

EFEK PERKUATAN GLASS FIBER REINFORCE POLYMER-SHEET PADA BALOK BETON BERTULANG DENGAN TULANGAN KOROSI

Ridwan AR¹⁾, Mufti Amir Sultan²⁾, Abdul Gaus³⁾

¹⁾Program Studi Magister Teknik Sipil, Program Pascasarjana, Universitas Khairun

^{2, 3)}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Khairun

Email: ridwanar1305@gmail.com¹⁾, muftiasltn@unkhair.ac.id²⁾, gaussmuhammad@gmail.com³⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v12i1.694>

(Received: January 2022 / Revised: February 2022 / Accepted: February 2022)

Abstrak

Artikel ini menyajikan tentang balok beton bertulang yang tulangnya telah korosi kemudian diberi perkuatan eksternal berupa serat glass tipe lembaran atau *Glass Fiber reinforced Polymer-Sheet* (GFRP-S). Pada studi ini variabel berdasarkan variasi tingkat korosi pada tulangan. Lima macam benda uji yang digunakan berbentuk balok dengan dimensi 15x20 cm panjang 160 cm. Tulangan utama yang digunakan besi $\phi 12$ dan tulangan sengkang $\phi 8-100$. Mutu beton digunakan 25 MPa. Balok beton bertulangan normal tanpa perkuatan sebagai balok kontrol (BN), balok beton bertulangan normal dengan perkuatan GFRP-S (BP), balok beton bertulangan korosi dengan perkuatan GFRP-S (BPK), variasi waktu pengkorosian tulangan selama 2 minggu (BPK₂), 4 minggu (BPK₄) dan 6 minggu (BPK₆) dengan metode perendaman pada larutan asam sulfat 2,0%. Balok diperkuat GFRP-S pada daerah Tarik di bagian bawah balok. Pengujian lentur dengan *twopoint load*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP-S mempunyai kapasitas lebih besar dibandingkan dengan balok normal sebesar 12,07%. Balok beton bertulang dengan tulangan tingkat korosi lebih besar (pengkorosian 6 minggu) cenderung menurunkan kapasitas balok namun kapasitasnya masih lebih besar dari balok normal sebesar 1,38%.

Kata kunci: *balok beton, tulangan korosi, asam sulfat, GFRP-S*

Abstract

This article presents about reinforced concrete beams whose reinforcement has been corroded and then externally reinforced in the form of sheet type glass fiber or Glass Fiber Reinforced Polymer-Sheet (GFRP-S). In this study, the variables are based on variations in the level of corrosion on the reinforcement. Five kinds of test objects used in the form of blocks with dimensions of 15x20 cm and length of 160 cm. The main reinforcement used is $\phi 12$ and $\phi 8-100$ stirrup reinforcement. The quality of the concrete used is 25 MPa. Normal reinforced concrete beams without reinforcement as control beams (BN), normal reinforced concrete beams with GFRP-S reinforcement (BP), corrosion reinforced concrete beams with GFRP-S reinforcement (BPK), variations in reinforcement corrosion time for 2 weeks (BPK₂), 4 weeks (BPK₄) and 6 weeks (BPK₆) by immersion method in 2.0% sulfuric acid solution. The beam is reinforced with GFRP-S in the Tensile region at the bottom of the beam. Flexural test with two point load. The results showed that reinforced concrete beams reinforced with GFRP-S had a larger capacity than normal beams by 12.70%. Reinforced concrete beams with reinforcement with a higher corrosion rate (6 weeks corrosion) tend to reduce the capacity of the beam but its capacity is still larger than normal beams by 1.38%.

Keywords: *concrete beam, corrosion reinforcement, sulfuric acid, GFRP-S*

1. Latar Belakang

Beton bertulang adalah komponen struktur bangunan yang populer digunakan. Besi tulangan tertanam di dalam beton sedemikian rupa sehingga kedua bahan menahan gaya yang diberikan. Kuat tekan beton dan kuat tarik baja membentuk ikatan yang kuat untuk menahan tegangan-tegangan ini dalam rentang waktu yang lama sesuai umur layanan struktur bangunan. Penggunaan struktur beton bertulang pada berbagai jenis konstruksi tidak terkecuali pada lingkungan yang ekstrim seperti pada daerah pantai atau bahkan dalam laut, pada lingkungan asam, konstruksi pada daerah ini akan berdampak pada kapasitas struktur (Sultan, Djamaluddin, *et al.*, 2015; Sultan, Parung, M. W. Tjaronge, *et al.*, 2015; Sultan, Parung, W. Tjaronge, *et al.*, 2015).

Struktur beton bertulang yang tidak dilindungi atau dekat dengan laut mungkin dipengaruhi oleh korosi, jika tidak ada tindakan pemeliharaan dan pencegahan sehingga dapat menyebabkan keruntuhan (Sultan and Djamaluddin, 2019).

Tulangan korosi merupakan salah satu penyebab utama kerusakan struktur dan mekanisme degradasi yang paling dominan pada struktur beton bertulang. Hal ini biasanya terkait dengan fenomena karbonasi atau penetrasi klorida, yang umumnya menginduksi pada bagian struktur. Korosi baja pada beton menyebabkan kerusakan pada elemen beton bertulang, karena hilangnya area baja dan pembentukan produk korosi ekspansif.

Ketika korosi tulangan berkembang secara signifikan, produk korosif berkembang terus menerus dan menghasilkan tekanan internal pada beton di sekitar batang baja. Proses korosi tulangan yang terus menerus tidak hanya berdampak pada kemampuan layan struktur dengan retak, atau bahkan pengelupasan penutup beton, tetapi juga berdampak serius pada keselamatan struktur dengan menurunkan daya dukung beban. Selain itu, efek fisik korosi antara lain hilangnya luas baja, hilangnya kekuatan ikatan antara tulangan baja dan beton, dan berkurangnya kekuatan beton akibat keretakan.

Salah satu teknik perbaikan elemen-elemen struktur berupa perkuatan diperlukan apabila terjadi degradasi bahan yang berakibat tidak terpenuhi lagi persyaratan-persyaratan yang bersifat teknik yaitu: kekakuan (*stiffnes*), kekuatan (*strength*), stabilitas (*stability*) dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan (*durability*) (Jamal, Bale, Akbar and Haqiqi, 2015).

Penggunaan GFRP-S sebagai perkuatan pada elemen struktur adalah inovasi perkuatan dengan menggunakan material komposit. Jenis material ini banyak digunakan sebagai perkuatan eksternal tambahan pada struktur karena sifatnya setelah dipasang pada struktur beton mampu menghilangkan kekurangan beton yang getas menjadi struktur yang daktail (Mahalingam, Rao and Kannan, 2013; Nurlina *et al.*, 2016; Sultan and Djamaluddin, 2018). Material GFRP-S terbuat dari serat polymer yang tidak dapat terkorosi.

Penggunaan FRP sebagai perkuatan pada balok beton bertulang telah diklarifikasi melalui eksperimen dan hasilnya bahwa penggunaan material FRP baik AFRP, CFRP dan GFRP mampu meningkatkan kapasitas balok tersebut (Kumar, 2016; Lakshmi, 2016) (Parikh and Patel, 2016; Rao and Husain, 2016; Sallal and Rajan, 2016; Syofyan, 2016).

Penelitian ini bertujuan untuk mengklarifikasi efek perkuatan GFRP-S pada balok beton bertulang dimana tulangan yang digunakan telah terkorosi.

2. Metode Penelitian

2.1 Proses pengkorosian tulangan

Pada penelitian ini tulangan baja dikorosikan dengan larutan asam sulfat H_2SO_4 konsentrasi 2,0%. Metode pengkorosian dilakukan dengan cara perendaman cairan asam sulfat H_2SO_4 . Proses pengkorosian ini dilakukan dalam jangka waktu selama 2, 4 dan 6 minggu.

Larutan asam sulfat yang digunakan untuk mengkorosikan tulangan dalam penelitian ini yaitu larutan asam sulfat pekat dengan konsentrasi asam 96%, dan dalam penelitian ini larutan asam sulfat pekat dilarutkan dengan air menjadi konsentrasi 2,0% (Sultan, Imran and Faujan, 2021). Pengenceran asam sulfat konsentrasi 2% dihitung dengan persamaan:

$$V_1 M_1 = V_2 M_2 \quad (1)$$

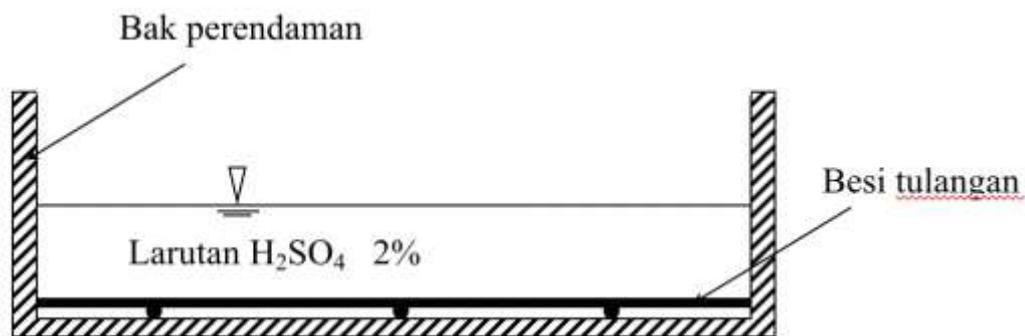
Keterangan

V_1 = volume asam sulfat yang dibutuhkan

V_2 = volume air yang dipakai

M_1 = molaritas asam sulfat pekat

M_2 = molaritas asam sulfat 2,0%



Gambar 1 Proses pengkorosian besi tulangan dengan perendaman asam sulfat 2,0%

Tahapan penyiapan sampel tulangan:

- Timbang besi tulangan
- Uji tarik besi tulangan
- Pembuatan larutan asam sulfat 2,0%
- Proses pengkorosian besi tulangan dengan perendaman dalam cairan asam sulfat 2,0% selama 2 minggu, 4 minggu dan 6 minggu seperti ditunjukkan pada Gambar 1.
- Timbang besi tulangan korosi
- Uji tarik besi tulangan korosi

Analisis data digunakan dengan *metode weight loss* atau kehilangan berat untuk mengetahui laju korosi (Sultan *et al.*, 2020). Prinsip dari metode ini adalah dengan menghitung banyaknya material yang hilang atau kehilangan berat setelah dilakukan proses pengkorosian menggunakan larutan asam sulfat 2,0%. Perhitungan tingkat kehilangan berat dari besi beton (*Percentage of Loss/PL*) diukur dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$PL = \frac{\text{berat tulangan awal} - \text{berat tulangan akhir}}{\text{berat tulangan awal}} \times 100\% \quad (2)$$

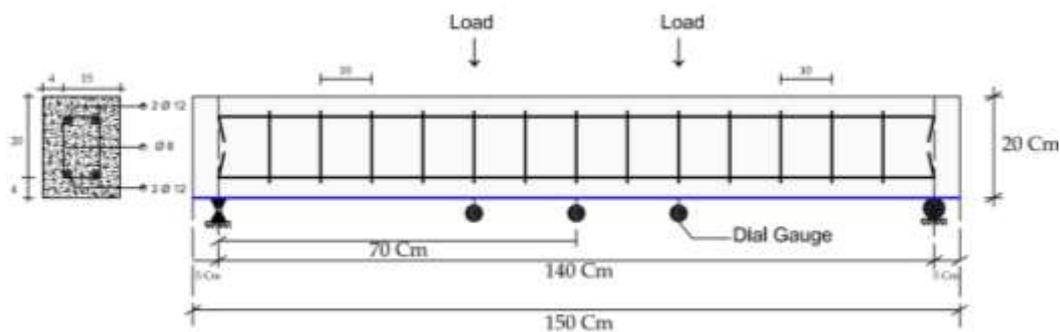
2.2 Benda uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian berbentuk balok dengan dimensi 15x20 cm panjang 150 cm, menggunakan tulangan lentur diameter 12 dan tulangan geser berdiameter 8, mutu beton 25 MPa.

Jumlah benda uji sebanyak 12 balok, 3 buah balok menggunakan tulangan tidak korosi tanpa perkuatan GFRP-S yang disimbolkan BN. Tiga buah balok menggunakan tulangan tidak korosi dengan perkuatan GFRP-S pada bagian bawah balok yang disimbolkan BP. Masing-masing 3 buah balok perkuatan GFRP-S menggunakan tulangan terkorosi dengan variasi proses korosi 2 minggu (BPK₂), 4 minggu (BPK₄), dan 6 minggu (BPK₆). Detail benda uji seperti ditunjukkan pada gambar 2 dan tabel 1.

Tabel 1 Variasi benda uji

Benda uji	Waktu pengkorosian (minggu)	Jumlah benda uji (buah)	Keterangan
BN	0	3	Balok tulangan normal tanpa perkuatan
BP	0	3	Balok tulangan normal dengan perkuatan GFRP-S
BPK ₂	2	3	Balok tulangan korosi 2 minggu dengan perkuatan GFRP-S
BPK ₄	4	3	Balok tulangan korosi 4 minggu dengan perkuatan GFRP-S
BPK ₆	6	3	Balok tulangan korosi 6 minggu dengan perkuatan GFRP-S



Gambar 2 Detail benda uji

Pemasangan GFRP-S pada balok setelah curing selama 28 hari. Proses pemasangan GFRP-S menggunakan metode *wet lay-up* (Sultan and Djamaluddin, 2017). Metode pemasangan ini dengan cara mengolesi *epoxy* pada GFRP-S selanjutnya ditempel pada bagian balok yang diperkuat, di mana sebelumnya permukaan balok telah dibersihkan dan dihaluskan menggunakan gurinda serta menutup pori-pori pada beton

GFRP-S yang digunakan dalam penelitian adalah satu lapis dengan tipe SEH51. Adapun sifat-sifat dari GFRP-S dan *epoxy* seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2 Spesifikasi GFRP-S tipe SEH51

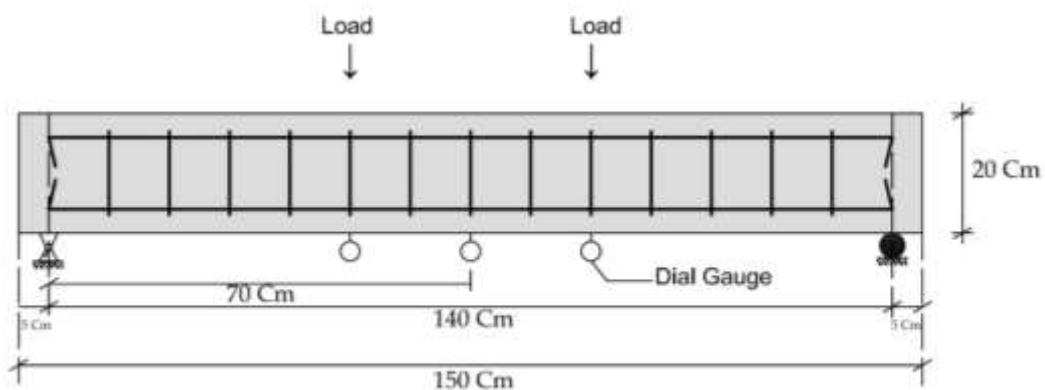
Properties	Nilai Tes
Tegangan Tarik ultimit dalam arah utama fiber	575 MPa
Regangan	2,2%
Modulus tarik	26,1 GPa
Tegangan tarik ultimit 90° dari arah utama fiber	25,8 MPa
Tebal lapisan	1,3 mm

Tabel 3 Sifat material *epoxy*

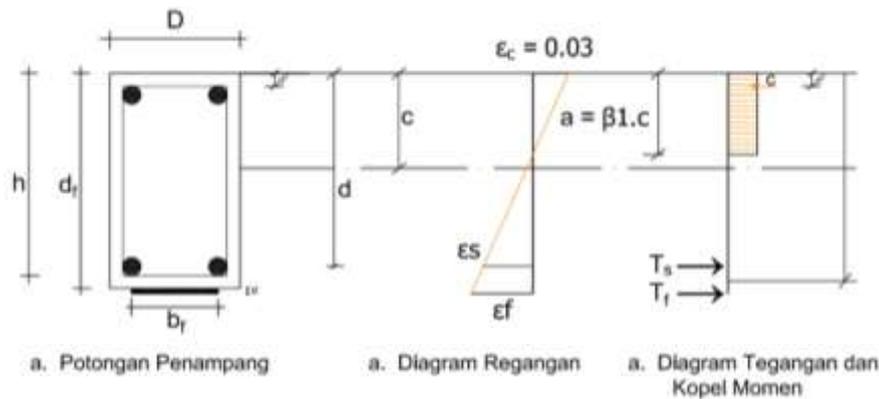
Sifat material	Nilai Tes
Kekuatan tarik	72,4 MPa
Regangan	5,0%
Modulus tarik	3,18 GPa
Kekuatan lentur	123,4 MPa
Modulus lentur	3,12 GPa

2.3 Setup Pengujian

Balok uji diletakkan di atas perletakan sederhana dengan sistem pembebanan *two point load*. Dial *gauge* dipasang pada tengah bentang untuk mengukur besar lendutan yang terjadi. Balok dibebani sampai mencapai kekuatan batas atau beban pada manometer tidak mengalami peningkatan. *Setup* pengujian balok seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 3 *Setup* pengujian balok

Balok yang diperkuat dengan GFRP-S dalam proses analisisnya berbeda dengan balok tanpa perkuatan GFRP-S. GFRP-S sebagai perkuatan umumnya diletakkan pada bagian bawah balok yang merupakan bagian tarik balok beton bertulang. Pemasangan GFRP-S pada bagian bawah balok akan menyebabkan bertambahnya gaya tarik pada balok seperti pada gambar 4.



Gambar 4 Diagram tegangan regangan balok dengan perkuatan GFRP

Resultan gaya tarik akan bertambah dengan adanya GFRP yang akan berpengaruh terhadap kuat lentur dari balok beton bertulang tersebut. Penambahan perkuatan GFRP pada bagian bawah atau bagian Tarik di sepanjang balok akan meningkatkan kuat lentur balok tersebut (ACI 544.4R, 2018).

$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \tag{1}$$

$$T_s = A_s \cdot f_{ys} \tag{2}$$

$$T_f = A_f \cdot f_{yf} \tag{3}$$

Syarat keseimbangan gaya-gaya dalam penampang balok dengan perkuatan GFRP-S:

$$C = T \tag{4}$$

$$C = T_s + T_f \tag{5}$$

$$0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b = A_s \cdot f_{ys} + A_f \cdot f_{yf} \tag{6}$$

$$a = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b}{A_s \cdot f_{ys} + A_f \cdot f_{yf}} \tag{7}$$

Sehingga akan menghasilkan momen sebesar:

$$Mn = A_s \cdot f_{ys} + A_f \cdot f_{yf} \cdot jd \tag{8}$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perubahan visual baja tulangan

Hasil pengkorosian tulangan dengan asam sulfat H₂SO₄ 2% menyebabkan perubahan tulangan baja secara fisik seperti pada gambar 5. Tulangan baja yang terkorosi mengalami perubahan secara visual, di mana tulangan baja berwarna lebih kecoklatan.



a. Tulangan belum terkorosi



b. Tulangan terkorosi

Gambar 5 Korosi permukaan baja tulangan

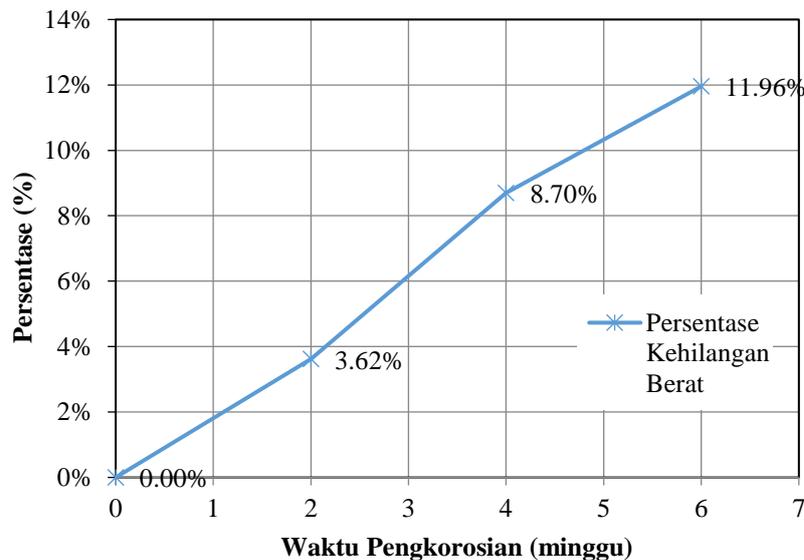
3.2 Kehilangan berat tulangan baja

Tulangan baja yang telah terkorosi H_2SO_4 2,0% selama 2, 4 dan 6 minggu kemudian dibersihkan dan ditimbang. Penimbangan tulangan baja bertujuan untuk mengetahui kehilangan berat dari tulangan baja yang terkorosi selama 2, 4 dan 6 minggu terhadap tulangan baja yang tidak terkorosi (normal). Hasil penimbangan tulangan baja yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Rata-rata hasil penimbangan berat tulangan baja

Tulangan	Waktu pengkorosian (minggu)	Berat tulangan awal (kg)	Berat tulangan akhir (kg)	Selisih (kg)	% kehilangan berat	Laju korosi (%/hari)
TN	0	1,150	1,150	-	-	-
TK ₂	2	1,150	1,108	0,042	3,62	0,0026
TK ₄	4	1,150	1,050	0,100	8,72	0,0031
TK ₆	6	1,150	1,013	0,138	11,96	0,0028

Dari tabel 2 dapat dilihat tingkat laju korosi pada tulangan yang korosi dipercepat dengan metode perendaman dalam larutan asam H_2SO_4 2,0%, memperlihatkan bahwa semakin lama tulangan direndam akan meningkatkan % kehilangan berat, laju korosi cenderung berfluktuasi sesuai lama perendaman

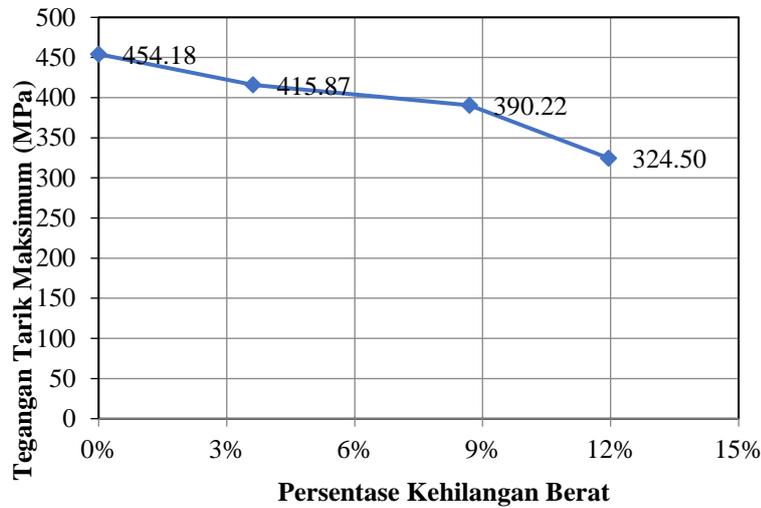


Gambar 6 Persentase kehilangan berat tulangan lentur

Berdasarkan hasil penimbangan tulangan yang mengalami penurunan berat pada tabel 2 dan gambar 6. Persentase rata-rata kehilangan berat tulangan lentur balok yang didapatkan pada tulangan 2 minggu korosi, tulangan 4 minggu korosi, tulangan 6 minggu korosi yaitu 3,62%; 8,70%; dan 11,96%. Kehilangan berat yang semakin meningkat dari tulangan baja disebabkan oleh terkelupasnya permukaan yang dialami tulangan baja. Semakin lama tulangan baja terkorosi semakin banyak permukaan tulangan baja yang terkelupas akibat korosi yang menyebabkan kehilangan berat pada tulangan baja

3.3 Hubungan tegangan tarik tulangan baja dan kehilangan berat

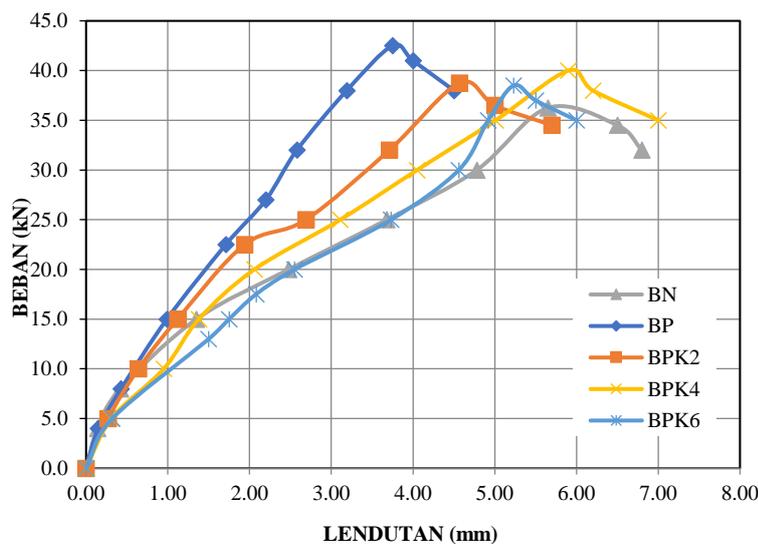
Pengujian tarik tulangan baja dilakukan untuk mengetahui penurunan mutu dari kuat tarik tulangan ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7 Hubungan kuat tarik terhadap persentase reduksi berat tulangan baja

3.4 Hubungan beban dan lendutan balok

Dari grafik hubungan beban – lendutan yang diperoleh dari gambar 8 dapat disimpulkan terdapat korelasi yang seimbang antara penurunan dan beban yang diberikan yaitu seiring dengan berkurangnya nilai tekan pada balok defleksi yang dialami balok juga semakin berkurang. Dari grafik dapat dilihat bahwasanya balok beton bertulang yang tulangnya terkorosi akan mengalami penurunan yang besar seiring dengan penambahan beban pada balok. Ini dikarenakan kuat tarik dari tulangan yang terkorosi telah berkurang dibandingkan dengan kekuatan tulangan pada balok normal, namun kemampuan balok yang diberi perkuatan GFRP-S dalam menerima beban masih lebih tinggi dibandingkan dengan balok normal.



Gambar 8 Hubungan beban-lendutan seluruh variasi benda uji

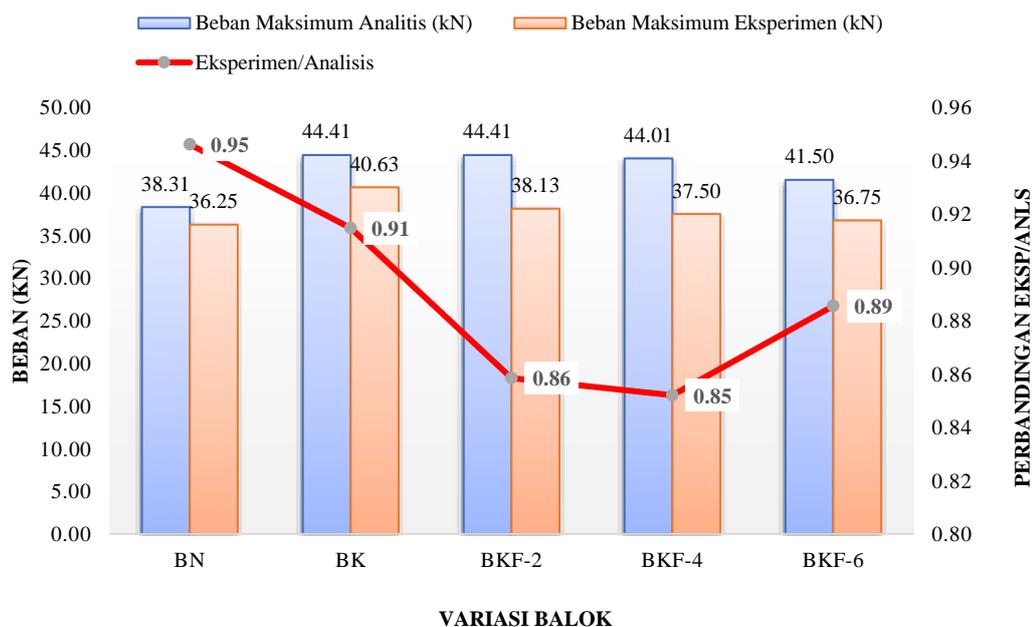
Dari grafik hubungan beban – lendutan yang diperoleh dari gambar 8 dapat disimpulkan terdapat korelasi yang setimbang antara penurunan dan beban yang diberikan yaitu seiring dengan berkurangnya nilai tekan pada balok defleksi yang dialami balok juga semakin berkurang. Dari grafik dapat dilihat bahwasanya balok beton bertulang yang tulangnya terkorosi akan mengalami penurunan yang besar seiring dengan penambahan beban pada balok. Ini dikarenakan kuat tarik dari tulangan yang terkorosi telah berkurang dibandingkan dengan kekuatan tulangan pada balok normal, namun kemampuan balok yang diberi perkuatan GFRP-S dalam menerima beban masih lebih tinggi dibandingkan dengan balok normal.

3.5 Kapasitas Lentur Balok

Kapasitas lentur balok secara analitis dihitung dengan menggunakan persamaan tegangan blok ekuivalen. Kapasitas lentur eksperimen dihitung dengan persamaan $M_u = 0,2016 + 0,3375P$, dimana P adalah beban maksimum pada saat pengujian di laboratorium, rekapitulasi kapasitas balok dapat dilihat pada Tabel 3.

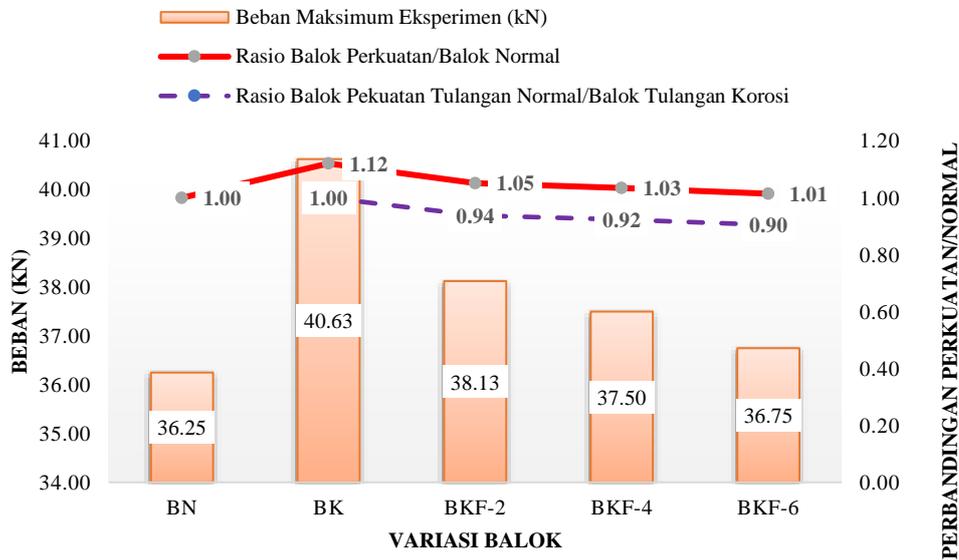
Tabel 3 Rekapitulasi kapasitas balok

Kode balok	BN	BP	BPK ₂	BPK ₄	BPK ₆
Jenis balok	tanpa perkuatan		perkuatan GFRP-S		
Jenis tulangan	tanpa korosi		korosi		
Waktu korosi (minggu)	-	-	2	4	6
Beban maksimum analitis (kN)	38,31	44,41	44,41	44,01	41,50
Beban maksimum eksperimen (kN)	36,25	40,63	38,13	37,50	36,75
Lentur maksimum analitis (kN.m)	13,11	15,33	15,33	15,05	14,20
Lentur maksimum eksperimen (kN.m)	12,44	13,91	13,07	12,86	12,6
$M_{eksperimen}/M_{analitis}$	0,95	0,91	0,85	0,85	0,89



Gambar 9 Perbandingan kapasitas balok eksperimen dan analisis

Dari tabel 3 dan gambar 9 rasio perbandingan kapasitas balok eksperimental dengan analitis untuk balok tulangan normal, balok tulangan normal dengan perkuatan dan balok perkuatan dengan tulangan terkorosi 2 minggu, 4 minggu dan 6 minggu masing-masing adalah 0,95; 0,91; 0,86; 0,85 dan 0,89.



Gambar 10 Perbandingan kapasitas balok hasil eksperimen

Gambar 10 memperlihatkan rasio perbandingan balok normal dengan perkuatan GFRP-S dan balok dengan perkuatan GFRP-S menggunakan tulangan terkorosi 2 minggu, 4 minggu dan 6 minggu. Balok normal yang diberi perkuatan akan meningkatkan kapasitas sebesar 12,07%. Balok perkuatan dengan tulangan terkorosi selama 2 minggu, 4 minggu dan 6 minggu mempunyai peningkatan kapasitas 5,17%; 3,45% dan 1,38% dibandingkan dengan balok normal. Ini mengindikasikan bahwa penggunaan GFRP-S sebagai perkuatan dapat meningkatkan kapasitas balok dibandingkan dengan balok normal atau balok tanpa perkuatan.

Rasio perbandingan balok perkuatan GFRP-S dengan tulangan tidak korosi dengan balok perkuatan GFRP-S dengan tulangan terkorosi 2 minggu, 4 minggu dan 6 minggu terhadap balok perkuatan GFRP-S dengan tulangan normal mengalami penurunan. Persentase penurunan kapasitas balok perkuatan dengan tulangan terkorosi 2 minggu, 4 minggu dan 6 minggu terhadap balok perkuatan tulangan normal masing-masing adalah 6,15%, 7,69% dan 9,54%. Ini memperlihatkan bahwa tulangan yang telah terkorosi dapat menurunkan kapasitas balok dalam menerima beban lentur, karena tulangan yang telah terkorosi tegangan leleh dari baja tersebut menurun. Pada penelitian ini penurunan kapasitas balok perkuatan mengalami penurunan <10% karena masih ada gaya tarik yang disumbangkan oleh GFRP-S sebagai perkuatan.

3.6 Pola Retak

Pola retak yang terdapat pada pengujian balok ini adalah retak lentur. Retak lentur adalah retak yang terjadi pada bagian tengah bentang. Retak lentur biasanya terjadi karena beban melebihi kemampuan balok. Penambahan retak untuk setiap

peningkatan beban tidak selalu merupakan kelanjutan dari retak sebelumnya. Peningkatan beban dapat menimbulkan retak baru di tempat lain, tetapi ada juga yang memperlebar atau memperpanjang retak sebelumnya. Hasil pengujian lentur pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 11; gambar 12; gambar 13; gambar 14; gambar 15.



Gambar 11 Pola retak pada balok tulangan normal



Gambar 12 Pola retak pada balok perkuatan GFRP-S tulangan normal



Gambar 13 Pola retak pada balok perkuatan GFRP-S tulangan korosi 2 minggu



Gambar 14 Pola retak pada balok perkuatan GFRP-S tulangan korosi 4 minggu



Gambar 15 Pola retak pada balok perkuatan GFRP-S tulangan korosi 6 minggu

Pada gambar 11; 12; 13; 14; dan 15, dapat dilihat bahwa pola retak yang terjadi hampir sama yaitu retak lentur sesuai dengan perencanaan awal. Pada pengujian yang dilakukan, retak-retak yang terjadi pada benda uji umumnya diawali retak halus pada sisi bawah bagian tengah bentang penampang lalu semakin panjang dan lebar pula retakan yang terjadi. Retak Lentur terjadi di daerah yang mempunyai nilai momen lentur maksimum, yaitu pada daerah tengah bentang penampang tepatnya di daerah dua titik pendistribusian beban diberikan.

Pada gambar 11s.d 15 dapat dilihat bahwa umumnya jumlah retak yang terjadi cenderung semakin banyak seiring dengan tingkat korosi pada tulangan balok, dimana pada balok normal (BN) jumlah retak sebanyak 3 buah dengan Panjang maksimal 17 cm. Pada balok dengan perkuatan (BP) jumlah retak sebanyak 4 buah dengan panjang 15 cm. Pada balok perkuatan dengan tulangan korosi 2 minggu (BPK₂) retak lentur sebanyak 4 buah dengan anjang 14 cm, balok perkuatan dengan tulangan korosi 2 minggu (BPK₂) retak lentur sebanyak 4 buah dengan Panjang 14 cm, balok perkuatan dengan tulangan korosi 4 minggu (BPK₄) retak lentur sebanyak 4 buah dengan Panjang 14 cm dan balok perkuatan dengan tulangan korosi 6 minggu (BPK₆) retak lentur sebanyak 6 buah dengan Panjang 16 cm,

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Korosi pada tulangan dapat mempengaruhi tegangan tarik maksimum tulangan baja, semakin banyak penurunan berat tulangan yang disebabkan korosi pada tulangan baja maka mutu tulangan baja semakin rendah. Penurunan tegangan pada baja akan menurunkan kapasitas balok dalam menahan lentur. Dengan perkuatan GFRP-S pada balok beton bertulang dapat meningkatkan kapasitas balok sebesar 12,07% dibandingkan dengan balok normal. Balok perkuatan dengan tulangan terkorosi selama 2 minggu, 4 minggu dan 6 minggu mempunyai peningkatan kapasitas 5,17%; 3,45% dan 1,38% dibandingkan dengan balok normal. Ini mengindikasikan bahwa penggunaan GFRP-S sebagai perkuatan dapat meningkatkan kapasitas balok dibandingkan dengan balok normal atau balok tanpa perkuatan.

4.2 Saran

Disarankan untuk melakukan penelitian dengan pengkorosian tulangan yang lebih lama, serta meneliti daya lekat tulangan terhadap beton sehingga dapat diketahui kontribus GFRP-S pada kasus seperti ini.

Daftar Kepustakaan

- ACI 544.4R, 2018. ACI 544.4R-18 Guide for Design with Fiber-Reinforced Concrete, American Concrete Institute, pp. 1–33.
- Jamal, A. U., Bale, Akbar, H. and Haqiqi, I., 2015. Perilaku Lentur Perbaikan Balok Beton Bertulang Dengan Variasi Lebar Carbon Fibre Reinforced Polymer, Jurnal Teknisia, XX, pp. 154–162.

- Kumar, M., 2016. Structural Rehabilitation, Retrofitting and Strengthening of Reinforced Concrete Structures, *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 10(1), pp. 37–41.
- Lakshmi, T. I., 2016. Reinforced Concrete Beams With Glass Fibre Reinforced Polymer Stirrups, in *International Conference on Current Research in Engineering Science and Technology (ICCREST-2016)*, pp. 28–34.
- Mahalingam, M., Rao, R. P. N. and Kannan, S., 2013. Ductility behavior fiber reinforced concrete beams strengthened with externally bonded glass fiber reinforced polymer laminates, *American Journal of Applied Sciences*, 10(1), pp. 107–111. doi: 10.3844/ajassp.2013.107.111.
- Nurlina, S. *et al.*, 2016. Perbandingan Daktilitas Balok Beton Bertulang Dengan Menggunakan Perkuatan CFRP Dan GFRP, *Rekayasa Sipil*, 10(1), pp. 62–69.
- Parikh, K. B. and Patel, N. S., 2016. Review on Analytical Study on Strengthening of Beam by FRP, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5(1), pp. 11–14.
- Rao, P. S. and Husain, M. M., 2016. Prediction analysis on mechanical properties of hygrothermal ageing GFRP composite laminates, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 23(4), pp. 288–296.
- Sallal, A. K. and Rajan, A., 2016. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthening with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) at Different Sides, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(5), pp. 1837–1843. doi: 10.21275/v5i5.18051602.
- Sultan, M. A., Parung, H., Tjaronge, W., *et al.*, 2015. Effect of Marine Environment to the Concrete Beams Strengthened Using GFRP Sheet, *International Journal of Engineering and Technology*, 7(1), pp. 21–24. doi: 10.7763/ijet.2015.v7.759.
- Sultan, M. A., Parung, H., Tjaronge, M. W., *et al.*, 2015. Effect Of Sea Water To The Flexural Behaviour Of RC Beam Strengthened GFRP-S, *Proceedings MICCE*, pp. 225–230.
- Sultan, M. A., Djamaluddin, R., *et al.*, 2015. Flexural Capacity of Concrete Beams Strengthened Using GFRP Sheet After Seawater Immersion, *Procedia Engineering*, 125, pp. 644–649. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.092.
- Sultan, M. A. *et al.*, 2020. Penggunaan Ekstrak Tembakau Sebagai Inhibitor Pada Beton Bertulang Menggunakan Pasir Laut dan Air Laut, *Teras Jurnal*, 10(1), pp. 17–26.
- Sultan, M. A. and Djamaluddin, R., 2017. Pengaruh Rendaman Air Laut terhadap Kapasitas Rekat GFRP-Sheet pada Balok Beton Bertulang, in *Jurnal Teknik Sipil*, pp. 31–43. doi: 10.5614/jts.2017.24.1.5.
- Sultan, M. A. and Djamaluddin, R., 2018. Daktilitas Dan Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan GFRP-S, *Konferensi Nasional Teknik Sipil 12, (September)*, pp. 18–19. Available at: https://www.researchgate.net/publication/344462867_DAKTALITAS_DAN_KAPASITAS_LENTUR_BALOK_BETON_BERTULANG_DENGAN_PERKUATAN_GFRP-S.

- Sultan, M. A. and Djamaluddin, R., 2019. Model Hubungan Kapasitas Rekatan Balok Beton Bertulangyang Diperkuat GFRP-S Terhadap Lama Perendaman Air Laut, *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(1), pp. 19–26.
- Sultan, M. A., Imran, I. and Faujan, M., 2021. Pengaruh Rendaman Asam Terhadap Kuat Tekan Beton Dengan Penambahan Fly Ash, *Teras Jurnal*, 11(1), p. 61. doi: 10.29103/tj.v11i1.367.
- Syofyan, E. R., 2016. Perbaikan Struktur Bangunan Pasca Gempa dengan Menggunakan Serat Karbon (Studi Kasus Gedung Kantor Bea dan Cukai Teluk Bayur Padang), *Poli Rekayasa*, 11(April), pp. 32–41.

Copyright (c) Ridwan AR, Mufti Amir Sultan, Abdul Gaus