

PERKUATAN GESER BALOK BETON BERTULANG MENGGUNAKAN GLASS FIBER REINFORCED POLYMER (GFRP)

Putu Deskarta¹

¹Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Denpasar
E-mail: deskarta@civil.unud.ac.id

Abstrak: Penelitian dengan pengujian laboratorium dilaksanakan untuk mengetahui pengaruh dari pelat GFRP terhadap peningkatan kapasitas geser dari balok beton bertulang yang diperkuat pelat GFRP. Pengujian difokuskan untuk menentukan pengaruh dari pelat GFRP yang dilekat pada kedua sisi samping balok terhadap peningkatan kapasitas dari balok

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh dari penambahan pelat GFRP dengan arah serat $0^{\circ}/90^{\circ}$, $\pm 45^{\circ}$ and 0° terhadap peningkatan kapasitas geser dari penampang beton bertulang. Penampang balok adalah 100 x 150 cm dan panjang 950 cm. Pelat GFRP ditambahkan pada kedua sisi permukaan balok dengan melapisi permukaan tersebut dengan epoxy resin dan menambahkan *glass fiber* dalam bentuk *woven roving* pada arah yang diperlukan dan terakhir ditutup kembali dengan epoxy. Balok ditumpu sederhana dan diberikan beban di empat titik. Data yang dikumpulkan berupa beban-lendutan pada setiap penambahan beban sampai runtuh dan pola runtuh dari balok.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok tanpa GFRP mengalami pola runtuh geser sedangkan balok dengan GFRP mengalami pola runtuh lentur. Selanjutnya, penambahan GFRP pada balok meningkatkan kapasitas beban balok sebesar rata-rata 12.48%. Arah serat GFRP memberikan sedikit perbedaan terhadap peningkatan kapasitas dan besarnya peningkatan kapasitas yang diberikan oleh serat dengan arah $0^{\circ}/90^{\circ}$, 0° , dan $\pm 45^{\circ}$ adalah masing-masing 13.744%, 11.374%, dan 12.322% . Secara teoritis serat dengan arah $\pm 45^{\circ}$ seharusnya memberikan nilai tertinggi tetapi hal ini tidak terjadi dikarenakan lepasnya (*debonding*) pelat GFRP dari permukaan balok.

Kata kunci : Pelat GFRP, arah serat, dan balok beton.

SHEAR STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS USING GLASS FIBER REINFORCED POLYMER (GFRP)

Abstract: In order to know the effect of GFRP plates on increasing capacity of reinforced concrete beams, an experiment on reinforced concrete beams strengthened by GFRP plates is made. This experiment is focused on finding the effects of bounding GFRP plates to the side surfaces of the beams on increasing capacity of the beams.

In this experiment the effect of adding GFRP plates having fiber directions of $0^{\circ}/90^{\circ}$, $\pm 45^{\circ}$ and 0° to the increasing shear capacity of reinforced concrete section was studied. The beams had section dimension of 100 cm by 150 cm and length 950 cm. The GFRP plates were added on the two side surfaces of the beams by covering the surfaces with epoxy resin and then add glass fiber in the form of woven roving in the direction needed and finally cover again with the epoxy. The beams were simply supported and subjected to four points load. Data recorded were the load-deflection at every step of loading until failure and modes of failure of the beams.

The result shows that the beams without GFRP fail in shear failure mode and the beams with GFRP fail in flexural failure mode. More over, addition of GFRP to the beams increases the load capacity of the beams by 12.48% averagely. The fiber direction gives a slight difference to the increasing capacity and the amount of the increasing capacity given by the fiber direction of $0^{\circ}/90^{\circ}$, 0° , and $\pm 45^{\circ}$ are 13.744%, 11.374%, and 12.322% respectively. Theoretically the fiber direction of $\pm 45^{\circ}$ should gives the highest value, but this is not happen because of de-bounding of the GFRP plate from the surface of the beams.

Keywords; GFRP plates, fiber directions, and reinforced concrete beams.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Bangunan kadang difungsikan tidak sesuai dengan yang direncanakan sehingga beban yang bekerja pada struktur bangunan tersebut dapat melampaui dari yang diperhitungkan sebelumnya. Untuk meningkatkan kemampuan struktur itu, maka kuat nominal penampang harus ditingkatkan dengan cara memperbesar dimensi atau dengan perkuatan eksternal. Khususnya untuk struktur beton, perkuatan eksternal yang paling sering dilakukan, karena sulitnya memperbesar dimensi. Perkuatan dilakukan dengan menempelkan pelat dari material baja atau material lainnya kepermukaan elemen struktur.

Salah satu material tersebut adalah *Advanced Composite Materials* (ACM). ACM adalah material yang terbuat dari *fiber* (serat) material sintesis seperti *glass*, *aramid* atau *carbon* yang disatukan oleh zat matrik, seperti epoksi atau polyester. Keuntungan dari penggunaan ACM adalah karena kemudahan pemasangannya, kuat tariknya yang tinggi, ringan, tahan korosi dan tidak menghantarkan listrik.

Ada berbagai jenis ACM, tergantung pada fiber yang dipakai. Yang umum dikenal ada tiga, yaitu GFRP (*glass fiber reinforced polymer*), AFRP (*aramid fiber reinforced polymer*), dan CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*). GFRP memakai *fiber glass*, AFRP memakai *fiber aramid* dan CFRP memakai *fiber carbon*.

Fiber glass merupakan serat yang saat ini paling banyak dipakai karena harganya yang murah dan lebih mudah didapatkan dipasaran. Kuat tarik fiber glass yang

tinggi membuat GFRP dapat dimanfaatkan sebagai tulangan yang menerima gaya tarik pada elemen struktur.

GFRP dapat dibuat berbentuk batang-an atau pelat. Khusus untuk yang berbentuk pelat, dibuat dari anyaman serat GFRP yang direkatkan lapis per lapis dengan matrik (pengisi) dari bahan epoxy. Karena itu jumlah dan arah dari serat akan berpengaruh terhadap kuat tarik GFRP. Semakin cermat penataannya makin banyak serat yang dapat dimasukkan sehingga semakin besar pula kuat tariknya.

Dari penelitian yang dilakukan oleh Sudiasa (2002) didapatkan bahwa penambahan lapis GFRP dapat meningkatkan kekuatan lentur balok beton bertulang sebesar 10,8%. Selain itu kemampuan menahan beban sampai terjadinya retak pertamanya juga bertambah sebesar 20%. Akan tetapi, peningkatan kemampuan geser dari balok akibat penambahan GFRP itu belum banyak diketahui. Untuk itu dilakukan penelitian pengaruh penambahan lapis GFRP pada balok beton bertulang dalam menahan gaya geser.

Permasalahan

Anyaman serat fiber yang membentuk pelat GFRP dapat dipasang membentuk sudut sesuai dengan yang diinginkan. Sehingga tentunya arah dari serat akan mempengaruhi kekuatan dari balok tersebut. Untuk itu masalah yang akan dibahas disini adalah bagaimana pengaruh penambahan lapis GFRP dengan arah serat 0° , $\pm 45^{\circ}$, $0^{\circ}/90^{\circ}$ pada balok beton bertulang dalam menahan gaya geser.

Tujuan dan Manfaat

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan lapis GFRP dengan arah serat 0°, ±45°, 0°/90° pada balok beton bertulang dalam menahan gaya geser. Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan alternatif untuk memperkuat struktur bangunan beton bertulang didalam menahan geser. Dengan kekuatan geser tersebut, maka diharapkan beban yang bekerja pada struktur dapat ditingkatkan.

MATERI DAN METODA

Arah serat juga mempengaruhi jumlah serat yang dapat diisikan ke dalam matrik. Makin cermat penataannya, makin banyak serat dan penguat dapat dimasukkan. Bila sejajar dan berbentuk kumpulan kontinu (*Roving*) berpeluang sampai 90%, bila saling tegak lurus (*Woven Roving*) peluangnya 75% dan tatanan acak (*Choped Strand Mat*) hanya memberi peluang pengisian 15% sampai 50%. (Feldman dan Hartomo, 1995). Beberapa jenis serat dengan sifat-sifatnya ditunjukkan pada Tabel 1.

Kelangsingan Geser

Suatu balok homogen yang menerima beban merata, arah tegangan-tegangan utama dalam balok tersebut jika dihubungkan akan membentuk suatu trajektori seperti pada Gambar 1. Besarnya tegangan tersebut selain dipengaruhi oleh beban juga oleh kelangsingan geser balok yang dinyatakan sebagai ratio *a/d* dimana *a* adalah bentang geser yaitu jarak antara titik pembebanan ke tumpuan dan *d* adalah tinggi efektif balok. Berdasarkan ratio *a/d* (Wang, 1994), balok dapat dikelompokkan menjadi empat kategori umum, yaitu:

1. Balok tinggi, dengan *a/d* < 1.
2. Balok pendek, dengan 1 < *a/d* < 2,5.
3. Balok menengah, dengan 2,5 < *a/d* < 6.
4. Balok panjang, dengan *a/d* > 6.

Perencanaan Penulangan Geser Menurut SK SNI T-15-1991-03

Persamaan-persamaan menurut SK SNI T-15-1991-03 yang menjadi dasar perencanaan tulangan geser adalah:

$$V_u \leq \Phi V_n \dots\dots\dots(2.1)$$

Atau

$$V_u \leq \Phi (V_c + V_s) \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

- V_u : gaya geser terfaktor (KN)
- V_c : kekuatan geser yang disumbangkan oleh beton (KN)
- V_s : kekuatan geser yang disumbangkan oleh tulangan (KN)
- Φ : faktor reduksi (0,6)
- V_n : kekuatan geser nominal (KN)

Untuk komponen struktur yang menahan geser dan lentur saja, gaya geser yang disumbangkan oleh beton (V_c) dapat dihitung dari:

$$V_c = (1/6 \sqrt{f'_c}) b_w \cdot D \dots\dots\dots(2.3)$$

Untuk gaya geser yang disumbangkan oleh sengkang vertikal (V_s) SK SNI T-15-1991-03 menganggap retak diagonal membentuk sudut 45° terhadap sumbu panjang balok V_s dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

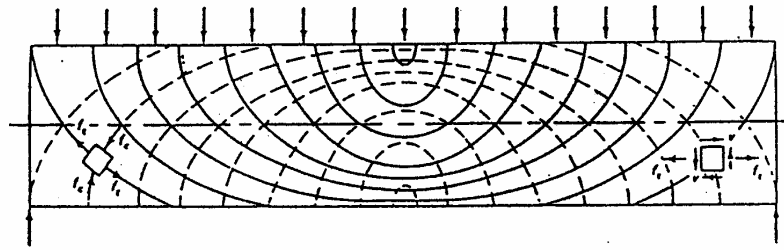
$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

- s* : jarak pusat ke pusat batang tulangan geser ke arah sejajar tulangan pokok penampang (mm)
- f_y : kuat leleh tulangan geser (MPa)

Rancangan Benda Uji

Benda uji dibuat dalam bentuk balok dan silinder. Balok dengan ukuran 10x15x 95 cm sebanyak 12 buah dan silinder dengan diameter 15 cm tinggi 30 cm sebanyak 12 buah. Balok yang digunakan pada penelitian ini didesain menjadi empat type seperti pada Tabel 2. yang setiap typenya memiliki pasangan benda uji silindernya.



Gambar 1. Trajektori tegangan utama balok homogen.
(Garis tak putus = trajektori tarik dan garis putus-putus = trajektori tekan)

Tabel 1. Jenis fiber dan sifat-sifat nya

Fiber type	Diameter (mm)	Specific gravity	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Strain at Failure (%)
Glass					
E (alkali sensitive)	0.01	2.5	72000	3450	4.8
AR (Alkali resistance)	0.013	2.7	80000	2480	3.6
Aramid					
Kevlar 29	0.012	1.44	62000	3620	3.6
Kevlar 49	0.01	1.44	117000	3620	2.5
Carbon					
I (High modulus)	0.008	1.9	380000	1790	0.5-0.7
II (High strength)	0.009	1.9	230000	2620	1-1.5

Tabel 2. Variasi tulangan dan lapis fiber pada balok

Type	Tulangan lentur	Tulangan geser	Arah serat
B11,B12,B13	2 Ø11	Ø4 - 65	tanpa GFRP
B21,B22,B23	2 Ø11	Ø4 - 65	0°/90°
B31,B32,B33	2 Ø11	Ø4 - 65	0°
B41,B42,B43	2 Ø11	Ø4 - 65	±45°

Proporsi campuran beton yang digunakan adalah campuran untuk mendapatkan kuat tekan beton berkisar 20 MPa. Tulangan geser dan lentur direncanakan sedemikian sehingga balok tanpa GFRP akan mengalami runtuh akibat geser (kapasitas lentur > dari geser).

Pengambilan Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini adalah data kuat tekan beton yang diperoleh dari hasil pengujian kuat tekan silinder dan data kuat geser balok yang diperoleh dari hasil pengujian kuat lentur balok beton bertulang.

Pengujian balok dilakukan dengan meletakkan benda uji pada alat uji lentur kemudian diberi dua buah beban terpusat.

Pada bagian bawah balok dipasang alat *Dial Gauge* untuk mengetahui lendutan pada setiap pembebanan. Beban diberikan secara bertahap hingga balok mengalami keruntuhan.

Pembuatan Benda Uji

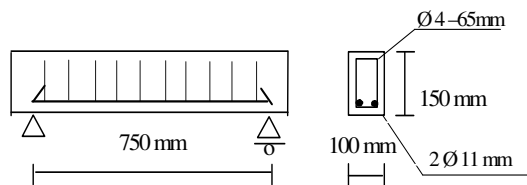
Benda uji balok, dengan ukuran 10x15x95 cm, dibuat dengan menuangkan adukan beton ke dalam cetakan yang berisi tulangan memanjang dan geser seperti pada Gambar 2. Setiap pencetakan sebuah balok dibuat sebuah benda uji berupa silinder beton dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm untuk pengtesan kuat tekan.

Penambahan Lapis GFRP

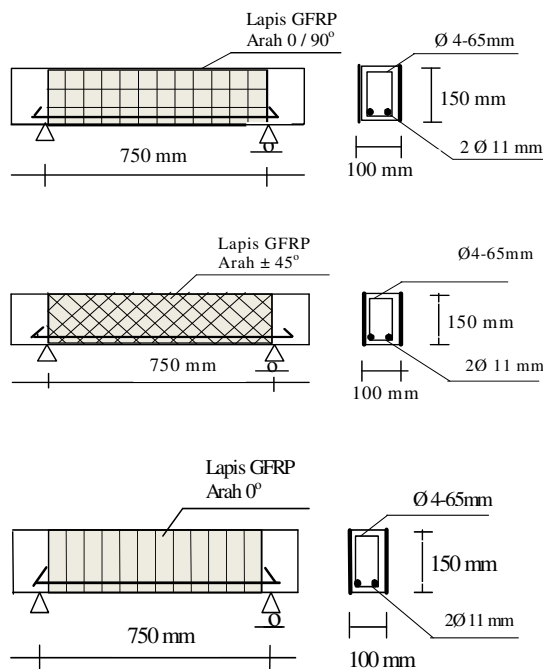
Pelat GFRP dipasang sepanjang permukaan sisi kiri dan kanan dari balok. Penambahan lapis GFRP dilakukan setelah beton berumur 14 hari dengan cara sebagai berikut:

1. Meratakan permukaan beton dengan menggunakan gerinda kemudian membersihkannya dengan menggunakan amplas dan kawat sikat.
2. Mencampur resin epoksi dan *hardener* dengan perbandingan 1:1 kemudian melapisinya pada permukaan beton dengan menggunakan kapi.
3. Memasang serat gelas yang diratakan dengan menggunakan *roller*.
4. Memberikan lapisan penutup resin epoksi untuk melindungi serat gelas kemudian dikeringkan.

Balok yang telah diberi lapisan GFRP ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Balok Kontrol



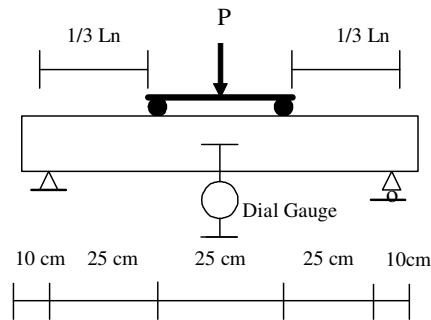
Gambar 3. Balok dengan lapisan GFRP

Pengujian Benda Uji

Pengujian dilakukan setelah beton berumur 28 hari. Alat yang digunakan untuk menguji kuat tekan silinder adalah mesin desak merk Controls buatan Milano-Italy dengan kapasitas 2000 kN, dan untuk menguji kuat lentur balok adalah Matest Sri Bream-bate Sopra 2430 Italy kapasitas 150 kN.

Pengujian Kuat Lentur Balok

Pengujian kuat lentur balok dilakukan dengan menempatkan benda uji balok pada dua tumpuan sederhana dan diberikan dua beban terpusat yang masing masing berjarak 1/3 bentang dari tumpuan seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Model Pengujian Lentur

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari. Setiap sampel dari benda uji silinder ini menyatakan kuat tekan dari balok pasangannya. Hasil kuat tekan yang diperoleh seperti pada Tabel 3 dengan kuat tekan rata-ratanya adalah 24.37 MPa.

Kuat Tarik Baja

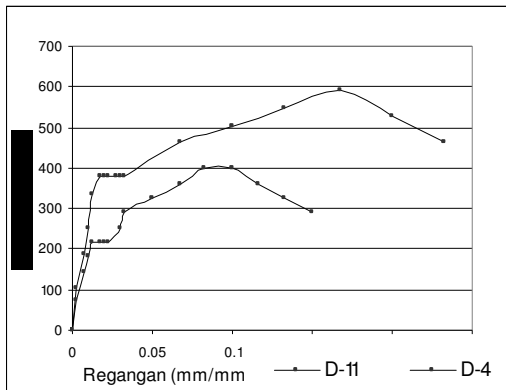
Hasil uji tarik baja tulangan yang dipakai pada balok dinyatakan dalam hubungan tegangan dan regangan dan di plot dalam grafik seperti yang ditampilkan pada Gambar 5.

Dari Gambar 5 dapat dilihat kuat leleh baja (f_y) untuk masing-masing diameter baja tulangan adalah sebagai berikut:

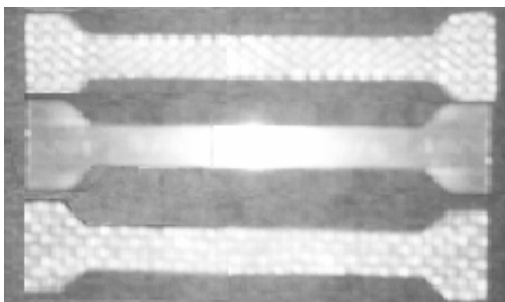
- a. Baja diameter 4 mm : 216.537 MPa
- b. Baja diameter 11 mm : 378.79 Mpa

Kuat Tarik GFRP

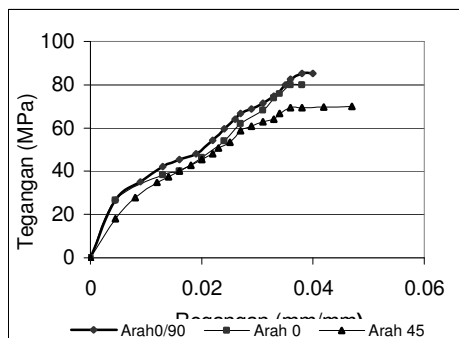
Benda uji tarik adalah pelat GFRP yang dipotong sehingga berbentuk seperti pada Gambar 6.



Gambar 5. Diagram tegangan-regangan baja tulangan



Gambar 6. Foto Benda Uji Tarik GFRP



Gambar 7. Diagram tegangan-regangan GFRP

Hasil pengujian lapis GFRP dibuat dalam bentuk diagram tegangan regangan seperti terlihat pada Gambar 7 dengan tegangan tarik ultimit (f_{tu}) untuk arah $0^\circ/90^\circ$, 0° dan $\pm 45^\circ$ masing-masing sebesar 85,3 MPa, 80,0 MPa, dan 69,9 MPa.

Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa kuat tarik ultimit lapis GFRP dengan arah serat $0^\circ/90^\circ$ lebih besar 22.14% dibanding-

kan dengan kuat tarik lapis GFRP dengan arah serat $\pm 45^\circ$. Sedangkan lapis GFRP dengan arah serat 0° memiliki kekuatan tarik ultimit 14.5% lebih besar jika dibandingkan dengan kuat tarik lapis GFRP arah serat $\pm 45^\circ$. Hal ini menunjukkan bahwa arah serat berpengaruh terhadap kekuatan tarik lapis GFRP. Semakin besar sudut yang dibentuk antara beban dengan serat semakin kecil kekuatan tarik lapis GFRP. Ini disebabkan karena kemampuan tarik serat tidak sepenuhnya dimanfaatkan. Sedangkan besarnya modulus elastisitas lapis GFRP dengan arah serat $0^\circ/90^\circ$ dan 0° didapat sebesar 5926 MPa sedangkan modulus elastisitas lapis GFRP dengan arah serat $\pm 45^\circ$ didapat sebesar 4029 MPa.

Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

Pengujian balok beton bertulang ini dilakukan dengan memberikan dua buah beban terpusat dengan jarak sepertiga bentang seperti yang ditampilkan pada Gambar 4. Beban ditingkatkan secara bertahap dengan peningkatan 2,5 kN sampai balok mengalami keruntuhan. Data yang diambil dalam penelitian ini adalah model keruntuhan balok dan nilai beban dan lendutannya.

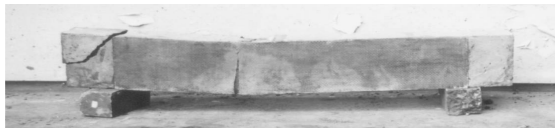
Model Keruntuhan Balok

Ada dua model terjadinya keruntuhan balok yaitu keruntuhan geser tekan dan keruntuhan lentur. Keruntuhan geser dialami oleh balok tanpa GFRP (balok B11, B12 dan B13). 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 daerah perletakan. Kemudian retak merambat lebih jauh ke dalam daerah tekan seiring dengan naiknya beban. Hal inilah yang menyebabkan balok runtuh dan hancurnya beton di sekitar daerah tekan. Model keruntuhan tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.

Keruntuhan lentur dialami oleh semua balok yang diberi lapis GFRP. Keruntuhan lentur diawali dengan munculnya retak miring pada daerah sepertiga bentang sampai daerah perletakan dan retak vertikal pada tengah bentang. Dengan meningkatnya beban luar, retak awal mulai melebar dan merambat menuju sumbu neutral penampang seiring dengan semakin besarnya peningkatan lendutan di tengah bentang. Saat itulah retak pada balok dengan lapis GFRP baru terlihat yang ditandai dengan munculnya warna putih pada lapis GFRP. Warna putih itu akan mengikuti bentuk retak yang terjadi. Retak miring yang terjadi akan berhenti kira-kira pada ketinggian setengah penampang, sedangkan retak vertikal akan terus menjangkar yang diikuti dengan robeknya lapis GFRP (kecuali arah serat $\pm 45^\circ$) sampai balok tersebut runtuh. Model keruntuhan balok ini dapat dilihat pada Gambar 9, 10 dan 11.



Gambar 8. Foto keruntuhan balok tanpa lapis GFRP



Gambar 9. Foto keruntuhan balok lapis GFRP dgn arah serat $0/90^\circ$



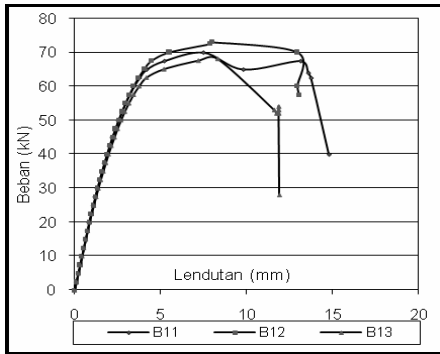
Gambar 10. Foto keruntuhan balok lapis GFRP dgn arah serat 0°



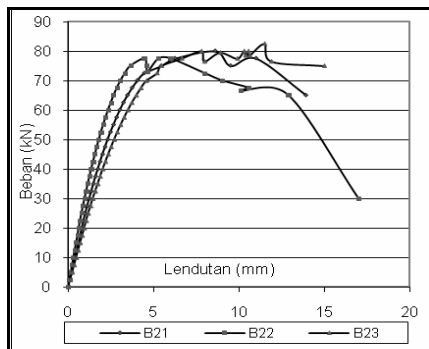
Gambar 11. Foto keruntuhan balok lapis GFRP dgn arah serat $\pm 45^\circ$

Balok tanpa GFRP memberikan bentuk kurva hubungan beban dan lendutan seperti yang terlihat pada Gambar 12. Pada awal pembebanan kurva masih berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Hal ini terjadi sampai beban rata-rata 22.5 kN. Sejalan dengan peningkatan beban, kurva menjadi semakin landai yang terjadi sampai beban rata-rata 70.33 kN. Pada saat baja tulangan mengalami leleh yang ditandai dengan peningkatan lendutan yang besar tanpa diikuti dengan peningkatan beban yang berarti, mengakibatkan kurva semakin mendatar. Balok mengalami keruntuhan pada saat mencapai beban ultimit yang ditandai dengan terbentuknya retak diagonal di sepanjang tinggi balok dari perletakan hingga ke pusat beban. Setelah beban semakin berkurang, sampai balok patah.

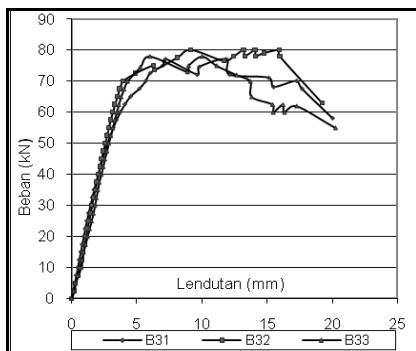
Balok dengan GFRP arah serat $0^\circ/90^\circ$ memberikan bentuk kurva hubungan beban dan lendutan seperti yang terlihat pada Gambar 13. Pada awal pembebanan kurva berbentuk lurus yang menunjukkan bahwa balok masih berperilaku elastis. Sejalan dengan peningkatan beban kurva menjadi semakin landai karena lendutan yang terjadi bertambah besar dan terus meningkat dengan pertambahan beban yang tidak begitu besar. Hal ini terjadi sampai beban rata-rata 80 kN. Pada saat baja tulangan mengalami leleh dan retak yang terjadi semakin lebar, muncul warna putih pada bagian balok yang retak sampai akhirnya GFRP robek sedikit demi sedikit. Setelah itu terjadi penurunan beban sampai pada akhirnya serat tekan beton hancur. Selain itu terjadi pula kegagalan di atas daerah perletakan yaitu pada balok tipe B23 seperti yang terlihat pada Gambar 9.



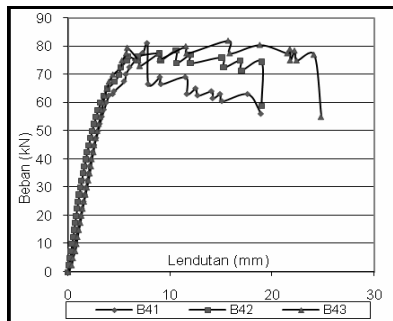
Gambar 12. Grafik beban-lendutan balok tanpa GFRP



Gambar 13. Grafik beban-lendutan balok dengan GFRP arah serat 0°/90°



Gambar 14. Grafik beban-lendutan balok dengan GFRP arah serat 0°



Gambar 15. Grafik beban-lendutan balok dengan GFRP arah serat ±45°

Balok dengan GFRP arah serat 0° memberikan hubungan beban dan lendu-

tan seperti pada Gambar 14. Pada awal pembebanan kurva masih berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis dari balok. Semakin bertambahnya beban, kurva beban-lendutan menjadi semakin landai dari sebelumnya. Hal ini terjadi sampai pada beban rata-rata 78. kN. Setelah itu kurva menjadi semakin datar yang menandakan tulangan leleh. Terlepasnya rekatan di sekitar daerah retak tidak begitu banyak, karena retak yang terjadi searah atau mengikuti arah serat GFRP. Setelah tulangan mengalami leleh beban mulai berkurang sampai pada akhirnya sisi tekan beton hancur.

Balok dengan arah serat ±45° juga memberikan kurva yang linier sampai beban rata-rata 79 kN, setelah itu kurva menjadi semakin landai dari sebelumnya. Selanjutnya kurva terlihat loncat-loncat naik dan turun berulang kali yang disebabkan oleh terlepasnya rekatan GFRP dari balok. Lepasnya rekatan kemudian semakin meluas sampai balok runtuh. Pada balok ini lapis GFRP tidak robek sama sekali. Hal itu disebabkan oleh lebih banyaknya jumlah serat yang berpotongan dengan retak jika dibandingkan dengan lapis GFRP arah 0°/90° dan 0°. Balok ini juga mengalami keruntuhan di atas daerah perletakan selain serat tekan beton yang hancur di tengah bentang.

Beban pada Saat Tulangan Leleh

Beton, baja tulangan dan lapis GFRP mampu bekerja secara bersama-sama untuk memikul beban dari awal pembebanan sampai pada saat tulangan leleh. Hal itu terlihat dari kurva hubungan beban lendutan yang terus menanjak. Tetapi setelah tulangan leleh, kurva hubungan beban lendutan menjadi turun-naik. Grafik hubungan antara beban dan lendutan dari balok tanpa GFRP dan dengan GFRP ditunjukkan pada Gambar 12 s/d 15

Dari hasil pengamatan untuk semua balok dengan pelat GFRP didapat bahwa semua keruntuhan disebabkan oleh terlepasnya rekatan antara beton dengan GFRP dan robeknya pelat GFRP. Tabel 3. me-

nampilkan beban saat tulangan mulai leleh.

Table 3. Beban saat tulangan leleh

Kode Balok	Arah Lapisan	Kuat tekan (MPa)	P _{leleh} (kN)	P _{rata-rata} (kN)
B11	-	22.35	70	
B12	-	23.77	73	70
B13	-	22.63	68	
B21	0°/90°	26.31	80	
B22	0°/90°	20.37	77.5	80
B23	0°/90°	29.42	82.5	
B31	0°	20.93	77	
B32	0°	23.77	80	78
B33	0°	23.77	78	
B41	±45°	29.42	81	
B42	±45°	22.35	76.5	79
B43	±45°	27.44	79.5	

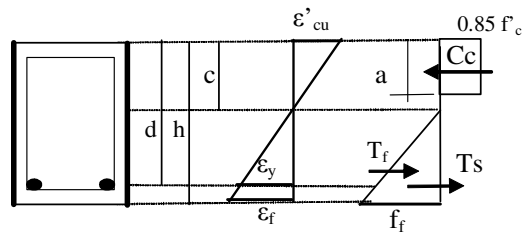
Dari Tabel 3 di atas terlihat bahwa penambahan lapis GFRP pada balok mampu meningkatkan beban saat tulangan leleh jika dibandingkan dengan balok tanpa lapis GFRP rata-rata sebesar 12.48%. Peningkatan beban saat tulangan leleh pada balok dengan lapis GFRP untuk arah serat 0°/90°, 0°, ±45° terhadap balok tanpa lapis untuk masing-masing arah serat rata-rata sebesar 13.7%, 11.4%, 12.3%. Disini terlihat bahwa arah serat tidak banyak memberi pengaruh.

Analisa Balok pada Kondisi Beban Leleh

Asumsi yang digunakan pada analisa balok ini yaitu terjadinya lekatan yang sempurna antara beton dengan lapis GFRP, regangan beton 0.003 dan GFRP masih dalam keadaan elastis. Berikut ditampilkan metoda yang dipakai untuk memprediksi kuat lentur dari balok dengan penambahan lapis GFRP. Kuat lentur dari hasil teoritis dan experiment ditampilkan pada Tabel 4.

Data perhitungan:

Balok; $b = 100\text{mm}$; $h = 150\text{mm}$
 lapis GFRP; $t = 1.25\text{ mm}$; $E_f = 5926\text{ Mpa}$
 tulangan; $A_s = 190.1\text{ mm}^2$ $f_y = 378.8\text{ Mpa}$



Gambar 16. Diagram Tegangan-regangan balok dengan GFRP pada beban leleh

$$\epsilon_f = \frac{(h-c)}{c} \epsilon'_{cu} = \frac{(150-c)}{c} * 0,003$$

$$f_f = E_f * \epsilon_f = 5926 * \frac{(150-c)}{c} * 0,003 = 17,78 * \frac{(150-c)}{c}$$

$$T_s = A_s * f_y = 72010\text{ N}$$

$$C_c = 0,85 f'_c * a * b = 0,85 f'_c * \beta * c * b = 1900c$$

$$T_f = 2 A_f * f_f = 2 * \frac{1}{2} * t * (h-c) * f_f$$

Dari persamaan kesetimbangan gaya :

$$C_c = T_s + T_f$$

$$1900c = 72010 + 1.25(150-c) * 17.78 \frac{(150-c)}{c}$$

$$0 = c^2 - 34.78 c - 266.15$$

Didapat; $c = 32.54\text{ mm}$; $a = 27.66\text{ mm}$

$$f_f = 76.0\text{ Mpa} \quad T_f = 11155\text{ N}$$

$$M_u = T_s * (d-a/2) + T_f * (2/3(h-c) + c - 1/2a)$$

$$= A_s * f_y * (d-a/2) + 5578 * (2/3h - 0.092c)$$

$$= 9447539\text{ Nmm}$$

$$P_u = 6 M_u / L_n$$

$$= 6 * 9447539 / 750$$

$$= 75580\text{ N} = 75.58\text{ kN}$$

Asumsi fiber elastis tidak dipakai jika didapat tegangan fiber melebihi tegangan ultimitnya. Selanjutnya dipakai diagram tegangan yang non elastis, dan analisa dilakukan dengan cara yang sama. Hasil analisa balok yang lain disajikan dalam Tabel 4. yang menunjukkan bahwa P_u dari hasil perhitungan mendekati nilai P_u yang didapat dari hasil pengujian. Dengan berpedoman pada hasil ini maka dapat ditarik kesimpulan bahwa asumsi, teori dan rumus yang dipakai pada perhitungan ini dapat dipergunakan untuk memprediksi

kuat lentur balok yang diperkuat pada bagian samping dengan pelat GFRP.

Tabel 4. Hasil perhitungan analisa balok

Kode Balok	f _c (MPa)	c (mm)	a (mm)	f _{tb} (MPa)	Mu (kNm)	P _{u(analysis)} (kN)	P _{u ex} (kN)
B11	22.35	44.59	37.90	-	7.995	63.96	70.0
B12	23.77	41.92	35.63	-	8.077	64.61	73.0
B13	22.63	44.03	37.43	-	8.012	64.10	68.0
B21	26.31	32.54	27.66	75.98	9.448	75.58	80.0
B22	20.37	40.48	34.40	44.10	8.704	69.63	77.5
B23	29.42	29.65	25.20	85.3	9.852	78.81	82.5
B31	20.93	39.54	33.61	46.78	8.774	70.19	77.0
B32	23.77	35.45	30.13	61.44	9.127	73.02	80.0
B33	23.77	35.45	30.13	61.44	9.127	73.02	78.0
B41	29.42	28.45	24.18	69.9	9.979	79.83	81.0
B42	22.35	36.22	30.79	56.16	9.025	72.20	76.5
B43	27.44	30.22	25.69	69.9	9.703	77.62	79.5

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kuat lentur balok dengan perkuatan dipengaruhi oleh kuat tekan beton dan modulus elastisitas dari GFRP.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil simpulan sebagai berikut:

1. Kuat tarik ultimit lapis GFRP arah serat 0°/90° dan 0° lebih besar 22.14% dan 14.5% dibandingkan dengan kuat tarik lapis GFRP dengan arah serat ±45°.
2. Penambahan lapis GFRP pada balok dapat merubah model keruntuhan dari keruntuhan geser tekan menjadi keruntuhan lentur.
3. Penambahan lapis GFRP pada balok mampu meningkatkan beban saat tulangan leleh jika dibandingkan dengan balok tanpa lapis GFRP rata-rata sebesar 12.48%.
4. Peningkatan beban saat tulangan leleh pada balok dengan lapis GFRP untuk arah serat 0°/90°, 0°, ±45° jika dibandingkan dengan balok tanpa la-

pis masing-masing sebesar 13.744%, 11.374% dan 12.322%.

Saran

Beberapa saran yang dapat disampaikan berdasarkan pada penelitian ini adalah:

1. Pemilihan ketebalan pelat GFRP harus mempertimbangkan kuat rekatannya dengan beton.
2. Perlu dilakukan penelitian mengenai kuat rekatan antara permukaan beton dengan GFRP pada balok yang mengalami lentur.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih yang tak terhingga penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu terselenggaranya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Departemen Pekerjaan Umum, 1991, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung, SK SNI T15-1991-03*, Yayasan Lembaga Pendidikan Masalah Bangunan, Bandung, 174 pp.
- Feldman, D., dan Hartomo, A. J., 1995, *Bahan Polimer Konstruksi Bangunan*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 117 pp.
- 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.
- Sudiasa, I M. A., 2002, *Perilaku Runtuh Balok Beton Bertulang dengan Penambahan Lapis Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)*, Tugas Akhir, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Denpasar.