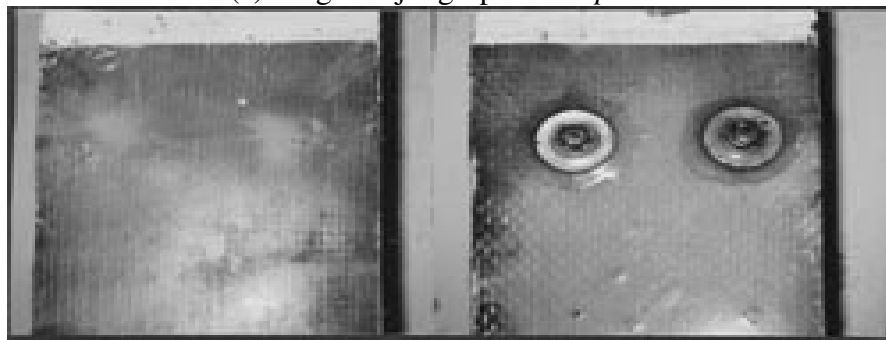
- Kemudian dilanjutkan dengan pemasangan lapis GFRP yang kedua (posisi ujung angker berada diantara lapis GFRP yang pertama dan kedua).

3. Jenis baut (*bolt*)

- Angker dipasang pada lubang yang telah dibuat pada permukaan beton dan direkatkan dengan resin *epoxy*.
- Mur baut dipasang setelah lapis GFRP mengering.



(a) Angker ujung tipe *U-shape*



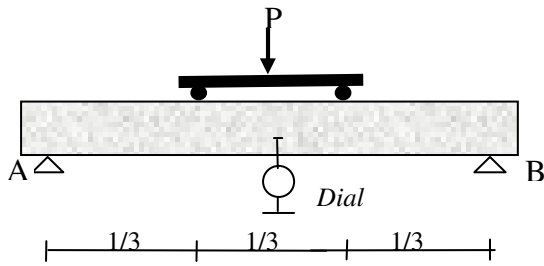
(b) Angker ujung tipe *fastener* dan baut

Gambar 3. Tipe-tipe angker ujung yang dipergunakan

Uji Pembebanan

Pembebanan dilakukan dengan meletakkan balok di atas dua tumpuan dengan bentang bersih 900 mm. Balok dibebani pada dua titik pembebanan sebesar $P/2$ sejauh $1/3 L$ dari perletakan. Pembebanan dilakukan secara bertahap sebesar 2,5 kN sampai balok mengalami keruntuhan. Aplikasi beban dilakukan secara perlahan dengan kecepatan konstan sebesar 1 kN/menit.

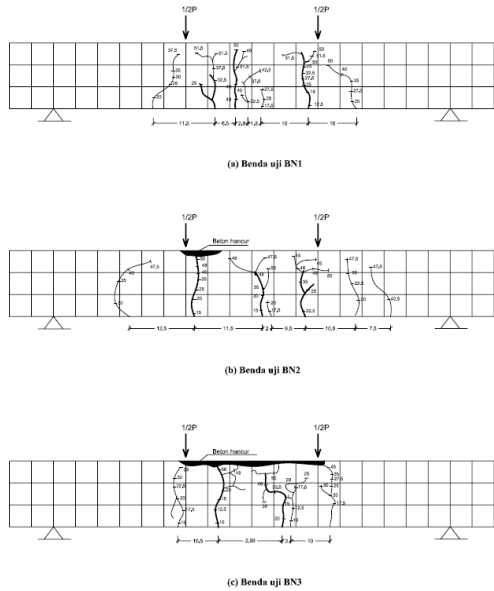
Selama proses pembebanan, perilaku balok diamati dan dicatat secara cermat. Lentutan di tengah bentang dicatat untuk setiap peningkatan beban melalui sebuah dial gauge. Begitu juga terbentuknya retak diamati dan ditandai pada balok untuk setiap tahap pembebanan.



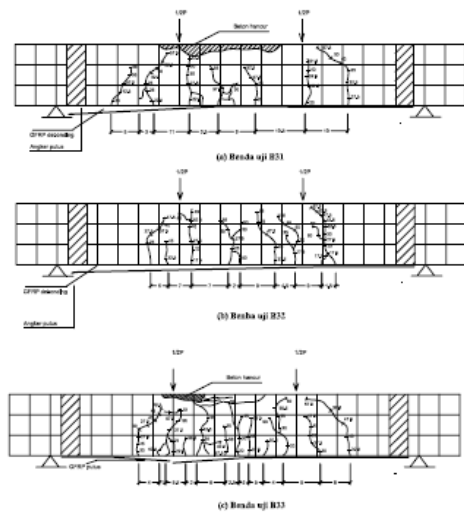
Gambar 4. Set-up pembebanan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian kuat lentur balok beton bertulang yang telah dilakukan, kemudian ditampilkan pada bagian ini dan dibahas berdasarkan data yang diambil pada saat pengujian meliputi pola dan jarak retak, lebar retak, beban ultimit dan lendu-



Gambar 5. Retak pada balok normal

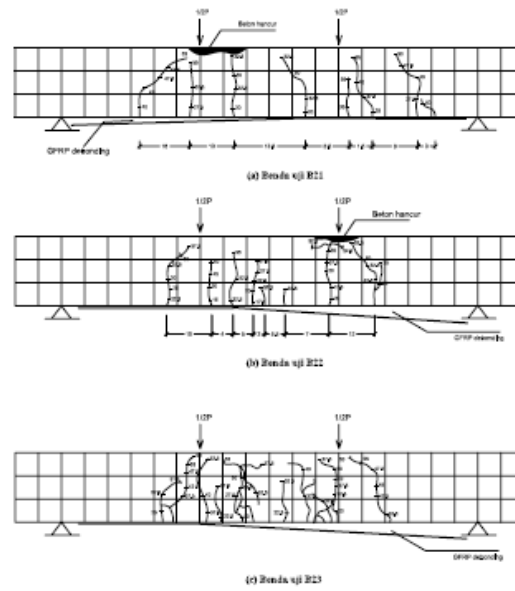


Gambar 7. Balok dengan angker U-shape

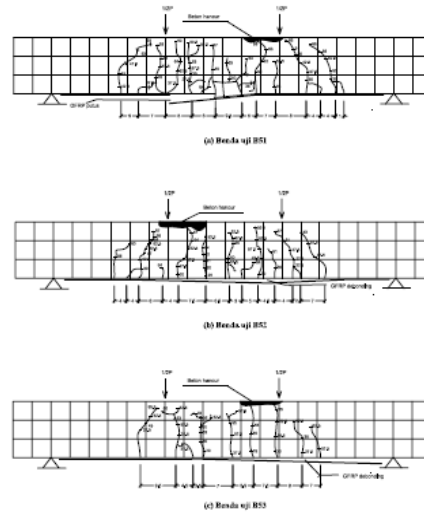
tan untuk menjelaskan perilaku balok dengan penambahan lapis GFRP dan angker ujung. Perilaku lebih detail dari benda uji balok selama pengujian dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pola Dan Jarak Retak

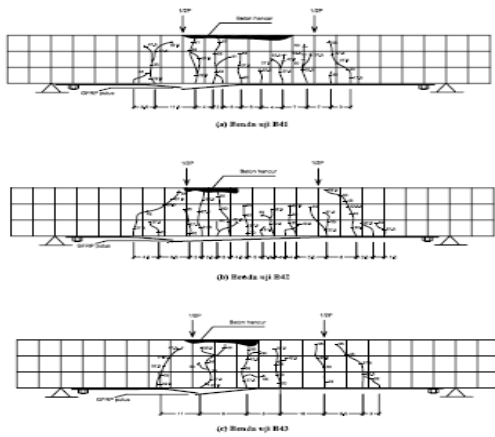
Pola dan jarak retak yang terjadi pada masing-masing benda uji balok dapat dilihat pada Gambar 5 sampai 9. Pola retak yang terjadi pada semua benda uji balok pada penelitian ini adalah pola retak lentur, hal ini dilihat dari adanya retak-retak yang arah rambatannya vertikal terhadap sumbu memanjang balok.



Gambar 6. Retak balok dengan 2 lapis GFRP



Gambar 8. Balok dengan angker fastener



Gambar 9. Balok dengan angker baut

Pemasangan angker ujung dapat menghasilkan jarak antar retak lebih berdekatan dengan penyebaran yang lebih merata pada daerah pembebanan. Hal tersebut karena tegangan geser horisontal yang bekerja berkurang dengan adanya angker sehingga *debonding* lebih lambat terjadi dari pada balok tanpa angker ujung.

Sedangkan rambatan retaknya, balok dengan angker ujung fasteners mempunyai rambatan retak yang lebih lambat dan peyebaran retak yang lebih merata dibandingkan dengan balok dengan angker ujung jenis sabuk dan baut. Retak yang arah rambatannya horisontal yang merupakan lanjutan dari retak lentur juga terjadi pada daerah tarik beton (Balok B33 dan B51), retak horisontal tersebut terjadi setelah rambatan retak lentur sampai ke sisi atas beton.

Lebar Retak

Pada Tabel 2 ditampilkan lebar retak yang terjadi pada masing – masing dari 15 (lima belas) benda uji balok.

Lebar retak (*w*) pada balok pada kondisi beban layan dapat ditentukan dengan Persamaan Georgely-Lutz sebagai berikut (Nawy, E. G. 1990) :

$$w = 11 \cdot 10^{-6} \cdot \beta \cdot f_s \cdot \sqrt[3]{d_c} \cdot A$$

$$w = 1110^6 \times 1.2 \times (0.6 \times 406729) \times \sqrt[3]{25 \times \left(\frac{2 \times 25 \times 100}{2}\right)}$$

$$= 0,13 \text{ mm}$$

Pola retak pada balok dengan penambahan 2 lapis GFRP masih konsisten dengan hasil yang diperoleh pada penelitian sebelumnya (Sudarsana, 2007) dimana penambahan GFRP dapat memperlambat terbentuknya retak pertama dengan jarak retak yang tidak jauh berbeda dengan balok tanpa perkuatan.

Dari Tabel 2. dapat dilihat bahwa pada saat beban mencapai 26.09%-38.09% dari beban ultimit yang merupakan beban retak pertama, lebar retak pada balok dengan penambahan lapis GFRP jauh lebih kecil dari pada lebar retak pada balok tanpa penambahan lapis GFRP.

Jika dibandingkan dengan lebar retak teoritis pada beban 76.087% - 93.333% dari beban ultimit, lebar retak rata-rata pada balok dengan penambahan 2 lapis GFRP tanpa dan dengan angker ujung masing-masing sebesar 0.135 mm dan 0.177 mm.

Nilai rata-rata ini tidak jauh berbeda dengan lebar retak teoritis dengan menganggap tidak ada lapis GFRP dengan tegangan baja f_s sebesar $0.6 f_y$. Namun perlu dicatat bahwa lebar retak teoritis yang dihitung berdasarkan tegangan baja ini merupakan lebar retak pada kondisi beban layan sedangkan pada pembebanan antara 76.08% sampai dengan 93.333% beban ultimit tersebut sudah jauh melewati beban layan, sehingga lebar retak hasil eksperimen ini sedikit lebih tinggi dari lebar retak teoritis.

Tabel 2. Lebar retak pada balok

No	Kode balok	P_{ult} (kN)	P (kN)	% beban pengamatan dari beban ultimit (%)	Lebar retak eksperimen (mm)	Lebar retak Teori (mm)
1	BN1	51.5	12.5	24.27	0.1	0.13
			45	87.379	1.0	
2	BN2	50	15	30.000	0.15	0.13
			48	93.204	0.4	
3	BN3	51.5	10	19.420	0.2	0.13
			48	93.204	0.3	
4	B21	55	20	36.360	0.08	0.13
			50	90.909	0.1	
5	B22	57.5	15	26.090	0.02	0.13
			45	78.261	0.06	
6	B23	60	20	33.333	0.02	0.13
			56	93.333	0.3	
7	B31	60	20	33.333	0.03	0.13
			51.5	85.333	0.08	
8	B32	60	17.5	29.170	0.04	0.13
			55	91.667	0.3	
9	B33	61	20	32.780	0.04	0.13
			56.5	92.623	0.12	
10	B41	61	17.5	28.690	0.04	0.13
			55	90.164	0.08	
11	B42	67	20	29.850	0.02	0.13
			51.5	76.866	0.06	
12	B43	63	20	38.090	0.02	0.13
			52.5	83.333	0.1	
13	B51	63	20	31.750	0.02	0.13
			55	87.302	0.08	
14	B52	69	20	28.990	0.08	0.13
			52.5	76.087	0.5	
15	B53	69	20	28.990	0.02	0.13
			52.5	76.087	0.4	

Model Keruntuhan Pada Balok

Pada Tabel 3. ditampilkan model keruntuhan dari masing-masing benda uji balok. Semua benda uji mengalami keruntuhan lentur yang diawali dengan terjadinya retak-retak lentur dan selanjutnya baja tulangan mencapai leleh. Penambahan angker ujung dapat memperlambat terjadinya debonding lapis GFRP dan mengubah titik awal terjadinya debonding lapis GFRP dibandingkan dengan benda uji tanpa penambahan angker ujung. Pada balok tanpa angker ujung debonding berawal dari cut-off point GFRP, namun dengan adanya angker ujung, debonding dimulai dari titik pembebanan atau tengah bentang dimana deformasi maksimum terjadi. Di antara ketiga tipe angker ujung yang diteliti, angker ujung dari baut yang mampu bertahan sampai lapis GFRP putus, se-

dangkan dua tipe angker ujung lainnya mengalami kegagalan secara perlahan yang kemudian diikuti oleh terjadinya debonding. Kegagalan angker ini terjadi setelah beban maksimum tercapai. Kemampuan baut menahan ujung lapis GFRP untuk tidak mengalami kegagalan disebabkan kekuatan baut lebih besar daripada kuat tarik 2 lembar lapis GFRP sehingga sebelum terjadinya kegagalan pada ujung GFRP, lapis GFRP telah putus terlebih dahulu. Kegagalan pada benda uji dengan angker baut lebih getas dibandingkan dengan kegagalan yang terjadi pada benda uji dengan angker ujung lainnya.

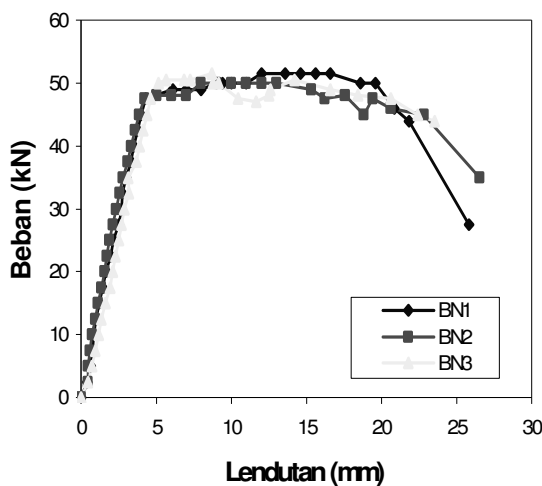
Tabel 3. Model keruntuhan pada balok

No	Variasi Balok	Kode Balok	Jumlah Lapis	P_{ult} (kN)	Model Keruntuhan
1	Balok tanpa lapis GFRP	BN1	2	51.5	Lentur
		BN2	2	50	Lentur
		BN3	2	51.5	Lentur
2	Balok dengan 2 lapis GFRP	B21	2	55	Lentur, GFRP Debonding
		B22	2	57.5	Lentur, GFRP Debonding
		B23	2	60	Lentur, GFRP Debonding
3	Balok dengan angker ujung sabuk (<i>U-shape straps</i>)	B31	2	60	Lentur, Angker putus, GFRP Debonding
		B32	2	60	Lentur, Angker putus, GFRP Debonding
		B33	2	61	Lentur, GFRP Putus
4	Balok dengan angker ujung baut (<i>bolt</i>)	B41	2	61	Lentur, GFRP Putus
		B42	2	67	Lentur, GFRP Putus
		B43	2	60	Lentur, GFRP Putus
5	Balok dengan angker ujung pengancing (<i>fasteners</i>)	B51	2	63	Lentur, GFRP Putus
		B52	2	69	Lentur, Angker putus, GFRP Debonding
		B53	2	69	Lentur, Angker putus, GFRP Debonding

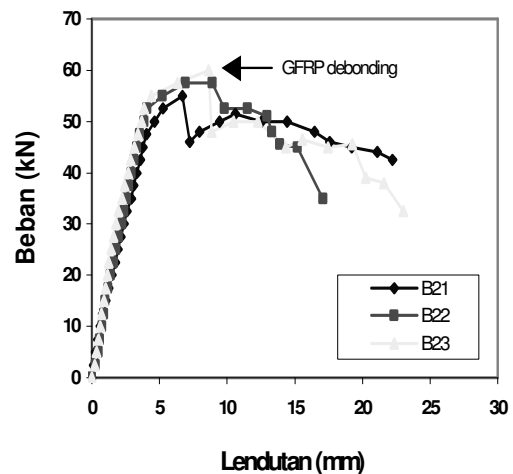
Hubungan Beban dan Lendutan

Lendutan vertikal pada tengah-tengah bentang balok dicatat untuk setiap peningkatan beban 2,5 kN sampai balok mengalami keruntuhan. Secara umum dapat dilihat bahwa balok tanpa perkuatan, kurva $P-\delta$ memiliki 2 titik peralihan kemiringan kurva yaitu titik dimana balok mengalami retak dan titik dimana baja mengalami leleh. Kondisi ini berbeda dengan

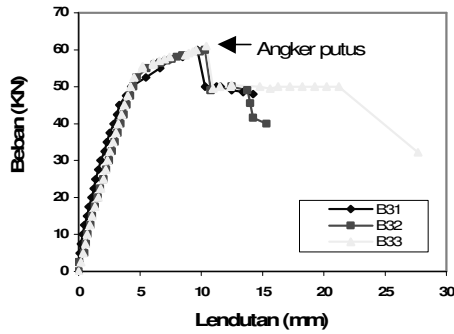
balok yang ditambahkan lapis GFRP baik dengan maupun tanpa angker ujung. Kurva $P-\delta$ dari balok tersebut terbagi atas 4 titik peralihan yaitu kondisi retak, leleh, kegagalan lapis GFRP atau angker ujung dan kondisi balok tanpa perkuatan. Secara lebih detail mengenai perilaku balok selama pengujian dapat dijabarkan sebagai berikut:



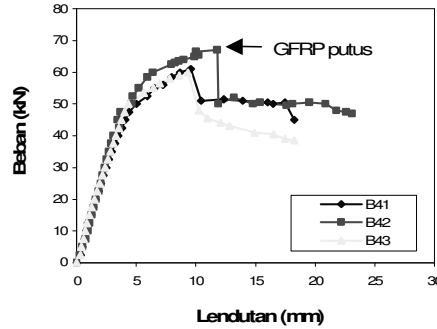
(a) Balok tanpa lapis GFRP



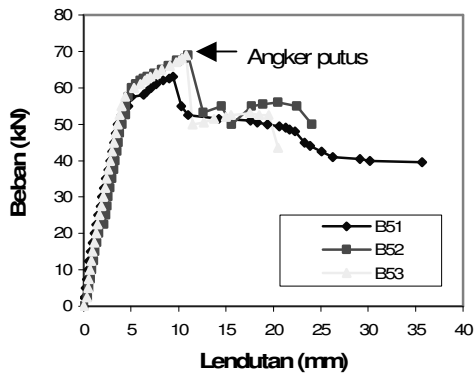
(b) Balok dengan 2 lapis GFRP tanpa angker



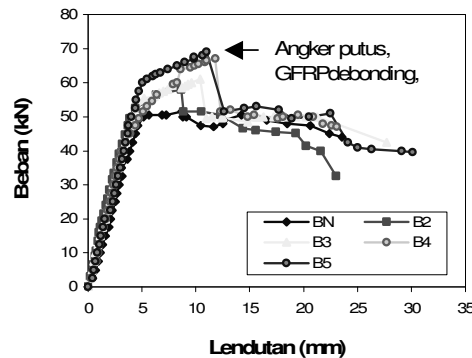
(c) Balok dengan angker U-shape



(d) Balok dengan angker Fastener



(e) Balok dengan angker Baut



(f) Perbandingan benda uji (a),(b),(c),(d),(e)

Gambar 10. Hubungan antara beban-lendutan balok untuk semua perlakuan

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

Pada Balok Tanpa Penambahan Lapis GFRP

Dari Gambar 10(a) dapat dilihat hubungan beban-lendutan pada awal pembebanan masih berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis. Pada saat baja tulangan mengalami leleh yang ditandai dengan peningkatan lendutan yang besar tanpa diikuti dengan peningkatan beban yang berarti, hal ini terjadi sampai balok mencapai beban ultimit yaitu rata-rata pada beban 51 kN.

Pada Balok Dengan Penambahan 2 Lapis GFRP

Dari Gambar 10(b) hubungan beban-lendutan pada awal pembebanan masih berupa garis lurus sampai beban rata-rata 20 kN. Pada saat baja tulangan mengalami leleh, lapis GFRP masih bekerja menahan

gaya tarik sampai terjadi kegagalan lekatan (*debonding*) antara lapis GFRP dengan permukaan beton pada beban maksimum yaitu pada beban rata-rata 57.5 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. Setelah lapis GFRP mengalami *debonding*, balok berperilaku seperti benda uji tanpa penambahan lapis GFRP sehingga tegangan tarik yang terjadi hanya dipikul oleh baja tulangan yang mengalami leleh sampai balok mencapai beban runtuhnya. Dari kurva P- δ tersebut dapat dilihat bahwa ada 4 titik peralihan kurva P- δ yaitu titik retak, leleh, GFRP debonding dan balok tanpa perkuatan.

Balok dengan penambahan angker ujung

Hubungan beban lendutan pada masing - masing jenis angker ujung dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pada Balok Dengan Angker Ujung Jenis Sabuk (*U-Shape Straps*)

Dari Gambar 10(c) hubungan beban-lendutan pada awal pembebanan masih berupa garis lurus sampai beban rata-rata 19.17 kN. Pada saat mencapai beban lokal *debonding*, lapis GFRP masih bekerja menahan gaya tarik yang ditandai dengan kurva hubungan beban-lendutan yang masih terjadi peningkatan namun lebih datar dari sebelumnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan beban terjadi secara perlahan karena mulai berkurangnya kekakuan balok akibat dari *debonding* tersebut. Dengan adanya angker rambatan *debonding* dapat ditahan terutama pada saat mendekati ujung lapis GFRP, sehingga lapis GFRP tidak terlepas sepenuhnya dari permukaan beton. Pada saat beban mencapai maksimum yaitu rata-rata 60 kN (B31, B32) angker tidak mampu lagi menahan gaya tarik dan mengalami kegagalan yaitu putusnya angker pada bagian tepi balok secara tiba-tiba yang disertai penurunan beban. Untuk balok B33 angker ujung efektif menahan *debonding* dan memaksimalkan kapasitas 2 lapis GFRP sampai terjadi putusnya lapis GFRP pada beban maksimum 61 kN. Setelah terjadinya GFRP *debonding* dan angker putus gaya tarik yang terjadi hanya dipikul oleh baja tulangan yang mengalami leleh sampai balok mencapai beban runtuhnya.

Pada Balok Dengan Angker Ujung Jenis Baut (*Bolt*)

Dari Gambar 10(d) Hubungan beban-lendutan pada awal pembebanan masih berupa garis lurus sampai beban rata-rata 19.17 kN. Pada saat mencapai beban lokal *debonding* lapis GFRP masih bekerja menahan gaya tarik, yang ditandai dengan kurva hubungan beban-lendutan yang masih terjadi peningkatan namun lebih datar dari sebelumnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan beban terjadi secara perlahan karena mulai berkurangnya kekakuan balok akibat dari *debonding* tersebut. Pada saat beban mencapai maksimum yaitu rata-rata 62.67 kN keruntuhan

pada lapis GFRP mulai terjadi, keruntuhan tersebut berupa putusnya lapis GFRP yang terjadi secara tiba-tiba yang disertai dengan penurunan beban. Setelah putusnya lapis GFRP gaya tarik gaya tarik yang terjadi hanya dipikul oleh baja tulangan yang mengalami leleh sampai balok mencapai beban runtuhnya.

Pada Balok Dengan Angker Ujung Jenis Pengancing (*Fasteners*)

Dari Gambar 10(e) hubungan beban-lendutan pada awal pembebanan masih berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh yang terjadi sampai beban rata-rata 20 kN. Pada saat mencapai beban lokal *debonding*, lapis GFRP masih bekerja menahan gaya tarik, yang ditandai dengan kurva hubungan beban-lendutan yang masih terjadi peningkatan namun lebih datar dari sebelumnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan beban terjadi secara perlahan karena mulai berkurangnya kekakuan balok akibat dari *debonding* tersebut. Dengan adanya angker rambatan *debonding* dapat ditahan terutama pada saat mendekati ujung lapis GFRP, sehingga lapis GFRP tidak terlepas sepenuhnya dari permukaan beton. Pada saat beban mencapai maksimum yaitu rata-rata 69 kN (B52, B53) angker tidak mampu lagi menahan gaya tarik dan mengalami kegagalan yaitu putusnya angker yang disertai dengan penurunan beban. Untuk balok B51 angker ujung efektif menahan *debonding* dan memaksimalkan kapasitas 2 lapis GFRP sampai terjadi putusnya lapis GFRP pada beban maksimum 63 kN. Setelah terjadinya GFRP *debonding* dan angker putus gaya tarik gaya tarik yang terjadi hanya dipikul oleh baja tulangan yang mengalami leleh sampai balok mencapai beban runtuhnya.

Pada Gambar 10(f) ditampilkan beban-lendutan rata-rata dari masing-masing perlakuan. Disini terlihat perilaku $P-\delta$ dari balok dengan angker ujung memiliki bentuk yang mirip, namun bila dilihat dari titik leleh dan kondisi beban maksimumnya ada sedikit perbedaan dari ketiga tipe ang-

ker ujung ini. Hal ini ditentukan dari kegagalan yang ditunjukkan dari jenis angker ujung tersebut.

Beban Ultimit Pada Balok

Pada Tabel 4 ditampilkan beban ultimit berdasarkan hasil pengamatan pada

masing-masing benda uji balok beton bertulang. Dari Tabel 4 terlihat bahwa penambahan lapis GFRP dapat meningkatkan kuat lentur balok beton bertulang.

Tabel 4. Beban ultimit pada balok

No	Variasi balok	Kode balok	Jumlah lapis	f'c (MPa)	Pult (kN)	Mult (kNm)
1	Balok tanpa	BN1	0	21.129	51.5	7.725
2	penambahan lapis	BN2	0	21.129	50	7.500
3	GFRP	BN3	0	21.129	51.5	7.725
4	Balok dengan	B21	2	21.129	55	8.250
5	penambahan 2 lapis	B22	2	21.129	57.5	8.625
6	GFRP	B23	2	21.129	60	9.000
7	Balok dengan angker	B31	2	21.129	60	9.000
8	ujung jenis sabuk	B32	2	21.129	60	9.000
9	(U-shape straps)	B33	2	21.129	61	9.150
10	Balok dengan angker	B41	2	21.129	61	9.150
11	ujung jenis baut	B42	2	21.129	67	10.050
12	(baut)	B43	2	21.129	60	9.000
13	Balok dengan angker	B51	2	21.129	63	9.450
14	ujung jenis pengancing	B52	2	21.129	69	10.350
15	(fasteners)	B53	2	21.129	69	10.350

Jika dibandingkan dengan balok tanpa penambahan lapis GFRP, peningkatan beban ultimit pada balok dengan penambahan 2 lapis GFRP tanpa angker ujung sebesar 12.745%. Untuk balok dengan angker ujung peningkatan beban ultimit terbesar terjadi pada balok dengan angker ujung jenis fasteners yaitu 31.373%, sedangkan peningkatan beban ultimit untuk balok dengan angker ujung jenis sabuk dan baut masing-masing 18.3% dan 22.876%. Bila dibandingkan dengan balok dengan 2 lapis GFRP tanpa angker ujung, pemasangan angker ujung ini mampu meningkatkan kapasitas lentur balok masing-masing sebesar 18.628%, 5.555% dan 10.131% untuk tipe angker *fastener*, *U-shape straps* dan *bolt*. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa pemasangan angker ujung dapat meningkatkan kuat lentur pada balok dengan penambahan lapis GFRP. Hal tersebut terjadi karena angker ujung dapat memperlambat terjadinya *debonding* sehingga kapasitas lapis GFRP dalam menerima beban dapat dimanfaatkan lebih maksimal.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Keruntuhan yang terjadi pada semua benda uji balok berupa keruntuhan lentur yang disertai dengan putusnya GFRP atau GFRP *debonding*, sedangkan keruntuhan pada angker ujung berupa putusnya angker pada beban maksimum.
2. Penambahan angker ujung mengubah titik awal terjadinya *debonding* lapis GFRP dari *cut-off point* pada balok dengan 2 lapis GFRP menjadi di daerah pembebanan atau tengah bentang pada balok dengan angker ujung.
3. Balok dengan *U-shape straps* dan *fastener* mengalami keruntuhan pada kondisi beban ultimit berawal dari kegagalan angker itu sendiri, sedangkan balok dengan angker baut, keruntuhan pada kondisi beban ultimit diakibatkan oleh putusnya lembar GFRP diantara

angker. Diantara ketiga tipe angker tersebut, perilaku keruntuhan balok dengan angker *fastener* yang paling daktail.

4. Pemasangan angker ujung pada balok dengan penambahan 2 lapis GFRP dapat meningkatkan kapasitas lentur balok sebesar 18.628%, 5.555% dan 10.131% masing-masing untuk tipe angker *fastener*, *U-shape straps* dan *bolt* dari kapasitas balok dengan penambahan 2 lapis GFRP tanpa angker ujung.

Saran

Penelitian ini terbatas pada penggunaan satu jenis material FRP dari serat gelas dengan jenis epoxy resin yang ada dipasaran. Penelitian dengan serat FRP seperti carbon dan aramid perlu dilakukan. Disamping itu dengan masih tetap terjadinya kegagalan debonding serat FRP dari permukaan beton, maka perlu dilakukan pengujian dengan menggunakan lem epoxy yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Bonacci, J. F. and Maalej, M. 2001. *Behavioral Trend of RC Beam Strengthened With Externally Bonded FRP*, Journal of Composites For Construction, Vol.5, No.2, May, pp 102-113.
- Mahmoud, T., El-Mihilmy. And Todesco, J. W. 2000. *Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened With FRP Plate Laminate*, ACI Structural Journal, Vol. 126, No. 6, June, pp 684-691.
- Malek, A. M., Saadatmanesh, H. And Ehsani, M. 1998. *Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened With FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End*, ACI Structural Journal, Vol. 195, No.1, January-February, pp 142-152.
- Nawy, E. G. 1990. *Beton Bertulang Sebagai Pendekatan Dasar*, Eresco, Bandung, 763 pp.
- Sudiasa. M. A. 2003. Perilaku Runtuh Balok Beton Bertulang Dengan Penambahan Lapis Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP), Tugas Akhir, 78 pp.
- Sudarsana, I K. and Sukrawa, M. 2007. Flexural Strengthening of T-Beam Bridge Girder Using External Laminate of CFRP Sheets, Proceeding of 1st International Conference of EACEF, UPH-Jakarta, 26-27 September 2007.
- Sudarsana, I K. 2007. *Penggunaan Lembar GFRP tipe Woven Roving untuk Perkuatan Lentur Balok*. Prosiding Konferensi Nasional Pengembangan Infrastruktur Berkelanjutan, Program S2 Sipil-JTS Unud, Sahid Hotel Bali, 18 Oktober.