

BEBAN ULTIMIT BALOK BETON BERTULANG HASIL PERBAIKAN DAN PERKUATAN MENGGUNAKAN FRP

Achmad Zultan Mansur¹⁾, Rudy Djamaluddin²⁾, Herman Parung³⁾, Rita Irmawaty⁴⁾

¹⁾ Mahasiswa Program Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

^{2,3,4)} Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino Km 6, Gowa 92172 Indonesia

email : achmadzultan@email.com

Abstrak

Struktur beton bertulang memiliki potensi sebagai konstruksi yang tahan lama, elastis dan kuat terhadap berbagai beban dan mampu menahan berbagai kondisi lingkungan yang merugikan. Namun, kegagalan dalam struktur masih dominan terjadi akibat korosi pada tulangan sehingga masa layan konstruksi menjadi berkurang. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh penggunaan GFRP dan sika grout 215 bagi kondisi balok spalling. Metode yang dilakukan adalah metode eksperimental yang dilakukan di laboratorium dengan membuat 6 benda uji balok 3,3x0,15x0,2 m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok dengan perkuatan GFRP mampu meningkatkan kapasitas beban maksimum terhadap balok kontrol yaitu sebesar 8.08%. Kondisi beton variasi yang tidak monolith serta kaku sangat mempengaruhi nilai kapasitas balok lentur. Mode kegagalan yang terjadi pada balok GFRP adalah kegagalan lekatan antara beton dan GFRP.

Kata kunci : grouting, GFRP, regangan, lendutan

Abstract

Reinforced concrete structures have the potential as a durable, elastic and strong construction against various loads and are able to withstand various adverse environmental conditions. However, failures in the structure are still dominant due to corrosion of the reinforcement so that the service life of the construction is reduced. This study aims to determine the effect of the use of GFRP and sika grout 215 for the condition of the spalling beam. The method carried out is an experimental method carried out in the laboratory by making 6 test objects of 3.3x0.15x0.2 m beams. The results showed that beams with GFRP reinforcement were able to increase the maximum load capacity for the kontrol beam, which was 8.08%. the condition of concrete that is not monolith as well as rigid greatly affects the value of the capacity of the bending beam. The failure mode that occurs in the GFRP beam is debonding failure.

Keywords: GFRP, grouting, strain, deflection

1. PENDAHULUAN

Penyebab utama dari masalah ketahanan struktur yang lazim ditemui pada beton bertulang yaitu terjadinya korosi pada tulangan yang mengakibatkan menurunnya kekuatan struktur (Jung dkk., 2019). Menurut Zandi (2015), aktivitas korosi pada tulangan akan menekan permukaan beton sekitarnya dengan tegangan yang cukup besar pada cover beton. Retak pada interface antara baja dan beton akan mulai terjadi jika korosi pada tulangan terus dibiarkan (Wang dkk., 2014).. cepat atau lambat retak yang terjadi akan menjalar dan akhirnya sampai ke bagian permukaan beton (Mardani, 2017).

Hal ini tentunya akan berisiko membahayakan bagi pengguna struktur karena dapat menyebabkan penurunan kekuatan dan hancurnya struktur beton bertulang (Wang dkk., 2011). Adanya retak, spalling dan perubahan warna pada beton merupakan indikasi awal kerusakan yang terjadi akibat korosi yang

mengakibatkan penurunan kekuatan dan umur layan bangunan (Sutrisno 2017).

Spalling beton tidak hanya menurunkan kualitas visual bangunan tetapi membuat struktur terlihat tidak terawat (Zhang dkk., 2021). Terlebih jika struktur berada di area yang dapat diakses oleh publik, atau oleh pekerja, maka spalling dapat berbahaya yang bisa menyebabkan puing-puing beton jatuh atau menimbulkan bahaya yang mengancam. Jika dibiarkan maka spalling akan cenderung semakin cepat dan menyebar sehingga pada akhirnya struktur bisa menjadi tidak stabil yang terjadi pada beton maka diperlukan metode perbaikan dan perkuatan yang tepat (Hijriah dkk., 2018).

Salah satu metode perbaikan adalah grouting dan injeksi yang digunakan untuk menutup retak pada beton, sedangkan metode perkuatan yang umum di Indonesia adalah *external prestressing*, membungkus beton eksisting dengan beton tambahan (*Concrete*

Jacketing), dengan baja (*Steel Jacketing*) ataupun membungkus dengan material ringan komposit seperti *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* (Djamiluddin dkk., 2019; Djamiluddin & Irmawaty, 2017).

atau mutu dari beton. Tujuan penelitian untuk mengetahui pengaruh perbaikan pada kondisi spalling dengan sika grout 215 dan perbaikan balok beton bertulang menggunakan GFRP.



Gambar 1. Sketsa benda uji balok beton bertulang dengan perbaikan grouting dan perkuatan GFRP

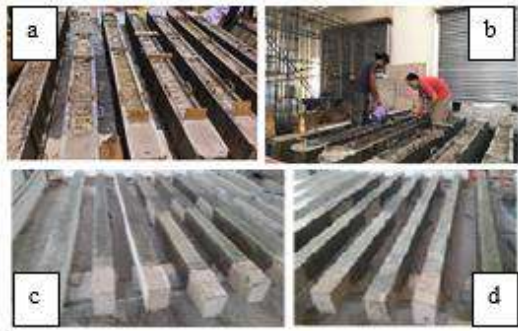
Salah satu metode perbaikan pada kondisi beton dengan tulangan korosi yaitu dengan perlakuan grouting, tujuannya untuk mengisi celah pada struktur beton yang mengalami keretakan sehingga kerusakan pada beton dapat teratasi dan kekuatan beton dapat kembali seperti semula. Semen grouting merupakan beton mutu tinggi yang tidak bersifat korosif dan tidak susut. Setelah dilakukan perbaikan, struktur beton perlu diperkuat menggunakan material *fiber reinforced polymer (FRP)* (Hijriah dkk., 2018; Idris dkk., 2019). Selain rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, daya tahan di lingkungan yang dapat membahayakan serta kekuatan kelelahan struktur yang tinggi, lembaran FRP dapat dengan mudah mengikat atau menguatkan secara eksternal terhadap lempengan beton bertulang, balok, dan kolom (Machmud dkk., 2019; Tata dkk., 2018).

Metode terbaru dari penelitian sebelumnya yaitu penelitian ini memodelkan kondisi beton bertulang yang mengalami korosi pada tulangan sehingga menyebabkan spalling kemudian dilakukan perbaikan menggunakan grouting dan tahap akhir dilakukan perkuatan struktur dengan menggunakan GFRP. Sebelum melakukan pengujian kuat lentur pada balok beton bertulang maka dilakukan terlebih dahulu pengujian sifat mekanis pada material yang digunakan agar dapat mempresentasikan kualitas

2. METODOLOGI

Pengujian bersifat experimental yang dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Struktur Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Obyek utama penelitian adalah struktur balok beton bertulang normal yang diasumsikan mengalami korosi pada tulangan sehingga dilakukan perbaikan dengan grouting dan perkuatan menggunakan GFRP.

Pada Gambar 1 menunjukkan benda uji balok beton tulangan sistem perbaikan grouting dan sistem perkuatan FRP menggunakan tulangan polos diameter 8 mm untuk sengkang serta tulangan longitudinal atas menggunakan tulangan polos 2Ø8 mm dan tulangan longitudinal bawah menggunakan tulangan 3Ø8 mm dengan kuat tekan beton rencana sebesar $f'c$ 20 MPa dan lebar GFRP selebar sisi bawah balok. Dimensi benda uji 150 x 200 x 3300 mm dengan mutu beton $f'c$ 20 MPa, dan pengujian balok dilakukan dengan instrumen standar umum pengujian balok. Untuk perbaikan beton yang mengalami spalling digunakan produk Sika Grout 215 @25Kg sedangkan untuk perkuatan GFRP yang digunakan merupakan produk dari Fyfe Company, yaitu Tyfo® The Fiberwrap Composite System SEH-51A.



Gambar 2. Pembuatan benda uji balok beton bertulang

- a. Pengecoran benda uji balok beton bertulang; b. Perbaikan balok dalam kondisi spalling dengan sika grout 215; c. Perbaikan dan perkuatan dengan pemasangan GFRP Sheet pada balok beton bertulang; d. Perbaikan dan perkuatan dengan pemasangan GFRP Sheet dan U Wrap pada balok beton bertulang.

Gambar 2 memperlihatkan hasil pengecoran balok uji dan telah dilakukan perbaikan dan perkuatan menggunakan GFRP. Ada 2 macam variasi benda uji yang dibuat pada penelitian ini dan setiap variasinya terdiri atas 3 buah benda uji yaitu balok normal sebanyak 3 buah dan balok variasi 3 buah. Balok normal sebagai balok kontrol diberikan penamaan dengan simbol BK1, BK2 dan BK2. Sedangkan balok variasi merupakan balok yang dilakukan perbaikan *grouting* pada bagian bawah serta diperkuat GFRP sheet pada keseluruhan sisi bawah juga GFRP U-Wrap sepanjang batang balok bertulang yang disimbolkan dengan BGRSF1, BGRSF2 dan BGRSF3.

Pengecoran dilakukan dari dasar balok uji dan dihentikan dengan menyisahkan 50 mm dari permukaan dasar bekisting (selimut beton) sehingga pada tampak atas besi tulangan terekspose jelas. Besi tulangan dibiarkan terekspos sampai dipastikan telah mengalami korosi kemudian pada umur 14 hari dilakukan perbaikan pada balok menggunakan sika grout 215 sampai permukaan balok tertutup dengan rapi sesuai dimensi tinggi yang direncanakan 20 cm. pada umur balok yang telah dilakukan perbaikan 28 hari kemudian diberikan perkuatan GFRP sheet pada sisi bawah dan sepanjang balok uji.

Pada Gambar 3 memperlihatkan posisi perletakan benda uji balok beton bertulang yaitu sendi-rol dengan sistem pembebanan dilakukan dengan sistim two point load dengan jarak antar titik pembebanan 600 mm dan sejauh 1200 mm dari masing-masing tumpuan. Pengujian Balok beton bertulang dilakukan dengan pembebanan yang bersifat statik dengan kecepatan ramp actuator konstan sebesar 0,1 mm/s sampai balok runtuh. Data yang diamati pada saat pengujian

adalah beban maksimum, kapasitas lentur balok, regangan, lendutan, dan mode kegagalan balok GFRP.



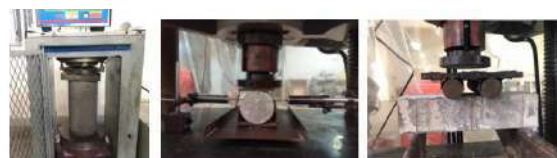
Gambar 3. Set-up benda uji balok bertulang

Pada saat pengujian dilakukan pemasangan LVDT pada bagian bawah benda uji untuk mengetahui lendutan yang terjadi pada saat balok diuji, pengukuran beban dapat dilihat pada bagian *Load Cell* dan penggunaan alat strain gauge untuk pengukuran regangan baja, beton dan GFRP. Instrument LVDT, Load Cell dan strain gauge dihubungkan dengan data logger untuk merekam data ke dalam komputer.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengujian material penyusun

Penulisan Hasil pengujian kuat tarik untuk tulangan polos 8 mm menunjukkan tegangan leleh rata-rata adalah 375.93 Mpa. Sehingga dengan modulus elastisitas $E_s = 200.000$ Mpa, maka didapatkan nilai regangan leleh rata-rata adalah 1880μ . Untuk pegujian tulangan ulir 13 mm diperoleh tegangan leleh rata-rata adalah 316.02 Mpa, sehingga nilai regangan leleh rata-rata adalah 1580μ . Berdasarkan data hasil uji tarik sifat mekanis baja tulangan dapat dilihat bahwa hasil pengujian memenuhi syarat pada SNI 2052:2017 sehingga dapat dikelompokkan tulangan tipe $\varnothing 8$ termasuk jenis baja polos BjTP 280 sedangkan tulangan tipe D13 termasuk jenis baja ulir BjTS 280.



a) Uji kuat tekan b) uji kuat tarik belah c) uji kuat lentur

Gambar 4. Pengujian sifat mekanis beton

Gambar 4 menunjukkan Pengujian sifat mekanis beton untuk uji tekan berbentuk silinder

dengan dimensi 15x30 cm sebanyak tiga buah dengan hasil pengujian kuat tekan rata-rata pada sampel umur 28 hari adalah 21,82 MPa. Hasil ini sesuai dengan target kuat tekan desain yaitu 20 MPa. Hasil uji kuat tekan rata-rata diumur 28 hari untuk benda uji Sikagrouting 215 adalah 33,52 MPa atau setara dengan kuat tekan 341,8 kg/cm². Prosedur pengujian kuat tarik belah mengacu pada SNI 2491:2014 dengan menggunakan sampel silinder ukuran 15x30 cm menunjukkan hasil pengujian kuat tarik belah dari rata-rata benda uji adalah 1,93 MPa. Sampel pengujian berupa balok dimensi 10x10x40 cm yang diberi pembebanan pada dua titik mengacu pada SNI 4431:2011. Hasil uji kuat lentur dari rata-rata benda uji adalah 4,06 MPa.

3.2. Pengujian UPV beton silinder

Pada Gambar 5 hasil pengujian UPV terhadap 6 sampel benda uji silinder, didapatkan nilai rata-rata cepat rambat gelombang antara 4076 m/s sampai dengan 4127 m/s, menunjukkan bahwa range nilai menggambarkan kualitas beton tergolong bagus.



Gambar 5. Pengujian UPV beton silinder

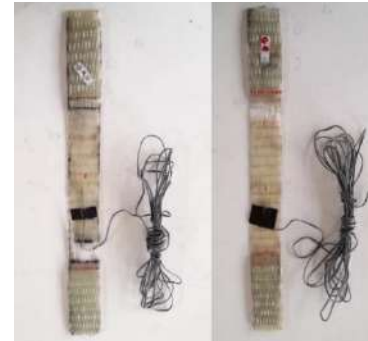
Dari hasil pengujian UPV didapatkan nilai cepat rambat gelombang yang meningkat seiring dengan semakin tinggi mutu benda uji. Hal ini sesuai dengan hipotesa awal bahwa semakin tinggi mutu beton, maka cepat rambat yang dihasilkan akan semakin bagus juga.

3.3. Pengujian Tarik (*Tensile Test*) GFRP

Gambar 6 menunjukkan hasil pengujian tarik material GFRP berdasarkan panduan ASTM D638 pada Gambar 6 dibuat menjadi 2 specimen dengan dimensi lebar 4 cm, tebal 0,14 cm dan panjang 18 cm.

Dari hasil pengujian kedua sampel menggunakan strain gauge didapatkan tegangan tertinggi yaitu 166,24 N/mm² dengan beban 4,604 kN dan nilai regangan terbesar 20.500 µε. Nilai 166,24 N/mm² merupakan Tegangan ultimit yaitu kemampuan GFRP untuk menahan beban maksimum yang dapat dipikulnya. Dimana saat titik ini tercapai, deformasi benda sudah mencapai puncaknya (tinggal menunggu saat untuk putus / runtuh saja), tidak ada kenaikan

tegangan yang berarti tapi deformasi (regangan) yang terjadi terus bertambah, ini ditunjukkan dengan garis kurva yang turun setelah titik batas tercapai, sehingga sampai suatu titik dimana deformasi (regangan) sudah mencapai putus (runtuhnya).



Gambar 6. Specimen uji tarik GFRP

3.4. Pengujian Balok beton bertulang

3.4.1 Kapasitas Beban Maksimum

Pengujian benda uji balok beton bertulang ditampilkan pada Tabel 1. Secara umum struktur balok beton yang diberikan perkuatan dengan GFRP-S akan mengalami peningkatan beban maksimum terhadap balok tanpa perkuatan.

Tabel 1.

Hasil pengujian beban ultimit

Benda uji	Kode	Beban Maksimum (kN)	Beban Maksimum Rata-Rata (kN)	Persentase Kenaikan (%)
Balok Kontrol	BK01	28,12	29,74	-
	BK02	30,45		
	BK03	30,65		
Balok Variasi	BGRS F1	33,85	32,14	8,08%
	BGRS F2	31,19		
	BGRS F3	31,39		
	BGRS F3	31,39		

Benda uji balok variasi BGRSF merupakan asumsi pemodelan dari kondisi balok yang mengalami *spalling* akibat korosi, sehingga dari kondisi balok normal menjadi balok variasi dianggap mengalami penurunan kinerja tulangan tarik sebesar 62% dengan perhitungan besi ulir D13 balok kontrol menurun menjadi tulangan polos φ8 mm.

Dari Tabel 1 dapat disimpulkan bahwa dengan adanya perbaikan pada balok menggunakan sika grout 215 mampu mengembalikan dimensi benda uji dan perkuatan yang dilakukan sepanjang bentang balok dapat ditingkatkan kemampuan kapasitas balok dalam menahan beban ultimit. Pada saat peningkatan

beban yang signifikan terjadi dan tulangan balok meleleh, balok masih mampu menahan beban selama GFRP masih melekat pada beton.

Meningkatnya kapasitas balok kontrol dari nilai beban maksimum sebesar 29,74 kN menjadi 32,14 kN untuk beban maksimum rata-rata balok variasi. Terjadinya peningkatan kapasitas beban ultimit pada benda uji balok variasi terhadap balok kontrol yaitu sebesar 8,08 %, hal ini membuktikan perkuatan dengan GFRP memiliki kemampuan untuk menahan beban lentur dan akan bekerja secara optimal pada balok dengan kondisi plastis.

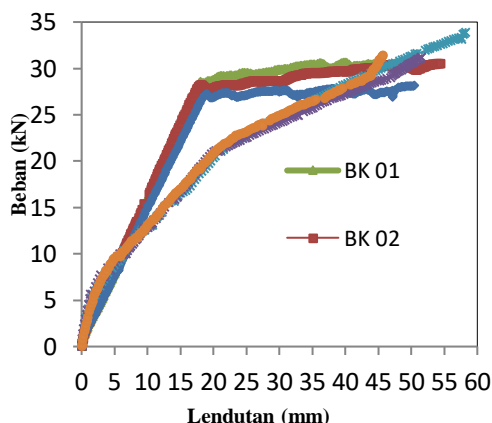
3.4.2 Hubungan Beban dan Lentutan

Untuk mengetahui besarnya lentutan (defleksi) yang terjadi pada benda uji balok maka digunakan alat LVDT sebanyak 3 buah yang dihubungkan ke komputer (data logger), dengan posisi LVDT dibentangkan pada daerah lapangan balok. Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran Besar lentutan dan beban maksimum pada masing-masing balok uji dengan menggunakan LVDT.

Tabel 2.

Hubungan beban dan lentutan

Benda Uji	Kode	Beban Maksimum (kN)	Lentutan Maksimum (mm)
Balok Kontrol	BK01	28,12	51,86
	BK02	30,45	54,38
	BK03	30,65	49,74
Balok Variasi	BGRSF1	33,85	92,42
	BGRSF2	28,98	46,62
	BGRSF3	31,39	43,78



Gambar 7. Hubungan beban dan lentutan pada tengah bentang balok

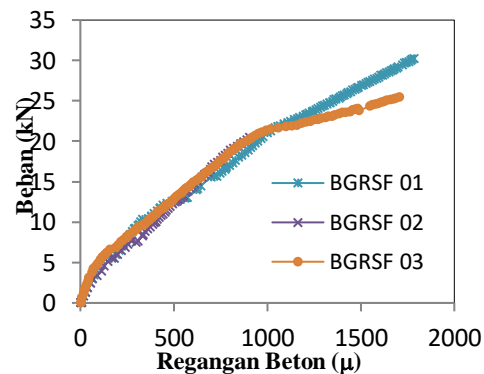
Gambar 7 memperlihatkan perbedaan kekuatan antara benda uji Balok variasi (BGRSF1, BGRSF 2 dan BGRSF2) terhadap balok kontrol (BK1, BK2 dan BK3).

Balok kontrol memiliki nilai lentutan yang cenderung lebih besar dibandingkan dengan balok variasi selain itu balok kontrol memiliki sifat struktur lebih daktail dibandingkan dengan balok yang telah diperkuat dengan GFRP.

3.4.3 Hubungan Beban dan Regangan

Untuk pembacaan besarnya regangan pada beton maka digunakan pembacaan dari strain gauge beton yang dilekatkan pada tulangan benda uji dengan ditengah bentang. Gambar 8 menunjukkan hubungan beban dan regangan beton.. Terlihat pada gambar 8 regangan tulangan melampaui nilai 2100×10^6 pada setiap benda uji yang mengindikasikan bahwa tulangan telah leleh. Terlihat secara jelas peningkatan nilai beban diikuti dengan peningkatan nilai regangan, baik untuk regangan beton maupun regangan GFRP. Nilai regangan tekan beton untuk kondisi beban ultimit pada BK01, BK01 dan BK01 berturut-turut sebesar sekitar 1501.9μ , 1578.95μ , dan 3039.05μ sedangkan untuk balok BGRSF01, BGRSF02 dan BGRSF03 sebesar 2173.33μ , 2438.1μ dan 2483.81μ .

Pada gambar 9 menunjukkan grafik hubungan antara beban dan regangan GFRP. Dari grafik terlihat bahwa balok BGA1, BGA2 dan BGA3 menghasilkan regangan rata-rata GFRP pada saat benda uji hancur masing-masing adalah sebesar $668,9 \mu\epsilon$, $869,3 \mu\epsilon$ dan $870,7 \mu\epsilon$. Hal ini menunjukkan bahwa balok hancur sebelum GFRP mencapai regangan putus sebesar 20000μ .



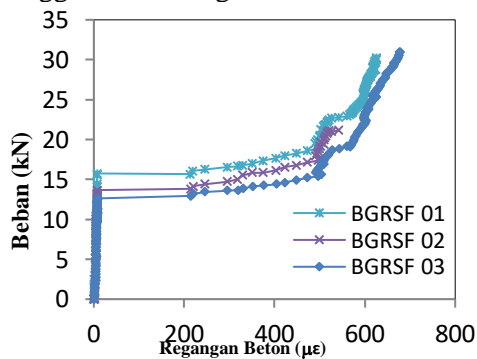
Gambar 8. Hubungan beban dan regangan beton

Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan standar ACI 440.2R-08 diperkirakan bahwa debonding akan terjadi pada saat regangan GFRP mencapai $11.200 \mu\epsilon$. Namun, dari hasil penelitian ditemukan bahwa debonding terjadi pada saat regangan GFRP mencapai $660 \mu\epsilon$ hingga $1417 \mu\epsilon$. Hal ini

menunjukkan bahwa GFRP mengalami debonding sebelum mencapai regangan putus.

3.4.4 Mode dan Mekanisme Keruntuhan Balok GFRP

Debonding *failure* yaitu pola keruntuhan yang terjadi pada balok beton yang dilakukan perkuatan GFRP dengan kondisi lepasnya ikatan antara pada permukaan pelat GFRP dengan beton. Pengamatan pola keruntuhan terhadap balok uji dapat dilihat pada Gambar 10, 11 dan 12, mengalami mode kegagalan *debonding failure*. Sifat kaku pada benda uji yang tertutupi seluruh bagian permukaan dan bawah balok dengan GFRP sangat mempengaruhi karakteristik balok diantara lain mudahnya terjadi patah didaerah lentur. Kapasitas balok variasi dalam menerima beban selain dipengaruhi dengan perkuatan GFRP juga dipengaruhi dengan kualitas beton yang telah mengalami penurunan kinerja sehingga telah dilakukan perbaikan menggunakan sika grout 215.

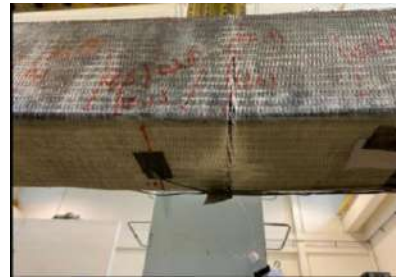


Gambar 9. Hubungan beban dan regangan GFRP



Gambar 10. Mode kegagalan BGRSF 01

Sifat balok yang tidak monolit sehingga membentuk sambungan diantara kedua material akan mengakibatkan terjadinya retak horizontal sebelum kembali diteruskan secara vertikal menuju beton normal. Kegagalan debonding akan mengancam balok yang tidak monolit dengan pelepasan ikatan antara lekatan antara beton normal dan mortar grouting



Gambar 11 Mode kegagalan BGRSF 02



Gambar 12. Mode kegagalan BGRSF 03

Keadaan leleh terjadi pada saat beban mencapai 25.32 kN. Sementara untuk kegagalan lentur terjadi pada saat beban maksimum rata-rata yaitu 32.14 kN. Balok BGRSF mengalami kegagalan tekan *under-reinforced* terlihat dengan terjadinya leleh sebelum beton mencapai beban maksimum. GFRP memiliki mutu yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton dan baja tulangan akan berdampak kegagalan dimana baja tulangan dan beton akan meleleh terlebih dahulu. Karena beton dan baja tulangan telah meleleh terlebih dahulu, maka reaksi komposit antara permukaan beton dengan GFRP berkurang sehingga GFRP terlepas dari beton.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

- Terjadi peningkatan kapasitas beban ultimit pada balok GFRP (BGRSF01, BGRSF02, dan BGRSF03) terhadap balok normal yaitu sebesar 8.08%.
- Balok BGRSF merupakan balok yang dibuat dengan konsep perbaikan dengan reduksi masa layan hingga 62% dan bersifat kaku akibat perkuatan GFRP.
- Hasil mode kegagalan yang terjadi pada benda uji BGRSF adalah kegagalan lekatan antara beton dengan GFRP (*debonding failure*).

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Diucapkan terima kasih kepada LPDP dan PUSLABDIK yang telah memberikan bantuan dana penelitian Program Doktor (S3), sehingga dapat digunakan untuk membiayai penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kepada PT. Fyfe Fiberwrap Indonesia atas penyediaan material lembar GFRP and epoxy.

DAFTAR PUSTAKA

- International Atomic Energy Agency, Vienna. (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Training Course Series No. 17.
- ASTM, D 638. Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, United States: ASTM International Standard
- Djamaluddin, R., Hijriah, Irmawati, R., Fachrudin, & Wahyuningsih, R. T. (2019). Delamination mechanism of GFRP sheet bonded on the reinforced concrete beams. *MATEC Web of Conferences*, 258, 03009. <https://doi.org/10.1051/matecc>
- Djamaluddin, R., & Irmawaty, R. (2017). Relationship Model of the Moment Capacity of GFRP Sheet Strengthened RC Beams to the Duration of Sea Water Exposure. *Procedia Engineering*, 180, 1195–1202. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.280>
- Hijriah, Parung, H., Djamaluddin, R., & Irmawaty, R. (2018). Delaminasi Lembar Gfrp Pada Balok Beton Bertulang. *Jurnal Ilmiah Ecosystem*, 18(3), 1271–1276. <https://journal.unibos.ac.id/eco/article/view/777>
- Idris, M., Parung, H., & Djamaluddin, R. (2019). Flexural Behavior Of Shear-Cracked Reinforced Concrete Beam Strengthened With GFRP Sheet. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 10(10), 64–72.
- Jung, J. S., Lee, B. Y., & Lee, K. S. (2019). Experimental Study on the Structural Performance Degradation of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams. *Advances in Civil Engineering*, 2019(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2019/9562574>
- Jansson, R. (2008). Material properties related to fire spalling of concrete. In *Div of Building Materials LTH, Lund university*.
- Machmud, H., Tjaronge, M. W., & Djamaluddin, R. (2019). The Capacity of Reinforced Concrete Beams Post Rebars Yielded with FRP Sheet Strengthening. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(9), 232–241. <http://www.iaeme.com/ijciet/issues.asp>
- Mardani, A. H. (2017). *Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Besi Yang Terkorosi (Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams With Corroded Steel Bars)*. Hasanuddin.
- Sutrisno, W. (2017). *Model Prediksi Retak Pada Beton Bertulang Akibat Korosi Tidak Seragam Karena Infiltrasi Klorida Dengan Mempertimbangkan Siklus Basah Dan Kering*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tata, A., Raffel, A. F., Ihsan, M., & Djamaluddin, R. (2018). *Fatigue Flexural Behavior Rc Beams Strengthened Using Gfrp-Sheet After Seawater Immersion*. *I(Icst)*, 349–355. <https://doi.org/10.2991/icst-18.2018.74>
- Wang, B. S., Zhao, R. W., Zhao, Y. F., & Liu, J. N. (2011). Test study on strengthening RC flexural members with grouting material. *2011 International Conference on Electrical and Kontrol Engineering, ICECE 2011 - Proceedings*, 5540–5544.
- Wang, L., Zhang, X., Zhang, J., Ma, Y., Xiang, Y., & Liu, Y. (2014). Effect of insufficient grouting and strand corrosion on flexural behavior of PC beams. *Construction and Building Materials*, 53, 213–224. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMA.2013.11.06>
- Zhang, X., Zhang, Y., Liu, B., Liu, B., Wu, W., & Yang, caiqian. (2021). Corrosion-induced spalling of concrete cover and its effects on shear strength of RC beams. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105538. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105538>
- Zandi, K. (2015). Corrosion-induced cover spalling and anchorage capacity. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(12), 1547–1564. <https://doi.org/10.1080/15732479.2014.979836>